

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 237      June 1976

海水練りコンクリートならびに残留ひび  
われが鉄筋の腐食におよぼす影響につい  
て（5年結果報告）

博 明  
関 大 堀  
即 信 義  
井 一

運 輸 省 港 湾 技 術 研 究 所



# 目 次

要 旨 .....	3
1 ま え が き .....	3
2 練りませ水として海水を使用したコンクリートと鉄筋の腐食 .....	4
2.1 研究概要 .....	4
2.2 使用材料 .....	6
2.3 供試体の成形および暴露条件 .....	6
2.4 試験項目および方法 .....	9
2.5 コンクリートの品質変化 .....	10
2.6 鉄筋の発錆傾向 .....	10
2.7 ま と め .....	14
3 残留ひびわれと鉄筋の腐食 .....	14
3.1 研究概要 .....	14
3.2 使用材料 .....	14
3.3 供試体の製作および暴露条件 .....	15
3.4 材令5年における試験項目および方法 .....	16
3.5 ひびわれと内部鉄筋の腐食 .....	18
3.6 鉄筋とコンクリートのはくり .....	22
3.7 ま と め .....	24
4 あ と が き .....	24
謝 辞 .....	25
参 考 文 献 .....	25

# Corrosion of Reinforcing Bars due to Concrete Mixed with Sea Water and Residual Crack (Five Years' Test)

Hiroshi SEKI \*  
Nobuaki OTSUKI \*\*  
Yoshikazu HORII \*\*

## Synopsis

The paper reported corrosion of reinforcing bars embedded in concrete specimens and change of concrete properties, after being left at the tidal zone of the experimental pool which simulated the natural sea condition of the ebb and flow.

The cylinder specimens ( $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ ) included such factors as kind of cement, content of  $\text{SO}_3$  in cement, kind of mixing water (the service water and the sea water), and cover depth of reinforcing bars (2, 4 and 7 cm). The experimental results obtained so far showed as follows:

- (1) Kind of cement and content of  $\text{SO}_3$  showed no distinct difference regarding concrete properties. Concrete using the sea water had tendency of larger compressive strength at the early age compared to concrete using the service water, the former being similar compressive strength to the latter at the age of five years.
- (2) Though reinforcing bars using the sea water tended to corrode, no visible corrosion was observed at cover depth of 7 cm.

The prism specimens ( $10 \times 10 \times 80 \text{ cm}$ ) had been loaded and unloaded before starting the exposing test to the sea water. The following results were made clear within the five years' test.

- (1) Unloaded crack width became constant in excess of 0.2 mm of loaded crack width. It was likely that upper limit of residual crack width at reinforcing bar position of concrete side surface came to be approximately 0.08 mm to 0.1 mm.
- (2) No distinct corrosion was observed at uncracked section, providing concrete mixed with the service water and concrete cover of 4 cm.
- (3) Reinforcing bars at cracked section corroded by 35 percents among whole crack width of less than 0.1 mm, and half of them showed distinct observed corrosion.

---

\* Chief of the Materials Laboratory, Structures Division  
\*\* Member of the Materials Laboratory, Structures Division

# 海水練りコンクリートならびに残留ひびわれが鉄筋の腐食におよぼす影響について(5年結果報告)

関 博\*  
大 即 信\*\*  
堀 井 義 一\*\*

## 要 旨

潮の干満作用を再現した実験水槽の感潮部に供試体を設置して、試験開始後5年を経たコンクリート中の鉄筋の腐食およびコンクリートの品質変化について検討した。埋め込んだ鉄筋はいずれも黒皮を除去したものであり、供試体形状は円柱供試体(φ15×30cm)および角柱供試体(10×10×80cm)である。

円柱供試体における実験要因は、セメントの種類および品質、練りませ水の種類(水道水および海水)、鉄筋のかぶり(2, 4および7cm)である。現在までの試験結果によると

- (1) セメントの種類やSO<sub>3</sub>の増量によって、コンクリートの品質に顕著な相違は認められない。海水を用いたコンクリートの圧縮強度は、水道水を用いたものに比較し初期材令において幾分増加する傾向を示すが、材令5年ではほぼ同程度となっている。
- (2) 海水を練りませ水として用いた供試体は、水道水を用いたものに比較し内部の鉄筋は腐食する傾向にあるが、かぶりを7cmとするときには腐食はほとんど認められない。角柱供試体はあらかじめ荷重を載荷し除荷して残留ひびわれを発生させ、暴露試験に供したものである。現段階で判明した事項を以下に述べると、
  - (1) 荷重除荷時のひびわれ幅は、荷重載荷時のひびわれ幅がある値以上となるとほぼ一定となるようであり、本供試体の側面鉄筋位置における残留ひびわれ幅の上限はほぼ0.08mm~0.1mmであった。
  - (2) 水道水を練りませ水として用いると、かぶりを4cm程度とするときには5年を経過した時点においてもひびわれ箇所以外では腐食はほとんど発生しないと考えてよい。
  - (3) 側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅が0.1mm程度以下では、ひびわれ断面の鉄筋の65%には腐食は認められず、腐食の認められたものでもその半数は点錆であった。

## 1 ま え が き

港湾や海洋の構造物は、過酷な気象・海象条件下に暴露され、一般の陸上構造物に比較して高度な耐久性が要求される。

コンクリート構造物ないし構造部材の耐久性は構造物の所要の供用年限と密接な関連性を有するが、構造部材単位で捉えると、海水作用に対する抵抗性はコンクリート、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリートに大別して考えることができる。それぞれの部材に対する耐久性は重複する部分もあるが、部材特有の問題として解決すべき項目も多い。

当材料施工研究室では、従来から既設コンクリート構造物の現地調査、当研究所内における実験水槽を用いた長期の耐久性試験、現実の港湾環境に設置したコンクリート供試体の長期耐海水性試験を実施中である。これらは、上述した部材におけるコンクリートの品質変化、鉄筋やPC鋼

材の腐食、コンクリート部材の耐力変化、などを包含するものであり、一部にはレジンコンクリートの耐海水性試験をも加えている。現時点までに得られた当研究室の調査結果や研究成果はすでに報告書として発表している<sup>1)~4)</sup>。

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の腐食には、外気や海水との接触条件によって2つの形態に分類することができると考えられる。これらは、たとえばアルカリ性域腐食および中性化域腐食と呼称することとする。前者は、鉄筋自体はコンクリートによって防護されているが、コンクリート空隙中を透過する空気や湿分によって鉄筋表面に腐食電池が形成される場合、あるいは、コンクリート中を浸透する海水中の塩素イオンによって鉄筋表面の不働態皮膜が解離される場合、など<sup>5)~6)</sup>に相当する。空気中の炭酸ガスによるコンクリート表面からの炭酸化もこれに属すると考えられるが、港湾の構造物ではその影響は極めて小さい<sup>1)</sup>。後者の中性化域腐食は、ひびわれ発生断面において生ずる鉄筋の腐

\* 構造部 材料施工研究室長  
\*\* 構造部 材料施工研究室

食であり、本質的に海洋環境に使用される鋼管パイプや鋼矢板などの腐食形態と同等である<sup>7)</sup>。ただし、鉄筋コンクリートではマクロ腐食によるものは無視し得る程度であって<sup>3)</sup>、ミクロ腐食のみを考慮すればよい。

海水作用を受ける環境での鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に関して報告した実験例は極めて少なく、<sup>3), 8), 9)</sup>など現段階では鉄筋のかぶりやひびわれ幅などと腐食に関して、明確な結論が得られていない状況である。

本研究では、上述のいわゆるアルカリ性域腐食および中性化域腐食の両者を実験研究の対象とし、実験要因による腐食の発生の可能性およびその程度に焦点を絞り検討を行うこととした。すなわち、いわゆるアルカリ性域腐食に関しては、コンクリートとしての使用材料の種類や鉄筋のかぶりと鉄筋の腐食について考察を加えるものである。中性化域腐食に関しては、設計荷重あるいはこれを上回る荷重を載荷した後に荷重を除荷して、残留ひびわれ幅と鉄筋の腐食について検討を行うものである。供試体は最も腐食を発生させ易い海水環境と思われる、実験水槽の感潮部に設置することとした。

本研究は、1970年より実験を開始し、最終材令を一応10～20年と予定して、現在暴露試験を継続中である。本文は、実験の経過および材令5年までに判明した試験結果を取り纏めたものである。

なお、本研究の一部は、社団法人セメント協会との共同研究として実施したものであることを付記する。

## 2 練りませ水として海水を使用したコンクリートと鉄筋の腐食

### 2.1 研究概要

海岸や港湾のコンクリート構造物では、その規模や種類、あるいは施工場所などの状況に応じて、コンクリートの練りませ水として海水を用いることが多い。

無筋コンクリートの練りませ水に海水を使用するとき

は、水道水を用いたコンクリートに比較して、凝結時間が若干短縮される、初期強度の発現が促進される、長期強度の増加割合が小さいなどの相違点があるようであるが、硬化したコンクリートの耐久性に特に支障はないと言われている。

鉄筋コンクリートに海水を練りませ水として用いると、内部鉄筋に対するコンクリートの防錆機能が低下し、錆の膨張圧によるひびわれの発生や表層コンクリートのはく離、鉄筋断面の減少などの有害な影響が表われると言われている<sup>10)</sup>。

このために、たとえば土木学会コンクリート標準示方書<sup>10)</sup>でも鉄筋コンクリート部材に対しては練りませ水に海水の使用を禁止している。コンクリート中の塩素イオン濃度が増加すると、内部鉄筋の腐食が促進されるようであるが、腐食の程度や構造物に及ぼす劣化の程度に関しては十分に明らかにされていないのが現状のようである。一方、十分なかぶりを確保し、富配合のコンクリートを入念に施工すれば、海水を練りませ水として用いても構造物の損傷に対する影響は無視し得る程度であるという見方もあるが、構造物の重要度や耐用年数、構造物の接する環境によっても影響の程度は相違するものと考えられる。

上述の観点から、本研究は練りませ水として海水を用いたコンクリートが、鉄筋の腐食に与える影響を長期的に調べることを主目的とし、併せてセメントの種類の影響、セメント中のSO<sub>3</sub>量およびかぶりの影響などについても検討を加えようとするものである。

実験の条件としてコンクリートの配合を同一とし、比較のために水道水を練りませ水として用いた供試体も同時に製作した。使用したセメントの種類は、普通、早強、中庸熟ポルトランドセメント、高炉セメントを選び、さらにアルミナセメントを追加した。これらのセメントを使用したコンクリートについて、セメントの種類による影響およびかぶりの影響などについても長期的に検討しようとするものである。

表-2.1 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	N 0	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	N 2	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	H 0	1.1	0.5	20.6	5.2	2.7	65.3	1.2	2.5	0.37	0.54	—	0.9
中庸熟ポルトランドセメント	M 0	0.8	0.2	23.5	4.5	3.8	63.4	1.2	1.7	0.28	0.48	—	0.5
B種高炉セメント	B 0	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	B 2	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-2.2 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 (水浸法)	フロー 値 (mm)	強さ							
			比表面積 ( $cm^2/g$ )	標準篩 ふるい 88 $\mu$ 残 分(%)	水量 (%)	始発 (時-分)	終結 (時-分)			曲げ強さ ( $kg/cm^2$ )			圧縮強さ ( $kg/cm^2$ )				
										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	N0	3.14	3,180	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	3,570	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	H0	3.13	4,290	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	M0	3.19	3,260	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	B0	3.04	3,850	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	4,100	1.3	29.0	3-54	5-52	良	253	-	26.8	37.8	63.8	-	95	152	325

表-2.3 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		粉未度 標準篩ふるい 88 $\mu$ 残分(%)	曲げ強さ (1日) ( $kg/cm^2$ )	圧縮強さ (3日) ( $kg/cm^2$ )
	$Fe_2O_3$	CaO			
$Al_2O_3$	2.5	32.5	0.2	67.2	468
60.6	2.98	4.230	0.2	67.2	468

表-2.4 使用骨材の物理的性質

種別	比重	吸水水量 (%)	フルイの呼び寸法 (mm)						粗粒率				
			25	20	15	10	5	2.5					
細骨材	2.61	2.52	0	0	0	0	0	14	38	63	86	97	2.98
粗骨材	2.65	1.05	0	4	21	42	68	96	100	100	100	100	6.85

注：神奈川県相模川産

## 2.2 使用材料

### (1) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント(N0およびN2)、早強ポルトランドセメント(HO)、中熱ポルトランドセメント(MO)、B種高炉セメント(BOおよびB2)およびアルミナセメント(AL)を用いた。前6者のセメント試料は、セメントの種類別にそれぞれ市販3銘柄を等量に混合したもの(SO<sub>3</sub>量はほぼ2%)で、記号N2およびB2で示した普通ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントについては化学せっこうをSO<sub>3</sub>量で2%増量したものを加えた。増量のため添加したせっこうは、りん酸せっこう(SO<sub>3</sub>: 42.3%)で、これをあらかじめ40℃以下で乾燥させ、44μ以下に微粉砕して使用した。アルミナセメントは一般の市販品である。

表-2.1~2.3に使用したセメントの化学分析および物理試験結果を示す。

### (2) 骨材

実験に用いた細骨材および粗骨材は神奈川県相模川産のもので、その物理的性質は表-2.4に示す通りである。

### (3) 水

コンクリートの練りませぎ水には、海水と水道水を使用した。海水は海水循環水槽より汲み上げて使用した。その海水は、表2.6中の測定回数2に示す成分のものである。

### (4) 混和剤

減水剤は、ポゾリス<sup>®</sup> 5 L (日曹マスタービルダーズ株式会社製)を用いた。空気量の調整には、付属のAE助剤ポゾリス<sup>®</sup> 303を用いた。

### (5) 鉄筋

鉄筋はJIS G3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に定めているφ9mmの丸鋼を用い、コンクリート中に埋め込む鉄筋の長さを18cmとした。6本の試験片による試験結果は、降状点4,010kg/cm<sup>2</sup>、引張強度5,950kg/cm<sup>2</sup>、伸び26%、絞り49%であった。

埋め込み鉄筋の表面処理は次の方法によった。表面の黒皮、さびその他を除去するため、10%クエン酸アンモニウム溶液に約48時間浸漬し、その後ワイヤブラシでこすりながら水洗いした。次に、水分を取り除くために鉄筋をアルコール中に浸漬した後、清浄な布で十分にふきとり、コンクリート打込みまで布に包んでデシケーター内に保存した。これらは、コンクリート打込み前に再びベンジンで十分に鉄筋表面を拭きとり、光沢の見られる状態として使用した。

## 2.3 供試体の成形および暴露条件

### (1) コンクリートの配合、練りませぎおよび成形

#### i) コンクリートの配合

配合条件は粗骨材の最大寸法25mm、単位セメント量290kg、スランブ5cm、空気量4%を目標とした。試験練りで定められた配合は表-2.5に示す通りである。

表-2.5 コンクリートの配合

セメントの種類	練りませぎ水	粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	空気量(%)	水セメント比W/C(%)	細骨材率s/a(%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	減水剤(ℓ)	AE剤(c.c.)
NO	水道水	25	6.6	3.4	53	37	153	290	740	1,261	2.9	—
	海水	25	5.6	3.2	53	36	155	290	718	1,277	2.9	—
N2	水道水	25	6.4	4.0	54	37	158	290	734	1,251	2.9	—
	海水	25	5.1	3.4	55	36	160	290	713	1,270	2.9	—
HO	水道水	25	3.7	3.9	53	37	154	290	738	1,258	2.9	—
	海水	25	5.7	3.1	55	36	160	290	711	1,263	2.9	—
MO	水道水	25	6.5	4.8	52	37	152	290	742	1,264	2.9	—
	海水	25	4.6	4.0	53	36	154	290	720	1,280	2.9	—
BO	水道水	25	3.5	3.0	52	37	152	290	738	1,258	2.9	—
	海水	25	4.0	3.8	53	36	154	290	716	1,274	2.9	—
B2	水道水	25	4.2	3.8	55	37	159	290	729	1,242	2.9	—
	海水	25	4.7	4.1	56	36	161	290	708	1,258	2.9	—
AL	水道水	25	6.3	3.1	52	37	151	290	737	1,256	2.9	20
	海水	25	5.1	3.5	53	36	153	290	716	1,272	2.9	—

ii) 供試体の形状および配筋方法

供試体はφ15×30cmの寸法を有するものであり、圧縮強度試験用供試体と、中性化および鉄筋発錆試験用供試体の2種を作製した。後者の供試体は、埋め込まれた鉄筋の発錆傾向を測定すると共に、供試体の上下両端を切断して、コンクリートの中性化試験に供した。

埋め込み鉄筋の本数は1個の供試体について3本とし、かぶりをそれぞれ2cm、4cm、7cmと変化させた。すなわち、鉄筋端面をコンクリート供試体の上下面から6cmの位置に配置した。鉄筋の固定には、図-2.1に示すような鉄筋固定金具を用いた。

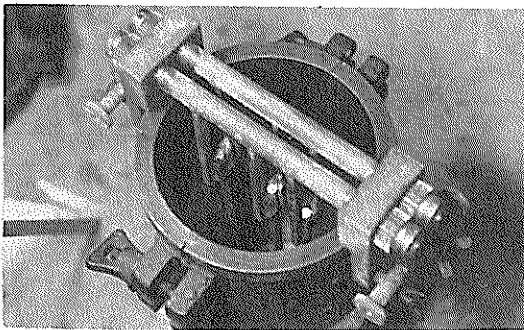


図-2.1 鉄筋固定金具による鉄筋の設置状況

iii) 供試体の成形

コンクリートの練りまぜは、容量200ℓの強制練りミキサーを用いた。コンクリートの打込みは恒温室内で行った。中性化および鉄筋発錆試験用供試体では、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固めた。コンクリートを上面まで打込んだ後に鉄筋の固定金具を取り外し、表層より4~5cmの部分を振動機により再び締固めて、コンクリートの表面を金ごて仕上げた。

(2) 養生方法および暴露条件

成形したコンクリートの供試体は恒温室内に静置して翌日脱型し、標準養生水槽(水温21℃)に移して6日間養生(早強ポルトランドセメントの場合は3日間)を行った後、循環水槽内の所定の位置に浸漬した。ただし、アルミナセメントを用いた供試体で海水を練りまぜ水として用いたものは、硬化が遅れ翌日脱型できなかったので、材令4日で脱型した。アルミナセメントの場合はいずれも脱型後ただちに海水養生を開始した。

海水循環水槽は、図-2.2に示すように自然の潮汐作用に関係なく1日に2回ポンプで人工的に1.5mの潮差で干潮および満潮の状態を再現するものである。循環水槽に使用している海水は、当研究所の護岸に隣接した井戸から採取しており、水位測定記録の一例を示すと図-2.3の通りである。循環水槽内の海水の化学成分を表-2.6に示す。海水の温度は夏期で約24℃、冬期で約8℃である。図-2.4は久里浜における月別最高、最低気温の平均値を示している。

供試体はいずれも上記海水循環水槽内の満潮面および干潮面の中間位置に設置した。

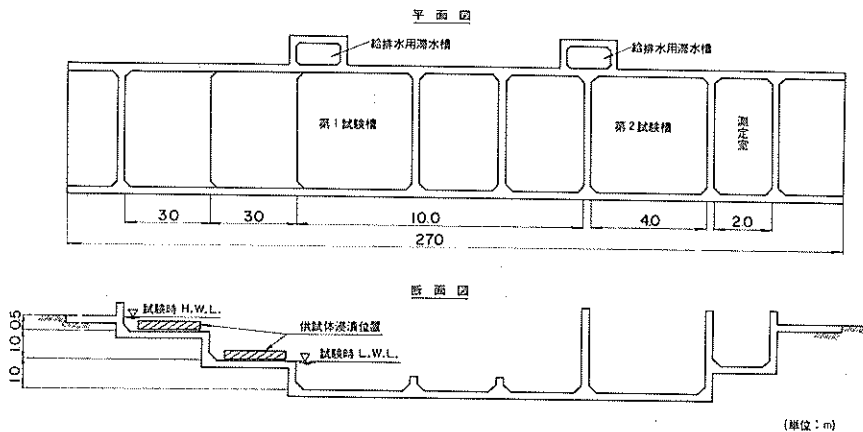


図-2.2 海水循環水槽の構造および供試体の浸漬位置



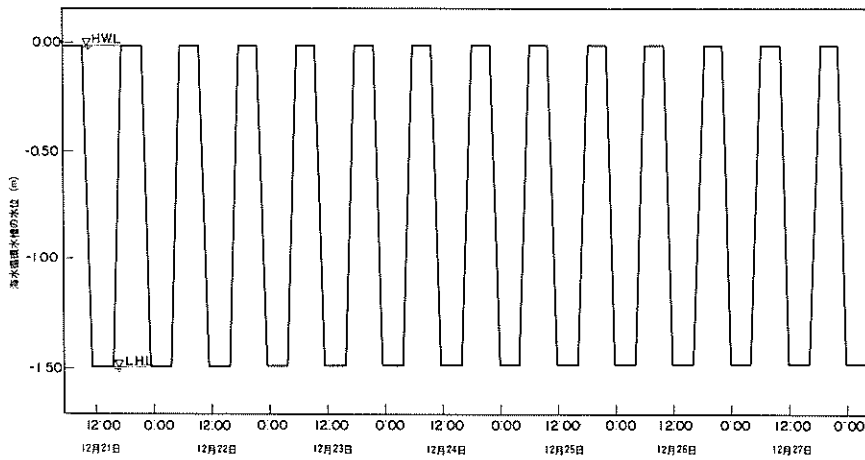


図-2.3 海水循環水槽の水位測定記録の一例(1970年12月21日~12月27日)

表-2.6 海水循環水槽内の海水の化学成分

測定回数	試料採取日	比重 (20℃)	pH (20℃)	化学成分 (mg/ℓ)						
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	CO <sub>3</sub>
1	1969年11月12日	1.024	8.13	10,525	380	388	1,247	18,137	2,534	67
2	1970年2月3日	1.024	8.03	10,125	382	376	1,180	17,136	2,412	65
3	1970年4月22日	1.024	8.12	10,705	380	372	1,231	17,951	2,492	84
4	1970年7月21日	1.023	8.05	10,025	375	345	1,094	16,185	2,270	62
5	1970年10月30日	1.024	8.10	10,405	380	382	1,198	18,025	2,506	80
6	1971年1月23日	1.023	7.60	10,125	397	388	1,249	18,472	2,583	118
7	1971年4月9日	1.021	7.95	9,550	360	359	1,150	16,949	2,377	114
8	1971年7月30日	1.022	7.75	9,900	392	367	1,222	17,903	2,483	129
9	1971年10月29日	1.020	7.70	8,625	335	326	1,051	13,098	2,168	133
10	1972年1月28日	1.024	7.65	10,050	390	387	1,243	18,383	2,523	120
11	1972年4月10日	1.021	7.78	9,900	370	362	1,169	17,258	2,396	113
12	1972年7月27日	1.020	7.58	8,600	340	312	1,023	15,059	2,104	114
13	1972年10月24日	1.022	7.70	10,050	365	375	1,218	17,912	2,525	120
14	1973年2月2日	1.023	7.55	10,250	380	388	1,244	18,198	2,581	110
15	1973年4月25日	1.021	7.75	8,700	325	333	1,042	15,487	2,162	104
16	1973年8月8日	1.020	7.75	9,150	355	333	1,133	15,696	2,325	101
17	1973年10月25日	1.022	7.40	9,600	360	362	1,119	17,581	2,435	125
18	1974年1月29日	1.024	7.85	9,900	380	395	1,262	18,354	2,585	98
19	1974年4月12日	1.022	7.75	9,750	355	341	1,119	16,451	2,295	103
20	1974年7月29日	1.020	7.30	9,450	340	307	1,042	16,545	2,275	105
21	1974年10月17日	1.019	7.70	7,925	320	293	1,011	14,683	2,025	110
22	1975年2月20日	1.021	7.20	9,750	370	363	1,225	17,790	2,455	119
23	1975年5月12日	1.024	7.50	10,050	400	380	1,258	18,414	2,583	91
24	1975年10月4日	1.022	7.65	9,300	370	360	1,211	17,706	2,430	137

注：海水循環水槽満潮時に-2.0mの位置より採取した。

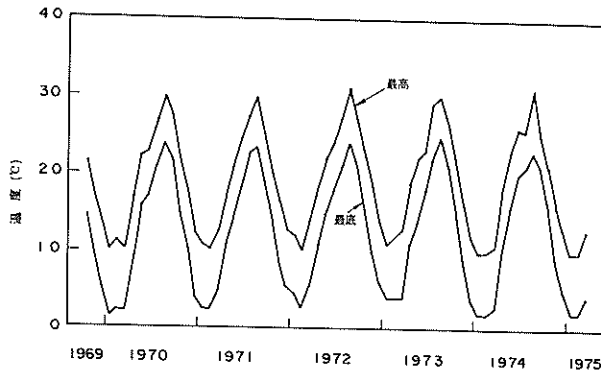


図-2.4 久里浜（港湾技術研究所）における月別最高最低温度

## 2.4 試験項目および方法

### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」により行った。供試体は原則として、初期材令では片面仕上げ面を石こうでキャッピングを行い、長期材令では両面ともウッドメタルでキャッピングを行った。

試験は、初期材令、および5年材令において行った。初期材令はセメントの種類によって変化させ、アルミナセメントで水道水使用の場合1日、海水使用の場合4日、早強ポルトランドセメントでは7日、その他の場合は28日とした。

### (2) 中性化試験

中性化測定のため供試体を図-2.5に示すように上面から5cmおよび25cmで切断し、さらに、上面から5cmの分を半割としてフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹き付け着色状況をトレースした。

試験は材令1年および5年で行い、最大中性化深さ、最小中性化深さを測定し、平均中性化深さはプランメーターにより中性化部分の面積を測定して計算した。

### (3) 鉄筋の発錆に関する試験

#### i) 表面観察

中性化試験を行ったコンクリート供試体を破壊して鉄筋を取り出し、表面の発錆の状況を調べた。鉄筋に接したコンクリートについては、供試体破壊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付けて、その部分のコンクリートが中性化しているかどうか確かめた。

#### ii) 腐食面積の測定

供試体より取り出した鉄筋について、肉眼で確認できる腐食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。

#### iii) 腐食深さの測定

発錆した鉄筋に孔食が生じていると思われる試験片を選んで、次の方法により腐食深さを測定した。先端を磨いた釘をノギスに接着剤で取り付けて、鉄筋軸方向にはぼ0.5mm間隔で直径を測った。このうち、孔食の顕著な試験片については、腐食箇所を鉄筋軸方向あるいは鉄筋軸と直角方向に機械切削して写真撮影を行った。

#### iv) 重量変化の測定

腐食による鉄筋の重量変化は、供試体製作時に2.2(5)で述べたようなクエン酸アンモニウム溶液による表面処理を行なった鉄筋の重量と、5年経過後に供試体より取り出し

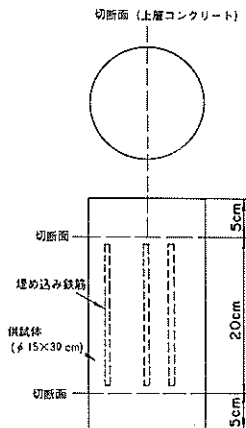


図-2.5 中性化試験における供試体の切断方法

た鉄筋の重量とを測定することにより求めた。後者の表面処理は、当初はクエン酸アンモニウム溶液による処理を行うことを予定していたが、腐食量に比較して溶液による溶解量が上廻ることが想定されたため、ブラシでサビや鉄筋表面に固着したモルタル分を除去して重量を測定し、腐食していないものと比較した。なお、重量測定には、いずれもメトラー製直立式天秤（感量 10 mg）を使用した。

## 2.5 コンクリートの品質変化

### (1) 外観観察

海水循環水槽から引き揚げた供試体の表面には、薄い皮膜の形成されているものが見られたが、これらの皮膜はブラシで清掃すると簡単に除去できるものであった。一般的にみてセメントの種類および  $SO_3$  量の増量、練りませ水の相違などによって、コンクリート表面の状態にはほとんど差がみられなかった。

### (2) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を表-2.7に示した。普通ポルトランドセメント（NO）、中庸熟ポルトランドセメント（MO）およびB種高炉セメント（BO）を用いたコンクリートでは、海水を練りませ水としたときに水道水を使用したものに比較して初期材令の圧縮強度が幾分大きい傾向を示すが、材令5年ではほぼ同程度となっている。

一方、アルミナセメントに海水を用いたコンクリートは、上記のセメントに対して極めて特異な性状を示すようである。すなわち、材令1日においては強度の発現は極めて少なく、脱型が不可能な状態であった。しかし、材令5年では強度の伸びが大きく、水道水を用いたコンクリートの90

%程度の強度比を示している。

### (3) 中性化

材令1年においては、いずれの供試体でもコンクリート内部への中性化は見られず、表面のみが中性化している程度であった。

材令5年の中性化試験結果を表-2.8に示した。中性化の進行は極めて少なく、平均中性化深さを測定することは困難であった。最大中性化深さも0.0~0.6cmの範囲にあり、供試体上部の隅角部や、粗骨材の粗粒分が表面付近に存在するような場合では、中性化深さは比較的大きな値を示すこともあるが、セメントの種類などの要因による差は判定できなかった。

## 2.6 鉄筋の発錆傾向

### (1) 表面観察

材令1年の供試体では、アルミナセメントを用いたもののみ鉄筋の発錆が観察された。この場合、水道水を練りませ水として用いた供試体における鉄筋の腐食は軽度であったが、海水を用いたものでは一例を図-2.6に示したように腐食は明瞭であった。

材令5年を経過した供試体中の鉄筋では、ほぼ半数に腐食が認められた。しかし、個々の鉄筋の腐食程度は、表面に軽く赤サビが認められるものから、孔食あるいは担食により鉄筋断面の一部が欠損し、黒サビが固着しているものまで広範囲に亘っている。図-2.7は参考までに腐食が比較的顕著なものを例示した。

鉄筋上端部付近に見られる腐食は、その他の部分に比べ一般に発錆箇所は少ないが、腐食面積は大きく腐食が鉄筋内部に進行しているものが少なからず見うけられた。この

表-2.7 コンクリートの圧縮強度

コンクリートの種類	練りませ水	圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )				
		1 日	4 日	7 日	28 日	5 年
NO	水道水	—	—	—	366	509
	海水	—	—	—	409	518
N2	水道水	—	—	—	—	524
	海水	—	—	—	388	521
HO	水道水	—	—	425	—	560
	海水	—	—	390	—	555
MO	水道水	—	—	—	328	478
	海水	—	—	—	356	477
BO	水道水	—	—	—	380	563
	海水	—	—	—	395	551
B2	水道水	—	—	—	363	523
	海水	—	—	—	366	513
AL	水道水	428	—	—	—	672
	海水	—	258	—	—	603

表-2.8 材令5年におけるコンクリートの中酸化および鉄筋の腐食測定結果

セメントの種類	練りませ	鉄筋の腐食														
		鉄筋のかぶり: 2 cm					鉄筋のかぶり: 4 cm									
		最大中酸化深さ(mm)		鉄筋全長		鉄筋全長		鉄筋全長		鉄筋全長						
		横断面	発錆数	最大発錆面積(mm <sup>2</sup> )	発錆面積率(%)	発錆数	最大発錆面積(mm <sup>2</sup> )	発錆面積率(%)	発錆数	最大発錆面積(mm <sup>2</sup> )	発錆面積率(%)					
NO	水道水	0	11	207	3	1	0.1	0.0	5	13	0	0.0	4	51	0	0.0
		0	6	70	(-)	0	(-)	0.0	14	0	0	0.0	3	33	(-)	0.0
		0	7	101	0	0	0.0	0.0	2	56	(-)	0	10	0	0	0.0
N2	海水	1	3	86	0	0	0.0	0.0	2	10	(-)	0	4	17	0	0.0
		0	4	17	0	0	0.0	0.0	7	17	0	0.0	6	44	(-)	0.0
		0	5	0	0	0	0.0	0.0	14	13	0	0.0	3	0	0	0.0
HO	水道水	3	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
MO	海水	1	3	32	0	0	0.0	0.1	2	0	0	0.0	1	0	0	0.0
		0	3	81	11	3	0.2	0.1	3	17	20	0.4	3	7	3	0.1
		0	1	19	0	0	0.0	0.0	4	0	0	0.0	2	3	1	0.0
BO	水道水	0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
B2	海水	0	6	144	144	7	3.2	2.4	1	43	0	0.0	1	0	(-)	(-)
		0	2	222	7	110	4.0	2.4	6	116	7	0.2	0	0	(-)	(-)
		0	5	159	178	3	3.9	3.9	3	28	0	0.0	0	0	(-)	(-)
AL	水道水	1	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		0	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
B2	海水	1	3	3	3	0	0.1	6.1	4	0	0	0.0	0	0	0	0.0
		0	3	100	182	277	4.0	6.1	5	0	0	0.0	6	9	7	0.4
		0	5	643	646	14.3	14.3	14.3	0	(-)	(-)	(-)	1	0	0	0.1
B2	水道水	1	2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
B2	海水	2	3	3	3	0	0.1	0.0	4	0	0	0.0	3	0	0	0.0
		2	7	0	0	1	0.0	0.0	0	0	0	0.0	2	0	0	0.0
		2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	14	0	0	0.0	0	0	0	0.0
B2	水道水	2	2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	3	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	15	0	0	0	0.0	0.0	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
AL	海水	2	2	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	1	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
		2	4	0	(-)	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)	0	(-)	(-)	(-)
AL	水道水	0	5	0	0	0	0.0	0.0	3	0	0	0.0	5	0	0	0.0
		1	15	7	0	0	0.0	0.0	3	6	0	0.0	2	9	3	0.2
		2	3	0	0	0	0.0	0.0	4	2	1	0.0	4	0	0	0.0
AL	海水	0	0	0	0	0	0.3	0.1	8	20	22	0.5	5	18	0	0.3
		0	1	96	(-)	5	(-)	0.1	5	18	9	0.2	2	31	4	0.0
		0	3	11	0	0	0.0	0.0	5	66	0	0.0	1	18	(-)	0.1

注: ① ( ) 内の数字は供試体隅角部  
 ② 最大発錆面積、発錆面積、発錆面積率は腐食が確認できたが面積測定が不可能なもの、( - ) はまったく腐食の認められないもの。  
 ③ 供試体製作時における鉄筋固定金具による鉄筋固定部分を除いたもの。ただし、発錆面積率は鉄筋全長の表面積を基準とした。

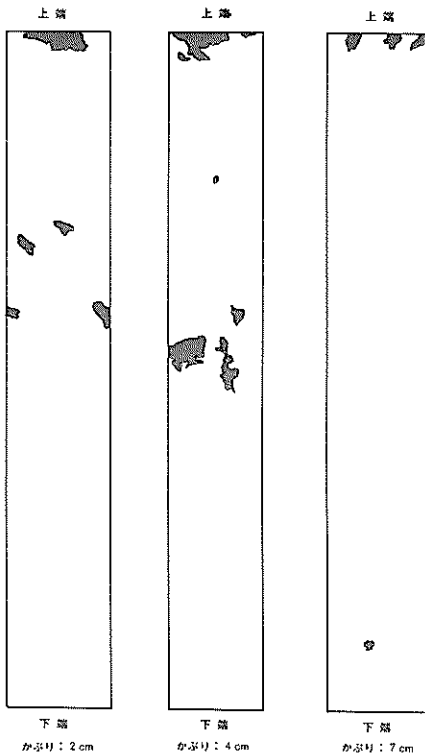


図-2.6 鉄筋の発錆状況例(1)

(練りませ水：海水、材令1年)  
(アルミナセメント使用)

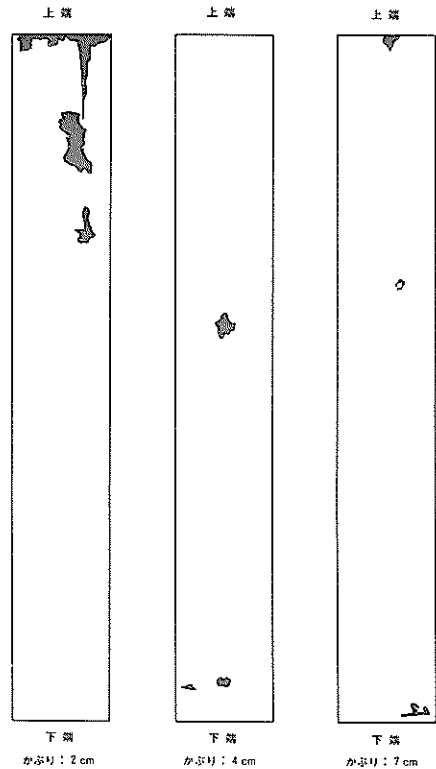


図-2.7 鉄筋の発錆状況例(2)

(練りませ水：海水、材令5年)  
(普通ポルトランドセメント(N2)使用)

部分は供試体製作時に、鉄筋固定金具の取り付け部分に相当し、金具の取り外し後の再振動締め作業を行っても下層コンクリートに比較し、若干ポーラスなコンクリートとなっていたものと推察される。ただし、内部鉄筋を取り出すために供試体を半割りにしてフェノールフタレイン1%アルコール溶液によって断面の中酸化状況を観察した限りでは、この部分で中性化が内部に進行している傾向は認められなかった。

#### (2) 腐食面積

鉄筋の腐食面積の測定結果を表-2.8に取り纏めた。この測定結果は、ある程度の面積を有しトレスできる程度の腐食を発錆数として表示したが、点錆などの腐食の軽微なものは含まれておらず、発錆数そのものに大きな意味があるわけではない。それぞれの試験片で最大の腐食面積を示す部分はほとんどが鉄筋上端部であるが、上端部のさび

は(1)で述べた如く供試体作成条件による影響も大きく、さらに、ブリージング水の影響も考えられるので、この部分の腐食を除外して、発錆面積および発錆面積率を計算した。

発錆面積はコンクリートの使用材料および鉄筋のかぶり同一であっても、試験片によって相当に値がバラつくようであり、腐食を定量的に判定することの困難さを示している。たとえば、中庸熟ポルトランドセメントを用い海水を練りませ水として鉄筋のかぶりを2cmとした場合に、発錆面積は3~646mm<sup>2</sup>の範囲にあり、発錆箇所が1ヶ所でも腐食面積の最も大きいものでは鉄筋の全周に亘り643mm<sup>2</sup>に及ぶものがある。また、本試験では点錆の評価は表-2.8に示すように“0”で表わし、供試体製作時と同様に光沢が見られまったく腐食の認められないもの(記号は“-”)と区別するに止めた。しかし、3本の試験片の平均値によれば、個々の要因に対する腐食の傾向はおおよ次のよう

ある。

一部に例外が認められるものの、練りませ水として海水を用いたものは水道水を用いたものに対して内部の鉄筋は腐食し易い傾向にあるようである。この傾向は普通ポルトランドセメント(N2)、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などを用いた供試体で特に明瞭である。しかし、海水を用いた場合でも鉄筋の腐食は、かぶりのコンクリートをはく離させたり供試体表面に赤サビが溶出するほどのものではなかった。

鉄筋のかぶりによる影響は、一般にはかぶりを大きくすることによって腐食の程度は減少するようであり、本試験結果では海水を練りませ水として用いた場合でもこの傾向は明らかである。ただし、アルミナセメントを用いた供試体では、かぶりによる腐食抑制の効果は明確ではなかった。

### (3) 腐食深さ

集中腐食によって鉄筋の直径に変化をきたした状態をノギスを用いて測定した結果は、表-2.9のようである。これによれば腐食の深さは腐食の程度によって異なるが、最大で1.0mm程度であり、大きなものは鉄筋上端部に集中している。上端部以外の測定箇所の腐食深さはわずかであった。図-2.8および図-2.9は、試験片を機械切削したときの腐食部分の断面変化の状況を示したものである。

### (4) 重量変化

腐食の認められない鉄筋と比較的鉄筋端部の腐食の著しいものとの両試験片について、埋め込み前と材令5年の重量差をみると、両者の間に明確な相違はみられなかった。現在までに生じた腐食の程度では、試験前後の重量差によって腐食を明瞭に識別することは困難なようである。

表-2.9 集中腐食の発錆箇所における鉄筋直径の減少量

鉄筋のかぶり：2 cm				鉄筋のかぶり：4 cm			
鉄筋記号	腐食測定番号	直径減少量 (mm)	直径減少率 (%)	鉄筋記号	腐食測定番号	直径減少量 (mm)	直径減少率 (%)
NW 10	(1)	0.4	5	NW 11	(1)	0.4	5
	(2)	0.3	4		(2)	0.4	5
NW 13	(1)	0.4	5		(3)	0.6	8
	(2)	0.3	4	NW 17	(1)	0.1	1
	(3)	0.2	2		(2)	0.2	2
	(4)	0.2	2	HS 14	(1)	0.1	1
	(5)	0.6	8		(2)	0.2	2
NW 16	(1)	0.2	2	AS 14	(1)	0.2	2
	(2)	0.4	5		(2)	0.1	1
	(3)	0.2	2		(3)	0.4	5
	(4)	0.6	8		(4)	0.3	4
MSR16	(1)	0.1	1		(5)	0.2	2
	(2)	0.8	10				
	(3)	1.0	12				
	(4)	0.6	7				
	(5)	1.0	12				
MSR10	(1)	0.2	2				

注：① 直径減少率は、腐食箇所付近の正常な平均径に対する割合。

② 上表は、特に腐食の著しい鉄筋上端部の値。



図-2.8 腐食による鉄筋の断面変化例(1)

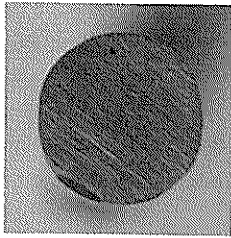


図-2.9 腐食による鉄筋の断面変化例(2)

## 2.7 ま と め

コンクリートの供試体(φ15×30mm)に丸鋼を埋め込み、これを海水循環水槽内の感潮部に設置して、材令5年に至るコンクリートの品質変化ならびに鉄筋の腐食の状況を検討した。本試験の範囲内で得られたおおよその傾向を述べると以下の通りである。

- (1) 供試体の外観は、表面の観察結果によるとセメントの種類、SO<sub>3</sub>の増量、および練りませ水の相違によって明確な差は認められなかった。
- (2) 練りませ水として海水を使用したコンクリートは、水道水を使用したものに比べて一般に初期材令においては圧縮強度が幾分増加する傾向を示したが、材令5年においてはほぼ同程度となっている。
- (3) 供試体の中性化はほとんど見られず、最大中性化深さでも0.4~0.5mm程度であった。
- (4) 海水を練りませ水として用いた供試体は、水道水を用いたものに比較して、内部の鉄筋は腐食する傾向にある。その程度は現在のところ腐食面積として一般に約1%以下であった。
- (5) 腐食の認められた供試体では、鉄筋のかぶりが増加するほど腐食の傾向は減少する。海水を練りませ水として用いた場合でも、かぶりが7cmでは大部分の鉄筋に腐食は認められなかった。

## 3. 残留ひびわれと鉄筋の腐食

### 3.1 研究概要

鉄筋コンクリート部材では設計荷重が作用すると、コンクリート引張側に0.1~0.2mm程度のひびわれが発生する。ひびわれ幅の大きさは、鉄筋のかぶり、鉄筋の表面形状、鉄筋比、鉄筋径、鉄筋の配筋方法、鉄筋の引張応力度などの多くの要因によって支配され、実験例やこれらを取り纏めた報文<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>なども多く、種々の計算式が提案されている<sup>11)~13)</sup>など。

ひびわれの影響を鉄筋コンクリート部材の設計に導入する方法としては、現在のところ基本的に2つの考え方があ

る。すなわち、鉄筋の許容引張応力度に制限を設ける方法と、許容ひびわれ幅を規定する方法である。前者は許容応力度設計法に基いた我が国の土木学会コンクリート標準示方書<sup>10)</sup>に明示された方法であり、鉄筋の降伏点の増加に応じた許容引張応力度の増加を認めておらず一定の制限値を規定している。一方、後者の考え方は鉄筋の腐食に有害なひびわれ幅の制限値を示すものであり、土木学会コンクリート標準示方書<sup>10)</sup>の海洋コンクリートの章や種々の基準<sup>14)~17)</sup>などがある。

ひびわれ幅を規定する方法によっても、ひびわれそのものの設計上の考え方やひびわれの鉄筋に対する有害な程度について明確に定める必要がある。たとえば、鉄筋に腐食を発生させるひびわれ幅の限界値、鉄筋コンクリート部材の耐力に影響を及ぼし、あるいは、かぶりのコンクリートをはく落させる腐食の程度の評価方法、種々の断面形状や鉄筋の表面形状・配筋方法などに適用できる正確なひびわれ幅の算定式、などに関して明らかにすることが重要である。これらは鉄筋コンクリート部材に耐用年数を導入することと密接な関連性を有するものであり、また、耐用年限における設計で想定した荷重・外力条件などをも考慮に入れる必要がある。

本研究は上述の問題点のうちで、コンクリートのひびわれ幅と鉄筋の腐食の関連について検討を加えようとするものである。特に、構造物に設計荷重あるいは過大荷重が作用するときを想定し、荷重が解放された後のひびわれ幅の変化、残留ひびわれによる鉄筋の腐食、鉄筋とコンクリートのはくり長さ、などに関して実験結果を基に検討を行うことを目的としている。

### 3.2 使用材料

#### (1) セメント

セメントは、市販の普通ポルトランドセメント(住友セメント株式会社浜松工場製)を使用した。その物理的性質は表-3.1に示す通りである。

表-3.1 セメントの物理的性質

比重	粉末度		凝 結			安定性 (浸水 方法)
	比 表 面 積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準網 ふるい 88μ残 分(%)	水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)	
3.17	3,140	3.1	26.5	2-08	3-43	良

フ ロ ー 値 (mm)	強 さ					
	曲げ強さ (kg/cm <sup>2</sup> )			圧縮強さ (kg/cm <sup>2</sup> )		
	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
236	33.6	48.5	70.8	136	226	407

表-3.2 使用骨材の物理的性質

種 別	比 重	吸 水 量 (%)	フルイに留まるものの重量百分率(%)										粗 粒 率
			フルイの呼び寸法(mm)										
			20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
細 骨 材	2.63	2.09	0	0	0	1	16	41	66	88	97	3.09	
粗 骨 材	2.66	1.07	0	3	46	92	99	100	100	100	100	6.40	

注：神奈川県相模川産

表-3.3 鉄筋の引張試験結果

鉄筋名	形 状	J I S 値			試 験 結 果		
		降 伏 点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引 張 強 度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)	降 伏 点 (kg/mm <sup>2</sup> )	引 張 強 度 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸 び (%)
B	横 フ シ	35 以上	50 以上	18 以上	37.3	54.4	27.5
F-1	波形類似フシ	35 以上	50 以上	18 以上	38.5	59.4	25.1
G-1	波形類似フシ	35 以上	50 以上	18 以上	35.6	51.5	28.6
I-2	斜め交差フシ	35 以上	50 以上	18 以上	35.7	54.3	29.2

(2) 骨 材

細骨材および粗骨材は神奈川県相模川産のものを使用した。粗骨材の最大寸法は 15 mm である。表-3.2 は用いた骨材の物理的性質を示している。

(3) 水および混和剤

コンクリートの練りませ水としては水道水を用いた。使用した減水剤はボゾリス 8 L (日曹マスタービルダーズ株式会社製) である。

(4) 鉄 筋

鉄筋は JIS G 3112 「鉄筋コンクリート用棒鋼」に定めている SD 35、D 16 の異形鉄筋を用いた。使用した鉄筋は、RIVERCON、FUJICON、KACON および SUMIBAR の 4 種である。コンクリート中に埋め込む鉄筋の長さは 80 cm とした。3 本の試験片によるそれぞれの鉄筋の強度特性の試験結果は表-3.3 に示す通りであり、表面形状の諸特性に関しては既往の報告<sup>18)</sup>を参照されたい。

鉄筋表面の処理は 2.2(5) で述べたと同一の方法により行った。その後コンクリートの打込みまでは、乾燥した布に包んで低湿室 (50% R.H.) 内に保存した。

3.3 供試体の製作および暴露条件

(1) 供試体の種類

製作した供試体は、内部の鉄筋の発錆のみを測定するもの (以下本文では鉄筋発錆用供試体と呼ぶ)、鉄筋とコンクリートのはくり状態を観察するもの (以下本文でははくり試験用供試体と呼ぶ)、および圧縮強度試験用供試体の 3 種であり、はくり試験用供試体では測定時に前者と同様に鉄筋の発錆状況も併せ測定した。表-3.4 は供試体の種類および圧縮強度試験結果を示している。

表-3.4 供試体種類およびコンクリート強度

供試体 番 号	使 用 鉄 筋	載荷荷重 ( t )	コンクリート圧縮強度 ( kg/cm <sup>2</sup> )	
			荷 重 載 荷 時	材 令 2 年
BR-1	B	2.50	} 253	} 368
BR-2	B	2.50		
BR-4	B	2.50		
BF-4	F-1	2.00	} 280	} 378
BF-8	F-1	2.00		
BF-9*	F-1	2.00		
BF-11*	F-1	2.75		
BF-12	F-1	2.75		
BK-1	G-1	2.75	} 270	} 427
BK-2	G-1	2.75		
BK-4	G-1	3.00		
BS6-1	I-2	2.00	} 288	} 386
BS6-3	I-2	2.00		
BS6-6*	I-2	2.50		

\* 鉄筋発錆およびはくり試験に併用  
他の供試体はいずれも鉄筋発錆用のみ使用

(2) コンクリートの配合および供試体の製作

i) コンクリートの配合

配合条件は粗骨材の最大寸法 15 mm、スランブ 5 cm、空気量 4% を目標とした。最終的に定められた配合は表-3.5 に示す通りである。



表-3.5 コンクリートの配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (ℓ)
15	5.0	6.1	46	46	140	306	864	1,030	0.77

注：5バッチの平均値

ii) 供試体の形状および製作方法

鉄筋発錆用供試体およびはくり試験用供試体の形状は  $10 \times 10 \times 80$  cmであり、鉄筋はそれぞれの供試体の中心に1本を配置した。従って、鉄筋のかぶり厚は4.2 cmである。圧縮強度試験用供試体の形状は  $\phi 15 \times 30$  cmである。

コンクリートの練りまぜは、容量200ℓの強制練りミキサーを用いた。コンクリートの打込みは恒温室内で行い、鉄筋発錆用供試体およびはくり試験用供試体では一層詰めとし棒状振動機によりコンクリートを締固めた。

(3) 養生方法および暴露条件

コンクリート打込み後、恒温室内に静置して翌日脱型した。その後、ほぼ材令1カ月の時点で3.3(4)に述べる方法によって供試体にひびわれを発生させた。載荷試験完了後それぞれの供試体は海水循環水槽内の所定の位置に浸漬した。

海水循環水槽の諸元、海水の化学成分、久里浜の気温、供試体の浸漬位置については、2.3(2)で述べた通りである。

(4) ひびわれの発生方法

図-3.1に示す要領で供試体に3等分点載荷を加え、ひびわれを発生させた。載荷試験は30t万能試験機を用い、所要のひびわれ幅が得られるように表-3.4に示したように2.0~3.0tに載荷荷重を相違させた。所定の荷重時にひびわれ幅を測定した後、荷重を除荷し再びひびわれ幅を測定した。

ひびわれ幅の測定位置は、図-3.1に示すように供試体両側面の鉄筋位置および下縁より1cmの位置、および、供試体底面の鉄筋位置の計5カ所である。なお、供試体底面の鉄筋位置のひびわれ幅は、荷重除荷後のみ測定を行った。ひびわれ幅の測定には、いずれも接眼鏡(最小目盛1/100mm)を用いた。

3.4 材令5年における試験項目および方法

(1) ひびわれ幅の測定

所定期間の経過した供試体を海水循環水槽より引き揚げ、表面の付着物をブラシで除去してひびわれ幅の測定を行っ

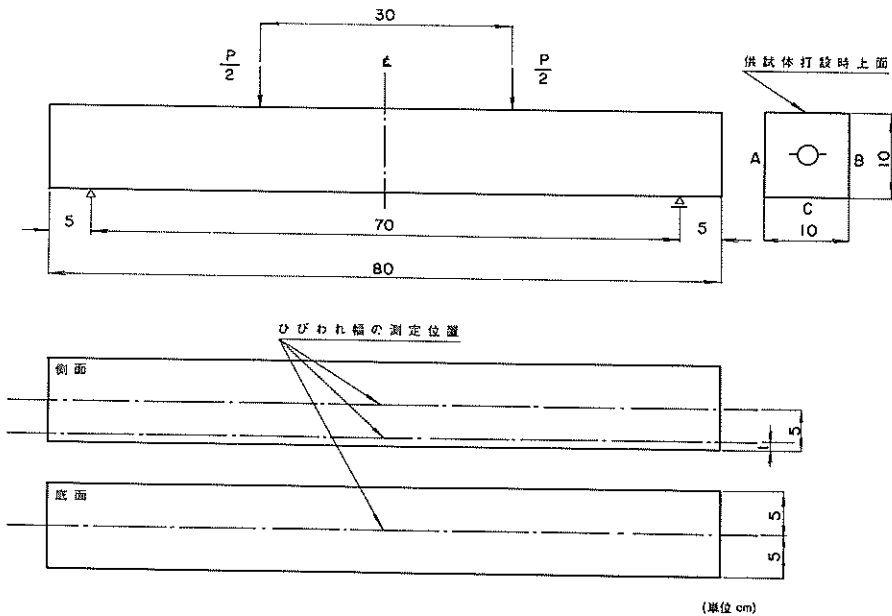


図-3.1 供試体の形状およびひびわれ幅測定位置

た。測定方法は 3.3 (4) で述べたと同一の方法で実施した。

(2) 鉄筋の発錆に関する試験

ひびわれ幅の測定、および、はくり試験用供試体では(3)で述べるフェノールフタレイン溶液の注入を完了した供試体を供試体軸方向に半割りして、内部の鉄筋を取り出した。鉄筋の発錆状況の測定項目は、腐食面積を求めることを主眼とし、その方法は 2.4 (3) ii) に述べたとほぼ同様である。なお、このとき腐食発生箇所とひびわれとの位置関係を明確に捉えるように留意した。

(3) はくり状態の測定方法

試験に用いた供試体の表面のひびわれ幅は極めて小さく、注射器などを用いた溶液の注入方法<sup>19), 20)</sup>が困難と思われた。このため今回は、鉄筋とコンクリートのはくり面積を求めるために次の方法を考案した。

ひびわれ幅の測定の完了したはくり試験用供試体について、コンクリートカッターを用いて供試体に幅 3~5 cm、深さ 1.5~3.5 cm 程度の溝を設けた。溝の位置は、ひびわれの生じている箇所の供試体底面および供試体 1 側面である。底面の溝にはフェノールフタレイン 2% アルコール溶液を溜め、側面の溝にはビニールホース先端をコンクリート面に密着させ他端は真空ポンプと連結させた。底面の溝およびビニールホース先端部を除くその他のひびわれからは空気が吸引されぬように、ゲージ用接着剤を用いてひびわれ

部のコーティングを行った。接着剤が硬化した後、真空ポンプ(東洋真空工業株式会社製、S-351 型)を 3mb で約 8 時間作動させて、底面の溝に滞留させたフェノールフタレイン 2% アルコール溶液がひびわれ部分を浸透してコンクリートと鉄筋のはくり部分に浸入するような方法を試みた。これらの概要は図-3.2 に示す通りである。

真空ポンプを所定時間作動後に供試体を軸方向に半割りして、鉄筋とコンクリートのはくり部分へのフェノールフタレイン 2% アルコール溶液の浸入領域を検討した。ひびわれとの位置関係を明確にして、主にコンクリートへの着色状況を観察した。

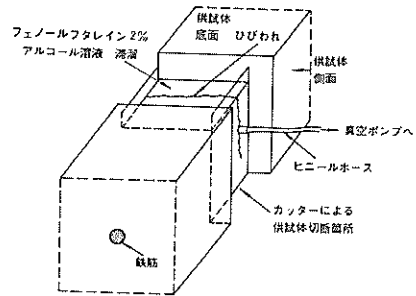


図-3.2 フェノールフタレイン溶液の注入要領図

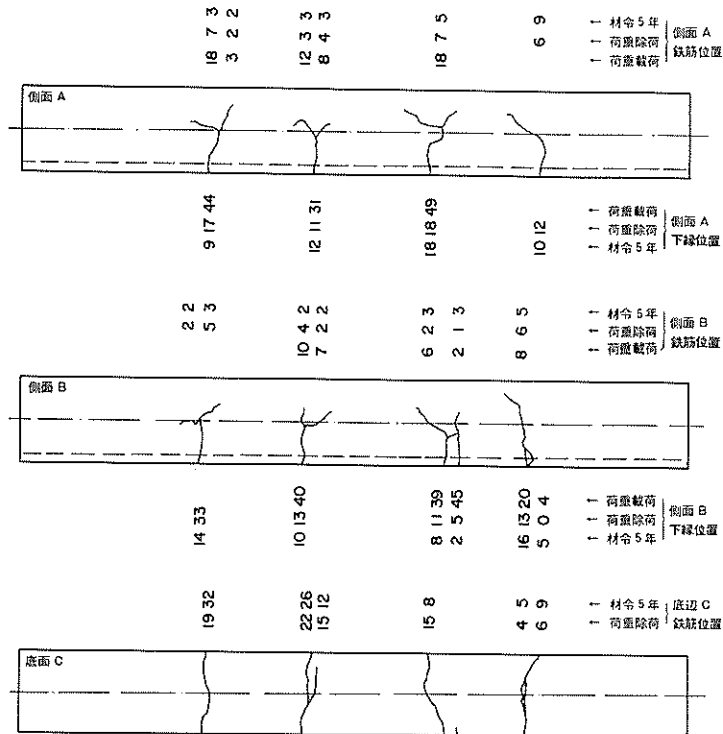


図-3.3 ひびわれ幅の経年変化例(1) (供試体 BS6-3) (単位:  $\times 10^{-2}$  mm)

### 3.5 ひびわれと内部鉄筋の腐食

#### 3.5.1 ひびわれ幅の変化

##### (1) 荷重載荷時と荷重除荷時のひびわれ幅

ひびわれ幅の測定結果の例を図-3.3および図-3.4に示した。図-3.5および図-3.6は本試験に供した全供試体についての荷重載荷時のひびわれ幅と荷重除荷時のひびわれ幅の関係を示したものである。なお、載荷試験は過大荷重を想定し設計荷重を相当に上廻る応力度を供試体に発

生させているが、図-3.6では側面下縁位置の載荷時ひびわれ幅が0.4mmを越えるものについては除外した。

鉄筋コンクリートはりの載荷試験においても、発生するひびわれの幅は相当にバラつくものであるが<sup>12)</sup>、荷重除荷後の残留ひびわれ幅に関しては現在のところ推定式は提案されていない。本試験に用いた供試体は一般の鉄筋コンクリート部材と相違して供試体の製作上中心位置に鉄筋を配筋したものであるが、図-3.5および図-3.6から実験的

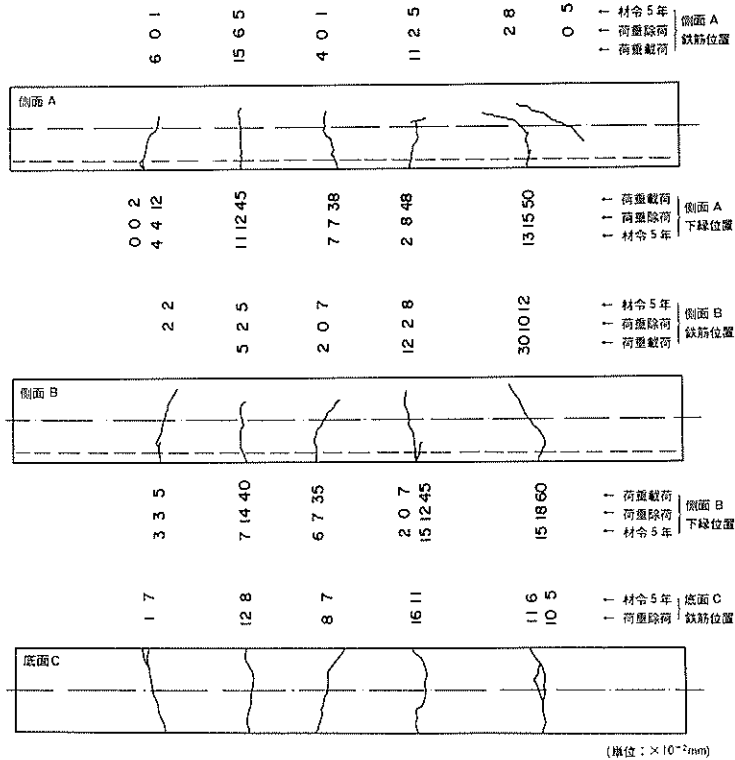


図-3.4 ひびわれ幅の経年変化例(2) (供試体 B F-11)

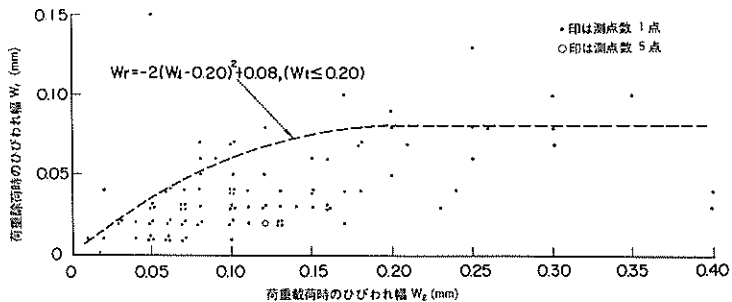


図-3.5 側面鉄筋位置における荷重載荷時および荷重除荷時のひびわれ幅の関係

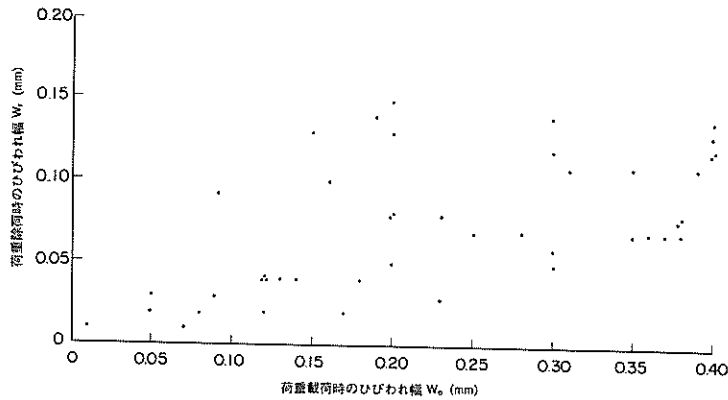


図-3.6 側面下縁位置における荷重載荷時および荷重除荷時のひびわれ幅の関係

に載荷時ひびわれ幅と残留ひびわれ幅についてのおおよその傾向を捉えることができる。すなわち、載荷時ひびわれ幅が0.2mm程度までは載荷時ひびわれ幅の増加に応じて残留ひびわれ幅も増加するが、載荷時ひびわれ幅が0.2mmを越えると残留ひびわれ幅はほぼ一定となるようである。測定値のバラツキおよびひびわれ幅の鉄筋の腐食への影響を考慮して、側面鉄筋位置におけるひびわれ幅の上限を規定する推定の式は本試験の範囲内では

$$W_t \leq 0.2 \text{ mm} \quad W_r = -2(W_t - 0.20)^2 + 0.08 \text{ (mm)}$$

$$W_t > 0.2 \text{ mm} \quad W_r = 0.08 \text{ (mm)}$$

ただし  $W_t$  : 荷重載荷時のひびわれ幅

$W_r$  : 荷重除荷時のひびわれ幅

すなわち、側面鉄筋位置の載荷時ひびわれ幅が0.15mmのときの残留ひびわれ幅は0.07mm、また、載荷時のひびわれ幅が0.2mmあるいはこれを越えるときの残留ひびわれ幅は0.08mm程度である。

#### (2) 残留ひびわれ幅の経年変化

荷重除荷時のひびわれ幅および5年経過後のひびわれ幅の測定結果を図示したものが図-3.7～3.9であり、側面鉄筋位置、側面下縁位置および底面鉄筋位置について示している。測定値のバラツキは、荷重除荷時と材令5年における測定者が異なっていること、ひびわれの形状が不規則であるためにひびわれ幅を接眼鏡を用いて測定すると測定位置に若干のずれが生じて実測値が異なること、などの理由によるものと考えられる。

上記に述べた如く、荷重除荷時と5年経過後ではひびわれ幅に若干の相違は認められるが、全般的には両者のひびわれ幅はほぼ同等か5年経過後に多少減少する傾向を示している。この原因はコンクリートのクリープや鉄筋のリラクゼーションなどが考えられるが、明確な結論を得ること

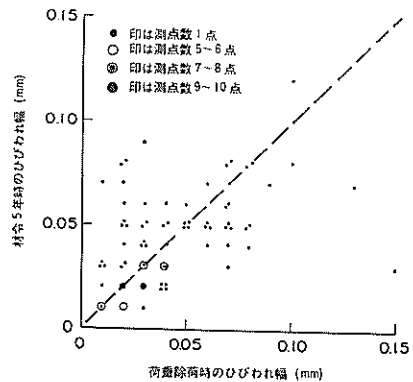


図-3.7 側面鉄筋位置におけるひびわれ幅の経年変化

はできない。本文では、ひびわれ幅と鉄筋の腐食の関係を検討するときには、5年経過後に求められたひびわれ幅を基準とすることとする。

#### 3.5.2 残留ひびわれ幅と鉄筋の腐食

##### (1) 鉄筋の腐食状況

いずれの供試体においても、鉄筋のサビがひびわれを通してコンクリート表面に溶出するものは認められなかった。

供試体を半割りにして鉄筋を取り出して腐食の状況を観察すると、必ずしもひびわれ箇所すべて腐食が認められる状態ではない。トレースできる程度の腐食を生ずるものであってもその面積は相当にバラツキを示している。図-3.10は腐食面積の測定できたものに関して、腐食状況、腐食面積およびひびわれ幅を示したものである。図-3.10から明らかなように腐食はひびわれ箇所の鉄筋の全周に拡大しておらず、コンクリート打込み方向に対して鉄筋の下

面に集中的に現われる傾向を示している。これは、コンクリート打込みにおけるブリージングの影響、および、供試体測面に比較して底面ひびわれ幅が大きいこと、などの理

由によると考えられる。孔食は認められず、大部分の腐食は黒サビが鉄筋表面に固着した状況であった。鉄筋の腐食状況は図-3.11に例示した。

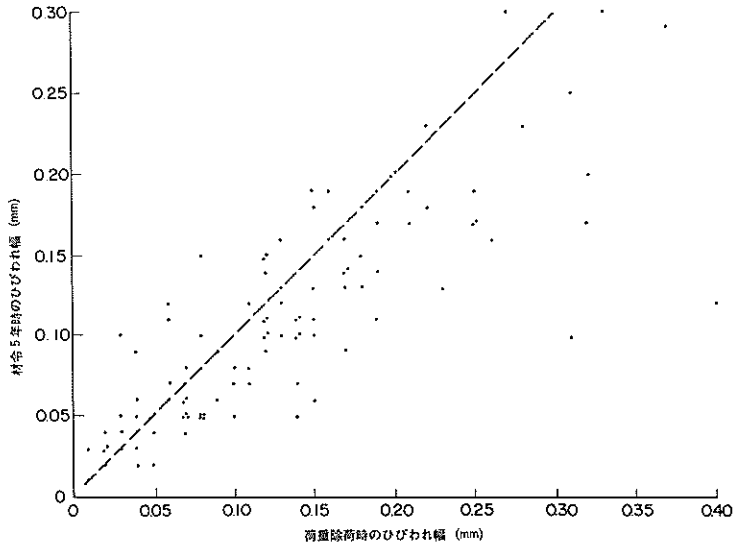


図-3.8 側面下縁位置におけるひびわれ幅の経年変化

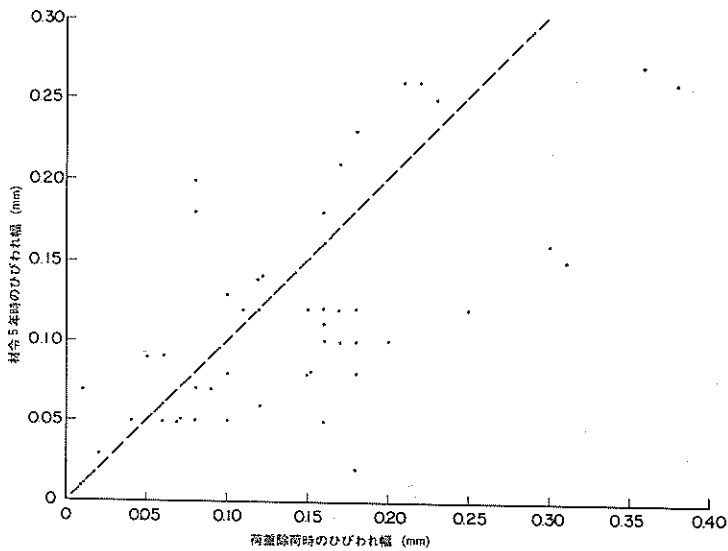


図-3.9 底面鉄筋位置におけるひびわれ幅の経年変化

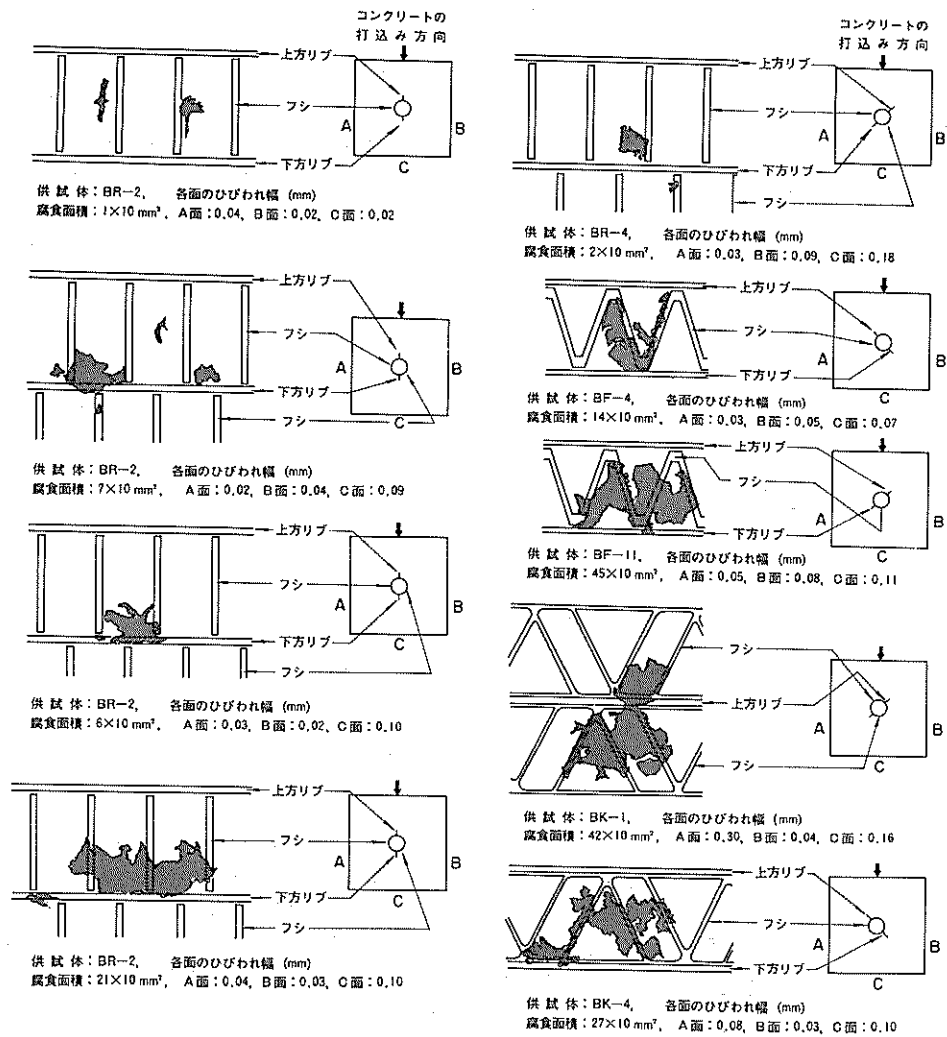


図 3.10 部分腐食の観察結果

ひびわれ発生箇所以外でも若干の腐食は認められたが、いずれも腐食面積の測定できぬ程度の点錆である。本試験はかぶりが4.2cmでコンクリートの打込み方向は鉄筋軸方向に対して直角であるが、腐食の傾向はかぶりを4cmとシコンクリートの打込み方向と鉄筋軸方向を平行とした表-2.8の測定値とほぼ一致するものである。すなわち、かぶりを4cm程度確保するときには5年経過した時点においてもひびわれ箇所以外では腐食はほとんど発生しないと考えるてよい。

(2) ひびわれ幅と鉄筋の腐食

鉄筋の腐食を検討するための供試体表面のひびわれ幅は、

側面鉄筋位置および底面鉄筋位置に発生したひびわれを選んだ。側面は両側のひびわれ幅が測定されているが、両側面のひびわれ幅が相当に異なるものを除外して平均値を求め鉄筋の腐食との関連を求めた。

図-3.12は、側面および底面の鉄筋位置の残留ひびわれ幅と鉄筋の腐食の関係を示したものである。図-3.12によると側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅が0.1mm以下の範囲では、全ひびわれ数46本のうち腐食の認められないものは65%、腐食の認められたものは35%であった。後者のうちで点錆程度のもの、面積の測定できるほどの腐食の発生しているもの、は同数であった。

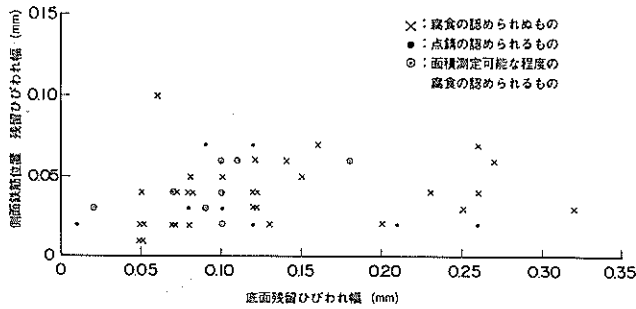


図-3.12 ひびわれ幅と鉄筋の腐食

表-3.6 側面鉄筋位置のひびわれ幅と鉄筋の腐食

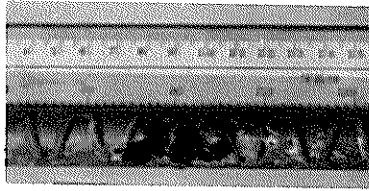
残留ひびわれ幅 (mm)	載荷時ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ本数	腐食の有無		
			腐食なし	点錆	部分腐食
0.01	0.01	2	2	0	0
0.02	0.03	12	7	4	1
0.03	0.04	8	4	2	2
0.04	0.06	10	8	0	2
0.05	0.07	3	3	0	0
0.06	0.10	6	3	0	3
0.07	0.14	4	2	2	0
0.10	-	1	1	0	0

次に、側面鉄筋位置における個々の残留ひびわれ幅と鉄筋腐食の有無を整理すると表-3.6に示す結果となる。表中に示した載荷時ひびわれ幅は3.5.1(1)で述べた関係式から計算した値である。ひびわれの本数が少なく、浸漬後5年の経過した時点であり、現段階で明確な結論を得ることはできないが、表-3.6によると小さな残留ひびわれ幅で

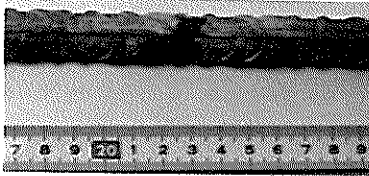
あっても必ずしも腐食が発生しないとは言えないようである。この傾向は既往の報文<sup>3)</sup>の結果ともほぼ一致するものである。しかし、全ひびわれ幅のうち面積の測定できる程度の腐食の発生する割合が50%程度の残留ひびわれ幅は、ほぼ0.05~0.06mm付近にあるものと思われる。このときの載荷時ひびわれ幅の推定値は、0.10~0.15mm程度である。5年間供試体を感潮部に設置した測定結果<sup>3)</sup>によると、ほぼ50%の鉄筋が著るしく腐食を生ずるひびわれ幅は0.15mmである。本試験とは供試体の試験では、鉄筋のかぶり、陸上における暴露期間、本試験における載荷時ひびわれ幅の計算法、など相違点はあるが、おおよその傾向はほぼ類似するものと考えられる。

3.6 鉄筋とコンクリートのはくり

はくり状態の観察結果を図-3.13に例示した。当初はひびわれ部分のコンクリートが炭酸化して変色されず、この部分に対応する鉄筋は腐食しており、ひびわれ部分からある距離以遠のはくり部分のコンクリートはフェノールフタレイン2%アルコール溶液によって赤変することを予想したが、図-3.13に見られるように鉄筋とコンクリートがはく離したと考えられる部分はいずれも赤色に着色してい

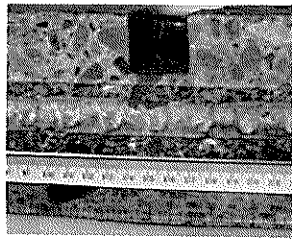


(1) 供試体 BF - 11

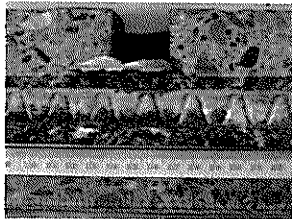


(2) 供試体 BK - 1

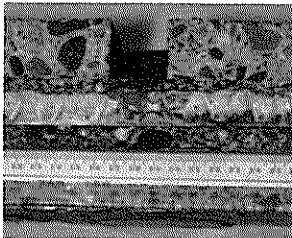
図 - 3.11 鉄筋の発錆状況例



(1) 供試体 BF - 9



(2) 供試体 BF - 9



(3) 供試体 BF - 11

図 - 3.13 フェノールフタレイン溶液の注入による着色状況例



た。注入したひびわれ部分の鉄筋は供試体を半割り後の観察によっても腐食が認められぬことから、はく離部分のコンクリートが赤色したことは十分に妥当性を有するものと考えられ、ひびわれ幅が極めて小さくひびわれを通して空気や湿分が自由に浸透しなかったものと思われる。なお、一部の供試体ではフェノールフタレイン2%アルコール溶液により着色された領域の内部に赤変しない部分が認められたが、霧吹き器により再度溶液を吹きつけると赤変して周囲の赤色領域と判別ができなくなった。これは、当初予想したような炭酸化領域ではなく、鉄筋表面とモルタルが付着してフェノールフタレイン2%アルコール溶液がその部分に浸透しなかったことによるものである。

表-3.7はひびわれ幅とはくり長さの測定結果を示したものである。コンクリートの赤変した部分は鉄筋全周に亘

表-3.7 ひびわれ幅とはくり長さ

側面鉄筋位置		① 底面鉄筋位置 残留ひびわれ幅 (mm)	② はくり長さ (mm)
① 残留ひびわれ幅 (mm)	荷重載荷時 ひびわれ幅 (mm)		
0.02	0.25	0.20	32
0.04	0.08	0.23	22
0.04	0.10	0.26	49
0.05	0.10	0.08	40
0.07	0.13	0.26	24

注：① 5年経過時のひびわれ幅  
② 鉄筋軸方向の最大はくり長さ

るものではないが、表-3.7では赤変した部分の最大の長さで示してあり、この部分は一般に鉄筋のリブに沿って鉄筋軸方向に進行する形態であった。同表によると測定値に相当のパラッキはあるものの、側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅が0.02~0.07mm程度で最大はくり長さは22~49mmに達している。このときの荷重載荷時のひびわれ幅は0.10~0.25mmであって、一般の鉄筋コンクリート部材において設計荷重下で十分に起こり得る程度のひびわれである。最大はくり長さは、側面鉄筋の残留ひびわれ幅に対して340~1,600倍程度、荷重載荷時のひびわれ幅に対して130~490倍程度となっている。

本試験で得られたはくり長さは、外力が作用することによる鉄筋とコンクリートの付着面の破壊によるもの<sup>21)</sup>のほかに、供試体製作時におけるブリージングなどの影響による鉄筋表面の空隙形成の要因なども含まれていることと思われる。しかし、本試験の場合はすきま腐食によるはくりの拡大は考えられない。どのような原因に基づくものであるにせよ、コンクリートと鉄筋の付着が破壊され、十分な水

平せん断力がコンクリートから鉄筋に伝達されないとの観点からは、同様の部材耐力上の減退をもたらすことには変りはないが、本試験の範囲内ではこのような顕著な腐食は発生していないと考えられる。

### 3.7 まとめ

コンクリート供試体(10×10×80cm)の中心位置に異形棒鋼を埋め込み、載荷試験を行ってひびわれを発生させた後荷重を解放して、海水循環水槽内の感潮部に設置した。5年経過ののちのひびわれ幅の変化、内部鉄筋の腐食状況などを調べた結果、本試験の範囲内ではおおよそ次のような事項が明らかとなった。

- (1) 荷重除荷時のひびわれ幅(W<sub>R</sub>)は、荷重載荷時のひびわれ幅(W<sub>I</sub>)がある値以上となるとほぼ一定となるようであり、本供試体の側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅の上限はほぼ次のように表わすことができた。

$$W_I \leq 0.2 \text{ mm}, W_R = -2(W_I - 0.20)^2 + 0.08 \text{ (mm)}$$

$$W_I > 0.2 \text{ mm}, W_R = 0.08 \text{ (mm)}$$

- (2) 鉄筋の腐食は大部分がひびわれ発生断面に生じており、この部分以外では若干の点錆が生じている程度であって、かぶりを4cm程度とするときには5年経過時点においてもひびわれ箇所以外では腐食はほとんど発生しないと考えてよい。
- (3) 側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅が0.1mm程度以下では、ひびわれ断面の鉄筋の65%には腐食は認められず、腐食の認められたものであってもその半数は点錆であった。
- (4) フェノールフタレイン2%アルコール溶液を真空ポンプを用いて浸透させた結果によると、鉄筋とコンクリートの最大はくり長さは22~49mm程度であった。このときの荷重載荷時のひびわれ幅は0.10~0.25mm、残留ひびわれ幅は0.02~0.07mmであった。

## 4. あとがき

以上本報告では、潮の干満作用を再現した実験水槽の感潮部にコンクリート供試体を設置して、5年を経過した時点における内部鉄筋の腐食に関する実験結果を概括的に述べてきた。

円柱供試体(φ15×30cm)に鉄筋を埋め込み、セメントの種類、セメントのSO<sub>3</sub>量、練りませ水の種類およびかぶりを相違させた浸漬試験の結果によると、現在までのところ顕著な相違は認められないが、練りませ水に海水を用いると水道水に比較し鉄筋の腐食が増加すること、かぶりを増せば腐食が減少すること、などの定性的な傾向がみられた。

角柱供試体(10×10×80cm)に鉄筋を埋め込み、荷重を載荷して除荷した後には水槽に浸漬した試験結果によると、荷重載荷時のひびわれ幅が0.2mm以上では残留ひびわ

れ幅はほぼ一定値となるようである。かぶりを4cm程度とするとときにはひびわれ断面以外では鉄筋はほとんど腐食しないと考えられ、また、側面鉄筋位置の残留ひびわれ幅が0.1mm程度以下では、ひびわれ断面位置の65%の鉄筋には腐食が認められなかった。

円柱供試体および角柱供試体のいずれの試験結果によっても、現段階では鉄筋コンクリート部材に著しい損傷を与えるような腐食は発生していない。

これらの実験は、さらに長期に亘る試験結果を待った上で、さらに詳細な検討を加える予定である。

(1976年3月29日受付)

## 謝 辞

本研究は1970年より長期浸漬試験として継続中のものである。試験の開始に際しては、青木義典元室長(現運輸省港湾局)、善一章主任研究官より種々の御指唆を賜った。供試体の製作および若材令の試験は、浅岡邦一君(元材料施工研究室員、現兵庫県)、田淵民雄君(元材料施工研究室員、現島根県)の尽力による所が大きい。材令5年に至る期間の供試体の管理は、上記両君の他に、佐々木克彦君(元材料施工研究室員)、小野寺幸夫君(元材料施工研究室員、現宮古港工事事務所)、丸山 浩君(前材料施工研究室員、現酒田港工事事務所)、故九嶋茂雄君、藤澤孝夫君(前材料施工研究室員、現沈埋構造研究室員)が継続的に担当した。材令5年試験の一部は、石野茂樹君(東海大学海洋学部)が実施したものである。久里浜における気温の測定結果は、高橋智晴室長(水工部海象観測研究室)の御好意により掲載の許可を頂いた。さらに、社団法人セメント協会の技術委員会関係者の方々には、種々の懇切な御指唆と御協力を頂いた。ここに、本試験に御協力頂いた上記の方々に対し、深甚の謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 赤塚雄三、関 博、浅岡邦一、佐々木克彦、“海水の作用を受けるコンクリートの中酸化について”、港湾技研資料、*第88*、39pp.、1969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、*第142*、33pp.、1972年6月
- 3) 関 博、丸山 浩、“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、Vol. 12、*第3*、pp. 203~225、1973年9月
- 4) 関 博、古賀尚宏、“海洋環境におけるプレストレストコンクリートの耐久性”、港湾技研資料、*第191*、32pp.、1974年6月
- 5) J. D. Mozer, A. C. Bianchini and C. E. Kesler,

“Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete”,  
ACI Journal, Proc. Vol. 62, *第8*, pp. 909~931,  
August 1965

- 6) 岸谷孝一、“鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の腐食について”、コンクリートジャーナル、Vol. 12、*第2*、pp. 1~16、1974年2月
- 7) 善一章、“港湾における鋼材の腐食と防食について”、第18回直技研報告資料、29pp.、1967年10月
- 8) T. B. Kennedy, “Tensile Crack Exposure Tests of Stressed Reinforced Concrete Beams”,  
ACI Journal, Proc. Vol. 52, *第10*, pp. 1049  
~1063, June 1956
- 9) O. E. Gjølrv, “Durability of Reinforced Concrete Wharves in Norwegian Harbours”,  
Page Bros. Ltd., 208pp., 1968
- 10) “コンクリート標準示方書解説(昭和49年度版)”,  
土木学会, 434pp., 1974年9月
- 11) “特集=コンクリートのひびわれ”、コンクリートジャーナル、Vol. 11、*第9*、pp. 1~130、1973年9月
- 12) E. G. Nawy, “Crack Control in Reinforced Concrete Structures”,  
ACI Journal, Proc. Vol. 65, *第10*, pp. 825~836, October 1968
- 13) 関 博、“太径鉄筋を用いたコンクリートはりのひびわれ”、港湾技術研究所報告、Vol. 12、*第4*、pp. 201~231、1973年12月
- 14) “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)”,  
American Concrete Institute, 78pp.
- 15) Commitee Europeen du Beton-Federation Internationale de la Precontrainte,  
“International Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures”,  
FIP Sixth Congress (Prague), 80pp., June 1970, (English Edition)
- 16) “港湾構造物設計基準”、日本港湾協会、1967年4月
- 17) “JIS A 5309-71 遠心力鉄筋コンクリートポール”
- 18) 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1報)”  
港湾技術研究所報告、Vol. 5、*第15*、80pp., 1966年9月
- 19) 神山一、久松光世、小沢俊司、“直接引張り鉄筋コンクリート供試体による付着破壊長さの測定”、セメント技術年報、XVIII、pp. 524~527、1964年

- 20) 後藤幸正、植田伸治、満木泰郎、“鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究”、コンクリートライブラリー、㍻ 14、pp. 94 ~ 109、1965年12月
- 21) 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、㍻ 308、pp. 50 ~ 57、1972年10月

港 灣 技 研 資 料      No. 237

1 9 7 6 · 6

編 集 兼 發 行 人      運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所

發 行 所      運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所  
                 橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所      勝 美 印 刷 株 式 會 社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.