

論文 塩化物と中性化の複合作用を受けるRC部材の鉄筋腐食とかぶりコンクリートに発生するひび割れに関する研究

飯泉 興平*1・関 博*2・薛 昕*3

要旨：異なるかぶりの厚さ，塩化物量のコンクリート中に埋設した鉄筋の腐食性状について塩害単独劣化，中性化単独劣化，複合劣化の比較を，腐食電流密度，腐食面積率，腐食減量の測定により検討した。かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋腐食量を電食試験，FEM解析により求めた。電食試験で求められたひび割れ発生時の腐食量はかぶり5mmで重量減少率1.29%，かぶり10mmで1.33%，FEM解析によるひび割れ発生腐食量は0.20～0.34%(すべて鉄筋径9mm)であった。

キーワード：鉄筋腐食，複合劣化，ひび割れ

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート構造物における，コンクリート片の落下，それに伴う事故の危険性が問題視されている。文献1)などでは，かぶりコンクリート片の落下が「対人安全性」に直接的あるいは間接的な影響を与えるとしている。加えて同報告書では，かぶりコンクリートの落下・剥落の直接的な原因は内部鉄筋の腐食であり，その主因は塩害や中性化の複合劣化などであるとしている。本研究では，単独劣化と複合劣化，かぶりや塩化物量の相違が腐食速度や腐食量に与える影響について，実験的に検討した。また破壊力学に基づいたFEM解析を行い，ひび割れ発生腐食量の推定を行った。

2. 実験概要

2.1 腐食促進試験

(1) 供試体

コンクリートの示方配合表を表-1に示す。供

試体は断面50×50mm，長さ200mmの角柱状であり，供試体中に鉄筋を埋設した。コンクリート打設時の底枠面を腐食促進面とし，腐食促進面を除く5面をエポキシ樹脂で被覆した。鉄筋はSR24丸鋼φ9mmを10%クエン酸二アンモニウム溶液に48時間浸漬し黒皮を完全に除去したものを使用した。

(2) 実験要因

実験要因としては，かぶり厚さ，塩化物量，与える劣化作用とした。要因の組み合わせを表-2に示す。

(3) 中性化促進および腐食促進条件

打設後24時間で脱型し，「3日間の水中養生」，「4日間の気中養生」，「エポキシ樹脂塗装」の後，「材齢2週」から中性化促進試験を「温度40℃・湿度50%・CO₂濃度10%」の環境で行った。中性化深さの測定により鉄筋の裏側まで中性化された供試体から随時「腐食促進試験」を開始した。腐食促進は，腐食促進期間100週までは高

表-1 示方配合表

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (ml/m ³)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
8	8	70	173	246	854	911	616

*1 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 早稲田大学 理工学部社会環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

温高湿状態（温度 40℃・湿度 95%）と低温低湿状態（温度 15℃・湿度 60%）の乾湿状態を、それぞれ 1 週間ずつ繰り返す「乾湿繰返し」によって行った。この時点で供試体内部が乾燥に近い状態であったため腐食促進期間 100 週以降は高温高湿状態に保った。

(4) 腐食電流密度の測定

自然電位から+600mV 分極させたアノード分極曲線の、自然電位+600mV から+300mV の領域の線形近似曲線と自然電位の値との交点を腐食電流密度の対数値として求めた。

(5) 腐食面積率および腐食重量減少率の測定

供試体を破壊して鉄筋を取り出し、腐食部分の面積を健全時の鉄筋表面積で除すことにより腐食面積率とした。腐食した鉄筋は 10%クエン酸二アンモニウム溶液に 48 時間浸漬し、錆を除去した後の重量を測定し腐食減量を求めた。健全時と腐食生成物除去後の鉄筋重量の差を健全時の鉄筋重量で除すことにより重量減少率とした。

2.2 電食試験

50×100×200mmの角柱供試体に、かぶり 5mm, 10mm として鉄筋(φ9mm)を埋設した。電食試験の概略を図-1に示す。鉄筋端部はシリコンにより被覆した。かぶり側の鉄筋近傍のコンクリート表面に4枚のひずみゲージ(長さ10mm)を設置し、鉄筋に沿う方向のひび割れ発生の評価を行った。水中に浸漬させた供試体に鉄筋単位表面積あたり 2122 μA の定電流を印加し鉄筋の腐食を促進させた。通電は供試体 1 体ずつ行った。コンクリートの配合は腐食促進試験と同様のものを用いている。

3. 実験結果

3.1 腐食促進試験結果

(1) かぶりの厚さによる比較

腐食促進期間 0~20 週において、かぶりの厚さにより腐食電流密度は相違する傾向が見られた。結果を図-2に示す。かぶりの厚さの増加に伴い初期の腐食電流密度が大きな値をとって

表-2 実験要因の組み合わせ

かぶり (mm)	塩化物量(NaCl 対 セメント重量) (%)	劣化作用
5	3, 10 ^{*a}	複合劣化 ^{*b}
10	1, 3, 5, 10 ^{*a}	
15	3, 10 ^{*a}	
10	0	中性化単独劣化
	0	なし
	3	塩害単独劣化

*a 10%は追加作成のため測定期間が異なる

*b 塩害と中性化の複合劣化

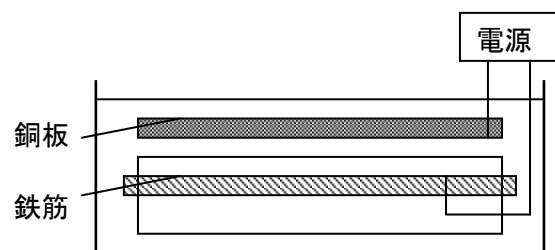


図-1 電食試験の概略

る。かぶりの厚さが大きい供試体ほど中性化期間が長かったため、よりコンクリートの pH が低下し不動態の破壊量が増加したことが影響していると考えられる。また、本実験では塩化物を練り混ぜ時に添加しており、かぶりの厚さの小さな供試体では塩分の溶出や、中性化による塩分の濃縮作用により鉄筋近傍の塩化物濃度が低下し不動態破壊量を軽減したとも考えられる。腐食促進期間 20 週を経過した後、一部の供試体を除いて 2~5 μA/cm² の値で推移し大きな値の変化が見られなくなった。高温高湿一定とした 100 週以降、各供試体の電流密度は 60~70 μA/cm² まで増加したが、かぶりの厚さとの明確な関連性は見られなかった。腐食減量測定結果を図-3に示す。腐食電流密度の大小に対応し、腐食促進期間初期において、かぶりの厚さが大きい供試体ほど腐食減量は大きくなっている。腐食促進期間の増加に伴い腐食減量の大小が初期と逆転していることから、かぶりの厚さの小さい供試体の腐食電流密度がわずかではあるが大

きかったと言える。

(2) 塩化物量による比較

腐食電流密度，腐食減量測定結果を図-4，図-5に示す。腐食促進期間初期において，塩化物量の大きい供試体ほど腐食電流密度が大きくなった。塩化物は鉄筋の不動態の破壊に関与し腐食の開始に大きな影響を与えらると思われが，今回の結果から塩化物量の大きい供試体で初期腐食速度が大きく，腐食減量も増加したことが考えられる。塩化物量が増加するほど腐食初期の腐食速度が大きくなり腐食減量は増加すると思われる。

(3) 劣化作用による比較

腐食電流密度，腐食面積率，腐食減量の測定結果をそれぞれ図-6，図-7，図-8に示す。複合劣化供試体は腐食促進期間初期において腐食電流密度が大きな値を示している。これに対応し，同期間の複合劣化供試体の腐食減量の値が増加していき，腐食面積率も単独劣化供試体と比較してはるかに大きな値となった。また，塩害単独劣化供試体の腐食面積率，腐食減量が中性化単独劣化供試体の同測定結果より大きな値となっている。腐食減量に関しては，全腐食促進期間において塩害，中性化単独劣化供試体の値の和よりも複合劣化供試体の値が大きくなった。比率として複合劣化供試体の腐食減量を1とすると，塩害単独劣化供試体が約0.6，中性化単独劣化供試体で約0.2である(塩害単独劣化供試体の40~60週の測定値について，同条件で追加作成した供試体を用いているが中性化深さがやや小さく，若干腐食量が小さくなっているとされる)。この比率は腐食促進期間においてあまり変化しておらず，腐食促進期間以前に複合作用の影響を受けたと推測され，その作用のひとつに，中性化によって添加されていた塩分が濃縮され鉄筋近傍の塩分濃度を増加させたことによる腐食速度の増加が考えられる⁴⁾。劣化作用の違いについては，鉄筋の腐食形態にも明確な違いがみられた。腐食面積率に違いはあるが，塩化物を含んだ供試体，つまり複合劣化

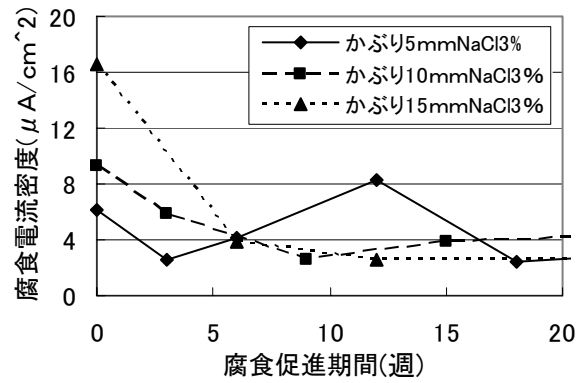


図-2 腐食電流密度の測定結果
—かぶりの厚さ比較—

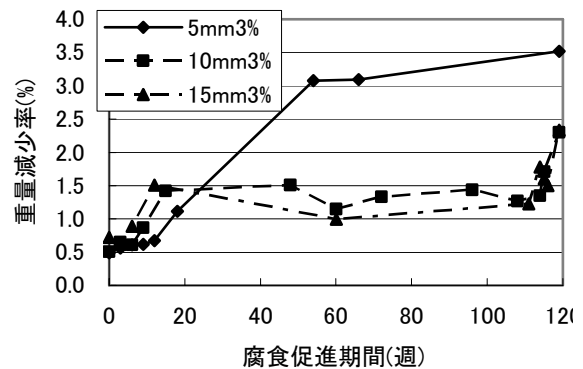


図-3 腐食減量の測定結果
—かぶりの厚さ比較—

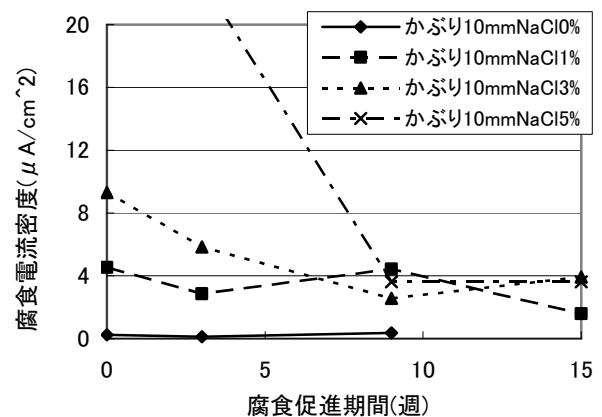


図-4 腐食電流密度の測定結果
—塩化物量比較—

供試体と塩害単独劣化供試体の鉄筋には局所的な激しい腐食があり，鉄筋深さ方向への顕著な腐食の進行が見られた。中性化単独劣化供試体については腐食面積率も小さく，軽微な点錆が発生している程度であった。

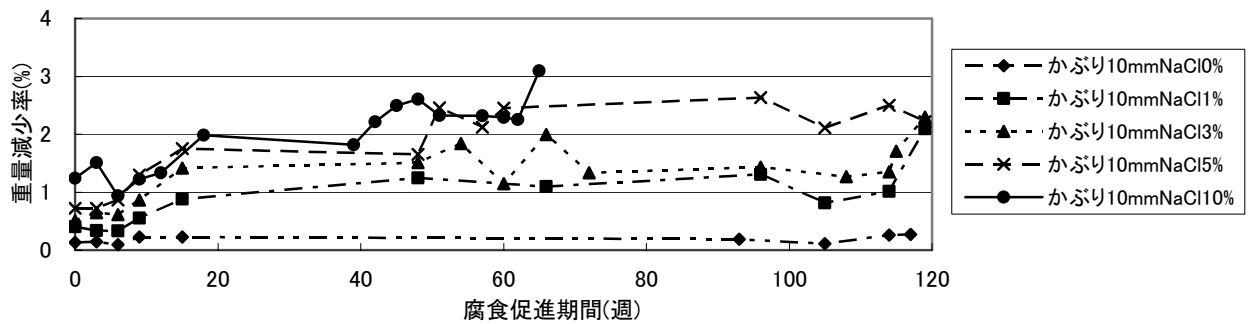


図-5 腐食減量の測定結果—塩化物量比較—

3.2 電食試験結果

電食試験ではかぶり側の供試体表面で測定したひずみの挙動によってひび割れ発生を判断した。通電開始後、しばらくの間、ひずみ値は大きな変化を見せない。その後、急激に増加し始め測定期間内の最大値となった後、減少し始める。本実験では、この一連の挙動を、腐食生成物のコンクリートの空隙への充填、鉄筋周辺コンクリートへの膨張応力の増加そしてひび割れの発生によるものとしてとらえることにより、ひび割れ発生時の腐食量は重量減少率において、かぶり 5mm で 1.29%，かぶり 10mm で 1.33%，単位面積当たりの減量でそれぞれ 24.76mg/cm²，25.38 mg/cm²であった。

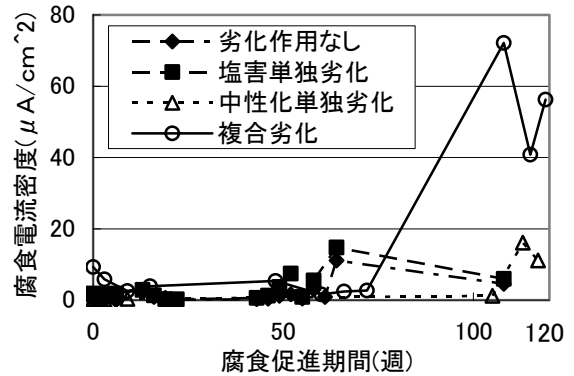


図-6 腐食電流密度の測定結果—劣化作用比較—

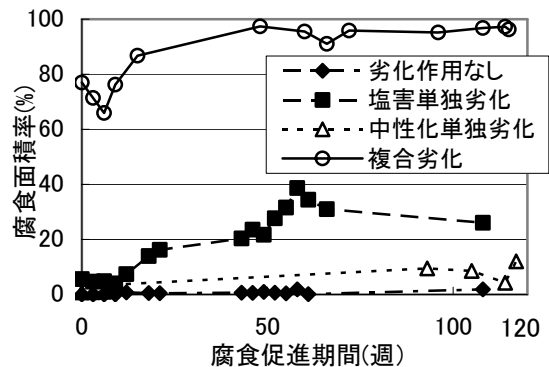


図-7 腐食面積率の測定結果—劣化作用比較—

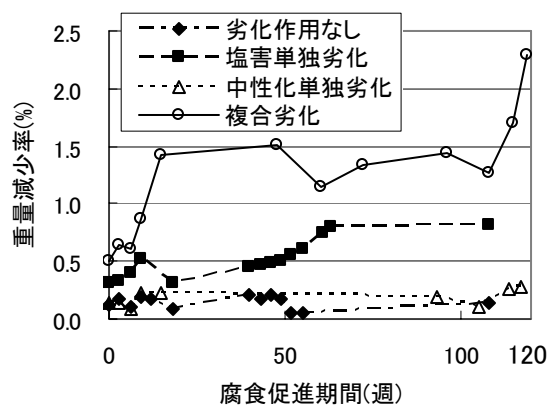


図-8 腐食減量の測定結果—劣化作用比較—

4. 解析概要

4.1 解析方法

有限要素法汎用プログラム DIANA により、破壊力学に基づいた FEM 解析を行った。鉄筋の腐食による膨張を鉄筋の周囲に作用する強制変位として与える変位制御型の増分解析である。本解析ではコンクリートの引張軟化によって、引張応力を伝達しなくなる時点をひび割れ発生と判断し、健全時の鉄筋表面からひび割れ発生時の腐食生成物表面までを変位量 u_2 として、式(1)²⁾を用いて腐食量の算出を行った。

$$W_c = \frac{\gamma}{(\rho - 1)} u_2 \quad (1)$$

120

ここで、 W_c ：鉄筋腐食量(mg/mm^2)， u_2 ：鉄筋の半径方向に増大した厚さ(mm)， γ ：鉄の密度($7.85\text{mg}/\text{mm}^3$)， ρ ：腐食生成物の体積膨張率である。本解析では $\rho=3.0$ とした。

4.2 ひび割れに対する構成則

本解析ではコンクリートの引張軟化について構成則に組み込み、指数軟化タイプの軟化曲線を用い、全てのコンクリート要素に適用させた。

4.3 使用モデル

本研究における実験供試体と同じ寸法の断面を用いた。拘束条件は、下辺の両端を x ， y 方向で固定した拘束 1 と、下辺、側辺の 3 辺を x ， y 方向で固定した拘束 2 の二通りを使用した。また、適用する材料特性を表-3 に示す。これらは腐食促進供試体を用いて求めた実験値であり、破壊エネルギーについてはコンクリート標準示方書より算定式を引用し求めた。

5. 解析結果

解析結果を表-4 に示す。また、主要な引張応力進展の様子を図-9、図-10 に示す(図中の色の濃い位置が応力の大きな部分)。図-9 は、本解析において最も多く見られた応力進展の様子であり、鉄筋周辺コンクリートにおいて引張応力が発生し(図-9 左上)、供試体表面コンクリート要素が引張強度に達した(図-9 右上)後、同要素の引張応力が徐々に低下し(図-9 左下)、0 となった(図-9 右下)。図-10 は本解析結果で唯一他と異なる傾向が見られた例である。供試体表面要素が引張強度に達し、鉄筋から斜め方向に引張応力が増加している(図-10 左上)。最後に鉄筋とコンクリートの境界面の要素の引張応力が 0 となり解析が終了した(図-10 右下)。表-4 より、供試体表面でひび割れの確認できる時期は、かぶりの厚さが大きいほど遅くなるといえる。本解析では、かぶり 5mm、鉄筋径 9mm で重量減少率 0.26~0.34%で、かぶり 10mm、鉄筋径 9mm で重量減少率 0.20~0.34%、かぶり 15mm、鉄筋径 9mm で重量減少率 0.20~0.32%でひび割れが発生する結果となった。

表-3 解析に使用した材料特性

ヤング係数	24260 (N/mm^2)
ポアソン比	2.00E-01
圧縮強度	22.52 (N/mm^2)
引張強度	1.834 (N/mm^2)
破壊エネルギー	6.084E-02 (N/mm)

表-4 解析によるひび割れ発生腐食量

かぶり-供試体幅	拘束 1	拘束 2
5mm-50mm	0.27% (5.14)	0.32% (6.04)
10mm-50mm	0.20% (3.89)	0.31% (5.93)
15mm-50mm	0.20% (3.89)	0.32% (6.12)
5mm-100mm	0.26% (4.95)	0.34% (6.48)
10mm-100mm	0.26% (4.98)	0.33% (6.32)

括弧内は単位 mg/cm^2

網掛けなしは供試体表面で、網掛けありは供試体内部でひび割れ発生

すべてのモデルで鉄筋径は 9mm

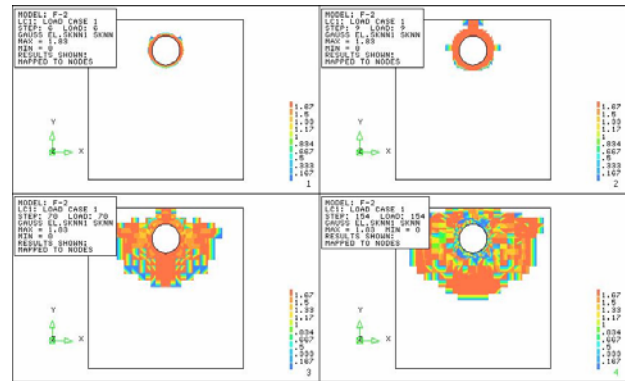


図-9 供試体断面応力図
-かぶり 5mm, 拘束パターン 2-

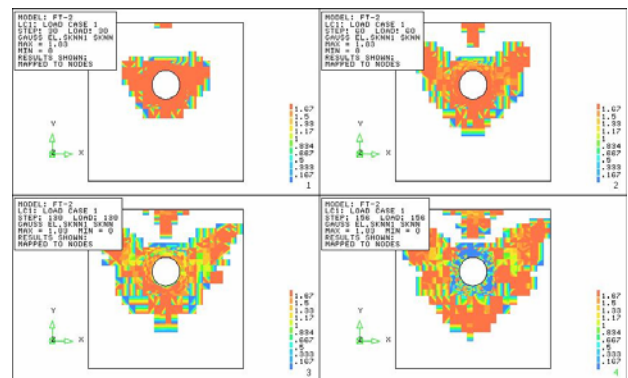


図-10 供試体断面応力図
-かぶり 15mm, 拘束パターン 2-

6. 実験結果と解析結果の比較

図-11 に腐食促進試験，電食試験および解析によるひび割れ発生時の腐食量を示す。ただし，腐食促進試験供試体については，ひび割れの発生が認められなかったため，腐食促進試験終了時の腐食量である。腐食促進試験供試体の腐食量が，ひび割れが発生していないにも関わらず，電食試験および解析によって算出されたひび割れ発生腐食量よりもかなり大きな値となっている。電食試験と解析結果を比較すると，電食試験供試体のひび割れ発生腐食量がやや大きな値となっている。これらの値の大小は，コンクリートの空隙構造が関与していると言える。腐食生成物は時間の経過とともに徐々にコンクリートの空隙部に溶出することが知られているが³⁾，解析過程では腐食生成物の空隙への溶出は考慮しておらず，電食試験では腐食を促進させているため実条件よりも腐食生成物の生成速度が速く，腐食生成物の空隙への溶出の影響が小さくなると考えられる。腐食促進試験供試体は腐食生成物の空隙への溶出の影響を最も受けると考えられ，腐食量も最も大きな値になったと考えられる。

7. まとめ

本研究では，中性化と塩化物の複合作用を受ける鉄筋の腐食性状について調査するとともに，電食試験，FEM 解析を用いて，かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点での鉄筋の腐食量評価を行った。本研究の範囲で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 塩化物量が増加するほど腐食初期において腐食速度が大きくなった。
- (2) 腐食面積率，重量減少率に関して複合劣化，塩害単独劣化，中性化単独劣化の順で大きくなった。
- (3) 鉄筋径 9mm を使用した電食試験におけるひび割れ発生腐食量は重量減少率でかぶりの厚さ 5mm 供試体で 1.29%，かぶりの厚さ 10mm 供試体で 1.33%であった。

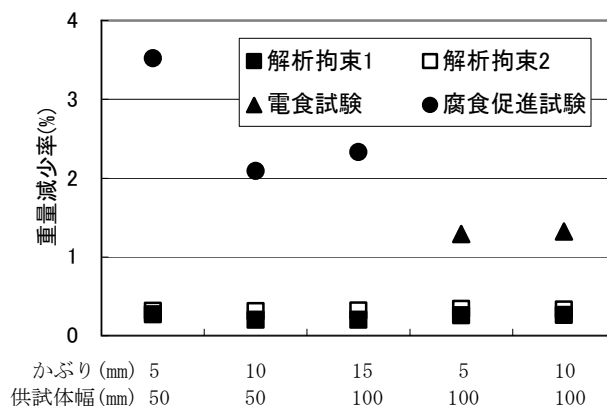


図-11 腐食促進試験，電食試験，解析によるひび割れ発生腐食量

- (4) FEM 解析による，ひび割れ発生腐食量は重量減少率 0.20～0.34%であった。

謝辞：本研究の実施にあたり，桑原 大亮氏，薄井 康士君，渋谷 泰君の諸氏に多大なご助力を頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。なお，本研究は科学研究費補助金(基盤研究 A-1，研究代表者，埼玉大，町田篤彦教授)により実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書，pp104，2001. 5
- 2) Qi Lukuan, 関 博, 高木 言芳：中性化したコンクリートにおける乾湿繰返し作用による鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文集，No. 697, V-54, pp1-11, 2002. 2
- 3) 堤 知明, 松島 学, 村上 祐治, 関 博：腐食ひび割れの発生機構に関する研究，土木学会論文集，No. 532, V-30, pp159-171, 1996. 2
- 4) 梶田 佳寛, 安田 正雪, 花榮 浩, 松林 祐二：塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 12, No. 1, pp441-446, 1990