

報告

[1077] 海水が浸透するひびわれ中の鉄筋腐食に関する基礎実験

正会員○黒田正信（東京湾横断道路(株)設計部）

下村真弘（東京湾横断道路(株)設計部）

森 芳徳（（財）土木研究センター）

正会員 伊藤 洋（(株)熊谷組原子力開発室）

1. はじめに

近年、海洋においても大型のRC製構造物が多く建設されつつある。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の発生が懸念される場所である^{1)・2)}。さらに、これらの構造物の中には、海水面下で中空構造となるものがある。このような場合には構造物内外で圧力差が生じ、ひびわれから海水が侵入することになり、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問題となる。しかし、既往の多くの研究において、このような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。

本実験は、こうした背景にあって、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ヶ年の計画で通水実験を行っているものである。本実験の焦点は、①ひびわれ幅と漏水量の経時的変化の関係、および②ひびわれ内の流量・ひびわれ幅と鉄筋腐食の関係、に係わる基礎データを得ることにある。実験は現在継続中であるが、いくつかの興味ある結果が得られたのでここでは4ヶ月経過までの結果を提示して考察を加えることとする。また、本実験では新しい試みとして、交流インピーダンス法による腐食反応抵抗³⁾の測定を同時に行っているが、実験の途中であるため別の機会に報告する予定である。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験装置は、図-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）使用する。装置Iは設定圧力が1~3 kgf/cm²で、装置IIは設定圧力が9~10kgf/cm²である。ここで、③の高性能フィルターは濾過精度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⑧の漏水受けタンクが一定量に達すると、⑨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、完全な循環系システムであり、長期間でしかも多数供試体の連続通水が可能である。

(2) 供試体の製作

供試体は、まず特殊な型枠内に十分に脱脂した鉄筋（丸鋼φ28:SS41 表面みがき処理、および異形棒鋼D29:SD35 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する。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く。3日間気中養生（温度20℃、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により平坦に整形する（直径φ=10 cm、高さh=20cm）。供試

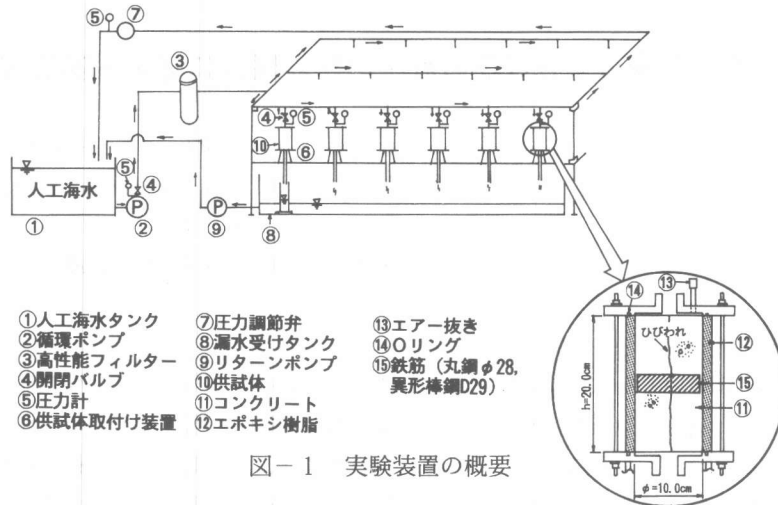


図-1 実験装置の概要

表-1 コンクリートの配合

呼び強度 f_{ck}	G_{max} (mm)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						C	W	S	G	AE
270	25	4 ±1	4 ±1	55	38	250	138	777	1272	1.87

体本数は、割裂ひびわれの不確かさを考慮して50本制作し、通水実験用として21本を用いる。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る。コンクリートの配合は、表-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る。

(3) 実験方法

実験方法は、まず人工海水を装置Ⅰ用に約2.4m³、装置Ⅱ用に80ℓを所定の配合で調整する。海水を①のタンクに入れた後、②の循環ポンプを作動させ、⑦の圧力調整弁を調節して、循環海水の圧力を装置Ⅰで約3kgf/cm²、装置Ⅱで約10kgf/cm²に設定する。つぎに、各供試体の④バルブを開いて、供試体に水圧を作用させ、⑬のエア抜きより空気を排除する。さらに、④バルブを調節して設定圧力とし、通水実験を開始する。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)を測定する。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観察および腐食速度の測定を行う。腐食速度の評価は、腐食面積率、および重量変化測定と鉄筋の直径変化測定による侵食度⁴⁾を算出し、これらとひびわれ内通水累積流量およびひびわれ幅との関係を整理して行う。本報告では、上述したように4ヶ月経過供試体までの結果を示す。

(4) 実験ケース

通水実験供試体の実験ケースを表-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(1~3kgf/cm², 9~10kgf/cm²)、ひびわれ幅3水準(任意; 0.1~1.0mm)、通

水期間3水準（2ヶ月、4ヶ月、12ヶ月）であり、それ以外（コンクリートの配合、ひびわれ長さ、流体外等）はすべて1水準とする。

使用する供試体21体は、予め水道水により予備通水実験を行って初期の漏水量を測定し、実測ひびわれ幅と実験水準を照らして選定する。これ以外の供試体は通水実験と比較するため、①人工海水タンク内に浸漬しておく（浸漬実験供試体として22本）。

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ることとする。

(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)で示した項目の付帯条件の測定を行っており、その結果を表-3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べ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⁵⁾。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、温度が高いためやや低めの値となっている。

これは腐食速度を逆に抑えることになるが、影響は10%程度と推定される⁵⁾。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）⁵⁾。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。

(2) 漏水量

漏水量の典型的な経時変化を図-2に示す。同図の漏水量は、温度20℃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。参考までに、濁質拘留モデルによる流量低減式による理論曲線を併せて示しているが、よく一致している⁶⁾。このときの閉塞係数は $K_b = 2.5(1/d)$ で、本実験における他の流量急減タイプのそれは2.0~6.5(1/d)の範囲にある。水道水を

表-2 通水実験ケース

供試体ケース	鋼棒の種類	ひびわれ形状	実測ひびわれ幅(mm)	圧力差 (kgf/cm ²)	通水期間	
I-A-1	異形鋼 =D29	割裂	0.17	3.0	2ヶ月	
I-A-2			0.33			
I-A-3			0.25			
I-B-1	0.14					
I-B-2	0.36					
I-B-3	0.65					
I-C-1	丸鋼 =φ28		平坦	0.51	1.0	4ヶ月
I-C-2				0.61		
I-C-3				0.92		
I-D-1		0.51				
I-D-2		0.64				
I-D-3		0.90				
I-E-1	割裂	— ^{a)}	— ^{a)}	3.0	12ヶ月	
I-E-2		0.26	— ^{a)}			
I-E-3		0.36	— ^{a)}			
I-F-1		— ^{a)}	— ^{a)}	10.0	2ヶ月	
I-F-2		— ^{a)}	— ^{a)}			
I-F-3		— ^{a)}	— ^{a)}			
II-A-1				0.14		
II-A-2				0.42		
II-A-3				0.80		

^{a)} I-E-1は、目詰まり物質の化学分析用供試体として解体、12ヶ月供試体は現在実験中のため測定値を記述していない。

表-3 付帯・環境条件の測定結果

項目	管理目標値	測定結果 (I:4ヶ月, II:2ヶ月)		影響を与える現象	東京湾 湾央の海水環境 (参考)
		装置I	装置II		
温度	50℃以下	平均36.5℃ (29.2~44.6)	平均45.0℃ (37.6~55.6)	腐食速度 流量	8~25℃
濁度	4.0ppm以下(SS)	平均0.20ppm (0.01~0.62)	平均0.16ppm (0.01~0.85)	流量(目詰まり)	2~7ppm
塩分濃度	NaCl換算 3.27%程度	平均2.99% (2.20~3.40)	平均3.06% (2.50~3.50)	腐食速度 流量	—
	塩素イオン 19800ppm程度	平均18200ppm (13000~20200)	平均19150ppm (15000~21000)		
溶存酸素濃度	6.0ppm程度	平均4.57ppm (3.85~5.33)	平均4.38ppm (3.42~5.00)		3.0~9.8ppm
pH	9.5以下	平均7.97 (7.84~8.85)	平均8.15 (7.79~9.43)		7.9~8.4ppm

用い鉄筋のない供試体を用いた別の実験では $K_b = 1.0(1/d)$ 程度であるから、本実験での閉塞の方がかなり速いことになる⁹⁾。この原因として、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、①鉄筋が流速抵抗を大きくして懸濁物質が付着・拘留されやすくなったこと、②腐食生成物等の一部が流出せずに目詰まりしたこと、③人工海水中の成分が反応生成物を形成してそれが付着・拘留したこと、などが考えられる。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0.65mmの場合である。この場合も一つの目詰まり過程と考えられる。同図の(c)は、流量がほとんど経時的に変化しない例であり、ひびわれは平坦で幅は0.51mmの場合である。ひびわれ幅は(b)のそれより小さいが、ひびわれ形状が平坦であることから流速が大きく懸濁物質が付着・拘留されにくいことが伺える。

つぎに、図-3はひびわれ幅と漏水量の関係をまとめて整理したものである。これより、平坦ひびわれは、いずれも割裂のそれに比べて漏水量が大きく、経時的にもほとんど変化しないことがわかる。一方、割裂ひびわれにおける流量（初期流量○と60日後の流量□）に着目すると、ひびわれ幅が0.25mm程度以下であるといずれも流量は大きく低下しほぼ停止状態になるのに対し、逆に0.35mm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（鉄筋なし）で得られているひびわれ幅と流量の関係（図中破線）⁹⁾を示したが、初期流量では比較的よく一致していることが確認できる。

(3) 鉄筋腐食

a) 鉄筋腐食状況

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一例を図-4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（D型⁴⁾）である、②通水鉄筋の方が浸漬のそれより腐食が激しい、③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

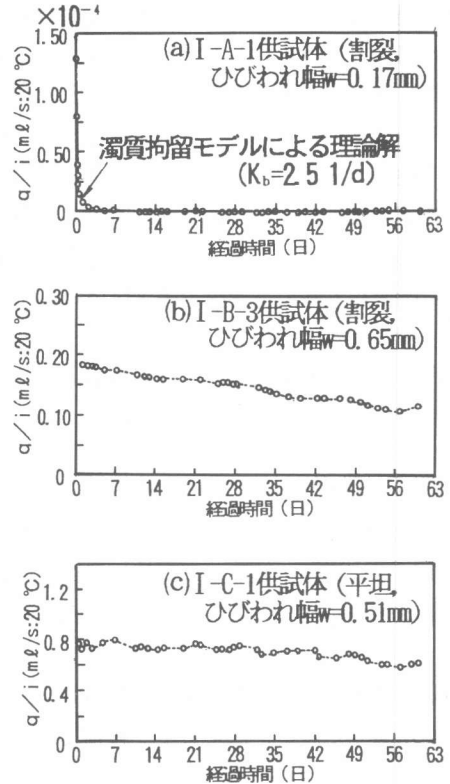


図-2 典型的な漏水流量の経時変化例

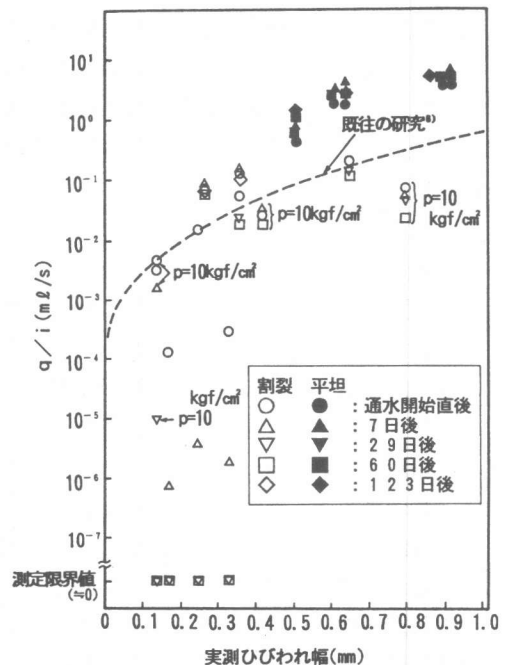


図-3 ひびわれ幅と流量の関係

近いフシ（凸の部分）で腐食が進行する、⑤鉄筋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、などの傾向が認められる。また、解体直後の錆の色は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化し、酸化されていく状況が観察されている。

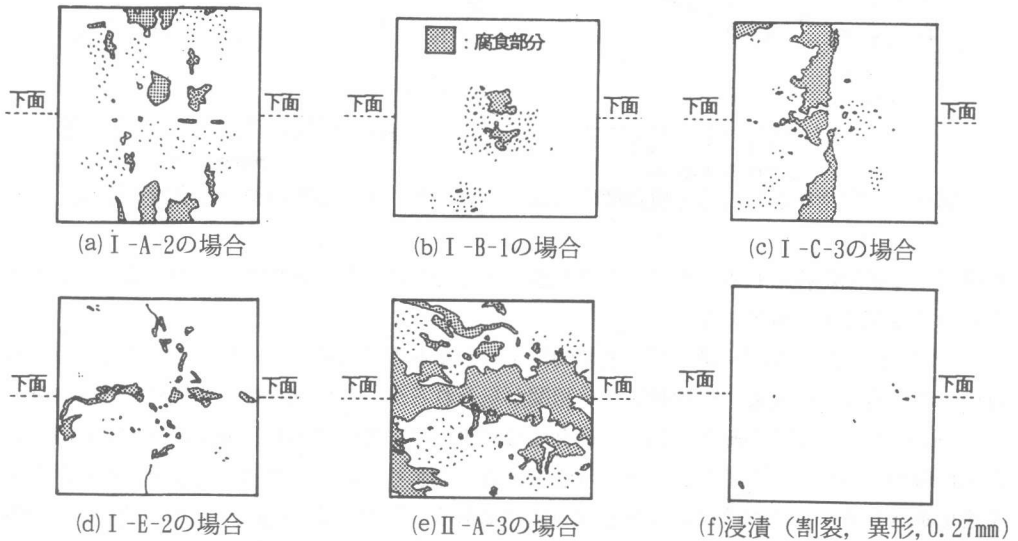


図-4 鉄筋腐食状況のスケッチの一例

b) 腐食面積率⁴⁾

腐食面積率を実測ひびわれ幅との関係で整理したものが図-5である。腐食面積率は、0.16~18.05%の範囲にある。これからすると個々の条件下では相関関係のあるケース（▽, △, ●）もあるが、全体的にはひびわれ幅や通水期間等との関係は認められない。ただ、通水した鉄筋の方が、少なくとも浸漬した鉄筋に比べて腐食面積率が大きいことは確認できる。

c) 侵食度（鉄筋断面の減少）⁴⁾

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対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。また、異形鋼棒は、形状に凹凸があって測定が困難であり、評価対象からは除外する。

図-6は、ひびわれ幅と侵食度の関係を整理したものである。同図より、通水鉄筋の侵食度のオーダーは、 $4.0 \times 10^{-3} \sim 2.63 \times 10^{-1} (\text{mm/year})$ とかなり幅があるのに対し、浸漬鉄筋ではひびわれ幅に関係なく 10^{-2} オーダー前後であることがわかる。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

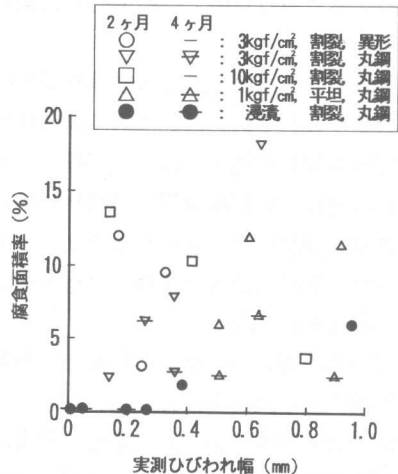


図-5 実測ひびわれ幅と腐食面積率の関係

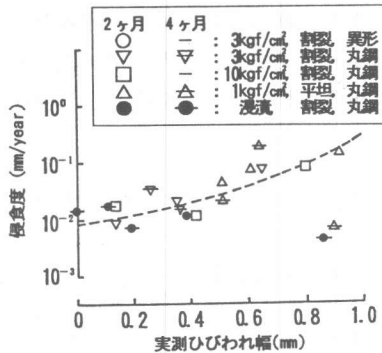


図-6 実測ひびわれ幅と侵食度の関係

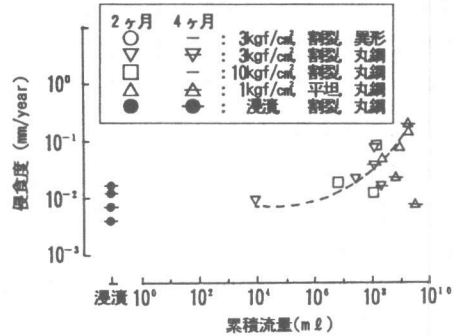


図-7 累積流量と侵食度の関係

明確な正の相関がみられる。ただ、この鉄筋 (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る。

つぎに、図-7 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見られるが、この場合は累積流量の差異が $10^4 \sim 10^{10}$ ml の 10^6 倍程度の範囲に対し、侵食度は10倍程度の違いであり、通水流量が鉄筋腐食に与える影響がそれほど大きくないことが示唆される。つまり、結果的に通水流量そのものは鉄筋腐食を促進させるが、比例的には寄与しない傾向にある。ただ、3. (2)の結果から割裂ひびわれで幅0.2mm 以下では、流量はほぼ停止しているため累積流量はこれ以上増加せず、侵食度も低下してくると考えられるので、長期的には累積流量の大小による侵食度の差異は広がる可能性がある。

4. まとめ

本実験の4ヶ月経過までの結論を要約すると以下のようになる。

- 1) 割裂ひびわれであれば、浸透流量は長期的に低減する傾向にあり、特にひびわれ幅が0.2mm 以下であれば比較的早期に停止状態となる。
- 2) 腐食形態は、局部腐食型 (D型⁴⁾) である。
- 3) 腐食は、浸漬状態にあったものより、通水状態のそのの方が著しい。
- 4) 腐食は、ひびわれ面と交わる付近で激しいが、中でも鉄筋下面 (コンクリート打設時の下面、かつ流出側) で著しい。
- 5) 異形鋼棒の腐食は、ひびわれ面と交わる付近のフシ (凸の部分) で著しい。
- 6) 本実験の通水鉄筋の侵食度は、 $4.0 \times 10^{-3} \sim 2.63 \times 10^{-1}$ (mm/year) であり、浸漬のそれは 10^{-2} (mm/year) 前後であった。また、侵食度はひびわれ幅および累積流量の増大に伴って大きくなる傾向が認められた。特に、ひびわれ幅との関係でよい相関が見られた。

最後に本実験を行うに当たって、貴重なご助言を頂いた東京工業大学 大即信明助教授、建設省土木研究所 小林茂敏室長、片脇清士室長、日本道路公団試験所 増田隆室長に謝意を表します。

〔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，1990. 4.
- 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，1989. 10.
- 3) 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，1986. 11，pp. 13~19.
- 4) 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)，1983. 2.
- 5) 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，1984，pp. 86 ~109.
- 6) 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41，1987，pp. 217~220.