

漏水を有するRCセグメントの鉄筋腐食の 初期進展に関する実験的研究 Evaluation of initial progress of steel corrosion of RC segment due to the leakage of underground water

伊藤 正寛¹・木村 定雄²
Masahiro ITO・Sadao KIMURA

In recent years, very few studies have been done on the effects of the leakage of underground water found in cracks of RC segment. This leakage causes steel corrosion, and it is suspected that the leakage induces weakening of flexural strengths. Because of the lack of knowledge in this area, we cannot evaluate the degree of corrosion unless the concrete is broken. Therefore, we challenged this problem. The purpose of this study is to investigate the initial process of steel corrosion of RC segment due to the leakage of underground water. First we proposed a model of the leakage of underground water in a shield tunnel. Next we measured the amount of the leaking water in five specimens with five different crack widths over 88 days. We also analyzed the process of corrosion in two ways-- measurement of macrocell current, and visual observation of steels. As a result, we found that 1) the leakage stopped due to clogging when the crack width was smaller than 0.2 mm, 2) the leakage caused carbonation on the crack surfaces of all the five specimens, and 3) only the widest crack of 0.34 mm resulted in corrosion. In conclusion, we confirmed that the leakage of underground water caused carbonation on the crack surfaces, and if the leakage stopped, the corrosion process is slowed.

Key Words: shield tunnel, segment, leakage, carbonation, steel corrosion

1. はじめに

RCセグメントの耐久性能は、水セメント比が小さく、品質管理が徹底されたコンクリート二次製品であることからその性能は高いと考えられる。しかしながら、供用中のシールドトンネルの損傷事例を見ると、漏水を生じている場合が多く、かぶりコンクリートの脆弱化や鉄筋腐食などが早期に進展することが懸念される。

一方、既往の鉄筋腐食の研究によると、塩害や中性化による鉄筋腐食に関する研究が多くなされているが、地下構造物を対象とした漏水現象を伴う場合の鉄筋腐食の研究は少ない¹⁾。したがって、漏水現象下での鉄筋コンクリート製セグメントの劣化状態を定量的に把握し、その将来の進展を予測する技術確立することが望まれている。

本論文は、地下水位50mまでを想定し、水圧が漸次的に増加する状態下での漏水現象をモデル化した実験を行い、漏水期間88日間の漏水量の変化と鉄筋腐食の初期進展を把握したものである。

2. 実験概要

(1) RCセグメントのモデル化

鉄道単線シールドトンネルで多用されているトンネル外径5~8mのセグメントリングを想定し、覆工厚300mmのRCセグメントをモデル化した供試体を作製した。その供試体の形状寸法はφ150mm×300mmである。

キーワード：シールドトンネル, RCセグメント, 漏水現象, 中性化, 鉄筋腐食

¹ 学生会員 金沢工業大学 大学院 工学研究科 博士前期課程 環境土木工学専攻

² 正会員 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科

供試体の示方配合を表-1に示す。水セメント比は40%，砂セメント比は2.5とした。細骨材は六日町産陸砂を用いた。本実験は、漏水現象における鉄筋腐食の進行を定量的に把握するため、モルタル製の供試体を用いた。すなわち、粗骨材の存在によってひび割れ面が複雑にならないようにした。内部鉄筋には丸鋼(SR235-φ9mm)を用いた。図-1は供試体内部の配筋図を示したものである。供試体中央に鉄筋腐食の進展をマクロセル電流で評価するための分割鉄筋を埋設した。また、供試体内部の上下には、ひび割れ導入後のひび割れ幅を保持するために全面をエポキシ樹脂でコーティングした補強鉄筋を埋設した。また、実験前の供試体の養生は、打設後に28日間の水中養生、10ヶ月間の気中養生(20±3℃, RH60±5%)とした。

(2) 貫通したひび割れの導入

供試体に貫通したひび割れを引張割裂試験により導入した。ひび割れを導入した後、5日間供試体を放置し、ひび割れ幅が安定するのを待って、これを実験前のひび割れ幅として測定した。ひび割れ幅は、流入面と流出面のそれぞれ3点ずつマイクロスコプで測定し、それらを平均したものとした。このようにして得られたひび割れ幅を表-2に示す。既往の研究によると、ひび割れ幅が0.2mm以下では、コンクリートの未水化物が漏水と反応して目詰まりを起こす自然治癒などの効果により、漏水が停止することが期待できると考えられている²⁾。本実験では漏水現象の要因である地下水压が漸次的に増加する場合においてもこのことがいえるか確認するため、ひび割れ幅が0.2mm以下を3ケースおよび0.2mm以上を2ケースの計5ケースの供試体を作製した。

(3) 漏水実験装置

本実験では漏水現象を再現するために、漏水実験装置を作製した。その全景を写真-1に示す。この装置は水を供給するタンク、供試体を据え付けるチャンバーおよびタンクに圧力を載荷するコンプレッサーで構成している。したがって、コンプレッサーでタンクに圧力を加えることで任意の水圧状態下での漏水現象を再現することが可能である。図-2に、チャンバー内の模式図を示す。供試体をチャンバーに据え付ける前に、供試体の側面をエポキシ樹脂でコーティングし、供試体円周部からの漏水の流入と流出を防いだ。また、供試体の流出面のひび割れ部以外からの漏水を防ぐため、供試体とチャンバーの間に、Oリングを設置し、さらにエポキシ樹脂にて止水処理を施した。

(4) 漏水現象のモデル化実験

本実験で用いた水は、地下水とした。表-3は地下水の主な水質を示したものである。また水圧は、地下水位が1mから50mまで上昇する漏水現象とモデル化し、水圧を段階的に増加させる漸次増加とした。初期水圧は0.01MPaとし、漏水量とマクロセル電流測定の値が定常状態になったことを確認した後、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5MPaと増加させた。漏水量は1時間間隔で計測し、ひび割れ幅ごとの漏水量の変化を把握した。

表-1 供試体の示方配合

W/C	S/C	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
40	25	242	603	1511

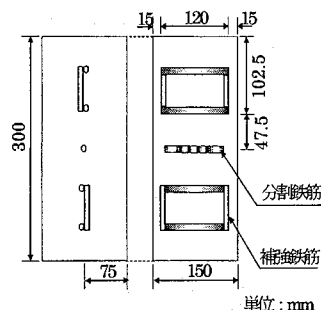


図-1 供試体の配筋図

表-2 ひび割れ幅

供試体	ひび割れ幅(mm)		
	流入面	流出面	平均
Sp.1	0.08	0.11	0.1
Sp.2	0.12	0.2	0.16
Sp.3	0.21	0.18	0.19
Sp.4	0.25	0.33	0.29
Sp.5	0.38	0.31	0.34

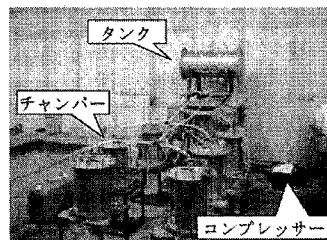


写真-1 漏水実験装置

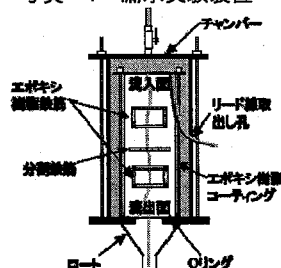


図-2 チャンバー内の模式

表-3 主な地下水の水質

試験項目	単位	試験結果
pH値		6.6(18℃)
電気伝導率	mS/m at25℃	253
溶存酸素	mg/l	3
遊離炭酸	CO ₂ mg/l	38.7
塩化物イオン	mg/l	13.7
硫酸イオン	mg/l	11.1
溶性ケイ酸	mg/l	40

(5) 鉄筋腐食の評価方法

鉄筋腐食には、鉄筋が局所的に腐食するマクロセル腐食と、鉄筋全体が腐食するミクロセル腐食とがある。一般にひび割れ部などの欠陥部での鉄筋腐食の初期進展は、ミクロセル腐食に比べて、マクロセル腐食が卓越すると言われている³⁾。そこで、本実験は、マクロセル腐食電流のみを測定することとした。マクロセル電流の測定は、供試体中央に埋設された分割鉄筋を用いて行った。分割鉄筋の写真と模式図を写真-2と図-3に示す。分割鉄筋はSR235- $\phi 9\text{mm}$ を27.5mmを2本と15mmを3本に切断し、各鉄筋要素間をエポキシ系樹脂で絶縁し接合したものである。隣接する鉄筋要素の隣接側のリード線を結線することで電氣的に一本の鉄筋としてみなせるものである。マクロセル電流は、アノードとカソードが異なる鉄筋要素に跨り形成される腐食セル（回路）の電流のことで、鉄筋要素間の電流を無抵抗電流計でその電流を測定することが可能となる³⁾。



写真-2 分割鉄筋

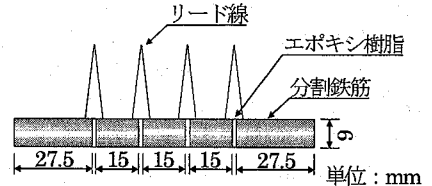


図-3 分割鉄筋の模式図

漏水実験中のチャンバーの側面からリード線を取り出し、各分割鉄筋の要素間のマクロセル電流を無抵抗電流計で1回/日の頻度で測定した。また、あわせて漏水実験後に供試体をひび割れ面で破断し、分割鉄筋を取り出して腐食状態を目視観察した。

3. 実験結果およびその考察

(1) 漏水量

a) 漏水量の経時変化

図-4(1)から図-4(5)は、各ケースの漏水量の経時変化を示したものである。すべてのケースに関して、漏水実験を開始した直後、漏水現象が生じた。その後、ひび割れ幅0.2mmのケースに関して、漏水実験開始後約7日間で漏水量が急激に減少し、その後漏水は停止した。しかし一方で、ひび割れ幅が0.2mm以上のケースに関して、ひび割れ幅が0.2mm以下のケースと同様な傾向を示したが、漏水は停止せず、およそ200ml/dayで定常状態になった。漏水量が減少した要因として、漏水実験中、漏出面に写真-3に示すような析出物が確認できたことから、コンクリートの未水和物が漏水と反応して目詰まりを起こしたためだと考えられる。また、Sp.4に関して、ひび割れ幅が0.29mmと0.2mmよりも大きに関わらず、漏水量が急激に減少した後、徐々に減少し、漏水実験開始後30日には停止した。これは、塩水を用い水圧0.3MPa

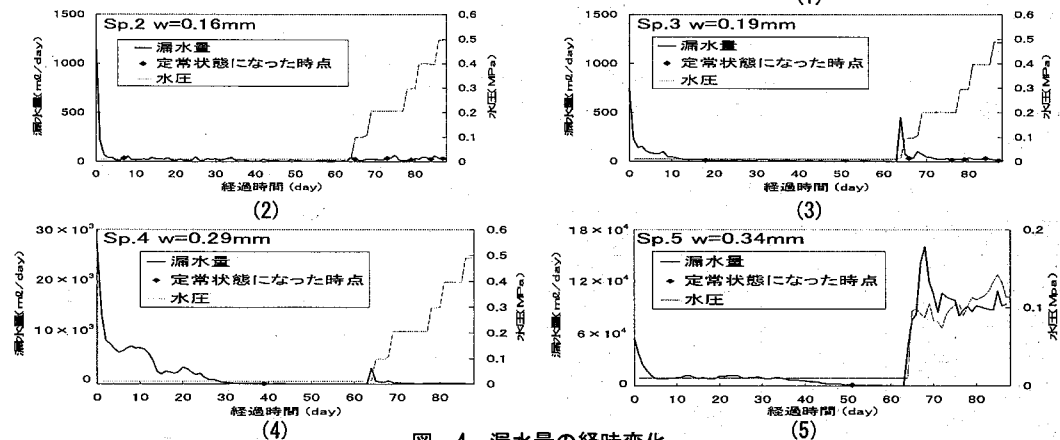


図-4 漏水量の経時変化

で漏水実験を行った既往の研究では、ひび割れ幅が0.26mmのケースで漏水量が徐々に減少する傾向を示している。しかしながら、漏水の停止には至っていない¹⁾。この既往の研究と本実験とでは、漏水実験開始時の水圧が大きく異なる。このことから、水圧が0.01MPaでは、漏水が停止したが、水圧が大きくなると、漏水が停止しないと考えられる。

次に、水圧を漸次増加させると、漏水量は増加し、その後減少して定常状態になることが確認された。一方、ひび割れ幅が最も大きいSp.5は、水圧の増加後に漏水量が急激に増大した。このため、このケースのみ水圧の増加を0.1MPaまでとして漏水量を計測した。

このことから、水圧が漸次的に増加するときの漏水現象下では、水圧が0.5MPaの高水圧下でもひび割れ幅が0.2mm以下であれば、自然治癒などの効果が期待でき、漏水量はほぼ停止することがわかった。

b) 漏水量の経時変化の定量的評価

既往の研究によると、目詰まりによる漏水量の低下は、平行間隙粘性流として濁質拘留モデルの流量低減式による理論曲線を用いて定量的に把握できるとされている^{1),4),5)6)}。

そこで、その流量低減式を用いて実験開始直後から28日間に起きた目詰まりによる漏水量の低下を定量的に把握した。式(3.a)は、流量低減式を示したものである。

$$q = q_0 \times \frac{1}{\sqrt{(1 + 2Kb't \frac{q_t}{q_0})^3}} + q_c \quad (3.a)$$

q : 流量 [mL/day]

q_t : $t=0$ の時の流量 [mL/day]

q_c : 定常流量 [mL/day]

q_0 : 閉塞対象流量($=q_t - q_c$) [mL/day]

Kb' : 閉塞係数 [T^{-1}]

t : 時間 [day]

本実験で用いる閉塞係数 Kb' は、最小二乗法により近似させ、これから求まる値とした。また、定常流量は、ひび割れ幅が0.2mm以下のケースに関して、漏水が停止することから0mL/dayとし、ひび割れ幅が0.2mm以上のケースに関して漏水開始後28日の漏水量とした。近似解に用いた各ケースの値を表-4に示す。図-5(1)から図-5(5)は各実験ケースの実験値と流量低減式による近似解を示したものである。

表-4 近似解に用いた値

係数	q_t [mL/day]	q_c [mL/day]	q_0 [mL/day]	Kb' [T^{-1}]
Sp.1	267	0	267	0.20
Sp.2	1197	0	1197	1.38
Sp.3	740	0	740	0.64
Sp.4	27108	868	26240	0.30
Sp.5	53917	9560	44357	0.59

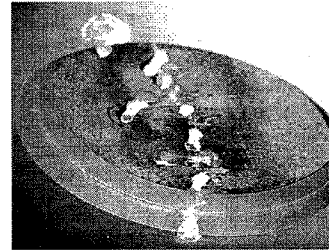


写真-3 確認された析出物

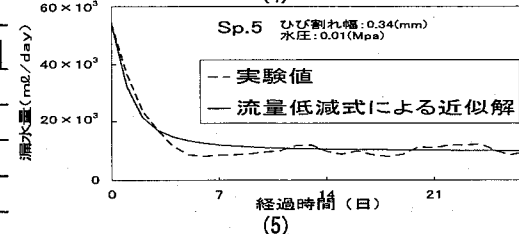
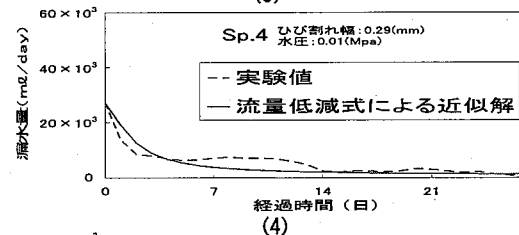
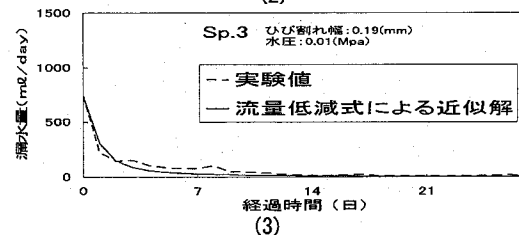
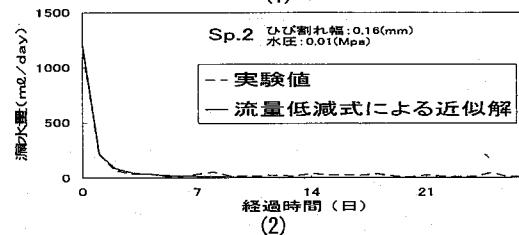
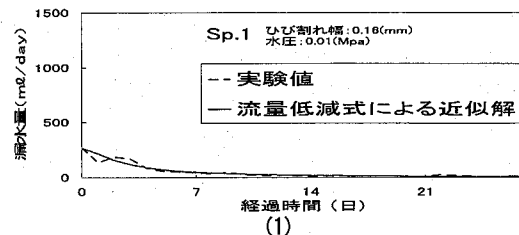


図-5 実験値と近似解

これを見ると、この流量低減式により、漏水量の減少傾向を示すことができると考えられる。

次に流量低減式における閉塞係数 Kb' を理論的に求めることができらなれば、流量低減式によって、漏水量の減少傾向を予測および評価をすることができると考えられる。しかしながら、閉塞係数 Kb' とひび割れ幅との明確な相関関係はない。これは、ひび割れ内面の表面粗さや曲がりなどが影響していることが考えられるため、さらに多くのケースを実験し、その影響を定性的に評価することが望ましいと考える。

c) ひび割れ幅と漏水量の関係

コンクリート構造物のひび割れからの漏水は、ひび割れ幅、作用水圧および部材厚などによって影響を受けて変化する。コンクリート標準示方書[施工編]によると、ひび割れなどからの漏水量は適切な試験を行い定めることを基本とし、試験を行わない場合には、次式(以下、基本式と呼ぶ)より漏水量を求めてよいとされている。

$$Q_{cjd} = \frac{\gamma_w}{12a\mu_w} bw^3 \frac{h}{L} \quad (3.b)$$

Q_{cjd} : ひび割れあるいは継目からの透水量 $[\text{m}^3/\text{s}]$,

γ_w : 水の単位体積重量 $[\text{N}/\text{m}^3]$

w : ひび割れ幅 $[\text{m}]$

b : ひび割れ長 $[\text{m}]$

μ_w : 水の粘性係数 $[\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2]$

h : 構造物内面と外面の水頭差 $[\text{m}]$

L : 透水経路長に相当する断面厚さの期待値 $[\text{m}]$ 一般に断面厚さとしてよい

a : ひび割れの曲がりやひび割れ内面の表面粗さの影響を考慮する係数

式(3.b)はひび割れを平行平板の間隙とみなすことで、平面ポアズイユ流(plane Poiseuille flow)の考え方を適用したものである。漏水量を求めるにあたり係数 a を適切に設定する必要があり $a=1$ が平行平板の場合となる。係数 a は既往の研究からひび割れ幅の関数として考えられているが、定式化されるまでには至っておらず、 $a=25$ としている。これは $a=25$ とすると既往の研究結果のほぼ上限の透水量を与えるからである^{6),7)}。

図-6は水圧が0.01MPaの時のひび割れ幅と漏水量の関係を示したものである。式(3.b)から求める漏水量(以下、基本値と呼ぶ)と漏水開始直後の漏水量を比較すると、ひび割れ幅が0.2mm以上のケースである{Sp.4($w=0.29\text{mm}$)とSp.5($w=0.34\text{mm}$)}は基本値と実験値が、ほぼ同程度となっている。ひび割れ幅が0.2mm以下のケースでは実験値が基本値を大きく下回った。このことから、ひび割れ幅が小さくなるほど、ひび割れの曲がりやひび割れ内面の表面粗さが漏水量に大きく影響することが考えられる。一方、漏水量が減少した段階の漏水開始10日後の漏水量を見ると、ひび割れ幅の大小に関わらず漏水量が減少しており、基本式から得られる漏水量よりも相当に少なくなる。

図-7は水圧を0.1MPaに増加した直後のひび割れ幅と漏水量の関係を示したものである。実験値は、基本値より少なくなった。この傾向はその他の水圧段階においても同様であった。これは、水圧が0.01MPaの段階である程度目詰まりがおき、それが影響し漏水しづらくなったためと考えられる。

以上のことから、ひび割れ幅の大小に関係なく未

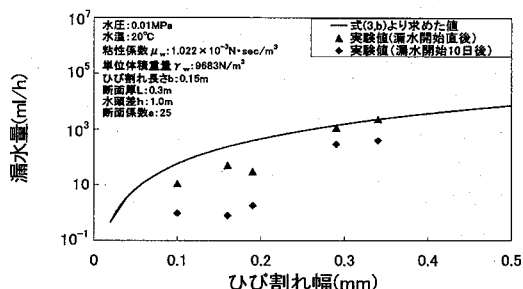


図-6 ひび割れ幅と漏水量の関係(0.01MPa)

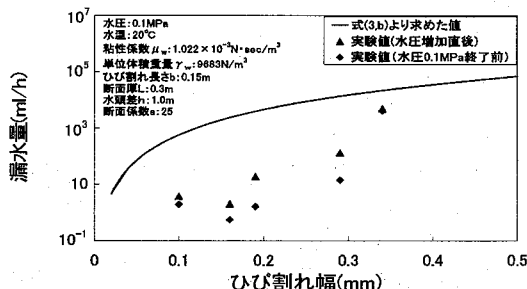


図-7 ひび割れ幅と漏水量の関係(0.1MPa)

水和物の生成などの目詰まり効果により、漏水量が減少する。また、一度目詰まりを起こすと、水压を漸次増加させてもその閉塞効果は持続されることが確認された。

(2) 鉄筋腐食

マクロセル電流測定の結果から、マクロセル電流密度を算定し、鉄筋腐食の初期進展を評価した。マクロセル電流密度は、対象とする分割要素の両端から流入する電流を合計し、この電流を分割鉄筋要素の表面積で除することで、分割鉄筋要素表面での値として算定した。例えば、図-8 に示す鉄筋要素 i のマクロセル電流密度 (a_i) は式 (3.c) で表される。

$$a_i = \frac{A_{i-1,i} - A_{i,i+1}}{S_i} \quad (3.c)$$

ここで、 S_i は鉄筋要素 i の表面積を示す。なお、対象とする分割鉄筋要素がアノードの場合、電流密度は正の値となる。一方、対象とする分割鉄筋要素がカソードの場合、電流密度は負の値となる。一般にマクロセル腐食の場合、アノード部が卓越するとされている³⁾。

漏水量およびマクロセル電流密度の経時変化を図-9 および図-10 に示す。それぞれひび割れ幅の小さいものと大きなものの代表の例である。ひび割れ幅の小さい Sp.3 では、漏水量の変化も小さく、時間の経過とともに漏水が停止している。この時のマクロセル電流密度をみると、ほとんど電位が発生していない。一方、ひび割れ幅の大きい Sp.5 では、漏水実験の開始直後、また水压の漸次増加直後に漏水量の変化が大きく、その時のマクロセル電流密度が大きく変動している。漏水開始直後の変動ではアノードとカソードが明確に分かれてなく、またこの段階で鉄筋が腐食しだすことは考え難いことから、漏水を伴う場合のマクロセル電流は不安定になることがわかった。一方、実験開始後約 65 日付近をみると、No.2 の鉄筋要素のみがアノードとなり、その他の鉄筋要素がカソードになっていることから、鉄筋腐食が開始している可能性があると考えられる。

そこで、漏水実験後に供試体をひび割れ面で破断し、分割鉄筋をとり出して、腐食状況を目視観察した。写真-4 および写真-5 は、Sp.5 の分割鉄筋の状

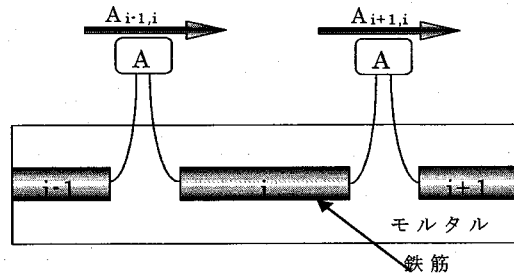


図-8 マクロセル電流密度の測定

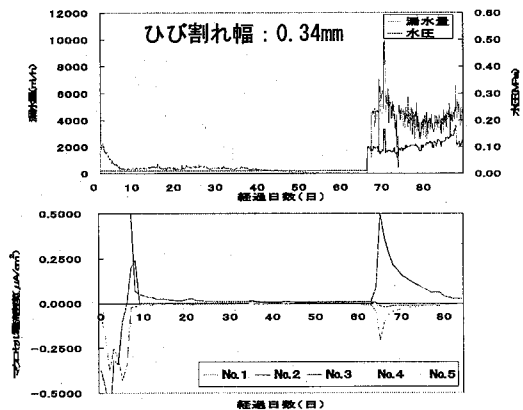


図-9 漏水量とマクロセル電流密度 (Sp. 5)

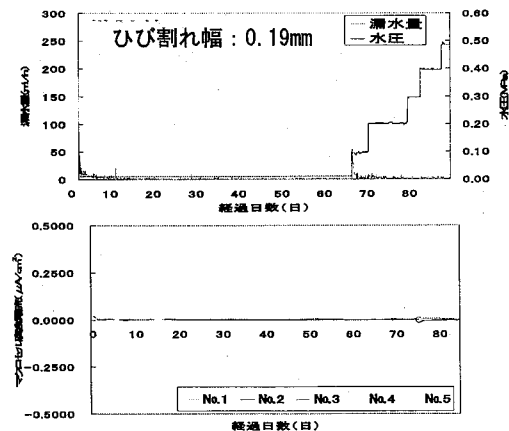


図-10 漏水量とマクロセル電流密度 (Sp. 3)

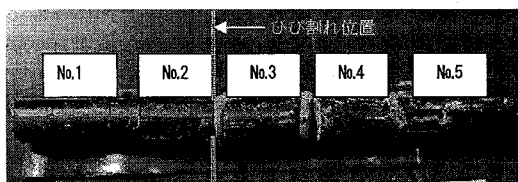


写真-4 取り出した分割鉄筋

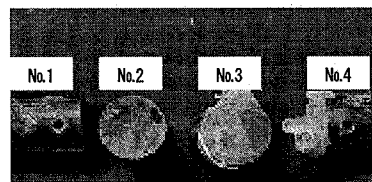


写真-5 鉄筋要素No.2 状況

況を示したものである。これより、No.2 の分割鉄筋の一部に腐食開始が認められた。なお、Sp.5 以外の供試体中の分割鉄筋は認められなかった。マクロセル電流密度のアノードと発錆が確認された鉄筋要素が一致したことから、マクロセル電流の測定により、非破壊的に鉄筋の腐食の進展が把握できる可能性が示された。

次に、供試体をひび割れ面で破断した後、ひび割れ面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、中性化の有無を確認した。その結果の一例を写真-6 に示す。これを見ると、ひび割れ面全体が中性化していることがわかる。この結果は、すべての実験ケースで同じであった。

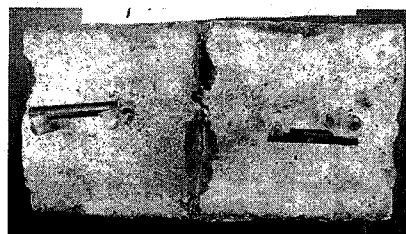


写真-6 中性化の有無の確認

以上のことから、漏水現象を伴う場合、ひび割れ面およびその付近に存在する鉄筋を保護している不動態皮膜は早期に消失し、鉄筋腐食の進展が早くなることが予想される。ただし、本実験は鉄筋腐食の初期進展、すなわち不動態皮膜の消失までを確認したものであるから、今後さらに長期的な実験を行い、鉄筋腐食の進展を確認する必要があると考えている。

4. まとめ

本実験で得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

(1) 漏水量予測に関する結論

- ① ひびわれ幅が0.2mm以下の場合、漏水量は指数的に減少し、ほぼ停止状態になる。一方、ひび割れ幅が0.2mm以上の場合、漏水量は漏水開始後急激に減少し、その後ゆっくりと減少し定常状態になる。これは、未水和物の生成などにより目詰まりが起きることが原因だと考えられる。
- ② 漏水量の経時変化は、平行間隙粘性流として濁質拘留モデルの流量低減式による理論曲線を用いて定量的に評価できる。しかし、閉塞係数とひび割れ幅との明確な相関関係が見られない。
- ③ 一度目詰まりが起きると、水圧を漸次的に上昇させてもその閉塞効果は持続する。
- ④ ひび割れ幅が大きくなると、ひび割れの曲がりや表面粗さが漏水量に及ぼす影響が小さくなる。

(2) 鉄筋腐食に関する結論

- ① ひび割れ幅の大小に関係なく、ひび割れ面内が漏水により中性化することから、不導体皮膜の消失は早期に起こると考えられる。
- ② ひび割れ幅が0.34mmのケースで鉄筋腐食の開始が確認されたことから、漏水現象を伴う場合には、鉄筋腐食の進展が早くなると推察される。

参考文献

- 1) 蛭川友司, 見坊東光, 森芳徳, 伊藤洋: 海水が浸透するひび割れ中の鉄筋腐食に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.466, pp.31-39, 1993.5
- 2) 例えば, 湯浅康尊, 中村徹立, 東狐光俊, 増野正男, 小泉淳: 内水圧が作用する RC セグメントの水密性に関する研究, JSCE 論文 V3.2, 2004.3
- 3) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰裕: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学論文集 No.2, pp.547-552, 2001.
- 4) 佐藤邦明, 伊藤洋: 岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構, 土と基礎, 36-4(363), pp.21-25, 1988
- 5) 壺岐直之, 清宮理, 山田昌郎, 高野誠紀: 沈埋トンネル側壁のひび割れからの漏水と自癒効果の確認実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.737-742, 1995.6
- 6) 伊藤洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 清水昭男: 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, No.41, pp.217-220, 1987.12

7) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕， pp.96-99， 2002.

8) 土木学会：2002 年度版コンクリート標準示方書 改定資料， コンクリートライブラリ第 108 号， pp89-90， 2002