

報告 電食試験による鉄筋腐食と透水性

坂口雄彦*¹・伊藤 洋*²・藤原 愛*³

要旨：コンクリート構造物の長期的な水密性を評価するに当たり、鉄筋腐食に起因するコンクリートのひび割れ発生・剝離は重要な機能劣化要因となる。本論では、鉄筋の腐食がコンクリート構造物の水密性に与える影響を評価することを目的に、電食試験法により鉄筋の初期腐食過程を促進し、ベンチレーション法及び加圧透水試験法により透水性を評価した。また、本試験におけるひび割れ発生メカニズムについても検討を加えた。

キーワード：鉄筋腐食、電食試験、透水係数、透水試験、ひびわれ、腐食量

1. はじめに

放射性廃棄物処分サイロや液体燃料貯蔵ピット等のコンクリート構造物では、長期的な耐久性・水密性が要求されるため、塩害等の劣化環境にない場合でも種々の劣化要因（鉄筋腐食、エトリンライト生成、Caの溶脱など）による止水性能低下の長期的評価が必要となる。著者らは、既に鉄筋の腐食がRC構造物の水密性に与える影響を評価することを目的に、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、鉄筋腐食に伴う鉄筋周囲の水みち形成に起因する透水性変化に焦点を当てた透水試験を実施している[1]。しかしながら、定電流条件で電食試験を行うと、コンクリート空隙の目詰まり等により抵抗が大きくなり、電圧が上昇し、水の電気分解が生じる2Vを越え[2]、鋼材からO₂ガスが発生しそのガス圧によるひび割れ発生が懸念されたため、十分な積算電流量を負荷できなかつた。そこで、本論では、1.8Vの定電圧負荷により長期間の電食試験を行い、前報[1]と同様に鉄筋に沿う方向の透水試験を行った。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

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φ25mm、長さ240mmの鋼材（約920g）を設置したもので、鋼材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。円柱供試体の圧縮強度は平均555.4kgf/cm²、引張強度は49.0kgf/cm²である。

2. 2 電食試験

電食試験は、図-2に示したように水槽内を電解液（地下水：埼玉県上尾市[1]，人工海水：JIS-K-2510）で満たし、絶縁ゴムマット上に供試体を設置する。つぎに、鋼材（陽極）と供試体周囲にセットしたステンレス板（陰極）に直流定電圧電源装置を接続して、水の電気分解によるO₂ガス発生を抑えるために1.8V定電圧の電食電流を通電して鋼材を腐食させた。通電中は、印加

*1 (株)熊谷組 技術研究所 土木系研究開発部 係長（正会員）

*2 (株)熊谷組 技術研究所 土木系研究開発部 課長，工博（正会員）

*3 (財)原子力環境整備センター 研究第2部 課長，理修

電圧、電食電流値、積算電流量及び鋼材自然電位を自動測定・記録した。また、表面ひび割れ状況を目視により観察した。通電終了後は、鋼材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℃の恒温室で実施した。

2. 3 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、腐食に伴う鋼材とコンクリートの界面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。試験体は、通電後の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[3]を用い、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 kgf/cm²(0.196MPa)とした。図-3は透水試験装置の概念を示したものである。

2. 4 内部ひび割れ分析、腐食生成物分析

供試体の一部について、鋼材周辺に発生した内部ひび割れの発生状況を分析した。通電後の供試体を円筒状に4分割した後、高圧含浸法により着色したエポキシ系樹脂を圧入し、樹脂硬化後

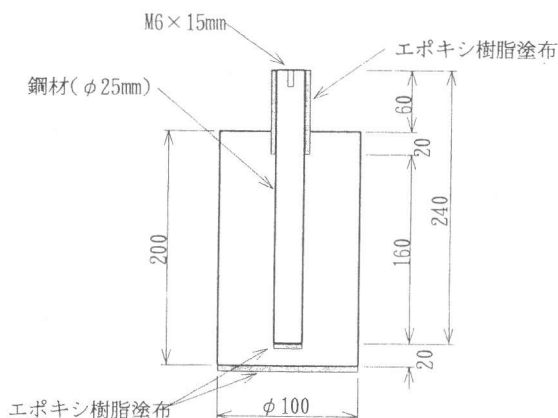


図-1 供試体の概要

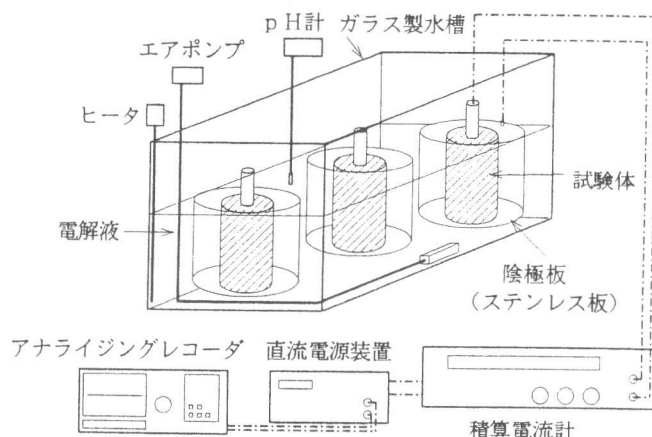
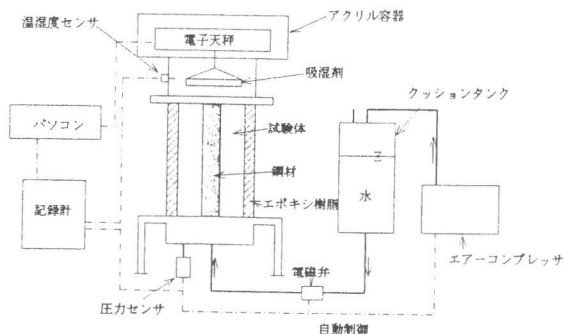


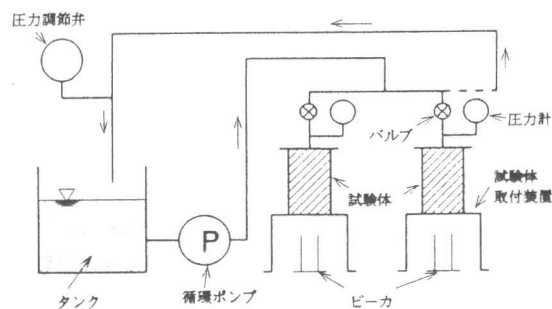
図-2 電食試験の概要

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/m ³)					
					W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
20	8 ± 1.5	4 ± 1	40	44	165	420	757	1004	1.050	0.0252



(a) ベンチレーション装置



(b) 加圧透水試験装置

図-3 透水試験装置の概要

切断面を研磨し、マイクロ스코プ（50倍）で観察面を拡大・観察した。また、鋼材周囲及びひび割れ内部に析出した腐食生成物について、E PMA分析を行った。

2. 5 実験条件および実験ケース

電食試験は、表-2に示すように電解液の種類（地下水，人工海水）、鋼材の種類（φ25mm黒皮付き丸鋼，φ25mmみがき丸鋼，D25mm異形棒鋼）と負荷時間（10d～90d）を変えた12ケース41体について行った。透水試験は、各ケースにつき1体と比較のために鋼材種別3種類につき各1ケース及び鋼材なしの場合1ケースの計16ケース実施した。また、A-1の1体について内部ひび割れ分析を行った。

3. 実験結果および考察

実験結果を整理して、表-2にまとめて示した。個々の結果について以下に考察する。

3. 1 電食電流、鋼材電位

表-2 実験ケースと結果

ケース	電解液	鋼材種別	負荷時間 (d)	積算電流密度 ($\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$)	電食減量 (g)	腐食量 (mg/cm^2)	孔食深さ (mm)	表面ひび割れ幅 (mm)	透水係数 (m/s)
A-0	なし	φ25mm黒皮付き丸鋼	電流負荷なし						1.07×10^{-12}
A-1	地下水		90	13751.0	—	—	—	最大0.03	7.89×10^{-12}
			90	16329.3	2.21	17.59	最大0.4	最大0.12	—
			90	12891.5	1.70	13.53	最大0.2	最大0.06	—
			90	14610.4	—	—	—	最大0.08*	—
A-2			60	10313.2	—	—	—	0.01以下	1.56×10^{-11}
			60	10313.2	1.44	11.46	最大0.2	0.01以下	—
			60	10313.2	1.39	11.06	最大0.3	0.01以下	—
			60	10886.2	1.45	11.54	最大0.1	最大0.03	—
A-3			30	6875.5	0.95	7.56	最大0.1	0.01以下	—
			30	5443.1	0.78	6.21	最大0.2	0.01以下	—
			30	5443.1	—	—	—	0.01以下	1.37×10^{-11}
			30	5156.6	0.75	5.97	最大0.2	最大0.02	—
A-4			20	3819.7	0.53	4.22	—	0.01以下	—
			20	3819.7	0.55	4.38	—	0.01以下	—
		20	4965.6	0.68	5.41	最大0.2	0.01以下	—	
		20	4583.7	—	—	—	0.01以下	2.06×10^{-11}	
A-5		10	1623.4	—	—	—	—	1.88×10^{-11}	
		10	1718.9	0.24	1.91	—	—	—	
		10	1718.9	0.27	2.15	—	—	—	
		10	2864.8	0.41	3.26	—	—	—	
B-0	なし	φ25mmみがき丸鋼	電流負荷なし						1.07×10^{-12}
B-3	地下水		30	8307.9	—	—	—	—	7.58×10^{-13}
			30	8594.3	1.17	9.31	最大0.2	—	—
		30	10026.7	1.35	10.74	最大0.3	—	—	
C-0	なし	D25mm異形棒鋼	電流負荷なし						1.06×10^{-12}
C-1	地下水		90	12891.5	—	—	—	0.01以下	1.15×10^{-11}
			90	16329.3	2.21	17.59	—	0.01以下	—
			90	13751.0	1.87	14.88	—	最大0.02	—
C-3			30	6875.5	0.96	7.64	—	0.01以下	—
			30	8880.8	—	—	—	0.01以下	2.31×10^{-11}
			30	6875.5	0.92	7.32	—	0.01以下	—
C-5			10	1527.9	0.23	1.83	—	—	—
			10	2005.3	—	—	—	—	1.80×10^{-11}
			10	1718.9	0.24	1.91	—	—	—
D-1	人工海水		90	50706.6	6.70	53.32	最大0.5	最大0.11	—
			90	42971.7	6.47	51.49	最大0.6	最大0.14	—
		90	48128.3	—	—	—	最大0.09	2.08×10^{-12}	
D-3		30	17475.2	—	—	—	最大0.07	2.04×10^{-11}	
		30	17188.7	2.31	18.38	最大0.2	最大0.04	—	
		30	22058.8	2.94	23.40	最大0.2	最大0.10	—	
D-5		10	3437.7	—	—	—	—	2.19×10^{-11}	
		10	4297.2	0.59	4.70	最大0.1	—	—	
		10	4679.1	0.66	5.25	最大0.2	—	—	
参 考	なし	なし	電流負荷なし						9.60×10^{-13}

*) 内部ひび割れ分析実施

電食電流は、全体に初期変動を除くと大きな変動はなかったが、一部のケース（D-1）で通電開始45日以降に電食電流の変動がしだいに大きくなり、70日経過前後から大きな変動が測定された。この時点でひび割れの発生あるいはひび割れ幅の拡大が起こったものと考えられる。

また、鋼材電位（S. C. E. 電極基準）は通電開始初期の状態では多少の変動が認められるが、全てのケースで+800mV 前後に収斂し、適切な陽分極の進行が確認された。

3. 2 供試体外観（表面ひび割れ発生状況）

電流負荷レベルに対応し、供試体表面に亀甲状のひび割れが確認された。表面ひび割れ幅の最大値は0.03~0.14mmであった。図-4は、表面ひび割れ幅の最大値と積算電流密度の関係を示したものである。表面ひび割れ幅はおよそ 10000~20000 $\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ の間で急増するが、積算電流密度がこれ以上大きくなっても0.14mm以上には増大しなかった。

つぎに、鋼材の種類の違いによる差異に着目する。みがき棒鋼の場合（B-3）には表面ひび割れの発生が全く認められなかった。一方、黒皮付き丸鋼を用いた同等の負荷レベルの場合（A-3）では最大0.01~0.02mmのひび割れが発生し、みがき棒鋼と比べ顕著な差が認められた。一方、異形棒鋼の場合（ケースC）は、黒皮付き丸鋼の場合と大差なかった。

3. 3 鋼材腐食状況

まず、黒皮付き丸鋼の場合（ケースA）には表面の黒皮があばた状あるいは筋状に溶出する状況が認められ、部分的に孔食の発生も認められた。孔食の深さはほぼ負荷電気量レベルに対応しており、A-1では最大0.4mmの孔食が観察された。つぎに、みがき棒鋼の場合（ケースB）は部分的に深さ 0.2mm~0.3mm 程度の孔食がある以外には表面に筋状、あばた状の腐食は観察されなかった。ただ、上述の表-3に示したように腐食量としてはケースAの場合と同等の値を示していることから、みがき棒鋼の場合には鋼材表面に電解を阻害する酸化層（黒皮）がなく活性であるため、鋼材全周にわたって均等に溶出したものと推察される。一方、異形棒鋼の場合（ケースC）は、腐食量、状況はケースAと同様であるが、突起部近傍に腐食が集中する傾向が見られた。これは、電流が突起部に集中するためと考えられる。また、電解液として人工海水を用いたケースDに着目すると、他のケースに比べて積算電流量が大きいために孔食深さが最大0.6mmと大きくなっているが腐食状況そのものはケースAと全く同様であった。したがって、電解液内の塩分は負荷電気量・負荷速度を増大させることのみ働いたと考えて良いと推察される。

また、腐食量は電解液に井戸水を用いた場合に最大17.59mg/cm²（ケースA-1）、人工海水を用いたケースD-1では最大53.32mg/cm²であった。腐食速度は平均70~275 $\mu\text{m}/\text{年}$ の範囲であった。

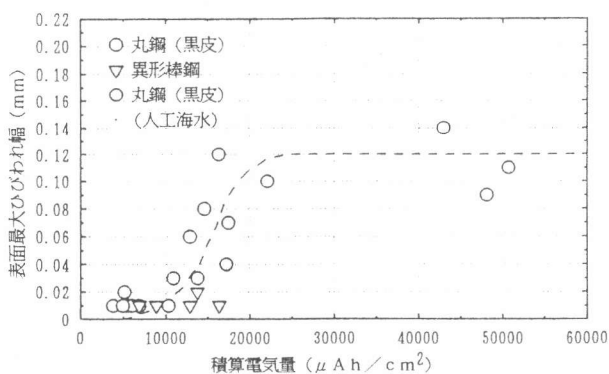


図-4 表面ひび割れ幅の最大値と積算電流量の関係

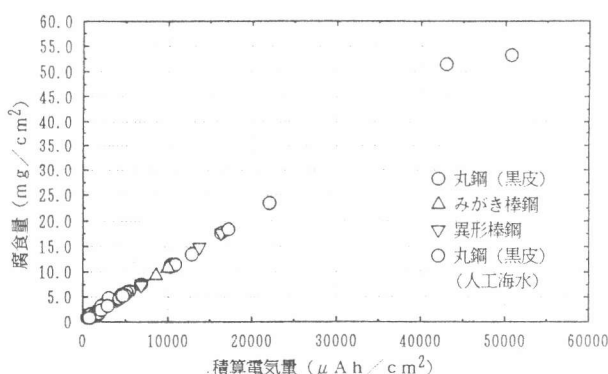


図-5 腐食量と積算電流量の関係

つぎに、腐食量と積算電流量の関係を図-5に示す。積算電流密度と腐食量はほぼ比例関係にあることがわかる。本試験における関係式(実験式)は、 $[\text{腐食量}(\text{mg}/\text{cm}^2)] = 0.0011 \times \text{積算電流密度}(\mu\text{Ah}/\text{cm}^2)$ となる。また、同図の勾配より、鉄の酸化数を2価とした場合の電食係数はほぼ1となり、通電電流がほとんど全て鉄の電解に使用されたことがわかった。

3.4 透水係数

電食後の透水試験においては、みがき棒鋼を用いたケースB-3を除いて全てのケースで微量ながら液状水の流出が認められた。図-6は、積算電流密度と透水係数の関係を示したものである。通電前の試験体の透水係数は、 $10^{-13}\text{m}/\text{s} \sim 10^{-12}\text{m}/\text{s}$ のオーダーであるが、積算電流密度が大きくなるにつれ透水係数も増大し、約 $2000\mu\text{Ah}/\text{cm}^2$ になると $10^{-11}\text{m}/\text{s}$ オーダーまで増大するが、その後は大きな変化はない。本試験における透水性の増大は、主として鋼材の電解により鋼材とコンクリートの界面に局部的に水みちができたことに起因するものと考えられる。

3.5 内部ひび割れ分析

ケースA-1の1体と比較用として未通電の供試体について内部ひび割れ分析を行った結果、通電なしの試験体においても、外周部からの深さが1.5~2.1mm、幅が0.01mm以下のマイクロクラックの存在が確認された。電食後の試験体は、深さ12.9~24.2mm、最大幅0.08mmの内部ひび割れが確認された。一方、鋼材周辺にはひび割れが認められないことから、本試験においては初期に試験体表面に存在したマイクロクラックが徐々に内部に進行していったものと推察される。

3.6 腐食生成物分析

本試験においては、解体した試験体のいずれにおいても鋼材とコンクリートの界面及びひび割れ内部に鉄の腐食生成物を確認することはできなかった。ひび割れ内部及び供試体表面の白色析出物についてEPMA面分析を実施した結果、水酸化カルシウムであった。

3.7 ひび割れ発生メカニズム

上述したように、電食後の試験体外観観察、解体による鋼材観察からは、鋼材とコンクリートの界面やひび割れ内部に鉄の酸化物としての腐食生成物は認められず、本試験により発生したひび割れは鋼材の腐食生成物に起因する膨張ひび割れとは考えられない。そこで、本試験におけるひび割れ発生のメカニズムを根本から考え直すと、試験体製造時より存在するマイクロクラックに通電により発生した何らかの生成物が集積して膨張し、ひび割れを拡大したことが要因と考えられる。電食試験に伴う生成物には、鉄の酸化に伴う腐食生成物(鉄の酸化物)とコンクリート自体のカルシウムの水和反応に伴う生成物の二つの物質が考えられる。前者は、通電により陽極(鋼材)と陰極(外部電極)間を直接溶出して移動する鉄イオンが電解質中の酸素と反応して生成される腐食生成物であるが、鉄イオンの移動速度は強制的な電位勾配のために速く、ほとんどの鉄イオンが酸化反応前に陰極板に吸着されるために生成されにくい。一方、後者は試験体のコンクリート及び骨材中に含まれるカルシウムが、陽極と陰極間の電位勾配により二次的にカルシウムイオンとなって遊離して移動するものであり、その移動速度は前者に比べて遅いものとなるため、ゆっくりした移動の途中ひび割れや試験体表面において電解質と反応して水酸化カルシウムとなるものである。このことは、試験終了後の試験体表面にカルシウム生成物が析出し、ひび割れ内部にも水酸化カルシウムが拘留していたことから十分納得できる。つまり、本試験におけるひび割れ発生の要因は、図-7に示すように水酸化カルシウムがひび割れ中に滞留・蓄積して膨張し、微小なひび割れを拡大したことによると考えられる。

以上のことから、本実験においては、鉄筋の腐食膨張に起因するひび割れ発生に至る前の初期

2. 2 試験

最初に、含水率の変化に伴う自然電位の変動を調べるため、水中養生後、空气中に放置して所定期間乾燥させた。かぶり表層部の含水率（以下、単に含水率と記す）は、105℃恒量法による値として表示される高周波容量式水分計を用いて測定した。自然電位は、鉛照合電極と高入力抵抗（1000MΩ）の電位差計を用いて測定した。

次に、炭酸化の進行に伴う自然電位の変動を調べるため、炭酸ガス濃度20%、温度30℃、相対湿度40%の条件で所定期間炭酸化させた。炭酸化深さは、供試体の一端を切断してフェノールフタレイン溶液を噴霧し、発色しない領域の長さとして求めた。自然電位は、槽内から取り出し十分散水した後、含水率と併せて測定した。

3. 実験結果

3. 1 塩化物を添加しない場合の自然電位の変動

(1) 含水率の変化に伴う電位変動

図-2に、供試体Aシリーズについて、含水率と鉄筋近傍の自然電位（以下、E1と称す）およびコンクリート表面の自然電位（以下、E2と称す）の関係を示す。E1は-150~-160mVの一定値を示している。この事実から、含水率の低下は表層部にとどまっておき、鉄筋近傍ではほとんどない。したがって、鉄筋は不動態が十分に形成されて健全な状態にあることが判った。また、E2は、含水率が低くなると貴な電位を示し、自然電位の補正が必要であることを確認した。

これまでの多くの研究によれば、コンクリートの含水率は電気抵抗と密接に関係し、含水率が低くなると電気抵抗は大きくなることが知られている[1]。かぶり部分の電気抵抗が大きくなれば、この間で生ずるIRドロップ（+の符号をもつ電位）が大きくなる。含水率が低くなるとIRドロップが大きくなり、E2は貴な電位を示すようになると考えられる。図-3に、含水率と電位変動分（E2-E1）の関係を示す。自然電位の測定に関わる誤差は通常0~30mVと考えられることに加えて、3.1(2)で述べるように含水率が5.5%以上であればほぼ飽水状態とみなせるので、これ以上の含水率では補正は必要ないと考えられることができる。したがって、補正分は含水率が5.5%以下の場合に対して、式(1)のように表わされる。

$$Z \text{ (電位補正分, mV)} = -2.5 X \text{ (含水率, \%)} + 180 \quad (1)$$

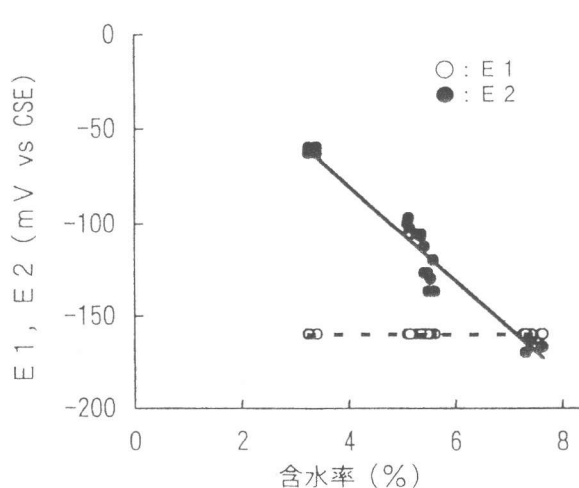


図-2 含水率とE1, E2の関係

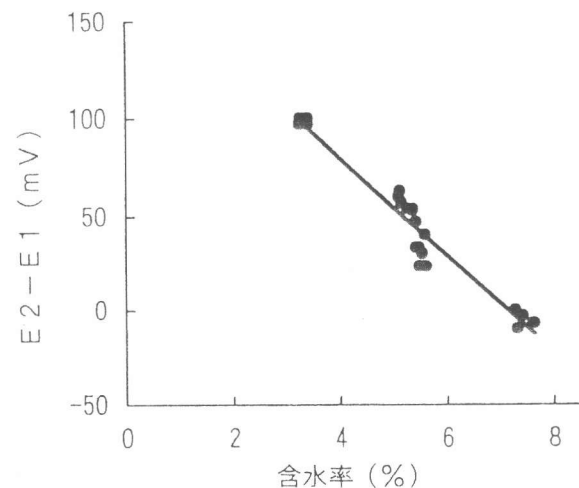


図-3 含水率と(E2-E1)の関係