

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

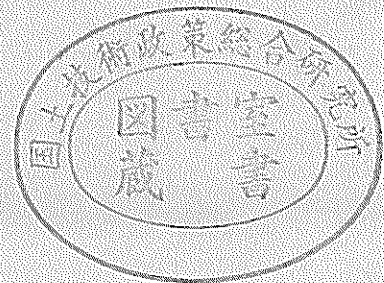
---

VOL. 24

NO. 3

SEPT. 1985

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第24巻 第3号 (Vol. 24, No. 3), 1985年9月 (Sept. 1985)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Characteristics of Ocean Waves off Cape Nojima in the Northwestern Pacific, Measured with a Discus Buoy  
..... Koji KOBUNE, Hiroshi SASAKI and Noriaki HASHIMOTO ..... 3  
(ディスクス・ブイで観測された野島崎沖海域の波浪特性  
.....小舟浩治・佐々木弘・橋本典明)
2. Decay of Mechanically Generated Waves in an Opposing Wind  
.....Hiroichi TSURUYA, Shin-ichi YANAGISHIMA  
and Yoshikuni MATSUNOBU.....31  
(逆風による波の減衰に関する実験的研究.....鶴谷広一・柳嶋慎一・松延嘉國)
3. Development of PHRI Geotechnical Centrifuge and its Application  
..... Masaaki TERASHI.....73  
(遠心力載荷装置の開発とその適用.....寺師昌明)
4. 最大エントロピー原理 (MEP) を用いた方向スペクトルの推定  
..... 橋本典明・小舟浩治 ..... 123  
(Estimation of Directional Spectra from the Maximum Entropy Principle  
.....Noriaki HASHIMOTO and Koji KOBUNE)
5. 底質 COD の測定における前処理と加熱処理.....堀江 毅・関根好幸..... 147  
(Pre-treatment and Heat Processing on Sediment COD Measurement  
.....Takeshi HORIE and Yoshiyuki SEKINE)
6. コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究  
..... 大即信明..... 183  
(Research on the Influence of Chloride on Corrosion of the Embedded Steel  
Bars in Concrete .....Nobuaki OTSUKI)
7. 土運船運航計画手法の開発 ..... 奥山育英..... 285  
(Barge Traffic Systems Planning in a Large-Scale Reclamation  
..... Yasuhide OKUYAMA)

## 6. コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす 塩素の影響に関する研究

大 即 信 明\*

### 要 旨

近年、一部の沿岸コンクリート構造物の劣化が著しく、コンクリート構造物の耐海水性の問題が徐々に顕在化している。特に、鉄筋コンクリートの鉄筋の腐食による鉄筋を囲むコンクリートのひびわれおよび剝離が大きな問題である。

この問題の対策の1つとして、土木、建築両学会では使用材料中の塩素（塩分）含有量に厳しい制限を設けている。

しかしながら、海洋環境では、コンクリート中に含まれる塩素は使用材料からのみ供給されるものではない。すなわち、使用材料より含まれるものおよび海洋環境としての海水よりコンクリート中へ浸入するものの2種類が考えられる。コンクリート中の鉄筋表面へ到達するのは、前者が水和反応以前からであるのに対し、後者の多くは水和反応終了後と考えられる。そのため、両者のコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響は異なることが予想される。

本研究の主目的は、この2種類の塩素のコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響の程度を比較検討することである。また、水セメント比、セメントの種類、ひびわれ等が、鉄筋の腐食に及ぼす影響も併せて検討した。なお、方法として電気化学的なものを多く用いた。

この結果、以下の結論が導かれた。

- (1) コンクリート中の鉄筋の腐食傾向に及ぼす種々の要因で、環境条件、ひびわれの有無、セメント種の及ぼす影響のほうが、練り混ぜ水（使用材料）中の塩素、水セメント比、初期標準養生期間の影響よりも大きい。
- (2) 練り混ぜ水（使用材料）中の塩素の悪影響は材令とともに相対的に減少する。特に、海水養生かつひびわれがある場合には、材令1年でその影響は認められない。
- (3) 電気化学的方法で最も有効なのは、本研究で提案した不動態のグレイドの判定であり、次いで自然電極電位の測定である。

\* 構造部 主任研究官（コンクリート担当）

## 6. Research on the Influence of Chloride on Corrosion of the Embedded Steel Bars in Concrete

Nobuaki OTSUKI\*

### Synopsis

In these days, there are clear deteriorations in some onshore structures, and this trouble is so important as to be solved as soon as possible. Especially, the strip off of cover concrete around the steel bars, which are corroded and expanded, is one of the worst causes of deteriorations.

For one of the countermeasures of this problem, J. S. C. E. and J. S. A. E. have made severe limits to control the amount of chloride in the fine aggregate. In marine environment, however, there are two origins of chloride to concrete, namely, from the materials used and from the sea water as an environmental condition. There is a great difference between the ages when the chloride ions can be on the surface of embedded steel bars. The age is before the hydration in the former case, and may be after the hydration in the latter case. For this reason, the influences of chloride are different each other.

The main purpose of this research is to clarify the difference of the influence of these chloride on the corrosion of the embedded steel bars in concrete. In addition to this, the influence of other factors (water cement ratio, kind of cement, crack, etc.) are also investigated. For the new experimental technique, the author adapts electro-chemical techniques. The conclusions are as follows :

- (1) Several factors are recognized to be influential to the corrosion of the embedded steel bars. Among them, the environmental condition, the kind of cement, and the existence of crack are more influential than the chloride content of mixing water, the water cement ratio and the curing condition.
- (2) The negative influence of the chloride in the mixing water (in the materials used) is relatively decreasing with age. Especially, in the case of in sea water and with the existence of crack, the influence can not be recognized at the age of only a year.
- (3) The most effective electro-chemical (measurement) technique is measuring the grade of the embedded steel bars.

---

\*Senior Research Engineer, Structures Division

## 目 次

要 旨	183
1. 本研究の概要	187
1. 1 目的	187
1. 2 概 要	187
1. 3 構 成	187
1. 4 既往の研究および本研究の位置づけ	188
2. 海洋環境下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論	189
2. 1 塩素存在下のコンクリート中の鉄筋の腐食に関する定説の概略	189
2. 2 腐食機構の電気化学的解釈	189
3. 実験方法に関する検討	191
3. 1 鉄筋観察および腐食量	191
3. 2 電気化学的方法（非破壊試験方法）	191
3. 3 その他本研究で用いたおもな実験方法	200
4. 実験の概要	202
4. 1 ひびわれのない場合	202
4. 2 ひびわれのある場合	209
4. 3 補足試験	212
5. 実験結果	213
5. 1 ひびわれのない場合	213
5. 2 ひびわれのある場合	226
5. 3 補足試験	241
6. 電気化学的方法の評価	242
7. 考察および結論	249
7. 1 個々の実験に対する考察および結論	249
7. 2 総合的考察および結論	279
8. あとがき	281
参考文献	282

## 1. 本研究の概要

### 1.1 目的

従来より、港湾構造物を含め、多くの海洋コンクリート構造物が建設され、過去の多くの場合は、何の問題もなく、その社会的役割を果たしてきた。しかしながら、近年になって、一部の海洋コンクリート構造物の劣化が著しく、コンクリート構造物の耐海水性の問題が徐々に顕在化してきている。特に、鉄筋コンクリートにおいて、鉄筋の腐食および膨張による鉄筋のかぶりコンクリートの剝離が重大な問題である。

この鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に対するひとつの解決策として、土木、建築両学会では、使用材料中の塩素（塩分）含有量に対して、厳しい規制を設けている。

しかしながら、海洋環境下では、コンクリート中に含まれる塩素は、使用材料のみから供給されるものではない。すなわち、使用材料より含まれるもののほかに、海洋環境としての海水よりコンクリート中へ侵入するものが当然考えられる。これらが、コンクリート中の鉄筋表面に到達するのは、前者が水和反応以前からであるのに対し、後者の大部分が水和反応終了後と考えられる。そのため、両者のコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響は異なることが予想される。

本研究の主目的は、これら2種類の塩素がコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響度を比較検討することである。すなわち、前者としては、練り混ぜ水に含まれる塩素を考え、後者としては、海中部あるいは感潮部でコンクリート中に侵入する塩素を対象として、これらの、コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響を比較検討するものである。

### 1.2 概要

前節で述べたように、本研究では、塩素のコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

実験は、供試体を用いた室内実験を主体とし、ほかに、供試体を用いた長期暴露実験および既設構造物の調査を行った。

腐食の評価方法としては、コンクリートより取り出した鉄筋の観察、および非破壊試験として電気化学的方法を用いた。

鉄筋観察は、材令1年、10年といった定まった時点で行い、その時点での塩素の影響の評価を行った。

それ以外の時点での経時的な塩素の影響については、種々の制約（供試体数、時間、費用）があり、特に供試体数を節約するために非破壊試験方法を用いることとし

た。非破壊試験方法としては、最も適切と考えられる電気化学的方法を用いた。なお、電気化学的方法の、コンクリート（モルタルを含む）中の鉄筋への実際的な有効性、理論的な適用性に関する既往の検討は十分とは言えないので、本研究で提案する方法を含めて、有効性、適用性を検討した。

### 1.3 構成

本研究の構成は、以下のとおりである。

2.において、海洋環境下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論について述べる。電気化学によって腐食を説明するとともに、コンクリート中での腐食の特徴および塩素の影響を述べる。

3.において、本研究において用いる実験方法を紹介する。電気化学的方法については、主として水溶液中で用いられているものを用いることとした。本研究で提案する方法についても述べる。

4.において、実験の概要を述べる。

5.において、実験結果を述べる。

6.において、種々の電気化学的方法の有効性、適用性に関する評価を行う。これは、水溶液中とコンクリート中では、電気化学理論成立のための条件が異なり、水溶液中では有効な方法も、コンクリート中で有効とは限らないからである。

7.において、コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響を、鉄筋の表面観察、電気化学的試験結果、さらには、補足試験結果（既存構造物調査等）を基に、考察を行い、結果を述べる。

また、本研究では、8つの実験シリーズがあり、おのおの分担があるが、それらの概要を述べる。

シリーズ1では、ひびわれのないコンクリート供試体を用い、外部環境としての海水より侵入する塩素と練り混ぜ水中より蓄積される塩素のコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響を検討する。同時に、電気化学的方法の有効性も検討する。

シリーズ2では、標準養生あるいは海水養生したモルタル中鉄筋の電気化学的性質に及ぼす練り混ぜ水中の鉄筋、W/C、および養生方法の影響を検討する。

シリーズ3では、10年間海洋環境に暴露した供試体について、鉄筋の腐食量、電気化学的性質に及ぼす練り混ぜ水およびセメントの種類の影響を検討する。

シリーズ4では、モデル供試体を用い、ひびわれ部および塩素のマイクロセルおよびマクロセルに及ぼす影響を検討する。

シリーズ5では、ひびわれを有するコンクリート供試体を用い、鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響を検討し

た。

シリーズ 6, 7, 8 では、塩素がコンクリートの基本的な物性に及ぼす影響を補足的に検討した。

#### 1.4 既往の研究および本研究の位置づけ

既往の塩素がコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響に関する研究は、以下のごとく 4 つに分けることができる。

すなわち、①コンクリート使用材料（特に海砂）中に含まれる塩素の影響に関する試験、②鉄筋を埋め込んだコンクリート、モルタル供試体の海洋環境暴露試験、③使用材料に塩素を含んだコンクリートあるいはモルタル供試体の海洋環境暴露試験、および、④海洋環境のコンクリート構造物の調査である。

##### (1) コンクリート使用材料（特に海砂）中に含まれる塩素の影響に関する試験

このテーマに関しては、膨大な研究がある。これらを集大成した報告<sup>1)</sup>によると、コンクリート中に材料中より含まれる塩素が鉄筋の腐食に及ぼす影響は次のようである。

① コンクリート中の液相は、通常水酸化カルシウムを主体とする水酸化物を溶解し、pH 12 以上のアルカリ性を保持している。この高いアルカリ性環境の中では、鉄筋表面は完全に不動態化され、錆の発生はみられない。

② アルカリ溶液中に、Cl イオンが含まれると、OH イオンの不動態化作用を阻害し、ある（塩素イオン/水酸イオン）比を上回ると不動態は破壊され、酸素および水の存在下で錆が発生する。石灰水飽和溶液中の NaCl 濃度を変化させた実験によると、NaCl 濃度 0.045 % が発錆の限度であると判断される。

③ 上記の限度以上に塩化物が混入しても、コンクリート中の鉄筋が腐食しない例も多い。これは、セメントペースト中の水和物が、塩化物と結合しているためとされる。この結合については、不明確な点が多く残されているが、フリーデル氏塩が生成することは確かめられている。

④ 常温における塩化物の固着は、普通の化学成分のポルトランドセメントの場合、Cl イオンとしてセメントの 0.4 % 程度という研究もあり、また 0.9 % 程度という研究もある。

⑤ 海砂を用いると、セメントと結合するものがあるとしても、若干の塩化物は残留するので、PC 鋼材のわずかな断面減少でも危険を伴うプレストレスコンクリートには塩化物を用いてはならず、また、海砂も用いてはならない。

⑥ 耐硫酸塩ポルトランドセメントは、 $C_3A$  が 5 % と低く、したがって、塩化物の固定能力が低く塩化物を含ませてはならない。また、アルミナセメントに塩化物が含まれると、凝結が著しく遅延されるので、塩化物を含ませてはならない。

⑦ 塩化物を含むコンクリートを高温養生すると、鉄筋に錆の発生がみられる。この発生過程については、種々の議論がある。しかし、高温養生の場合に塩化物の使用を禁止する点では異論はない。

⑧ 水セメント比を小さくし、単位水量を少なくし、硬練りのコンクリートを十分に締め固め、かぶりを大きくとることが、錆を防ぐ要諦である。

なお、これらの結論は、海洋環境をおもな対象とはしておらず、また、ひびわれの影響についてもほとんど考慮していない。

##### (2) 鉄筋を埋め込んだコンクリート、モルタル供試体の海洋環境暴露試験

###### a) ひびわれのない場合

これに関しては、文献 2), 3) をはじめとして多くのものがある。これらに共通して言えることは、以下のようである。

① 混合セメントがポルトランドセメントに比較して、pH は若干低い、水密性が良く塩分浸透が少なく、強度の伸びも良い。このため、防食性能も良い。

② 水セメント比とスランプが小さく、かぶり大きいものは防食性能が良い。

なお、ここでは使用材料に塩化物を含む場合については除いてある。

###### b) ひびわれのある場合

これに関しても、4), 5) をはじめとして多くの研究がある。これらに共通して言えることは、以下のようである。

① 中性化は腐食の原因ではない。

② ひびわれ幅が 0.2 mm 程度以下では、鉄筋の腐食が強度特性に与える影響は小さかった。

③ かぶりの影響は大きい。

##### (3) 使用材料に塩素を含んだコンクリートあるいはモルタル供試体の海洋環境暴露試験

これについては、6), 7), 8) 等の研究がある。これらに共通する結論は、以下のようである。

すなわち、練り混ぜ水、養生水の組み合わせに対する腐食量は、セメントの種類、W/C に関係なく、（海水練り+海水養生）>（海水練り+淡水養生）>（淡水練り+海水養生）>（淡水練り+淡水養生）の順である。

また、文献 6) では、次のごとき結論をだしている。

すなわち、海水暴露試験の材令5年における鉄筋の発錆量を高温高湿の条件下で行った促進試験の結果と比較した結果、海水暴露試験結果を促進試験結果によって推定するのは困難である。

(4) 海洋環境のコンクリート構造物の調査

これに関しては、文献9)等の調査がある。これらに共通の事項は次のようである。

- ① コンクリート中に蓄積される塩分量は、極めて多い。
- ② 所要の品質を有するコンクリートを入念に打ち込み、締め固めおよび養生を適切に実施し、適切なかぶり確保されているときは、材令20年以上でも十分な耐久性を確保することができる。

(5) 本研究の位置づけ

本研究は、(3)に分類されるものではあるが、既往の研究とは以下の点で異なっている。

すなわち、①使用材料からコンクリート中へ蓄積される塩分(塩素)と外部環境より供給される塩素の影響を分離したこと、②①において、ひびわれの影響を考慮したこと、③室内短期試験と屋外長期試験を組み合わせたこと、および、④独自の方法を含む電気化学的方法を適用範囲を明らかにして、かつ用いたこと、が挙げられる。

また、本研究は海洋環境にコンクリート構造物を建設するもの立場より、塩素の影響をみるものである。すなわち、ある程度の塩素の侵入は、長期を考えればやむを得ないという立場から塩素の影響を考えた。さらに、資源節約の見地から、塩素による害を他の因子で置き換えることができないかということも考えた。これは、既往の研究の多くが、外部よりの塩素の浸透にそれほどの注意を払わず、また、塩素の害ばかりを強調するものが多く、それらとは本研究は趣を異にする訳である。

これらが、本研究の位置づけである。

2. 海洋環境下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食理論

2.1 塩素存在下のコンクリート中の鉄筋の腐食に関する定説の概略

一般にコンクリート中の鉄筋の腐食については次のように言われている。

まず、塩素の存在しない条件下では、コンクリート中の鉄筋は腐食しないと言われている。その理由として、コンクリート中のpHは12程度であり、この条件では、鉄筋表面には不動態が形成され、これによって、腐食は著しく制限されるということが言われている。

しかしながら、塩素を含む溶液が鉄筋表面にあると、不動態が破壊され、腐食が進行する可能性がある。特

に、コンクリートにひびわれ等の欠陥部があると、その部分の鉄筋がアノードとなり、また、また、酸素の供給もあるので、マイクロセル、マクロセルのいずれか、あるいは、両方が形成され、腐食は進行すると言われる<sup>1),2),3)</sup>。

塩素存在下でのこれらの一般論は、種々の研究論文の考察等に多く引用されるが、具体的な不動態およびマクロセルに関する研究は、十分とは言えない。

2.2 腐食機構の電気化学的解釈

一般的な腐食機構の解釈は次のようである。

鉄筋の腐食は、鉄筋を形成する金属鉄が、鉄イオンとなり、 $Fe_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$ 、 $Fe(OH)_2$ 等のいわゆる錆を形成する反応をさす。この反応は、電子の移動と、化学反応を含む電気化学的反応である。

コンクリート中の鉄筋表面は、マイクロにみると不均一である。不均一である理由としては、ミルスケールの不均一性、鉄筋表面の凹凸等の鉄筋に関するものと、pH、酸素、ブリージング、および、乾湿の不均一性等のコンクリートに関するものがある。このため鉄筋表面は、マイクロ的に電位が不均一になり、アノード部とカソード部を生ずる。すなわち、腐食電池(corrosion cell, galvanic cellともいう)を生ずる。

不動態を生じない場合に、コンクリート中の鉄筋に生ずる腐食電池の概要は、図-1に示すとおりである。金属鉄は、アノード部において鉄イオンとなり溶解する( $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ )。このとき生じた電子は、カソード部へ移動し、水と酸素から水酸イオンを形成する( $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ )。水酸イオンはカソード部からアノード部へ移動し、 $Fe^{2+}$ イオンと反応し $Fe(OH)_2$ を形成する。 $Fe(OH)_2$ は酸素と反応し、容易に $Fe_2O_3$ あるいは $Fe_3O_4$ を形成する。これらは、いわゆる錆である。特に、鉄筋表面からやや離れた所に形成される $Fe_2O_3$ は、層状で空隙が多く、しかも鉄筋に付着しない

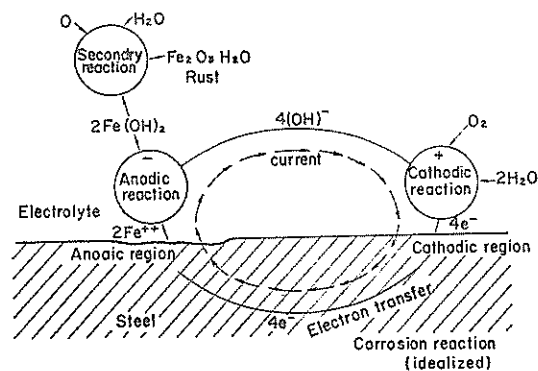


図-1 腐食反応の概略



錆層を形成する。

しかしながら、塩素の影響を受けず、また、中性化もしていない健全なコンクリート中では、鉄イオンが、金属鉄に密着したままで酸化され、薄い酸化膜が、金属鉄表面を覆うようになる場合がある。この酸化膜の厚さは非常に薄く、30 Å 内外あるいはそれ以下と言われている<sup>5)</sup>。これを概念的に示したのが、図-2<sup>4)</sup>である。一般に、この酸化皮膜を不動態皮膜と称し、腐食速度は、著しく低下すると言われている。

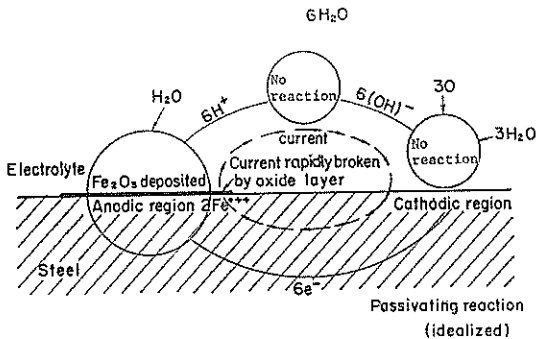


図-2 不動態の効果

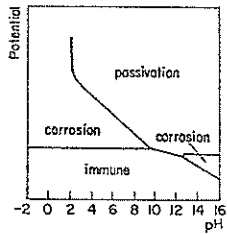


図-3 簡略化した Pourbaix 図

不動態の有無は、Pourbaix による Pourbaix Diagram を用いるのが分かりやすい。図-3 に簡略化した Pourbaix Diagram を示す。この図中には、腐食領域 (CORROSION)、不動態領域 (PASSIVATION)、および、不活性領域 (IMMUNE) の3つがある。

コンクリート中の鉄筋の場合、pH はおよそ 12 程度であるので、図より外部からの電流等がなければ、不動態があると考えられる。これによって、通常は、腐食は発生しない。

しかし、塩素イオンの存在するコンクリート中もしくは中性化したコンクリート中では、不動態は容易に破壊され、コンクリート中の鉄筋は腐食する可能性がある。海洋環境 (海中、感潮部) では、中性化はほとんどな

く、塩素イオンの影響が卓越すると考えられる。この理由については後述する。なお、塩素イオンによって不動態が破壊される機構については不明な点が多いが、その影響自体は明らかにされており、ごく少量 (0.03 モル) の塩素イオンによって不動態は、脆いものになることが知らされている<sup>4)</sup>。

ある部分で不動態が存在しなくなると、不動態のある部分とない部分でアノード部とカソード部が生じ、腐食電池が形成される。アノード部とカソード部の距離の大小によって腐食電池および腐食機構が分類される。距離の比較的大きなもの (例えば、数 cm 以上) をマクロセル、小さなものをマイクロセルということもできる。

(1) ミクロセル

これは、比較的均質な溶媒中にある金属表面に生じる。

一般に、鉄筋表面は、多くの微小なアノード部とカソード部よりなり、鉄筋自身により短絡されて、腐食電池を形成している。マイクロセルにおいては、アノード部とカソード部の分布状態が、マクロ的にみて均一であり、腐食の状態もマクロ的にみて均一となるものである。

(2) マクロセル

マクロセルは、アノード部とカソード部の距離が比較的大きな場合に生ずる腐食電池である。この電池が形成されるのは、鉄筋表面あるいはコンクリート中にマクロな不均一性がある場合である。

マクロセルには、不均一性の原因により大きく分類して、濃淡電池および活性-不動態電池が考えられる。

a) 濃淡電池

コンクリート中において、pH、塩化物濃度、あるいは、酸素濃度が部分的に異なる場合がある。pH および酸素濃度の場合には、それらの値が低い部分が、塩化物濃度の場合には、その値の高いところが、アノードになりやすく、これによって腐食が促進される。

海洋環境のコンクリート中においては、塩化物あるいは酸素による濃淡電池が発生することが考えられる。

b) 活性-不動態電池<sup>7)</sup>

ひびわれ等の影響によって、塩化物濃度あるいは酸素濃度の分布が特に不均一な場合には、ある部分の鉄筋には不動態があるが、他の部分にはない (活性化している) ことも考えられる。この場合、活性部分がアノードとなると言われている。活性部分の不動態部分に対する面積が小さいほどその部分の腐食進行速度は速い、と言われている。

以上述べたように、コンクリート中鉄筋の腐食は、不動態の有無、および、pH 塩化物濃度、酸素濃度の分布

に支配されると考えられる。海洋環境では、特に、塩化物濃度（塩素イオン濃度）およびそれに伴う不動態の有無が重要である。

### 3. 実験方法に関する検討

#### 3.1 鉄筋観察および腐食量

鉄筋の腐食に関する測定は、重要な測定項目ではあるが、簡便かつ確立された測定方法はないのが実状である。一般には、鉄筋の表面観察および腐食面積の測定が行われるが、本研究では、それらに加えて、錆の重量測定を行った。

##### (1) 鉄筋の表面観察

鉄の表面は、通常、純粋の金属鉄が露出しているのではなく、酸化鉄で覆われている。そのため、どういった酸化鉄を、錆（腐食している）と判定するかが問題となる。本研究では、薄いねずみ色で鉄筋表面全域あるいは部分的に密着した均一な薄い酸化鉄は無視し、黒、赤、赤茶、茶、黄等の色彩を有したものを対象とした。

観察の結果得られた鉄筋表面の錆の分布状況を A 4 用紙へスケッチした。

##### (2) 腐食面積の測定

(1)でスケッチした図より、プランメーターにて腐食面積を求めた。

##### (3) 錆重量の測定

カッターナイフを用い、錆を鉄筋表面よりこすり落とし、直示天秤にて重量を測定した。作業中は、錆にモルタル分等が混入しないように慎重に、また、すべての錆をこすり落とすよう努力したが、ある程度の誤差は、避けることができないようであった。

#### 3.2 電気化学的方法（非破壊試験方法）

ここで述べる分野の電気化学的方法は、簡単に言っても、鉄筋の電位および電流の測定、さらにこれらの測定結果の解釈によりコンクリート中の鉄筋の腐食状態を推察する方法である。

##### (1) 既往の方法

###### a) 電位および電流の個別の測定

一般には、ある一定の環境条件において、鉄筋の電位が貴であるほど腐食しにくく、電位が卑であるほど腐食しやすいと言われている。このため、コンクリート中の鉄筋の電位（自然電極電位と称することが多い）あるいは電位分布を測定することによって、腐食あるいは腐食の傾向を判断することが可能であると言われている。この方法は、カリフォルニア州の橋梁被害調査<sup>15)</sup>を初めとして、我が国においても最近用いられており、ある程度の成果をあげている。また、この方法の欠点については

後述する。なお、電流測定は、歴史的に最も重要な実験方法であり、異種金属間のガルバニ電池の電流の測定は、19世紀より腐食の研究に用いられている。

コンクリート中の鋼材の腐食の研究においても、善<sup>16)</sup>、宮川等の研究にみられるように、マクロセル電流の測定が行われている。

なお、本研究ではこれらの測定には、市販の電気量測定器（DIGITAL MULTIMETER、内部抵抗 10000 Ω）を用いた。

##### b) 分極曲線（電位—電流曲線）

分極曲線とは、金属がある環境中にある場合に、電位あるいは電流を、外部電源を用いて強制的に変化させることによって得られる電位電流曲線のことである。分極曲線は、金属の腐食特性を迅速に判定する方法として、腐食工学の分野で広く用いられており、その判定の信頼性は高いとされている。

分極曲線から得られる情報は、基本的には、試料がある電位において電気化学的な平衡状態を保つには、どれだけ外部電流が必要か、というものであるが、種々の仮定を設けることによって、次の解釈をすることができる。すなわち、

- ① Tafel 線があると仮定して、腐食電流（交換電流）を算定する。Tafel 線とは、過電圧が小さいときに、電圧と電流の対数とに線形関係があるとして求める線である。
  - ② 不動態の程度を判定することができる。
  - ③ 試料がマクロセルの一部を形成した際のアノード電流あるいはカソード電流の見積りができる。
- の3つである。

次にこれらの方法を用いた鉄筋に関する検討例を述べる。

①に関しては、青戸の研究<sup>2)</sup>等があり、一応の成果を挙げているが、定性的な領域をでていない。

②に関しては、水溶液中の鉄筋に関する研究が多い。通常、飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> 水溶液を、コンクリートに代わるものと考えて検討している。この水溶液中では、鉄筋は不動態を有していると言われている。後述する検討によれば、この水溶液では、ある電位の範囲内において 1000~10000 nA/cm<sup>2</sup> 程度の電流密度の不動態が存在するようである。しかし、不動態に関する分極曲線の系統だった研究はないようである。

③に関しては、異種金属が、腐食電池（ガルバニ電池）を形成したときの、腐食速度の推定等に利用できるようである。

これら3つの方法については、本研究でも用いてお

り、詳細は後述する。なお、ここで述べた方法は、試料全体がマイクロセルであるときは問題ないが、試料にマクロセルがあるときには、その解釈には理論上からも問題がある。すなわち、数種の異なったアノードおよびカソードが混在する場合には、測定される分極曲線は、複数の分極曲線の加算されたものとなり、解釈が困難となる。例えば、大きな空隙あるいはひびわれ等がある場合には、分極曲線による情報の処理は困難となる。

なお、分極曲線の測定方法については、後述する(図-14 参照)。

## (2) 新たな電気化学の応用方法の提示

腐食は、電気化学的反応であり、腐食に関する情報を得るには、電気化学的方法を用いるのが良いと考えられる。しかしながら、コンクリート(モルタルも含む)中の鉄筋に対しては、前述した方法のみでは不十分な点もあると考えられた。

本研究では、不動態に関するものとマクロセル電流の測定に関するものとの2つの方法を考案し、それらを用いた。本項では、それらの方法を提示する。

### a) アノード分極曲線を用いた不動態の分類方法

前述したように、「通常のコンクリート中の鉄筋には、不動態がある。」と一般には言われているが、その具体的な検証例は少ない。ここでは、まず、良好な不動態を有していると言われるものが、アノード分極曲線を用いてどのように表せるのか、また逆に、不動態が全くないと言われるものがどのように表せるのかを検討する。これを判断の基準として、アノード分極曲線の測定結果を用いて、塩素イオン、養生(暴露)条件、W/C、材令、等が不動態に及ぼす影響を検討する。

### ① 不動態の電気化学的解釈

広義には、「不動態は、ある環境条件での化学反応性の消滅」と定義される<sup>12)</sup>。さらに、狭義には、「金属あるいは合金が、熱力学的には、金属状態から錆の状態へと移行するに十分大きな自由エネルギーの減少を伴う環境下にありながら、十分な腐食抵抗性がある場合に、不動態を有しているという<sup>13)</sup>。」とされる。

この不動態の本質ならびに電気化学的性質に関して M. G. Fontana & N. D. Greene は次のように述べている<sup>12)</sup>。すなわち、「…このため、不動態膜の性質および不動態の具体的な性質は、いまだに未解決の問題として残っている。過去 10 年間に行われた電気化学の分野の研究により、不動態に関する知識が増加し、腐食の分野で多くの重要な進歩がなされてきた。これらの研究は、不動態膜の性質に関する情報を得るのではなく、むしろ、不動態に関するメカニズムとは、完全に独立であ

る。」

すなわち、不動態の電気化学的研究は、電気化学的性質の情報によって、不動態の電気化学的性質を把握するものであって、不動態膜そのものの構造の解明には、全く関係ないものである。したがって、不動態の定義を、電気化学的に行う場合には、不動態膜自体の構造については、全く言及しないのである。本研究においては、不動態皮膜自体の構造の検討は全く行わないが、それは上記の理由によるものである。

さて、電気化学的に、不動態が存在するか否かは、アノード分極曲線によって判定するのが普通である。通常、不動態膜は、酸化膜( $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等)と考えられている。この膜は、電子は通すが、イオンは通しにくいと言われている。これは、アノード分極曲線において、電流が制限されることを意味する。

これらのことより、アノード分極曲線は概念的に、活性(active)、不動態(passive)、活性—不動態(active-passive)に分類される(図-4 参照)。おおまかにいって、図-4 に示す分極曲線に対応して、活性では腐食が進行しやすく、不動態では腐食が進行しにくく、また活性—不動態では微妙な条件の変化で腐食の進行の難易が変化する。

このように、アノード分極曲線より、不動態の電気化学的性質な定義あるいは腐食に対する性質を推察することができる。

### ② アノード分極曲線の測定および応用例

分極曲線の測定方法には、大きく分けて、電位を制御していく方法と、電流を制御していく方法とがある。また、電位あるいは電流を連続的に変えるのか断続的に変えるのか、さらに、電位あるいは電流を変化させる速度によっても異なった分極曲線となる可能性がある。

標準的なものとして、ASTM G 5-72 "Standard reference method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement" による測定法がある。

本研究においては、上記規定の Potentiodynamic method (動電位分極法) に準じて、測定を行った。電位の掃引速度は、1 mV/s を標準とした。

ステンレススチールに関する研究については、アノード分極曲線を用いた例は多い。図-5、図-6<sup>13)</sup> に2種類のステンレススチール(304 L S. S. および 316 S. S.) の分極曲線の例を示す。いずれの図においても、良好な不動態を有しているとの判断がなされており、不動態域の電流密度は、1000 nA/cm<sup>2</sup> 程度である。なお、計測方法については(5)で述べる。

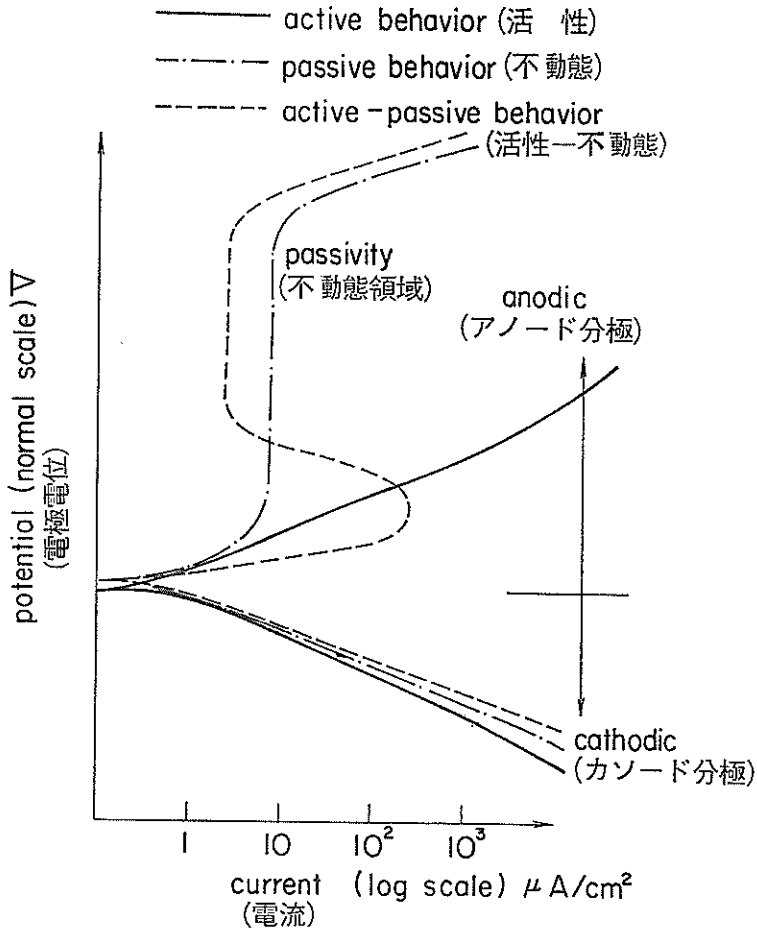


図-4 アノード分極曲線の分類

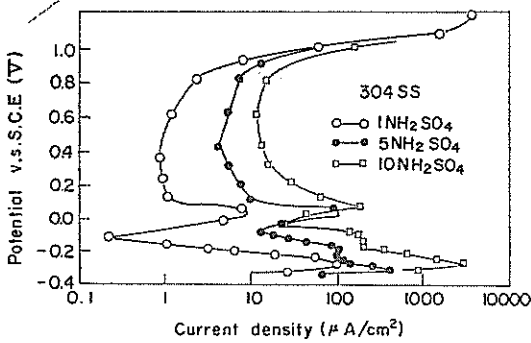


図-5 304 L ステンレススチールの1規定硫酸溶液中のアノード分極曲線

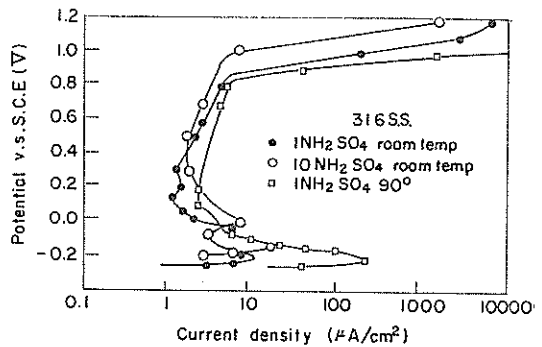


図-6 316 ステンレススチールの1規定硫酸溶液中のアノード分極曲線

③ アノード分極曲線を用いたコンクリート中铁筋の不動態判定方法

電気化学の分野におけるステンレス鋼等のアノード分極曲線の測定は、主として水溶液中で行われており、この範囲で有効であることが認められている。しかし、コンクリート中の鉄筋について、この測定が有効か否かについて若干の問題点がある。ここでは、この問題点を検討するとともに、コンクリート中铁筋の不動態判定方法を提示する。

イ) 問題点

コンクリートは、水溶液に比較して、大きな電気抵抗を有している。このため、この抵抗による電位降下 (iR ドロップ) のアノード分極曲線に及ぼす影響を検討する必要がある。また、ステンレス鋼では、良好な不動態域 (不動態の影響が電流に及ぶと考えられる電位の範囲) の電流密度は、約 1000 nA/cm<sup>2</sup> 以下であろうと推察されるが、鉄筋については実測例もなく、どの程度の値であるかを検討する必要がある。

ロ) iR ドロップ (電位降下) の影響について

試料 (鉄筋) と照合電極間の溶媒に抵抗  $r$  があると、試料の電位  $E$  は、 $\Delta E = i'r$  ( $i'$ : 鉄筋と照合電極間の電流) だけずれて測定される。コンクリートは、アルカリ、酸や塩類の水溶液に比較して電気抵抗が大きく、測定電流が多いときには水溶液では無視できる範囲であっても、 $\Delta E$  が問題となる。

$\Delta E$  は、 $\Delta E = i'r$  と表せるが、この式において、鉄筋と対極間 (図-14 参照) の電流  $i$  (この  $i$  が測定すべき電流であって、通常、 $i \gg i'$ ) および測定機器の内部抵抗  $R$  を用いると、

$$\Delta E = r^2 \cdot i / (r + R)$$

と表すことができる。

本研究での、一部の試験では、マイクロコンピュータ-内蔵の測定機器 (Model 350, EG & G Princeton Research 社製) を用いたが、この機器は、随意に iR ドロップを補正することが可能なので、iR ドロップに対する考慮はほとんど無用であった。しかし、これ以外のものは、iR ドロップの影響を考慮する必要がある。これらの供試体は、ほとんど  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱供試体であり、多くの場合、この中央部に鉄筋が埋め込んである。この場合、コンクリートの電気抵抗は、十分に吸水しているという条件で、鉄筋として長さ 10 cm かつ径 9 または 10 mm (表面積約 30 mm<sup>2</sup>) のものを用いた場合、平均 80  $\Omega$ 、最大で 150  $\Omega$  程度である。また、測定機器の内部抵抗は、10 k $\Omega$  である。さらに、後述するが、電流密度は 1 mA/cm<sup>2</sup> 程度まで計れば十分である (こ

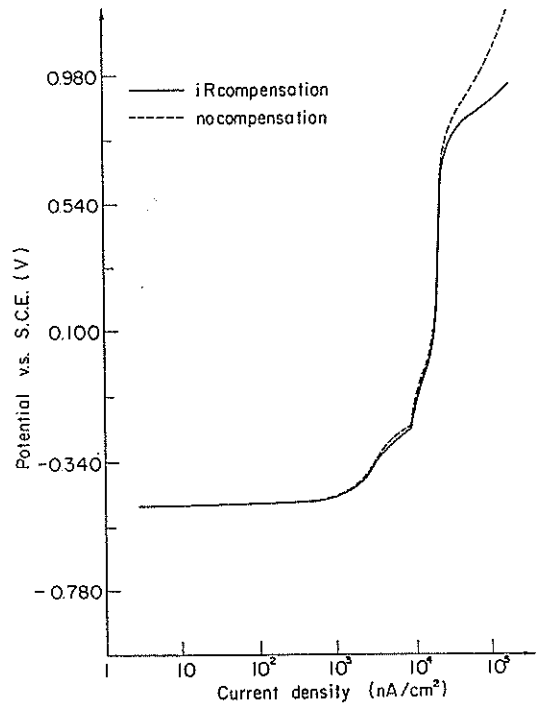


図-7 抵抗による電位降下の影響

の場合、鉄筋全体の電流は、 $30 \text{ cm}^2 \times 1 \text{ mA/cm}^2 = 30 \text{ mA}$ 。このとき、抵抗を 150  $\Omega$  と仮定すれば、

$\Delta E = r^2 \cdot i / (r + R) = 150^2 \times 30 \text{ mA} / (150 + 10000) = 67 \text{ mV}$  となる。また、電流密度が、 $100 \mu\text{A/cm}^2$  に対しては、約 6.7 mV 程度となる。

図-7 に、測定機器の内部抵抗  $r$  が約 50  $\Omega$  の場合の、iR ドロップの補正を行ったときと行っていないときとの分極曲線を示す (Model 350 を使用)。この図によれば、電流密度 10  $\mu\text{A/cm}^2$  までは、定量的にもほとんど問題なく、100  $\mu\text{A/cm}^2$  においても、定性的な判断には問題ないものと思われる。

ハ) 不動態域での電流密度

NaOH 水溶液中での実験<sup>18)</sup>によれば、不動態を有すると考えられる鉄筋に 10  $\mu\text{A/cm}^2$  の電流を流した後も、その鉄筋の電位は変化しないとしている。しかしながら、鉄筋の不動態については、これ以上の情報はなく、不動態域の電流密度について以下の検討を行った。

すなわち、次の 6 種の溶液中の鉄筋のアノード分極曲線を測定し、不動態と電流密度 (不動態保持電流密度と言う) との関係を検討した。

(a) 飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液 (通常、不動態があると考えられる)

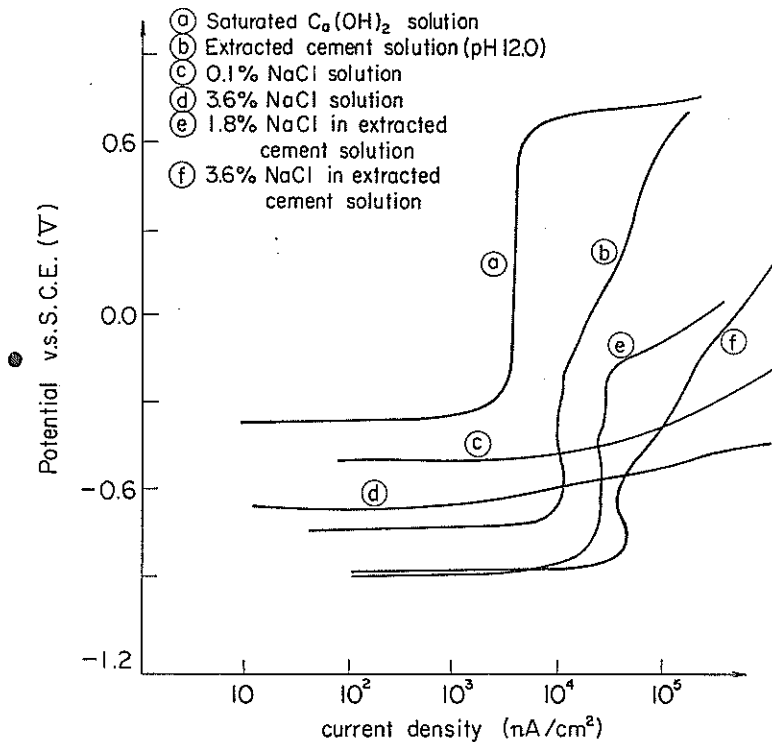


図-8 各種の溶液中での分極曲線

(b) セメント抽出液 (通常, 不動態があると考えられている。pH=12)

(c) 0.1 % NaCl 溶液 (通常, 不動態はないと考えられている。)

(d) 3.6 % NaCl 溶液 (通常, 不動態はないと考えられている。ほぼ, 海水に等しい塩素含有量である。)

(e) 1.8 % NaCl 混入セメント抽出液 (通常, 不動態はないと考えられている。)

(f) 3.6 % NaCl 混入セメント抽出液 (通常, 不動態はないと考えられる。)

図-8 に, これらの分極曲線を示す (掃引速度 1 mv/s, 掃引速度とは分極曲線測定時の電位の変化する速度である)。

おおまかに判断すると, 10~100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を境として, 通常不動態のあると言われているものはこの電流密度以下であり, 不動態のないと言われているものはこれ以上の電流密度であると言える。このように, 不動態と電流密度が対応するようである。

不動態を, 定性あるいは定量的に判定しようという試みは, 以前よりなされているが, 十分なものはない。

著者は, ひとつの試みとして, 分極曲線の平均的な電流密度を考え, 図-8 等を参考として, 以下に示す不動態のグレイドを設定した。

すなわち, 鉄筋の自然電極電位を  $E_n$  として, 電位  $E$  が,  $E_n + 0.2 \text{ V} < E < +0.6 \text{ V}$  (vs. SCE 飽和甘こう電極) の範囲で,

グレイド 0 : 電流密度が一度でも 100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を超えるもの (全く不動態がないと判断した)

グレイド 1 : 電流密度が, 10~100  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  にあるもの (不完全ではあるが, 若干は不動態があると判断される)

グレイド 2 : 電流密度が一度でも 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を越え, かつ, グレイド 1 または 3 に含まれないもの

グレイド 3 : 電流密度が, 1~10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  にあるもの

グレイド 4 : 電流密度が, 一度でも 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を越え, かつ, グレイド 1, 2, および 3 に含まれないもの

グレイド 5 : 電流密度が, 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を越えないもの (非常に良好な不動態があると判断される)

ここで, 電位の範囲として,  $E_n + 0.2 \text{ V} < E < +0.6 \text{ V}$  を考えたのは,  $E < E_n + 0.2 \text{ V}$  ではカソード分極の影響が考えられ, また,  $+0.6 \text{ V} < E$  では, 水の分解

による酸素の発生等の異なった反応の起こる可能性があるからである。

b) コンクリート中鉄筋に及ぼすマクロセルの影響の測定

コンクリート中鉄筋のマクロセル発生の原因としては、前述したように、濃淡電池作用と活性不動態電池作用がある。コンクリート中鉄筋の場合、既往の研究<sup>9)</sup>結果等より考えて、マクロセルのアノード部あるいはカソード部の最小単位は数 cm を目安にすればよいように思われる。通常数 cm と考えられているマクロセルの最小単位を、本研究では具体的に 2.5 cm として研究を進めた。

さて、上記のいずれかの原因によって、比較的離れた距離(数 cm 以上と考えている)に大きなアノード部とカソード部が形成され、これらの間にマクロセル電流が流れる。このマクロセル電流が、ミクロセルの腐食電流に比較して大きい場合、マクロセルによる腐食が顕著になる。

(イ) マクロセル電流の電気化学的解釈

コンクリート中の鉄筋には、通常なんらかの原因でアノード部及びカソード部が生じている。アノード部およびカソード部の電位をおのおの  $E_a$ ,  $E_c$  とし、各種のアノード分極曲線およびカソード分極曲線を 図-9 に概念

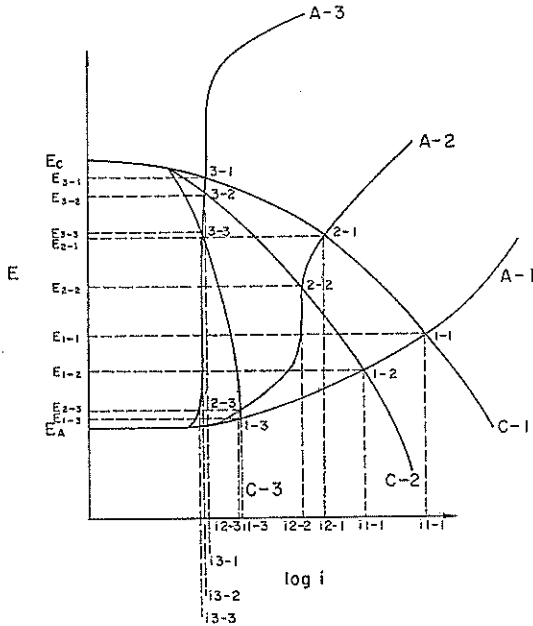


図-9 アノード分極曲線、カソード分極曲線および電位電流との関係

的に示す。

この図で、アノード分極曲線 A-1, A-2, A-3 はおのおの、活性(不動態はない)、不完全ながらも不動態がある、良好な不動態がある、に相当するものとし、カソード分極曲線は、主として溶存酸素量の影響によって酸素量の多いほうから、C-1, C-2, C-3 のごとくなるものと考えた。なお、カソード分極曲線の分類の根拠となる分極曲線の実測例は後に示す。

また、図で、 $i_{1-1}$ ,  $i_{1-2}$ , ...,  $i_{3-3}$  はおのおのに対応するマクロセル電流を、 $E_{1-1}$ ,  $E_{1-2}$ , ...,  $E_{3-3}$  は、おのおのに対応する閉路電位を表す。

この図を用いて考察を行う。不動態がない場合(A-1)、カソード分極曲線の少しの変化で、マクロセル電流は大きく変化する。また、マクロセル電流そのものの絶対値も大きい。不動態のある場合(A-3)、カソード分極曲線が変化しても、マクロセル電流は、ほとんど変化しないし、その絶対値も小さい。A-2 は、その中間である。

また、この図から、アノード分極曲線が一定の場合には、閉路電位が卑であるほどマクロセル電流は小さく、逆に、カソード分極曲線が一定の場合には、閉路電位が卑であるほど、マクロセル電流は大となる。これにより、電位の貴卑とマクロセル電流の間には一義的な関係はないことがわかる。

現地調査等で、コンクリート中鉄筋の電位分布を測定し、「電位の最大値と最小値の差が大きいほど腐食の大きい傾向にある。」という報告があるが<sup>10)</sup>、図で、 $E_a$  と  $E_c$  との差が大であることに対応し、特に不動態がない場合にはその傾向が是認される。特に、調査をする場合は、腐食等が発生していることが通例であり、多くの場合アノード部には不動態はなく、前記の傾向が認められるものと思われる。

このように、マクロセル電流と分極曲線とは、密接な関係にある。

なお、この図は、マクロセルについてのみでなく、ミクロセルの場合にも適用でき、ほぼ同様のことが言える。

特に、一般には、電位と腐食電流あるいは電位と不動態の有無との間には一義的な関係はないということは重要である。また、電位のみから腐食の有無等を論ずることは、なんらかの条件、例えば、アノードあるいはカソード分極曲線が一定である等の条件がなければ、無理がある。

(ロ) マクロセル測定方法

前述したように、マクロセルの最小単位を 2.5 cm として後述する供試体を用いマクロセル電流、不動態の有

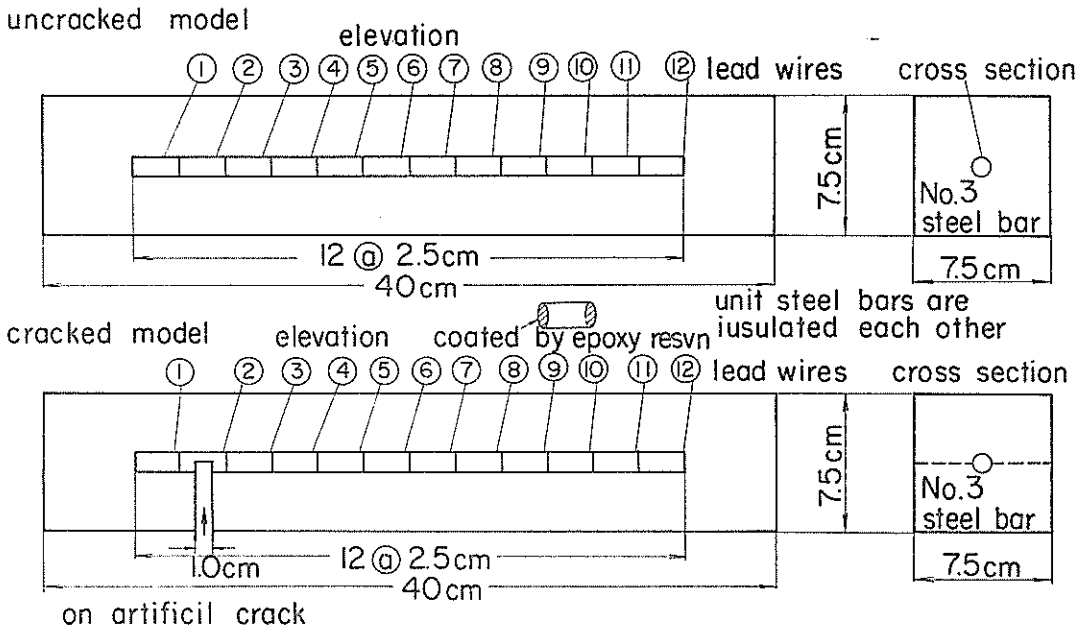


図-10 マクロセル電流測定用供試体の概要（はり型）

無、および腐食速度に及ぼすひびわれ部の影響等を検討した。この検討には、長さ 2.5 cm の鉄筋の両端をエポキシ樹脂でコーティングしたものを要素鉄筋と称して、これを 12 本接続した長さ 30 cm の鉄筋を用いた。図-10 に示すように、この鉄筋をコンクリート中に埋め込んで、マクロセル測定用の供試体を作成した。

マクロセル電流は、この図に示す 12 個の長さ 2.5 cm の要素鉄筋間に流れる電流をすべて測定し、アノードあるいはカソード電流の総和をマクロセル電流と定義して測定した。

(3) その他の既往の電気化学的測定方法

前述した以外の、本研究で用いた電気化学的測定方法を述べる。

a) 腐食電流の測定

腐食反応に律速条件のない場合、すなわち、イオンの供給が不足している、あるいは、十分な不動態がある等の条件のない場合、過電圧（強制的に与えられた電位と自然電極電位との差）を  $\eta$ 、それに伴う外部電流を  $i$ 、腐食電流を  $i_0$  とすれば、分極曲線は、

$$i = i_0 \left[ \exp \left\{ (1-\beta) \frac{\eta F}{RT} \right\} - \exp \left\{ -\beta \frac{\eta F}{RT} \right\} \right] \dots \dots \dots \text{式 (1)}$$

と表すことができる<sup>23)</sup>。ここで、 $\beta$ : symmetry factor (1/2 と近似することが多い)、 $F$ : Faraday 定数、 $R$ : 気体定数、である。この式を、 $\eta$  の大きな範囲で近似

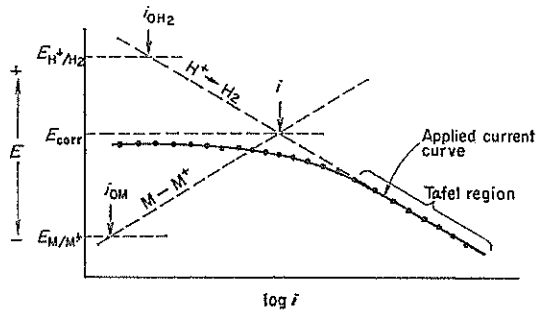


図-11 Tafel 線の適用例

するか、あるいは、小さな範囲で近似するかのいずれかによって、腐食電流  $i_0$  を求めることができる。前者の近似を Tafel 近似、後者の近似を分極抵抗法という。

(イ) Tafel 近似を用いた方法

式 (1) において、 $\beta$  を 1/2 と仮定し、 $\eta$  が十分大であるとすれば、 $\exp \left\{ (1-\beta) \frac{\eta F}{RT} \right\} \gg \exp \left\{ -\beta \frac{\eta F}{RT} \right\}$  となり、 $i \approx i_0 \exp \left\{ (1-\beta) \frac{\eta F}{RT} \right\}$  とすることができる。この近似の程度は、 $\eta=100$  mV で約 98 %、120 mV で約 99 %となる。このとき、電流  $i$  を対数で表して図示すれば、図-11 に示すように、 $\log i$  と  $\eta$  (図-11 で  $\eta$  は電位の  $E_{corr}$  からの差である) は直線関係となり、その直線と  $\eta=0$  (電位が  $E_{corr}$  のとき) との交点が電



流  $i_0$ , すなわち, 腐食電流を表す。また,  $\beta$  が  $1/2$  でない場合でも, 式は難しくはなるが, ほぼ同じことがいえる。なお, 著者は, この方法を用いる場合,  $\eta > 100$  mV でのデータを用いた。

この方法は, 理論的には問題はないが, 実際には, 直線部 (Tafel region) の判定および傾きの決定が困難であること, あるいは, 電位の掃引速度の影響が明確でないなどの問題点がある。さらに, 不動態の影響, 酸素の供給条件等によっては, 理論上の仮定が崩れることもある。

(ロ) 分極抵抗法 (図-12 参照)

Tafel 近似とは逆に,  $\eta$  が十分小さいとすれば,  $\beta$  が  $1/2$  のとき, 式(1)は,  $i \approx i_0 F \eta / RT$  と近似することができる。この場合,  $i_0 = (RT/F) \times (\Delta i / \Delta \eta)$  として  $i_0$  が算定される。このとき,  $\Delta \eta = 10$  mV では誤差は約 1%, 20 mV で約 2.5% である。また,  $\beta$  が  $1/2$  でない場合には,  $\Delta i / \Delta \eta = \beta_a \cdot \beta_c / \{2.3 i_0 (\beta_a + \beta_c)\}$  なる近似が可能である。ここで,  $\beta_a, \beta_c$ : アノードおよびカソード側の Tafel slope,  $\Delta i / \Delta \eta$ : 直線勾配である。

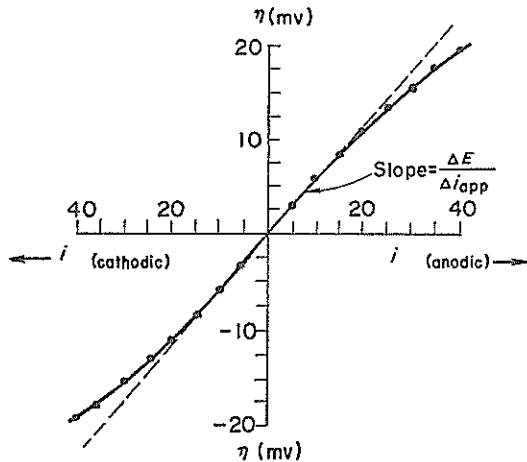


図-12 分極抵抗法の適用例

コンクリート中の鉄筋では,  $\beta_a = 0.12, \beta_c = 0.06$  として算定すれば, 精度は 2 倍以内とされる。

b) 再不動態化電位の測定

a) および前述した電気化学的方法は, 均一な腐食 (一般腐食あるいは General corrosion ともいう) に対して特に有効とされる。しかしながら, 孔食 (pitting) および応力腐食等の発見にはそれほど有効ではない。

コンクリート中鉄筋の腐食の 1 つの形態として, 孔食も考えられる<sup>24)</sup>。この孔食の発見には, 再不動態化電位

の測定が有効であるといわれている<sup>25)</sup>。アノード分極を行い, 不動態域を過ぎて, 電流が急激に増加し始めて, 約  $2 \text{ mA/cm}^2$  となった段階で, カソード方向に掃引すると, ある電位で電流が 0 となる。この電位を再不動態化電位という。

再不動態化電位と孔食電位, 自然電極電位との関係は次のごとくである。ここで, 孔食電位とは, 厳密な定義ではないが, 電位がわずかに貴に変化するだけで電流が急速に増加し始める電位である。

すなわち, ①自然電極電位が孔食電位よりも貴であれば, 新しい孔食が発生し成長する, ②自然電極電位が孔食電位と再不動態化電位との間であれば, 既成の孔食が成長する, ③自然電極電位が, 再不動態化電位よりも卑であれば, 孔食は発生も成長もしない。

c) カソード分極曲線の測定

カソード分極曲線の測定は, アノード分極曲線と同様に, ASTM G 5-72 の動電位分極法に準じて行った。なお, アノードの場合との相違は, 電位の掃引方向が, 自然電極電位から卑の方向とし,  $-1.2 \text{ V}$  (vs. SCE) まで分極させた点である。なお, カソード分極曲線を測定する理由は, ひびわれの有無等による酸素の供給条件の相違がカソード分極曲線に影響を与えられ考えられるためである。その根拠は, 以下のようである。

腐食が進行するには, カソード部に酸化剤が供給される必要がある。

酸化剤の量が多いほど, 同一の電位でカソード分極曲線の電流密度は大きくなるということが知られている。例えば, 図-13<sup>25)</sup> においては, アルゴンの飽和した酸素を含まない NaCl 溶液中に酸化剤として  $\text{Fe}^{3+}$  を種々の割合で混入してカソード分極曲線を測定した結果を示しているが,  $\text{Fe}^{3+}$  の多いほど電流密度の多いことが理解される。

一般には, コンクリート中鉄筋の腐食反応に関係する酸化剤は, 酸素と考えられるので, 酸素の供給条件によってカソード分極曲線が変化することが予想される。

(4) 水溶液中とコンクリート中における鉄筋の腐食の相違と電気化学的方法の問題点

文献 1) 中において, 飽和カルシウム溶液中等をコンクリート中と考え種々の結論を導いているが, 以下に述べる欠点があり, モルタルおよびコンクリート中の鉄筋を測定する場合とは異なる。

a) 水溶液中での問題点 (腐食生成物)

水道水等の水溶液中の腐食生成物は多様である。文献 24) においては, 「水溶液中では, 腐食がやや停滞ぎみの場合, 腐食面の色調が黒あるいは茶色の単色に近いのであるが, 腐食が活発に進行している場合は, 色の混

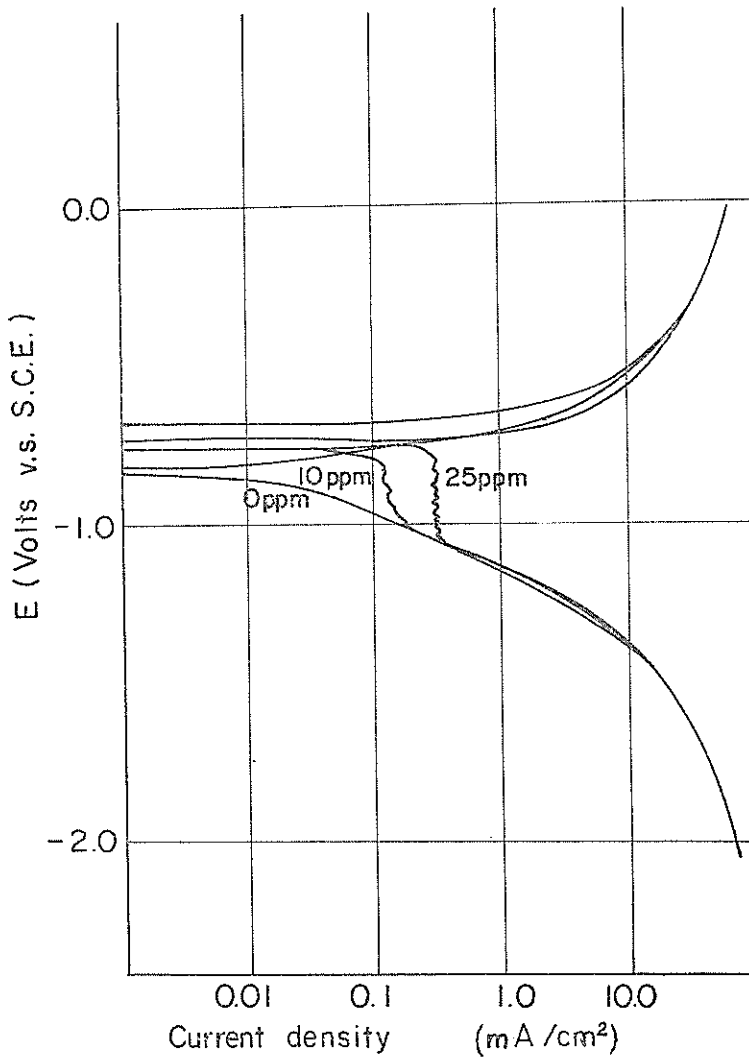


図-13 マイルドスチールのカソード分極曲線に及ぼす酸化剤 ( $Fe^{2+}$ ) の影響 (3.5% NaCl 溶液中アルゴン飽和)

在(黄, 黒, 赤茶, 茶の混在)が認められた。」とされる。また, 著者の観察でも, 当初, 黒の単色の錆でも, 水溶液浸し後 1 週間では色の混在が認められた。

コンクリート中(ひびわれのない場合)のものは, 後述するように, ほとんどが黒まれに茶の単色であり, 水溶液中とコンクリート中では, 腐食生成物に若干の相違がある可能性もある。このため, 水溶液中の鉄筋の電気化学的性質より, コンクリート中の鉄筋の電気化学的性質を直接知ることは難しい。

b) コンクリート中での問題点(均質性について)  
電気化学的な方法は元来均質な水溶液中で適用される

方法である。コンクリート中での場合, コンクリートの電気抵抗が大なることの影響は抵抗の補正を行ったり, 電流密度の小さな場合は実用上無視できるなど解決可能となったが, コンクリートが不均質性であることの影響は, 未知であり, 検討が必要である。不均質であれば, 大きなマクロセル電流が存在したり, 測定する部分によってアノード分極曲線が異なったりする可能性がある。

しかしながら, 幸いなことに, 後述するひびわれを有しないモデル供試体(図-10 参照)を用いた試験において, 2.5 cm 単位の要素鉄筋の分極曲線はそれほどばらつかず, また, それらの分極曲線と長さ 30 cm の鉄筋

の分極曲線もほとんど同一であった。この長さの範囲の鉄筋であれば、巨視的に均一と考えて電気化学的測定方法を用いてよいものと思われる。

しかしながら、後述するように、ひびわれが存在すると、電気化学的測定方法の有効性は非常に疑問となる。

(5) 本研究での分極曲線測定方法

分極曲線の測定方法の概要を、図-14 に示す。照合電極としては、飽和甘こう電極を用い、対極としては、ステンレス鋼板を用いた。

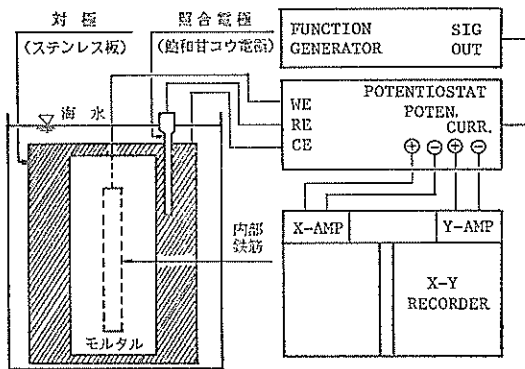


図-14 測定装置の概略

測定は、電位を自然電極電位から+1.0Vまで掃引速度40mV/min(シリーズ2, 3)あるいは60mV/min(シリーズ1, 4, 5)で変化させ、その間の電位と電流の関係をX-Yレコーダーで記録した。なお、掃引速度が測定機器の都合上やむなく異なったが、その影響は、後述する実験より分極曲線の定性的な判断には少ないと考えた。

3.3 その他本研究で用いたおもな実験方法

(1) コンクリート中の塩素量の測定

コンクリート中の塩素量の測定は、困難な問題を含んでいる。問題点は大きく分けて3つある。すなわち、試料の採取方法、塩素の抽出方法、および、定量方法のおのおのに関するものである。これらの問題点について述べ、さらには、本研究で用いた方法を示す。

a) 試料の採取方法

コンクリート中の塩素には、水和物中にほぼ固定されたものあるいは液相中の可溶性のもの等があるが鉄筋の腐食の観点からは、鉄筋をとりまく液相中の塩素イオン濃度を知ることが望まれるが、現状では、直接に鉄筋周辺の液相中の試料を得ることは無理である。そのため、通常は、塩素の状態は区別せずに塩素量を測定し、それ

を代表値として取り扱っている。

著者らが行っている採取方法は、目的の箇所を中心に、半径およそ1cm以内のコンクリートを小型たがね等を用いてハンマーで軽くたたきながら細かくして、粗骨材を取り除き(モルタル供試体の場合は省略)、モルタル分を取り出し、これをすりつぶすという方法である。

この方法の問題点は、粗骨材との分離が困難なことである。そのため、目的とした部分のコンクリートをすべて粉状としてしまうことも考えたが、労力がかかること、粗骨材の分布によってモルタルと粗骨材の比率が不均一になること等の問題が依然として残り、労力を要する割には精度の向上は望めない。いずれも精度上の問題を残すのであるから、本研究ではより簡便な上記の方法を採用した。

b) 塩素の抽出方法

塩素の抽出方法には大きく分けて2通りのものがある。1つは、試料中に含まれるすべての塩素(全塩素と称する)を抽出しようとするものであり、1つは、可溶性の塩素を抽出しようとするものである。

全塩素の抽出については、①試料を溶剤とともに白金るつばで溶解した後に抽出するもの、②試料を硝酸溶液で溶解して抽出するもの、および、③試料を数分間煮沸して抽出するもの、の3通りがある。最も確実なのは、①であると思われるが、②、③ともに全塩素であると主張している研究者もいる<sup>21)</sup>が、確認されてはいない。そのため、本研究では①の方法を用いた。

可溶性塩素の抽出についても種々のものが用いられている。例えば、「試料1に対して5の割合の水を50°Cに温めて加え、30分間攪拌したときに抽出される塩素<sup>21)</sup>」という考え方もある。著者が用いている方法は、「試料1gに20°Cの100mlの蒸留水を加え、20°Cのまま24時間後に溶出する塩素」を考えた方法であって、本研究では常温で発生する鉄筋の腐食を対象としていることから水温を20°Cとした。なお、24時間としたのは、予備実験によれば溶出時間12時間までは、時間とともに塩素の溶出量が増加するが、それ以降はほぼ一定であったため、安全を見込み24時間の溶出時間とした。

以上でも分かるように、塩素量は抽出条件を示さないと、意味がないと思われる。

c) 定量方法

定量方法には、大きく分けて、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定方法、クロム酸銀-吸光度法、硝酸銀滴定法、および、直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いる方法の4種類がある。前3者については、歴史もあり確立された方法ではあるが、やや労力を必要

とする。最後に記した方法は、簡便ではあるが、使用実績に乏しい。本研究ではこれらの方法を併用した。

これらの方法は、精度には差があり有効数字は異なるが、測定される数値自体には、あまり影響を及ぼさないとと思われる。表-1 に同一試料を用いて、硝酸銀滴定法以外の方法について比較したものを示す（後述する本研究でのデータをまとめたもの）。誤差の標準偏差が 0.06~0.07 であり、小数第 1 位までならば、同一視してよいと判断された。

以上、塩素量測定上の問題点を示し、それらの問題点を考慮した上で本研究で用いる測定方法を示した。

また、本研究での測定方法を取りまとめると次のようである。

試料は、モルタル分を取り出し、これをすりつぶしたものをを用いた。

抽出は、全塩素については、白金るつぼで溶解して抽出したものをを用い、可溶性塩素は、20°C で 24 時間蒸留水中にて抽出したものとした。

定量方法は、全塩素については、クロム酸銀一吸光度法を用い、可溶性塩素については、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法、クロム酸銀一吸光度法、および、直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いる方法の 3 種を併用した。

(2) 空隙率

コンクリートの密実性を把握するために空隙率の測定を行った。

コンクリートから採取した 2.5~5 g のモルタル塊を 40 時間真空乾燥させたものを試料とした。

測定は、ポロシメーター(Carlo Erba 社製)を用い、注入圧力を 1~2000 kgf/cm<sup>2</sup> として、細孔半径 38~75000 オングストローム間の細孔量および細孔量割合を測定した。

なお、注入圧力と水銀が圧入される細孔半径との関係は次式によった。

$r = 75000/P$  ( $r$ : 細孔半径 (オングストローム),  $P$ : 加えられた絶対圧 (kgf/cm<sup>2</sup>))

(3) X線回折

コンクリート中にいかなる化学成分があるかを、X線回折によって検討した。

コンクリートの表面より約 20 mm の距離にあるモルタルを試料とした。

X線回折装置の走査条件は次のようである。

対陰極: Cu, フィルター: Ni, モノクロメーター: グラファイト, 加速電圧および電流: 40kV および 100 mA, スリット系: 1°-0.15mm~0.6°, 時定数: 0.5 s)

表-1 3種の定量方法の相違に関する検討

- (1) C. 塩素イオン選択性電極を用いた電位差適定法  
A. 直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いた方法

コンクリートの種類		養生条件	A %	C %	A-C	
W/C (%)	練り混ぜ水					
45	水道水	海水中	0.28	0.21	0.07	
55	海水	気中	0.10	0.13	-0.03	
55	水道水	海水中	0.32	0.39	-0.07	
55	海水	海水中	0.40	0.51	-0.11	
55	海水	水道水中	0.05	0.09	-0.04	
65	海水	海水中	0.39	0.46	0.07	
65	水道水	海水中	0.26	0.37	-0.11	
平均値			0.26	0.31	-0.05	
					S. D.	0.06
					Z	-0.84

コンクリート材令 1年

抽出条件: 20°C 1日蒸留水中

- (2) B. クロム酸銀一吸光度法

- A. 直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いた方法

コンクリートの種類		材令 (日)	A %	B %	A-B	
W/C (%)	練り混ぜ水					
40	水道水	180	0.28	0.35	-0.07	
	海水	180	0.21	0.30	-0.09	
45	水道水	180	0.43	0.44	-0.01	
	海水	91	0.10	0.15	-0.05	
	海水	180	0.57	0.49	-0.08	
50	水道水	91	0.02	0.04	-0.02	
	水道水	180	0.24	0.25	-0.01	
	海水	91	0.10	0.15	-0.05	
	海水	180	0.42	0.34	0.08	
55	水道水	91	0.06	0.11	-0.05	
	水道水	180	0.64	0.53	0.11	
	海水	91	0.08	0.17	-0.09	
	海水	180	0.74	0.64	0.10	
60	水道水	180	0.64	0.53	0.11	
	海水	91	0.07	0.15	-0.08	
	海水	180	0.76	0.66	0.10	
65	海水	91	0.10	0.13	-0.03	
	海水	180	1.55	0.55	0	
平均値			0.33	0.33	0.0017	
					S. D.	0.074
					Z	0.023

抽出条件: 20°C 1日蒸留水中

養生条件: 28日標準養生後 海水中

(4) SEM 観察

コンクリートの内部構造を明らかにするため、走査型電子顕微鏡を用いて、最大 6000 倍までの電子顕微鏡写真を撮影した。

4. 実験の概要

本研究では、コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響を検討するのであるが、それには非常に多くの要因が関連する。そのなかで、ひびわれの有無は重要なものであると考えられ、ここでは、ひびわれのない場合とある場合とに分けて実験を行った。また、シリーズにおいては、モルタル中の鉄筋の腐食を検討した。

4.1 ひびわれのない場合

(1) コンクリート中 (1年試験) シリーズ I

a) 目的

ひびわれのないコンクリート円柱供試体を用い、外部環境から侵入すると考えられる海水および使用材料 (練り混ぜ水) としての海水がコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす概略の影響を標準養生および水道水練りのものと比較することによって把握することが目的である。すなわち、海水練りかつ海水養生、海水練りかつ標準養生、水道水練りかつ海水養生、および、水道水練りかつ標準養生の 4 つの組み合わせについて実験を行い比較を行う。また、同時に各種の電気化学的方法の有効性の検討も行う。すなわち、以下のものを目的とした。

まず、鉄筋の腐食と電気化学的性質に密接な相関性があるものとして、海水練りコンクリート中鉄筋の不動態の程度を初めとする電気化学的性質の経年変化が、図-15 に示す I, II, III のいずれのタイプに属するかを検討することである。I に属するのであれば、海水練りコンクリートを鉄筋コンクリートに用いるのも、水道水練りコンクリートを用いるのも、大きな差はないものと判断されよう。しかし、III に属するのであれば、海水を練り混ぜ水として用いると、水道水を用いた場合と比較し

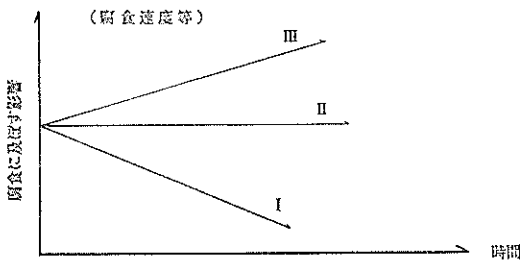


図-15 腐食に及ぼす影響の経時変化のタイプ

て鉄筋の腐食が非常に進行する可能性がある と判断されよう。

つぎに、海水養生が、鉄筋の不動態の程度を初めとする電気化学的性質および腐食 (錆) にどの程度の影響を及ぼすかを検討することである。特に、練り混ぜ水の腐食に及ぼす影響との比較を行う。

さらに、各種の電気化学的方法の有効性についても検討する。なお、本シリーズは、著者が米国留学中に実施したものである。

b) 供試体の製作および養生 (暴露) 条件

イ) 使用材料

セメントは、タイプ I セメント (普通ポルトランドセメント) およびタイプ III セメント (早強ポルトランドセメント) を用いた。なお、比重はいずれも 3.15 であった。

粗骨材は、オースチン (米国) 近傍に産する pea gravel で、最大寸法 3/8 in. (約 0.95cm) のものを用いた。なお、粗骨材は単位体積重量 1610 kgf/m<sup>3</sup>, 比重 2.57, F. M. 5.99 および吸水率 1.08% のものであった。

細骨材も、オースチン近傍に産するものを用いた。これは単位体積重量 1595 kgf/m<sup>3</sup>, 比重 2.58, F. M. 2.76, および吸水率 1.02% のものであった。

練り混ぜ水としては、蒸留水および人工海水 (ASTM D 1145-75 による) を用いた。

混和剤は、タイプ I セメントには用いなかったが、タイプ II セメントの場合には、AE 剤および CaCl<sub>2</sub> をベースとした促進剤を一部に使用した。

鉄筋として、グレイド 60, ナンバー 3 (φ 3/8 in.), 長さ 4 in. (約 10 cm) の異形鉄筋を使用した。なお、コンクリートに埋め込む前に、サンドブラストし、光沢状態として使用した。また、片端にはリード線をハンダ付けし、その後、両端部はエポキシ樹脂にてコーティングして使用した。

ロ) 配合

配合条件は、タイプ I セメントの場合、粗骨材最大寸法 3/8 in., という条件下で、スランブの種類 5 cm, 7 cm, 12 cm の 3 種を考え、W/C として 45%, 50%, 55%, 65% の 4 種を考えた。

また、タイプ III セメントを用いた場合、粗骨材最大寸法 3/8 in., スランブ 7 cm, W/C = 50% として配合を定めた。

示方配合および圧縮強度を表-2 に示す。

ハ) 供試体の形状および配筋

供試体は、φ 3 × 6 in. (約 φ 7.5 × 15.2 cm) の寸法を有するものであって、鉄筋腐食試験用供試体と圧縮強度試験用供試体の 2 種を製作した。

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

表-2 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	スランブ(cm)	W/C (%)	W (kgf/m <sup>3</sup> )	C (kgf/m <sup>3</sup> )	G (kgf/m <sup>3</sup> )	S (kgf/m <sup>3</sup> )	Sea Salt (kgf/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
45-5-T	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	0	455
45-5-S	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	6.84	435
45-7-T	I	7	45	220	488.9	748.2	819.5	0	448
45-7-S	I	7	45	220	488.9	748.2	819.5	7.92	450
45-12-T	I	12	45	240	533.3	748.2	730.8	0	444
54-12-S	I	12	45	240	533.3	748.2	730.8	8.64	447
50-5-T	I	5	50	190	380.0	748.2	986.6	0	393
50-5-S	I	5	50	190	380.0	748.2	986.6	6.84	390
55-5-T	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	0	337
55-5-S	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	6.84	334
65-5-T	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	0	254
65-5-S	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	6.84	232
65-12-T	I	12	65	240	369.7	748.2	874.4	0	231
65-12-S	I	12	65	240	369.7	748.2	874.4	8.64	251
H-T	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	402* A E 剤
H-S	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	398* A E 剤
H-H	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	420* Hydroset + A E 剤

(スランブは目標値, \*: 7日強度 圧縮強度は2本の平均値である。)

埋め込み鉄筋は、1供試体につき1本とした。かぶりは、1.25 cm または 3.3 cm とした。

ニ) 供試体の製作

コンクリートの練り混ぜには、容量 20 l ドラム回転式ミキサーを用いた。コンクリートの打ち込みは、室温 24 °C、50% R. H. の室内で行った。また、締め固めは、2層に分け、振動台を用いて行った。鉄筋は、1層を締め固めた後、所定の位置に取り付け、リード線を型枠上部に固定した棒に取り付けることによって上下方向に固定した。その後、2層めを打ち込み締め固めた。さらに、凝結終了後、上面を金ごて仕上げた。

ホ) 養生(暴露)条件

成形したコンクリート供試体は室内に静置し、濡れた布でおおい、1日で脱型後、恒温恒湿室(20°C、100% R. H.)にて材令 20 日まで養生する。その後、一部は 3.6% NaCl 溶液中にて養生し(N養生と称する)、一部は、室内で気中養生し(A養生と称する)、これら以外のものは、そのまま、標準養生を継続した。

シ) 測定項目

イ) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、ASTM C 39-81 "Compression Strength of Cylindrical Concrete Specimens" に準じて行った。供試体は、すべて片面仕上げ面を、硫黄キャ

ッピングとした。タイプ I セメントを用いたものでは、材令 28 日に、タイプ III セメントを用いたものでは、材令 7 日に 1 配合について、おのおの 2 本試験を行った。

ロ) 鉄筋の腐食量に関する測定

鉄筋の腐食量に関する測定としては、前章で述べた鉄筋の表面視察、腐食面積の測定および錆重量の測定を行った。

(ハ)、(ニ)の測定項目とあわせて、配合、かぶり、養生(暴露)条件別に測定本数を表-3 に示した。

ハ) コンクリート中鉄筋の電気化学的測定

コンクリート中鉄筋の電気化定の測定としては、前章で述べたアノード分極曲線を用いた不動態のグレイド、腐食電流、再不動態化電位、および、自然電極電位を測定した。

ニ) 塩素含有量の測定

材令 1 年のコンクリート供試体をはつり、かぶり約 1.2 cm の部分のモルタルを約 1 g 採取し、これをすりつぶして試料とした。この試料を用いて、3.3 (1) で述べた本研究でいう可溶性塩素を測定した。すなわち、約 100 ml かつ 20°C の蒸留水中に 24 時間で塩素を抽出し、ろ紙にてこし、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法により定量分析した。

(2) モルタル中(1年試験)一シリーズ 2

大 即 信 明

表-3 測定項目および測定本数

配 合 号 (記 号)	養生 条件	かぶり (cm)	製作 本数	測 定 本 数					
				鉄筋の腐食に 関する測定 材令 1 年	不動態判定 材令 (月) 1, 2, 4, 6, 12	腐食電流 材令 (月) 1, 2, 4, 6, 12	Repassivation potential 材令 1 年	potential (月) 1, 2, 4, 6, 9, 12	塩素含有量 材令 1 年
45- 5-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
45- 5-S	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
45- 7-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
35- 7-S	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
45-12-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
45-12-S	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
50- 5-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
50- 5-T	N	1.2	2	1	1	1	1	2	2
	S	1.2	2	1	1	1	1	2	2
55- 5-T	N	1.2	6	2	2	2	2	5	2
	S	1.2	4	2	2	2	2	4	0
		3.3	2	1	1	1	1	2	0
	A	1.2	2	1	1	1	1	2	0
55- 5-S	N	1.2	4	3	1	1	1	3	2
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	2
	A	1.2	2	2	1	1	1	2	2
65- 5-T	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
65- 5-S	N	1.2	2	2	1	1	1	2	2
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	2
		3.3	2	2	1	1	1	2	0
65-12-T	N	1.2	2	1	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
65-12-S	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
H-T	N	1.2	2	1	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
H-S	N	1.2	2	1	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	1	1	1	1	2	0
H-H	N	1.2	2	2	1	1	1	2	0
	S	1.2	2	2	1	1	1	2	0
Total			90	88	43	43	43	80	28

N : NaCl 溶液中

S : 標準養生

表-4 セメントの試験成績表

比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結				安定性	フロー値	曲 げ 強 さ (kgf/cm <sup>2</sup> )			圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		水 量 (%)	始 時	終 時	結 分			3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
3.17	3180	27.6	2-26	3-29	良	252	22	49	71	135	233	416	

表-5 細骨材の物理試験結果

比重	吸水量	単 位 容 積 重 (kgf/m <sup>3</sup> )	空隙率 (%)	洗 試 験 (%)	有 機 不 純 物	ふるい (mm) を通過する百分率						粗粒率
						5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	
2.63	1.33	1624	38.7	2.21	良	100	86	51	29	14	7	3.13

表-6 海水の化学成分

比 重 (20°C)	pH (20°C)	濁 度	化 学 成 分 (mg/l)						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>
1.022	7.55	1 以下	8925	343	362	1166	17411	2439	103

a) 目的

本節では、モルタル供試体を用いて、モルタル中铁筋の不動態のグレイドに及ぼす W/C の影響、および、練り混ぜ水中の塩素量を海水養生および水道水養生において比較した。不動態のグレイドを用いたのは、後述するように、シリーズ1の実験結果より、不動態のグレイドが鉄筋腐食のし易さを最もよく表す電気化学的方法であると判断されたからである。

b) 供試体の製作および養生(暴露)条件

i) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント(三菱鉱業社製)を用いた。

細骨材は、山砂(千葉産)を用いた。

表-4 および表-5にセメント試験成績表および細骨材の物理試験結果を示す。

練り混ぜ水としては、水道水(横須賀市)のほかに自然海水(横須賀市久里浜湾)を用いたが、表-6にその化学成分を示す。また、練り混ぜ水として、海水を希釈したもの、海水に塩素を増量したものを用いたが、海水の希釈には、蒸留水を用い、塩素の増量には、試薬一級の塩化ナトリウムを用いた。

鉄筋は、JIS R 3112に定めるSR 24 φ 9 mm の普通丸鋼を10%クエン酸アンモニウム溶液に48時間浸し、その後、水およびアルコールで洗い、鉄筋表面の錆等を除去し、端部に長さ1 mのリード線をハンダ付けし、その部分をエポキシ樹脂にてコーティングしたものを用いた。

ロ) モルタルの種類および配合

モルタルは、s/c を2とし、W/C は、40、45、50、55、60、65%の6種類を用いた。また、練り混ぜ水としては、水道水、海水、海水中の塩素濃度を1/2に希釈したもの、1/4に希釈したもの、2倍に増量したもの、および、4倍に増量したもの、の6種類を用いた。

表-7に、モルタルの示方配合と練り混ぜ時に混入される塩素量を示す。なお、表中、記号Wは水道水練りを、記号1Sは海水練りを、記号1/4S、1/2S、2S、4Sは、それぞれ海水の1/4、1/2、2、4倍の塩素濃度の練り混ぜ水を用いたことを示す。

ハ) 供試体の製作

供試体は、4×4×16 cmの角柱モルタル供試体である。モルタルの練り混ぜには、モルタルミキサ(容量20 l)を用いた。打設は2層に分けて行い、鉄筋が断面中央に位置するようにした。このとき、鉄筋のかぶりは約1.5 cmである。締め固めには、φ10 mmの鋼棒を用いた。打設後は、濡れむしろで1日湿潤養生し、その後脱型して、所定の環境下で養生した。供試体の製作はすべて恒温恒湿室内(20°C、80% R. H.)で行った。

ニ) 養生(暴露)条件

養生条件は、以下に示す4条件とした。すなわち、①水道水中標準養生(記号St)、②脱型後(材令1日)直ちに海水養生(記号1K)、③脱型後水道水中標準養生を行い、材令7日より海水養生(記号7K)、および、④脱型後水道水中標準養生を行い、材令28日より海水養生



表-7 モルタルの配合

記 号	W/C (%)	C (kgf/m <sup>3</sup> )	W (kgf/m <sup>3</sup> )	S (kgf/m <sup>3</sup> )	塩素量 (%)
40-W	40	674.9	270.0	1439.8	0
40-1S	40	674.9	270.0	1439.8	0.20
40-2S	40	674.9	270.0	1439.8	0.41
40-4S	40	674.9	270.0	1439.8	0.82
45-W	45	652.9	293.8	1305.7	0
45-1/4S	45	652.9	293.8	1305.7	0.06
45-1/2S	45	652.9	293.8	1305.7	0.11
45-1S	45	652.9	293.8	1305.7	0.23
45-2S	45	652.9	293.8	1305.7	0.45
50-W	50	632.2	316.1	1264.5	0
50-1S	50	632.2	316.1	1264.5	0.07
55-W	55	612.9	337.1	1225.7	0
55-1/4S	55	612.9	337.1	1225.7	4.07
55-1/2S	55	612.9	337.1	1225.7	0.14
55-1S	55	612.9	337.1	1225.7	0.27
55-2S	55	612.9	337.1	1225.7	0.54
55-4S	55	612.9	337.1	1225.7	1.08
60-W	60	594.6	356.7	1189.3	0
60-1S	60	594.6	356.7	1189.3	0.29
65-1/4S	65	582.2	378.4	1164.3	0.08
65-1/2S	65	582.2	378.4	1164.3	0.16
65-1S	65	582.2	378.4	1164.3	0.31
65-2S	65	582.2	378.4	1164.3	0.62

表-8 配合および養生別供試体数

配 合	養 生 条 件				計
	St	1K	7K	28K	
40-W	5	5	4	3	17
40-1S	5	5	4	3	17
40-2S	5	0	0	3	8
40-4S	5	0	0	3	8
45-W	5	5	4	3	17
45-1/4S	5	0	0	3	8
45-1/2S	5	0	0	3	8
45-1S	5	5	4	3	17
45-2S	5	0	0	3	8
50-W	5	5	4	3	17
50-1S	5	5	4	3	17
55-W	5	5	4	3	17
55-1/4S	5	5	4	3	17
55-1/2S	5	5	4	3	17
55-1S	5	5	4	3	17
55-2S	5	5	4	3	17
55-4S	5	5	4	3	71
60-W	5	5	4	3	17
60-1S	5	5	4	3	17
65-1/4S	5	0	0	3	8
65-1/2S	5	0	0	3	8
65-1S	5	5	4	3	17
65-2S	5	0	0	3	8

生（記号28K）の4種類である。

これらの養生はすべて恒温室内（20℃）で行い、海水養生に用いた海水は自然海水（表-6）である。また、養生水は、15日程度に一度の割合で交換した。なお、配合、養生別の供試体数を、表-8に示す。

c) 測定項目

イ) 鉄筋の電気化学的測定

モルタル中铁筋の電気化学的測定として、不動態のグレイドを判定した。なお、ここでは、再測定の影響をなくすため、1供試体につき、ただ1回の測定しか行わず、再測定は行わなかった。

ロ) モルタル中塩素量の測定

モルタル中塩素量を測定した。かぶり約1.5cmの部分のモルタルを約1g採取してそれをすりつぶしたものを、3.3(1)で述べた可溶性塩素の抽出方法で抽出した。

定量方法としては、材令180日までのものの一部分と材令1年のものすべてを、クロム酸銀—吸光度法により測定し、また、材令180日までのものの大部分を簡便のため直読式の塩素イオン活性度測定用電極を用いて測

定した。

ハ) 鉄筋の腐食度の測定

この実験では、目視による腐食状況のみを観察し、その結果を腐食度という尺度を用いて表した。

すなわち、①腐食がまったく認められずに光沢のあるものを腐食度0、②腐食は認められないが光沢のなくなったもの、あるいは、光沢はあるが点錆等が一部に発生しているものを腐食度1、③点錆が広い範囲にあるものを腐食度2、④腐食が広い範囲にあるものを腐食度3、とした。

この判定基準によって、材令1年の鉄筋の腐食度を判定した。

(3) コンクリート中（10年試験）シリーズ3

a) 目的

ここでは、暴露条件として感潮部を用い、材令は10年という長期材令とした。これによって、前述したコンクリートおよびモルタルの1年試験の結果を長期材令試験結果と比較することによって検証することができる。

表-9 セメントの化学分析結果

セメントの種類	記号	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	S (%)	f. cao (%)
普通ポルトランドセメント	NO	0.8	0.3	21.7	5.5	3.1	64.7	1.3	2.0	0.30	0.57	—	0.9
普通ポルトランドセメント	N2	1.7	0.3	20.7	5.2	2.9	63.3	1.2	3.9	0.27	0.56	—	0.9
早強ポルトランドセメント	HO	1.1	0.5	20.6	5.2	2.7	65.3	2.2	2.5	0.37	0.54	—	0.9
中庸熱ポルトランドセメント	MO	0.8	0.2	23.5	4.5	3.8	65.4	1.2	1.7	0.28	0.48	—	0.5
B種高炉セメント	BO	0.4	0.7	25.7	9.7	2.1	54.1	3.2	2.4	0.46	0.51	0.4	0.3
B種高炉セメント	B2	1.3	0.6	24.4	9.3	2.0	53.2	3.0	4.3	0.44	0.48	0.4	0.4

表-10 セメントの物理試験結果

セメントの種類	記号	比重	粉末度		凝結		安定性	フロー値 (mm)	強さ								
			比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準網ふるい 80μ残分 (%)	水量 (%)	始発時 (分)			終結時 (分)	曲げ強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )			
										1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	NO	3.14	3180	1.6	27.5	2:28	3:28	良	250	—	32.9	46.1	69.0	—	131	226	422
普通ポルトランドセメント	N2	3.12	3570	1.6	27.8	2:50	3:50	良	249	—	39.0	47.3	72.6	—	159	231	380
早強ポルトランドセメント	HO	3.13	4290	0.7	29.0	2:23	3:26	良	259	30.8	47.7	62.4	74.7	115	226	338	447
中庸熱ポルトランドセメント	MO	3.19	3260	2.0	25.5	3:02	4:27	良	255	—	25.3	36.0	62.2	—	90	146	317
B種高炉セメント	BO	3.04	3850	1.4	28.8	3:34	5:10	良	255	—	28.1	34.9	62.0	—	97	152	346
B種高炉セメント	B2	3.00	4100	1.3	29.0	3:54	5:52	良	253	—	26.8	37.8	63.8	—	9	152	325

表-11 アルミナセメントの化学分析および物理試験結果

化学成分 (%)			比重	粉末度		曲げ強さ (1日) (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強さ (1日) (kgf/cm <sup>2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準網ふるい 88μ残分 (%)		
60.6	2.5	32.5	2.98	42.30	0.2	67.2	468

すなわち、養生（暴露）条件および練り混ぜ時に含まれる塩素の影響を長期にわたって確認する。さらに、セメントの種類の影響についても検討する。なお、電気化学的方法としては、自然電極電位の測定および不動態のグレイドの判定を行った。

b) 供試体の製作および暴露条件

イ) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（記号 NO および N2）、早強ポルトランドセメント（記号 HO および H2）、中庸熱ポルトランドセメント（記号 MO）、B種高炉セメント（記号 BO および B2）、およびアルミナセメント（記号 AL）を用いた。N2、B2のセメントは、それぞれ NO、BO（昭和45年当時の市販セメント）に化学石膏を SO<sub>3</sub> 重量で2%増量したものである。表-9～表-11 に使用したセメントの化学成分および

物理試験結果を示す。

ここを、SO<sub>3</sub> 量を変化させて検討したのは、昭和44年に JIS R 5210～5213 が改正され、セメント中の SO<sub>3</sub> 量が2%増加してよいことになったためである。このため、SO<sub>3</sub> の変化がコンクリートの長期の耐海水性にどのような影響を与えるかを検討することが必要となった。しかしながら、本研究ではこの点については、特には言及しない。

粗骨材および細骨材は、神奈川県相模川産のもので、

表-12 使用骨材の物理試験結果

種別	比重	吸水量 (%)	粗粒率
細骨材	2.61	2.52	2.98
粗骨材	2.65	1.05	6.85

表-13 海 水 の 化 学 成 分

試料採取日	比重 (20°C)	pH (20°C)	化 学 成 分 (mg/l)						
			Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>
1970年2月3日	1.024	8.03	10125	387	376	1180	17136	2412	65

表-14 コ ン ク リ ー ト の 配 合

セメントの種類	記号	練り混ぜ水	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 s/a (%)	単 位 量 (kgf/m <sup>3</sup> )						塩素含有量 vs モルタル (%)
								水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (l)	AE剤 (c. c.)	
普通ポルトランドセメント	NO	水道水 海水	25	6.6	3.4	52.7	37.0	153	290	740	1261	2.9	—	—
			25	5.6	3.2	53.4	36.0	155	290	718	1277	2.9	—	0.227
早強ポルトランドセメント	N2	水道水 海水	25	6.4	4.0	54.5	37.0	158	290	734	1251	2.9	—	—
			25	5.1	3.4	55.2	36.0	160	290	713	1270	2.9	—	0.235
中庸熱ポルトランドセメント	HO	水道水 海水	25	3.7	3.9	53.1	37.0	154	290	748	1258	2.9	—	—
			25	5.7	3.1	55.2	36.0	160	290	711	1263	2.9	—	0.235
B種高炉セメント	BO	水道水 海水	25	3.5	3.0	52.4	37.0	152	290	738	1258	2.9	—	—
			25	4.0	3.8	53.1	36.0	154	290	716	1274	2.9	—	0.226
アルミナセメント	B2	水道水 海水	25	4.2	3.8	54.8	37.0	159	290	729	1242	2.9	—	—
			25	4.7	4.1	55.5	36.7	161	290	708	1258	2.9	—	0.237
アルミナセメント	AL	水道水 海水	25	6.3	3.1	52.1	37.0	151	290	737	1256	2.9	20	—
			25	5.1	3.5	52.8	36.0	153	290	716	1272	2.9	—	0.225

注) スランプ、空気量は測定値

その物理試験結果を表-12に示す。

コンクリートの練り混ぜ水として、水道水と海水を用いた。海水の成分を、表-13に示す。

減水剤としては、ポゾリス No. 5 Lを用い、空気量の調節には、AE剤ポゾリス No. 303を使用した。

鉄筋は、JIS RG 3112に定めるφ9mmの丸鋼を用い、コンクリート中の埋め込み長さ18cmをとした。埋め込み鉄筋は、10%クエン酸アンモニウム溶液によって黒皮を除去して、光沢状態として使用した。

ロ) 供試体の製作

コンクリートの配合条件は、粗骨材の最大寸法25mm、単位セメント量290 kgf/m<sup>3</sup>、スランプ5 cm、空気量4%を目標とした。配合結果を表-14に示す。

供試体は、φ15×30 cmの円柱供試体であり、圧縮強度試験供試体、鉄筋腐食試験供試体、および、自然電極電位測定供試体の3種類のものを製作した。

鉄筋腐食試験供試体は、埋め込まれた鉄筋の腐食の観察に用いるとともに、供試体の上下両端を、カッターに

より切断して、コンクリートの中性化試験に用いた。鉄筋腐食試験供試体に埋め込む鉄筋の本数は、1供試体につき3本とし、かぶりをそれぞれ2、4、7 cmと変化させた。

また、埋め込み鉄筋の電気化学的測定に用いる自然電極電位測定供試体は、鉄筋腐食試験供試体と同様のものとして、各鉄筋の上端にφ1 mmの穴をあけ、それをリード線に接続したものである。

コンクリートの練り混ぜには容量200 lの強制練りミキサーを用いた。コンクリートの打設は、20°Cの恒温室内で行った。型枠に、コンクリートを2層に分けて詰め、各層を棒状振動機で締め固めた。鉄筋腐食試験供試体および自然電極電位測定供試体では、コンクリートを上面まで打ち込んだ後に、鉄筋の固定金具を取り外して、表面より4~5 cmの部分を振動機により再び締め固めて、コンクリートの表面を金ごて仕上げた。

ハ) 供試体の養生および暴露

成形したコンクリート供試体は、恒温室内に静置し

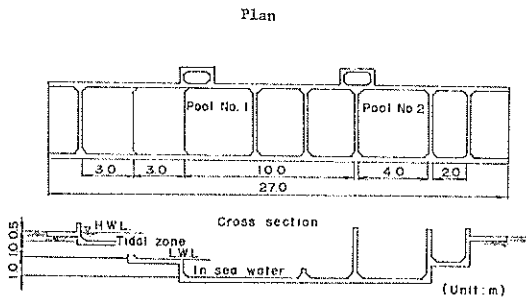


図-16 海水循環水槽概略図

て、翌日脱型して、標準養生水槽(21°C)にて6日間養生(早強ポルトランドセメントの場合3日間)を行った後、海水循環水槽の最も腐食環境の厳しいと考えられた感潮部に設置した。

海水循環水槽は、図-16に示す構造を有し、1日2回ポンプで海水を給排水し、1.5mの潮位差で自然の潮せき作用に似た状態を模倣するものである。この水槽の海水は、久里浜湾(神奈川県)に面した護岸に隣接した井戸から採取している。海水の化学成分は、表-13に示すものである。また、海水の温度は、夏期で約24°C、冬期で約8°Cである。

c) 測定項目

イ) 圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108により行った。試験は、初期材令、1年、5年、および10年、の各材令にて行った。

ロ) コンクリート中の塩素含有量

鉄筋腐食試験供試体を用いて、かぶりがそれぞれ2, 4, 7cmの鉄筋近傍のコンクリートを5~10g採取し、さらに、3.3(1)に述べた全塩素に対する抽出を行い、その後、クロム酸銀一吸光度法によって塩素を定量した。塩素含有量については、材令10年で試験を行った。

ハ) コンクリート中の鉄筋の腐食状況

材令10年で、鉄筋腐食試験供試体を割裂して、鉄筋を取り出して表面の腐食状況を観察した。鉄筋に接したコンクリートについては、供試体割裂後ただちにフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹きつけて、中性化の有無を確かめた。

取り出した鉄筋について、肉眼で観察できる腐食した部分をトレースしてプランメーターによって腐食面積を測定した。

ニ) コンクリート中鉄筋の電気化学的性質

① 自然電極電位

このシリーズの試験においては、照合電極として海水

塩化銀電極を用いた。なお、測定時には、供試体は、海水に浸っている状態とした。

② 不動電位のグレイド

材令10年において、鉄筋腐食試験供試体を用いて分極曲線を測定し、不動電位のグレイドを判定した。この場合、コンクリート供試体の下層部分(約5cm)のコンクリートを割裂ではぎ取り、鉄筋の端部を露出させ、ハンダ付けによりリード線を接続した。接続部およびコンクリートの割裂面は、エポキシ樹脂でコーティングした。また、照合電極および対極としてそれぞれ飽和甘こう電極およびステンレス鋼を用いた。

このシリーズでは、電位の掃引速度を40mV/min(0.67mV/s)とした。

ホ) コンクリートの中性化

鉄筋腐食試験供試体を図-17に示すように上面より5cmおよび25cmで割裂により切断し、さらに、上面から5cmまでの部分を半割りとしてフェノールフタレイン溶液を吹きつけ、着色状態をトレースした。試験は、材令1年、5年、10年で行い、最大中性化深さを測定した。また、平均中性化深さもプランメーターにより中性化部分の面積を測定して、それを周辺長で除することによって求めた。

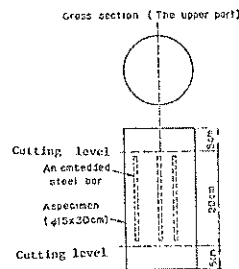


図-17 鉄筋腐食試験用供試体及びその切断面

4.2 ひびわれのある場合

(1) モデル供試体—シリーズ4

a) 目的

このシリーズでは、ひびわれのあるコンクリート中鉄筋の腐食に関して、主として電気化学的試験を行い、ひびわれのある場合の腐食機構を明らかにせんとした。

すなわち、目的の1つは、各種の電気化学的方法の、ひびわれのあるコンクリート中鉄筋への有効性の検討である。

さらに、3.2(2)で述べた鉄筋を12の要素に分割したモデル鉄筋をコンクリート中に埋め込んだ供試体を用

表-15 コ ン ク リ ー ト の 配 合

記 号	スランブ (cm)	W/C (%)	W (kgf/m <sup>3</sup> )	C (kgf/m <sup>3</sup> )	G (kgf/m <sup>3</sup> )	S (kgf/m <sup>3</sup> )	Sea Salt (kgf/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	供試体の記号
45-5-T	5	45	190	422.7	748.2	952.7	0	455	V-45-T, VC-45-T
45-5-S	5	45	190	422.7	748.2	952.7	6.84	435	V-45-S, VC-45-S
65-12-T	12	65	240	369.7	748.2	874.4	0	231	V-65-T, VC-65-T
65-12-S	12	65	240	369.7	748.2	874.4	8.14	251	V-65-S, VC-65-S
45-7-T	7	45	220	488.9	748.2	819.5	0	448	S型
45-12-T	12	45	240	533.3	748.7	720.8	0	444	V-45-1-T

い、要素鉄筋おのおの分極曲線の測定および要素鉄筋相互の電流を測定することによって、おのおのミクロセル電流およびマクロセル電流を算定した。これによって、ミクロセル電流およびマクロセル電流におよぼす塩素の影響を検討した。さらに、乾湿がマクロセル電流に及ぼす影響も検討した。

b) 供試体の製作および養生条件

イ) 使用材料

使用材料は、シリーズ1のものと同一である。ただし、タイプⅢセメントは用いなかった。

ロ) 配 合

配合を表-15に示す。この配合は、シリーズ1の配合の一部と同一である。

ハ) 供試体の形状および配筋

供試体は、S、VおよびVC型の3種を用いた。

S型は、 $\phi 6 \times 6$  in. (約  $15 \times 15$  cm) の寸法の円柱供試体であり、V型およびVC型は、 $7.5 \times 7.5 \times 40$  cmの角柱供試体である(図-10参照)。

S型の埋め込み鉄筋の本数は、1供試体につき2本(長さ10 cm)とし、かぶりはおのおの1.25 cmおよび7 cmとした。

V型およびVC型の鉄筋としては、3.2(2)で述べた図-10に示すような鉄筋を用いて、各供試体にそれを埋め込んだ。かぶりは約3.3 cmとした。

ニ) 供試体の製作

供試体の製作は、シリーズ1と同様に行った。

ホ) 養生条件

成形したコンクリート供試体は、室内に静置し、濡れた布でおおい、1日で脱型後、恒温恒湿室(20°C, 100% R. H.)において2か月間養生した。その後、一部は水道水中養生し、残りは3.6% NaCl 溶液中で養生した。

シ) 測定項目

イ) 鉄筋の腐食に関する測定

鉄筋の腐食に関しては、主として表面観察を行った。

ロ) 電気化学的測定

表-16 供試体の種類

供試体の名	配 合 (記号)	供した試験および本数
S型	45-7-T	ひびわれ前後の電気化学的変化 2本
V-45-T	45-5-T	Open 供試体1本, Closed 供試体2本, Dry and Wet 供試体2本
V-65-T	65-12-T	同 上
V-65-S	65-12-S	同 上
V-45-12-T	45-12-T	同 上
V-45-S	45-5-S	Open 供試体1本, Closed 供試体1本
VC-45-T	45-5-T	Open 供試体1本
VC-45-S	45-5-S	Closed 供試体4本 (水道水中2本, NaCl 溶液中2本)
VC-65-T	65-12-T	Dry and Wet 供試体2本
VC-65-S	65-12-S	

鉄筋の電気化学的測定として、自然電極電位、分極曲線、腐食電流、および、マクロセル電流を測定した。

なお、供試体の種類の一覧を表-16に示す。

(2) コンクリート中(1年)シリーズ5

a) 目 的

このシリーズでは、ひびわれを有するコンクリート角柱供試体を用いて、外部環境より侵入する海水、および、練り混ぜ水として混入する海水が、コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響を検討する。ひびわれのない場合との比較検討も当然行う。

さらに、ひびわれのある場合における、各種の電気化学的方法の有効性についても検討する。

b) 供試体の製作および養生(暴露)条件

イ) 使用材料

使用材料は、シリーズ1と同一である。なお、鉄筋の長さのみが30 cmと異なったものを用いている。

ロ) 配 合

表-17 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	スランブ(cm)	W/C (%)	W (kgf/m <sup>3</sup> )	C (kgf/m <sup>3</sup> )	G (kgf/m <sup>3</sup> )	S (kgf/m <sup>3</sup> )	Sea Salt (kgf/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	備考
45-T	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	0	455	
45-S	I	5	45	190	422.2	748.2	952.7	6.84	435	
55-T	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	0	337	
55-S	I	5	55	190	345.5	748.2	1015.3	6.84	334	
65-T	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	0	254	
65-S	I	5	65	190	292.3	748.2	1060.6	6.84	232	
H-T	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.8	0	* 402	A. E. 剤
H-S	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	7.07	* 398	A. E. 剤
H-H	III	7	50	196.5	391.9	1088.8	603.9	0	* 420	A. E. 剤+Hydrosset

注：スランブは目標値 \* 7日強度 圧縮強度は2本の平均値

配合および圧縮強度を表-17に示す。これらは、シリーズ1で用いたものの一部である。

ハ) 供試体の形状および配筋

供試体は、3×3×16 in. (約7.5×7.5×40 cm) の寸法を有する。埋め込み鉄筋は、1供試体につき1本とし、かぶりは、1.25 cm とした。

ニ) 供試体の製作

コンクリートの練り混ぜおよび打ち込みは、シリーズ1と同様に行った。

締め固めは、振動台を用いて行った。埋め込み鉄筋は、1層を締め固めた後、所定の位置に固定した。その後、2層目を打ち込み、凝結終了後、上面を金ごて仕上げした。

ホ) 養生条件

成形したコンクリート供試体は、材令1日で脱型し、材令28日まで恒温恒湿室(20°C, 100% R. H.)にて養生した。

28日間の標準養生後、供試体を3つのグループに分け、以下の3種の養生を適用した。すなわち、S養生：恒温恒湿室内において11か月標準養生(全期間1年)、N養生：3.6% NaCl 溶液中に11か月浸し(全期間1年)、X養生：N養生の後3か月間空中養生(全期間1年3か月)の3つである。

c) 測定項目

イ) 鉄筋の腐食に関する測定

鉄筋の腐食に関する測定としては、表面観察、腐食面積の測定、および錆重量の測定を行った。

ロ) 鉄筋の電気化学的測定

鉄筋の電気化学的測定としては、不動態のグレイドの判定および自然電極電位の測定を行った。

上記の測定項目について、配合、養生条件別に整理した測定本数を表-18に示す。

表-18 測定項目および測定本数

配合 (記号)	養生 条件	製作 本数	測定本数		
			鉄筋の腐食に関する測定	不動態の判定	Potential (自然電極電位)
45-T	N	2	2	1	2
45-S	N	2	2	1	2
55-T	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
55-S	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
65-T	N	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
65-S	N	2	2	1	2
	X	2	2	1	2
H-T	M	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
H-S	N	2	2	1	2
	S	2	2	1	2
H-H	M	2	2	1	2
	S	2	2	1	2

d) コンクリート供試体へのひびわれ導入

材令28日において、コンクリート供試体に1点載荷により曲げモーメントを与え曲げひびわれを導入した。鉄筋応力度として2000 kgf/cm<sup>2</sup>を目標としたが、コンクリートの曲げ強度が高く、所定のひびわれ幅のひび

表-19 供試体の残留ひびわれ幅および  
載荷時鉄筋応力度

配 合 (記号)	養生 条件	番号	ひびわれ幅 (mm)				鉄筋応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			①	②	③	total	
45-T	N	1	0.20	—	—	0.20	2397
		2	0.15	—	—	0.15	3120
45-S	N	1	0.15	—	—	0.15	2952
		2	0.15	—	—	0.15	3055
55-T	N	1	0.10	—	—	0.10	2680
		2	0.30	—	—	0.30	2961
		3	0.20	—	—	0.20	3196
		4	0.25	0.06	—	0.31	3290
	S	1	0.04	0.08	0.10	0.22	3055
		2	0.08	—	—	0.08	2961
55-S	N	1	0.20	0.08	—	0.28	3290
		2	0.08	—	—	0.08	2679
		3	0.10	—	—	0.10	2585
		4	0.10	—	—	0.10	3149
	S	1	0.08	—	—	0.08	2632
		2	0.10	—	—	0.10	3385
65-T	N	1	0.08	0.20	—	0.28	2867
		2	0.15	—	—	0.15	2538
65-S	N	1	0.08	—	—	0.08	2914
		2	0.08	—	—	0.08	2491
H-T	N	1	0.10	—	—	0.10	2632
		2	0.05	—	—	0.05	2914
	S	1	0.05	—	—	0.05	2914
		2	0.05	0.05	—	0.10	3769
H-S	H	1	0.10	—	—	0.10	2820
		2	0.05	0.05	—	0.10	3290
	S	1	0.05	—	—	0.05	3290
		2	0.05	—	—	0.05	3290
H-H	N	1	0.09	—	—	0.05	3010
		2	0.05	—	—	0.05	3525
	S	1	0.05	—	—	0.05	3243
		2	0.05	—	—	0.05	3290

われが発生するまで載荷したところ鉄筋応力度は約3000 kgf/cm<sup>2</sup>となった。表-19に、1週間後に測定した残留ひびわれ幅の測定結果を示す。

#### 4.3 補足試験

##### (1) コンクリート中の塩素量の実態—シリーズ6

海洋環境下の実在構造物のコンクリート中の塩素量の

実態を把握して、供試体での実験値との比較を目的とした。

ここでは、所定のかぶりを有する位置のコンクリートの全塩素を測定することとし、抽出方法は、試料を白金るつぼで溶解後抽出する方法とし、定量方法は、クロム酸銀—吸光光度法を用いた。

##### (2) ひびわれと塩素の侵入—シリーズ7

ひびわれの発生によって、海洋環境下（海中部、感潮部）では、海水は速やかにひびわれ箇所およびそれに連続する鉄筋とコンクリートとはく離部に侵入すると考えられる。この海水の侵入は、練り混ぜ水中の塩素量に関係せず、したがって、ひびわれのある場合では、ひびわれのない場合に比較して、練り混ぜ水（水道水と海水）による鉄筋の腐食の違いは少ないものと考えられる。

このシリーズでは、ひびわれ部にどの程度の塩素が侵入するかについて簡単な試験を行った。

フランレジンコンクリートを用いた供試体を2体製作した。フランレジンコンクリートを用いた理由は、塩素イオンのひびわれ部以外からの侵入を避けるためである。鉄筋およびその配筋は、シリーズ5と同一である。また、ひびわれ導入時の鉄筋応力度は、約3500 kgf/cm<sup>2</sup>とした。残留ひびわれ幅は、1つの供試体では0.15mmのものが1つ、他の1本では、0.10mmと0.15mmの2つのひびわれが発生していた。

ひびわれ導入は、材令1か月で行い、その後、材令1年までNaCl溶液中に浸した。

##### (3) 海洋環境下のコンクリートの空隙率の測定、X線回折、および、SEM観察—シリーズ8

###### a) 目的

コンクリートの内部構造に及ぼす練り混ぜ水としての海水および外部から侵入してくる海水の影響を検討するのが目的である。

###### b) 供試体の製作および暴露条件

###### イ) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いた。表-20および表-21に使用セメントの化学成分および物理的性質を示す。

粗骨材には、両神（千葉県）産砕石（最大寸法15mm）を、細骨材には、木更津産山砂を用いた。表-22に骨材の物理的性質を示す。

練り混ぜ水としては、海水および水道水（横須賀市）を用いた。

混和剤として、ヴィンソルを用いた。

###### ロ) 配合

コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートと

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

表-20 セメントの化学成分

セメントの種類	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
普通ポルトランドセメント	0.67	0.08	22.65	5.50	3.08	63.74	1.71	2.02
B種高炉セメント	1.26	0.20	25.47	9.06	2.42	54.09	3.96	2.82

表-21 セメントの物理的試験

セメントの種類	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結			安定性	強 さ					
			水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		曲げ強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )			圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )		
							3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.17	3240	27.4	2:00	3:22	良	32	48	74	128	212	431
B種高炉セメント	3.04	3820	29.5	4:05	5:54	良	30	41	75	112	183	431

表-22 骨材物理的性質

骨材の種類	F.M.	表乾比重	吸水率 (%)	単位容積量 (kgf/m <sup>3</sup> )	実積率 (%)	安定性 (損失量%)	洗い損失量 (%)	粘土塊 (%)	有機物
粗骨材	6.57	2.70	0.79	1520	56.5	7.9	1.0	0.8	一
細骨材	2.80	2.61	1.64	1770	68.9	6.2	1.0	0.4	良

表-23 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートとしての性質

記号	セメントの種類	W/C (%)	練り混ぜ水	s/a (%)	単位量 (kgf/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度
					セメント	水	細骨材	粗骨材	A E 剤			
NWH	普通ポルト	55	水道水	46	290	160	843	1026	0.0522	9.1*	4.9*	18~ 21°C
NSH	〃	55	海水	46	290	160	843	1026	0.0522	7.7*	4.7*	
BSH	B種高炉	55	〃	46	290	160	840	1021	0.0870	7.5*	4.6*	

\* 2バッチの平均値

しての性質を表-23に示す。

ハ) 供試体の製作

練り混ぜは、100 l 強制練りミキサーを用いて行った。練り混ぜ時間は1分とし、締め固めは、突き棒によった。供試体は、φ10×20 cm の円柱供試体とし、3種類をおのおの2本合計6本試験した。

ニ) 養生(暴露)条件

供試体は、恒温室(20°C)に材令2日まで静置し脱型した。その後、材令28日まで水中標準養生を行った。1種類2本の供試体のうち、おのおの1本ずつを材令1年まで水道水中標準養生および循環水槽中にて海水養生した。

ホ) 試料の採取

材令1年において、試料を円柱供試体の上下部5 cm

を除いたものの表面から1.5~2.5 cm のモルタル部を試料とした。

5. 実験結果

5.1 ひびわれのない場合

(1) コンクリート中(1年試験)ーシリーズ1

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

標準養生(気中)およびNaCl溶液中にて養生したコンクリート中鉄筋は、割裂して取り出した直後は、湿っていた。錆の形状は、楕円状もしくは筋状のものが大部分で、互いに独立して存在しており、連続しているものはなかった。楕円状のもの発生箇所は、鉄筋の凹凸に關係ないと思われたが、筋状のもの発生箇所は、凹部



表-24 鉄筋の腐食面積および錆の重量

配 合 (記 号)	養生条件	かぶり (cm)	腐 食 面 積 (mm <sup>2</sup> )			腐食面積率 (%)	錆 の 重 量 (mgf)			錆の厚さ (mgf/mm <sup>2</sup> ) B/A
			① (③)	② (④)	平 均 A		① (③)	② (④)	平 均 B	
45-5-T	N S	1.2	2.2	9.5	5.85	0.19	1	1	1	0.17
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		3.3	0	0	0	0	0	0	0	
45-5-S	N S	1.2	35*	59*	47	1.55	6	8	7	0.15
		1.2	6*	0	0	0.10	1	0	0.5	0.17
		3.3	16*	8	12	0.40	2	0.5	1.25	0.10
45-7-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
45-7-S	N S	1.2	0	3	1.5	0.05	0	0.05	0.25	0.17
		1.2	15	16	15.5	0.51	2	0.5	1.25	0.08
45-12-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
45-12-S	N S	1.2	8*	13*	10.5	0.35	2	1	1.5	0.14
		1.2	28	9	18.5	0.61	0.5	1	0.75	0.04
50-5-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
50-5-S	N S	1.2	16	4	10	0.30	1	1	1	0.10
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
55-5-T	N	1.2	12	6	7.33	0.24	2	1	1.33	0.18
		1.2	4	3	1.5	0.05	1	0.5	0.25	0.17
	S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0.13
		3.3	4*	0	2	0.07	0	0	0.25	
	A	3.3	3.5*	0	1.75	0.06	1	0	0.5	0.29
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
55-5-S	N	1.2	4	7	5	0.17	0	2	1	0.2
		1.2	4	0	0	0	0	0	0	
	S	1.2	0	0	4	0.13	1	0	0.5	0.13
		3.3	7*	1*	7.5	0.25	0.5	1	0.75	0.10
A	1.2	9*	6*	0	0	0	1	0		
65-5-T	N	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		3.3	0	0	0	0	0	0	0	
65-5-S	N	1.2	1	31	16	0.53	0	5	2.5	0.16
		3.3	13*	12*	12.5	0.41	3	3	3	0.24
	S	1.2	0	13	6.5	0.21	0	0.5	0.25	0.04
65-12-T	N S	1.2	0	3	1.5	0.05	0	0	0	0
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
65-12-S	N S	1.2	12*	2.5*	18.5	0.61	1	3	2	0.11
		1.2	45	10	27.5	0.91	1	0.5	0.75	0.03
H-T	N S	1.2	0	0	0	0	0	0	0	
		1.2	0	0	0	0	0	0	0	
H-S	N S	1.2	10	30	20	0.66	0.5	5	2.75	0.14
		1.2	7	0	3.5	0.12	1	0	0.5	0.14
H-H	N S	1.2	25	0	12.5	0.41	1	0	0.5	0.04
		1.2	2	0	1	0.03	0.5	0	0.25	0.25
									平 均	0.134
									S. D.	0.069

(\* は pitting があると思われたもの)

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

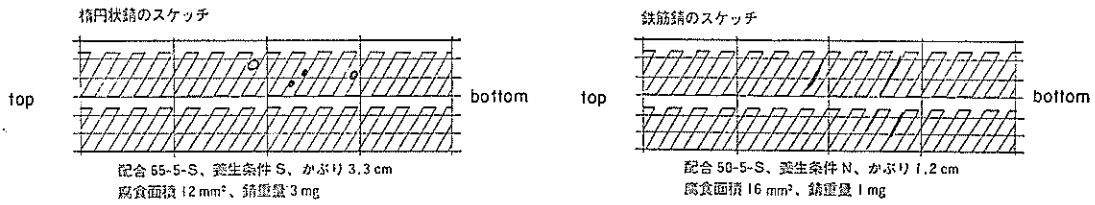


図-18 腐食状況スケッチ例

表-25 アノード分極曲線を用いた不動態判定

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令					平 均 (重み付き)
			1 か月	2 か月	4 か月	6 か月	12 か月	
45-5-T	N S	1.2	3	3	1	1	1	1.5
		1.2	3	3	1	1	1	1.5
		3.3	2	3	1	1	1	1.38
45-5-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	0	0	1	1	1	0.75
		3.3	0	0	1	1	1	0.75
45-7-T	N S	1.2	1	1	1	1	2	1.25
		1.2	1	1	1	1	1	1
45-7-S	N S	1.2	0	0	1	1	1	0.75
		1.2	0	0	1	1	1	0.625
45-12-T	N S	1.2	1	1	3	1	1	1.455
		1.2	1	1	3	1	1	1.33
45-12-S	N S	1.2	0	0	0	0	1	0.25
		1.2	0	0	0	0	1	0.25
50-5-T	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	3	1	1	1	1.25
50-5-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	1	1	1	1	1
55-5-T	N	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	2	3	1	1	1	1.38
	S	1.2	3	3	1	2	3	2.33
		1.2	1	1	1	1	1	1
A	3.3	1	1	1	1	1	1	
	1.2	1	3	3	5	5	3.92	
65-12-T	N S	1.2	2	1	1	1	1	1.13
		1.2	2	3	3	3	3	2.88
65-12-S	N S	1.2	0	0	0	0	1	0.25
		1.2	0	0	0	0	1	0.25
H-T	N S	1.2	3	3	1	1	1	1.5
		1.2	3	2	1	2	1	1.71
H-S	N S	1.2	1	1	1	1	1	1
		1.2	1	1	1	1	1	1
H-H	N S	1.2	1	2	1	1	1	1.13
		1.2	1	1	2	1	1	1.17

表-26 腐食電流密度および1年間の全腐食電流

(電流密度単位 nA/cm<sup>2</sup>)

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令					全 腐 食 流 Faraday	鉛を Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> とし たときの 重量(mg)
			1 か年	2 か月	4 か月	6 か月	12か月		
45-5-T	N S	1.2	183	187	1475	5400	2532	0.027	772
		1.2	150	130	194	—	—	—	—
		3.3	165	181	127	—	—	—	—
45-5-S	N S	1.2	3320	690	1360	2400	8859	0.037	1060
		1.2	1910	1736	2400	2600	3360	0.025	726
		3.3	1268	1476	2823	3240	5680	0.032	939
45-7-T	N S	1.2	3658	2823	1476	2412	2432	0.024	699
		1.2	2355	1597	2290	3228	3498	0.028	801
45-7-S	N S	1.2	2187	3061	2603	2979	2990	0.028	802
		1.2	3061	3320	2603	2720	2977	0.028	816
45-12-T	N S	1.2	1800	5856	—	484	1834	0.021	596
		1.2	1858	1780	375	1800	1871	0.015	449
45-12-S	N S	1.2	5000	5856	2642	2658	2070	0.031	907
		1.2	2068	1593	1056	1780	1041	0.015	421
50-5-T	N S	1.2	1071	2213	1476	2776	4112	0.025	739
		1.2	1993	659	2603	2412	2637	0.022	631
50-5-T	N S	1.2	2440	2603	2305	2312	2336	0.023	671
		1.2	1726	3320	3061	3126	3200	0.029	345
55-5-T	N	1.2	907	2040	1667	5856	3643	0.034	994
		1.2	269	103	1157	1255	7073	0.024	687
	S	1.2	111	238	581	5400	1833	0.023	676
		1.2	2400	2040	1600	2440	3498	0.025	711
A	3.3	2041	2400	2040	2068	2745	0.022	643	
	1.2	114	90	63	248	350	0.002	58	
55-5-S	N S	1.2	1067	514	343	1448	6412	0.023	663
		1.2	623	971	1255	1807	2564	0.016	468
	A	3.3	2400	2364	1929	2400	3793	0.026	755
		1.2	1379	3904	1736	3200	4112	0.030	862
65-5-T	N	1.2	2041	210	303	3320	5287	0.027	782
		3.3	114	194	1600	5856	4257	0.032	941
65-5-S	N	1.2	2400	771	713	2213	5287	0.025	729
		3.3	2734	1067	771	2213	6158	0.028	816
	S	1.2	1583	1549	2603	1667	2976	0.021	602
65-12-T	N S	1.2	94	4592	4458	4281	4113	0.037	1072
		1.2	474	118	1067	207	336	0.004	115
65-12-S	N S	1.2	3061	6350	5114	5240	5682	0.051	1471
		1.2	4063	4234	3949	4112	4834	0.042	1211
H-T	N S	1.2	155	74	836	2603	1691	0.014	413
		1.2	204	437	1362	907	960	0.008	241
H-S	N S	1.2	776	2822	3600	2823	3728	0.029	828
		1.2	1735	1475	2213	7238	1691	0.035	1021
H-H	N S	1.2	2353	372	3320	2823	2976	0.025	731
		1.2	2894	3061	837	2823	3498	0.026	765

の打ち込み方向に向かって上側の凸部との境界線に沿って発生しているものが多かった(図-18)。

錆の色は、黒が大部分でこげ茶が若干あった。これは、錆の大部分がマグネタイト( $Fe_2O_3$ )であることを示しているものと思われる。

ロ) 腐食面積

表面観察の後、錆の状態を写生して、プランメーターにて面積を測定した。結果を表-24に示す。この表では、同一配合、同一養生条件、および同一かぶり別に腐食面積を平均し、さらに、鉄筋表面積を $30.3cm^2$ として腐食面積率を示した(厳密に異形鉄筋の表面積を求めるのは困難なため)。

なお、腐食面積の測定精度は、整数位( $mm^2$ )までに判断した。なお、腐食面積は全体的に非常に小さかった。

ハ) 錆重量

腐食面積測定後、カッターナイフで鉄筋よりこすりとれる錆を取り、直示天秤(精度は $0.5mg$ までと考えた)を用いて錆重量を測定した。表-24に、腐食面積とともに、錆重量およびその平均値を示した。さらに、錆の厚さに関係すると考えられる量として、錆重量を腐食面積で除した量を示した。

イ) 鉄筋の電気化学的測定

エ) アノード分極曲線を用いた不動態のグレイドの判定

材令1, 2, 4, 6, 12か月におけるコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドを判定した。なお、測定は、同一配合、同一養生条件、および同一かぶりについて1供試体を選び(ただし、55-5-T, 55-5-S, および、55-5-Nのかぶり $1.2cm$ についてはおのおの2本)、各材令における測定を同一供試体について実施した。測定結果を用いて得た不動態のグレイドを、表-25に示す。

ロ) 腐食電流

アノード分極曲線より Tafel 近似を用いて、材令1, 2, 4, 6, 12か月におけるコンクリート中鉄筋の腐食電流を算定した。算定結果を、表-26に示す。

なお、表中、全腐食電流(単位: Faraday)は、電流密度に面積を乗じて電流を求め、さらに、それに期間を乗じて求めたものである(具体的には、1.5, 1.5, 2, 4, 3をおのおの乗じた)。さらに、全腐食電流が、すべて $Fe_2O_3$ を生成するために用いられたとしてその量を算定した。

ハ) 再不動化電位

再不動化電位( $E_{rep}$ と略記する)を材令1年において測定した。その測定結果およびそれに対応する自然電極電位( $E_{corr}$ と略記する)との差を表-27に示す。

表-27 材令1年における再不動化電位( $E_{rep}$ )および自然電極電位( $E_{corr}$ )との差

配合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	$E_{rep}$ (mV)	$E_{rep}-E_{corr}$ (mV)
45-5-T	N S	1.2	-540	212
		1.2	211	449
		3.3	641	705
45-5-S	N S	1.2	-435	189
		1.2	-280	604
		3.3	-294	624
45-7-T	N S	1.2	-93	595
		1.2	-269	589
45-7-S	N S	1.2	-418	306
		1.2	-258	600
45-12-T	N S	1.2	515	703
		1.2	-116	706
45-12-S	N S	1.2	-377	437
		1.2	-305	549
50-5-T	N S	1.2	-381	561
		1.2	-180	544
50-5-S	N S	1.2	-240	158
		1.2	-288	434
55-5-T	N S A	1.2	-475	413
		1.2	-376	122
		1.2	601	759
		3.3	-96	732
55-5-S	N S A	1.2	-165	719
		1.2	538	628
		1.2	-500	332
		1.2	-255	603
55-5-S	N S A	1.2	-303	595
		3.3	-254	612
		1.2	470	500
65-5-T	N	1.2	-472	330
		3.3	-513	431
65-5-S	N S	1.2	-469	193
		3.3	-532	234
		1.2	-234	654
65-12-T	N S	1.2	-403	199
		1.2	651	793
65-12-S	N S	1.2	-490	174
		1.2	-196	546
H-T	N S	1.2	-512	442
		1.2	-93	361
H-S	N S	1.2	-454	474
		1.2	-224	546
H-H	N S	1.2	-501	461
		1.2	-64	706

$E_{rep}$  V.S. SCE

大 即 信 明

表-28 自然電極電位の測定値 (mV V.S. SCE)

2本の平均値

配 合 (記号)	養生条件	かぶり (cm)	測 定 材 令 (月)						平 均 値 (重み付き)
			1	2	4	6	9	12	
45-5-T	N S	1.2	-177	-244	-863	-1005	-812	-813	-710
		1.2	-167	-496	-347	-265	-323	-181	-290
		3.3	-153	-57	-106	-68	-65	-82	-85
45-5-S	N S	1.2	-663	-752	-764	-875	-708	-769	-760
		1.2	-899	-889	-910	-875	-893	-901	-893
		3.3	-914	-904	-932	-773	-750	-879	-841
45-7-T	N S	1.2	-710	-958	-543	-578	-660	-506	-648
		1.2	-867	-872	-894	-502	-362	-574	-652
45-7-S	N S	1.2	-899	-998	-959	-936	-860	-824	-910
		1.2	-861	-905	-917	-868	-840	-859	-872
45-12-T	N S	1.2	-840	-995	-607	-598	-594	-644	-684
		1.2	-845	-867	-611	-520	-831	-806	-733
45-12-S	N S	1.2	-896	-1008	-991	-920	-902	-814	-922
		1.2	-901	-916	-1001	-868	-761	-854	-872
50-5-T	N S	1.2	-901	-536	-416	-568	-838	-918	-692
		1.2	-873	-595	-875	-819	-803	-784	-799
50-5-S	N S	1.2	-895	-969	-906	-841	-808	-750	-855
		1.2	-920	-916	-856	-891	-847	-722	-860
55-5-T	N	1.2*	-172	-1018	-801	-878	-908	-890	-803
			-307	-672	-974	-936	-899	-708	-790
	S	1.2	-167	-176	-560	-882	-67	-190	-368
			-843	-873	-782	-857	-776	-847	-823
		3.3	-873	-879	-884	-871	-830	-862	-754
A	1.2	-199	-118	-78	-47	-19	+46	-61	
55-5-S	N S	1.2*	-915	-769	-805	-871	-869	-878	-874
		1.2	-940	-929	-919	-858	-843	-693	-863
	A	3.3	-901	-884	-784	-757	-839	-799	-821
			-950	-912	-884	-923	-868	-858	-897
		1.2	-909	-95	-57	-10	+48	+22	-122
65-5-T	N	1.2	-532	-639	-756	-1045	-684	-904	-737
		3.3	-516	-327	-492	-607	-565	-717	-545
65-5-S	N S	1.2	-909	-335	-451	-570	-569	-738	-584
		3.3	-895	-661	-556	-599	-765	-768	-699
		1.2	-909	-856	-897	-890	-880	-888	-887
65-12-T	N S	1.2	-520	-852	-683	-968	-925	-761	-813
		1.2	-503	-542	-416	-326	-333	-142	-369
65-12-S	N S	1.2	-911	-1046	-1029	-974	-974	-970	-964
		1.2	-929	-895	-715	-567	-567	-518	-688
H-T	N S	1.2	-171	-84	-482	-643	-630	-742	-484
		1.2	-137	-636	-751	-658	-666	-706	-614
H-S	N S	1.2	-916	-972	-977	-908	-782	-891	-895
		1.2	-914	-876	-900	-565	-842	-967	-810
H-H	N S	1.2	-911	-724	-854	-730	-925	-939	-847
		1.2	-764	-855	-578	-867	-736	-740	-756

ニ) 自然電極電位

自然電極電位を、材令1, 2, 4, 6, 9, 12か月で測定し、その結果を表-28に示す。

シ) 塩素含有量

材令1年においてコンクリート供試体の塩素含有量を測定し、その結果を表-29に示す。

(1) モルタル中(1年試験) — シリーズ2

ア) 不動態グレイドの判定

モルタル中鉄筋のアノード分極曲線を海中あるいは水道水中において、材令7日, 28日, 91日, 180日, および、1年において測定した。これらの測定例を図-19に示す。

これらの図をもとに、不動態のグレイドを判定し、その結果を表-30に示す。概略の傾向として、養生St(水道水中標準養生)では、材令とともに、不動態のグレイドは1になっていき、St以外の海水養生では、グレイドは0となっていくようである。

この表より容易にわかることは、養生Stでは、水セメ

表-29 材令1年での塩素含有量(モルタル重量比)

配 合 (記号)	養 生 条 件	塩素含有量 (%)
45-5-T	N	0.21
45-5-S	N S	0.45 0.11
50-5-T	N	0.23
50-5-S	N S	0.26 0.12
55-5-T	N	0.26
55-5-S	N S	0.51 0.17
65-5-T	N	0.38
65-5-S	N S	0.46 0.21

かぶり 1.2cm 2本の平均値

表-30 不動態のグレイドに及ぼす各因子の影響

Curing Conditions Ages (days) Kinds of specimens	St					1 K					7 K				28K		
	7	28	91	180	1 y	7	28	91	180	1 y	28	91	180	1 y	91	180	1 y
40 — W	1	2	1	1	1	1	1	1	0	0	1	2	1	0	2	1	0
40 — 1 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
40 — 2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	0
40 — 4 S	0	1	2	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
45 — W	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
45 — 1/4 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	0
45 — 1/2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0	—
45 — 1 S	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
45 — 2 S	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	0	0
55 — W	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
50 — 1 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	—
55 — W	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
55 — 1/4 S	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
55 — 1/2 S	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
55 — 1 S	0	1	1	1	1	0	1	1	—	0	1	0	0	0	0	0	0
55 — 2 S	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
55 — 4 S	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60 — W	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
60 — 1 S	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 — 1/4 S	—	0	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	—
65 — 1/2 S	0	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
65 — 1 S	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65 — 2 S	0	0	0	0	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0

\* 1y: 1 year

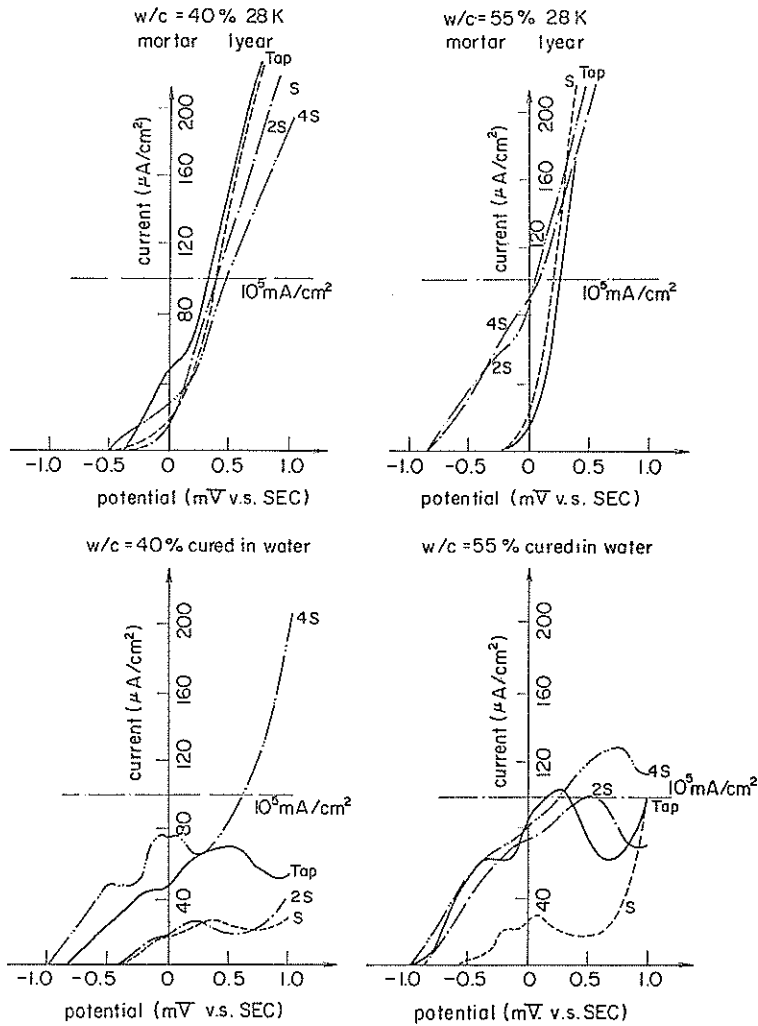


図-19 分極曲線 (W/C=40 and 55%)

ント比および練り混ぜ水の種類に関係なく、材令1年では、すべてのモルタル中鉄筋がグレイド1となる。これに対して、海水養生のものはすべてグレイド0となった。図さらに、表-30をもとに、海水養生において、不動態のグレイドが最初に0となる材令測定期間を養生別に、表-31に示す。これより、不動態のグレイドが0となるまでの期間は、水セメント比が小さいほど、練り混ぜ水中の塩素量が少ないほど、長くなること分かる。また、水道水中に28日まで養生し、その後海水養生したもの(28K)のものの方が、1K、7Kに比較して不動態がより長く維持されることが分かる。

b) 塩素含有量

所定の材令において測定した塩素含有量を、表-32お

よび表-33に示す。表-32は、塩素含有量を、モルタルに対する重量%で示したものであり、表-33は絶乾状態の砂に対する重量%で示したものである。

これらの表より容易に分かることは、養生 St では、当初混入された塩素量に対して、溶存塩素量は材令とともに減少する傾向にあること、および、海水養生では、溶存塩素量は増加することである。

表-34に、養生 St の練り混ぜ時に塩素を含んだ供試体において、材令1年での溶存塩素量の、当初含まれる塩素に対する残存率を示した。概略40%弱であり、60%強は、20°C 1年という条件でなんらかの形で固定されているものと考えられる。

表-35に、海水養生した供試体の材令1年における溶

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

表-31 不動態のグイド0と測定された期間

curing condition	mixing water	W/C					
		0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
28K	W	12	6	12	6	3	—
	1/4 S	—	6	—	6	—	3
	1/2 S	—	6	—	3	—	3
	1 S	12	6	6	3	3	3
	2 S	12	6	—	3	—	3
4 S	3	—	—	3	—	—	
7 K	W	12	6	6	3	3	—
	1/4 S	—	—	—	3	—	—
	1/2 S	—	—	—	3	—	—
	1 S	6	3	12	3	1	1
	2 S	—	—	—	6	—	—
4 S	—	—	—	1	—	—	
1 K	W	6	6	6	6	3	—
	1/4 S	—	—	—	6	—	—
	1/2 S	—	—	—	3	—	—
	1 S	6	6	6	—	3	1
	2 S	—	—	—	3	—	—
4 S	—	—	—	6	—	—	

(month)

存塩素量を示す。これより、材令1年では、水道水練りと海水練り供試体のかぶり1.5 cmにおける溶存塩素量にはほとんど差のないことが分かる。また、それらの絶対量は、当初含まれる塩素量に比較して大きい。

c) 鉄筋の腐食度

表-36に、材令1年での、養生Stおよび28Kのモルタル中鉄筋の腐食度を測定し、おのおの2本の平均値を示す。

(3) コンクリート中(10年試験) — シリーズ3

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

材令10年において、かぶりごとに、水道水練りのものについては、普通ポルトランドセメントのもの4本、早強ポルトランドセメントおよびアルミナセメントのものをおのおの2本、中庸熱セメントおよびB種高炉セメントのものをおのおの3本、また、海水練りのものについては、普通ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントのものをおのおの6本、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよびアルミナセメン

表-32 塩素イオン含有量  
The chloride ion contents (% V. S. mortar weight)

curing conditions ages (days)	St				1 K				7 K				28K				
	28	91	180	1year	28	91	180	1year	28	91	180	1year	91	180	1year		
40-W	—	—	—	—	(0.02)	(0.10)	(0.31)	0.56	(0.04)	(0.02)	—	0.44	—	—	(0.28)	0.35	0.62
40-1 S <0.20>	(0.04)	—	(0.05)	0.05	(0.09)	(0.14)	(0.19)	0.62	(0.06)	(0.07)	(0.22)	0.75	—	—	(0.21)	0.30	0.62
40-2 S <0.41>	(0.19)	(0.15)	(0.14)	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.21)	—	(0.64)	—	0.49
40-4 S <0.82>	—	(0.39)	(0.32)	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.40)	—	(0.59)	—	0.68
45-W	—	—	—	—	(0.05)	(0.09)	(0.31)	0.78	—	(0.07)	(0.47)	0.77	—	0.06	(0.43)	0.44	0.75
45-1/4 S <0.06>	(0.02)	—	—	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.07)	—	(0.47)	—	0.55
45-1/2 S <0.11>	—	(0.03)	(0.03)	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.03)	—	(0.17)	—	0.55
45-1 S <0.23>	(0.04)	(0.05)	(0.04)	0.08	(0.11)	(0.13)	(0.55)	0.96	(0.09)	(0.10)	(0.51)	0.89	(0.10)	0.15	(0.57)	0.49	0.72
45-2 S <0.45>	—	(0.12)	(0.04)	0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.18)	—	(0.37)	—	0.49
50-W	—	—	—	—	(0.05)	(0.17)	(0.41)	0.89	(0.05)	(0.05)	(0.80)	0.88	(0.02)	0.04	(0.24)	0.25	0.70
50-1 S <0.25>	(0.09)	(0.05)	—	0.06	(0.15)	(0.16)	(0.63)	0.72	(0.09)	—	(0.27)	0.70	(0.10)	0.15	(0.42)	0.34	0.49
55-W	—	—	—	—	(0.10)	(0.14)	(0.56)	0.78	—	—	(0.72)	0.84	(0.06)	0.11	(0.64)	0.53	0.64
55-1/4 S <0.07>	(0.03)	(0.02)	—	0.03	(0.13)	(0.15)	(0.70)	0.93	(0.06)	(0.08)	(0.81)	0.92	(0.07)	—	(0.49)	—	0.70
55-1/2 S <0.14>	(0.05)	(0.02)	(0.02)	0.06	(0.14)	(0.21)	(0.48)	1.07	(0.10)	—	(0.62)	0.94	—	—	(0.62)	—	0.94
55-1 S <0.27>	(0.05)	—	(0.04)	0.12	(0.13)	(0.26)	(0.55)	0.86	(0.19)	(0.19)	(0.78)	0.86	(0.08)	0.17	(0.74)	0.64	0.78
55-2 S <0.54>	(0.14)	(0.13)	(0.13)	0.21	(0.26)	(0.40)	(0.62)	0.84	(0.20)	(0.32)	(0.57)	0.81	(0.19)	—	(0.54)	—	0.67
55-4 S <1.08>	(0.36)	—	(0.26)	0.33	(0.57)	(0.65)	(0.65)	0.78	(0.37)	(0.51)	(0.67)	0.77	(0.53)	—	(0.65)	—	0.66
60-W	—	—	—	—	(0.13)	—	(0.23)	0.92	(0.09)	(0.12)	(0.31)	0.92	—	—	(0.64)	0.53	0.82
60-1 S <0.29>	(0.10)	(0.06)	(0.03)	0.07	—	(0.27)	(0.38)	0.73	—	(0.23)	(0.43)	0.80	(0.07)	0.15	(0.76)	0.66	0.72
65-1/4 S <0.08>	(0.06)	(0.02)	(0.02)	0.02	—	(0.19)	—	—	—	(0.20)	—	—	—	—	(0.56)	—	0.67
65-1/2 S <0.16>	(0.06)	(0.04)	(0.05)	0.04	(0.16)	—	—	—	(0.14)	—	—	—	—	—	(0.44)	—	—
65-1 S <0.31>	(0.22)	—	—	0.12	—	(0.29)	—	1.01	—	—	—	0.83	(0.10)	0.13	(0.55)	0.55	0.79
65-2 S <0.62>	(0.49)	(0.20)	(0.16)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.31)	—	(0.27)	—	0.86

< > : the chloride content when mixed  
{ } : using salt 9  
the others : using Cement Association's method



大 郎 信 明

表-33 塩素イオン含有量  
The chloride ion contents (% V. S. dry sand)

curing conditions ages (days) kinds of specimens	St				1 K				7 K				28K				
	28	91	180	1year	28	91	180	1year	28	91	180	1year	91	180	1year		
40-W 0	—	—	—	—	(0.03)	(0.17)	(0.52)	0.96	(0.07)	(0.03)	—	0.76	—	—	(0.48)	0.60	1.06
40-1 S <0.34>	(0.07)	—	(0.08)	0.09	(0.07)	(0.24)	(0.32)	1.05	(0.10)	(0.12)	(0.37)	1.77	—	—	(0.36)	0.52	1.06
40-2 S <0.70>	(0.32)	(0.25)	(0.24)	0.19	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.35)	—	(1.10)	—	0.84
40-4 S <1.41>	—	(0.66)	(0.54)	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.67)	—	—	—	1.16
45-W 0	—	—	—	—	(0.09)	(0.16)	(0.54)	1.36	—	(0.12)	(0.82)	1.34	—	0.11	(0.75)	0.77	1.31
45-1/4 S <0.11>	(0.04)	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.12)	—	(0.82)	—	0.96
45-1/2 S <0.19>	—	(0.05)	(0.05)	0.11	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.05)	—	(0.30)	—	0.96
45-S <0.40>	(0.07)	(0.09)	(0.07)	0.14	(0.19)	(0.23)	(0.96)	1.67	(0.16)	(0.18)	(0.89)	1.55	(0.18)	0.26	(0.99)	0.85	1.25
45-2 S <0.78>	—	(0.21)	(0.21)	0.28	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.31)	—	(0.65)	—	0.85
50-W 0	—	—	—	—	(0.09)	(0.30)	(0.73)	1.58	(0.09)	(0.09)	(1.41)	1.56	(0.04)	0.07	(0.42)	0.44	1.24
50-1 S <0.43>	(0.16)	(0.09)	—	0.11	(0.27)	(0.28)	(1.12)	1.27	(0.16)	—	(0.48)	1.24	(0.18)	0.27	(0.74)	0.60	0.87
55-W 0	—	—	—	—	(0.18)	(0.25)	(1.00)	1.40	—	—	(1.29)	1.50	(0.11)	0.20	(1.15)	0.95	1.15
55-1/4 S <0.13>	(0.06)	(0.04)	—	0.06	(0.23)	(0.27)	(1.26)	1.67	(0.11)	(0.14)	(1.45)	1.65	(0.13)	—	(0.88)	—	1.26
55-1/2 S <0.25>	(0.09)	(0.04)	(0.04)	0.11	(0.25)	(0.38)	(0.86)	1.92	(0.18)	—	(1.11)	1.69	—	—	(1.11)	—	1.69
55-1 S <0.48>	(0.09)	—	(0.07)	0.22	(0.23)	(0.46)	(0.98)	1.54	(0.22)	(0.34)	(1.40)	1.54	(0.14)	0.30	(1.32)	1.14	1.40
55-2 S <0.97>	(0.25)	(0.23)	(0.23)	0.38	(0.46)	(0.72)	(1.11)	1.50	(0.36)	(0.58)	(1.02)	1.45	(0.34)	—	(0.97)	—	1.20
55-4 S <1.93>	(0.65)	—	(0.46)	0.59	(1.02)	(0.17)	(1.17)	1.40	(0.66)	(0.91)	(1.20)	1.38	(0.95)	—	(1.17)	—	1.18
60-W 0	—	—	—	—	(0.24)	—	(0.42)	1.67	(0.16)	(0.22)	(0.57)	1.67	—	—	(1.17)	0.96	1.49
60-1 S <0.53>	(0.18)	(0.11)	(0.06)	0.13	—	(0.49)	(0.69)	1.33	—	(0.42)	(0.78)	1.45	(0.13)	0.27	(1.38)	1.20	1.31
65-1/4 S <0.15>	(0.11)	(0.04)	(0.04)	0.04	—	(0.35)	—	—	—	(0.37)	—	—	—	—	(1.03)	—	1.24
65-1/2 S <0.29>	(0.11)	(0.08)	(0.09)	0.08	(0.29)	—	—	—	(0.26)	—	—	—	—	—	(0.81)	—	—
65-1 S <0.57>	(0.40)	—	—	0.22	—	(0.54)	—	1.86	—	—	—	1.53	(0.19)	0.24	(1.02)	1.02	1.45
65-2 S <1.14>	(0.90)	(0.37)	(0.29)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(0.57)	—	(0.50)	—	1.59

< > : the chloride content when mixed  
( ) : using salt 9  
the others : using Cement Association's method

表-34 溶存塩素の材令1年における残存率  
(標準養生)

Kinds of specimens	Residual (%)	Ave. and variance
40-S	25	
40-2 S	27	
40-4 S	34	
45-1/4 S	67	
45-1/2 S	55	
45-S	35	
45-2 S	36	
50-S	25	Ave.
55-1/4 S	42	36%
55-1/2 S	43	σ.
55-S	44	12%
55-2 S	39	
55-4 S	31	
60-S	24	
65-1/4 S	25	
65-1/2 S	25	
65-S	39	

表-35 材令1年における海水養生供試体の溶存塩素量  
(% V. S. モルタル重量)

Curing Conditions Kinds of specimens	1 K	7 K	28K	Average	
40-W	0.56	0.44	0.62	0.54	0.60
40-1 S	0.62	0.75	0.62	0.66	
45-W	0.78	0.77	0.75	0.77	0.81
45-1 S	0.96	0.89	0.72	0.86	
50-W	0.89	0.88	0.70	0.82	0.73
50-1 S	0.72	0.70	0.49	0.64	
55-W	0.78	0.84	0.64	0.75	0.79
55-1 S	0.86	0.86	0.78	0.83	
60-W	0.92	0.92	0.82	0.89	0.82
60-1 S	0.73	0.80	0.72	0.75	
Average	0.78	0.79	0.68	0.75	

Ave. W : 0.75, S : 0.75

表-36 目視による腐食度  
(材令1年, 2本平均)

配 合	養 生 条 件	
	標 準 養 生	海 水 養 生 (28K)
40-W	0.5	1.5
40-1 S	0.5	1.0
40-4 S	0.5	1.5
40-4 S	1.0	1.5
45-W	0.5	1.5
45-1/4 S	0.5	1.5
45-1/2 S	1.0	1.0
45-1 S	1.0	1.5
45-2 S	0.5	1.5
50-W	0.5	1.0
50-1 S	0.5	1.0
55-W	0.5	1.5
55-1/4 S	0.0	1.5
55-1/2 S	0.0	2.0
55-1 S	0.5	2.5
55-2 S	0.5	1.5
55-4 S	1.5	1.5
60-W	0.5	2.0
60-1 S	0.0	2.0
65-W	0.5	1.5
65-1/4 S	0.0	1.0
65-1/2 S	0.5	—
65-1 S	0.5	1.0
65-2 S	0.5	1.5

表-37 鉄筋の腐食面積率  
(%)

セメント の 種 類	練り混ぜ 水	か ぶ り					
		2 cm		4 cm		7 cm	
		個別	平均	個別	平均	個別	平均
普通ポルトラ ンドセメント (NO+N2)	水道水	5.3		1.0		0.0	
		0.8	1.03	0.0	0.25	0.0	0.0
		1.6		0.0		0.0	
	海 水	0.0		0.0		0.0	
		0.0	0.0	0.3		0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.07	0.1	0.15
早強 ポルトランド セメント (HO)	水道水	0.0		0.0		0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		2.0		0.0		0.0	
	海 水	4.5	3.60	0.0	0.0	0.0	0.0
		4.3		0.0		0.0	
		0.0		0.0		0.0	
中層熱 ポルトランド セメント (MO)	水道水	0.0		0.0		0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0		0.0		0.0	
	海 水	0.0		0.0		0.5	
		1.8	0.87	0.0	0.0	0.8	0.43
		0.8		0.0		0.0	
B種高炉 セメント (BO+B2)	水道水	0.3		0.0		0.0	
		0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.0		0.0		0.0	
	海 水	0.0		0.0		0.0	
		0.0	0.03	0.0	0.0	0.2	0.03
		0.0		0.0		0.0	
アルミナセメ ント (AL)	水道水	0.0		0.0		0.0	
		0.2	0.1	0.1	0.05	0.0	0.0
		2.3		1.7		1.5	
	海 水	1.3	1.9	0.5	1.4	1.3	1.4
		2.1		2.0		1.4	
		0.0		0.0		0.0	

(材令10年)

トのもののおの3本の鉄筋について表面観察し、さらに、腐食面積を測定した。

各種のポルトランドセメントを用いたものにおいては、水道水練りの場合、27本の中で4本が腐食しており、海水練りの場合では、36本の中で12本が腐食していた。B種高炉セメントを用いたものは、水道水練りの場合、9本の中で1本が腐食しており、海水練りの場合、18本の中で2本が腐食していた。さらに、アルミナセメントを用いたものでは、水道水練りの場合、6本の中で2本が、海水練りの場合では、9本すべてが腐食していた。

鉄筋の腐食の程度は、いずれの場合においても軽微であり、かぶりのコンクリートを剝落させたものや、コンクリート表面に錆を溶出させたものは皆無であった。錆としては、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>が主成分と思われる黒いものが多く、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が主成分と思われる赤い錆も若干観察された。赤い錆は、アルミナセメントを用いたものに多く見ら

れ、また、かぶりの小さなものにおいても観察された。鉄筋上端部(打ち込み方向に向かって)付近の錆は、その他の部分のものに比較して、面積も大きく厚かった。なお、鉄筋が腐食している場合においても、その周辺のコンクリートに中性化は認められなかった。

なお、アルミナセメントを用いた海水練りコンクリート中鉄筋のすべてが腐食していたことの原因として、アルミナセメントの硬化が材令1日でも脱型できないほど遅く、これが原因と考えられる。

表-38 自然電極電位の経年変化

(mV)

経過年数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	全平均
NO 水道水	-429	-435	-325	-360	-482	-613	-624	---	-781	-844	-544
NO 海 水	-469	-484	-546	-482	-514	-643	-597	---	-708	-817	-584
N2 水道水	-390	-296	-302	-338	-348	-483	-530	---	-720	-777	-465
N2 海 水	-650	-852	-694	-549	-583	-624	-561	---	-764	-810	-676
HO 水道水	-912	-729	-628	-421	-491	-733	-586	---	-843	-831	-686
HO 海 水	-979	-900	-800	-629	-623	-600	-624	---	-603	-717	-719
MO 水道水	-659	-723	-625	-484	-497	-623	-624	---	-727	-799	-640
MO 海 水	-791	-903	-815	-656	-588	-654	-599	---	-713	-752	-719
BO 水道水	-915	-922	-688	-645	-608	-605	-538	---	-506	-499	-659
BO 海 水	-792	-739	-638	-419	-550	-448	-486	---	-448	-517	-560
B2 水道水	-814	-700	-617	-577	-618	-583	-486	---	-447	-518	-596
B2 海 水	-670	-790	-724	-514	-467	-475	-439	---	-463	-476	-558
AL 水道水	-72	-96	-174	-133	-180	-122	-147	---	-447	-281	-184
AL 海 水	-84	-60	-87	-134	-205	-235	-211	---	-286	-294	-177

注) おおのこの値は、供試体 3 本かぶり 2, 4, 7 cm, 測定月 2, 4, 7, 10 月の 36 個の測定値の平均である。

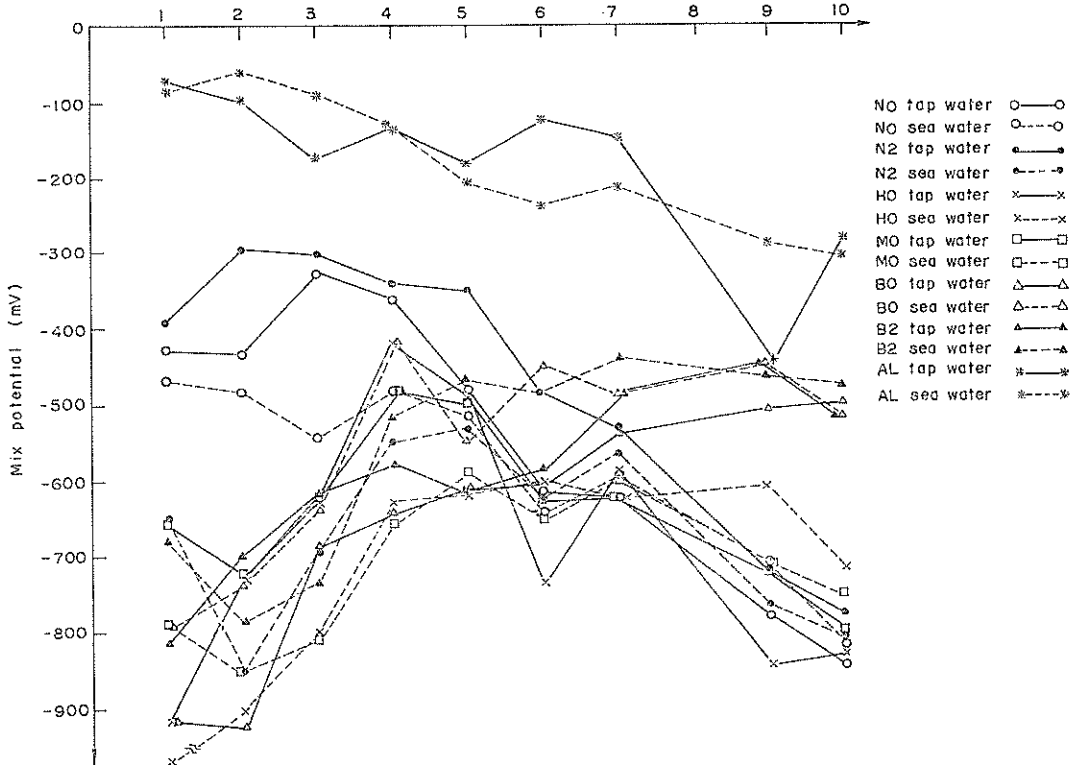


図-20 自然電極電位の経年変化

また、鉄筋上端部付近の腐食が大きい理由としては、ブリージング水の影響あるいは鉄筋固定金具の取り外し後に打ち足したコンクリートが十分に締め固められず若

干ポーラスになったことなどが考えられる。ただし、鉄筋の取り出し時に観察した限りでは、ポーラスな状態は全くなかった。

アルミナセメントを用いたものを除外して、鉄筋の腐食は、かぶり2, 4, 7cmの鉄筋でそれぞれ40本の中で10本, 3本, 6本が腐食していた。

ロ) 腐食面積率

鉄筋の腐食面積率の測定結果を、表-37に示す。なお、腐食面積率は、鉄筋表面積を50.0 cm<sup>2</sup>として算定した。腐食面積は、セメント種、練り混ぜ水、およびかぶりが同一であっても供試体によってばらつきがあった。

b) コンクリート中鉄筋の電気化学的測定

イ) 自然電極電位

コンクリート中鉄筋の自然電極電位は、セメントの種類と練り混ぜ水の組み合わせごとに3本ずつの供試体(合計42コンクリート供試体, 126鉄筋)について暴露開始時より測定した。自然電極電位の経年変化を、表-38および図-20に示す。これらの値は、セメントの種類別に3供試体のかぶり2, 4, 7cmについて各年ごとに1月, 4月, 7月, および, 10月の4回測定し, 計36個の測定値を平均したものである。なお, 材令5年ごろまでの測定月による変動はかなり大きかった。

自然電極電位の経年変化は、各種のポルトランドセメント, B種高炉セメント, および, アルミナセメントの3グループによって明らかに傾向が異なった。各種のポルトランドセメントを用いたものでは、電位が徐々に、卑に移行する傾向を示し, 材令10年では, -710~-185 mV となった。B種高炉セメントを用いたものでは、電位は徐々に貴に移行する傾向を示し, 材令10年では, -470~-520 mV となった。アルミナセメントを用いたものでは、電位は徐々に卑に移行する傾向を示すが、電位は前2者より貴であって, 材令10年では-240~-270 mV となった。

ロ) 不動態のグレイドの判定

材令10年でコンクリート中鉄筋のアノード分極曲線を測定し, 不動態のグレイドの判定を行った。結果を, 表-39に示す。これより, 練り混ぜ水またはかぶりの影響よりもセメントの種類による影響が卓越していることが認められる。すなわち, B種高炉セメントを用いたコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドのほうが明らかに, 普通もしくは早強ポルトランドセメントのものより良い値を示す。

c) 圧縮強度および中性化

イ) 圧縮強度の経年変化

コンクリートの圧縮強度試験に用いた供試体数は, 原則として, セメントの種類と練り混ぜ水の組み合わせごとに3本であり, 材令28日, 1年, 5年, 10年において行った。試験結果を, 表-40に示す。

表-39 材令10年における不動態のグレイド

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)	不動態のグレイド	不動態のグレイド平均値
普通ポルトランドセメント (N2)	水道水	2	0 1	0.5
		4	0 1	0.5
		7	0 1	0.5
	海水	2	1 1	1
		4	1 1	1
		7	1 1	1
早強ポルトランドセメント (HO)	水道水	2	2 2	2
		4	2 2	2
		7	2 3	2.5
	海水	2	1 0	0.5
		4	2 2	2
		7	2 2	2
B種高炉セメント (B2)	水道水	2	3 3	3
		4	4 3	3.5
		7	4 4	4
	海水	2	3 3	3
		4	3 4	3.5
		7	4 3	3.5
アルミナセメント (AL)	水道水	2	4 4	4
		4	4 4	4
		7	4 4	4

各種ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの圧縮強度はいずれの場合も, 水道水練りのものと同等であった。

コンクリートの圧縮強度は, 材令5年のものが最も大きく, 材令10年では強度の低下が明確に認められた。材令5年から10年にかけての強度の減少割合は, 普通お

表-40 コンクリートの圧縮強度の経年変化 (kgf/cm<sup>2</sup>)

セメントの 種 類	記号	練り混 ぜ 水	圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )				海水練り/ 水道水練り			$\sigma_{10年}$ $\sigma_{28日}$	
			28 日	1 年	5 年	10 年	28日	5年	10年		
普通ポルトラ ンドセメント	NO	水道水 海 水	366(35.9) 409(40.1)	— 405(39.7)	509(49.9) 518(50.8)	321(31.5) 335(32.8)	1.12	1.02	1.04	0.88 0.82	
	N2	水道水 海 水	— 388(38.0)	— 366(35.9)	524(51.4) 521(51.1)	— 307(30.1)	—	1.00	—	— 0.79	
早強ポルトラ ンドセメント	HO	水道水 海 水	*425(41.7) *390(38.2)	— 411(40.3)	560(54.9) 555(54.4)	— 382(37.4)	0.92	0.99	—	— 0.98	
中庸熟ポルト ランドセメン ト	MO	水道水 海 水	328(32.1) 356(34.9)	— 558(54.7)	478(46.8) 477(46.7)	344(33.4) 379(37.1)	1.09	1.00	1.10	1.05 1.06	
B 種 高 炉 セ メ ン ト	BO	水道水 海 水	380(37.2) 395(38.7)	— 532(52.1)	563(55.2) 551(54.0)	429(42.0) 423(41.5)	1.04	0.98	0.99	1.03 1.07	
	B2	水道水 海 水	363(35.6) 366(35.9)	— 420(41.2)	523(51.3) 513(50.3)	— 389(38.1)	1.01	0.98	—	— 1.06	
アルミナ セメント	AL	水道水 海 水	**428(41.9) ***258(25.3)	— 568(55.7)	672(65.9) 603(59.1)	— 526(51.5)	—	0.90	—	— —	
							平 均	1.04	0.98	1.04	0.98

注) おのおの値は3本である。また\*は7日,\*\*は1日,\*\*\*は4日の強度である。( )内は N/mm<sup>2</sup>

よび早強ポルトランドセメントの場合3~4割, 中庸熟ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの場合2割強であった。また, 材令10年の圧縮強度は, 材令28日のものに比較して, 普通ポルトランドセメントの場合0.79から0.88とやや小さく, B種高炉セメントおよび中庸熟ポルトランドセメントの場合, 1.03から1.07とやや大きかった。早強ポルトランドセメントの場合, 材令7日の強度とはほぼ同一であった。

#### ロ) 中性化の経年変化

中性化を, 材令1年, 5年, 10年で測定した。

材令1年では, いずれの供試体も, 表面のみが中性化している程度であり, コンクリート内部への中性化の進行は認められなかった。

材令5年および10年における中性化の試験結果を, 表-41に示す。中性化の区域が狭く, 平均中性化深さを測定することが困難であったので, 最大中性化深さのみを測定した。最大中性化深さは, 供試体上部の隅角部や粗骨材の粗粒分が表面近くに存在するような箇所が生じていた。

#### ド) 塩素含有量

材令10年におけるコンクリート供試体のかぶり別の塩素含有量を表-42に示す。これより, 10年間感潮部に暴露されたコンクリート中の塩素含有量は, 練り混ぜ水として海水を用いたコンクリートの練り混ぜ時の塩素量と

比較しても著しく多い。

#### 5.2 ひびわれのある場合

##### (1) モデル供試体—シリーズ4

##### a) 鉄筋の腐食に関する測定

S型供試体を材令3か月で鉄筋軸に沿って割裂し, 鉄筋を露出させた状態で, その後, 水中養生とした。材令6か月(鉄筋露出後6か月)において, 鉄筋の表面観察を行ったが比較的面積の大きな赤茶色の厚い錆が露出面の一部に観察された。それらの腐食面積および錆重量を, 表-43に示す。

V型およびVC型供試体は, 材令9か月で鉄筋を露出させ観察を行った。V型供試体の錆は非常に軽微であり, 茶または黒色のものであった。VC型供試体の錆は, ひびわれ部全体を覆っており, 他の部分では, 錆は, 全く観察されなかった。

##### b) 自然電極電位

##### ① ひびわれ発生前後での自然電極電位の変化

S型供試体(Sa および Sb)を材令3か月で割裂し, 鉄筋を露出させて, その前後での自然電極電位の変化を測定した。結果を, 表-44に示す。これより, Sa-1cm, Sa-7cm および Sb-1cm は, ひびわれの発生によって, 電位は貴となり, Sb-7cmのみ逆に卑となった。いずれも, 材令1年では, -330~530mV となった。

これを, ひびわれのない供試体(45-7-T)のものと

表-41 コンクリートの中酸化

セメントの種類	記号	練り混ぜ水	最大中酸化深さ (mm)						
			横断面				縦断面		
			上面		下面				
			5年	10年	5年	10年	5年	10年	
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	0 0 0	4 0 4	0 0 0	2 3 2	0(4) 0(2) 0(3)	0(6) 0(7) 0(2)	
		海水	1 0 0	2 5 0	0 0 0	5 0 0	0(5) 0(3) 0(3)	0(4) 0(2) 0(5)	
	N2	水道水	3 0 0		2 2 0		0(3) 0(1) 0(1)		
		海水	1 1 0	0 2 3	0 0 0	4 2 3	0(5) 0(3) 0(3)	0(8) 0(4) 0(3)	
	早強ポルトランドセメント	HO	水道水	0 0 0		0 0 0		0(0) 0(2) 0(0)	
			海水	0 0 0	0 3 2	0 0 0	2 2 2	0(0) 0(0) 0(0)	1(2) 0(5) 0(4)
中熱ポルトランドセメント	MO	水道水	0 1 1	2 3 3	0 0 0	0 2 3	0(2) 0(3) 0(2)	0(6) 1(8) 0(6)	
		海水	0 1 2	0 2 2	0 0 0	9 3 5	0(3) 0(3) 0(3)	0(4) 0(8) 4(4)	
B種高炉セメント	BO	水道水	1 3 2	7 4 4	2 2 2	6 2 4	0(5) 0(4) 0(4)	3(8) 0(5) 0(4)	
		海水	2 2 2	2 6 4	3 2 3	4 4 4	0(5) 0(4) 0(5)	4(6) 4(5) 3(5)	
アルミナセメント	AL	水道水	0 1 2		1 1 1		0(0) 0(0) 0(0)		
		海水	0 0 0	20 3 15	0 0 0	6 10 5	0(1) 0(1) 0(1)	3(4) 5(5) 4(7)	

( ) 内の数字は供試体隅角部

表-42 コンクリート中の塩素含有量 (全塩素)  
(% V. S. モルタル重量)

セメントの種類	かぶり (cm)	水道水練り	海水練り①	海水練りに当る初含素量②	①—②
普通ポルトランドセメント (NO)	2	1.73	1.65		1.32
	4	1.55	1.70	0.23	1.37
	7	1.33	1.30		1.07
早強ポルトランドセメント (HO)	2	1.63	2.70		2.46
	4	1.40	1.75	0.24	1.51
	7	1.00	1.50		1.26
B種高炉セメント (BO)	2	1.08	1.50		1.27
	4	0.80	0.98	0.23	0.75
	7	0.40	0.98		0.75
アルミナセメント (AL)	2	0.36		0.23	
	4	0.16			
	7	0.08			

表-43 S型供試体鉄筋の腐食面積および錆の重量

供試体	腐食面積 (mm <sup>2</sup> )	錆の重量 (mgf)	錆の厚さ (mgf/mm <sup>2</sup> )
Sa-1 (かぶり 1.25 cm)	35	40	1.14
Sb-1 (かぶり 1.25 cm)	32	18	0.56
Sa-7 (かぶり 7 cm)	125	79	0.63
Sb-7 (かぶり 7 cm)	2	1	0.5
* 45-7-T	0	0	—

\* 同一配合のコンクリートを用いたひびわれのないもの

比較すると、ひびわれのある供試体のほうが概して貴であり、かつ、前述したように赤茶色の錆を有している。このことは、ひびわれのある場合には、一体としての自然電極電位を比較することは問題があることを示す。

② モデル供試体の自然電極電位

V型 (ひびわれのないモデル供試体) と VC型 (ひびわれのあるモデル供試体) の自然電極電位を表-45に示す。明らかにひびわれのある VC型の電位が貴であることが認められた。

③ モデル供試体の各要素鉄筋の自然電極電位

表-46および表-47に、V型およびVC型の各要素鉄筋の自然電極電位を示す。ここで、オープン供試体とは、図-21に示すように、各要素鉄筋を常時電氣的に独立にしておくものであり、クローズド供試体とは、各要素鉄筋を常時電氣的に接続しているものである。

V型では、オープン供試体の要素鉄筋の自然電極電位の平均値はばらつきはあるものの、クローズド供試体のものとはほぼ同一である。このことはV型では電氣的に接続してもしなくても、各要素鉄筋の電気化学的性質は変

表-44 ひびわれ前後での自然電極電位の変化 (in tap water)

材 令 鉄 筋	1 か月 nocrack	2 か月 nocrack	cracking	+ 5 分	+10分	+20分	+ 1 時間	+ 2 時間	+ 6 時間	+ 1 日	+ 1 週間	+ 2 週間	1 年	
Sa-1(かぶり 1.25 cm)	-483	-875		-472	-501	-522	-553	-540	-456	-461	-534	-640	-474	
Sb-1( " )	-909	-908		-523	-540	-549	-613	-627	-645	-641	-552	-633	-514	
Sa-7(かぶり 7 cm)	-916	-898		-510	-460	-441	-378	-338	-471	-605	-534	-637	-522	
Sb-7( " )	-130	-130		-149	- 84	-123	-176	-179	-171	-548	-519	-516	-336	
平 均	-610	-703		-414	-396	-409	-430	-421	-436	-564	-535	-606	-462	
S. D.	378	382		178	211	196	197	202	196	78	14	60	86	
平均 (S. D.)	-656 (356)			-467 (156)										
*45-7-T (2本平均)	-867	-872												-574

\* 同一配合のコンクリートを用いたひびわれのない供試体

表-45 自然電極電位の測定 (2本の平均値)

供 試 体	材 令				平 均
	20 日	2 か月	3 か月	6 か月	
V-45-T	-877	-857	-821	-777	-833
V-45-S	-939	-907	-892	-962	-925
V-65-T	-873	-165	-368	-351	-439
V-65-S	-844	-832	-720	-562	-740
VC-45-T	-158	-368	-391	-249	-292
VC-45-S	-274	-172	-139	-190	-194
VC-65-T	-161	-151	-150	-173	-159
VC-65-S	-689	-673	-588	-313	-362

表-47 VC 型供試体の各要素鉄筋の自然電極電位 (mV)

配 合	材 令	Open 供試体			Closed 供試体
		ひびわれ部	その他の部分		
			平 均	S. D.	
45-T	7 日	-522	-599	246	-248
	28 日	-509	-704	216	-158
	2 か月	-571	-974	18	-368
	3 か月	-501	-895	77	-391
45-S	28 日	-296	-876	134	-274
65-T	28 日	-114	-810	161	-161
	2 か月	-510	-788	194	-151
	3 か月	-392	-784	160	-150

表-46 V型供試体の各要素鉄筋の自然電極電位

配 合	材 令	Open 供試体		Closed 供試体	①—②
		平均①	S. D.		
45-T	7 日	-554	207	-397	-157
	28 日	-809	160	-877	68
	2 か月	-815	152	-857	42
65-T	7 日	-509	241	-487	- 22
	14 日	-597	277	-546	- 51
	28 日	-665	285	-873	208
	2 か月	-140	54	-165	25
45-S	7 日	-940	7	-919	- 21
	28 日	-953	12	-939	- 14
	2 か月	-901	9	-907	6
				平 均	8
				S. D.	93

化しないことを示唆すると思われる。また、2.5 cm での測定と 30 cm でのものとで相違がないとも言えよう。

VC 型では、オープンとクローズド供試体の各要素鉄筋の電位とは明らかに相違する。このことは、要素鉄筋

が電気的に接続された場合、異種の要素（ここでは、ひびわれ部）が存在すると、接続されない場合とは異なり、なんらかの電気化学的变化が起こることを意味している。すなわち、ひびわれ部がある場合、全体は部分の平均では表せないのである。

c) アノード分極曲線および不動態のグレイド

① ひびわれ発生前後のアノード分極曲線

図-22に、材令2か月でのひびわれのない供試体のアノード分極曲線と、ひびわれ(割裂)後2週間でのアノード分極曲線を示す。不動態のグレイドは、Sb-7(ひびわれ前)がグレイド3、ひびわれ後がグレイド2である他は、すべてグレイド1と判定でき、ひびわれ前後で大きな差はない。しかし、ひびわれ発生前後では錆の状況が異なりグレイドが差がないことは傾向が異なる。

② ひびわれのないモデル供試体のアノード分極曲線および不動態のグレイド

材令6か月で、ひびわれのないクローズドモデル供試体において、全体としてのアノード分極曲線と各要素の

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

供試体	材 令				平均
	28日	2ヶ月	3ヶ月	6ヶ月	
V-45-T	-877	-857	-821	-777	-833
V-45-S	-939	-907	-892	-962	-925
V-65-T	-873	-165	-368	-351	-439
V-65-S	-844	-832	-720	-562	-740
VC-45-T	-158	-368	-391	-249	-292
VC-45-S	-274	-172	-139	-190	-194
VC-65-T	-161	-151	-150	-173	-159
VC-65-S	-689	-673	-588	-313	-362

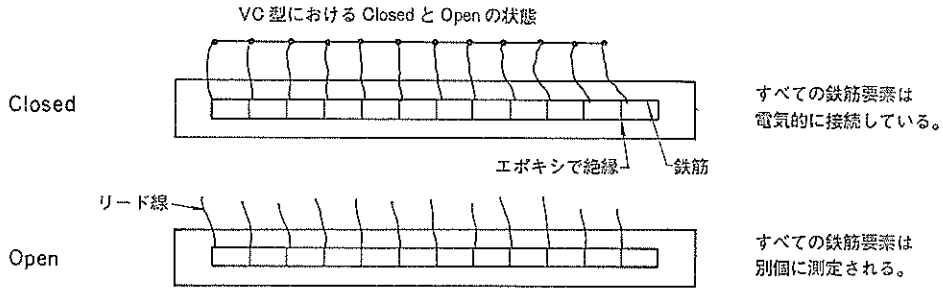


図-21 閉路供試体と開路供試体

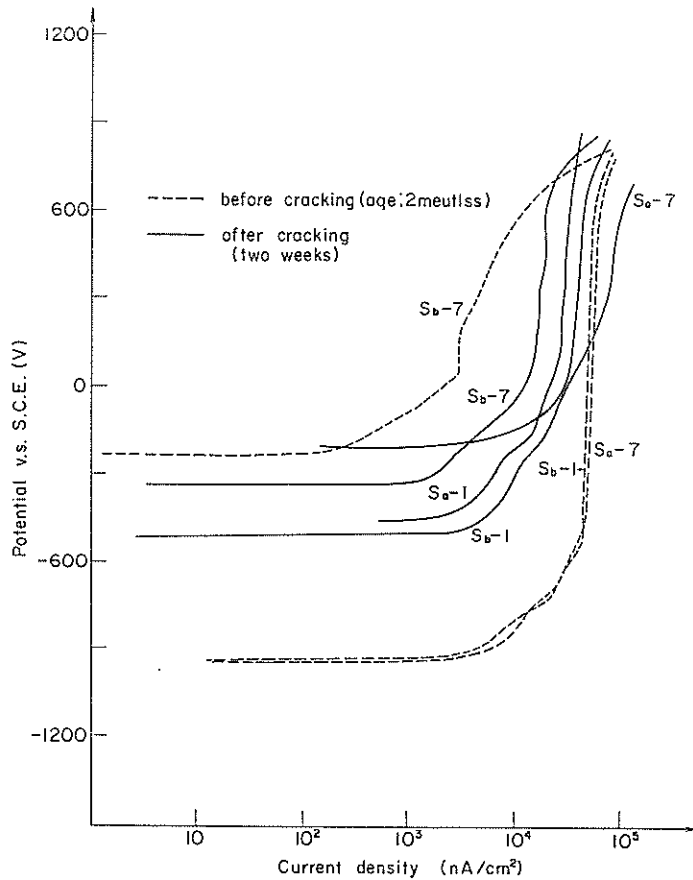


図-22 ひびわれ前後でのアノード分極曲線の変化



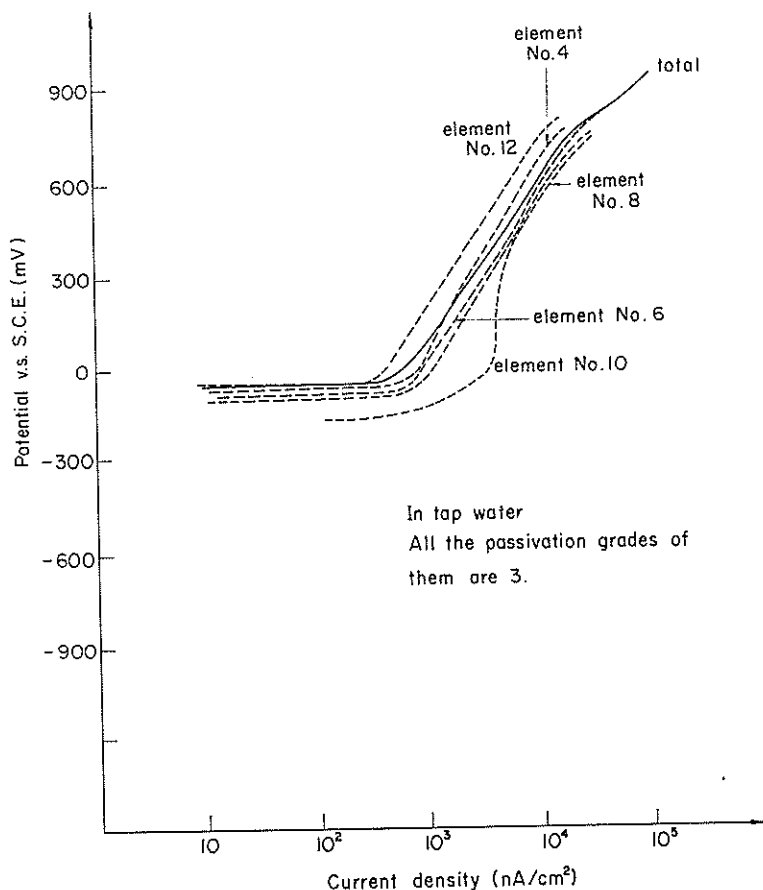


図-23 ひびわれのない供試体（配合65-12-T）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

アノード分極曲線を水道水中で測定し、それらを比較した。

配合 65-12-T および 45-5-S についての測定結果を図-23 および 図-24 に示す。いずれの図においても全体の各要素鉄筋の分極曲線には大差ない。したがって、不動態のグレイドも同一である。このことは、要素鉄筋相互の電気化学的性質が同一であることを示すとともに、2.5 cm での測定と 30 cm での測定に差のないことも示している。

③ ひびわれのあるモデル供試体のアノード分極曲線および不動態のグレイド

イ) 水道水中での測定

材令 6 か月において、ひびわれのあるクローズド供試体の全体としてのアノード分極曲線を測定し、その 1 か月後に各要素鉄筋（ひびわれ部を含む）のアノード分極曲線を測定した。その測定結果を、図-25、図-26、および図-27 に示す。

これらの図より、ひびわれ部鉄筋の電流密度は大きく、不動態のグレイドは 0 と判定された。また、ひびわれ部には、明らかに赤茶色の錆が観察された。全体としてのアノード分極曲線とひびわれ部を含まない要素鉄筋のアノード分極曲線を比較すると、わずかに全体としてのものの電流密度が大きいが、大部分のものの不動態のグレイドはともに 1 と判定される。この理由として、ひびわれ部の面積は、要素鉄筋の 1/2 であり、ひびわれ部の影響は全体のアノード分極曲線にはそれほど及ばないと考えられる。

ロ) NaCl (3.6%) 溶液中での測定

イ) と同様の測定を NaCl 溶液中においても行った。測定結果の一例を 図-28 および 図-29 に示す。

これらの結果より、イ) と同様にひびわれ部のものの電流密度が大きく、この値は、水道水中のものより大きい。また、全体およびひびわれ部の不動態のグレイドはすべて 0 であった。

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

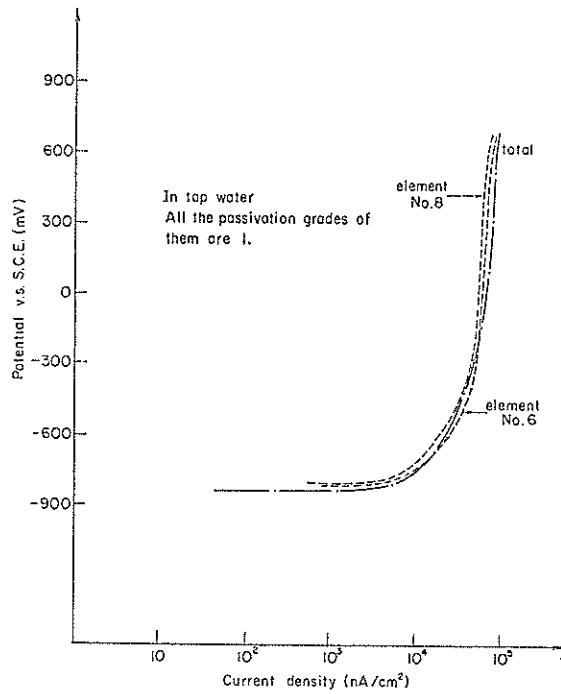


図-24 ひびわれのない供試体（配合45-5-S）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

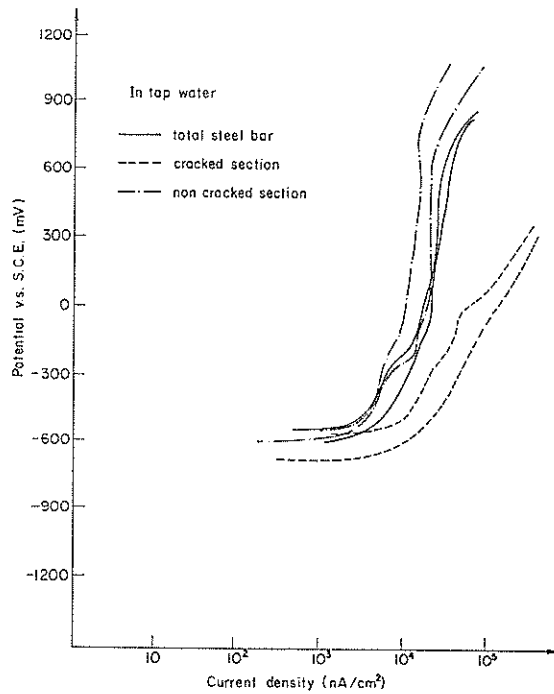


図-25 ひびわれのある供試体（配合65-5-T）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

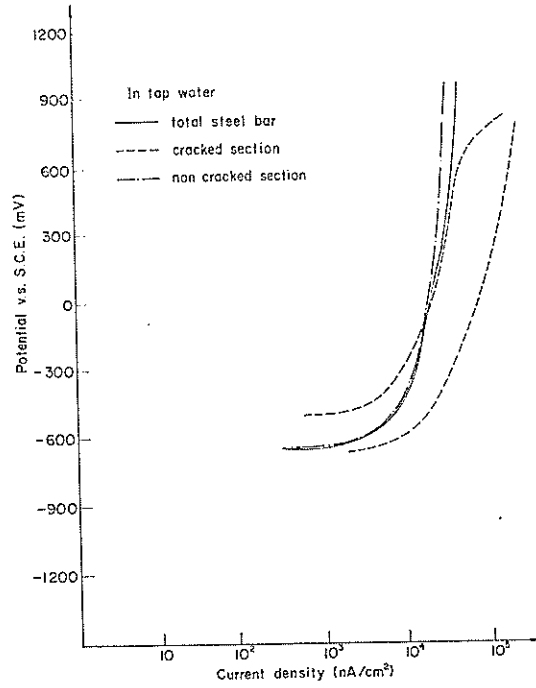


図-26 ひびわれのある供試体（配合45-5-S）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

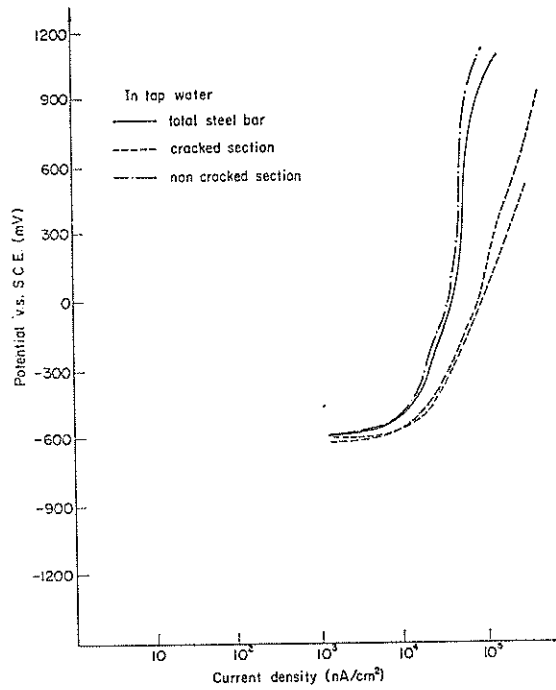


図-27 ひびわれのある供試体（配合65-12-S）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

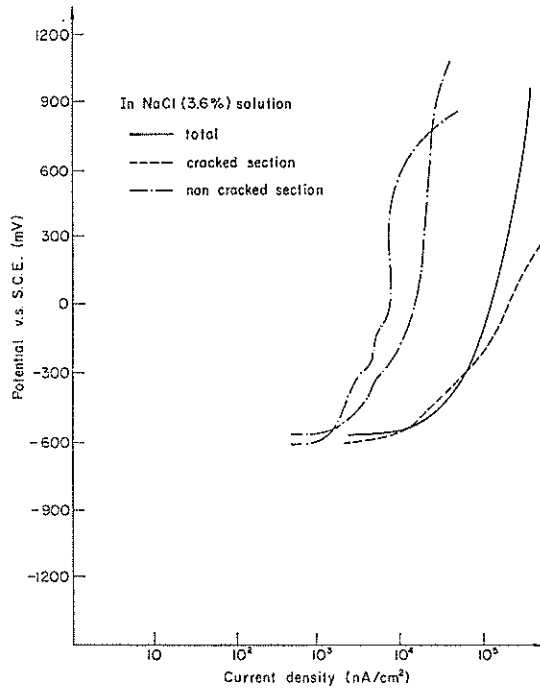


図-28 ひびわれのある供試体（配合45-5-T）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

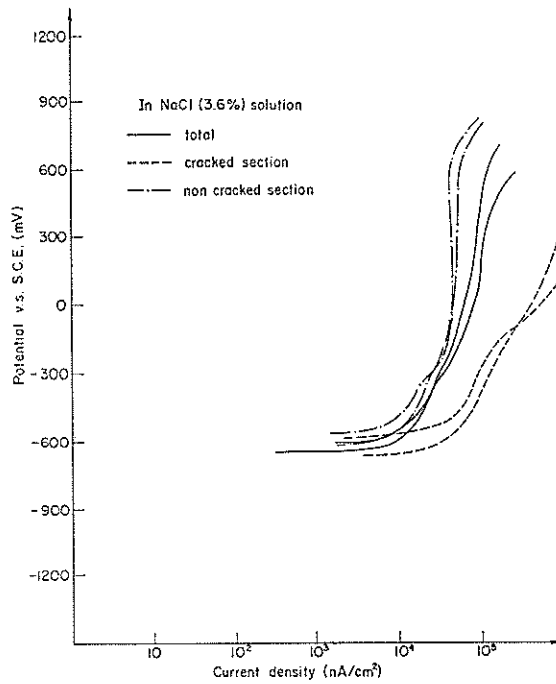


図-29 ひびわれのある供試体（配合65-12-S）の全体および各要素鉄筋のアノード分極曲線

表-48 モデル供試体の不動態のグレード

種 類	養 生 (測定) 条 件	配 合 (記号)	全 体 と して のグレード	各 要 素 ご と の グ レ イ ド									
				ひびわれ 部	ひびわれのない部分 (要素番号)							平均	
					1	3	5	7	9	11			
ひびわれの ない供試体	水 道 水 中	45-5-T	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1	
		45-5-S	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1	
		65-12-7	3*	—	3	3	3	3	3	3	3	3	
		45-12-T	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1	
ひびわれの ある供試体	水 道 水 中	45-5-T	2	1	2	2	3	—	—	—	—	2.3	
		45-5-S	1	0	1	1	1	—	—	—	—	1	
		65-12-T	1*	0	1	1	2	—	—	—	—	1.3	
		65-12-S	1*	0	1	1	1	—	—	—	—	1	
	Na Cl 溶 液 中	45-5-T	0.5*	0	0	1	2	1	—	—	—	—	1
		45-5-S	1	0	0	1	0	1	—	—	—	—	0.7
		65-12-T	1	0	0	1	2	1	—	—	—	—	1.3
		65-12-S	0.5*	0	0	1	1	1	—	—	—	—	1

\* のみ2本平均

イ), ロ) より, 全体としてのアノード分極曲線は, ひびわれ部の影響を若干受ける。特に, ひびわれ部のものの電流密度が大きいほど, ひびわれ部の影響は大きいものと思われる。しかし, 全体としてのアノード分極曲線より, ひびわれ部のものを類推することは, 無理があるようである。

ハ) 不動態のグレード

表-48に, モデル供試体に関する不動態のグレードを示す。

④ カソード分極曲線の測定

ひびわれのあるモデル供試体を用いて, 材令6か月において, ひびわれ部とひびわれのない部分の要素鉄筋のカソード分極曲線を測定して比較した。測定結果の一部を図-30に示す。

これらより, ひびわれ部のカソード分極曲線のほうがより大きな電流密度を示す。カソード部での反応を, 酸素の還元反応とすれば, この原因は, ひびわれ部のほうが, 酸素供給が容易なためと考えられる。

⑤ 腐食電流

モデル供試体の材令6か月におけるアノード分極曲線より, Tafelの仮定を用いて腐食電流を求めた。測定結果を, 表-49に示す。

ひびわれのない供試体では, 要素鉄筋全体をまとめて測定した場合と, 個別に測定した場合の電流密度は小さいという傾向が認められた。

また, ひびわれのある供試体では, ひびわれ部の電流

密度が最も高く, 次いで全体として測定したものであり, ひびわれのない部分のものが最小であった。

⑥ マクロセル電流の測定

材令6か月におけるマクロセル電流の測定例を 表-50に示す。この測定では, 番号の大きな要素鉄筋から番号の小さな要素鉄筋に流れ込む電流を測定し, 上三角行列を作成し, 残りの下三角行列は対応する上三角行列の符号を逆として作成した。なお, この場合, 全電流の合計値は必ず0となり, アノード部要素鉄筋へ流入する電流の合計値(+記号)と, カソード部要素鉄筋から流出する電流の合計値(-記号)の絶対値は等しくなる。この電流の合計値をマクロセル電流と定義した。

表-51のこれらの測定結果を示す。ひびわれのある供試体のマクロセル電流がやや大きい傾向がある。また, ひびわれ部が必ずしもアノード部とならないことは注目に値する。

さらに, V型およびVC型供試体において, V型では任意の鉄筋要素, VC型ではひびわれ部の要素鉄筋を対象として, 他の要素より流入する電流と乾湿の条件との関係を測定した。測定結果を, 表-52および表-53に示す。なお, 乾湿のサイクルは, 潮汐作用を考慮して6時間とした。

(2) コンクリート中(1年試験) — シリーズ5

a) 鉄筋の腐食に関する測定

イ) 表面観察

割裂直後では, S養生およびN養生のコンクリート中

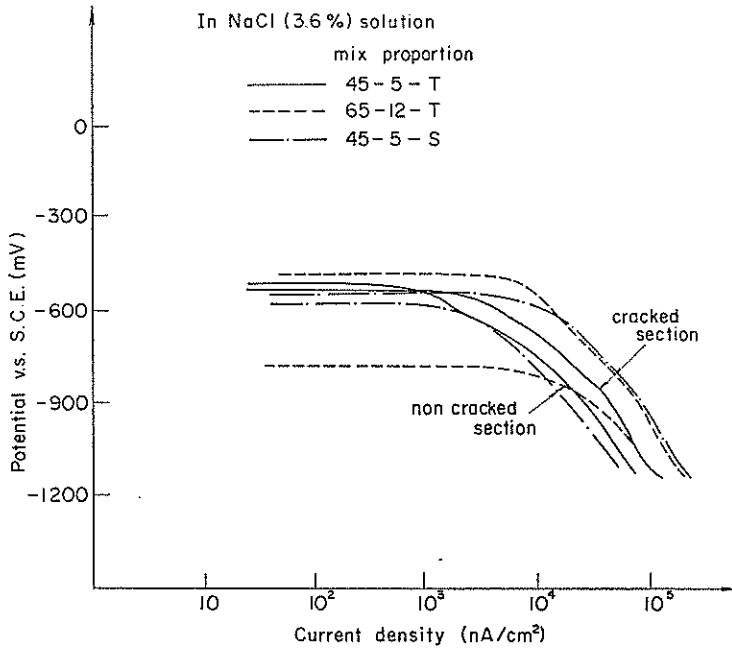


図-30 ひびわれ部のカソード分極曲線に及ぼす影響

表-49 モデル供試体の腐食電流密度

種 類	養 生 (測定) 条 件	配 合 (記号)	全体として の電流密度 (nA/cm <sup>2</sup> )	各要素ごとの電流密度 (nA/cm <sup>2</sup> )							
				ひびわれ 部	ひびわれのない部分 (要素番号)						平均
					1	3	5	7	9	11	
ひびわれの ない 供 試 体	水 道 水 中	45-5-T	2243	—	3634	2082	2637	1997	2976	2760	2683
		45-5-S	3227	—	3360	3036	4833	3498	4458	3658	3807
		65-12-T	483*	—	851	785	323	754	616	411	707
		65-11-S	2712	—	—	—	2976	—	—	—	2976
		45-12-T	1267*	—	990	2532	1438	2532	2154	1960	1929
ひびわれの ある 供 試 体	水 道 水 中	45-5-T	385	641	350	350	754	—	—	—	485
		45-5-S	1274	2920*	960	785	817	—	—	—	854
		65-12-T	1657*	3558*	1760	1909	1833	—	—	—	1834
		65-12-S	1829*	3827*	2745	2335	2637	—	—	—	2572
	NaCl 溶 液 中	45-5-T	4458*	6677	785	1129	754	—	—	—	889
		45-5-S	2745	3510*	2532	1987	2336	—	—	—	2285
		65-12-T	2976	3524*	1760	1909	2069	—	—	—	1912
		65-12-S	4442*	8723*	2976	5680	2336	—	—	—	3664

鉄筋は湿っており、特に、ひびわれ近傍のものは完全に濡れていた。また、X養生のもの鉄筋は乾いてはいたが、赤茶色の錆がコンクリート表面ににじんでいた。

S養生、X養生のコンクリート中铁筋の錆は、黒いも

のが大部分で、形状は、楕円状もしくは筋状であった。いずれの形状のものも、凹部に発生しているものが多く、その傾向は筋状のもので顕著であった。X養生のコンクリート中铁筋の錆は赤茶色のものが大部分で形状は

大 即 信 明

表-50 マクロセル電流の測定例

(1) ひびわれのないモデル供試体 (配合 65-12-T) mix potential. -248

( $\mu\text{A}$ )

カソード側* アノード側*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合 計
1		-0.5	5.3	-1.0	-2.2	-2.7	0	-2.2	-0.7	2.7	0.1	-1.0	- 2.2
2	0.5		10.0	-0.5	-2.5	-0.5	-2.8	-1.6	-0.5	0	1.1	0	3.2
3	-5.3	-10.0		0	-7.0	-7.0	-5.0	-1.0	-2.0	2.0	0	0	-35.3
4	1.0	0.5	0		0	-2.0	-3.0	-2.0	-1.0	3.0	1.0	0	- 2.5
5	2.2	2.5	7.0	0		-2.2	-5.0	-0.2	-0.5	5.0	3.0	-0.5	11.3
6	2.7	0.5	7.0	2.0	2.2		-3.0	2.0	0	6.0	0	1.0	20.4
7	0	2.8	5.0	3.0	5.0	3.0		4.0	2.0	0	0	2.0	26.8
8	2.2	1.6	1.0	2.0	0.2	-2.0	-4.0		0	5.0	3.0	0	9.0
9	0.7	0.5	2.0	1.0	0.5	0	-2.0	0		4.0	2.0	0	8.7
10	-2.7	0	-2.0	-3.0	-5.0	-6.0	0	-5.0	-4.0		0	-2.0	-29.7
11	-0.1	-1.1	0	-1.0	-3.0	0	0	-3.0	-2.0	0		-2.0	-12.2
12	1.0	0	0	0	0.5	-1.0	-2.0	0	0	2.0	2.0		2.5
マクロセル電流 (アノード電流の合計)													81.9

\* : 要素鉄筋のNo.

(2) ひびわれのあるモデル供試体 (配合 65-12-S, NaCl 溶液中) mix potential. -576

( $\mu\text{A}$ )

カソード側* アノード側*	1	②	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合 計
1		0.9	0.5	5.0	0.2	0.3	0	0	0.1	0.1	2.6	0.9	10.6
②	-0.9		-0.4	4.0	-0.2	-0.6	2.9	-0.2	-0.3	-0.5	1.6	0.6	② 6.0
3	-0.5	0.4		5.0	0.2	0	2.0	0	0	0.2	2.4	0.8	10.5
4	-5.0	-4.0	-5.0		-5.0	-5.0	-1.0	-5.0	-5.0	-5.0	-2.0	-4.0	-46.0
5	-0.2	0.2	-0.2	5.0		-0.3	3.4	-0.3	-0.2	0.1	0.1	0.7	8.3
6	-0.3	0.6	0	5.0	0.3		3.0	0	0	0.2	3.0	1.1	12.9
7	0	-2.9	-2.0	1.0	-3.4	-3.0		-4.0	-4.0	-3.5	-0.8	-1.8	-24.4
8	0	0.2	0	5.0	0.3	0	4.0		0	0.1	2.7	1.0	13.3
9	-0.1	0.3	0	5.0	0.2	0	4.0	0		0.2	2.9	1.2	13.7
10	-0.1	0.5	-0.2	5.0	-0.1	-0.2	3.5	-0.1	-0.2		3.0	1.0	12.1
11	-2.6	-1.6	-2.4	2.0	-0.1	-3.0	0.8	-2.7	-2.9	-3.0		-1.0	-16.5
12	-0.9	-0.6	-0.8	4.0	-0.7	-1.1	1.8	-1.0	-1.2	-1.0	1.0		- 0.5
マクロセル電流 (アノード電流の合計)													87.4

② : ひびわれ部アノード電流

\* : 要素鉄筋のNo.

表-51 材令6か月におけるマクロセル電流

種 類	養生 (測定) 条 件	配 合 (記号)	ひびわれ部に 流入するアノ ード電流 ( $\mu A$ )	全体として のマクロセ ル電流 ( $\mu A$ )	ひびわれ部 がアノード である割合
ひびわれの ない 供 試 体	水 道 水 中	45-5-T	—	73.2	—
		45-5-S	—	97.0	—
		65-12-T	—	71.3	—
		65-12-S	—	14.8	—
		45-12-T	—	24.5	—
ひびわれの ある 供 試 体	水 道 水 中	45-5-T	- 57.6	93.2	0/2
		45-5-S	27.4	140.8	2/2
		65-12-T	-187.8	598.8	0/2
		65-12-S	19.1	142.7	2/2
	Na Cl 溶 液 中	45-5-T	25.6	95.6	2/2
		45-5-S	1.2	32.3	2/2
		65-12-T	- 0.2	341.6	1/2
		65-12-S	6.1	74.5	2/2

表-52 V型のマクロセル電流に及ぼす乾湿の影響  
(材令6か月)

測定条件 および期間	配 合			
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	65-12-S
①NaCl 溶液中	-0.2	0.2	0.1	-0.1
drying 5 min	0.1	0.6	0	-0.1
10min	0.2	0.2	0.1	0
10min	0.3	0.6	0.1	-0.1
20min	0.2	0	0	0.1
30min	0.2	0.8	-0.2	0
1 hour	-0.4	0.2	0.1	-0.2
2 hrs	-0.6	0.2	0.2	-0.3
3 hrs	0	0.6	0.2	-0.3
4 hrs	0.9	0.2	0.2	-0.2
5 hrs	-0.3	0.1	-0.1	0
6 hrs	0	0.3	0	-0.3
wetting 5 min	-0.1	0.8	-0.4	-0.3
10min	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
15min	0.4	0.4	-0.3	-0.3
20min	1.0	0.2	-0.3	-0.1
30min	-0.3	0.3	-0.2	-0.2
1 hour	0.6	0	-0.1	-0.3
2 hrs	-0.3	0.1	-0.4	-0.4
3 hrs	0.4	0.3	0.2	-0.1
4 hrs	-0.3	0.5	0.1	-0.2
5 hrs	-0.1	0.3	-0.2	-0.1
6 hrs	-0.1	0.3	-0.1	-0.2

12時間 (1 cycle) での全電流

電流の種類	配 合			
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	65-12-S
Anode 電流	0.008	0.011	0.004	0
Cathode電流	-0.008	0	-0.004	-0.009
①の状態での 電流	-0.009	0.009	0.004	-0.004

無定形であった。この場合、凹凸部の境界面に錆が著しかった。錆の色より判断すると、酸素供給量の多いと思われるX養生のほうに  $Fe_2O_3$  が多く、酸素供給量の少ないと思われるS養生およびN養生に  $Fe_3O_4$  が多いものと思われる。

ロ) 腐食面積

表面観察後、錆をスケッチしてプランニメーターによって面積を測定した。測定結果を、表-54に示す。この表では、配合および養生条件別に腐食面積を平均し、更に、腐食面積を90.9 cm<sup>2</sup>として腐食面積率を示した。

なお、有効数字は2桁までと考えた。

ハ) 錆重量

腐食面積測定後、カッターナイフでこすり取れる錆を取り、直示天秤で錆重量を測定した。測定結果を、表-54に併せて示す。

イ) 鉄筋の電気化学的測定

イ) アノード分極曲線を用いた不動態のグレイドの判定



表-53 VC 型のひびわれ部のマクロセル電流に  
及ぼす乾湿の影響 (材令 6 か月)

(μA)

測定条件 および時間	配 合			
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	65-12-S
① NaCl 溶液中	5.0	2.6	-10	6.7
drying 5 min	1.0	-0.7	-1.0	-6.3
10min	0.2	-1.0	-0.5	-5.4
15min	-0.3	-1.2	-0.4	-4.7
20min	-0.7	-2.7	-0.5	-4.5
30min	-0.7	-2.1	-0.8	-4.1
1 hour	-0.8	-1.6	-1.1	-5.3
2 hrs	-1.9	-7.4	-3.1	-9.3
3 hrs	-3.0	-3.9	-0.9	-8.4
4 hrs	-1.4	-5.8	-1.3	-10.9
5 hrs	-0.7	-8.6	-1.2	-9.8
6 hrs	-0.7	-7.5	-0.8	-9.0
wetting 5 min	8.0	-3.2	0.2	-8.0
10min	0.7	6.2	9.9	2.4
15min	8.9	6.8	12.7	8.8
20min	9.1	8.3	34.1	8.7
30min	8.8	9.4	38.9	8.2
1 hour	7.2	13.3	10.7	7.0
2 hrs	12.5	5.1	13.7	7.1
3 hrs	8.8	5.1	8.7	3.8
4 hrs	8.4	7.5	3.3	7.0
5 hrs	8.0	9.2	1.8	5.6
6 hrs	8.0	11.9	0.7	3.7

12時間 (1 cycle) ひびわれ部に流れ込む電流

電流の種類	配 合			
	45-5-T	45-5-S	65-12-T	65-12-S
Anode 電流	0.197	9.185	0.208	0.142
Cathode 電流	-0.031	-0.120	-0.035	-0.189
①の状態での電流	0.216	0.112	-0.432	0.289

(単位: coulomb) 注: 2本の平均値

1, 2, 4, 6, 12か月 (X養生では15か月も含む) におけるコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドを判定した。測定結果を、表-55 に示す。

ロ) 自然電極電位

1, 2, 4, 6, 12か月 (X養生では15か月も含む) において自然電極電位を測定した。測定結果を表-56 に示す。

表-55 ひびわれのある供試体における  
アノード分極曲線を用いた不動態判定

配 合 (記号)	養生 条件	測定材令 (月)					平均値 (重み 付き)	
		1	2	4	6	12		
45-T	N	3	2	1	1	1	1.38	
45-S	N	1	2	2	2	2	1.88	
55-T	N	0	2	1	1	1	1	
	S	2	2	1	1	1	1.25	
55-S	N	1	1	1	1	1	1	
	S	1	1	1	2	1	1.33	
65-T	1	1	1	1	1	1	1	
65-S	N	1	1	1	1	1	1	
H-T	N	3	3	3	3	2	2.75	
	S	2	3	1	1	1	1.38	
H-S	N	2	2	2	3	3	2.58	
	S	2	3	1	1	1	1.54	
H-H	N	1	1	2	3	2	2.08	
	S	1	1	1	1	1	1	
							15か月	
55-T	X	1	3	3	1	1	5.58	1
55-S	X	0	1	2	2	1	1.38	1
65-T	X	1	1	1	2	1	1.33	1
65-S	X	1	1	3	3	1	2	1

表-57 コンクリート岸壁および護岸中の全塩素  
含有量 (% V. S. モルタル重量)

構 造 物	試験時 までの 経過年 数	か ぶ り (cm)		
		0~4	8~12	16~20
七尾港岸壁	18年	0.24	0.22	0.23
		0.32	0.32	0.38
		0.29	0.37	0.34
		0.29	0.32	0.21
澁 港 護 岸	44年	0.26	0.12	0.04
		0.20	0.12	0.05
		0.23	0.14	0.05
		0.23	0.10	0.02
		0.13	0.10	0.05
津 港 護 岸	15年	0.13	0.08	0.06
		0.08	0.07	0.06
		0.08	0.07	0.06
宇治山田護岸	15年	0.10	0.06	0.03
		0.07	0.06	0.06
		0.08	0.09	0.07

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

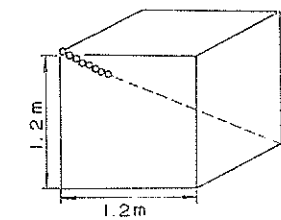
表-54 鉄筋の腐食面積および錆の重量 (ひびわれのある供試体)

注: ● 赤茶の錆 無印 黒の錆

配合 (記号)	養生条件	腐食面積 (mm <sup>2</sup> )			腐食率 (%)	錆の重量 (mg)			錆の厚さ (mg/mm <sup>2</sup> ) B/A
		① (③)	② (④)	平均 A		① (③)	② (④)	平均 B	
45-T	N	● 150	10	80	0.88	23	0	11.5	0.14
45-S	N	27	28	27.0	0.30	5	5	5	0.18
55-T	N	134	● 196	10	1.2	12	13	8.33	0.08
	S	0	0	0	0	0	0	0	—
55-S	N	10	93	49	0.54	0	10	5	0.10
	S	67	89	78	0.86	3	5	4	0.05
65-T	N	26	40	33	0.36	3	11	7	0.21
65-S	N	11	9	10	0.11	2	8	5	0.50
H-T	N	0	3	1.5	0.02	0	1	0.5	0.33
	S	0	0	0	0	0	0	0	—
H-S	N	10	37	23.5	0.26	1.5	3	2.25	0.10
	S	21	66	43.5	0.48	1	1	1	0.02
H-H	N	0	12	6	0.07	0	5	2.5	0.42
	S	39	19	29	0.32	4	1	2.5	0.13
55-T	X	2600	1035	1818	20.0	40	23	31.5	0.02
55-S	X	250	76	163	1.79	14	3	8.5	0.05
65-T	X	2070	243	1157	12.7	42	14	28	0.02
65-S	X	757	287	522	5.74	26	11	18.5	0.04

注: X養生の錆はすべて赤茶

Distance (cm)	Chloride Content
10	1.66
20	0.76
30	0.35
40	0.09
50	0.06
60	0.07
70	0.08
80	0.09



(The positions where the specimens come from)

図-31 根固めブロック中の塩素含有量 (%)  
(コンクリートの概略の仕様: ボルト  
ランドセメント G<sub>max</sub> 40 mm セメン  
ト量 400 kgf/m<sup>3</sup>, W/C=65%)

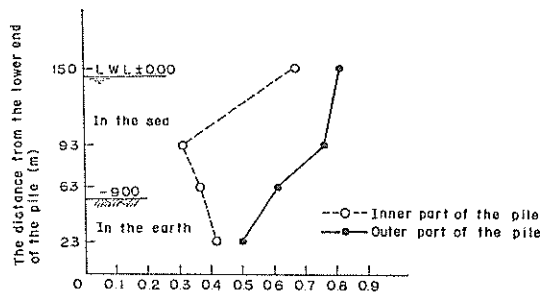


図-32 プレキャスト RC くい中の塩素含有量 (%)  
(くい内側, くい外側ともかぶりおよそ  
2.5 cm 程度である)

表-56 ひびわれ供試体の自然電極電位の測定値

配 合 号 (記 号)	養生条件	測 定 材 令 (月)						平均 値 (重み付き)	
		1	2	4	6	9	12		
45-T	N	-344	-396	-437	-592	-558	-535	-495	
45-S	N	-328	-377	-377	-441	-369	-320	-375	
55-T	N	-401	-589	-461	-664	-534	-399	-522	
	S	-254	-232	-646	-634	-182	-92	-358	
55-S	N	-722	-503	-479	-562	-619	-544	-573	
	S	-859	-712	-849	-861	-781	-653	-794	
65-T	N	-385	-336	-521	-593	-612	-600	-529	
65-S	N	-273	-421	-438	-459	-441	-464	-424	
H-T	N	-57	-69	-143	-310	-323	-344	-228	
	S	-109	-362	-711	-841	-822	-675	-642	
H-S	N	-208	-211	-307	-329	-331	-346	-298	
	S	-458	-562	-858	-563	-867	-773	-701	
H-H	N	-342	-285	-293	-345	-436	-565	-379	
	S	-498	-805	-814	-818	-819	-758	-734	
									15ヵ月
55-T	X	-355	-248	-280	-394	-633	-704	-450	-332
55-S	X	-181	-294	-262	-254	-391	-426	-307	-236
65-T	X	-300	-425	-295	-408	-361	-475	-374	-340
65-S	X	-181	-333	-305	-525	-596	-462	-431	-226

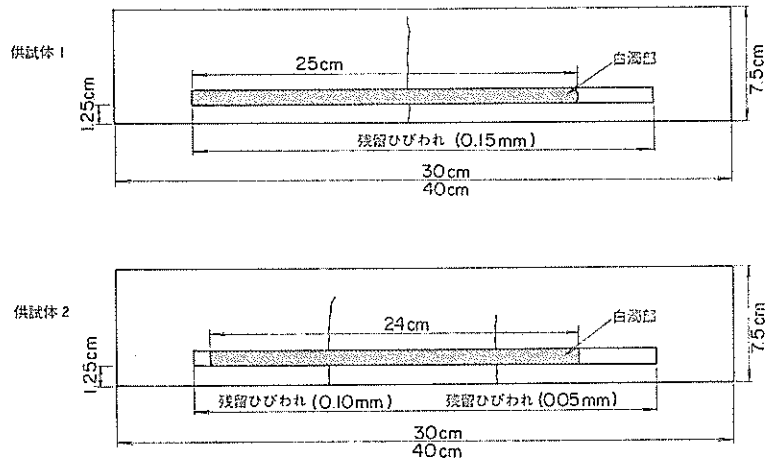


図-33 フランレジコンクリート中へのひびわれ部からの塩素浸入

5.3 補足試験

(1) 既存構造物の塩素含有量—シリーズ6

建設後15~44年経過したコンクリート岸壁および護岸の全塩素含有量を表-57に示す。これらの構造物は、感潮部よりやや上方の飛沫部にあり、比較的少ない塩素含有量である。また、浸した後およそ15年経過した海中部の根固めブロックの対角線方向の全塩素含有量（この試料の抽出条件のみ5分間煮沸）を図-31に示す。隅角部より10, 20, 30 cm の位置の全塩素含有量は、おのおの1.66, 0.76, 0.35%と比較的多くの塩素を含んでいるが、40~80 cm の位置では0.1%以下となる。さらに、建設後おのおの15年および20年経過した感潮部に近い飛沫部にある棧橋床版の全塩素含有量を表-58に示す。また、20年を経過した飛沫部、感潮部、海中部、土中部を貫通するプレキャスト鉄筋コンクリート杭中の全塩素含有量を図-32に示す。この図からは、プレキャスト部材であっても、特に全塩素含有量が少ないということは認め

られなかった。

なお、海水を練り混ぜ水として用いた場合の全塩素含有量はおよそ0.25%、海砂中の塩分規制値として塩分0.1% (NaCl換算)とした場合の全塩素含有量はおよそ0.04%である。

(2) ひびわれと塩素量の実態—シリーズ7

材令1年において、供試体を鉄筋軸方向に半割りし、半割り部の鉄筋跡およびその近傍に0.014モルAgNO<sub>3</sub>溶液を点滴した。この溶液によって、塩素の存在する部分は白濁する。このスケッチを図-33に示す。いずれの供試体においても鉄筋跡の80%以上が白濁していた。この部分の塩素濃度については、0.014モルAgNO<sub>3</sub>溶液で感知できるものであるという以上には言えないが、このことより、ひびわれによって海水中にあるコンクリート中鉄筋表面の多くの部分に塩素の付着している可能性の高いことが認められた。

(3) 海洋環境化のコンクリートの空隙率、X線回折、および、SEM観察—シリーズ8

a) 空隙率

表-58 棧橋床版および文献27, 28)にみられる塩素含有量および見掛けの拡散係数

	データの種類	経過年数	かぶり (cm)	塩素含有量 (%)	計算値	
					C <sub>0</sub> (%)	D <sup>*</sup>
飛沫部	①スラブコンクリート C=315kgf/m <sup>2</sup> W/C=36%	20年	2.5	0.08	0.10	0.39
			7.5	0.05		
			12.5	0.035		
飛沫部	②スラブコンクリート C=480kgf/m <sup>2</sup> W/C=43%	20年	2.5	0.63	0.56	0.13
			7.5	0.21		
			12.5	0.10		
部	③スラブコンクリート (はり部) W/C=60%	15年	2.5	0.29	0.28	0.26
			7.5	0.10		
			15.0	0.02		
海中部	④モルタル W/C=40%	0.5年	0.5	0.35	0.94	0.11
			1.25	0.15		
			1.75	0.01		
部	(文献28)	1.0年	0.5	0.50	0.94	0.11
			1.25	0.30		
			2.0	0.15		
部	(文献28)	2.0年	0.25	1.00	0.94	0.11
			0.90	0.52		
			1.5	0.38		
			2.25	0.25		
			3.1	0.08		
ペースト W/C=40.0% (文献27))					0.694	

\* (10<sup>-7</sup>cm<sup>2</sup>/s)

表-59 空隙率測定結果

細孔径 (Å)	細孔量 (mm <sup>3</sup> /g)					
	NWH		NSH		BSH	
	標準養生	海水養生	標準養生	海水養生	標準養生	海水養生
38	12.25	12.68	17.81	18.88	16.80	15.14
75	7.98	7.45	9.95	6.11	8.34	8.15
125	8.95	4.83	3.82	2.27	4.97	4.72
250	2.88	1.57	1.07	1.50	1.43	1.46
450	0.97	0.96	0.48	0.80	1.29	0.96
750	1.77	1.18	1.04	0.68	1.50	1.29
1250	2.70	1.99	2.08	1.68	2.53	2.57
2500	4.08	3.14	3.91	2.78	3.20	3.01
4500	5.25	5.82	3.68	5.11	2.85	3.01
7500	4.67	5.71	4.02	4.33	2.74	2.55
12500	3.85	4.77	3.56	4.78	2.85	2.78
25000	2.33	2.21	2.41	2.56	1.14	1.62
45000	0.70	1.28	0.34	0.89	0.57	0.23
75000						
合計	58.37	53.58	54.17	52.37	50.21	47.49

(試料は各1本)

表-60 X線回折結果 (X線回折ピーク強度比)

配 合	養 生 条 件	検 出 鉱 物 名						
		フリーデル氏塩 (0.0°)	エトリンガイト (11.2°)	ポルトランド ダイト (18.3°)	方 解 石 (29.4°)	石 英 (36.7°)	長 石 (27.5°~ 28.0°)	
NWH	標 準 養 生 海 水 養 生	0	0.5	>19	7	5	8	
		3.5	1	>19	4	8	15	
NSH	標 準 養 生 海 水 養 生	3	0.5	>19	4	5	9	
		4.5	1	>19	7.5	3	8	
BSH	標 準 養 生 海 水 養 生	3	1.5	10	12	6	18	
		3	2	11	6	4	6	

空隙率の測定結果を、表-59 に示す。各試料の38~75000オングストローム間の細孔量の順位は、NWH (普通ポルトランドセメント) 標準養生> NSH (普通ポルトランドセメント海水練り) 標準養生> NWH 海水養生> NSH 海水養生> BSH (高炉B種海水練り) 標準養生> BSH 海水養生であった。

すなわち、海水養生したコンクリートの細孔量は、標準養生したものより少ない。海水練りコンクリートの細孔量は、水道水練りのものより少ない。さらに、高炉セメントB種のもは、普通ポルトランドセメントのものより少ないことが認められた。

なお、38~78オングストロームの間では、この傾向は一部逆転している。

b) X線回折

X線回折結果を、表-60 に示す。

フリーデル氏塩は、NWH 標準養生以外のものにはすべて存在が認められた。この塩の生成には、塩素を必要とするので、NWH 標準養生のものに存在しないのは当然である。また、エトリンガイトは、海水練りおよび高炉セメントB種のものでやや多いことが認められる。

c) SEM 観察

NWH 海水養生、NSH 標準養生および NSH 海水養生の材令1年の SEM 観察を行った。

その結果、NWH 海水養生と NSH 標準養生には、フリーデル氏塩の結晶は観察されず、NSH 海水養生のみに観察された。また、NSH 標準養生の空隙にはエトリンガイトは観察されなかったが、NWH 海水養生および NSH 海水養生の空隙には、エトリンガイトの針状結晶が多く観察された。

6. 電気化学的方法の評価

(1) シリーズ1の実験結果に基づいた考察

各種の電気化学的方法の有効性を、コンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量と比較検討した。

表-61 不動態のグレイドと腐食発生の割合

不動態のグレイドの範囲	0.5以下	0.5< ≤1.0	1.0< ≤1.5	1.5< ≤2.0	2.0<
腐食発生の割合	100% (8/8)	66% (27/41)	35% (11/31)	0% (0/2)	0% (0/4)
不動態のグレイドの範囲	0.5未満	0.5 ≤ <1.0	1.0 ≤ <1.5	1.5 ≤ <2.0	2.0以上
腐食発生の割合	100% (8/8)	80% (8/10)	50% (28/56)	25% (2/8)	0% (0/4)

a) 不動態のグレイド

表-61に不動態のグレイドの1年間の平均値(重み付き平均)と腐食発生の割合との関係を示す。明確な境界は存在しないが、概略1.0を境界値として腐食発生領域と非腐食発生領域に分けることが可能と思われる。1.0を境界値とすると、1.0以下での腐食発生の割合は1年で8割強となる。

図-34および図-35におのおの不動態のグレイドの平均値と腐食面積および錆重量との関係を示す。定性的には、不動態のグレイドが小さいほど腐食面積率および錆重量とともに増加することが認められ、また、境界値1.0として概略分類できることが分かる。

このデータから、不動態のグレイドは、腐食の定性的な尺度として十分用いることができると判断される。

b) 腐食電流(腐食電流密度)

均一な水溶液中で理想的な試験を行い、すべての反応生成物を測定できれば、全腐食電流C(この場合、1年間の腐食電流の合計:coulomb)と反応生成物の当量Xとの間には、 $C = X \times F$  (F:Faraday, 96500 coulomb)の関係が成り立つはずである。すなわち、比例関係が期待される。

しかしながら、図-36に示す全腐食電流と錆重量の関係からは、比例関係の存在は認められない。

この理由としては、Tafelの仮定の適応性の問題、お



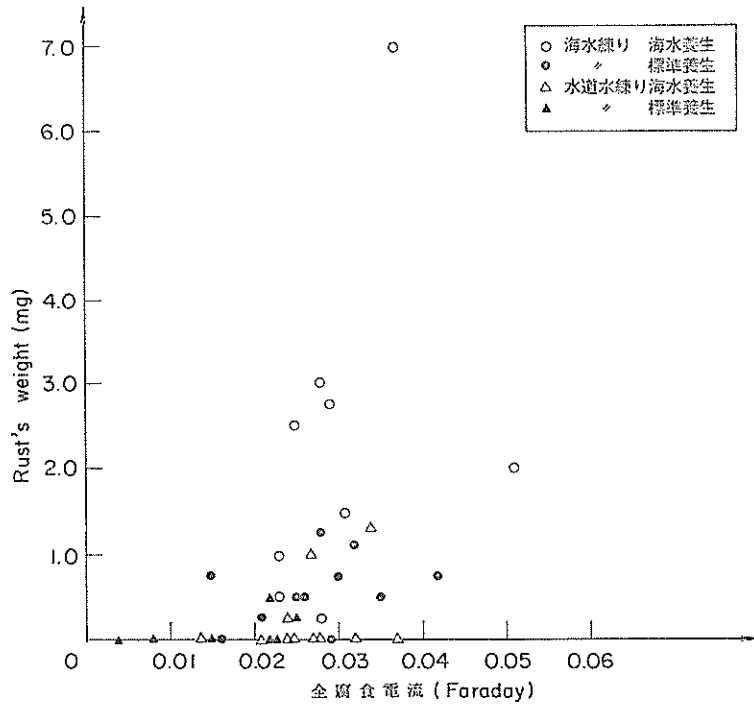


図-36 全腐食電流と錆の重量との関係 (錆の重量は2本の平均値)

よび、反応生成物はいわゆる錆のみではない、という2つのことが考えられる。これらについての議論は後述するが、いずれにしても、腐食電流は、腐食量の判定の尺度として用いにくいことが分かる。

c) 再不動態化電位と自然電極電位の差

図-37に、再不動態電位 ( $E_{rep}$ ) と自然電極電位 ( $E_{corr}$ ) との差と腐食面積率との関係を示す。全体としては、両者に明確な相関関係は認められない。しかしながら、400 mV 程度を境界値として、それ以下は海水養生のもの、それ以上は標準養生のものとして明確に別れており、( $E_{rep}-E_{corr}$ ) は養生条件と密接な関係があることが認められた。

材令1年では、養生条件の差は、腐食面積にそれほど影響を与えず、したがって、( $E_{rep}-E_{corr}$ ) は、腐食面積と関連づけられなかったものと考えられる。

なお、通常 ( $E_{rep}-E_{corr}$ ) は、孔食の発生と関連づけられる数値であるが、直接的な関連は認められなかった。

d) 自然電極電位

前述したように、同一の自然電極電位を有する鉄筋であっても、アノードの特性 (アノード分極曲線および面積) とカソードの特性 (カソード分極曲線および面積)

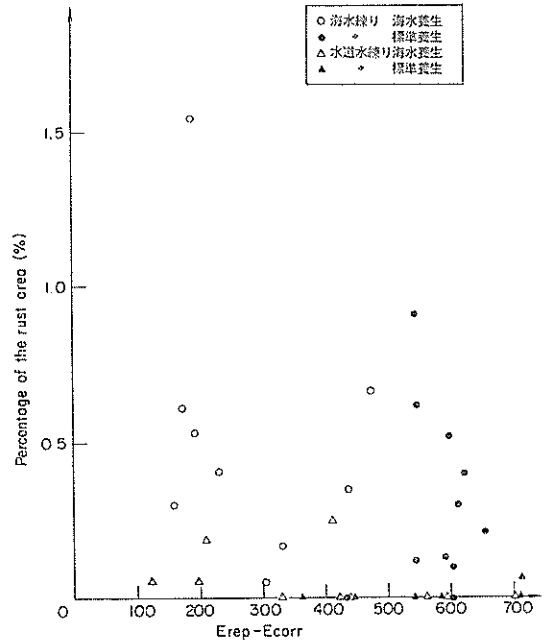


図-37 再不動態化電位と自然電極電位の差と腐食面積率の関係 (腐食面積率は2本の平均値)

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

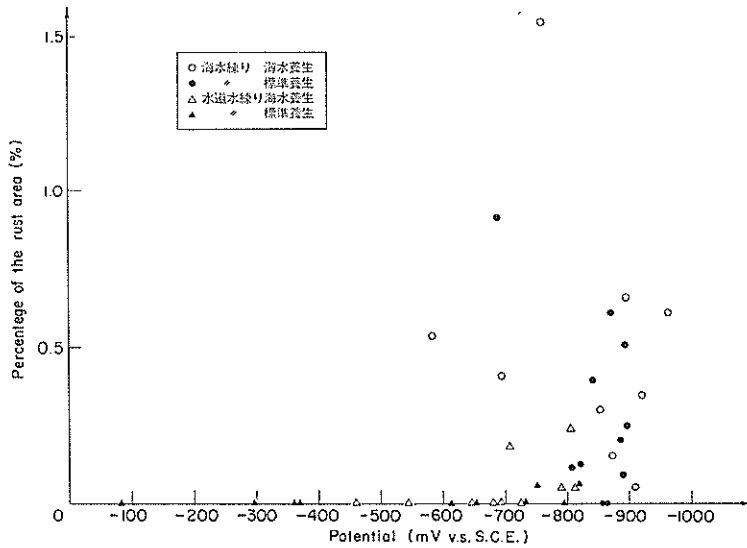


図-38 自然電極電位の平均値と腐食面積率との関係 (腐食面積率は2本の平均値)

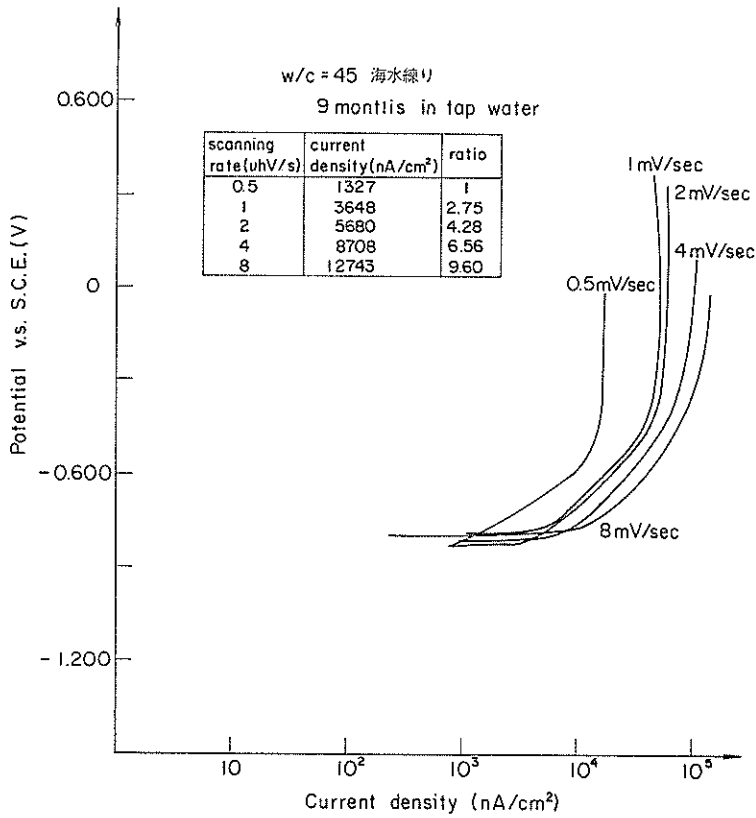


図-39 掃引速度の分極曲線に及ぼす影響



の組み合わせは、無数にあるので、鉄筋の腐食の判定に  
適応するには理論的な問題がある。

しかしながら、図-38に示すように、-550 mV (vs.  
SCE) より貴な電位では、腐食は発生しておらず、定性  
的な判断には役立つと思われる。

e) 腐食電流と不動態のグレイドに関する考察

一般に水溶液中での試験では、腐食電流と反応生成物  
とは、Faraday 数と規定数がよく一致するとされている。  
しかしながら、本実験では、図-36に示すようにそれら  
は一致しない。また、表-24、表-26の Faraday 数  
より算定した錆重量と実測値とでは、1000倍近くの相違  
がある。この原因として著者は、① Tafel 線を用いた  
算定法、および、②錆と反応生成物との関係、に問題が  
あると考えた。

①については、特に、掃引速度と Tafel 線の傾の変化  
との関係が問題と考えた。しかし、図-39に示す本実験  
結果より、掃引速度を0.5 mV/s から8 mV/s まで変化  
させても、腐食電流密度の測定値の差は大きく見積って  
も10倍であって、1000倍近い差から考えると主因とは考  
えにくい。

そこで主因は②ではないかかと推察された。表-62に、  
表-24 および表-26 よりまとめた、全腐食電流から求め  
た錆の厚さ(全鉄筋表面積に一樣に錆が分布すると仮定  
した)と実測した錆重量を腐食面積で除したものを錆厚  
さと称して示す。なお、全電流から錆の厚さを算出する  
際の反応生成物を  $Fe_2O_3$  と仮定した。

この表より、錆重量の測定精度および掃引速度の影響  
を考えると、錆の厚さはよく一致していると考えられ  
る。さらに飛躍して考えると、錆の発生していない表面  
にもほぼ同一厚さ(規定数に換算して)の反応生成物が  
ある可能性があり、この生成物は不動態の生成となんら  
かの関係があるとも考えた。また、この表では不動態の  
グレイドも併せて示したが、全く錆のないものはグレイ  
ド1以上に対応するものが多く、この意味するところは、  
グレイド1以上では、腐食電流のほとんどは不動態  
の生成に用いられ、しかも、皮膜の厚さは薄いというこ  
とが推察される。

f) まとめ

電気化学的方法の中で、コンクリート中铁筋の腐食の  
判定に最も有効なものは、不動態のグレイドの判定であ  
り、ついで、自然電極電位である。また、( $E_{rep}-E_{corr}$ )  
によって養生条件の判定の可能性もある。

(2) シリーズ2の実験結果に基づく考察

シリーズ2の実験結果を整理し、不動態のグレイドと  
腐食度との関係を図-40に示す。ここでは、不動態のグ

表-62 全腐食電流および実測値から求めた錆の厚さ

配号 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	錆の厚さ (mgf/mm <sup>2</sup> )		不動態の グレイド
			全腐食 電流より	実測値 より	
45-5-T	N	1.2	0.25	0.17	1.5
45-5-S	S	1.2	0.35	0.15	1
		1.2	0.24	0.17	0.75
		3.3	0.31	0.10	0.75
45-7-T	S	1.2	0.23	—	1.25
		1.2	0.26	—	1
45-7-S	S	1.2	0.26	0.17	0.75
		1.2	0.27	0.08	0.625
45-2-T	S	1.2	0.20	—	1.455
		1.2	0.15	—	1.33
45-12-S	S	1.2	0.30	0.14	0.25
		1.2	0.14	0.04	0.25
50-5-T	S	1.2	0.24	—	7
		1.2	0.21	—	1.25
50-5-S	S	1.2	0.22	0.01	1
		1.2	0.28	—	1
55-5-T	S	1.2	0.33	0.18	1
		1.2	0.23	0.17	1.38
		1.2	0.22	—	2.33
		1.2	0.23	0.13	1
55-5-S	S	3.3	0.21	0.20	1
		1.2	0.22	0.20	1.29
		1.2	0.15	—	1
		1.2	0.25	0.13	1
65-5-T	S	3.3	0.28	0.10	1
		1.2	0.26	—	1.29
		1.2	0.31	—	1.38
		1.2	0.24	0.16	1
65-5-S	S	3.3	0.27	0.24	0.88
		1.2	0.20	0.04	1
		1.2	0.20	0.04	1
65-12-T	S	1.2	0.35	—	1.13
		1.2	0.04	—	2.88
65-12-S	S	1.2	0.47	0.11	0.25
		1.2	0.40	0.03	0.25
H-T	S	1.2	0.14	—	1.5
		1.2	0.08	—	1.71
H-S	S	1.2	0.27	0.14	1
		1.2	0.34	0.14	1
H-H	S	1.2	0.24	0.04	1.13
		1.2	0.25	0.25	1.17

レイドとして、おのおのモルタル中铁筋の91日、180日、  
および1年のグレイドの平均値を用いた。

これより、養生条件別では、不動態のグレイド別にサ  
ンプル数が大幅に異なることもあってか傾向の把握は困

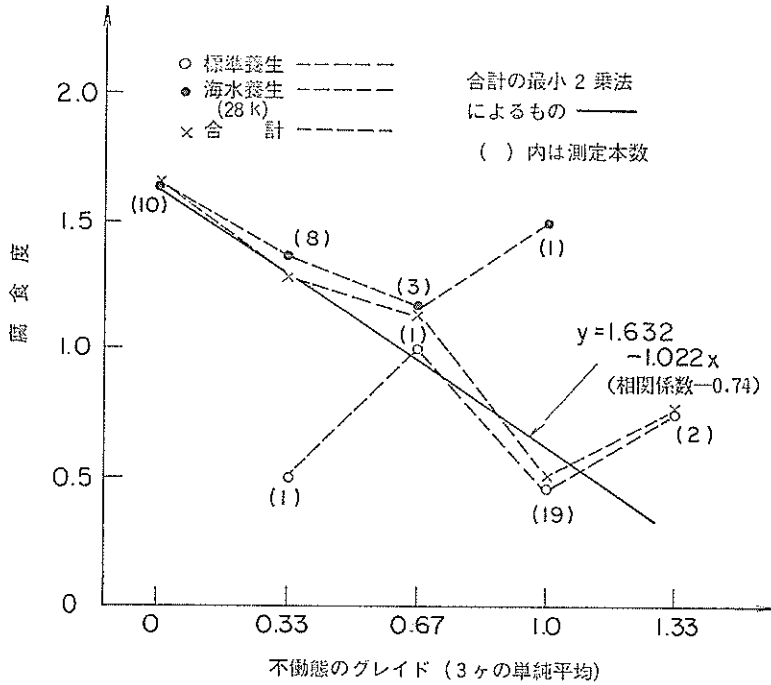


図-40 不動態のグレードと腐食度の関係

難であるが、全体としてみると、腐食のように非常にばらつく現象としては、高い相関が認められる。

(3) シリーズの実験結果に基づく考察

a) 自然電極電位

シリーズ4の実験結果より、ひびわれの発生によって、大部分の供試体の自然電極電位は貴に、また、当初非常に貴であったものはひびわれ発生後は卑へと移行した。

このように、ひびわれによって腐食が発生しやすくなるにもかかわらず電位が必ずしも卑とならないのは以下の理由による。

すなわち、自然電極電位が腐食のしやすさと関係するためには、カソード分極曲線がほぼ一定であるという条件が必要と考えられるが、ひびわれによってこの条件がなくなるため電位は必ずしも卑とはならないと言える。

例えば、図-41によって Sa, Sb での電位の変化を説明すると次のようである。

ひびわれ発生前のカソード分極曲線をIのごとく想定し、さらに、ひびわれ発生前の不動態のあるアノード分極曲線をA、不動態のないアノード分極曲線をBと想定する。電位はアノードとカソード分極曲線の交点として求められ、この場合、不動態の有無によってXあるいはは

Yとして求められる。Sa, Sb 供試体では Sb-7 が X にその他が Y に相当したと考えられる。さて、ひびわれ発生後は、カソード分極曲線の電流密度は増大しIIのように想定される。またひびわれ発生後は不動態は存在しないことが多く、アノード分極曲線はCのごとく想定される。したがって、ひびわれ発生後の電位はZのごとくすることが想定される。これによって、ひびわれによって Sb-7 のみが貴に他のものが卑となったことが定性的に説明される。

上記のごとくにカソード分極曲線が変化する場合には、自然電極電位は腐食の判定には適用しにくい。

b) 不動態のグレード

アノード分極曲線は自然電極電位とは異なり、任意の電位において個々の要素の電流を加算したものが全体のアノード分極曲線のベースとなる。この意味でひびわれ部の影響は、全体のアノード分極曲線に反映される。

しかし、問題はひびわれ部の影響によって他の部分のアノード分極曲線が変化することとひびわれ部の面積が不明なことである。

前者の問題について、ひびわれ部の他の部分の不動態のグレードに及ぼす影響を表-63にまとめた。配合で 45-5-T, 65-12-S は、ひびわれ部によって不動態のグレードは高くなり、65-12-T の水道水中のみでひびわれ

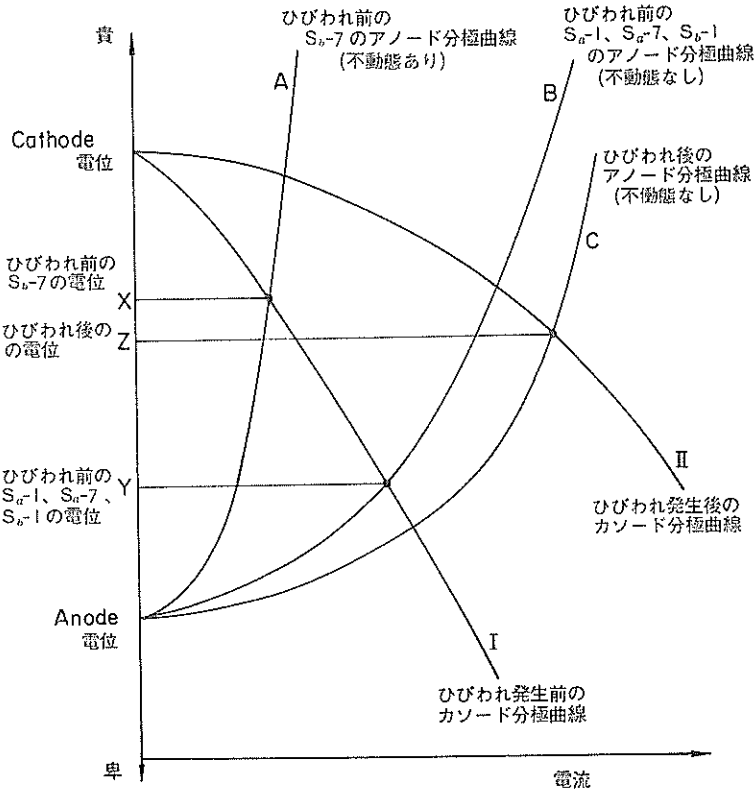


図-41 ひびわれ前後の自然電位変化の概念図

表-63 ひびわれ部のひびわれのない部分の不動態のグレイドに及ぼす影響

(Closed 供試体)

配合 (記号)	VC 型供試体の ひびわれのない 部分の不動態の グレイド		V 型供試 体のグレイ ド (水道水 中)	表-25より (材令6か月)	
	水道水中	NaCl 溶液中		水道水中	NaCl 溶液中
45- 5-T	2.3	1.3	1	1	1
45- 5-S	1	0.7	1	1	1
65-12-T	1.3	1.3	3	3	1
65-12-S	1	1	—	0	0

部によってグレイドは低くなることが認められた。また、前述したように、クローズドとオープン供試体の自然電極電位には明らかに差がある。いずれにせよ、ひびわれ部のその他の部分のアノード分極曲線に与える影響は大きい。このため、ひびわれのない供試体とひびわれのある供試体のアノード分極曲線を直接比較して腐食の

傾向（腐食の有無など）を判定することには無理がある。

後者の問題は、面積比が分からなければ、全体のアノード分極曲線からひびわれ部あるいはその他の部分のアノード分極曲線を分離することができないことになる。

以上のことより、ひびわれのある供試体とない供試体のアノード分極曲線の直接比較には無理がある。しかし、同一供試体の経時変化、あるいは同程度のひびわれを有する供試体の相対的な比較であれば、ある程度の判断は可能と思われる。

(4) まとめ

一般に、電気化学理論の多くは、均一溶液中、1つのアノード、1つのカソードがあるという条件の下に理論を展開しており、電気化学的方法もその理論にもとづいているわけである。しかしながら、コンクリートは不均一な多相材料であり、また、鉄筋表面は不均一である。そのため、電気化学の理論上の仮定の厳密な成立は疑問である。

この疑問を解決すべく、種々の電気化学的方法を実験

的に検討した結果、不動態のグレイドについて自然電極電位が有効であることが認められた。また、コンクリート中よりもモルタル中の鉄筋に関してのほうが有効であるとの印象を受けた。さらに、ひびわれがある場合には、自然電極電位は有効でなく、不動態のグレイドも相対比較に有効であるのみである。

7. 考察および結論

7.1 個々の実験に対する考察および結論

(1) シリーズ1について(ひびわれなしかつコンクリート中)

a) 養生条件の及ぼす影響

塩素として、水和反応の大部分が終了した後に(材令28日以降を考えた)侵入する塩素の影響を考える。すなわち、材令28日以降の標準養生(恒温恒湿室内)と海水養生によるコンクリート中鉄筋の腐食の相違を考える。

イ) 鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

表-64に、配合およびかぶりが高さ同一という条件で、標準養生と海水養生したコンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量の相違を示す。なお、気中養生のものには腐食は認められなかった。

腐食の有無という観点からは、配合およびかぶりが高さ同一であれば、標準養生で腐食の認められるものでは、必ず海水養生でも腐食が認められる。

腐食面積および錆重量においても、海水養生のものが標準養生のものを上回る傾向がある。

ロ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

表-65に、養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響を示した。ばらつきはあるものの、材令2か月では、養生条件による差はわずかであるが、材令6か月、12か月となると標準養生のほうが高いグレイドとなる。

ハ) 腐食電流密度および全腐食電流に及ぼす影響

表-66に、養生条件が腐食電流密度および全電流密度に及ぼす影響を示す。海水養生のものが標準養生のものに比較して大きな値を示す。特に、材令12か月での腐食電流密度においてその傾向が明らかである。

ニ) 再不動態化電位 ( $E_{rep}$ ) および ( $E_{rep}-E_{corr}$ ) に及ぼす影響

表-67に、養生条件が  $E_{rep}$  および ( $E_{rep}-E_{corr}$ ) に及ぼす影響を示す。2, 3の例外を除き、 $E_{rep}$ 、( $E_{rep}-E_{corr}$ )ともに標準養生のものが大きな値を示す。特に、孔食の起こりやすさの尺度(小さいほど起こりやすい)となる ( $E_{rep}-E_{corr}$ )は明確に海水養生が小さな値を示す。

ホ) 自然電極電位に及ぼす影響

表-64 養生条件の鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

配 合 (記 号)	腐食面積 (mm <sup>2</sup> )			錆の重量 (mgf)		
	養生条件		①-②	養生条件		③-④
	N①	S②		N③	S④	
45- 5-T	5.85	0	5.85	1	0	1
45- 5-S	47	3	44	7	0.5	6.5
45- 7-T	0	0	0	0	0	0
45- 7-S	1.5	15.5	-14	0.25	1.25	-1
45-12-T	0	0	0	0	0	0
45-12-S	10.5	18.4	-8	1.5	0.75	0.75
50- 5-T	10	0	0	0	0	0
50- 5-S	10	0	10	1	0	1
55- 5-T	1.33 1.5	0 2	7.33 -0.5	1.33 0.25	0 0.25	1.33 0
55- 5-S	5	0	5	1	0	1
65- 5-S	16	6.5	0.5	2.5	0.25	2.25
65-12-T	1.5	0	1.5	0	0	0
65-12-S	18.5	27.5	-9	2	0.75	1.75
H-T	0	0	0	0	0	0
H-S	20	3.5	16.5	2.75	0.5	2.25
H-H	12.5	1	11.5	0.5	0.25	0.25
Total	平 均 S. D. t	4.69 12.78 0.34	平 均 S. D. t	0.98 1.66 0.59		
錆のある ものにつ いて	平 均 S. D. t	6.13 14.4 0.43	平 均 S. D. t	1.28 1.81 0.71		

(かぶりはすべて1.2cm)

表-68に、養生条件が自然電極電位に及ぼす影響を示す。材令2か月では、養生条件による相違は明確ではないが、材令6, 9, 12か月では、標準養生のものが貴な値を示す傾向にある。

ヘ) 塩素含有量に及ぼす影響

表-69に、養生条件が塩素含有量に及ぼす影響を示す。当然のことではあるが、海水養生のものが標準養生したものに比較して含有量は多い。海水養生したものは水道水練りであってもコンクリート中の材令1年の塩素含有量は、海水練りコンクリートが練り混ぜ時に含む

表-65 養生条件が不動態のグレードに及ぼす影響

配 合 (記 号)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦
	N ①	S ②		N ③	S ④		N ⑤	S ⑥		N ⑦	S ⑧	
45-5-T	3	3	0	1	1	0	1	1	0	1.5	1.5	0
45-5-S	1	0	-1	1	1	0	1	1	0	1	0.75	-0.25
45-7-T	1	1	0	1	1	0	2	1	-1	1.25	1	-0.25
45-7-S	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0.75	0.625	-0.125
45-12-T	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1.455	1.33	-0.125
45-12-S	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.25	0.25	0
50-5-T	1	3	2	1	1	0	1	1	0	1	1.25	0.25
50-5-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
55-5-T	1 3	3 1	2 -2	1 1	2 1	1 0	1 1	3 1	2 0	1 1.38	2.33 1	1.23 -0.38
55-5-S	1	1	-1	1	1	0	1	1	0	1.29	1	-0.29
65-5-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65-12-T	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1.13	2.88	1.75
65-12-S	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0.25	0.25	0
H-T	3	2	-1	1	2	1	1	1	0	1.5	1.71	0.21
H-S	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
H-H	2	1	-1	1	1	0	1	1	0	1.13	1.17	0.04
平 均	1.29	1.29	0	0.88	1.12	0.235	1.06	1.235	0.176	1.05	1.18	0.127
S. D.	—	—	1.118	—	—	0.562	—	—	0.727	—	—	5.561
t	—	—	0	—	—	0.42	—	—	0.24	—	—	0.23

有量にほぼ等しい。また、海水練りコンクリートで標準養生したものは材令1年で、練り混ぜ時に混入した塩素の6割を抽出することができた。

ト) まとめ

コンクリート中鉄筋の腐食の有無については、明らかに海水養生したものが腐食を生じやすく、腐食面積、錆重量についても、海水養生したものがやや多いことが認められる。

ロ), ハ), ホ) より、材令2か月では、海水養生と標準養生の差は顕著ではないが、材令が長くなると、養生条件の差が明らかとなる傾向がある。また、(E<sub>rep</sub>-E<sub>corr</sub>)の養生条件による差も材令12か月で明らかとなる。この理由は、コンクリート中への海水の侵入と思われる。

バ) 練り混ぜ水の及ぼす影響

塩素として、水和反応の始まる以前より存在する塩素を考える。すなわち、海水練りの影響を水道水練りとの比較で考える。

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量に及ぼす影響

表-70 に、練り混ぜ水が鉄筋の腐食面積および錆重量に及ぼす影響を示す。

腐食の有無という観点からは、水道水練りで腐食が生じている場合、それに対応する海水練りには必ず腐食が生じており、海水練りのほうが明らかに腐食を生じやすい。腐食面積および錆重量に関しては、海水練りのほうが大きな傾向があるが、有意な差ではない。

ロ) 不動態のグレードに及ぼす影響

表-71 に、練り混ぜ水が不動態のグレードに及ぼす影響を示す。水道水練りのほうが高い値を示す傾向があ

表-66 養生条件が腐食電流密度および全腐食電流に及ぼす影響

(nA/cm<sup>2</sup>)

配 合 (記 号)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			全腐食電流 (F)		
	養生条件		①-②	養生条件		③-④	養生条件		⑤-⑥	養生条件		⑦-⑧
	N ①	S ②		N ③	S ④		N ⑤	S ⑥		N ⑦	S ⑧	
45-5-T	187	130	57	5400	—	—	2532	—	—	0.027	—	—
45-5-S	690	1736	-1046	2400	2600	-200	8859	3360	5499	0.037	0.025	0.012
45-7-T	2823	1597	1226	2412	3228	-816	2432	3498	-1066	0.024	0.028	-0.004
45-7-S	3061	3320	-259	2979	2720	259	2990	2977	13	0.028	0.028	0
45-12-T	5856	1780	4076	484	1800	-1316	1834	1871	-37	0.021	0.015	0.006
45-12-S	5856	1593	4263	2658	1780	878	2070	1041	1029	0.031	0.015	0.016
50-5-T	2213	659	1554	2776	2412	364	4112	2637	1475	0.025	0.022	0.003
50-5-S	2603	3320	-717	2312	3126	-814	2336	3200	-864	0.023	0.029	-0.006
55-5-T	2040	238	1802	5856	5400	456	3643	1833	1810	0.034	0.023	0.011
	103	2040	-1937	1225	2440	-1215	7073	3498	3575	0.024	0.025	0.001
55-5-S	514	971	-457	1448	1807	-359	6412	2564	3848	0.023	0.016	0.007
65-5-S	771	1549	-778	2213	1667	546	5287	2976	2311	0.025	0.021	0.004
65-12-T	4592	118	4474	4281	207	4074	4113	336	3777	0.037	0.004	0.033
65-12-S	6350	4234	2116	5240	4112	1128	5682	4834	848	0.051	0.042	0.009
H-T	74	437	-363	2603	907	1696	1691	960	731	0.014	0.008	0.006
H-S	2822	1475	1347	2823	7238	-4415	3728	1691	2037	0.029	0.035	-0.006
H-H	372	3061	-2689	2823	2823	0	2976	3498	-522	0.025	0.026	-0.001
平 均	2407	1662	745	2937	2767	17	3986	2548	1529	0.028	0.023	0.0056
S. D.	2152	1226	2128	1470	1701	1759	2043	1177	1899	0.008	0.010	0.0098
t	—	—	0.35	—	—	0.01	—	—	0.81	—	—	0.57

る。また、養生条件の影響とは異なり、練り混ぜ水の影響は材令とともに小さくなるようである。

また、この表より、海水練りでは、不動態のグレードの平均値は材令とともに、2か月(0.75)、6か月(1.0)、12か月(1.2)と大きくなる傾向があるのに対して、水道水練りのものはやや小さくなる傾向がある。

ハ) 腐食電流密度及び全電流密度に及ぼす影響

表-72 に練り混ぜ水が、腐食電流密度および全腐食電流に及ぼす影響を示す。海水練りのものが水道水練りのものを上回る傾向を示す。特に、材令2か月の標準養生のもので明らかである。しかし、材令6か月では、練り混ぜ水の影響はほとんど認められず、また、材令12か月ではふたたび練り混ぜ水の影響が表れるなど説明し難い点もある。後でも検討するが、腐食電流密度をコンクリ

ート中鉄筋の腐食の評価に適用するには問題があるように思われる。

ニ) 再不動態化電位 (E<sub>rep</sub>) および (E<sub>rep</sub>-E<sub>corr</sub>) に及ぼす影響

表-73 に、練り混ぜ水が E<sub>rep</sub> および (E<sub>rep</sub>-E<sub>corr</sub>) に及ぼす影響を示す。(E<sub>rep</sub>-E<sub>corr</sub>) について練り混ぜ水の影響がより明らかである。水道水練りのものが大きく、孔食となりにくいと判断される。

ホ) 自然電極電位に及ぼす影響

表-74 に、練り混ぜ水が自然電極電位に及ぼす影響を示す。水道水練りのものは、海水養生では卑の方向へ、標準養生では貴の方向へ向かう傾向にある。海水練りのものは、海水養生ではほとんど変化せず、また、標準養生では貴の方向へ向かう傾向にある。いずれも気中養生

大 即 信 明

表-67 養生条件が再不動態化電位および、再不動態化電位と自然電極電位の差に及ぼす影響 (mV)

配 合 号 (記 号)	E <sub>rep</sub>			E <sub>rep</sub> -E <sub>corr</sub>			配 合 号 (記 号)	E <sub>rep</sub>			E <sub>rep</sub> -E <sub>corr</sub>		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③		養生条件		②-①	養生条件		④-③
	N①	S②		N③	S④			N①	S②		N②	S④	
45-5-T	-540	211	751	212	449	237	55-5-S	-500	-255	245	332	603	271
45-5-S	-435	-280	155	189	604	415	65-5-S	-469	-243	226	193	654	461
45-7-T	-93	-269	-176	595	589	-6	65-12-N	-403	651	1054	199	793	594
45-7-S	-418	-258	160	306	600	294	65-12-S	-490	-196	294	174	546	372
45-12-S	-377	-305	72	437	549	112	H-T	-512	-93	419	442	361	81
50-5-T	-381	-180	201	561	544	-17	H-S	-454	-224	230	474	546	72
50-5-S	-240	-288	-48	158	434	276	H-H	-501	-64	437	461	706	245
55-5-T	-475 -376	601 -96	1076 280	413 122	759 732	346 610	平 均 S. D. t	-416.5 113.2	-80.5 304.0	336.0 351.2 0.96	329.3 154.9 —	591.8 118.9 —	262.6 206.8 1.27

表-68 養生条件が自然電極電位 (E<sub>corr</sub>) に及ぼす影響 (mV)

配 合 (記号)	材令2か月			材令6か月			材令9か月			材令12か月			平 均 値		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦	養生条件		⑩-⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
45-5-T	-244	-496	-252	-1005	-265	740	-812	-323	489	-813	-181	632	-710	-299	411
45-5-S	-752	-889	-137	-875	-875	0	-708	-893	-185	-769	-901	-132	-760	-893	-133
45-7-T	-958	-872	86	-578	-592	-14	-660	-362	298	-506	-574	-68	-648	-652	-4
45-7-S	-998	-905	93	-936	-868	68	-860	-840	20	-824	-859	-35	-910	-872	38
45-12-T	-995	-867	128	-598	-520	78	-594	-831	-237	-644	-806	-162	-684	-733	-49
45-12-S	-1008	-916	92	-920	-868	52	-902	-761	141	-814	-854	-40	-922	-872	50
50-5-T	-536	-595	-59	-568	-819	-251	-838	-803	35	-918	-784	134	-692	-799	-107
50-5-S	-969	-916	53	-841	-891	-50	-808	-847	-39	-750	-722	28	-855	-860	-5
55-5-T	-1018 -672	-176 -873	842 -201	-878 -936	-882 -857	-4 79	-908 -899	-97 -776	811 123	-890 -708	-190 -847	700 -139	-803 -793	-368 -823	435 -30
55-5-S	-769	-929	-160	-971	-858	113	-869	-843	26	-878	-693	185	-874	-863	11
65-5-S	-335	-856	-521	-570	-890	-320	-569	-880	-311	-738	-888	-150	-584	-887	-303
65-12-T	-852	-542	310	-968	-326	642	-925	-333	-592	-761	-142	619	-813	-369	444
65-12-S	-1046	-895	151	-974	-567	407	-970	-518	452	-818	-742	76	-964	-688	276
H-T	-84	-636	-552	-643	-658	-15	-630	-666	-36	-742	-706	36	-484	-614	-130
H-S	-972	-876	96	-908	-565	343	-782	-842	-60	-891	-867	24	-895	-810	85
H-H	-724	-855	-131	-730	-867	-137	-925	-736	189	-939	-740	199	-847	-756	91
平 均 S. D. t	-761 298	-770 209	-9.5 318.6 -0.03	-818 163	-716 208	101.8 283.5 0.36	-803 126	-666 248	135.8 305.5 0.44	-788 108	-676 255	112.2 279.7 0.40	-779 130	-715 195	63.5 212.7 0.30

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

表-69 養生条件が塩素含有量に及ぼす影響

配 合 (記 号)	塩素含有量 (%)					配 合 (記 号)	塩素含有量 (%)				
	養生条件		①-②	練り混 ぜ時③	②/③		養生条件		①-②	練り混 ぜ時③	②/③
	N ①	S ②					N ①	S ③			
45-5-T	0.21	(0)	0.21	0	—	55-5-S	0.51	0.17	0.34	0.268	0.634
45-5-S	0.45	0.11	0.34	0.265	0.415	65-5-T	0.38	(0)	0.38	0	—
50-5-T	0.23	(0)	0.23	0	—	65-5-S	0.46	0.21	0.25	0.269	0.781
50-5-S	0.26	0.12	0.14	0.266	0.451	平 均	0.345	0.076	0.269	—	0.570
55-5-T	0.26	(0)	0.26	0	—	S. D.	—	—	0.080	—	—
						t	—	—	3.36	—	—

注：( ) 内は理論値

表-70 練り混ぜ水の相違が鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

配 号 (記 号)	養 生 条 件	か ぶ り (cm)	腐 食 面 積 (mm <sup>2</sup> )			錆 の 重 量 (mgf)		
			練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ水		④-③
			T ①	S ②		T ③	S ④	
45-5	N	1.2	5.85	47	41.15	1	7	6
45-7	N	1.2	0	1.5	1.5	0	0.25	0.25
45-12	N	1.2	0	10.5	10.5	0	1.5	1.5
50-5	N	1.2	0	10	10	0	1	1
55-5	N	1.2	7.33	5	-2.33	1.33	1	-0.33
65-5	N	1.2	0	16	16	0	2.5	2.5
		3.3	0	12.5	12.5	0	3	3
65-12	N	1.2	1.5	18.5	17	0	2	2
H	N	1.2	0	20	20	0	2.75	2.75
小 計	平 均 S. D. t	—	1.63	15.67	14.04	0.26	2.23	2.07
		—	—	—	12.45	—	—	1.85
		—	—	—	1.13	—	—	1.12
45-5	S	1.2	0	3	3	0	0.5	0.5
		3.3	0	12	12	0	1.25	1.25
45-7	S	1.2	0	15.5	15.5	0	1.25	1.25
45-12	S	1.2	0	18.5	18.5	0	1	1
50-5	S	1.2	0	0	0	0	0	0
55-5	S	1.2	0	0	0	0	0	0
		3.3	2	4	2	0.25	0.5	0.25
			1.75	7.5	5.75	0.5	0.75	0.25
65-12	S	1.2	0	27.5	27.5	0	0.75	0.75
H	S	1.2	0	3.5	3.5	0	0.5	0.5
小 計	平 均 S. D. t	—	0.375	9.11	8.775	0.075	0.65	0.575
		—	—	—	9.225	—	—	0.472
		—	—	—	0.96	—	—	1.22
55-51	A	1.2	0	3.5	3.5	0	0.5	0.5
総 計	平 均 S. D. t	—	0.922	11.8	10.93	0.154	1.4	1.246
		—	—	—	10.73	—	—	1.464
		—	—	—	1.02	—	—	0.85



大 即 信 明

表-71 練り混ぜ水が不動態のグレイドに及ぼす影響

配 合 (記号)	養 生 条 件	かぶ り (cm)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水		
			T①	S②	①-②	T③	S④	③-④	T⑤	S⑥	⑤-⑥	T⑦	S⑧	⑦-⑧
45- 5	N	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.5	1	0.5
45- 7	N	1.2	1	0	1	1	1	0	2	1	1	1.25	0.75	0.5
45-12	N	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.455	0.25	1.205
50- 5	N	1.2	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
55- 5	N	1.2	1	2	-1	1	1	0	1	1	0	1	1.29	-0.29
65- 5	N	1.2	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1.29	1	0.29
		3.3	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1.38	0.88	0.5
65-12	N	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.13	0.25	0.88
H	N	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.5	1	0.5
小 計		平 均	1.67	0.78	0.89	1	0.78	0.22	1.11	1	0.11	1.28	0.82	0.45
		S. D. t	0.87 —	0.67 —	0.93 0.96	0 —	0.44 —	0.44 0.50	0.33 —	0.33 —	0.33 —	0.20 —	0.36 —	0.44 1.02
45- 5	S	1.2 3.3	3 3	0 0	3 3	1 1	1 1	0 0	1 1	1 1	0 0	1.5 1.38	0.75 0.75	0.75 0.63
45- 7	S	1.1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0.625	0.375
45-12	S	1.2	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1.33	0.25	1.08
50- 5	S	1.2	3	1	2	1	1	0	1	1	0	1.25	1	0.25
55- 5	S	1.2	3	1	2	2	1	1	3	1	2	2.33	1	1.33
		t	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
		3.3	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65-12	S	1.2	3	0	3	3	0	3	3	1	2	2.88	0.25	2.63
H	S	1.2	2	1	1	2	1	1	1	1	0	1.71	1	5.71
小 計		平 均	2.10	0.50	1.60	1.40	0.80	0.60	1.40	1	0.40	1.54	0.76	0.78
		S. D. t	0.99 —	0.53 —	1.10 1.37	0.70 —	0.42 —	0.97 0.62	0.84 —	0 —	0.84 0.48	0.62 —	0.30 —	0.73 1.00
55- 5	A	1.2	3	3	0	5	5	0	5	5	0	3.92	3.92	0
総 計		平 均	1.95	0.75	1.20	1.40	1.0	0.40	1.45	1.20	0.25	1.54	0.95	0.59
		S. D. t	0.94 —	0.79 —	1.11 1.08	4.99 —	1.03 —	0.75 0.53	1.05 —	0.89 —	0.64 0.39	0.73 —	0.77 —	0.64 0.92

では貴の方向である。

水道水練りのほうがより貴な値を示すが、その差は、標準養生では材令あまり変化せず約300mV、海水養生では材令2か月で約200mV、材令12か月で約150mVと標準養生に比較して差は小さくなる。

へ) 塩素含有量に及ぼす影響

表-75 に、練り混ぜ水が塩素含有量に及ぼす影響を示

す。当然ながら、海水練りのものが水道水練りのものを上回る。しかし、その差は練り混ぜ時に比較して少なくなっており、養生条件に関係なく6割弱となっている。

c) 練り混ぜ水および養生条件が鉄筋の腐食傾向に及ぼす影響

前述のごとく、海水練りおよび海水養生が、それぞれ水道水練りおよび標準養生に比較して腐食が多いことは

表-72 練り混ぜ水が腐食電流密度および全腐食電流に及ぼす影響

(nA/cm<sup>2</sup>)

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	材令2か月			材令6か月			材令12か月			全腐食電流 (F)		
			練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ水		④-③	練り混ぜ水		⑥-⑤	練り混ぜ水		⑧-⑦
			T①	S②		T③	S④		T⑤	S⑥		T⑦	S⑧	
45-5	N	1.2	187	690	503	5400	2400	-3000	2532	8856	6324	0.027	0.037	0.010
45-7	N	1.2	2823	3061	238	2412	2979	567	2432	2990	558	0.024	0.028	0.004
45-12	N	1.2	5856	5856	0	484	2658	2174	1834	2070	236	0.021	0.031	0.010
50-5	N	1.2	2213	2603	390	2776	2312	-464	4112	2336	-1776	0.025	0.023	-0.002
55-5	N	1.2	2040	514	-1526	5856	1448	-4408	3643	6412	2769	0.034	0.023	-0.011
65-5	N	1.2 3.3	210 194	771 1067	561 873	3320 5856	2213	-1107 -3643	5287 4257	5287 6158	0 1901	0.027 0.032	0.025 0.028	-0.002 -0.004
65-12	N	1.2	4592	6350	1758	4281	5240	959	4113	5682	1569	0.037	0.051	0.014
H	N	1.2	74	2822	2748	2603	2823	220	1691	3728	2037	0.014	0.029	0.015
小計		平均 S. D. t	2021 2115 —	2637 2197 —	616.1 1178 0.52	3665 1827 —	2698 1051 —	-967 2257 -0.43	3322 1244 —	4835 2232 —	1513 2258 0.67	0.027 0.007 —	0.031 0.008 —	0.0038 0.0090 0.42
45-5	S	1.2 3.3	130 181	1736 1476	1606 1295	—	—	—	—	—	—	—	—	—
45-7	S	1.2	1597	3320	1723	3228	2720	-508	3498	2977	-521	0.028	0.028	0
45-12	S	1.2	1780	1593	-187	1800	1780	-20	1871	1041	-830	0.015	0.015	0
50-5	S	1.2	659	3320	2661	2412	3126	714	2637	3200	563	0.022	0.029	0.007
55-5	S	1.2 3.3	238 2040 2400	971 2364 3904	733 324 1504	5400 2440 2068	1807 2400 3200	-3593 -40 1132	1833 3498 2745	2564 3793 4112	731 295 1367	0.023 0.025 0.022	0.016 0.026 0.030	-0.007 0.001 0.008
65-12	S	1.2	118	4234	4116	207	4112	3905	336	4834	4498	0.004	0.042	0.038
H	S	1.2	437	1475	1038	907	7238	6331	960	1691	731	0.008	0.035	0.027
小計		平均 S. D. t	958 895 —	2439 1162 —	1481 1217 1.22	2308 1564 —	3298 1769 —	990 2987 0.33	2172 1141 —	3027 1254 —	852 1634 0.52	0.018 0.009 —	0.028 0.009 —	0.009 0.015 0.60
55-5	A	1.2	90	182	92	248	110	-138	350	400	50	0.002	0.005	0.003
総計		平均 S. D. t	1393 1624 —	2415 1720 —	1023 1233 0.83	2872 1862 —	2821 1534 —	-51 2650 -0.02	3097 2148 —	3785 2126 —	1139 1919 0.59	0.022 0.010 —	0.028 0.010 —	0.006 0.012 0.50

明らかである。また、表-70より練り混ぜ水および養生条件の影響を個別に抜き出すと表-76のごとくである。すなわち、材令1年では、海水練り海水養生、海水練り標準養生、水道水練り海水養生、水道水練り標準養生の順で腐食が多い。

次に、不動態のグレイドおよび自然電極電位に対する海水練りの影響の経時変化を考える。表-71より、練り

混ぜ水による不動態のグレイドの経時変化に及ぼす影響を抽出すると表-77のごとくである。これより、練り混ぜ水の影響は徐々に小さくなることが認められる。特に、海水養生ではその傾向が顕著である。この理由として標準養生では、練り混ぜ時の塩素の一部が固定化されることが考えられる。これに対して、海水養生では、この影響に加えて、外部からの塩素の侵入がある。いずれ

表-73 練り混ぜ水が再不動態化電位および再不動態化電位と自然電極電位の差に及ぼす影響 (mV)

配 合 (記号)	養 生 条 件	かぶ り (cm)	E <sub>rep</sub>			E <sub>rep</sub> -E <sub>corr</sub>		
			練り混ぜ水		①-②	練り混ぜ水		③-④
			T ①	S ②		T ③	S ④	
45-5	N	1.2	-540	-435	-105	212	189	23
45-7	N	1.2	-93	-418	325	595	306	289
50-5	N	1.2	-381	-240	-141	561	158	403
55-5	N	1.2	-475	-500	25	413	332	81
65-5	N	1.2	-472	-469	-3	330	193	137
		3.3	-513	-532	19	431	234	197
65-12	N	1.2	-403	-490	87	199	174	25
H	N	1.2	-512	-454	-58	442	474	-32
小 計		平 均	-424	-442	18.6	398	258	140
		S. D.	144	89	144.3	145	108	149
		t	—	—	0.13	—	—	0.94
45-7	S	1.2	-269	-258	-11	589	600	-11
45-12	S	1.2	-116	-305	189	706	549	157
50-5	S	1.2	-180	-288	108	544	434	110
55-5	S	1.2	601	-255	856	759	603	156
		3.3	-96	-303	207	732	595	137
			-165	-254	89	719	612	107
65-12	S	1.2	651	-196	847	793	546	247
H	S	1.2	-93	-224	131	361	546	-185
小 計		平 均	42	-260	302	650	561	90
		S. D.	365	38	346	144	58	142
		t	—	—	0.87	—	—	0.72
55-5	A	1.2	538	470	68	628	500	128
総 計		平 均	-148	-303	155	530	414	122
		S. D.	391	228	286	187	173	137
		t	—	—	0.54	—	—	0.89

の影響も練り混ぜ時に含まれる塩素の影響を打ち消す方向に働くと考えられる。

また、表-78 に、不動態のグレイドの経時変化に及ぼす養生条件の影響を示すが、徐々に影響が大きくなることが認められる。すなわち、平均的には、材令1か月で、練り混ぜ水による不動態のグレイドの差は1.2、養生条件による差は0であったものが、材令1年ではおのおの0.25および0.18となっている。

次に、自然電極電位の経時変化を考える。表-79 に練り混ぜ水が電位の経時変化に及ぼす影響を示す。これより、練り混ぜ水の影響は、特に海水養生において顕著に

低下していることが認められる。また、表-80 に、養生条件が電位の経時変化に及ぼす影響を示す。これより、養生条件の影響は、特に水道水練りのもので顕著に増加していることが認められる。

以上述べた事項を 図-42 および 図-43 に示す。

ここまでの結論として、海水養生では、海水練りと水道水練りコンクリート中の鉄筋の腐食に関する多くの特性は養生期間が長くなるとそれらの差は小さくなると言えよう。

さらに、(E<sub>rep</sub>-E<sub>corr</sub>) について言えば、材令1年では、練り混ぜ水による差が平均約120mV であるの対

表-74 練り混ぜ水が自然電極電位 ( $E_{corr}$ ) に及ぼす影響

(mV)

配合 (記号)	養生 条件	かぶり (cm)	材令2か月			材令6か月			材令9か月			材令12か月			平均値		
			練り混ぜ水		①-	練り混ぜ水		③-	練り混ぜ水		⑤-	練り混ぜ水		⑦-	練り混ぜ水		⑨-
			T①	S②	②	T③	S④	④	T⑤	S⑥	⑥	T⑦	S⑧	⑧	T⑨	S⑩	⑩
45-5	N	1.2	-244	-752	508	-1005	-875	-130	-812	-708	-104	-813	-769	-44	-710	-760	50
45-7	N	1.2	-958	-998	40	-578	-936	358	-660	-860	200	-506	-824	318	-648	-910	262
45-12	N	1.2	-995	-1008	13	-598	-920	322	-594	-902	308	-644	-814	170	-684	-922	238
50-5	N	1.2	-536	-969	433	-568	-841	273	-838	-808	-30	-918	-750	-168	-692	-855	163
55-5	N	1.2	-1018	-769	-249	-878	-971	93	-908	-869	-39	-890	-878	-12	-803	-874	71
65-5	N	1.2	-639	-335	-304	-1045	-570	-475	-684	-569	-115	-904	-738	-166	-737	-584	-153
		3.3	-327	-661	334	-607	-599	-8	-565	-765	200	-717	-768	51	-545	-699	154
65-12	N	1.2	-852	-1046	194	-968	-974	6	-925	-970	45	-761	-818	57	-813	-964	151
H	N	1.2	-84	-972	888	-643	-908	265	-630	-782	152	-742	-891	149	-484	-895	411
小計		平均	-628	-834	206	-766	-844	78	-735	-804	69	-766	-806	39	-680	-829	150
		S.D. t	352	232	380	204	153	268	137	118	152	135	54	159	109	124	157
			—	—	0.54	—	—	0.29	—	—	0.45	—	—	0.25	—	—	0.96
45-5	S	1.2	-496	-889	393	-265	-875	610	-323	-893	570	-181	-901	720	-299	-893	594
		3.3	-57	-904	847	-68	-773	705	-65	-750	685	-82	-879	797	-85	-841	756
45-7	S	1.2	-872	-905	33	-592	-868	276	-362	-840	478	-574	-859	285	-652	-872	220
45-12	S	1.2	-867	-916	49	-520	-868	348	-831	-761	-70	-806	-854	48	-733	-872	139
50-5	S	1.2	-595	-916	321	-819	-891	72	-803	-847	44	-784	-722	-62	-799	-860	61
55-5	S	1.2	-176	-929	753	-882	-858	-24	-97	-843	746	-190	-693	503	-368	-863	495
		3.3	-873	-884	11	-857	-757	-100	-776	-839	63	-847	-799	-48	-823	-821	-2
			-879	-912	33	-871	-923	52	-830	-868	38	-862	-858	-4	-754	-897	143
65-12	S	1.2	-542	-895	353	-326	-567	241	-333	-518	185	-142	-742	600	-369	688	319
H	S	1.2	-636	-876	240	-658	-565	-93	-666	-842	176	-706	-867	161	-614	-810	196
小計		平均	-599	-903	303	-586	-795	209	-509	-800	292	-517	-817	300	-550	-842	292
		S.D. t	296	16	300	288	131	282	306	108	299	329	73	330	252	61	247
			—	—	1.01	—	—	0.74	—	—	0.98	—	—	0.91	—	—	1.18
55-5	A	1.2	-118	-95	-23	-47	-10	-37	-19	+48	-67	+46	+22	+24	-61	-122	61
総計		平均	-588	-832	243	-640	-777	138	-586	-759	173	-601	-770	169	-584	-800	216
		S.D. t	325	232	331	290	226	272	288	218	260	312	196	284	233	184	214
			—	—	0.73	—	—	0.51	—	0.77	0.67	—	—	0.60	—	—	1.01

して、養生条件による差は平均約 260mV である。これは、孔食に関係すると思われる ( $E_{rep}-E_{corr}$ ) については、養生条件の影響が練り混ぜ水の影響を上回ることを示す。

d) 結論

海水養生 (3.6% NaCl 溶液中) および標準養生 (恒温恒湿室内) したコンクリート中鉄筋の腐食について次のような結論を得た。

イ) 海水練りと水道水練りコンクリート中鉄筋の種類の腐食に関する特性 (以後腐食傾向と称する) の差は、材令1か月ではかなり大きい、材令とともに減少していく傾向にある。この傾向は、特に、海水養生において顕著である。この理由として、コンクリート中での可溶性塩素の固定と海水からの塩素の侵入という2つの要因が考えられる。

表-75 練り混ぜ水が塩素含有量に及ぼす影響

配合 (記号)	養生 条件	塩素含有量(%)				差の 残存率 (②-①) /③
		練り混ぜ水		練り混ぜ時の 差 ③	②-①	
		T①	S②			
44-5	N	0.21	0.45	0.23	0.265	0.87
50-5	N	0.23	0.26	0.03	0.266	0.11
55-5	N	0.26	0.51	0.25	0.268	0.93
65-5	N	0.38	0.46	0.08	0.269	0.30
平均(小計)		0.27	0.42	0.15	0.267	0.56
45-5	S	(0)	0.11	0.11	0.265	0.42
50-5	S	(0)	0.12	0.12	0.266	0.45
55-5	S	(0)	0.17	0.17	0.268	0.63
65-5	S	(0)	0.21	0.21	0.269	0.78
平均(小計)		(0)	0.15	0.15	0.267	0.57
総 計		平均 S. D. t		0.15 0.078 1.92		0.56 0.29 1.93

注：(0)は使用材料中に塩素の含まれないことを示す。

表-76 腐食に及ぼす練り混ぜ水および養生条件の影響

腐食面積の平均値 (mm<sup>2</sup>)

練り混ぜ水 養生条件	T	S
	水道水	海水
N	1.63③	15.67①
S	0.375④	9.15②

錆の重量の平均値

練り混ぜ水 養生条件	T	S
	水道水	海水
N	0.26 ③	2.33①
S	0.075④	0.55②

腐食発生の割合

練り混ぜ水 養生条件	T	S
	水道水	海水
N	37(7/19)③	95(18/19)①
S	10(2/20)④	68(15/22)②

注：( )内は本数 ○内は順位

表-77 不動態のグレイドの経時変化に及ぼす練り混ぜ水の影響

養生条件	練り混ぜ水	材 令				
		1か月	2か月	4か月	6か月	12か月
N	T ①	1.77	1.67	1.375	1.0	1.11
	S ②	0.56	0.78	0.875	0.78	1.0
	①-②	1.22 (1.09)	0.89 (0.96)	0.5 (1.20)	0.22 (0.50)	0.11 (0.33)
S	T ③	1.80	2.0	1.40	1.40	1.40
	S ④	0.50	0.50	0.80	0.80	1.0
	③-④	1.30 (1.06)	1.60 (1.37)	0.60 (1.26)	0.60 (0.62)	0.40 (0.48)
Total	T ⑤	1.79	1.95	1.38	1.40	1.45
	S ⑥	0.53	0.75	0.83	1.0	1.20
	⑤-⑥	1.26 (1.05)	1.20 (1.08)	0.55 (0.51)	0.40 (0.53)	0.25 (0.39)

以下は、1か月での値からの減少量

N	①-②	0	0.33	0.72	1.0	1.11
S	③-④	0	-0.30	0.70	0.70	0.0
Total	⑤-⑥	0	0.06	0.71	0.86	1.01

1か月での値との比率

N	①-②	1.0	0.73	0.41	0.10	0.09
S	③-④	1.0	1.23	0.46	0.46	0.31
Total	⑤-⑥	1.0	0.95	0.44	0.32	0.20

( )内はt値

表-78 不動態のグレイドの経時変化に及ぼす養生条件の影響

練り混ぜ水	養生条件	材 令				
		1か月	2か月	4か月	6か月	12か月
T	N ①	1.75	1.75	1.25	1.0	1.125
	S ②	1.88	2.13	1.50	1.50	1.50
	②-①	0.125 (0.15)	0.375 (0.25)	0.25 (0.35)	0.50 (0.66)	0.375 (0.35)
S	N ③	0.625	0.75	0.875	0.85	1.0
	S ④	0.50	0.5	0.75	0.75	1.0
	④-③	-0.125 (0.35)	-0.25 (0.54)	-0.125 (0.35)	0 (-)	0 (-)
Total	N ⑤	1.19	1.25	1.06	0.875	1.06
	S ⑥	1.19	1.31	1.125	1.125	1.25
	⑥-⑤	0 (6)	0.06 (0.05)	0.06 (0.03)	0.25 (0.43)	0.19 (0.25)

以下は、1か月での差を0と仮定した場合

T	②-①	0	0.25	0.125	0.375	0.25
S	④-③	0	0.125	0	0.125	0.125

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

表-79 自然電極電位 ( $E_{corr}$ ) の経時変化に及ぼす練り混ぜ水の影響

(mV)

養生条件	練り混ぜ水	材 令					
		1 か月	2 か月	4 か月	6 か月	9 か月	12 か月
N	T ①	-504	-628	-627	-766	-735	-766
	S ②	-878	-834	-826	-844	-804	-806
	① - ②	374 (1.41)	206 (0.54)	199 (0.69)	78 (0.29)	69 (0.45)	39 (0.25)
S	T ③	-543	-599	-623	-586	-509	-517
	S ④	-913	-903	-882	-795	-800	-817
	③ - ④	370 (1.04)	303 (1.01)	259 (0.92)	209 (1.74)	292 (0.98)	300 (0.91)
Total	T ⑤	-524	-613	-625	-671	-616	-635
	S ⑥	-896	-870	-856	-818	-802	-812
	⑤ - ⑥	372 (1.21)	257 (0.77)	231 (0.82)	147 (0.53)	186 (0.72)	177 (0.61)

以下は、1か月での値との比率

N	① - ②	1.0	0.55	0.53	0.21	0.18	0.10
S	③ - ④	1.0	0.82	0.70	0.56	0.79	0.81
Total	⑤ - ⑥	1.0	0.69	0.62	0.40	0.50	0.48

1か月での値を0とした場合

N	① - ②	0	-168	-175	-296	-305	-335
S	③ - ④	0	-67	-111	-161	-78	-70
Total	⑤ - ⑥	0	-115	-141	-225	-186	-195

表-80 自然電極電位 ( $E_{corr}$ ) の経時変化に及ぼす養生条件の影響

(mV)

練り混ぜ水	養生条件	材 令					
		1 か月	2 か月	4 か月	6 か月	9 か月	12 か月
T	N ①	-475	-670	-671	-772	-783	-748
	S ②	-551	-632	-654	-615	-524	-529
	② - ①	-76 (0.39)	38 (0.09)	17 (0.05)	157 (0.45)	259 (0.73)	219 (0.59)
S	N ③	-876	-856	-860	-875	-809	-811
	S ④	-908	-899	-889	-798	-803	-816
	④ - ③	-32 (0.38)	-43 (0.19)	-29 (0.13)	77 (0.34)	-6 (0.02)	-5 (0.05)
Total	N ⑤	-675	-762	-766	-824	-796	-780
	S ⑥	-729	-766	-772	-707	-664	-673
	⑥ - ⑤	-54 (0.37)	-2.6 (0)	-6.3 (0.01)	117 (0.41)	132 (0.42)	107 (0.37)

以下は、1か月での差を0とした場合

T	② - ①	0	114	93	233	335	295
S	④ - ③	0	-9	3	109	38	27
Total	⑥ - ⑤	0	51	48	171	186	161

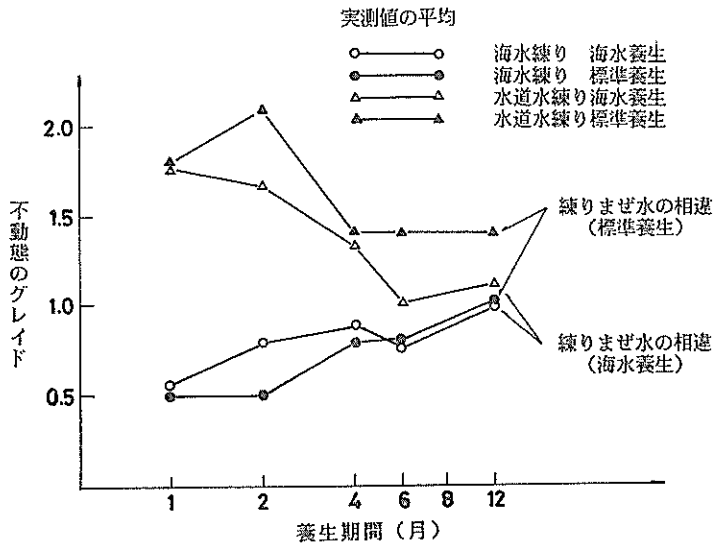
注：( ) 内は t 値

ロ) 海水養生と標準養生の差は、水道水練りコンクリート中鉄筋の腐食傾向に影響を及ぼす。しかし、材令1年では、練り混ぜ水の影響より小さい。

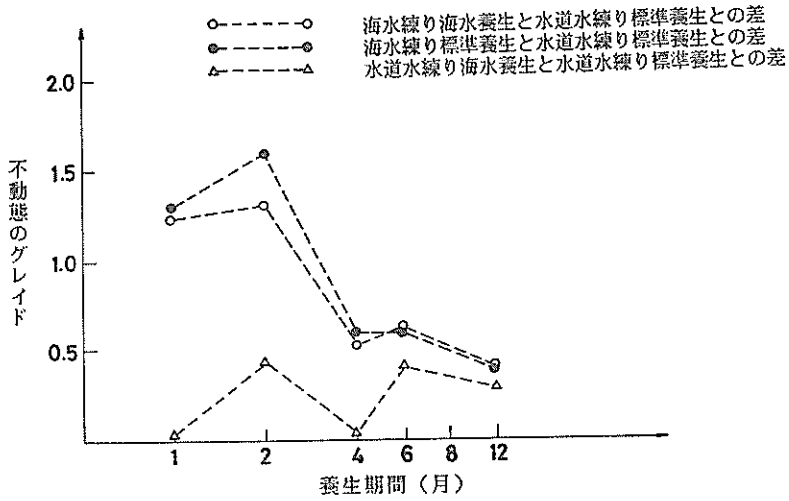
コンクリート中鉄筋のものが最も多く、次いで、海水練りかつ標準養生、水道水練りかつ海水養生、水道水練りかつ標準養生の順であった。

ハ) 材令1年での腐食量は、海水練りかつ海水養生の

ニ) 材令1年で標準養生コンクリート中に残存する



(a)



(b)

図-42 練り混ぜ水および養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響

可溶性塩素量は、練り混ぜ時の塩素量の6割弱であった。

(2) シリーズ2について(ひびわれなしかつモルタル中)

a) 水セメント比の影響

水セメント比の不動態のグレイドに及ぼす影響を、表-34より整理して図-44に示す。水セメント比が小さい

ほど不動態のグレイドは高い値を示す傾向にある。

練り混ぜ水との関連で言えば、たとえ海水練りであっても水セメント比が小さいものは、水道水練りである水セメント比が大きなものよりも腐食しにくいと判断される。例えば、この図からは、水セメント比60%水道水練りの不動態のグレイドの平均値は約0.47であり、水セ

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

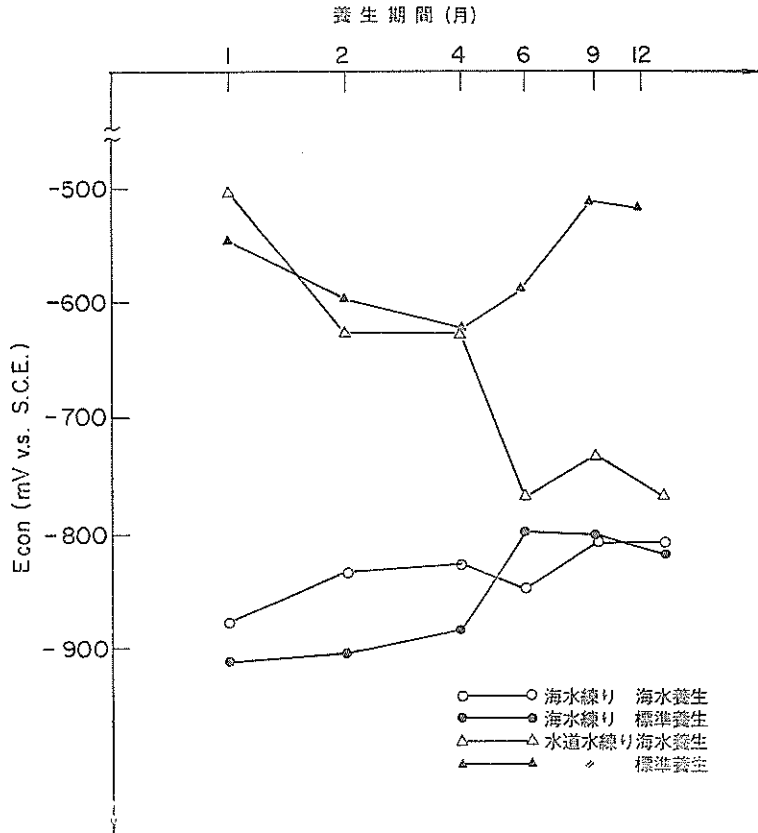


図-43 練り混ぜ水および養生条件が自然電極電位に及ぼす影響

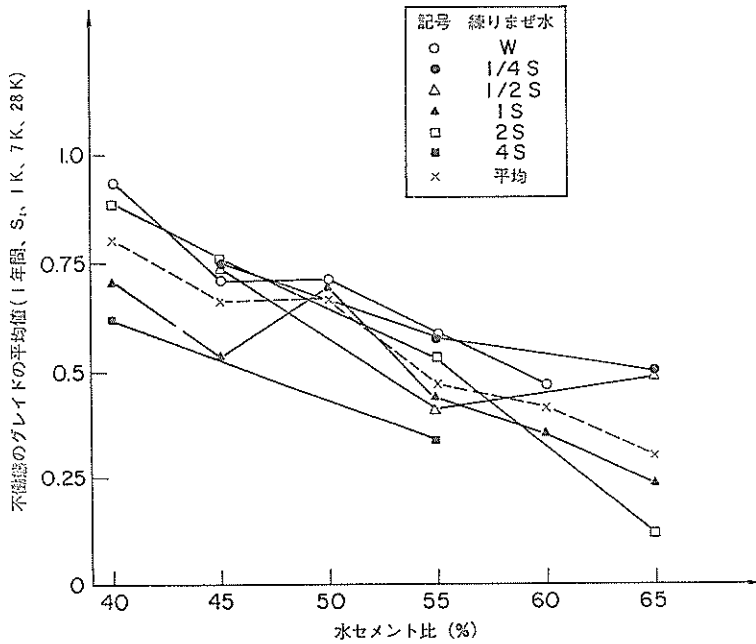


図-44 不動態のグレイドに及ぼす水セメント比の影響



メント比 45%，50%の海水練りでは、おのおの約 0.53 および 0.70 であった。

また、表-35 を、概念的に図化したものを 図-45 に示す。これから、海水養生においては、不動態がなくなるまでの期間を長くしようとすれば、水セメント比あるいは塩素含有量を小さくするからである。さらに、塩素含有量の影響を水セメント比を小さくすることによって打ち消すことも可能であることを示す。

塩素含有量に及ぼす影響は、水セメント比40%のものがやや少ないことが認められた。

b) 練り混ぜ水中の塩素量の影響

不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ水中の塩素量の影響の経時変化を表-81 に示す。この塩素量の影響は、標準養生で遅くとも 180 日で、海水養生のもので 1 年でなくなるということが認められた。

また、1 年間の不動態のグレイドの平均値に及ぼす練り混ぜ水中に含まれる塩素量の影響を 図-46、図-47、図-48 に示す。図-46 は、標準養生 (St) におけるものを水セメント比ごとに示したものである。塩素量が多いほど不動態のグレイドは小さくなる傾向がある。特に、水セメント比 65% のものでその傾向が顕著である。図-47 は海水養生 (1K, 7K, 28K の平均) のものを水セメント比ごとに示したものである。図-48 は、不動態のグレイドを養生条件ごとに示したものである。塩素量の多

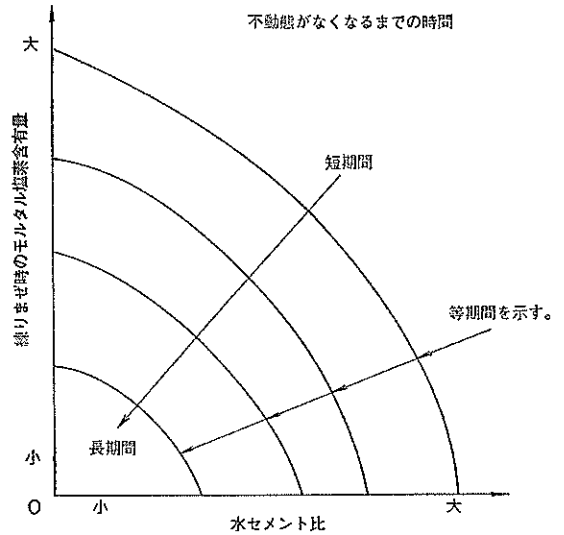


図-45 不動態がなくなるまでの期間に及ぼす水セメント比と練り混ぜ時塩素量の影響

いほどグレイドは小さい傾向にあるが、塩素の影響よりも、養生条件の影響のほうが顕著である。

c) 養生条件の影響

図-49 に、不動態のグレイドの経時変化に及ぼす養生条件の影響を示す。標準養生では、材令とともにやや増

表-81 不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響の経時変化

養生条件 材令(日) 練り混ぜ水 W/C	St					1 K					7 K			28K			1 K, 7 K, 28K の平均 (Ⓚ)			Stで差の なくなる 材令	Ⓚで差の なくなる 材令		
	7	28	91	180	365	7	28	91	180	365	28	91	180	365	91	180	365						
	40 W① S② ①-②	1	2	1	1	1	1	1	1	0	0	1	2	1	0	0	2	1	0			1.67	0.67
45 W③ S④ ③-④	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0.67	0	0	180	180
50 W⑤ S⑥ ⑤-⑥	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0.33	0	7	91
55 W⑦ S⑧ ⑦-⑧	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0.4	0	0	91	180
60 W⑨ S⑩ ⑨-⑩	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	91

注：W：水道水  
S：海水 (1/4S, 1/2S, 1S, 2S, 4S の平均)  
Ⓚ：1K, 7K, 28K の平均

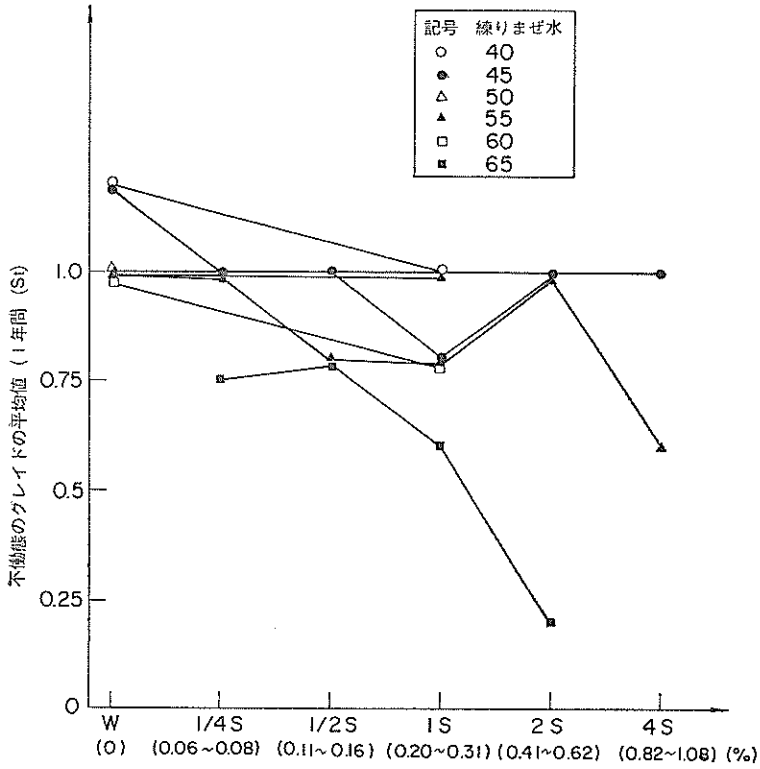


図-46 不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響 (St 標準養生)

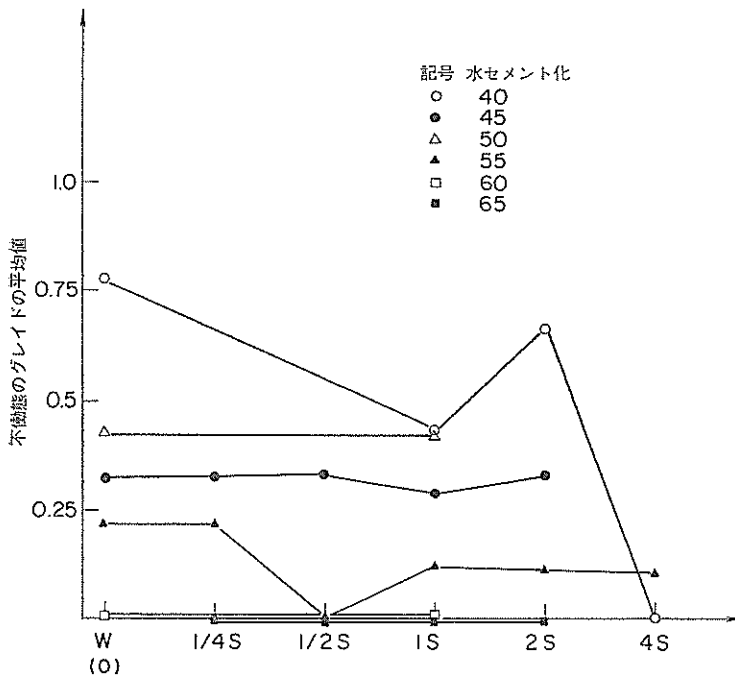


図-47 不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響 (不動態のグレイドは1K, 7K, 28K, かつ91, 180, 365日の平均)

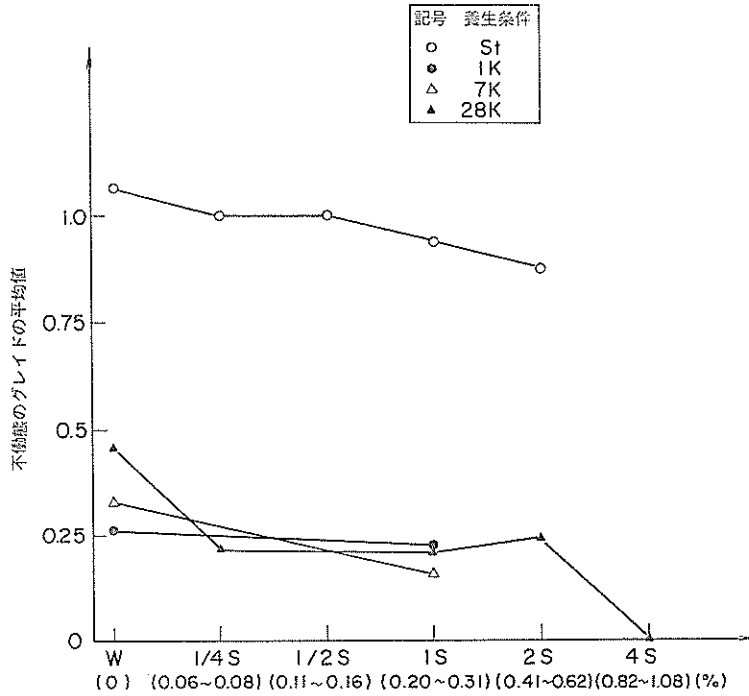


図-48 不動態のグレードに及ぼす練り混ぜ時の塩素量の影響  
(91日, 180日, 1年の平均値)

加あるいは変化しないと判断される。海水養生では、材令とともに急激に小さくなり、材令1年では、すべてのグレードが0となることが認められる。

また、この図より、材令180日までは、水道水練りのものが海水練りのものより高いグレードを示すことが認められる。

以上より、養生条件にかかわらず、材令1年で、練り混ぜ水中の塩素の影響は、不動態のグレードに関する限りなくなる。

d) 不動態の有無と溶存塩素量との関係

表-34および36を用いて、表-82に不動態の有無と塩素量との関係を示す。この表では、グレード0を不動態がないとみなした。

当然ではあるが、溶存塩素量の多いほど不動態はなく、少ないほど不動態はある傾向にある。さらに、本表より、80%以上の率で不動態があると判断される塩素量は、0.15%以下である。また、0.2%以上では、不動態のある率は急激に低下し、50%以下となる。

さらに、ここで不動態がないと判断される塩素量で最低の値は0.05%であった。

また、通常のコンクリート中のモルタル量を1500 kgf

/m<sup>3</sup>と仮定すると、0.15%、0.05%の塩素量はおのおのコンクリート1m<sup>3</sup>中2.25 kgおよび0.75 kgに相当する。

e) 腐食度に及ぼす影響

図-50に鉄筋の腐食度に及ぼす水セメント比、練り混ぜ水および養生条件の影響を示す。

図より、最も大きな影響を及ぼすのは養生条件と認められる。練り混ぜ水については、4Sが標準養生において大きな影響を示すが、その他の影響は小さい。水セメント比の影響も明らかでない。

f) 結 論

かぶり1.5 cmのモルタル供試体を標準養生あるいは海水養生して、不動態のグレードの判定、溶存塩素量の測定および腐食度の判定を行った。本実験の範囲で次のことが言える。

イ) 水セメント比が小さいほど、不動態のグレードは高い。また、練り混ぜ水に含まれる塩素の影響を、水セメント比を小さくすることによって打ち消すことも可能である。しかし、材令1年では養生条件の影響が卓越し、水セメント比が不動態に与える影響はなくなる。

ロ) 練り混ぜ水に含まれる塩素量が多いほど、不動態のグレードは小さい傾向にある。しかし、材令1年では、

記号	養生条件	線	練り混ぜ水
○	S†	——	W
●	1K	- - - -	IS
△	7K	——	IS
▲	28K	——	IS

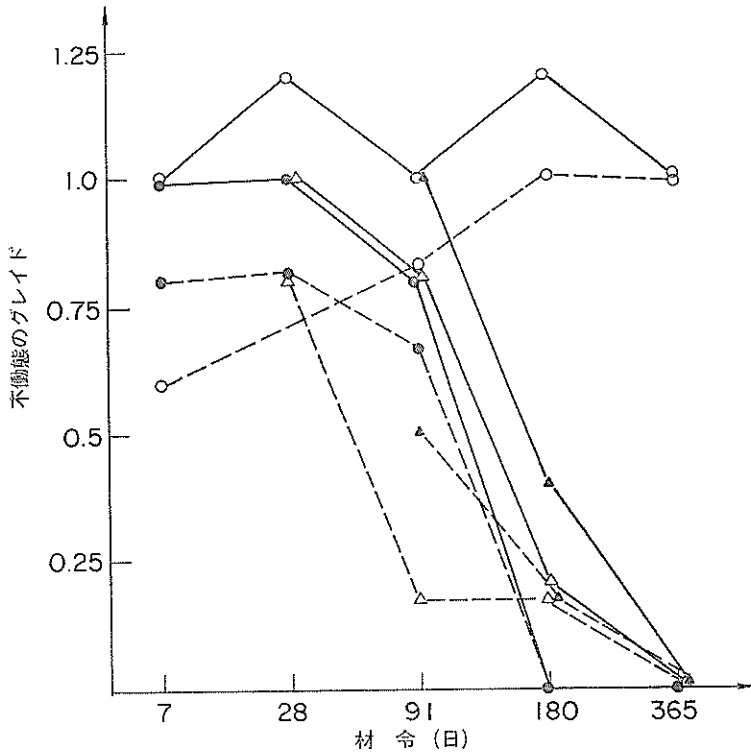


図-49 不動態のグレイドの経年変化に及ぼす養生条件の影響

養生条件の影響が卓越し、練り混ぜ水中の塩素量の影響はなくなる。

ハ) 養生条件の不動態のグレイドに及ぼす影響は、材令とともに卓越してくる。材令1年では、標準養生したもののグレイドはすべて1となり、海水養生したもののグレイドはすべて0となった。不動態の有無を決定するのは養生条件と判断される。

ニ) モルタル中の溶存塩素量が少ないほど、不動態の存在する率は高い。0.15%以下では、不動態は80%以上の率で存在する。

ホ) モルタルでは、材令1年において練り混ぜ時に含まれる塩素量の40%弱しか溶存塩素として測定できなかった。

ヘ) モルタル中铁筋の不動態のグレイドと鉄筋の腐食

度はかなりの相関関係が認められた。

ト) かぶり小さい場合、練り混ぜ時に含まれる塩素量にかかわらず、比較的短期間に養生条件によって不動態の有無が決定された。それゆえ、練り混ぜ水中の塩素量のみを規制しても効果は少ない。

(3) シリーズ3について(長期暴露試験)

ア) 練り混ぜ水の影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響

腐食の有無および腐食面積率に及ぼす練り混ぜ水の影響を、表-83および表-84に示す。

腐食発生割合は明らかに海水練りのほうが多い。また、腐食面積率については、一部のものを除いて、海水練りのもののほうが多い傾向にある。

カ) 自然電極電位の経年変化に及ぼす影響

表-82 不動態の有無と塩素量

		塩素量 (V. S. モルタル%) の区間									合 計
		≤0.075	0.075 < ≤0.125 (0.10)	0.125 < ≤0.175 (0.15)	0.175 < ≤0.225 (0.20)	0.225 < ≤0.275 (0.25)	0.275 < ≤0.325 (0.30)	0.325 < ≤0.375 (0.35)	0.375 < ≤0.425 (0.40)	0.425 <	
不動態があると判断される場合	塩分計による	44 (51.2%)	14 (16.3%)	15 (17.4%)	5 (5.8%)	3 (3.5%)	3 (3.5%)	0 (0%)	1 (1.2%)	1 (1.2%)	86
	セメ協による	11 (44.0%)	5 (20.0%)	2 (8.0%)	0 (0%)	1 (4.0%)	2 (8.0%)	2 (8.0%)	0 (0%)	2 (8.0%)	25
	合 計 (%) A	55 (49.5%)	19 (17.1%)	17 (15.3%)	5 (4.5%)	4 (3.6%)	5 (4.5%)	2 (1.8%)	1 (0.9%)	3 (2.7%)	111
不動態がないと判断される場合	塩分計による	3 (4.8%)	4 (6.3%)	2 (3.2%)	6 (9.5%)	5 (7.9%)	5 (7.9%)	2 (3.2%)	4 (6.3%)	32 (50.8%)	63
	セメ協による	0 —	0 —	2 (3.6%)	0 —	0 —	0 —	1 (1.8%)	0 —	53 (94.6%)	56
	合 計 (%) B	3 (2.5%)	4 (3.4%)	4 (3.4%)	6 (5.0%)	5 (4.2%)	5 (4.2%)	3 (2.5%)	4 (3.4%)	85 (71.4%)	119
不動態がある確率	A/A+B	0.95	0.83	0.82	0.47	0.46	0.52	0.42	0.21	0.04	

(注：不動態がないと判断されるもので最低の塩素量 0.05%)

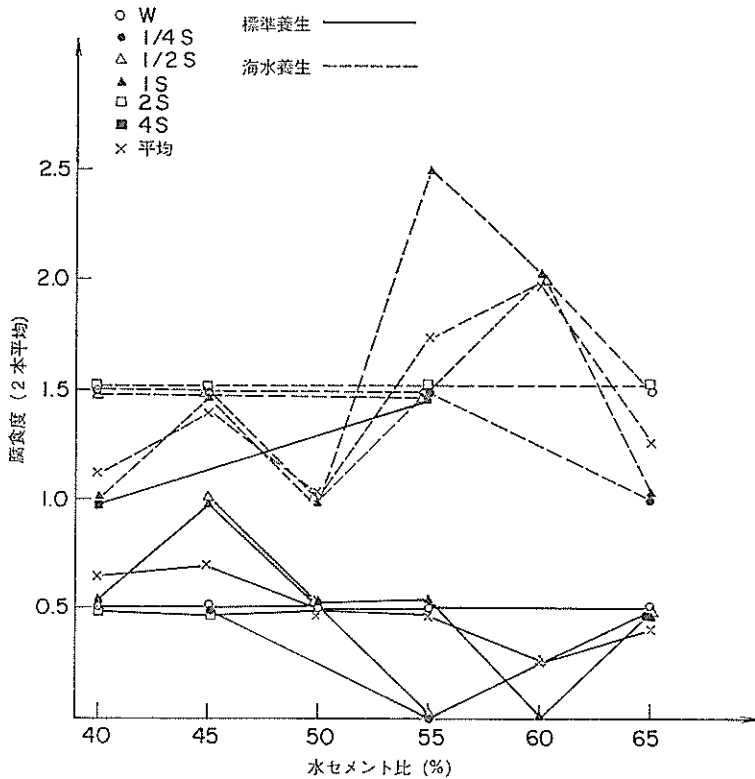


図-50 鉄筋の腐食度に及ぼす水セメント比、練り混ぜ水および養生条件の影響

表-83 腐食の有無に及ぼす練り混ぜ水の影響 (%)

セメントの種類	練り混ぜ水		平均
	水道水	海水	
普通ポルトランドセメント	33.3 (4/12)	27.8 (5/18)	30.1
早強ポルトランドセメント	0 (0/6)	33.3 (3/9)	16.7
中庸熟ポルトランドセメント	0 (0/9)	44.4 (4/9)	22.2
B種高炉セメント	11.1 (1/9)	11.1 (2/18)	11.1
アルミナセメント	33.3 (2/6)	100 (9/9)	66.7
平均 (アルミナを除く)	11.1	29.2	

注：腐食発生率 (%) ( / ) は (腐食している本数 / 全体の本数) の意味

表-84 腐食面積率に及ぼす練り混ぜ水の影響 (%)

セメントの種類	練り混ぜ水	
	水道水	海水
普通ポルトランドセメント	0.73	0.07
早強ポルトランドセメント	0	1.20
中庸熟ポルトランドセメント	0	0.43
B種高炉セメント	0.03	0.02
アルミナセメント	0.05	1.57
平均 (アルミナを除く)	0.19	0.43

注：腐食面積率の平均値 (%)

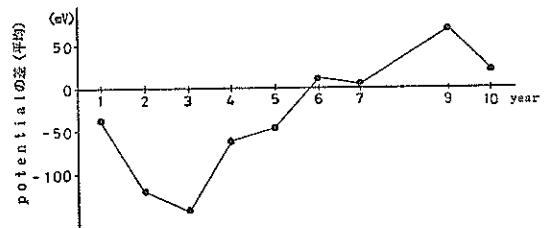


図-51 練り混ぜ水による自然電極電位の相違の経年変化

表-85 練り混ぜ水による自然電極電位の相違の経年変化

(海水練りの自然電極電位 - 水道水練りの自然電極電位) (mV)

セメントの種類	経過年数										平均
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
NO	-40	-49	-221	-122	-32	-30	27	—	73	27	-41
N2	-260	-556	-392	-211	-235	-141	-31	—	-44	-33	-211
HO	-67	-171	-172	-208	-132	133	-38	—	240	114	-33
MO	-132	-180	-190	-172	-91	-31	25	—	14	47	-79
BO	123	183	50	226	58	157	55	—	58	-18	99
B2	144	-90	-107	63	151	108	47	—	-16	42	38
AL	-8	36	87	-1	-25	-113	-64	—	161	-13	7
平均	-34	-118	-135	-61	-44	12	3	—	69	24	-31

表-86 練り混ぜ水が材令10年の  
不動態のグレイドに及ぼす影響

セメントの 種 類	かぶり (cm)	練り混ぜ水			
		水 道 水		海 水	
		かぶり別	平均	かぶり別	平均
普通ポルト ラ ン ド セ メ ン ト	2	0 1	0.5	1 1	1.0
	4	0 1		1 1	
	7	0 1		1 1	
早強ポルト ラ ン ド セ メ ン ト	2	2 2	2.17	1 0	1.5
	4	2 2		2 2	
	7	2 3		2 2	
B 種 高 炉 セ メ ン ト	2	3 3	3.5	3 3	3.33
	4	4 3		3 4	
	7	4 4		4 3	
平 均		2.06		1.94	

海水練りコンクリート中鉄筋と水道水練りコンクリート中鉄筋の自然電極電位の差の経年変化を表-85および図-51に示す。概略の傾向は、材令5年程度までは、海水練りのものが卑であり、特に、材令2～3年においてこの傾向が著しいが、材令6年以降は、海水練りのものがやや貴となっている。自然電極電位が鉄筋の腐食と関係するとすれば、感潮部という条件下では、材令2～3年までは海水練りのものが水道水練りのものに比較して腐食しやすいが、材令5年以降はその差がなくなり、あるいは逆転する傾向すらあることを示す。

ハ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

練り混ぜ水が材令10年のコンクリート中鉄筋の不動態のグレイドに及ぼす影響を表-86に示す。平均的には、海水練りと水道水練りとの差はないが、セメント種別を見ると、普通ポルトランドセメントでは海水練りが、また、早強ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントのものでは、水道水練りのものが、不動態のグレイドが高い。この不動態のグレイドより判断すると、普通ポルトランドセメント中の鉄筋は、特に水道水練りのものにおいて腐食が進行していると思われ、早強ポルトランドセメントのものは、ほとんどのものが腐食は進行していないと思われる。さらに、B種高炉セメントのものは、全く進行していないと判断される。

ニ) コンクリートの圧縮強度および中性化に及ぼす影響

シリーズ3より、海水練りコンクリートと水道水練りコンクリートの圧縮強度の比(海水練り/水道水練り)を見ると、それらは、アルミナセメントを除いて0.95から1.10であり、材令5年および10年ではそれらの平均はおのおの0.98および1.10となる。これより、海水練りコンクリートの圧縮強度はアルミナセメントを除いて、水道水練りコンクリートに劣らない。

表-87に、材令5年、10年のコンクリートの中性化(コンクリートの横断面)に及ぼす練り混ぜ水の影響を示す。海水練りコンクリートの最大中性化深さのほうが大きいことがわかる。

表-87 コンクリートの中性化に及ぼす  
練り混ぜ水の影響

セメントの 種 類	材 令	横断面の最大中性化 平均値(上下面を含む)	
		(mm)	
		水道水練り	海水練り
NO	5年	0	0.17
	10年	2.5	2.83
HO	5年	0	0
MO	5年	0.33	0.5
	10年	2.17	3.5
BO	5年	2.0	5.17
	10年	2.33	4.17

ホ) 塩素含有量に及ぼす影響

当然ながら、海水練りコンクリートの含有量が多い。

ビ) セメント種別の影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響

表-83, 84より判断すると、水道水練りコンクリートの場合、早強ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの防食性能が優れており、普通ポルトランドセメントおよびアルミナセメントの防食性能はやや劣ることが認められる。また、海水練りの場合、B種高炉セメントの防食性能が優れている。

特に、本試験結果より、B種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの防食性能が、普通ポルトランドセメントを用いて水道水練りコンクリートのものを上回ることには注目に値する。

ロ) 自然電極電位に及ぼす影響

前述したように、自然電極電位に及ぼす影響は、各種のポルトランドセメント、B種高炉セメントおよびアルミナセメントを用いたもので傾向が異なった。

すなわち、各種のポルトランドセメントを用いたものは、材令5年まではばらつくが、それ以降は卑に向かい、材令10年では-710 mV~-850 mVとなった。B種

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

高炉セメントを用いたものは、当初は卑であるが、徐々に貴に向かい、材令10年では-470 mV~-520 mVとなる。アルミナセメントを用いたものは、当初相当費であるが徐々に卑に向かい材令10年では-240 mV~-270 mVとなる。

自然電極電位が有効とすれば、各種のポルトランドセメント及びアルミナセメントを用いたコンクリート中鉄筋は徐々に腐食しやすく、逆に、B種高炉セメントを用いたコンクリート中のものは徐々に腐食しにくくなる傾向にある。

なお、この傾向は、練り混ぜ水の影響を受けない。

ハ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

表-86 より、材令10年では、不動態のグレイドは、B種高炉セメントを用いたものが最も高く、次いで、早強ポルトランドセメントを用いたものであり、最も低いのが普通ポルトランドセメントを用いたものである。特に注目すべき点は、B種高炉セメント海水練りの不動態のグレイドは3以上であり、材令10年での腐食の進行は全くないと判断され、かつ、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントの水道水練りのものより高い値であると言うことである。

また、普通ポルトランドセメントを用いたものでは、水道水練りのグレイドが海水練りのものより低い傾向があり、この傾向は、腐食の有無および腐食面積率の傾向とも一致する。

ニ) コンクリートの圧縮強度及び中性化に及ぼす影響

セメント種別の材令10年と材令28日の圧縮強度の比を見ると、B種高炉セメントと中熱ポルトランドセメントのものが1.05程度であり、普通ポルトランドセメントのものが0.80~0.90であり、普通ポルトランドセメントがやや劣るようである。この理由の1つとして、B種高炉セメントと中熱ポルトランドセメントの初期強度発現は、普通ポルトランドセメントに比較して遅いことが挙げられる。

表-87 より、最大中性化深さについては、材令10年では、水道水練りのものについてはセメント種別の影響はほとんどないが、海水練りのものでは、B種高炉セメントを用いたものが最も大きく、普通ポルトランドセメントを用いたものが最も小さい。

ホ) 塩素含有量に及ぼす影響

普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の含有量が多く、次いで、B種高炉セメントを用いたものであり、アルミナセメントを用いたものが最も少ないことが認められた。

表-88 鉄筋の腐食の有無に及ぼすかぶりの影響

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)		
		2	4	7
普通ポルトランドセメント	水道水	3/4	1/4	0/4
	海水	0/6	2/6	3/6
早強ポルトランドセメント	水道水	0/2	0/2	0/2
	海水	3/3	0/3	0/3
中庸熱ポルトランドセメント	水道水	0/3	0/3	0/3
	海水	3/4	0/4	2/4
B種高炉セメント	水道水	1/3	0/3	0/3
	海水	1/6	0/6	1/6
合計	水道水	4/12 (33.3%)	1/12 (8.3%)	0/12 (0%)
	海水	7/19 (36.8%)	2/19 (10.5%)	6/10 (31.6%)
	平均	35.1%	9.4%	15.8%

表-89 鉄筋の腐食面積率に及ぼすかぶりの影響 (平均値)

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)		
		2	4	7
普通ポルトランドセメント	水道水	1.93	0.25	0.0
	海水	0.0	0.07	0.15
早強ポルトランドセメント	水道水	0.0	0.0	0.0
	海水	3.60	0.0	0.0
中庸熱ポルトランドセメント	水道水	0.0	0.0	0.0
	海水	0.87	0.0	0.43
B種高炉セメント	水道水	0.1	0.0	0.0
	海水	0.03	0.0	0.03
合計	水道水	0.51	0.06	0.0
	海水	1.13	0.02	0.15
	平均	0.82	0.04	0.08

(%)

c) かぶりの影響

イ) 腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響

表-88 および 89 に、かぶりが鉄筋の腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響を示す。水道水練りと海水練りとで傾向が異なった。水道水練りでは、かぶりの影響は



明瞭であり、かぶりが大きいほど腐食の発生および腐食面積率は減少する。特に、かぶり7 cm では腐食はなかった。これに対して、海水練りでは、かぶり2 cm のものの腐食が最も顕著ではあるが、かぶり4 cm のものより7 cm のものの腐食が多く、必ずしも、かぶりの影響は明瞭ではない。これは、練り混ぜ水としての海水の及ぼす悪影響はかぶりに無関係のためと考えられる。

ロ) 自然電極電位に及ぼす影響

自然電極電位をかぶり別に整理したものを表-90 に示す。材令10年におけるものはかぶりの大きなものほど貴である傾向を示す。しかし、10年間の平均値では、かぶりによる差は明らかでない。

表-90 かぶり別の自然電極電位 (mV)

かぶり セメント の種類	2 cm		4 cm		7 cm	
	全平均	材令 10年	全平均	材令 10年	全平均	材令 10年
普通ポルトランドセメント	-569	-851	-559	-633	-565	-649
B種高炉セメント	-571	-463	-591	-462	-587	-380
アルミナセメント	-211	-359	-193	-232	-133	-195

ハ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

早強ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いたものでは、かぶりの大きいほうがやや高いグレイドを示す。しかし、普通ポルトランドセメントを用いたものでは差が認められなかった。

ニ) 塩素含有量におよぼす影響

当然のことではあるが、かぶりの小さいほど含有量は多い。

ド) 結 論

イ) 材令10年での腐食のしやすさに及ぼす要因

材令10年での腐食のしやすさに及ぼす要因を不動態のグレイドおよび自然電極電位より判断すると、練り混ぜ

水とかぶりの影響は、セメント種別の影響に比較して少ない。この場合、B種高炉セメントを用いたものが良好な防食性能を示し、その海水練りのものの防食性能は、普通ポルトランドセメントの水道水練りのものより良好である。

ロ) 材令10年での腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響

表-91 におのおの練り混ぜ水、セメントの種類、およびかぶりの腐食の有無および腐食面積率に及ぼす影響を示す。腐食面積率に関しては、セメントおよびかぶりの影響が大きいと思われる。特に、B種高炉セメントを用いたものおよび水道水練りかぶり7 cm のものは、腐食は非常に少ない。なお、全体として腐食は軽微である。

ハ) 圧縮強度の経年変化に及ぼす要因

セメント種別の影響はあるが、練り混ぜ水による相違は少ない。

ニ) 塩素含有量に及ぼす影響

海水練りおよびかぶりの小さなものの塩素含有量が多いことは当然であるが、B種高炉セメントを用いたものが他のセメントを用いたものに比較して少ない。

ホ) ま と め

コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす練り混ぜ水、セメント、かぶりの影響はそれぞれ大きい。また、それらの材令10年での腐食のしやすさにおよぼす影響については、セメントの影響が顕著である。以上のことが、かぶり7 cm の範囲かつ感潮部で確認された。

(4) シリーズ4について (モデル供試体)

ア) マクロセル電流とマイクロセル電流について

シリーズ4より、材令6か月におけるマクロセル電流とマイクロセル電流との関係を表-92 に示す。ここでは、真のマイクロセル電流と実験値より算定した腐食電流とに比例関係があると仮定して、その補正係数を $\alpha$ とした。

全体としてのマクロセル電流とマイクロセル電流との比について考える。水道水中でのV型とVC型を比較すると、明らかにVC型の比のほうが大きく、ひびわれ部があるとマクロセルの影響が大きくなると言えよう。ま

表-91 腐食面積率 (材令10年) に及ぼす各種要因の影響

練り混ぜ水	腐食面積率	セメント種	腐食面積率	かぶり	腐食面積率
水道水	0.19%	普通ポルト	0.40%	2 cm	0.82%
海水	0.43%	早強ポルト	0.60%	4 cm	0.04%
		中府熱ポルト	0.22%	7 cm	0.08%
		B種高炉	0.03%		

表-92 マクロセル電流とマイクロセル電流

( $\mu A$ )

種類	養生(測定)条件	配合(記号)	ひびわれ部			全体として			ひびわれ部の割合	
			マクロセル電流①	マイクロセル電流②	マクロ/マイクロ( $\alpha^{-1}$ )	マクロセル電流③	マイクロセル電流④	マクロ/マイクロ( $\alpha^{-1}$ )	マクロセル①/③	マイクロセル②/④
V型 (ひびわれなし)	水道水中	45-5-T	—	—	—	73.2	203.9 $\alpha$	0.36	—	—
		45-5-S	—	—	—	97.0	293.3 $\alpha$	0.33	—	—
		65-12-T	—	—	—	71.3	43.9 $\alpha$	1.62	—	—
		65-12-S	—	—	—	14.8	246.5 $\alpha$	0.06	—	—
		45-12-T	—	—	—	24.5	115.2 $\alpha$	0.21	—	—
VC型 (ひびわれあり)	水道水中	45-5-T	-57.6	5.0 $\alpha$	-11.52	93.2	35.0 $\alpha$	2.66	-0.62	0.14
		45-5-S	27.4	22.8 $\alpha$	1.20	140.8	115.8 $\alpha$	1.22	0.19	0.20
		65-12-T	-187.8	27.8 $\alpha$	-6.76	598.8	150.6 $\alpha$	3.98	-0.31	0.18
		69-12-S	19.1	29.9 $\alpha$	0.64	142.7	166.3 $\alpha$	0.86	0.13	0.18
	NaCl溶液中	45-5-T	25.6	52.1 $\alpha$	0.49	95.6	405.2 $\alpha$	0.24	0.27	0.13
		45-5-S	1.2	27.4 $\alpha$	0.04	32.3	249.5 $\alpha$	0.13	0.04	0.11
		65-12-T	-0.2	27.5 $\alpha$	-0.01	341.6	270.5 $\alpha$	1.26	-0.00	0.10
		65-12-S	6.1	68.0 $\alpha$	0.09	74.5	403.8 $\alpha$	0.18	0.08	0.17

注:  $\alpha$  は補正係数

た、VC型において、水道水中と NaCl 溶液中とを比較すると、NaCl 溶液中ではマクロセルの影響が小さくなっている。この理由として、NaCl 溶液中では、元々ひびわれ部を含む各部のマイクロセルが活発であることが考えられる。

ひびわれ部の項目を見ると、水道水中では NaCl 溶液中に比較して、マクロセル電流の影響が大きいが分かる。これも、NaCl 溶液中では、マイクロセルが活発なためと考えられる。また、全マクロセル電流に及ぼすひびわれ部の影響も水道水中のほうが大きい。

さらに、水道水中では、海水練りコンクリートではひびわれ部がアノードに、水道水練りではカソードとなる傾向がある。しかし、NaCl 溶液中では明らかでない。

b) VC型供試体での練り混ぜ水および養生(測定)条件の及ぼす影響

表-93 に、VC 型供試体の不動態のグレイドに及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響を示す。練り混ぜ水の影響は、水道水養生では水道水練りのグレイドが若干大きい、NaCl 溶液中では差はないと判断される。養生条件では、水道水養生のグレイドがやや大きいようである。

表-94 に、VC 型供試体のマクロセル電流に及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響を示す。練り混ぜ水の影響は、水道水中で顕著である。ひびわれ部については水道水練りではカソードとなり、海水練りではア

表-93 VC 型供試体の不動態のグレイド (アノード分極曲線より) に及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響

	練り混ぜ水	配合(記号)	養生(測定)条件		平均
			水道水中	NaCl 溶液中	
全体として	水道水	45-5-T	2	0.5	1.125
		65-12-T	1	1	
		平均	1.5	0.75	
	海水	45-5-S	1	1	0.875
65-12-S		1	0.5		
平均		1	0.75		
平均			1.25	0.75	1
ひびわれ部	水道水	45-5-T	1	0	0.25
		65-12-T	0	0	
		平均	0.5	0	
	海水	45-5-S	0	0	0
		65-12-S	0	0	
平均			0.25	0	0.125

ノードとなる。

c) ひびわれ部のマクロセル電流に及ぼす乾湿の影響

表-94 VC型供試体のマクロセル電流に及ぼす練り混ぜ水および養生(測定)条件の影響 ( $\mu A$ )

	練り混ぜ水	配合(記号)	養生(測定)条件		平均
			水道水中	NaCl溶液中	
全 体 と して	水道水	45-5-T	93.2	95.6	282.3
		65-12-T	598.8	341.4	
		平均	346.0	218.5	
	海 水	45-5-S	140.8	32.3	97.6
		65-12-S	142.7	74.5	
		平均	141.8	53.4	
平均			243.9	136.0	190.0
ひびわれ 部	水道水	45-5-T	-57.6	25.6	-55.0
		65-12-T	-187.8	-0.2	
		平均	-122.7	12.7	
	海 水	45-5-S	27.4	1.2	13.5
		65-12-S	19.1	6.1	
		平均	23.3	3.7	
平均			-49.7	8.2	-20.8

ひびわれのある供試体(VC型)とない供試体(V型)との大きな違いは、ひびわれのない場合は、乾湿は電流の方向に大きな影響を与えないが、ひびわれがある場合には、乾湿によって電流の方向が変化する。すなわち、ひびわれがある場合には、乾燥過程でひびわれ部はカソードに、湿潤過程でのアノードとなる傾向がある。

このことより、乾湿の繰り返しにより、ひびわれ部がアノードとなり腐食が促進され、また、逆に他の部分がアノードとなり腐食が促進される可能性がある。しかし、本実験は供試体が小さいためか、マクロセルの顕著な影響は認められなかった。

d) まとめ

イ) ひびわれのある供試体に関する電気化学的方法  
ひびわれの存在によってカソード分極曲線が大きく変化するの、自然電極電位の有効性が著しく減少した。アノード分極曲線による不動態のグレイドの有効性も減少するが、NaCl溶液中で若干有効であった。

ロ) ひびわれ部とマクロセル電流

ひびわれの存在によってマクロセルの影響は大きくなる。特に、水道水中でその影響は大きい。また、ひびわれ部は必ずしもアノードでない。

ハ) 不動態のグレイド

表-95 養生条件の鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

(1) N養生とS養生

配 合 (記号)	腐食面積(mm <sup>2</sup> )			錆の重量(mgf)		
	養生条件		①—②	養生条件		③—④
	N①	S②		N③	S④	
55-T	110	0	110	8.33	0	8.33
55-S	49	78	-29	5	4	1
H-T	1.5	0	1.5	0.5	0	0.5
H-S	23.5	43.5	-20.0	2.25	1	1.25
H-H	6	20	-23	2.5	2.5	0
Total	平均		7.9	平均		2.22
	S. D. t		58.2 0.14	S. D. t		3.45 0.64

(2) X養生とN養生

配 合	X①	N②	①—②	X③	N④	③—④
55-T	1818	110	1708	31.5	8.33	23.17
55-S	163	49	114	8.5	5	3.5
65-T	1157	33	1124	28.0	7	21.0
65-S	522	10	512	18.5	5	13.5
Total	平均		865	平均		15.3
	S. D. t		699 1.24	S. D. t		8.98 1.69

ひびわれ部の不動態のグレイドは、他の部分のものより小さい。

ニ) ひびわれのある場合の練り混ぜ水の影響

水道水中では、練り混ぜ水として海水を用いるとやや不利となる場合もあるが、NaCl溶液中では、海水練りが防食上不利という結果はない。

ホ) 乾湿の影響

ひびわれ部は、乾燥過程でカソード、湿潤過程でアノードとなる傾向がある。

(5) シリーズ5について(ひびわれありかつコンクリート中)

a) 養生条件の及ぼす影響

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量に及ぼす影響

同一配合で、S養生とN養生、N養生とX養生におけるコンクリート中鉄筋の腐食面積および錆重量の相違を整理して表-95に示す。N養生とS養生を比較すると、N養生においてやや腐食の多い傾向が認められるが明確ではない。ひびわれのない場合と比較するとひびわれが

表-96 ひびわれのある供試体における養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響 (N養生とS養生)

配合 (記号)	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平均		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦	養生条件		⑩-⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
55-T	2	2	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1.25	0.25
55-S	1	1	0	1	1	0	1	2	1	1	1	0	1	1.33	0.33
H-T	3	3	0	3	1	-2	3	1	-2	2	1	-1	2.75	1.38	-1.37
H-S	2	3	1	2	1	-1	3	1	-2	3	1	-2	2.58	1.54	-1.04
H-H	1	1	0	2	1	-1	3	1	-2	2	1	-1	2.08	1	-1.08
平均	1.8	2.0	0.2	1.8	1	-0.8	2.2	1.2	-1	1.8	1	-0.8	1.88	1.3	-0.58
S. D.	0.84	1	0.45	0.84	0	0.84	1.10	0.45	1.41	0.84	0	0.84	0.84	0.20	0.81
t	-	-	0.45	-	-	-0.96	-	-	-0.71	-	-	-0.96	-	-	-0.72

あると養生条件の相違の影響は小さくなる。

N養生とX養生での相違は明確であって、X養生のコンクリート中の鉄筋の腐食は若しく多い。ひびわれのない場合には、乾湿の繰り返しを受ける感潮部のものが材令10年においても腐食が軽微であるのと対照的である。また、予備的にX養生としたひびわれのない供試体中の鉄筋は腐食が認められなかった。

ロ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

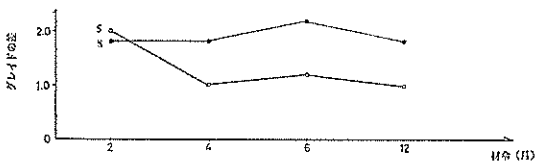


図-52 ひびわれのない供試体における養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響

表-96 および図-52に、養生条件が不動態のグレイドに与える影響を示す。材令2か月では、標準養生のほうがやや高い値を示すが、材令4か月以降は、NaCl 溶液中のほうがやや高い値を示す。

ハ) 自然電極電位に及ぼす影響

表-97に、養生条件が、自然電極電位に及ぼす影響を示す。NaCl 溶液中のほうが貴な値を示す傾向にある。

イ) 鉄筋の腐食面積および錆重量に及ぼす影響

表-98に、ひびわれのある供試体において、練り混ぜ水が鉄筋の腐食面積および錆重量に及ぼす影響を示す。標準養生 (S養生) では、練り混ぜ水の影響は明らかで、海水練りのものは腐食しているのに対し、水道水練りものは腐食していない傾向がある。ひびわれのない場合 (シリーズ1) とあわせると、水道水練りかつ標準養生のものは合計24本で、そのうちひびわれのある場合に

表-97 ひびわれのある供試体における養生条件が自然電極電位に及ぼす影響

配合 (記号)	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平均		
	養生条件		②-①	養生条件		④-③	養生条件		⑥-⑤	養生条件		⑧-⑦	養生条件		⑩-⑨
	N①	S②		N③	S④		N⑤	S⑥		N⑦	S⑧		N⑨	S⑩	
55-T	-589	-232	357	-461	-646	-185	-664	-634	30	-399	-92	307	-522	-358	164
55-S	-503	-712	-209	-479	-849	-370	-562	-861	-299	-544	-653	-109	-573	-794	-221
H-T	-69	-362	-293	-143	-711	-568	-310	-841	-531	-344	-675	-331	-228	-642	-414
H-S	-211	-562	-351	-307	-858	-551	-328	-563	-235	-346	-773	-427	-298	-701	-403
H-H	-285	-805	-520	-293	-814	-521	-345	-818	-473	-565	-758	-193	-379	-734	-355
平均	-331	-535	-203	-337	-776	-439	-442	-743	-302	-440	-590	-151	-400	-646	-246
S. D.	213	238	333	138	93	162	161	135	222	107	283	284	146	170	242
t	-	-	-0.61	-	-	-2.71	-	-	-1.36	-	-	-0.53	-	-	-1.02

2本のみ腐食しているだけで、ほとんど腐食しないものと判断される。

表-98 ひびわれのある供試体における練り混ぜ水の相違が鉄筋の腐食面積および錆の重量に及ぼす影響

(T:水道水, S:海水)

配 号 (記号)	養 生 条 件	腐食面積(mm <sup>2</sup> )			錆の重量(mgf)		
		練り混ぜ水		②-①	練り混ぜ水		④-③
		T①	S②		T③	S④	
45	N	80.0	27.0	-53.0	11.5	5.0	- 6.5
55	"	110.0	49.0	-61.0	8.33	5.0	-3.33
65	"	33.0	10.0	-23.0	7.0	5.0	- 2.0
H	"	1.5	23.5	+22.0	0.5	2.25	+1.75
小計(平均)		56.1	27.4	-28.7	6.83	4.31	-2.52
55	S	0	78.0	78.0	0	4.0	4.0
H	"	0	43.5	43.5	0	1.0	1.0
小計(平均)		0	60.8	60.8	0	2.5	2.5
55	X	1818	163	-1655	31.5	8.5	- 23
65	"	1157	522	- 635	28.0	18.5	- 9.5
55	X	1818	163	-1655	31.5	8.5	- 23
65	"	1157	522	- 635	28.0	18.5	- 9.5
小計(平均)		1488	343	-1145	29.8	13.5	-16.3

しかし、N養生(NaCl溶液中)あるいはX養生(NaCl溶液中養生の後気中養生)では、全く異なる傾向を示す。すなわち、表-98(ひびわれのある場合)によれば、水道水練りのものの腐食が比較的多いことが認められる。この理由の1つとしては、水道水練りの場合には、ひびわれ部とその他の部分との電気化学的性質の相違が、海水練りの場合よりも大きく、マクロセル電流がより大きいことが考えられる。いずれの理由にせよ、ひびわれがありかつ塩素が大量に侵入する場合には、海水練りコンクリートの防食性能が水道水練りのものに比較して劣るという事実はない。

なお、表-99に練り混ぜ水および養生条件別の錆厚さを示した。養生条件による差が明らかに認められ、練り混ぜ水による差は認められない。

ロ) 不動態のグレイドに及ぼす影響

表-100および図-53に、練り混ぜ水が不動態のグレイ

表-99 錆の厚さの比較(練り混ぜ水、養生条件別の平均値の比較)

練り混ぜ水 養生条件	水道水(T)	海水(S)
N	0.19	0.26
S	—	0.06
X	0.02	0.05

(mgf/mm<sup>2</sup>)

表-100 ひびわれのある供試体における練り混ぜ水が不動態のグレイドに及ぼす影響

配 合 (記号)	養 生 条 件	材令2か月			材令4か月			材令6か月			材令12か月			平 均		
		練り混ぜ水		①-②	練り混ぜ水		③-④	練り混ぜ水		⑤-⑥	練り混ぜ水		⑦-⑧	練り混ぜ水		⑨-⑩
		T①	S②		T③	S④		T⑤	S⑥		T⑦	S⑧		T⑨	S⑩	
45	N	2	2	0	1	2	- 1	1	2	- 1	1	2	- 1	1.38	1.88	- 0.5
55	"	2	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
65	"	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0
H	"	3	2	1	3	2	1	3	3	0	2	3	- 1	2.75	2.58	0.17
小計(平均)		2	1.5	0.5	1.5	1.5	0	1.5	1.75	-0.25	1.25	1.75	- 0.5	1.53	1.62	-0.08
55	S	2	1	1	1	1	0	1	2	- 1	1	1	0	1.25	1.33	-0.08
H	"	3	3	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1.38	1.54	-0.16
小計(平均)		2.5	2	0.5	1	1	0	1	1.5	- 0.5	1	1	0	1.32	1.44	-0.12
55	X	3	1	2	3	2	1	1	2	- 1	1	1	0	1.58	1.38	0.20
65	"	1	1	0	1	3	- 2	2	3	- 1	1	1	0	1.33	2	-0.67
小計(平均)		2	1	1	2	2.5	- 0.5	1.5	2.5	- 1	1	1	0	1.46	1.69	-0.24

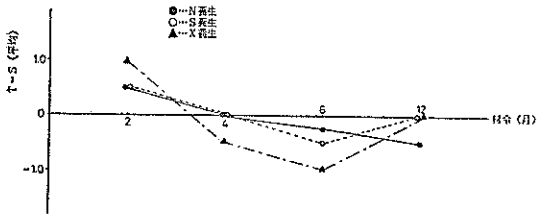


図-53 ひびわれのある供試体における養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響

ドに及ぼす影響を示した。材令2か月では水道水練りのほうが明らかに高い値を示す。材令4か月，6か月となると，海水練りのほうがむしろ高くなり，材令12か月では，ほとんど差はないと判断される。

ハ) 自然電極電位に及ぼす影響

表-101および図-54に練り混ぜ水が自然電極電位に及ぼす影響を示す。S養生では，明らかに水道水練りのほうが高い値を示すが，N養生では練り混ぜ水による差は

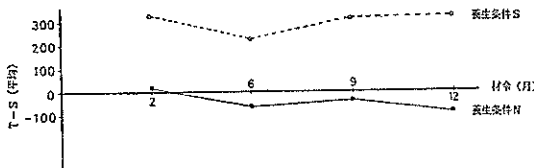


図-54 練り混ぜ水が自然電極電位に及ぼす影響

小さいことが認められる。

シ) ひびわれ幅の及ぼす影響

表-102，図-55 および図-56に鉄筋の腐食面積に及ぼす最大ひびわれ幅およびひびわれ幅の合計値の影響を示

表-102 ひびわれ幅の腐食面積に及ぼす影響 (mm<sup>2</sup>)

最大ひびわれ幅 (mm)	養生条件および練り混ぜ水					
	S 養生			N 養生		
	水道水	海水	平均	水道水	海水	平均
0.05	0	43	22	3	37	20
0.08	0	67	39	—	38	(38)
0.10	0	89	45	67	27	47
0.15	—	—	—	25	28	27
0.20	—	—	—	59	10	35
0.30	—	—	—	196	—	(196)

ひびわれ幅の合計 (mm)	養生条件および練り混ぜ水					
	S 養生			N 養生		
	水道水	海水	平均	水道水	海水	平均
0.05	0	43	22	3	—	(3)
0.08	0	67	39	—	38	(38)
0.10	0	89	45	67	30	49
0.15	—	—	—	25	28	27
0.2-0.25	0	—	(0)	150	—	(150)
0.25以上	—	—	—	111	10	61

表-101 練り混ぜ水が自然電極電位 (E<sub>corr</sub>) に及ぼす影響

(mV)

配合 (記号)	養生条件	材令2か月		材令6か月			材令9か月			材令12か月			平均値			
		練り混ぜ水		練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			練り混ぜ水			
		T①	S②	①-②	T③	S④	③-④	T⑤	S⑥	⑤-⑥	T⑦	S⑧	⑦-⑧	T⑨	S⑩	⑨-⑩
45	N	-396	-377	19	-592	-441	151	-558	-369	189	-535	-320	215	-495	-375	120
55	N	-589	-503	86	-664	-562	102	-534	-619	85	-366	-544	145	-522	-573	51
	X(N)	-248	-294	46	-394	-254	140	-633	-391	242	-704	-426	278	-450	-307	143
65	N	-336	-421	85	-593	-459	134	-612	-441	171	-600	-464	136	-529	-424	105
	X(N)	-425	-333	92	-408	-525	117	-361	-596	235	-475	-431	44	-340	-226	114
H	N	-69	-211	142	-310	-329	19	-323	-331	8	-344	-346	2	-228	-298	70
小計	平均	-344	-357	13	-494	-428	65	-504	-458	46	-510	-422	88	-427	-367	60
	S. D.	176	102	95	141	117	109	131	121	186	132	81	154	120	122	94
	t	—	—	0.14	—	—	-0.60	—	—	-0.25	—	—	-0.57	—	—	-0.63
55	S	-232	-712	480	-634	-861	227	-182	-781	599	-92	-653	561	-358	-794	436
H	S	-362	-562	200	—	—	—	-822	-867	45	-675	-773	98	-642	-701	59
小計(平均)		-297	-637	340	-634	-861	227	-502	-824	322	-384	-713	330	-500	-748	248

す。S養生かつ海水練りおよびN養生かつ水道水練りではひびわれ幅の大きいほど腐食面積の大きいことの認められたが、N養生かつ海水練りでは明確ではなかった。

d) ひびわれのない場合との比較

ひびわれの有無による、練り混ぜ水および養生条件の腐食に及ぼす影響を表-103 および 図-57 に示す。

ひびわれの有無に関係なく共通している点は、水道水練りかつ標準養生のものがほとんど腐食していないことである。

ひびわれの有無によって、大きく異なる点は、水道水練りかつ海水養生 (NaCl 溶液中) の場合で、ひびわれのない場合は、腐食面積、錆重量とも他の組み合わせに比較して少ないほうであるのに対し、ひびわれのある場合では、比較的多いほうである。

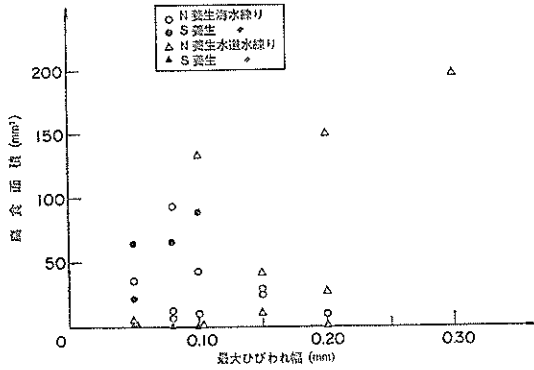


図-55 最大ひびわれ幅と腐食面積との関係

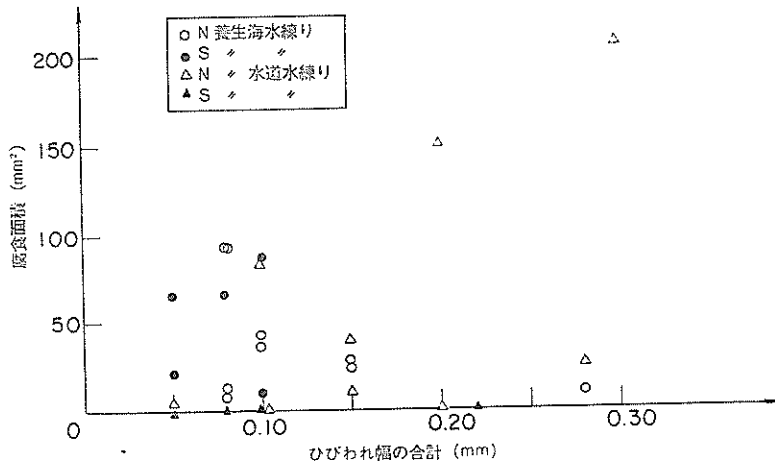


図-56 ひびわれ幅の合計値と腐食面積との関係

ひびわれのない場合でも、海水養生では、水道水練りと海水練りの腐食傾向は徐々に近づく傾向にあったが、ひびわれのある場合では、腐食面積、錆重量に関しても

表-103 ひびわれの有無による腐食に及ぼす練り混ぜ水および養生条件の影響

(1) 腐食面積率の平均値 (%)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	0.62②	0.05③	0.30③	0.52①
S	0.0④	0.01④	0.67①	0.30②

(2) 錆の単位面積あたり重量 (μg/cm²)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	75.1①	8.6③	47.4②	76.9①
S	0④	2.5④	27.5③	18.2②

(3) 腐食発生の割合 (%)

練り混ぜ水 養生条件	水道水		海水	
	ひびわれ有	ひびわれ無	ひびわれ有	ひびわれ無
N	78③	37③	89②	95①
S	0④	10④	100①	68②

注：○内はひびわれの有無別の順位

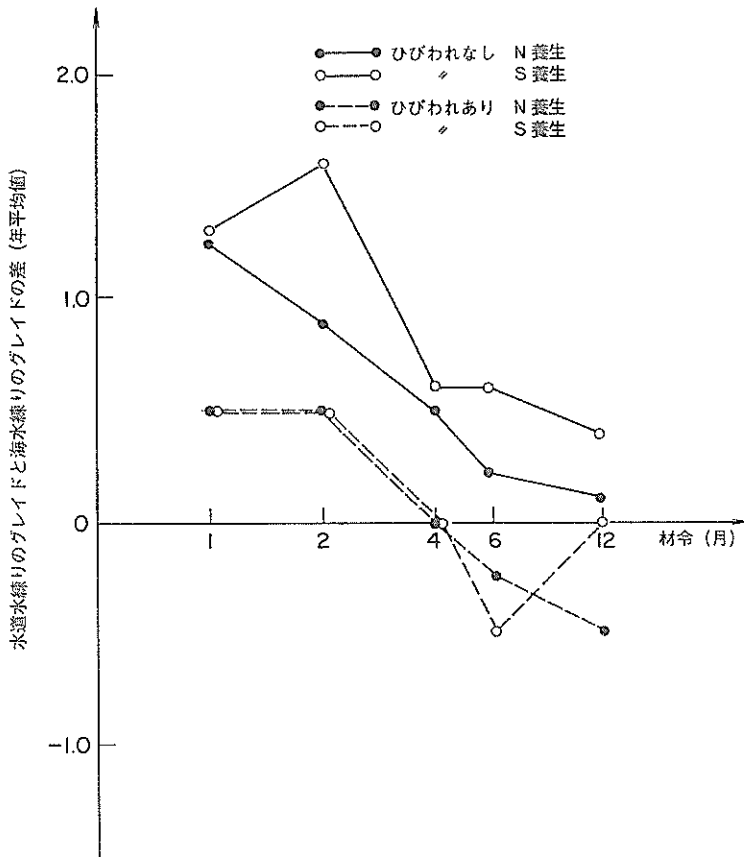


図-57 ひびわれの有無による練り混ぜ水が不動態のグレードに及ぼす影響の相違

海水練りが不利とは言えないようである。この理由として、短期間の内に鉄筋表面に海水が侵入することが挙げられる。

なお、標準養生では、ひびわれのある場合のほうが、水道水練りと海水練りとの差はより明確であった。

不動態のグレードより判断すれば、ひびわれのある場合、練り混ぜ水よりも養生条件の影響が卓越してくるのは、材令4か月以降と判断される(図-52, 53 参照)。

また、ひびわれのない場合、海水養生の影響が卓越してくるのは12か月以降と考えられる。これによっても、ひびわれのある場合のほうが、練り混ぜ水の影響が少ないことが分かる。

e) 結論

標準養生(恒温恒湿室内, 材令12か月まで), 海水養生(3.6% NaCl 溶液中, 材令12か月)および海水養生後気中養生(材令15か月まで)をしたひびわれのある

コンクリート中鉄筋の腐食につき、次の結論を得た。

イ) 海水練りが腐食量に及ぼす影響は、標準養生では、海水練りの腐食量のほうが、水道水練りのものに比較して多いが、海水養生あるいは海水養生後気中養生では、むしろ海水練りの腐食量が少ない。

ロ) 腐食量に関し、ひびわれのない場合との大きな相違は、水道水練りかつ海水養生の腐食量がひびわれのある場合では大きいことである。

ハ) 海水養生後気中養生のものの腐食量は著しく大きい。

ニ) ひびわれ幅の大きなほど腐食量は大きい傾向がある。

ホ) 不動態のグレードより判断すると、海水練りの影響は、材令4か月以降は、表面には現れない。この期間は、ひびわれのない場合より短い。

(6) シリーズ6について(既設構造物の塩素量測定)



a) 塩素含有量

前述したように、既設構造物中の塩素含有量はかなり多い。

これらの含有量を、海水を練り混ぜ水として用いた場合の数値（約0.25%）、海砂中の塩素含有量規制値を0.1%（NaCl換算）とした場合の数値（0.04%）、さらに、シリーズ2の結果より、80%以上の率で不動態のある溶存塩素含有量0.15%以下という数値と比較する。

飛沫部の値は、海砂中の塩分規制値に対応する値を大きく上回っており、一部のものは、海水を練り混ぜ水として用いた値をも上回っている。

海中部の値は、飛沫部の値よりもさらに大きく、根固めブロックでは、かぶり20cm以下のもの、また、プレキャスト杭では、ほとんどすべてのものが、海水を練り混ぜ水として用いた場合を上回っている。

b) 塩素の拡散係数

海水中に含まれるイオンの中で、ひびわれ等の欠陥のないコンクリート中に深く浸透するのは、塩素イオンのみであると言われている。塩素イオンの拡散については、1次元の拡散方程式より、

$$c/c_0 = 1 - \operatorname{erf}(x/\sqrt{2D't})$$

ここでx：表面からの距離（cm）、c：xでの塩素含有量（%）、 $c_0$ ：x=0でのc、D'：見掛けの拡散係数（ $\text{cm}^2/\text{s}$ ）

本研究では、上式を用いて、既設構造物の塩素含有量より、見掛けの拡散係数の算定を行った。この場合、上式を導く際の仮定を満たすため、コンクリートに対し、塩素の侵入面が1つかつ直角方向であり、xが大なると

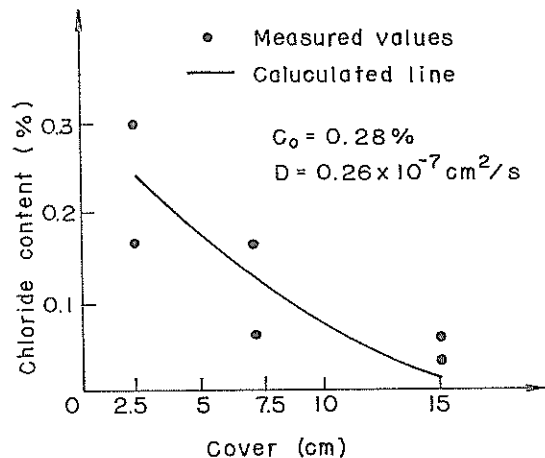


図-58 栈橋床版中の全塩素含有量（表-58 ③に対応）の実測値および計算値

きの塩素含有量が0に近くなるような分布を有する測定値を用いた。これらの測定値を用いて最小二乗法により、 $c_0$ 、D'を求め、その結果を、図-58および表-58に合わせて示す。なお、計算は表-58に示した①～④のデータのおおのについて行い、図-58には③の測定値および表-58に示す  $c_0$ 、D'を用いた計算値を示す。

試料としてコンクリート、モルタル、ペースト、測定した環境条件として飛沫部、海中部、NaCl 溶液中と条件の異なったものを対象とした結果、見掛けの拡散係数はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  程度と判断される。

c) まとめ

イ) 海洋環境下に長期間暴露されたコンクリートには、多量の塩素が含まれている。特に、海中部では、練り混ぜ水として海水を用いたコンクリートの練り混ぜ時に含まれる量を上回る。

ロ) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の塩素の見掛けの拡散係数はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  である。

(7) シリーズ7について（ひびわれと塩素の侵入）

ひびわれによって多量の塩素が内部鉄筋表面に侵入することが確認された。

(8) シリーズ8について（コンクリートの分析）

材令1年で、コンクリート表面より約2cmのモルタルについて、空隙率（細孔量）、X線回折およびSEM観察を行った。

その結果、空隙率（細孔量）は、海水養生したものが標準養生したものよりも小さく、また、海水練りのもののほうが水道水練りのものより小さい。さらに、B種高炉セメントを用いたものが普通ポルトランドセメントを用いたものよりも小さいことが認められた。このことは、材令1年の時点では、海水練りコンクリートへの有害物質の侵入は水道水練りコンクリートへの侵入より少ないと言う可能性を示す。また、X線回折、SEM観察結果より、フリーデル氏塩およびエトリンガイトの存在は細孔量を減少させるものであると判断される。

すなわち、塩素イオンあるいは硫酸イオンは、コンクリート中に存在することによって、細孔量を減少させるため、新たなイオンの侵入を阻止すると思われる。そのため、初期のコンクリート中のイオン量にかかわらず、長期間海洋環境にあることによって、イオン量は徐々に同一の値に収束することが考えられる。

また、前述したB種高炉セメントを用いたコンクリート中への塩素イオンの侵入が比較的小さいことの理由の1つとして、細孔量が少ないことが挙げられる。

(9) 各シリーズの結論のまとめ

a) シリーズ1

イ) 海水練りと水道水練りコンクリート中鉄筋の腐食傾向の差は、材令1か月ではかなり大きい。材令とともに減少していく傾向にある。特に、その差の減少は海水養生において著しい。

ロ) 材令1年での、コンクリート中鉄筋の腐食量は、海水練りかつ海水養生のものが最も多く、次いで、海水練りかつ標準養生のもの、水道水練りかつ海水養生のもの、水道水練りかつ標準養生のもの順である。

b) シリーズ2

イ) 水セメント比が小さいほど、不動態のグレイドは高い。また、練り混ぜ水に含まれる塩素の悪影響を水セメント比を小さくすることによってなくすことも可能である。

ロ) 練り混ぜ水に含まれる塩素量が多いほど不動態のグレイドは小さい傾向にある。

ハ) 養生条件が不動態のグレイドに及ぼす影響は材令とともに卓越してくる。材令1年で、標準養生したものの不動態のグレイドはすべて1となり、海水養生したもののグレイドはすべて0となった。

ニ) モルタル中の塩素含有量が少ないほど不動態の存在する率は高い。溶存塩素量が0.15%以下では不動態は80%以上の率で存在する。

ホ) モルタル中では、材令1年で練り混ぜ時に含まれる塩素の40%弱しか溶存塩素として測定できなかった。

ヘ) かぶり小さい場合、練り混ぜ時に含まれる塩素量にかかわらず、比較的短期間において、養生条件によって不動態の有無が決定される。それゆえ、不動態の有無に関して使用材料中の塩素量のみ規制しても効果は少ない。

c) シリーズ3

材令10年の感潮部におけるコンクリート中鉄筋の腐食量には、練り混ぜ水、セメント、かぶりがそれぞれ影響するが、この中では、練り混ぜ水の影響がやや少ない。また、材令10年での腐食傾向に対しては、セメントの影響が最も大きかった。

d) シリーズ4

イ) ひびわれの存在によって、マクロセルの影響は大きくなる。特に、水道水中での影響が大きい。

ロ) ひびわれ部の不動態のグレイドは他の部分のものより小さい。

ハ) ひびわれのある場合、水道水中では練り混ぜ水として海水を用いると防食上やや不利となる場合もあるが、NaCl 溶液中では、海水練りが不利と言うことはない。

ニ) ひびわれ部は、乾燥過程でカソード、湿潤過程でアノードとなる傾向がある。

e) シリーズ5

イ) 海水練りが腐食量に及ぼす影響として、標準養生では海水練りのものの腐食量が多いが、海水養生あるいは海水養生後気中養生ではむしろ海水練りの腐食量が少ない。

ロ) 腐食量に関してひびわれのない場合との大きな相違は、水道水練りかつ海水養生の腐食量が大きな点である。

ハ) 海水養生後気中養生のものの腐食量は著しく多い。

ニ) ひびわれ幅が大きいほど腐食量は大きい傾向にある。

ホ) 不動態のグレイドの傾向において、海水練りの影響は材令4か月で認められなくなる。これは、ひびわれのない場合より短い。

f) シリーズ6

海洋環境下の既設コンクリート構造物中の塩素含有量は大きい。

g) シリーズ7

海水養生では、ひびわれ部より鉄筋表面に多量の塩素が侵入する。

h) シリーズ8

海水の影響でコンクリート内部にはフリーデル氏塩、エトリンガイトが形成され、空隙率(細孔量)も小さくなる傾向がある。

## 7.2 総合的考察および結論

(1) 各種要因の鉄筋の腐食傾向に及ぼす影響の比較  
各種要因として、養生(環境)条件、練り混ぜ水(使用材料)中の塩素、ひびわれの有無、セメント、かぶり(7cmまで)、水セメント比および初期標準養生期間を考える。

シリーズ2のモルタル供試体の実験より考える。水セメント比、初期標準養生期間、練り混ぜ水中の塩素が不動態のグレイドに与える影響を比較すると、材令1年では、養生(環境)条件が、不動態のグレイドの決定要因となっていた。また、不動態の存在期間に対しては、水セメント比、初期標準養生期間、練り混ぜ水中の塩素量にはある程度の互換性があることが認められた。

シリーズ3の材令10年の実験より考えると、材令10年での腐食傾向に関して、セメント種の影響が練り混ぜ水およびかぶりの影響より卓越していた。

シリーズ4のモデル供試体の実験より、ひびわれ部には、その他の部分に関係なく、不動態はなかった。ま

た、シリーズ7で検討したように、海水中ではひびわれによって鉄筋には塩素が付着するので、ひびわれ部には不動態はないと判断される。

以上のことから、各種要因の影響度は、表-104に示されるように、おおまかに2つのグループに分けることができよう。

表-104 各種要因の長期の腐食傾向に及ぼす影響度

より大きな影響度を及ぼす要因	養生（環境）条件、ひびわれの有無、セメント種
影響を及ぼす要因	使用材料（練り混ぜ水）中の塩素、水セメント比 初期養生期間 かぶり（7cmまで）

(2) 練り混ぜ水中に含まれる塩素の影響について  
シリーズ1とシリーズ5の実験結果より、材令1年における練り混ぜ水の相違がコンクリート中鉄筋の腐食傾向および腐食量に与える影響は表-105に示すようである。また、シリーズのモルタル試験では、材令1年は、練り混ぜ水中の塩素量の腐食傾向に及ぼす影響はほとんどなく、さらに、シリーズ3で示したように材令10年でのコンクリート中の鉄筋に及ぼす影響はセメント種が最も多く、練り混ぜ水の影響は少なく、腐食量についてもセメント種の影響がやや大きかった。

表-105 練り混ぜ水の影響の有無（海水練りの悪影響の有無）

(1) 腐食量（材令12か月）

	ひびわれなし	ひびわれあり
標準養生	有（中）	有（大）
海水養生	有（中）	ほとんどなし

(2) 12か月における腐食の傾向

	ひびわれなし	ひびわれあり
標準養生	有	ほとんどなし
海水養生	ほとんどなし	むしろ逆転

これらの結果、特にシリーズ2の結果より、練り混ぜ水の影響は材令とともに減少すると考えられ、さらに、表-105より、海水養生では、標準養生中よりも練り混ぜ水の影響は小さい。特に、海水養生かつひびわれがあ

る場合には、練り混ぜ水中の塩素の影響は、腐食量および腐食傾向について全くないと言って差し支えないようである。逆に、練り混ぜ水の影響がやや大きくするのは、標準養生の腐食量である。

すなわち、本研究の範囲では、比較的早期の材令では練り混ぜ水としての海水の悪影響があるが、その程度は材令とともに減少する。特に、海水養生では、腐食傾向は材令1年でほとんど影響を受けず、特にひびわれがある場合には腐食量も影響を受けない。実用上、練り混ぜ水中の塩素の影響は長期材令では無視できると判断される。また、シリーズ3の結果より、ひびわれのない供試体では、水セメント比50%程度、かぶり2cmでかつ海水練りでも実用上腐食は問題とはならないようである。

しかしながら、練り混ぜ水中に塩素を含んでいる場合には、早期の材令での腐食傾向は比較的悪いので、早期の材令にコンクリート中の鉄筋にとって好ましくない状況、例えば、高温（蒸気養生、オートクレーブ養生等）あるいはひびわれがあつてかつ乾湿の繰り返しを受ける等の状況があると、腐食が著しく進行することが考えられる。

このような状況以外であれば、練り混ぜ水中の塩素の影響は、水セメント比、初期標準養生期間、セメント種等に若干の考慮を払えば、実用上問題にならないと考えられる。さらに言えば、このことは、使用材料中の塩素についても言えると考えられる。

なお、ここで述べているのは、あくまで使用材料中の塩素の通常の鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に関してであり、決して、他の要因を含む海砂の使用やプレストレストコンクリート中の鋼材についてはないことに留意されたい。

また、この結論の主要な適用範囲は、海水中ならびに感潮部で、常時鉄筋近傍のコンクリートが湿潤（腐食が酸素の拡散律速となる）である場合と考えている。

(3) かぶりに関する考察（ひびわれのない場合）

かぶりが大きくなると、外部からの塩素の侵入が遅くなるため、コンクリート自体は海水中にあつても、鉄筋周辺は、標準養生に近い環境下であると推察される。この場合、ある材令までは、鉄筋位置には塩素は到達しない。この場合は、練り混ぜ水中の塩素の影響が比較的長期に及ぶことが予想される。特に、腐食量については早期での差がそのまま残ると予想される。すなわち、塩素を含まないものは全く腐食がなく、塩素をある程度含むものは若干腐食している。しかし、シリーズ2より普通ポルトランドセメントを用いた場合、材令1年では同一の不動態のグレイドとなる。

(4) ひびわれの影響

コンクリートの周囲に海水が十分に有る場合には、シリーズ7にも見られるように、ひびわれがあれば、鉄筋表面にはかなりの量の海水および塩素が付着していることが当然考えられる。この状況では、練り混ぜ水中の塩素の影響は、ひびわれのない場合より低下するのは当然である。また、鉄筋表面に十分な塩素が付着すれば、不動態はないと考えられる。

さらに、シリーズ4で示したように、ひびわれによって、マクロセル電流は増加する。したがって、鉄筋の腐食する条件は十分そろっている。しかしながら、海水中の鉄筋の腐食は軽微であった。この理由は酸素の供給が不十分なためと考えられる。それゆえ、酸素が十分であれば腐食するものと考えられ、シリーズ5でのひびわれのある供試体で海水養生後気中養生したものの腐食量は多かったのである。

しかしながら、コンクリートが乾燥している場合には、電気化学的測定は困難で、残念ながら本研究の範囲外とした。

(5) 海水と海砂の使用について

現在、著者の試験では、コンクリートの使用材料中の塩素量は、他の規制とのバランスから考えて、これのみ厳しく規制されている感が強い。この塩素量の規制には、もちろん意味はある。すなわち、沿岸の各種のコンクリート構造物に劣化が発見され、なんらかの対策を講じなければならないときに、最も容易にし得るのが、使用材料中の塩素量規制であった訳である。

その他の更に重要と考えられるコンクリートの基本的な性質であるスランプ、単位水量とポンプの使用、骨材の品質の低下、セメント種の選定、ならびに、セメントの品質等といった重要な要因には手をつけにくいこともあってか、ほとんどなんらの規制もない状況である。

海砂問題については若干の混乱があるように思われる。海砂には、それに含まれる塩素の問題の他に、それ自体の粒度や岩質にも問題がある場合が多いのである。海砂は、多孔質で粒形が悪い場合、単位水量の増大やワーカビリティの低下を起し、良好な耐久性は期待しにくいことがある。これが原因となる劣化も塩素が原因として挙げられるものがあるとも考えられる。

特に、海洋環境では、本研究より、使用材料中の塩素の影響は軽微であり、水セメント比、セメント種、初期養生条件等をくふうすれば、海水や海砂の使用も場合によっては問題ないものと思われる。

著者の主張は、構造物の耐用年数、重要度などを考え、使用材料中の塩素量のみにはこだわらず、ケースバイ

ケースで工学的に判断すればよいと言うことである。

(6) 使用材料中の塩素が限界条件となる場合

前述したように、練り混ぜ水に塩素が含まれる場合、早期材令では、コンクリート中の鉄筋はより腐食しやすい傾向にある。そのため早期材令に、腐食促進があると、練り混ぜ水中の塩素が決定要因となって、腐食が顕著となることもある。

また、この意味で、促進試験では塩素の悪影響が強調されるのは明らかであり、促進試験の結果の判断には注意を要する。

(7) 主要な結論

今まで、種々の観点から、多数の考察および結論を述べたが、主要な結論は以下の点と考える。

a) コンクリート中の鉄筋の腐食傾向におよぼす種々の要因の中では、養生(環境)条件、ひびわれの有無、セメント種の及ぼす影響のほうが、練り混ぜ水中の塩素、水セメント比、初期標準養生期間の影響より大きい。

なお、塩素量としては練り混ぜ水として海水を用いた場合の値を一応の上限と考えている。

b) 練り混ぜ水中の塩素の影響は材令とともに減少する。特に、海水養生かつひびわれがある場合には、材令1年でその影響は認められない。

なお、電気化学的方法についても併せて述べると、この中で最も有効なのは、不動態のグレイドであり、次いで、自然電極電位である。両者とも、鉄筋周辺の条件が均一なほど有効であると判断される。

8. あとがき

(1) 本研究の問題点

本研究でのおもな問題点は、コンクリート中の鉄筋に対する電気化学的方法の信頼性である。

電気化学理論は、均一な溶媒、溶質を前提としていることが多く、不均一な場合には種々の制約がある。コンクリートは元来不均一な材料であるため、電気化学的方法がどの程度コンクリート中の鉄筋の腐食に対して有効であるかが疑問であった。そのため、各実験シリーズにおいて、腐食面積等と著者の提案する不動態のグレイド等の電気化学的方法とのキャリブレーションを行った。しかしながら、まだ十分なものとは言えないようである。

また、本研究の結論は、土木学会等の基準とやや趣が異なるものであるが、7.で述べたように、それらの基準の使用材料中の塩素量の規制は、特に、海洋環境において、問題があるように思われる。(1985年6月29日受付)

(2) 謝辞

本研究の実施にあたっては非常に多くの方のご示唆および御協力をいただいた。

長期の暴露試験および既設構造物調査は、1970年より継続しているものである。研究の発端は、赤塚雄三元港湾技術研究所材料施工研究室長のご示唆によるものであり、試験および調査の一部は関博および森好生元材料施工研究室長に負う所が多く、さらに、元材料施工研究室研究員の浅岡邦一氏、田淵民雄氏、佐々木克彦氏、小野寺幸夫氏、丸山浩氏、故九嶋茂雄氏、藤沢孝夫氏、堀井義一氏および下沢治氏に試験の一部を担当していただいた。

また、短期材令試験の一部はテキサス大学 (Austin, Texas, U. S. A.) で行ったが、Dr. Z. Eliezer, Dr. D. W. Fowler, Mrs. H. Wheat, Mr. D. Whitney および Mr. D. Malkemus のご指導およびご協力をいただいた。

さらに、港湾技術研究所構造部土田肇部長、横井聡之材料施工研究室長、善一章前主任研究官、セメント協会の方々および東京工業大学長滝重義教授等に種々のご示唆とご協力をいただいた。ここに、謹んで感謝の意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 海砂に関する調査研究委員会：海砂に関する調査研究報告書，日本コンクリート会議，1974年3月 pp. 199
- 2) 青戸 章：鉄筋コンクリートの耐海水性に関する研究，鉄道技術研究報告，No. 1156，1980年11月，250 p.
- 3) C. Dehghanian & C. E. Locke：Electrochemical behavior of steel in concrete as a result of chloride diffusion into concrete-Part 2, *Corrosion NACE*, Vol. 38, No. 9, Sep. 1982, pp. 494~499
- 4) 関 博，丸山 博：長期間海水作用を受けたコンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食について，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，1973年9月 pp. 203~225
- 5) E. Atimtay & P. M. Ferguson：Early chloride corrosion of reinforced concrete-A test report, *ACI*, Vol. 70, No. 70-55, 1973, Sept, pp.606~611
- 6) (社)セメント協会：海砂の塩分含有量とコンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究—材令5年中間報告(その2)—コンクリート専門委員会報告F-35, June, 1982年, 79 p.
- 7) R. Shalon and M. Raphael：Influence of sea water on corrosion of reinforcement, *ACI*, VOL, 55, No. 55-76, 1959, June, pp. 1251~1268
- 8) 川村満紀，山田祐定，小泉 徹：海砂使用モルタル中の鉄筋の発錆に関する実験的研究，セメ技年報，No. 29, 1975年5月, p. 238
- 9) 関 博，堀井義一：建設後20年を経過した鉄筋コンクリートさん橋の劣化状況調査，港湾技術資料 No. 255, 1977年5月, pp. 53
- 10) A. W. Beeby：Concrete in the Oceans—Cracking and Corrosion—, *Technical Report No. 1*, CIRIA/UEG, C & CA, 1978. 77p.
- 11) K. Okada and T. Miyagawa：Chloride Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete, *ACI*, SP-65-14, 1980, pp. 237~254
- 12) M. G. Fontana and N. D. Greene：Corrosion Engineering, *McGRAW-Hill Book Co.*, 1978, p. 319~337
- 13) H. A. Berman：Sodium Chloride, Corrosion of reinforcing Steel, and the pH of Calcium Hydroxide Solution, *ACI* Vol. 71, 1975, pp. 150~157
- 14) V. K. Gouda and H. M. Mourad：Galvanic Cells Encountered in the Corrosion of Steel Reinforcement, I, II, III, & IV, *Corrosion Science*, Vol. 14, No. 11~12, 1974, pp. 68~90 and Vol. 15, No. 5, 1975, pp. 307~336
- 15) B. Tremper, J. L. Beaton and R. F. Stratful：Causes and Repair of Deterioration to a California Bridge due to Corrosion of Reinforcing Steel in a Marine Environment, Part II, *Highway Research Board Bulletin* 182, 1958, pp. 18~41
- 16) 善一章：港湾における鋼材防食法の研究(第一報)—セメント硬化体による防食法—，港湾技術研究所報告，第5巻9号，1966年6月，141 p.
- 17) H. H. Uhlig：Corrosion and Corrosion Control John Wiley & Sons Inc., 1971, p. 61
- 18) V.K.Gouda：Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel, *British Corrosion Journal* Vol. 5, 1970, pp. 198~203
- 19) J. M. Gaidis, A. M. Rosenberg and I. Saleh：Improved Test Methods for Determining Corrosion Inhibition by Calcium Nitrite in Concrete, *A.S.T.M., S.T.P.* 713, 1980, pp. 64~74
- 20) セメント協会コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，No.F-18, 1967年, 71 p.
- 21) 片岡清士：コンクリート中に含まれる塩化物の定量方法に関する一試案，海洋コンクリート構造物の防食指針(案)資料，JCI-R1, 1973年, pp. 99~106
- 22) J. O. Bookris and A. K. N. Reddy：Modern Electrochemistry 2, Plenum Publishing Co., 1977, p. 883
- 23) M. Stern and E. D. Weisert：Experimental Observations on the Relation between Polarization Resistance and Corrosion Rate, *Proc. of A.S.T.M.* 1959
- 24) 樫野紀元：鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究，建築研究報告，No. 90, 1980年, 244 p.

コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究

- 25) R. L. Martin : Application of Electrochemical Polarization to Corrosion, Petrolite Instruments Co., 1978, 66 p.
- 26) 森好生, 野木孝次 : コンクリートの耐海水性に関する研究—材令10年試験結果報告—, セメントコンクリート, No. 417, 1981年
- 27) 近藤連一, 佐竹実, 牛山宏隆 : セメント硬化体中のイオン拡散, セメ技年報28, 1974年, pp. 58~61
- 28) O. E. Gj ø rv and ø, Vennesland : Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 9, No. 2, 1979, pp. 229~238