

## 報告 鉄筋の腐食に伴う透水性評価実験

伊藤 洋\*<sup>1</sup>・坂口雄彦\*<sup>2</sup>・西岡吉弘\*<sup>3</sup>・藤原 愛\*<sup>4</sup>

要旨：コンクリート構造物の長期的な水密性を評価することを目的として、劣化要因の一つである鉄筋腐食が透水性に与える影響を基礎的に評価する実験を行った。実験では、中央に鉄筋を設置した円柱供試体を用いて一定の低電流付加による電食試験を行い、鉄筋を腐食させた後、鉄筋に沿う方向の透水試験を行った。その結果、鉄筋の腐食に伴う透水性は、腐食量が1.0mg/cm<sup>2</sup>程度まではあまり変化しないが、それが1.5~2.0mg/cm<sup>2</sup>以上になると急激に増大することが示唆された。

キーワード：鉄筋腐食、電食試験、透水係数、水密性、透水試験、ひびわれ、腐食量

### 1. はじめに

近年、コンクリートの高性能・高機能化が注目され、高強度・高流動を中心とした研究がなれているが、他方、廃棄物貯蔵・処分サイロや液体燃料貯蔵ピットなどのコンクリート構造物は高水密性と高耐久性が重要な要求機能となっている。著者らは、これまで構造物に発生する期のひびわれなどの止水欠陥における透水性評価や止水補修の検討を行っているが[1], [2]、密性は長期的にも維持される必要がある。しかし、高耐久性に係わる劣化要因（鉄筋腐食、 $\text{Et}$ ガットの生成、 $\text{Ca}$ の溶脱など）を加味した水密性の検討は現状ではほとんどなされていない。

本研究では、劣化要因の一つである鉄筋の腐食がRC構造物の水密性に与える影響を基礎的に評価することを目的とする。実験では、中央に鉄筋を設置した円柱供試体を用いて定電流負荷による電食試験を行い、鉄筋を腐食させた後、鉄筋に沿う方向の透水試験を微小浸出量の測定まで能なベンチレーション法と液状水での浸出測定を行う加圧透水試験法により行った。その結果興味深い知見が得られたのでここに報告する。

### 2. 実験方法

実験は、鉄筋を電食試験により腐食させ、腐食量と透水係数の測定を行った。ここで、電食実験における付加電流は、ガス発生によるひびわれ発生の影響を抑止するため、従来の電食試験電流密度よりかなり小さくした。また、電解質溶液は一般的な地下環境を模擬するため、地下（井戸水）を用いた。

#### 2.1 供試体の製作

供試体は、図-1に示したように直径10cm、高さ20cmのコンクリート円柱の中心に $\phi$ 25mm、長さ240mmの丸鋼（約920g）を設置したもので、丸鋼の両端部およびコンクリート下面は絶縁のためエポキシ樹脂を塗布した。コンクリートの配合は表-1に示したとおりである。円柱供試体

\*1 (株)熊谷組 技術研究所 力学系研究開発部 副長, 工博(正会員)

\*2 (株)熊谷組 技術研究所 力学系研究開発部 (正会員)

\*3 (株)熊谷組 名古屋支店 土木部(元技術研究所) (正会員)

\*4 (財)原子力環境整備センター 研究第2部 課長, 理修

圧縮強度は平均 555.4kgf/cm<sup>2</sup>, 引張強度は49.0kgf/cm<sup>2</sup>である。

## 2. 2 試験方法

### (1) 電食試験

電食試験は、図-2 に示したように水槽内を地下水（埼玉県上尾市；表-2 水質分析結果）で満たし、絶縁ゴムマット上に供試体を設置する。つぎに、丸鋼（陽極）と供試体周囲にセットしたステンレス板（陰極）に直流定電流電源装置を接続して、電食電流を通電して丸鋼を腐食させた[3]。通電中は、電源装置からの出力値（電圧・電流）を自動記録した。また、電解質溶液のpH値を経時的に測定し、ひびわれ発生状況は目視により観察した。通電終了後は、腐食状況の観察および腐食量（重量差）の測定を行った。なお、試験は、約20°Cの恒温室で実施した。

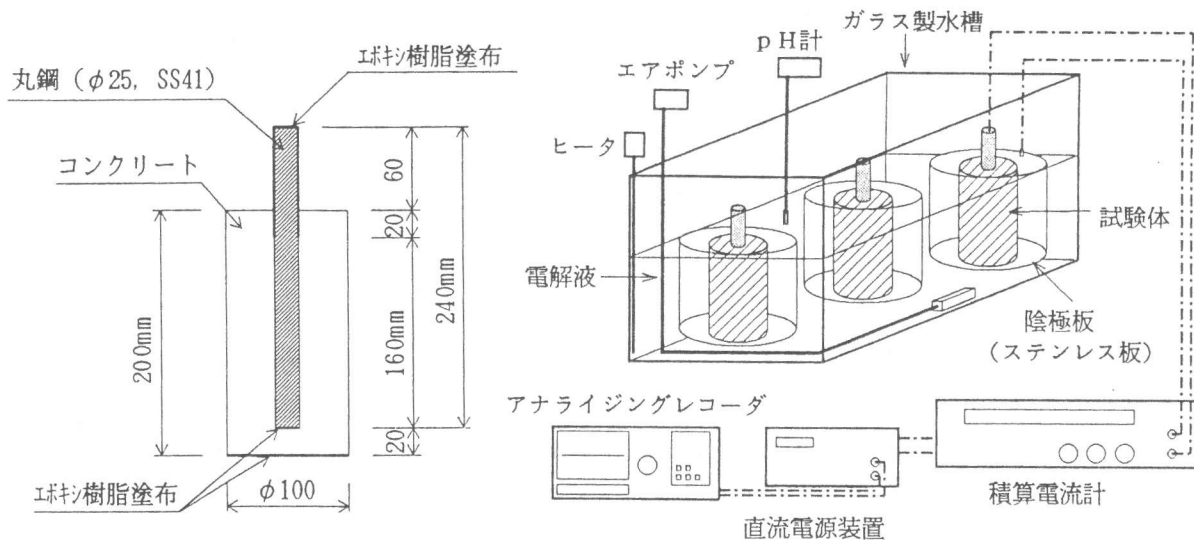


図-1 供試体の概要

図-2 電食試験の概要

表-1 コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	Sl (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/cm <sup>2</sup> )					
					W	C	S	G	Ad <sub>1</sub>	Ad <sub>2</sub>
20	8 ± 1.5	4 ± 1	40	44	165	420	757	1004	1.05	0.0252

表-2 電解質溶液の水質

pH	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	DO (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)
6.9	5 未満	52	1	9.5	13	16

## (2) 透水試験

透水試験は、腐食量の測定を行わない供試体を用いて行った。透水試験用の試験体は、電食させた供試体周囲をエポキシコーティングし、その両端を切断して製作した。透水試験は、腐食に伴う鋼材とコンクリートの界面での水みちの透水性に焦点を置き、鉄筋に沿う方向で行った。透水試験装置は、浸出水の状態によって、水蒸気浸出程度の微量であればベンチレーション試験装置を用い[4]、液状水での測定が可能であれば加圧透水試験装置を用いた。注水圧力は、両者共約  $2 \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.196 \text{ MPa}$ ) とした。図-3は透水試験装置の概念を示したものである。

## (3) 実験条件および実験ケース

まず、本実験では腐食に伴う透水特性を評価することを目的としているため、水の電気分解によるガス発生による影響を抑止する必要がある[3], [5]。ここでは、電圧を水の分解電圧である約  $2 \text{ V}$  を上回らないことを条件とし、電流密度を  $20 \text{ mA/m}^2$  と  $30 \text{ mA/m}^2$  の2水準とした。これは、電食に有効な丸鋼の断面積が  $125 \text{ cm}^2$  であるから、電食電流値はそれぞれ  $250 \mu\text{A}$ ,  $375 \mu\text{A}$  となる。一方、これまでの定電流方式の電食実験での電流密度と比較すると、既往のそれでは  $0.1 \sim 100 \text{ A/m}^2$  の範囲にあり  $10 \text{ A/m}^2$  程度が多いので[6], [7]、本実験の電流密度はその数百分の1程度となる。つぎに、通電期間は10日、20日、30日、40日、60日の5水準とした。電食試験ケースは、これらの組み合わせにより合計10ケースとした。実験ケースは、表-3(後述)の試験結果と併せて示した。また、1ケース当たりの試験体本数は3本とし、そのうち2本は解体して腐食量の測定を行い、1本は透水試験に用いた。

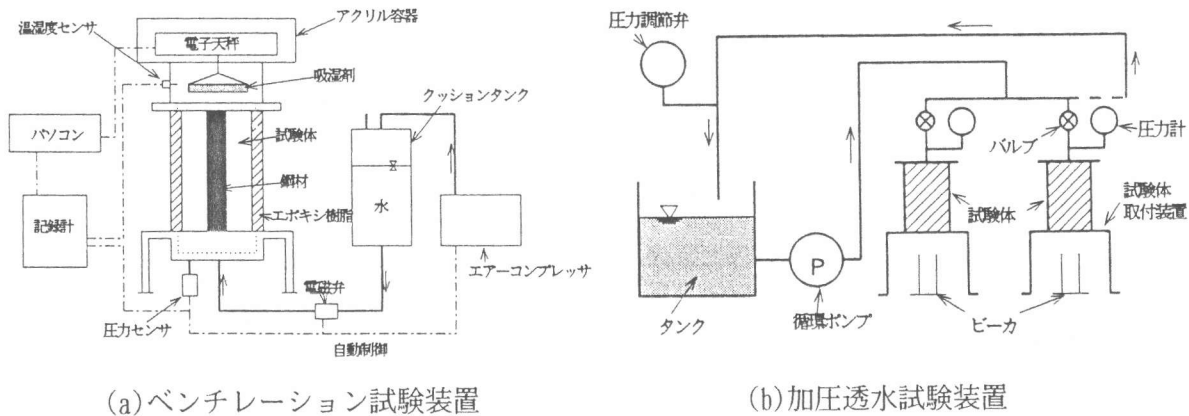


図-3 透水試験装置の概要

## 3. 実験結果および考察

実験結果を整理して、表-3にまとめて示した。同表の実験結果を整理し、鉄筋の腐食と透水性の関係について考察を加える。

### 3.1 実験環境条件

図-4は、電圧の経時変化の代表例としてI-5のケースにおける3本の供試体の印加電圧を示したものである。電圧の変化を全体的にみると、初期の電圧は  $1.1 \sim 1.25 \text{ V}$  の範囲にあり、200時間経過した後徐々に増加し、1300時間前後で最大値の  $1.42 \text{ V}$  となって、その後低下している。一方、短期的に電圧が降下するところがあり、特に最大値を示した1,300時間後以降でその傾向が顕著である。このような傾向は、概ね他の実験でも同様であった。印加電圧の上昇原因としては、腐食生成物が鋼材表面に蓄積すること、およびそのコンクリート中への移動により空

隙を閉塞することなどが推察される。また、電圧降下はマイクロクラックの発生により水みちが形成され、コンクリートの電気抵抗が低下したものと考えられる。他方、最大電圧はII-3の1.9Vと2V以下であり、目視によっても気泡の発生は認められなかった。

一方、同時に測定したpH値の経時変化を図-5に示したが、pH値は8.0~10.3の範囲にあり、

表-3 実験ケースおよび結果

ケース	電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )	負荷時間 (day)	積算電流密度 (μAh/cm <sup>2</sup> )	電食減量 (g)	腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	透水係数 (m/s)
I-1	20	10	480	0.1, 0.1	0.8, 0.8	$6.91 \times 10^{-13}$
I-2		20	960	0.2, 0.1	1.6, 0.8	$8.14 \times 10^{-13}$
I-3		30	1,440	0.2, 0.2	1.6, 1.6	$1.14 \times 10^{-12}$
I-4		40	1,920	0.2, 0.3	1.6, 2.4	$2.91 \times 10^{-11}$
I-5		60	3,040	0.5, 0.6	4.0, 4.8	$8.61 \times 10^{-12}$
II-1	30	10	720	0.1, 0.1	0.8, 0.8	$5.16 \times 10^{-13}$
II-2		20	1,440	0.2, 0.2	1.6, 1.6	$1.09 \times 10^{-12}$
II-3		30	2,160	0.3, 0.4	2.4, 3.2	$7.13 \times 10^{-12}$
II-4		40	2,880	0.4, 0.4	3.2, 3.2	$1.49 \times 10^{-12}$
II-5		60	4,560	0.7, 0.7	5.6, 5.6	$1.17 \times 10^{-11}$
I-0	電流負荷なし					$4.06 \times 10^{-13}$
鉄筋無	電流負荷なし					$7.09 \times 10^{-13}$

注) 透水試験は、透水係数が $10^{-13}$ m/sオーダはベンション法により、それより大きいと加圧透水試験法により行った。また、I-0および鉄筋無のケースの透水係数は、3供試体の平均値である。

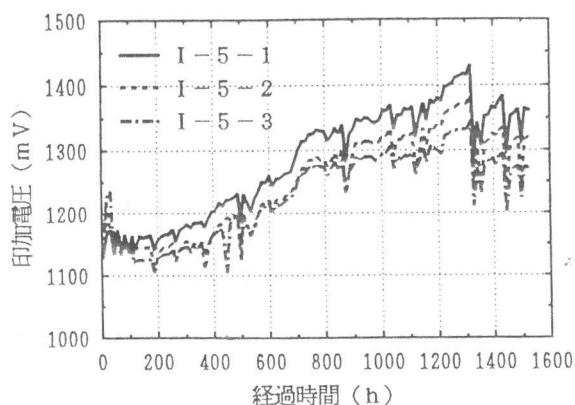


図-4 印加電圧の経時変化 (I-5)

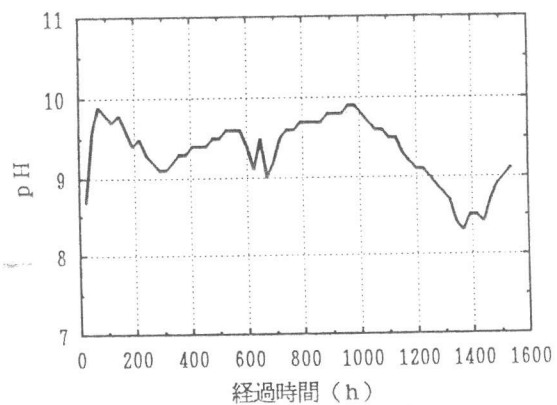


図-5 pHの経時変化 (I-5)

電解液の初期値であるpH 7程度よりも大きくなっている。これは、一つには電食中におけるCaの溶脱による影響と考えられる。

### 3. 2 ひびわれ発生状況

本試験では、大きなひびわれは発生せず、ひびわれ幅にして0.01mm以下のヘアクラック程度のものが円柱供試体の側面に亀甲状に発生した。これらのヘアクラックは、目視では観察しにくく、浸漬した供試体を気中にあげたときの表面の水分乾燥時に観察された。このようなクラックは通電期間が30日以降のI, II-3~5のケースの供試体側面で認められ、通電期間の増加によってその本数が増すことが明確に認められた。本試験におけるひびわれ発生限界腐食量は、2.0 mg/cm<sup>2</sup> (後述) 前後と考えられるが、既往の電食試験で得られているそれは概ね2~10mg/cm<sup>2</sup>程度であり[3], [6], [8]、①ひびわれの発生基準、②酸素ガス発生の有無、③通電時間(クリープの影響)が異なるもののオーダ的には一致したものとなっている。

### 3. 3 腐食量

丸鋼の腐食量は全体に微量であったが、鋼材表面の黒皮が筋状あるいはあばた状になっていた。また、I-4, 5, II-3~5の積算電流密度が約2,000 μA/cm<sup>2</sup>以上のケースでは、深さ0.2~0.5mm程度の孔食が発生した。

腐食量は、表-3に示したように0.8~5.6mg/cm<sup>2</sup>の範囲にある。図-6は、積算電流密度と腐食量との関係を示したものである。腐食量は積算電流密度が増大するに伴って大きくなっていることがわかる。また、両者の関係において積算電流密度が2,000 μA/cm<sup>2</sup>前後(腐食量で約2.0mg/cm<sup>2</sup>)を境にして、勾配に若干の差がみられ、それ以下ではやや小さく、それ以上ではやや大きくなっている。これは上述したひびわれの発生や孔食が顕在化してくる時期とほぼ一致している。ここで、電解式;  $W = K \eta I t$  [ $W$ : 腐食量(g),  $K$ : 電気化学当量(g/A h),  $\eta$ : 電食係数,  $I$ : 電流(A),  $t$ : 時間(h)]における関係をもてみる。電食試験において生成しやすい腐食生成物とされているマグネタイト、あるいは一般的に考えられる水酸化第一鉄のようなものを考えると電気化学当量は0.782~1.042程度と考えられる[6]~[8]。同図における勾配からみると、電食係数 $\eta$ は1.0前後かそれよりやや大きい値となる。これは、腐食量が小さく誤差を含んでいるものの基本的には電解効率が100%に近く、水の電気分解は生じなかったことを示唆しているものと考えられる。

なお、本試験における腐食量を腐食速度に換算すると、20~50 μm/yearとなる。

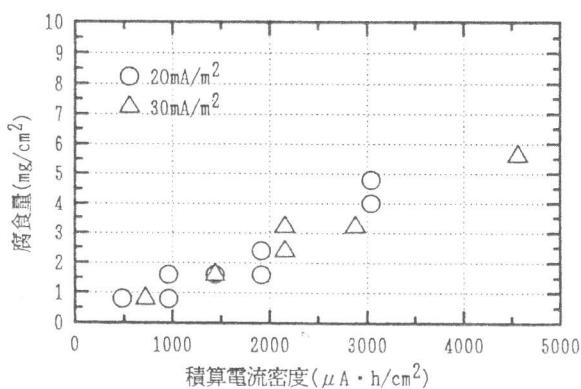


図-6 積算電流密度と腐食量の関係

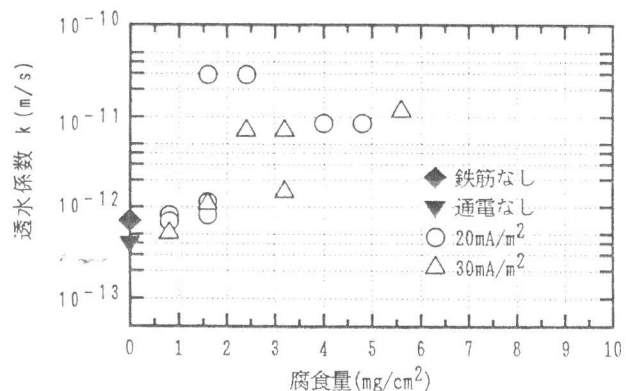


図-7 腐食量と透水係数の関係

### 3. 4 腐食量と透水係数

図-7は腐食量と透水係数の関係を整理して示したものである。同図から、鉄筋無の供試体および通電前の供試体(I-0)の透水係数は、いずれも $10^{-13}$ m/sオーダーであるが、腐食量が1mg/cm<sup>2</sup>までは透水係数は変化せず、1.5mg/cm<sup>2</sup>を越えると急に透水係数が増大していることが認められる。腐食量が2mg/cm<sup>2</sup>以上になると、透水係数は $10^{-11}$ m/sオーダーと初期に比較して数十倍の値となっている。また、透水係数が $10^{-11}$ m/sオーダーとなるケースでは、透水試験において鋼材周辺より浸出水が滲み出ていることが目視により観察された。これは、一般的に鉄筋腐食に伴う透水係数の増大要因として、①鉄の溶出に伴う鋼材界面での水みちの形成、②腐食生成物の膨張によるひびわれの発生、が考えられるが、本実験の腐食レベルでは①の要因が支配的であったことを示唆しているものと判断できる。

### 4. まとめ

本研究は、長期的な水密性や耐久性を評価することを目的として、鉄筋腐食に伴う水みちの形成に着目し、透水性評価実験を試みた。得られた主な結果を整理すると以下のようになる。

- (1) 電圧を水の電気分解を生じにくい2V以下とするような一定の低電流を通電する電食試験を行い、電解効率が100%に近い試験を行うことができた。
- (2) 腐食量は積算電流量にほぼ比例して増大することが確認された。
- (3) 鉄筋に沿う透水係数は、腐食量が1.0mg/cm<sup>2</sup>程度まではあまり変化しないが、それが1.5~2.0mg/cm<sup>2</sup>以上になると急激に増大することが認められた。
- (4) ひびわれ幅0.01mm以下程度のヘアクラックの発生をひびわれ発生時としたときの腐食量は概ね2.0mg/cm<sup>2</sup>程度であった。

本実験により鉄筋腐食に伴う透水性の解明に電食試験が適用可能であることや腐食により透水性が増大するといった基本的な性質を確認することができた。しかし、鉄筋周辺でのひびわれの発生状況、腐食量が更に増大した時の透水特性、実験・環境条件の影響(海水環境や異形鉄筋など)、腐食生成物の存在形態などの課題もあり、今後さらに検討を進めたい。

最後に、本実験を行うに当たってご協力を頂いた(株)ナカポーテック 技術開発研究所の主任研究員 木内幸則氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] 伊藤 洋ほか：加圧注入法とベンチレーション法の併用による実大サイロ構造物の透水性評価実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.723~728，1994。
- [2] 伊藤 洋ほか：地下空間内外環境に係わるコンクリートの透水性評価について、土質工学「都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム」，pp.221~226，1993.11。
- [3] たとえば森川雅行・関 博・奥村 隆：鉄筋の膨張腐食によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.97~105，1987.2。
- [4] 伊藤 洋ほか：コンクリート表面からの水分蒸発過程による透水性評価実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.507~512，1993。
- [5] 藤嶋昭ほか：電気化学測定法(上)，技法堂出版，pp.1~3，1989.6。
- [6] たとえば関 博：鉄筋の腐食による膨張ひびわれの発生機構について，セメント・コンクリート，No.458，pp.20~27，1985.4。
- [7] たとえば黒井登起雄：電気分解による鉄筋コンクリートの劣化に関する基礎的研究，土木学会論文集，第402号/V-10，pp.33~42，1989.2。
- [8] 須田久美子・MISRA Sudhir・本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.751~756，1992。