

論文 乾燥収縮の違いと内部ひび割れが鉄筋腐食に与える影響

高本 直樹^{*1}・森岡 卓也^{*2}・氏家 勲^{*3}・岡崎 慎一郎^{*4}

要旨: 本論文は使用状態にある RC 部材を想定し、乾燥収縮量の異なるコンクリートを使用した RC 供試体に一軸引張荷重を行うことで内部ひび割れを発生させ、除荷後に塩水の乾湿繰返しによる腐食促進試験を行い、乾燥収縮に伴う内部ひび割れが鉄筋腐食速度に与える影響を検討した。内部ひび割れ発生による鉄筋腐食速度は、載荷履歴がないものと比較して 1 オーダー程度大きくなることを確認された。さらに、載荷を持続させたままに腐食促進試験を行ったところ、除荷後に試験を行ったものと比較して、自然電位がより卑の方向への変化し、腐食速度の増加が確認され、内部ひび割れの存在および内部ひび割れの開口幅が鉄筋腐食に影響を与えるという結論を得た。

キーワード: 内部ひび割れ、乾湿繰返し、長さ変化、分極抵抗、鉄筋腐食速度

1. はじめに

RC 構造物の適切な維持管理のためには、任意の時刻における構造性能や耐久性性能の正確な評価が不可欠である。現状の維持管理体系においては、構造物表面に存在するひび割れの有無や、ひび割れ幅を構造物の健全性評価の判断材料としているが表面には現れなくともコンクリート内部の鉄筋近傍に存在する内部ひび割れも存在し、このひび割れが RC 構造物の耐久性に与える影響が表面ひび割れと同様に看過できないように思われる。

内部ひび割れとは使用状態にあり引張応力を受ける RC 部材の鉄筋近傍に発生する図-1 のようなひび割れを指し、異形鉄筋を中心に 3 次元的にコーン状に形成される。内部ひび割れは、発生に骨材の種類の違いによる影響が大きいこと²⁾や、鉄筋応力度が 100N/mm² 到達以前に発生する¹⁾ことがこれまでに報告されている。

内部ひび割れが耐久性性能に与える影響に関し、著者らは鋼材腐食抵抗性に与える影響を検討している³⁾。内部ひび割れを発生させた RC 供試体に、3%NaCl 水溶液による乾湿繰返し試験を行い、供試体の長さ変化と、単位時間当たりの腐食量を指標化した鉄筋腐食速度を測定した結果、乾湿繰返しにより供試体が膨張する場合に内部

ひび割れ幅は小さくなり鉄筋腐食速度は低減されることなどが分かっている。この研究により内部ひび割れの存在が鉄筋腐食に与える影響度が明らかとなったものの塩水の乾湿繰返しを行っている最中は除荷の状態にあつて載荷状態を想定したものではなく、内部ひび割れが閉じているために内部ひび割れが耐久性性能に与える影響が適切には評価されていないと考えられる。

以上の背景を踏まえて、本研究では、これまで実施してきたように使用状態を想定した荷重まで載荷後、除荷した場合での鉄筋腐食抵抗性の検討に加え、載荷を持続させることにより、使用状態にあつて内部ひび割れが開口した状態の RC 部材が受ける鉄筋腐食に与える影響を検討するために一連の実験を行う。収縮量の異なる骨材を 3 パターン使用することで乾燥収縮量の異なる RC 供試体を作製し、両引張載荷試験に供することで鉄筋近傍に内部ひび割れを発生させた供試体と、載荷履歴を有するが荷重を作用させていない供試体、さらに無筋の供試体の計 3 ケースを対象に海水の乾湿繰返し試験を行った。また、乾湿繰返しに伴う長さ変化と鉄筋腐食速度さらに鉄筋近傍の塩化物イオン量の測定を行うことで、内部ひび割れの乾湿繰返しに伴う長さ変化の影響が鉄筋腐食速度に与える影響の感度とその要因について検討する。

表-1 配合表

供試体 名称	単体量 kg/cm ³					
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
F	175	350	834	906	4.55	1.40
C	175	350	865	943	0	0.35
M	175	350	833	951	2.10	1.75

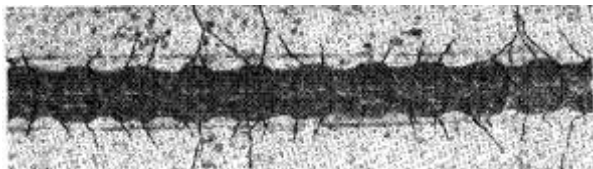
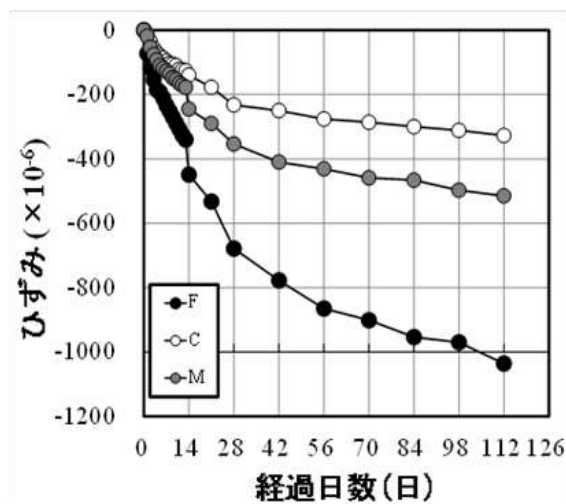
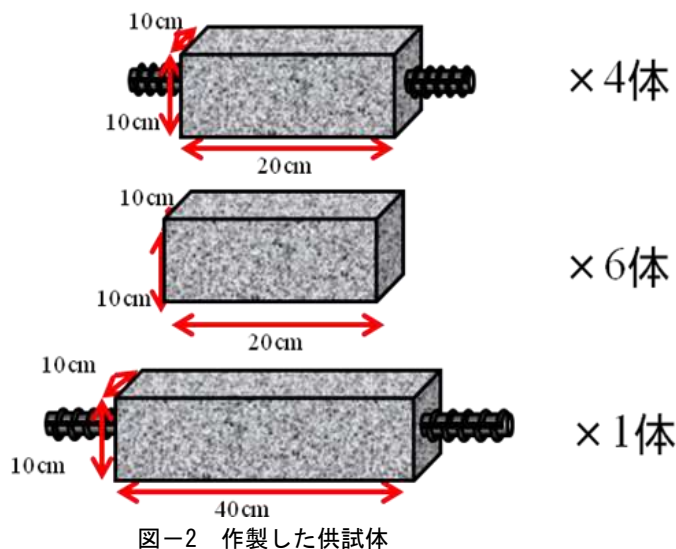


図-1 部材に発生した内部ひび割れ¹⁾

*1 愛媛大学 工学部環境建設工学科 (学生会員)
 *2 愛媛大学 大学院理工学研究科
 *3 愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 博(工) (正会員)
 *4 愛媛大学 大学院理工学研究科 講師 博(工) (正会員)



2. 実験概要及び結果

2.1 供試体

本研究では乾燥収縮ひずみが異なる供試体を作製するため細骨材に愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用砕砂、粗骨材に愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用砕石を使用したものと、細骨材に大分県新津久見鉦山産石灰石砕砂、粗骨材に大分県新津久見鉦山産石灰石砕石を使用したものと、細骨材に愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用砕砂と大分県新津久見鉦山産石灰石砕砂を質量での混合比7:3としたもの、粗骨材に大分県新津久見鉦山産石灰石砕石を使用したものをそれぞれW/C=50%で計3パターン作製した。以後、愛媛県東温市山之内産砂岩を使用した供試体をF、大分県新津久見鉦山産石灰石を使用した供試体をC、混合した供試体をMと表記する。Fは表乾密度2.55g/cm³、吸水率1.65%、粗粒率2.8。Cは表乾密度2.66g/cm³、吸水率1.02%、粗粒率2.74。Mは表乾密度2.58g/cm³、吸水率1.46%、粗粒率2.66である。また本研究で用いた配合を表-1に示す。

実験で用いる供試体は各骨材ごと、寸法が10×10×20cmの角柱供試体を有筋が4体、無筋が6体、無筋の内、埋込み型ひずみ計を内部に有する無筋のものが2体、および10×10×40cmの角柱供試体を有筋のものを1体作製する。作製する供試体の概要を図-2に示す。なお、鉄筋はJIS G3112 SD295Aの呼び名D25の異形鉄筋を使用した。供試体作製後、無筋供試体については水中養生を、有筋供試体については養生中の鉄筋腐食を避けるため、鉄筋部をエポキシ樹脂系接着剤によってシールした後水中養生を行った。なお養生期間は28日間施した。

使用する骨材の相違が無筋コンクリートの収縮に与える影響を検討するため、10×10×40cmの供試体の長さ変を元の長さで除し、算出した乾燥収縮ひずみの測定を事前に行っている。その結果を図-3に示す。なお試験は20℃の環境下で行った。F供試体が最も収縮しており、

図-3 乾燥収縮ひずみ

C供試体は最も収縮しておらず、M供試体はそれらの間に収縮していることが確認できる。

2.2 両引張載荷試験

本試験では図-1に示すような内部ひび割れを使用状態にある供試体に発生させることを目的としている。既往の文献¹⁾から内部ひび割れは鉄筋応力度が100N/mm²に到達する以前にすでにその発生が確認されているので、この値を参考にして、本試験では約20℃の恒温環境下において、載荷を行う際の載荷荷重を鉄筋応力度で125N/mm²とし、さらに10×10×20cmの角柱供試体は鉄筋応力度で200N/mm²で10回の繰り返し載荷を実施することで塩水の乾湿繰返し時に除荷することによる内部ひび割れの閉塞の影響をできるだけ回避している。また、前述の供試体との比較のため、10×10×40cmの角柱供試体は載荷後にD筋チャックにより鉄筋を載荷したまま固定し、塩水の乾湿繰返し試験中であっても、両引張載荷を持続させる実験をも実施している。鉄筋応力度で125N/mm²まで載荷を行った後、その荷重を維持させるので両引張載荷試験時のように繰り返し載荷は行わないものとする。

2.3 乾湿繰返し試験

両引張載荷試験が終了後、供試体に対して次のような処理を行う。供試体から出ている鉄筋の一方をハンドグラインダーにより黒皮を削り、その部分に導線をつけ固定する。その後、供試体から出ている両方の鉄筋部分に、外部からの水分付着による鉄筋腐食が生じないようにするためにエポキシ樹脂系接着剤を用いてシールを施す。以上の処理を行った供試体に塩水を用いた乾湿繰返し試験を、湿潤3日、乾燥11日を1サイクルとして実施した。このサイクルは、乾湿繰返しによりコンクリートが収縮する場合の影響を検討するために行っている。本サイクルでの乾湿繰返しは、短期間内で鉄筋腐食を確認するた

め、40°Cに設定した炉内で行っている。なお、乾燥も湿潤時同様に、40°Cにて行っている。

両引張持続荷重の供試体は、ハンドグラインダー等の処理は同様に行うが、本試験においては20°Cに設定した室内で乾湿繰返しを行っている。なお、実環境下では、荷重・塩分浸透は同時に起こるが本研究では両引張荷重試験および両引張持続荷重試験の両者とも荷重後の供試体を用いるので、通常の塩分環境よりも厳しい塩分環境条件のもと試験を行っている。

乾湿繰返しに伴う長さ変化の測定はJIS規格のモルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第2部 (JIS A 1129-2)を参考にしている。ゲージプラグは貼り付け用を使用し、その他測定器はJIS規格に則ったものを使用している。測定を行う供試体は、40°Cに設定した炉内で行うものを2体、20°Cに設定した室内で行うものを2体とし、各温度で計2カ所の測定点を5回測定する。測定後、2カ所の測定値の平均値を求め、その値を測定値とした。なお、40°Cに設定した乾燥炉内で行うものは海水を用いるので、海水によりゲージプラグが腐食しないように湿潤時にはゲージプラグにビニルテープを張り付け海水と触れないようにした。また、20°Cの室内での乾湿繰返しには、埋め込み型ひずみ計により内部の長さ変化を測定するための供試体も2体用いている。こちらも2体の測定値の平均値を求めたものを測定値とする。40°Cの乾燥炉内の測定結果を図-4、20°Cの室内の測定結果を図-5、供試体内部の測定結果を図-6に示す。

はじめに、コンタクトゲージを用いた供試体表面の長さ変化について検討する。図-4、図-5で示すように、乾湿繰返しによる水分供給と逸散を伴うことにより、全ての供試体の表面のひずみが増減を繰り返しながら、傾向としては収縮していることが分かる。供試体毎の収縮量の相違については、常には図-2の大小の関係にしたがってはいないものの、およそ図-2に示す関係と同様の傾向を示している。

次に埋め込み型ひずみ計による供試体内部の長さ変化について検討する。図-6に示すようにF供試体とM供試体については、乾湿繰返しによりひずみの増減を繰り返しつつも、収縮傾向にあることが読み取れるものの、C供試体に関しては増減しつつも、収縮傾向にはない。これは、供試体内部の水分逸散の様相の相違に起因していると考えられる。水分逸散が著しいほど乾燥収縮は大きくなるが、F供試体の場合は骨材の水分逸散が容易であると考えられ、そのため供試体表層からも骨材やセメントマトリックスから容易に水分逸散し、水分量の勾配がつきやすくなる。そのため、供試体内部から表層へ向かう水分移動量も大きくなり、供試体内部からの水分逸散も大きくなると考えられる。湿潤3日、乾燥11日とい

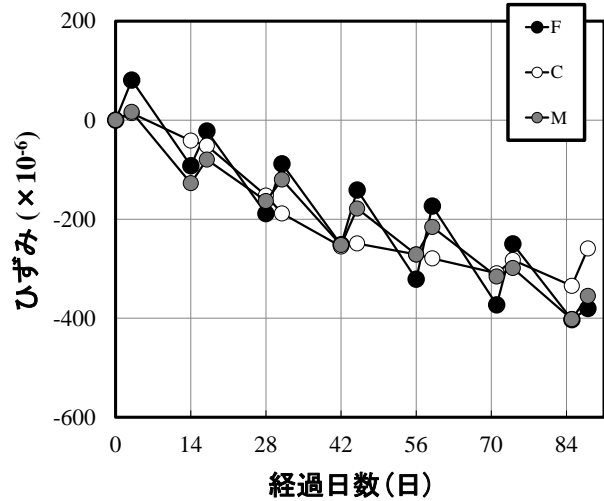


図-4 乾湿繰返しによる長さ変化 (40°Cの炉内)

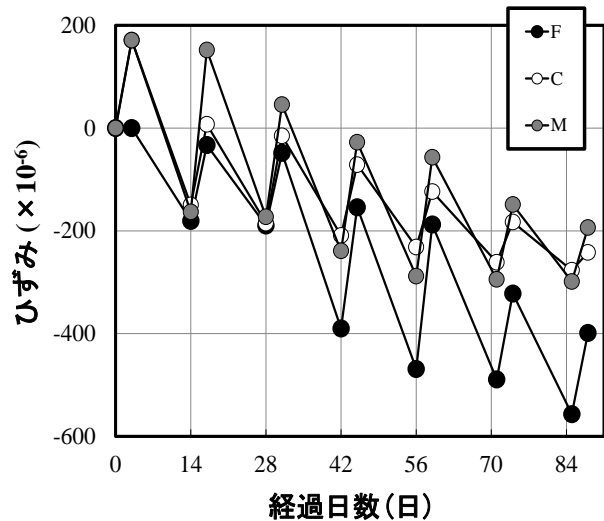


図-5 乾湿繰返しによる長さ変化 (20°Cの室内)

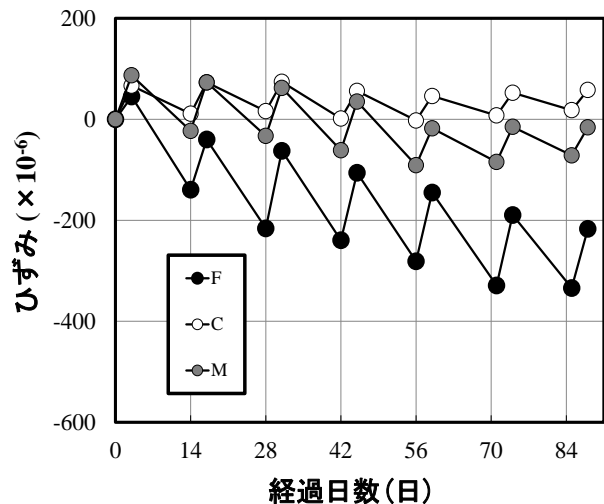
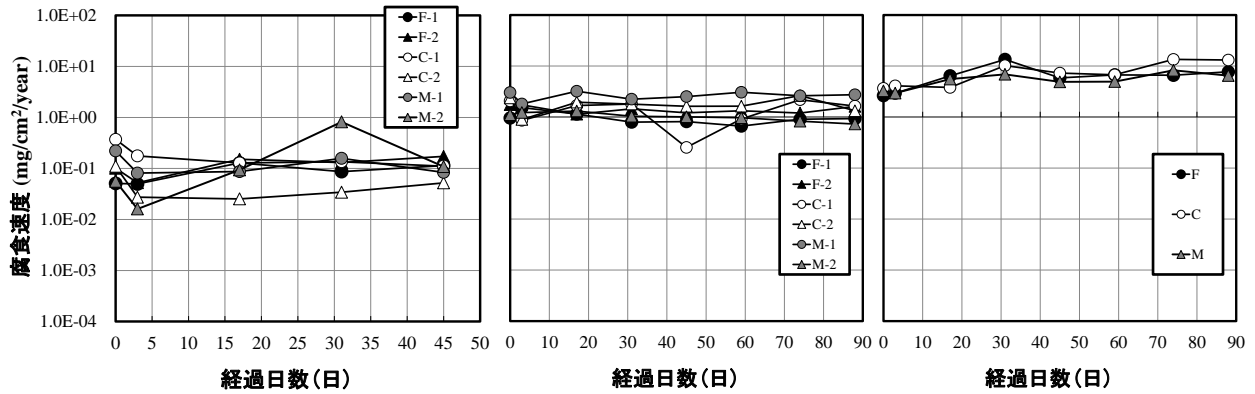
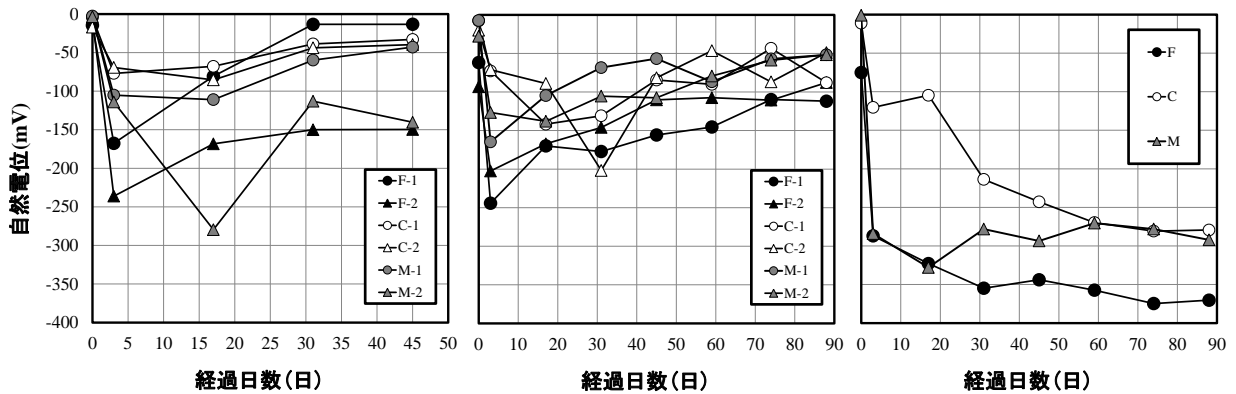


図-6 乾湿繰返しによる長さ変化 (供試体内部)



図一七 腐食速度 (左：载荷履歴のない供試体，中央：両引張载荷履歴がある供試体，右：常に両引張载荷を
持続している供試体)



図一八 自然電位 参照電極：(Ag/AgCl)(左：载荷履歴のない供試体，中央：両引張载荷履歴がある供試体，右：
常に両引張载荷を保持している供試体)

うサイクルのため、水分供給に対して乾燥の日数が非常に長い
ため、水分が供試体内部にまで至らず、日数の経過によりひずみ
が減少する傾向にあると考えられる。一方、C 供試体に使用した
骨材の水分逸散性状は F ほど大きくないため供試体内部の十分
な水分逸散にまで至らず、湿潤 3 日、乾燥 11 日というサイ
クルであっても、水分を保持し続けているために日数の経過
によりひずみは減少しないとされる。

2.4 鉄筋腐食判定

塩水の乾湿繰返し作用によるコンクリート中の鉄筋腐食状
況を同定するため、電気化学的手法のひとつである分極抵抗
法を採用した。

一般にコンクリート中では、腐食部では電位が低く、分極
抵抗は小さい一方で、非腐食部では電位が高く、分極抵抗が
大きいという特徴を有する。この特性を鉄筋腐食診断機によ
り対極から内部の鉄筋に電流を印加し、特定の周波数の交
流電流を測定することにより、見掛けのコンクリート抵抗
 $R_s(\Omega)$ および見掛けの分極抵抗 $R_p(\Omega)$ を求めること
ができる。なお、参照電極には (Ag/AgCl) を用いている。単
位面積当たりで定義される分極抵抗 R_p は、金田らの研究⁵⁾
に基づく手法により算出した。この

手法は、境界要素法による電流分布解析を用いることで、
現場での実測値をもとに、対極から鉄筋に対する電流を推
定し、単位面積当たりの分極抵抗を精度良く算出するとい
うものである。解析によって算出された分極抵抗値から、単
位面積当たりの鉄筋腐食速度を以下の式(1)、(2)によって
算出する。式(1)は Stern-Geary の式⁵⁾と呼ばれている。

$$I_{corr} = K \cdot (1/R_p) \quad (1)$$

ここに、 I_{corr} ：単位面積当たりの腐食電流密度(A/cm²),

表一2 腐食判定表

腐食速度 (mg/cm ² /年)	腐食速度の判定
1.8未満	不動態状態(腐食なし)または 極めて遅い腐食速度
1.8以上4.6以下	低～中程度の腐食速度
4.6以上9.1以下	中～高程度の腐食速度
9.1より大	激しい、高い腐食速度

自然電位(E) (mV)	鉄筋腐食の可能性
-200 < E	90%以上の確率で腐食なし
-350 < E ≤ -200	不確定
E ≤ -350	90%以上の確率で腐食あり

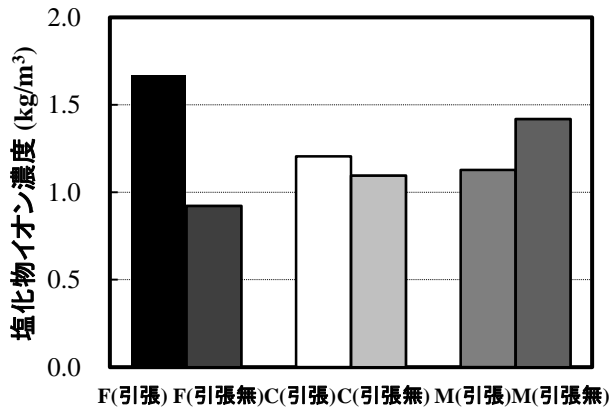


図-9 塩化物イオン濃度

K : 換算係数 (V), 実験から求められ 0.026V がよく用いられる, R_p : 単位面積当たりの分極抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
また, 腐食電流密度はファラデーの第 2 法則から, 以下の式(2)により腐食速度に換算される。

$$V = \frac{m \cdot I_{corr}}{z \cdot F} \quad (2)$$

ここに, V : 腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$), m : 鉄の原子量 ($=55.8\text{g}$),
 z : 鉄のイオン価数 ($=2: \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$), F : ファラデー定数 ($=96500\text{A} \cdot \text{s}$ クーロン)である。

鉄筋腐食速度の測定法には前述のとおり分極抵抗法を用いた。測定には, (株)日鐵テクノリサーチ社製鉄筋腐食診断機 CM-SE1 を使用し, プローブはコンクリート用プローブを使用した。測定時に供試体内部の湿潤状況を測定ごと, 供試体ごとで統一するため, 測定は湿潤後のみ行った。また, 供試体の測定点はシール処理を施していない面の中央として見掛けのコンクリート抵抗 R_s' と見掛けの分極抵抗 R_p' , 自然電位を各 3 回の測定し, その平均値を測定値とした。両引張荷重を施した供試体 2 体, 両引張持続荷重試験を施した供試体 1 体, 荷重していない供試体 2 体の値を配合ごとに測定し, 鉄筋腐食速度を算出した。

この方法での腐食速度の測定結果を図-7, 自然電位の測定結果を図-8 に示す。なお, 表-2 に, 腐食速度及び自然電位による鉄筋腐食判定を示す。

はじめに, 図-7, 図-8 のそれぞれ左端に示す両引張荷重履歴がある供試体および, 中央に示す荷重履歴のない供試体との比較検討を行う。

荷重履歴のない供試体よりも, 両引張荷重によって内部ひび割れを生じさせたものの方が腐食速度は大きく, 自然電位も全体的には卑となる値を呈していることから, 内部ひび割れの存在により, 鉄筋腐食抵抗性が低減したと考えられる。

続いて, 図-7, 図-8 のそれぞれ左端に示す両引張載

荷履歴がある供試体および, 右端に示す常時引張持続荷重している供試体との比較検討を行う。常時引張持続荷重している供試体の腐食速度は, 荷重履歴があり乾湿繰返し時には除荷している供試体よりも高く, 自然電位もより卑な値を呈している。なお, 常時引張持続荷重している供試体は 20°C 環境下であることに對し, 荷重履歴があり持続荷重ではない供試体は腐食促進のために 40°C 環境下にあることを勘案すると, 内部ひび割れが鉄筋腐食に与える影響は温度による腐食促進の影響よりも大きいと考えられる。

2.4 塩化物イオン濃度

鉄筋近傍の塩化物イオン濃度を測定することにより, かぶりコンクリートの物質移動抵抗性の低下度および鉄筋が腐食に至る要因について検討を行った。塩化物イオン濃度は, 各供試体の鉄筋近傍から, ドリルにより微粉末のコンクリート試料を 10g 採取し, JIS A 1154 に基づいて測定を行った。

図-9 に引張荷重履歴のある供試体と, 荷重履歴のない供試体での測定結果を示す。すべての供試体について塩化物イオン濃度は $1\text{kg}/\text{m}^3$ 付近にあり, 引張荷重を受けた F 供試体については, 他の供試体よりも高い値を示している。その他の供試体については内部ひび割れの有無によらず塩化物イオン濃度はほとんど変化を呈していない。

一方, 引張荷重によりひび割れが導入された場合, 図-7 に示すように腐食速度は 1 オーダー程度大きくなっている。塩化物イオン濃度の相違が内部ひび割れの有無によらず見られないため, かぶりコンクリートの, 表層からの塩化物イオン移動抵抗性は内部ひび割れの影響を受け腐食速度が増加することから, 内部ひび割れの発生により外気からの酸素の供給や, 高 pH の細孔溶液に触れていたことで保護されていた鉄筋が, 細孔よりも空間スケールの大きいひび割れにより細孔溶液が存在できなくなり, 不動態皮膜の損傷などによって腐食速度が増加するに至ったと思われる。

3. 既往の研究との比較による鉄筋腐食速度の検討

既往の研究⁴⁾との比較により, 得られた実験結果の詳細検討を行う。供試体の長さ変化と鉄筋腐食速度の関係について着目する。図-4, 図-5, 図-6 に示すように, 本研究では供試体の表面は収縮しているものの, 供試体内部は必ずしも収縮していないものが存在する。図-10 に既往の研究で実地した湿潤 2 日, 乾燥 5 日の同じ試験での鉄筋腐食速度である。なお, 図中の S 供試体は, 本研究では M 供試体に相当するものである。この試験と本論文で示した試験の相違は, 本論文での試験では, 乾湿

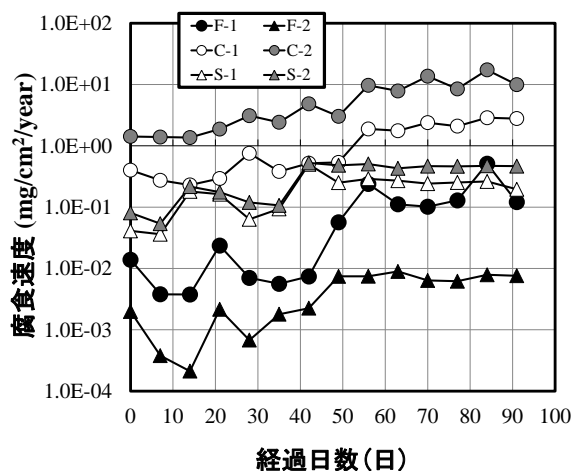


図-10 既往の研究結果

繰返しにより供試体表面は収縮していることに対して、この結果は乾湿繰返しにより供試体表面が膨張していた。この結果を踏まえて今回の実験結果と比較すると、本研究で行った試験結果は、図-10 に示す供試体群の腐食速度値よりも腐食速度が大きい傾向にあることが確認できる。これは供試体が収縮することにより内部ひび割れのひび割れ幅が広がったことが理由と考えられる。

このことから供試体内部よりも外部の長さ変化が腐食速度に影響すると考えられ、その理由としては、内部ひび割れは鉄筋から供試体表面に近づくにつれその幅は狭くなっているため、表面が収縮すると外部からの劣化因子が侵入しやすくなり、膨張すると浸入しにくくなるということなどが考えられる。

内部のひび割れ幅が腐食速度に与える影響の検討に関連して、本研究で実施した持続荷重が腐食速度に与える影響を検討する。前述のとおり、持続荷重により腐食速度は荷重後除荷したものよりも大きい値を示している。これは、前述した供試体の長さ変化と同じように、内部ひび割れの開口幅が大きくなったことに起因すると考えられるが、それと比較すると数値の上がり方が大きい。この事実により、収縮や死荷重・活荷重の作用による内部ひび割れの開口幅の増加は、乾燥後湿潤の影響を受けて供試体が膨張するような環境下にあっても、腐食速度に与える影響が大きいと考えられるので、設計段階では、収縮や荷重の影響を精密に勘案しつつ、内部ひび割れの存在が部材の耐久性能に与える影響を適切に考慮する必要があると考えられ、そのためには、今後、内部ひび割れと耐久性能の関係をより明らかにしていく必要がある。

4. 結論

本研究では以下の結果が得られた。

使用状態にある RC 部材を想定し、乾燥収縮量の異なるコンクリートを使用した RC 供試体に一軸引張荷重を行うことにより鉄筋近傍に内部ひび割れを発生させ、除荷後に塩水の乾湿繰返しによる腐食促進試験を行い、乾燥収縮に伴う内部ひび割れが鉄筋腐食速度に与える影響を検討した。内部ひび割れ発生による鉄筋腐食速度は、荷重履歴がないものと比較して 1 オーダー程度大きくなることを確認された。この検討に加え、荷重を持続させた状態で腐食促進試験を行ったところ、除荷後に試験を行ったものと比較して、自然電位の卑の方向への変化と腐食速度の増加が確認され、内部ひび割れの存在および内部ひび割れの開口幅が鉄筋腐食に大きな影響を与えるという結論を得た。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(A) 課題番号 21246071 (代表者：佐藤良一(広島大学))の一部として行ったものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 294 号, pp.85-100, 1980
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ—メカニズムと対策技術の現状, 2003
- 3) 氏家 勲, 岡崎 慎一郎, 村上 展将, 森岡 卓也: 乾燥収縮が内部ひび割れによるかぶりコンクリートの物質移動抵抗性の低下に及ぼす影響, 耐久静力学に基づく収縮影響評価に関するワークショップ 論文集, pp.53-58, 2011.8
- 4) 氏家 勲, 岡崎 慎一郎, 村上 展将, 中野 泰邦: コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす内部ひび割れの影響に関する研究, セメント技術大会
- 5) 金田尚志, 松岡和巳: BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, 2011, pp.1715-1720
- 6) M.G.Fontana and N.D.Greene: Corrosion Engineering, Second Edition, p.345, 1983, McGraw-Hill