

論文

塩害と中性化における劣化機構の違いが鉄筋の腐食形態に及ぼす影響

前原 聡*1, 伊代田 岳史*2

Effect of Different Corrosion Mechanism of Rebar Depends on Salt Damage and Carbonation

Satoshi MAEHARA*1, Takeshi IYODA*2

要旨: 塩害や中性化による劣化において、鉄筋の腐食程度からかぶりにひび割れが発生する時期を予測する研究がなされている。鉄筋腐食は、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なる2種類の腐食形態に大別されているが、これらの腐食形態の違いを考慮して検討した研究は極めて少ない。そこで、本研究では、腐食形態によってひび割れ発生に至るまでの過程が異なるものと考え、それらの影響を整理することを目的とし、塩害と中性化を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験を実施した。その結果、塩害と中性化では異なる腐食形態を示し、鉄筋の腐食膨張がモルタル表面のひずみに与える影響も異なることが確認できた。

キーワード: 塩害, 中性化, 鉄筋腐食, 乾湿繰返し, 腐食形態

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。塩害におけるかぶりコンクリートの剥離・剥落は、中性化によるものよりも早期に顕著化し、劣化が甚大になることが認識されている。一方、中性化による劣化の進行は塩害と比較すると緩慢であることから、高架橋の高欄などのかぶりが小さい箇所において発生すること¹⁾²⁾が多く報告されており、かぶりの厚さがある程度確保されている場合での劣化事例は、極めて少ないのが現状である。

ここで、JCI-SC1 コンクリート中の鋼材腐食評価方法³⁾によると鉄筋の腐食形態は、表面が均一に腐食するものと局所的に著しく腐食するものに大別される。表面が均一に腐食する形態は、微視的なアノードとカソードからなるマイクロセルを多数形成し、鋼材表面から全面的に腐食するものと考えられている。また、局所的に著しく腐食する腐食形態は、微小面積のアノードと広い面積のカソードが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きく

なり、塩害では孔食のように局所的に著しく腐食する形態になり易いと考えられている。塩害による劣化進行が中性化によるものよりも早期になることは、腐食の進展速度が塩害のほうが速いのみならず、腐食形態の違いも影響するものと想定し、かぶりコンクリートのひび割れ発生に及ぼす腐食形態の影響を整理することを本研究の目的とした。

そこで、本研究では、はじめに塩害と中性化における劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響を、腐食減量、腐食面積率および3次元の形状測定による腐食深さを求めることで把握した。そして、次に腐食形態の違いによって鉄筋の腐食膨張がモルタル表面のひずみ挙動に与える影響を実験的に検討し、考察した。

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を基本とした。また、腐食を著しく促進させるために、比較として水セメント比が150%、砂セメント比が5.0の配合も用いた。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2.64g/cm³)を用いた。水セメント比が150%の配合では、材料分離を抑制するために、アルキルア

*1 東急建設株式会社 技術研究所 土木研究グループ 主任研究員

*2 芝浦工業大学 工学部 土木工学科 教授 博士(工学)

表-1 モルタルの配合表

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	Vis
65	3.0	309	475	1427	—
150	5.0	404	270	1348	W*3.0%

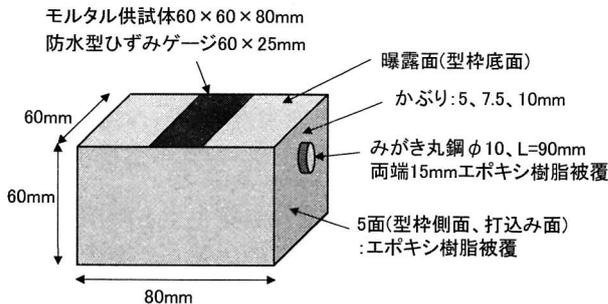


図-1 モルタル供試体の概要

リルスルホン酸塩およびアルキルアンモニウム塩系の高機能特殊増粘剤を単位水量の 3.0wt%を内割り添加した。モルタル供試体の形状は、60×60×80mmの角柱供試体として、かぶり 5, 7.5, 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 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、鉄筋の長手方向で 60mm の範囲が腐食するようにした。また、モルタル供試体は暴露面一面以外をエポキシ樹脂にて被覆した。

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、その後脱型して材齢 7 日まで標準水中養生もしくは封緘養生とした。ここで、腐食形態は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度および中性化深さによって異なるものと考え、供試体水準として初期の劣化深さを変化させた。まず、初期の劣化深さを把握するため、腐食促進試験用のモルタル供試体とは、別に、鉄筋を配置していないモルタル供試体を作製した。塩害を想定する条件では、モルタル供試体の暴露面を上面とし、供試体全体が 10%NaCl 水溶液中に浸るように静置した。中性化を想定した条件では、封緘養生後に材齢 14 日まで恒温恒湿度室内 (20℃, 60%RH) での気中養生とし、その後、二酸化炭素濃度 5%の促進中性化環境下 (20℃, 60%RH) に暴露した。任意の塩水浸漬および促進中性化期間にて割裂して、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、フェノールフタレイン溶液の噴霧にて中性化深さを確認した。図-2 に塩化物イオンの浸透深さと中性化深さの結果を示す。次に、図-3 にモルタル供試体の水準と養生条件を示す。塩害を想定した条件のモルタル供試体は、

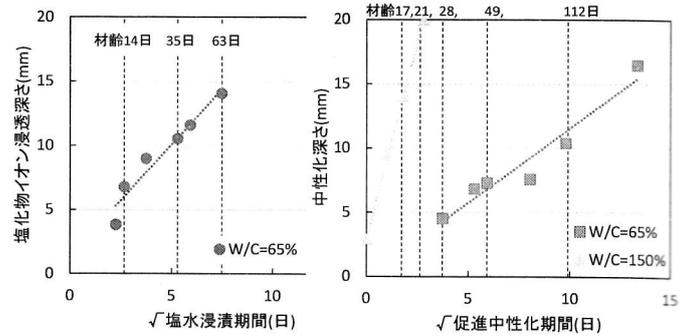
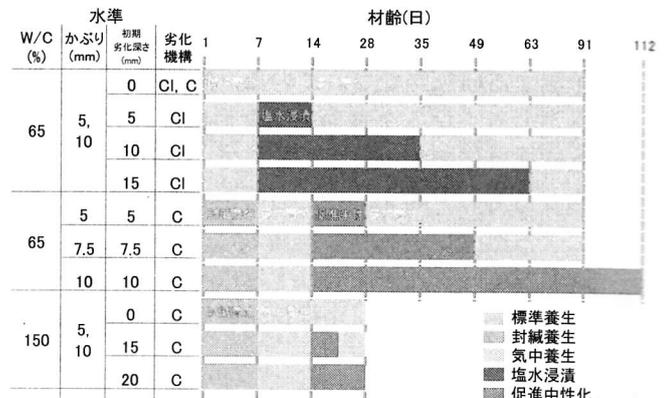


図-2 塩化物イオン浸透深さ、中性化深さの経時変化



供試体記号: (W/C)-(かぶり)-(初期劣化深さ)-(劣化機構 Cl 塩害, C 中性化)

図-3 モルタル供試体の水準と養生条件

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、鉄筋表面と鉄筋中心の深さ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、10%NaCl 水溶液に浸漬させた。

中性化を想定した条件では、促進中性化環境下に暴露し、中性化深さが所定の深さとなるまで初期に劣化させた。その後、供試体は恒温恒湿度室内での気中養生とした後に腐食促進試験に供した。

2.3 腐食促進試験

(1) 試験概要

腐食促進試験は、塩害では 40℃, 10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬、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。中性化では、40℃の水道水に 3 日間浸漬、4 日間の乾燥とした。腐食促進試験では、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体 (n=2) と、モルタル表面のひずみ測定用のモルタル供試体 (n=2) を試験に供した。

(2) 腐食減量・腐食面積率

腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体では、任意の腐食促進期間において割裂し、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、鉄筋表面上の腐食している部分を写し取り、二値化画像処

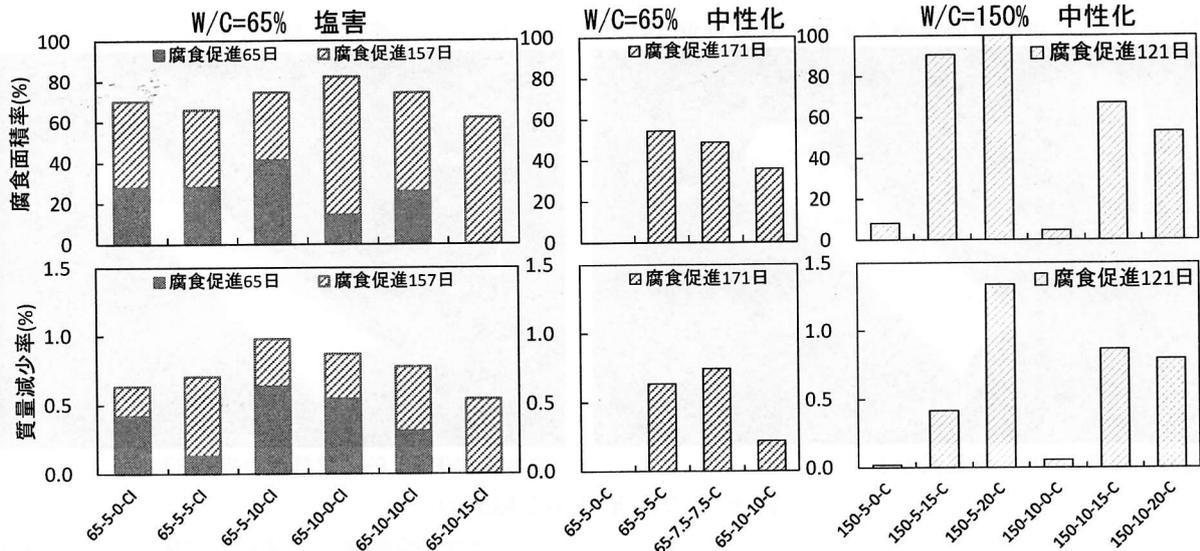


図-4 腐食面積率と質量減少率

理にて腐食面積を求めた。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時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に鉄筋質量を測定して元の鉄筋質量に対する質量減少率を算出した。

(3) 形状測定

腐食生成物を除去した鉄筋を対象に腐食深さを求めるため、3D測定マイクロスコープを用いて鉄筋の形状を測定した。形状測定では、3D画像の取得と線分析として鉄筋の長手方向の腐食深さを求めた。また、線分析における腐食深さの測点(24μm間隔、約2000点)を対象として変動係数を算出し、腐食深さのバラつきを求めた。

(4) モルタル表面のひずみ測定

表面のひずみ測定用の供試体は、防水型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、鉄筋直上のモルタル表面ひずみの変化を連続的に計測した。塩害を想定した条件では、所定の試験期間中にひび割れが発生したことから、ひび割れ発生後に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. 実験結果および考察

3.1 腐食減量・腐食面積率

図-4に腐食面積率と質量減少率を示す。塩害を想定した条件では、腐食期間65日において初期に塩化物イオンを15mmまで浸透させたもの(65-10-15-CI)以外において腐食が確認された。65-10-15-CIでは、塩水浸漬期間が他条件よりも長いことから、塩水浸漬期間中もセメントの水和が進行したことや塩化物

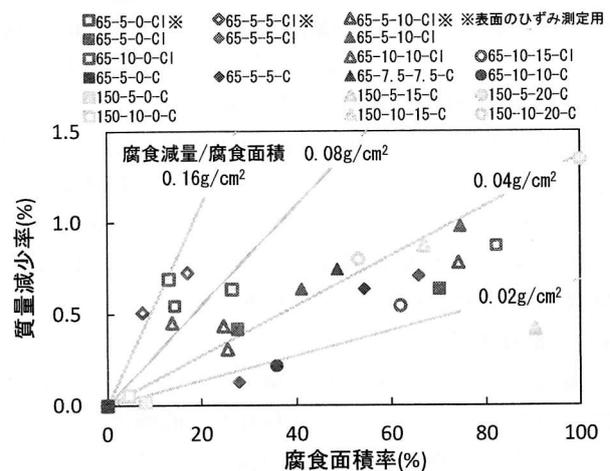


図-5 腐食面積率と質量減少率の関係

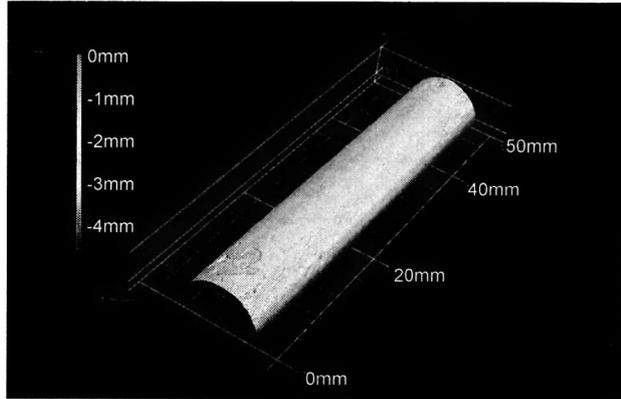
イオンが固定化したことで、モルタルの細孔構造が変化し、緻密化したことが影響したと考えられる。

中性化を想定した条件では、水セメント比65%において、かぶり10mm(65-10-10-C)で腐食面積率35.8%、質量減少率0.22%と、かぶり5mmと7.5mmよりも腐食程度が小さくなった。また、水セメント比150%のかぶり5mmでは、初期の中性化深さが20mm(150-5-20-C)で、腐食面積率100%、質量減少率1.34%と、初期の中性化深さが0mmと15mmのものよりも腐食程度が大きくなった。つまり、水セメント比65%と150%のそれぞれの条件において、かぶりが小さいほど、また初期の中性化深さが大きいほど腐食の程度は大きくなった。なお、初期に中性化が進行していない65-5-0-Cでは、腐食促進期間171日においても腐食が確認されなかった。

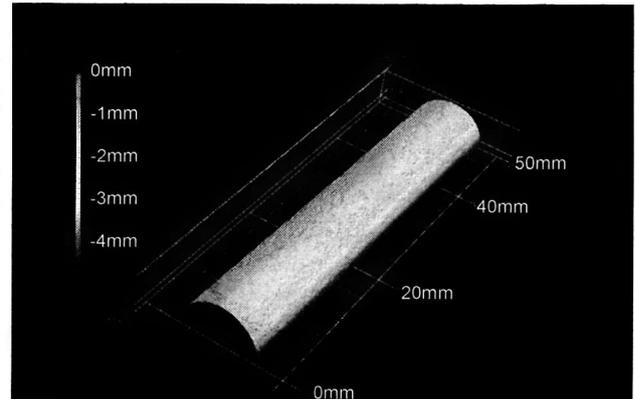
次に、図-5に腐食面積率と質量減少率の関係を示す。なお、図中には腐食面積に対する腐食減量の関係(腐食減量/腐食面積)を併せて示す。腐食面積率と質量減少率の関係は、塩害および中性化の劣化機

65-5-5-CI 表面のひずみ測定用 腐食促進141日

150-10-15-C 腐食促進121日



腐食面積率 17.1%, 質量減少率 0.72%,



腐食面積率 66.9%, 質量減少率 0.87%

図-6 3次元形状測定結果の一例

構ごとで異なる傾向を示した。中性化を想定した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.01 \sim 0.05 \text{g/cm}^2$ の範囲となるのに対して、塩害を想定した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.01 \sim 0.2 \text{g/cm}^2$ の範囲となり、バラつきが大きくなるとともに塩害のほうが、腐食減量/腐食面積は大きくなる傾向を示した。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ものとする。

3.2 形状測定

図-6、図-7に3次元形状測定の一例を示す。図中において、腐食していない箇所の鉄筋断面の頂点を0mmとして、鉄筋長手方向の腐食深さを求めた。図中の65-5-5-CIと150-10-15-Cの質量減少率は、0.72%と0.87%と同程度であるが、腐食減量/腐食面積は65-5-5-CIが 0.12g/cm^2 で、150-10-15-Cは 0.04g/cm^2 である。3D画像および線分析の結果から、塩害の65-5-5-CIでは、測定位置15~50mm程度の範囲ではほとんど腐食していないが、測定位置0~15mm程度の範囲において最大腐食深さが0.19mmとなり、局所的に著しく腐食していることが分かる。中性化を想定した条件である150-10-15-Cでは、測定対象範囲が全体的に腐食している傾向を示した。

図-8に腐食減量/腐食面積と形状測定により求めた腐食深さの変動係数の関係を示す。腐食減量/腐食面積が大きくなると腐食深さの変動係数は大きくなり、局所的に著しく腐食する形態になる傾向を示した。つまり、腐食面積に対する腐食減量の関係（腐食減量/腐食面積）は、腐食形態を示す指標として、局所的に著しく腐食する腐食形態もしくは表面が均一に腐食する腐食形態かを適切に表していると考えられる。なお、塩害においては、腐食減量/腐食面積と腐食深さの変動係数が大きくなり、局所的な腐食形態を示すものもあれば、中性化を想定とした条件と同

—65-5-5-CI 表面のひずみ測定用 腐食促進141日 変動係数:1.53
—150-10-15-C 腐食促進121日 変動係数:0.74

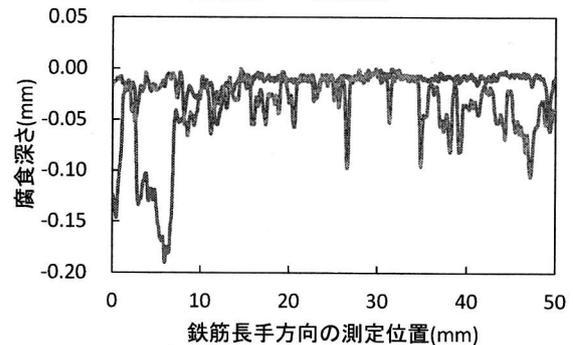


図-7 線分析腐食深さ測定結果の一例

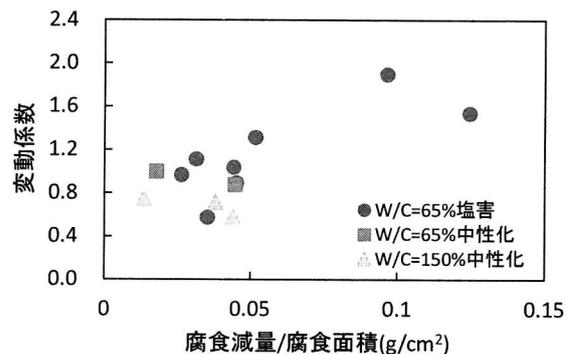


図-8 腐食減量/質量減少率と変動係数の関係

様な腐食形態を示すものもあった。図-5より、表面のひずみ測定用の供試体では、腐食減量/腐食面積が $0.05 \sim 0.2 \text{g/cm}^2$ 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。表面のひずみ測定用の供試体では、モルタル表面の中央部にひずみゲージを貼付し被覆したことから、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減少したことで、腐食形態に影響したものと考えられる。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-CIでは、同条件にも関わらず、供試体によっ

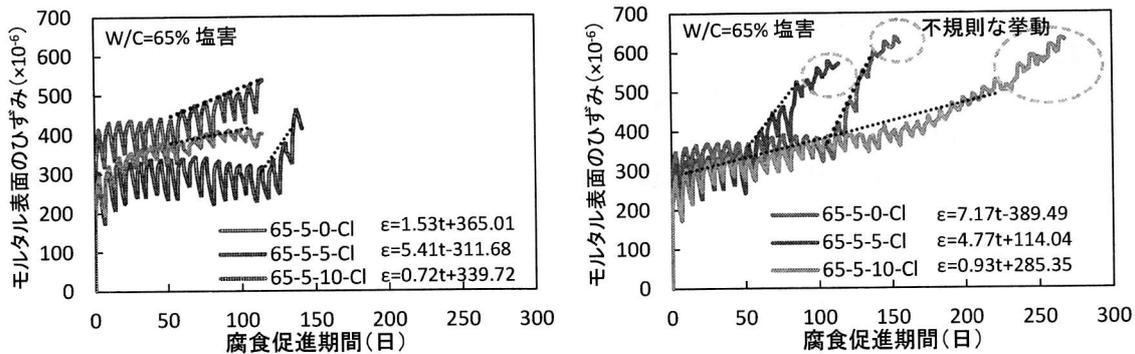


図-9 モルタル表面のひずみ変化 (塩害)

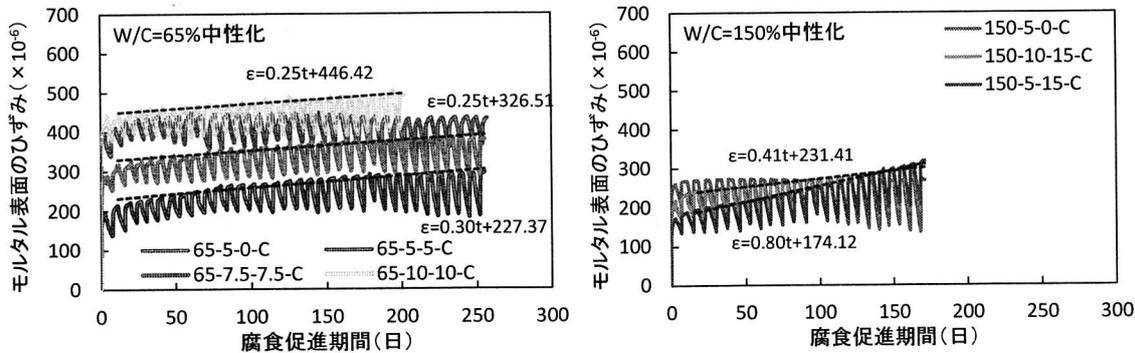


図-10 モルタル表面のひずみ変化 (中性化)

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。表面のひずみ測定用の供試体において、腐食減量/腐食面積が大きくなる傾向であったことを考慮すると腐食形態に及ぼす要因として、鉄筋位置での酸素および水分の供給程度の違いが影響したと考える。

3.3 モルタル表面のひずみ

図-9、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 $200\sim 400\times 10^{-6}$ 程度の膨張挙動を示した。これは、腐食促進試験を開始する以前のモルタル供試体は、それぞれの条件で一定期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、表面のひずみは乾湿繰返しの影響によって1サイクルの期間において $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の収縮と膨張挙動を示した。塩害を想定した条件である 65-5-0-Cl と 65-5-5-Cl では、腐食促進試験を開始して 50 日程度までは、1サイクルの期間中における表面のひずみの最大値は一定の値を示したが、腐食促進期間 50 日程度以降から膨張傾向を示した。この表面のひずみの変化量が鉄筋腐食に起因するものであると考えられる。塩害を想定した条件では、供試体数 2 体の内 1 体をこの鉄筋腐食に起因するひずみ変化であることを確認するため、 100×10^{-6} 程度増加したところで、鉄筋を採取して腐食していることを確認し、腐食減量と腐食面積率

を求めた。腐食促進試験を継続したものでは、鉄筋腐食に起因するひずみ変化が $150\sim 200\times 10^{-6}$ 程度増加した時点で、表面のひずみが不規則な挙動を示した。その後、乾湿繰返しを 2~4 サイクル継続し、 300×10^{-6} 程度に増加した際に腐食促進試験を終了した。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ところ、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。表面のひずみが不規則な挙動を示した時点においてひび割れが発生したものと考える。ここで、65-5-5-Cl では鉄筋腐食に起因する表面のひずみが急激に増加傾向を示したが、65-5-10-Cl では、明確な変曲点は確認されず、緩やかに表面のひずみが増加する挙動となり、塩害を想定した条件での腐食膨張によるひずみ変化は、条件および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以降の1サイクル内での表面のひずみの最大値を線形近似し、その傾きを表面のひずみの増加速度 de/dt として算出した。

次に、中性化を想定した条件では、初期に中性化させていない 65-5-0-C および 150-5-0-C は、促進腐食期間中において、表面のひずみの1サイクル内での最大値は一定の値を示した。それに対して、腐食促進試験前に中性化させたものは、水セメント比 65% および 150% とともに若干ではあるが腐食促進試験開始後、徐々に膨張傾向を示した。中性化を想定

した条件のものは、所要の腐食促進期間においてひび割れは確認されていないため、モルタル表面のひび割れ測定用の供試体においては、腐食状況を確認し、腐食減量および腐食面積率を求めていない。しかし、図-4の腐食減量と腐食面積率測定用の供試体では腐食の進行を確認できている。そのことから、初期に中性化させた条件では、腐食促進試験期間中において、表面のひび割れ測定用の供試体でも腐食が進行しているものと推定でき、腐食促進試験開始後の表面のひび割れの膨張挙動は、鉄筋腐食に起因するものであると考える。そこで、塩害と同様に表面のひび割れの増加速度 de/dt を算出した。中性化における de/dt は、水セメント比 65% と 150% のそれぞれにおいて、かぶり小さいほど de/dt が大きくなった。これは、図-4の腐食減量と腐食面積の結果と同様の傾向となり、かぶりが小さく腐食しやすい条件ほど de/dt が大きくなった。

次に、図-11に腐食減量/腐食面積と表面のひび割れの増加速度 de/dt の関係を示す。なお、塩害を想定した条件のものは、表面のひび割れ測定用の供試体における腐食減量/腐食面積を用いている。中性化においては、表面のひび割れ測定用の供試体において、腐食減量/腐食面積を求めていないため、腐食減量・腐食面積率用の供試体より把握した腐食減量/腐食面積を用いた。塩害を想定した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.05 \sim 0.2 \text{ g/cm}^2$ の範囲で、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。塩害を想定した条件では、65-5-10-CI のようにモルタル表面のひび割れが、中性化を想定した条件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 0.9)、と 65-5-5-CI のように急激な変化となるものに分かれる傾向を示した。腐食減量/腐食面積が 0.1 g/cm^2 以上で著しく腐食している範囲の割合が多い腐食形態では、モルタル表面のひび割れが腐食膨張により急激な変化を示す傾向となった。表面のひび割れとその増加速度の結果より、局所的に著しく腐食する形態と表面が均一に腐食する形態とでは、モルタル表面のひび割れ挙動に影響を及ぼし、局所的に著しく腐食する箇所の腐食速度が大きくなることの影響していると考えられる。つまり、中性化と塩害とでは、異なる腐食形態となり、それぞれの腐食形態によって、ひび割れに至るまでの表面のひび割れの挙動に違いが現れ、ひび割れに至る時期は塩害では早期に、中性化では遅くなるものと推測する。

なお、本研究の範囲内では、塩害を想定した条件では、モルタル表面にひび割れ幅 0.1 mm 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

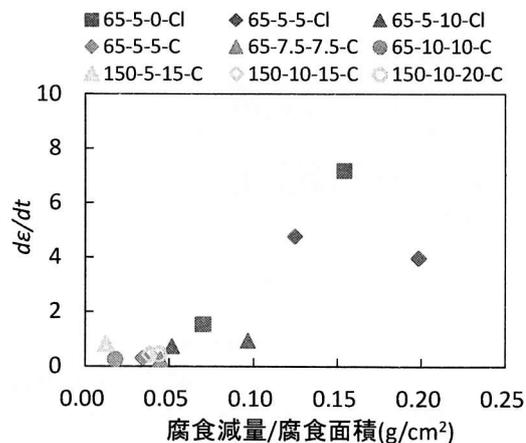


図-11 腐食減量/腐食面積と de/dt の関係

素および水分の供給が多くなる段階では、腐食減量/腐食面積と腐食形態の関係性は異なる傾向を示すものと考えられる。また、図-7のような腐食深さが著しく大きくなる範囲の位置によっても、表面のひび割れ挙動に影響を及ぼすものと考えられ、それらの要因を含め、今後も継続して検討する予定である。

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) 形状測定および腐食減量、腐食面積率の結果より、腐食減量/腐食面積を用いることで腐食形態の違いを表すことができると考える。
- (2) 塩害を想定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形態と局所的に著しく腐食する異なる腐食形態が確認された。
- (3) 局所的に著しく腐食する形態では、腐食膨張によるモルタル表面のひび割れの増加速度は、均一に腐食する形態よりも大きくなった。

謝辞

3次元形状測定に際して、株式会社キーエンスの各位に、多大なる助言とご協力を頂いた。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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