

# 港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第 5 卷 9 号

Vol. 5 No. 9

(通巻第 31 号)

港湾における鋼材防食法の研究 (第 1 報)

セメント硬化体による防食法 ..... 善 一 章

1966年6月

運輸省港湾技術研究所

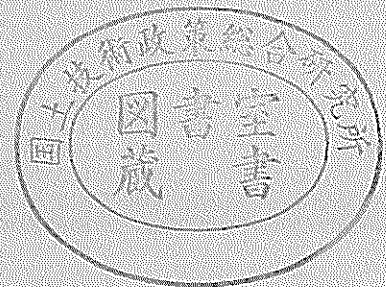
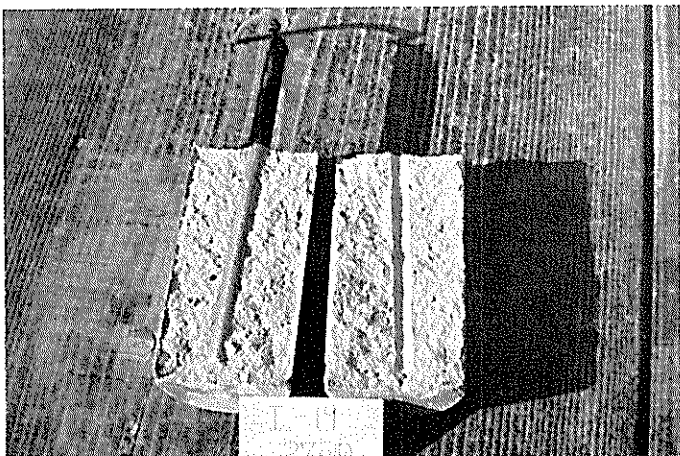
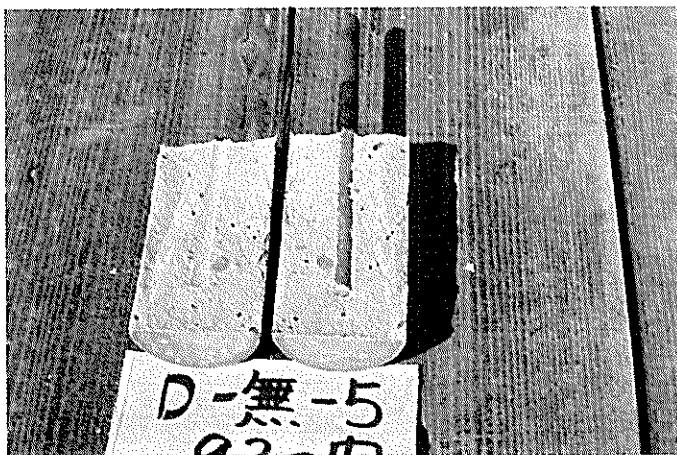


図 25 D-13 の破壊後 →



← 図 28 I-19 の破壊後

図 31 F-10 の破断面 →

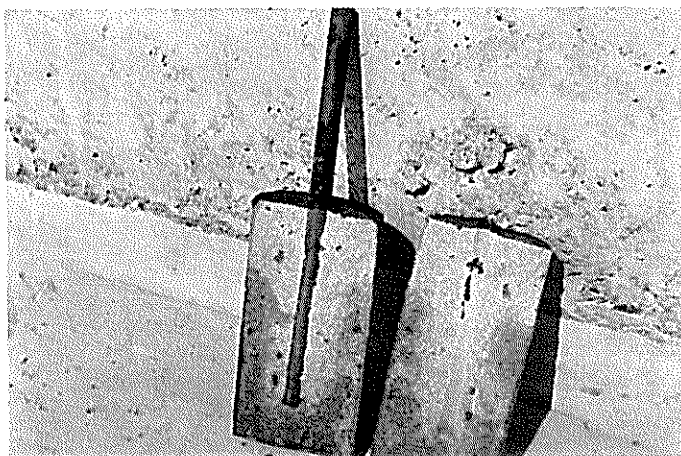
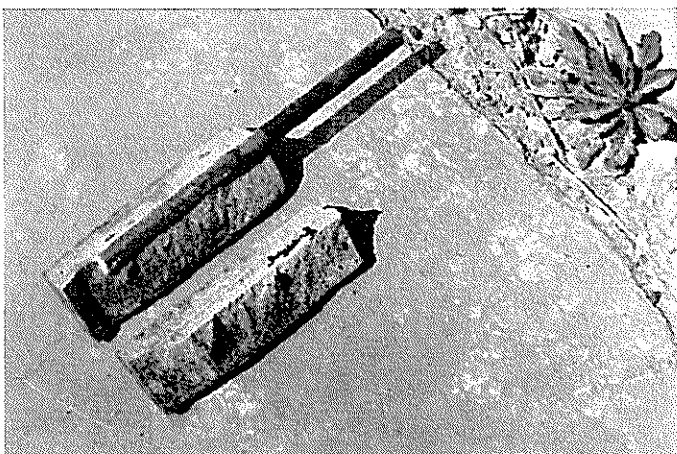
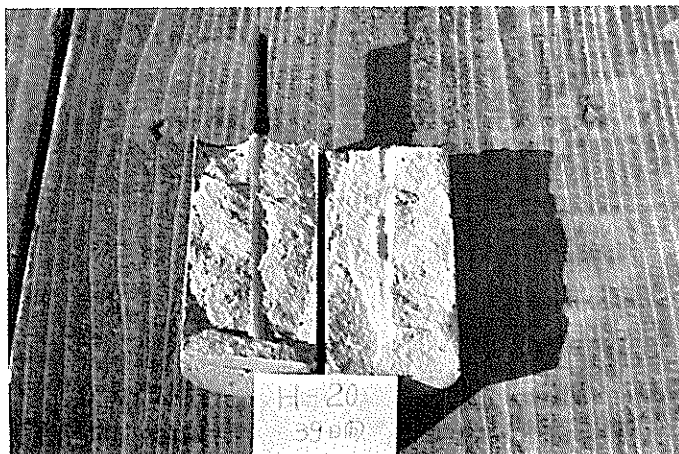


図 32 F-10 の破断面 →



← 図 34 B-13の破壊後



← 図 36 H-20の破壊後

# 港湾における鋼材防食法の研究 (第1報)

## セメント硬化体による防食法

### 目 次

英文要旨	1
1. ま え が き	4
2. アルカリ溶液(主として水酸化カルシウム溶液)中の鋼材腐食	4
2.1 セメント硬化体中のアルカリ	5
実験1 セメント硬化体粉末のpH	5
2.2 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材腐食(1)(溶媒が水道水の場合)	6
実験2 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位(安定電位)	6
実験3 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位(浸漬時の電位変化)	7
実験4 水酸化カルシウム飽和溶液中に骨材が存在するときの鋼材電位(1) (骨材の粒径が小さい場合)	10
実験5 水酸化カルシウム飽和溶液中に骨材が存在するときの鋼材電位(2) (骨材の粒径が大きい場合)	11
2.3 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材腐食(2)(溶媒に海水が含まれる場合)	11
実験6 溶媒が海水を含む水道水の場合	11
実験7 溶媒が海水の場合	12
2.4 水酸化カルシウム不飽和溶液中の鋼材腐食	12
実験8 水酸化カルシウム飽和溶液を塩酸溶液で中和して行ったときの鋼材電位変化	13
実験9 水酸化カルシウム飽和溶液中で安定した単極電位を示す鋼材をいろいろなpH 値の溶液中に浸漬したときの鋼材腐食	14
実験10 水酸化カルシウム溶液のpHが12付近のときの鋼材腐食	15
2.5 考 察	15
3. セメント硬化体中の鋼材腐食	18
3.1 セメント硬化体1層の場合	18
実験11 古いセメント硬化体中の鋼材電位	18
実験12 セメント硬化体を海水中または水道水中に浸漬するときの鋼材腐食(1) (AE剤を含まない場合)	20
実験13 セメント硬化体を海水中または水道水中に浸漬するときの鋼材腐食(2) (AE剤を含む場合)	38

実験14	セメント硬化体中鋼材の電位差および腐食傾向	39
実験15	セメント硬化体の一部が浸液，一部が空中に出ている場合の鋼材腐食	47
実験16	セメント硬化体中鋼材が異種金属（とくに鋼材よりも電位が貴な金属）に接触した 場合の鋼材腐食	49
3.2	1層の場合の考察および過去の検討結果	51
3.3	セメント硬化体と海水（もしくは海水飽和泥層）の2層の場合	56
実験17	鋼材がセメント硬化体と海水（流動）に接する場合の腐食傾向	57
実験18	鋼材がセメント硬化体と海水飽和泥層の2層に接する場合の腐食傾向	67
3.4	2層の場合の考察および過去の検討結果	74
3.5	セメント硬化体，海水（もしくは水道水）泥層（海水もしくは水道水飽和）の3層 の場合	76
実験19	鋼材がセメント硬化体，1%塩化ナトリウム溶液（攪拌），泥層（1%塩化ナト リウム溶液飽和）の3層に接するときの腐食傾向	76
実験20	鋼材がセメント硬化体，海水（攪拌），泥層（海水飽和）の3層に接するときの 腐食傾向	93
実験21	鋼材がセメント硬化体，海水（静止），泥層（海水飽和）の3層に接するときの 腐食傾向	108
実験22	鋼材がセメント硬化体，水道水（流下），泥層（水道水飽和）の3層に接すると きの腐食傾向	118
3.6	3層の場合の考察	129
3.7	セメント硬化体による防食効果	132
実験23	セメント硬化体中鋼材の電位変化	132
4.	結    び	138

# Studies on Protective Method of Steel Structures at Harbors (1st Report)

## Protective Method by Means of Hardened Cement Coating

Kazuaki Zen\*

### Synopsis

Usually cathodic protection has been used as protective method for steel structures at harbors, but there are still some problems to be investigated, for example, establishment of protective method for steel exposed to splash zone, confirmation of the effect of cathodic protection for macro-corrosion, investigation of the effect of cathodic protection applied along with painting to steel in sea water and investigation of the effect of corrosion-resistant steel, and so on. So, at first, as one of protective method for steel exposed to splash zone, protective method by means of hardened cement coating was investigated as shown in this report. Untill now, corrosion tendencies of steel embeded in hardened cement coating alone have been investigated in experimental rooms and in field conditions by many engineers, but those of steel in hardened cement coating acting as one zone among many environments around all steel surface have not yet been studied quantitatively and systematically.

On the contrary, since steel structures under marine environment contact with many zones, for example, sea water and mud zone saturated with sea water, in applying hardened cement coating to steel above L.W.L., steel structures result in passing through three zones, i.e. hardened cement coating, sea water and mud zone saturated with sea water. And besides, corrosion condition of steel contacting with hardened cement coating with sea water and sea water is equal to one of reinforcing steel in reinforced concrete structures with crack in sea water.

Therefore, to make corrosion tendencies and protective effect by means of hardened cement coating in practical conditions clear, I investigated corrosion tendencies of steel in alkaline solution i.e. calcium hydroxide solution, in hardened cement coating zone alone, and in hardened cement coating among two or three corrosion zones, and obtained the following results:

#### [ I ] Corrosion tendency of steel in hardened cement coating alone

(1) By measuring potential value of steel embeded in hardened cement coating alone, occurrence of corrosion of steel in it could be qualitatively known. That is to say, it was confirmed within the scope of this experiment that when potential value of steel in hardened cement coating was more noble than about—500 mV to a sea water-silver chloride electrode no corrosion occured on surface of steel in it, while when more basic than about—500 mV rust was always observed on surface of steel. Such tendency was made sure of steel in calcium hydroxide solution too.

#### [ II ] Corrosion tendency of steel in hardened cement coating among two corrosion zones

(1) When steel contacted with two zones, i.e. hardened cement coating in sea water and sea water or mud zone saturated with sea water, steel in hardened cement coating served always as cathode against bare steel in others, i.e. in sea water or in mud zone saturated with sea water. As a result, macro-corrosion cell whos eanode was steel in others and cathode was steel in hardened cement coating, occured between two zones and macro-corrosion current flowed in from anode to cathode.

(2) In this case, macro-corrosion current density was shown by the following relations;

In  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \leq 1$ ,  $I_{MD} \doteq I_0$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and in  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S > 1$ ,  $I_{MD} \propto I_0 (A_M/A_{SW})^{-1}$  or  $I_{MD} \propto I_0 (A_M/A_S)^{-1}$  where,  $A_M$  was surface area of steel in hardened cement coating ( $\text{cm}^2$ ),  $A_{SW}$  was surface area of steel in sea water ( $\text{cm}^2$ ),  $A_S$  was surface area of steel in mud zone saturated with sea water ( $\text{cm}^2$ ),  $I_{MD}$  was current density flowing in from steel in sea water or mud zone saturated with sea water to steel in hardened cement coating ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $I_0$  was current density flowing in to steel in hardened cement coating in  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S=1$  and was about  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

(3) When cathodic protection is applied to steel in hardened cement coating containing chloride ion ( $\text{Cl}^-$ ), as a value of current density to be required to steel in it  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  has generally been suggested.

\* Chief Research Engineer, Structure Division

Accordingly, if  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \leq 1$ , corrosion condition of steel in hardened cement coating among two corrosion zones was equivalent to one of steel in hardened cement coating, which cathodic protection was applied and was more profitable in point of protection than steel in hardened cement coating alone.

(4) On the other hand, if  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S > 1$ , it was considered that corrosion condition of steel in hardened cement coating among two zones was nearly equal to one of steel in hardened cement coating zone alone.

(5) Most of all, if  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \gg 1$ , corrosion condition of steel in hardened cement coating with sea water among two corrosion zones was equivalent to one of reinforcing steel in reinforced concrete structures with crack in sea water or in mud zone saturated with sea water.

(6) As a result, it is essential that when steel contacts with two zones, i.e. hardened cement coating and sea water or mud zone saturated with sea water, and besides, in  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \leq 1$ , some protective methods are applied to bare steel in sea water or in mud zone saturated with sea water, and that in  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \gg 1$ , we take into consideration to protect steel in hardened cement coating and in sea water or mud zone.

[III] Corrosion tendency of steel in hardened cement coating among three corrosion zones

(1) When steel contacted with three corrosion zones, i.e. hardened cement coating with solution, solution (sea water or fresh water) and mud zone saturated with solution, steel in hardened cement coating served constantly as cathode against bare steel in mud zone, whether corrosion proceeded or not on surface of steel in solution.

(2) Current density flowing in from steel in mud zone to steel in hardened cement coating was shown by the following relations:

When  $A_M/A_S \leq 1$ ,  $I_{MD} \doteq I_0$  and when  $A_M/A_S > 1$ ,  $I_{MD} \propto I_0 (A_M/A_S)^{-1}$  where,  $A_M$  was surface area of steel in hardened cement coating ( $\text{cm}^2$ ),  $A_S$  was surface area of steel in mud zone ( $\text{cm}^2$ ),  $I_{MD}$  was current density flowing in from steel in mud zone to steel in hardened cement coating ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $I_0$  was current density flowing in to steel in hardened cement coating in  $A_M/A_S = 1$  and when solution was sea water,  $I_0 \doteq 0.45 \times 1 \sim 1/2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , when solution was fresh water,  $I_0 \doteq 0.07 \times 1 \sim 1/2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , and then  $0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  was a current density to be required in applying cathodic protection to steel in hardened cement coating without  $\text{Cl}^-$ .

(3) Consequently, from [III] (2), it seemed that steel in hardened cement coating zone among three zones was protected by macro-corrosion current in  $A_M/A_S \leq 1$  just as well as by right cathodic protection.

(4) When solution was moving, there were such tendencies that bare steel in solution became cathode against bare steel in mud zone and current,  $I_{SWD}$  or  $I_{WD}$ , flowed in from steel in mud zone to steel in moving solution. And these tendencies were considerable with decreasing of value of  $A_{SW}/A_S$  or  $A_W/A_S$ . Where,  $A_{SW}$  was surface area of steel in moving sea water ( $\text{cm}^2$ ),  $A_W$  was surface area of steel in moving fresh water ( $\text{cm}^2$ ),  $I_{SWD}$  was current density flowing in from steel mud zone to steel in moving sea water ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), and  $I_{WD}$  was current density flowing in from steel in mud zone to steel in moving fresh water ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Therefore, when solution moved, it was considered that  $A_{SW}/A_S$  or  $A_W/A_S$  was a powerful controlling factor for steel corrosion and if  $A_{SW}/A_S$  or  $A_W/A_S$  was lesser than  $0.25 \sim 0.5$ , it was hard to find occurrence of corrosion on surface of steel in moving solution.

(5) On the other hand, when solution was stationary corrosion occurred always on surface of steel in moving solution regardless of value of  $A_{SW}/A_S$  or  $A_W/A_S$ , and steel potential in it, i.e.  $E_{SW}$  (potential of steel in sea water) or  $E_W$  (potential of steel in fresh water), was nearly equal to potential of steel in mud zone and sometimes steel in solution served as anode against steel in hardened cement coating.

(6) When steel contacted with three zones, i.e. hardened cement coating, solution and mud zone, steel in mud zone served constantly as anode against steel in hardened cement coating and in moving solution, and thickness of steel in mud zone decreased by the action of the above mentioned macro-corrosion cell at the rate of  $0.08 \text{ mm}$  a year or so (calculated by weight loss) in  $A_{SW}/A_S$  or  $A_W/A_S = 1$ .

(7) The above tendencies were shown regardless of kind of mixing water in hardened cement coating.

(8) Since steel in sea water and mud zone saturated with sea water corroded based upon micro- and macro-corrosion cell, some protective methods should be applied to steel in both zones according to corrosion conditions.

[IV] Effect of protective method by means of hardened cement coating

(1) Since on surface of steel embedded in hardened cement coating zone alone potential difference was apt to occur based upon various factors, for example, difference of composition of mixing water, difference of surface condition of steel and difference of executing condition, and so on, protective effect for steel by means of hardened cement coating alone does not always reliable for long time. On the contrary, when

hardened cement coating acted as one of corrosion environments contacting with surface of steel and when  $A_M/A_{SW}$  or  $A_M/A_S \leq 1$ , both protective effects by hardened cement coating itself and by macro-corrosion current as well as by cathodic protection could be expected.

(2) Accordingly, in applying hardened cement coating to steel above L.W.L. in steel structures under marine environment, steel in hardened cement coating will be sufficiently protected for long time because  $A_M/A_S$  is almost less than 1.0 at harbors.

(3) However, since cathodic protection has been used below sea water level, influence of it on protective method by means of hardened cement coating is a important problem. But, according to my additional experiment, it seems that taking protective method by means of hardened cement coating with cathodic protection is more effective.

Based upon the above results, some additional experiments are now being conducted in experimental room and in field condition.



# 港湾における鋼材防食法の研究 (第1報)

## セメント硬化体による防食法

善 一 章\*

### 1. ま え が き

土木、建築関係では建設用資材として鋼材が多量に使用されてきているが港湾においても岸壁構造や棧橋構造から防波堤にまで鋼材が使われている。また、このような鋼製構造物の様式の増加にともなって鋼材の形状、寸法も多様となっている。したがって防食法としても一層の合理化が望まれる。防食法の合理化を計るには防食法の防食効果の検討に先立ってまず実際条件下の腐食機構を把握することが必要である。しかしながらこれまでは港湾における鋼材の腐食の問題は単一層内における腐食、すなわちマイクロ腐食にのみ重点がおかれているが、腐食環境は海測では海水面、潮位間、海水中、海底泥層中、陸側では残留水位以上と残留水位以下のような各種環境から成っており鋼材はこれらの環境を貫通した状態で埋設されるためにマクロ腐食の発生も予想される。さらに海水中的のカキやフジボなどの生物の付着などによる環境変化も考えられる。これに対処するために港湾における鋼材腐食についての検討、とくにマイクロ腐食とマクロ腐食の関係を検討しているが<sup>1)</sup>、防食法の効果についてもこれまでのマイクロ腐食に対する効果の検討とともにマクロ腐食の立場からも検討してみることが必要である。したがってこのような見地から実際条件下における鋼材防食法を腐食実験と併せて検討することにした。

港湾における防食法としては電気防食法が一般に適用されているが海水浸漬率が40%未満の鋼材(普通鋼)部分に対しては別の防食法を適用することが望まれている<sup>2)</sup>。したがって海水浸漬率40%付近をM.W.L.と見なせばM.W.L.以上の鋼材(普通鋼)には電気防食法以外の何らかの防食法が必要となる。これに対してコンクリート巻き、アスファルト巻き、1/4"鋼板溶接による部分的な肉厚増しなどいろいろな方法が提案されている<sup>3)</sup>。一方港湾における鋼製構造物の上部工であるセメント硬化体の下端はある場合にはM.W.L.付近、またある場合ではH.W.L.上1m付近までとまちまちであり統一さ

れていない。いまこのセメント硬化体被覆をM.W.L.またはL.W.L.付近まで下げたときセメント硬化体の防食性はどうかということが問題となる。セメント硬化体内の鋼材の腐食傾向、防食性についてはいろいろ検討されているが後述するようにいずれもセメント硬化体1層中についてである。しかしL.W.L.以上の防食の場合はセメント硬化体一層ではなくセメント硬化体より出ている鋼材は海水と海底泥層にもそれぞれ接しているが、鋼材が多層に接するときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向についてはまだ検討されていない。したがって2層または3層のときの鋼材とセメント硬化体との関係を検討してこの結果にもとづいてL.W.L.上の防食効果など各ケースにおけるセメント硬化体の防食性が推察できるようにすることを目的として本報(セメント硬化体による防食法)を纏めてみた。なおアルカリ溶液(水酸化カルシウム溶液)中およびセメント硬化体1層中鋼材の腐食傾向についてはすでに検討されてきているが、これらの検討結果を参考として主として鋼材電位~腐食傾向の面を眺めて多層のときのセメント硬化体中鋼材の腐食に関する足がかりを得るための基礎実験をいくつか行なってみた。

### 2. アルカリ溶液(主として水酸化カルシウム溶液中の鋼材腐食)

セメント硬化体1層、2層(セメント硬化体の自然環境1層)、3層(セメント硬化体と自然環境2層)のときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向およびセメント硬化体の防食特性を検討する前に順序としてアルカリ溶液(主として水酸化カルシウム溶液)中の鋼材腐食について調べることにした。しかしpH~鋼材腐食についてはすでにR. Shalon & M. Rophael<sup>4)</sup>がくわしく検討しており、またPourbaix<sup>5)</sup>はpH~鋼材電位~鋼材腐食傾向3者の関係図を熱力学の立場から提案している。したがってここではセメント硬化体中鋼材の電位変化の見当をつける意味からアルカリ溶液中の鋼材電位変化~発錆傾向を主として取扱ってみた。

\* 構造部 主任研究官

## 2.1 セメント硬化体中のアルカリ

セメントは表1<sup>6)</sup>に示すように全体の60%以上がCaOであり水を加えることによって水和反応がおこってセメント硬化体となる。

表1 ボルトランド・セメントの化学成分

酸化物	重量百分率(%)	
	平均	範囲
酸化石灰 (CaO)	63	62~66
けい酸 (SiO <sub>2</sub> )	22	20~26
アルミナ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6	4~7
酸化鉄 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3	2~5
酸化マグネシウム (MgO)	2	1~3
無水硫酸 (SO <sub>3</sub> )	2	1~2

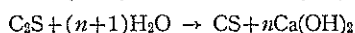
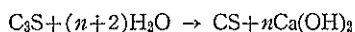
セメントは細骨材、粗骨材の混入如何によってセメント・ペースト(セメントと水)、モルタル(セメント、細骨材、水)、コンクリート(セメント、細骨材、粗骨材、水)となるが、本報ではこれらセメントを硬化材とした硬化体を一括してセメント硬化体と呼ぶことにする。本報では硬化モルタルをセメント硬化体の代表例として用いて実験を進めることにした。この外に注入を目的とする場合には空気連行剤やAl粉末、耐摩性を期待するために空気連行剤、硬化促進のために硬化促進剤たとえば塩化カルシウム、硬化遅延のために硬化遅延剤などをセメント硬化体中に混入(主に練り水に溶解させて)することがあるがいずれもセメント量の0.5%以下のように微量である。これらのうちで塩化カルシウムは練り水に塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)を含む場合に相当すると考えられるのでこの場合は練り水に海水を使用することで代行することにして、その他に空気連行剤を含む場合を後述するように取り上げてみた。

セメント硬化体の防食性はその中のアルカリ成分によるものといわれている。表1を参照するとセメント中のアルカリ成分としてはCaOがあるが、この外に微量のNa<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oがある。セメント中ではC<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>Sなどで

表2 アルカリ成分の溶解度

化合物	溶解度 (g/100g・H <sub>2</sub> O)					
	0°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C
Ca(OH) <sub>2</sub>	0.185	0.176	0.165	—	0.153	0.141
N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> H	—	103.2	109	—	119	129
KOH	97	103	112	117.4	126	—

表示される形で入っている。C<sub>3</sub>SとC<sub>2</sub>Sはセメント中で約70%を占めるが水と反応して多量のCa(OH)<sub>2</sub>が生成する。すなわち



生成したCa(OH)<sub>2</sub>は次第に結晶化してセメントの硬化に寄与するが、水和反応は28日でその1/2が進行するといわれる。表2にアルカリ成分の溶解度を示す。

表2に示すようにK、Naのアルカリ金属類の水に対する溶解度はアルカリ土金属類のCaの溶解度に比べるとはるかに大きい。したがって含有量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)<0.5%、溶解度ならびに鋼材防食のための長期間にわたる作用の3点からみると検討の対象とすべきアルカリ成分はセメント硬化体中の遊離水酸化カルシウムと考えられる。

また、一般にセメント硬化体1層中の鋼材腐食に関係ある事項としてセメント硬化体の中性化があげられている。したがってセメント硬化体中性化のごく大まかな見当をつける意味で次の実験を行なってみた。

### 実験1 セメント硬化体粉末のpH

材令28日のセメント硬化体(配合はJIS R 5201に準ずる)を粗砕機と粉砕機にかけて微粉末とした。粉末となったセメント硬化体1,000gをφ20cmのポート(おらかじめ定性用濾紙を敷いておく)内に入れ、上から洗滌液を継続して注いで行ったときの濾液のpHを電氣的に測定した。洗滌液としては蒸溜水、水道水、海水の種類を用いた。測定値を表3に示す。

表3を図示すると図1の通りである。

表3 セメント硬化体粉末濾液のpH変化

洗滌液	pH											
	1 day	7 day	12 day	14 day	15 day	19 day	22 day	23 day	24 day	31 day	43 day	60 day
蒸溜水	12.3	12.3	12.5	—	12.6	12.4	11.9	11.7	11.8	11.2	10.8	10.2
水道水	12.3	12.3	12.5	—	12.4	12.3	12.0	—	11.6	11.4	11.1	9.3
海水	11.8	11.8	11.5	11.5	10.4	10.5	9.4	9.6	9.3	9.3	9.0	8.3

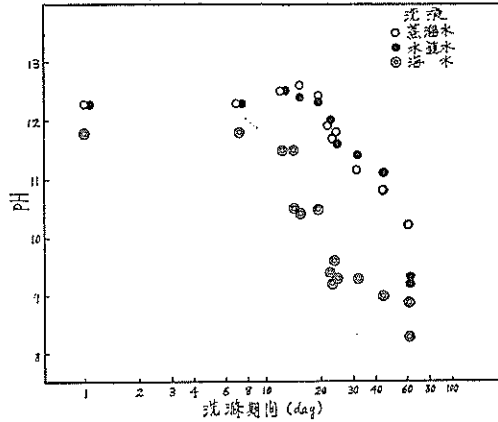


図1 セメント硬化体粉末汚液のpHの経日変化

表4 洗滌液のpH

洗滌液	pH
蒸溜水	5.0
水道水	6.5
海水	8.4

このときの洗滌液のpHを参考として測定すると表4のようである。

図1からわかるように洗滌液として海水を使用するとき水道水または蒸溜水を使用したときよりも汚液のpHの低下が早い、すなわち中性化が1層早められる。すなわち海水が洗液のときの汚液が海水と同じpHとなるまでには大体2カ月かかるようであるが、蒸溜水や水道水が洗液のとき2カ月後の汚液はいぜんとしてアルカリ性を示している。この現象の一因は海水中の $\text{SO}_4^{2-}$ のように石灰と反応して難溶性の化合物を作って汚液のアルカリ性に寄与する遊離石灰の消費を助けることにあると考えられる。また洗滌液として海水を用いたとき汚液のpHが最初から他の洗滌液のときの汚液のpHより若干小さいことはR. Shalonら<sup>4)</sup>が示しているように含塩量が多くなるにつれてpHが低下する現象なのかもしれない。

## 2.2 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材腐食(1) (溶媒が水道水の場合)

中性化が始まる前の鋼材腐食の挙動を知るために先ず水酸化カルシウム飽和溶液について検討してみた。(1)として溶媒が水道水の場合について次のような実験を行った。

## 実験2 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位 (安定電位)

φ30 cm, 高さ20 cmのガラス容器に水道水を8割程度入れこの中に水酸化カルシウム(白色粉末)を添加してガラス棒で攪拌する。水酸化カルシウムの溶解度は表2に示すように常温で大体0.17g/100gであるので長時間飽和状態を保つために、すなわち空気中の炭酸ガス吸収によるアルカリ性の中性化を防ぐために0.17g×5/100g程度の水酸化カルシウムを添加した。したがって攪拌後不溶解分の水酸化カルシウムはガラス容器底部に沈殿している。なおこのときの白色沈殿物の中には水道水に含まれていて $\text{Ca}^{2+}$ と化合して難溶性となった生成物も若干存在している。図2に飽和水酸化カルシウム溶液のpH~温度の関係曲線を示す。図2によれば常温ではpH≒12.6である。

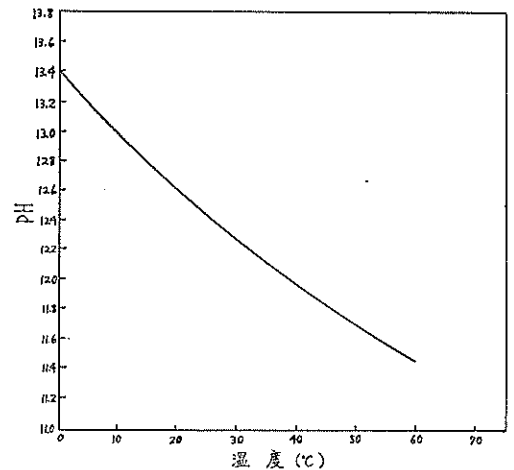


図2 水酸化カルシウム飽和溶液のpHの温度変化

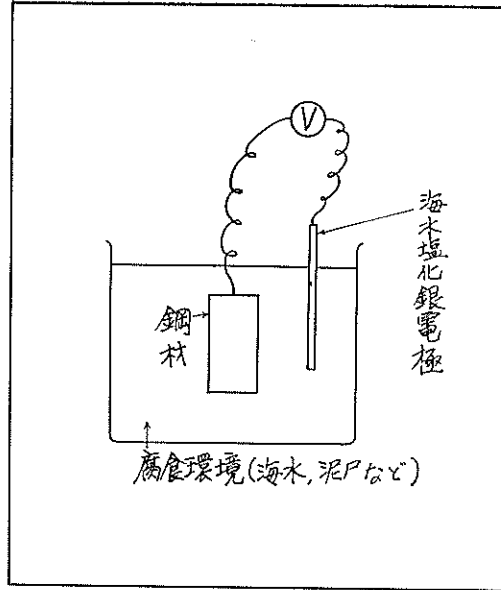
一方鋼材は裸鋼材面が完全に飽和水酸化カルシウム溶液中のみに浸漬されるようにするために次のようにした。すなわち、鋼材片の一端(仮りにA端としよう)に測定用電線を接続する。これと反対側の一端(A端に対してB端とする)から約2cmは裸鋼材面そのままとして残しておき、その他の鋼材表面は全部有機合成樹脂(リゾラック, 理研合成製品)で被覆, 絶縁する。こうした鋼材片を裸鋼材部分が完全に飽和水酸化カルシウム溶液中に没するように吊す。裸鋼材の表面状態は表5に示すようにいろいろな場合がある。鋼材全体の長さは15cm~20cmである。

以上のように調整した鋼材片について飽和水酸化カルシウム溶液中の単極電位の測定と表面観察を行なった。単極電位の測定は図3に示す要領で海水塩化銀電極に対する値(-mV)で示す。測定時の電池構成は $\text{Ag}|\text{Ag}$

表 5 水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬した鋼材

No.	鋼材表面
1	先端断面発錆，側面は研磨のみで脱脂せず
2	研磨，脱脂
3	先端断面のみ研磨
4	野ざらし発錆状態のものを 90° 曲げた
5	溶接部材
6	黒皮付を 90° 曲げたもの
7	黒皮で発錆（先端はガス切断）
8	一部にモルタル付着，一部は野ざらし状態で発錆
9	研磨のみ脱脂せず
10	野ざらし状態で発錆
11	8 と同じ
12	研磨，脱脂後 90° 曲げたもの
13	研磨，切りきずあり
14	研磨，脱脂（φ 9 mm 鉄筋）
15	発錆，90° 曲げて曲げの部分のみ研磨（φ 6 mm 鉄筋）
16	発錆，先端断面はグラインダー研磨により青色に変色（φ 6 mm 鉄筋）
17	研磨（グラインダー）により青色に変色
18	黒皮面に一部モルタル付着
19	黒皮面を脱脂
20	黒皮，脱脂，きりきずあり
21	研磨，一部油付着
22	発錆，一部油付着

Cl<sub>2</sub>，海水，水酸化カルシウム飽和溶液[Fe]であり，海水塩化銀電極の標準水素電極に対する電位(V)は +0.2505 - 0.00055 (t-25°) となる。このとき海水塩化銀電極は pH=12.6 (at 26°C) の強アルカリ性溶液中に浸漬されるため測定の都度次のような検定を行なってみた。すなわち 2本の海水塩化銀電極を用意しておきその中の 1本を水酸化カルシウム飽和溶液中の電位測定に使用し，もう 1本は控えとして新鮮な水道水を満たしたビーカー中に常時浸漬しておく。電位測定後水酸化カルシウム飽和溶液に浸漬していた海水塩化銀電極を取り出して水道水で洗滌した後ビーカー中の水道水に漬ける。2本の海水塩化銀電極を入れたビーカー中の水道水をゆるく攪拌してから両電極間の電位差を電位計 (Dual Meter) で測定した。このときの⊕(または⊖)電位は電位計の⊕(または⊖)端子に鋼材電位測定に使用した電極を，⊖端子(または⊕)端子に検定用電極が接続されたときの電位計の振れを示している。したがって補正電位の⊕符号は測定された鋼材電位はそれだけ高めの値となっていることを意



V: 電位計

図 3 単極電位測定状況

味する。電位の測定結果を表 6 に示す。

表 6 からわかるように同じ水酸化カルシウムの飽和溶液中でも鋼材電位は鋼材表面差によって異なっているが，いずれも -400 mV 以上，大部分は -200 ~ -300 mV のように貴の値を示している。また鋼材表面の肉眼による観察によればどの鋼材表面にも腐食の進行は認められなかった。

### 実験 3 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位 (浸漬時の電位変化)

実験 2 から水酸化カルシウム飽和溶液中に鋼材を浸漬すると -400 mV 以上の貴な電位になることがわかったが次にこのような安定電位に達する過程を調べてみた。実験の要領は実験 2 と同じで電位の測定時間を分単位で行なった。鋼材表面が研磨状態のときの測定結果を表 7, 8, 9 に示す。表 7, 8 を図示すると 図 4, 5 の通りである。

次に鋼材面が発錆状態のときの測定結果を表 10 に示す。表 10 を図示すれば 図 6 の通りである。

図 5, 6 によれば水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位は表面状態 (研磨，発錆) に拘わらず 60 分程度で安定電位に達するようであるが，図 4 では 60 分 ~ 1,000 分の間の測定をしていないためにはっきりしないけれどもこのような傾向はいえそうである。

表 6 電位測定結果

No.	単 極 電 位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)																		
	浸漬時	1 day	1.5day	2 day	3 day	5 day	6 day	7 day	8 day	9 day	10day	11day	12day	14day	15day	18day	22day	25day	
1	522	146	167	124	170	166	160	178	186	198	194	198	199	238	226	268	275	194	
2	446	148	163	110	128	114	108	132	136	142	145	142	130	148	146	148	142	130	
3	564	155	173	115	152	170	204	228	269	285	288	172	168	160	152	164	154	177	
4	476	275	295	258	329	294	328	327	330	345	345	346	318	364	360	394	318	334	
5	410	416	441	386	406	365	354	368	372	372	385	366	346	352	352	354	326	306	
6	370	292	306	262	304	304	323	345	350	368	354	358	355	382	374	418	410	404	
7	466	354	313	214	208	155	174	198	212	230	246	230	255	256	246	254	354	327	
8	460	620	620	568	552	328	208	186	185	170	166	158	148	167	156	175	162	152	
9	430	164	180	168	234	332	384	377	386	370	380	388	414	415	406	350	404	244	
10	538	473	440	230	180	144	155	223	170	172	172	180	168	186	179	200	205	212	
11	600	204	245	254	264	248	282	284	288	288	288	312	315	346	346	296	272	256	
12	420	268	278	228	265	273	300	314	329	327	332	332	318	328	336	332	332	320	
13	454	338	353	327	356	338	335	358	355	355	354	368	355	368	364	376	380	375	
14	295	172	185	130	148	125	134	155	152	156	154	200	150	165	158	160	152	135	
15	400	272	267	214	252	265	288	312	325	340	352	364	345	368	358	375	364	330	
16	395	214	226	185	222	215	235	248	249	244	254	284	268	277	268	285	298	266	
17	415	326	335	284	292	282	300	310	300	292	295	284	286	298	293	294	290	274	
18	485	334	320	214	224	224	264	223	210	195	204	234	216	230	259	252	264	282	
19	495	200	221	212	246	252	275	284	274	290	306	315	236	362	252	386	356	322	
20	575	180	194	180	205	288	294	310	294	242	236	255	216	216	236	248	268	275	
21	430	295	297	225	230	195	208	208	225	218	216	200	216	208	228	196	164	145	
22	560	455	478	396	370	275	294	290	298	250	252	214	186	186	177	176	175	170	
補正電位 (mV)	-2	-6	+8	-18	+4	+2	-4	+15	+10	+8	+10	+16	+18	+28	+32	+16	+15	-	

表 7 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材(研磨、脱脂)電位(海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)
1	12.8	502	+ 2
6	12.8	496	+ 4
11	12.8	480	+ 1
21	12.8	447	- 4
26	12.8	432	- 8
52	12.8	375	-13
980	12.8	235	- 6
1000	12.8	238	+ 5
1005	12.8	252	+ 8
1010	12.8	254	+ 6
1025	12.8	236	+ 8

表 8 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材(研磨)電位

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)	補正のための海水中鋼材の電位 (-mV)*	
			電極(1)	電極(2)
1	12.8	430	450	453
9	12.8	380	460	465
24	12.8	350	422	432
46	12.8	330	436	445
59	12.8	330	455	457
74	12.8	335	452	452
89	12.8	340	480	473
119	12.8	335	478	475
149	12.8	335	483	477

電極(1): 水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬した海水塩化銀電極

電極(2): 常時海水中に浸漬してアルカリの影響を受けない海水塩化銀電極

\* 海水中に浸漬した鋼材は水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬した鋼材とは別もので、海水中鋼材の電位は海水中鋼材を使用して電極(1),(2)の差を単に比較するためのものである。

表 9 水酸化カルシウム飽和溶液中鋼材(研摩)の電位  
(海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)
1	12.8	382	- 2
46	12.8	342	+ 4
—	12.8	263	—
2,820	12.8	264	- 8
4,465	12.8	276	+ 5
7,121	12.8	300	+16
7,191	12.8	322	+ 5
8,531	12.8	375	+ 8
10,126	12.8	280	+ 5
—	12.8	274	+ 2
18,666	12.8	272	-28
22,956	12.8	160	-23

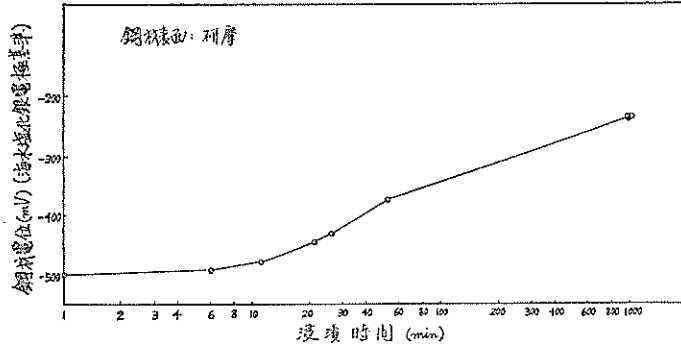


図 4 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位変化

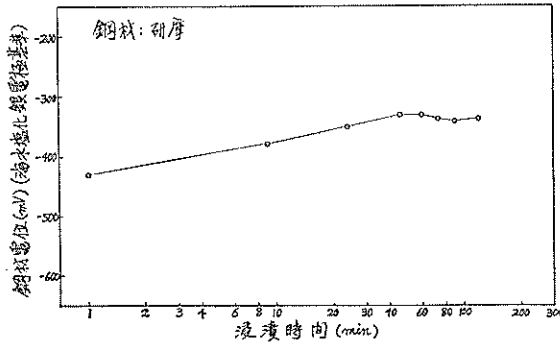


図 5 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位変化

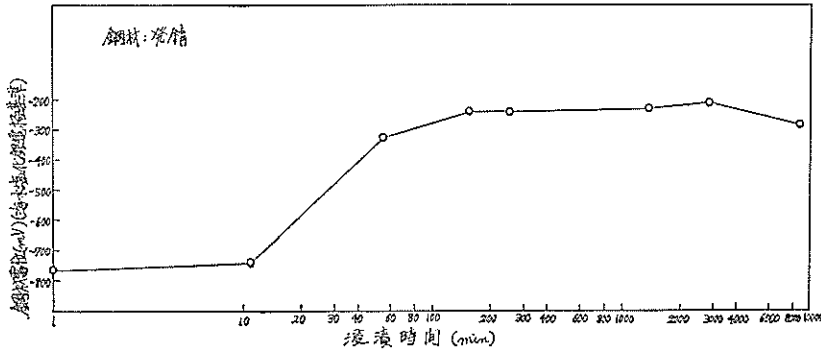


図 6 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位変化

表 10 水酸化カルシウム飽和溶液中鋼材(発錆)の電位 (海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)
1	12.8	765
11	12.8	740
56	12.8	322
158	12.8	238
256	12.8	238
1,410	12.8	230
2,935	12.8	210
—	12.8	274
8,600	12.8	284

表 11 苛性ソーダ溶液中鋼材(発錆)の電位 (海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)
1	13.10	940	+16
11	13.10	920	+ 5
56	13.10	415	+36
158	13.10	440	+10
256	13.10	318	+10
1,410	13.10	282	+ 8
2,935	13.10	296	+ 5
—	13.10	342	+ 2
8,600	13.10	365	-28
—	12.78	348	-23

参考として水酸化ナトリウム溶液 (pH=13.1) 中に発錆鋼材を浸漬したときの電位の経時変化を測定してみると表 11 のようになる。表 11 によれば水酸化ナトリウム溶液 (pH=13.1) 中の鋼材電位は水酸化ナトリウム飽和溶液中と同じように浸漬後の時間の経過とともに次第に貴の方へ移って行き落着くまでに要する時間は最初の鋼材表面状態によると思われるが水酸化ナトリウム溶液中の方がやや長いようである。

#### 実験 4 水酸化カルシウム飽和溶液中に骨材が存在するときの鋼材電位 (1) (骨材の粒径が小さい場合)

セメント硬化体に類似させるために飽和水酸化カルシウム溶液に細骨材を充填し、この中に鋼材を埋設したときの電位を測定してみた。ガラス容器 (φ30 cm, 高さ 20 cm) に半分ほど標準砂を詰め上から飽和水酸化カルシウム溶液を注いで行ってガラス容器に満水する。ここで使用した標準砂とはセメント強度試験用の細骨材として JIS R 5201 に規定された砂である\*。

供試鋼材としては φ 3 mm, l 150 mm の鋼棒を実験 2 の要領で加工して、鋼棒先端の裸鋼材部分が完全に砂層 (水酸化カルシウム飽和溶液で飽和) 中に没するように埋

\* 豊浦標準砂は山口県豊浦郡豊浦町産の天然ケイ砂から雑物を除き去り、JIS Z 8801 (標準フルイ) の標準網フルイ 297 μ でふるい分けた通過分であって次の試験に合格しなければならない。

100 g の試料を採り JIS Z 8801 (標準フルイ) の標準網フルイ 297 μ および 105 μ でふるいわけ、1 分間の通過量が 1 g 以下となったときふるいの止め標準網フルイ 297 μ に残った量が 1% 以下であり標準網フルイ 105 μ に残った量が 95% 以上であることを要する。

この試験は 2 回以上行ない、その平均値をとる。

表 12 鋼材電位測定結果 (海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)	海水塩化銀電極の位置*	鋼材の位置**
1	324	+ 2	液中	砂中
10	316	- 4	液中	砂中
41	260	-10	液中	砂中
71	273	- 2	液中	砂中
381	225	+ 5	液中	砂中
2,800	298	+ 6	砂中	砂中
2,860	280	+10	液中	砂中
2,920	262	- 4	液中	液中
4,330	278	+ 8	液中	砂中
5,864	273	+ 4	液中	砂中
7,226	273	+2	液中	砂中

飽和水酸化カルシウム溶液中の鋼材安定電位  
-284 mV

\* 海水塩化銀電極の位置: 電位測定時の海水塩化銀電極先端の位置

\*\* 鋼材の位置: 電位測定時の鋼材のおかれた位置

設する。このとき裸鋼材の研磨面は砂層にのみ接している。こうした鋼棒について実験 1 と同じ要領で単極電位の経時変化を測定したところ表 12 に示す値を得た。表 12 によれば研磨鋼材を飽和水酸化カルシウム溶液中に浸漬したときの電位よりも 100 mV 程度卑な値となっている。これは鋼材腐食に関する実験<sup>1)</sup>のときに流動海水中の鋼材電位にくらべて海水飽和砂層中の鋼材電位の方が 100~200 mV ほど卑となった現象と同じく溶存酸素量の差によるものと考えられる。表 12 からわかるように電位測定するときに海水塩化銀電極を水酸化カルシウム溶液中と砂層 (水酸化カルシウム飽和溶液飽和) 中にそれぞれおいたときの電位は環境の電導性が良いためにほとんど差はないようである。表 12 を図示すると図 7 のように

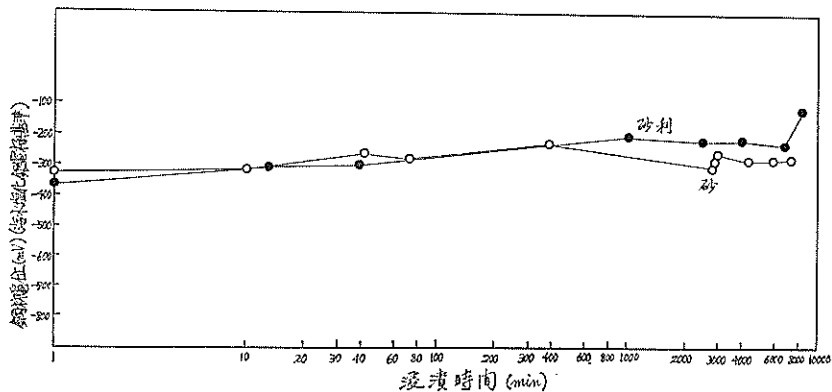


図 7 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位変化

なる。一方鋼材を引き抜いて砂層に接していた裸鋼材面を肉眼で観察したところ発錆は見られなかった。

**実験 5 水酸化カルシウム飽和溶液中に骨材が存在するときの鋼材電位 (2) (骨材の粒径が大きい場合)**

実験 4 と同じ要領で骨材の粒径を 2~3cm としたときの鋼材電位を表 13 に示す。表 13 が推察されるように鋼材の単極電位は骨材が存在しないときの値に類似している。また肉眼による観察によれば発錆は認められなかった。

表 13 鋼材電位測定結果(海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)
1	—	364	+2
16	—	302	—
39	—	295	-4
1,000	—	198	-2
2,473	—	214	—
3,980	—	212	—
6,860	—	225	—
8,333	12.78	112	+5

実験 2~5 よりわかるように水酸化カルシウム飽和溶液中に鋼材を浸漬したとき鋼材の単極電位は自然環境中の鋼材単極電位に対してかなり貴となる。すなわち自然環境中における鋼材の単極電位は海水塩化銀電極に対して -600 mV 付近であるが水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材単極電位は同じく海水塩化銀電極に対して -100~-200 mV である。しかし実験 2 からわかるように水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位は鋼材表面差によって 100~150 mV 程度の高低があることは注目される。

一方肉眼による観察によればいずれの鋼材表面処理のときにも腐食の進行は認められなかった。この結果各鋼材片を単独で飽和水酸化カルシウム溶液中に浸漬したときには鋼材の単極電位は -200 mV (海水塩化銀電極基準) のように貴となり発錆しないことがわかる。また実験 3 からは水酸化カルシウム飽和溶液中に鋼材片を浸漬したとき鋼材表面の発錆の有無にかかわらず大体 1 時間後には安定電位となるようである。実験 4 によれば海水中の鋼材電位より海水飽和の砂層中鋼材電位の方が 100 mV 程度卑となる傾向は海水の代わりに水酸化カルシウム飽和溶液を使用しても見受けられる。また実験 5 によれば骨材の粒径が大きくなれば当然鋼材電位は骨材を含まないときの値に接近することが確かめられた。

**2.3 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材腐食 (2) (溶媒に海水が含まれる場合)**

港湾では海水の存在が避けられないために水酸化カルシウム飽和溶液の溶媒に海水が含まれる場合の鋼材電位と発錆傾向を次のように検討した。

**実験 6 溶媒が海水を含む水道水の場合**

あらかじめ水酸化カルシウム飽和溶液(溶媒が水道水) 500 cc を 1 l のビーカーに入れこの中に実験 2 のときと同じ恰好の鋼材を裸鋼材面が全部浸漬するように吊す。浸漬後 10 分間は放置しておき単極電位を測定する。10 分以後水酸化カルシウム飽和溶液に海水を少しづつ(5cc 見当) 加えて行き海水添加量ともなう鋼材の単極電位変化ならびに鋼材面の発錆状況を観察した。このときの鋼材表面状態は発錆の少ないものと発錆のひどいもの 2 通りである。電位の測定結果を表 14 に示す。表 14 を図示すると 図 8 のようになる。図 8 によれば海水添加量が增加するにつれて鋼材電位は次第に卑となる様子がわか

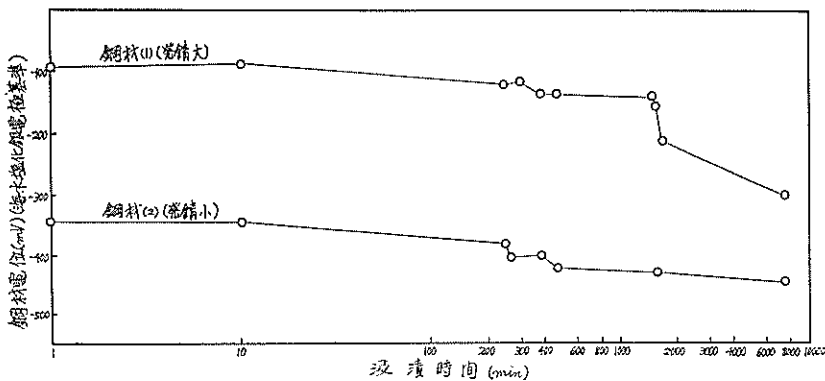


図 8 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位変化



表 14 鋼材電位測定結果(海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	鋼材電位 (-mV)		補正電位 (mV)	海 水	添加海水
	発錆の 程度小 の鋼材	発錆の 程度大 の鋼材		添加量	積算量
1	345	95	-7	0	
10	345	87	-5	0	
242	380	120		10 drop	10 drop
243	386	122	+10	0	10
247	390	123	+12	0	10
252	382	115	0	0	10
257	407	130	+15	5cc~ 10 drops	5cc
261	403	122	+5	0	5cc
291	395	115	-10	0	5cc
376	395	115	+7	0	5cc
381	400	135	+5	5cc	10cc
461	422	135	+5	0	10cc
1,476	420	142	-15	0	10cc
1,481	430	140	+3	5cc	15cc
1,484	425	145		5cc	20cc
1,526	430	135	-13	0	20cc
1,529	425	152	-5	5cc	25cc
1,657	415	210	-16	0	25cc
1,660	420	195	-15	5cc	30cc
7,420	445	300	-11	0	30cc
13,180	445	480	-15	0	30cc
17,500	435	435	-11	0	30cc
	393	335	-7	0	30cc
	390	365	-5	0	30cc

る。

電位がどこまで卑となるのかはこれだけでは測定例が少ないので判断できないが電位の低い発錆量の少ない鋼材では -450 mV 付近となっており、発錆量の多い鋼材は -400 mV あたりに近づきそうである。海水添加時の鋼材電位が鋼材の表面状態によってかなり差がみられるが、海水添加までの浸漬時間が10分間であることから実験3の結果を参照すればこれは安定途中の電位のための差であろうと考えられる。一方肉眼による鋼材表面の観察によれば腐食の進行はみられなかった。

#### 実験 7 溶媒が海水の場合

海水の混入量がさらに増えて水酸化カルシウム飽和溶液の溶媒が全部海水となった場合について実験した。

実験2と同じ恰好の鋼材を海水を溶媒とする水酸化カルシウム飽和溶液中に裸鋼材面が全部浸漬するように入れたときの鋼材電位の経時変化を測定すると表15のようになる。表15によれば鋼材面が研磨、発錆に関係なく

表 15 水酸化カルシウム飽和溶液(溶媒が海水)中  
鋼材電位測定結果(海水塩化銀電極基準)

浸漬時間 (min)	鋼材電位 (-mV)		補正電位 (mV)
	研磨鋼材	発錆鋼材	
5	455	490	+1
10	450	453	0
15	435	426	+5
61	470	417	+5
1,510	460	460	-5

鋼材電位は -450 mV 程度である。

実験6,7から水酸化カルシウム飽和溶液に海水が混入することによって鋼材電位は溶媒に海水を含まないときの電位より卑となり、海水混入率が数%以上ではほぼ -400~-450 mV 付近まで低下することがわかる。肉眼観察によれば海水が溶媒に混入しても鋼材表面には腐食の進行は認められなかった。

実験2~7の測定結果より水酸化カルシウム飽和溶液の溶媒による鋼材電位の違いを眺めてみると次のようになる。

溶 媒	電 位 (mV) (海水塩化銀電極基準)
水道水	-100~-200
水道水に海水混入(数%)	-200~-400
海 水	-450

すなわち溶媒が水道水のみときは水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位は -100~-200 mV のように自然環境における鋼材電位 (-600 mV 付近) にくらべるといちぢるしく貴な電位である。これに対して溶媒に海水が混入されると鋼材電位は -400~-450 mV のように卑となる。しかし海水の混入如何にかかわらず水酸化カルシウム溶液が飽和であれば浸漬鋼材には腐食の進行は抑制されるようである。これは一般にいわれているアルカリ不動態化に関連するものと思われるが、溶媒に海水 (Cl-) を含むときの鋼材電位が海水を含まないときの鋼材電位より 200 mV ほど卑であるということは海水 (主として Cl-) のアルカリ不動態化に対する作用を示すものとして興味深い。ここで一つ注意すべきことは水酸化カルシウム溶液の飽和が保たれていても海水の存在によって鋼材電位が低下するということは海水の濃淡に応じた電池の発生が水酸化カルシウム溶液がたとえ飽和であっても予想されることである。

#### 2.4 水酸化カルシウム不飽和溶液中の鋼材腐食

水酸化カルシウムの不飽和溶液中の鋼材腐食傾向につ

いて次のような実験を行なった。

表 17 各 pH 溶液中の鋼材(研摩)電位  
(海水塩化銀電極基準)

pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)	浸漬時間 (min)	備 考
12.8	502	+ 2	1	塩酸溶液添加
12.8	496	+ 4	6	
12.8	480	+ 1	11	
12.8	447	- 4	21	
12.8	432	- 8	26	
12.8	375	-13	52	
12.8	235	- 6	980	
12.8	238	+ 5	1,000	
12.8	252	+ 8	1,005	
12.8	254	+ 6	1,010	
12.8	236	+ 8	1,025	
12.44	372	+ 4	1,035	
12.44	325	+ 2	1,040	
12.46	305	+ 2	1,045	
12.32	352	- 5	1,075	
12.44	390	+ 3	1,082	
12.44	405	+ 2	1,085	
12.44	415	- 2	1,090	
12.49	420	- 6	1,095	
12.49	445	+ 5	1,107	
12.49	488	+ 1	1,144	
12.49	493	0	1,165	
12.44	395	- 5	1,179	
12.44	495	- 3	1,187	
10.14	495	-15	1,190	塩酸溶液添加
11.16	545	- 3	1,216	
—	555	-11	1,234	
10.74	557	- 2	1,251	
4.2	—	—	—	塩酸溶液添加 水酸化カルシ ウム添加
4.5	590	-12	1,258	
4.9	580	- 5	1,285	
3.9	545	+ 7	1,291	塩酸溶液添加

実験 8 水酸化カルシウム飽和溶液を塩酸溶液で中和して行ったときの鋼材電位変化

実験 2 と同じ恰好の鋼材片をまず水酸化カルシウム飽和溶液中に裸鋼材部分が完全に没するように浸漬し、放置して鋼材電位を安定させる。電位が十分安定したのち 0.1 N の塩酸溶液を水酸化カルシウム飽和溶液に添加して行きながら pH および鋼材電位を連続的に測定してこのときの測定結果を 表 16, 17 に示す。表 16, 17 を図示すると 図 9, 10 のようになる。

図 9, 10 によれば水酸化カルシウム溶液が飽和であるときの鋼材電位は -200 mV のように自然環境における鋼材電位に対して非常に貴となっているが、飽和状態が破れ始めるにつれて鋼材電位は急に卑の方に移動し pH が十分アルカリ性域であるにもかかわらず -500 ~ -600

表 16 各 pH 溶液中の鋼材(研摩)電位  
(海水塩化銀電極基準)

pH	鋼材電位 (-mV)	補正電位 (mV)	浸漬時間 (min)	備 考
12.8	430	+ 3	1	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	380	+ 5	9	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	350	+12	24	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	330	+ 9	46	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	330	+ 2	59	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	335	± 0	74	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	340	- 7	89	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	335	- 3	119	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	335	- 6	149	水酸化カルシウム飽和溶液中
12.8	395	- 5	175	塩酸溶液添加開始
12.6	495	+15	—	塩酸溶液添加
12.05	465	+13	191	塩酸溶液添加
12.10	535	+33	198	放置
11.95	543	+20	203	放置
11.95	570	+13	212	放置
11.50	575	+ 8	220	塩酸溶液添加
11.65	595	+ 7	230	放置
10.05	532	+12	233	塩酸溶液添加
10.33	585	+10	242	放置
8.90	505	+ 9	246	塩酸溶液添加
9.02	547	+ 7	255	放置
7.85	515	+ 8	260	塩酸溶液添加
8.30	540	+ 5	283	放置
7.38	550	+10	296	塩酸溶液添加
5.95	545	+11	298	塩酸溶液添加

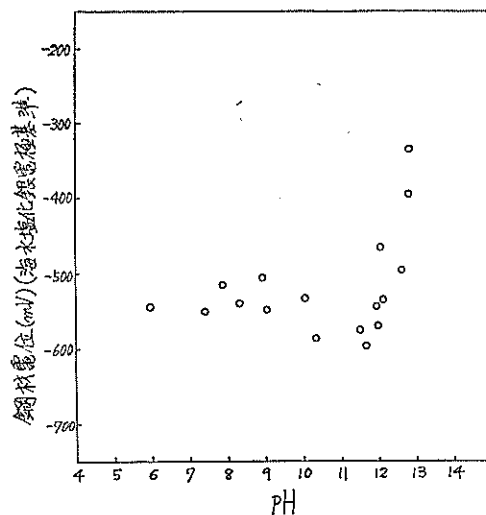


図 9 pH~鋼材電位の関係(1)

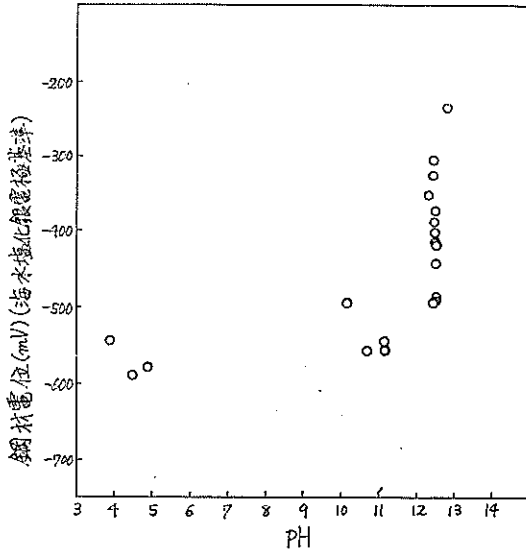


図 10 pH～鋼材電位の関係(2)

mV のようになり自然環境における鋼材電位と変わらない値となることがわかる。しかしこの場合塩酸溶液の滴下が比較的短時間でなされたために鋼材表面の発錆状態を観察するには浸漬期間があまり短かすぎた。

実験 9 水酸化カルシウム飽和溶液中で安定した単極電位を示す鋼材をいろいろな pH 値の溶液中

に浸漬したときの鋼材腐食

実験 8 から浸漬溶液の pH と鋼材電位の関係のごく概略がわかったが発錆との関連をはっきりさせることはできなかったので実験 9 を行なった。実験 2 と同じ恰好の鋼材を水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬して貴の電位に安定したことを確かめておく。これとは別に 500 cc のビーカー中に pH がそれぞれ異なる水溶液を水酸化カル

表 18 鋼材電位測定結果 (海水塩化銀電極基準)

測定項目	浸漬時間 (min)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	補正電位 (mV)
pH	0	11.85	10.77	10.18	10.10	9.10	8.80	
電位	1	267	395	410	340	345	360	+ 2
電位	14	456	490	498	480	478	495	- 4
電位	29	484	504	525	496	494	528	- 6
電位	174	522	556	565	525	525	550	+ 2
電位	1,200	516	555*	548*	572*	572*	556*	+ 6
電位	1,650	540	468	480	562	545	552	-10
電位	2,640	610*	555	504	590	545	566	+ 4
電位	4,080	550	525	573	562	530	544	-20
電位**	—	(285)	(315)	(280)	(370)	(327)	(292)	+ 4

\* 発錆が認められた

\*\* 予め水酸化カルシウム飽和溶液中に浸漬して安定した鋼材電位

表 19 pH および鋼材電位測定結果 (電位の単位は -mV, 海水塩化銀電極基準)

測定項目	浸漬時間 (min)	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	補正電位 (mV)
pH	0	12.8	11.8	11.0	9.4	8.7	8.0	7.7	6.7	5.9	4.7	4.4	12.8	
電位	1	212	458	462	445	462	385	404	394	380	390	425	200	-12
電位	35	182	510	484	478	520	473	482	418	448	380	430	194	-22
電位	88	165	555	510	494	544	536	528	538	465	458	446	164	-22
電位	128	160	555	504	479	534	515	500	446	463	455	445	150	-22
電位	145	155	552	500	472	534	530	520	450	455	445	445	154	-25
電位	986	132	578	530	512	536	615	580	478	488	476	414	140	-20
pH	986	12.8	11.4	10.5	8.9	8.3	8.1	8.0	7.2	6.4	5.2	4.1	12.8	
電位	1,138	164	586	538	527	522	620	590	506	510	506	452	146	- 6
電位	1,438	130	568	526	506	544	610	585	515	508	498	428	145	-20
電位	2,538	178	584	568	564	582	655	630	557	536	526	457	158	- 5
pH	2,538	12.8	10.5	9.8	8.4	8.3	8.4	8.3	7.8	7.7	6.2	4.5	12.8	
電位	5,319	165	574*	566*	565*	585*	640*	635*	565*	544*	528*	447*	138	-10
pH	5,319	12.8	9.9	9.1	8.6	8.5	8.6	8.6	8.5	8.1	7.7	6.2	12.8	
電位	6,939	196	585	574	562	576	615	610	564	538	528	446	154	-12

\* 発錆が確認された

\*\* 鋼材は研磨, 脱脂後, 水酸化カルシウム飽和溶液中に 4 hr 浸漬してから測定に供した

シウム溶液、塩酸溶液および水道水で作成しておき、これら各 pH の水溶液中にあらかじめ水酸化カルシウム飽和溶液中で電位が安定している鋼材を1本ずつ浸漬する。浸漬とともに鋼材電位、発錆状況および浸漬溶液の pH を継続して測定した。測定結果を 表 18, 19 に示す。表 18, 19 より鋼材電位の変化模様を図示すると 図 11 のようになる。図11によれば水酸化カルシウム飽和溶液中で安定していた鋼材電位は不飽和溶液中に移し替えると直ちに卑の方に移動し始め大体1時間後には  $-500 \sim -600$  mV 付近に落ち着くようである。一方肉眼で明らかに発錆が認められたのは表 19 では1,200分(20時間)後、表 20 では5,000分(80時間)後である。このときの発錆は部分的なものでアルカリ性の強い水溶液中では鋼棒の先端断面付近に点食の形で見られた。表 18, 19 より発錆

と pH と鋼材電位の関係を示すと 図 12 のようになる。図 12 によれば図 9, 10 で見られる pH と鋼材電位の関係がはっきりするが、さらにもう一つの特長としては発錆傾向と鋼材電位の関係である。すなわち鋼材電位が  $-400$  mV 付近より貴な場合には発錆は認められないが  $-500 \sim -600$  mV 付近では発錆が認められる。

#### 実験10 水酸化カルシウム溶液の pH が12付近のときの鋼材腐食

実験 8, 9 から水酸化カルシウム溶液の飽和状態が破れ始めると直ちに鋼材電位が卑となるとともに発錆する傾向のあることがわかったが、pHが12付近について鋼材電位、pH、発錆傾向について検討したところ 表 20, 21 の結果を得た。表 20 によれば  $\text{pH} < 12.6$  では発錆が認

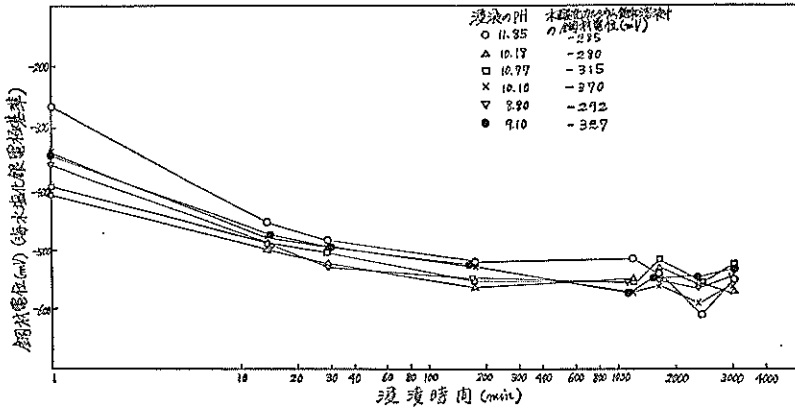


図 11 鋼材単極電位の経時変化

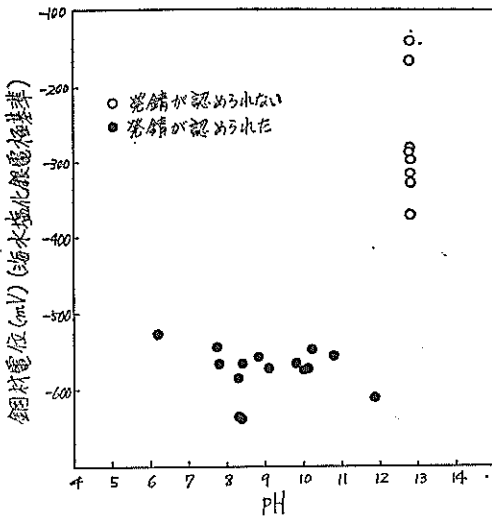


図 12 pH~鋼材電位の関係 (3)

められた ( $\text{pH}=12.4$  でも発錆が認められない1例がある) ことから水酸化カルシウム溶液の飽和状態が破れ始めると鋼材は発錆する傾向があるといえそうである。表21は肉眼による観察が欠けているので単に pH と電位の関係を示すとどまった。

#### 2.5 考 察

実験 2~10より水酸化カルシウム溶液中の鋼材は水酸化カルシウムの飽和が保たれているときは電位が貴(溶媒が水道水るとき  $-100 \sim -200$  mV, 溶媒が海水るとき  $-300 \sim -400$  mV, いずれも海水塩化銀電極基準)となり全く発錆しないが、飽和が破れると電位の低下を来たすとともに発錆することがわかった。これに対して Heyn & Bauer<sup>8)</sup> は鋼材腐食阻止に必要な水酸化カルシウムの臨界濃度は  $0.05 \sim 0.1$  g/100 g,  $\text{H}_2\text{O}$  (g/100 g,  $\text{H}_2\text{O}$  は水 100 g 中に溶解した溶質のグラム数) であることを測定している。20°C 水酸化カルシウムの溶解度は表

表 20 pH および銅材電位測定結果 (電位の単位は -mV, 海水塩化銀電極基準)

測定項目	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	補正電位 (mV)	浸漬時間 (min)
pH	12.8	12.6	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.9		1
電位	382	480	398	373	394	394	392	408	- 2	1
pH	12.8	12.6	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.9		46
電位	342	362	362	448	422	478	454	380	+ 4	46
電位	263	372	288	435	435	470	492	465		
電位	264	495	310	518	552	630	700	640	- 8	2,820
観 察		発錆		発錆	発錆	発錆	発錆	発錆		
pH	12.80	12.76	12.50	12.14	11.85	11.60	10.42	12.2		
電位	276	514	315	655	620	675	642	630	+ 5	4,465
pH	12.80	12.72	12.48	11.60	11.14	10.68	9.82	10.5		4,465
pH	12.88	12.72	12.20	10.80	9.90	9.72	9.09	9.72		7,121
電位	300	527	274	650	620	660	680	630	+16	7,121
電位	322	520	258	655	620	675	680	630	+ 5	7,191
電位	375	522	342	670	638	642	695	645	+ 8	8,531
pH	12.90	12.78	11.50	9.70	9.52	9.30	8.70	9.18		8,531
電位	280	258	605	670	615	625	695	690	+ 5	10,126
電位	274	470	685	695	665	720	710	660	+ 2	
電位	292	566	690	670	675	690	680	640	-28	18,666
pH	12.64	12.48	9.32	8.68	8.62	8.64	8.90	9.70	-23	22,956
電位	160	622	695	675	690	700	680	625	-23	22,956

表 21 pH および銅材電位測定結果 (電位の単位は -mV, 海水塩化銀電極基準)

測定項目	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	補正電位 (mV)	浸漬時間 (min)
pH	12.88	12.72	12.20	10.28	9.90	9.72	9.09	9.72		0
電位	765	695	630	580	572	608	575	615	+16	1
電位	740	245	400	586	570	600	575	612	+ 5	11
電位	322	270	347	593	592	600	585	595	+36	56
電位	238	262	350	588	594	610	590	602	+10	158
電位	238	280	355	595	602	610	595	600	+10	256
電位	230	246	496	596	615	625	615	618	+ 8	1,410
pH	12.90	12.78	11.50	9.70	9.52	9.30	8.70	9.18		1,410
電位	210	246	575	605	635	690	632	620	+ 5	2,935
電位	274	508	665	630	645	655	635	622	+ 2	
電位	284	504	710	630	640	640	620	600	-28	8,600
pH	12.64	12.48	9.32	86.8	8.62	8.64	8.90	9.70	-23	12,875
電位	416	495	715	660	675	660	640	615	-23	12,875

2に示すように 0.165g/100g, H<sub>2</sub>O であるから Heyn & Bauer が求めた 臨界濃度は飽和量の 30~60% の水酸化カルシウム濃度に相当し、このときの pH<sub>1</sub> は 12 付近である。また Pourbaix<sup>9)</sup> は熱力学の立場から pH 鋼材電位の関係図を 図 13 のように示している。図13は Fe<sup>++</sup> に限らずすべて溶存イオンの平衡濃度が 10<sup>-6</sup>g·ion/l を基準としてこれ以下の濃度の場合には腐食は実際は無視できるという考え方に立って作られたもので、金属が素地のままで安定に存在する領域 (素地領域)、難溶性被膜ができてそのために上述の基準からみて腐食が無視できる領域 (不動態化領域) ならびに腐食領域とに分割されている。このような分割領域は当然溶存イオンの平衡濃度基準値によって変わってくるが、最も重要な点は Pourbaix の結論はすべて可逆平衡電位を基礎として得られたものであるから実際にはある有限な腐食電流が流れているからこれにはそれに相当した過電圧の補正をしなければならないということである<sup>9)</sup>。したがって図13からはあくまでも定性的な腐食傾向しかわからないが、水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材は溶媒の塩化物含有の有無に関係なく十分不動態域に保たれていることがわかり肉眼による観察結果と一致する。以上のように Heyn & Bauer や Pourbaix の検討は定性的な

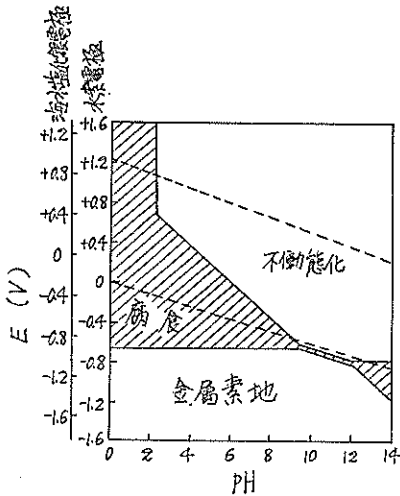


図 13 鉄の金属素地、腐食および不動態化領域 (by M. Pourbaix)

表 22 水酸化カルシウム溶液中の鋼材腐食量 (by R. Shalon & M. Raphael<sup>11)</sup>)

水酸化カルシウム溶液の pH	重量減少量 (%) (3 カ月後)	
	空気量 (少)	空気量 (多)
10.0	0.74	2.46
10.5	0.81	2.20
11.0	0.30	2.00
11.5	0.10	1.80
12.0	0.02	0.02
12.65	0.02	0.01

ものであるが R. Shalon & M. Raphael<sup>11)</sup> は次のように定量的な検討を加えている。すなわち pH~鋼材腐食量について表 22 の関係を示している。これら一連の実験より腐食阻止に必要な pH 値を表 23 のように発表している。表22より水酸化カルシウム溶液の飽和が破れると発錆する傾向のあることがわかり 2 章の実験結果と一致する。表22, 23 によれば水酸化カルシウム溶液の飽和が破れても pH が 11.5 (水酸化カルシウム溶液中の空気量が少ない場合で R. Shalon らはセメント硬化体のかぶりの厚い場合に相当するとしている) または 12.0 (水酸化カルシウム溶液中の空気量が多い場合でセメント硬化体のかぶりの薄い場合に相当すると R. Shalon らは考えている) までは鋼材腐食量は小さい。したがって腐食量が

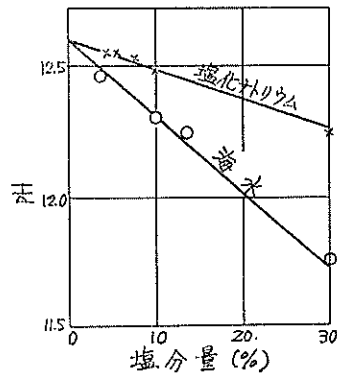


図 14 pH におよぼす塩分量の影響 (by R. Shalon & M. Raphael)

表 23 腐食阻止に必要な pH 値 (by R. Shalon & M. Raphael<sup>11)</sup>)

溶 液	Ca(OH) <sub>2</sub>		海水を用いたコンクリート抽出液		Ca(OH) <sub>2</sub> +3.6%NaCl	
	少	多	少	多	少	多
空 気 量						
pH 限 界 値	≥11.5	12.0	12.6	12.75	12.6	できるだけ大

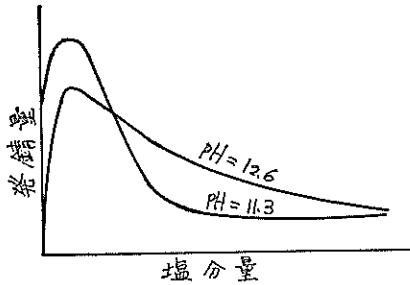


図 15 発錆量に対する pH, 塩分量の影響  
(by R. Shalon & M. Raphael)

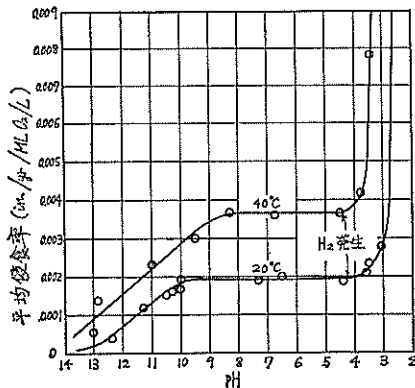


図 16 軟鋼の腐食に影響する pH の影響

小さい範囲の pH 最少値を発錆阻止に必要な pH 値としている。この外 図 14 に示すように水酸化カルシウムの pH 値は溶媒の含塩量が増えるにつれて次第に低下する傾向のあることや 図 15 に示すように水酸化カルシウム溶液中の鋼材腐食量は溶媒のある含塩量に対して最高値を示す傾のあることなども述べている。Uhlig<sup>10)</sup>によれば pH~鋼材腐食速度は 図 16 のようになり pH=12~13 付近では中性環境のときの  $1/5 \sim 1/10$  程度の腐食速度のあることを示している。また表 23 によれば水酸化カルシウム溶液中に塩化物が含まれると腐食阻止に必要な pH 値は 12.0 以上で、これは飽和状態に相当する。一方 2 章の実験によれば水酸化カルシウム溶液の溶媒に塩化物が含まれるとき浸液中鋼材の電位は溶媒に塩化物が含まれないときの電位より 200 mV 程度卑となる傾向があることがわかった。これに対して H. F. Finley<sup>11)</sup> は塩化物は不動態域におかれた鋼材表面に生成する保護被膜を浸食する外、陽極減極剤 (anodic depolarizer) としての減極作用があるために腐食電流を増大させると述べている。したがって塩化物の存在は水酸化カルシウム溶液が飽和であれば浸漬鋼材の発錆は阻止されるけれども以上のように電位の低下, pH の低下や陽極減極作用などがある

ために防食上好ましくないとされる。

### 3. セメント硬化体中の鋼材腐食

2. で検討したアルカリ溶液 (とくに水酸化カルシウム溶液) 中の鋼材腐食傾向の検討にひきつづいてセメント硬化体中の鋼材腐食について検討することにした。セメント硬化体中の鋼材腐食についてはこれまでいろいろ検討されてきているがほとんどセメント硬化体 1 層の場合に限られている。しかしながら港湾における鋼材の腐食環境は上からスプラッシュ・ゾーン、タイダル・ゾーン、海水および海底泥層よりなる複合層である。したがってセメント硬化体中の鋼材腐食の検討に際しても鋼材がおかれる次の 3 つの場合を考慮する必要がある。

すなわち

- (1) セメント硬化体の中に鋼材が包まれる場合
- (2) 鋼材がセメント硬化体と海水 (または河水) または海底泥層の 2 層に接する場合
- (3) 鋼材がセメント硬化体、海水 (または河水)、海底泥層の 3 層に接する場合

したがって以下のように 3 つの場合について実験を進めて行なった。

#### 3.1 セメント硬化体 1 層の場合

セメント硬化体 1 層中の鋼材腐食傾向は 3.2 (1 層の場合の考察および過去の検討結果) に示すように、これまでに室内または野外における、短期または長期の実験、実際構造物についての調査などいろいろ行なわれてきており、さらに実施中のものもある。したがってここではあくまでも多層の中の 1 層であるセメント硬化体中鋼材の腐食傾向の検討に進む前段階の意味からアルカリ溶液中の場合にひきつづいて主として鋼材電位の面からセメント硬化体 1 層中鋼材の腐食傾向を検討してみた。

#### 実験 11 古いセメント硬化体中の鋼材電位

セメント硬化体の配合および埋設鋼材の形状、寸法を表 24 に示す。埋設鋼材片の一端にあらかじめ測定用電線が 1 本接続され電線と鋼材の接続部分はリゴラック樹脂で絶縁のために被覆された。ただし鋼材が針金の場合は 1 本の針金 ( $\phi 1 \text{ mm}$  程度) の大半がセメント硬化体中に入り一部はセメント硬化体より出ている。この出ている針金部分はセメント硬化体を浸液に入れる場合常に空中にあるように留意した。かぶりはセメント硬化体の寸法が  $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  のときは薄いところで 3 cm, 厚いところで 7 cm,  $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$  のときは薄いところで 1 cm, 厚いところで 2 cm (鋼材が針金

表 24 供 試 体

No.	浸 漬 日 年・月・日	セメント硬化 体寸法 (cm)	配 合		側面被覆	鋼 材	
			C : S	W/C (%)		(cm)	表 面
A	1959・	15×15×15	1 : 2	70		5×9×0.1	発 錆
B	1959・11・6	15×15×15	1 : 2	70			
C	1959・11・4	15×15×15	1 : 2	70		5×9×0.1	
D	1959・11・6	15×15×15	1 : 2	70			
E-a	1959・11	φ15×30	1 : 2	70			
E-b	1959・11	φ15×30	1 : 2	70			
F-a	1959・9・15	4×4×16	1 : 2	50		2×5×0.1	
F-b	1959・9・15	4×4×16	1 : 2	50		φ0.1の針金	
F-c	1959・9・15	4×4×16	1 : 2	50		φ0.1の針金	
G-a	1959・9・14	4×4×16	1 : 2	70		2×5×0.1	
G-b	1959・9・14	4×4×16	1 : 2	70		φ0.1の針金	
G-c	1959・9・14	4×4×16	1 : 2	70		φ0.1の針金	
H	1959・10・25	4×4×16	1 : 2	70			
I-a	1959・10・22	4×4×16	1 : 2	70	3方	2×5×0.1	
I-b	1959・10・22	4×4×16		170		2×5×0.1	
I-c	1959・10・25	4×4×16		150		2×5×0.1	
I-d	1959・10	4×4×16	1 : 2	70	2方	2×5×0.1	
I-e	1959・10	4×4×16			3方	2×5×0.1	
I-f	1959・10	4×4×16	1 : 1	70		2×5×0.1	
I-g	1959・10・7	4×4×16	1 : 2	70		2×5×0.1	
J	1959・10・22	4×4×16		150*		2×5×0.1	

\* W/C+P (%)

表 25 鋼 材 電 位 (-mV)  
(海水塩化銀電極基準)

No.	海 水 浸 漬 期 間 (yr)			観 察
	5	5.5	6	
A	—	468	500	キレツ
B	—	75	102	
C	—	194	230	
D	—	114	160	
E-a	451	500	395	
E-b	428	400	362	
F-a	505	770	640	
F-b	552	420	245	
F-c	299	475	152	
G-a	510	490	496	
G-b	392	390	102	
G-c	—	—	—	
H	—	610	500	
I-a	321	350	390	
I-b	687	740	740	
I-c	623	740	680	
I-d	392	115	150	
I-e	371	340	354	
I-f	581	590	620	
I-g	241	700	860	
J	—	780	740	

の場合は薄いところで2cm)であり、φ15cm×30cmのときは7cm~10cmである。(ただし、このかぶりは何れもセメント硬化体の側面方向についてである。)表24に示す側面被覆のところはセメント硬化体の側面をリゴラック樹脂で被覆して透水を制限した方向を意味するもので透水性と鋼材腐食の傾向を調べるために準備した。セメント硬化体はそれぞれ大文字のアルファベット記号の組毎に分けて次のようなガラス容器に浸漬した。このときの浸漬液はいずれも海水である。セメント硬化体寸法とガラス容器寸法は次の通りである。

セメント硬化体	ガラス容器
φ 15 cm × 30 cm	φ 50 cm × 40 cm
15 cm × 15 cm × 15 cm	φ 30 cm × 20 cm
4 cm × 4 cm × 16 cm	φ 30 cm × 20 cm

以上のように作成したセメント硬化体の8割(縦方向)が海水に浸漬するようにガラス容器に設置して5年から6年後の鋼材電位を測定してみると表25に示す値であった。表25によればセメント硬化体中鋼材電位は6年後でもいぜんとして-100~-200mVのように貴の値であるが、このような傾向はかぶりの厚いときの方が多く見られるようである。しかしNo. Aはかぶりが厚いにもかかわらず-500mVとなっているが、これは埋設前の鋼材表面状態によるのかセメント硬化体上面にキレツ



(最大幅 2mm 程度) が生じたことに起因するようと思われる。No. I の供試体グループからセメント硬化体について透水性と鋼材腐食の傾向の関係がうかがわれる。すなわち No. I について被覆の有無と鋼材電位を比較してみると次のようになる。

No.	被覆した側面	単極電位 (-mV)
I-a	3方	390
I-d	2方	150
I-e	3方	354
I-b	なし	740
I-c	なし	680
I-f	なし	620
I-g	なし	860

上の比較からわかるようにセメント硬化体の側面を被覆して透水方向を制限するときの鋼材電位は -400mV より貴の値に6年後でも保たれているが、セメント硬化体の側面を被覆せずに透水方向を制限しない場合は5年以内で卑な電位を示している。

**実験12** セメント硬化体を海水中または水道水中に浸漬するときの鋼材腐食 (1) (AE 剤を含まない場合)

#### 供試体

##### (1) 鋼材

鋼材は a: 鉄筋 ( $\phi$  9mm, 長さ 15cm) と b: 鋼板 (5cm $\times$ 18cm $\times$ 0.1cm) の形状, 寸法のものを用いた。材質はいずれも SS-41 である。

また鋼材の表面状態は次の各種がある。

- a: 発錆したものをワイヤ・ブラシで脱錆
- b: サンド・ペーパーで研磨後脱脂
- c: 黒皮付 (切口面だけは黒皮なし)
- d: 発錆のまま脱脂

##### (2) セメント硬化体

配合は次の割合で行ない所要量だけを手練りで調合した。( $\phi$  5cm $\times$ 10cm 供試体3コ分)

ポルトランド・セメント	520g
細骨材 (標準砂)	1,040g
水 (水道水または海水)	338g

形状, 寸法は次の2通りである。

- a:  $\phi$  5cm $\times$ 10cm
- b: 7cm $\times$ 18cm $\times$ 2cm

##### (3) 浸液

セメント硬化体を次の2種類の浸液に入れた。

- a: 海水
- b: 水道水

#### (4) 浸漬状態

セメント硬化体は 図 17, 18 に示すようにその8割が浸液に浸るように吊された。

a:  $\phi$  5cm $\times$ 10cm の場合は図17の通り。

b: 7cm $\times$ 18cm $\times$ 2cm の場合は図18の通り。

全供試体ともセメント硬化体より出ている鋼材部分 (図 17, 18 からわかるように空中に出ている) およびセメント硬化体上面はタール・エポキシ系塗料で被覆された。(セメント硬化体の側面および下面はそのままである) 浸漬容器の上部はビニール・シートで覆われた。

#### (5) 供試体一覧表

供試体の一覧表を表 26 に示す。表26に示すように供試体のうち No. A~G はそれぞれ単独浸漬と電気防食した場合に分かれている。

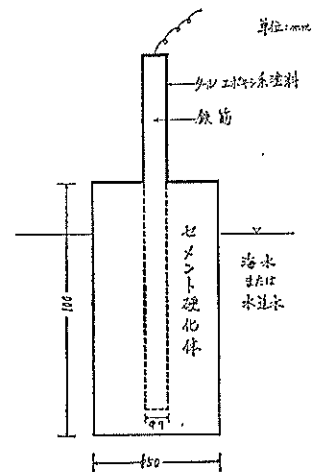


図 17 供試体浸漬状況 (1)

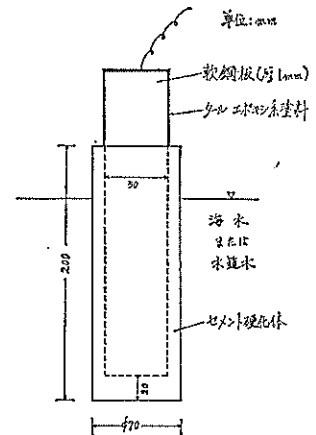


図 18 供試体浸漬状況 (2)

表 26 実験 11 の供試体一覧表

No.	鋼材		セメント硬化体				供試体数		脱型後浸漬するまでの期間 (day)
	形状	表面状態	形状	練り水	浸液	浸液状態	通電	無通電	
A	a	a	a	水道水	海水	a	9	7	3
B	b	b	b	水道水	海水	b	8	8	2
C	b	b	b	水道水	海水	b	8	8	4
D	a	b	a	水道水	海水	a	8	8	2
E	b	c	b	水道水	海水	b	8	8	2
F	a	b	a	海水	海水	a	8	8	2
G	b	b	b	海水	海水	b	8	8	—
H	a	a	a	水道水	海水	a	—	24*	—
I	a	b	a	水道水	海水	a	—	24*	—
J	a	d	a	水道水	海水	a	—	24*	—
K	a	b	a	水道水	水道水	a	—	24*	—
L	a	b	a	水道水	水道水	a	—	24*	—
M	a	d	a	水道水	水道水	a	—	24*	—

\* この中 4 コは乾燥による重量変化を測定するために空中に放置，残り 20 コを浸液した。

測定

測定項目は鋼材電位，抵抗変化，重量変化，セメント硬化体の表面観察，セメント硬化体の破壊による鋼材表面の観察であり，各項目についての測定方法は次の通りである。

(1) 鋼材電位

図 3 に示す要領で海水塩化銀電極に対する値を電位計で測定する。単位は  $-mV$  である。

(2) 抵抗変化

図 19 に示すように  $\phi 11mm \times 35mm$  の裸鋼材面をもつ一つの標準電極を浸漬液中に漬けてこの標準電極とセメント硬化体中に埋設する鋼材間の抵抗を A. C.ブリッジを用いて分極を起さないように測定する。この要領で浸漬時の抵抗に対する増減を継続測定した。A. C.ブリッジは港研式腐食計の抵抗測定部を使用した。単位は  $\Omega$  である。



図 19 抵抗測定用標準鉄電極 (左端部)

(3) 重量変化

セメント硬化体の空隙，吸水量などの一つの目安をつけるために脱型後の空中乾燥による重量変化を測定した。セメント硬化体は型枠に注型したものを 24 時間標準養生してから脱型後室内に放置した。このとき脱型時の重量を秤量しておき室内乾燥で一定となったときの重量を秤り，両者の差から重量減量を求めた。

(4) セメント供試体の表面観察

鋼材の腐食が進行してセメント硬化体表面から発錆が認められるものを肉眼により観察した。

(5) 破壊による鋼材表面の観察

水酸化カルシウム溶液について行なった鋼材電位と発錆との傾向をセメント硬化体中について確かめるために，鋼材の単極電位が  $-400mV$  より貴なグループと  $-400mV$  より卑なグループに属する供試体を破壊してセメント硬化体中に埋設されていた鋼材の表面を肉眼で観察した。セメント硬化体の破壊試験は 20t 油圧式強度試験機を用いて  $\phi 5cm \times 10cm$  の寸法のセメント硬化体は図 20 に示すように引張り強さ試験と同じ方法で加圧，破壊した。またセメント硬化体が  $7cm \times 18cm \times 2cm$  のときは図 21 に示すように曲げ試験と同じ方法で加圧，破壊した。

測定結果

(1) 鋼材電位

セメント硬化体中鋼材の単極電位測定結果を表 27~39 に示す。

表27 No. A の鋼材電位

No.	電 位 (-mV)												
	1 day	2 day	7 day	10 day	13 day	15 day	18 day	21 day	28 day	35 day	42 day	50 day	56 day
1	497	790	800	780	760	775	790	755	820	780	900	870	875
2	498	790	800	780	760	778	790	755	820	780	900	870	875
3	497	790	800	780	760	750	790	755	820	780	900	870	875
4	495	790	800	780	760	720	790	755	820	780	900	870	875
5	497	790	800	780	760	740	790	755	820	780	900	870	875
6	505	790	800	780	760	720	790	755	820	780	900	870	875
7	500	790	800	780	760	745	790	755	820	780	900	870	875
8	495	790	800	780	760	747	790	755	820	780	900	870	875
9	497	790	800	780	760	745	790	755	820	780	900	870	875
10	373	405	465	480	478	470	504	485	530	510	550	530	530
11	407	455	530	525	510	490	520	505	555	537	580	545	545
12	451	488	560	570	562	535	587	560	600	568	600	570	575
13	501	530	604	611	607	587	625	588	624	581	620	600	596
14	498	497	520	510	500	480	510	483	514	500	540	514	523
15	407	407	460	475	478	470	503	488	540	522	560	530	515
16	370	393	495	510	515	510	545	527	566	549	585	558	560

No. 13~16 は 122 日以降セメント硬化体中鋼材をアノード，銅板をカソードとなるように短絡したときの，開路

表 28 No. B の 鋼 材 電 位

No.	電 位 (-mV)													
	1 day	3 day	4 day	5 day	6 day	7 day	8 day	11 day	18 day	25 day	32 day	39 day	46 day	52 day
1	300	200	270	190	220	186	170	423	780	710	710	775	733	860
2	270	463	540	538	553	566	550	573	780	710	710	775	733	860
3	275	177	174	164	160	164	152	150	780	710	710	775	733	860
4	283	186	180	175	170	173	479	439	780	710	710	775	733	860
5	611	646	665	660	650	675	648	672	780	710	710	775	733	860
6	280	515	540	542	538	565	548	561	780	710	710	775	733	860
7	310	480	516	520	520	520	495	559	780	710	710	775	733	860
8	490	370	564	425	670	222	200	185	780	710	710	775	733	860
9	255	257	420	450	437	460	438	443	522	575	540	580	580	596
10	540	484	496	390	318	490	393	363	425	410	456	458	475	415
11	517	507	492	496	495	517	494	505	518	557	522	550	550	550
12	574	595	615	610	618	622	613	650	645	690	620	680	675	668
13	478	556	580	580	576	590	575	608	596	654	595	648	650	652
14	185	172	164	175	157	160	150	150	138	152	425	438	442	405
15	577	593	604	610	610	630	606	630	625	675	610	670	675	670
16	187	174	166	164	160	165	153	150	138	484	440	452	430	410

\* 破壊試験を行なった。

## (海水塩化銀電極基準)

電 位 (-mV)														No.
63 day	70 day	77 day	94 day	101day	108day	115day	122day	129day	136day	157day	221day	270day	432day	
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	1
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	2
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	3
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	4
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	5
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	6
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	7
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	8
877	874	878	882	882	875	878	870	870	873	980	870	828	662	9
538	540	550	558	558	550	550	548	542	549	596	562	550	618	10
547	540	553	568	568	555	554	550	547	550	596	640	482	367	11
579	577	572	565	565	550	538	532	528	520	506	424	440	272	12
605	610	613	630	630	618	618	322	320	403	450	482	470	545	13
528	528	532	540	540	531	538	309	320	403	450	482	470	572	14
505	508	502	552	552	551	570	336	321	400	450	482	470	525	15
542	531	521	511	511	500	500	242	321	401	450	482	470	572	16

後の電位である。

## (海水塩化銀電極基準)

電 位 (-mV)														No.	
59 day	66 day	73 day	80day	86day	93day	100day	107day	114day	121day	128day	149day	213day	262day		424day
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	1
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	2
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	3
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	4
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	5
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	6
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	7
785	992	1000	982	970	958	956	954	952	941	950	1055	934	914	870	8
605	590	590	602	600	588	582	592	608	600	600	670	588		880	9
422	300	282	277	452	408	448	450	440	398	318	325	620	574	560	10
552	560	562	575	562	544	540	549	542	520	593	635	645	628	595	11
657	652	659	662	655	641	639	642	642	637	646	695	516	642	605	12
660	652	657	659	655	645	652	650	658	660	668	740	*			13
300	280	282	298	300	308	298	304	332	350	379	450	492	650	680	14
665	662	660	665	655	649	642	651	648	642	643	695	485	620	610	15
318	259	242	242	440	270	256	394	342	400	425	300	510	525	642	16

表 29 No. C の鋼材電位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)													
	7 day	14day	21day	28day	35day	42day	49day	56day	63day	70day	91day	143day	192day	354day
1	165	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
2	158	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
3	170	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
4	165	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
5	162	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
6	152	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
7	158	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
8	179	830	782	808	810	845	850	852	875	822	920	1024	1080	1060
9	670	698	718	717	710	711	712	711	709	710	790	700	708	700
10	427	520	550	567	560	564	560	558	570	562	596	628	628	610
11	160	152	365	406	308	232	390	296	235	211	475	352	400	645
12	180	180	389	450	480	500	510	504	550	542	560	—	—	—
13	160	155	158	155	150	148	384	302	252	371	200	—	490	—
14	160	388	492	285	210	188	178	420	417	497	572	514	585	615
15	167	162	160	150	365	250	220	202	180	394	405	306	330	517
16	155	150	150	142	395	400	299	248	220	210	305	340	418	620

表 30 No. D の鋼材電位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)													
	7 day	14day	21day	28day	35day	42day	49day	56day	63day	70day	91day	143day	192day	354day
1	131	86	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
2	192	95	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
3	143	90	858	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
4	193	90	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
5	155	100	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
6	149	90	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
7	178	94	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
8	182	85	958	952	920	834	762	645	521	786	755	538	968	680
9	182	88	260	272	272	280	292	320	311	307	325	362	380	119
10	160	80	280	349	376	362	304	288	279	260	270	558	440	519
11	150	95	562	610	650	554	465	432	405	432	398	376	486	500
12	187	80	285	329	350	210	198	184	168	178	170	566	440	378
13	149	100	192	212	208	200	204	202	200	202	230	208	230	—
14	138	88	184	199	200	201	212	218	216	212	490	542	490	490
15	179	88	248	296	324	348	354	356	347	349	358	419	342	482
16	161	88	201	209	206	215	224	238	240	230	290	448	508	290

表 31 No. E の鋼材電位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)													
	7 day	14day	21day	28day	35day	42day	49day	56day	63day	70day	91day	143day	192day	354day
1	522	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
2	565	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
3	477	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
4	133	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
5	520	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
6	561	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
7	547	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
8	452	990	924	890	842	820	792	762	742	722	695	594	696	700
9	604	618	639	642	628	628	636	632	631	629	695	640	626	710
10	589	579	585	585	570	570	575	578	573	578	620	610	624	565
11	353	286	390	360	419	388	485	472	358	388	380	414	480	478
12	548	548	560	559	540	542	550	546	555	552	595	572	592	692
13	410	422	480	437	490	514	518	500	478	502	525	542	578	542
14	492	486	507	513	490	482	476	484	478	479	506	618	612	485
15	496	475	510	499	463	448	432	420	448	430	470	424	450	527
16	495	499	498	499	481	469	482	490	502	518	585	580	608	643

表 32 No. F の鋼材電位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)													
	3 day	10day	17day	24day	31day	38day	45day	52day	59day	66day	87day	151day	200day	362day
1	480	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
2	349	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
3	431	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	—
4	387	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
5	340	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
6	448	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
7	588	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
8	358	1012	965	953	932	920	930	720	905	910	965	755	1008	710
9	592	660	748	787	792	790	778	770	757	742	670	675	776	410
10	618	848	882	886	850	845	846	840	827	847	895	622	458	373
11	502	845	829	811	784	770	750	730	717	701	910	552	460	670
12	538	820	875	892	882	866	852	842	831	823	835	386	508	330
13	426	630	652	648	618	598	588	562	526	507	530	372	400	360
14	497	745	668	575	514	490	470	440	430	405	400	500	464	378
15	532	492	506	512	502	508	508	512	515	513	535	475	390	352
16	452	575	532	523	512	505	505	506	500	496	550	475	532	480

表 33 No. G の 鋼 材 電 位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)													
	1 day	3 day	10day	17day	24day	31day	38day	45day	52day	57day	94day	115day	228day	390day
1	405	440	837	862	888	376	896	900	532	519	540	1140	640	590
2	382	385	837	862	888	379	896	900	532	519	540	1140	640	590
3	245	508	837	862	888	608	896	900	532	519	540	1140	640	590
4	420	492	837	862	888	504	896	900	532	519	540	1140	640	590
5	380	430	837	862	888	402	896	900	532	519	540	1140	640	590
6	396	472	837	862	888	359	896	900	532	519	540	1140	640	590
7	349	390	837	862	888	392	896	900	532	519	540	1140	640	590
8	400	453	837	862	888	360	896	900	532	519	540	1140	640	590
9	370	431	538	560	580	568	798	586	582	581	582	630	600	540
10	370	350	311	262	262	250	290	314	340	377	479	540	430	492
11	400	466	512	545	540	510	500	498	480	471	471	490	624	600
12	374	428	400	382	410	420	430	464	484	498	517	400	650	470
13	388	445	335	318	277	260	424	340	384	345	328	370	466	532
14	349	410	492	417	364	340	350	364	388	396	405	455	530	535
15	374	392	338	268	358	232	362	266	270	394	387	305	370	540
16	370	352	283	—	—	270	310	344	326	398	409	480	568	530

表 34 No. H の 鋼 材 電 位 (海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)									
	1 day	2 day	3 day	4 day	10 day	13 day	41 day	77 day	105 day	154 day
1	199	528	549	562	602	560	415	494	488	410
2	200	224	242	248	268	316	516	510	472	432
3	208	242	232	242	258	272	434	430	390	390
4	201	258	266	278	379	427	572	576	524	402
5	198	512	532	528	472	360	332	402	400	380
6	216	228	234	236	264	310	491	552	514	468
7	214	198	214	216	214	244	504	430	530	392
8	216	270	274	274	289	232	512	490	490	460
9	230	530	569	552	360	312	438	548	414	420
10	201	494	390	320	300	348	484	535	502	428
11	196	200	208	208	218	229	440	456	475	492
12	200	220	242	254	364	380	412	426	402	464
13	197	254	268	270	278	290	526	570	558	420
14	195	196	214	218	248	292	430	536	530	521
15	198	210	230	230	234	258	420	495	545	510
16	195	224	242	248	308	352	494	542	500	448
17	180	468	490	334	259	240	250	460	474	462
18	191	202	230	230	268	322	492	518	512	492
19	200	195	214	224	238	267	500	568	532	450
20	213	240	260	268	390	450	568	—	—	—

表35 No. I の鋼材電位  
(海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)							
	1 day	2 day	6 day	26day	60day	90day	139day	301day
1	160	205	232	232	284	322	350	475
2	160	205	235	202	210	210	270	406
3	164	218	224	200	286	246	360	340
4	160	358	468	250	200	224	250	278
5	160	198	198	175	342	510	490	403
6	164	212	195	194	240	270	370	520
7	158	226	228	295	230	308	380	432
8	168	230	220	445	226	538	450	510
9	177	214	178	214	196	224	250	507
10	164	208	220	214	225	260	290	490
11	156	198	190	188	280	354	330	410
12	148	146	176	150	289	236	210	160
13	154	175	186	162	202	340	230	325
14	158	174	174	162	186	245	240	470
15	154	170	210	208	254	384	280	440
16	166	204	302	208	264	290	455	525
17	162	202	218	175	232	254	430	497
18	155	180	182	158	130	152	152	220
19	155	155	155	165	*	—	—	—
20	150	206	215	246	180	230	260	388

\* 27日目に破壊試験を行なった。

表37 No. K の鋼材電位  
(海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)							
	1 day	2 day	6 day	26day	62day	90day	139day	
1	162	148	166	185	316	440	362	
2	162	160	172	156	168	200	194	
3	175	162	180	196	170	230	188	
4	164	205	184	173	148	202	172	
5	152	142	164	146	135	170	160	
6	165	146	174	145	122	135	110	
7	170	174	162	184	175	220	298	
8	138	184	—	294	222	270	222	
9	134	150	172	234	230	370	296	
10	165	188	208	340	222	252	300	
11	125	162	192	360	192	234	164	
12	155	198	222	394	368	350	175	
13	150	136	176	215	148	220	164	
14	190	185	196	252	194	210	170	
15	170	142	180	216	170	210	210	
16	160	148	194	268	164	160	138	
17	172	148	172	180	102	130	148	
18	164	150	170	127	78	90	98	
19	140	148	174	212	144	162	145	
20	145	132	166	192	214	172	168	

表36 No. J の鋼材電位  
(海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)					
	1 day	5 day	25 day	61 day	89 day	138 day
1	164	214	300	414	442	470
2	160	225	553	555	570	565
3	200	448	408	275	459	530
4	155	547	524	456	512	478
5	144	224	284	346	422	522
6	152	196	300	336	394	360
7	136	251	340	514	545	575
8	142	225	548	518	528	530
9	142	472	464	422	550	590
10	174	610	645	470	555	535
11	136	502	512	575	550	542
12	156	468	376	480	524	544
13	146	406	292	504	555	588
14	135	228	300	360	420	598
15	148	199	395	480	505	489
16	148	190	312	462	500	514
17	525	620	524	600	545	434
18	140	212	292	410	456	472
19	278	574	628	402	464	496
20	144	306	320	468	500	502

表38 No. L の鋼材電位  
(海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)					
	1 day	5 day	25 day	61 day	89 day	138 day
1	122	—	292	524	490	400
2	134	218	504	490	492	340
3	95	150	368	523	556	500
4	140	186	345	490	510	382
5	96	135	202	400	410	300
6	102	161	206	462	480	354
7	112	—	244	426	300	302
8	90	168	420	522	456	380
9	132	132	198	300	278	260
10	114	147	396	566	560	490
11	92	128	174	264	290	310
12	116	150	228	420	380	260
13	123	149	184	323	330	286
14	106	122	168	252	310	280
15	114	140	230	470	419	290
16	112	129	185	426	410	320
17	102	142	202	434	392	308
18	100	134	214	422	400	292
19	110	171	208	392	290	224
20	125	—	388	392	330	282



表 39 No. M の鋼材電位  
(海水塩化銀電極基準)

No.	電 位 (-mV)					
	1 day	4 day	24 day	60 day	88 day	147 day
1	198	173	218	240	235	332
2	214	184	176	230	208	272
3	156	164	262	316	275	288
4	168	164	240	325	280	296
5	170	155	188	268	266	188
6	212	194	214	292	265	300
7	196	176	158	194	270	252
8	160	155	193	282	270	240
9	216	178	205	260	235	238
10	175	165	184	262	250	350
11	212	184	194	290	302	370
12	196	176	165	246	210	278
13	224	210	208	342	314	328
14	230	185	254	372	330	335
15	262	306	262	312	256	244
16	185	170	222	216	280	212
17	208	160	180	174	190	285
18	194	164	165	218	258	364
19	176	160	216	300	272	350
20	168	162	215	286	282	242

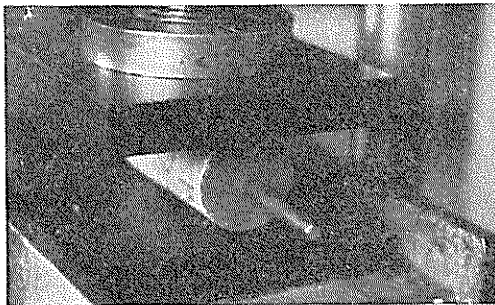


図 20 セメント硬化体の破壊試験 (1)



図 21 セメント硬化体の破壊試験 (2)

表27~33によれば単独浸漬のセメント硬化体中鋼材の電位は経日とともにむらがあるようであるが、これはセメント硬化体上部より出ている鋼材（タール・エポキシ系の塗料で被覆）表面の乾湿状況によるものと考えられる。すなわちセメント硬化体中鋼材の電位変化よりも塗膜面下または裸鋼材部分の発錆による電位変化が湿润なときには大きく影響してくると思われる。したがってセメント硬化体中鋼材の電位を正確に知るにはセメント硬化体外の鋼材部分を完全に絶縁させた状態（たとえば完全にセメント硬化体中に密封状態）で測定しなければならない。かぶりが十分と見られる表 27, 30, 32 の単独浸漬の測定電位が貴である供試体では裸鋼材部分の影響がほとんど表われていないものと予想される。また表27~33で電気防食をしている供試体の電位の経日変化は防食電流密度の大小によるものである。これら電気防食をしている供試体の電位が No. 1~No. 8 (または No. 9)とも同一であることは供試体が互に接続されているためである。一方表34~39ではセメント硬化体はガラス水槽に設置されてセメント硬化体外の鋼材および電線との接続部分はタール・エポキシ系塗料で入念に被覆されたが、やはり水槽をビニール・シートで覆ったため塗料の劣化とともにところどころ空中鋼材部に発錆が見られるようになった。したがって鋼材電位は浸漬時間の経過とともに次第に卑となり大体1年後にはほとんど-400mV以下である。この場合も正確にセメント硬化体中鋼材の電位を求るには上述の通りセメント硬化体外の鋼材部分を完全に絶縁することが必要である。たとえば No. I-1 は1年後の測定電位は表 35 に示すように-475mVでありセメント硬化体外の鋼材には塗膜が破れて発錆が散見される状態である。セメント硬化体より出ている鋼材部分を十分に乾燥してから電位を測定すると-265mVのように貴の値となる。したがってセメント硬化体中鋼材電位を長期にわたって測定するには後述する実験のように鋼材片に測定用電線を接続し接続部分を十分に絶縁、被覆してから鋼材を全部セメント硬化体中に埋設する方法が好ましいと思われる。

## (2) 抵抗

抵抗測定値( $\Omega$ )はそのままでは相互間の比較に不要であるので供試体浸漬後最初の抵抗( $\Omega$ )を100とした数値に換算した。抵抗比を表 40~52 に示す。

上表から抵抗比を見てみるとある場合は浸漬期間の経過とともに減少したある場合は増加しているが、これはセメント硬化体の脆型から浸漬するまでの空中に放置する期間によるものでこの期間が長いほど減少の例となりこの期間の短いほど増加の例となる。したがって上表

の抵抗変化比は表26に示す供試体の空中放置期間を参照して見る必要がある。表40~46に示す No. A~G ではそれぞれ No. 1~No. 8 (ただし No. A のみは No. 1~No. 9) までは電気防食をしており No. 9~No. 16 (No. A のみは No. 10~No. 16) は電気防食をしていないのであるが、上表から見る範囲では電気防食実施の有無と抵抗変化比との間にはとくに関係はないようである。

### (3) 重量変化

No. H~No. M のそれぞれ No. 21~No. 24 の4コづつは浸液せずに空中に放置して乾燥させた。乾燥重量は室内湿度におけるものであるがほぼ3カ月後に最小重量を示したので初期重量と3カ月後の重量との差を求めて初期重量に対する百分率で示すと表53のようになる。表53によればセメント硬化体の室内乾燥による水分の逸散は1~4%であるが、初期重量測定が脱型後1~2日経過すると3~4%、3~5日後で2%、7日後で0.2%程度となる。

### (4) セメント硬化体表面の観察

No. A~No. G を浸漬半年後に肉眼で観察したところ表54に示すような発錆状況であった。また No. H~No. M について1年後にやはり肉眼観察をしたところ、ほとんどセメント硬化体表面には発錆の痕跡は認められないがセメント硬化体外の鋼材に部分的な発錆があった。セメント硬化体外鋼材の発錆傾向としては No. A~No. G では主にセメント硬化体に接近した付近に発錆したが、No. H~No. M ではセメント硬化体より離れた付近が発錆した。

### (5) 破壊試験による鋼材表面の観察

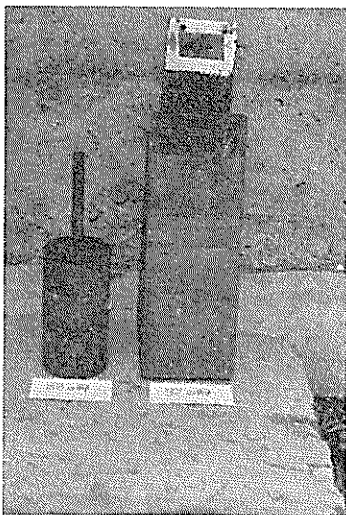


図 22 破壊前の供試体例 (表)

破壊前後の供試体表面を 図 22~37 に示す。

破壊前の鋼材電位と破壊後の鋼材表面の観察結果を表55に示す。表55によればアルカリ溶液について得た鋼材電位と鋼材の発錆の傾向はセメント硬化体についてもあてはまることがわかる。すなわち鋼材の電位が  $-500$  mV より貴なときには発錆は認められないが  $-500$  mV より卑なときには発錆が認められる。したがってこの傾向は表55と表27~39の鋼材電位測定結果を参照するとセメント硬化体内外の鋼材発錆の有無のチェックに適用できるように思われる。図58,64参照



図 23 破壊前の供試体例 (裏)



図 24 D-13 の破壊前  
(D-無-5 は D-13 に相当する)

表 40 No. A の

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )											
	1 day	7 day	10 day	13 day	15 day	18 day	21 day	28 day	35 day	42 day	56 day	63 day
1	100	74	74	74	74	78	77	81	78	81	81	85
2	100	86	86	84	82	86	85	89	86	91	93	96
3	100	79	77	79	77	75	74	76	76	82	82	86
4	100	85	87	85	85	87	86	92	89	93	100	104
5	100	84	82	82	79	79	81	82	82	84	86	89
6	100	77	80	81	81	81	82	85	85	88	88	91
7	100	51	48	46	45	45	45	46	45	47	49	50
8	100	77	77	75	75	76	77	81	80	85	87	88
9	100	69	74	71	72	72	72	77	77	77	81	83
10	100	92	93	93	92	93	97	98	110	103	106	210
11	100	77	77	76	76	77	76	82	82	83	87	87
12	100	85	85	85	83	85	88	92	92	96	100	108
13	100	81	81	80	79	82	80	84	85	88	89	90
14	100	83	85	82	81	80	83	89	89	92	92	100
15	100	83	82	81	75	79	77	82	79	86	89	89
16	100	85	84	80	78	80	80	81	80	87	90	93

表 41 No. B の

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )													
	1 day	3 day	4 day	5 day	6 day	7 day	8 day	11 day	18 day	25 day	32 day	39 day	46 day	52 day
1	100	114	162	122	122	122	133	143	171	186	224	—	226	238
2	100	103	163	99	103	103	113	115	132	149	161	—	178	190
3	100	112	159	118	126	129	139	151	187	204	222	—	244	257
4	100	115	158	116	123	124	135	142	168	180	200	—	225	235
5	100	104	159	100	108	104	119	122	141	154	168	—	192	202
6	100	128	197	121	137	129	143	154	176	197	216	—	252	264
7	100	133	243	133	142	140	154	167	198	214	239	—	267	284
8	100	120	207	125	137	135	152	166	202	223	246	—	277	284
9	100	129	105	136	146	148	159	172	204	214	278	238	256	272
10	100	131	81	143	153	152	162	176	215	225	267	250	267	284
11	100	131	138	145	150	150	162	169	210	218	256	246	259	281
12	100	125	196	130	133	132	140	148	175	192	208	203	233	258
13	100	127	168	128	137	140	150	153	184	197	214	214	231	250
14	100	136	139	150	154	161	171	189	231	245	274	274	294	314
15	100	144	146	146	146	146	164	167	200	209	236	240	273	291
16	100	133	135	146	152	157	163	179	217	230	258	261	299	299

抵 抗

抵 抗 ( $\Omega$ )												No.
70 day	77 day	95 day	101 day	108 day	115 day	122 day	129 day	136 day	157 day	221 day	270 day	
85	85	83	93	96	93	92	96	93	96	108	205	1
96	89	93	96	93	97	93	100	97	99	97	192	2
86	82	86	84	84	84	90	93	89	97	94	175	3
104	100	98	101	97	92	99	104	104	107	99	178	4
89	83	94	100	96	95	100	100	96	100	94	159	5
94	88	94	100	95	94	95	100	96	103	105	222	6
49	49	50	54	53	55	53	55	55	55	53	191	7
88	87	92	94	94	91	91	100	96	108	101	208	8
87	85	91	88	86	86	86	93	93	94	101	238	9
113	107	110	113	113	113	116	120	117	120	100	198	10
91	89	89	87	91	87	85	87	87	91	91	274	11
108	108	114	128	115	115	109	121	120	120	108	203	12
91	91	93	93	93	92	98	11	11	103	92	219	13
100	99	97	99	99	99	100	10	10	111	78	236	14
89	86	94	91	91	89	89	9	9	94	73	205	15
95	90	96	92	92	92	92	8	9	20	85	194	16

抵 抗

抵 抗 ( $\Omega$ )														No.
59 day	66 day	73 day	80 day	86 day	93 day	100day	107day	114day	121day	128 day	149 day	213 day	262 day	
257	238	256	277	276	296	286	286	296	297	281	295	274	1090	1
205	195	215	230	242	260	253	255	262	276	264	276	308	2070	2
281	252	279	285	290	299	296	298	296	308	294	286	278	1680	3
255	230	255	265	275	284	282	282	292	298	290	290	282	1880	4
224	213	244	262	276	284	295	295	305	321	316	331	321	2180	5
286	263	293	312	330	346	357	357	352	384	379	394	371	1860	6
301	271	294	305	324	327	336	332	330	358	341	352	325	—	7
308	264	213	322	334	344	342	343	345	357	344	362	296	320	8
290	282	296	312	335	330	328	341	346	365	353	353	—	2620	9
307	284	305	318	335	334	339	339	339	353	335	341	307	2630	10
300	275	300	312	330	335	330	337	342	353	338	360	330	—	11
292	270	308	325	358	370	383	386	386	408	398	421	—	—	12
272	257	279	293	314	320	324	329	317	339	332	350	—	2420	13
340	309	324	340	356	363	363	363	356	373	356	373	303	—	14
318	302	327	345	373	374	396	389	410	427	412	436	—	—	15
320	302	320	337	344	354	357	352	352	364	348	361	326	2930	16

表 42 No. C の 抵 抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )												
	7 day	14 day	21 day	28 day	35 day	42 day	49 day	56 day	63 day	70 day	91 day	143 day	192 day
1	100	101	116	136	153	172	164	173	191	202	203	139	228
2	100	93	106	122	136	141	144	156	172	170	186	134	218
3	100	94	110	132	148	151	164	174	189	186	204	147	226
4	100	91	104	122	133	142	150	153	168	165	180	130	183
5	100	86	101	121	129	138	142	153	161	160	174	126	206
6	100	90	99	117	132	138	141	149	167	160	187	122	206
7	100	87	97	120	143	136	157	163	187	190	220	206	387
8	100	98	109	130	144	149	156	165	180	177	196	140	196
9	100	90	106	117	114	122	123	133	142	140	146	128	2250
10	100	100	114	131	138	150	161	176	194	200	230	162	1550
11	100	87	93	109	117	122	131	139	149	145	154	100	800
12	100	98	103	122	134	139	150	158	162	162	189	—	—
13	100	96	104	123	136	141	154	161	176	174	192	—	—
14	100	96	102	118	129	133	143	151	161	156	167	122	1090
15	100	99	108	126	140	146	146	158	168	166	189	113	845
16	100	100	108	128	142	146	158	168	180	176	198	124	634

表 43 No. D の 抵 抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )												
	7 day	14 day	21 day	28 day	35 day	42 day	49 day	56 day	63 day	70 day	91 day	143 day	192 day
1	100	87	89	100	108	115	113	117	126	126	144	134	268
2	100	71	82	96	102	108	109	114	120	118	139	106	233
3	100	92	101	114	127	131	131	139	149	143	166	134	267
4	100	84	98	110	123	122	127	141	148	144	167	124	250
5	100	78	98	112	122	124	126	126	142	140	150	112	224
6	100	87	104	118	129	129	130	133	152	147	172	132	227
7	100	82	92	102	116	119	120	126	136	132	159	127	186
8	100	100	98	114	124	124	124	140	146	144	184	155	289
9	100	212	87	112	120	126	131	135	143	143	162	135	352
10	100	253	98	127	144	144	140	150	166	166	187	142	366
11	100	252	104	119	130	128	130	135	148	148	167	122	300
12	100	238	93	111	120	132	132	136	155	150	170	134	334
13	100	165	111	128	140	148	146	160	168	168	177	—	—
14	100	162	99	114	124	124	133	139	149	148	169	137	286
15	100	195	100	112	127	123	127	135	147	143	161	125	313
16	100	161	95	107	118	121	119	124	134	134	170	121	390

表 44 No. E の 抵 抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )											
	7 day	14 day	21 day	28 day	35 day	42 day	49 day	56 day	63 day	70 day	125 day	192 day
1	100	12	12	13	14	14	15	16	17	17	21	25
2	100	11	11	13	14	14	15	16	17	17	21	23
3	100	12	12	14	15	15	15	16	17	17	18	9
4	100	12	13	15	16	16	16	17	18	18	18	19
5	100	12	13	15	16	16	17	17	19	18	20	19
6	100	10	12	14	15	15	15	16	17	17	20	20
7	100	11	12	14	15	15	15	16	17	16	20	24
8	100	12	14	15	17	17	17	18	19	18	20	20
9	100	12	13	15	16	16	16	17	18	18	20	18
10	100	12	13	14	15	15	16	15	17	16	17	16
11	100	12	13	16	17	17	18	18	20	19	19	16
12	100	12	13	13	16	16	16	16	18	18	20	25
13	100	13	14	16	17	17	18	19	20	19	19	19
14	100	12	13	14	15	15	16	17	18	17	20	23
15	100	12	14	15	16	16	16	17	18	17	19	21
16	100	11	12	14	15	15	15	16	18	18	20	24

表 45 No. F の 抵 抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )											
	3 day	10 day	17 day	24 day	31 day	38 day	45 day	52 day	59 day	66 day	151 day	200 day
1	100	90	142	171	167	177	177	192	212	207	180	263
2	100	97	162	196	186	194	203	214	232	229	209	218
3	100	97	149	181	183	203	203	208	230	230	—	203
4	100	99	147	178	192	197	204	216	240	232	195	284
5	100	98	160	194	192	199	208	213	232	230	225	314
6	100	101	157	191	192	205	212	219	243	241	229	317
7	100	98	147	176	184	198	198	201	230	222	235	307
8	100	95	156	188	178	194	194	206	222	222	234	309
9	100	99	123	172	198	201	210	219	246	239	222	367
10	100	94	119	161	174	187	198	208	230	229	205	326
11	100	90	114	152	170	185	190	202	220	216	205	329
12	100	93	133	159	184	187	204	218	241	224	212	309
13	100	91	135	160	177	187	192	205	214	222	221	327
14	100	109	150	179	202	208	220	220	256	248	241	319
15	100	106	155	181	214	216	241	241	260	254	238	346
16	100	114	160	190	200	214	243	243	177	272	246	380

表 46 No. G の抵抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )											
	3 day	10 day	17 day	24 day	31 day	38 day	45 day	52 day	59 day	66 day	115 day	228 day
1	100	153	165	179	193	200	200	212	235	229	444	2700
2	100	140	159	185	205	212	212	226	242	234	212	1360
3	100	115	130	146	156	162	164	171	189	177	198	1450
4	100	109	120	130	143	143	146	157	174	171	301	1680
5	100	114	132	153	172	177	177	177	204	196	208	1290
6	100	114	136	155	173	175	174	186	204	195	300	1400
7	100	141	165	185	193	198	198	209	227	218	305	1910
8	100	151	168	192	250	218	216	227	250	238	245	2040
9	100	131	145	167	184	188	187	193	218	220	244	1490
10	100	142	163	189	208	220	220	230	250	239	166	1570
11	100	114	120	138	152	161	160	178	195	195	275	1900
12	100	113	125	141	155	161	165	174	189	185	217	1810
13	100	125	147	169	186	189	191	203	219	212	226	1670
14	100	132	148	170	187	196	197	203	226	219	231	1800
15	100	122	155	163	181	190	188	196	215	208	222	1530
16	100	129	—	—	190	204	204	208	232	222	244	1610

表 47 No. H の抵抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )							
	1 day	2 day	3 day	4 day	10 day	14 day	105 day	154 day
1	100	124	179	197	268	294	527	420
2	100	127	186	211	282	314	567	467
3	100	130	190	210	284	298	514	458
4	100	128	185	206	296	300	524	447
5	100	124	177	198	260	279	510	411
6	100	129	160	200	266	286	496	379
7	100	122	200	200	264	294	500	488
8	100	124	170	191	261	285	500	415
9	100	129	155	201	276	303	550	366
10	100	126	195	195	269	290	515	462
11	100	121	179	199	261	294	548	454
12	100	127	181	198	256	287	518	465
13	100	125	179	198	239	276	517	466
14	100	126	188	204	260	288	531	478
15	100	127	186	210	267	305	571	514
16	100	126	190	208	278	311	528	464
17	100	124	183	202	285	306	523	459
18	100	122	181	197	269	290	496	462
19	100	127	134	199	275	314	527	500
20	100	126	165	184	262	298	—	—

表 48 No. I の抵抗

No.	抵 抗 ( $\Omega$ )			
	1 day	2 day	90 day	139 day
1	100	136	627	653
2	100	134	588	630
3	100	129	578	—
4	100	128	536	560
5	100	97	382	422
6	100	121	483	504
7	100	92	374	386
8	100	80	326	349
9	100	99	455	506
10	100	137	730	800
11	100	131	660	657
12	100	53	220	217
13	100	129	570	618
14	100	55	229	235
15	100	140	680	776
16	100	156	654	731
17	100	112	511	602
18	100	129	548	595
19	100	116	—	—
20	100	115	560	710

表 49 No. J の抵抗

No.	抵抗 ( $\Omega$ )		
	1 day	89 day	138 day
1	100	576	554
2	100	526	511
3	100	584	549
4	100	498	504
5	100	545	560
6	100	487	481
7	100	555	548
8	100	600	575
9	100	600	560
10	100	560	580
11	100	661	660
12	100	597	543
13	100	682	664
14	100	680	602
15	100	670	625
16	100	600	568
17	100	396	396
18	100	650	615
19	100	452	428
20	100	633	642

表 50 No. K の抵抗

No.	抵抗 ( $\Omega$ )			
	1 day	2 day	90 day	139 day
1	100	17	30	25
2	100	17	30	28
3	100	15	26	25
4	100	16	24	26
5	100	16	24	25
6	100	16	24	26
7	100	18	26	26
8	100	17	30	30
9	100	18	28	30
10	100	17	28	30
11	100	17	30	29
12	100	16	27	24
13	100	16	26	29
14	100	15	24	23
15	100	13	26	24
16	100	13	27	24
17	100	13	22	21
18	100	13	21	23
19	100	15	30	29
20	100	16	29	29

表 51 No. L の抵抗

No.	抵抗 ( $\Omega$ )		
	1 day	89 day	138 day
1	100	72	65
2	100	64	69
3	100	65	60
4	100	58	52
5	100	64	62
6	100	60	60
7	100	71	66
8	100	67	59
9	100	—	—
10	100	104	76
11	100	75	80
12	100	73	70
13	100	72	77
14	100	85	86
15	100	71	71
16	100	69	66
17	100	61	56
18	100	65	63
19	100	70	72
20	100	69	73

表 52 No. M の抵抗

No.	抵抗 ( $\Omega$ )		
	1 day	88 day	147 day
1	100	153	94
2	100	162	104
3	100	168	112
4	100	149	118
5	100	144	105
6	100	136	90
7	100	130	67
8	100	82	76
9	100	85	55
10	100	65	53
11	100	60	50
12	100	57	48
13	100	63	50
14	100	70	74
15	100	127	—
16	100	189	—
17	100	164	153
18	100	388	—
19	100	—	92
20	100	91	76



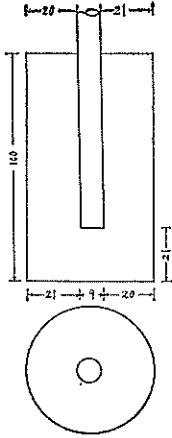


図 26 破壊試験による発錆状況 (D-13)

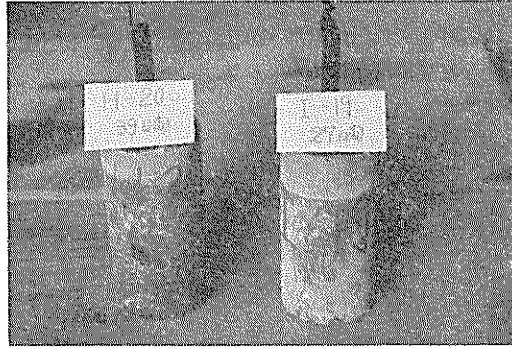


図 27 H-20  
I-19 の破壊前

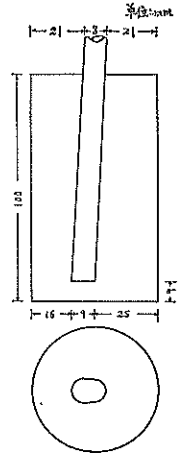


図 29 破壊試験による発錆状況 (I-19)

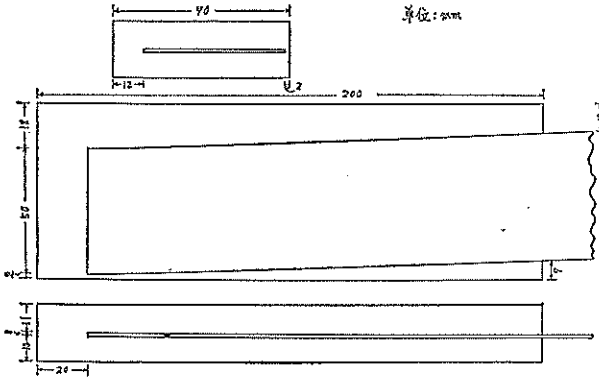


図 30 破壊試験による発錆状況 (C-12)

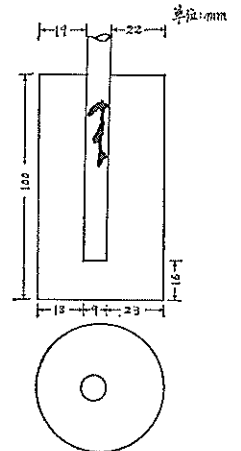


図 33 破壊試験による発錆状況 (F-10)

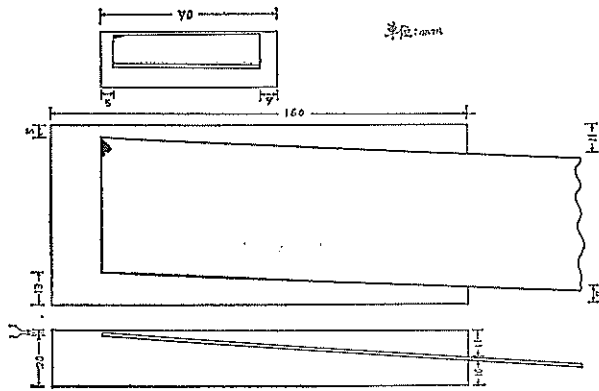


図 35 破壊試験による発錆状況 (B-13)

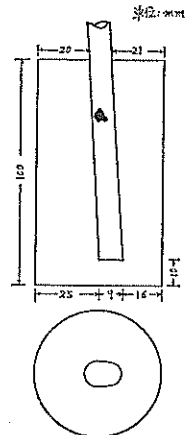


図 37 破壊試験による発錆状況 (H-20)

表 53 セメント硬化体の乾燥による水分逸散量 (%)

No.	重 量 (g)			減 量 初期重量 $\times 100(\%)$
	浸 漬 時	3 カ 月 後	減 量	
H—21	444.15	426.60	17.55	3.95
H—22	446.15	432.20	13.95	3.13
H—23	446.05	428.30	17.75	3.98
H—24	444.55	429.80	14.75	3.32
I—21	427.65	425.30	2.35	0.55
I—22	435.17	430.30	4.87	1.12
I—23	422.55	419.70	2.85	0.67
I—24	427.50	424.20	3.30	0.77
J—21	430.10	428.30	1.80	0.42
J—22	430.05	430.10	0.50	0.12
J—23	427.40	426.50	0.90	0.21
J—24	430.20	428.50	1.70	0.40
K—21	442.10	435.20	6.90	1.56
K—22	438.60	431.20	7.40	1.69
K—23	437.30	432.00	5.30	1.21
K—24	427.80	423.70	4.10	0.96
L—21	439.40	428.00	11.40	2.59
L—22	436.70	423.70	13.00	2.98
L—23	438.00	424.80	13.20	3.01
L—24	433.80	424.50	9.30	2.14
M—21	447.50	433.50	14.00	3.13
M—22	444.60	429.70	14.90	3.35
M—23	446.30	432.70	13.60	3.05
M—24	441.45	428.70	12.75	2.89

表 54 供試体の発錆状況

水 槽 No.	空中鋼材部分に発錆 した供試体	セメント硬化体に発錆が現われた供試体		
		上 部	表 ・ 裏 面	側 面
A	No. 4, 5, 6, 7			
B	No. 9		No. 5, 14, 16	No. 12, 15
C				
D	No. 1			
E		No. 4, 10, 16	No. 7	No. 1, 2, 8, 9, 11
F		No. 3, 11		
G		No. 5, 10		No. 3, 9
H	No. 1~20			
I	No. 1~20			
J	No. 1~20			
K	No. 1~20			
L	No. 1~20			
M	No. 1~20			

表 55 破壊による発錆観察結果

セメント硬化体材令 (week)	鋼材電位 $-200\text{ mV}$ 以上		鋼材電位 $-500\text{ mV}$ 以下	
	供試体 No.	発錆の有無	供試体 No.	発錆の有無
>10	D-13	なし	C-12 F-10 B-13	有り 有り 有り
<5	I-19	なし	H-20	有り

実験13 セメント硬化体を海水中または水道水中に浸漬するときの鋼材腐食 (2) (AE 剤を含む場合)

現在では土木用のコンクリート構造物には AE コンクリートを使用することが普通である。AE コンクリートとは AE 剤 (Air entraining agent) をコンクリート材料に加えて練り混ぜると直径  $0.25\sim 0.025\text{ mm}$  位の空気泡が互いに連絡しないで独立して均等に分布されているコンクリートのことでエア-エントレインドコンクリートともいう<sup>12)</sup>。AE 剤としてはいろいろあるが次のような商品名のあるものがある<sup>12)</sup>。

ビンゾール レジン (Vinsol resin)

ダレックス (Darex)

プロテックス (Protex)

スプーマ (Spuma)

ポゾリス (Pozzolith)

このうちポゾリスはセメント分散剤 (Dispersing agent) でセメント粒子の分散に作用があるが、このとき AE 剤におけるような空気が相当に出るので AE 剤の働きをする。また AE 剤を加えたものもできている。したがってセメント硬化体中鋼材の電位についても AE 剤を含んだ場合について測定してみた。

表 56 電位測定値 (海水塩化銀電極基準)

鋼材 表面	AE 剤	電 位 ( $-\text{mV}$ )														
		浸漬時	4 day	7 day	8 day	9 day	10day	11day	14day	15day	16day	17day	18day	19day	20day	266day
研	なし	200	516	486	452	470	480	506	580	576	565	560	557	542	530	457
		198	375	464	468	494	510	514	540	532	514	512	512	506	514	423
		242	312	336	310	310	314	318	350	354	355	356	368	366	356	457
摩	あり	230	490	486	476	512	544	546	548	557	536	540	530	490	514	425
		208	480	548	546	560	556	551	550	555	550	550	555	534	542	481
		270	450	510	520	534	545	552	552	545	538	538	540	515	528	490
発	なし	364	506	550	565	580	590	590	605	600	598	590	590	578	578	372
		177	300	414	430	448	480	464	530	535	539	542	550	542	525	498
		198	375	486	494	502	512	516	544	552	555	562	580	562	477	489
錆	あり	210	410	452	423	335	350	368	316	318	300	350	382	346	346	392
		220	475	412	334	340	385	410	446	454	450	469	480	488	499	322
		218	380	300	325	258	273	306	252	266	266	282	280	275	470	435
研	なし	536	630	685	688	680	680	680	675	670	665	660	670	650	640	611
		584	690	670	660	640	630	622	585	545	532	550	560	555	580	590
		572	708	745	740	735	730	725	715	710	700	690	690	660	645	595
塗	あり	525	594	568	575	568	630	660	550	630	660	690	725	718	712	598
		595	618	665	665	575	625	660	588	660	645	650	660	638	625	602
		598	660	640	630	622	622	620	630	595	595	600	615	582	580	589

## 供 試 体

### (1) 鋼 材

鋼材としては鉄筋 ( $\phi$  9 mm, 長さ 15 cm, 材質 SS-41) を使用した。鋼材表面は研摩, 発錆, 塗装の 3 種類で塗装はタール, エポキシ系塗料 (銀色) を 1 回塗布した。セメント硬化体より外に出る鋼材部分およびセメント硬化体上面 (側面および底面は裸セメント硬化体のまま) には同じ塗装をしたが, セメント硬化体上面に塗布された塗料にはアルカリのために  $\phi$  3~5 mm 位のふくれが多数生じた。

### (2) セメント硬化体

配合は次の通りである。(ただし供試体 3 ヶ分)

ポルトランド セメント	520 g
細骨材 (標準砂)	1,040 g
水道水	338 g
AE 剤 (Vinsol resin)	0.3 cc

### (3) 浸液状態

供試体の浸漬は図17に示す要領で行ない浸液としては海水を使用した。

## 測 定

測定項目は鋼材の単極電位と供試体の表面観察である。電位は実験 12 と同じ方法で測定した。

### 測定結果および考察

電位の測定結果を表 56 に示す。表56によればセメント硬化体中鋼材表面が塗装されていない場合鋼材電位は浸漬期間を通じて全般的に変動しているがこれは実験12のときと同じく水槽上部をビニール・シートで被覆したためにセメント硬化体より出ている鋼材面に発錆したことによるものと思われる。266 日目の電位はビニールシートを取り除いて 2 時間ほどしてからの測定値であるから大部セメント硬化体外の鋼材部分の影響は少なくなっていると予想される。したがって浸漬時および 266 日目の値を中心として AE 剤の添加効果のみをみると AE 剤の添加の有無にかかわらずセメント硬化体中鋼材の電位にはあまり差はないようである。(セメント硬化体より出ている鋼材の発錆の影響がほとんどないと思われる浸漬時の電位を比較してみても AE 剤による差はほとんどなさそうである。)

一方塗装した場合鋼材電位は塗装しない場合の電位にくらべて浸漬時より一様に卑の値となっているが, この値は塗料の種類によって変るものと考えられる。(たとえばジンクリッチ系塗料を塗料した場合  $-1,000$  mV より卑となる。)

## 実験14 セメント硬化体中鋼材の電位差および腐食傾向

実験 12, 13 ではセメント硬化体中鋼材の電位を測定するためにセメント硬化体より出ている鋼材部分を塗料で一応被覆したが塗膜の劣化のために電位測定用供試体としては不十分であった。また実験 2 (表 5, 6 参照) より鋼材表面差による電位差および実験 6 (表 15), 実験 7 (表 16) より練り水による電位差が考えられる。さらに分散剤や Al 粉末<sup>13)</sup>の影響も検討してみる必要がある。したがって実験14としてはこれまでの実験結果にもとづいてセメント硬化体中鋼材の電位差および生じ電位差による腐食傾向を検討することにした。

## 供 試 体

### (1) 鋼 材

2 cm  $\times$  3 cm  $\times$  0.1 cm の鋼板 (SS-41) に測定用電線を接続し, 接続部分をリゴラック樹脂で被覆した。鋼材表面は研摩, 発錆, 黒皮の 3 種類であるがいずれも脱脂した。このうち黒皮鋼板については切り口面の地肌と黒皮との相互関係をなくすために周囲の切り口面は完全にリゴラック樹脂で被覆された。(ただし黒皮鋼板のみは厚さ 0.2 cm である。)

### (2) セメント硬化体

セメント硬化体の配合は表 57 に示す10通りである。鋼材は 2 cm  $\times$  3 cm  $\times$  0.1 cm の寸法であるので鋼材の向きを型枠直径 ( $\phi$  5 cm) 方向に 2 cm, 上下方向 (10 cm) に 3 cm となるようにして型枠中央付近に埋設した。したがってセメント硬化体のもっとも薄いかぶりは図38のように直径方向で 1.5 cm, 上下方向で 3.5 cm となる。

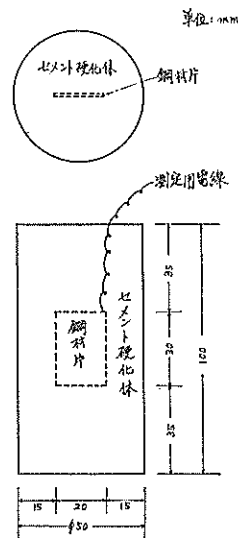


図 38 実験 14 の供試体

表 57 実験 14 の 配合 表

配合 No.	比較 因子	材 料 (g)				
		セメント	砂	水	分散 剤 (ポリリス No.)	Al 粉末
I	練り水 (水道水)	1,040	2,080	676		
II	練り水 (海水)	520	1,040	338		
III	練り水 (海水:水道水) 1 : 10	60	120	20		
IV	練り水 (海水:水道水) 10 : 1	60	120	20		
V	分散剤+Al粉末	60	120	20	0.15	0.3
VI	Al粉末	60	120	20		0.3
VII	練り水 (純水)	60	120	20		
VIII	鋼材表面 (黒皮)	60	120	20		
IX	鋼材表面 (発錆)	60	120	20		
X	施工性	60	120	20		

表 58 供 試 体 一 覧 表

No.	銅		材		セメント硬化 体配合 No.	比較 因子
	表面 状態	寸 法 (cm)	重 量 (g)			
1	研 摩	2×3×0.1	5.2730		I	練り水
2	研 摩	2×3×0.1	5.3210		VI	Al 粉末
3	研 摩	2×3×0.1	5.3064		V	分散剤+Al粉末
4	研 摩	2×3×0.1	5.4175		I	練り水
5	研 摩	2×3×0.1	5.1810		III	練り水
6	研 摩	2×3×0.1	5.1495		IV	練り水
7	研 摩	2×3×0.1	5.2400		VII	練り水
8	研 摩	2×3×0.1	5.3940		I	練り水
9	研 摩	2×3×0.1	5.3640		I	練り水
10	研 摩	2×3×0.1	5.3650		I	練り水
11	研 摩	2×3×0.1	5.0760		I	練り水
12	研 摩	2×3×0.1	5.4532		X	練り水
13	研 摩	2×3×0.1	5.3690		I	練り水
14	研 摩	2×3×0.1	5.3102		I	練り水
15	研 摩	2×3×0.1	5.2984		I	練り水
16	研 摩	2×3×0.1	5.0952		II	練り水
17	研 摩	2×3×0.1	5.5078		II	練り水
18	研 摩	2×3×0.1	5.4028		X	練り水
19	研 摩	2×3×0.1	5.1238		I	練り水
20	研 摩	2×3×0.1	5.6072		I	練り水
21	黒 皮	2×3×0.2	9.5820		VIII	鋼 材 (黒皮)
22	発 錆	2×3×0.1	5.4316		IX	鋼 材 (発錆)

セメント硬化体は表57に示す配合の材料を手練りで混合し型枠に注型後1日間標準養生を行ない直ちに脱型した。脱型後3日間室内に静置してからセメント硬化体上面の電線がでていところをリゴラック樹脂で十分密に固めて電線を伝わって透水することのないように留意した。この処置が終ったのちセメント硬化体表面積の8割が浸水するように海水を入れたガラス容器中に設置した。

(3) 供試体一覧表

(1), (2) の要領で作成した供試体を表58に一覧表で示す。

セメント硬化体の水セメント比 W/C は表57からわかるように同じではないが固練り配合のものについても型枠注型時に2層に分けて各層とも25回づつ突き棒で突きさらに型枠を軽く振動させて十分密に充填した。このとき使用した砂は十分湿っていたので固練り配合のまだ固まらないセメント硬化体はばさばさではなかった。

測定

測定項目は鋼材電位、各要因に基づく電位差によって発生する腐食電池の電流、短絡電位および抵抗である。

(1) 鋼材単極電位

セメント硬化体を海水に浸漬したときのセメント硬化体中鋼材電位を実験2と同じ要領で測定した。単位は -mV である。

(2) 腐食電池の形成

表57に示す比較因子を表59のように組合わせてそれぞれの1組づつを海水を入れたガラス容器1コづつに浸

漬して腐食電池を形成し、各組合わせの供試体について抵抗、電流、電位（短絡前の電位は(1)の値を利用することにした）を測定した。抵抗は A. C.ブリッジで電池を形成する供試体間および標準鉄電極（φ11mm, l35mm）と各供試体間の抵抗を測定した。抵抗の単位は Ω である。(1)の単極電位および抵抗測定後に各組合わせの供試体を短絡して電池を形成しこのとき流れる電流の経時変化を D. C. 電流計で測定した。電流の単位は μA である。また電流測定とともに短絡電位を海水塩化銀電極に対する値として測定した。

電位の単位は -mV である。

測定結果および考察

(1) 電池 No. a についての測定結果は表60の通りである。

(2) 電池 No. b についての測定結果は表61の通りである。

(3) 電池 No. c についての測定結果は表62の通りである。

(4) 電池 No. d についての測定結果は表63の通りである。

(5) 電池 No. e についての測定結果は表64の通りである。

(6) 電池 No. f についての測定結果は表65の通りである。

(7) 電池 No. g についての測定結果は表66の通りである。

(8) 電池 No. h についての測定結果は表67の通りである。

(9) 電池 No. i についての測定結果は表68の通りである。

(10) 単独浸漬についての測定結果は表69の通りである。

表60~69より電位差を生ずる要因と初期電位差および長期電流密度を比較してみると次のようになる。

No.	要因	初期電位差 (mV)	長期電流密度 (μA/cm <sup>2</sup> )
a	表面差	250	-0.09
b	表面差	90	0
c	練り水差	360	0.02
d	練り水差	380	0
e	練り水差	40	0
f	練り水差	2	0.22
g	混和剤	100	0
h	混和剤	180	-0.09
i	施工差	180	-0.19

表59 形成電池の内容

電池 No.	供試体 (1)	供試体 (2)	電位差を生ずると思われる因子
a	No. 1 (研磨)	No. 21 (黒皮)	鋼材表面
b	No. 8 (研磨)	No. 22 (発錆)	鋼材表面
c	No. 4 (水道水)	No. 19 (海水)	練り水
d	No. 9 (水道水)	No. 6 (水道水1 海水10)	練り水
e	No. 10 (水道水)	No. 5 (水道水10 海水1)	練り水
f	No. 11 (水道水)	No. 7 (純水)	練り水
g	No. 13 (Al粉末 なし)	No. 2 (Al粉末)	混和剤
h	No. 15 (分散剤 なし)	No. 3 (分散剤)	混和剤
i	No. 18	No. 12	施工性
開路	No. 14, No. 16, No. 19, No. 20		

表 60 電池 No. a の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	No. 1	No. 21	R <sub>No.1</sub>	R <sub>No. 21</sub>	R <sub>No.1-No.21</sub>			
0		220	465	78	75				
0		236	478						
1							6.5	0.54	
2							6.4	0.53	428
3							6.1	0.51	425
4							6.05	0.50	425
5							6.00	0.50	427
10							5.6	0.47	427
15							5.5	0.46	427
20							5.4	0.45	
25							5.3	0.44	
30							5.2	0.43	430
60							5.0	0.42	435
90							4.95	0.41	435
120							4.9	0.41	
910						160	4.25	0.35	450
2,350							3.8	0.32	470
3,790							1.7	0.14	380
5,290							1.6	0.13	375
	125						1.55	0.13	379
	148						1.4	0.12	382
	216						0.5	0.04	362
	312						-0.05	-0.004	312
	504						-0.4	-0.03	314
	888						0.2	0.02	242
	1,608						-1.1	-0.09	254

表 61 電池 No. b の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	E <sub>No. 8</sub>	E <sub>No. 22</sub>	R <sub>No. 8</sub>	R <sub>No. 22</sub>	R <sub>No. 4-No. 22</sub>			
0		242	300						
0		245	337	72	72	145	9.5	0.79	
1							1.3	0.11	379
2							1.0	0.08	370
3							0.9	0.08	362
4							0.8	0.07	356
5							0.7	0.06	350
10							0.5	0.04	325
15							0.45	0.04	325
20							0.4	0.03	313
25							0.4	0.03	310
30							0.4	0.03	309
60							0.35	0.03	302
90							0.3	0.03	300
185							0.3	0.03	305
1,235							0.2	0.02	326
2,680							0.4	0.03	320
	69						0.4	0.03	328
	96						0.4	0.03	332
	120						0.4	0.03	340
	188						0.4	0.03	357
	288						0.4	0.03	365
	480						0.4	0.03	382
	864						0.2	0.02	230
	1,584						0	0	232

表 62 電池 No. c の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)		
(min)	(hr)	No. 4	No. 19	$R_{No.4}$	$R_{No.19}$	$R_{No.4-No.19}$					
0		224	563	70	53	128					
0		250	610						25	2.08	
1									2.2	0.18	390
2									1.8	0.15	372
3									1.6	0.13	366
4									1.5	0.13	362
5									1.45	0.12	358
10									1.4	0.12	350
15									1.2	0.10	342
20									1.1	0.09	336
25									1.0	0.08	334
30									1.0	0.08	330
60									0.75	0.06	305
90									0.6	0.05	300
120									0.6	0.05	298
1,320									0.45	0.04	255
2,760						1.9	0.16	362			
4,260						1.9	0.16	362			
	96					1.4	0.12	340			
	120					1.0	0.08	312			
	192					0.75	0.06	295			
	288					0.45	0.04	272			
	480					0.4	0.03	268			
	864					0.25	0.02	258			
	1,584					0.25	0.02	212			

表 63 電池 No. d の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)		
(min)	(hr)	$E_{No.9}$	$E_{No.6}$	$R_{No.9}$	$R_{No.6}$	$R_{No.9-No.6}$					
0		238	560	90	104	160					
0		362	745						17.0	1.42	
1									5.6	0.47	524
2									4.8	0.40	518
3									4.5	0.38	516
4									4.2	0.35	512
5									3.8	0.32	505
10									2.8	0.23	486
15									2.2	0.18	470
20									1.8	0.15	464
25									1.6	0.13	450
30									1.4	0.12	445
60									0.8	0.07	418
120									0.55	0.05	400
1,140									0.13	0.01	370
	48								0.15	0.01	362
	72					0.15	0.01	363			
	96					0.15	0.01	313			
	168					0	0	247			
	264					0	0	237			
	456					0	0	256			
	840					0	0	212			
	1,560					0	0	265			



表 64 電池 No. e の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	$E_{No. 10}$	$E_{No. 5}$	$R_{No. 10}$	$R_{No. 5}$	$R_{No. 10-No. 5}$			
0		223	241	98	88	150	7.4	0.62	
0		294	340				0.4	0.03	286
1							0.3	0.03	280
2							0.25	0.02	274
3							0.25	0.02	270
4							0.25	0.02	266
5							0.2	0.02	264
10							0.2	0.02	260
15							0.2	0.02	256
20							0.2	0.02	256
25							0.2	0.02	256
30							0.2	0.02	256
60							0.2	0.02	256
120							0.2	0.02	256
1,140							0.15	0.01	260
	48						0.15	0.01	262
	72						0.05	0.004	250
	96						trace	0	213
	168						0	0	209
	264						0	0	208
	456			0	0	198			
	840			0	0	200			
	1,560			0	0	192			

表 65 電池 No. f の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	$E_{No. 7}$	$E_{No. 13}$	$R_{No. 7}$	$R_{No. 13}$	$R_{No. 7-No. 13}$			
0		210	223	70	104	140			
0		216	220				0	0	218
0		218	220						
	24						0.05	0.004	221
	48						0.15	0.01	244
	72						1.1	0.09	332
	144						1.5	0.13	368
	240						0.95	0.08	308
	432						0.5	0.04	230
	816						0.45	0.04	264
	1,536			2.6	0.22	280			

表 66 電池 No. g の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	$E_{No. 13}$	$E_{No. 2}$	$R_{No. 13}$	$R_{No. 2}$	$R_{No. 13-No. 2}$			
0		200	293						
0		205	308	110	140	210	7.0	0.58	
1							1.2	0.10	264
2							1.1	0.09	264
3							1.1	0.09	264
4							1.1	0.09	264
5							1.1	0.09	264
10							1.1	0.09	264
15							1.1	0.09	266
20							1.1	0.09	265
25							1.1	0.09	265
30							1.1	0.09	266
60							1.1	0.09	265
120							1.2	0.10	265
1,080							0.7	0.06	250
2,460							0.55	0.05	230
	72						1.4	0.12	268
	96						0.3	0.03	202
	168						0.2	0.02	180
	264						0.1	0.08	169
	456						0.05	0.004	164
	840						0.05	0.004	168
	1,560						0	0	155

表 67 電池 No. h の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	$E_{No. 15}$	$E_{No. 3}$	$R_{No. 15}$	$R_{No. 3}$	$R_{No. 15-No. 3}$			
0		190	390						
0		208	392	89	130	200	25	2.08	
1							4.4	0.37	318
2							4.1	0.34	315
3							4.0	0.33	317
4							3.9	0.33	315
5							3.85	0.32	314
10							3.6	0.30	311
15							3.6	0.30	311
20							3.55	0.30	310
25							3.55	0.30	312
30							3.55	0.30	312
60							3.5	0.29	312
560							3.0	0.25	359
1,380							2.1	0.18	300
	23						2.1	0.18	311
	46						1.25	0.10	272
	60						1.05	0.09	252
	156						0.9	0.08	238
	348						0.55	0.05	220
	432						0.25	0.02	223
	1,252						-1.1	-0.09	250

表 68 電池 No. i の測定値

短絡時間		単極電位 (-mV)		抵抗 ( $\Omega$ )			電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)	E <sub>No. 18</sub>	E <sub>No. 12</sub>	R <sub>No. 18</sub>	R <sub>No. 12</sub>	R <sub>No. 18-No. 12</sub>			
0		222	404						
0		240	405	116	98				
0									
1		205	390				1.4	0.12	315
2							1.3	0.11	310
3							1.25	0.10	308
4							1.2	0.10	306
5							1.2	0.10	305
10							1.15	0.10	305
15							1.1	0.09	302
40							1.1	0.09	301
85							1.05	0.09	300
	22						1.02	0.09	302
	46						0.8	0.07	306
	60						0.6	0.05	302
	156						0.35	0.03	278
	348						0.45	0.04	297
	792						0.25	0.02	292
	1,512						-0.1	-0.01	550
							-2.3	-0.19	417

表 69 単独浸漬の電位変化 (海水塩化銀電極基準)

浸漬期間 (day)	No. 14		No. 16		No. 19		No. 20	
	-mV	$\Omega$	-mV	$\Omega$	-mV	$\Omega$	-mV	$\Omega$
2	308		542		290		293	
4	395	82	514	88	270	102		
(1')*							440	17.6
(6')							576	
(11')							598	
(16')							610	
(21')							618	
(26')							620	
(31')							620**	
(36')							620	
(41')							620	
(1,440')							665	
5							650	
6	348		437		261		645	
11	300		422					
15	378		382		195			
23			242		175			
39			270		150			
46	262		240		176		760	
67	216		250		121		750	

\* No. 20 は海水浸漬4日後にとり出してセメント硬化体の一部を切り取ったため封入してあった鋼材(研磨)が0.1~0.2 cm<sup>2</sup>外部に現われた。これを再び海水に浸漬して鋼材の電位変化を測定したが( )内の数字はこのときの経過時間(min)を示す。なおセメント硬化体の切斷から海水浸漬までに4~5 min 要した。

\*\* 明らかに発錆が認められた。

表 70 1年間海水浸漬後に短絡したときの電池電位および電流

短絡時間		電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)	短絡時間		電流 ( $\mu$ A)	電流密度 ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	短絡電位 (-mV)
(min)	(hr)				(min)	(hr)			
短絡時		7.5	0.38			365	0.2	0.01	350
1		6.8	0.34			22	0.1	0.005	330
2		5.0	0.25			30	0.1	0.005	
3		4.0	0.20			46	0.1	0.005	
4		3.6	0.18			70	0.5	0.025	378
5		3.2	0.16	352		96	0.15	0.008	378
10		2.15	0.11			101	-0.1	-0.005	
15		1.6	0.08			120	-0.05	-0.003	377
20		1.3	0.07			144	0	0	420
25		1.1	0.06			168	0	0	405
30		0.95	0.05			192	-0.2	-0.01	422
45		0.7	0.04			264	0	0	432
65		0.6	0.03			288	-0.05	-0.003	398
85		0.5	0.03			312	-0.05	-0.003	366
135		0.4	0.02	352		432	0	0	477
185		0.3	0.02			480	0.3	0.015	
250		0.25	0.02			528	0.45	0.02	
305		0.22	0.01			648	3.7	0.19	440
						1,248	6.5	0.33	450

短絡前の値

$$E_{F15} = -382 \text{ mV}$$

$$E_{D16} = -312 \text{ mV}$$

$$R_{F15-D16} = 390 \Omega$$

鋼材面積 = 20 cm<sup>2</sup>

短絡前の海水浸漬期間

F15: 367日 (練り水: 海水)

D16: 371日 (練り水: 水道水)

以上のようにいろいろの要因によってセメント硬化体中鋼材間には 2~380 mV の範囲にわたる電位差が生じた。この電位差にもとづいて腐食電流が発生するが電流密度は次第に減少して 0~0.2  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> 付近に収まり、なかには電流の流れが反対 (No. a, h, i) となる場合もある。次に参考として海水に1年間浸漬したセメント硬化体 ( $\phi$  5 cm  $\times$  10 cm, 封入された鋼材は  $\phi$  0.9 cm  $\times$  8 cm) 2コを短絡したときの電流、電位を測定してみると表70ようになる。表70によれば短絡前の電位差は 70 mV であり短絡電流密度は 0.3  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> 付近であったものが 20~400 hr 位はほとんど零となったが、400 hr 以後再び流れ始めて 1,000 hr 後では 0.3  $\mu$ A/cm<sup>2</sup> に戻っている。このように短絡電流密度が時間の経過とともに増減する傾向は表60~69についても見られる。しかし短絡電位が貴であるほど短絡電流密度は小さく短絡電位が卑なほど短絡電流密度は大きいようである。したがってセメント硬化体1層中鋼材にはいろいろの要因による腐食電池が発生しやすいがセメント硬化体の被覆状態如何によって腐食電流は増減するようである。

### 実験15 セメント硬化体の一部が浸液、一部が空中に出ている場合の鋼材腐食

セメント硬化体が長尺ものの場合その一部が浸漬し一部は乾燥している例があるので、実験15ではその代表例としてセメント硬化体の一部が海水に浸り一部が空中に出ている場合について腐食傾向を検討した。

#### 供試体

##### (1) 鋼材

2 cm  $\times$  3 cm  $\times$  0.1 cm の研磨鋼板の一隅に測定用電線を接続したものを使用した。材質は SS-41 である。

##### (2) セメント硬化体

配合、成型は実験12に同じである。

##### (3) 鋼材の埋設およびセメント硬化体の浸漬

鋼材の埋設間隔およびセメント硬化体の浸漬の要領は図 39 に示す通りである。

#### 測定

測定項目は電位、電流、抵抗の3項目である。

##### (1) 電位

測定の要領は実験12と同じであり電位は海水塩化銀電

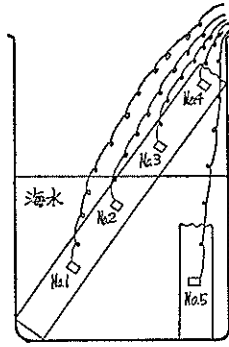


図 39 実験 15 の供試体浸漬状況

極に対する値で表わす。単位は  $-mV$  である。

(2) 電 流

電流は図39に示す鋼材片 No. 1, 2, 3, 4, 5 のうちの2点間に D. C. 電流計を挿入して測定した。単位は  $\mu A$  である。

(3) 抵 抗

実験12と同じ要領で標準鉄電極と各鋼材間および任意に選んだ1組の鋼材間の抵抗を A. C. ブリッジで測定し

た。

測定結果および考察

(1) 電 位

電位の測定結果を表 71 に示す。表71によれば海水中のセメント硬化体中鋼材 (No. 1, 2, 5) の電位の方が空中のセメント硬化体中鋼材 (No. 3, 4) よりも卑となっている。また No. 1, 2, 5 の中 No. 5 の電位がっとも卑であるが浸漬時の電位は大差ないことからセメント硬化体破断面 (No. 5 の埋設されているセメント硬化体 No. 1, 2, 3, 4 はが埋設されているセメント硬化体から折れた) の影響 (破断面は型枠に接した側面ほどきれいな肌ではなくてざらざらしている) かと考えられる。表71よりセメント硬化体が乾湿にまたがる場合には乾燥しているセメント硬化体中鋼材がカソード、湿っているセメント硬化体中鋼材がアノードとなる腐食電池の発生する可能性のあることがうかがわれる。

(2) 電 流

乾湿部間に考えられる電池の代表例として No. 2(-) ~No. 3(+ ) と No. 5(-) ~No. 4(+ ) の2組について測定した電流(浸漬期間 436 日) を表 72 に示す。表72

表 71 電位ならびに抵抗測定値

浸漬期間 (day)	電 位 ( $-mV$ )*					抵 抗 ( $\Omega$ )				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	210	190	242	240	214					
1	246	222	234	200	264					
2	290	240	184	203	270	77.5	70	170	1,100	95
3	280	266	225	204	262	82.7	73	180	1,220	110
4	280	272	212	181	253	98	93	200	1,320	115
7	290	265	212	173	270	108	102	250	1,620	124
14	370	286	180	138	300	138	128	355	2,300	139
21	357	330	160	152	276	133	130	410	2,700	137
29	290	300	448	104	288	152	150	260	2,790	150
35	292	280	422	104	270	152	154	305	3,000	149
42	263	380	418	100	335	160	160	400	3,700	150
49	310	450	290	400	462	175	176	510	4,400	160
56	248	342	298	100	380	190	190	625	5,200	170
63	243	330	330	75	358					
70	245	282	202	70	362	200	200	960	5,000	185
77	242	258	342	74	325	210	225	570	5,250	200
83	242	242	211	60	341	225	230	1,000	5,300	200
118	215	215	314	20	311	260	275	1,500	8,300	235
153	225	225	150	25	319					
193	164	208	138	76	275					
436	172	196	100	90	372	470	530	7,000	710,000	470

\* 海水塩化銀電極基準

表 72 海水に 436 日間没漬したセメント硬化体中鋼材を短絡したときに発生した電流

No. 2 (-) ~ No. 3 (+)					No. 5 (-) ~ No. 4 (+)				
短絡時間		電流 ( $\mu\text{A}$ )	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電位* (-mV)	短絡時間		電流 ( $\mu\text{A}$ )	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	電位* (-mV)
(min)	(hr)				(min)	(hr)			
0		0.5	0.04		1		2.1	0.18	362
5		0.8	0.07		2		2.0	0.17	362
10		0.9	0.08	147	3		2.0	0.17	360
30		0.7	0.06		4		1.95	0.16	358
60		0.45	0.04	170	5		1.95	0.16	358
90		0.45	0.04	174	10		1.9	0.16	351
990		0.3	0.03	147	30		1.8	0.15	345
2,430		0.2	0.02	140	990		1.55	0.13	347
3,870		0	0	132	2,430		1.45	0.12	341
	120	0.2	0.02	135	3,870		1.3	0.11	333
	192	0	0	59		120	1.0	0.08	328
	480	0	0	100		192	0.35	0.03	236
	864			170		480	0.1	0.01	198
						864	0.1	0.01	204

\* 海水塩化銀電極基準  
鋼材寸法: 2 cm × 3 cm × 0.1 cm

によればセメント硬化体が乾湿部にまたがる場合湿部のセメント硬化体中鋼材がアノード, 乾部のセメント硬化体中鋼材がカソードとなる腐食電池が発生, この傾向はアノードとなる湿部のセメント硬化体表面が粗なるほど大きいことがわかる。しかし長期的には腐食電流密度は減少して行く。

(3) 抵抗

標準鉄電極とセメント硬化体中鋼材間の抵抗の経日変化を表 71 に示す。表 71 によれば No. 1, 2, 3, 5 は 1 年

表 73 鋼材間の抵抗変化

鋼材間	抵抗 ( $\Omega$ )		
	7 day	70 day	436 day
No. 1~No. 2		390	1,200
No. 1~No. 3			7,500
No. 1~No. 4		5,250	>10,000
No. 1~No. 5			1,100
No. 2~No. 3	335	1,150	7,500
No. 2~No. 4	1,720	5,250	>10,000
No. 2~No. 5			1,150
No. 3~No. 4	1,580	5,500	>10,000
No. 3~No. 5			7,500
No. 4~No. 5			>10,000

以後で大体数倍となっているが No. 4 は 10 倍以上に増加している。一方各鋼材間の抵抗変化は表 73 の通りである。

実験 16 セメント硬化体中鋼材が異種金属 (とくに鋼材よりも電位が貴な金属) に接触した場合の鋼材腐食

セメント硬化体中鋼材よりどのくらい腐食電流が流出したらセメント硬化体表面にキレツが発生し錆が見えるようになるのかの大体の見当をつけることを兼ねて異種金属との接触の危険性を検討した。

供試体

実験 12 の No. A-13, 14, 15, 16 を使用した。したがって No. A-13, 14, 15, 16 の 4 供試体は 117 日間単独に海水に没漬されており 118 日目から実験 16 に用いられた。鋼材より貴電位の金属としては銅を使用した。セメント硬化体中鋼材表面積は 4 コとも 20  $\text{cm}^2$  である。

測定方法

図 40 に示すように 4 コの供試体を銅板 (海水没漬部分 8 cm × 12 cm × 0.1 cm) と接続して海水に没漬した。測定項目は電流, 抵抗, 電位および肉眼による表面観察である。

(1) 電流

鋼材片 4 コと銅板間に D. C. 電流計を挿入して安定電

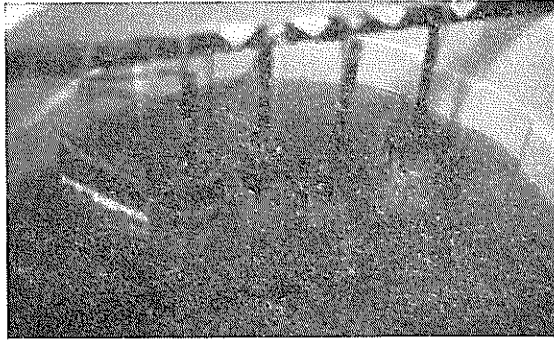


図40 実験16の供試体浸漬状況

流を求めた。測定電流値を4で割れば供試体1コ当りより流出する電流となりまた  $20\text{ cm}^2 \times 4 = 80\text{ cm}^2$  で割れ電流密度が得られる。電流の単位は  $\mu\text{A}$ 、電流密度の単位は  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  である。

(2) 抵抗

標準鉄電極と各供試体間の抵抗を A. C.ブリッジで測定した。単位は  $\Omega$  である。

(3) 電位

銅板と短絡しているときの電位および開路後の鋼材と銅板の電位を海水塩化銀電極を基準として測定した。測定の要領は実験12に同じである。

測定結果

電流測定値を表74に、電位および抵抗測定値を表75に示す。表74によれば短絡後50日目までは大体  $300\ \mu\text{A}$

表74 電流値

短絡期間 (day)	電流 ( $\mu\text{A}$ )	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	短絡期間 (day)	電流 ( $\mu\text{A}$ )	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
(0')	1,800	22.5	17	351	4.4
(2')	1,500	18.8	19	342	4.3
(4')	1,060	13.3	22	282	3.5
(5')	900	11.3	23	275	3.4
(6')	800	10.0	24	269	3.4
(180')	780	9.8	27	281	3.5
(240')	163	2.0	28	272	3.4
1	108	1.4	29	278	3.5
2	160	2.0	34	298	3.7
3	155	1.9	35	292	3.7
5	180	2.3	37	290	3.6
6	205	2.6	40	296	3.7
7	220	2.8	41	299	3.7
8	230	2.9	45	303	3.8
9	252	3.2	47	305	3.8
10	272	3.4	54	565	7.1
11	282	3.5	55	582	7.3
12	300	3.8	58	575	7.2
14	362	4.5	105	572	7.2
15	372	4.7	292	510	6.4
16	355	4.4	431	720	9.0

鋼材:  $20\text{ cm}^2 \times 4\text{ コ} = 80\text{ cm}^2$

表75 電位, 抵抗値

短絡期間 (day)	開路時間 (min)	電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)					抵抗 ( $\Omega$ )				
		$E_0$	$E_{A-13}$	$E_{A-14}$	$E_{A-15}$	$E_{A-16}$	$E_{Cu}$	$R_{A-13}$	$R_{A-14}$	$R_{A-15}$	$R_{A-16}$
(浸漬時)			501	498	407	370		117	130	140	150
(浸漬21日)								94	108	108	120
0			618	538	570	500		108	128	124	138
5								115	130	124	138
12								125	125	125	125
19								135	131	130	130
40								120	144	132	300
105								108	102	102	270
155								250	298	270	280
292	0	540									
"	1		572	530	568	540	310				
"	5		570	525	570	540					
"	10		572	525	572	545					
431	0	380					225				
	5		456	430	445	418					
	20		468	435	458	432					
	60		477	447	470	450					
	150		490	460	485	472					
	425		506	470	502	498		300	340	320	400
	1,380		511	486	508	512					

### 3.2 1層の場合の考察および過去の検討結果

実験11~16より次のことが推察される。

(1) セメント硬化体のかぶりが多いほど埋設鋼材の単極電位は長期間貴な値に保たれる傾向がある。たとえばかぶりのもっとも薄いところが5cm程度あれば6年後でもいぜんとして貴の電位を保っている。(ただし表25のNo. Aのみは埋設前の鋼材表面は発錆状態であったが何らかの理由でセメント硬化体上面に幅2mm程度のキレツが入ったため電位は $-500\text{mV}$ のように卑となっている。) またかぶりが2cm程度でも6年後はやはり貴の電位を示しているがかぶりが1cm程度では卑の電位となっている。(表24, 25より)

(2) セメント硬化体の配合, かぶりが等しい場合埋設鋼材の電位はセメント硬化体表面の防水被覆の程度によって異なる。たとえばかぶりのもっとも薄いところが1cm位のときセメント硬化体表面に防水処理を何もしない場合は静止海水中で6年後にはいずれも $-500\text{mV}$ より卑の値に埋設鋼材の電位は低下したが, セメント硬化体表面の $\frac{1}{2}$ または $\frac{1}{4}$ に防水被覆をすると埋設鋼材の電位はいずれも $-400\text{mV}$ より貴な電位を保っている。(表24, 25より)

したがって(1), (2)の事実よりセメント硬化体の透水性がセメント硬化体1層中に封入される鋼材の発錆に強く影響することが予想できる。

(3) 水酸化カルシウム溶液について確かめた鋼材電位と発錆傾向との関係はセメント硬化体中鋼材についても適用できよう。(図12, 図24~37, 表55より)

セメント硬化体のキレツなどによって埋設鋼材が海水に接した場合キレツ発生前までは $-300\text{mV}$ より貴な値を示していた電位が海水接触と同時に低下して20~30分後には $-620\text{mV}$ 程度の卑な値に落着く。(表69より)したがってセメント硬化体中鋼材の電位を測定することによって破壊しない状態のセメント硬化体中鋼材の発錆またはセメント硬化体の破壊を知ることが可能と思われる。ただし鋼材面に塗装を施した場合は塗料の種類によって電位は異なる。(表56より)

(4) セメント硬化体1層中の鋼材電位および抵抗の変化を測定するには測定用電線を接続(接続部分は絶縁性の樹脂で被覆)した鋼材片を完全にセメント硬化体中に封入して電線を通して測定することが誤差を少なくする方法と思われる。(実験12より)

(5) AE剤(Air entraining agent)としてVinsol resinをセメント硬化体に混入したときこれの混入有無によるセメント硬化体中鋼材電位の差はあまり認められない。

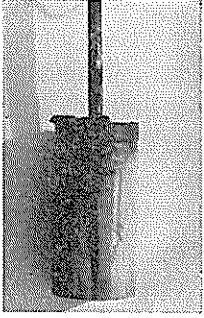


図41 No. A-13の外観

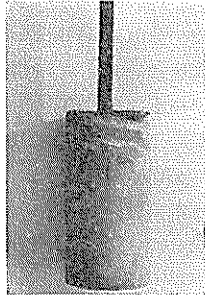


図42 No. A-14の外観

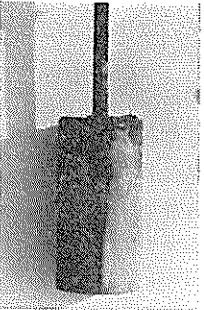


図43 No. A-15の外観

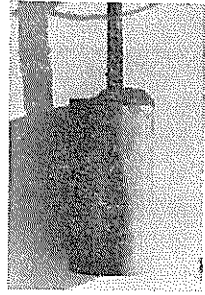


図44 No. A-16の外観

( $\approx 3.8\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )に電流は落着いているが50目を過ぎると電流は $550\mu\text{A}$ 程度( $\approx 7\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )に急増する。一方肉眼観察によれば短絡後292日では供試体No. A—13, 15, 16の3コのセメント硬化体側面にキレツが生じており, そのキレツから鉄錆が出てキレツ付近のセメント硬化体を多少茶褐色に染めているのが確かめられた。短絡後何日目から発錆が見え始めたのかははっきりしないが292日目の電流が50日付近の値に近いことから発錆によるセメント硬化体の膨張破壊は短絡後50日頃からではないかと推定される。720日目の測定では短絡電流はさらに大きくなっているけれどもNo. A—14にはまだキレツを生じていない。キレツ, 発錆の状況を図41~44に示す。またNo. A—13, 15, 16のキレツ, 発錆が生じたのはいずれも海水中セメント硬化体の海水面に近いところである。表73と図41~44より実験16の配合(JIS R 5201)でかぶりが2cm程度のとき $3.8\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の割合で腐食電流が流出した場合50日位でセメント硬化体に発錆によるキレツが発生することがうかがわれる。その後の観察によれば400日後にはNo. A—14にもキレツが発生した。



(表56より)

(6) 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位は溶媒に含まれる海水によって卑となる傾向があったが(表15, 16参照)セメント硬化体中鋼材の電位もセメント硬化体の練り水に含まれる海水のために卑となる。このときの鋼材電位は海水混入割合によって多少異なるようで、たとえば練り水が水道水:海水=1:10のときは $-340\text{mV}$ 程度であるのに対して水道水:海水=10:1または海水のみのときは $-500\text{mV}$ 以下となる。(表62, 63, 64より)練り水が海水と水道水のとき両方の練り水のセメント硬化体中鋼材の表面積が1:1のときたとえば $0.02\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の腐食電流が測定された。(表62より)したがってセメント硬化体に透水差による海水濃度にむらが生じた場合、または何らかの施工上のミスで塩分濃度の異なるカ所を生じた場合にはセメント硬化体中鋼材に腐食電池が発生する可能性がある。

(7) 水酸化カルシウム飽和溶液中の鋼材電位は鋼材の表面状態によって異なったが(表5, 6), セメント硬化体中においても同じ傾向が見られる。たとえば研磨面と黒皮面が存在するとき黒皮面がアノード, 研磨面がカソードとなる腐食電池の発生が考えられ両者の短絡によって腐食電流が生ずる。両者の表面積比が1:1のときその値は $0.02\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となり、さらに電流の流れる方向が反対となった。(表60より)

(8) また研磨面と発錆面が存在するとき発錆面がアノード, 研磨面がカソードとなる腐食電池が発生する可能性があり、両者の表面積が1:1のとき発錆面より流出する電流密度が $0.03\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となったが、さらに長期には零となった。(表61より)

(9) セメント硬化体の練り水が水道水のときの鋼材電位と純水のときの鋼材電位はほとんど大差ないようである。しかし、次第に電流が流れて1,500hr以後には $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となった。(表65より)

(10) AE剤(Air entraining agent)としてVinsol resinを使用したときこれを用いないときと鋼材電位にはあまり差は見られなかった。(表56より)しかしこの場合の鋼材はセメント硬化体より一部出て塗装されたものであるから実験14の方法で検討してみる必要がある。R. F. Stratfullの実験<sup>14)</sup>によれば、鉄筋の発錆によるキレツが生ずるまでの期間はAEコンクリートの方がAE剤を含まないコンクリートよりも短い傾向がある。

(11) セメント硬化体にAl粉末を混入した場合の鋼材電位はAl粉末を含まないときの鋼材電位よりも多少卑となり、たとえば鋼材表面が1:1のとき $0.005\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の腐食電流が発生したが、1,500hr以後では零とな

った。(表66より)

(12) 分散剤(Dispersing agent)を含むセメント硬化体と含まないセメント硬化体がある場合、前者中の鋼材がアノード、後者中の鋼材がカソードとなる腐食電池の発生が考えられ、両鋼材の表面積が1:1のときたとえば $0.02\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の腐食電流が測定されたが、1,200hr以後では電流の流れが反対となった。(表67より)

(13) 同じ配合、同じ鋼材表面であっても施工性によって鋼材電位は変ってくる、たとえば $2\text{cm}\times 3\text{cm}\times 0.1\text{cm}$ の研磨鋼材を $\phi 5\text{cm}\times 10\text{cm}$ のセメント硬化体(練り水:水道水)中に埋設しても最大約100mVの電位差を生じて60~300hrでは $0.02\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の腐食電流が測定されたが800hr以後では電流の流れが反対となった。(表68より)

(14) セメント硬化体に乾湿部が存在するとき湿部セメント硬化体中鋼材がアノード、乾部セメント硬化体中鋼材がカソードとなる腐食電池の発生が考えられる。このとき湿部セメント硬化体表面が緻密であれば乾湿部セメント硬化体中鋼材間の電位差はあまり大きくないので大きな回路抵抗(乾部)のために腐食電池はかなり抑制されるようであるが、湿部セメント硬化体表面が粗なところがあれば(たとえば破断面など)乾湿部の電位差は大きくなり腐食電池の活動が認められ両部の鋼材表面積が1:1のとき100hr以後は $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の電流が測定されたが400hr以後は減少して $0.01\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となった。(表71より)

(15) セメント硬化体のかぶり厚が2cm程度の鋼材より $3.8\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の腐食電流量が約50日間流出するとセメント硬化体が錆の膨張により破壊し始めると思われる。(表74, 図41~44より)このとき破壊した供試体は4コ中3コであるからごく大まかにいって破壊の確率は75%ということになる。またセメント硬化体の75%が埋設鋼材の発錆のために破壊するまでの所要電流量は概算 $4.6\times 10^{-3}\text{AH}/\text{cm}^2$ または $46\text{AH}/\text{dm}^2$ となる。これは $5\text{mg}/\text{cm}^2$ または $48\text{g}/\text{dm}^2$ の鋼材の溶解に相当する。400日付近では残りの1コのセメント硬化体にもキレツが発生した。

(16) したがって異種金属(鋼材より貴電位の金属、たとえば銅など)との接触などセメント硬化体中鋼材がアノードとなる腐食電池の形成は危険である。(表74, 75より)

(17) 以上の結果よりセメント硬化体1層中鋼材にはいろいろな理由から電位差を生ずるが上述の実験条件では発生電流は次第に減少して鋼材の電位は貴の値に保たれることがわかる。

以上の外にセメント硬化体が交番浸漬された場合または塩素イオン以外の陰イオンとくに硫酸イオンを含む溶液に浸漬された場合その他のいろいろの環境条件におかれることが想定される。

また野外における長期実験や調査結果も参照して見る必要がある。したがってセメント硬化体1層中鋼材の腐食傾向を正しく評価する意味から以下に実験、調査、規則例について触れてみることにする。

R. F. Stratfull<sup>14)</sup> は浸漬溶液の差(塩化ナトリウム飽和溶液と硫酸ナトリウム溶液)を鉄筋コンクリートについて検討している。

#### 供試体

II型のセメント(註D)を使用した $2'' \times 5'' \times 18''$ ( $\approx 5.1\text{cm} \times 12.7\text{cm} \times 45.7\text{cm}$ )のセメント硬化体(AEコンクリートとAE剤を含まないコンクリート)中に $\phi 1/2'' \times 15 1/2''$ ( $\approx \phi 1.3\text{mm} \times 39.4\text{cm}$ )の寸法でサンドブラストで研摩した鉄筋を埋設した。このときのセメント硬化体のかぶりは $3/4''$ ( $\approx 19\text{mm}$ )である。セメントの使用量は6と7 sacks/cu.yd.でAE剤としては中性化された Vinsol resin が混和され4.5%の空気量が進行された。また骨材はAEコンクリートの場合粗骨材が52%,細骨材が48%,ブレンコンクリートの場合は50%と50%である。成型後14日間 $73.4^\circ\text{F}$ ( $23^\circ\text{C}$ )の噴霧室で養生され、さらに60日間空気中で乾燥された。

#### 測定

塩化ナトリウム溶液と硫酸ナトリウム溶液それぞれに供試体を1部浸漬と交番浸漬の2通りの浸漬をして、化学分析による塩素イオンと硫酸イオンの定量、セメント硬化体面から求める鋼材電位差の測定、セメント硬化体の劣化の観察などを行なった。その結果次のような興味ある結果が得られた。

浸液に塩素イオンが含まれたときの方が硫酸イオンが存在するときよりも劣化は早い。すなわち前者では一部浸漬の場合10~40日位、交番浸漬の場合40~60日位で劣化が見られたが後者では214日まで劣化がおこらなかった。また劣化は電位が相対的に卑な部分に発生するので電位測定によって定性的な判断が下せると述べている。

塩素イオンの吸収量は貧配合ほど大きく、一部浸漬の場合はAEコンクリートの方がブレンコンクリートよ

り塩素イオン吸収量は少ないが交番浸漬の場合はこれと反対になるともいっている。また交番浸漬では劣化がおこるとアノード電位の位置が別の新しいところに移ることに触れている。結局 Stratfull はこの実験からセメント硬化体中鋼材が発錆するまでの期間はセメント硬化体の性質、水分量、かぶり、環境の化学組成に左右されるものであるとしている。

H. F. Finley<sup>15)</sup> はセメント硬化体中鋼材の腐食の第1の物理的原因は透水性であり、透水にもとづいて酸素濃淡(溶質濃度差または吸水量の差による)電池の発生によって腐食反応が進むとしている。また1916年に行なわれたアメリカ海岸の数多くの鉄筋コンクリート構造物についての調査結果の概要に触れている。すなわちこれらの構造物の大多数は海水面より上にある埋設鉄筋の腐食によって劣化または破壊したことが明らかである。鉄筋の腐食については、

(i) 腐食はまずコンクリートのひび割れ部分の裸鋼材に発生するが、たとえそうであったにしても、このために構造物が破壊した例はあまりない。(訳注、この事実は後述する2層についての実験結果と一致する。図64 65参照)

(ii) 鉄筋の腐食は海面上でのみおこるものであり、それもコンクリートがしぶきをかぶるところに限られる。

(iii) 海水中塩分が蓄積されて濃度が大きくなったところは必ず腐食した鉄筋上のコンクリート部分である。

(iv) 鉄筋の腐食はコンクリートの化学的劣化(chemical deterioration)とは関係ない。

さらに Gewertz, Trempter, Beaton, Stratfull が行なった San Mateo-Hayword 橋(鉄筋コンクリート製, San Francisco Bay)についての入念な調査の結果<sup>15)16)</sup>を簡単に紹介している。すなわち、

(i) 鉄筋の腐食は孔食(deep pits)の形であった。

(ii) 海水面以下では鉄筋の腐食は発生しなかった。

(iii) 鉄筋の腐食と鉄筋を覆っているコンクリートのひび割れ、または化学的劣化とは何の関係もなかった。

(iv) 腐食した鉄筋上のコンクリートは非常に透水性であり強度は低かったが、この低い強度は高い値から低下したことは明らかである。

(v) 鉄筋腐食のもっとも大きいところのコンクリート中には非常に大量の吸収された塩分が検分された。このときの塩分濃度はコンクリート表面から内部の方に次第に少なくなっており、塩分は海面上のしぶきによって蓄積されたものであった。

塩分量のもっとも多いところは平均潮位面と海水のし

注1) アメリカ政府規格 SS-C-192 に規定されたセメントの型5つの中の1つでもっとも普遍的に用いられているものである。組成的には $\text{C}_3\text{A}$ が少なく $\text{C}_4\text{AF}$ の多いのが特長であり、このために熱の発生を減少し容積変化が小さく硫酸塩(アルカリ)溶液に対する抵抗性が大である。

ぶきをかぶる上端との間であった。

(vi) 電位を測定したところ鉄筋の腐食が発生した部分が腐食が発生しなかった部分に対して卑の電位であった。

このようなアノード、カソード部分は 10 ft (≒3 m)ほど離れていた。

(vii) 補修は鉄筋腐食部分をけずり落として吹き付け (shotcrete) とさらにアスファルト被覆が施された。

(viii) アスファルト被覆をすると、被覆部分の鋼材がその付近の鋼材に対して今度はカソードとなることしばしばあった。

(ix) コンクリートの劣化はその電気抵抗が小さければ小さいほど大きく、カソード部分の抵抗はアノード部分の抵抗より大きかった。

San Mateo-Hayward 橋の調査で(先述のアメリカ海岸における鉄筋コンクリート構造物についての調査でもそうであったが)鉄筋の腐食は海水面下では発生しなかったことに対して次のように説明している。すなわち海中の鉄筋コンクリートでは鉄筋の表面に強固な防食被膜が生成されたために酸素が欠乏したものと思われる。このときコンクリート中の空隙水が塩素イオンに接するのみであるから防食被膜は塩素イオンによって浸食されるおそれはない。このようにコンクリート中の濃アルカリ性環境においては腐食を発生する酸素濃淡電池は酸素濃度の高低間に存在するものであって、一方の酸素濃度が零のときは存在しない。

R. Shalon & M. Raphael<sup>14)</sup>は鉄筋腐食におよぼす海水の影響に関する研究を行なうに際してこの問題の現状として次のように述べている。

(1) 鉄筋の腐食速度に対する海水の影響については系統的な研究がこれまでは行なわれなかった。また利用できる資料は少なく、理路整然とというには程遠くときには相反することもある。

(2) ドイツ規格<sup>17)</sup>ではアルミナセメントを用いるとき以外は鉄筋コンクリート構造物に対して全ての自然水の使用を許している。またドイツ鉄道規格 (AMB)<sup>18)</sup>は塩化ナトリウムまたは塩化マグネシウムを3%以上含む水を鉄筋コンクリート構造物に使用することを禁止している。このためバルチック海の海水(全塩化物量 0.7%)と北海の海水(全塩化物量 3.3%であるが塩化ナトリウムまたは塩化マグネシウム含有量は3%以下)は使用できる。

(3) ACI 建築規則<sup>19)</sup>では有害物質の有害量以下の水を使用することを述べた以外は無機塩または海水についてはとくに触れていない。これに反してプレストレストコ

ンクリート<sup>20)</sup>に対しては海水は禁じられている。

(4) Gilkey<sup>21)</sup>は、もし強度の低下が考えられないならば鉄筋コンクリート構造物用コンクリート作成に海水を使用することは反対していない。

(5) ボルトランドセメント協会<sup>22)</sup>は無筋または鉄筋コンクリートのどちらにも海水を使用することを許している。

(6) イギリス規則<sup>23)</sup>はエフロレッセンス (efflorescence, コンクリートを風雨にさらしておくとその面に白い結晶の表層ができることがある。この表層をエフロレッセンスという) がひどくないとき以外は海水の使用を許している。

(7) ロシヤ規則<sup>24)</sup>は熱帯と乾燥地方の海岸構造物としての鉄筋コンクリート構造物に海水を使用することは鉄筋腐食とエフロレッセンスの危険性の観点から禁じているが、海岸、熱帯または乾燥地方でないところで鉄筋コンクリート構造物のコンクリート練り水に海水を使用することは反対していない。

ついでに日本の状況を参考として記してみる。

吉田徳次郎氏<sup>25)</sup>は「ボルトランドセメント、高炉セメント、シリカセメント等を用いる場合、海中工事における無筋コンクリートには海水を用いてもよいが、鉄筋コンクリート工事には、海水を用いないのが安全である。海水を用いたために、鉄筋コンクリートが破壊したという例はないようであるが、海水を用いたことが、鉄筋コンクリートの破壊の原因の一つではないかと考えられる实例はある。少なくとも、電流の影響が予想できる鉄筋コンクリート構造物の場合には、海水を用いないのがよい。アルミナセメントを用いる場合には、決して、海水を用いてはならない。

標準示方書(鉄筋)には、鉄筋コンクリートには海水を用いてはならない。とある。」と述べている。

R. Shalon & M. Raphael<sup>14)</sup>は水酸化カルシウム溶液中の鋼材腐食にひきつづいてモルタル中鋼材の腐食傾向を検討して次のような結果を得た。このときのモルタル寸法は 4×4×16 cm, 鉄筋(軟鋼)の直径は 6 mm, モルタルのかぶり厚は約 1.7 cm である。

(1) 地中海の海水練りで空中曝露のモルタル、コンクリートのアルカリ性は鉄筋の腐食発生を完全に抑制するには不十分である。このことはまた水道水練りのコンクリート中に海水が透水するときにもあてはまる。

(2) 空中曝露の鉄筋構造物用のモルタルまたはコンクリートの練り水に使用する海水は鉄筋を非常に腐食されやすくする。

(3) 海岸の鉄筋構造物は海水または噴霧海水のいかな

る侵入に対してもとくに密なコンクリート、十分なかぶりさらには特殊な表面処理によって保護されるべきである。

(4) もし海水、波などに耐えるためのコンクリートに対する普通の要求が守られるならば、実際の港湾構造物 (sea structures) の状況から確かめられた実験結果は常に海水浸漬部分の鉄筋コンクリート中の鉄筋にはコンクリートの練り水が水道水であっても海水であっても腐食の危険性はないという仮定に対して十分な根拠を与えると信ずる。

(4)の理由としては海水または水道水中に浸漬されるセメント硬化体中では鋼材腐食阻止に必要な pH 限界値 (12.95) 以上に保たれることと均一塩分濃度の2つをあげている。また pH>12.95 に保たれることは海水中に存在する  $MgCl_2$  の  $Ca(OH)_2$  に対する作用のために可溶性  $CaCl_2$  濃度が増加せず、したがって  $CaCl_2$  濃度増加によって pH 値が非常に低下するということがなくなることによると説明している。この点 H. F. Finley が述べている酸素欠乏説とは異なるようである。

I. L. Tyler<sup>26)</sup> は15年以上海水または淡水にさらしたコンクリートについて耐久性を検討している。実験場所は寒冷地の海水として Cape Cod Canal、寒冷地の淡水として Esopus Creek と Hodson River、温暖地の海水として Florida と南 California である。コンクリート・パイルは断面が  $12\text{ in}^2$ 、長さは  $20\sim 30\text{ ft}$  である。鉄筋コンクリートの場合かぶりは  $1\frac{1}{2}\text{ in}$  で鉄筋は  $\frac{5}{8}\text{ in}$  の丸棒である。供試体はいずれも海水または河水中に打込まれたが水面上にも出ていて  $4\sim 6\text{ ft}$  の潮位間の劣化状況も観察、測定 (無破壊試験による強度変化) された。5地点別の劣化傾向が述べられているが5地点の実験結果から次のような結論を示している。

(1) 海水にさらされた場合は常に  $1\frac{1}{2}\text{ in}$  ( $\approx 3.8\text{ cm}$ ) のかぶりでは鉄筋の発錆およびコンクリートのひび割れを防ぐには不十分であった。しかし淡水の場合は一部十分である傾向が見られた。肉眼観察によれば鉄筋の発錆とコンクリートのひび割れは温暖地の海水 (Florida と南 California) に接したときほどかった。

(2) 水セメント比 W/C (ここではセメント量とコンクリートのスランブで示されている) はどの実験地点 (酸性の水が混入した河水の場合も含めて) においても重要な役割を示した。すなわちセメント量が7袋でスランブが2 in の供試体 (W/C $\approx$ 5 gal. per sack) は15~17年の曝露にはどの地点においても耐久性はすぐれたけれどもセメント量が5袋、スランブが2 in (W/C $\approx$ 7 gal. per sack) の供試体はもっともひどい劣化状況を示した。

Cape Code における実験結果から ACI 613-54 に示されている 4.5~5.0 gal. per sack は W/C はきびしい気象条件下の海水にさらされる空気連行コンクリートに対する最適の W/C であると考えられる。

(3) コンクリート中への空気連行はコンクリートが寒冷地または温暖地の海水にさらされるときある程度有効である。この傾向は温暖地よりも寒冷地のときの方が大きい。

(4) 酸性の淡水中ではセメント組成は重要でない。

(5) 海水による化学浸食の最初のはっきりした徴候はセメント No. 18 ( $C_3A$  が最も多量,  $SO_3$  1.83%, Free  $CaO$  0.33%,  $MgO$  2.13%,  $Na_2O$  0.15%,  $K_2O$  0.14%,  $C_3S$  48.2%,  $C_2S$  24.9%,  $C_3A$  12.2%,  $C_4AF$  6.8%) を使用した Florida の実験地で見られた。このセメントは他の実験地点では  $SO_4^{2-}$  侵食にどのセメント種よりも弱かった。このような侵食は貧配合の供試体が最もひどかったが、一方富配合の供試体にも侵食が起こり富配合だけでは完全な防食をすることはむづかしいことがわかった。このことと他の研究者の検討結果から海水による侵食は反応が非常に遅いということを除けば濃い硫酸塩溶液による侵食に類似しているといえよう。

(6) 寒冷地においては貧配合のときの吸水様式 (absorptive form liners) はコンクリートの劣化状況に大きな影響はなかった。一つのセメント種が劣化の徴候をはっきり示し  $C_3A$  含有量はとくに多いとき考慮すべきであることがわかったけれどもさらに海水用セメント種を決められるとは思われない。このことは Florida の実験地点付近の技術者達による海水浸漬構造物についての資料によって確かめられた。

最後に耐海水性コンクリートの性質をはっきりさせるためにさらに50種のセメントまたはセメント-混和物の配合の供試体 ( $6\times 6\times 30\text{ in}$ ) 800 ほどが San Pedro, California において実験中であることを付記している。R. F. Stratfull<sup>27)</sup> はカリフォルニア州のハイウェイに使用されている多数の鉄筋コンクリート橋について調査した結果と室内実験結果より鉄筋コンクリート構造物の地上部分の耐用年数を推定する関係式を次のように提案した。

すなわち

$$R_t = \frac{1.107^e \times C^{0.717} \times S_i^{1.22} \times 1011}{K^{0.42} \times W_m^{1.17}}$$

$R_t$  : 鉄筋コンクリート構造物の70%に鉄筋腐食が発生するまでの年数

$C$  : セメント量, sacks/cu. yd

$S_i$  : かぶり, in

$K$  : 土中または水中の塩化物量, ppm

$W_m$ : コンクリート量に対する水量, Vol. %

さらに上式を適用しやすいうように 図 45 に示すノモグラフを作成している。ただしこの推定式にはセメントの型, 骨材の大きさ, 粒度, 製造, 混和剤, 施工性, 養生, 温度などの影響については検討されていない。

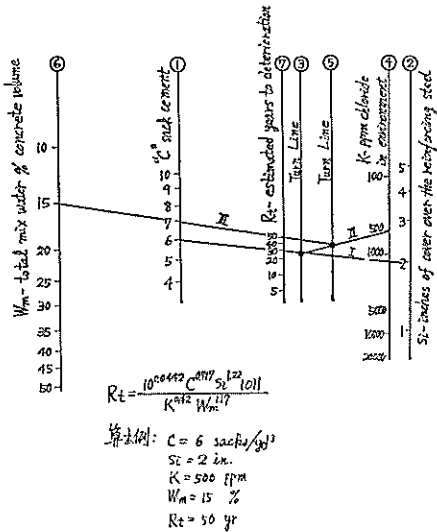


図 45 鉄筋コンクリートの耐用年数推定用ノモグラフ (by R. F. Stratfull)

J. Franquin<sup>283</sup> は過去 30 年フランス内で行なわれた調査を要約している。プレストレスト コンクリート内の鋼線の腐食機構は応力をかけないときのコンクリート内の鋼材腐食機構と全く同じであるがただ非常に加速される。もし鋼材が均質なポルトランドセメント中に埋設されるならば Pourbaix's graph (図 13 参照) に示すように不活性電位 (passivating potential) となって腐食は発生しないが, 全体的にまたは部分的にコンクリートの物理的組成が変ると不活性ではなくってくる。このようなところでは鋼材電位が卑となり電位のむらを生じた部分では腐食電流が発生する。後者のコンクリートの物理的組成が部分的に異なることは水によってひきおこされるのでプレストレスト コンクリートにおいては最高の不透水性が強く望まれる。調査した破壊実例から次の基本原則が考えられる。

(i) プレストレスト コンクリートの長尺物の設計またはそれら部品の製作にあたっては均質ということが必要である。さらにパイプラインは同じ組成の部品で組立てられるべきであるがもし部品が異質であるときには絶縁接手を使用しなければならない。製造期間中ポルト

ランドセメントのみが使用され各工程は厳格に管理されねばならない。材料と製造方法の一定化が質, 量ともにもっとも緻密で均質なコンクリートを生産することにつながる。

(ii) 使用される硬鋼はもろくなくまた腐食性でもないものである。使用前に行なわれる検査は製品の品質を保証するに違いない。

(iii) プレストレストコンクリートのパイプラインが埋設される道筋は土壌の腐食性を予知するために調査されねばならない。

結局ここ 20~30 年間に 1950 年代におこった災害報告を読むと技術者はプレストレストコンクリートパイプは産業構造物としての品質に疑念を生ずるかもしれないが, このような災害は冶金技術者, パイプ製造業者, パイプ使用者の注意を促ながして現在では多大の注意がプレストレストコンクリートのパイプライン建設に向けられており先に概要を述べた勧告処置がとられている。

以上の実験結果および過去の実験および調査例からわかるようにセメント硬化体 1 層中の鋼材はセメント硬化体が物理的, 化学的に不均一であれば常に腐食の危険性がつきまとう。とくに港湾においては海面上のセメント硬化体部分にこのような懸念が集中するため海面上のセメント硬化体中鋼材に対しては不均一を生じさせない努力と適切な防食措置を講ずることが必要である。

防食法としては電気防食法が適用例<sup>16)29)</sup>も多くまた原理的にもアルカリ性の増加と電位差の解消が望めるために実用的であると思われる。この外 K. S. Frazier<sup>30)</sup>は亜鉛メッキした鉄筋を使用すると鉄錆が 13 倍に容積膨張するのに対して亜鉛メッキした鉄筋上の白色腐食生成物は薄くコンクリートにひび割れ, はく落ちおこさせるほどの容積膨張がなく, 付着強度も裸鉄筋の 5 割増程度となるため亜鉛メッキした鉄筋の使用は防食上効果的であると述べている。

### 3.3 セメント硬化体と海水 (もしくは海水飽和泥層) の 2 層の場合

セメント硬化体 1 層中鋼材の腐食傾向については 3.2 で紹介したようにいろいろと検討されているが, 本節で取り上げる 2 層の場合のセメント硬化体中鋼材の腐食傾向についての検討は少なく<sup>31)</sup>, またあまり突っ込んだ検討はほとんど行なわれていない。しかし 2 層の場合はセメント硬化体 1 層にひび割れが生じた状態に相当する外さらに 3 層の場合のセメント硬化体中鋼材の腐食傾向を解明するための一つの足掛りにもなると考えられるので重要である。したがって 2 層の場合について以下のように

に実験を進めた。

実験17 鋼材がセメント硬化体と海水（流動）に接する場合の腐食傾向

供試体

鋼材の形状、寸法、重量、表面積、表面積比、セメント硬化体の配合についての一覧表を表76に示す。作成の順序はまず鋼材（SS-41）の一隅にφ1mmの穴をあけてから研磨、脱脂後重量を秤る。鋼材の穴に測定用電線の1本接続して裸電線部分と鋼板の接続部分を絶縁性の合成樹脂（リゴラック、理研合成K.K.製品）で被覆する。電線の長さは供試体の浸漬場所によって異なるがNo. r以外は直接に久里浜湾（神奈川県、横須賀市）に浸漬するためにそれぞれ9mとした。供試体No. rのみは室内の水槽（海水、攪拌）中に設置するために1mとした。一方セメント硬化体の作成はJIS R 5201セメント強度試験方法の供試体作成方法に準じて行なった。すなわち表76に示す配合の材料を計量して練り鉢（φ30cm、中央深奥部の深さが10cm程度の鉄製）に入れて手練をし、手練りしたグラウトをφ5cm×10cmの鋼製型枠に注型する。使用海水は久里浜湾より汲んだものである。注型したグラウト中央部に先に準備した電線付鋼板を埋設する。このときのかぶりは次の通りである。

鋼材寸法

鋼材寸法	セメント硬化体φ方向のかぶり (cm)	セメント硬化体長さ方向のかぶり (cm)
3 cm=1 cm×1.5 cm×2	2	4.2
6 cm=1.5 cm×2 cm×2	1.7	4
12 cm=2 cm×3 cm×2	1.5	3.5
30 cm=3 cm×5 cm×2	1	2.5

注型後24時間標準養生してから脱型し室内に2日間放置した後実験に供した。セメント硬化体中に埋設した鋼材と裸鋼材をそれぞれ表76に示すような表面積比の組合わせとなるように設置した。設置の要領はまず鋼材を封入したセメント硬化体を木箱（50 cm×50 cm×70 cm）の底部に置き裸鋼材は上部付近に吊り下げて木箱を海底に沈めた。このとき各鋼材片に接続されている測定用電線は全部陸上の操作盤に集められた。木箱中の各供試体はお互いが接触しないように固定されまた木箱自身も波によって転倒しないように木箱の底部にコンクリート製の籠りがつけられた。木箱中には海水が自由に入出入り出来るように木箱の側面と上面は格子状である。また表76からわかるようにセメント硬化体の練り水による差を比較するために練り水として水道水と海水を使用するとともに、1層と2層よりなるときのセメント硬化体中鋼材の

表 76 実験 17 の 供 試 体

No.	鋼 材						セメント硬化体			回路	
	表面積 (cm <sup>2</sup> )		表面積比		重 量 (g)		配 合				
	A <sub>M</sub>	A <sub>SW</sub>	A <sub>M</sub> : A <sub>SW</sub>	W <sub>M</sub>	W <sub>SW</sub>	C (g)	S (g)	W (g)			
r	30	3	10	1	11.9555	1.4050	520	1,040	338	水道水	短絡
h	12	3	4	1	5.3660	1.0806	520	1,040	338	水道水	短絡
i	6	3	2	1	2.6836	1.1308	520	1,040	338	水道水	短絡
j	3	3	1	1	1.0556	1.0724	520	1,040	338	水道水	短絡
k	3	6	1	2	1.0568	2.6350	520	1,040	338	水道水	短絡
l	3	12	1	4	1.0064	5.2690	520	1,040	338	水道水	短絡
m	12	12	1	1	5.2795	5.2920	520	1,040	338	水道水	開路
n	3	3	1	1	1.0820	1.1106	520	1,040	338	海水	短絡
o	12	—	4	—	5.3172	—	520	1,040	338	海水	—
p	12	—	4	—	5.3220	—	520	1,040	338	海水	—
q	—	12	—	4	—	4.4304	—	—	—	—	—

鋼材の形状寸法

- 3 cm<sup>2</sup>=1 cm×1.5 cm×2
- 6 cm<sup>2</sup>=2 cm×1.5 cm×2
- 12 cm<sup>2</sup>=2 cm×3 cm×2
- (鋼材片の厚み 0.1 cm)

表 77 鋼材電位測定値 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

No.	0 day			1 day			2 day			7 day			21 day			174 day		
	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_{SW}$	$E_M$
r	575	528	240	710	698	535				734*	740*	440*	710	728	490	677	688	390
h	598	418	215	690	709	582	702	711	642	708	710	692	725	728	670			
i	546	390	198	701	717	448	722	719	600	694	700	579	705	716	574			
j	562	395	195	693	710	350	720	732	440	724	726	480	698	698	492			
k	672	428	194	708	719	439	709	720	423	708	700	535	702	712	524			
l	650	446	188	730	725	390	724	721	450	720	740	502	700	702	518			
m	677	432	178		730				752	262		722	255	705				
n	572	444	325	732	731	632	744	742	641	748	755	570	698	702	532			
o			298			323			380			465		454				
p			314			408			442			460		300				
q		420			719			711			700		711					

\* 14 day

腐食傾向を比較するために供試体は短絡と開路の状態に保たれた。

測 定

測定項目は電位, 電流, 抵抗の測定および供試体表面の観察である。

(1) 電 位

電位としては  $E_0$  (セメント硬化体中鋼材と海水中鋼材を短絡したときの電位),  $E_M$  (開路のときまたは短絡前のセメント硬化体中鋼材電位),  $E_{SW}$  (開路のときまたは短絡前の海水中鋼材電位) の3つがあるがいずれも海水塩化銀電極に対する値を電位計で測定した。 $E_M$ ,  $E_{SW}$  は短絡供試体では短絡前と開路後について, 単独浸漬の供試体では単独状態について測定されたが, 開路後の電位は開路5分後の値である。また短絡電位  $E_0$  の測定は No. m, o, p, q に対してはこれらが単独浸漬であるから行なわなかった。単位は -mV である。

(2) 電 流

短絡された No. h, i, j, k, l, n, r について電流測定を行なった。すなわち操作盤上の短絡供試体端子間に D.C. 電流計を挿入して安定した電流値を読んで短絡電流とした。単位は  $\mu A$  である。

(3) 抵 抗

抵抗測定は  $R_M$  (セメント硬化体中鋼材と標準電極: 実験12参照との間の抵抗) と  $R_{M-SW}$  (セメント硬化体中鋼材と海水中鋼材間の抵抗) について A.C.ブリッジで行なわれた。A.C.ブリッジは港研式腐食計の抵抗測定部を使用し単位は  $\Omega$  である。

(4) 供試体表面の観察

セメント硬化体および海水中鋼材の表面状況を肉眼で

表 78 海水浸漬後の鋼材単極電位変化 (海水塩化銀電極基準)

研 磨 鋼 材			発 錆 鋼 材	
浸漬時間 (min)	浸漬時間 (hr)	電 位 (-mV)	浸漬時間 (min)	電 位 (-mV)
0		390	0	200
1		415	1	230
2		418	6	300
3		418	10	360
4		410	15	390
5		410	20	415
10		414	25	420
15		422	30	422
20		430	60	450
25		438	90	470
30		444	120	483
60		485	157	495
120		508	180	500
180		530	210	518
	74	630	1,530	600
	148	640	2,970	620
	172	635	5,850	650
	197	640	7,290	654
			10,170	670
			30,330	670

観察した。観察は表76に示す供試体の外に1本の鋼材の一部がセメント硬化体であり他の一部が海水に接しているものについても行なわれた。

測定結果および考察

### (1) 電 位

電位測定結果を表77に示す。表77の上欄に示す日数は供試体の海水浸漬期間で0日は浸漬口を意味するものであり、0日の電位  $E_{SW}$ ,  $E_M$  は短絡前の値,  $E_0$  は短絡直後の値である。また1日以降の  $E_0$  はその期間まで短絡したときの短絡電位であり  $E_{SW}$ ,  $E_M$  はその期間まで短絡していた回路を開いてから5分後の開路電位である。表77によれば短絡前のセメント硬化体中鋼材電位  $E_M$  は練り水が水道水るときは  $-200\text{ mV}$  程度であるが、練り水が海水るときは水道水るときより  $100\sim 130\text{ mV}$  卑となっている。この傾向はセメント硬化体1層中の鋼材について行なって先の測定結果と同じである。一方海水中に浸漬された裸鋼材の電位は  $-400\text{ mV}$  付近である。浸漬時の電位は一見多少貴に思えるが、これは表78に示す浸漬後の電位変化とともに表77の1日以降の  $E_{SW}$  の値を参照することによって海水浸漬後の鋼材の電位が次第に  $-600\text{ mV}$  台の卑な値に向うことが納得できよう。表77の0日の  $E_M$ ,  $E_{SW}$  を比較してみると  $E_M > E_{SW}$  すなわち  $E_M$  の方が  $E_{SW}$  より貴であるからセメント硬化体中鋼材と海水中鋼材とが短絡されるときには前者がカソード、後者がアノードとなるマクロ腐食電池が発生

することが予想される。これを確かめるために表77より0日と短絡21日後の  $E_0$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_M$  の関係を図示すると図46, 47のようになる。このときの  $E_M$  は開路5分後の値であるが何れも短絡された場合セメント硬化体中鋼材がカソード、海水中鋼材がアノードとなり  $E_0$  は当然  $E_M$  と  $E_{SW}$  間に存在する。

短絡電位  $E_0$  は短絡後1日以上経つとほぼ安定するようどとくに  $E_0$  とカソード表面積(セメント硬化体中鋼材の表面積,  $A_M$ ) 対アノード表面積(海水中鋼材の表面積  $A_{SW}$ )すなわち  $A_M/A_{SW}$  との間には関係は見受けられない。これに対して開路後の電位  $E_{SW}$ ,  $E_M$  は短絡期間が長くなっても一定とはなっていない。しかしあくまでも表77の  $E_{SW}$ ,  $E_M$  は開路後5分してから測定された値であるから  $E_{SW}$ ,  $E_M$  の開路後の経時変化を調べてみる必要がある。表79に供試体 No. r の  $E_M$ ,  $E_{SW}$  の変化模様を示す。(供試体 No. r 以外は全部1965年秋の台風で流失して現在追加実験中なので、長期間浸漬したときの測定値が間に合わないためにここでは No. r のみに限定した。なお、さらに長期の実験を追加実施中である。表79を図示すると図48のようになる。図48によれば  $E_{SW}$  は開路とともに直ちに安定となるが安定する電位

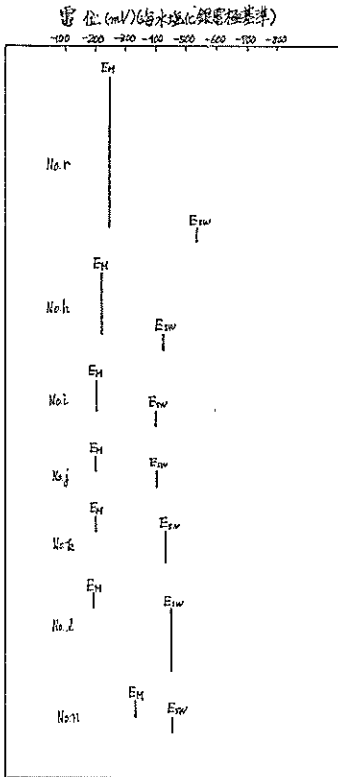


図46 開路電位 (0 day)

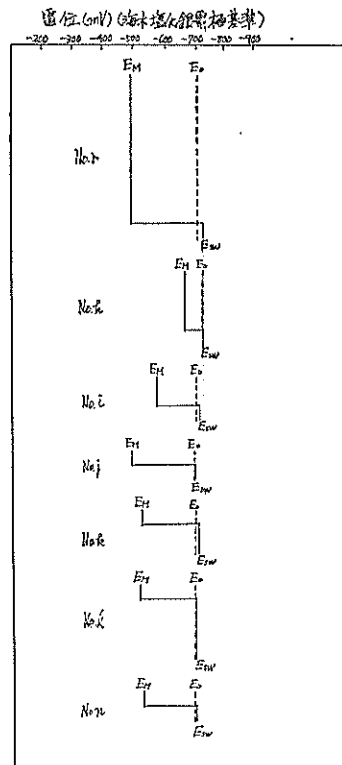


図47 短絡電位と開路電位の関係 (21 day)



表 79 開路後の電位変化 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

No.	$E_0$	1 min		5 min		10 min		15 min		20 min		25 min		40 min		90 min		浸漬期間 (day)	
		$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$		
r	734	740	636	720	544	740	505	721	490	721	472	730	440					14	
r	710	705	600	709	570	721	522	715	522	727	502	728	490					21	
r	667	680	565	675	490	675	458	675	437		420	675	410			398	688	390	174

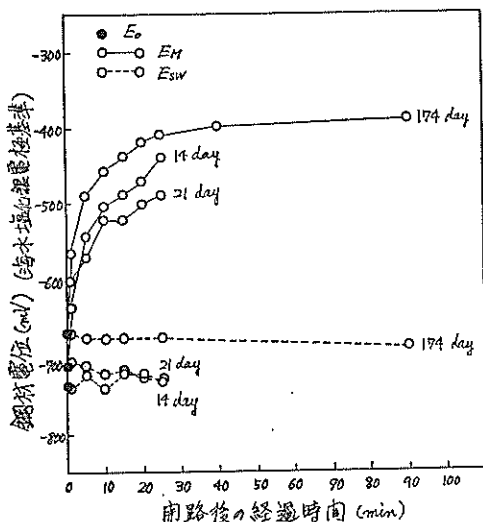


図 48 開路後の電位変化 (No. r)

は  $E_0$  よりやや卑な値である。しかし  $E_M$  の方は開路とともに次第に貴の方に急激に変化して行き大体30分以後は変化勾配はごく緩くなり、一見安定電位に60分~90分後には達したかのように思われるが、後述の表 175 に示す3層のときのセメント硬化体中鋼材の  $E_M$  の経時変化と同じくかなり長期にわたって電位は貴となって行くものと推察される。また図48によればセメント硬化体中鋼材と海水中鋼材間に発生した腐食電池は174日目でも1~2週間目と同じ位の見掛けの電位差を保っていることがわかる。一方単独浸漬(開路状態で浸漬)では練り水が水道水のセメント硬化体中鋼材(No. m)の電位は-200mV程度度の貴な値であるが、練り水が海水のセメント硬化体中鋼材(No. n, o, p)の電位は-400mV前後となっている。また海水中単独浸漬の鋼材(No. q)の電位は-700mV程度で短絡されている海水中鋼材の電位(No. h, i, j, k, l, n, r)の  $E_{SW}$  と変らない値である。

(2) 電 流

電流の測定結果を表 80 に示す。図 47, 48 から予想されるように表 80 に示す電流値いずれも海水中鋼材が、(-), セメント硬化体中鋼材が(+)となるように D.C.

表 80 セメント硬化体中鋼材に流入する電流

No.	$I_M$ ( $\mu A$ )							
	0 day <sup>a</sup>	0 day <sup>b</sup>	1 day	2 day	7 day <sup>c</sup>	7 day <sup>d</sup>	21 day	169 day
r	84		12			7 <sup>e</sup>	6	7.5
h	60	47	14	10	4	4	3	
i	22	19	14	3	4	5	5	
j	22	23	22	12	3	4	2.5	
k	62	39	16	13	5	7	3	
l	38	29	17	13	4	5	7.5	
m	140	90						
n	40	45	3	3	6	7	3	
o								
p								
q								

- a 浸漬時
- b 浸漬後 1 hr
- c 供試体の入っている木箱を海底に静置して測定した場合
- d 供試体の入っている木箱を海水中で上下させて測定した場合
- e 14 day

電流計の端子に接続したときの電流計の指度である。したがって表80の値は海水中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流値を示すことになる。表80によると短絡時の電流は大きい時間が経過とともに分極作用のために次第に電流は減少し大体1週以後は落着くように見受けられるが、これらの傾向はさらに電流密度として以下のように検討することにする。

セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表80に示す電流値  $I_M$  ( $\mu A$ ) をセメント硬化体中鋼材表面積  $A_M$  ( $cm^2$ ) で割ってセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度  $I_{MD}$  ( $\mu A/cm^2$ ) を算出すると表 81 のようになる。単位は  $\mu A/cm^2$  である。表 81 にもとづいて電流密度を短絡期間に対して図示すると図 49 のようになる。図49によればセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度は短絡後20日位で大体安定となるようであり、また

表 81 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_{SW}$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )								
			0 day	0 day	1 day	2 day	7 day	7 day	21 day	169 day	
r	30	10	2.80		0.40				0.23*	0.20	0.25
h	12	4	5.00	3.92	1.17	0.83	0.33	0.33	0.33	0.25	
i	6	2	3.67	3.17	2.33	0.50	0.67	0.83	0.83	0.50	
j	3	1	7.33	7.67	7.33	4.00	1.00	1.33	1.33	0.83	
k	3	0.5	20.7	13.0	5.33	4.33	1.67	2.33	2.33	1.00	
l	3	0.25	12.7	9.67	5.67	4.33	1.33	1.67	1.67	2.50	
m	12	1	11.7	7.50							
n	3	1	13.3	15.0	1.00	1.00	2.00	2.33	2.33	1.00	
o	12										
p	12										
q											

\* 14 day

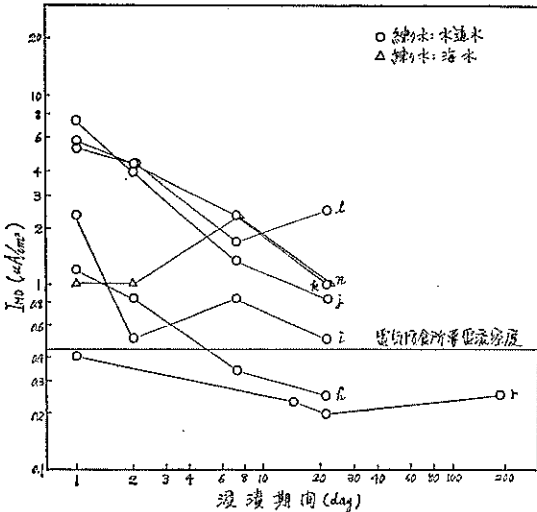


図 49 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

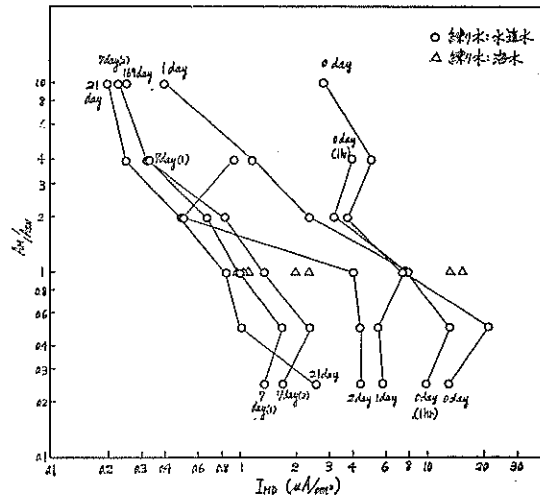


図 50  $I_{MD} \sim A_M/A_{SW}$  の関係

その値はセメント硬化体中鋼材の表面積  $A_M$  対海水中鋼材の表面積  $A_{SW}$  (すなわち  $A_M/A_{SW}$ ) に反比例することがわかる。一般にセメント硬化体中鋼材に対して必要な電気防食電流密度は次のように示されている<sup>31)</sup>。

塩化物を含むとき  $0.0045 \text{ A}/\text{m}^2 = 0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

塩化物を含まないとき  $0.0007 \text{ A}/\text{m}^2 = 0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

いま供試体のおかれる環境が海水であるために塩化物を含むときの数値を図49に適用してみると No. r, h は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  に不足するが No. i, j, k, l は海水中鋼材より流入する電流で十分電気防食された恰好となっている。

すなわち  $A_M/A_S > 4$  ではセメント硬水体中鋼材に海

水中鋼材より流入する電流密度は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下であるが、 $A_M/A_{SW} \leq 2$  では  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上となっている。この関係をさらにはっきりさせるためにセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度を  $A_M/A_{SW}$  に対して図示してみると 図 50 のようになる。図50によれば  $A_M/A_{SW} < 1$  ではセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度 ( $I_{MD}$ ) は  $A_M/A_{SW}$  に関係なく一定 ( $0.8 \sim 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近) のようであるが  $A_M/A_{SW} > 1$  では  $I_{MD}$  は  $A_M/A_{SW}$  に反比例して減少することがわかる。すなわち  $I_{MD} \propto k (A_M/A_{SW})^{-1}$  の関係がある。このとき  $A_M/A_{SW} = 2$  で  $I_{MD} = 0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となりさらに  $A_M/A_{SW}$  が大きくなれば  $I_{MD}$  は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となって次第にセメント

表 82 海水中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_{sw}$ ( $cm^2$ )	$A_M/A_{sw}$	$I_{swD}$ ( $\mu A/cm^2$ )							
			0 day	0 day	1 day	2 day	7 day	7 day	21 day	169 day
r	3	10	28.0		4.00			2.33*	2.00	2.50
h	3	4	20.0	15.7	4.67	3.33	1.33	1.33	1.00	
i	3	2	7.33	6.33	4.67	1.00	1.33	1.67	1.00	
j	3	1	7.33	7.67	7.33	4.00	1.00	1.33	0.83	
k	6	0.5	10.3	6.50	2.67	2.17	0.83	1.17	0.50	
l	12	0.25	3.17	2.52	1.42	1.08	0.33	0.42	0.63	
m	12									
n	3	1	13.3	15.00	1.00	1.00	2.00	2.33	1.00	
o										
p										
q										

\* 14 day

表 83 海水中鋼材のマクロ腐食速度

No.	$A_M/A_{sw}$	$C_{sw}$ (mm/yr)								
		0 day	0 day	1 day	2 day	7 day	7 day	14 day	21 day	169 day
r	10	0.326		0.047				0.027	0.023	0.029
h	4	0.233	0.183	0.054	0.039	0.015	0.015		0.012	
i	2	0.085	0.074	0.054	0.012	0.015	0.019		0.012	
j	1	0.085	0.089	0.085	0.047	0.012	0.015		0.010	
k	0.5	0.120	0.076	0.031	0.025	0.010	0.014		0.006	
l	0.25	0.037	0.029	0.017	0.013	0.004	0.005		0.007	
m	1									
n	1	0.155	0.174	0.012	0.012	0.023	0.027		0.012	
o										
p										
q										

硬化体 1 層中鋼材と同じ状態に近づく。 $A_M/A_{sw} \gg 1$  の例としてはひび割れを生じた鉄筋コンクリートの場合などがある。また図 49,50 によれば No. j ( $A_M/A_{sw}=1$ , 練り水:水道水) と No. n ( $A_M/A_{sw}=1$ , 練り水:海水) の  $I_{MD}$  はほとんど差はなさそうである。

海水中鋼材より流出する電流密度

表80より海水中鋼材より流出する電流密度  $I_{swD}$  を求めてみると表 82 のようになる。表82より  $I_{swD}$  と短絡期間との関係を示すと図 51 のようになる。図51を参照すると  $I_{swD}$  はやはり短絡期間 20 日位で安定しておるが図49と異なって  $A_M/A_{sw}$  に比例している。また No. j と No. n の  $I_{swD}$  を比較すると  $I_{swD}$  に対するセメント硬化体の練り水 (水道水と海水) の差はないようである。

ある。次に表 82 に示す電流密度 ( $\mu A/cm^2$ ) を腐食速度 (mm/yr) の単位に換算してみると表 83 のようになる。表83に示す腐食速度はセメント硬化体中鋼材と裸鋼材が海水中で短絡されたときに形成されるマクロ腐食電池の腐食速度  $C_{sw}$  に相当する。表 83 より腐食速度  $C_s$  と  $A_M/A_{sw}$  との関係を図示すると図 52 のようになる。図52によると腐食速度  $C_{sw}$  は  $A_M/A_{sw} < 1$  では  $A_M/A_{sw}$  に比例するよう見受けられるが  $A_M/A_{sw} > 1$  では  $A_M/A_{sw}$  とあまり関係はないようである。全般に  $C_{sw}$  の値が小さいことが注目される。すなわちたとえば  $A_M/A_{sw}=1$  のときの  $C_{sw}$  は 0.01~0.02 mm/yr 程度に落ち着いてきているが、これは単独に海水中に浸漬した鋼材の腐食速度 (海水中の鋼材のマクロ腐食速度) の

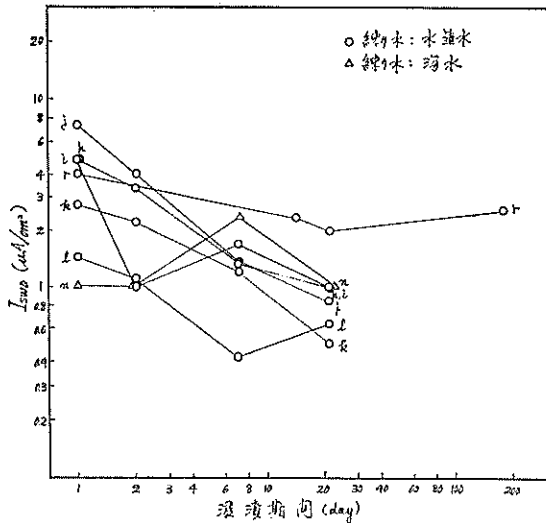


図 51 海水中鋼材より流出する電流密度

大略  $1/5 \sim 1/10$  程度にすぎない。したがって  $A_M/A_{SW} \gg 1$  の条件たとえば鉄筋コンクリートのコンクリート部分にひび割れを生じて鉄筋が海水に触れた場合などには裸鋼材は少量のマクロ腐食（セメント硬化体中鋼材がカソード、海水中鋼材がアノードとなる腐食電池の腐食）の外にマイクロ腐食の発生することが予想される。（この点については追加実験中である。）

(3) 抵抗

表 84 に抵抗測定結果を示す。表 84 について測定値が少ないため仮りに供試体を海水に浸漬したときの抵抗値を 100 とした  $R_M$  の変化率 (%) を算出してみると表 85 のようになる。

表 84 抵抗測定値 ( $\Omega$ )

No.	$A_M/A_{SW}$	0 day		14 day		21 day		174 day		
		$R_M$	$R_{M-SW}$	$R_M$	$R_{M-SW}$	$R_M$	$R_{M-SW}$	$R_M$	$R_{SW}$	$R_{M-SW}$
r	10	182	12	240	100	50	38.2	100	19	74.6
h	4	260	46.5			388				
i	2	304	75.2			396				
j	1	350	130			490				
k	0.5	344	145			500				
l	0.25	325	148			510				
m	1	262	38.4			400				
n	1	490	270			518				
o		310				405				
p		328				390				
q										

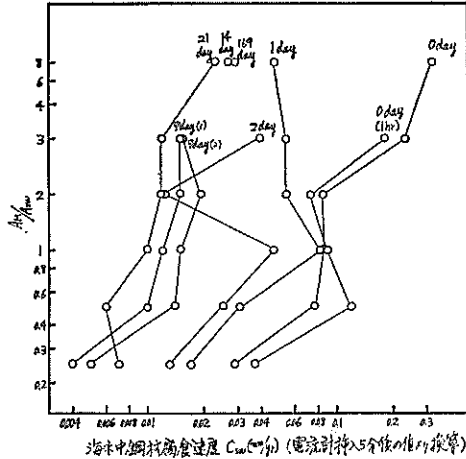


図 52  $C_{SW} \sim A_M/A_{SW}$  の関係

表 85 の抵抗値からだけでは短絡、開路によるセメント硬化体の抵抗変化の差はあまりはっきり取り出せない。

(4) 供試体表面の観察

表 76 に示す供試体についてはセメント硬化体表面にはひび割れ、発錆などの劣化現象は全く見られなかった。一方海水中鋼材は短絡、開路にかかわらず全部発錆したが必ずしも全面的ではなくてある場合には部分的な発錆が見られた。次に表 76 の供試体とは別に定性的な検討のために作られた供試体の観察結果を図 53~56 に示す。

図 53 はセメント硬化体の一端より鋼材が突き出ておりセメント硬化体が下になるように海水（攪拌）中に置いた供試体の一つで約半年経過したときの写真である。この場合裸鋼材部分に発錆が見られる。図 54 はセメント硬化体の両端より鋼材が突き出ている型の供試体で海水

表 85 抵抗変化率

No.	$A_M/A_{SW}$	$R_M$ (%)		
		0 day	21 day	174 day
r	10	100	27	55
h	4	100	149	
i	2	100	130	
j	1	100	140	
k	0.5	100	145	
l	0.25	100	157	
m	1	100	153	
n	1	100	106	
o		100	131	
p		100	119	
q		100		

(静止)浸漬後約1年半経過したときの写真である。この場合もやはり海水中鋼材に発錆が見られる。図55,56はセメント硬化体片方より鋼材が出ている型の供試体を海水(静止)浸漬後セメント硬化体部分を破壊したときの写真で、図55の鋼材は黒皮付鉄筋、図56の鋼材は研磨鋼材板である。図55によれば鉄筋の発錆カ所は海水中裸鋼

材のガラス容器に接触していたところに限られている。これは海水中鋼材表面のうちでもっともガラス容器に接触していたところの酸素供給速度が遅くて電位がもっとも卑となったためと思われる。図56では海水中鋼材はほぼ全面的に腐食しているが、裸鋼材部分より数mmほどのセメント硬化体層中鋼材にも発錆が見られた。これはセメント硬化体の破断面に見られるなどのように密実性を阻害する作用が、この付近のセメント硬化体にあったためと考えられる。

またあらかじめ鋼材の電位(海水塩化銀電極基準)を測定しておいて破壊した供試体の状況を図57,58に示す。図57は2層(セメント硬化体中と海水中)を鋼材が貫通するときの供試体で破壊前の電位は $-610\text{mV}$ であった。このときの発錆は海水中鋼材だけに見られてセメント硬化体中鋼材は最初の研磨面が保たれており、表76の供試体の検討結果より予想される通りの現象である。図58は参考として行なったものでセメント硬化体1層中に埋設されていた鋼材片の電位を1年後測定したところ $-510\text{mV}$ (海水塩化銀電極基準、電位は鋼材片に接続されている電線を利用して行なわれた)であり、破壊後は図58に示すようにセメント硬化体中鋼材に発錆が見られ

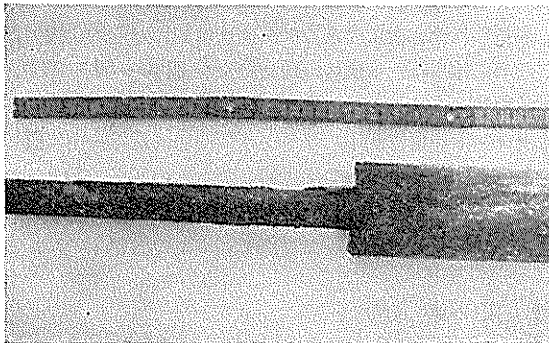


図53 2層のときの腐食例(1)

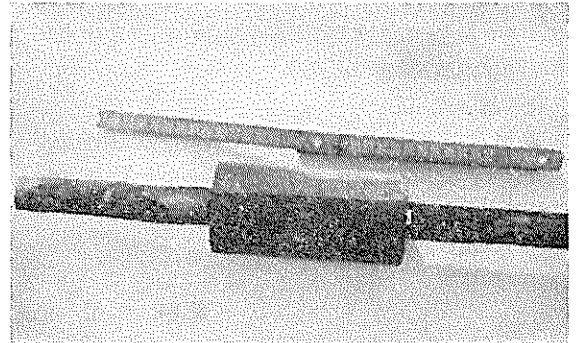


図54 2層のときの腐食例(2)

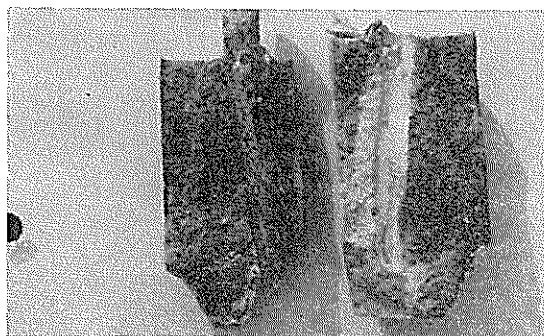


図55 2層のときの腐食例(3)

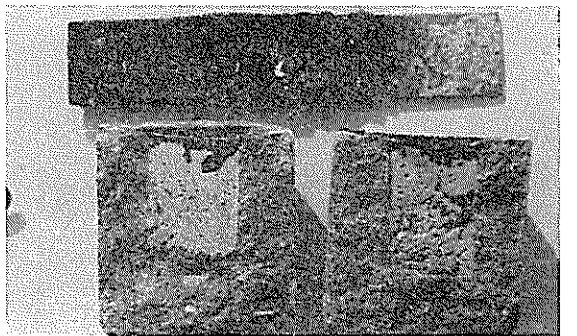
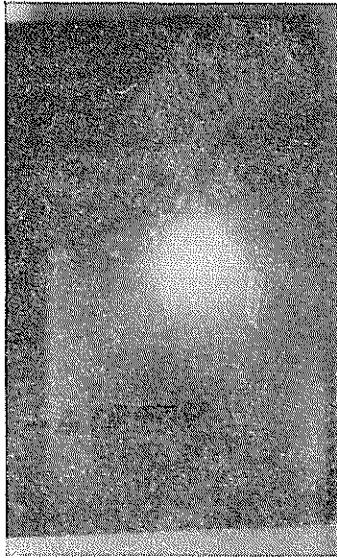


図56 2層のときの腐食例(4)



海水中

セメント硬化体中

図 57 2層のときの腐食例 (5)

( $-610\text{ mV}$  の電位を示す供試体を破壊したところ発錆はセメント硬化体より出ている鋼材部分のみに限られていた)

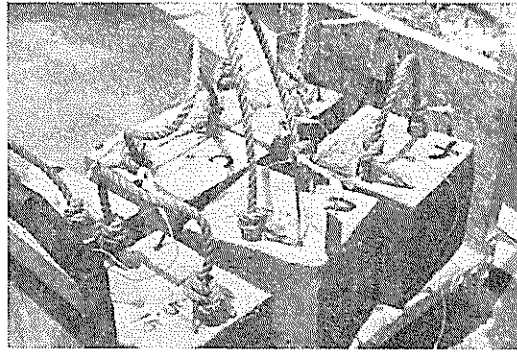


図 59 浸漬前の供試体

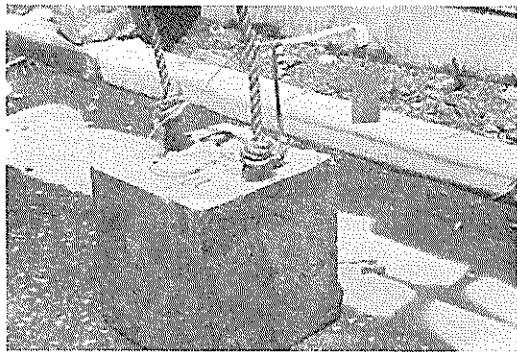


図 60 浸漬前の供試体 (No. a)

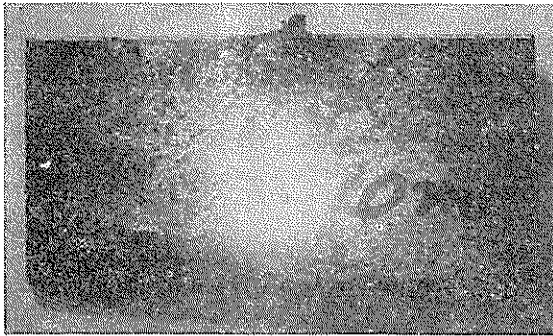


図 58 1層のときの腐食例

( $-510\text{ mV}$  の電位を示す供試体を破壊したところ左下隅に発錆が見られた。中央上端の突起部分は電線の接続部分である)

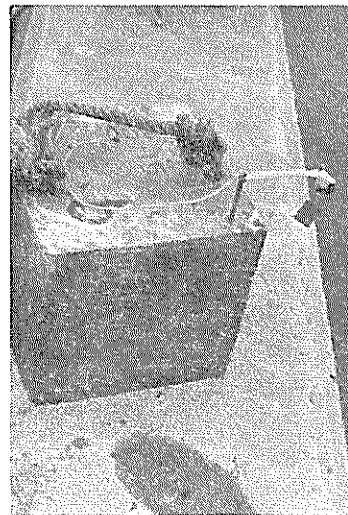


図 61 No. b (海水浸漬期間 11 day)

た。この傾向はアルカリ溶液中およびセメント硬化体 1 層中鋼材について行なった傾向と同様である。

次に  $25\text{ mm} \times 25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$  のセメント硬化体 (表 76 と同一配合) 中に鋼材片を埋設してかぶりを  $10\text{ cm}$  以上としたときの観察結果を 図 59~63 に示す。なお、このときの供試体の内容は次頁上段に示す通りである。

No. a~f は何れも台風で流されてしまったので、ここでは、単なる定性的な観察しか出来ないが、表 76 について行なった検討結果の傾向は多少なりともうかがわれるのではないかとと思われる。また 図 64 に表 69 の No. 20

の発錆状況を示す。No. 20 は表 69 に示したように  $\phi 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  のセメント硬化体中に  $2\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$  の研磨鋼材片を埋設しあり、海水浸漬後 4 日目に図 64 に示すようにセメント硬化体の表面を切り取って破摩鋼材を  $0.02\text{ cm}^2$  程度外部に出した後再び海水中に浸漬したもの

No.	セメント硬化体中鋼材			海水中鋼材			回路
	表面	寸法 (cm)	電位 (-mV)	表面	寸法 (cm)	電位 (-mV)	
a	研磨	2×3×0.1	190	研磨	4×8×0.1	370	研磨
b	研磨	2×3×0.1	230	研磨	2×3×0.1		研磨
c	研磨	2×3×0.1	182	研磨	2×3×0.1	540	研磨
d	発錆	2×3×0.1	190	発錆	4×8×0.1		発錆
e	発錆	2×3×0.1	260		2×3×0.1		発錆
f	発錆	2×3×0.1	202		2×3×0.1		発錆

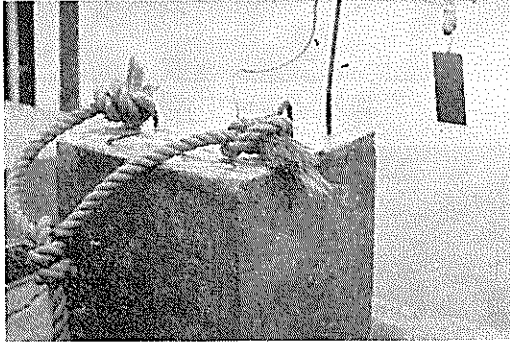


図 62 No. d (海水浸漬期間 11 day)

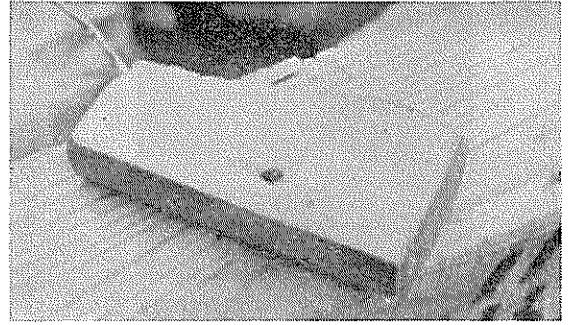


図 64 2層のときの腐食例 (6)

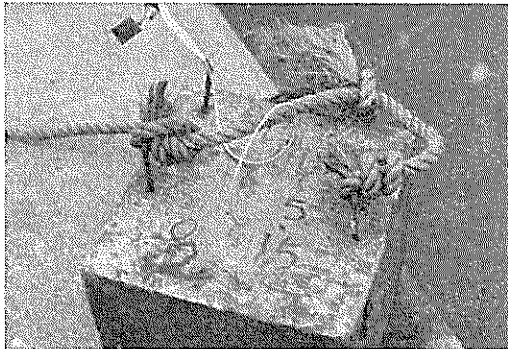


図 63 No. e (海水浸漬期間 11 day)

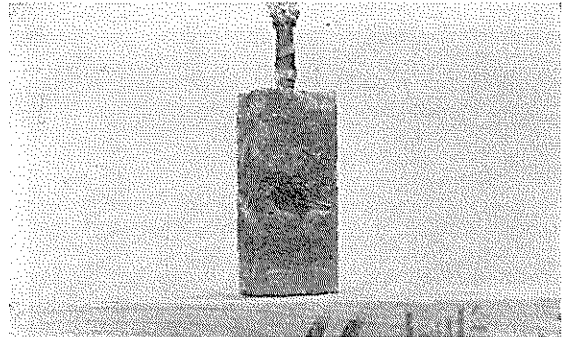


図 65 2層のときの腐食例 (7)

である。鋼材電位は鋼材片が外部に現われるまでは  $-293\text{ mV}$  であったのがセメント硬化体被覆切断後鋼材片が直接海水に触れると直ちに卑の方に变化して行き10分程度で  $-600\text{ mV}$  となった。さらに浸漬期間が長くなるにつれて卑となって行き46日後では  $-760\text{ mV}$  となっている(表69より)。一方発錆は海水に直接鋼材が触れてから30分ほどで肉眼で見られたが、発錆は次第に大きくなり約50日後には図64に示すように盛り上がってきている。これに対してセメント硬化体表面には発錆、ひび割れなどの劣化しるしは全く見られない。

また図65に裸鋼材面が一部出ているセメント硬化体の腐食を促進したときの供試体を示す。図65に示すように  $\phi 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  のセメント硬化体に  $\phi 0.9\text{ cm}$  の鉄筋を埋設した供試体(セメント硬化体上面およびセメン

ト硬化体上面より出ている鋼材部分はタール・エポキシ塗料で被覆されている)の側面中央部に1カ所セメント硬化体を取り除いて内部の裸鋼材面を  $0.04\text{ cm}^2$  位外部から見えるようにした。これを温度が  $40^\circ\text{C}$  のときの潮位間に相当する腐食促進環境に約  $2,000\text{ hr}$  暴露したときの供試体表面が図65のようになった。図65よりわかるように腐食はもっぱら裸鋼材部だけに集中しておりセメント硬化体分には何の劣化のしるしは現われていない。このとき裸鋼材部に見られる錆の色は図64の赤褐色と異なって図65では黒褐色である。

最後に参考としてセメント硬化体と海水の2層よりなる鋼製構造物がアノードとなるような回路を生じたとき侵食部分は海水中鋼材に集中した例を図66に示す。これは鋼製構造物にちようど迷走電流が流入したような状

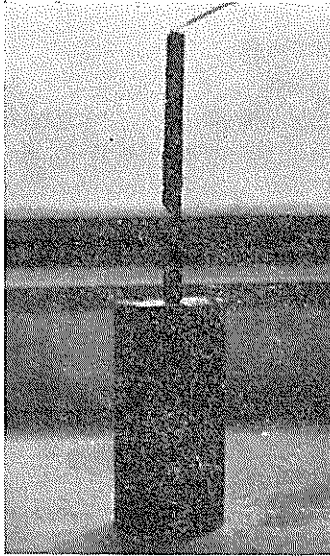


図 66 2層のときの腐食例 (8)

態に相当するが流入した電流はセメント硬化体外の鋼材部分より流出して図66のように侵食されたがセメント硬化体には変化は見られなかった。

実験18 鋼材がセメント硬化体と海水飽和泥層の2層に接する場合の腐食傾向

供試体

供試体の内容を表 86 に示す。供試体の作成要領は実験17の要領に準ずる。鋼材表面はいずれも研磨、脱脂状態である。セメント硬化体中鋼材と裸鋼材は表86に示す組合わせとして実験環境に設置される。まず 40 cm×30 cm×50 cm の木箱 (水密性としてある) に自然海水を注ぎこの中に砂河砂を投入して水槽の下半分が砂層上半分が海水となるようにする。このとき当然砂層は海水飽和となり海底泥層の模型と考えられる。こうした海水飽和の砂層 (以下単に砂層ということにする) の中間深度付近に供試体 No. a~i の裸鋼材片を埋設する。砂層中鋼材間の間隔は 10~15 cm である。次に砂層上にセメント硬化体 ( $\phi 5 \text{ cm} \times l 10 \text{ cm}$ ) を高さ 10 cm が上下方向となるように置く。このとき鋼材片に接続している電線はセメント硬化体上面より出ている。砂層中鋼材とセメント硬化体中鋼材より出ている電線は実験水槽の外に置いてある操作切換え盤に接続されて No. h 以外の供試体は操作盤上で短絡され、また計測の必要に応じて各供試体は各種計測器に結ばれるようになっている。海水はモーターによって往復運動をする攪拌羽根で 8 時間波をおこし 16 時間静置しておくという周期で流動する。実験装置の外観を 図 67 に示す。

測定

測定項目は電位、電流、抵抗および供試体の観察である。

表 86 実験 18 の 供 試 体

No.	鋼 材						セメント硬化体			練り水	回路
	表面積 (cm <sup>2</sup> )		表面積比		重 量 (g)		配 合				
	A <sub>S</sub>	A <sub>M</sub>	A <sub>S</sub> : A <sub>M</sub>	W <sub>S</sub>	W <sub>M</sub>	W (g)	C (g)	S (g)			
a	3	30	1	10	1.2276	10.6754	338	520	1,040	水道水	短絡
b	3	12	1	4	1.3004	5.3174	338	520	1,040	水道水	短絡
c	3	6	1	2	1.3542	2.6930	338	520	1,040	水道水	短絡
d	3	3	1	1	1.3349	1.1386	338	520	1,040	水道水	短絡
e	6	3	2	1	2.6924	1.3490	338	520	1,040	水道水	短絡
f	12	3	4	1	5.2300	1.2190	338	520	1,040	水道水	短絡
g	30	3	10	1	11.7674	1.4778	338	520	1,040	水道水	短絡
h	4	4	1	1	4.9482	5.2480	338	520	1,040	水道水	開路
i	3	3	1	1	1.1184	1.2932	338	520	1,040	海水	短絡

鋼材の形状寸法

- 3 cm<sup>2</sup> = 1 cm × 1.5 cm × 2
- 6 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 1.5 cm × 2
- 12 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 3 cm × 2
- 30 cm<sup>2</sup> = 3 cm × 5 cm × 2
- (鋼材片の厚み 0.1 cm)

- A<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)
- A<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)
- W<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の重量 (g)
- W<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の重量 (g)
- W: 練り水量 (g)
- C: 普通ポルトランドセメント量 (g)
- S: 標準砂量 (g)



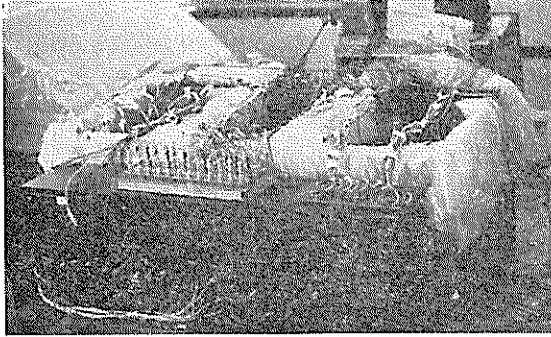


図 67 実験水槽の外観

(1) 電 位

電位は短絡電位  $E_0$ 、開路電位  $E_M$  (セメント硬化体中鋼材の電位) と  $E_S$  (砂層中鋼材の電位) について行なったが、 $E_M$  と  $E_S$  には短絡する前の電位と短絡後に開路とされたときの電位が含まれる。(ただし No. h のみは開路のみである) また開路後の  $E_M$ 、 $E_S$  の経時変化も測定したが電位測定はいずれも実験 17 の要領で行なわれた。単位は  $-mV$  (海水塩化銀電極基準) である。

(2) 電 流

電流は短絡する供試体 No. a, b, c, d, e, f, g, i について実験 17 と同じ要領で測定した。No. h のみは開路のままであるから測定しなかった。単位は  $\mu A$  である。

(3) 抵 抗

実験 17 と同じ要領で  $R_M$  (セメント硬化体中鋼材と標準鉄電極間の抵抗)、 $R_S$  (砂層中鋼材と標準鉄電極間の抵抗)、 $R_{M-S}$  (セメント硬化体中鋼材と砂層中鋼材間の抵抗) の経日変化を測定した。単位は  $\Omega$  である。

(4) 供試体表面の観察

表 86 に示す供試体について劣化の状況を肉眼で観察し

た。

測定結果および考察

(1) 電 位

電位の測定結果を表 87 に示す。表によれば短絡前の電位  $E_M$  は練り水による差は見られず  $-240 \sim -290 mV$  となっている。一方  $E_S$  は  $-700 mV$  台の卑な値となっている。表 88 に砂層中に埋設した鋼材の電位の経時変

表 88 海水飽和砂層中鋼材の単極電位変化 (海水塩化銀電極基準)

研 摩 鋼 材		発 錆 鋼 材				
浸漬時間		電 位	浸漬時間		電 位	
(min)	(hr)	(-mV)	(min)	(hr)	(-mV)	
0		430	0		570	560
1		495	60		600	585
2		515	120		610	600
3		554	160		620	615
4		575	180		620	615
5		592	240		622	620
10		620	300		628	622
15		635		27	660	676
20		650		50	672	690
25		655		79	683	703
30		660		98	690	700
60		700		122	692	706
120		720				
180		725				
	74	735				
	148	740				
	172	740				
	197	740				

表 87 鋼材電位測定値 ( $-mV$ ) (海水塩化銀電極基準)

No.	0 day			0 day (1 hr)			1 day			14 day			21 day			174 day		
	$E_0$	$E_S$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_M$
a	648	715	240	714			745	777	530	720	754	542	730	747	529		721	385
b	680	740	230	730			738	760	632	758	766	610	750	760	561	695	720	400
c	690	720	240	730			757	770	538	738	760	470	722	751	498	690	720	360
d	698	725	290	718			748	747	535	724	736	464	715	722	440	697	715	368
e	722	760	282	755			747	753	520	742	742	520	740	758	520	700	720	387
f	746	732	290	768			755	767	592	770	752	540	750	770	540	710	722	482
g	760	777	250	766			780	778	537	770	762	528	750	769	500	725	738	374
h	724	748	288	746				780	270		748	520		740	567		731	527
i	692	730	292	718			738	760	567	730	734	524	730	750	510	695	708	365

化を示す。表88からわかるように砂層中鋼材の電位は埋設時は海水浸漬時より卑である。これは両層における鋼材表面への酸素拡散速度差によるものですでに述べたように<sup>2)</sup> 両層間にマクロ腐食発生の可能性がある。しかし海水中に単独浸漬中の鋼材面が発錆した時の電位と砂層中に単独埋設した鋼材の電位はともに  $-700$  mV 付近になる。短絡前の電位  $E_M$ ,  $E_S$  よりセメント硬化体中鋼材がカソード、砂層中鋼材がアノードとなる腐食電池の発生が予想される。この関係をはっきりさせるために 0 日, 21日, 174日について図示すると 図 68~70 のようになり予想した腐食電池の発生していることが確かめられる。また表87によれば  $E_0$  は短絡後1時間以内にほとんど落着くように見受けられる。開路後の電位  $E_M$ ,  $E_S$  は上述したように開路5分後の値であるため  $E_M$ ,  $E_S$  の経時変化を調べてみると表 89~91 のようになる。表 89, 90を図示すると 図 71, 表 91を図示すると 図 72 のようになる。図 71~72を参照すると  $E_S$  は  $E_0$  付近に直ちに落着くが  $E_M$  は開路とともに次第に貴となるがとくに最初の30分間が上昇率が大きく30分以後はごく緩やかとなる。さらに長期間開路に保つとき  $E_M$  は図 175 と同じ傾向となるものと考えられる。このように  $E_M$  は長期にわたって変化するものであれば表87の測定値(開路後

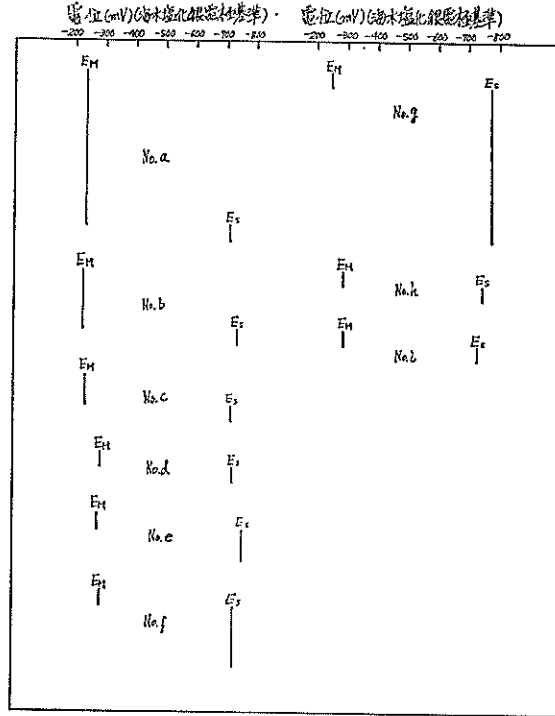


図 68 開路電位 (0 day)

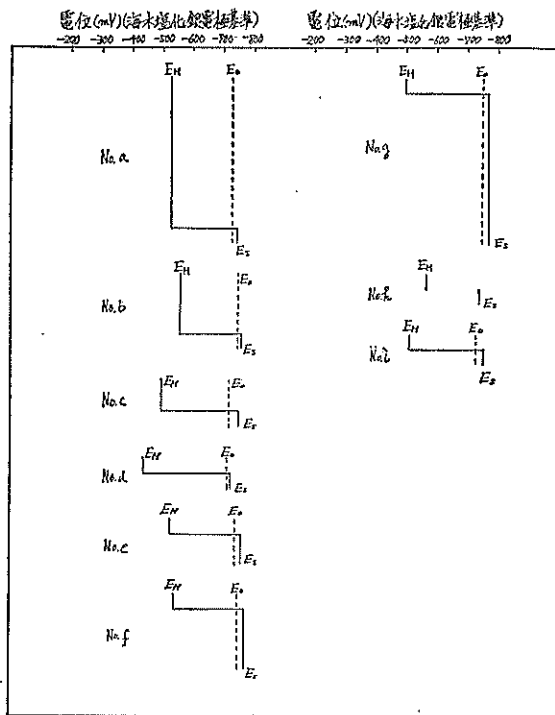


図 69 短絡電位と開路電位の関係 (21 day)

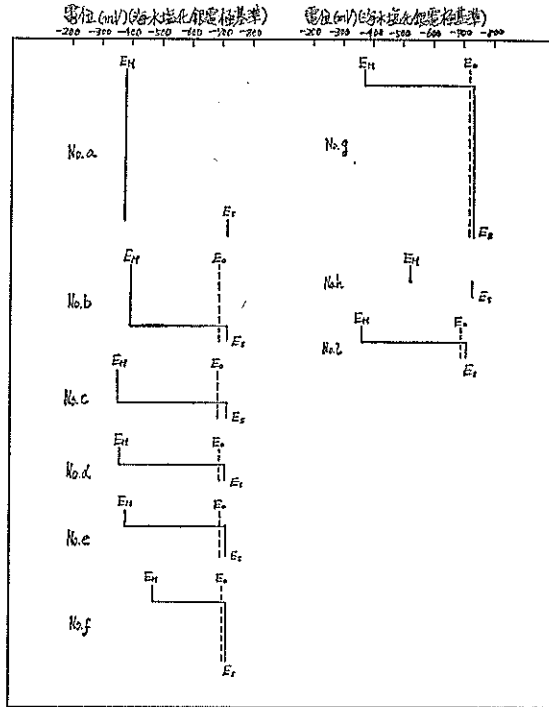


図 70 短絡電位と開路電位の関係 (174 day)

表 89 開路後の鋼材電位変化 (14 day)

(海水塩化銀電極基準)

単位: -mV

No.	$E_0$	1 min		5 min		10 min		15 min		20 min		25 min	
		$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$
a	720	751	726	756	632	752	612	742	584	734	562	754	542
b	758	752	726	754	696	748	680	750	662	768	642	766	610
c	738	750	654	765	568	738	524	746	492	760	480	760	470
d	724	736	634	732	522	752	480	724	480	732	468	736	464
e	742	750	706	745	640	745	600	754	550	765	518	742	520
f	770	756	718	770	620	770	590	760	562	752	540	752	540
g	770	780	664	762	608	756	564	772	548	762	536	762	528
h													
i	730	745	604	730	572	746	530	732	520	728	512	734	524

表 90 開路後の電位変化 (21 day)

(海水塩化銀電極基準)

単位: -mV

No.	$E_0$	1 min		5 min		10 min		15 min		20 min		25 min	
		$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$
a	730	747	662	732	612	721	598	720	558	723	540	720	529
b	750	763	700	740	680	760	635	762	613	759	600	751	561
c	722	737	650	745	552	752	540	731	505	734	482	751	498
d	715	720	550	735	507	726	465	719	460	745	465	722	440
e	740	742	650	748	610	743	555	763	528	745	520	758	520
f	750	770	685	760	618	770	605	745	578	770	540	750	540
g	750	769	610	772	572	752	540	760	520	772	531	750	500
h													
i	730	750	622	723	590	775	560	730	528	745	512	727	510

表 91 開路後の電位変化 (174 day)

(海水塩化銀電極基準)

単位: -mV

No.	$E_0$	1 min		5 min		10 min		15 min		20 min		25 min		40 min		90 min	
		$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$	$E_S$	$E_M$
a		690	660	690	555	692	502	693	470	695	445	702	437		412	721	385
b	695	705	680	710	635	715	595	715	562		530	715	512		460	720	400
c	690			720	605	720	599	715	450	719	421	716	399	720*	380*	720**	360**
d	697	703	605	708	475	705	425	710	400		386		372		372	715	368
e	700	710	610	713	522	713	480	711	452		435	705	382		435	720	387
f	710	720	640	720	543	720	497	720	465		440	710	425		403	722	482
g	725	730	600	735	505	736	462	737	440		420	730	410		397	738	374
h																	
i	695	700	590	700	508	700	455	700	422		400	700	390		386	708	365

\* 30 min 後の電位

\*\* 100 min 後の電位

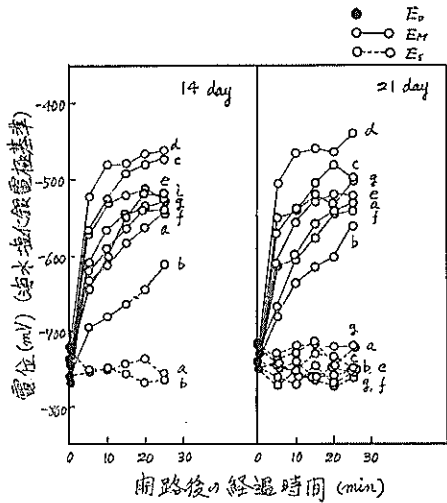


図 71 開路後の電位変化

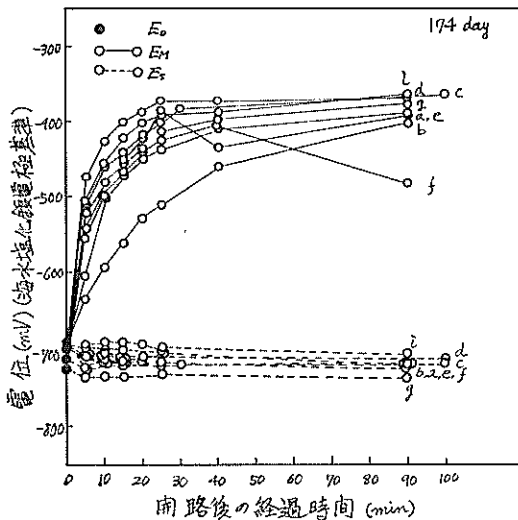


図 72 開路後の電位変化

25~90分)からは直ちに練り水による  $E_M$  の比較をすることはできない。図72, 表87より開路後90分までの  $E_M$  の変化模様を No. d (練り水:水道水,  $A_M/A_S=1$ ) と No. i (練り水:海水,  $A_M/A_S=1$ ) を比べてみると練り水による差はなさそうである。No. h は表87によれば開路のままの予定であったが誤まって1日間短絡された。しかし14日以後は  $-500\text{ mV}$  のようになりかなり早い電位となっているがこれまでの実験結果から何らかの原因で埋設鋼材片に発錆傾向のあることが推定される。

## (2) 電 流

電流の測定結果を表 92 に示す。表92の電流の流れる方向によって電位測定より確かめた腐食電池 (セメント

表 92 セメント硬化体中鋼材に流入する電流

No.	$A_M/A_S$	$I_M$ ( $\mu\text{A}$ )				
		0 day	1 day	14 day	21 day	174 day
a	10	74	10	3	4	5
b	4	64	13	4	5	5
c	2	42	9	5	5	5
d	1	50	8	4	5	5.1
e	0.5	42	12	5	3	5.1
f	0.25	42	8	3	4	5
g	0.1	48	12	4	4.5	5.5
h	1					
i	1	42	10	6	6	5

表 93 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )				
			0 day	1 day	14day	21day	168day
a	30	10	2.47	0.33	0.10	0.13	0.17
b	12	4	5.33	1.08	0.33	0.42	0.41
c	6	2	7.00	1.50	0.83	0.83	0.83
d	3	1	16.7	2.67	1.33	1.67	1.70
e	3	0.5	14.0	4.00	1.67	1.00	1.70
f	3	0.25	14.0	2.67	1.00	1.33	1.67
g	3	0.1	16.0	4.00	1.33	1.50	1.83
h	4	1					
i	3	1	14.0	3.33	2.00	2.00	1.67

硬化体中鋼材がカソード, 砂層中鋼材がアノード) の発生が一層はっきりする。表92の値は砂層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流である。短絡電流は短絡とともに次第に減少して1日ではまだ安定していないが14日ではすでに安定していることがうかがわれる。これらの傾向については以下のように電流密度の値で検討する。

### セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 93 よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度  $I_{MD}$  を算出すると表 93 のようになる。表 93 の  $I_{MD}$  を短絡期間に対して図示すると 図 73 のようになる。図73によれば  $I_{MD}$  は短絡期間が10~20日でも174日でもほとんど変わらないようである。また  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S$  に反比例しており  $A_M/A_S > 4$  (No. a, b) では  $0.45\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (塩化物が存在するときのセメント硬化体中鋼材の防食に必要なといわれている防食電流密度) に不足するが  $A_M/A_S \leq 2$  (No. c, d, e, f, g, i) では  $0.45\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上

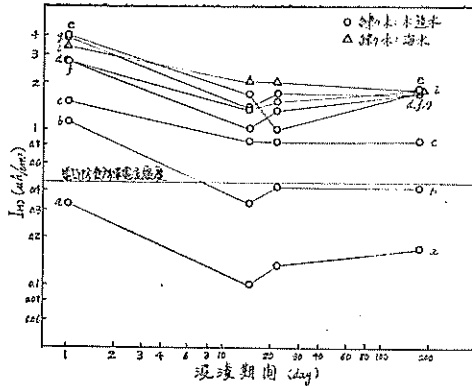


図73 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

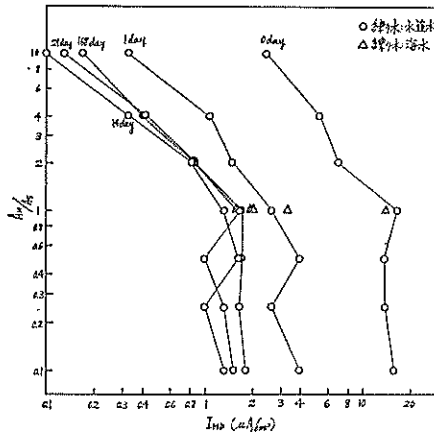


図74  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

である。この関係をさらにはっきりさせるために  $I_{MD}$  を  $A_M/A_S$  に対して図示すると 図74 のようになる。

図74によれば  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S \leq 1$  では大体  $0.8 \sim 1 \mu A$  となって  $A_M/A_S$  に関係なく一定となるが  $A_M/A_S > 1$  では  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S$  に反比例して減少する。 $A_M/A_S = 2$  付近のときの  $I_{MD}$  が防食の一つの目安とされている  $0.45 \mu A/cm^2$  の値と交差しさらに  $A_M/A_S \gg 1$  となるにしたがって  $I_{MD}$  は零に近づく。したがって  $A_M/A_S > 2$  ではセメント硬化体中鋼材はセメント硬化体1層中のときの鋼材腐食条件に近づき  $A_M/A_S \gg 1$  となるほどこの傾向が強いことがわかる。

次に No. d (練り水：水道水,  $A_M/A_S=1$ ) と No. i (練り水：海水,  $A_M/A_S=1$ ) の  $I_{MD}$  を表93, 図73, 74より比較してみると練り水による差はとくに見られずどちらの場合も  $1.7 \mu A/cm^2$  程度であった。

砂層中鋼材より流出する電流密度

表92より砂層中鋼材から流出する電流密度  $I_{SD}$  ( $\mu A/cm^2$ )

表94 砂層中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_S$ ( $cm^2$ )	$I_{SD}$ ( $\mu A/cm^2$ )				
		0 day	1 day	14 day	21 day	168 day
a	3	24.7	3.33	1.00	1.33	1.67
b	3	21.3	4.33	1.33	1.67	1.67
c	3	14.0	3.00	1.67	1.67	1.67
d	3	16.7	2.67	1.33	1.67	1.70
e	6	7.0	2.00	0.83	0.50	0.85
f	12	3.5	0.67	0.25	0.33	0.42
g	30	1.6	0.40	0.13	0.15	0.18
h	4					
i	3	14.0	3.33	2.00	2.00	1.67

表95 砂中鋼材のマクロ腐食速度 (mm/yr)

No.	$A_M/A_S$	$C_S$ (mm/yr)				
		0 day	1 day	14 day	21 day	174 day
a	10	0.287	0.039	0.012	0.015	0.019
b	4	0.248	0.050	0.015	0.019	0.019
c	2	0.163	0.035	0.019	0.019	0.019
d	1	0.194	0.031	0.015	0.019	0.020
e	0.5	0.081	0.023	0.010	0.006	0.010
f	0.25	0.041	0.008	0.003	0.004	0.005
g	0.1	0.019	0.005	0.002	0.002	0.002
h	1					
i	1	0.163	0.039	0.023	0.023	0.019

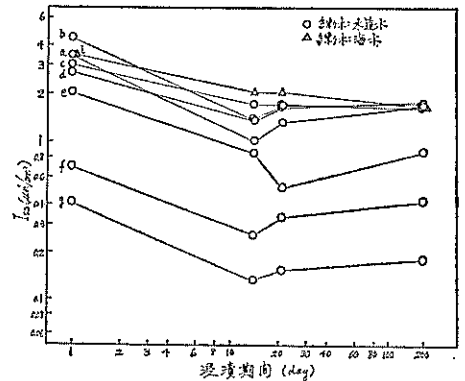


図75 砂層中鋼材より流出する電流密度

$cm^2$ ) を算出すると表94のようになる。表94の  $I_{SD}$  を短絡期間に対して図示すると 図75のようになる。図75によれば砂層中鋼材より流出する電流密度  $I_{SD}$  は予想されるように14日以後安定しており、また  $A_M/A_S$  に反比

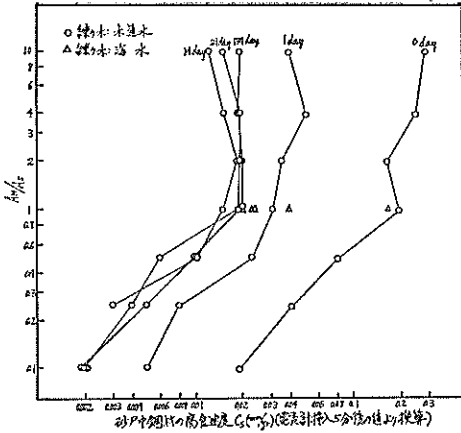


図 76  $C_S \sim A_M/A_S$  の関係

例している。表94の電流密度  $I_{SD}$  ( $\mu A/cm^2$ ) を腐食速度  $C_S$  (mm/yr) の単位に換算すると表95のようになる。表95の腐食速度  $C_S$  はセメント硬化体中鋼材と砂層中鋼

材が短絡されるとき砂層中鋼材がマクロ腐食電池のアノードとして溶出する速度である。この  $C_S$  (mm/yr) を  $A_M/A_S$  に対して図示すると図76のようになる。図76によれば  $A_M/A_S > 1$  では  $C_S$  は  $A_M/A_S$  に関係なく一定値 (0.02 mm/yr 付近) となっているが、 $A_M/A_S \leq 1$  では  $C_S$  は  $A_M/A_S$  に比例して増減することがわかる。すなわち  $C_S \propto k (A_M/A_S)$  の関係がある。 $A_M/A_S = 1$  では  $C_S$  は 0.02 mm/yr 程度である。図75, 76よりわかるように No. d (練り水: 水道水,  $A_M/A_S = 1$ ) と No. i (練り水: 海水,  $A_M/A_S = 1$ ) の  $C_S$  はほとんど差はないようである。このことはセメント硬化体中鋼材と砂層中鋼材が短絡されるとき砂層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流量はセメント硬化体の練り水が水道水であっても海水であっても変わらないことを示している。

(3) 抵抗

表96に  $R_M$ ,  $R_S$ ,  $R_{M-S}$  の測定結果を示す。表96よりの  $R_M$ ,  $R_S$ ,  $R_{M-S}$  変化率 (0日の値に対する%) を求めると表97のようになる。まず  $R_M$  (%) を表97より

表 96 抵抗値 ( $\Omega$ )

No.	0 day			14 day		21 day		174 day		
	$R_M$	$R_S$	$R_{M-S}$	$R_M$	$R_{M-S}$	$R_M$	$R_{M-S}$	$R_M$	$R_S$	$R_{M-S}$
a	128	32.2	160	174	47	38.5	56	84	45	154
b	150	34.2	178	195	78	77	89	160	22.6	160
c	142	39.0	150	234	128	130	134	230	22	220
d	158	53.0	162	240	172	190	200	298	22	300
e	190	45.2	150	260	160	170	180	270	18.4	274
f	190	45.5	148	290	178	195	200	310	14	322
g	168	40.0	194	236	170	190	188	292	12	292
h	155	25.4	160	240	100	105	106	182	17	180
i	158	44.0	165	258	180	195	200	298	23.2	322

表 97 抵抗変化率

No.	$R_M$ (%)				$R_S$ (%)				$R_{M-S}$ (%)			
	0 day	14 day	21 day	174 day	0 day	14 day	21 day	174 day	0 day	14 day	21 day	174 day
a	100	136	30	66	100			140	100			96
b	100	130	51	107	100			66	100			90
c	100	165	92	162	100			56	100			147
d	100	152	120	189	100			42	100			185
e	100	137	89	142	100			41	100			183
f	100	153	103	163	100			31	100			218
g	100	140	113	174	100			30	100			151
h	100	155	68	117	100			67	100			113
i	100	163	123	189	100			53	100			195

表 97'  $R_M^0, R_S^0$  の経日変化

No.	0 day		174 day	
	$R_M^0 (\Omega)$	$R_S^0 (\Omega)$	$R_M^0 (\Omega)$	$R_S^0 (\Omega)$
a	128	32	97	58
b	147	31	149	12
c	127	24	214	6
d	134	29	288	12
e	148	3	263	11
f	146	2	309	13
g	161	33	286	6
h	145	15	173	8
i	140	25	299	24

見てみると14日, 21日, 174日の中で21日の値が全般的に低い。このような傾向は抵抗測定の際に対極として使用した標準鉄電極(裸鉄面が  $\phi 1.1 \text{ cm} \times l 35 \text{ cm}$ ) の表面状態によるものと推定される。

$0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上の電流密度 ( $A_M/A_S < 2$  の場合) が流入するセメント硬化体の抵抗変化率は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $A_M/A > 2$  の場合) 以下の電流密度の流入(零の開路のものを含む)するセメント硬化体の抵抗変化率より5割以上大きいようであるが  $R_S(\%)$ ,  $R_{M-S}(\%)$  については明らかな変化傾向はわからない。

次に表96より鋼材周囲のセメント硬化体の抵抗 ( $R_M^0$  とする) と砂層の抵抗 ( $R_S^0$  とする) を求めてみた。

$$R_M \equiv R_M^0 + R_{Fe}$$

$$R_S \equiv R_S^0 + R_{Fe}$$

$$R_{M-S} \equiv R_M^0 + R_S^0$$

( $R_{Fe}$  は海水に接する鉄電極の抵抗)

上の関係より  $R_M^0, R_S^0$  をそれぞれ表86より算出してみると表97' のようになる。

表97' より No. d (短絡), No. h (開路) を比較してみると174 day 後では流入電流によってセメント硬化体の抵抗が約6割電流が流入しないときよりも増加している。この傾向は No. i (練り水: 海水) にも見られる。これに対して  $R_S^0$  は経日による抵抗増加はとくになさそうである。

#### (4) 供試体表面の観察

表86に示す供試体の劣化状況を肉眼で観察したところセメント硬化体表面には劣化のしるし(ひび割れ, 発錆など)は全く見られなかった。一方砂層中鋼材は砂層より引き上げたところきれいな鋼材面が保たれており, ある場合には鋼材面の上部付近に少量の砂粒が付着している。このときの砂粒は引き上げ直後は多少黒色であった。

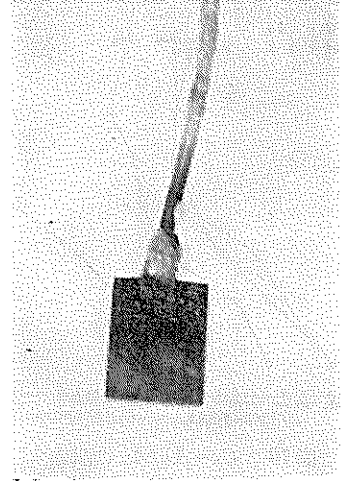


図 77 砂層中鋼材表面

このような状況の1例を図77に示す。

### 3.4 2層の場合の考察および過去の検討結果

実験17, 18からわかるように鋼材がセメント硬化体(海水浸漬)と他の1層(海水または海底泥層)を貫通した状態で埋設されるとき, セメント硬化体中鋼材の腐食傾向は先述したセメント硬化体1層中の腐食傾向とは非常に異なり次のような特長がある。

(1) セメント硬化体中鋼材は他の1層(海水または海水飽和泥層)中鋼材に対して常にカソードとなる。(図46~48, 68~70より)

(2) したがってセメント硬化体中鋼材がカソード, 他の1層(海水または海水飽和泥層)中鋼材がアノードとなるマクロ腐食電池が発生する。この結果, セメント硬化体中鋼材には海水または海水飽和泥層中鋼材より流出した腐食電流が流入する。このとき腐食電池ではカソード分極>アノード分極と考えられる。(図46~48, 68~72より)

(3) セメント硬化体中鋼材の電位は開路後30分位で200~300 mV程度短絡電位より貴となるが, さらに緩やかではあるが貴の方へ移って行く様子である。これに対して海水中または泥層中鋼材の電位は開路後直ちに安定する。(図48, 71, 72より)

(4) (3)の電位変化の模様を自然環境で発生するマクロ腐食電池<sup>1)</sup>のそれと比較してみると図78のようになる。図78に示す点線と自然環境2層(水と粘土層, 粘土層と砂層など)間に発生する腐食電池のカソード(水と粘土層のときは水, 粘土層と砂層のときは砂層中鋼材)の開路後の電位である。どちらの場合も開路後60分以内で一

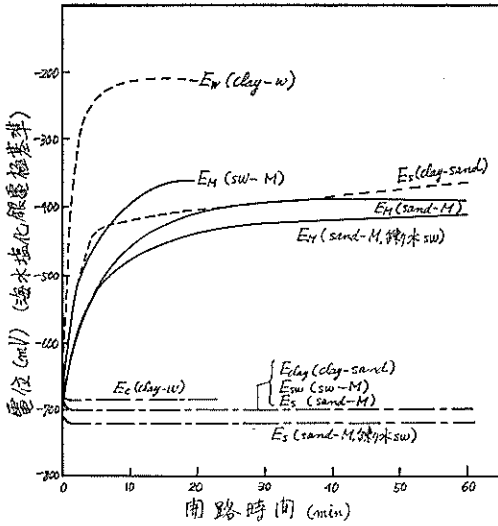


図 78 開路後の電位変化

400 mV より貴の電位に戻っており、どちらのカソード鋼材面にも発錆は認められないが、とくに水と粘土層のときの水中鋼材電位は -200 mV 付近まで一気に達している。これに対してセメント硬化体中鋼材の電位は開路後20~30分で-400 mV 付近に戻り30分以後の電位はごく緩やかであり図78からではどこまで回復するのかわかりしない。図175を参照すれば長時間後には-200 mV のように貴の値まで戻ることが予想される。一方短絡電位およびアノード電位の開路後の変化はカソード環境には関係ない様子が見られる。

(5) アノード（海水または泥層中鋼材）より流出してカソード（セメント硬化体中鋼材）に流入する電流量は腐食電池発生後7日間位でほぼ安定する。（図49, 50, 73, 74より）

(6) 安定した電流量は  $A_M/A_{SW}$ （セメント硬化体中鋼材表面積/海水中鋼材表面積） $\leq 1$  では  $1 \mu A/cm^2$  程度また  $A_M/A_S$ （セメント硬化体中鋼材表面積/泥層中鋼材表面積） $\leq 1$  では  $1.6 \mu A/cm^2$  程度の値となる。しかし  $A_M/A_{SW} > 1$  または  $A_M/A_S > 1$  では  $I_{MD} \propto k(A_M/A_{SW})^{-1}$  または  $I_{MD} \propto k(A_M/A_S)^{-1}$  の関係がある。（図50, 74より）

(7) セメント硬化体中鋼材を防食するために必要な防食電流は一般に  $0.45 \mu A/cm^2$  といわれている。この値を図50, 74に適用すると  $A_M/A_{SW} = 2 \sim 3$ ,  $A_M/A_S = 3 \sim 4$  付近の電流量に相当する。

(8) したがってセメント硬化体と海水2層のときは  $A_M/A_{SW} > 2 \sim 3$ , またセメント硬化体と泥層2層のときは  $A_M/A_S > 3 \sim 4$  の条件下のセメント硬化体中鋼材はセ

メント硬化体1層中鋼材の腐食状態に近づき  $A_M/A_{SW} \gg 2 \sim 3$  または  $A_M/A_S \gg 3 \sim 4$  となるほどこの傾向が強い。（図50, 74より）

(9) これに反して  $A_M/A_{SW} \leq 2 \sim 3$  の場合、または  $A_M/A_S \leq 3 \sim 4$  の場合にはセメント硬化体中鋼材には  $0.45 \mu A/cm^2$  の1~3倍程度の電流量が流入して丁度電気防食された恰好となる。（図50, 74より）

(10) セメント硬化体と海水の2層に鋼材が接するときアノードとなる海水中鋼材より流出してカソードとなるセメント硬化体中鋼材に流入する電流量 ( $\mu A/cm^2$ ) の安定値を海水中鋼材の平均腐食速度  $C_{SW}$  (mm/yr) に換算すると、 $C_{SW}$  は  $A_M/A_{SW} > 1$  では  $A_M/A_{SW}$  に一次の関係で変化する。このとき  $C_{SW}$  は海水中鋼材の肉厚減少量である。しかし  $A_M/A_{SW} > 1$  では  $A_M/A_{SW}$  にとくに関係なく  $C_{SW}$  は  $A_M/A_{SW} = 1$  のときの値付近に落ち着くようである。（図52より）

(11) 海水中に鋼材を浸漬したときの平均腐食速度は  $0.1 \sim 0.12$  mm/yr であることを考えるとセメント硬化体と海水の2層に接するときの海水中鋼材の腐食は少量のマクロ腐食の外に大部分のミクロ腐食が発生することが予想できる。（図52, 文献1より）

(12) (8), (11)よりたとえば鉄筋コンクリートにひび割れを生じて鉄筋が直接海水に接触するように  $A_M/A_{SW} \gg 1$  の場合にはセメント硬化体中鋼材はセメント硬化体1層中の鋼材と同じ腐食条件とみなされ、一方の裸鋼材はマクロ腐食とミクロ腐食によって侵食されることがうかがわれる。このような傾向はとくに図64, 65などより明らかであるが、また先に紹介したように H. F. Finley などが述べている。「鉄筋の腐食と鉄筋を覆っているコンクリートのひび割れまたは化学的劣化とは何の関係もない」ということなどを参考としてみるとうなづかれよう。

(13) セメント硬化体と海水の2層に鋼材が接するときセメント硬化体中鋼材に海水中鋼材より流入する電流量 ( $\mu A/cm^2$ ) は  $A_M/A_{SW} = 1$  のときセメント硬化体の練り水が水道水であっても海水であってもほとんど差はない。（図49より）したがって海水中鋼材より流出する安定電流量（たとえば短絡期間が21日ときの値）を平均肉厚減少量  $C_S$  (mm/yr) に換算してみると  $A_M/A_{SW} = 1$  のとき練り水が水道水の場合  $0.01$  mm/yr であるのに対して練り水が海水の場合  $0.012$  mm/yr と非常に接近している。（表83より）

(14) (13)の傾向はセメント硬化体と泥層（海水飽和）の場合にも成立する。すなわち  $A_M/A_S = 1$  のとき174日後で練り水が水道水るとき  $C_S = 0.02$  mm/yr であるのに対



して練り水が海水のとき 0.019 mm/yr である。(図 73, 表95より)

(6)  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の 1 ~ 3 倍の電流量が流入したセメント硬化体 (これは電気防食されたときに相当する) の抵抗増加率は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下 (零も含む) の電流量が流入したセメント硬化体の抵抗増加率の約 5 割増しとなった例がある。(表97,  $R_M$  の変化率より)

(6) (1)~(6)のことはセメント硬化体のほかの 1 層が海水飽和砂層に限らず文献 1 の結果から海水飽和泥層全般についてもいえよう。

(7) (1)~(6)のことから次のことがいえる。すなわちセメント硬化体 1 層中鋼材にセメント硬化体の不均一性から生ずる電位によって発錆する可能性が多分に考えられるが, 2 層のときのセメント硬化体中鋼材は他の 1 層中鋼材に対して常にカソードとなり  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ )  $\leq 1$  の条件下では 丁度適切な電気防食をされたときと同じ防食効果が期待できる。これに対して他の 1 層中鋼材にミクロ腐食とマクロ腐食が発生するため他の 1 層中鋼材の防食が重要である。

参考として 2 層の場合に該当する文献例を紹介しておく。すなわち L. P. Sudrabrin<sup>32)</sup>は土中に打込まれた鋼杭の腐食機構の一つにマクロ腐食反応があることを示している。このとき地下水面上がアノード, 地下水面上がカソードとなり, 地下水面上にあるセメント硬化体中鋼材部分にもアノードより腐食電流が流入することが定性的に図で示してあるが定量的なことには触れていない。また鋼材が土壌とセメント硬化体の 2 層に接したとき土壌中鋼材 (これもセメント硬化体付根付近) が非常に侵食した例がアメリカ東部海岸の化学装置にあったが, 原因としては地下水に石炭殻から出た酸性液が混入して侵食鋼材部分が酸性液に接したためとしている。これはマクロ腐食が酸によって助長された場合かとも想像される。

### 3.5 セメント硬化体, 海水 (もしくは水道水), 泥層 (海水もしくは水道水飽和) の 3 層の場合

港湾における鋼材の腐食環境には前節の 2 層にひきつづいて 3 層の場合がある。とくに鋼製構造物のスプラッシュ・ゾーンの防食にセメント硬化体を使用するときの防食効果をはっきりさせるためには, 鋼材がセメント硬化体, 海水 (もしくは水道水), 泥層の 3 層に接するときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向を検討することが必要である。セメント硬化体と海水の 2 層の場合も含めて港湾における多層の場合のセメント硬化体中鋼材の腐食傾向についての検討はまだ行なわれていないように見受

けられる。したがってスプラッシュ・ゾーンの防食効果を知ることも含めて港湾環境におけるセメント硬化体の防食特性を知るために以下のような検討を行なった。

#### 実験19 鋼材がセメント硬化体, 1 %塩化ナトリウム溶液 (攪拌), 泥層 (1 %塩化ナトリウム溶液飽和) の 3 層に接するときの腐食傾向

##### 供試体

供試体の内容を表 98 に示す。鋼材 (SS-41) は表98に示す形状, 寸法のものを用いて研磨 (サンドペーパー), 脱脂の後実験17と同じ要領でその一隅に測定用電線を接続した。このときの電線の長さは 1 m である。こうした鋼材片を  $\phi 5 \text{ cm} \times l 10 \text{ cm}$  の鋼製型枠に注塑したまだ固まらないセメント硬化体の中央部に各種寸法の鋼材を埋設し, 硬化した後に型枠からはずして使用した。このときのセメント硬化体の配合は表 98 に示す通り JIS R 5201 に準ずるものであるが練り水は水道水と 1 %塩化ナトリウム溶液を使用した。セメント硬化体のかぶり厚は次の通りである。

鋼材寸法 (cm)	セメント硬化体 $\phi$ 方向のかぶり (cm)	セメント硬化体長さ方向のかぶり (cm)
$3 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 2$	2	4.2
$6 \text{ cm}^2 = 1.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2$	1.7	4
$12 \text{ cm}^2 = 2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2$	1.5	3.5

セメント硬化体は型枠に注塑後 1 日間標準養生され脱型後表98に示す表面積比となるように裸鋼材片と組合わされた。このときセメント硬化体上面より電線が出ているが, 電線を伝って浸液が浸入することを防ぐために電線の付根付近はリゾラック樹脂でしっかりと固められた。練り水が水道水の場合は No. e を 1 つの基準表面積比として  $A_M$  (セメント硬化体中鋼材の表面積) :  $A_{SW}$  (1 %塩化ナトリウム溶液中鋼材の表面積) :  $A_S$  (1 %塩化ナトリウム溶液飽和砂層中鋼材の表面積) = 1 : 1 : 1 を考え, No. a ~ No. d は  $A_S < A_M$ , No. f ~ No. i は  $A_S > A_M$  となるような表面積比とした。No. j は No. e と同じ表面積比であるが No. e と異なって開路状態である。一方練り水が 1 %塩化ナトリウム溶液の場合は練り水が水道水のときの No. d, e, f に相当する表面積比のものを No. d', No. e', No. f' とし, また No. j に相当するものを No. j' とした。このようにして作成した供試体各組の鋼材が, それぞれ, セメント硬化体 (1 %塩化ナトリウム溶液に浸漬), 1 %塩化ナトリウム溶液, 砂層 (1 %塩化ナトリウム溶液飽和) の 3 層に接するように次のような要領で設置した。すなわち  $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  の水

表 98 実験 19 の 供 試 体

No.	鋼 材									セメント硬化体				回路
	表面積 (cm <sup>2</sup> )			表面積比			重 量 (gr)			配 合			練り水	
	A <sub>S</sub>	A <sub>SW</sub>	A <sub>M</sub>	A <sub>S</sub> :A <sub>SW</sub> :A <sub>M</sub>	W <sub>S</sub>	W <sub>SW</sub>	W <sub>M</sub>	W (g)	C (g)	S (g)				
a	3	12	12	1	4	4	1.1040	4.5590	4.5460	338	520	1,040	水道水	短絡
b	3	3	12	1	1	4	1.1176	1.1170	5.2672	338	520	1,040	水道水	短絡
c	3	6	6	1	2	2	1.1190	2.7316	2.6206	338	520	1,040	水道水	短絡
d	3	3	6	1	1	2	1.1265	1.1310	2.7112	338	520	1,040	水道水	短絡
e	3	3	3	1	1	1	1.1250	1.1650	1.1120	338	520	1,040	水道水	短絡
f	6	3	3	2	1	1	2.5119	1.1240	1.0880	338	520	1,040	水道水	短絡
g	6	6	3	2	2	1	2.7260	2.6395	1.1230	338	520	1,040	水道水	短絡
h	12	3	3	4	1	1	5.2840	1.1195	1.0972	338	520	1,040	水道水	短絡
i	12	12	3	4	4	1	5.4060	5.1920	1.0980	338	520	1,040	水道水	短絡
j	12	12	12	1	1	1	4.5776	5.2904	4.5638	338	520	1,040	水道水	開路
d'	3	3	6	6	1	2	1.1280	1.1284	2.5990	338	520	1,040	1%NaCl	短絡
e'	3	3	3	3	1	1	1.1372	1.1102	1.1010	338	520	1,040	1%NaCl	短絡
f'	6	3	3	3	1	1	2.5782	1.1200	1.1355	338	520	1,040	1%NaCl	短絡
j'	12	12	12	12	1	1	5.1960	5.1396	4.5568	338	520	1,040	1%NaCl	開路

鋼材の形状寸法 (厚み 0.1 cm)

$$3 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 2$$

$$6 \text{ cm}^2 = 2 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 2$$

$$12 \text{ cm}^2 = 2 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 2$$

A<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

A<sub>SW</sub>: 海水中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

A<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

W<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の重量 (g)

W<sub>SW</sub>: 海水中鋼材の重量 (g)

W<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の重量 (g)

W: 練り水の量 (g)

C: セメントの量 (g)

S: 砂の量 (g)

密な木製水槽の下半分 (20 cm) が 1% 塩化ナトリウム溶液飽和の砂層, 上半分 (20 cm) が 1% 塩化ナトリウム溶液となるように 1% 塩化ナトリウム溶液と砂を充填する。まず供試体各組のうち砂層中に埋設する予定の鋼材片を砂層の中心深度付近に約 10 cm 間隔で埋設した。鋼材を埋設した砂層表面付近にその組のうちのセメント硬化体中鋼材をセメント硬化体の長さ方向 (10 cm) が上下方向となるようにして設置する。またその付近の 1% 塩化ナトリウム溶液中央部にその組のうちの塩化ナトリウム溶液中に浸漬する予定の鋼材片を浸漬する。このようにして浸漬, 埋設した鋼材片より出ている測定用電線は切換操作盤にそれぞれ接続され, 操作盤によって短絡または開路状態に保たれる外必要に応じて各計測器に接続される。なお 1% 塩化ナトリウム溶液は実験 17 と同様 8 時間攪拌, 16 時間静止という周期を繰り返す。また 1% 塩化ナトリウム溶液を練り水の一部および供試体浸液として海水の代わりに使用したのは先述のセメント硬化体 1 層のときの検討結果から海水がセメント硬化体中鋼材の腐食に影響をおよぼす因はもっぱら海水中の塩

素イオンにあると予想できるためであるが, 浸液としての 1% 塩化ナトリウム溶液は実験の都合により約 1 カ月後に海水に変へられた。

#### 測 定

測定項目は電位, 電流, 抵抗の測定および供試体表面の観察である。

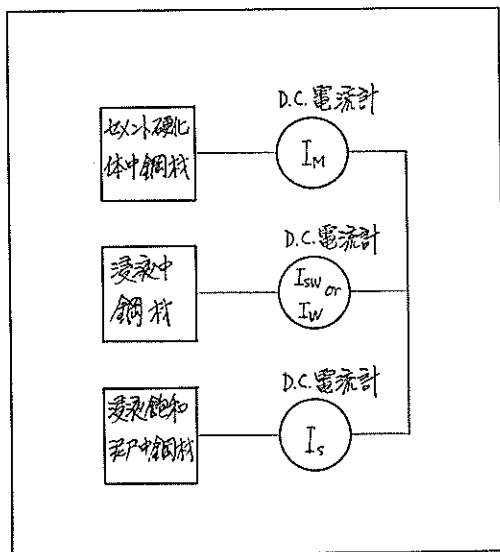
##### (1) 電 位

電位には E<sub>0</sub> (3 層中鋼材を短絡したときの電位), E<sub>M</sub> (短絡前または短絡後開路としたときのセメント硬化体中鋼材の電位), E<sub>SW</sub> (短絡前または短絡後開路としたときの浸漬中鋼材の電位), E<sub>S</sub> (短絡前または短絡後開路としたときの砂層中鋼材の電位) の 4 つが含まれるが, いずれも海水塩化銀電極に対する値として電位計で測定された。このうち E<sub>M</sub>, E<sub>SW</sub>, E<sub>S</sub> の開路後の値は開路後の経過時間によって変化する模様も測定した。ただし No. j, No. j' は開路のままであるから E<sub>0</sub> と開路後の E<sub>M</sub>, E<sub>SW</sub>, E<sub>S</sub> は測定されなかった。単位は -mV である。

##### (2) 電 流

No. a~No. i と No. d'~No. f' について 図 79 に示す

ように D. C. 電流計を挿入して安定した値を測定した。電流には  $I_M$  (セメント硬化体中鋼材に流入する電流),  $I_{SW}$  (浸液中鋼材に流入する電流),  $I_S$  (砂層中鋼材より流出する電流) があり, またそれぞれの電流密度を  $I_{MD}$ ,  $I_{SWD}$ ,  $I_{SD}$  で表わす。電流の単位は  $\mu A$ , 電流密度の単位は  $\mu A/cm^2$  である。



D.C. 電流計を上図の位置に1台ずつ挿入して  $I_M$ ,  $I_{SW}$  (or  $I_W$ ),  $I_S$  を交互に測定した。

図 79  $I_M$ ,  $I_{SW}$  ( $I_W$ ),  $I_S$  の測定方法

### (8) 抵抗

抵抗には  $R_M$  (セメント硬化体中鋼材と標準鉄電極: 裸鉄面  $\phi 11\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ , 間の抵抗),  $R_{SW}$  (浸液中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_S$  (砂層中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_{M-SW}$  (セメント硬化体中鋼材と浸液中鋼材間の抵抗),  $R_{SM-S}$  (浸液中鋼材と砂層中鋼材間の抵抗) がある。各抵抗とも A. C. ブリッジ (1,000 c/s) で分極をおこさないようにして測定された。使用した A. C. ブリッジは港研式腐食計の抵抗測定部である。単位は  $\Omega$  である。

### (4) 供試

体表面の観察供試体表面の劣化状況を肉眼で観察した。

### 測定結果および考察

#### (1) 電位

電位の測定結果を表 99 に示す。短絡前の  $E_M$  は練り水が水道水である No. a~No. j では  $-200 \sim -250\text{ mV}$  であるが練り水が 1% 塩化ナトリウム溶液の No. d'~No. j' では  $-300 \sim -420\text{ mV}$  で明らかに練り水による差が認められる。 $E_{SM}$  は大体  $-500\text{ mV}$  程度であるが  $E_S$  は  $-700\text{ mV}$  付近であり 3 層中鋼材電位のうちではもっとも卑である。短絡期間が 4 日と 14 日の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は開路後 5~10 分の値であり 28 日の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は開路後 25 分の値であるが, 193 日の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は開路後 180 分のときの値である。

このように電位測定までの開路後の経過時間が異なる

表 99 鋼材電位測定値 ( $-mV$ ) (海水塩化銀電極基準)

No.	0 day				4 day				14 day				28 day				193 day			
	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	594	700	490	252	708	735	495	498	680	730	440	540	650	730	310	470	695	700	700	465
b	650	724	512	250	719	730	545	580	732	738	470	670	692	720	314	410	690	700	490	356
c	652	726	522	204	703	747	548	519	718	750	460	578	680	732	334	300	690	700	435	508
d	660	740	530	250	720	782	580	603	719	762	460	565	672	726	320	500	695	700	430	475
e	688	730	482	232	728	752	475	408	710	730	483	620	705	746	420	352	700	710	680	412
f	658	740	448	238	730	745	540	450	721	772	446	530	712	742	394	480	710	710	580	462
g	710	754	500	264	729	752	550	502	721	740	482	482	672	730	—	472	710	710	700	490
h	674	768	478	240	739	756	592	511	743	788	555	505	724	740	432	470	705	710	500	460
i	654	750	498	262	725	743	541	498	720	742	488	530	690	730	298	524	718	720	700	410
j	652	764	474	250	—	785	570	422	—	790	572	450	—	—	—	—	—	715	680	180
d'	688	712	450	420	720	749	500	600	710	740	415	513	708	730	430	472	690	700	485	365
e'	—	726	460	320	712	739	488	510	700	730	370	503	682	740	314	468	700	710	455	385
f'	—	742	470	340	729	752	500	489	720	740	450	510	710	736	370	450	610	720	700	485
j'	—	758	520	305	—	763	562	405	—	770	588	260	—	—	—	—	—	735	710	200

が表99の値から短絡時、短絡28日後および193日後の  $E_0$ ,  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の関係を図示すると 図 80, 81, 82 のようになる。図80, 82からわかるように短絡時および短絡期間が1カ月程度では砂層中鋼材のみがアノードとなりセメント硬化体中鋼材と浸液中鋼材がカソードとなるが、短絡期間が6カ月を越すとある場合には浸液中鋼材が短絡電位付近の電位に接近してくる。(No. a, e, g, i, f') このように短絡電位に近い  $-600$  mV 台の単な電位を示す浸液中鋼材表面には観察のところで後述するように発錆が見られる。一方開路のままである No. j (練り水：水道水) と No. j' (練り水：1%塩化ナトリウム溶液) の  $E_M$  は半年以後は浸漬時より多少貴となっている。また  $E_{SW}$  は次第に卑となって半年以後では  $-700$  mV 付近となるが  $E_S$  は埋設時とほとんど変わらず  $-700$  mV 台を示している。短絡される No. a~No. i と No. d'~No. f' の開路後の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の経時変化の様態を測定してみると表 100, 101 のようになる。表 100 は短絡期間が28日、表 101 は短絡期間が193日のときの値でありこれを図示すると 図 83~94 の通りである。図83~94よりわかるようにいずれの場合にも  $E_M$  は開路後30分位で  $E_0$  より  $200\sim300$  mV 程度貴となり30分以後は徐々に貴となって行くようである。これに対して  $E_{SW}$  は短絡期間が

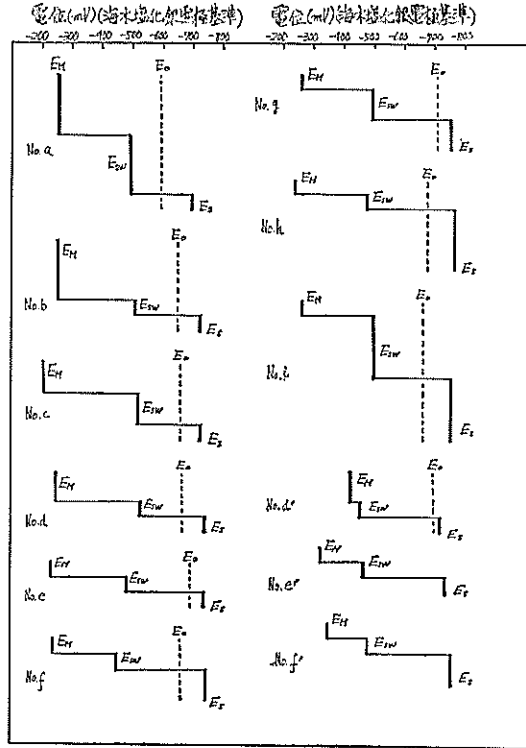


図 80 短絡電位と開路電位の関係 (0 day)

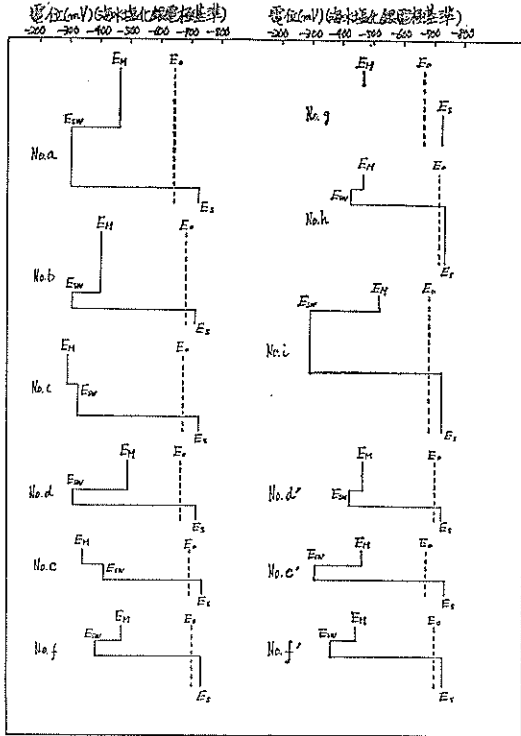


図 81 短絡電位と開路電位の関係 (28 day)

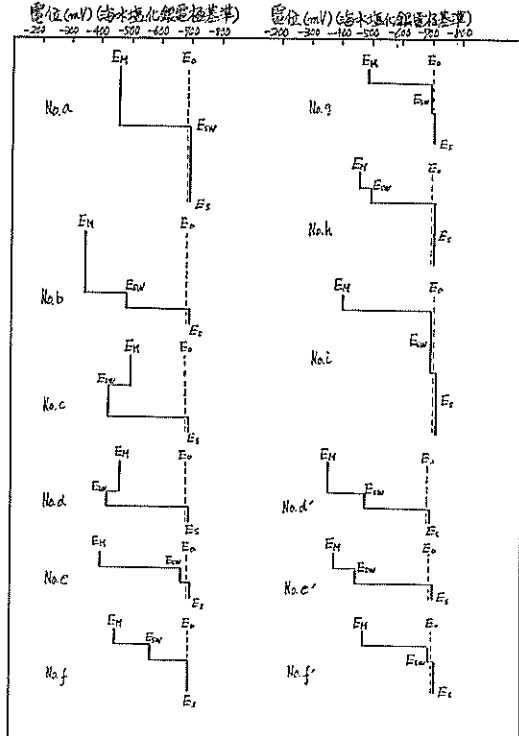


図 82 短絡電位と開路電位の関係 (193 day)

1 カ月程度では開路後30分位で  $E_0$  より 300~400 mV 程度貴の方に戻すが、短絡期間が6カ月以後では短絡電位に接近してくるものもありまた100~200 mV 位貴となるものもあるようになる。一方  $E_S$  は開路後直ちに短絡電位よりやや卑のところに着く。開路後の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の変化模様を図86, 87, 88と図92, 93, 94について比較してみるととくに練り水による違いはあまり見受けられない。

(2) 電 流

電流の測定結果を表102に示す。表102に示す値は図79のようにして測定したときのもので  $I_M$ ,  $I_{SW}$  は流入電流,  $I_S$  は流出電流を表す。 $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の測定値から予想されたようにセメント硬化体中鋼材と浸液中鋼材が砂層中鋼材に対してカソードとなるマクロ腐食電池の発生することが表102より一層はっきりする。表102からわかるように  $I_S = I_M + I_{SW}$  となっているが  $I_S$ ,  $I_M$ ,  $I_{SW}$  は短絡期間が長くなると減少するようであり、その詳細は以下の電流密度のところで検討することにする。

表 100 開路後の電位変化 (-mV) (海水塩化銀電極基準) (28 day)

No.	$E_0$	5 min			15 min			25 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	650	740	374	470	732	310	425	730	310	470
b	692	738	422	476	724	330	426	720	314	410
c	680	724	448	502	730	372	426	732	334	300
d	672	744	455	574	724	380	510	726	320	500
e	705	756	434	404	750	402	370	746	420	352
f	712	730	460	524	745	398	466	742	394	480
g	672	720	432	546	740	390	516	730		472
h	724	748	576	670	748	454	552	740	432	470
i	690	744	420	504	730	330	498	730	298	524
j		790	600	405						
d'	708	736	460	498	725	570	485	730	430	472
e'	682	750	400	482	720	350	460	740	314	468
f'	710	734	444	492	735	370	600	736	370	450
g'		760	612	240						

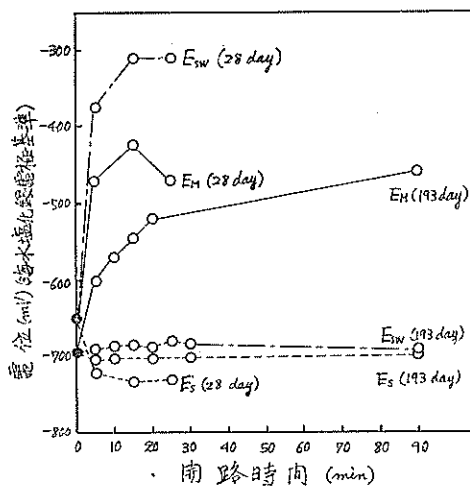


図 83 開路後の電位変化 (No. a)

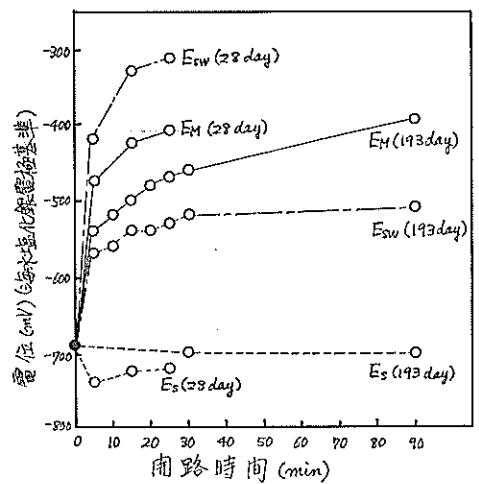


図 84 開路後の電位変化 (No. b)

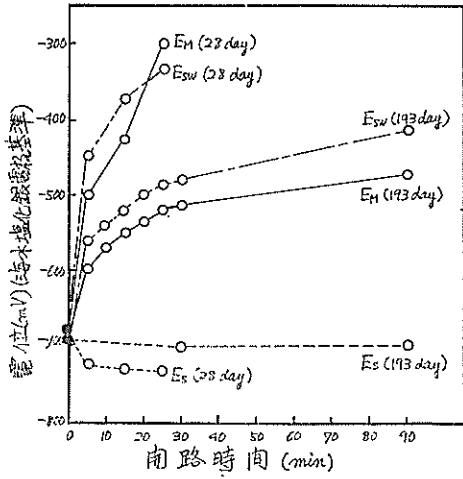


図 85 開路後の電位変化 (No. c)

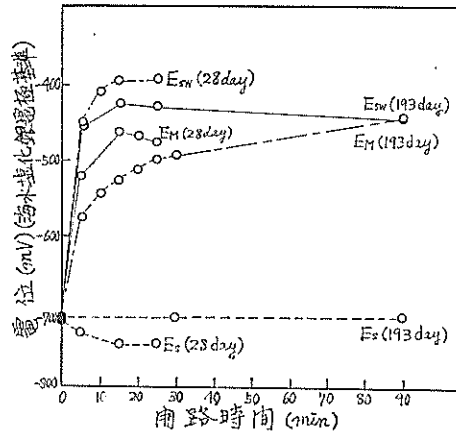


図 88 開路後の電位変化 (No. f)

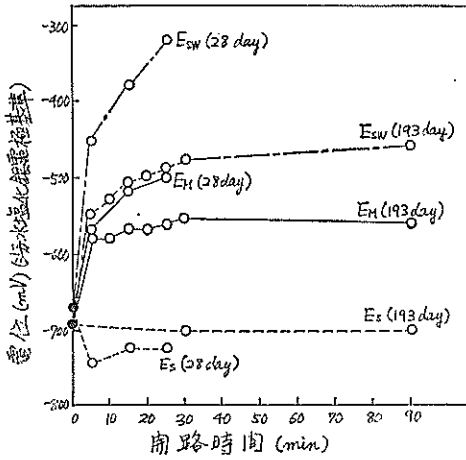


図 86 開路後の電位変化 (No. d)

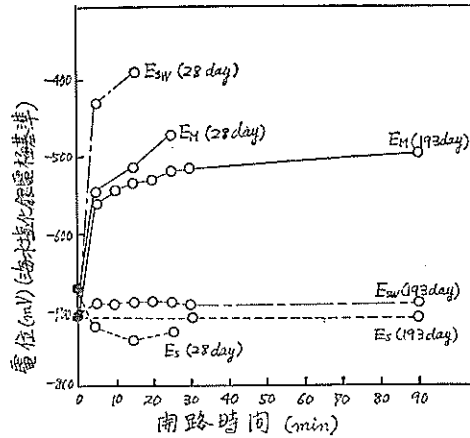


図 89 開路後の電位変化 (No. g)

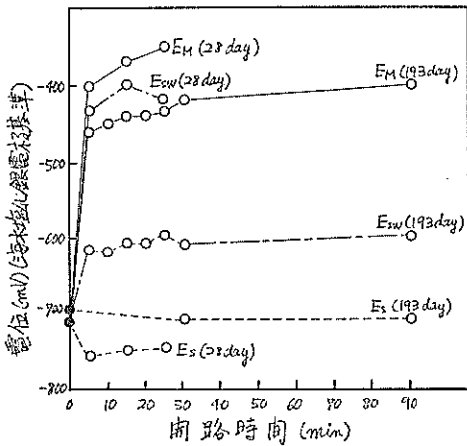


図 87 開路後の電位変化 (No. e)

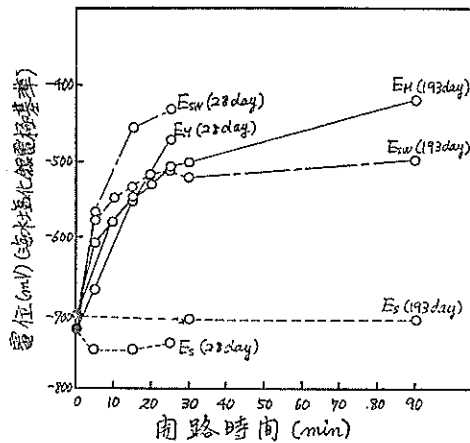


図 90 開路後の電位変化 (No. h)

表 101 閉路後の電位変化 (-mV)

No.	$E_0$	1 min			5 min			10 min			15 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	695	700	690	690		690	600		690	570	700	682	540
b	690	700	620	640		570	540		560	520	700	540	500
c	690	700	620	680		562	598		540	570	700	520	550
d	695	700	615	655		550	582		530	580	700	518	570
e	700	710	640	635		620	460		620	450	705	510	440
f	710	710	650	680		580	455		550	410	710	530	425
g	710	710	680	675		690	560		690	545	710	690	535
h	705	710	640	690		570	610		550	580	710	535	550
i	718	720	620	700		610	545		600	510	722	600	490
j													
d'	690	700	625	660		560	500		540	475	700	522	450
e'	700	708	635	695		555	590		525	540	710	510	515
f'	710	720	700	700		710	580		700	530	720	710	502
j'													

表 102 電 流 測

No.	0 day			4 day			14 day			28 day			120 day		
	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$
a	70	162	232	6	64	70	5	69	74	5	75	80	1.8	4.5	6.3
b	22	53	75	4	21	25	4	23	27	8	29	37	2.5	10.0	12.5
c	27	89	116	3	41	44	2	48	50	2	56	58	1.5	24.0	25.5
d	29	46	75	6	17	23	7	25	32	3	31	34	3.0	18.1	21.1
e	17	69	86	5	23	28	1	34	35	6	38	44	2.1	20.1	22.2
f	17	60	77	3	20	23	8	29	37	5	30	35	3.4	20.2	23.6
g	47	83	130	5	35	40	8.5	52.5	61	5	55	60	5.9	27.9	33.8
h	20	44	64	4	19	23	7.5	22.5	30	4	24	28	3.5	22.5	26.0
i	21	145	166	4.5	53.5	58	7.5	81.5	89	4	91	95	10.8	34.7	45.5
j															
d'	19	58	77	3	23	26	7	28	35	5	32	35	4.3	25.0	29.3
e'	20	124	144	7	33	40	6	35	41	6	36	42			
f'	21	84	105	8			7.5	29.5	37	5	29	34			
j'															

(海水塩化銀電極基準) (193 day)

20 min			25 min			30 min			90 min			180 min		No.
$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_{SW}$	$E_M$	
	690	520		680		700	685		700	695	458	700	465	a
	540	480		530	470	700	520	460	700	510	395	490	356	b
	500	535		485	520	700	480	515	700	410	472	435	508	c
	500	570		490	565	700	480	555	700	460	560	430	475	d
	610	440		600	435	710	610	420	710	600	402	680	412	e
	518	470		500	430	710	500	500	710	445		580	462	f
	690	530		690	520	710	695	515	710	690	495	700	490	g
	520	525		515	510	710	520	500	710	498	420	500	460	h
	600	470		610	455	720	620	445	720	650	400	700	410	i
									710		262			j
	515	430		502	420	700	510	400	700	485	370	485	365	d'
	480	495		465	480	710	460	460	710	400	385	455	385	e'
	700	480		700	460	720	710	450	720	710	390	700	485	f'
									735	710	600			j'

定 値 ( $\mu A$ )

193 day*			194 day*			228 day*			229 day**			No.
$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	
2	4	16	2	12	13.5	1			1		1.1	a
2	6	8	1	7	8	1.4			1		8.0	b
0.5	8.5	9	0.4	14.5	15	0.6			0.6		10.6	c
0.5	4.8	5.3	4.5	5	9	1.2			1.2		10.1	d
3	2	5	5	2.5	7	1.5			1.5		13.4	e
0.2	7.5	7.5	0.2	8	8	1.1			1.1		10.7	f
1	10.2	10.5	0.5	19.5	20	1.8			1.8		11.5	g
0.2	7.5	7.7	0.1	10	10	0.6			0.6		14.5	h
1.5	14	15.5	2.5	30.5	32.5	0.25			0.3		13.1	i
												j
1	7	9	2	14.5	17	0.4			0.4		1.8	d'
1	8.5	8.5	2.5	12	14.5	2.8			2.7		3.2	e'
1	26	24	0.5	20	20	0.8			0.9		10.5	f'
												j'

\* 海水静止のとき測定

\*\* 海水攪拌のとき測定



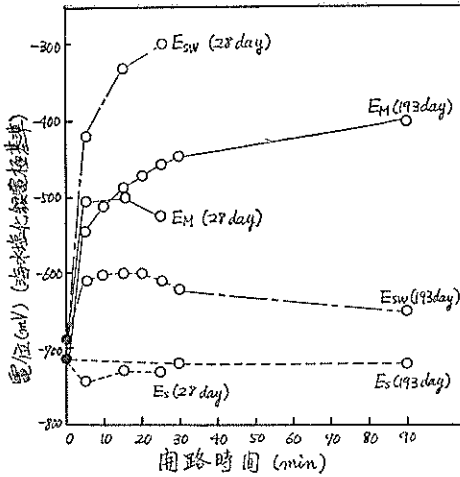


図 91 開路後の電位変化 (No. i)

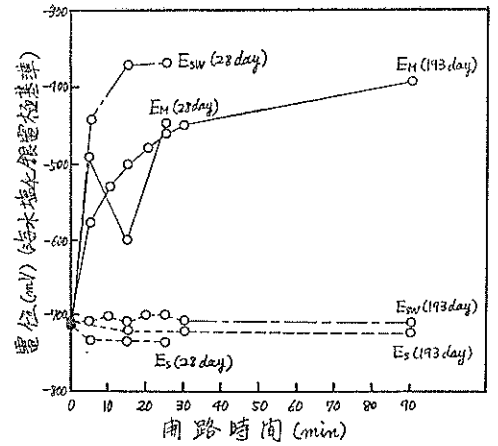


図 94 開路後の電位変化 (No. f')

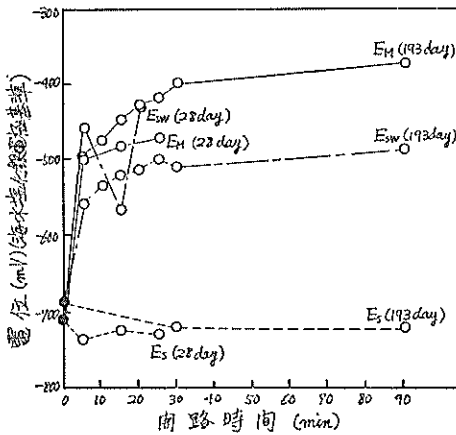


図 92 開路後の電位変化 (No. d')

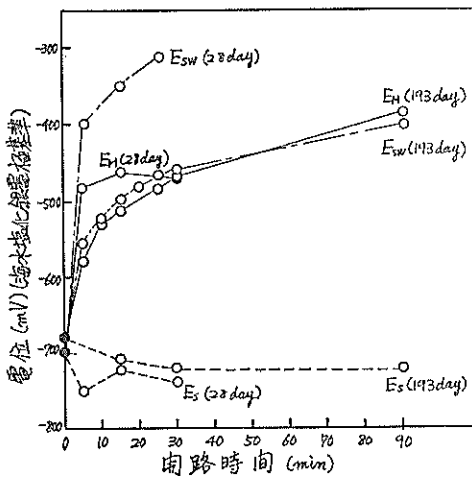


図 93 開路後の電位変化 (No. e')

セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表102に示す  $I_M$  をセメント硬化体中鋼材の表面積  $A_M$  ( $\text{cm}^2$ ) で割ってセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度を求めると表 103 のようになる。表 103 から No. a ~ No. i の  $I_{MD}$  を短絡期間に対して図示すると 図 95 のようになる。図95によれば  $I_{MD}$  は短絡後120日位まではほぼ一定しているが 200 日付近では多少減少する傾向が見受けられる。また No. d' ~ No. f' について  $I_{MD}$  と短絡期間の関係を図示すると 図 96 のようになる。図95, 96より No. d, e, f, d', e', f' の  $I_{MD}$  を比較してみるとよく練り水による差はないようである。次に表 103 より  $A_M/A_S$  に対する  $I_{MD}$  を求めてみると表 104 のようになる。表104より  $I_{MD}$  と  $A_M/A_S$  の関係を図示すると 図

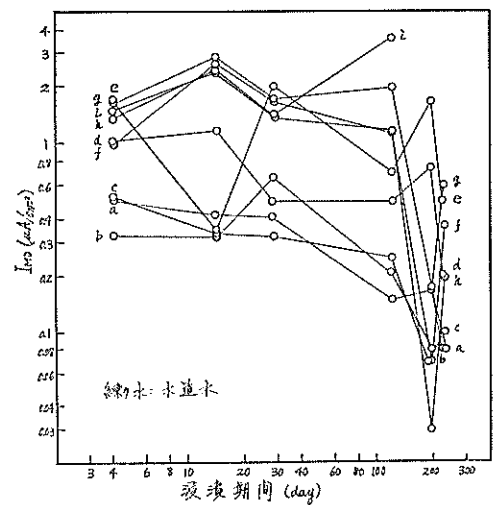


図 95 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 103 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )								
			0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day	228 day	229 day
a	12	4	5.83	0.50	0.42	0.42	0.15	0.17	0.17	0.08	0.08
b	12	4	1.83	0.33	0.33	0.67	0.21	0.17	0.08	0.12	0.08
c	6	2	4.50	0.50	0.33	0.33	0.25	0.08	0.07	0.10	0.10
d	6	2	4.83	1.00	1.17	0.50	0.50	0.08	0.75	0.20	0.20
e	3	1	5.67	1.67	0.33	2.00	0.70	1.00	1.67	0.50	0.50
f	3	0.5	5.67	1.00	2.67	0.67	1.13	0.07	1.07	0.37	0.37
g	3	0.5	15.7	1.67	2.83	0.67	1.97	0.33	0.17	0.60	0.60
h	3	0.25	6.67	1.33	2.50	1.33	1.17	0.07	0.03	0.20	0.20
i	3	0.25	7.00	1.50	2.50	1.33	3.60	0.50	0.83	0.08	0.10
j	3										
d'	6	2	3.17	0.50	1.17	0.83		0.17	0.33	0.07	0.07
e'	3	1	6.67	2.33		2.00		0.33	0.83	0.93	0.90
f'	3	0.5	7.00	2.67		1.67		0.22	0.17	0.27	0.30
j'	3										

表 104 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )								
		0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day	228 day	229 day
a, b	4	3.83	0.44	0.38	0.55	0.18	0.17	0.13	0.10	0.08
c, d	2	4.67	0.75	0.75	0.42	0.35	0.08	0.41	0.15	0.15
e	1	5.67	1.67	0.33	2.00	0.70	1.00	1.67	0.50	0.50
f, g	0.5	10.69	1.34	2.75	1.67	1.55	0.20	0.12	0.49	0.49
h, i	0.25	6.84	0.94	2.50	1.33	2.39	0.29	0.43	0.14	0.15
d'	2	3.17	0.50	1.17	0.83		0.17	0.33	0.07	0.07
e'	1	6.67	2.33	2.00	2.00		0.33	0.83	0.93	0.90
f'	0.5	7.00	2.67	2.50	1.67		0.33	0.17	0.27	0.30

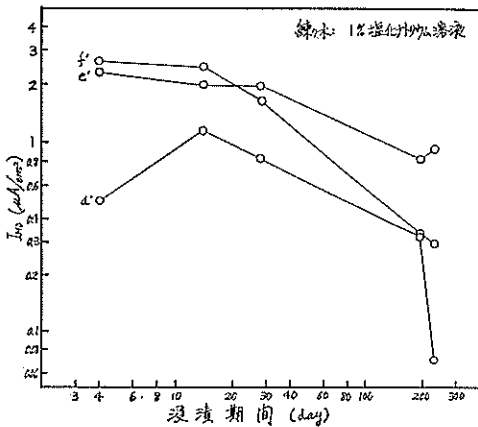


図 96 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

97, 98 のようになる。図 97, 98 を参照すると  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S > 1$  では  $A_M/A_S$  に反比例するが  $A_M/A_S < 1$  ではほぼ  $A_M/A_S = 1$  のときの値に一定となるようである。

$A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は短絡時は  $6 \sim 7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  のように大きい。短絡期間が長くなるにつれて減少し、ほぼ  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に落ち着くようである。したがって図 97, 98 に  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (塩化物が存在するときセメント硬化体中鋼材に対して必要とされる電気防食電流密度) の値を適用してみると、大体  $A_M/A_S < 1$  のときに  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の電流量が 3 層のときのセメント硬化体中鋼材に流入することが期待できる。

また図 97 と 98 を比較すれば、このような傾向に対するセメント硬化体練り水の差はとくになさそうである。

(図97, 98に示す縦の実線は、 $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、縦の点線は  $0.45 \times 1/2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の値を表わす。)

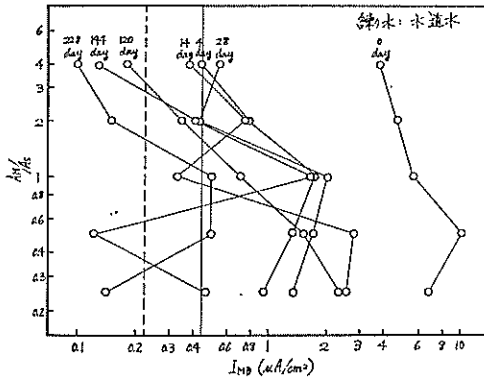


図97  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

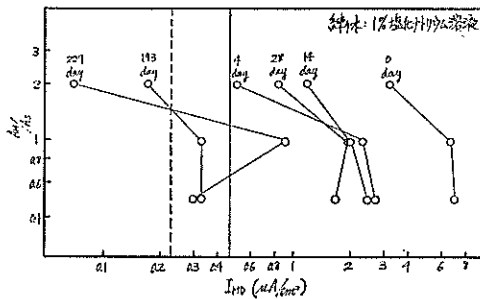


図98  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

海水中鋼材に流入する電流密度

表102より海水中鋼材に流入する電流密度  $I_{SWD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を算出すると表105のようになる。表105より  $I_{SWD}$  ~ 短絡期間の関係を図示すると図99, 100のようになる。図99は上部セメント硬化体の練り水が水道水、図100は練り水が1%塩化ナトリウム溶液の場合である。図99, 100からわかるように  $I_{SWD}$  は短絡期間が長くなるにつれて次第に減少する傾向が見られる。すなわち短絡1~2カ月後では  $I_{SWD}$  は大体  $6 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  であるが短絡6カ月以後になると  $3 \sim 4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近となる。ここで後述する浸液中鋼材表面の観察結果を参照して

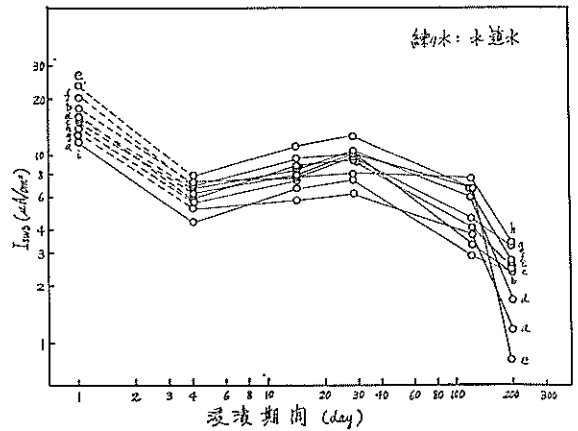


図99 海水中鋼材に流入する電流密度

表105 海水中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_{SW}$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_{SW}/A_S$	$A_{SW+M}/A_S$	$I_{SWD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )						
				0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day
a	12	4	8	13.5	5.33	5.75	6.25	3.75	1.17	1.00
b	3	1	5	17.7	7.00	7.67	9.67	3.33	2.00	2.33
c	6	2	4	14.8	6.83	8.00	9.33	4.00	1.42	2.42
d	3	1	3	15.3	5.67	8.33	10.3	6.03	1.60	1.67
e	3	1	2	23.0	7.67	11.3	12.7	6.67	0.67	0.83
f	3	0.5	1	20.0	6.67	9.67	10.0	6.67		2.67
g	6	1	1.5	13.8	5.83	8.75	9.17	4.65	1.70	3.25
h	3	0.25	0.5	14.7	6.33	7.50	8.00	7.50	2.50	3.33
i	12	1	1.25	12.1	4.46	6.79	7.58	2.89	1.17	3.54
j	3									
d'	3	1	3	19.3	7.67	9.33	10.7		2.33	4.83
e'	3	1	2	41.3	11.0	11.7	12.0		2.83	4.00
f'	3	0.5	1	28.0		9.83	9.67		8.67	6.67
j'	3									

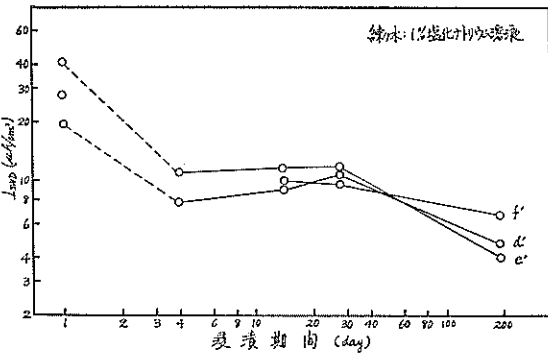


図 100 海水中鋼材に流入する電流密度

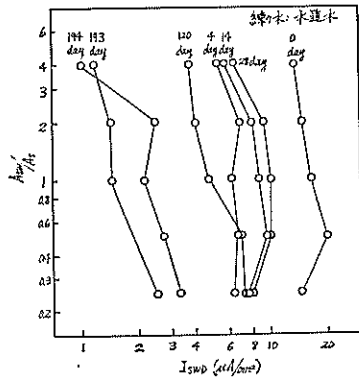


図 101  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の関係

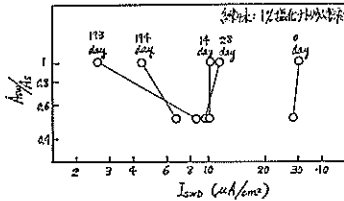


図 102  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の関係

ると1カ月後では浸液中のどの鋼材面にも発錆は認められないが、4カ月後では No. a と No. b, 6カ月後では No. a, No. b, No. i, No. d', No. e' に発錆が部分的に認められる。 $I_{swD}$  が短絡当初は $15 \sim 20 \mu A/cm^2$ , 1~2カ月後は $6 \sim 10 \mu A/cm^2$ , 6カ月後は $3 \sim 4 \mu A/cm^2$ に減少する過程は海水中鋼材に電気防食を適用したときの所要電流密度の減少過程に類似している。また浸液中鋼材表面には白色の石灰質被膜が生成しており(発錆した鋼材では発錆カ所以外の部分に生成)この現象も電気防食法を適用した海水中鋼材面と同様である。

3層の1つである浸液中鋼材に流入する電流密度はとくに3層のうちの1層であるセメント硬化体の練り水には関係なさそうである。

次に表105より  $I_{swD}$  を  $A_{sw}/A_s$  についてまとめてみると表 106 のようになり、これを図示すると 図 101, 102 のようになる。図101, 102を参照するとセメント硬化体の練り水にはとくに関係なく  $I_{swD}$  は短絡当初は  $A_{sw}/A_s$  にあまり関係なさそうであるが長期間後には  $A_{sw}/A_s$  に多少反比例してくる傾向がうかがえる。

砂層中鋼材より流出する電流密度

表102に示す  $I_s (\mu A)$  を  $A_s (cm^2)$  で割って砂層中鋼材より流出する電流密度  $I_{SD} (\mu A/cm^2)$  を算出すると表 107 のようになる。表 107 の  $I_{SD}$  を短絡期間に対して図示すると 図 103 (セメント硬化体の練り水が水道水の場合), 図 104 (練り水が1%塩化ナトリウム溶液の場合) のようになる。

$I_{MD}$ ,  $I_{swD}$  または  $I_M$ ,  $I_{sw}$  の経日変化から予想されるように図103, 104によれば  $I_{SD}$  は短絡 3~4 カ月後では減少している。また  $I_{SD}$  は予想されるように  $(A_M + A_{sw})/A_s$  に比例する傾向がうかがわれる。図 103, 104 から No. d, e, f および No. d', e', f' の  $I_{SD}$  を比較すれば  $I_{SD}$  に対する練り水の差はなさそうである。次に

表 106  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の経日変化

$A_{sw}/A_s$	No.	$I_{swD} (\mu A/cm^2)$						
		0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day
4	a	13.5	5.33	5.75	6.25	3.75	1.17	1
2	c	14.8	6.83	8.00	9.33	4.00	1.42	2.42
1	b, d, e, g, i	16.4	6.13	8.57	9.88	4.72	1.43	2.12
0.5	f	20.0	6.67	9.67	10.00	6.67		2.67
0.25	h	14.7	6.33	7.50	8.00	7.50	2.50	3.33
1	d', e'	30.3	9.34	10.52	11.35		2.58	4.42
0.5	f'	28.0		9.83	9.67			6.67

表 107 砂層中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_s$ ( $\text{cm}^2$ )	$I_{SD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )							
		0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day	229 day
a	3	77.3	23.3	24.7	26.7	2.10	5.33	4.50	0.37
b	3	25.0	8.33	9.0	12.3	4.17	2.67	2.67	2.67
c	3	38.7	14.7	16.7	19.3	8.50	3.00	5.00	3.53
d	3	25.0	7.67	10.7	11.3	7.03	1.77	3.00	3.37
e	3	28.7	9.33	11.7	14.7	7.40	1.67	2.33	4.47
f	6	12.8	3.83	6.17	5.83	3.93	1.25	1.33	4.78
g	6	21.7	6.67	10.2	10.0	5.63	1.75	3.33	1.92
h	12	5.33	1.92	2.50	2.33	2.17	0.64	0.83	1.21
i	12	13.8	4.83	7.42	7.92	3.79	1.29	2.71	1.09
j	3								
d'	3	25.7	8.67	11.7	11.7		3.00	5.67	0.60
e'	3	48.0	13.3	13.7	14.0		2.73	4.83	1.07
f'	6	17.5		6.17	5.67		4.00	3.33	1.75
j'	3								

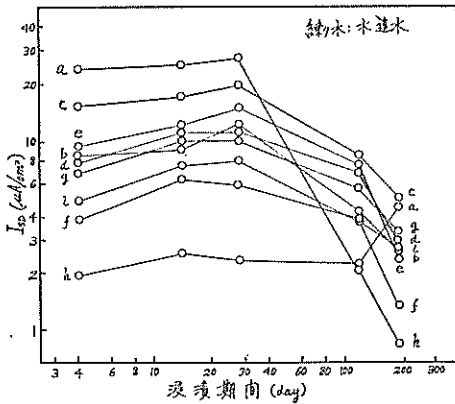


図 103 砂層中鋼材より流出する電流密度

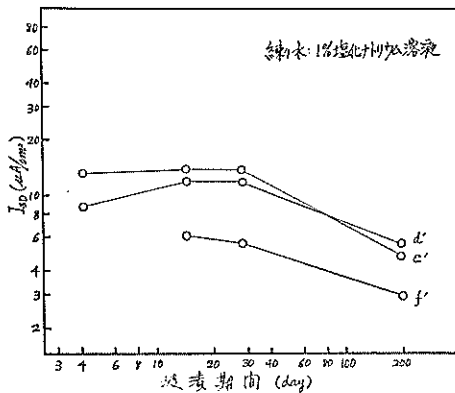


図 104 砂層中鋼材より流出する電流密度

表107の  $I_{SD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を平均腐食速度  $C_S$  (mm/yr) の単位に換算すると表 108 のようになる。また表 108 の  $C_S$  (mm/yr) を便宜上  $A_{SW}/A_S$  に対する平均値として求めてみると表 109 のようになる。表109から  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係を図示してみると図 105, 106 のようになる。図 105 は 3 層中 1 層のセメント硬化体の練り水が水道水の場合、図106 は練り水が 1% 塩化ナトリウム溶液の場合である。図 105 によれば 3 層 (セメント硬化体、浸液、砂層) 中鋼材間に発生するマクロ腐食電池のアノードである砂層中鋼材の平均肉厚減少量  $C_S$  (mm/yr) は  $A_{SW}/A_S$  と一次の関係があることがうかがわれる。

すなわち

$$C_S = k \cdot A_{SW}/A_S$$

$A_{SW}/A_S=1$  のときの  $C_S$  は短絡時は 0.2~0.3 mm/yr であるが次第に減少して半年以後では 0.02~0.03 mm/yr 程度となる。

したがって砂層中鋼材の肉厚減少量は  $A_{SW}/A_S=1$  のときは 0.02~0.03 mm/yr,  $A_{SW}/A_S=10$  のときは 0.2~0.3 mm/yr となつてかなりの危険性が予想されるが、 $A_{SW}/A_S > 2$  では浸液中鋼材に発錆があり  $I_{SWD}$  の減少によって、一次の関係よりはずれの傾向も見られる。反対に  $A_{SW}/A_S=1/10$  のときは 0.002~0.003 mm/yr となって腐食はほとんど無視し得るようになる。このような傾向はすでに文献として紹介した港湾におけるマクロ腐食の傾向と同様である。一方練り水が異なる図 106 でも  $A_{SW}/A_S < 1$  では図105と似たような傾向のあることがう

表 108 砂層中鋼材のマクロ腐食速度

No.	$A_{SW}/A_S$	$A_{SW+M}/A_S$	$C_S$ (mm/yr)							
			0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day	229 day
a	4	8	0.90	0.27	0.29	0.31	0.02	0.062	0.052	0.004
b	1	4	0.29	0.097	0.10	0.14	0.05	0.031	0.031	0.031
c	2	4	0.45	0.17	0.19	0.22	0.10	0.035	0.058	0.041
d	1	3	0.29	0.089	0.12	0.13	0.08	0.021	0.035	0.039
e	1	2	0.33	0.11	0.14	0.17	0.09	0.019	0.027	0.052
f	0.5	1	0.15	0.045	0.072	0.068	0.05	0.015	0.015	0.021
g	1	1.5	0.25	0.078	0.12	0.12	0.07	0.020	0.039	0.022
h	0.25	0.5	0.062	0.022	0.029	0.027	0.03	0.007	0.096	0.014
i	1	0.25	0.016	0.056	0.086	0.092	0.04	0.015	0.032	0.014
j	1	1								
d'	1	3	0.30	0.10	0.14	0.14		0.035	0.066	0.007
e'	1	2	0.56	0.15	0.16	0.16		0.033	0.056	0.012
f'	0.5	1	0.20		0.072	0.066		0.047	0.039	0.020
j'	1	1								

表 109  $C_S \sim A_S/A_{SW}$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$C_S$ (mm/yr)							
		0 day	4 day	14 day	28 day	120 day	193 day	194 day	229 day
4	a	0.90	0.27	0.29	0.31	0.02	0.062	0.052	0.004
2	c	0.45	0.17	0.19	0.22	0.10	0.032	0.058	0.031
1	b, d, e, g, i	0.24	0.086	0.11	0.13	0.066	0.021	0.033	0.032
0.5	f	0.15	0.045	0.072	0.068	0.05	0.015	0.015	0.021
0.25	h	0.062	0.022	0.029	0.027	0.03	0.007	0.01	0.014
1	d', e'	0.43	0.125	0.15	0.15		0.034	0.061	
0.5	f'	0.20		0.072	0.066		0.047	0.039	0.02

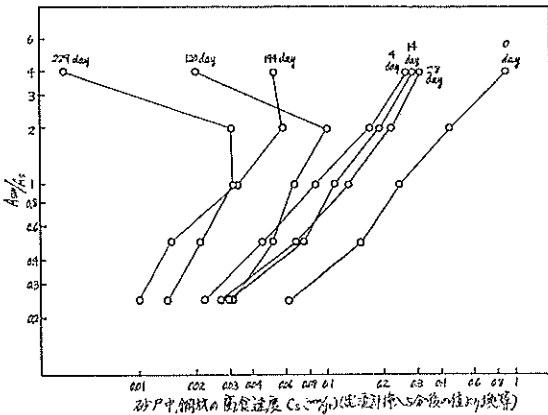


図 105  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

かがえる。図105, 106において縦軸に  $A_{SW}/A_S$  をとったのは  $I_{MD} < I_{SWD}$  であるので  $I_{SD} \approx I_{SW}$  とごく大ざっぱに考えて整理するために便宜上使用してみたものである。(5)重量減量から算出した腐食速度参照)

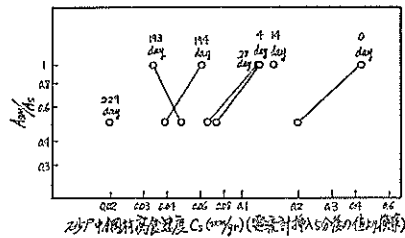


図 106  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

(3) 抵抗

抵抗の測定結果を表 110 に示す。表 110 より  $R_M$ ,  $R_{M-sw}$ ,  $R_{SW-S}$  の変化率 (浸漬日すなわち 0 日の値を 100% としたときの割合, %) を求めてみると表 111 のようになる。

表 111 の変化率を  $A_M/A_S$  について調べてみると表

112 のようになる。

比較してみると 2 層のときのような流入電流密度の傾向ははっきりしない。これは 0 日の抵抗測定を脱型直後に行なったために 2 層のとき(脱型後 1 ~ 2 日空中乾燥)の抵抗にくらべて  $1/5 \sim 1/10$  程度になっており時効硬化後の抵抗に対して誤差の生ずる可能性があると考えられ

表 110 抵抗測定値 ( $\Omega$ )

No.	0 day			228 day	229 day					
	$R_M$	$R_{M-sw}$	$R_{SW-S}$	$R_M$	$R_M$	$R_{SW}$	$R_S$	$R_{M-sw}$	$R_{SW-S}$	$R_{M-S}$
a	24.2	26.0	50.4	310	530	18.0	34.6	780	41.0	800
b	25.4	31.4	12.6	340	520	148	31.2	750	164	540
c	33.2	35.8	59.0	324	500	108	30.4	760	152	660
d	34.0	39.0	54.2	320	470	128	33.0	800	190	680
e	50.6	53.2	56.0	328	475	170	24.5	1000	162	900
f	45.4	55.0	48.4	330	620	160	18.6	900	196	820
g	27.2	29.8	38.2	250	360	106	18.0	640	160	520
h	45.0	51.6	35.4	284	590	154	18.4	940	158	900
i	46.0	50.0	32.8	296	674	108	18.0	900	106	840
j	53.8	51.8	31.2	338	820	12.0	12.0	900	16.6	800
d'	27.8	33.0	54.0	288	586	23.0	26.2	800	37.4	780
e'	38.0	48.0	58.0	296	824	40.0	30.8	1100	65.0	1100
f'	40.0	53.4	46.5	320	1200	136	25.6	1280	146	1280
j'	22.2	23.0	31.5	335	700	13.6	16.6	750	19.2	700

表 111 抵抗変化率

No.	$A_M/A_S$	$A_M/A_{SW}$	$A_{SW}/A_S$	$R_M$ (%)			$R_M$ (%)		$R_{M-sw}$ (%)		$R_{SW-S}$ (%)	
				0 day	28 day	229 day	28 day	229 day	0 day	229 day	0 day	229 day
a	4	1	4	100	1280	2190	100	171	100	3000	100	81.3
b	4	4	1	100	1338	2047	100	153	100	2389	100	262
c	2	1	2	100	976	1506	100	154	100	2123	100	258
d	2	2	1	100	941	1382	100	147	100	2051	100	351
e	1	1	1	100	648	1334	100	206	100	1880	100	289
f	0.5	1	0.5	100	727	1366	100	188	100	1636	100	405
g	0.5	0.5	1	100	919	1324	100	144	100	2148	100	419
h	0.25	1	0.25	100	631	1311	100	208	100	1822	100	446
i	0.25	0.25	1	100	643	1465	100	228	100	1800	100	323
j	1	1	1	100	628	1524	100	243	100	1737	100	53.2
d'	2	2	1	100	1306	2108	100	203	100	2424	100	69.3
e'	1	1	1	100	779	2168	100	278	100	2292	100	122
f'	0.5	1	0.5	100	800	3000	100	375	100	2397	100	314
j'	1	1	1	100	1509	3153	100	209	100	3261	100	61.0

表 112  $R_M \sim A_M/A_S$  の関係

$A_M/A_S$	No.	$R_M$ (%)			$R_M$ (%)	
		0 day	28 day	229day	28 day	229day
4	a, b	100	1309	2119	100	162
2	c, d	100	959	1444	100	151
1	e	100	648	1334	100	206
0.5	f, g	100	823	1345	100	166
0.25	h, i	100	637	1388	100	218
1	j	100	628	1524	100	243
2	d'	100	1036	2108	100	203
1	e'	100	779	2168	100	278
0.5	f'	100	800	3000	100	375
1	j'	100	1509	3153	100	209

る。したがって変化率の基準を28日の抵抗としても算出してみた。

28日の抵抗を100%としてみると2層のときと同じように流入電流密度による影響が見られるが(ただし練り水が水道水のときの開路状態は短絡,  $A_M/A_S \leq 1$  のときより大きな変化率を示しているが), とくに, この傾向は練り水が1%塩化ナトリウム溶液のときでは一層はっきりしている。次に表111より  $R_{M-SW}$  の  $A_M/A_{SW}$  に対する変化を取り出してみると表113のようになる。また  $R_{SW-S}$  と  $A_{SW}/A_S$  との変化は表114のようになる。表113によれば  $R_{M-SW}$ (%)は  $A_M/A_{SW}$  に多少反比例する傾向がうかがえるがあまりはっきりしない。しかし表114によれば  $R_{SW-S}$ (%)は明らかに  $A_{SW}/A_S$  に反比例していることがわかる。

次に表110より  $R_M^0$  (セメント硬化体中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_{SW}^0$  (海水中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_S^0$  (砂層中鋼材

表 113  $R_{M-SW} \sim A_M/A_{SW}$  の関係

$A_M/A_{SW}$	No.	$R_{M-SW}$ (%)	
		0 day	229 day
4	b	100	2,389
2	d	100	2,051
1	a, c, e, f, h	100	2,092
0.5	g	100	2,148
0.25	i	100	1,800
1	j	100	1,737
2	d'	100	2,424
1	e', f'	100	2,345
1	j'	100	3,261

表 114  $R_{SW-S} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$R_{SW-S}$ (%)	
		0 day	229 day
4	a	100	81
2	c	100	258
1	b, d, e, g, i	100	329
0.5	f	100	405
0.25	h	100	446
1	j	100	53
1	d', e'	100	91
0.5	f'	100	314
1	j'	100	61

表 114'  $R_M^0, R_{SW}^0, R_S^0$

No.	229 day		
	$R_M^0$ ( $\Omega$ )	$R_{SW}^0$ ( $\Omega$ )	$R_S^0$ ( $\Omega$ )
a	770	11	31
b	563	187	—
c	634	126	26
d	645	155	35
e	869	131	31
f	762	138	58
g	500	140	20
h	841	99	59
i	817	86	23
j	842	59	—
d'	772	29	9
e'	1,068	33	33
f'	1,207	73	73
j'	716	35	—

の抵抗,  $\Omega$ ) を以下のように算出してみる。算出した値を 表 114' に示す。

$$R_M^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{M-S}) - (R_{SW-S})}{2}$$

$$R_{SW}^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{SW-S}) - (R_{M-S})}{2}$$

$$R_S^0 = \frac{(R_{SW-S}) + (R_{M-S}) - (R_{M-SW})}{2}$$

表114'より  $R_M^0$  を見てみると No. e (短絡, 水道水) と No. j (開路, 水道水) では大差ない。No. e' (短絡, 海水) と No. j' (開路, 海水) では No. e' の方が No. j' より5割程度大きい。これは練り水に海水を使用した場合でも流入電流によってセメント硬化体内部が緻密にな



ることを示す一例であると思われる。

(4) 供試体表面の観察

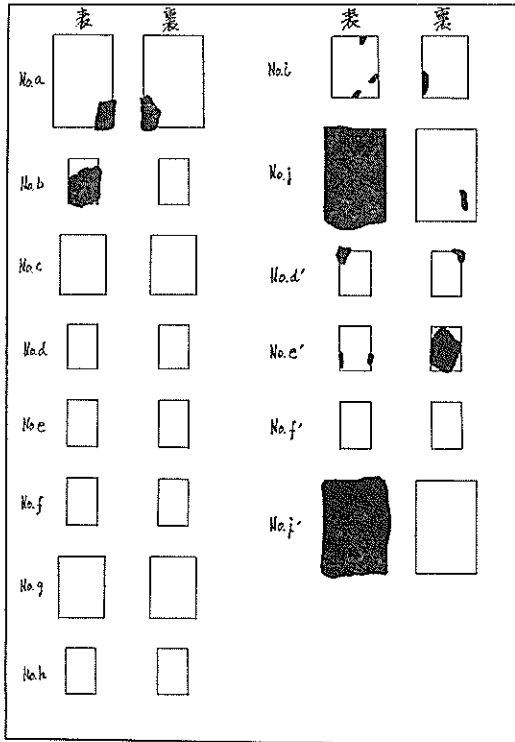


図 107 海水中鋼材片の発錆状況 (194 day)

肉眼による観察によればセメント硬化体表面には劣化のしるし（キレツ、発錆）はいずれも見られなかった。

浸液中鋼材は120日後では No. a, No. b に部分的に発錆したが194日後では No. a, b, i, j, d', e', j' にそれぞれ部分的な発錆が 図 107 のように認められた。一方砂層中鋼材は2層のときの砂層中鋼材表面と全く同様に奇麗な鉄面が現われている。(図77参照)

(5) 重量減量から算出した腐食速度

電流測定値より算出した腐食速度と比較するために重量減量よりも腐食速度を算出してみたところ 表 109' のようになる。表 109' より腐食速度と  $A_{sw}/A_s$  の関係を示す。

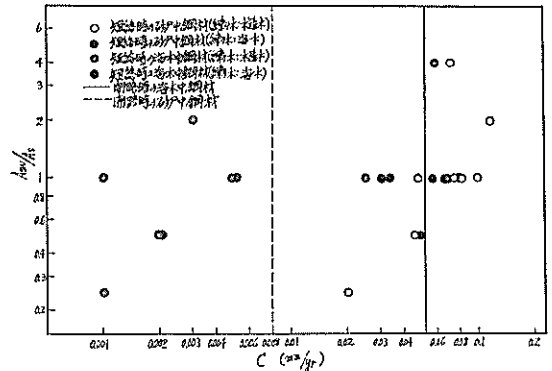


図 106' 3層(セメント硬化体、海水、砂層)中鋼材の腐食速度 (重量減量より算出) (腐食期間 320 day)

表 109' 重量減量より算出した層中鋼材の腐食速度 (腐食期間 320 day)

No.	表面積比			セメント硬化体中鋼材		海水中鋼材				砂層中鋼材			
	$A_M$	$A_{sw}$	$A_s$	初期重量 (g)	後期重量 (g)	初期重量 (g)	後期重量 (g)	重量減量 (g)	mm/yr	初期重量 (g)	後期重量 (g)	重量減量 (g)	mm/yr
a	4	4	1	4.5460	4.5472	4.5590	4.3100	0.2490	0.058	1.1040	0.9598	0.1442	0.070
b	4	1	1	5.2672	5.2676	2.1170	1.0518	0.0652	0.067	1.1176	0.9608	0.1568	0.076
c	2	2	1	2.6206	2.6210	2.7316	0.7202	0.0114	0.003	1.1190	0.8816	0.2374	0.115
d	2	1	1	2.7112	2.7118	1.1310	1.1285	0.0025	0.001	1.1265	0.9610	0.1655	0.080
e	1	1	1	1.1120	1.1118	1.1650	1.1138	0.0512	0.025	1.1250	0.9224	0.2026	0.098
f	1	1	2	1.0880	1.0878	1.1240	1.1202	0.0038	0.002	2.5119	2.3180	0.1939	0.047
g	1	2	2	1.1230	1.1224	2.6395	2.6196	0.0199	0.005	2.7260	2.4054	0.3206	0.078
h	1	1	4	1.0972	1.0976	1.1195	1.1170	0.0025	0.001	5.2840	5.1178	0.1662	0.020
i	1	4	4	1.0980	1.0970	1.1920	5.1534	0.0386	0.005	5.4060	5.0192	0.3868	0.047
j	1	1	1	4.5638	4.5642	5.2904	4.8790	0.4114	0.050	4.5776	4.5110	0.0666	0.008
d'	2	1	1	2.5990	2.5990	1.1284	1.0634	0.0650	0.031	1.1280	0.9944	0.1336	0.065
e'	1	1	1	1.1010	1.1004	1.1102	0.9940	0.1162	0.056	1.1372	1.0685	0.0687	0.033
f'	1	1	2	1.1355	1.1354	1.1200	1.1150	0.0050	0.002	2.5782	2.3810	0.1972	0.048
j'	1	1	1	4.5568	4.5642	5.1396	4.6930	0.4466	0.054	5.1960	5.1265	0.0695	0.008

図示すると 図 106' のようになる。ただし重量減量は腐食期間が320日の値である。図 105, 106と図106'を比較すると  $A_{SM}/A_S$  に対する  $C_S$  の傾向は類似しているが図106'の値の方が図105, 106の値より約2倍大きい。すなわち重量減量より算出した腐食速度の方が電流値より算出した値より2倍程度大きい。

これは使用した電流計の内部抵抗に起因して電流より換算するときは少ない目となるためと考えられるので、この点に留意して電流値より換算した腐食速度を見る必要がある。

一方、セメント硬化体中鋼材には電位から予想された通り発錆は見られず腐食速度は零であった。

**実験20 鋼材がセメント硬化体、海水（攪拌）、泥層（海水飽和）の3層に接するときの腐食傾向**

**供試体**

供試体の内容を表 115 に示す。供試体の作成、浸漬要領は実験19に準じた。実験19と異なるところはセメント硬化体の練り水が、水道水と1%塩化ナトリウム液澄

であったのに対して、水道水と海水（久里浜湾より採取）としたことと供試体の浸漬液に最初から海水（久里浜湾より採取）を使用した2点である。

**測定**

測定項目は電位、電流、抵抗の測定および供試体表面の観察である。

**(1) 電位**

電位には  $E_0$ （3層中鋼材を短絡したときの電位）、 $E_M$ （短絡前または短絡後開路としたときのセメント硬化体中鋼材の電位）、 $E_{SW}$ （短絡前または短絡後開路としたときの海水飽和砂層中鋼材の電位）の4つがあるがいずれも海水塩化銀電極基準として電位計（Dual Meter）で測定された。また開路後に  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  が変化する模様も測定したが No. j, No. j' については開路時の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の測定のみである。単位は -mV である。

**(2) 電流**

電流には  $I_M$ （セメント硬化体中鋼材に流入する電流）、 $I_{SW}$ （海水中鋼材に流出入する電流）、 $I_S$ （海水飽和砂層中鋼材より流出する電流がある。電流は図79に示す要領で

表 115 実験 20 の 供 試 体

No.	鋼 材									モ ル タ ル				回 路
	表面積 (cm <sup>2</sup> )			表面積比			重 量 (g)			配 合			練り水	
	$A_S$	$A_{SW}$	$A_M$	$A_S : A_{SW} : A_M$	$W_S$	$W_{SW}$	$W_M$	$W$ (g)	$C$ (g)	$S$ (g)				
a	3	12	12	1	4	4	1.1360	4.4772	4.6240	338	520	1,040	水道水	短絡
b	3	3	12	1	1	4	1.1356	1.1412	4.6142	338	520	1,040	水道水	短絡
c	3	6	6	1	2	2	1.1220	2.4416	2.5550	338	520	1,040	水道水	短絡
d	3	3	6	1	1	2	1.1380	1.1225	2.3924	338	520	1,040	水道水	短絡
e	3	3	3	1	1	1	1.1186	1.1369	1.1478	338	520	1,040	水道水	短絡
f	6	3	3	2	1	1	2.5142	1.1239	1.1209	338	520	1,040	水道水	短絡
g	6	6	3	2	2	1	2.5930	2.3344	1.1385	338	520	1,040	水道水	短絡
h	12	3	3	4	1	1	4.5808	1.1502	1.1510	338	520	1,040	水道水	短絡
i	12	12	3	4	4	1	4.6334	4.5654	1.1290	338	520	1,040	水道水	短絡
j	12	12	12	4	4	4	4.6280	4.6022	4.5870	338	520	1,040	水道水	開路
d'	3	3	6	1	1	2	1.1306	1.1300	2.5530	338	520	1,040	海 水	短絡
e'	3	3	3	1	1	1	1.1570	1.1220	1.1350	338	520	1,040	海 水	短絡
f'	6	3	3	2	1	1	1.6224	2.6528	1.1562	338	520	1,040	海 水	短絡
j'	12	12	12	4	4	4	4.5940	4.6528	4.6150	338	520	1,040	海 水	開路

鋼材の形状寸法（厚さ 0.1 cm）  
 3 cm<sup>2</sup> = 1 cm × 1.5 cm × 2  
 6 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 1.5 cm × 2  
 12 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 3 cm × 2

$A_M$ : セメント硬化体中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $W_S$ : 砂層中鋼材の重量 (g)  
 $W_{SW}$ : 海水中鋼材の重量 (g)  
 $W_M$ : セメント硬化体中鋼材の重量 (g)  
 $W$ : 練り水量 (g)  
 $C$ : セメントの量 (g)  
 $S$ : 砂の量 (g)

$A_S$ : 砂層中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $A_{SW}$ : 海水中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

No. a~No. i および No. d'~No. f' について D. C. 電流計で測定された。また  $I_M$ ,  $I_{SM}$ ,  $I_S$  を各層中鋼材表面積  $A_M$ ,  $A_{SW}$ ,  $A_S$  で割って算出する電流密度を  $I_{MD}$ ,  $I_{SWD}$ ,  $I_{SD}$  で表わす。電流の単位は  $\mu A$ , 電流密度の単位は  $\mu A/cm^2$  である。解析の都合上  $I_{SD}$  ( $\mu A/cm^2$ ) を 86 ( $\mu A/cm^2/mm/yr$ ) で割って砂層中鋼材の平均腐食速度  $C_S(mm/yr)$  を求めたが,  $C_S(mm/yr)$  が砂層中鋼材の肉厚減少量に相当する。

### (3) 抵抗

抵抗には  $R_M$  (セメント硬化体中鋼材と標準鉄電極: 裸鉄面  $\phi 11mm \times l 35 mm$ , 間の抵抗),  $R_{SW}$  (海水中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_S$  (砂層中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_{M-SW}$  (セメント硬化体中鋼材と海水中鋼材間の抵抗),  $R_{SW-S}$  (海水中鋼材と砂層中鋼材間の抵抗),  $R_{M-S}$  (セメント硬化体中鋼材と砂層中鋼材間の抵抗) の 6 つがある。各抵抗は A. C.ブリッジ (1.000 c/s) で分極をおこさないようにして測定された。使用した計測器は港研式腐食計の抵抗測定部である。また抵抗値そのものは鋼材片の大きさが異なるため直接比較できないために基準とする値(たとえば 0日の値)に対する百分率(%)を算出した。抵抗の単位は  $\Omega$  であり抵抗変化率の単位は % である。

### (4) 供試体表面の観察

供試体の劣化状況を肉眼で観察した。

## 測定結果および考察

### (1) 電位

電位の測定結果を表 116 に示す。表 116 よりまず短絡前の電位を比較してみると  $E_M$  は練り水が水道水の場合  $-200 mV$  台であるが練り水が海水の場合は  $-200 mV$  台から  $-400 mV$  台である。また  $E_{SW}$  は  $-400 mV$  台,  $E_S$  は  $-700 mV$  台である。この模様を図示してみると図 108 のようになり 3 層中鋼材間にはマクロ腐食電池の発生することが予想できる。次に 3 層中鋼材を短絡すると  $E_0$  は  $E_S$  に非常に接近しており, この傾向は短絡期間にはほとんど左右されないようである。表 116 に示す開路電位 (すなわち 1 日以後の)  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は開路後 5~10 分のときの値である。(ただし 234 日の値のみは 140 分のときのものである。) 表 116 から短絡後の例として 35 日と 234 日のときの  $E_0$ ,  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の関係を図示すると図 109, 110 のようになる。先の図 108 と図 109, 110 を参照すると 3 層間に発生するマクロ腐食の内容が一層はつきりする。一方開路後の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の開路後の経過時間による変化状況は表 117, 118 のようになる。表 117, 118 から  $E_0$ ,  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の変化模様を図示してみると図 111~122 のようになる。図 111~122 からわかるように  $E_M$  は開路後 30 分位で  $-400 mV$  付近の貴の電位となり 30 分以後はごく緩やかに貴の方に移り常にマクロ腐食電池のカソードとなっている。これに対して  $E_{SW}$  は  $-500 mV$  より貴な場合もあるし  $-500 mV$  より卑な

表 116 電位測定値 (-mV)

No.	0 day			1 day				7 day				19 day			
	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	750	442	230	740	750	740	542	720	733	690	515	735	751	718	471
b	748	548	228	720	715	707	427	726	721	520	440	702	725	500	463
c	767	438	258	715	738	700	437	720	723	510	429	700	740	515	515
d	763	426	232	732	748	710	437	728	747	499	438	730	738	520	508
e	763	590	278	725	757	453	443	730	745	501	410	719	753	513	413
f	745	480	242	732	745	428	542	730	745	540	480	740	753	561	560
g	767	468	254	720	743	663	477	729	732	516	388	730	734	514	459
h	767	454	270	750	775	458	653	737	765	517	499	740	752	551	472
i	765	466	248	740	760	401	498	728	741	500	478	710	748	488	405
j	767	472	208		762	730	240		777	700	227		765	718	208
d'	695	457	228	722	742	452	518	715	721	493	413	727	720	522	450
e'	719	467	408	728	739	448	420	715	720	442	380	719	760	505	417
f'	740	465	468	725	742	408	439	721	735	457	380	721	747	480	440
j'	760	450	242	752	763	718	603		750	710	410		742	730	470

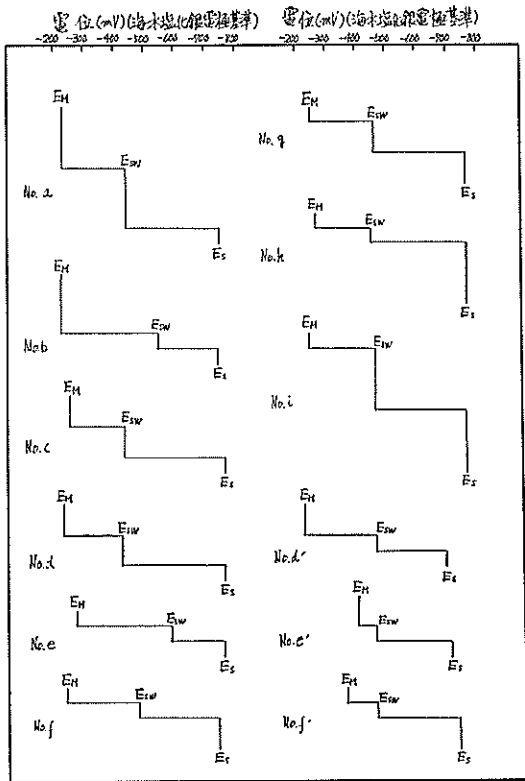


図 108 開路電位 (0 day)

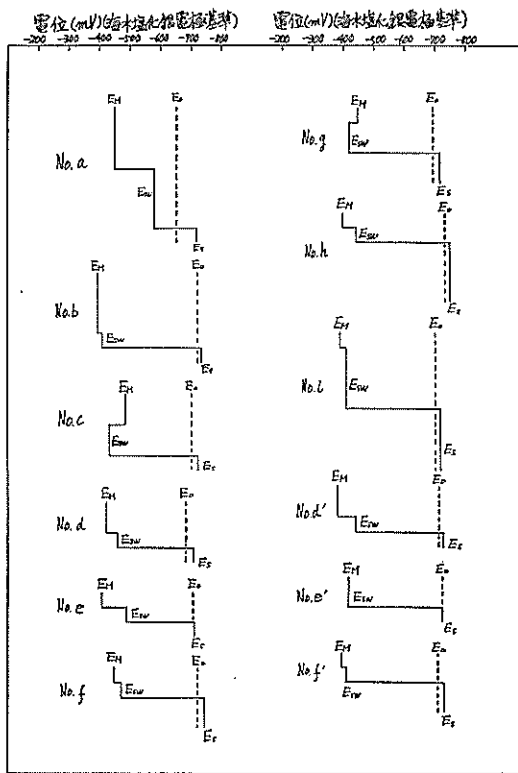


図 109 短絡電位と開路電位の関係 (35 day)

(海水塩化銀電極基準)

28 day				35 day				55 day				234 day				No.
$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	
730	724	716	460	654	722	583	455	721	720	725	660	690	710	710	430	a
714	740	454	412	724	737	410	398					680	700	500	352	b
724	725	454	446	706	725	425	487					680	700	500	500	c
708	724	480	428	686	710	462	423					680	700	695	336	d
742	722	456	414	710	710	491	410					675	700	695	350	e
742	750	492	468	722	745	472	449					680	710	430	440	f
732	722	450	446	694	718	422	450					680	710	695	536	g
736	734	508	454	732	750	443	400					680	710	510	660	h
730	730	490	394	700	718	410	390					680	715	700	340	i
		748	290													j
708	710	540	438	714	710	440	381					660	700	500	360	d'
702	718	538	462	722	710	415	415					680	705	460	380	e'
722	740	542	470	706	725	405	392					680	715	695	482	f'
		750	470													j'

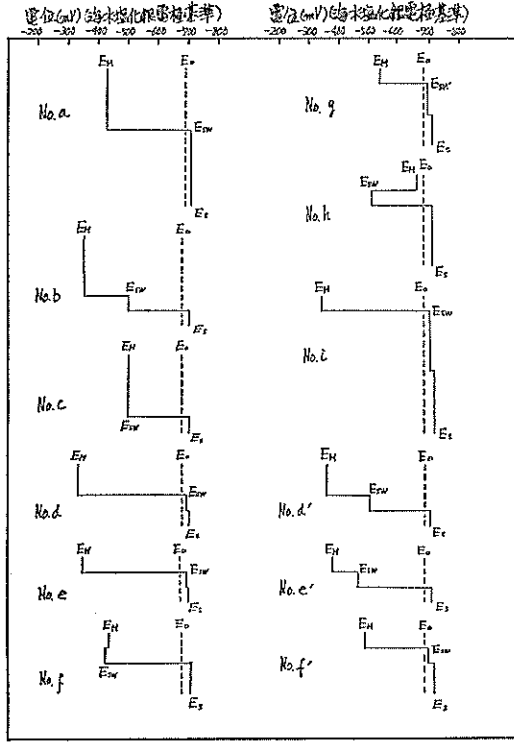


図 110 短絡電位と開路電位の関係 (234 day)

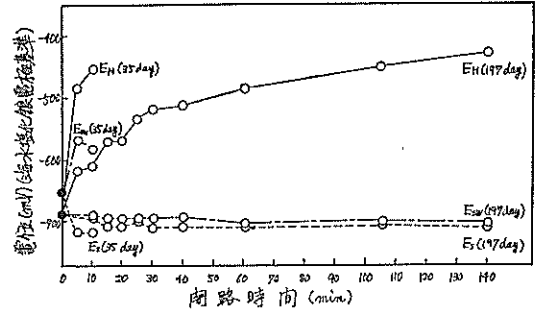


図 111 開路後の電位変化 (No. a)

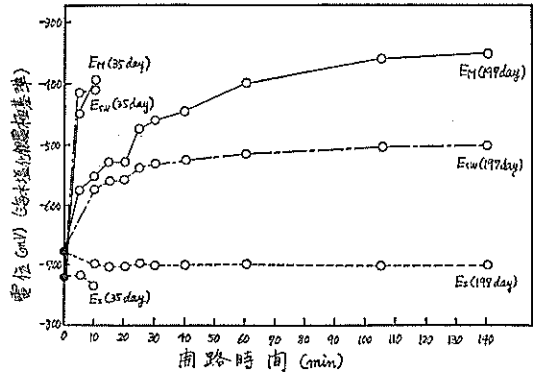


図 112 開路後の電位変化 (No. b)

表 118 開路後の電位変化 (-mV)

No.	$E_0$	1 min			5 min			10 min			15 min			20 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	690	720	720	700			620	700	700	610	710	700	570	710	700	570
b	680	710	630	690			675	700	575	555	705	560	530	705	560	530
c	680	710	680	695			670	700	630	665	705	610	650	705	610	650
d	680	705	700	680			475	695	690	450	700	690	410	700	690	395
e	675	705	700	650			400	710	695	380	700	690	376	700	690	350
f	680	720	675	700			534	710	600	510	710	675	480	715	675	470
g	680	720	700	710			675	705	695	660	710	695	640	710	695	635
h	680	715	660	710			700	715	580	700	705	670	695	705	610	695
i	680	720	710	700			555	700	700	535	715	695	495	720	695	475
j																
d'	660	705	640	680			480	705	570	450	700	550	405	700	550	380
e'	680	705	680	705			625	715	615	600	705	595	560	705	595	540
f'	680	720	710	710			635		700	615	715	695	585	715	695	570
j'																

表 117 開路後の電位変化 (-mV) (海水塩化銀電極基準) (35 day)

No.	$E_0$	1 min			5 min			10 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	654	725	582*	537	720	570	485	722	583	455
b	724	725	462	520	720	415	450	737	410	398
c	706	703	445	520	730	430	502	725	425	487
d	686	701	485	507	725	456	465	710	462	423
e	710	705	498	522	682	497	480	710	491	410
f	722	725	472	540	745	470	500	745	472	449
g	694	740	446	510	740	420	477	718	422	450
h	732	745	478	555	725	465	462	750	443	400
i	700	740	430	420	720	429	382	718	410	390
j		752	638*							
d'	714	725	425	525	708	420	400	710	440	381
e'	722	722	419	497	732	418	462	710	415	415
f'	706	727	398	462	730	392	405	725	405	392
j'		750	650*	555						

\* 発錆のままで -700 mV であったが錆をおとすと -600 mV 台となった。

(海水塩化銀電極基準) (234 day)

25 min			30 min			40 min			60 min			105 min			140 min			No.
$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	
705	700	535	710	700	520	710	700	515	710	710	486	710	710	452	710	710	430	a
700	540	475	702	535	460	702	525	446	700	515	400	702	505	362	700	500	352	b
705	590	620	702	580	615	700	560	590	700	540	578	700	515	532	700	500	500	c
700	690	375	700	690	355	700	690	355	700	690	340	700	690	336	700	695	336	d
695	690	335	710	695	330	700	695	330	700	695	340	700	695	352	700	695	350	e
710	540	455	710	530	450	710	505	450		475	450	710	440	440	710	430	440	f
710	695	620	710	695	610	710	695	590	710	695	582	710	695	554	710	695	536	g
702	545	690	710	540	690	710	530	685	710	520	680	710	515	670	710	510	660	h
715	700	450	715	700	430	715	700	405	705	700	370	710	700	335	715	500	340	i
																		j
700	535	360	700	530	350	700	520	346	700	510	346	700	500	346	700	500	360	d'
705	565	520	710	555	510	705	535	498	705	510	450	705	480	395	705	460	380	e'
715	695	550	715	695	540	715	695	536	705	695	510	715	695	470	715	695	482	f'
																		j'

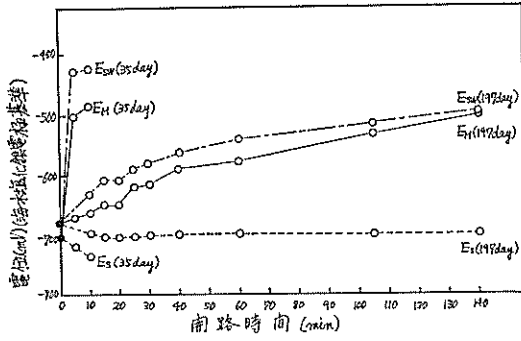


図 113 開路後の電位変化 (No. c)

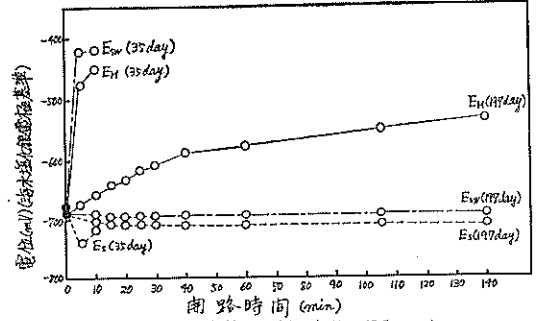


図 117 開路後の電位変化 (No. g)

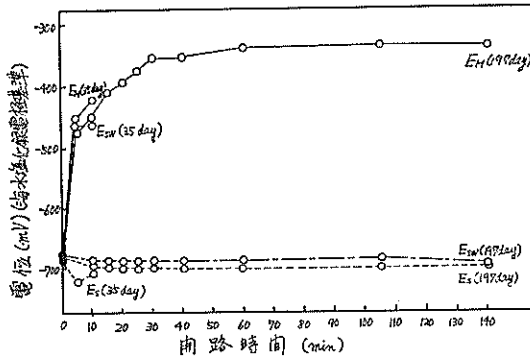


図 114 開路後の電位変化 (No. d)

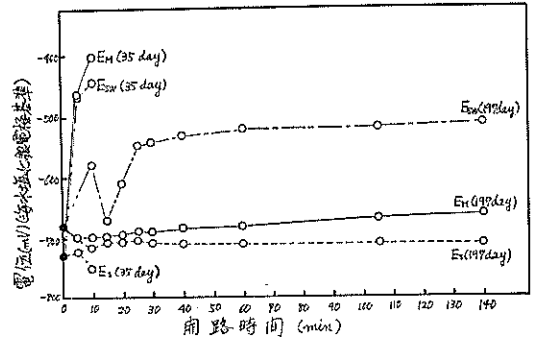


図 118 開路後の電位変化 (No. h)

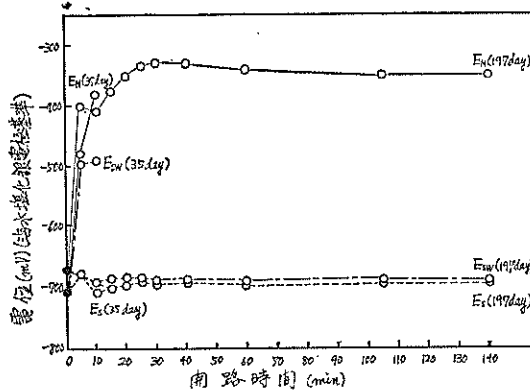


図 115 開路後の電位変化 (No. e)

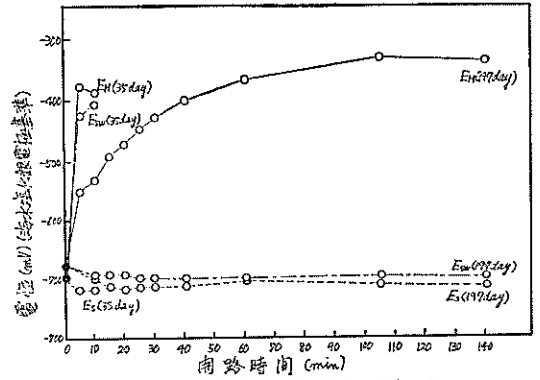


図 119 開路後の電位変化 (No. i)

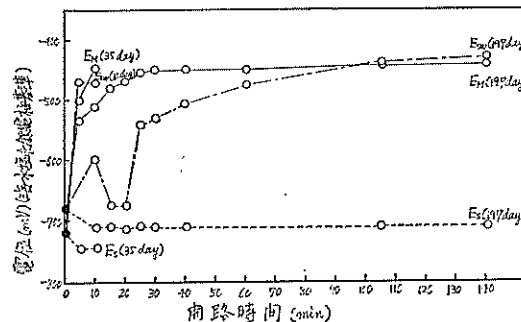


図 116 開路後の電位変化 (No. f)

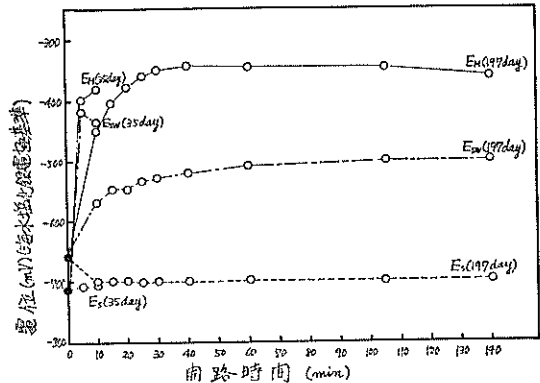


図 120 開路後の電位変化 (No. d')

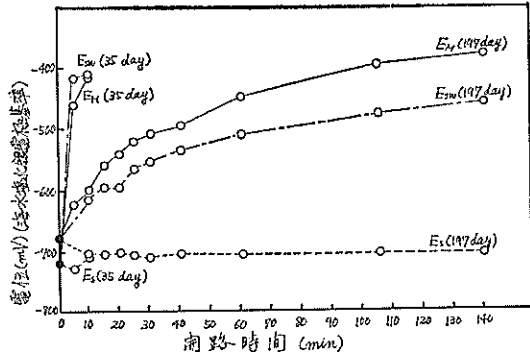


図 121 開路後の電位変化 (No. e')

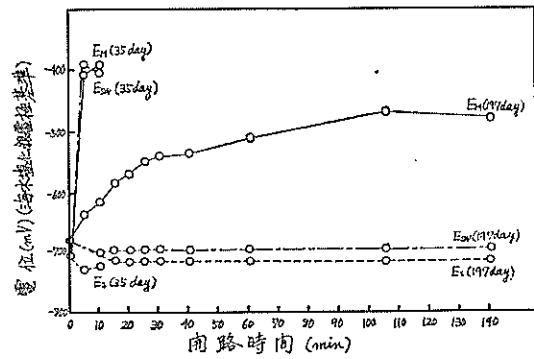


図 122 開路後の電位変化 (No. f')

場合もある。このことは後述の海水中鋼材の発錆状態の観察結果を参照する必要がある。

No. j, No. j' の  $E_M$  を比較すると練り水が水道水の No. j では半年以後では  $-400$  mV 台になっているが練り水が海水の No. j' では  $-500$  mV 台となっている。しかし短絡した No. d, e, f と No. d', e', f' の  $E_M$  の変化模様は図 114, 115, 116 および図 120, 121, 122 の比較からわかるようにとくに練り水による差は見受けられない。

(2) 電 流

電流の測定結果を表 119 に示す。表 119 で  $I_M, I_{SW}$  が (+) の値はそれぞれセメント硬化体中鋼材と海水中鋼材に流入する電流を意味し  $I_{SW}$  が (-) の値は海水中鋼材より流出する電流を示す。また  $I_S$  が (+) の値は砂層中鋼材より流出する電流を示す。表 119 からわかるように  $I_S = I_M + I_{SW}$  となっている。3 層中鋼材間に流入する電流についての検討は以下のように電流密度の形として行なう。

セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 119 から算出した電流密度  $I_{MD}$  は表 120 のようになる。表 120 から  $I_{MD}$  と短絡期間の関係を図示すると図 123, 124 のようになる。図 123 は練り水が水道水、図 124 は練り水が海水の場合である。図 123 によれば  $I_{MD}$  は短絡期間が長くなるにつれて多少減少して行く傾向がある。このような傾向は図 124 についてもいえるようであ

表 119 電 流 測 定 値 ( $\mu A$ ) (1)

No.	0 day			2 day			7 day			19 day			28 day		
	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$
a	92	61		5	28	23	4	33	29	4	16	12	8	12	4
b	135	124		6	36	30	4	24	20	4	23	19	5	10	5
c	68	71		6	44	38	7	35	28	6	42	36	3	18	15
d	75	111		6	62	56	4	20	16	3	20	17	3	14	11
e	32	55		4	21	17	3	20	17	5	23	18	5	18	13
f	20	100		3	30	27	4	26	22	2	20	18	2	10	8
g	37	45		4	55	51	20	43	23	10	40	30	8	20	12
h	48	100		8	30	28	15	26	11	11	26	16	10	17.5	7.5
i	44	115		4	55	51	3	30	27	4	50	46	7	23	16
j	121	112													
d'	32	42		5	23	18	7	19	12	7.5	23	15.5	14	25	11
e'	35	85		5	20	15	8	23	15	7	24	17	7	16	9
f'	40	100		5	30	25	9	28	19	5	27.5	22.5	9	22	13
j'	140	160													



表 119 電 流 測 定 値 ( $\mu\text{A}$ ) (2)

No.	35 day			55 day			196 day**			197 day***		
	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$	$I_M$	$I_S$	$I_{SW}$
a	5	156*	151	2.5	+3.5	-6	1	2	1	2	9.5	6
b	5	24	19	5	19	14	1.5	12	10.5	2.5	12	10
c	2	30	28	5.5	35	19.5	0.8	20.5	19.5	0.5	23	23
d	2.5	17	14.5	5.5	12	9.5	2	17.5	15	2	18	16
e	5	8	3	4	9	5	2	22	20	2	22.5	21
f	0.5	14	13.5	1	9	8	2.3	20	17.4	2.5	21	19.5
g	6	25	19	8	27.5	19.5	2.3	23	20.3	2.5	26	24
h	5	18	13	6	16	10	1.5	19	17.5	2	21	19.5
i	6	47	41	7.5	13	35.5	0.4	28	27.4	0.5	35.5	35
j												
d'	7	20	13	4	11	7	1.5	4.5	3.3	5.5	12.5	7.5
e'	5	17	12	5	13	8	1.5	0.5	-1.5	2	0.4	-1
f'	5.5	28	22.5	6	21	15	1.2	19	17.5	2.5	21.5	19.5
j'												

\* 海水中鋼材の錆をおとす  
 \*\* 海水静止中  
 \*\*\* 海水攪拌

表 120 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )								
			0 day	2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
a	12	4	7.7	0.42	0.33	0.33	0.67	0.42	0.21	0.08	0.17
b	12	4	11.3	0.50	0.33	0.33	0.42	0.42	0.42	0.13	0.21
c	6	2	11.3	1.00	1.17	1.00	0.50	0.33	0.92	0.13	0.09
d	6	2	12.5	1.00	0.67	0.50	0.50	0.42	0.42	0.33	0.33
e	3	1	10.7	1.33	1.00	1.67	1.67	1.67	1.33	0.67	0.67
f	3	0.5	6.7	1.00	1.33	0.67	0.67	0.17	0.33	0.77	0.83
g	3	0.5	12.3	1.33	6.67	3.33	3.67	2.00	2.67	0.77	0.83
h	3	0.25	16.0	2.67	5.00	3.67	4.33	1.67	2.00	0.50	0.67
i	3	0.25	14.7	1.33	1.00	1.33	2.67	2.00	2.50	0.13	0.17
j	12	1	10.1								
d'	6	2	5.3	0.83	1.17	1.25	2.33	1.17	0.67	0.25	0.92
e'	3	1	11.7	1.67	2.67	2.33	2.33	1.67	0.67	0.50	0.67
f'	3	0.5	13.3	1.67	3.00	1.67	3.00	1.83	2.00	0.40	0.83
j'	12		11.7								

表 121  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の経日変化

$A_M/A_S$	No.	$I_{MD}$ ( $\mu A/cm^2$ )								
		0 day	2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
4	a, b	9.5	0.46	0.33	0.33	0.55	0.42	0.32	0.11	0.19
2	c, d	11.9	1.00	0.92	0.75	0.50	0.38	0.77	0.23	0.21
1	e	10.7	1.33	1.00	1.67	1.67	1.67	1.33	0.67	0.67
0.5	f, g	9.5	1.17	4.00	2.00	2.17	1.08	1.50	0.77	0.87
0.25	h, i	15.4	2.00	3.00	2.50	3.50	1.84	2.25	0.32	0.42
2	d'	5.3	0.83	1.17	1.25	2.33	1.17	0.67	0.25	0.92
1	e'	11.7	1.67	2.67	2.33	2.33	1.67	1.67	0.50	0.67
0.5	f'	13.3	1.67	3.00	1.67	3.00	1.83	2.00	0.40	0.83

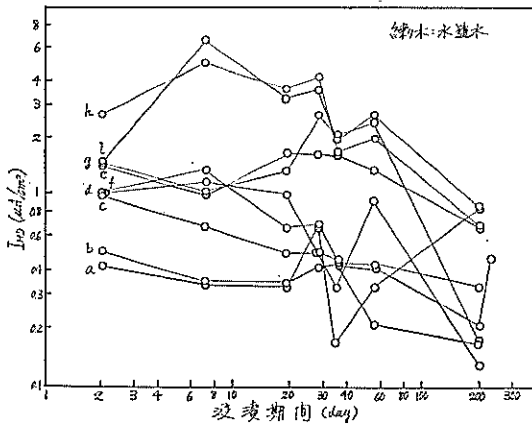


図 123 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

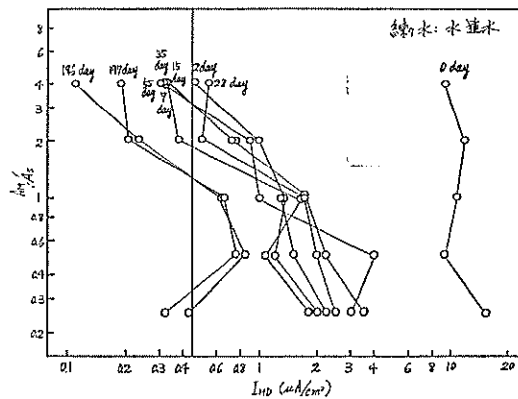


図 125  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

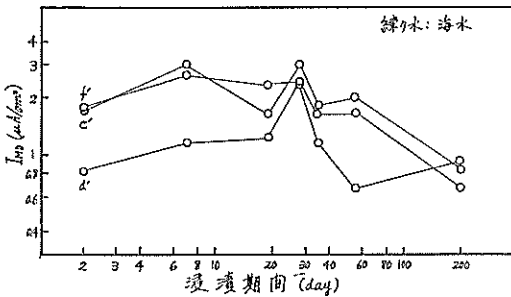


図 124 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

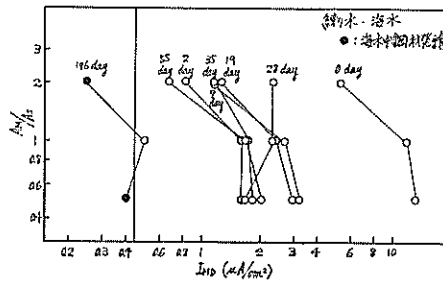


図 126  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

り、また図123の No. d, e, f と図124の d', e', f' を比較してもとくに  $I_{MD}$  の値には練り水による差は見られない。次に表 120 から  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  を整理すると表 121 のようになる。また表121から  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係を示すと 図 125, 126 のようになる。図 125 は練り水が水道水、図126は練り水が海水の場合である。

図 125 によれば  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S > 1$  では  $A_M/A_S$  対

して反比例の関係にある。これに対して  $A_M/A_S \leq 1$  のときは  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S$  にほとんど関係なく  $A_M/A_S=1$  のときの値に一定となるようである。 $A_M/A_S=1$  のときの  $I_{MD}$  は短絡時は  $10 \mu A/cm^2$  と大きい、短絡期間が長くなるにつれて次第に  $I_{MD}$  は減少して半年以後ではほぼ  $0.5 \sim 0.6 \mu A/cm^2$  付近に落ち着くようである。図125に  $0.45 \mu A/cm^2$  (塩化物が存在するときセメント硬化体中鋼材の防食に必要といわれる電気防食電流密度) を適用

表 122 海水中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_{SW}$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_{SW}/A_S$	$I_{SWD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )							
			2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
a	12	4	1.92	2.42	1.00	0.33	12.6	-0.50	0.08	0.50
b	3	1	10.0	6.67	6.33	1.67	6.33	4.67	3.50	3.33
c	6	2	6.33	4.67	6.00	2.50	4.67	3.25	3.25	3.83
d	3	1	18.7	5.33	5.67	3.67	4.83	3.17	5.00	5.33
e	3	1	5.67	5.67	6.00	4.33	1.00	1.67	6.67	7.00
f	3	0.5	9.00	7.33	6.00	2.67	4.50	2.67	5.80	6.50
g	6	1	8.50	3.33	5.00	2.00	3.17	3.25	3.38	4.00
h	3	0.25	9.33	3.67	5.33	2.50	4.33	3.33	5.83	6.50
i	12	1	4.25	2.25	3.83	1.33	3.03	2.96	2.28	2.92
j	12									
d'	3	1	6.00	4.00	5.17	3.67	4.33	2.33	1.10	2.50
e'	3	1	5.00	5.00	5.67	3.00	4.00	2.67	-0.50	-0.33
f'	3	0.5	8.33	6.33	7.50	4.33	7.50	5.00	5.83	6.50
j'	12									

してみると短絡期間が長く安定したと思われる半年以後の  $I_{MD}$  では  $A_M/A_S \leq 1$  のとき  $I_{MD} > 0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となることが期待できる。したがって  $A_M/A_S \leq 1$  の条件下では  $A_{SW}$  に関係なくセメント硬化体中鋼材は砂層中鋼材より流入する電流によって、丁度電気防食された恰好となるが  $A_M/A_S > 1$  では次第に十分な電気防食効果が期待できなくなり  $A_M/A_S \gg 1$  のときのセメント硬化体中鋼材は、セメント硬化体 1 層中鋼材と同じ腐食環境におかれることになる。一方図 126 によれば練り水が海水の場合にも練り水が水道水のととき同じ傾向が成立つことがうかがわれる。

海水中鋼材に流入する電流密度

表 119 より海水中鋼材に流入する電流密度  $I_{SWD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を算出すると表 122 のようになる。表 122 より  $I_{SWD}$  を短絡期間に対して図示すると図 127, 128 のようになる。図 127 は 3 層のうちの 1 層であるセメント硬化体の練り水が水道水の場合、図 128 は練り水が海水の場合である。図 127 からわかるように  $I_{SWD}$  は短絡後次第に減少して大体 1 カ月後には、大体  $3 \sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に落ち着くようである。表 122 に No. a と No. e' に 1, 2 カ所  $I_{SWD}$  の符号が(-)となっているところがある。これは海水中鋼材表面が発錆して電位が卑となったために海水中鋼材が、マクロ腐食電池のアノードとなってカソードのセメント硬化体中鋼材に電流を流出していることを示す。No. a は 55 日後に(-)に一時になっているが、海水中鋼材には後述の観察結果のように発錆が認められ

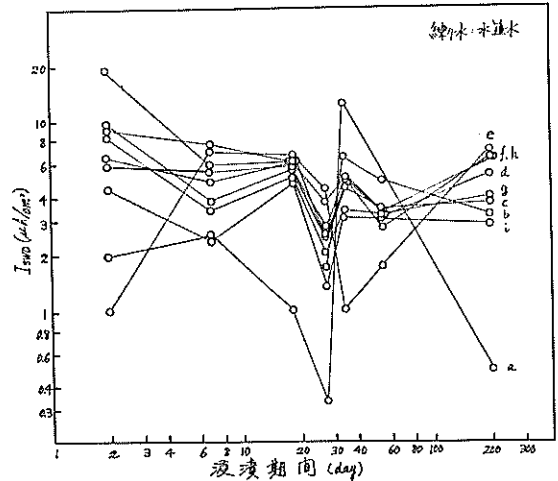


図 127 海水中鋼材に流入する電流密度

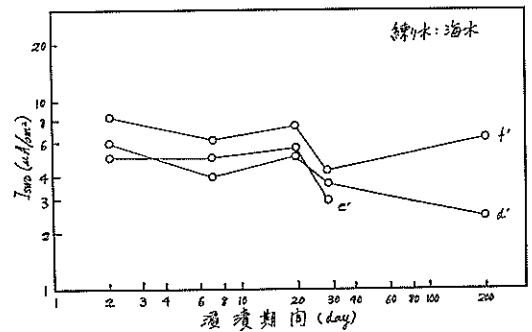


図 128 海水中鋼材に流入する電流密度

表 123  $I_{SWD} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$I_{SWD}$ ( $\mu A/cm^2$ )							
		2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
4	a	1.92	2.42	1.00	0.33			0.08	0.50
2	c	6.33	4.67	6.00	2.50	4.67	3.25	3.25	3.83
1	b, d, e, g, i	9.42	4.65	5.37	2.60	3.67	3.14	4.17	4.52
0.5	f	9.00	7.33	6.00	2.67	4.50	2.67	5.80	6.50
0.25	h	9.33	3.67	5.33	2.50	4.33	3.33	5.83	6.50
1	d', e'	5.50	4.50	5.42	3.35	4.17	2.50	0.30	1.09
0.5	f'	8.33	6.33	7.50	4.33	7.50	5.00	5.83	6.50

る。図128を図127と比較すると  $I_{SWD}$  は3層中のセメント硬化体の練り水には影響されないことが予想できる。次に表122より  $I_{SWD}$  を  $A_{SW}/A_S$  について表わしてみると表 123 のようになる。表123より  $I_{SWD} \sim A_{SW}/A_S$  の関係を図示すると 図 129, 130 のようになる。図 129 はセメント硬化体の練り水が水道水の場合であり図 130 は練り水が海水の場合である。図129によれば  $A_{SW}/A_S > 2$  では  $I_{SWD}$  は  $A_{SW}/A_S$  に対して反比例の関係があるようであるが  $A_{SW}/A_S < 2$  では  $I_{SWD}$  はとくに  $A_{SW}/A_S$  には関係なさそうである。これに対して図 130 によれば  $I_{SWD}$  は  $A_{SW}/A_S$  に反比例する傾向がうかがわれる。

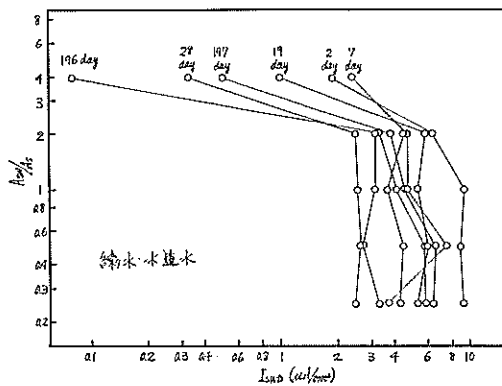


図 129  $I_{SWD} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

砂層中鋼材より流出する電流密度

表119より砂層中鋼材より流出する電流密度  $I_{SD}$  ( $\mu A/cm^2$ )

表 124 砂層中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_S$ ( $cm^2$ )	$I_{SD}$ ( $\mu A/cm^2$ )							
		2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
a	3	9.33	11.00	5.33	4.00	52.0 *	-1.17	0.67	3.17
b	3	12.0	8.00	7.67	3.33	8.00	6.33	4.00	4.00
c	3	14.7	11.67	14.00	6.00	10.00	8.33	6.83	7.67
d	3	20.7	6.67	6.67	4.67	5.67	4.00	5.83	6.00
e	3	7.0	6.67	7.67	6.00	2.67	3.00	7.33	7.50
f	6	5.0	4.33	3.33	1.67	2.34	1.50	3.33	3.50
g	6	9.17	7.17	6.67	3.33	4.17	4.59	3.83	4.33
h	12	2.50	2.17	2.17	1.46	1.50	1.33	1.58	1.75
i	12	4.58	2.50	4.17	1.75	3.82	3.58	2.33	2.96
j	12								
d'	3	7.67	6.33	7.67	8.33	6.67	3.67	1.50	4.17
e'	3	6.67	7.67	8.00	5.33	5.67	4.33	0.17	0.13
f'	6	5.00	4.67	4.58	3.67	6.67	3.50	3.17	3.58
j'	12								

\* 電流測定前に海水中鋼材を脱錆した。

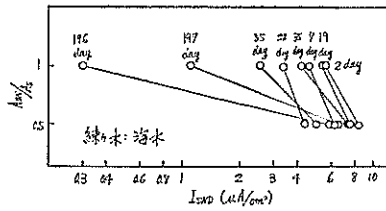


図 130  $I_{SW} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

cm<sup>2</sup>) を算出すると表 124 のようになる。表 124 によれば No. a の 55 日後の  $I_{SD}$  は (-) の符号となっている。これはセメント硬化体中鋼材、海水中鋼材、砂層中鋼材の 3 者間に発生するマクロ腐食電池のアノードは海水中

鋼材、カソードがセメント硬化体中鋼材と砂層中鋼材となつて、表 124 に示す値の電流密度が海水中鋼材より流出することを意味する。また No. a の 35 日後の  $I_{SD}$  は 52  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  とずば抜けて大きくなっているが、これは海水中鋼材表面に発生した錆を測定前に全部けずり落としたために海水中鋼材表面が全部砂層中鋼材に対してカソードとなつたためと考えられる。このとき海水中鋼材表面には白色石灰質被膜は見られなかった。表 124 より  $I_{SD}$  と短絡期間の関係を図示すると図 131, 132 のようになる。図 131 は練水が水道水、図 132 は練水が海水の場合

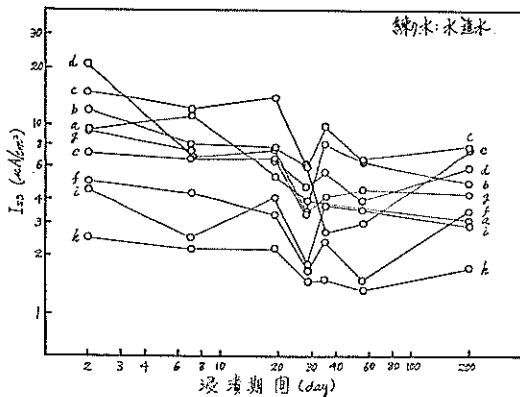


図 131 砂層中鋼材より流出する電流密度

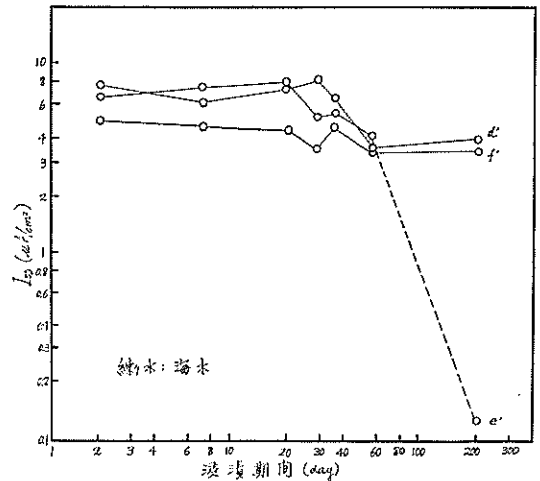


図 132 砂層中鋼材より流出する電流密度

表 125 砂層中鋼材腐食速度

No.	$A_{SW}/A_S$	$C_s$ (mm/yr)							
		2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
a	4	0.108	0.128	0.062	0.047	0.605		0.008	0.037
b	1	0.140	0.093	0.089	0.039	0.093	0.074	0.047	0.047
c	2	0.171	0.136	0.163	0.070	0.119	0.097	0.079	0.089
d	1	0.241	0.078	0.078	0.054	0.066	0.047	0.068	0.070
e	1	0.081	0.078	0.089	0.070	0.031	0.035	0.085	0.087
f	0.5	0.058	0.050	0.039	0.019	0.027	0.017	0.039	0.041
g	1	0.107	0.083	0.078	0.039	0.048	0.053	0.045	0.050
h	0.25	0.029	0.025	0.025	0.017	0.017	0.015	0.018	0.020
i	1	0.053	0.029	0.048	0.020	0.044	0.041	0.027	0.034
j	1								
d'	1	0.089	0.074	0.089	0.097	0.078	0.043	0.017	0.048
e'	1	0.078	0.089	0.093	0.062	0.066	0.050	0.002	0.002
f'	0.5	0.058	0.054	0.053	0.043	0.054	0.041	0.037	0.042
j'	1								

表 126  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$C_S$ (mm/yr)							
		2 day	7 day	19 day	28 day	35 day	55 day	196 day	197 day
4	a	0.108	0.128	0.062	0.047	0.605	—	0.008	0.037
2	c	0.171	0.136	0.163	0.070	0.116	0.097	0.079	0.089
1	b, d, e, g, i	0.124	0.072	0.076	0.044	0.056	0.050	0.054	0.058
0.5	f	0.058	0.050	0.039	0.019	0.027	0.017	0.039	0.041
0.25	h	0.029	0.025	0.025	0.017	0.017	0.015	0.018	0.020
1	a', b'	0.084	0.082	0.091	0.080	0.072	0.047	0.017	0.048
0.5	c'	0.058	0.054	0.053	0.043	0.054	0.041	0.037	0.042

合である。図 131 から  $I_{SD}$  は短絡期間が長くなるにつれて次第に減少する傾向のあることがわかる。

また図 131 の No. d, e, f と図 132 の No. d', e', f' の  $I_{SD}$  を比較するとくに練り水による差はなさそうである。

表 124 より砂層中鋼材の腐食速度  $C_S$  (mm/yr) を算出すると表 125 のようになる。このときの  $C_S$  (mm/yr) は砂層中鋼材全表面が、マクロ腐食によって、均一に侵食される速度である。したがって  $A_{SW}/A_S$  に対する  $C_S$  を纏めてみると表 126 のようになる。表 126 から  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係を図示すると図 133, 134 のようになる。図 133 は 3 層中の 1 層であるセメント硬化体の練り水が水道水の場合であり図 134 は練り水が海水の場合である。図 133 によれば砂層中鋼材の腐食速度  $C_S$  (mm/yr)  $\sim A_{SW}/A_S$  間には、ほぼ一次の関係があるようである。しかし No. a ( $A_{SW}/A_S=4$ ) のみは一次の関係よりはずれている。一方  $A_{SW}/A_S=1$  のときの  $C_S$  はマクロ腐食電池発生後 1 週間位では 0.07~0.1 mm/yr 付近であるが、1 カ月以後は大抵 0.04 mm/yr 付近に落ち着くようである。したがって  $A_{SW}/A_S > 1$  では砂層中鋼材の腐食による肉厚減量は大きくなるが  $A_{SW}/A_S < 1$  では反対に次第に小さくなって行く。このようなマクロ腐食の傾向は自然環境におけるマクロ腐食<sup>1)</sup>や実験 19 の傾向と同様で  $A_{SW}/A_S$  が 1 付近もしくは 1 以下のところでは  $C_S$  は  $A_{SW}/A_S$  に比例するが、 $A_{SW}/A_S$  が 1 より大きくなるにつれて両者間に比例関係はなくなる。

次に図 134 の  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の傾向を図 133 の傾向と比較すると  $A_{SW}/A_S < 1$  ではとくに練り水の差はなさそうである。

### (3) 抵抗

抵抗の測定結果を表 127 に示す。表 127 より  $R_M, R_{M-SW}, R_{SW-S}$  の変化率を 0 日および 35 日の値を 100% として算出すると表 128 のようになる。表 128 より  $R_M$  (%)

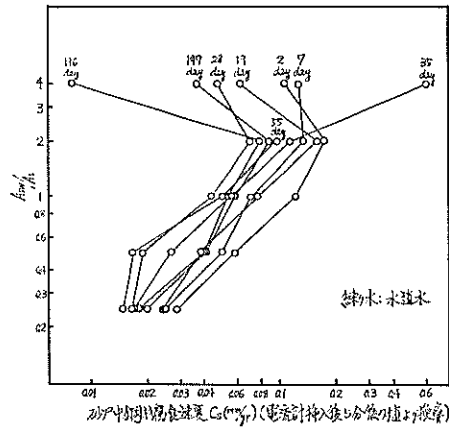


図 133  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

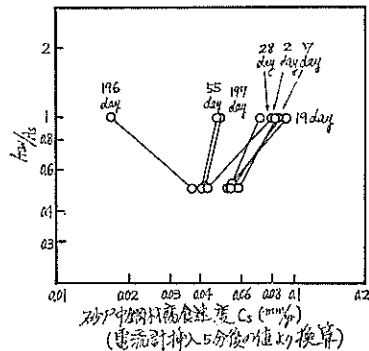


図 134  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

を  $A_M/A_S$  について纏めてみると表 129 のようになる。

次に表 128 より  $R_{M-SW}$  (%)  $\sim A_M/A_{SW}$  の関係を示すと表 130 のようになる。

さらに表 128 より  $R_{SW-S} \sim A_{SW}/A_S$  の関係を表にすると表 131 のようになる。

次に表 127 より以下のように  $R_M^0$  (セメント硬化体中

表 127 抵 抗 測 定 結 果 ( $\Omega$ )

No.	0 day			35 day			232 day					
	$R_M$	$R_{M-SW}$	$R_{SW-S}$	$R_M$	$R_{M-SW}$	$R_{SW-S}$	$R_M$	$R_{SW}$	$R_S$	$R_{M-SW}$	$R_{SW-S}$	$R_{M-S}$
a	24.8	24.5	29.0	132	130	24.2	208	16.0	25.2	206	28.2	218
b	24.6	28.0	43.4	128	128	29.2	232	184	29.6	278	124	240
c	36.6	35.0	23.8	170	174	23.8	270	29.8	24.0	290	46.2	308
d	38.0	40.0	25.0	230	200	27.8	300	34.4	20.0	338	48.0	318
e	55.0	55.0	30.0	204	345	84.0	472	2.50	27.0	480	42.5	522
f	56.2	58.0	24.4	254	260	23.0	392	92.0	19.4	488	108	404
g	54.4	53.0	19.0	254	260	18.0	434	23.0	17.8	476	28.4	458
h	30.0	32.0	11.0	196	190	17.4	280	84.0	15.6	344	86.0	276
i	53.0	51.6	18.2	250	242	16.0	400	17.6	16.6	372	22.0	390
j	28.4	27.6	17.8	140	—	—	270	16.0	14.6	230	21.0	238
d'	56.6	58.4	31.0	250	250	30.6	416	58.0	27.8	432	62.0	420
e'	42.0	43.8	29.8	274	278	27.0	360	90.0	24.0	390	98.0	374
f'	40.0	39.0	23.6	260	250	22.0	290	20.8	20.5	322	28.4	304
j'	21.0	20.0	16.2	140	—	—	184	16.0	17.8	190	19.8	182

表 128 抵 抗 變 化 率

No.	$A_M/A_S$	$A_M/A_{SW}$	$A_{SW}/A_S$	$R_M$ (%)						$R_{M-SW}$ (%)						$R_{SW-S}$ (%)					
				(1)			(2)			(1)			(2)			(1)			(2)		
				0 day	35day	232day	35day	232day	0 day	35day	232day	35day	232day	0 day	35day	232day	35day	232day			
				a	4	1	4	100	532	839	100	158	100	531	840	100	158	100	83	97	100
b	4	4	1	100	520	943	100	181	100	457	993	100	217	100	67	286	100	425			
c	2	1	2	100	464	738	100	189	100	497	829	100	167	100	100	194	100	194			
d	2	2	1	100	605	789	100	130	100	500	845	100	169	100	111	192	100	173			
e	1	1	1	100	371	858	100	231	100	627	873	100	139	100	280	142	100	51			
f	0.5	1	0.5	100	452	698	100	154	100	448	841	100	188	100	94	443	100	470			
g	0.5	0.5	1	100	467	798	100	171	100	491	898	100	183	100	95	149	100	158			
h	0.25	1	0.25	100	653	933	100	143	100	594	1075	100	181	100	158	782	100	494			
i	0.25	0.25	1	100	472	755	100	160	100	469	721	100	154	100	88	121	100	138			
j	1	1	1	100	493	951	100	193	100		833	100		100		118	100				
d'	2	2	1	100	442	735	100	166	100	428	740	100	173	100	99	200	100	203			
e'	1	1	1	100	652	857	100	131	100	635	890	100	140	100	91	329	100	363			
f'	0.5	1	0.5	100	650	735	100	112	100	641	826	100	129	100	93	120	100	129			
j'	1	1	1	100	667	876	100	131	100		950	100		100		122	100				

表 129  $R_M \sim A_M/A_S$  の関係

$A_M/A_S$	No.	$R_M$ (%)			$R_M$ (%)	
		0 day	35 day	232day	35 day	232day
4	a, b	100	526	891	100	170
2	c, d	100	535	764	100	145
1	e	100	371	858	100	231
0.5	f, g	100	460	748	100	163
0.25	h, i	100	563	844	100	152
1	j	100	493	951	100	193
2	d'	100	442	735	100	166
1	e'	100	652	857	100	131
0.5	f'	100	650	725	100	112
1	j'	100	667	876	100	131

表 130  $R_{M-SW} \sim A_M/A_{SW}$  の関係

$A_M/A_{SW}$	No.	$R_{M-SW}$ (%)			$R_{M-SW}$ (%)	
		0 day	35 day	232day	35 day	232day
4	b	100	457	993	100	217
2	d	100	500	845	100	169
1	a, c, e	100	539	892	100	166
0.5	f, h	100	491	898	100	183
0.25	i	100	469	721	100	154
1	j	100		833	100	
2	d'	100	428	740	100	173
1	e', f'	100	638	858	100	135
1	j'	100		950	100	

表 131  $R_{SW-S} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$R_{SW-S}$ (%)			$R_{SW-S}$ (%)	
		0 day	35 day	232day	35 day	232day
4	a	100	83	97	100	117
2	c	100	100	194	100	173
1	b, d, e	100	128	178	100	189
0.5	g, i	100	94	443	100	470
0.25	h	100	158	782	100	494
1	j	100		118		
1	d', e'	100	95	270	100	283
0.5	f'	100	93	120	100	129
1	j'	100		122		

表 131'  $R_M^0, R_{SW}^0, R_S^0$

No.	232 day		
	$R_M^0$ ( $\Omega$ )	$R_{SW}^0$ ( $\Omega$ )	$R_S^0$ ( $\Omega$ )
a	198	8	20
b	197	81	43
c	276	14	32
d	304	34	14
e	480	1	43
f	392	96	12
g	453	23	5
h	267	77	9
i	370	2	20
j	224	7	15
d'	395	37	25
e'	333	57	41
f'	299	23	5
j'	176	14	6

鋼材の抵抗,  $\Omega$ ,  $R_{SW}^0$  (海水中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_S^0$  (砂層中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ) を算出すると表 131' のようになる。

$$R_M^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{M-S}) - (R_{SW-S})}{2}$$

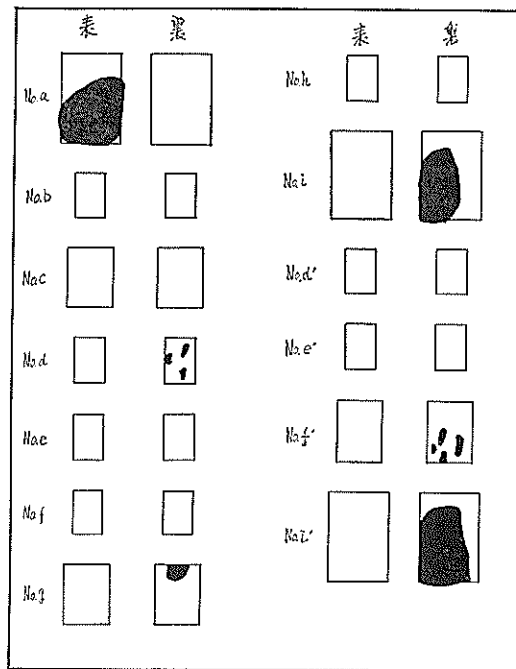


図 135 海水中鋼材の発錆状況 (232 day)



$$R_{SM}^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{SW-S}) - (R_{M-S})}{2}$$

$$R_S^0 = \frac{(R_{SW-S}) + (R_{M-S}) - (R_{M-SW})}{2}$$

表131'より  $R_M^0$  を見てみると練り水が水道水、海水どちらの場合でも流入電流によって抵抗が増加される傾向のあることがわかる。

#### (4) 供試体表面の観察

肉眼による観察によればセメント硬化体表面には劣化現象(キレツ、発錆)は全く見られない。海水中鋼材には図135に示すように発錆した。一方砂層中鋼材は図77と同様の表面状況であった。

### 実験21 鋼材がセメント硬化体、海水(静止)、泥層(海水飽和)の3層に接するときの腐食傾向

#### 供試体

供試体の内容を表132に示す。表132からわかるようにセメント硬化体の練り水は水道水のみであるが、供試体の作成要領は全く実験19の作成要領と同じである。また表面積比、回路状態も実験No. a~No. jのと同じである。No. a~No. jの各組の供試体を次の要領で浸漬した。

すなわち、まずφ30cm×h20cmのガラス水槽に海水を注いでからこの中に砂を投入して砂層の厚さを水槽の

半分とする。したがってこのときガラス容器内には下半分(約10cm)に海水飽和の砂層、上半分(約10cm)に海水が存在することになる。No. a~No. jの  $A_S$  の面積をもつ鋼材片を砂層の中央深度付近に埋設し、その砂層面上付近に  $A_M$  の面積をもつ鋼材片をセメント硬化体ごと設置する。最後にその付近の海水中央深度のところ  $A_{SW}$  の面積をもつ鋼材片を吊してから3層(セメント硬化体:海水に浸漬、静止海水、砂層:海水飽和)中鋼材から出ている各電線をNo. a~No. iについては短絡する。ただしNo. jのみは開路のままにしておく。このように供試体を設置したらガラス容器を静置して海水を静止状態に保つ。

#### 測定

測定項目は電位、電流、抵抗の測定および供試体表面の観察である。

#### (1) 電位

電位には  $E_0$  (3層中鋼材を短絡したときの電位)、 $E_M$  (短絡前または短絡後開路としたときのセメント硬化体中鋼材電位)、 $E_{SW}$  (短絡前または短絡後開路としたときの海水鋼材の電位)、 $E_S$  (短絡前または短絡後開路としたときの海水飽和砂層中鋼材の電位)の4つがある。

$E_0, E_M, E_{SW}, E_S$  はいずれも海水塩化銀電極に対する値として電位計(Dual Meter)で測定された。また  $E_M$

表132 実験21の供試体

No.	鋼材									モルタル			練り水	回路
	表面積 (cm <sup>2</sup> )			表面積比			重量 (g)			配合				
	$A_S$	$A_{SW}$	$A_M$	$A_S : A_{SW} : A_M$			$W_S$	$W_{SW}$	$W_M$	$W$ (g)	$C$ (g)	$S$ (g)		
a	3	12	12	1	4	4	1.0760	4.4627	4.4894	338	520	1,040	水道水	短絡
b	3	3	12	1	1	4	1.0290	1.1036	4.5224	338	520	1,040	水道水	短絡
c	3	6	6	1	2	2	1.0370	2.3260	2.3996	338	520	1,040	水道水	短絡
d	3	3	6	1	1	2	1.0785	1.0825	2.1846	338	520	1,040	水道水	短絡
e	3	3	3	1	1	1	1.0950	1.0748	1.0785	338	520	1,040	水道水	短絡
f	6	3	3	2	1	1	2.3360	1.0312	1.0980	338	520	1,040	水道水	短絡
g	6	6	3	2	2	1	2.3254	2.3341	1.0360	338	520	1,040	水道水	短絡
h	12	3	3	4	1	1	4.5322	1.0514	1.0889	338	520	1,040	水道水	短絡
i	12	12	3	4	4	1	4.4656	4.4662	1.0450	338	520	1,040	水道水	短絡
j				1	1	1	1.0638	1.0916	1.0420	338	520	1,040	水道水	開路

鋼材の形状寸法(厚み 0.1 cm)  
 3 cm<sup>2</sup> = 1 cm × 1.5 cm × 2  
 6 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 1.5 cm × 2  
 12 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 3 cm × 2

$A_S$ : 砂層中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $A_{SW}$ : 海水静止中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

$A_M$ : セメント硬化体中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $W_S$ : 砂層中鋼材の重量 (g)  
 $A_{SW}$ : 海水静止中鋼材の重量 (g)  
 $W_M$ : セメント硬化体中鋼材の重量 (g)  
 $W$ : 練り水の重量 (g)  
 $C$ : セメントの重量 (g)  
 $S$ : 砂の重量 (g)

$E_{SW}$ ,  $E_S$  の開路後の電位変化も No. a~No. i について測定されたが No. j' は開路電位  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  のみである。単位は -mV である。

## (2) 電 流

電流には  $I_M$  (セメント硬化体中鋼材に流入する電流),  $I_{SW}$  (海水中鋼材に流入する電流),  $I_S$  (砂層中鋼材より流出する電流) の3つがある。電流は図79に示す要領で No. a~No. i について測定された。また  $I_M$ ,  $I_{SW}$ ,  $I_S$  をそれぞれの表面積  $A_M$ ,  $A_{SW}$ ,  $A_S$  で割って電流密度  $I_{MD}$ ,  $I_{SWD}$ ,  $I_{SD}$  を算出した。さらに  $I_{SD}$  を砂層中鋼材の腐食速度  $C_S$  に換算したが  $C_S$  は砂層中鋼材全表面からの侵食度である。

$I_M$ , $I_{SW}$ , $I_S$	$\mu A$
$I_{MD}$ , $I_{SWD}$ , $I_{SD}$	$\mu A/cm^2$
$C_S$	mm/yr

## (3) 抵 抗

抵抗には  $R_M$  (セメント硬化体中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_{SW}$  (海水中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_S$  (砂層中鋼材と標準鉄電極間の抵抗),  $R_{M-SW}$  (セメント硬化体中鋼材と海水中鋼材間の抵抗),  $R_{SM-S}$  (海水中鋼材と砂層中鋼材間の抵抗),  $R_{M-S}$  (セメント硬化体と砂層中鋼材間の抵抗) の6つがある。 $R_M$ ,  $R_{SW}$ ,  $R_S$ ,  $R_{M-SW}$ ,  $R_{SM-S}$ ,  $R_{M-S}$  はいずれも分極をおこさないように A. C.ブリッジ (1,000 c/s) で測定された。使用した計測器は港研式腐食計<sup>1)</sup>の抵抗測定部である。また抵抗値そのままでは鋼材の寸法がそれぞれ異なるために直接比較することはむづかしい。したがって基準とする抵抗値に対する百分率(%)を算出した。抵抗の単位は  $\Omega$ , 抵抗変化率の単位は%である。

## (4) 供試体表面の観察

供試体の劣化状況を肉眼で観察した。

## 測定結果および考察

### (1) 電 位

電位の測定結果を表133に示す。表133によれば短絡前の  $E_M$  は -250~-300 mV であり (No. i のみは -390 mV となっているが) いずれも -400 mV より貴な電位である。これに対して  $E_{SW}$  は -600 mV 付近,  $E_S$  は -700 mV 付近となり結局短絡前の電位は  $E_M > E_{SW} > E_S$  の順序で貴となる。この関係を図示すると図136のようになり3層中鋼材間にマクロ腐食電池の発生することが十分考えられる。したがって3層中鋼材を短絡してみると短絡期間が1カ月程度では  $E_0$  は -700~-750 mV 付近でありセメント硬化体中鋼材と海水(静止)中鋼材がカソード, 砂層中鋼材がアノードとなる。この状況を図137に示す。短絡期間がさらに長くなり8カ月後には  $E_0$

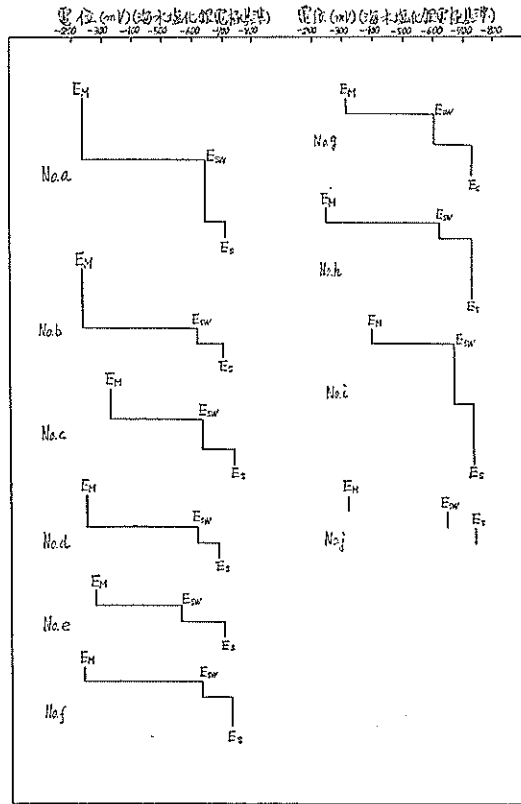


図136 開路電位 (0 day)

は -650 mV 程度となり短絡期間が短いときにくらべて 50~100 mV 程貴となる。しかし  $E_M$  はいぜんとして  $E_{SW}$ ,  $E_S$  より貴であるためマクロ腐食電池のカソードとなっている。この状況を図138に示す。表133に示す開路後の電位  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は開路後10分~30分の値であるが短絡期間が242日の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  のみは開路後280分のときの値である。No. a~No. i の  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の開路後の変化状況を測定してみると表134, 135のようになる。表134, 135から  $E_M$ ,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  の変化模様を図示すると図139~図147のようになる。図139~147からわかるように  $E_M$  は短絡期間の長短にかかわらず開路後貴の電位の方に次第に移って行くが,  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は短絡期間が長くなると多少貴の値となる傾向がある, たとえば8カ月以後では1カ月後のときより  $E_S$ ,  $E_{SW}$  は 50~100 mV 貴となっている。このときの海水の pH は 10程度である。このように  $E_{SW}$  が  $E_S$  に接近する傾向は実験19, 20のときと異なっている。この原因としては実験21の供試体浸漬液である海水(静止)の入れ替えが行なわれず単に蒸発水分の補充をすることでめだためセメント硬化体中の遊離石灰の溶出によって海水が強アルカリ性となっ

表 133 電位測定結果 (-mV)

No.	0 day			10 day			16 day				24 day			
	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	710	642	238	740	730	662	728	760	726	580	715	775	690	584
b	700	616	238	754	706	724	709	730	685	673	720	747	697	688
c	702	632	330	734	730	790	727	758	715	670	727	740	725	611
d	682	614	250	730	712	582	720	720	719	533	719	750	713	555
e	708	562	280	752	540	726	723	733	545	705	735	752	583	690
f	725	630	244	764	510	725	735	762	615	700	755	777	693	580
g	725	600	310	734	550	718	772	749	590	711	743	768	657	725
h	722	616	240	762	545	530	760	770	625	540	740	790	678	687
i	728	664	394	742	744	690	732	760	720	690	713	770	690	642
j	734	640	312	774	722	475		780	725	390		800	733	262

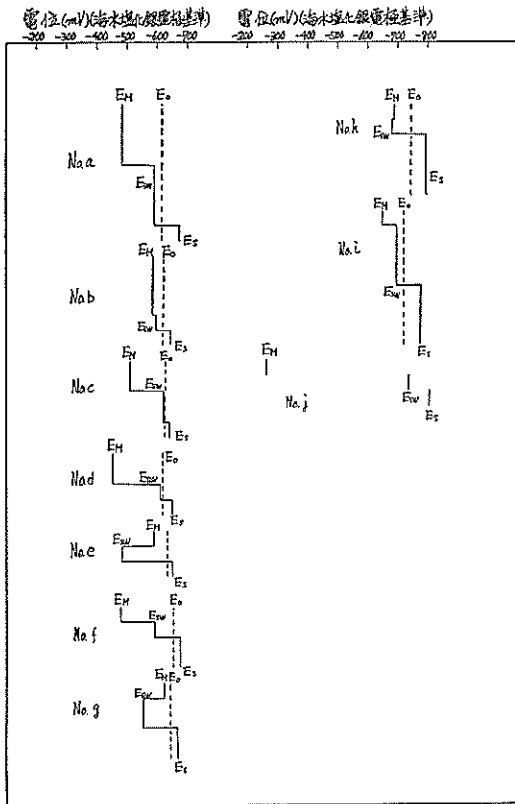


図 137 短絡電位と開路電位の関係 (24 day)

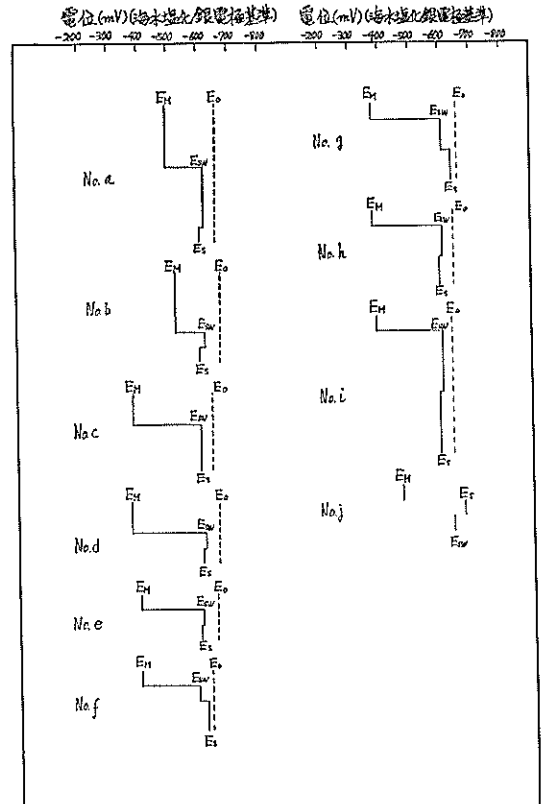


図 138 短絡電位と開路電位の関係 (242 day)  
( $E_0$  は計測器不調のためか  $E_S$  よりさらに卑となっている)

(海水塩化銀電極基準)

33 dag				42 dag				242 dag				No.
$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	
755	740	719	587	730	745	728	622	660	605	620	495	a
751	759	681	740	708	732	685	700	670	605	625	525	b
702	768	698	698	728	745	721	612	640	605	605	380	c
703	731	715	560	680	739	700	550	660	610	620	375	d
755	772	650	730	720	739	600	610	650	605	610	400	e
752	748	687	572	728	770	668	550	630	620	590	400	f
767	795	658	698	742	768	647	621	660	640	610	380	g
745	768	650	652	760	779	620	600	645	600	610	380	h
752	738	732	698	730	753	707	615	640	600	610	390	i
	821	733	250		788	720	508		640	675	470	j

表 134 開路後の電位変化 (短絡期間 10 day)  
(-mV) (海水塩化銀電極基準)

No.	5 min			10 min			20 min			30 min
	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_M$
a	760	714	710	732	700	670	740	730	662	632
b	750	700	714	762	684	708	754	706	724	724
c	750	732	772	750	712	810	734	730	790	780
d	732	732	660	724	740	626	730	712	582	564
e	762	596	720	758	574	730	752	540	726	709
f	760	584	722	764	530	710	764	510	725	732
g	748	630	731	720	581	730	734	550	718	710
h	770	664	648	750	600	570	762	545	530	500
i	742	714	700	764	724	692	742	744	690	660
j	762	740	480	754	714	474	774	722	475	468

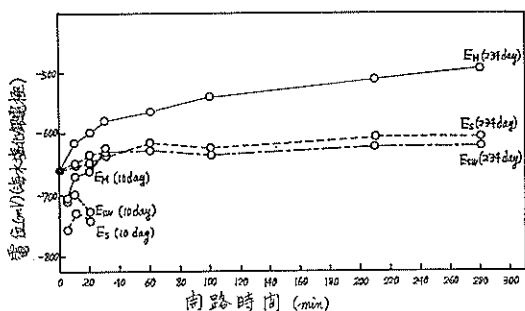


図 139 開路後の電位変化 (No. a)

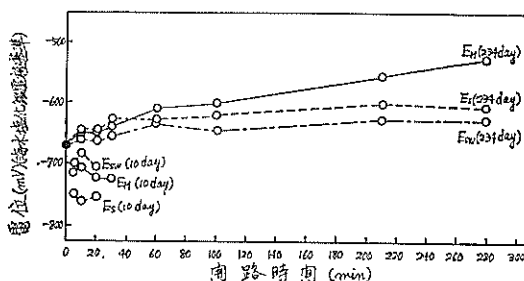


図 140 開路後の電位変化 (No. b)

表 135 開路後の電位変化 (短絡期間 234 dag)

No.	$E_0$	1 min			5 min			10 min			15 min			20 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	660	640	630	650	640	640	620	650	560	615	650	640	600	650	640	600
b	670	650	655	660	640	655	650	650	660	650	650	655	640	650	660	645
c	640	635	630	640	635	625	605	645	635	580	650	630	550	650	635	540
d	660	645	650	640	640	645	600	655	650	570	655	650	540	650	650	525
e	650	640	640	640	635	640	595	650	645	570	650	640	550	650	640	540
f	630	635	620	625	635	615	600	650	620	585	655	620	570	655	620	560
g	660	655	640	625	650	640	560	660	645	515	670	640	485	670	640	480
h	645	635	640	630	630	635	595	640	645	555	640	640	530	645	645	515
i	640	640	535	630	630	635	590	650	640	550	650	640	520	645	635	510

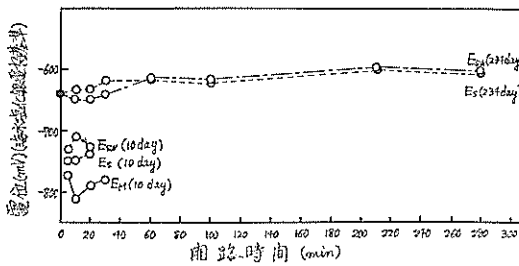


図 141 開路後の電位変化 (No. c)

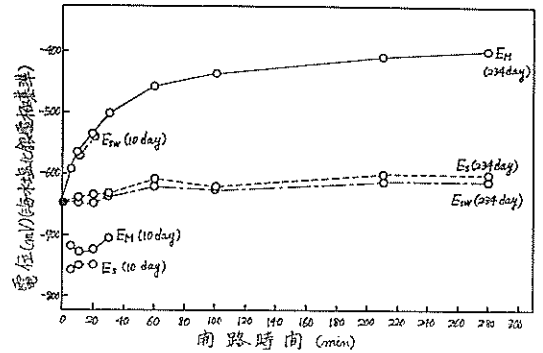


図 143 開路後の電位変化 (No. e)

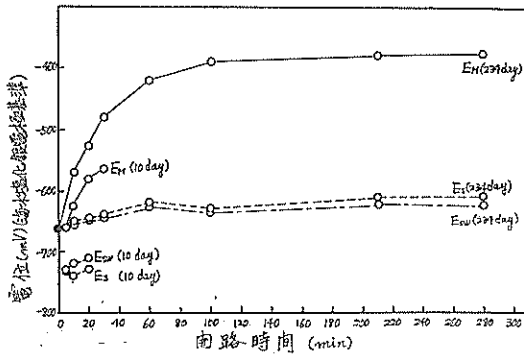


図 142 開路後の電位変化 (No. d)

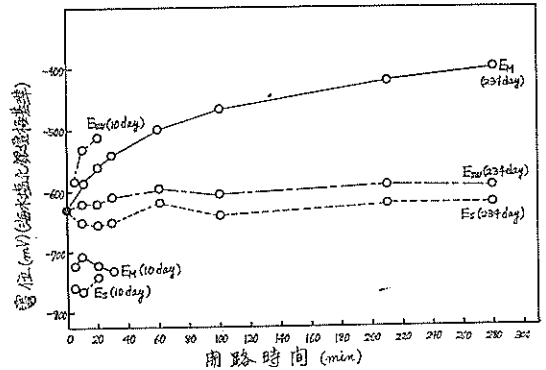


図 144 開路後の電位変化 (No. f)

たことに起因するのではないかと考えられる。一方 No. j の  $E_M$  は最初  $-200$  mV 台であったのが 1 カ月以後では  $-450 \sim -500$  mV 付近になっている。このような電位の低下から何らかの理由によりセメント硬化体中鋼材の発錆に有利な条件が発生したことが予想できる。また No.

j の  $E_{SW}$ ,  $E_S$  は  $-700 \sim -800$  mV と卑であったのが、やはりアルカリ性化のために多少貴となっている。また 241 日では  $E_{SW} < E_S$  となった例がある。

(-mV) (海水塩化銀電極基準)

30 min			60 min			100 min			210 min			280 min			No.
$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	
640	635	580	615	625	565	630	635	540	605	620	510	605	620	495	a
640	650	630	610	635	620	620	645	600	600	625	455	605	625	525	b
640	620	500	615	615	440	625	620	415	605	600	400	605	605	380	c
645	640	485	620	625	420	630	635	390	610	620	380	610	620	375	d
640	635	505	610	620	460	630	630	440	605	610	410	605	610	400	e
650	610	540	620	595	500	640	605	465	620	590	420	620	590	400	f
665	635	445	640	620	420	655	625	410	650	610	390	640	610	380	g
630	635	480	605	615	425	615	625	415	600	610	385	600	610	380	h
635	630	475	605	610	425	620	625	415	600	610	400	600	610	390	i

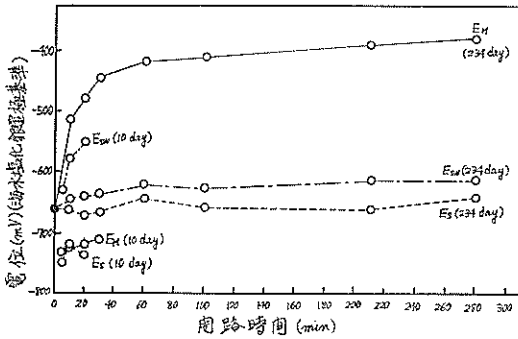


図 145 開路後の電位変化 (No. g)

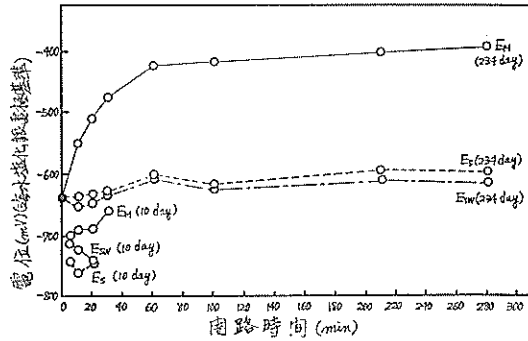


図 147 開路後の電位変化 (No. i)

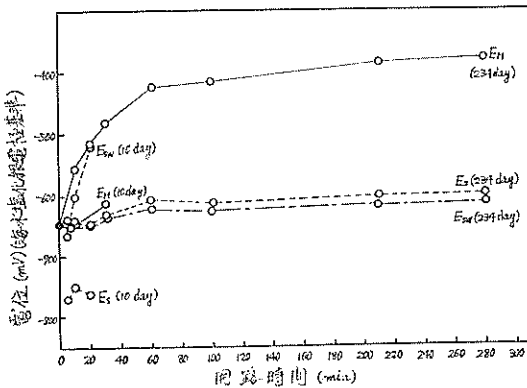


図 146 開路後の電位変化 (No. h)

(2) 電 流

電流の測定結果を表 136 に示す。表 136 に示す  $I_M$ ,  $I_{SW}$  の (+) 符号は流入, (-) 符号は流出を表わすが反対に  $I_S$  の (+) 符号は流出, (-) 符号は流入を意味する。表 136 からわかるように短絡期間が長くなるととくに  $I_S$ ,  $I_{SW}$

が減少するようであるが以下のように電流密度として個々に検討してみる。

セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 136 よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度  $I_{MD}$  ( $\mu A/cm^2$ ) を算出してみると表 137 のようになる。表 137 より  $I_{MD}$  を短絡期間に対して図示すると図 148 のようになる。図 148 よりわかるように大体安定電流になっていたものがある場合には 8 カ月以降でかなり減少している。次に表 137 より  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の経日変化を表示すると表 138 のようになる。表 138 の関係を図示すると図 149 のようになる。図 149 によれば  $A_M/A_S > 1$  では  $I_{MD} \propto k(A_M/A_S)^{-1}$  の関係があるが  $A_M/A_S \leq 1$  では  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S = 1$  のときの値に一定となる傾向のあることがわかる。また  $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は  $0.2 \sim 0.3 \mu A/cm^2$  付近に落ち着くようである。いま図 149 に  $0.45 \mu A/cm^2$  (塩化物が存在するときのセメント硬化体中鋼材の防食に必要といわれる電気防食電流密度) を 1 つの基準値として適用してみると、全体的に  $I_{MD}$  は  $0.45 \mu A/cm^2$  より多少小さいが  $A_M/A_S \leq 1$  のときはほぼ防食電

表 136 電 流 測 定 値 ( $\mu\text{A}$ )

No.	10 day			17 day			24 day			33 day			42 day			213day	241 day		
	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$	$I_S$	$I_M$	$I_{SW}$	$I_S$
a	1	17	18	2	4	6	1.5	9.5	11	1	9	10	1	6	7	2	0.2	-0.1	0.2
b	1	26	27	1	13	14		11	11		11	11	1	11.5	12.5	2	0.1	-0.5	-0.4
c		12	12	1	9	10	0.5	6.5	7		6	6	2	6	8		0.4	1.1	1.3
d	1	6	7	4	4	8	2	6	8	1	5	6	2.5	11.5	14	2	0.5	0.1	0.6
e		5	5	1.5	3.5	5		5	5		4	4	1	5	6	1	0.7	-0.55	0.2
f	1	14	15	1	8.5	9.5		8	8	1	6.5	7.5	2.5	7.5	10	3	0.25	4.9	4.9
g	1	15	16	1	11	12		14	14		10	10	1*	19	20*	1	1	2.0	2.1
h	2	4	6	2	1.5	3.5		1.5	1.5	1	4	5	1	4.5	5.5	1	0.1	-0.4	-0.4
i		17	17	1	19	20		30	30		33	33	1	26	27	0.5	0.1	0	0.1

\* 砂層中鋼材が海水中に出ていたのて再び砂層中に押込んで電流を測定した。

表 137 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )						
			10 day	17 day	24 day	33 day	42 day	213 day	241 day
a	12	4	0.08	0.17	0.13	0.08	0.08	0.17	0.02
b	12	4	0.08	0.08			0.08	0.17	0.01
c	6	2		0.17	0.08		0.33		0.07
d	6	2	0.17	0.67	0.33	0.17	0.42	0.33	0.17
e	3	1		0.50			0.33	0.33	0.40
f	3	0.5	0.33	0.33		0.33	0.83	1.00	0.08
g	3	0.5	0.33	0.33			0.33	0.33	0.33
h	3	0.25	0.25	0.67		0.33	0.33	0.33	0.03
i	3	0.25	0.25	0.33			0.33	0.17	0.03

表 138  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の経日変化

$A_M/A_S$	No.	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )						
		10 day	17 day	24 day	33 day	42 day	213 day	241 day
4	a, b	0.08	0.13	0.13	0.08	0.08	0.17	0.03
2	c, d	0.17	0.42	0.21	0.17	0.38	0.33	0.12
1	e		0.50			0.33	0.33	0.23
0.5	f, g	0.33	0.33		0.33	0.58	0.67	0.21
0.25	h, i	0.67	0.50		0.33	0.33	0.25	0.03

流密度に相当すると見なせば(上述の開路後の  $E_M$  の値がいぜんとして貴であることや、また電気防食所要電流密度は長期的には  $1/2 \sim 1/3$  となることからそう考えてもよさそうである)  $A_M/A_S > 1$  とくに  $A_M/A_S \gg 1$  のときは  $I_{MD} \ll 0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となってセメント硬化体単層中の鋼材と同じ腐食条件に近づく。したがってセメント硬化体

単層のときと同じような腐食に対する注意が必要となる。(図149の縦点線は  $0.45 \times 1/2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の値を表わす)。

海水中鋼材に海入する電流密度

表136より海水中鋼材に流入する電流密度  $I_{SMD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を算出すると表139のようになる。表139よりわかるように短絡期間が長期になると  $I_{SWD}$  の符号は(+)

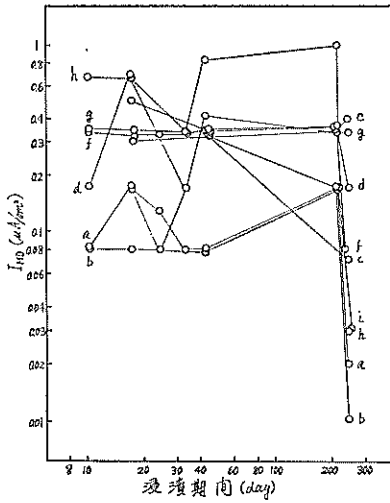


図 148 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

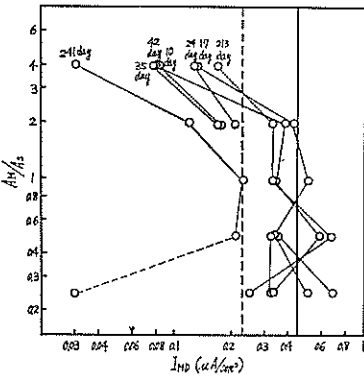


図 149  $I_{sw} \sim A_{sw}/A_s$  の経日変化

の場合もあり(一)の場合もある。また電流密度そのものも全般的に非常に小さくなっている。このような傾向は表133に示す  $E_s, E_{sw}$  が長期的には接近することから予想できる。表139から  $I_{swD}$  を短絡期間に対して図示すると図150のようになる。短絡期間が241日ときの  $I_{swD}$  は(+)符号すなわち流入値 (No. c, d, f, g) のみを示した。表139より  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の関係を示すと表140のようになる。表140より  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の関係を図示すると図151のようになる。図151を参照すると42日までくらは  $I_{swD}$  は  $A_{sw}/A_s$  に反比例の傾向があるよううかがえるが、241日のように長期間後では  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  間にはとくに関係はなさそうである。

表 139 海水中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_{sw}$ ( $cm^2$ )	$A_{sw}/A_s$	$I_{swD}$ ( $\mu A/cm^2$ )					
			10day	17day	24day	33day	42day	241day
a	12	4	1.42	0.33	0.79	0.75	0.50	-0.008
b	3	1	8.67	4.33	3.67	3.67	3.83	-0.17
c	6	2	2.00	1.50	1.09	1.00	1.00	0.18
d	3	1	2.00	1.33	2.00	1.67	3.83	0.03
e	3	1	1.67	1.17	1.67	1.33	1.67	-0.18
f	3	0.5	4.67	2.83	2.67	2.17	2.50	1.65
g	6	1	2.50	1.83	2.23	1.67	3.17	0.33
h	3	0.25	1.33	0.50	0.50	1.33	1.50	-0.13
i	12	1	1.42	1.58	2.50	2.75	2.16	0

表 140  $I_{swD} \sim A_{sw}/A_s$  の経日変化

$A_{sw}/A_s$	No.	$I_{swD}$ ( $\mu A/cm^2$ )					
		10 day	17 day	24 day	33 day	42 day	241day
4	a	1.42	0.33	0.79	0.75	0.50	-0.008
2	c	2.00	1.50	1.09	1.00	1.00	0.18
1	b, d, e	3.25	2.05	2.43	2.22	2.93	0.002
0.5	f	4.67	2.83	2.67	2.17	2.50	1.65
0.25	h	1.33	0.50	0.50	1.33	1.50	-0.13

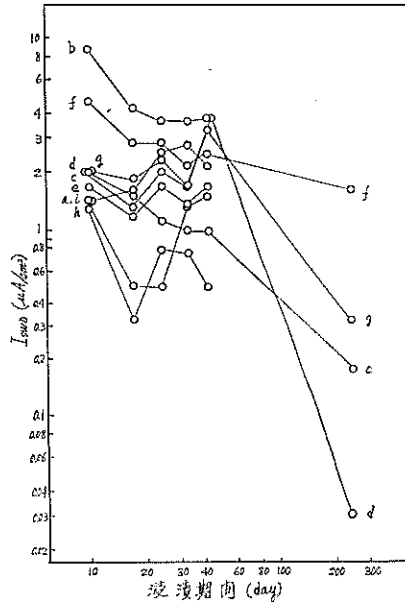


図 150 海水中鋼材に流入する電流密度



砂層中鋼材より流出する電流密度

表 136 より砂層中鋼材より流出する電流密度  $I_{SD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を算出すると表 141 のようになる。表 141 より  $I_{SD}$  と短絡期間との関係を図示すると 図 152 のようになる。ただし短絡期間が 241 日のときの No. b, h の  $I_{SD}$  は符号が (-), すなわち海水中鋼材よりの流入値であるため図示していない。図 152 によれば短絡期間が 241 日の  $I_{SD}$  は短絡期間が 1 カ月程度の  $I_{SD}$  にくらべるとかなり小さくなっている。また表 141 よりわかるように No. b, h では  $I_{SD}$  は流入電流密度に変わっている。このような傾向は表 133 に示す  $E_S, E_{SW}$  よりうかがわれる。次に表 141 より  $I_{SD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) (ただし (+) 符号のみ) を平均腐食速度  $C_S$  (mm/yr) に換算すると表 142 のようになる。表 142 より  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係を表示すると表 143 のようになる。表 143 から  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係を図示すると 図 153 のようになる。図

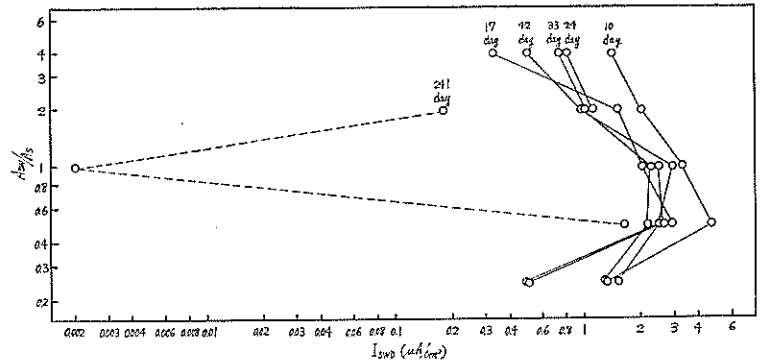


図 151  $I_{SW} \sim A_{SW}/A_S$  の関係

表 141 砂層中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_S$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_{SW}/A_S$	$I_{SD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )					
			10day	17day	24day	33day	42day	241day
a	3	4	6.00	2.00	3.67	3.33	2.33	0.07
b	3	1	9.00	4.67	3.67	3.67	4.17	-0.13
c	3	2	4.00	3.33	2.33	2.00	2.67	0.43
d	3	1	2.33	2.67	2.67	2.00	4.67	0.20
e	3	1	1.67	1.67	1.67	1.33	2.00	0.07
f	6	0.5	2.50	1.58	1.33	1.25	1.67	0.81
g	6	1	2.67	2.00	2.33	1.67	2.23	0.35
h	12	0.25	0.50	0.29	0.13	0.42	0.46	-0.03
i	12	1	0.14	0.17	0.25	2.75	2.25	0.01

表 142 砂層中鋼材のマクロ腐食速度

No.	$A_{SW}/A_S$	$C_S$ (mm/yr)					
		10 day	17 day	24 day	33 day	42 day	241day
a	4	0.07	0.023	0.043	0.039	0.027	0.001
b	1	0.10	0.054	0.043	0.043	0.048	
c	2	0.047	0.039	0.027	0.023	0.031	0.005
d	1	0.027	0.048	0.048	0.023	0.054	0.002
e	1	0.019	0.019	0.019	0.015	0.023	0.01
f	0.5	0.029	0.018	0.015	0.015	0.019	0.004
g	1	0.048	0.023	0.027	0.019	0.039	
h	0.25	0.006	0.003	0.002	0.005	0.005	
i	1	0.002	0.002	0.003	0.032	0.026	

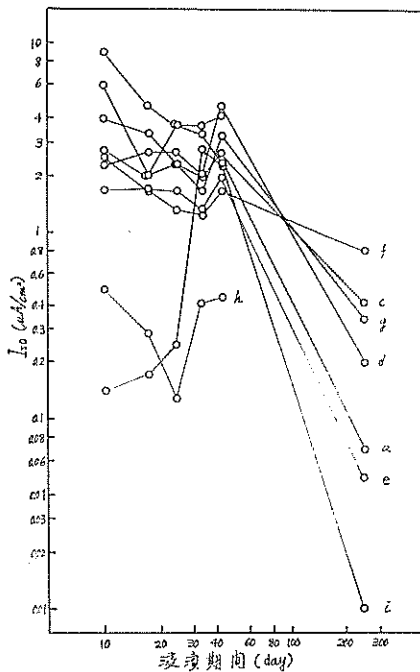


図 152 砂層中鋼材より流出する電流密度

153 によれば短絡期間が短い場合にはほぼ  $C_S \propto k(A_{SW}/A_S)$  の関係があるように見えるが ( $A_{SW}/A_S > 1$  では多少一次の関係からはずれるようであるが) 短絡期間が長期間になると  $C_S$  と  $A_{SW}/A_S$  との間にはとくに関係はなさそうである。

表 143  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

$A_{SW}/A_S$	No.	$C_S$ (mm/yr)					
		10day	17day	24day	33day	42day	241day
4	a	0.07	0.023	0.043	0.039	0.027	0.001
2	c	0.047	0.039	0.027	0.023	0.031	0.005
1	b, d, e g, i	0.039	0.029	0.028	0.026	0.038	0.002
0.5	f	0.029	0.018	0.015	0.015	0.019	0.01
0.25	h	0.006	0.003	0.002	0.005	0.005	

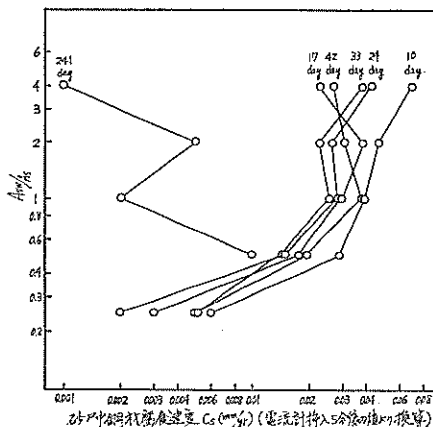


図 153  $C_S \sim A_{SW}/A_S$  の関係

(3) 抵抗

抵抗の測定結果を表 144 に示す。表 144 より  $R_{M-SW}$ ,  $R_{SW-S}$  の変化率(%)を短絡期間が10日の値を100(%)として算出すると表 145 のようになる。表 145 より  $R_{M-SW}$  (%)  $\sim A_M/A_{SW}$  を表示すると表 146 のようになる。次

に表 145 より  $R_{SW-S}$  (%) と  $A_{SW}/A_S$  の関係を表示すると

表 144 抵抗測定結果 ( $\Omega$ )

No.	10 day		242 day					
	$R_{M-SW}$	$R_{SW-S}$	$R_M$	$R_{SW}$	$R_S$	$R_{M-SW}$	$R_{SW-S}$	$R_{M-S}$
a	100	26.5	1,140	11.0	20.0	1,120	21.6	1,120
b	104	29.0	1,200	19.0	37.8	1,220	45.2	1,260
c	140	29.4	1,700	13.2	25.8	1,700	25.0	1,700
d	150	34	1,700	26.4	25.0	1,640	34.0	1,620
e	195	29.4	2,280	16.0	32.2	2,300	36.0	2,300
f	194	26	2,560	17.2	20.2	2,600	25.2	2,620
g	194	21	2,580	13.8	18.0	2,560	20.8	2,540
h	204	22	2,060	24.4	13.0	2,000	20.0	2,000
i	194	15.4	1,920	7.2	14.6	1,920	15.2	1,920
j	190	29	2,380	19.2	20.0	2,400	29.2	2,420

表 145 抵抗変化率

No.	$A_M/A_S$	$A_M/A_{SW}$	$A_{SW}/A_S$	$R_{M-SW}$ (%)		$R_{SW-S}$ (%)	
				10 day	242 day	10 day	242 day
a	4	1	4	100	1,120	100	82
b	4	4	1	100	1,173	100	156
c	2	1	2	100	1,214	100	85
d	2	2	1	100	1,093	100	100
e	1	1	1	100	1,179	100	122
f	0.5	1	0.5	100	1,340	100	97
g	0.5	0.5	1	100	1,320	100	99
h	0.25	1	0.25	100	980	100	91
i	0.25	0.25	1	100	990	100	99
j	1	1	1	100	1,263	100	101

表 146  $R_{M-SW} \sim A_M/A_{SW}$  の関係

$A_M/A_{SW}$	No.	$R_{M-SW}$ (%)	
		10 day	242 day
4	b	100	1,173
2	d	100	1,093
1	a, c, e, f, h	100	1,167
0.5	g	100	1,320
0.25	i	100	990
1	j	100	1,263

表 147  $R_{SW-S} \sim A_S/A_S$  の関係

$A_S/A_{SW}$	No.	$R_{SW-S}$ (%)	
		10 day	242 day
4	a	100	82
2	c	100	85
1	b, d, e, g, i	100	115
0.5	f	100	97
0.25	h	100	91
1	j	100	101

表 147'  $R_M^0, R_{SW}^0, R_S^0$

No.	242 day		
	$R_M^0 (\Omega)$	$R_{SW}^0 (\Omega)$	$R_S^0 (\Omega)$
a	1,109	11	11
b	1,218	3	43
c	1,688	13	13
d	1,613	27	7
e	2,282	18	18
f	2,598	3	23
g	2,540	22	1
h	1,990	10	10
i	1,913	8	8
j	2,396	5	25

表 147 のようになる。

次に表144より  $R_M^0$  (セメント硬化体中鋼材の抵抗,  $\Omega$ )  
 $R_{SM}^0$  (海水中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_S^0$  (砂層中鋼材の抵抗,  
 $\Omega$ )を (以下のように算出してみると表147'のようになる。

$$R_M^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{M-S})}{2}$$

$$R_{SW}^0 = \frac{(R_{M-SW}) + (R_{SW-S})}{2}$$

$$R_S^0 = \frac{(R_{SW-S}) + (R_{M-S})}{2}$$

表 147' を参照すると開路と短絡による  $R_M^0$  の違いは見受けられない。

(4) 供試体表面観察

セメント硬化体表面には劣化のしるしは見られない。  
 海水中鋼材の発錆状況を 図 154 に示す。図154からわかるように静止海水中鋼材は短絡、開路の区別なくいずれの場合も発錆が見られる。一方砂層中鋼材表面は砂粒が付着して白色であるが周囲は黒色となっている。

実験22 鋼材がセメント硬化体、水道水(流下)、泥層(水道水飽和)の3層に接するときの腐食傾向

供試体

供試体の内容を表 148 に示す。供試体の作成要領は実験19に同じである。セメント硬化体の練り水は表 148 からわかるように水道水のみであり供試体は No. a~No. j の10組である。このうち No. a~No. i は3層中鋼材を短絡するが No. j のみは開路のみである。出来上がった No. a~No. j の供試体は次の要領で腐食環境に設置された。まず  $\phi 30 \text{ cm} \times h 20 \text{ cm}$  のガラス水槽に水道水を流下し続けこの中に砂(標準砂)を投入して砂層を

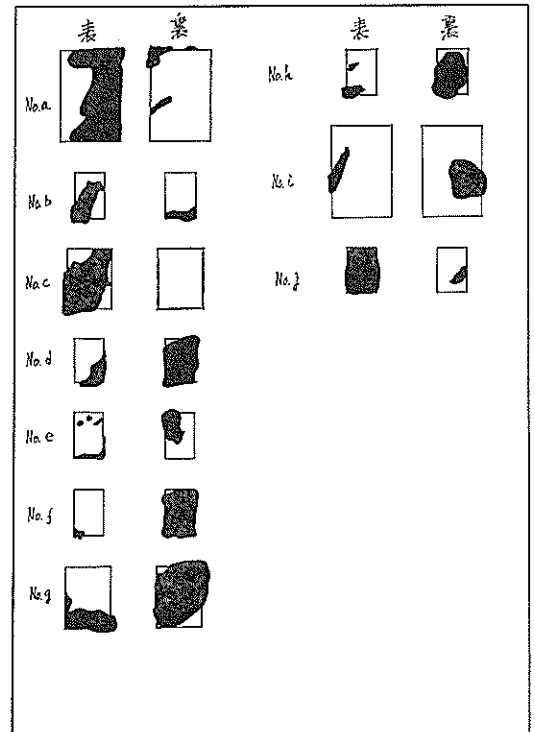


図 154 静止海水中鋼材の発錆状況 (241 day)

表 148 実験 22 の 供 試 体

No.	鋼 材									モ ル タ ル				回 路
	表面積 (cm <sup>2</sup> )			表面積比			重 量 (g)			配 合			練り水	
	A <sub>S</sub>	A <sub>W</sub>	A <sub>M</sub>	A <sub>S</sub> : A <sub>W</sub> : A <sub>M</sub>			W <sub>S</sub>	W <sub>W</sub>	W <sub>M</sub>	W (g)	C (g)	S (g)		
a	3	12	12	1	4	4	1.0760	4.4627	4.4894	338	520	1,040	水道水	短絡
b	3	3	12	1	1	4	1.0290	1.1036	4.5224	338	520	1,040	水道水	短絡
c	3	6	6	1	2	2	1.0370	2.3260	2.3996	338	520	1,040	水道水	短絡
d	3	3	6	1	1	2	1.0785	1.0825	2.1846	338	520	1,040	水道水	短絡
e	3	3	3	1	1	1	1.0950	1.0748	1.0785	338	520	1,040	水道水	短絡
f	3	3	3	2	1	1	2.3360	1.0312	1.0980	338	520	1,040	水道水	短絡
g	6	6	3	2	2	1	2.3254	2.3341	1.0360	338	520	1,040	水道水	短絡
h	6	3	3	4	1	1	4.5322	1.0514	1.0889	338	520	1,040	水道水	短絡
i	12	12	3	4	4	1	4.4656	4.4662	1.0450	338	520	1,040	水道水	短絡
j				1	1	1	1.0638	1.0916	1.0420	338	520	1,040	水道水	開路

鋼材の形状寸法 (厚み 0.1 cm)  
 3 cm<sup>2</sup> = 1 cm × 1.5 cm × 2  
 6 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 1.5 cm × 2  
 12 cm<sup>2</sup> = 2 cm × 3 cm × 2

A<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 A<sub>W</sub>: 水道水(流下)中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)

A<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の表面積 (cm<sup>2</sup>)  
 W<sub>S</sub>: 砂層中鋼材の重量 (g)  
 W<sub>W</sub>: 流下 水道水中鋼材の重量 (g)  
 W<sub>M</sub>: セメント硬化体中鋼材の重量 (g)  
 W: 練り水の重量 (g)  
 C: 普通ボルトランドセメントの重量 (g)  
 S: 細骨材(豊浦標準砂)の重量 (g)

10 cm とする。したがって上半分は新鮮な水道水, 下半分は水道水飽和の砂層となる。砂層中に No. a ~ No. j のうち A<sub>S</sub> の表面積をもつ鋼材片を埋設する。このときの埋設間隔は約 4 cm, 深さは砂層の中央深度すなわち約 5 cm である。A<sub>S</sub> の鋼材を埋設した砂層上面付近に A<sub>M</sub> の表面積の鋼材 (セメント硬化体 φ 5 cm × l 10 cm 中) を設置し次にその付近の水道水中に A<sub>W</sub> の表面積の鋼材を吊す。このとき鋼材片の位置は水面から約 5 cm のところである。水道水は常時少量づつ流下されている。

測 定

測定項目は電位, 電流, 抵抗の測定および供試体表面の観察である。

(1) 電 位

電位には E<sub>0</sub> (3 層中鋼材を短絡したときの電位), E<sub>M</sub> (短絡前または短絡後開路としたときのセメント硬化体中鋼材の電位), E<sub>W</sub> (短絡前または短絡後開路としたときの流下 水道水中鋼材の電位), E<sub>S</sub> (短絡前または短絡後開路としたときの砂層中鋼材の電位) の 4 つがあり, いずれも海水塩化銀電極に対する値として電位計により測定された。また併せて E<sub>M</sub>, E<sub>W</sub>, E<sub>S</sub> の開路後の変化状況も測定された。ただし No. j は開路のままであるから開路電位 E<sub>M</sub>, E<sub>W</sub>, E<sub>S</sub> だけを測定した。単位は -mV である。

(2) 電 流

短絡する No. a ~ No. i について図 79 に示すように D. C. 電流計を挿入して 5 分後の値を読んだ。電流には I<sub>M</sub> (セメント硬化体中鋼材に流入する電流), I<sub>S</sub> (流下 水道水中鋼材に流入する電流), I<sub>S</sub> (水道水飽和砂層中鋼材より流出する電流) がある。また電流を鋼材表面積で割って電流密度 I<sub>MD</sub> (セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度, = I<sub>M</sub>/A<sub>M</sub>), I<sub>WD</sub> (水道水中鋼材に流入する電流密度, = I<sub>W</sub>/A<sub>W</sub>), I<sub>SD</sub> (砂層中鋼材より流出する電流密度, = I<sub>S</sub>/A<sub>S</sub>) を算出した。電流の単位は μA, 電流密度の単位は μA/cm<sup>2</sup> である。

(3) 抵 抗

抵抗には R<sub>M</sub> (セメント硬化体中鋼材と標準鉄電極間の抵抗), R<sub>W</sub> (流下 水道水中鋼材と標準鉄電極間の抵抗), R<sub>S</sub> (水道水飽和砂層中鋼材と標準鉄電極間の抵抗), R<sub>M-W</sub> (セメント硬化体中鋼材と流下 水道水中鋼材間の抵抗), R<sub>W-S</sub> (流下 水道水中鋼材と水道水飽和砂層中鋼材間の抵抗), R<sub>M-S</sub> (セメント硬化体と水道水飽和砂層中鋼材間の抵抗) の 6 つである。各抵抗とも A. C. ブリッジ (1,000 c/s) で分極を起こさないようにして測定された。使用した A. C. ブリッジは港研式腐食計の抵抗測定部である。単位は Ω である。

(4) 供試体表面の観察

表 149 電位測定結果 (-mV)

No.	0 day			10 day				24 day			
	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_W$	$E_M$
a	684	380	170	520	666	416	446	600	640	495	565
b	640	430	200	646	678	392	640	620	650	265	610
c	680	408	250	642	678	400	618	600	633	280	643
d	696	402	190	672	702	428	634	600	645	498	160
e	700	400	170	685	684	445	672	590	682	498	500
f	715	392	160	658	690	390	628	613	665	300	365
g	724	410	178	644	680	370	616	628	675	282	550
h	708	400	200	668	688	350	588	646	740	242	552
i	719	388	214	628		394	604	600	652	260	601
j	688	392	194						700	603	250

供試体表面の劣化状況を肉眼で観察した。

測定結果および考察

(1) 電位

電位の測定結果を表 149 に示す。表 149 に示す 0 日の  $E_S$ ,  $E_W$ ,  $E_M$  は短絡前の 3 層中鋼材の電位であり, 10 日, 24 日, 33 日, 42 日の  $E_S$ ,  $E_W$ ,  $E_M$  は短絡後開路として 10 分~20 分経過したときの電位であるが 242 日の  $E_S$ ,  $E_W$ ,  $E_M$  は開路 170 分後の値である。まず表 149 より短絡前の電位を比較してみると  $E_S$  は -700 mV,  $E_W$  は -400 mV,  $E_M$  は -200 mV 付近の値であり 3 者間の関係は 図 155 のようになって短絡によりマクロ腐食電池が発生することが予想できる。次に短絡後の電位を見てみると  $E_0$  は大体 -600~-700 mV に落ち着いておりました  $E_S$  も  $E_0$  よりやや卑の -700 mV 付近となっている。これに対して  $E_W$ ,  $E_M$  は開路後時間の経過とともに次第に貴の方に移るがとくに  $E_W$  が貴となるのが急である。短絡後の  $E_0$ ,  $E_S$ ,  $E_W$ ,  $E_M$  の関係を 42 日, 242 日の値で図示すると 図 156, 157 のようになって 図 155 から予想したマクロ腐食電池の発生していることがはっきりする。このときマクロ腐食電池のアノードは砂層中鋼材であり, カソードはセメント硬化体中鋼材と水道水中鋼材である。 $E_M$ ,  $E_W$ ,  $E_S$  の開路後の経過時間に対する変化を測定してみると 表 150, 151 のようになる。表 150, 151 より  $E_M$ ,  $E_W$ ,  $E_S$  の変化模様を図示すると 図 158~図 166 のようになる。

図 158~166 を参照すると  $E_S$  は開路後  $E_0$  より若干卑な値に直ちに安定するが  $E_M$ ,  $E_W$  は次第に貴の方に移行して行く。とくに  $E_M$  では No. b, c, f, g, h, i は大幅に貴となり -100 mV よりさらに貴となる。この傾向は後述する供試体表面の観察結果を参照すると理解できよう。すなわちマクロ腐食電池のカソードとして丁度電気

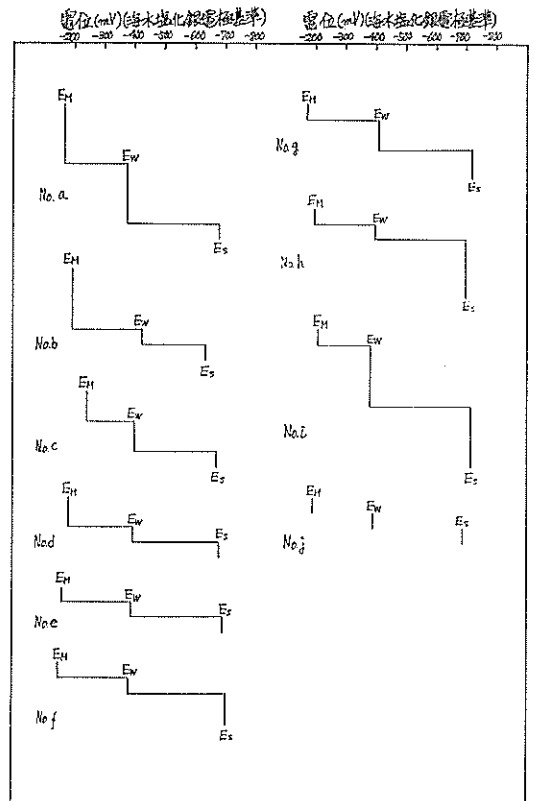


図 155 開路電位 (0 day)

防食法の適用によって十分防食されたことに相当する。一方開路のままである No. j の  $E_S$  は -700 mV 台,  $E_M$  は -600 mV 台となっているが  $E_M$  はいぜんとして -100 mV である。

(海水塩化銀電極基準)

33 day				42 day				242 day				No.
$E_0$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_0$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	
612	660	507	570	618	670	502	572	640	690	405	515	a
642	672	290	641	650	671	265	602	685	700	25	505	b
618	669	340	609	624	662	370	597	670	695	46	500	c
638	665	560	595	640	651	590	608	700	700	515	515	d
630	662	558	590	620	650	580	601	690	700	540	450	e
657	687	295	557	650	688	238	600	680	700	130	350	f
632	674	270	545	620	648	262	551	660	705	40	410	g
660	687	245	572	670	679	268	580	685	705	60	420	h
236	670	260	605	648	650	202	597	675	705	50	440	i
	711	610	228		702	640	270		770	625	128	j

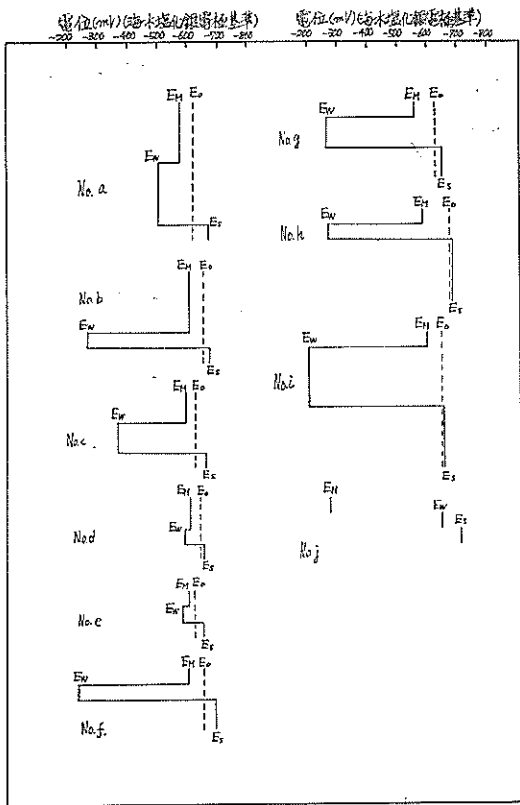


図 156 短絡電位と開路電位の関係 (42 day)

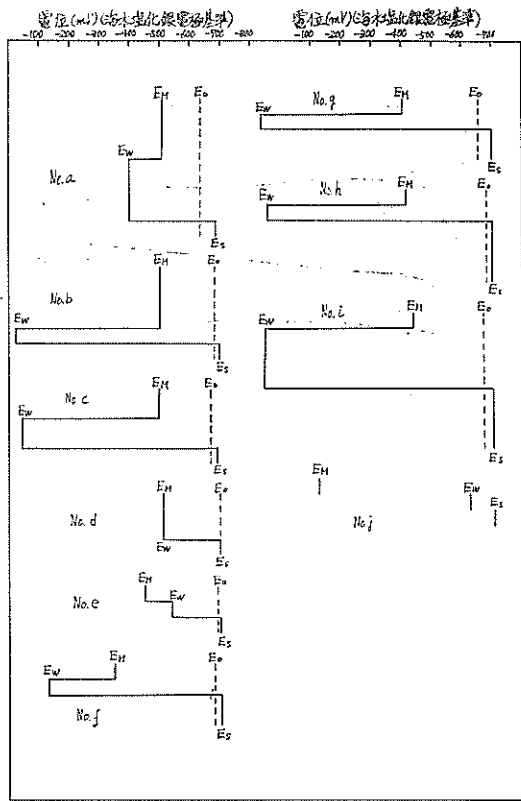


図 157 短絡電位と開路電位の関係 (242 day)

(2) 電 流

電流の測定結果を表 152 に示す。表 152 で  $I_M$ ,  $I_W$  の (+) 符号は流入,  $I_S$  の (+) 符号は流出を意味するものである。

電流についての検討は以下のように電流密度として行なうことにする。

セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 152 よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

表 150 開路後の電位変化 (短絡期間 10 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準)

No.	$E_0$	5 min			10 min			20 min		
		$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$	$E_S$	$E_{SW}$	$E_M$
a	520	670	305	500	670	438	510	666	416	646
b	646	705	416	645	699	420	666	678	392	640
c	642	726	488	614	680	402	634	678	400	618
d	672	744	432	678	714	432	636	702	428	634
e	685	712	378	480	712	428	660	684	445	672
f	958	694	385	666	700	418	628	690	390	628
g	644	735	378	660	696	425	632	680	370	616
h	668	728	350	670	680	330	624	688	350	588
i	628	700	400	655	700	430	630		394	604
j		755	612	390						

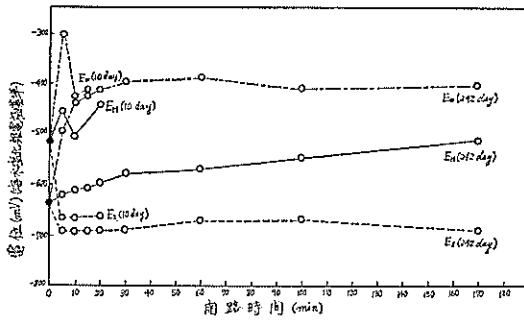


図 158 開路後の電位変化 (No. a)

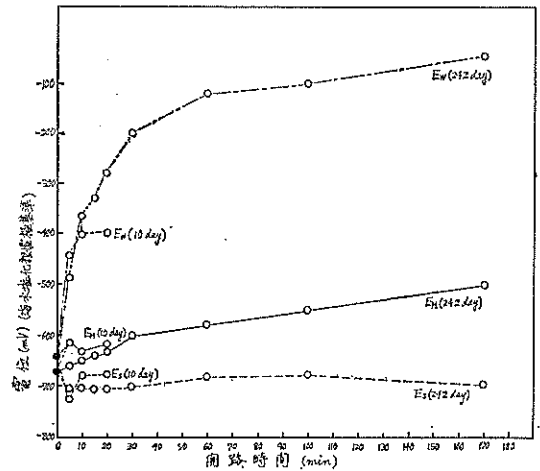


図 159 開路後の電位変化 (No. b)

表 151 開路後の電位変化 (短絡期間 242 day)

No.	$E_0$	5 min			[10 min			20 min			30 min		
		$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$
a	640	695	460	625	695	430	615	695	430	610	695	415	600
b	685	715	310	670	715	235	660	715	205	650	710	195	640
c	670	705	445	660	705	365	650	705	330	640	705	280	630
d	700	720	635	680	715	615	660	715	605	650	715	600	640
e	690	715	640	675	715	625	650	715	620	630	710	610	615
f	680	730	290	650	720	195	605	720	180	580	715	180	550
g	660	725	300	635	720	210	905	720	170	595	720	160	580
h	685	735	320	665	730	235	635	730	195	615	730	170	595
i	675	720	285	660	720	195	635	820	175	625	720	150	610

表 152 電流測定結果 ( $\mu A$ )

No.	10 day			24 day			33 day	42 day			212 day			241 day		
	$I_M$	$I_W$	$I_S$	$I_M$	$I_W$	$I_S$	$I_S$	$I_M$	$I_W$	$I_S$	$I_M$	$I_W$	$I_S$	$I_M$	$I_W$	$I_S$
a	1	49	50			27.5	23	0.5	23.5	24	0.5	32	32	0.05	13	13.2
b	1	22	23	1	27	28	9	1	10	11	0.1	14.5	14.5	0.1	6.5	6.7
c	1	33	34	0.5	37.5	38	17	0.3	16.7	17	0.1	17.5	17	0.05	8.1	8.2
d			25			50	21	1	15	16	0.2	7.5	7.5	0.2	4.1	4.3
e			24			36	20	0.5	16.5	17	0.1	8.5	8.5	0.1	4.25	4.4
f	1	23	24			24	11	1	11	12	0.1	11	11	0.05	6.7	6.8
g	1	45	40	0.5	38.5	39	20	0.5	17.5	18	0.1	23	23	0.2	11.7	11.9
h	0.5	27.5	28	0.5	29.5	30	13	1	16.5	17.5	0.1	15	15	0.1	9.7	9.8
i	1	88	89	0.5	72.5	73	33	0.5	34.5	35	0.1	34	34	0.1	20.4	40.5

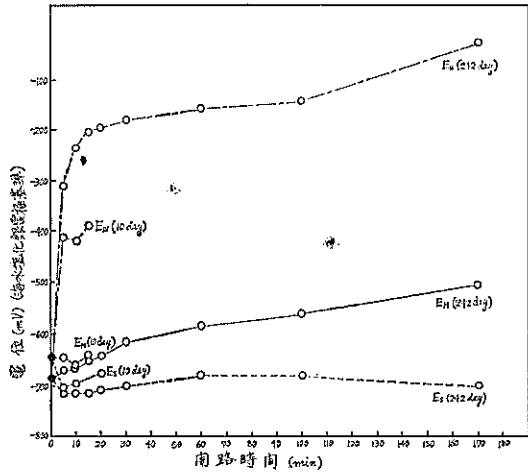


図 160 開路後の電位変化 (No. c)

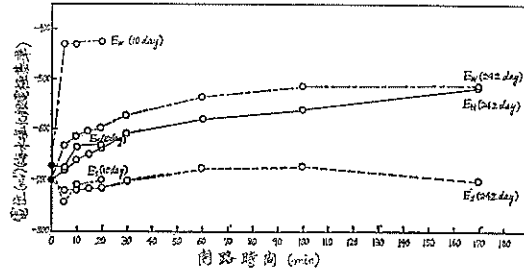


図 161 開路後の電位変化 (No. d)

(-mV) (海水塩化銀電極基準)

30 min			60 min			100 min			170 min			No.
$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	$E_S$	$E_W$	$E_M$	
690	400	580	670	390	570	670	420	550	690	405	515	a
700	180	615	680	155	585	680	140	560	700	25	505	b
700	200	600	675	120	580	675	100	550	695	46	500	c
700	575	610	675	535	580	675	515	560	700	515	515	d
705	590	570	680	550	520	680	540	500	700	540	450	e
710	175	510	680	180	445	680	120	400	700	130	350	f
710	120	540	680	80	495	680	50	470	705	40	410	g
715	140	550	680	105	500	680	70	480	705	60	420	h
710	100	575	685	50	525	685	55	500	705	50	440	i



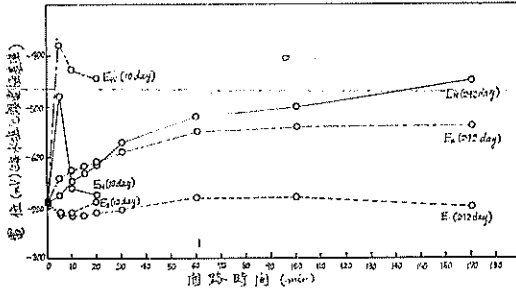


図 162 開路後の電位変化 (No. e)

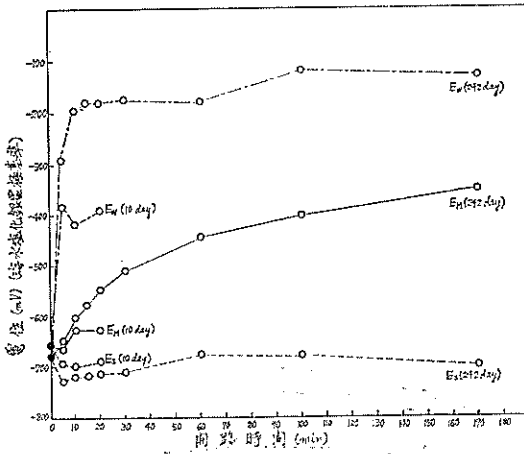


図 163 開路後の電位変化 (No. f)

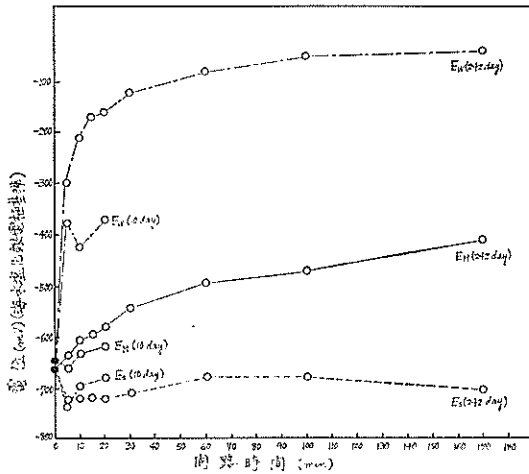


図 164 開路後の電位変化 (No. g)

$I_{MD}$  ( $\mu A/cm^2$ ) を算出すると表 153 のようになる。表 153より  $I_{MD}$  と短絡期間の関係を図示すると図 167 のようになる。図167よりわかるように  $I_{MD}$  は短絡期間の経

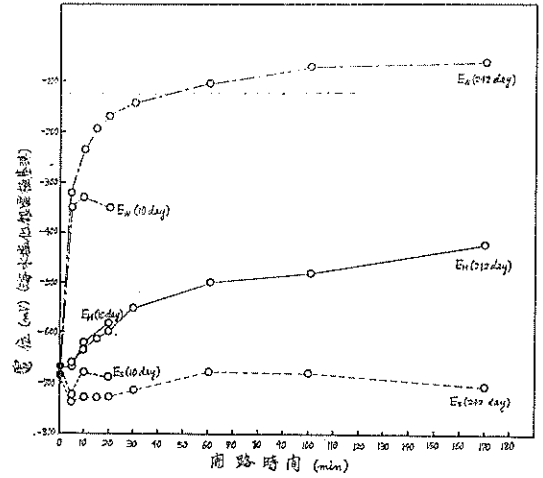


図 165 開路後の電位変化 (No. h)

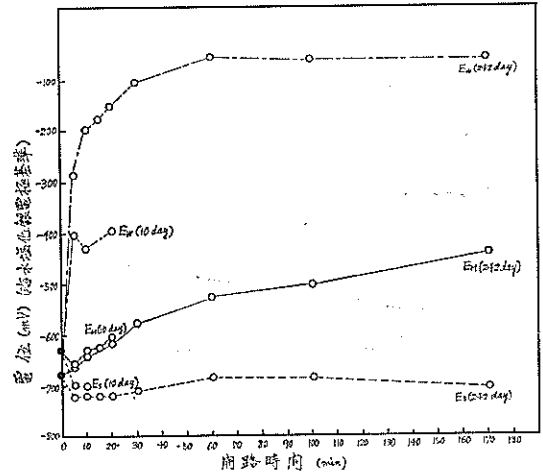


図 166 開路後の電位変化 (No. i)

過とともに次第に減少する傾向がうかがわれるが短絡期間 100 日前後の測定をしていないためはっきりしないが 200 日付近ではすでに安定しているように思われる。次に表 153 より  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係を表示すると表 154 のようになる。表154より  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係を図示すると図 168 のようになる。図 168 によれば  $A_M/A_S > 1$  では  $I_{MD} \propto k (A_M/A_S)^{-1}$  の関係がうかがえるが  $A_M/A_S \leq 1$  では  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S$  にとくに関係はなく  $A_M/A_S = 1$  のときの値に一定となるようである。 $A_M/A_S = 1$  のときの値は短絡後 40 日位は  $0.2 \sim 0.3 \mu A/cm^2$  であるが 7~8 カ月後では  $0.03 \sim 0.04 \mu A/cm^2$  となる。図 168 に  $0.07 \mu A/cm^2$ <sup>31)</sup> (塩化物が存在しないときのセメント硬化体中鋼材の防食に必要といわれる電気防食電流密度の 1 つ

表 153 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_M$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_M/A_S$	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )				
			10 day	24 day	42 day	212day	24 day
a	12	4	0.03		0.04	0.04	0.004
b	12	4	0.08	0.08	0.08	0.01	0.008
c	6	2	0.16	0.08	0.05	0.02	0.008
d	3	2			0.33	0.07	0.07
e	3	1			0.17	0.03	0.03
f	3	0.5	0.33		0.33	0.03	0.017
g	3	0.5	0.33	0.17	0.17	0.03	0.07
h	3	0.25	0.17	0.17	0.33	0.03	0.03
i	3	0.25	0.33	0.17	0.17	0.03	0.03

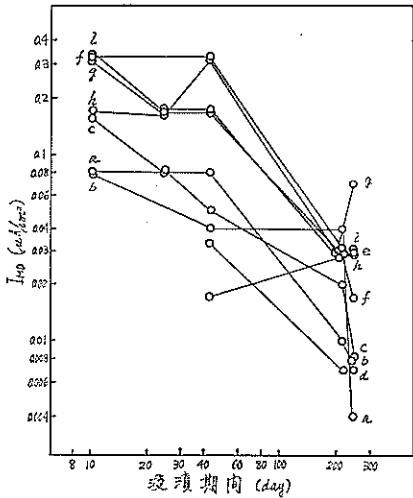


図 167 セメント硬化体中鋼材に流入する電流密度

の基準値)適用してみると短絡期間が長くなった場合は  $I_{MD} < 0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となる。しかし図158~166に示すように  $E_M$  はいぜんとして貴の電位に保たれていることおよび電気防食電流密度はふつう  $1/2 \sim 1/3$  程度に減少して行くことなどを考え併せると  $A_M/A_S \leq 1$  ではセメント硬化体中鋼材は有効な電気防食を受けていると見てもよさそうである。これに対して  $A_M/A_S > 1$  では流入電流密度が  $A_M/A_S \leq 1$  のときより次第に低下しとくに  $A_M/A_S \ll 1$  ではセメント硬化体単層中の鋼材と同じ腐食条件におかれるようになる。

流下水道水中鋼材に流入する電流密度

表152より流下水道水中鋼材に流入する電流密度  $I_{WD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を算出すると表155のようになる。表155より  $I_{WD}$  ~ 短絡期間の関係を図示すると図169のようになる。図169によれば  $I_{WD}$  は短絡期間が長くなるにつれ

表 154  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の経日変化

$A_M/A_S$	No.	$I_{MD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )				
		10 day	24 day	42 day	212day	241 day
4	a, b	0.08	0.08	0.06	0.025	0.006
2	c, d	0.16	0.08	0.19	0.045	0.04
1	e			0.17	0.03	0.03
0.5	f, g	0.33	0.17	0.25	0.03	0.04
0.25	h, i	0.25	0.17	0.25	0.03	0.03

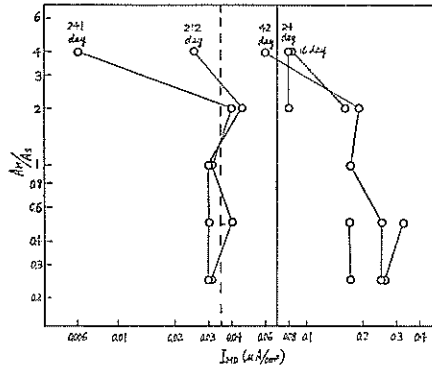


図 168  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係

表 155 下水道水中鋼材に流入する電流密度

No.	$A_W$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_W/A_S$	$I_{WD}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )				
			10 day	24 day	42 day	212day	241 day
a	12	4	4.08		1.96	2.67	1.08
b	3	1	7.33	9.00	3.33	4.83	2.25
c	6	2	5.50	6.25	2.78	2.92	1.35
d	3	1			5.00	2.50	1.37
e	3	1			5.50	2.83	1.42
f	3	0.5	7.67		3.67	3.67	2.23
g	6	1	7.50	6.41	2.92	3.43	1.95
h	3	0.25	9.17	9.83	5.50	5.00	3.23
i	12	1	7.33	6.04	2.88	2.83	1.70

で次第に減少している。すなわち短絡期間が10日付近では  $I_{WD} = 4 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  であったのが40日付近では  $2 \sim 6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となり200日以降では  $1 \sim 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となっている。一般に流動淡水中鋼材に必要な電気防食電流密度は  $6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  <sup>3D</sup> とされているが、図158~166に示すように  $E_W$  は非常に貴な値であることや後述の発錆状況の観察結果などを参照すると長期的には  $1 \sim 3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の電流密度で十分防食の目的を果していると考えられる。

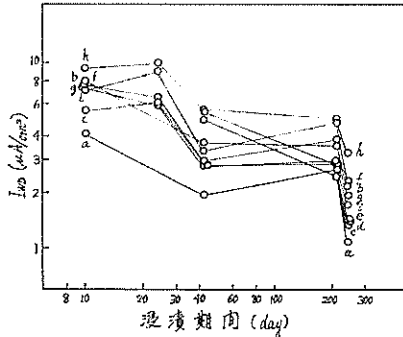


図 169 水道水(流下)中鋼材に流入する電流密度

このことより淡水(流動)中の鋼材に対して必要な電気防食電流密度は要求されている値(6 μA/cm<sup>2</sup>)の1/2~1/3程度で長期的にはすむことが予想できる。

次に表155より  $I_{WD} \sim A_W/A_S$  の関係を表わすと表156のようになる。表156より  $I_{WD} \sim A_W/A_S$  の関係を図示すると図170ようになる。図170によれば明らかに  $I_{WD}$  は  $A_W/A_S$  に反比例の関係がありこの傾向は短絡期間が長くなっても見られる。

砂層中鋼材より流出する電流密度

表152より砂層中鋼材より流出する電流密度  $I_{SD}$  (μA/cm<sup>2</sup>) を算出すると表157のようになる。表157より  $I_{SD} \sim$  短絡期間の関係を図示すると図171のようになる。図171より  $I_{SD}$  は短絡期間が長くなるにつれて次第に減少することがわかる。このような傾向は図169より予想できる。次に表157より  $I_{SD}$  (μA/cm<sup>2</sup>) を平均腐食速度  $C_S$  (mm/yr) に換算すると表158のようになる。表158より  $C_S \sim A_W/A_S$  の関係を表示すると表159のようになる。表159の  $C_S \sim A_W/A_S$  の関係を図示すると図172のようになる。図172によれば  $C_S$  すなわち水道水飽和砂

表 156  $I_{WD} \sim A_W/A_S$  の経日変化

$A_W/A_S$	No.	$I_{WD}$ (μA/cm <sup>2</sup> )				
		10 day	24 day	42 day	212day	241day
4	a	4.08		1.96	2.67	1.08
2	c	5.50	6.25	2.78	2.92	1.35
1	b,d,e, g,i	7.39	7.15	3.93	3.36	1.74
0.5	f	7.67		3.67	3.67	2.23
0.25	h	9.17	9.83	5.50	5.00	3.23

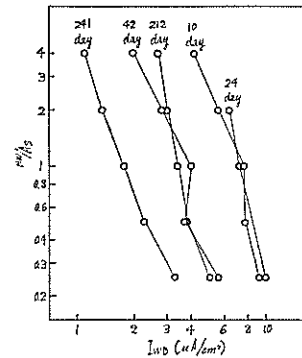


図 170  $I_{WD} \sim A_W/A_S$  の関係

層中鋼材のマクロ腐食のアノードとしての肉厚減少量 (mm/yr) と  $A_W/A_S$  との間には  $C_S \propto k \cdot A_M/A_S$  の関係がありそうである。  $A_W/A_S=1$  のときの  $C_S$  は短絡期間が10日位では0.1 mm/yr程度であるが短絡期間が長くなるにつれて減少し長期間後には0.02 mm/yr程度となるようである。したがって  $A_W/A_S \gg 1$  のような条件下ではカソードすなわちセメント硬化体中鋼材および流下水道水中鋼材の防食のためにアノードとなる砂層中

表 157 砂層中鋼材より流出する電流密度

No.	$A_S$ (cm <sup>2</sup> )	$A_W/A_S$	$I_{SD}$ (μA/cm <sup>2</sup> )					
			10day	24day	33day	42day	212day	241day
a	3	4	16.7	9.17	7.67	8.00	10.7	4.4
b	3	1	7.67	9.33	3.00	3.67	4.83	2.23
c	3	2	11.3	12.7	5.67	5.67	5.67	2.73
d	3	1	8.33	16.7	7.00	5.33	2.50	1.43
e	3	1	8.00	12.0	6.67	5.67	2.83	1.47
f	6	0.5	4.00	4.00	1.83	2.00	1.83	1.13
g	6	1	7.67	6.50	3.33	3.00	3.83	1.98
h	12	0.25	2.33	2.50	1.08	1.46	1.25	0.82
i	12	1	7.42	6.08	2.75	2.92	2.83	1.71

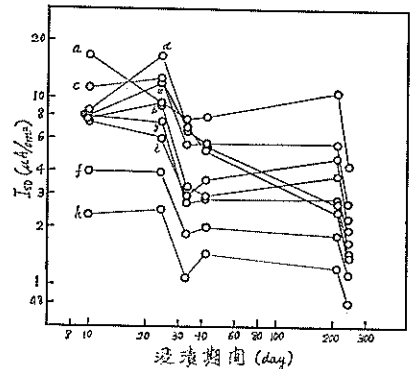


図 171 砂層中鋼材より流出する電流密度

表 158 砂層中鋼材の腐食速度

No.	$A_W/A_S$	$C_S$ (mm/yr)					
		10day	24day	33day	42day	212day	241day
a	4	0.194	0.107	0.089	0.093	0.124	0.051
b	1	0.089	0.108	0.035	0.043	0.056	0.026
c	2	0.131	0.148	0.066	0.066	0.066	0.032
d	1	0.097	0.194	0.081	0.062	0.029	0.017
e	1	0.093	0.140	0.078	0.066	0.033	0.017
f	0.5	0.047	0.047	0.021	0.023	0.021	0.013
g	1	0.089	0.076	0.039	0.035	0.045	0.023
h	0.25	0.027	0.029	0.013	0.017	0.015	0.01
i	1	0.086	0.071	0.032	0.034	0.033	0.02

表 159  $C_S \sim A_W/A_S$  の関係

$A_W/A_S$	No.	$C_S$ (mm/yr)					
		10day	24day	33day	42day	212day	241day
4	a	0.194	0.107	0.089	0.093	0.124	0.051
2	c	0.131	0.148	0.066	0.066	0.066	0.032
1	b, d, e, g, i	0.091	0.118	0.058	0.052	0.041	0.017
0.5	f	0.047	0.047	0.021	0.023	0.021	0.013
0.25	h	0.027	0.029	0.013	0.017	0.015	0.01

鋼材の犠牲が大きくなることを十分留意しておくことが必要である。これに反して  $A_W/A_S \ll 1$  の条件下では砂層中鋼材のマクロ腐食による犠牲は無視しても差し支へなさうである。また  $C_S \propto k \cdot A_W/A_S$  の関係からわかるようにセメント硬化体、流下排水水、水道水飽砂層の3層に鋼材が接するとき発生するマクロ腐食の速度はも

表 160 抵抗測定値 ( $\Omega$ )

No.	10 day			241 day				
	$R_{M-W}$	$R_{W-S}$	$R_M$	$R_W$	$R_S$	$R_{M-W}$	$R_{W-S}$	$R_{M-S}$
a	900	1,600	4,620	4,900	5,000	2,100	2,320	2,150
b	1,360	2,640	5,080	5,780	5,400	2,480	3,060	2,440
c	1,000	2,040	5,320	5,120	5,100	2,200	2,580	2,580
d	1,540	2,580	5,480	5,700	5,180	2,920	3,000	2,840
e	1,560	2,960	6,180	6,020	5,500	3,620	3,220	3,600
f	1,400	2,420	5,700	5,760	5,780	3,420	3,600	3,450
g	1,040	1,720	5,400	5,100	5,380	2,880	2,500	3,240
h	1,460	1,940	5,800	5,440	4,820	3,600	2,620	3,000
i	796	1,250	5,000	4,960	4,860	2,680	1,680	2,670
j	1,380	2,870	5,700	5,840	5,340	3,220	3,140	3,100

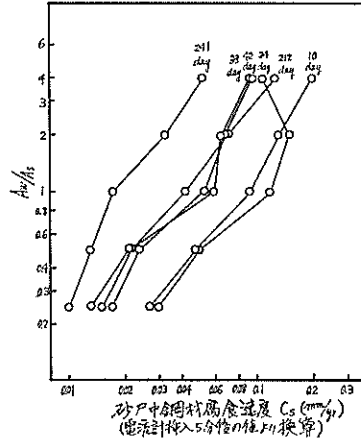


図 172  $C_S \sim A_W/A_S$  の関係

っぱら  $A_W/A_S$  に比例してさほど  $A_M$  には左右されないようである。

(3) 抵抗

抵抗の測定結果を表 160 に示す。表 160 より  $R_{M-W}$ ,  $R_{M-S}$  の変化率(%)を短絡期間が10日のときの値を基準として算出すると表 161 のようになる。表 161 より  $R_{M-W}(\%) \sim A_M/A_W$  の関係を表示すると表 162 のようになる。表 162 によれば  $R_{W-S}(\%)$  は  $A_M/A_W$  に反比例するようである。また表 161 より  $R_{W-S}(\%) \sim A_W/A_S$  の関係を表示すると表 163 のようになる。表 163 によれば  $R_{W-S}(\%)$  と  $A_W/A_S$  との間にはとくに関係は見られない。

次に表 160 より  $R_M^0$  (セメント硬化体中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_W^0$  (水道水中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ),  $R_S^0$  (砂層中鋼材の抵抗,  $\Omega$ ) を以下のように算出してみると表 163' の

表 161 抵抗変化率

No.	$A_M/A_S$	$A_M/A_S$	$A_W/A_S$	$R_{M-W}(\%)$		$R_{W-S}(\%)$	
				10day	24day	10day	24day
a	4	1	4	100	233	100	145
b	4	4	1	100	182	100	116
c	2	1	2	100	220	100	126
d	2	2	1	100	190	100	116
e	1	1	1	100	232	100	109
f	0.5	1	0.5	100	244	100	149
g	0.5	0.5	1	100	277	100	145
h	0.25	1	0.25	100	247	100	135
i	0.25	0.25	1	100	337	100	134
j	1	1	1	100	233	100	109

表 163'  $R_M^0, R_W^0, R_S^0$

No.	241 day		
	$R_M^0 (\Omega)$	$R_W^0 (\Omega)$	$R_S^0 (\Omega)$
a	965	1,135	1,185
b	930	1,550	1,510
c	1,100	1,100	1,480
d	1,380	1,540	1,460
e	2,000	1,620	1,600
f	1,635	1,785	1,815
g	1,810	1,070	1,430
h	1,990	1,610	1,010
i	1,810	870	810
j	1,590	1,630	1,510

表 162  $R_{M-W} \sim A_M/A_W$  の関係

$A_M/A_W$	No.	$R_{M-W}(\%)$	
		10 day	24 day
4	b	100	182
2	d	100	190
1	a, c, e f, h	100	235
0.5	g	100	277
0.25	i	100	337
1	j	100	233

表 163  $R_{W-S} \sim A_W/A_S$  の関係

$A_W/A_S$	No.	$R_{W-S}(\%)$	
		10 day	24/day
4	a	100	145
2	c	100	126
1	b, d, e g, i	100	124
0.5	f	100	149
0.25	h	100	135
1	j	100	109

ようになる。

$$R_M^0 = \frac{(R_{M-W}) + (R_{M-S})}{2}$$

$$R_W^0 = \frac{(R_{M-W}) + (R_{W-S})}{2}$$

$$R_S^0 = \frac{(R_{W-S}) + (R_{M-S})}{2}$$

表163'を参照すると  $R_M^0, R_W^0, R_S^0$  は大体同じ大きさである。また  $R_M^0$  は短絡，開路の差はあまりなさそうであ

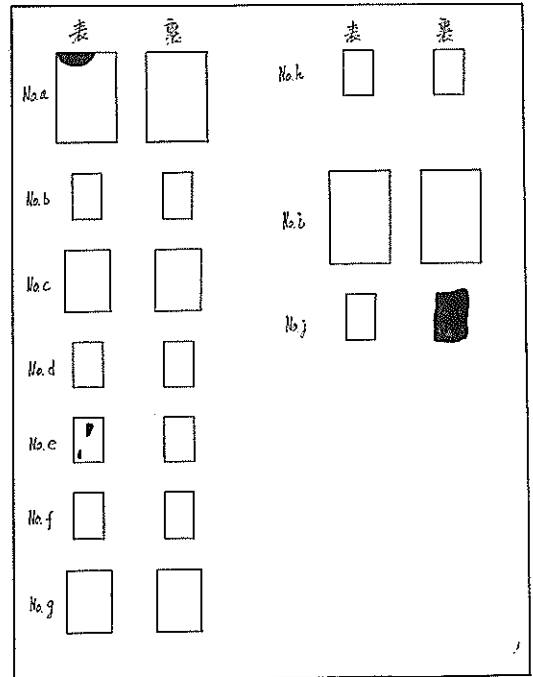


図 173 水道水(流下)中鋼材の発錆状況 (241 day)

る。

(4) 供試体表面の観察

肉眼による観察によれば No. a~No. j のセメント硬化体表面には劣化のしるし(キレツ，発錆)は 240 日以降でも見られなかった。水道水中鋼材の発錆状況は 図 173 の通りである。

図 173 よりわかるように発錆の認められたのは No. a, e, j であるが No. a, e の発錆は一部分である。No. j (開路) は片面は片面全部に発錆が見られた。その他の No. b, c, d, f, g, h, i には発錆は認められず浸漬時の研磨面

がそのまま保たれており別に海水中鋼材面上のような白色石灰被覆は発生していない。一方砂層中鋼材は図77と同じように鉄の溶出により鉄素地が見られた。

### 3.6 3層の場合の考察

実験19~22より次のことがいえよう。

(1) 鋼材がセメント硬化体、塩化ナトリウム溶液（流動）、塩化ナトリウム溶液飽和砂層の3層に接するときセメント硬化体中鋼材は常に砂層中鋼材に対してカソードとなる。（表99, 図80より）

(2) (1)のセメント硬化体中鋼材が砂層中鋼材に対してカソードとなる傾向は本実験の範囲内、すなわち  $A_M/A_S=4\sim 0.25$  では長期間続くことが予想できる。（表99~101, 図81~94より）

(3) (1), (2)の傾向はセメント硬化体の練り水が水道水であっても塩化ナトリウム溶液であっても成立する。（表99, 図86~88, 92~94より）

(4) (1), (2), (3)の傾向は鋼材がセメント硬化体、海水（流動）、海水飽和砂層の3層に接するときにも見られる。（表116~118, 図108~122より）

(5) (1), (2)の傾向は鋼材がセメント硬化体、海水（静止）、海水飽和砂層の3層に接するときにも見られる。（表133~135, 図136~147より）

(6) (1), (2)の傾向は鋼材がセメント硬化体、水道水（流動）、水道水飽和砂層の3層に接するときにも見られる。（表149~151, 図155~166より）

(7) 鋼材がセメント硬化体、塩化ナトリウム溶液（流動）または海水（流動）、塩化ナトリウム溶液または海水飽和砂層の3層に接するとき塩化ナトリウム溶液（流動）または海水（流動）中鋼材の電位  $E_{SW}$  が  $-500$  mV より貴になる場合と  $-500$  mV より卑になる場合がある。すなわち本実験の範囲では塩化ナトリウム溶液または海水中鋼材に部分的にでも発錆が認められるときは  $E_{SW}$  は  $-500$  mV より卑な値となり、また発錆が認められないときは  $-500$  mV より貴な値を示す傾向がうかがわれる。（表99, 図107, 表116, 図135より） $E_{SW}$  が  $-500$  mV より貴であるときに発錆が認められないことを塩化ナトリウム溶液または海水中鋼材がマクロ腐食電池のカソードとして防食されたことを意味する。

(8) 鋼材がセメント硬化体、海水（静止）、海水飽和砂層の3層に接するとき海水（静止）中鋼材には短絡、開路に関係なく発錆が見られ  $E_{SW}$  は  $-500$  mV より常に卑となる。これは最初は  $E_S < E_{SW}$  のために発生したマクロ腐食電池が海水が静止のために海水中溶存酸素量が減少して次第に砂層中酸素量に接近して、マクロ腐食電

池においては  $E_S \approx E_{SW}$  となるためと予想される。（表133, 図154より）

(9) 鋼材がセメント硬化体、水道水（流下）、水道水飽和砂層の3層に接するとき水道水（流下）中鋼材電位  $E_W$  については(7)の傾向がある。（表149, 図173より）この場合水道水（流下）中鋼材は水道水飽和砂層に対して永続的にカソードとなりやすいので  $E_W$  は  $-500$  mV よりかなり貴となる傾向が強い。

(10) 海水飽和または水道水飽和の砂層中鋼材の電位  $E_S$  は開路のままでも短絡後開路としたときでも大抵  $-700\sim -750$  mV であり、セメント硬化体中鋼材、流動海水中鋼材や流動水道水中鋼材に対して常にアノードとなる。（表99, 図80~94, 表116, 図108~122, 表149, 図155~166より）

ただしセメント硬化体、静止海水、海水飽和砂層の3層のときの  $E_S$  は長期的には  $-600\sim -650$  mV 程度で  $-700$  mV より多少貴となっている。（表133, 図139~147より）これは静止海水の取り替えをせずにただ蒸発水分の補給だけが続けたのでセメント硬化体から溶解した遊離アルカリのために次第に海水のアルカリ性が増したことに起因するのではないかと考えられる。（表13などを参照）

(11) セメント硬化体、浸液（塩化ナトリウム溶液、海水または水道水）、浸液飽和砂層の3層に接する鋼材の電位  $E_0$  は浸液飽和砂層中鋼材の電位  $E_S$  よりやや貴の値となる。（表99, 図83~94, 表116, 図111~122, 表149, 図159~167より）

(12) (1)~(11)をまとめてみると図174のように3層の場合のセメント硬化体中鋼材は常にカソードとなる。

(13) 鋼材がセメント硬化体、塩化ナトリウム1%溶液

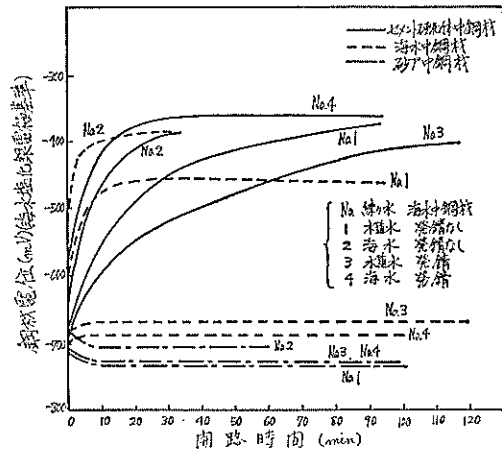


図174 3層（セメント硬化体、海水、泥層）中鋼材の開路後の電位変化

(攪拌), 塩化ナトリウム1%溶液飽和砂層の3層に接するとき砂層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材および塩化ナトリウム1%溶液中鋼材に流入する方向に電流が流れる。(表102より)

(4) (3)の傾向はセメント硬化体の練り水が水道水であっても塩化ナトリウム溶液であっても見られる。(表102より)

(5) (3)の3層のとき砂層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度  $I_{MD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) は  $A_M/A_S$  に対して次の関係がある。

すなわち  $A_M/A_S > 1$  のとき  $I_{MD} \propto k \cdot (A_M/A_S)^{-1}$

$A_M/A_S \leq 1$  のとき  $I_{MD} \doteq (A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD})$

$A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は短絡期間が長くなるにつれて減少するが長期的(7カ月以後)には大体  $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に落ち着くようである。したがって  $A_M/A_S \leq 1$  では  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (塩化物が存在するときのセメント硬化体中鋼材に必要なといわれる電気防食電流密度)に相当する防食電流の流入が期待できる。これに対して  $A_M/A_S > 1$  では  $I_{MD} \propto k (A_M/A_S)^{-1}$  の関係があるので  $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  より次第に減少して  $A_M/A_S = 2$  では  $I_{MD} = 0.5/2$ ,  $A_M/A_S = 4$  では  $I_{MD} = 0.5/4$  となる。(表103, 104, 図95, 97より) この結果セメント硬化体, 塩化ナトリウム1%溶液(攪拌), 塩化ナトリウム1%溶液飽和砂層の3層に鋼材が接するとき  $A_M/A_S \leq 1$  の条件ではセメント硬化体中鋼材は砂層中鋼材の犠牲電流によって丁度電気防食された恰好となる。一般に電気防食電流密度は時間の経過とともに次第に減少する傾向がある。たとえば流動海水中鋼材に電気防食を適用したときの防食所要電流密度は 図 175<sup>31)</sup> のようになる。図175によれば大体半年後で防食所要電流密度は初期電流密度の  $1/2$  となる。この減少割合をそのまま図97に適用すると3層の中のセメント硬化体中鋼材が砂層中鋼材よりの流入電流によって電気防食されることに相当する条件は  $A_M/A_S \leq 1$  が  $A_M/A_S \leq 2$  となる。

(6) (5)の傾向は(3)の3層のうちのセメント硬化体の練り水が水道水の代りに塩化ナトリウム1%溶液であっても成立する。(表103, 104, 図96, 98より)

(7) 鋼材がセメント硬化体, 海水(攪拌), 海水飽和砂層の3層に接するときにも(5), (6)の傾向は成立する。(表120, 121, 図123, 124, 125, 126より)

(8) 鋼材がセメント硬化体, 海水(静止), 海水飽和砂層の3層に接するときにも(5)の傾向が見られるが,  $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は短絡期間が半年以後では  $0.23 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に落ち着くようである。(表137, 138, 図148, 149より)

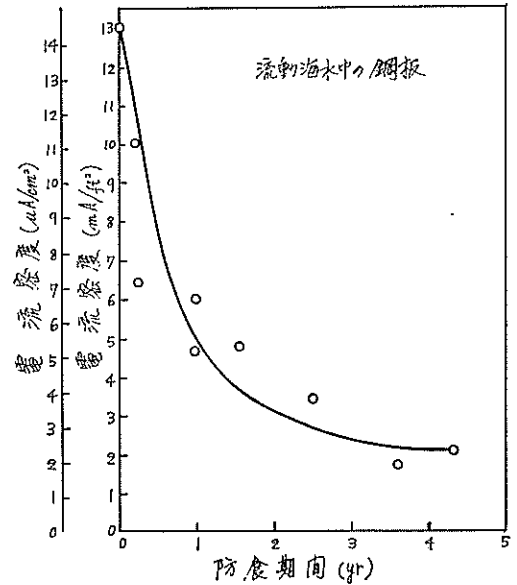


図 175 電気防食所要電流の時間的变化

したがって図 175 の防食所要電流密度~防食期間の関係を検討するとほぼ  $A_M/A_S \leq 1$  では3層中のセメント硬化体中鋼材は砂層中鋼材より流出する電流によって電気防食されたことに相当する。

(9) 鋼材がセメント硬化体, 水道水(流下), 水道水飽和砂層の3層に接するときにも(5)と同じ  $I_{MD} \sim A_M/A_S$  の関係が見られるが, 短絡期間が半年以降では  $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は  $0.03 \sim 0.04 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となる。(表153, 154, 図167, 168より) 塩化物が存在しないときのセメント硬化体中鋼材に対する防食所要電流密度は一般に  $0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ <sup>31)</sup> とされている。したがって図175の防食所要電流密度~防食期間の関係を適用すると3層のうちのセメント硬化体中鋼材は砂層中鋼材よりの犠牲電流の流入によって  $A_M/A_S \leq 1$  の条件のとき電気防食されることになる。

(10) 一方鋼材がセメント硬化体, 浸液(攪拌, 静止), 浸液飽和砂層の3層に接するときセメント硬化体中鋼材は  $A_M/A_S > 1$  の条件下では砂層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度は  $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  にくらべて次第に小さくなり  $A_M/A_S \gg 1$  の条件下ではセメント硬化体1層中の鋼材と同じ腐食条件となる。この傾向はセメント硬化体の練り水に関係なく成立する。(図97, 98, 125, 126, 149, 168より) したがって  $A_M/A_S \gg 1$  では必要に応じて適当な防食法の適用が望まれる。

(11) 鋼材がセメント硬化体, 浸液, 浸液飽和砂層の3

層に接するときのセメント硬化体中鋼材に流入する電流密度  $I_{wD}$  は長期間後には短絡時の値の $1/10$ またはそれ以下となる傾向がある。(表103, 104, 153, 154より)

㉒ 鋼材がセメント硬化体、塩化ナトリウム1%溶液(攪拌)、塩化ナトリウム1%溶液飽和砂層の3層に接するとき塩化ナトリウム1%溶液中鋼材に砂層中鋼材より流入する電流密度  $I_{swD}$  は短絡後次第に低下して半年以後では短絡時の  $I_{swD}$  の約 $1/10$ 、短絡後1%週位の  $I_{swD}$  の $1/2 \sim 1/3$ 程度となる。(表105, 106, 図99, 100, 101, 102より)

㉓ 塩化ナトリウム1%溶液(攪拌)中鋼材は  $A_{sw}/A_s \geq 1$  のときに発錆しやすい傾向がある。ただしこのときの発錆は部分的である。一方  $A_{sw}/A_s = 0.25 \sim 0.5$  のときには浸液中鋼材面には発錆は半年以後でも全く認められなかった。(図107より)

一方、浸液中鋼材の防食に必要な半年後の電流密度は初期(1週後位)の値の約 $1/2$ にあたる  $2 \sim 3 \mu A/cm^2$  程度ですむと考えられる。(表106より)

㉔ 鋼材がセメント硬化体、海水攪拌、海水(飽和)、砂層の3層に接するとき半年後の  $I_{swD}$  は  $A_{sw}/A_s < 1$  では1週後の値とほとんど変わらないようであるが、 $1 \leq A_{sw}/A_s \leq 2$  の範囲では1週後の値程度またはその $1/3$ 程度となる。さらに  $A_{sw}/A_s > 4$  では防食所要電流密度よりかなり  $I_{swD}$  は小さくなる。(表122, 123, 図127, 128, 129, 130より)

㉕ 海水(攪拌)中鋼材は  $A_{sw}/A_s$  が1より小さいほど発錆しにくい傾向がある。(図135より)

㉖ ㉔, ㉕の傾向は3層中のセメント硬化体(表面積  $A_M$  および練り水の種類)にはとくに関係なく成立すると思われる。(表105, 106, 図101, 102, 107, 表122, 123, 図129, 130, 135より)

㉗ 鋼材がセメント硬化体、海水(静止)、海水飽和砂層の3層に接するとき  $I_{swD}$  は短絡期間が40日頃までは流入しているが8カ月以後ではほとんど流入しなくなる。(ある場合には  $I_{swD}$  の符号が(-)すなわち流出することもある。)(表139, 140, 図150, 151より)これは上述の(8)の理由によるものと思われる。

㉘ 海水(静止)中鋼材は  $A_{sw}/A_s$  に関係なく発錆している。(図154より)したがってセメント硬化体、海水(静止)、海水飽和砂層の3層に鋼材が接するとき海水(静止)中鋼材は単独に鋼材を静止海水に浸漬したときと同じようなミクロ腐食の発生とセメント硬化体をカソードとするマクロ腐食のアノードにもなり得ることが予想される。

㉙ 鋼材がセメント硬化体、水道水(流下)、水道水飽和砂層の3層に接するとき  $I_{wD}$  は短絡後低下して安定

値に近づく。 $I_{wD}$  は  $A_w/A_s$  が小さくなるにつれて増加する傾向があるが短絡8カ月後の  $I_{wD}$  は短絡10日後の値の大体 $1/3$ となる。数値で示すと  $A_w/A_s = 1 \sim 4$  では  $I_{wD} = 1.1 \sim 1.7 \mu A/cm^2$ ,  $A_w/A_s = 0.5 \sim 0.25$  では  $I_{wD} = 2.2 \sim 3.2 \mu A/cm^2$  に落着くようである。(表155, 156, 図169, 170より)

㉚ 水道水(流下)中鋼材は  $A_w/A_s$  が1より大きいほど発錆しやすくなる傾向がある。 $A_w/A_s \leq 2$  では流下水道水中鋼材は開路の場合を除いて発錆せず最初の研摩面がきれいに保たれている。(図173より) (9)の電位傾向を参照するとこのように流下水道水中鋼材が砂層中鋼材に対して  $A_w/A_s \leq 2$  では十分カソードとなって防食されることが理解できる。

㉛ 鋼材がセメント硬化体、塩化ナトリウム1%溶液(攪拌)、塩化ナトリウム1%溶液飽和砂層の3層に接するとき、マクロ腐食電池のアノードとして溶解する砂層中鋼材の肉厚減少量  $C_s$  (mm/yr) と  $A_{sw}/A_s$  との間に  $C_s \propto k \cdot A_{sw}/A_s$  の関係があるが長期的には  $A_{sw}/A_s < 1$  のところに限られる。 $A_{sw}/A_s = 1$  のときの  $C_s$  は半年以後では  $0.02$  mm/yr 付近である。(表109, 図105より)

㉜ ㉛の傾向は  $A_{sw}/A_s < 1$  のとき3層のうちの1つであるセメント硬化体(表面積、練り水の種類)には関係なく成立するようである。(図105, 106より)

㉝ 鋼材がセメント硬化体、海水(攪拌)、海水飽和砂層の3層に接するとき、㉛と同じく砂層中鋼材のマクロ腐食電池のアノードとしての肉厚減少量  $C_s$  (mm/yr) と  $A_{sw}/A_s$  との間には  $C_s \propto k \cdot A_{sw}/A_s$  の関係が見られるが  $A_{sw}/A_s \approx 4$  のときこのような比例関係からはずれようである。また  $A_{sw}/A_s = 1$  のときの  $C_s$  は短絡期間が半年以後では  $0.04$  mm/yr 付近となる。(表126, 図133より)

㉞ ㉝の傾向は  $A_{sw}/A_s < 1$  のとき3層のうちの1つであるセメント硬化体(表面積、練り水の種類)には関係なく成立するようである。(図133, 134より)

㉟ 鋼材がセメント硬化体、海水(静止)、海水飽和砂層の3層に接するとき砂層鋼材のマクロ腐食電池のアノードとしての肉厚減少量  $C_s$  (mm/yr) は  $A_{sw}/A_s$  に対していろいろ変った関係を示す。すなわち短絡期間が40日位までは  $A_{sw}/A_s \leq 1$  では  $C_s \propto k \cdot A_{sw}/A_s$  の関係がうかがわれるが  $A_{sw}/A_s > 1$  では  $C_s \approx \text{const}$  の傾向を示す。また  $A_{sw}/A_s = 1$  のときの  $C_s$  は  $0.02 \sim 0.04$  mm/yr である。しかし短絡期間が8カ月以上ではむしろ  $C_s \sim A_{sw}/A_s$  間にはとくに関係はなさそうであり  $A_{sw}/A_s = 1$  のときの  $C_s$  も1桁ほど小さくなる。(表143, 図153より)このような傾向は海水が静止状態であった



浸液の種類	攪拌状態	発錆しなかった $A_{SW}/A_S$ (または $A_W/A_S$ )	発錆しない鋼材部分 の表面状態
塩化ナトリウム1%溶液	8時間攪拌16時間静止	$\leq 0.5$	白色石灰質被膜
海水	"	$\leq 0.25$	"
海水	静止	(常に発錆)	"
水道水	静かに流下	$\leq 0.5$	研磨面

(図 107, 135, 154, 173 より)

めに次第に海水中鋼材表面への酸素拡散速度が低下して  $E_{SW} \approx E_S$  となって(8), (9)のようにマクロ腐食電池の発生が阻害されてくるためと思われる。

(8) 鋼材がセメント硬化体、水道水(流下)、水道水飽和砂層の3層に接するとき砂層中鋼材のマクロ腐食電池のアノードとしての肉厚減少量  $C_S$ (mm/yr)は  $A_W/A_S$  に対して  $C_S \propto k \cdot A_W/A_S$  の関係がある。 $A_W/A_S=1$  のとき半年以後では  $0.02 \sim 0.04$  mm/yr 付近となる。(表 159, 図172より)浸液が流下水道水の場合ほとくに  $A_W/A_S > 1$  では砂層中鋼材のマクロ腐食による侵食が大きくなる恐れがある。

(9) セメント硬化体、浸液、浸液飽和砂層の3層に鋼材が接するとき砂層中鋼材は他の2層中鋼材に対してアノードとなって溶出する傾向がある。しかし  $R_s^0$  (砂層中鋼材の抵抗)  $\sim A_M, A_{SW}, A_S$  との関係はあまりとり出せないようである。(表114', 131', 147' より)

(9) 一方  $R_M^0$  ( $\Omega$ ) は  $A_M/A_S$  が小さいほど、すなわち  $I_{MD}$  の大きいほど大きくなる傾向の見受けられる場合がある。(表131', 147' より)

(9) 3層のうちの1つである浸液中の鋼材の発錆傾向は浸液の種類および攪拌状態、浸液中鋼材表面積と砂層中鋼材表面積の比によって異なり上に示すような傾向がある。

(10)  $E_M, E_{SW}, E_W$  が開路後に貴の安定電位に達するまでの所要時間の順序は  $E_M$  の到達する時間  $> E_{SW}$  の到達する時間  $> E_W$  の到達する時間のようにである。(図 83~94, 111~122, 158~166より)

このような傾向は鋼材表面の被覆層の厚さなどによるものと思われる。すなわちカソード鋼材面には電流の流入によってカソード分極反応がおこるが流入電流の中止後カソード分極が消滅するまでの時間は被覆層(流入電流密度および流入時間による生成被覆層も含めて)の性質に支配されるのではないかと考えられる。

(11)  $E_M, E_{SW}, E_W$  が開路後到達する値はセメント硬化体中鋼材がもっとも貴であるとは限らず  $E_W$  は  $-50$  mV のように貴な値を示している。(図158~166より)本実験例にかぎらず自然環境中で発生するマクロ腐食電池のカソード電位も開路後次第に貴の値となり  $-100$

mV や  $-200$  mV となる。<sup>1)</sup> したがってこのような測定されたカソード電位は見掛けのカソード電位の値であって開路後カソード電位が近づく値は真のカソード電位ではないかと思われる。

(12) (1)~(11)の傾向は3層のうちの1層が浸液飽和砂層のときに限らず文献1に示す実験結果から浸液飽和泥層全般についていえることは容易にうなづける。

(13) 以上に示した腐食速度(mm/yr)は測定電流値より算出した値であるから重量減量より算出した腐食速度に比らべるとその約1/3となっていることに留意する必要がある。このことはやはり上に示した電流値( $\mu A$  または  $\mu A/cm^2$ )についてもいえよう。

### 3.7 セメント硬化体による防食効果

以上の検討により2層または3層のときのセメント硬化体中鋼材はセメント硬化体1層中鋼材よりも防食上一層有利な条件におかれることがわかった。すなわちセメント硬化体1層の場合にはもっぱらセメント硬化体被覆の均一性、密実性に頼っているが、2層または3層の場合はセメント硬化体被覆の上をさらに電気防食している恰好である。したがって多層のときのセメント硬化体中鋼材の防食傾向をもう少しはっきりさせるために電気防食したときのセメント硬化体中鋼材と防食性を比較してみることにした。

#### 実験23 セメント硬化体中鋼材の電位変化

##### 供試体

実験19の No. e, e' j のセメント硬化体中鋼材および実験20~22のセメント硬化体中鋼材を使用した。

##### 測定

まず実験19の No. e (短絡, 練り水:水道水), No. e' (短絡, 練り水:海水), No. j (開路, 練り水:水道水)について次の測定を行なった。短絡期間が200日の No. e, No. e' を開路としたときのセメント硬化体中鋼材について  $E_M$  の経時変化を測定した。またこれと平行して No. j のセメント硬化体中鋼材に  $A_I$  陽極より電流を流していわゆる電気防食をする。このときあらかじめ開路のときの  $E_M$  を測定しておき防食電流を流し始めると防食電

流密度に対応する  $E_M$  を測定して行った。 $E_M$  が防食電位付近に達した後開路としたときの  $E_M$  の経時変化を測定した。

次に実験20~22のセメント硬化体中鋼材について短絡期間が240日位で開路としたときの  $E_M$  の経時変化を測定した。

電位は海水塩化銀電極に対する値として電位計 (Dual Meter) で測定した。電位の単位は  $-mV$  である。電流は D. C. 電流計で測定し、単位は  $\mu A$  または  $\mu A/cm^2$  である。

#### 測定結果および考察

No. j に防食電流を与えて行ったときの  $E_M$  の変化は表 164 のようになる。 $E_M$  が  $-755 mV$  になってから開路としたときの  $E_M$  の経時変化を表 165 に示す。また No. e の開路後の  $E_M$  変化を表 166 に、No. e' の開路後の  $E_M$  変化を表 167 に示す。表 164, 165, 166, 167 より No. j, e, e' の  $E_M$  の変化模様を図示してみると図 176 のようになる。すなわち開路の状態でも200日間海水中に浸漬していたセメント硬化体中鋼材 (No. j) に防食電流を流入するとき図 176 に示すように分極をおこして次第に  $E_M$  は卑となる。 $E_M$  が  $-170 mV$  から低下して  $-755 mV$  になったところで防食電流の流入を中止すると  $E_M$  は次第に貴の方に移行して行き開路後100分位で  $-350 mV$  程度となり100分~500分の間は僅か  $20 mV$  位しか回復しない。しかし開路後500分頃から  $E_M$  は貴の方に移し始め1,000分頃までにはほぼ初期の電位  $-170 mV$  程度に達する。1,000分以後は  $-170 \sim -168 mV$  に

表 164 セメント硬化体中鋼材 (No. j) の防食電位  
(海水塩化銀電極基準)

防食電流 ( $\mu A$ )	防食電流密度 ( $\mu A/cm^2$ )	$E_M$ ( $-mV$ )	同一電流密度に保った時間 (min)
0	0	170	(海水中 200 day)
3	0.250	210	6
4	0.333	227	4
4.8	0.400	290	25
5.7	0.475	390	11
6.55	0.546	392	16
8.1	0.675	440	7
10.4	0.867	553	15
14.1	1.175	630	15
22.5	1.875	690	18
26	2.167	715	22
29.9	2.492	746	15
30.5	2.542	755	24

落ち着く。

このとき電気防食電流を No. j に流し始めてから中止するまでの時間は大体3時間程度である。次に短絡期間が200日位すなわち電気防食を200日位行なったことに相当するときは No. e, e' のように100分位で  $-350 mV$  まで回復するとそれから4,000分位まではほとんど電位は変化しない。4,000分以後  $E_M$  はさらに貴の方に移り始

表 165 No. j (実験19) の  $E_M$  変化  
(海水塩化銀電極基準)

開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )	開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )	開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )
0	755	90	346	10,080	168
1/3	600	120	353	11,520	170
1/2	550	160	350	12,960	168
1	500	245	341	14,400	168
1.5	465	435	331	15,840	169
2	450	500	330	17,280	168
3	430	1,185	185	18,720	175
4	425	1,415	182	20,160	162
5	418	1,690	181	21,000	163
10	397	2,692	178	24,480	169
15	390	4,123	174	25,920	168
20	382	4,603	168	27,360	168
25	378	5,760	170	28,800	168
30	372	7,200	170	36,000	167
60	362	9,300	168		

表 166 No. e (実験19) の  $E_M$  変化  
(海水塩化銀電極基準)

開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )	開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )	開路時間 (min)	$E_M$ ( $-mV$ )
0	687	60	363	18,570	232
1/6	670	95	350	11,520	225
1/3	670	145	330	12,960	220
3/4	662	200	320	14,400	212
1	652	390	327	15,840	204
2	628	1,142	330	17,280	200
3	602	1,322	331	18,720	200
4	582	1,592	332	20,160	180
5	562	2,594	330	21,600	170
10	500	4,030	320	24,480	159
15	471	4,510	309	25,920	159
20	441	5,530	289	27,360	152
25	421	6,910	268	28,800	152
30	408	9,070	240	36,000	150

めて30,000分位で安定となるようである。ここで一つ注目すべきことは最終安定電位の値である。いま No. e, e', j の条件と安定電位を比較してみると次のようになる。

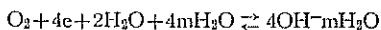
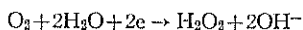
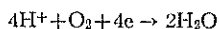
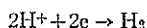
No.	$E_M(0 \text{ day})$	$E_M(193 \text{ day})$	$E_O(193 \text{ day})$	$E_M(193 \text{ day})$
e	-232 mV		-700 mV	-150 mV
e'	-320 mV		-700 mV	-167 mV
j	-250 mV	-170 mV*	-755 mV**	-167 mV

\* 電気防食前の開路電位

\*\* 電気防食電位

すなわち No. e, e' の安定電位は練り水の種類に関係なくどちらも-160 mV 付近となっている。-160 mV は  $E_M(0 \text{ 日})$  にくらべると貴な値となっているが No. j の  $E_M(0 \text{ 日})$  と  $E_M(193 \text{ 日}^*)$  を参照するとこのような傾向のあることがうかがわれよう。

一方-170 mV の安定電位となっている No. j に防食電流を与えて  $E_M$  を-170 mV から -755 mV まで下げた後開路とすると  $E_M$  は再び防食する前の電位-170 mV に戻る。一般に電流が流入する鋼材面では次のような反応がおけるといわれている<sup>33)</sup>。



要するに鋼材面では電子を受領して陽イオンの電荷を中和し、あるいは陰イオンが生成されることになる。したがって水素イオンの電荷放出は水酸イオンの相対的

表 167 No. e' (実験19) の  $E_M$  変化  
(海水塩化銀電極基準)

開路時間 (min)	$E_M$ (-mV)	開路時間 (min)	$E_M$ (-mV)	開路時間 (min)	$E_M$ (-mV)
0	703	140	358	12,990	200
1/3	690	195	350	14,400	192
1	685	325	355	15,840	188
2	670	397	358	17,280	181
3	662	1,147	360	18,720	187
4	652	1,327	362	20,160	178
5	638	2,600	368	21,600	178
10	588	4,030	362	24,480	172
15	548	4,510	350	25,920	172
20	520	5,530	342	27,360	169
25	498	5,910	350	28,800	167
30	478	9,070	232	36,000	166
60	400	10,570	220		
90	378	11,520	205		

濃密化をもたらし、また水酸イオンが生成することによって結局は防食電流の流入により被防食鋼材面付近のアルカリ性が増加する。このため No. j のように電気防食を適用したセメント硬化体中鋼材の電位が防食電流の流入が中止されると次第に最初の貴な電位に戻って行く現象は防食電流によるアルカリ性の増加によって十分腐食に対して不活域に保たれており、またこれが永続化されることを示すものと考えられる。また図 176 の No. j の

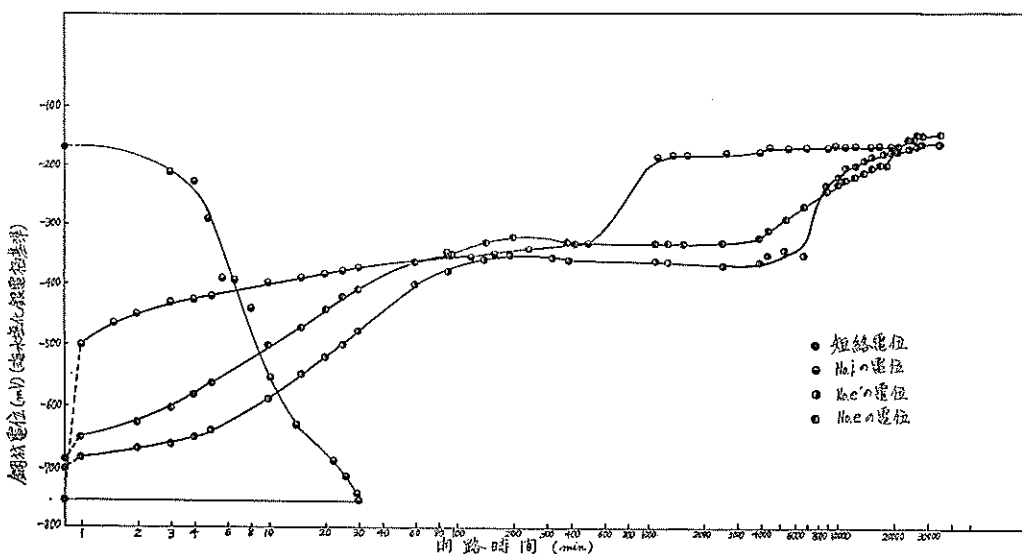


図 176 セメント硬化体中鋼材の電位変化

防食電位からわかるように防食電流の流入によって  $E_M$  が低下する。これは電気防食の原理である被防食鋼材面の電位差をなくする作用による。この結果電流が流入するセメント硬化体中鋼材は防食電流密度に相当する分極作用のためにセメント硬化体1層のときにいろいろの原

因から発生することが予想される電位差がなくなることが期待できる。

次に実験 20~22の  $E_M$  変化を測定してみると表 168 ~170 の通りである。

表 168 実験 20 の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期間 234 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準) (1)

No.	$E_M$ (0day)	$E_0$	$E_M$											
			7min	10min	15min	20min	25min	30min	40min	1 hr	1.8 hr	2.3 hr	3.3 hr	5.3 hr
a	230	690	620	610	570	568	535	520	515	486	452	430	397	378
b	228	680	575	555	530	510	475	460	446	400	362	352	351	358
c	258	680	670	665	650	640	620	615	590	578	532	500	433	385
d	232	680	475	450	410	395	375	355	355	340	336	336	331	330
e	278	675	400	380	376	350	335	330	330	340	352	350	347	348
f	242	680	534	510	480	470	455	450	450	450	440	440	415	420
g	254	680	675	660	640	635	620	610	590	582	554	536	479	425
h	270	680	700	700	695	695	690	690	685	680	670	660	626	601
i	248	680	555	535	495	475	650	430	405	370	335	340	342	340
j	208	475												
d'	228	660	480	450	405	480	360	350	346	346	346	360	363	369
e'	408	680	625	600	560	540	520	510	498	450	395	380	356	345
f'	468	680	635	615	585	570	550	540	536	510	470	482	441	407
j'	242	580												

表 168 実験 20 の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期間 242 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準) (2)

No.	$E_M$												
	24 hr	53 hr	96 hr	125 hr	150 hr	171 hr	193 hr	216 hr	265 hr	288 hr	336 hr	408 hr	480 hr
a	388	385	390	386	372	423	400	408	380	390	375	434	396
b	372	358	342	246	207	199	196	198	195	190	192	194	205
c	382	376	376	365	366	349	356	370	355	354	350	450	372
d	246	305	475	470	440	455	380	486	476	466	478	480	498
e	336	298	294	275	275	268	270	278	276	285	284	288	306
f	398	450	448	440	425	423	424	418	424	424	418	426	442
g	382	377	374	366	356	350	359	364	361	360	356	356	380
h	392	382	378	368	365	355	363	370	369	366	360	368	392
i	452	448	456	434	418	406	410	410	395	386	375	358	498
j													
d'	375	346	266	230	227	226	229	260	251	225	225	230	205
e'	366	346	350	325	305	230	482	496	490	518	510	512	
f'	422	422	438	412	411	406	414	402	395	340	412	414	370
j'													

表 169 実験 21 の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期間 242 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準) (1)

No.	$E_M$ (0日)	$E_0$	$E_M$									
			1 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	1 hr	1.7 hr	3.5 hr	4.7 hr
a	238	660	650	620	615	600	600	580	565	540	510	495
b	238	670	660	650	650	640	645	630	620	600	455	525
c	330	640	640	605	580	550	540	500	440	415	400	380
d	250	660	640	600	570	540	525	485	420	390	380	375
e	280	650	640	595	570	550	540	505	460	440	410	400
f	244	630	625	600	585	570	560	540	500	465	420	400
g	310	660	625	560	515	485	480	445	420	410	390	380
h	240	645	630	595	555	530	515	480	425	415	385	380
i	394	640	630	590	550	520	510	475	425	415	400	390
j	312	490										

表 169 実験 21 の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期間 242 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準) (2)

No.	$E_M$										
	21 hr	52 hr	77 hr	98 hr	122 hr	144 hr	194 hr	226 hr	264 hr	336 hr	408 hr
a	480	440	411	402	406	418	402	396	392	395	420
b	428	400	386	380	384	395	384	380	370	362	238
c	405	385	358	327	275	256	246	236	238	227	240
d	380	262	238	226	226	256	221	220	214	214	225
e	410	400	382	373	379	380	323	290	250	224	225
f	420	415	391	385	391	398	390	385	385	388	410
g	388	344	299	260	249	242	225	214	212	210	225
h	390	384	363	350	331	330	330	290	272	200	208
i	400	385	359	335	310	290	244	230	215	204	210
j											

表 170 実験 22 の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期間 242 day) (-mV) (海水塩化銀電極基準) (1)

No.	$E_M$ (0日)	$E_0$	$E_M$								
			1 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	1 hr	1.7 hr	2.8 hr
a	170	640	620	625	615	610	600	580	570	550	515
b	200	685	670	670	660	650	640	615	585	560	505
c	250	670	670	660	650	640	630	600	580	550	500
d	190	700	670	680	660	650	640	610	580	560	515
e	170	690	665	675	650	630	615	570	520	500	450
f	160	680		650	605	580	550	510	445	400	350
g	178	660		635	605	595	580	540	495	470	410
h	200	685		665	635	615	595	550	500	480	420
i	214	675		660	635	625	610	575	525	500	440
j	194	128									

表 170 実験22の開路後の  $E_M$  変化 (短絡期 242 day) (-mV) (間海水塩化銀電極基準) (2)

No.	$E_M$									
	20 hr	46 hr	70 hr	96 hr	144 hr	192 hr	216 hr	264 hr	336 hr	408 hr
a	395	380	340	300	314	256	240	225	220	145
b	390	380	370	350	354	237	325	305	288	188
c	390		373	367	350	284	236	196	160	274
d	400	354	340	317	326	281	276	376	258	320
e	360	330	310	317	244	151	148	138	138	260
f	335	345	343	291	314	165	165	160	156	212
g	375	380	313	314	294	243	232	230	240	205
h	364	340	343	335	358	253	230	206	192	198
i	368	342	332	318	340	290	282	256	234	208
j						100	100	112	110	

表 171 短絡, 開路電位の比較 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

No.	$A_M/A_S$	実 験 20			実 験 21			実 験 22		
		$E_M^0$	$E_0$	$E_M^{334}$	$E_M^0$	$E_0$	$E_M^{334}$	$E_M^0$	$E_0$	$E_M^{334}$
a	4	230	690	378	238	660	395	170	640	145
b	4	228	680	190	238	670	238	200	685	188
c	2	258	680	350	330	640	227	250	670	160
d	2	232	680	246	250	660	214	190	700	258
e	1	278	765	268	280	650	224	170	690	138
f	0.5	242	680	398	244	630	385	160	680	156
g	0.5	254	680	350	310	660	210	178	660	205
h	0.25	270	680	355	240	645	200	200	685	192
i	0.25	248	680	335	394	640	204	214	675	208
j	1	208	475		312	490		194	100	
d'	2	228	660	225						
e'	1	408	680	230						
f'	0.5	368	680	340						
j'	1	242	580							

$E_M^0$ : 浸液時のセメント硬化体中鋼材電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

$E_0$ : 浸液後 234 day 後の短絡電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

$E_M^{334}$ : 浸液後 234 day に開路として 408 hr 経過するまでに最も貴なセメント硬化体中鋼材電位 (-mV) (海水塩化銀電極基準)

表168~170より比較をする便宜上浸液時(すなわち短絡前)のセメント硬化体中鋼材の電位および短絡期間が234日ときの短絡電位と開路としてから408時間後のセメント硬化体中鋼材の電位を示すと表171のようになる。表171に示すNo. j, j'は短絡されないで開路のまま浸液されていたセメント硬化体中鋼材である。ただし

No. j のセメント硬化体の練り水は水道水であるが No. j' の練り水は海水である。また実験20と実験21の供試体の浸液は海水であるが実験22の浸液は水道水である。いま鋼材の防食がセメント被覆のみによる場合の鋼材の電位変化を No. j および No. j' について眺めてみると次のようになる。すなわち

実験番号	練り水	浸液	浸液時の鋼材電位	浸液234日後の鋼材電位
20	水道水	海水	-208 mV	-475 mV
21	水道水	海水	-312 mV	-490 mV
22	水道水	水道水	-194 mV	-128 mV
20	海水	海水	-242 mV	-580 mV

以上のように練り水または浸液が海水のときにはセメント硬化体中鋼材の電位は -500 mV 付近となり、とくに練り水が海水のときには -580 mV となっている。これに対して練り水も浸液もどちらも水道水の場合は234日浸液後では -100 mV のように非常に貴の値を保っている。No. j, No. j' の最小かぶりは 1.5 cm であるが海水の存在はセメント硬化体1層中鋼材の発錆作用を助長すると思われる。

次は表171より234日間短絡したセメント硬化体中鋼材の開路後の電位として開路408時間までに最も貴な電位を示すと次のようになる。

実験番号	練り水	浸液	234日間短絡したときの最も貴な開路電位
20	水道水	海水	-190~-398 mV
21	水道水	海水	-200~-395 mV
22	水道水	水道水	-138~-258 mV
20	海水	海水	-225~-340 mV

以上のように短絡されていた(すなわちマクロ腐食電流が流入していた)セメント硬化体中鋼材の電位は回路を開路とすると(すなわちマクロ腐食電流の流入が停止すると) -400 mV より貴な電位となる。この傾向をセメント硬化体1層中鋼材電位の経日変化と比較すると多層のときのセメント硬化体中鋼材はセメント硬化体1層中鋼材より防食上非常に有利であることがわかる。この結果例えばスプラッシュゾーンのように腐食が激しい鋼材部分だけをセメント硬化体で被覆するようなセメント硬化体の使い方は施工がそれほどむづかしくない場合には効果のある防食法の一つであるといえよう。

#### 4. 結 び

本報の結論としては次のことがいえよう。

[A] 水酸化カルシウム溶液中の鋼材腐食傾向

(1) 水酸化カルシウム飽和溶液中では溶媒が水道水であっても海水であっても鋼材に発錆は認められない。このときの鋼材電位(海水塩化銀電極基準)は溶媒が水道水するとき -100~-200 mV 程度、溶媒が海水のとき -300~-400 mV 程度のようにかなり貴の値を示しており、Pourbaixなどが述べている不働態域に収まっていることがうかがわれる。しかし塩化物(Cl<sup>-</sup>)の存在によって

電位が低下することが確かめられたことや、pH 値の低下、不働態域で発生する保護被膜の侵食作用や陽極減作用などが指摘されているため水酸化カルシウム飽和溶液中の Cl<sup>-</sup> は鋼材防食上好ましくない成分と考えられる。

(2) 水酸化カルシウム不飽和溶液中では鋼材は発錆する傾向がある。発錆したときの鋼材電位(海水塩化銀電極基準)は発錆が認められないときの鋼材電位より卑となり一つの目安としての -500 mV より卑であった。

[B] セメント硬化体1層中鋼材の腐食傾向

(1) 鋼材がセメント硬化体1層で包まれた場合は[A](1)(2)と同じ鋼材発錆傾向と電位の関係が成立する。

(2) したがって鋼材電位の測定によってセメント硬化体中鋼材の発錆の有無を外部から検出できる。

(3) セメント硬化体の練り水に塩化物(Cl<sup>-</sup>)が存在することは[A](1)の理由からやはり好ましくないようである。

(4) セメント硬化体中鋼材はいろいろな原因にもとづいて電位差を生ずる可能性があるので電位差を発生、助長させる一切の不均一性は避けなければならない。したがってセメント硬化体1層内の不働態状態は必ずしも安定ではなく、このため完全を期すには何らかの対策を必要とする。

[C] セメント硬化体、海水(または海水飽和泥層)の2層に接するときの鋼材腐食傾向

(1) 2層のときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向はセメント硬化体1層中鋼材の腐食傾向と異なる。

(2) すなわち2層のときのセメント硬化体中鋼材は他の1層(海水または海水飽和泥層)中鋼材に対して常にカソード(陰極)となる。

(3) 陽極となる他の1層(海水または海水飽和泥層)中鋼材よりセメント硬化体中鋼材(陰極)に流入する電流量  $I_{MD}$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) はセメント硬化体中鋼材の表面積対他の1層中鋼材の表面積比 ( $A_M/A_{SW}$  または  $A_M/A_S$ ) が1または1以下のとき  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ ) = 1 のときの電流値である  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近に一定となる。この値は塩化物が存在するときのセメント硬化体中鋼材に対する電気防食所要電流密度に相当する。したがって  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ )  $\leq 1$  のときセメント硬化体中鋼材は丁度適切な電気防食をされた恰好となる。

(4) これに対して  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ )  $> 1$  のときは  $I_{MD} \propto k(A_M/A_{SW})^{-1}$  または  $I_{MD} \propto k(A_M/A_S)^{-1}$  の関係が成立する。このため  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ )  $> 1$  では次第に  $I_{MD}$  が減少して行くためにセメント硬化体中鋼材はセメント硬化体1層中鋼材と同じ腐食条件に近づく。

(5) とくに  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ )  $\gg 1$  のときはセメント硬化体1層中鋼材の一部がセメント硬化体のひび割れなどによって直接他の1層(海水または海水飽和泥層)に触れた場合に相当する。このときセメント硬化体中鋼材は[C](4)の状態となる。他の1層(海水または海水飽和泥層)中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に流出する電流量を腐食速度に換算すると  $A_M/A_{SW}$  (または  $A_M/A_S$ ) = 1 のとき  $0.02 \sim 0.03$  mm/yr となる。

したがって海水中鋼材のマイクロ腐食速度が  $0.1 \sim 0.15$  mm/yr であることから2層(セメント硬化体と海水)のときの海水中鋼材の腐食はほとんどマイクロ腐食とみなされる。

(6) このため鋼製構造物の一部にセメント硬化体被覆を適用する場合セメント硬化体で被覆しない裸鋼材部分に対しては何らかの防食法を適用することが必要である。

[D] セメント硬化体、浸液(海水または水道水)、浸液飽和泥層の3層に接するときの鋼材腐食傾向

(1) 3層のときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向はセメント硬化体1層中の鋼材の腐食傾向と異なり2層のときのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向に似ている。

(2) すなわち3層のときのセメント硬化体中鋼材は浸液飽和泥層中鋼材に対して常にカソード(陰極)となる。

(ただし浸液が静止海水の場合浸液中鋼材もセメント硬化体中鋼材に対してアノード(陽極)となることがある。)

(3) また浸液中鋼材も浸液飽和泥層中鋼材に対してカソードとなる傾向があるがこのような傾向は浸液が流動しているとほど大きい。浸液の流動が8時間攪拌で16時間静止の繰り返しまたは水道水の少量づつの流下程度るとき浸液中鋼材の発錆傾向は浸液中鋼材表面積対浸液飽和泥層中鋼材の表面積の比 ( $A_{SW}/A_S$  または  $A_W/A_S$ ) が1より小さくなるにつれて減少する。すなわち  $A_{SW}/A_S$  (または  $A_W/A_S$ ) = 0.25 では全く発錆が認められずまた  $A_{SW}/A_S$  = 0.5 のときは発錆が認められた場合もあるが、 $A_{SW}/A_S > 1$  となるにつれて次第に発錆しやすくなり、また発錆はほとんど全面的となる。

(4) しかし浸液が静止状態のときは  $A_{SW}/A_S$  または  $A_W/A_S$  の大小に関係なく浸液中鋼材は常に全面的に発錆する。

(5) 一方セメント硬化体中鋼材に浸液飽和泥層中鋼材より流入する電流量  $I_{MD}$  は  $A_M/A_S = 1$  のときの値にほぼ一定となる。 $A_M/A_S = 1$  のときの  $I_{MD}$  は  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  付近となるため3層のときのセメント硬化体中鋼材は2層のときと同じく、丁度適切な電気防食をされたことに相当する。浸液が水道水(流下)のときは  $A_M/A_S = 1$

のときの  $I_{MD} = 0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (塩化物を含まないときのセメント硬化体中鋼材に対する電気防食所要電流密度)の  $1 \sim 1/2$  倍となる。(ただし浸液が静止海水のときは  $I_{MD} = 0.45 \times 1 \sim 1/2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  となるが電気防食所要電流量は防食期間が長くなるにつれて通常  $1/2 \sim 1/3$  に減少することを考えると  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の  $1/2$  でも長期的には十分であり、このことは浸漬が水道水の場合にもいえる。このような傾向は3層のうちの浸液中鋼材の表面積および発錆の有無にはとくに関係ない。

(6)  $A_M/A_S > 1$  のときは  $I_{MD} \propto k \cdot (A_M/A_S)^{-1}$  の関係が2層のときと同様に成立するが、この関係は3層のうちの浸液中鋼材の表面積および発錆の有無にかかわらず成立する。

一方  $A_M/A_S \gg 1$  では次第にセメント硬化体1層中鋼材の腐食条件に近づく。

(7) 3層のとき浸液飽和泥層中鋼材は常にセメント硬化体中鋼材に対してアノードとなりまた浸液が流動状態にあるときは浸液中鋼材に対してもアノードとなるため3層間に発生するマクロ腐食による侵食カ所となる。浸液が流動している場合  $I_{SWD}$  (または  $I_{WD}$ )  $\gg I_{MD}$  であるため泥層中鋼材のマクロ腐食による肉厚減少量  $C_S$  (mm/yr) はもっぱら  $A_{SW}/A_S$  (または  $A_W/A_S$ ) の影響を受け両者間には  $C_S \propto k \cdot A_{SW}/A_S$  (または  $C_S \propto k \cdot A_W/A_S$ ) の関係がある。 $A_{SW}/A_S$  (または  $A_W/A_S$ ) = 1 のときの  $C_S$  は長期間では  $0.04 \sim 0.08$  mm/yr (重量減量より算出した値) 付近に落ち着くと思われる。しかし3層のうちの1層が海水であるときは浸漬初期は上の比例関係が成立するが次第にこの比例関係は  $A_{SW}/A_S > 1$  では成立しなくなりついには  $A_{SW}/A_S < 1$  のときのみ成立する傾向がある。また浸液(海水または水道水)が静止状態のときは  $I_{SWD}$  (または  $I_{WD}) = 0$  となるため  $C_S$  は非常に小さくなり泥層中および浸漬中鋼材の腐食速度はほぼ両層それぞれにおけるマイクロ腐食速度となる。

(8) (1)~(7)の傾向は  $A_{SW}/A_S$  (または  $A_W/A_S$ )  $< 1$  のとき3層のうちの1つであるセメント硬化体の練り水が塩化ナトリウム1%溶液および海水のときにも見られる。

(9) 3層のときのセメント硬化体中鋼材は2層のときのセメント硬化体中鋼材と同じく  $A_M/A_S \leq 1$  の条件では十分永続的に防食されることが期待できるが、このために犠牲電流を流出する泥層中鋼材ならびに溶液中鋼材(溶液が流動している場合は  $A_{SW}/A_S$  または  $A_W/A_S > 0.25 \sim 0.5$  溶液が静止している場合は  $A_{SW}/A_S$  または  $A_W/A_S$  に関係なく)が侵食部であることを留意しておくことが必要である。

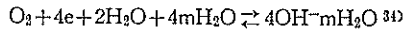


(4) [C], [D]に示す電流値より求めた腐食速度は重量減量より求めた腐食速度の約 $1/2$ に相当した。

[E] 港湾における鋼製構造物のスブラッシュゾーンをセメント硬化体で被覆したときの防食効果

(1) スブラッシュゾーンにさらされる鋼材部分をセメント硬化体で包むとき、セメント硬化体が湿っておれば  $A_M/A_S \leq 1$  の条件では [D] で述べたように海底泥層中鋼材よりセメント硬化体中鋼材に電気防食所要電流量 ( $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) に相当する電流が流入する。このときセメント硬化体中鋼材表面においては流入電流量に相当する電極反応がおこる。

すなわち



この反応で生成する  $\text{OH}^-$  のためにセメント硬化体中鋼材の表面付近のアルカリ性は増加するので鋼材は長期間十分に不働態域に保たれることになる。また流入電流量に相当したカソード分極がセメント硬化体中鋼材表面におこり  $E_0$  (短絡電位) が  $-650 \sim -700 \text{ mV}$  (海水塩化銀電極基準) となるためセメント硬化体1層中鋼材につきまとう不均一性にもとづく電位差が解消できる。これに対して港湾における鋼製構造物では普通  $A_M/A_S \leq 1$  (岸壁タイプのように裏込め泥層がある場合は残留水位以下の泥層中鋼材の表面積は海底泥層中鋼材表面に等しいと見なす) であるからスブラッシュゾーンにさらされる鋼材部分をセメント硬化体で包むことは防食上有効であると思われる。また波しぶきをあまりかぶらないセメント硬化体中鋼材には電流の流入が期待できなくなるがその反面乾くにつれて鋼材電位は一層貴に保されるために腐食の心配はない。

(2) 流入電流量により電気防食効果が期待できる反面流入電流量によるセメント硬化体と鋼材との付着強度の低下がまず懸念される。これに対して J. Franquin<sup>26)</sup> が示している防食電流密度と付着強度の低下の関係は次の通りである。

防食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	付着強度の低下状況
2~20	付着強度は弱められる
20~200	30%低下する
>200	セメント硬化体被覆がはく落する

$A_M/A_S \leq 1$  のときの  $I_{MD}$  は [D] で示したように  $0.45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の  $1 \sim 1/2$  程度であるから J. Franquin の実験結果を参照すれば付着強度低下の恐れはないと考えられる。

(3) スブラッシュゾーンは施工地点によっては波でたたかれるところである。したがって波や接触などによる機械的作用でセメント硬化体が鋼材からはがされない

よう施工上留意することが必要である。

(4) また防食電流がセメント硬化体中鋼材に入るための回路を確保することが必要である。しかし現在の鋼製構造物の上部を覆っているセメント硬化体の下端はまちまちである場合は M. W. L. と L. W. L. 間、またある場合は H. W. L. より 1 m ほど上までしかない。このためいまセメント硬化体の下端を L. W. L. 付近まで下げるならば [D] に述べた理由により十分な長期防食効果が期待できる。

(5) 海水面下の防食に電気防食法を適用する場合セメント硬化体との併用性が問題となる。しかし検討例によれば両者の併用性は良好のようである<sup>34)</sup>。

## あ と が き

セメント硬化体1層中鋼材の腐食傾向についてはこれまでもいろいろの実験、調査されているが、本報では野外環境では避けられない多層のうちの1層としてのセメント硬化体中鋼材の腐食傾向について以上のような検討をしてみた。

この結果1層中の場合とは異なる興味ある傾向がいくつか得られた。またこのような傾向からいろいろな使用条件下における腐食現象、防食対策についてのヒントが類推できると思われるが、1例として港湾鋼製構造物のスブラッシュゾーンへの適用がある。この防食法は実用的であると考えられるがそのほかにも設計、施工上の面で潜在的な効果が多少なりともあれば幸いである。本報は防食法に関する実験に先立って行なった腐食に関する実験<sup>1)</sup>の結果によるところが多い。また本報で示した1層、2層、3層のときのセメント硬化体についての測定はさらに継続されており、また室内における補足実験および大型鋼材による野外実験が行なわれていることを付記しておく。

最後に測定ならびに資料整理に協力して頂いた港研構造部 阿部正美技官に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 善 一章: 港湾における鋼材腐食の研究 (第1報), 港研報告, 5, No. 8
- 2) 内堀利也, 潮の干満部での鋼材に対する電気防食効果, 防食技術, 14, No. 6, 21~25 (1965)
- 3) たとえば M. S. Haque, Corrosion in civil engineering (2), Corrosion Prevention & Control, 11, No. 1, p. 28~30 (1964)
- 4) R. Shalon and M. Raphael: Influence of sea water on corrosion of reinforcement, ACI Journal, 30, No. 12, No. 1251~1268 (1959)

- 5) M. Pourbaix: Corrosion, passivity and passivation from the thermodynamic point of view, *Corrosion*, 5, No. 4, 121~133 (1949)
- 6) 吉田徳次郎: コンクリート及鉄筋コンクリート施工法, p. 46, 丸善
- 7) 日本化学会編: 化学便覧, p. 581~604, 丸善
- 8) 山本洋一: 金属の腐食及防食(上巻), p. 279, 共立社
- 9) 岡本 剛: 金属腐食の科学と防食技術, 化学と工業, 12, No. 9, 48 (1959)
- 10) H. H. Uhlig: The corrosion handbook (1953), p. 129
- 11) H. F. Finley: Corrosion of reinforcing steel in concrete in marine atmospheres, *Corrosion*, 17, No. 3 No. 104t~108t (1961)
- 12) 吉田徳次郎: コンクリート及鉄筋コンクリート施工法, p. 588~590, 丸善
- 13) 吉田徳次郎: コンクリート及鉄筋コンクリート施工法, p. 629, 丸善
- 14) R. F. Stratfull: Effect on reinforced concrete in sodium chloride and sodium sulfate environments, *Materials Protection*, 3, No. 12, 74~80 (1964)
- 15) R. F. Stratfull: The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge, *Corrosion*, 13, No. 3, 173t~178t (1957)
- 16) R. F. Stratfull: Progress report on inhibiting the corrosion of steel in a reinforced concrete bridge, *corrosion*, 15, No. 6, 331t~334t (1959)
- 17) German Standard DIN 1045: Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton, revision adopted July 1952 (in German)
- 18) Deutsche Bundesbahn (Editor): Anweisung für Mörtel und Beton (AMB), Die Bundesbahn, Munich, 2nd Edition, 1947 (in German)
- 19) ACI Committee 318: Building code requirements for reinforced concrete (ACI 318-56), *ACI Journal*, 27, No. 9, 913~986 (1956)
- 20) ACI-ASCE Joint Committee 323, Tentative recommendation for prestressed concrete, *ACI Journal*, 29, No. 7, 545~578 (1958)
- 21) H. J. Gilkey: Cement and concrete, *Civil Engineer's Handbook* (L. C. Urquhart, Editor), p. 638, McGraw Hill Book Co., New York (1950)
- 22) Use of sea water for mixing and curing concrete, ST 7-4, 2-51, *Concrete Informations*, Structural and Railways Bureau, Portland Cement Association, Chicago
- 23) W. L. Scott and others: Explanatory handbook on the B. S. code of practice for reinforced concrete, Concrete Publications Ltd., London (1950)
- 24) A. I. Avakov: Design of mixes for concrete and mortars (Naznachenije sostavov betonov i restvorov), Gosudarstvennoe Izdatel'stvo Literaturny po Stroitel'stv i Arkhitekture, Moscow (1955) (in Russian)
- 25) 吉田徳次郎: コンクリート及鉄筋コンクリート施工法, p. 171
- 26) I. L. Tyler: Long-time study of cement performance in concrete, *ACI Journal*, 31, No. 9, 825~836 (1960)
- 27) R. F. Stratfull: Highway corrosion problems-metallic culverts and reinforced concrete bridges, *Materials Protection*, 2, No. 9, 8~14 (1963)
- 28) J. Franquin: The corrosion-protection of prestressed concrete piles, *Corrosion Technology*, 12, No. 3, 7~13 (1965)
- 29) M. Unz: Cathodic protection of prestressed concrete pipe, *Corrosion*, 16, No. 6, 289t~297t (1960)
- 30) K. S. Frazier: Value of galvanized reinforcing in concrete structures, *Materials Protection*, 4, No. 5, 53~55 (1965)
- 31) 重野隼太: 電気防食法, 第6回金属防食技術講習会テキスト抜萃, NCE資料 No. 89, p. 1~12
- 32) L. P. Sudrabin: Foundation piling corrosion; mechanisms and cathodic protection, *Materials Protection*, 2, No. 10, 54~64 (1963)
- 33) G. V. Akimov: Theory and research methods of metallic corrosion-process of electrochemical corrosion, *Corrosion*, 14, 463t~483t (1958)
- 34) 善 一章: 港湾における鋼材防食法の研究(第1報), 防食法に関する基礎的実験, 防食技術, 15, No. 1, 12~16 (1966)

(昭和41年6月30日受付)

港湾技術研究所報告 第5卷9号

1966年6月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 啓文堂松本印刷  
東京都新宿区東五軒町26