

論文 鉄筋腐食での腐食形態がモルタル表面のひずみ挙動に及ぼす影響

前原 聡*1・伊代田 岳史*2

要旨: 鉄筋の腐食形態は、表面が均一に腐食するものと、局所的に著しく腐食深さが大きく腐食するものに大別できる。この腐食形態の違いが腐食膨張によるコンクリートのひび割れ発生に及ぼす影響を把握するため、塩水を用いた乾湿繰返しによる腐食促進試験を実施した。局所的に著しく腐食している範囲割合の大きさを示す指標として、腐食面積に対する腐食減量（腐食減量/腐食面積）を用い、表面のひずみの変化量およびその増加割合の関係性について整理した。その結果、著しく腐食している範囲割合が大きいと、表面のひずみの増加割合が大きくなることが示された。

キーワード: 鉄筋腐食, 乾湿繰返し, 塩害, 腐食減量, 腐食面積率

1. はじめに

RC 構造物の鉄筋腐食に起因する劣化として、塩害および中性化が挙げられる。塩害ではコンクリート中に塩化物イオンが浸透すること、中性化ではコンクリート中のアルカリ性が低下することで、鉄筋の不動態皮膜を破壊、鉄筋腐食を引き起こす。これらの鉄筋腐食が進行すると腐食生成物の膨張圧により、かぶりコンクリートにひび割れや剥離・剥落を発生させる。鉄道や交通量の大きい幹線道路を跨ぐ橋梁などの構造物では、かぶりコンクリートの剥落は、直接的かつ甚大な第三者災害につながる可能性が大きいことから、RC 構造物を維持管理していくうえで適切な対策を施す必要がある。更に、笹子トンネル天井板落下事故以降、改めてインフラの老朽化が深刻な問題であることが認識されており、構造物の維持管理、長寿命化技術を確立することが急務となっている。このように構造物の維持管理の重要性が改めて認識されている中、RC 構造物の代表的な劣化である塩害および中性化に対して、適切な劣化過程の把握とその後の正確な劣化予測をすることは構造物を長期間供用するためにも重要である。

コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁾では、塩害および中性化による劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類している。ここで、加速期は鉄筋腐食によるひび割れが発生する時期以降とされており、その後はひび割れの影響により鉄筋腐食の速度が著しく増大する。ひび割れの有無により鉄筋腐食の速度は大きく異なることから、鉄筋の腐食程度とひび割れ発生時の関係を定量的に把握することは適切な劣化予測をするためにも極めて重要である。

これまで、ひび割れ発生時における鉄筋の腐食程度に

着目した研究は、電食実験や塩害を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験などにより研究が進められている^{2)~6)}。ただし、電食実験ではひび割れが発生したかぶり側の鉄筋側面に腐食が集中し、局所的に著しく腐食する腐食形態に大きく偏ること²⁾や電食実験と実環境下では腐食生成物が異なること⁶⁾が言われており、腐食形態および腐食生成物の種類や割合により、ひび割れ発生に与える影響が異なるものと考えられている。一方で、中性化に着目した場合、中性化による鉄筋腐食は、塩害によるものと比較して著しく遅くなることが実務的に認識されている。そのため、中性化による鉄筋腐食がひび割れ発生に及ぼす影響を言及した実験的検討はなされていないのが現状である。しかしながら、中性化により劣化した実構造物の調査に基づく検討結果^{7),8)}では、水分供給の有無により、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響に違いがあることが示されており、中性化の場合でも腐食形態によりひび割れ発生に与える影響が異なることが推測される。以上のことから、塩害および中性化のどちらにおいても鉄筋の腐食形態がひび割れ発生に与える影響を整理する必要があると考える。

JCI-SC1 コンクリート中の鋼材腐食評価方法⁹⁾によると鉄筋の腐食形態は、表面が均一に腐食しているものと局所的に著しく腐食深さが大きく腐食しているものに大別される。この腐食形態の違いによりひび割れに至るまでの過程が異なると想定し、本研究では基本的な知見を得るため、塩水を用いた乾湿繰返しによる腐食促進試験を実施した。腐食促進試験では、モルタル供試体表面のひずみの経時変化と任意の時点での鉄筋の腐食減量、腐食面積率を求め、腐食形態の違いがモルタルの表面のひずみ挙動に与える影響を整理した。

*1 東急建設(株) 技術研究所 土木研究グループ 工修 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 モルタルの配合表

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
65.0	3.0	309	475	1427

モルタル供試体60×60×80mm

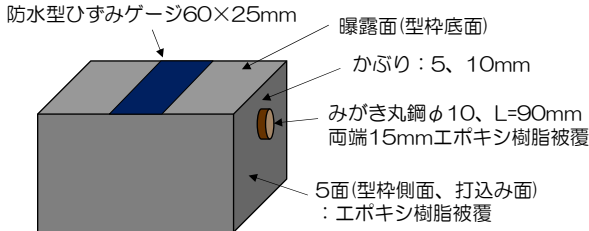


図-1 モルタル供試体の概要

2. 実験概要

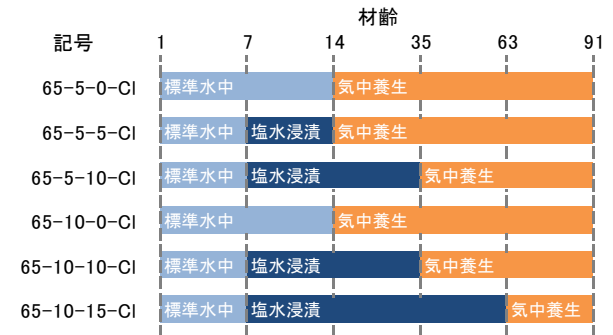
2.1 使用材料, 配合および供試体

表-1 にモルタルの配合を示す。モルタルの配合は、水セメント比が 65%、砂セメント比が 3.0 とした。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を、細骨材は君津産山砂（表乾密度 2.64 g/cm³）を用いた。

図-1 にモルタル供試体の概要を示す。モルタル供試体の形状は、60×60×80mm となる角柱供試体として、ブリーディングの影響を極力少なくするため、型枠底面からかぶり 5、10mm となるように鉄筋を配置した。鉄筋は、径 10mm、長さ 90mm のみがき丸鋼で、型枠設置前に粒度 80 番の研磨紙を用いて粗研磨し、アセトンにて表面の油分を除去した。なお、鉄筋の両端部から 15mm ずつの範囲はエポキシ樹脂にて被覆し、鉄筋の長さ方向で 60mm の範囲が腐食するようにした。

2.2 養生条件

モルタル供試体は、打込みから材齢 24 時間までは封緘養生とし、その後に脱型して材齢 7 日まで標準水中養生とした。図-2 にモルタル供試体の水準と養生条件を示す。腐食促進試験の開始時点で鉄筋位置の塩化物イオン濃度の違いにより、腐食形態が異なると考え、モルタル供試体は、以下の 3 水準とした。1 つは、塩化物イオンが浸透していないものとして標準水中養生を材齢 14 日まで継続した。他 2 つは、鉄筋表面までと芯かぶりまで塩化物イオンが浸透している状態を模擬するため、それぞれの期間、モルタル供試体の曝露面が上面となるようにし、供試体全体が 10%NaCl 水溶液中に浸るよう静置した。塩化物イオンの浸透深さは、腐食促進試験用のモルタル供試体とは、別途、鉄筋を配置していない供試体を準備し、任意の浸漬期間にて割裂し、0.1mol/L 硝酸銀水溶液の噴霧にて塩化物イオンの浸透深さを確認した。図-3 に塩化物イオンの浸透深さの結果を示す。塩化物



※記号: 65-(かぶり)-(初期塩化物イオン浸透深さ)-CI

図-2 モルタル供試体の水準と養生条件

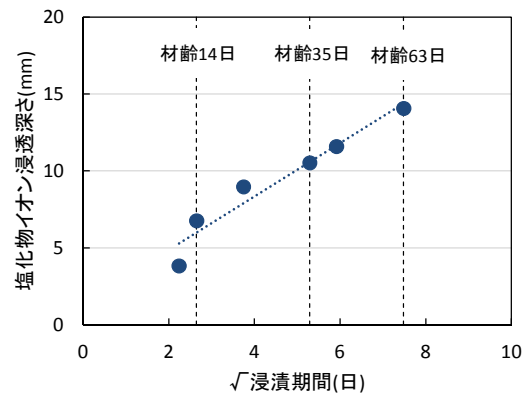


図-3 塩化物イオン浸透深さの経時変化

イオン浸透深さが概ね 5mm、10mm および 15mm となるまで浸漬させた後、モルタル供試体は、材齢 91 日まで恒温恒湿度室内（20℃、60%RH）に静置し、その後に腐食促進試験に用いた。

2.3 腐食促進試験

(1) 試験概要

腐食促進試験では、40℃、10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬させ、その後 20℃、60%RH の環境下で 4 日間乾燥させる乾湿繰返しを 1 サイクルとした。腐食促進試験では、腐食減量・腐食面積率の経時変化を求めるモルタル供試体 (n=2) をそれぞれのかぶり、養生条件ごとに準備した。また、モルタル供試体の表面のひずみを連続的に測定するものとして、かぶり 5mm でそれぞれの養生条件ごとのモルタル供試体 (n=2) を試験に供した。

(2) 腐食減量・腐食面積率

腐食減量・腐食面積率用のモルタル供試体では、腐食促進期間 65 日および 157 日（9 サイクル後、22 サイクル後）において割裂し、鉄筋を採取して腐食減量・腐食面積率を求めた。腐食面積率は、採取した鉄筋に透明シートを巻きつけ、鉄筋表面上の明らかに腐食している部分を写し取り、二値化画像処理にて腐食している面積を求めた。その面積と鉄筋表面積（鉄筋円周×60mm の範囲）に対する比率を腐食面積率として算出した。腐食減量は、腐食面積率を測定した後、60℃、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に 12 時間程度浸漬させ、腐食生成物を除

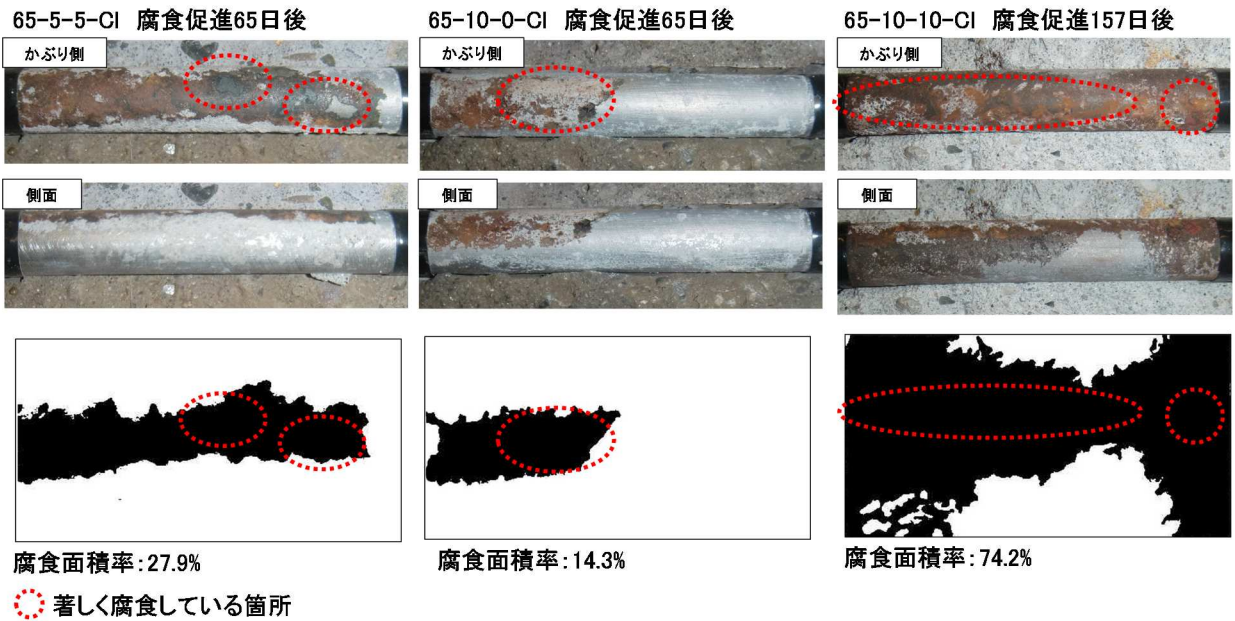


図-4 鉄筋の腐食状況と腐食面積率

去した後に鉄筋重量を測定して元の鉄筋重量に対する質量減少率を算出した。なお、それぞれの腐食促進期間におけるモルタル供試体中の全塩化物イオン濃度分布を把握するため、割裂したモルタル供試体を表層から7~10mm程度ごとの層に切断して、JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法に準拠して、各層の全塩化物イオン量を求めた。

また、鉄筋腐食は酸素および水分の供給量にも影響を受けるものと考え、腐食促進試験を開始する前のモルタル供試体の表層を対象に、酸素および水分の透過性を間接的に評価するため、それぞれのモルタル供試体の細孔径分布を求めた。細孔径分布の分析用試料は、モルタル供試体の表層から7~10mm程度に切断した後、数mm角に粉碎した。試料をアセトンに浸漬して水分を除去、真空乾燥器中での脱気・乾燥により、試料を作製した。その分析用試料を水銀圧入法により0.006~6μmの範囲における細孔径の容積を測定した。

(3) モルタル表面のひずみ

表面のひずみを求めるモルタル供試体では、防水型のひずみゲージを供試体の曝露面中央部で鉄筋直角方向に配置し、モルタル表面のひずみ変化を連続的に計測した。ここで、鈴木ら⁴⁾は、電食実験において腐食ひび割れ発生時の表面のひずみを求めている。それによれば、腐食ひび割れ発生時の電食によるひずみは、内在塩分の有無、かぶり、電流密度および初期ひび割れの有無の影響は受けず50~200×10⁻⁶程度の範囲にあるとしているように、ひび割れ発生時のひずみを一義的な値として定めることは困難である。そこで、本研究では鉄筋腐食による膨張に起因する表面のひずみの変化量が100×10⁻⁶をひび割れ発生付近、300×10⁻⁶をひび割れ発生後と想定し、

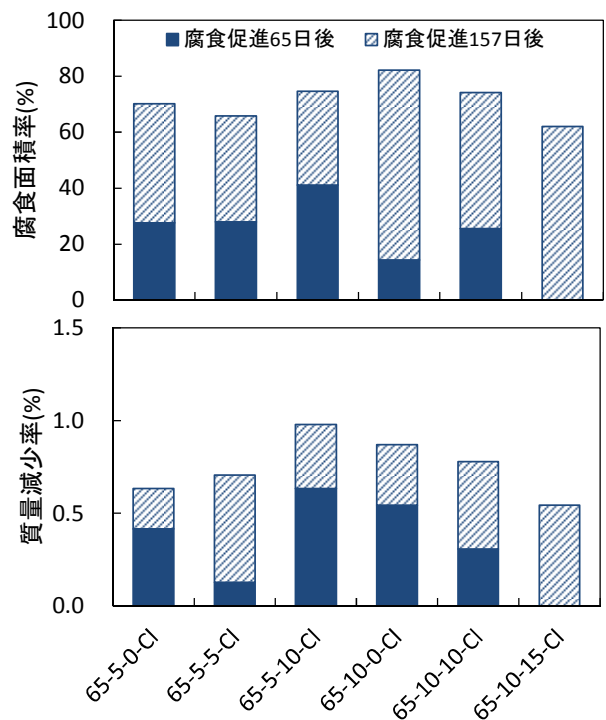


図-5 腐食面積率と質量減少率

表面のひずみとその時点に至るまで腐食促進試験を実施した。その後、鉄筋を採取してその時点での腐食減量・腐食面積率を求めた。

3. 実験結果

3.1 腐食減量・腐食面積率

図-4に腐食促進試験後に採取した鉄筋の腐食状況を図-5に腐食面積率と質量減少率の経時変化を示す。採取した鉄筋は、かぶり側が腐食しており、その中でも表面が均一的に腐食している範囲と、腐食深さが深く、著しく腐食している範囲が確認された。図-4に著しく腐

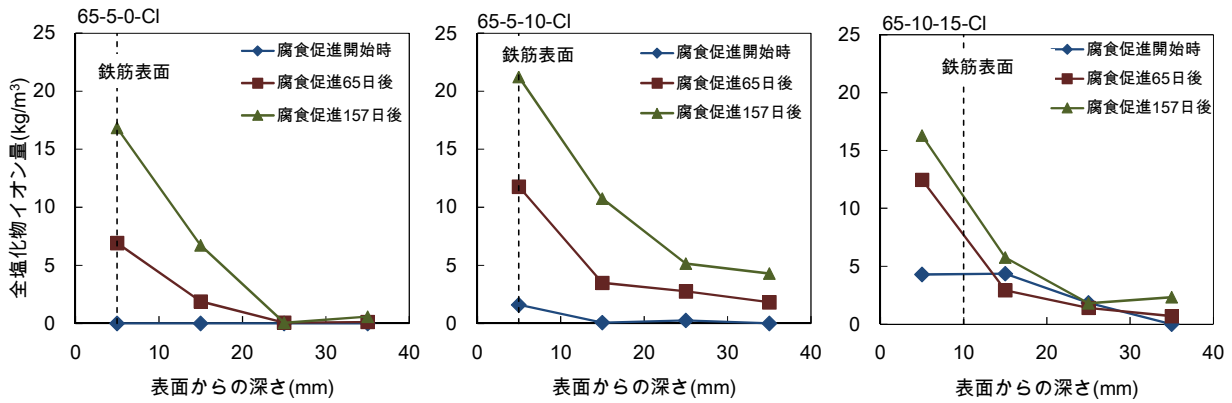


図-6 全塩化物イオン濃度分布の経時変化

食している概ねの範囲を示す。図-5より、腐食促進期間が65日の場合、かぶり5mm、初期塩化物イオン浸透深さ10mmの供試体(65-5-10-Cl)において、腐食面積率が最も大きくなり41.1%であり、鉄筋のかぶり側のみに腐食が確認された。また、かぶり10mm、初期塩化物イオン浸透深さ15mm(65-10-15-Cl)では、腐食促進期間65日では腐食が確認されなかった。腐食促進期間157日では、全ての供試体において腐食面積率が50%以上となり、供試体内部側の面まで鉄筋腐食が進行していることが確認された。腐食面積率と質量減少率の経時変化から、かぶり5mmのものでは、初期塩化物イオン浸透深さが大きいものほど、腐食の程度が大きくなる傾向を示した。しかし、かぶり10mmのものに着目すると、65-10-15-Clは、他条件の供試体と比較して、腐食面積率および質量減少率が小さくなる傾向となった。

ここで、図-6に全塩化物イオン濃度分布の経時変化を示す。65-5-0-Cl, 65-5-10-Clでは、腐食促進開始後に1, 2層目(表面からの深さ0~10mm, 10~20mm)の全塩化物イオン量が経時的に大きく増加しているのに対して、65-10-15-Clでは、2層目の全塩化物イオン量の増加量が小さかった。また、図-7の細孔径分布の結果より、65-10-15-Clでは、0.1 μ m付近の細孔量が他条件のモルタル供試体よりも若干ではあるが小さくなった。以上のことから、65-10-15-Clでは、塩水浸漬期間中もセメントの水和が進行することや塩化物イオンが固定化されることで、モルタルの細孔構造が変化し、緻密化したものと推測する。そして、腐食促進開始後においては、鉄筋位置での酸素と水分の供給量が他条件よりも少なくなることで鉄筋の腐食面積率および質量減少率が小さくなったものと考えられる。つまり、腐食の進展においては、かぶりコンクリートの緻密性やかぶりの大きさなどによる酸素および水分の供給程度に大きく影響を受けると言える。

次に、図-8に腐食面積率と質量減少率の関係を示す。なお、図中には表面のひずみを求めた試験での結果も含

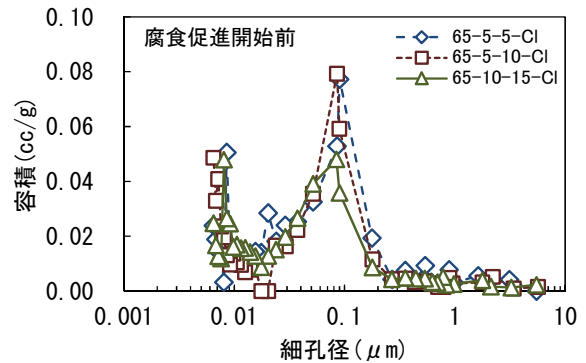


図-7 表層の細孔径分布

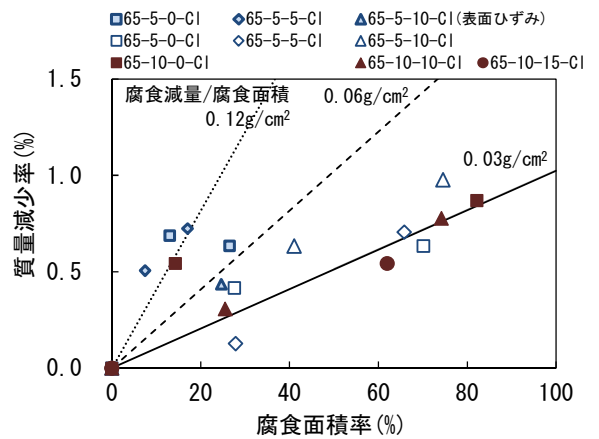


図-8 腐食面積率と質量減少率の関係

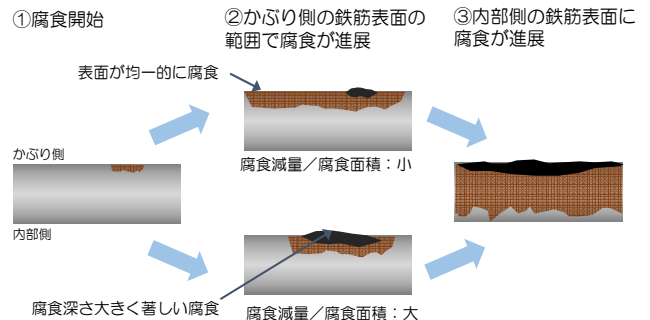


図-9 腐食進展過程の概念図

めて示す。更に、局所的に著しく腐食している範囲を定量的に判別することが困難であるため、著しく腐食して

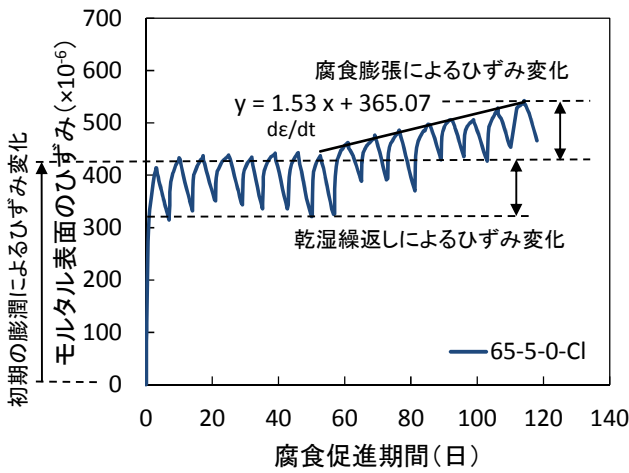


図-10 腐食膨張による表面のひずみ変化

いる範囲割合の大小を現し、腐食形態の違いを示す指標として、腐食面積に対する腐食減量を算出する。局所的に著しく腐食している範囲が大きい場合、腐食面積が同程度であっても腐食減量が大きくなり、腐食減量/腐食面積が大きくなる。図中には腐食面積率と質量減少率の関係における腐食減量/腐食面積をあわせて示す。腐食面積率が50%以上となると、かぶりおよび初期塩化物イオン量にかかわらず、腐食減量/腐食面積が $0.03\text{g}/\text{cm}^2$ 程度となった。腐食促進期間 65 日のものと表面のひずみを求めた試験では、腐食面積率が50%以下で、腐食減量/腐食面積は $0.05\sim 0.2\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲となり、バラつきが大きくなった。ここで、図-9 に腐食の進展過程の概念図を示す。65-10-0-Cl に着目すると、腐食促進期間が65日では、かぶり側の表面において、腐食している箇所と腐食していない箇所が確認される。つまり、腐食面積率が50%以下の場合では、かぶり側の鉄筋表面の範囲において腐食が平面的に進展しているのに対して、腐食面積率が50%以上となると、かぶり側の鉄筋表面がある程度腐食し、供試体内部側の表面に向かい腐食が進展していく段階であると考えられる。腐食がかぶり側の鉄筋表面の範囲において平面的に進行している段階では、腐食減量と腐食面積の関係にバラつきが大きくなり、局所的に著しく腐食する範囲の割合が変化し、腐食形態が異なり易い状態であると考えられる。そして、供試体内部側の面に向かい腐食が進展している段階では、かぶり側の鉄筋表面が全体的に著しく腐食し、腐食減量が大きくなり、腐食減量と腐食面積との関係においてバラつきが小さくなるものと推測する。

3.2 モルタル表面のひずみ

図-10 にモルタル表面のひずみを連続的に計測した結果を、図-11 に表面のひずみの経時変化を示す。全ての条件において、表面のひずみは、腐食促進開始直後に $300\sim 400\times 10^{-6}$ 程度の膨張挙動を示した。これは、腐食

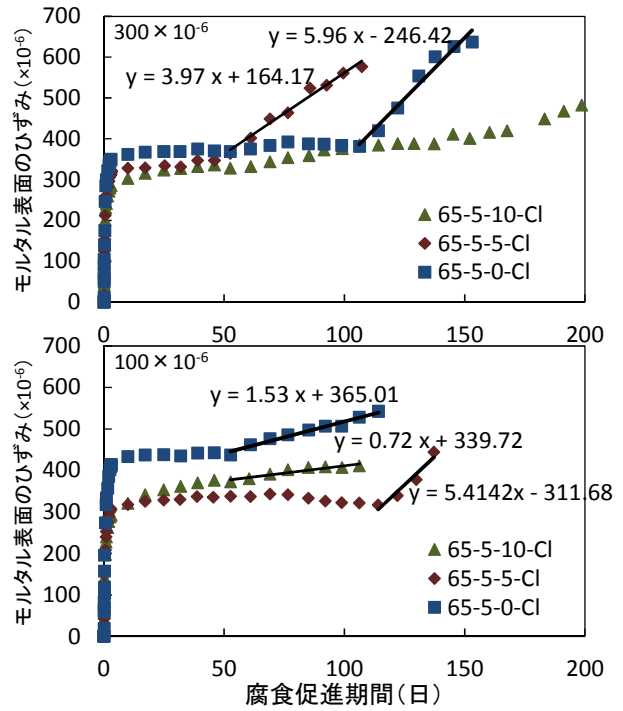


図-11 表面のひずみの経時変化

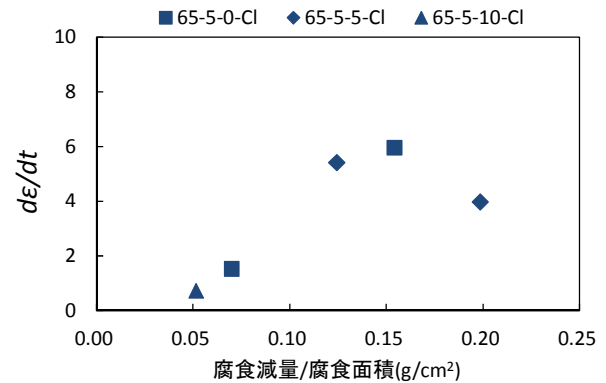


図-12 腐食減量/腐食面積とひずみ挙動の関係

促進試験を開始する以前のモルタル供試体は、それぞれの条件で 28 日～77 日間の乾燥期間を設けていることから、水分の浸透および 20°C から 40°C への温度変化によるひずみ変化であると考えられる。その後、乾湿繰返しの影響により、表面のひずみは、 $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の収縮と膨張挙動を示した。腐食促進初期のサイクルでは、 40°C 、 $10\%\text{NaCl}$ 水溶液に 3 日間浸漬させ、乾燥に移行する時点での表面のひずみは、一定の値を示した。図-11 では、乾燥に移行する時点のひずみを図示する。そして、65-5-0-Cl では腐食促進期間 50 日程度以降から徐々に膨張傾向を示した。ここでの初期の膨潤によるひずみからの変化量を腐食膨張によるひずみと考え、その変化量が約 100×10^{-6} もしくは 300×10^{-6} 程度となる時点まで乾湿繰返しを継続した。ここで、腐食膨張によるひずみ変化の増加割合は、供試体によって異なる傾向を示した。そこで、腐食膨張によるひずみ変化が発生した後の 40°C 、

10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬させ、乾燥に移行する時点での表面のひずみ ε を線形近似し、 de/dt を算出した。なお、腐食促進試験終了時点において、モルタル供試体の表面を目視とクラックスケールにて確認した。腐食膨張によるひずみ変化量が 300×10^{-6} 程度となるまで試験した供試体には、モルタル表面の鉄筋直上に鉄筋と沿うようにひび割れ幅 0.1mm 以下のひび割れが確認された。また、65-5-10-Cl では、所要の腐食促進期間において、腐食膨張によるひずみ変化が 300×10^{-6} 程度まで至らなかったため、その後の腐食減量と腐食面積率の測定を省略している。それ以外の供試体において腐食促進試験終了後に腐食面積率を求めたところ、どの条件においても腐食面積率は 30%以下であり、かぶり側の鉄筋表面の範囲において腐食が平面的に進行している段階であった。

図-12 に腐食減量/腐食面積と de/dt の関係を示す。腐食減量/腐食面積が大きくなると de/dt は大きくなる傾向を示した。モルタル表面のひずみは、65-5-10-Cl のように比較的緩やかに増加するもの (de/dt が 0.7 および 1.5) と、65-5-5-Cl のように急な変化となるもの (de/dt が 4.5 ~ 6.0 程度) に分けられる傾向を示した。そして、腐食減量/腐食面積が $0.1\text{g}/\text{cm}^2$ 以上となる著しく腐食している範囲割合が多い腐食形態では、モルタル表面のひずみが腐食膨張により急な変化を示す傾向となった。つまり、局所的に著しく腐食している範囲が多い場合と均一的な腐食形態とでは、表面のひずみとその増加割合の結果より、異なる挙動を示すと考えられる。よって、腐食形態ごとにひび割れに至るまでの表面のひずみの挙動に違いが現れ、ひび割れに至る時期が異なってくるものと推測する。

また、表面のひずみを求めた試験では、腐食減量/腐食面積が $0.05 \sim 0.2\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲となり、腐食減量と腐食面積率を求めた試験よりも大きくなった。表面のひずみを求める供試体では、モルタル表面の中央部にひずみゲージを貼付し被覆することから、実質の曝露面が腐食減量と腐食面積率を把握した供試体よりも少ない。曝露面が少なくなることで、酸素および水分の供給程度が異なり、腐食の進展状況の違いに影響を及ぼしたと考える。なお、本研究の範囲内では、モルタル表面にひび割れ幅 0.1mm 以下のひび割れが目視にて確認できる段階までを対象とした。この後、ひび割れ幅が増大し、ひび割れを介して酸素および水分の供給が多くなる段階では、この腐食形態の関係性は異なる挙動を示すものと考えられる。

また、腐食促進試験の開始時点における鉄筋位置での初期塩化物イオン濃度の違いによって、異なる腐食形態を示すものと考えたが、65-5-0-Cl では、同条件にも関わらず、供試体によって腐食減量/腐食面積が $0.07\text{g}/\text{cm}^2$ と $0.15\text{g}/\text{cm}^2$ で異なる腐食形態を示した。かぶり側の鉄筋表

面の範囲で腐食が平面的に進行している段階において、腐食形態に及ぼす要因は、鉄筋位置での酸素および水分の供給程度のバラつきなどが考えられるが、これに関しては、今後、より詳細な検討が必要であると考える。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 塩害を模擬した乾湿繰返しによる腐食促進試験において、モルタル供試体中の鉄筋は、比較的、表面が均一に腐食するものと局所的に著しく腐食深さが大きく腐食する異なる腐食形態が確認された。
- (2) 腐食形態が局所的に著しく腐食している範囲割合が大きい場合では、腐食膨張による表面のひずみの増加割合が大きくなるものと考えられ、ひび割れに至るまでの挙動に違いが現れるものと考えられる。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2013
- 2) 松島学，横田優，関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004.7
- 3) 中川裕之，田中大博，横田優，松島学：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.110-121，2008.2
- 4) 鈴木三馨，堀口賢一，福浦尚之，丸屋剛：鉄筋腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1081-1086，2009.7
- 5) 鈴木三馨，福浦尚之，丸屋剛：ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく耐久・構造連成解析システムの高精度化，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.773-778，2010.7
- 6) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.
- 7) 前原聡，鈴木将充，早川健司，伊藤正憲，伊代田岳史：水分供給がかぶりコンクリートのはく離・はく落に与える影響に関する調査報告，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-041，pp.81-82，2015.9
- 8) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集 No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 9) 社団法人日本コンクリート工学協会：JCI 規準集 (1977~2002 年度)，pp.91-94，2004.4