

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

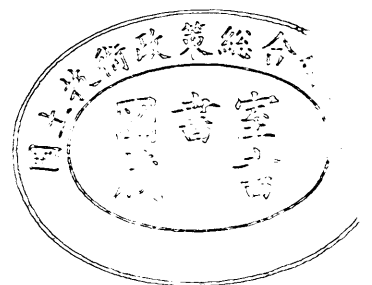
---

VOL. 12

NO. 3

SEPT. 1973

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第12巻 第3号 (Vol. 12, No. 3), 1973年9月 (Sept. 1973)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 衝撃碎波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察……………合田良実…………… 3  
(Motion of Composite Breakwater on Elastic Foundation under the Action of Impulsive Breaking Wave Pressure……………Yoshimi GODA)
2. 防波堤の設計波圧に関する研究……………合田良実……………31  
(A New Method of Wave Pressure Calculation for the Design of Composite Breakwater……………Yoshimi GODA)
3. 前面に遊歩道を持つ海浜護岸について — 越波特性からの断面形の検討 —  
……………服部典節・佐藤昭二……………71  
(On the profile of seawalls at the resort beach……………Michiyo HATTORI and Shoji SATO)
4. 大阪湾の潮流と物質拡散に関する模型実験  
……………金子安雄・堀江毅・村上和男・上野信行・久保正則……………99  
(Model Experiment on Tidal Current and Substance Diffusion OSAKA Bay  
……………Yasuo KANEKO, Takeshi HORIE, Kazuo MURAKAMI,  
Nobuyuki UENO and Masanori KUBO)
5. 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  
……………関博・丸山浩…………… 203  
(Corrosion of Steel Bars at Crack of Reinforced Concrete Exposed to Sea Environments……………Hiroshi SEKI and Hiroshi MARUYAMA)
6. 雑貨埠頭の上屋・倉庫のシステム設計 (第2報)  
……………早藤能伸・工藤和男…………… 227  
(System Design of Transitsheds and Warehouses (Part-2)  
……………Yoshinobu HAYAFUJI and Kazuo KUDO)
7. 細砂送流時における濃度分布および流速分布について  
……………是石昭夫・八木得次・奥出律…………… 245  
(On the distribution of solid concentration and flow velocity at time of transporting the fine sand in a horizontal pipe……………Akio KOREISHI, Tokuji YAGI and Tadasu OKUDE)
8. エアリフトの揚水特性について……………岡山義邦・八木得次…………… 261  
(On the Air-Lift Characteristics with Gas-Liquid Mixture  
……………Yoshikuni OKAYAMA and Tokuji YAGI)

## 5. 長期間海水浸漬した鉄筋コンクリートはりの ひびわれと内部鉄筋の腐食

関 博\*・丸山 浩\*\*

### 要 旨

鉄筋コンクリートはり（断面15×30cm，長さ1.8m，かぶり1.5cm，丸鋼φ13使用）を海水循環水槽に浸漬して，供試はりにあらかじめ発生させたひびわれと内部鉄筋の腐食傾向を検討した。供試はりは，1日2回の潮の干満を再現した水槽内の感潮部および海水中に静置した。試験は材令5年，7年および9年の時点において実施した。

試験結果によると，9年経過の時点においても pH 10~12 以下の領域はコンクリート表層2~6mm程度であって，ひびわれ発生箇所におけるサビが鉄筋腐食の主要因と考えられる。鉄筋に明瞭にサビが認められる状態であっても，ひびわれ幅が0.2mm以下では，鉄筋の強度特性に与える影響は小さく，材令9年においても腐食量は0.05~0.1mm程度であって，引張強度の低下も腐食の認められぬ鉄筋に比較しわずかである。鉄筋の強度特性の観点からは，明瞭にサビの認められる腐食発生率50%を基準とすると，海水環境中にある鉄筋コンクリートのひびわれ幅の限界値は，感潮部において0.15mm程度，海水中において0.2mm程度と考えられる。しかし，腐食はひびわれ箇所から鉄筋軸方向に，特に，鉄筋下面位置で左右に進行しており，腐食による鉄筋とコンクリートとの付着破壊の長さが，鉄筋コンクリートの部材耐力に及ぼす影響に関しては今後さらに検討する必要がある。

\* 構造部 コンクリート主任研究官

\*\* 前構造部 材料施工研究室

## 5. Corrosion of Steel Bars at Crack of Reinforced Concrete Exposed to Sea Environments

Hiroshi SEKI\*

Hiroshi MARUYAMA\*\*

### Synopsis

Reinforced concrete beams had been kept at the tidal zone and under the sea water in the sea tidal pool which simulated the natural sea condition of ebb and flow. Dimensions of beam specimens were 15cm wide, 30cm high and 1.8m long. Reinforcement embedded was round bars of  $\phi 13\text{mm}$  and concrete cover was 1.5cm. Load had applied to beam specimens in order to occur crack. Series of test was carried out at the age of five years, seven years and nine years.

Test results indicated that the area of less than 10 to 12 of pH was limited to 2 to 6mm from concrete surface of beam specimens even after nine years. The main factor of corrosion of embedded bars, therefore, may have been connected with crack section of beam specimens. Notwithstanding the stage of visible corrosion of the surface of reinforcing bars, corrosion did not always influence strength property of reinforcing bars under the condition that crack width was less than 0.2mm. Corrosion depth was approximately 0.05 to 0.1mm after age of nine years, and tensile strength decreased quite small compared to that of non corroded reinforcing bars. It may be considered from the standpoint of strength property of bars that allowable crack width of reinforced concrete beams was 0.15mm for beams exposed to the tidal zone and 0.2mm for beams under the sea water provided that half number of total bars would be visibly corroded.

Corrosion, however, developed at the longitudinal direction of bars from crack sections of beam specimens, especially, along lower surface of bars. Therefore, it must be of necessity to elucidate if bond failure between concrete and bars due to corrosion will influence bending property of reinforced concrete beams.

---

\* Senior Research Engineer, Structures Division

\*\* Ex. Member of Materials Laboratory, Structures Division

## 目 次

1. ま え が き	207
2. 試 験 方 法	207
2.1 供試体の諸元	207
2.2 暴露条件	210
2.3 試験方法	212
3. コンクリートの劣化	212
4. ひびわれと鉄筋の腐食	215
4.1 鉄筋の腐食状況	215
4.2 ひびわれ幅と鉄筋の発錆傾向	217
4.3 鉄筋軸方向における腐食の進行	219
4.4 鉄筋の腐食による断面変化	221
5. 結 論	223
謝 辞	224
参 考 文 献	224

## 1. ま え が き

港湾施設には、さん橋式けい船岸の床版、防波堤のケーソンなどに鉄筋コンクリート構造物が数多く供用されている。一方、港湾構造物は波浪・潮風などの物理的、化学的作用を受け、陸上構造物に比較して接する自然環境は著しく過酷である。厳しい自然条件下において、所要の機能を維持するためには、鉄筋コンクリートの材料のみならず構造部材としても長年月に亘って十分な耐久性が保持されなければならない。

本報告は、港湾技術研究所で実施している港湾・海岸環境中におけるコンクリート部材の耐久性に関する研究項目の一環をなすものである。港湾あるいは海岸施設には、重力式のコンクリート構造物が多く用いられ、これら無筋コンクリート体の劣化程度については、筆者の1人が現地調査を踏まえて報文を発表している<sup>1),2)</sup>。鉄筋コンクリートに使用されるコンクリートそのものの耐久性は、無筋コンクリートにおけると同様であるが、構造部材として捉えるときには別の観点からも耐久性を論じなければならない。すなわち、内部鉄筋の腐食とこれが部材耐力に及ぼす影響に関してである。“コンクリートの耐久性”とは多くの内容を包含するものであるが、本文では港湾構造物にとりわけ重要と考えられるひびわれと内部鉄筋の腐食について検討を行なった。

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の発錆要因および発錆過程について、電気化学的立場から概述した報文は多く発表されており<sup>3),4),5)</sup>、また、自然環境下における暴露試験結果も数例散見される<sup>6)-8)</sup>。しかし、ひびわれ箇所における鉄筋の腐食機構は、コンクリート中の鉄筋における腐食機構と著しく異なると考えられ、また、腐食の程度も顕著であるにもかかわらず、腐食機構を考察した基礎的な研究報告は皆無に近い。表面ひびわれと内部鉄筋の腐食傾向を検討した報告例もあるが<sup>9)</sup>など、いずれも測定値の変動が大きく、また、腐食の評価方法にも多くの問題が残されている。神山<sup>10)</sup>は鉄筋の腐食を、コンクリートと鉄筋のはく離長さ、腐食長さ、コンクリートのかぶりなどの観点から追求しており、ひびわれと鉄筋の腐食に関する極めて有意義な示唆を与えていると考える。

諸外国の規準には、鉄筋コンクリートの許容ひびわれ幅の規定が散見されるが<sup>11),12)</sup>など、鉄筋の腐食は外気の温度、湿度などの影響が大きく、これらの相違する我が国においてこの値をそのまま適用することは妥当ではない。特に、自然条件の過酷な港湾環境においては、同等

または類似の環境下に暴露された供試体の長期実験を基礎に議論を展開するのであれば、問題を適正に評価することは困難である。

上述の観点から、ほぼ10年程前に港湾技術研究所において、鉄筋コンクリートの耐久性を表面ひびわれと内部鉄筋の腐食の観点から取り上げ長期実験を開始した。海水の作用を自然環境と類似させるために、1日2度の潮の干満を模した海水循環水槽を造り、水槽中の感潮部および海水中部に鉄筋コンクリートはり供試体31本を設置して長期間実験を継続した。この間、5年、7年試験を実施し、5年試験についてはその結果を発表している<sup>13)</sup>。昭和47年、材令9年に達した時点においてさらに供試体を海水循環水槽から引揚げ試験に供した。本文は、5年、7年および9年試験の結果を取り纏めたものである。供試体の諸元、浸漬条件など既設の港湾構造物の諸条件をすべて満足するものではなく、本試験結果が港湾構造物の鉄筋コンクリート部材のひびわれと内部鉄筋の腐食に関するすべての問題を包含しているものではないことは当然である。今後、さらに、微視的あるいは化学的立場からのひびわれからの腐食現象の追求、および、既設構造物におけるひびわれと鉄筋腐食の実態を調査・研究し、港湾構造物の耐久性の問題を解明することが必要であると考えている。

## 2. 試験方法

### 2.1 供試体の製作

暴露試験に使用した供試体は鉄筋コンクリートはりで、一部はプレキャストコンクリートにより製作した。使用したセメント、混和材料、骨材の諸性質は表-1に示している。はりは、断面15×30cm、長さ180cmの形状を有し、その配筋は図-1に示すようにA、B、CおよびDの4種の型式である。コンクリートのかぶりはいずれも1.5cmであり、用いたコンクリートの配合は表-2に示した通りである。主鉄筋はφ13mmの丸鋼(降伏点2,900kg/cm<sup>2</sup>~4,900kg/cm<sup>2</sup>)を使用した<sup>14)</sup>。主鉄筋、スタラップいずれも脱脂などの表面処理は施していない。

供試体はりは、ほぼ4週経過後に載荷試験を行なった。これは、スパン間隔1.65mとし、荷重はスパン0.55mの2点載荷とし、ほぼはりの破壊近傍まで荷重を加えた。はり中央の上縁および鉄筋に添付したストレイン・ゲージによるひずみの測定結果の1例は、図-2に示す通りであって、はりの圧縮縁におけるコンクリートのひずみはコンクリートの最大強度を超過し、鉄筋の引張りひずみは降伏点に達していることを示している。従って、は

表-1 はりの製作に使用したコンクリート材料

材 料		普通コンクリートはり	プレパックドコンクリートはり
セメント		小野田普通ポルトランドセメント	小野田普通ポルトランドセメント
フライアッシュ		—	宇部ボゾラン
混和剤	減水剤	ボゾリス No.8	ボゾリス No.8
	発泡剤	—	アルミニウム粉末 A A12 (福田金属箔紛工業 K. K.) 鱗片状, 平均粒形 25 $\mu$
細骨材		神奈川県鶴沼海岸砂 比重 2.64, 吸水量 2.36%, 粗粒率 2.30	神奈川県鶴沼海岸砂 比重 2.64, 吸水量 2.36%, 粗粒率 1.44 (1.2mm 以下)
粗骨材		神奈川県酒匂川産 比重 2.77, 吸水量 1.2%, 粗粒率 6.90	神奈川県酒匂川産 比重 2.77, 吸水量 1.2% 15~20mm 50%    20~25mm 50%

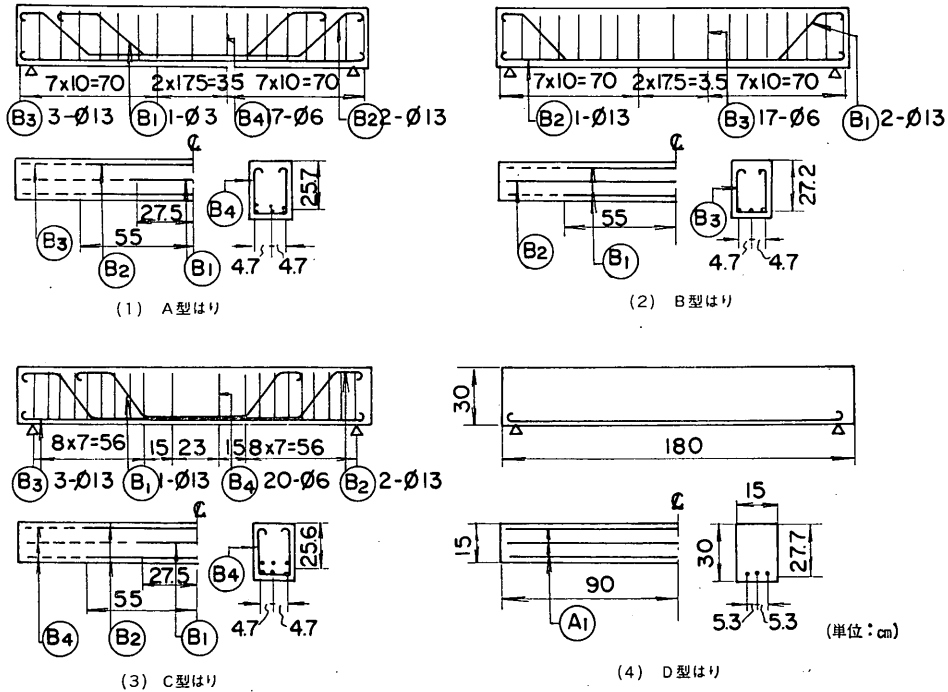


図-1 鉄筋コンクリートはりの形状, 寸法および配筋図

表-2 鉄筋コンクリートはりの暴露条件およびコンクリートの性質

腐食試験 材令(年)	はり番号	はりの 配筋型式	暴露条件(年)		コンクリートの配合						コンクリートの 強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		備考		
			陸上	海水循環水槽	W/C あるいは W/C+F (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Al	圧縮強度	曲げ強度			
						W	C あるいは C+F	S	G					Poz	
5年	S5NA	A	4	海水中	44	140	321	689	1234	0.83	—	271	24		
	S5NC	C	4	海水中	58	161	278	725	1219	0.70	—	245	—		
	T5NB1	B	4	感潮部	58	161	278	725	1219	0.70	—	245	—		
	T5NB2	B	4	感潮部	58	161	278	725	1219	0.70	—	245	—		
	T5NB3	B	4	感潮部	58	161	278	725	1219	0.70	—	245	—		
	T5NC1	C	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—		
	T5NC2	C	4	感潮部	58	161	278	725	1219	0.70	—	245	—		
	T5PD1	D	4	感潮部	53	157	298	375	1590	0.74	0.045	162	—		
	T5PD2	D	4	感潮部	48	168	352	358	1590	0.88	0.053	205	—		
	T5PD3	D	4	感潮部	49	173	351	356	1590	0.88	0.053	219	—		
	7年	S7PA1	A	4	海水中	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31	
		S7PA2	A	4	海水中	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31	
T7NB1		B	4	感潮部	78	178	228	749	1124	0.70	—	128	—		
T7NB2		B	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—		
T7NB3		B	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—		
T7NB4		B	4	感潮部	44	140	321	689	1234	0.83	—	271	24		
T7NC		C	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—		
T7ND		D	4	感潮部	64	177	277	743	1197	0.70	—	212	—		
T7PB		B	4	感潮部	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31		
T7PC		C	4	感潮部	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31		
S9NC1		C	4	海水中	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—		
S9NC2		C	4	海水中	64	177	277	743	1197	0.70	—	212	—		
S9PA	A	4	海水中	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31			
S9PC1	C	4	海水中	49	146	297	297	1732	0.75	0.044	136	21			
S9PC2	C	4	海水中	49	146	297	297	1732	0.75	0.044	136	21			
S9PD	D	4	海水中	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31			
T9NA	A	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—			
T9NB1	B	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—			
T9NB2	B	4	感潮部	78	177	227	782	1158	0.57	—	146	—			
T9PC	C	4	感潮部	49	146	297	297	1732	0.75	0.044	136	21			
T9PD	D	4	感潮部	44	204	463	463	1732	1.17	0.069	202	31			

(注) コンクリートの強度は標準養生を行なった3個の供試体(φ15×30cm および 15×15×60cm)の材令28日における平均値である。



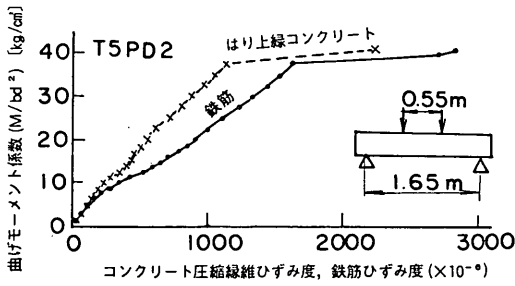


図-2 荷重試験におけるひずみの測定結果

り中央に塑性ヒンジが形成された状態であることを示している。他のはりにおいても、曲げ破壊あるいはせん断破壊を示す著しいひびわれが認められている例が多い。荷重解放後、鉄筋位置におけるひびわれ幅を測定し、発生状況を記録した。

ひびわれ幅の測定には、接眼鏡（最小目盛 1/100mm）を用いた。測定箇所は、はりの両側面、鉄筋の重心位置である。はり荷重試験後のひびわれの状態の1例は写真-1に示している。

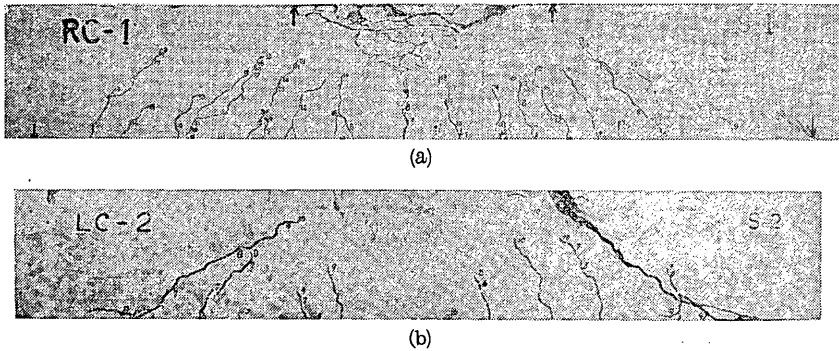


写真-1 鉄筋コンクリートはりの荷重試験後のひびわれの状態

## 2.2 暴露条件

荷重試験の完了した供試体はりは、4年間屋外に放置し、以後所定の材令まで海水中に浸漬した。屋外放置の場所は海岸線より15m程度離れ、気温は $-1.2^{\circ}\text{C}$ ～ $32.4^{\circ}\text{C}$ （年平均 $14.7^{\circ}\text{C}$ ）程度で、四季を通じて激しい潮風を受ける上に、年間数日は荒天時に海水のしぶきを浴びる場

所である。海水中への浸漬は、海水循環水槽内に設置したもので、この循環水槽の構造、および、はりの設置位置は図-3、写真-2に示している。本装置は常時前面の海より新しい海水をくみ上げて補給しながら潮の干満を再現し、図示の最高、最低潮位間を6時間ごとに上下する自動制御の給排水装置をとりつけたものである。所定月

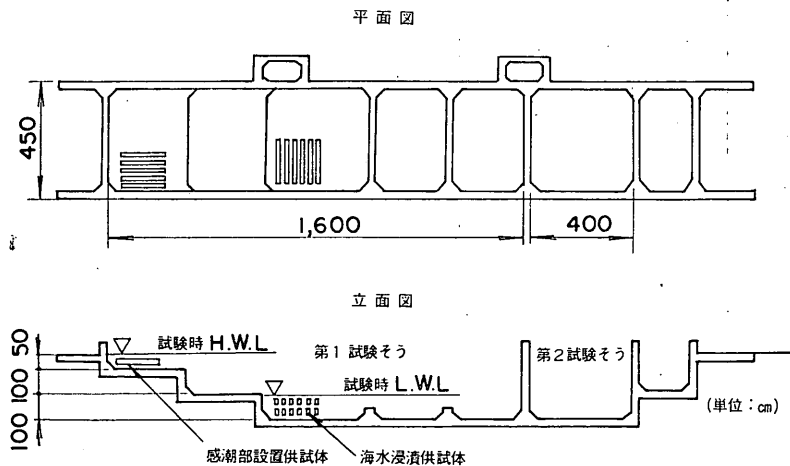


図-3 海水循環水槽概要図

コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

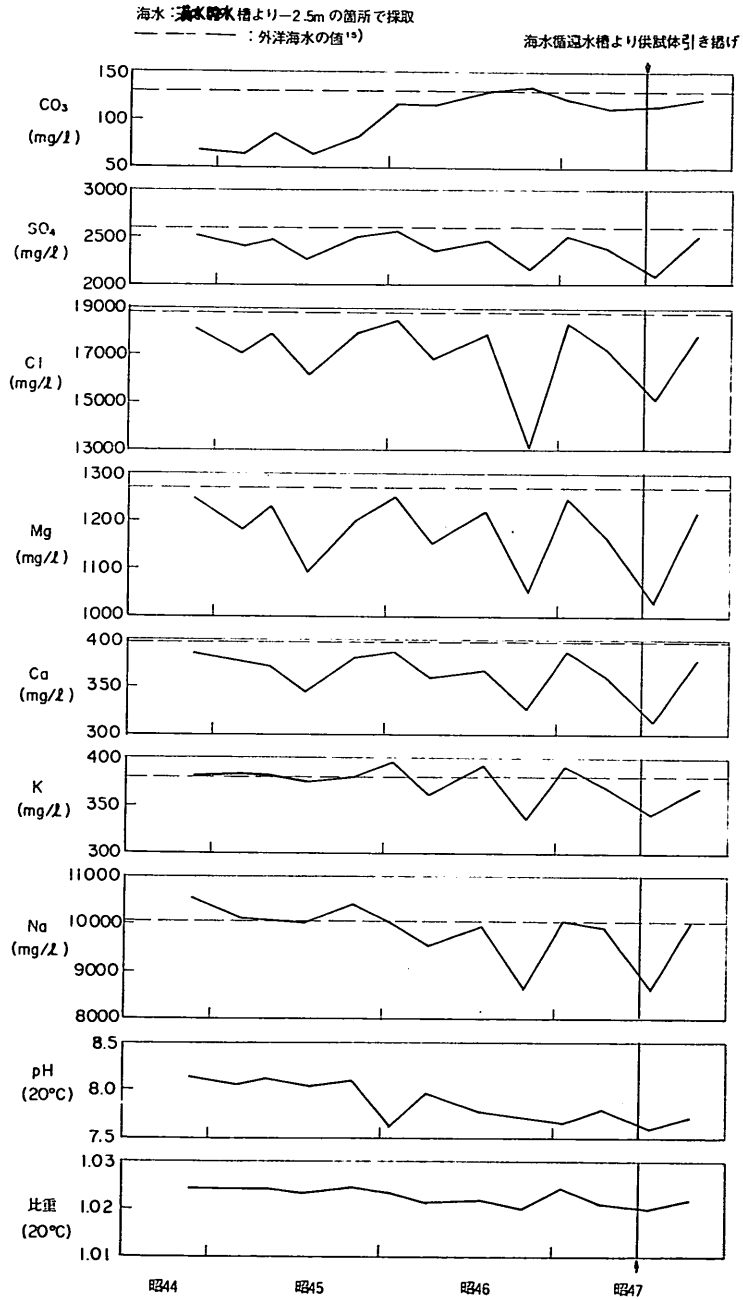


図-4 海水循環水槽海水分析結果

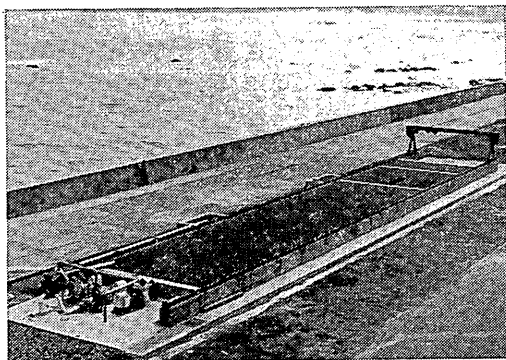


写真-2 海水循環水槽

毎に測定された海水の分析結果は図-4に示している。

### 2.3 試験方法

供試体は所定の材令経過後、ひびわれ幅の測定、はり断面の中性化状況の測定および鉄筋腐食の程度の3項目について測定を行なった。

#### (1) ひびわれ幅

ひびわれ幅の測定法は、2.1に述べたと同一の方法で行なった。

#### (2) 中性化試験

材令7年後に海水循環水槽より引き揚げたはり T7NB1, T7NB4, および材令9年後に引き揚げたはり S9NC2, の合計3本のはりに関して、断面のpHの程度の測定を実施した。これは、ひびわれの発生した箇所、ひびわれの観察されない箇所を任意に選定し、コンクリートカッターにより断面を切断したのちに、それぞれの断面に、フェノールレッド(0.10g+N/50NaOH溶液14.20cc+H<sub>2</sub>O(→100cc)), チモールブルー(0.1g+N/50NaOH溶液10.75cc+H<sub>2</sub>O(→250cc)), フェノールフタレイン(1% C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH溶液), アリザリンエローGG(0.1g+C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH(95容量%)50cc+H<sub>2</sub>O(→100cc))を散布してコンクリート表面の変色の程度を観察し、鉄筋コンクリートはり断面のpHの分布状態を求めたものである。それぞれの指示薬のpH変色領域は次の通りである。

フェノールレッド : 黄 6.8~8.4 赤  
 チモールブルー : 黄 8.0~9.6 青  
 フェノールフタレイン: 無 8.2~10.0 赤  
 アリザリンエローGG: 黄 10.0~12.0 かつ色

変色域は、トレーシングペーパーにトレースの後、プランメータによりその面積を測定し、はり断面の外周を除いて平均変色深さを求めた。

#### (3) 鉄筋の腐食

鉄筋の腐食の程度に関してはさく岩機により供試はりを破壊した後、材令5年のはりについては肉眼観察による腐食程度、材令7年および9年のはりについてはこのほかに腐食長さの測定、腐食面積の測定、腐食による重量変化、腐食した鉄筋の引張試験の4種の方法によって評価した。

肉眼観察に関しては、腐食の程度をH(明瞭に腐食が観察されその程度が著しいもの)、L(かろうじて腐食が観察されるか、または鉄筋表面に変色が認められるもの)、N(腐食の観察されぬもの)の3種に分類して、それぞれのひびわれに対応する鉄筋位置の発錆状況の評価した。

腐食長さは、測尺を使用しcm単位まで測定した。

腐食面積の測定には、腐食した箇所にトレーシングペーパーをあてトレースして、プランメータを用いることによって求めた。

発錆による鉄筋の重量域を求めるためにクエン酸アンモニウム溶液を使用した。すなわち、発錆の見られる鉄筋を約10cmの長さに切断し、鉄筋表面のモルタル付着などをブラシで除去して重量を測定する。この作業完了後、クエン酸アンモニウム溶液(10%水溶液)に浸漬する。ほぼ24時間を経過した時点で水洗し、アルコール溶液に漬け、鉄筋表面の水分を除く。ここで、再び重量を測定し、クエン酸アンモニウム溶液浸漬前と比較することにより、腐食による鉄筋の重量変化を計算する。なお、これと並行して、上記試験片とほぼ同一の長さを有する同一径の鉄筋を用い、同一の溶液に浸漬して重量減を求め、クエン酸アンモニウム溶液浸漬による未腐食部分の重量減少量を補正した。使用したばかりは、精密天びん(E. Mettler社製, 1Div.=1mg)である。鉄筋直径の測定には、ギス(1/20mm目盛)を用いた。

数本の鉄筋コンクリートはりに関しては、腐食程度の著しいもの、腐食のほとんど認められないものなどを選定し、ほぼ50cm程度の長さに鉄筋を切り出し、引張強度試験に供した。引張試験は、JIS Z 2241金属材料引張試験方法に準じて行なった。

### 3. コンクリートの劣化

供試はり海水循環水槽より引き揚げた後、表面観察を行なった結果では、コンクリート表面は予想されたより海水中生物の付着は少なかった。しかし、一部供試体では、表面にふじつば類の付着していた跡が見られる。写真-3は、海水循環水槽に5年浸漬した供試体の、はり下面の状況を示している。

コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食



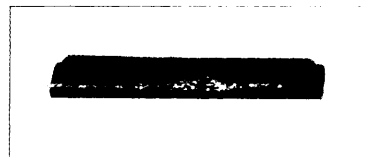
写真-4 鉄筋付近におけるコンクリートの中酸化状況 (はり T5PD2)



写真-5 はり断面の変色状況の一例 (フェノールフタレイン使用)



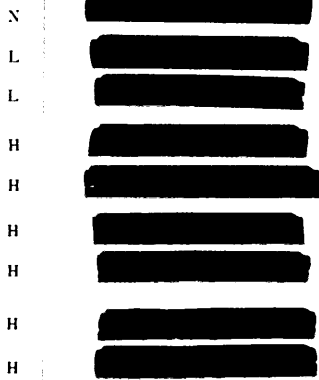
(a) 鉄筋切断時



(b) クエン酸アンモニウム処理後

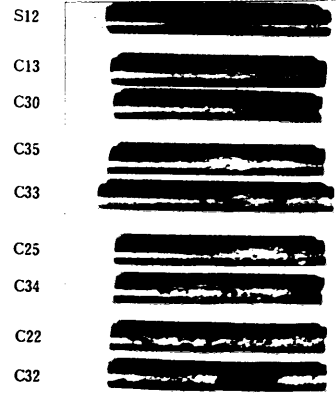
写真-7 鉄筋下面の集中腐食

腐食の種類記号



a 鉄筋切断時

試験片番号



b クエン酸アンモニウム処理後

写真-8 鉄筋の腐食程度 (はり T9PC2)



写真-3 はり下面の海中生物の付着状況 (写真上下ははり側面, 左右方向ははり軸)

コンクリート表面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を塗布して中性化の状況を調べると、色調の変化は認められず、表面においては明らかに、pHが8.2以下に低下していることがわかる。材令7年の供試体について、ひびわれの発生していない箇所のはり下縁のコンクリートを2cm程度は取り取って、鉄筋を露出させ中性化の状況を観察した。結果は写真-4に示すように、はり表面を除いて塗布したフェノールフタレイン溶液は赤変した。材令9年の供試体においてもこの傾向はほぼ同様であり、約10年間、海水環境下に暴露されたコンクリートでは、中性化ははり表面に限定され、2cm程度

のかぶりであっても、かぶりコンクリートを通して鉄筋位置まで中性化は進行していないようである。

つぎに、はりの数本について断面を切断してpHを測定した。切断したはりは、いずれも普通コンクリートであって、材令7年においては感潮部に静置したはり、材令9年においては海水中に浸漬したはりを試験に供した。写真-5および図-5では、各種指示薬を用いた変色域の状態の1例を示しており、表-3はその試験結果である。ここで平均深さとは、指示薬により変色せぬ領域面積を周長で除した値である。

観察結果では、概して供試体上縁における平均深さが下縁における平均深さに比して大きいようである。はりによって若干の相違は認められるが、一般に、フェノールレッド、チモールブルー、フェノールフタレイン、アリザリンエロ-GGの順序で、平均深さは大きな値を示す傾向にある。はりT7NB1は他のはりに比較して平均深さが大きい、主として、使用されたコンクリートが貧配合であることに由来すると考えられる。

筆者の一人は、主としてフライアッシュを使用した港湾構造物の平均中性化深さを調査している<sup>1)</sup>。調査結果によると材令20年ではほぼ5mmであった。また、既設の海岸構造物を同様にフェノールフタレイン1%アルコール溶液塗布により調査した結果では<sup>2)</sup>、コンクリートの品質によって相当の相違が認められたが、良品質と考えられるコンクリートの平均中性化深さは、材令15~41年で1.2~9.7mm程度の範囲にあった。上記調査例は、構造物がいずれも海面上に位置し、いわゆる、潮風のみ(荒天時には波しぶきの)作用を受けるコンクリートであり、本文における、感潮部ないし海面下にある構造

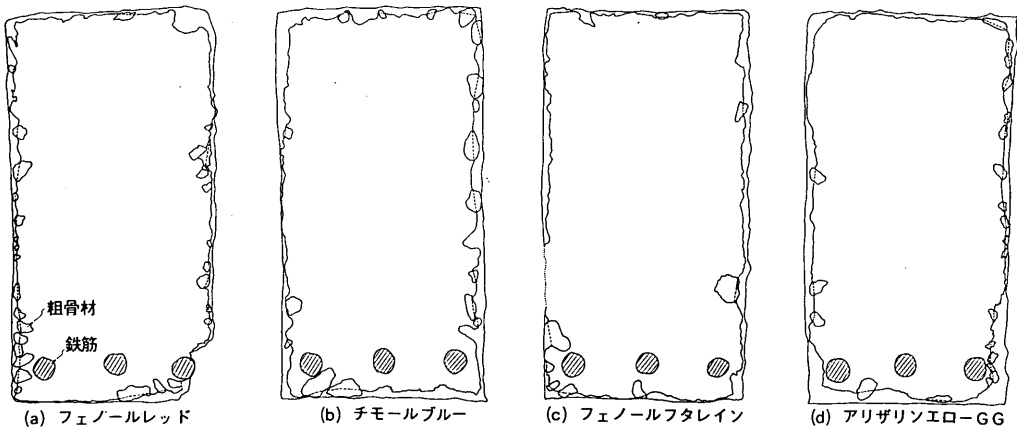


図-5 指示薬によるコンクリートはり断面の変色状況

コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

表-3 指示薬によるはり断面のコンクリートの変色領域

はり番号	暴露条件	切断箇所	指示薬名	指示薬の変色せぬ平均深さ(mm)	備考
T7NB1	陸上4年 感潮部3年	1-1'	フェノール・レッド	4.0	
		2-2'	チモール・ブルー	5.7	
		3-3'	フェノールフタレイン	4.0	
		4-4'	アリザリン・エロー GG	5.6	
T7NB4	陸上4年 感潮部3年	1-1'	フェノール・レッド	1.3	
		2-2'	チモール・ブルー	1.6	
		3-3'	フェノールフタレイン	1.9	
		4-4'	アリザリン・エロー GG	2.3	
S9NC2	陸上4年 海水中5年	2-2'	フェノール・レッド	2.7	
		7-7'		2.2	
		4-4'	チモール・ブルー	3.0	
		6-6'		2.4	
		3-3'	フェノールフタレイン	3.1	
8-8'	2.7				
1-1'	アリザリン・エロー GG	2.8			
5-5'		3.6			

物と暴露条件は相違する。本試験の結果は、材令7年で4.0mmおよび1.9mm、材令9年で2.9mmであり、単位セメント量約300kgを使用した圧縮強度200kg/cm<sup>2</sup>以上のT7NB4およびS9NC2では現地調査例を下廻る値であると思われる。これは、空気とりわけ炭酸ガスの接触する条件の差違に基づくものと考えられる。

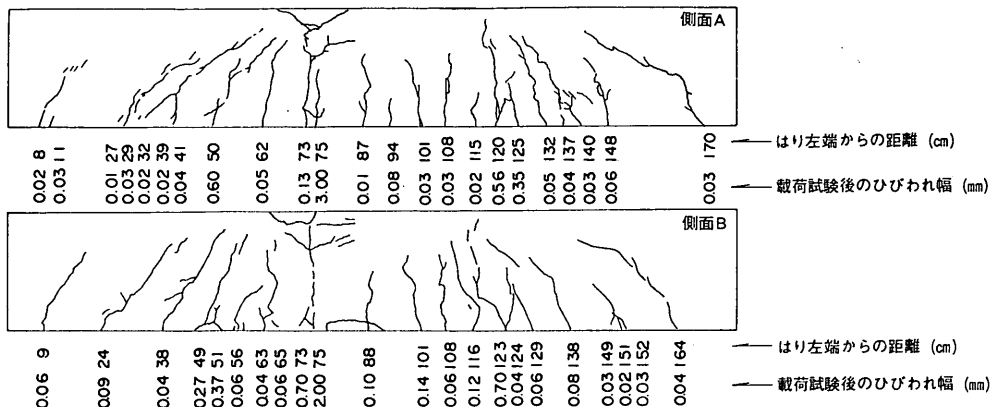
コンクリート中、あるいは、これに類似の溶液を使用して鉄筋の防錆に必要なpHの限界値を測定した例に2, 3の報文がある。R. ShalonとM. Raphael<sup>16)</sup>によると、水酸化カルシウム溶液中では、空気量が少ない場合pH=11.5、空気量が多い場合pH=12.0であるとし、また、海水を用いたコンクリートの抽出液中での限界値を、空気量が少ない場合pH=12.6、空気量が多い場合pH=12.75であると報告している。善は水酸化カルシウム溶液中での鉄筋の発錆限界をpH=12.6付近と考えている<sup>17)</sup>。岸谷によると、不動態化を妨げる多量の塩素イオンなどが存在しないときpHの限界値は10程度であるとしている<sup>4)</sup>。コンクリート中のpHを水酸化カルシウム溶液のpHに置き換えて限界値を論ずる場合には、若干の問題は残るが、おおよその目安としては、限界値はpH=10~12付近であると考えて大きな誤りはないであろう。

したがって、表-3からアリザリン・エローGGによる変色せぬ平均深さを検討すると、供試はりによって相違するが、2~6mm程度である。本試験に供したはりのかぶりは1.5cmであり、材令9年を経過した時点においても、コンクリート中を浸透すると考えられる水分、酸素、塩分による鉄筋発錆の可能性は少ない。ただし、貧配合のコンクリートを使用した場合、施工が不十分である場合などには、コンクリートの透水係数が大きいと考えられ、コンクリートの密実度に左右されると思われる。しかし、本試験に用いたコンクリートの配合、供試体形状(かぶり)、施工方法、暴露条件下においては、コンクリート中からのサビ発生の要因は少なく、発錆の主たる原因は供試はりの曲げひびわれに基づくと考えて差し支えないと思われる。

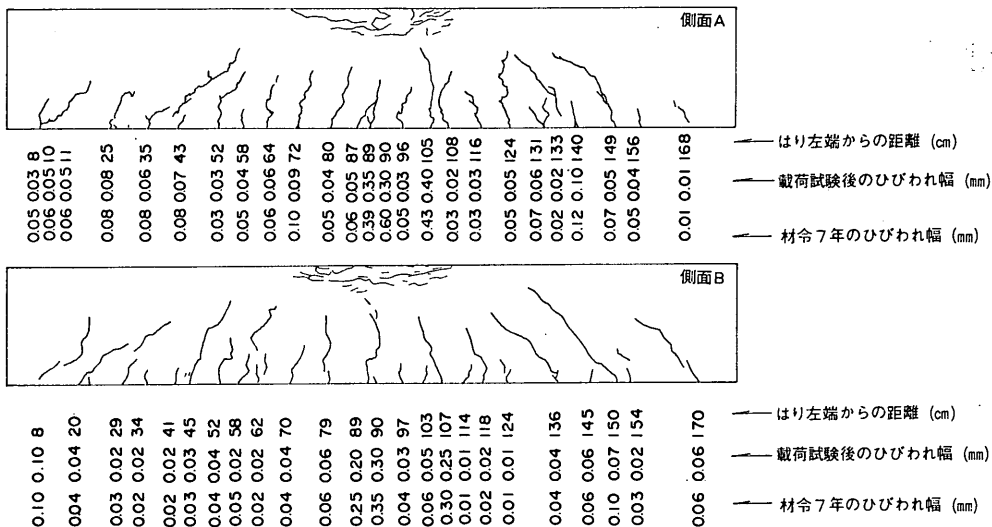
#### 4. ひびわれと鉄筋の腐食

##### 4.1 鉄筋の腐食状況

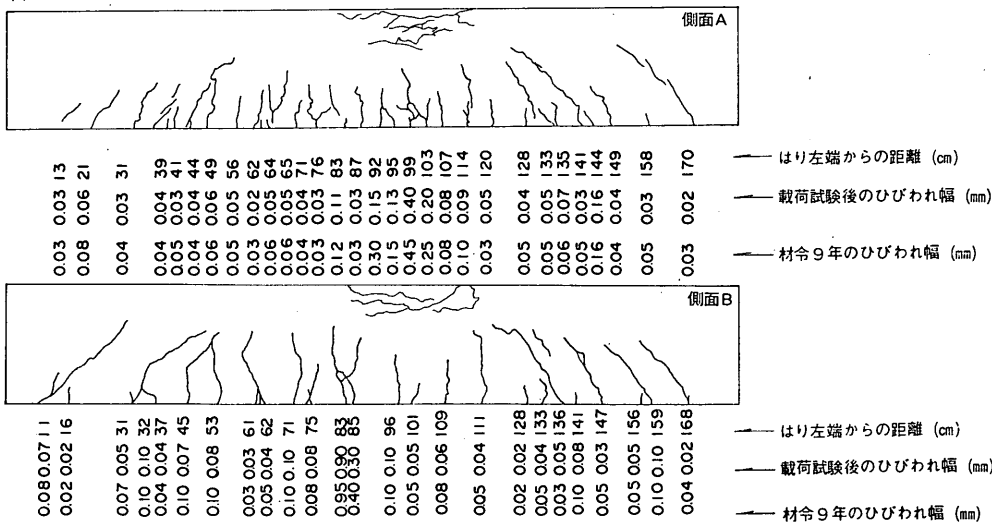
供試体引き揚げ時のひびわれ幅の測定結果の1例は、図-6に示す通りである。ひびわれ幅はすべて鉄筋重心位置で測定した。はり載荷試験後のひびわれ幅測定結果を多少上廻るものも認められるが、測定者によるひびわれ幅の測定箇所の相違も考えられ、ひびわれ幅の変化は予



(a) はり供試体 S5NA : 陸上 4年 海水中 1年



(b) はり供試体 S7PA2 : 陸上 4年 海水中 3年



(c) はり供試体 S9PC2 : 陸上 4年 海水中 5年

(ひびわれ幅は重心位置における値)

図-6 はりのひびわれ幅観察結果の一例

## コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

想されたよりもはるかに小さく、ほぼ荷重解放後のひびわれ幅を維持して海水循環水槽中において海水の作用を受けたものと考えられる。したがって、本文では、供試体暴露時のひびわれ幅を基準として、鉄筋の腐食傾向を検討することとした。

実際構造物では鉄筋軸方向に沿って、ひびわれが発生し、かぶりコンクリートがはく落する例がよく見られるようである。本供試体においては、供試下縁のひびわれは曲げひびわれのみであって、鉄筋位置に沿った軸方向ひびわれは見られなかった。鉄筋の腐食は曲げひびわれにはほぼ対応するようである。写真-6は、はりの下半分のコンクリートをはつり取り、鉄筋の露出した状態を示している。写真中央は、はりのほぼスパン中央に相当し、ひびわれのもっとも著しい箇所であるが、ひびわれに対応した鉄筋のサビの状況が観察される。陸上放置後1年間海水循環水槽中に静置した供試体では、鉄筋表面のサビの発生は比較的少ないが、5年間水槽中に設置した供試体の腐食は概して著しい。また、ひびわれ幅の大きな箇所の鉄筋では、サビの溶出ないしはく離によって、明瞭に断面減少の認められる例もある。特に、ストレージを接着した箇所の腐食は顕著である。これは、リード線、コンスタンタン線、鉄筋の間に腐食電池が形成され、鉄筋がアノードとなり腐食が促進されたものと考えられ、この部分の鉄筋の腐食はデータ整理の段階で除外することとした。

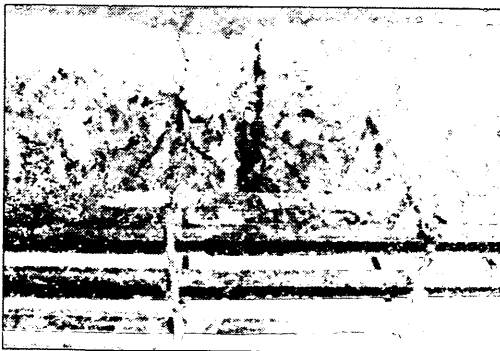


写真-6 内部鉄筋のサビの状況 (はり T5NC1)

サビはほぼ鉄筋全周に亘って観察される例もあるが、また、著しい腐食を呈する場合でも、それが、鉄筋下面に限定されるものもある。コンクリート打設時に、鉄筋下面にブリージング水が滞留し、組織的にこの部分が空隙の大きいコンクリートとなったためと考えられる。

鉄筋の腐食面積は小さいが、サビが鉄筋内部に進行した状況の腐食例も見られる。いわゆる、孔食に属するも

のと思われるが、表面観察では比較的捉え難い。しかしクエン酸アンモニウム溶液に浸漬して、サビを溶出させると、写真-7で1例を示すように、局部腐食をある程度明瞭に判定することができる。

写真-8は、供試はり T9PC (陸上4年、感潮部5年) について、試験片のサビの程度を示したものである。写真上方はまったく発錆の認められぬ鉄筋であり、以下、下方に向うに従ってサビの著しい鉄筋を例示してある。試験片 S12はまったくサビの認められぬもの(記号N)、試験片 C13、C30は腐食の痕跡が肉眼で識別できるもの(記号L)、その他は腐食が明瞭に認められるもの(記号H)、の3種に類別化した。したがって、記号Hの試験片は、腐食が著しく断面減少を伴うものまでを含み、広い範囲のサビの領域を規定することとなる。

### 4.2 ひびわれ幅と鉄筋の発錆傾向

鉄筋コンクリートはり表面の鉄筋軸位置におけるひびわれ幅と、内部鉄筋が腐食する割合(以下、本文では腐食発生率と呼ぶこととする)を示したものが表-4である。表-4において、腐食発生率0%とは、たとえば、評価Lでひびわれが発生していても、対応する箇所のすべての鉄筋に腐食が認められないことを表わし、評価Hで腐食発生率100%とは、すべての鉄筋が著しく腐食していたことを示している。図-7は、5年試験および9年試験に関し、主として腐食が明瞭に認められるもの(評価H)を基準として、鉄筋の腐食発生率を図示したものである。なお、ひびわれ幅の大きな位置の鉄筋については、測定値が少ないために、以下では0.2~0.3mm以下のひびわれ幅を主に考察の対象とすることにする。

図-8によると、海水中に浸漬した供試はりにおいては表面ひびわれ幅が0.3~0.4mm程度ではほぼ確実に鉄筋は腐食すると言い得るようである。9年経過の時点においては、ほぼ0.1mmのひびわれ幅で内部鉄筋の50%は発錆し、0.25mm程度のひびわれではすべての鉄筋にサビが認められる。ひびわれ幅が0.1mm以下であっても、評価Hのサビは観察されるが、鉄筋の腐食発生率50%を基準として検討すると、材令9年において評価L+Hおよび評価Hのサビが発生するひびわれ幅は、0.1mmおよび0.2mm程度と想定される。

感潮部に設置した供試はりの、材令9年における発錆傾向は、海水中に浸漬した供試はりに比較し若干大きくなるようである。ほぼ0.15mmのひびわれ幅で、内部鉄筋は確実に腐食されるようである。鉄筋の腐食発生率50%近辺におけるひびわれ幅は、評価L+Hおよび評価Hのサビで、それぞれ、0.05mmおよび0.15mmと、海



表-4 ひびわれ幅と筋鉄の腐食発生率

ひびわれ幅 (mm)	5年試験 (4年陸上) 腐食発生率						7年試験 (4年陸上) 腐食発生率						9年試験 (4年陸上) 腐食発生率										
	海中1年			感潮部1年			海中3年			感潮部3年			海中5年			感潮部5年							
	N (%)	L (%)	H (%)	測定数	N (%)	L (%)	H (%)	測定数	N (%)	L (%)	H (%)	測定数	N (%)	L (%)	H (%)	測定数	N (%)	L (%)	H (%)				
0.02	100	0	0	16	63	25	12	35	63	26	11	20	80	15	5	31	74	23	3	29	76	14	10
0.05	88	10	2	86	60	20	20	55	60	20	20	61	52	20	28	128	65	30	5	34	41	27	32
0.10	78	—	22	34	67	24	9	14	14	65	21	22	27	27	46	29	41	59	0	8	12	63	25
0.15	38	38	24	13	31	31	38	2	50	0	50	5	0	20	80	11	18	55	27	5	0	40	60
0.20	—	—	—	9	44	12	44	2	0	50	50	3	33	33	33	5	20	20	60	—	—	—	—
0.25	—	—	—	4	25	25	50	2	0	50	50	3	33	67	0	2	0	0	100	—	—	—	—
0.30	50	—	50	12	33	17	50	—	—	—	—	1	0	0	100	1	0	0	100	1	0	0	100
0.40	—	50	50	3	33	33	33	2	0	100	0	2	50	0	50	—	—	—	—	—	—	—	—
0.50	—	—	—	9	67	11	22	—	—	—	—	2	0	0	100	2	0	0	100	—	—	—	—
0.60	6	—	67	6	33	17	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.70	4	—	75	2	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

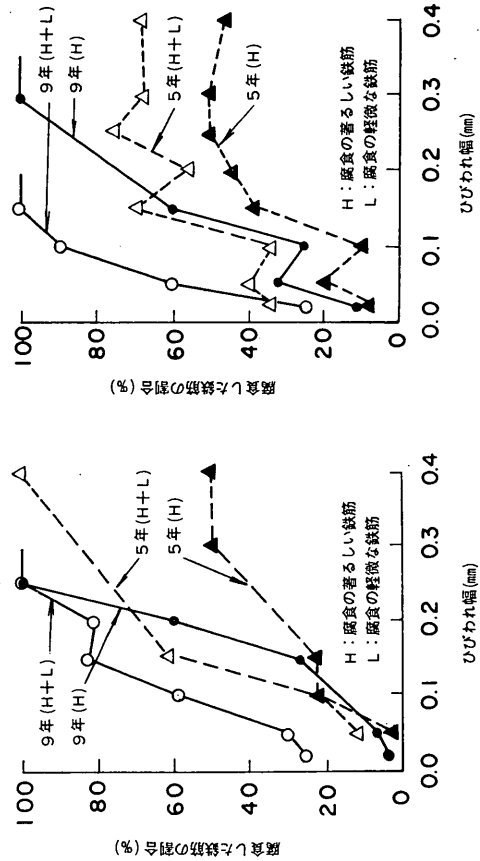


図-7 ひびわれ幅と鉄筋の腐食 (a) 海水中浸漬 (b) 感潮部設置

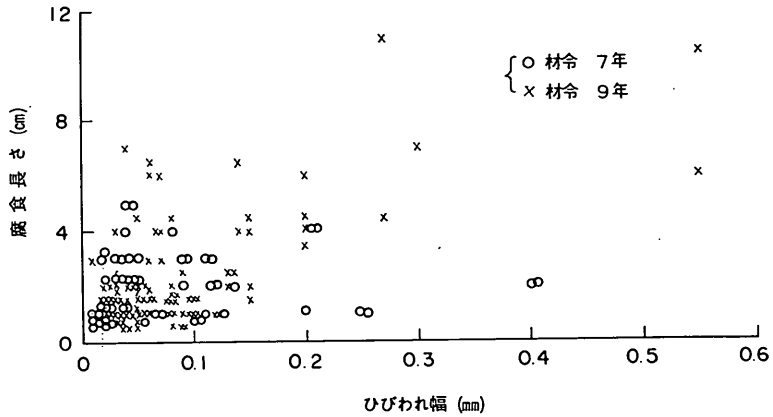
コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

水中に浸漬した供試はりのひびわれ幅を0.05mm程度下廻る値であった。感潮部においては、潮の干満による酸素供給量が大きく、また、ある程度海水の交換により、海水中に比較し鉄筋の腐食の進行が容易な環境にあったものと推定される。しかし、ひびわれからの吸い上げ現象による海水の流入程度、ひびわれ部分の海水の循環、酸素の進入、ひびわれ部分のセメント硬化体によるアルカリ性の保持などの現象、ひびわれ箇所からの塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)の浸透、あるいは、これらの要因が鉄筋の腐食に及ぼす程度については明らかではなく、今後、これらの関係を捉える基礎的研究を推進する必要がある。

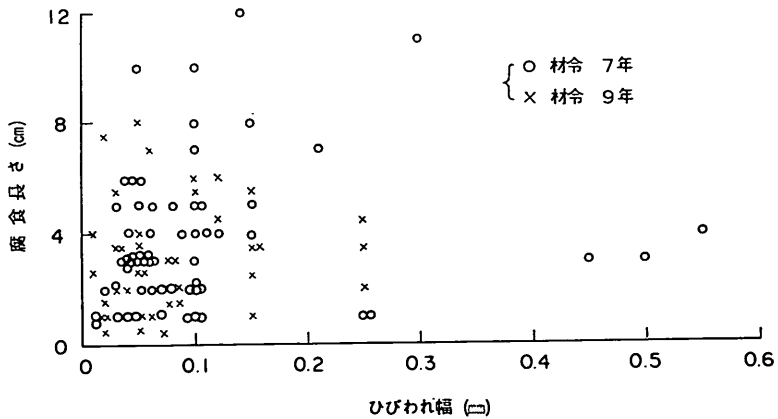
4.3 鉄筋軸方向における腐食の進行

4.2で述べたように、ひびわれ発生箇所において内部鉄筋は腐食するが、一方、腐食そのものはひびわれ箇所を中心として鉄筋軸方向に進行する。

図-8は、鉄筋コンクリートはり表面のひびわれ幅とその箇所に対応する内部鉄筋の腐食の軸方向長さを示したものである。測定値が相当にバラついているために一般的傾向を捉えることは困難であるが、表面ひびわれ幅が0.1~0.2mm程度であっても、腐食長さは4~8cmに達するようである。神山は両引き供試体を用いて、表面ひびわれ幅と内部鉄筋の腐食の傾向を検討している<sup>10),18)</sup>。供試体は東京都内の大学の構内に静置し長期暴露試験を実施した。したがって、暴露条件は本試験とは相違す



(a) 海水中浸漬供試はり



(b) 感潮部設置供試はり

図-8 ひびわれ位置における鉄筋の腐食長さ

る。神山によると、鉄筋の腐食長さは、コンクリートのかぶり、ひびわれ幅、鉄筋に載荷した引張応力度、鉄筋径などによって影響を受けるようである。実験条件が同一でないために、直接に比較することは無理を伴うが、たとえば、腐食長さに関する神山の実験式を本結果に適用すると、

$$l_r = 4,440w_r - 20$$

$w_r$  は残留ひびわれ幅であり、0.1mmおよび0.2mmのひびわれ幅に適用すると、腐食長さ  $l_r$  はそれぞれ、42cm および 89cm となる。前述したように、供試体形状、コンクリートのかぶり、鉄筋径、載荷条件、暴露条件などの実験条件が、本実測値と良い符合を示さぬ主因と考えられる。

本実験結果によると、腐食長さは表面ひびわれ幅の500倍程度に達するようであるが、いかなる過程を経て

腐食長さが増大するものか明確に判定はできない。神山によると<sup>10)</sup>、荷重載荷時においてすでにひびわれ発生箇所において鉄筋とコンクリートははく離を生じているようである。たとえば、鉄筋径 25mm、鉄筋応力度 1400 kg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 50mm 以下の両引き供試体では、鉄筋とコンクリートとのはく離長さは、ひびわれ幅 0.1mm で 3~10cm に達すると考えられる。したがって、本供試体の暴露試験開始時点において、鉄筋とコンクリートのはく離は発生していたと考えることが妥当と思われるが、本実験では、はく離長さとの関係は明確に分離することはできない。

鉄筋コンクリート体中に埋設された鉄筋の電位傾向を考察すると、ひびわれ箇所の鉄筋露出部分がアノードとなり、コンクリート中鉄筋はカソードとなる<sup>17)</sup>。すなわち、露出した鉄筋の腐食は促進され露出近辺の鉄筋が防

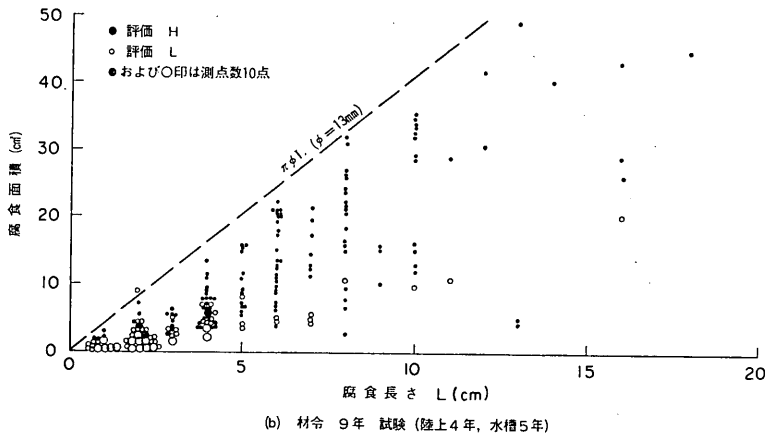
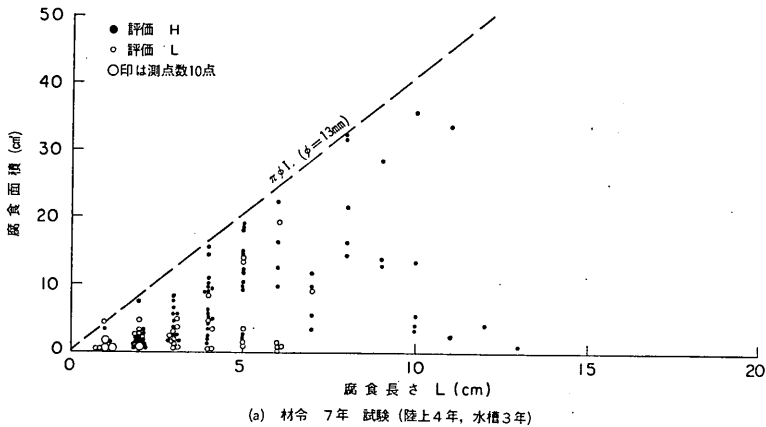


図-9 鉄筋発錆箇所における長さと同面積

錆されることとなる。露出した鉄筋面積 ( $A_e$ ) がコンクリート中に埋設された鉄筋面積 ( $A_c$ ) に対し、 $A_c/A_e \ll 1$  である場合には、溶存酸素濃度による腐食電池の形成は無視され<sup>17)</sup>、ひびわれ箇所の鉄筋の腐食はマイクロ腐食に基づくと考えられる。しかし、 $A_c/A_e \gg 1$  の状態ではひびわれ部分のマクロ腐食が進行するが、はく離が鉄筋軸方向に広範囲に発生している場合にはマクロ腐食の影響は減少すると考えられる。したがって、鉄筋軸方向の腐食の原因は、すきま腐食も一因と思われる。

鉄筋がある長さを有しサビが発生していたとしても、全周に発錆しているわけではない。図-9は、腐食長さ  $l$  の区間における腐食面積を明示したものである。破線は、腐食長さの区間様にサビが発生したときの面積を示しているが、破線上あるいは破線近辺にある測定値は少ない。鉄筋の腐食観察においても、4.1 で述べたように鉄筋下面のサビの進行が顕著であったが、コンクリートと鉄筋間に空隙が予想されるこの部分における鉄筋軸方向のサビが著しい。試験片によって相違するが、一般には全周一様に腐食の進行する例は少ないと言える。

#### 4.4 鉄筋の腐食による断面変化

##### (1) 腐食部分の断面変化

サビの発生した部分の試験片の重量減少率および平均減少厚を示したものが表-5である。ここで、重量減少率とは、クエン酸アンモニウム溶液処理による鉄筋の重量減少量を、腐食長さ部分の公称径 ( $\phi=13\text{mm}$ ) で計算した鉄筋重量で除した値である。また、サビ部分の平均減少厚とは、鉄筋の重量減少量を、鉄筋の比重を7.84と考え腐食面積で除して計算した値である。したがって、いずれも、腐食が同一幅で、かつ、同一厚さで進行するものと仮定してある。実際のサビの進行状況は、4.1 で述べたように、比較的均一に分布するものもあるが、一方では、局部腐食に近いサビの形態もあるため、本算定値が腐食による鉄筋断面変化を必ずしも正確に反映しているとは言えないようである。また、鉄筋表面のサビが浸漬実験中に海水中に溶出した場合、あるいは、はりのコンクリートをはつる作業中にサビがはく落した場合、このような状況下のサビの影響は含まれていない。しかし、一般には、サビの発生によって鉄筋表面に著しくサビの蓄積ないし、接触によってサビのはく落するものを除いては、表面が軽く腐食した鉄筋は重量減少率ないし平均減少率の測定値によって、おおよその腐食傾向を推察でき得ると考えられる。

表-5によると、サビの発生した部分の重量減少率は試験片によって異なるが、ほぼ0~4%の範囲にある。し

かし、重量減少の割合は必ずしも鉄筋の腐食した面積の割合(本文では、これを腐食率と呼ぶこととする)とは対応しない。この事実は、サビの形態として局部腐食に近いものを包含しているためと考えられ、このような形態では腐食率が低い値であっても重量減少率としては大きな数値を示すこととなる。

サビ部分の平均減少厚は、数例を除いては、0.03mm程度である。海水環境下にある鋼材の腐食による減少厚は、海水中では年間0.1mm/yr.程度と言われているが、長期間経過した港湾鋼構造物の調査結果では0.05mm/yr.あるいはこれ以下であり、感潮部に設置した鋼材片の腐食速度は0.1~0.2mm/yr.程度である<sup>19)</sup>。本試験片の平均減少厚はこれらの $1/15 \sim 1/60$ 程度である。本試験片の減少厚は腐食部分の平均値であり、ひびわれ発生箇所の減少量は後述するように必ずしも小さいとは言えない。しかも、ひびわれ部分から鉄筋軸方向に左右に伸びた極めて程度の軽いサビすべてを含んだ平均減少厚であり、これらの要因が小さな平均減少厚を示す原因であると考えられる。逆に、A10, C11, C14, C19, C20の試験片のように集中腐食に近いサビでは、平均減少厚が0.1~1mmに達するものもある。写真-9では、集中腐食と近い箇所を切断して、サビの発生していない箇所と対比して示した例である。

表-5の最右欄では、ひびわれ部分に対応した特に腐食の著しい箇所の直径の減少量を示している。ノギスによる測定であるために、孔食程度を捉えることは困難であった。一般には、サビ部分の平均減少厚の5~10倍程度であり、しかも、腐食率の高い、すなわち、腐食の進行の著しい試験片ほど直径の減少割合も大きい。直径減少量の大きな試験片の腐食量は、海水環境下にあるマイクロ腐食量のほぼ $1/5 \sim 1/10$ となる。たとえば、海水中に浸漬したはりS9PC2の試験片A8においては、年間腐食量は0.015mm、感潮部に静置したはりT9PC2の試験片C32については、年間腐食量は0.03mm程度である。これらの例は、表面ひびわれ幅の大きな腐食断面変化の著しい例であるが、ひびわれ幅が0.2mmを越えぬ箇所の鉄筋の直径減少量は材令9年経過後においても0.1~0.2mm程度である。この腐食量は海水鋼材の $1/5 \sim 1/10$ 、感潮部鋼材の腐食量の $1/10 \sim 1/40$ にすぎない。すなわち、ひびわれ部分の鉄筋は、常時海水環境下にある鋼材ほどには十分な溶存酸素が供給されないと考えられる。また、コンクリート中の水酸化石灰の溶出により若干海水に比較しpHが高いと推察されること、なども腐食による直径減少量が少ない要因と想定される。

表-5 腐食箇所における断面減少の割合

はり番号	試験片 番号	(6) 腐食率 (%)	(1) サビ部分 の重量減 少率 (%)	(1) 腐食厚 (mm)		はり番号	試験片 番号	(6) 腐食率 (%)	(1) サビ部分 の重量減 少率 (%)	(1) 腐食厚 (mm)	
				サビ部 分の平 均減少 厚	直 径 減少 量					サビ部 分の平 均減少 厚	直 径 減少 量
S9PC2	A 1	18	1.8	0.03		T9PC2	C 1	39	0.3	0.02	
	A 4	72	0.8	0.03	0.02 <sup>(4)</sup>		C 2	30	0.1	0.01	
	A 5	23	0.1	0.00			C 3	100	0.2	0.01	0.09 <sup>(4)</sup>
	A 9	17	0.4	0.07			C 4	100	1.1	0.04	0.36 <sup>(4)</sup>
	A 8	100	1.4	0.05	0.27 <sup>(4)</sup>		C 6	50	0.2	0.02	
	A 9	10	0.0	0.01			C 9	84	0.6	0.02	0.09 <sup>(5)</sup>
	A10	10	0.3	0.12			C10	63	3.9	0.20	0.17 <sup>(5)</sup>
	A11	100			0.21 <sup>(3)</sup>		C11	33	1.5	0.15	0.03 <sup>(5)</sup>
	A12	100			0.23 <sup>(3)</sup>		C12	21	0.4	0.06	0.09 <sup>(5)</sup>
	A14	55			0.10 <sup>(5)</sup>		C13	45	0.3	0.02	
	A15	66			0.16 <sup>(4)</sup>		C14	19	2.3	0.40	
	A17	79	0.6	0.02	0.17 <sup>(3)</sup>		C15	56	0.2	0.01	0.06 <sup>(5)</sup>
	A19	61	0.3	0.02	0.17 <sup>(4)</sup>		C16	80	0.6	0.04	0.16 <sup>(5)</sup>
A20	77	0.8	0.03	0.04 <sup>(4)</sup>	C19	11	3.4	1.03			
T9NA	H 1	21	0.1	0.01		C20	24	2.6	0.35	0.09 <sup>(5)</sup>	
	H 2	37	0.1	0.01		C21	42	0.3	0.02	0.08 <sup>(5)</sup>	
	H 4	34	0.3	0.03		C22	6	0.4	0.09	0.07 <sup>(4)</sup>	
	H 5	100	0.2	0.01	0.10 <sup>(4)</sup>	C23	71	0.2	0.04	0.01 <sup>(4)</sup>	
	H 6	43	0.3	0.02	0.10 <sup>(4)</sup>	C26	69	0.1	0.00	0.17 <sup>(3)</sup>	
	H11	100	0.2	0.01	0.05 <sup>(4)</sup>	C27	69	0.5	0.02	0.02 <sup>(3)</sup>	
	H14	54	0.4	0.02	0.07 <sup>(5)</sup>	C28	56	0.3	0.02	0.47 <sup>(4)</sup>	
	H16	54	0.4	0.03		C29	50	0.3	0.02	0.17 <sup>(5)</sup>	
	H17	61	0.4	0.02		C30	43	0.6	0.05		
	H21	34	0.1	0.01		C31	100			0.40 <sup>(4)</sup>	
	H22	100			0.34 <sup>(4)</sup>	C32	100			0.60 <sup>(4)</sup>	
	H25	31	0.1	0.01	0.19 <sup>(3)</sup>	C34	40	0.5	0.04	0.22 <sup>(4)</sup>	

(注) (1)  $\frac{\text{腐食量 (g)}}{10.42(\text{g/cm}) \times \text{腐食長さ (cm)}} \times 100$

(2)  $\frac{\text{腐食量 (g)}}{\text{腐食面積 (cm}^2) \times 7.84} \times 10$

(3) 同一鉄筋におけるサビの発生していない試験片の直径に対する、サビの発生した鉄筋の最小直径との差

(4) 同一鉄筋におけるサビのほとんど発生していない試験片の直径に対する、サビの発生した鉄筋の最小直径との差

(5) 同一試験片における、サビの発生していない箇所の直径に対する、サビの発生した箇所の最小直径との差

(6)  $\frac{\text{腐食面積 (cm}^2)}{\pi \times \text{鉄筋直径 (cm)} \times \text{腐食長さ (cm)}} \times 100 (\%)$

コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

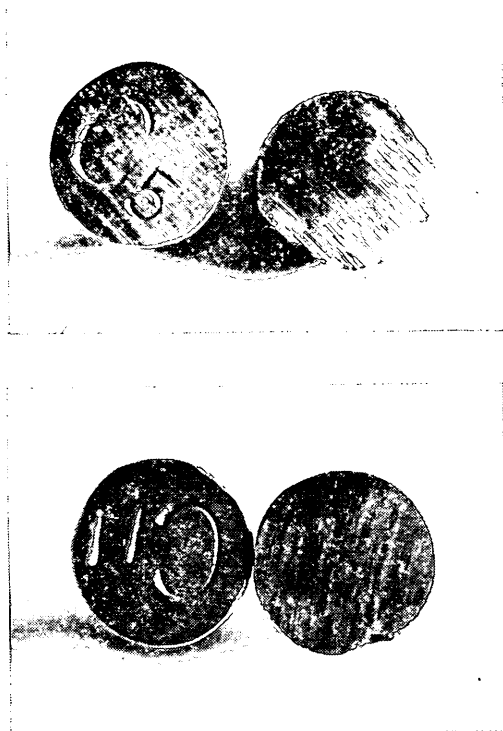


写真-9 集中腐食箇所の鉄筋の断面変化

(2) 鉄筋の引張強度

鉄筋の引張試験の結果を示したものが表-6である。表-6では、使用した鉄筋の引張強度を3段階にクラス分けして、それぞれのクラスについて、腐食の程度に応じた降伏点、引張強度の結果、および、腐食が認められない鉄筋に対する比率を表示してある。

表-6によると、腐食がかりうじて認められる鉄筋(評価L)は発錆していない鉄筋に対して降伏点、引張強度共に強度特性は低下していないと考えられる。一方、腐食の明瞭な鉄筋(評価H)においては、強度特性は若干低下する傾向も見られるがその割合は数%程度のものである。表-6では、最小の降伏点および引張強度を示した試験片の、腐食が認められない鉄筋に対する強度比率を表示してある。引張強度は10~20%の低下が認められる。しかし、鉄筋の位置する箇所のひびわれは、いずれも0.2~0.3mm以上であった。(1)から、直径変化が0.6mm程度の強度低下は約10%と想定される。上記の値はこれを上回る数値であるが、供試試験片、鉄筋断面方向に深く進行した腐食の影響も含まれるものと考えられる。

しかし、表-5で示したように、腐食による直径減少厚は一般に小さく、0.1~0.2mm程度であり、これは、鉄筋断面積を1.5~3%減少させるにすぎない。また、表-6で明らかのように、ひびわれ幅の小さな箇所における

表-6 腐食による鉄筋強度の変化

引張強度 ランク (kg/cm <sup>2</sup> )	腐食が認められない鉄筋 (評価N) (kg/cm <sup>2</sup> )			腐食がかりうじて認められる鉄筋 (評価L) (kg/cm <sup>2</sup> )			明らかに腐食が認められる鉄筋 (評価H) (kg/cm <sup>2</sup> )					Nに対する比率 (%)					
	試験片数	降伏点	引張強度	試験片数	降伏点	引張強度	試験片数	降伏点	最小降伏点	引張強度	最小引張強度	L		H			
												降伏点	引張強度	降伏点	最小降伏点	引張強度	最小引張強度
3500~3700	4	2310	3560	4	2380	3640	15	2390	2040	3460	2870	103	102	104	88	97	81
4000~4400	18	3070	4320	2	2870	4270	11	2930	2580	4180	3960	93	99	95	84	97	92
4500~4800	6	3400	4630	4	3540	5030	10	3360	3170	4530	4230	104	109	99	93	98	91

(注) 鉄筋の降伏点および引張強度はいずれも公称径(φ13mm)で計算した。

鉄筋の強度は、腐食が明瞭に認められる鉄筋においても3%程度の減少にとどまるようである。この程度の低下率は鉄筋の品質の変動範囲に含まれる値<sup>20)</sup>であると考えられる。

5. 結 論

断面15×30cm、長さ1.8mの鉄筋コンクリートはりを

海水循環水槽に浸漬して、あらかじめ供試はりに発生させたひびわれと内部鉄筋の腐食傾向を実験的に検討した。供試はりは水槽中の感潮部および水中部に静置して、材令5年、7年および9年の時点において、試験に供した。供試はりのかぶり厚は1.5cm、使用鉄筋はφ13mmの丸鋼である。

実験内容は多くの要因を含み、また、試験の性質上、

測定値のバラつきが大きく、明確な結論を提示することはなほ困難であるが、本実験の範囲では以下の事柄を言い得ると考える。

コンクリート中の鉄筋は、鉄筋コンクリート部材の曲げひびわれ箇所における腐食、ひびわれが発生していない状態であっても各種の原因によって生ずる腐食、の2種の腐食が考えられる。かぶり小さい場合には、コンクリート中を透過する水分、酸素、塩分などによって鉄筋が腐食する可能性はある。一方、種々の試薬によってコンクリート表層のpHの変化を測定すると、材令9年に至る時点においても、表層2～6mm程度がpH10～12に低下しているにとどまっている。ひびわれの発生していない箇所の腐食の程度は、ひびわれ発生箇所における腐食に比較して極めて軽微であって、本実験の範囲では、コンクリートのpHの低下ないし各種成分の浸透による鉄筋の腐食は、ひびわれ発生箇所の腐食に対して無視して考えることができる。

ほぼ9年間、海水の作用下に暴露された供試はりでは、鉄筋の発錆はコンクリート表面のひびわれ幅に応じて推定できるようである。明らかに発錆の認められる状態を基準として鉄筋の腐食発生率50%のときのひびわれ幅を検討すると、感潮部に静置された供試はりのひびわれ幅は0.15mm程度、海水中に浸漬された供試はりのひびわれ幅は0.2mm程度であった。

鉄筋に腐食が認められる試験片において測定した鉄筋の断面減少率は、同一環境条件下に暴露した鋼材の腐食量に比較しはるかに小さいようである。ひびわれ幅が0.2mm以下では材令9年経過後において腐食厚さは0.05～0.1mm程度である。この腐食量は、海水中鋼材の腐食量の $\frac{1}{5}$ ～ $\frac{1}{10}$ 、感潮部鋼材の腐食量の $\frac{1}{10}$ ～ $\frac{1}{40}$ にすぎない。また、鉄筋の引張試験による強度低下率を測定した結果では、ひびわれ幅が0.2mm以下の範囲において、鉄筋表面の腐食が明瞭に認められる状態であっても、腐食の認められぬ鉄筋の引張強度に比較し数%程度の強度低下を示すにとどまる。したがって、鉄筋の強度特性の観点から腐食の影響を捉える限りにおいては、感潮部における0.15mm程度のひびわれ幅、海水中における0.2mm程度のひびわれ幅は、鉄筋の品質を大幅にそこなうものではないようである。

しかし、ひびわれ位置の鉄筋に錆が発生すると、腐食はひびわれ部分から鉄筋軸方向に進行するようである。表面ひびわれ幅が0.1～0.2mm程度であっても、腐食長さは4～8cmに達する実測例も示されているが、腐食の進行は鉄筋下面に集中的に現われ、必ずしも、腐食長

さの区間全周が発錆するわけではない。

以上から、鉄筋の強度特性の観点からは本実験の範囲内では、鉄筋コンクリート部材のひびわれ幅の限界を、感潮部に暴露される部材においては0.15mm以下、海水中に浸漬される部材では0.2mm以下とすることができる。しかし、鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力を考慮に入れると、4～8cmに達する鉄筋軸方向の腐食が、部材の抵抗曲げモーメントの低下に及ぼす影響を検討する必要がある。また、試験条件が相違する場合（特にコンクリートのかぶり厚さ、波浪作用などの環境条件）の腐食に及ぼす影響、実際の構造物に作用する荷重回数とひびわれ幅の変化などに関しても、今後、実験的・理論的解析を進めることが大切である。

#### 謝 辞

本報告は、およそ10年間に及ぶ長期試験の結果を取り纏めたものである。実験の基本計画、遂行および5年試験の結果の解析は、赤塚雄三氏（世界銀行港湾技師、元材料施工研究室長）の指導の基に実施された。供試体の製作および載荷試験は、森口拓氏（土質部滑走路研究室長、元材料施工研究室研究員）の尽力によるところが大きい。この間、津端雅史技官（設計基準部計算室、元材料施工研究室）には供試体の載荷試験、浅岡邦一氏（元材料施工研究室）には5年試験の一部を担当して頂いた。また、構造部善主任研究官には実験手法、鋼材の腐食などに関して有益な御示唆を頂いた。海水循環水槽中の海水の化学分析は、セメント協会研究所に依頼した。本報文は、上記、元材料施工研究室長ならびに室員等の努力の基に作成し得たものであって、著者はこれら関係者各位に対し深甚の謝意を表するものである。

(1973年6月30日受付)

#### 参 考 文 献

- 1) 関 博, “海水の作用を受けるコンクリートの中性化について”, 土木学会論文報告集, 第181号, pp. 91～99, 昭和45年9月
- 2) 関 博, 小野寺幸夫, 丸山浩, “長期間海岸環境中に暴露された無筋コンクリート構造物の劣化状況調査”, 港湾技研資料, No. 142, 33pp., 昭和47年6月
- 3) J.D. Mozer, A.C. Bianchini, C.E. Kesler: “Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete”, ACI Journal, Vol. 62, No. 8, pp. 909～931, Aug. 1965
- 4) 岸谷孝一, “コンクリート中の鉄筋の腐食—塩素イオンとリグニン系混和剤の防食効果—”, セメント

コンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐食

- コンクリート, No. 289, pp. 22~30, 昭和46年3月
- 5) W.K. Boyd, A.B. Tripler: 松島巖訳, “コンクリート中の鉄筋の腐食”, 防蝕技術, Vol. 18, No. 3, pp. 16~26, 昭和44年3月
  - 6) I.L. Tyler: “Long-Time Study of Cement Performance in Concrete”, ACI Journal, Vol. 56, No. 9, pp. 825~836, March 1960
  - 7) O.E. Jorv: “Long-time Durability of Concrete in Sea Water”, ACI Journal, Vol. 68, No. 1, pp. 60~67, Jan. 1971
  - 8) T.B. Kennedy: “Tensile Crack Exposure Tests of Stressed Reinforced Concrete Beams”, ACI Journal, Vol. 52, No. 10, pp. 1049~1063, June 1956
  - 9) 内山 実, 三浦 尚, 杉木六郎, “コンクリートのひびわれと鉄筋のさび—塩沢における長期放置実験の結果より—”, コンクリートジャーナル, Vol. 13, No. 5, pp. 21~26, 昭和40年9月
  - 10) 神山 一, “コンクリート中の鉄筋のさび”, セメントコンクリート, No. 308, pp. 50~56, 昭和47年10月
  - 11) ACI Standard: “Building Code Requirement for Reinforced Concrete”, (ACI 318-63)
  - 12) CEB-FIP 編, プレストレスト技術協会, 日本コンクリート会議訳, “コンクリート構造物設計施工国際指針”, 鹿島出版会, 159pp., 昭和46年4月
  - 13) 赤塚雄三, 関 博, 浅岡邦一, “海水の作用を受ける鉄筋コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食について”, セメントコンクリート, No. 266, pp. 38~43, 昭和44年4月
  - 14) Yuzo Akatsuka, Hiraku Moriguchi: “Strength of Prepacked Concrete and Reinforced Prepacked Concrete Beams”, ACI Journal, Vol. 64, No. 4, pp. 204~212, April 1967
  - 15) 永井彰一郎, 杉 二郎, 緒方英世, 中山道夫, “海水化学(工業化学全書66)”, 日刊工業新聞社, 242pp., 昭和38年11月
  - 16) R. Shalom, M. Raphael: “Influence of Sea Water on Corrosion of Reinforcement”, ACI Journal, Vol. 55, No. 12, pp. 1251~1268, June 1959
  - 17) 善 一章, “港湾における鋼材防食法の研究(第1報)セメント硬化体による防食法”, 港湾技術研究所報告, 第5巻, 9号, 141pp., 昭和41年6月
  - 18) 神山 一, “コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食”, コンクリートライブラリー, 第14号, pp. 110~114, 昭和45年12月
  - 19) 善 一章, “港湾における既設構造物の腐食に関する研究”, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第1号, pp. 141~194, 昭和48年3月
  - 20) 赤塚雄三, 関 博, “港湾構造物における高張力異形鉄筋の使用法に関する調査研究(第2報)”, 港湾技術研究所報告, 第7巻, 第1号, pp. 25~44, 昭和43年3月