

海水が浸透するひびわれ中の鉄筋腐食に関する基礎研究

蛭川友司*・見坊東光**・森 芳徳***・
伊藤 洋****

海洋中空大型構造物では、その内外で水圧差を生じひびわれ中に海水が浸透することとなり、水密性のみならず鉄筋の腐食促進が懸念される。本研究では、こういった環境下にある鉄筋腐食に係わる基本的性質を明らかにすることを目的として、割裂ひびわれに直行する鉄筋を設置した特殊な円柱供試体に人工海水を長期間連続通水し、その浸透特性および鉄筋の腐食性状について検討を加えた。

Key Words: corrosion, corrosion rate, crack, permeability, reinforcing bar, concrete, nondestructive test

1. はじめに

近年、海洋においても大型の中空構造のRC製構造物が建設されつつある。この種の構造物では、マスコンクリートとなるものが多くあり、外部拘束による貫通性の温度ひびわれが発生する可能性がある^{1),2)}。このような構造物が海水面下にあると、構造物の内外で圧力差を生じ、ひびわれ中に強制的に海水が浸入・浸透することとなる。このことは、単に水密性の問題にとどまらず水、塩分、酸素がこのようなひびわれを通じて供給されることによる鉄筋の腐食が懸念される。しかし、従来の海洋コンクリート構造物の多くは重量構造物であって、既往の研究における海水面下の腐食環境は自然浸漬条件であり^{3),4)}、このような環境条件下における鉄筋の腐食評価を行ったものはほとんど見当たらない。従って、この種の構造物の設計・施工および防食対策を行う上で、基礎データさえないのが現状である。

本研究では、こういった背景にあって、コンクリート構造物のひびわれ中を高水圧の海水が浸透するときの鉄筋腐食に係わる基本的性質を明らかにすることを目的として、約1ヶ年の連続通水実験を行った。本研究における焦点は、まず、腐食環境を把握することが重要であるとの判断から、内外水圧差があるコンクリート内のひびわれ中を海水が浸透するときの透水特性を明確にすることである。つぎに、評価パラメータの指標と考えられるひびわれ幅およびひびわれ内の流量と鉄筋腐食の係に係わる基礎データを得て、それらの基本的性質を明らか

にすることである。本論では、この2点を中心に検討を加えるが、本研究ではさらに新しい試みとして、鉄筋腐食速度の経時的変化特性を調べることを目的として、交流インピーダンス法による腐食反応抵抗の測定を行い、考察の一助とした。工学的に有用なくつかの新しい知見が得られたのでここにまとめて報告する。

2. 実験方法

実験の中心は、連続通水による腐食実験であるが、さらに内空壁面のひびわれ近傍に不飽和領域が存在し、直接空気に触れるような場合を想定して定期的に通水を停止し気中乾燥期間を設けた環境(乾湿繰り返し)、および浸漬環境における腐食実験を併せて行った。一方、鉄筋腐食速度の経時的変化特性を評価するため、一部の供試体において交流インピーダンス法による腐食反応抵抗の測定を行った。

(1) 実験装置

実験装置は、Fig.1に示したようなポンプ循環による定圧透水実験装置を2台(I, II)を使用した。装置Iは18供試体の設置ができ圧力は0.098~0.294 MPa (1~3 kgf/cm²) が設定できる。装置IIは3供試体の設置しかできないが、圧力は0.98 MPa (10 kgf/cm²) 程度まで設定可能である。ここで、③の高性能フィルターはろ過精度5 μmの繊維カートリッジを有しており、人工海水中の浮遊物(主に腐食生成物等)を除去し、所定の濁度以下に維持するために設けたものである。また、本装置は⑦漏水受けタンクが一定量に達すると、⑧のリターンポンプにより再び①の人工海水タンクに戻されるといった完全な循環システムであり、長時間でしかも多数供試体の連続通水が可能である。

Photo 1は、実験装置の供試体取付部を示したものである。

*元東京湾横断道路(株) 設計部課長(現 日本道路公団大月管理事務所長)(〒102 千代田区1番町15-5)

**元東京湾横断道路(株) 設計部係長(現鹿島建設(株) 土木設計本部)

*** (財) 土木研究センター 研究開発部長

**** 工博(株) 熊谷組 エンジニアリング本部 原子力・エネルギー部 係長

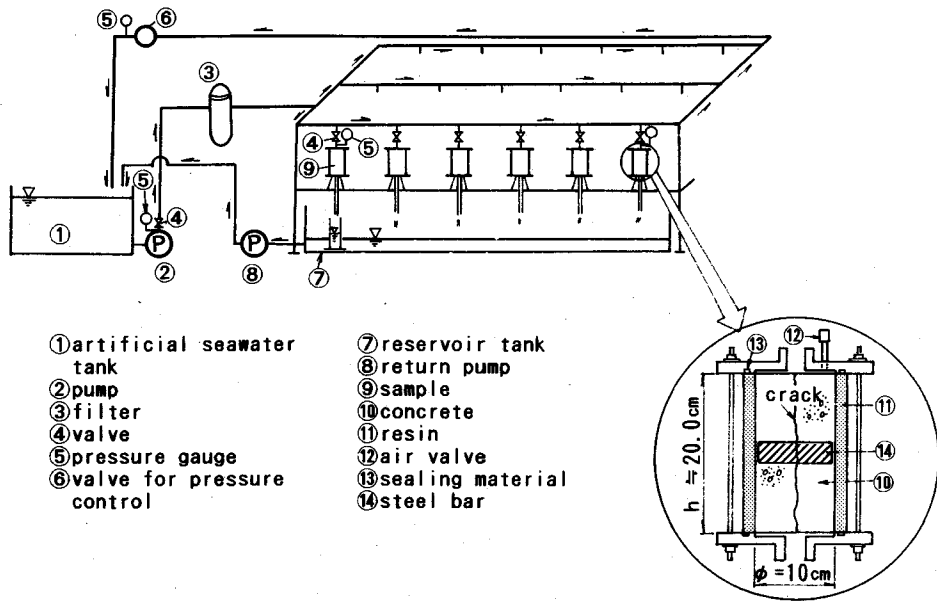


Fig.1 System of experiment.

Table 1 Mix proportion of concrete.

nominal strength f'_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	slump (cm)	air (%)	W/C (%)	s/a (%)	unit weight (N/m ³)				
						C	W	S	G	AE
26.46	25	4 ± 1	4 ± 1	55	38	2452	1353	7619	12473	18.3

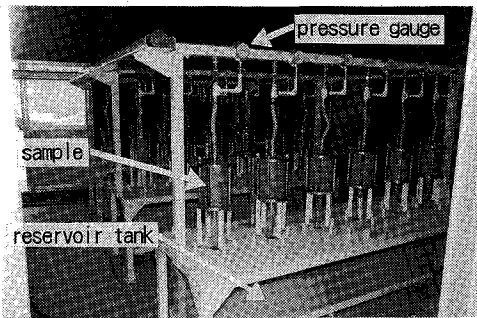


Photo 1 Experimental apparatus.

(2) 供試体の製作

供試体は、まず特殊に設計した型枠内に十分に脱脂した鉄筋（丸鋼 $\phi 28$: SS 41 表面みがき処理、および異形棒鋼 D 29 : SD 35 サンドブラスト処理）を重量・寸法測定後に取付け、コンクリートを打設した。ここで、平坦ひびわれを発生させるものは打設前に予め黄銅板をセットしておいた。3日間気中養生（温度 20°C、湿度 60% RH）した後、鉄筋と直交するように割裂ひびわれを発生、あるいは黄銅板を引き抜いて平坦ひびわれを発生させた後、周囲をエポキシ樹脂でコーティングし、硬化した後上下面をダイヤモンドカッターにより平坦に整形した

（直径 $\phi = 10$ cm、高さ $h = 20$ cm）。供試体の製作は、割裂ひびわれの不確かさを考慮して 50 本製作し、通水実験用として 21 本を用いた。ひびわれ幅の測定は、装置へのセット直前に上下面それぞれ 9 点行い、さらに実験終了後に供試体を 5 つに切断して各面のひびわれ幅をクラックルーペを用いて測定し、それらの平均値をとった。コンクリートの配合は、Table 1 に示すとおりであり、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

(3) 実験方法

a) 通水による腐食実験

まず、人工海水を装置 I 用に約 2.4 m³、装置 II 用に約 80 l を所定の配合（10 l の組成は、NaCl が 245 g、MgCl \cdot H₂O が 111 g、Na₂SO₄ が 41 g、CaCl₂ が 12 g、KCl が 7 g である）で調整した⁵⁾。この人工海水を各装置のタンクに入れた後、循環ポンプを作動させ、圧力調整弁を調節して、循環海水の圧力は装置 I で約 0.294 MPa (3.0 kgf/cm²)、装置 II で約 0.98 MPa (10.0 kgf/cm²) に設定した。つぎに、各供試体上部のバルブを開いて、供試体に水圧を作用させ、供試体取付け装置上部のエア抜きより空気を排除し、さらに各供試体上部のバルブにより設定圧力に調整して通水実験を開始した。

通水期間中は、(i) 漏水量、(ii) 腐食反応抵抗、(iii) 付帯条件（塩分濃度、溶存酸素濃度、濁度、温度、pH）を測定した。所定の通水期間（2ヶ月、4ヶ月、12ヶ月）を経過した供試体は、解体して鉄筋の腐食状況を調査し、ついで腐食速度の測定を行った。腐食速度の評価は、腐食面積率、および鉄筋の直径変化測定による侵食度を算出し、これらとひびわれ内通水量およびひびわれ幅との関係に整理した。

b) 浸漬による腐食実験

装置Ⅰの人工海水タンク中に所定の期間（2ヶ月、4ヶ月、12ヶ月）浸漬した後、通水による腐食実験供試体と同様に解体して、鉄筋の腐食状況調査および腐食速度を測定した。

c) 乾湿繰り返しによる腐食実験

装置Ⅱの設定圧力を0.294 MPaに調整して、通水1週間と乾燥（気中養生）1週間で1サイクルとして4サイクル（8週間）繰り返した。実験終了後は同様に鉄筋の腐食状況調査および腐食速度を測定した。

d) 腐食反応抵抗測定実験

一部の供試体において鉄筋の腐食反応抵抗 R_p とコンクリートのひびわれ部の抵抗 R_s の経時的変化を交流インピーダンス法により測定した^{6)~9)}。本実験では、供試体のひびわれ中に海水を連続通水するため、Fig.2に示すようなコンクリート供試体中に鉄筋を2本取り付け、これを電極とするいわゆる2電極法を採用した。本腐食実験系の等価回路は、腐食抵抗 $[R_{p1}, R_{p2}]$ とコンデンサ $[C_1, C_2]$ からなる回路を溶液（人工海水）抵抗 $[R_s]$ を介して直列に接続した構造モデルとなっていると考えられる。従って、腐食モニターで測定される分極抵抗 $[R_p]$ は、 $R_p = R_{p1} + R_{p2}$ となる。腐食速度は、この分極抵抗 R_p に逆比例する関係にある。一方、溶液抵抗 R_s はこの場合にはひびわれ中とその周辺コンクリート中の人工海水の抵抗ということになる。つまり、分極抵抗 R_p が大きいほど鉄筋の腐食速度は遅く、溶液抵抗 R_s が大きいほどひびわれ内の抵抗が増加していることになる。

(4) 実験ケース

通水実験供試体の実験ケースをTable 2に示す。ここで、各実験ケースの先頭文字Ⅰ、Ⅱは装置の区分である。実験水準は、鉄筋の種類2水準（丸鋼φ28、異形棒鋼D29）、ひびわれ形状2水準（割裂、平坦）、水圧2水準（0.098~0.294 MPa、0.98 MPa）、ひびわれ幅3種類（0.1~1.0 mmの範囲から選定）、通水期間2水準（2、4ヶ月）であり、それ以外（コンクリートの配合、ひびわれ長さ、流体等）はすべて1水準とした。この実験水準で、水圧の2水準は、基準圧力として水深30m程度を想定した場合（0.29 MPa）を設定し、過酷な条件として水深100m程度を想定した場合（0.98 MPa）を設

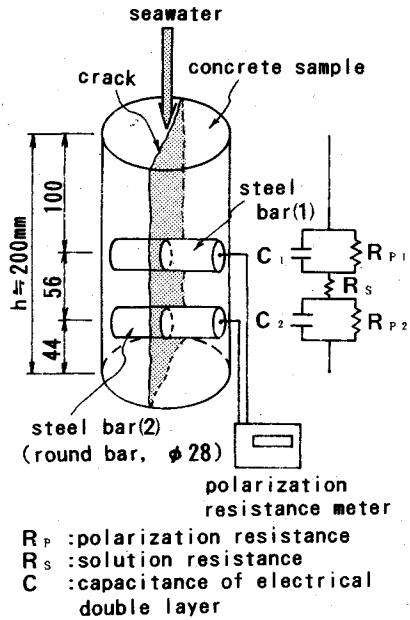


Fig.2 Monitoring system of polarization resistance.

Table 2 Experimental cases and conditions under flow condition.

specimen No.	type of bars	type of crack	crack width (mm)	pressure (MPa)	test period				
I-A-1	deformed bar(D29)		0.17	0.294	2 months				
I-A-2			0.33						
I-A-3			0.25						
I-B-1		rough	0.14			0.098	4 months		
I-B-2			0.36						
I-B-3			0.65						
I-C-1		flat	0.51					0.294	2 months
I-C-2			0.61						
I-C-3			0.92						
I-D-1	round bar (φ28)		0.51*	0.98	2 months				
I-D-2			0.64						
I-D-3			0.90						
I-E-1	rough		—			0.294	2 months		
I-E-2			0.26						
I-E-3			0.36						
II-A-1			0.14					0.98	2 months
II-A-2			0.42						
II-A-3			0.80						

* the specimen for chemical analysis

定した。ただし、平坦ひびわれを有する供試体の水圧が0.098 MPaとなっているのは、同供試体からの漏水量がかなり多く、その透水抵抗が小さいことから結果的に供試体上面の水圧が実験装置全体の設定圧力（0.294 MPa）まで上昇しなかったことによる。

通水実験における供試体本数は21本であり、乾湿繰り返し実験のそれは3本である。一方、浸漬実験の各水準は通水実験のそれと同様であるが、浸漬期間の配分は

Table 3 Experimental cases for corrosion monitoring.

test condition	specimen No.	crack width (mm)	pressure (MPa)	polarization resistance R_p (kΩ)	corrosion rate ($\times 10^{-3}$ mm/y)	test period
seawater flow in a crack	I-F-1	0.09	0.294	0.236	0.60	12 months
	I-F-2	0.35		0.070	0.15	
	I-F-3	0.36		0.105	0.50	
submerged in seawater	S-1	0.14	—	0.116	0.15	12 months
	S-2	0.36		0.233	0.20	
	S-3	0.48		0.252	0.35	
seawater flow and air curing cycle	II-B-1	0.06	0.294	—	7.00	2 months
	II-B-2	0.12		—	6.90	
	II-B-3	0.28		0.151	5.30	

* 1: $R_p = (\int (R_p) dt) / T$, T: test period

Table 4 Results of environmental conditions.

measured item	marked value	average measured results		related phenomena	environments of seawater in Tokyo bay
		apparatus I	apparatus II		
temperature	under 50°C	27.2 ~ 41.0 °C	45.0 °C	corrosion seepage	8 ~ 20 °C
turbidity	under 4.0ppm	0.15 ~ 0.51 ppm	0.16 ppm	seepage (clogging)	2 ~ 7 ppm
concentration of salt	order of 3.27%	2.80 ~ 3.15 %	3.06 %	corrosion seepage	order of 3.0 %
concentration of dissolved oxygen	order of 6.0ppm	4.20 ~ 4.64 ppm	4.38 ppm		3.0 ~ 9.8ppm
pH	under 9.5	7.89 ~ 8.20	8.15		7.9 ~ 8.4

異なり、2ヶ月浸漬が3本、4ヶ月浸漬が7本、12ヶ月浸漬が15本の計25本である。また、腐食反応抵抗の測定を行ったケースは、Table 3に示したように通水実験のI-F-1~3の3本(12ヶ月通水)、浸漬実験(12ヶ月浸漬)のS-1~3の3本、乾湿繰り返しII-B-1~3の3本の9ケースである。

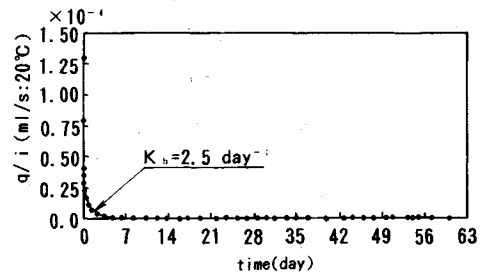
なお、すべての実験ケースは、8月10日に開始した。

3. 結果と考察

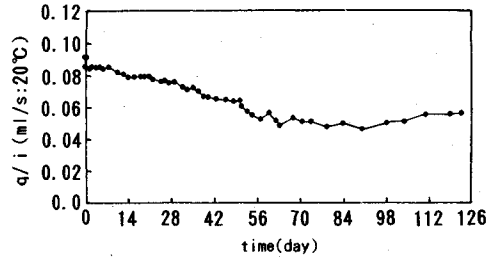
得られた結果を整理し、漏水量および鉄筋腐食の観点から検討を加えた。ただし、腐食反応抵抗測定用供試体は、鉄筋を2本配置していることもあって、1本配置供試体とは区別して整理・検討した。

(1) 付帯・環境条件

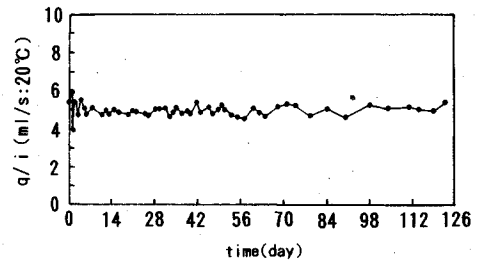
人工海水を所定の条件に維持するため、2.(3) a)で示した項目の付帯条件の測定を行っており、その結果をTable 4にまとめて示す。管理目標値は、実際の環境条件を想定して設定したものである。ここで、温度が一般の海水に比較してかなり高く設定しているのは、装置が高圧力水の循環系であって、管内の摩擦熱が発生することによるが、腐食速度を多少促進している可能性がある⁹⁾。濁度は十分小さく、腐食生成物はほとんど捕捉・除去されたものと考えられる。塩分濃度は、ほぼ管理目標値の範囲にある。溶存酸素濃度は、温度が高いためにやや低めの値となっている。これは腐食速度を逆に抑え



(a) I-A-1



(b) I-E-2



(c) I-D-3

Fig.3 Typical discharge [q/i] with time.

ることになるが、影響は10~20%程度と推定される⁹⁾。pHは、管理目標値以下であり、腐食速度に与える影響は無視し得る(pH=5~9.5では、腐食速度は変化しない)¹⁰⁾。結果的に付帯条件は、管理目標をほぼ満足しており、腐食速度の評価において、特に補正等は行わないこととした。

(2) 漏水量

漏水量の典型的な経時変化をFig.3に示す。同図の漏水量は、温度20°Cに換算し、動水勾配*i*で除した値*q/i*を用いる。まず、(a)は漏水量が指数的に急減して恒常流量(ほぼ停止状態)となる例であり、ひびわれは割裂で幅が0.17mmの場合である。このような流量の減少傾向は、結果的には目詰まりによると考えられるが、その原因を調べるため、供試体を解体して目詰まり物質をEPMA分析(電子線マイクロアナライザー)¹¹⁾、X線回折、および化学成分分析を行った。その結果、割れ目壁面に付着・拘留された物質は、コンクリート中の成分と人工海水中の成分が反応して難溶性物質[主にCaCO₃とMg(OH)₂]が生成されたものであることが

推察された。前者は、セメントあるいは人工海水中の Ca^{2+} イオンが強アルカリ性水（人工海水が、コンクリートに接触して強アルカリ性水となったもの）に含まれる CO_3^{2-} イオンと反応して生成したものであり、後者は人工海水中の Mg^{2+} イオンが強アルカリ性水の OH^- イオンと反応したものと考えられる。Ca はコンクリート中および人工海水中に多く含まれ、Mg は人工海水中に多く含まれている。

他方、図中には次式に示す濁質拘留モデルによる流量低減式による理論曲線¹²⁾を併せて示しているが、よく一致している。

$$q = q_0 / (1 + 2K_b t \cdot q_0 / q_i)^{3/2} + q_c \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 q : 流量,

q_i : $t=0$ での流量,

q_c : 恒常流量,

q_0 : 閉塞対象流量 ($=q_i - q_c$),

K_b : 閉塞係数,

t : 時間である。

このときの閉塞係数は $K_b = 2.5 \text{ day}^{-1}$ であり、本実験における他の流量急減タイプのそれは $2.0 \sim 6.5 \text{ day}^{-1}$ の範囲にある。水道水を用いた鉄筋のない供試体を用いた別の実験では $K_b = 1.0 \text{ day}^{-1}$ 程度であるから¹²⁾、本実験での閉塞の方がかなり速いことになる。この原因としては、本実験ではフィルターを通して濁度を水道水程度としていることを考慮すると、流体中の溶解成分の違いがなく、上述の海水成分との反応生成物による影響と判断される。

同図の (b) は、徐々に流量が低下するものであり、ひびわれは割裂で幅は 0.26 mm の場合である。この現象もやはり目詰まり過程と考えられるが、最終的な低下率は初期流量の半分程度となっている。同図の (c) は、流量が経時的にほとんど変化しない例であり、平坦でひびわれ幅が 0.90 mm の場合である。ひびわれ幅が大きく、形状が平坦であると流速が大きくなって、反応生成物、あるいは浮遊物質が付着・拘留されにくいことが推察される。

つぎに、Fig.4 は、実測ひびわれ幅と漏水量 (20°C に換算) の関係を示したものである。図は、横軸に実測ひびわれ幅をとり、縦軸に漏水量 q/i (ml/s) [q : 漏水量, i : 動水勾配] を対数でとったものである。まず、平坦ひびわれにおける流量は、全体に割裂のそれよりかなり大きく、経時的にもほとんど低下していないことが認められる。一方、割裂ひびわれにおける流量 (初期流量 \circ と 60 日後の \square) に着目すると、ひびわれ幅が 0.25 mm 以下ではいずれも最終的にはほぼ停止状態となっているが、逆に 0.35 mm 以上になると有意な低減はみられない。また、参考までに既往の研究 ($q/i = 57.3 w^3 l + 0.218 w^2 l$; w : ひびわれ幅, l : ひびわれ平面長さ)¹²⁾で

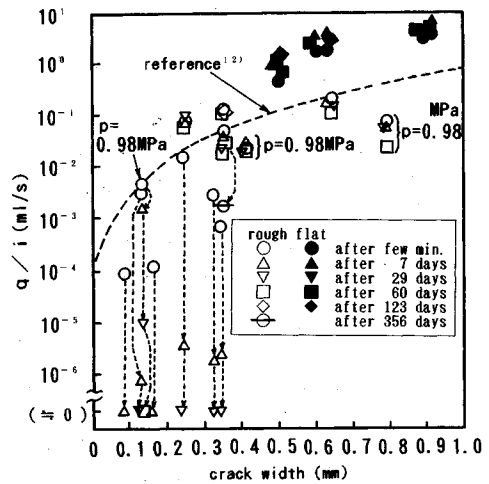


Fig.4 Relationship between crack width and discharge.

得られているひびわれ幅と漏水量の関係を図中に破線で示したが、初期流量と比較的よく一致している。

(3) 鉄筋腐食

a) 鉄筋の腐食状況

所定の期間を経た供試体を解体して、鉄筋の腐食状況を調査・スケッチしたものの代表的な例を Fig.5 に示す。同図の展開図は、鉄筋下面 (流出側) が中心となるように示している。これらのスケッチ図および写真撮影により、①腐食形態は局部腐食型で、短期的に部分的に深く腐食が進むと考えられる形態 (D型) に分類できる¹³⁾、②通水鉄筋の方が浸漬のそれより腐食が激しい、③通水鉄筋ではひびわれ面と交わる付近で腐食が著しい、④異形棒鋼では、ひびわれ面に近いフシ (凸の部分) で腐食が進行する、⑤鉄筋の下面での腐食が激しい、⑥高圧通水鉄筋ではひびわれ部よりさらに広い範囲まで腐食する、⑦乾湿繰り返し供試体の 2本の鉄筋は、乾燥時に空中環境に近い面、すなわち上側鉄筋の上面、下側鉄筋の下面で著しい、などの傾向が認められた。また、解体直後の錆の色が黒っぽく酸欠状態と想定され、その後数分間の間に淡緑色を経て黄褐色に変色し、酸化されていく状況が観察された。

Photo 2 は、実験終了後の供試体解体時における鉄筋の腐食状況の一例を示したものであり、Photo 3 は、通水開始から 2ヶ月経過後の鉄筋下面の腐食状況例を示したものである。

b) 鉄筋の腐食面積

腐食面積率と実測ひびわれ幅との関係を整理したものが Fig.6 である。腐食面積率は、 $0.01 \sim 18.04\%$ の範囲にある。もともとひびわれ部の周辺に腐食が集中する傾向にあるため、全体に対する腐食面積率はあまり大きくない。また、全体的には腐食面積率とひびわれ幅や通水期間などの関係は特に認められない。ただ、通水鉄筋

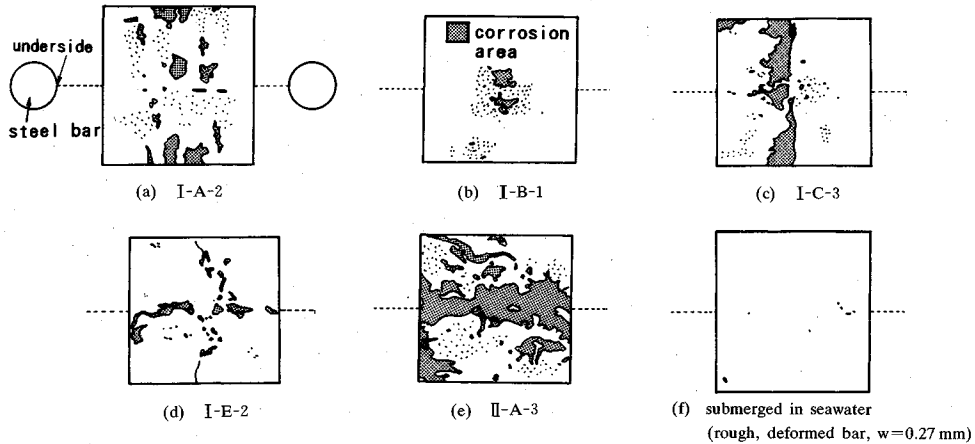


Fig.5 Typical distributions of corrosion area in steel bars.

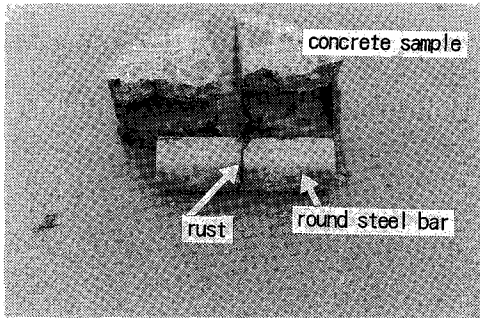


Photo 2 Test piece and steel bar for I-C-1.

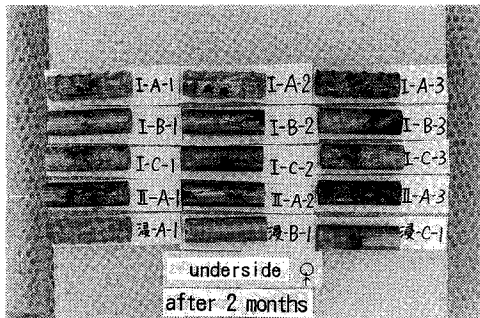


Photo 3 Rust distributions at underside of steel bars after 2 months of testing.

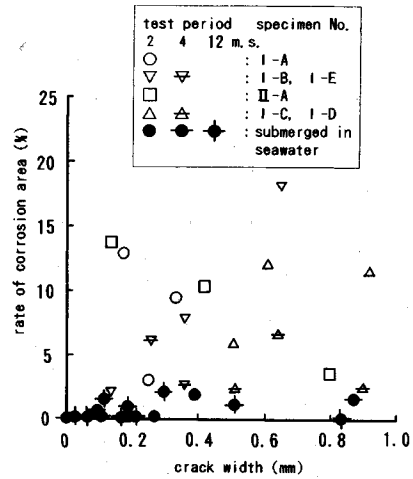


Fig.6 Relationship between rate of corrosion area and crack width.

の方が、少なくとも浸漬鉄筋に比べて腐食面積率が大きいことは確認できる。

c) 鉄筋の侵食度

腐食速度の評価として、重量変化率と直径変化の測定を行って侵食度の算出を行ったが、重量変化率に関しては全体の鉄筋重量に大して局部腐食型であることもあって、その変化量が極めて小さく、十分な精度が期待できなかったため、ここでは不確定要素の比較的少ない直径変化測定法による侵食度を評価の対象とする。鉄筋の直径測定は、ポイントマイクロメータを用いて実験前に鉄

筋の中心および両端部の3断面について30°ピッチで6ヶ所の測定を行い、実験後は腐食が最も著しい部分(主にひびわれ面と交わる付近)を一断面選定し、同様に30°ピッチで6ヶ所測定を行い、それぞれ平均値をとった。従って、侵食度の評価は次式による¹⁴⁾。

$$\text{侵食度 (mm/y)} = \frac{\text{実験前後の平均直径の差}}{2 \times \text{試験日数 (day)} / 365} \dots (2)$$

Fig.7は、ひびわれ幅と侵食度の関係を示したものである。侵食度のオーダーは、通水鉄筋で $0.0 \sim 1.84 \times 10^{-1}$ (mm/y)であるのに対し、浸漬鉄筋ではひびわれ幅に特に関係なく $10^{-3} \sim 10^{-2}$ (mm/y)程度となっている。同図でひびわれ幅の大きい1ヶ所(I-D-3, 平坦, △, 4ヶ月)で小さい値を示すものがあるが、それ以外では侵食度とひびわれ幅に明確な正の相関が見られる。ただ、この小さい値を示している鉄筋(I-D-3)は、断面平均では侵食度は小さいものの、著しい孔食が認められてい

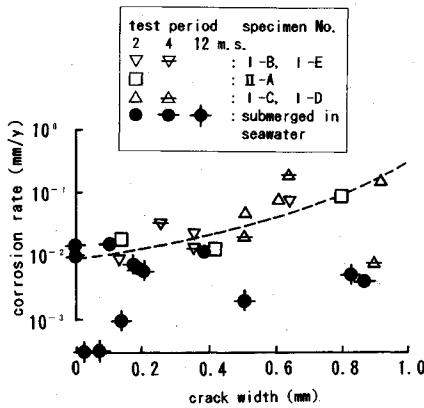


Fig.7 Relationship between corrosion rate and crack width.

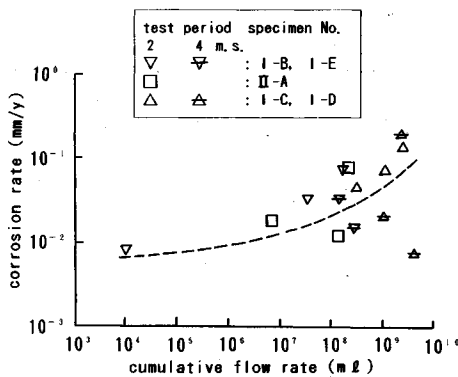


Fig.8 Relationship between corrosion rate and cumulated discharge.

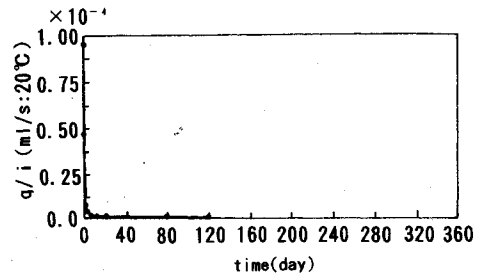
る。

つぎに、Fig.8は、累積流量と侵食度の関係を示したものである。この場合も、上述の1体を除けば、累積流量と侵食度には比較的よい相関がみられる。しかし、この場合は累積流量の差異が、 $10^4 \sim 10^{10}$ ml の 10^6 倍程度で、侵食度は10倍程度の差となっている。つまり、通水流量は腐食速度に影響を与えるが、比例的には寄与しない結果となっている。

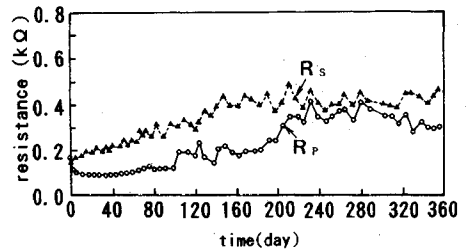
(4) 腐食反応抵抗の測定

腐食反応抵抗測定供試体の鉄筋腐食状況は、基本的には上述の3.(3)と同様であるが、2本の鉄筋には差がみられた。2本の鉄筋の平均侵食度は、Table 3に示した。乾湿繰返し供試体における侵食度は、連続通水及び浸漬のそれに比べてかなり大きくなっていることが分かる。

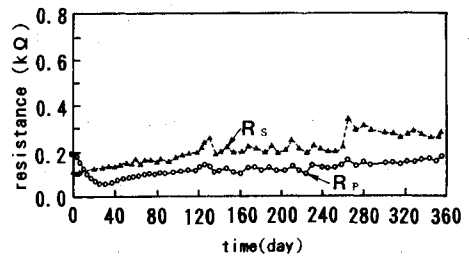
つぎに、腐食反応抵抗の結果として、Fig.9に代表的な漏水量 (q/i) の経時変化に対応させた R_p 、 R_s の経時変化の結果を示す。(a)、(b)は12ヶ月連続通水供試体、(c)は浸漬供試体(腐食反応抵抗)、(d)、(e)は乾湿繰返し供試体である。まず、(a)の通水供試体では、漏水量は初期より大きく低減し、7日後ではほぼ停止している。一方、(b)の R_p に注目すると、通水開始



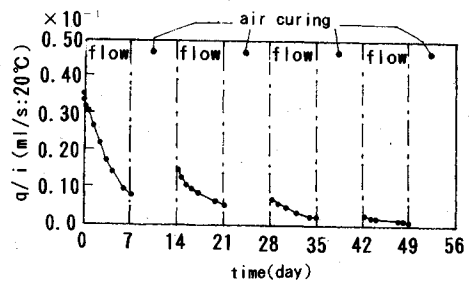
(a) I-F-1: discharge with time



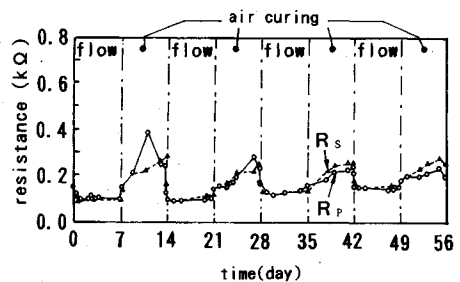
(b) I-F-1: resistance with time



(c) S-1: resistance with time



(d) II-B-3: discharge with time



(e) II-B-3: resistance with time

Fig.9 Typical polarization resistance and discharge with time.

後（5日程度まで）に急減した後は漸増傾向となり、漏水量の測定が困難となった120日目前後からは大きく増大しているが、280日目前後から再び減少傾向となっている。この傾向を腐食速度に対応させると、初期に腐食が加速され、これ以後は経時的に腐食は抑制される傾向にあるが、280日目あたりから再び増大していることになる。また、同図の R_p に注目すると経時的に増大する傾向にある。この傾向は目詰まり過程を示唆しているものと推察される。これらの結果から、通水鉄筋では初期には鉄筋表面が通水の影響を受け、急激に酸化被膜が破壊されて腐食は促進されるが、それ以後は目詰まり効果により通水流量は減少して経時的には腐食速度は低下するものと考えられる。

また、漏水開始から280日目以降の腐食速度の増大傾向は、この時期が5月下旬から8月の夏場に当たることから、人工海水の温度が上昇して腐食を促進したものと推察される。

つぎに、(c)では(b)と同様に R_p は、急激な低下を経て、40日以後から増加傾向となっている。一方、 R_s についても、析出物や腐食生成物等がひびわれ内部へ蓄積・充填されることにより、増加傾向を示している。浸漬鉄筋では、従来の研究から明らかにされているようにひびわれ内に海水が停滞した状態で徐々に酸化被膜が破壊されて腐食が進行するが、それ以後、約40日目ぐらいからは析出物や腐食生成物等がひびわれ内部に蓄積される効果が現れて、 R_p の増加、つまり腐食速度の減少傾向が生じてくるものと考えられる。

つぎに、(d)、(e)は乾湿繰返し供試体であるが、実験期間全体では、 R_p 、 R_s 共に通水期間は小さい値を示し、乾燥期間になると急激に増大するといった明確な違いが判読できる。また、全体的にはいずれも経時的に増大する傾向を示している。乾燥期間については、ひびわれ中の海水が漏出・蒸発するなどして環境条件が不安定となるが、通水期間中の傾向は、上述の連続通水鉄筋のそれと同様であることは確認できる。

他方、Table 3には、分極抵抗値 R_p を示したが、データ数が少ないこともあって特に侵食度との相関関係は明確ではない。

以上より、交流インピーダンス法は、腐食速度およびひびわれ中の目詰まり過程の経時的変化の定性的な傾向を評価・検討するのに有用な手段となる可能性があることが示唆された。

4. 結 論

本論では、海洋中空RC構造物を対象にコンクリート壁のひびわれ中に海水が浸透するときの鉄筋の腐食に係わる基本的性質を実験的に検討した。

本研究で得られた成果を要約すると以下のような

る。

- (1) 海水が浸透するひびわれでその幅が0.25 mm以下であれば、漏水量は比較的早期（数ヶ月オーダー）に停止状態となる。
- (2) ひびわれ中を海水が浸透するときの目詰まり物質は海水とコンクリート中の成分が反応した難溶解性物質（主に CaCO_3 と $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ）であることが示唆された。
- (3) 腐食形態は、全般に局部腐食型である。
- (4) 腐食は、浸漬環境より通水環境の方が激しい。さらに、乾湿繰返し環境の腐食は、通水環境のそれより促進される傾向にあった。
- (5) 腐食の発生は、ひびわれ面と交わる付近で最も著しい。
- (6) 腐食面積は、圧力差が小さい場合はひびわれ近傍に限定されるが、圧力差が大きくなると大きく広がる傾向にある。腐食面積率とひびわれ幅には特に明確な相関関係は認められない。
- (7) 侵食度は、ひびわれ幅および累積流量と正の相関が認められ、特にひびわれ幅との相関が強い。
- (8) 交流インピーダンス法は、腐食反応抵抗およびひびわれ内の目詰まり過程の定性的な傾向をモニタリングするのに有用である可能性が示唆された。
- (9) 腐食反応抵抗は、経時的に初期に低下し、その後増加する傾向にある。

この種の研究は、従来ほとんど扱われていなかったものであり、今回の実験により海水がコンクリート内のひびわれ中を浸透するときの鉄筋腐食評価や防食対策に一つの足掛かりを与えたと感じている。しかしながら、本実験は、その装置の制約から一般的な海水環境¹⁵⁾と比較して、塩分濃度およびpHは概ね一致したものの、海水温度が高く溶存酸素濃度が若干小さい環境条件で行われた。したがって、ここで得られた腐食速度や腐食面積などの値は、一般海水環境でのそれとは差異があると考えられ、傾向としては多少促進されたものと推察される。

謝 辞：本研究の実験を実施するに当たっては、東京工業大学工学部の大即信明助教授、建設省土木研究所 地質化学部の小林茂敏部長、同化学研究室の片脇清士室長、日本道路公団試験所コンクリート試験室の増田隆室長に貴重なご助言を頂きました。また、交流インピーダンス法による腐食反応の測定に当たっては、新日本製鉄（株）の鋼構造研究開発センターの後藤信弘氏および関係各位に協力を頂きました。さらに、実験の計画・実施に当たって日本道路公団大阪建設局の下村真弘次長（元東京湾横断道路（株）設計部次長）、日本道路公団試験所の長谷川明機次長（元東京湾横断道路（株）設計部課長）、お

よび清水建設(株)土木本部の黒田正信課長(元東京湾横断道路(株)設計部係長)の協力を得ました。ここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤田信一ほか：海洋人工島に構築される換気塔の設計，土木学会構造工学論文集，pp. 1319-1328, 1990.
- 2) 藤田信一ほか：東京湾横断道路海中換気塔温度応力の検討，第18回日本道路会議，pp. 308-309, 1989.
- 3) 例えば岸谷孝一ほか編(大即信明ほか著)：塩害(I)，技報堂，1987.
- 4) 例えば関 博：コンクリートによる鋼材の防食，コンクリート工学，Vol. 19, No. 3, pp. 55-63, 1981.
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食防食に関する試験方法ならびに規準(案)，p. 8, 1987.4.
- 6) 水流徹：交流インピーダンス法とその腐食・防食への適用，防錆管理，pp. 13-19, 1986.
- 7) 後藤信弘ほか：交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，pp. 527-532, 1990.
- 8) 宮川豊章ほか：コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について，コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集，pp. 85-90, 1988.5.
- 9) H. H. ユーリック(岡本剛監修)：腐食反応とその制御，産業図書，pp. 86-109, 1984.
- 10) 前出3)に同じ，p. 24.
- 11) 例えば武藤義一ほか：分析機器要覧，科学新聞社，pp. 153-158, 1980.
- 12) 伊藤洋ほか：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究，セメント技術年報41，pp. 217-220, 1987.
- 13) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)，pp. 103-106, 1988.
- 14) 前出13)に同じ，pp. 105-106.
- 15) 国立天文台編：理科年表，丸善，pp. 694-697, 1989.

(1991.9.13 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON REINFORCEMENT CORROSION IN CONCRETE CRACK UNDER SEAWATER SEEPAGE

Tomoji HIRUKAWA, Harumitsu KENBOU, Yoshinori MORI and Yo ITO

When designing massive hollow concrete structures under marine, it is important to consider the corrosion of steel bars resulting from the seepage of seawater through concrete cracks. This paper studies the seepage of seawater through cracks and the resulting corrosion of steel bars. The characteristics of seepage and corrosion phenomena are experimentally discussed in the light of long-term permeability tests. In addition, the corrosion process was studied using a new nondestructive method.