# 論文　水分供給が中性化コンクリート中の鋼材腐食に与える影響

上田　隆雄[*1]・井周　茉優[*2]・七澤　章[*3]

**要旨**：コンクリートの中性化に伴うコンクリート中の鋼材腐食は，コンクリートの含水状態の影響を強く受ける。さらに，コンクリートが塩化物イオンや，混和材などの各種要因についても，鋼材腐食に与える影響程度については定量的な評価には至っていない。そこで本研究では，中性化コンクリート中の鋼材腐食について，水分を初めとする諸要因の影響を明らかにすることを目的として実験的に検討した。この結果，本実験条件では，塩化物イオンを含有しないコンクリートでは中性化残り 5 mm まで中性化しても鋼材腐食は開始せず，その後の乾湿繰返しによる水分供給によって鋼材腐食が開始したものと推測された。

**キーワード**：中性化，鋼材腐食，コンクリートの含水状態，電気化学的鉄筋腐食指標

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC とする）構造物の代表的な劣化機構として，中性化や塩害による鋼材腐食が挙げられる。一般に，これらの劣化機構においては，劣化因子である二酸化炭素（以下 $CO_2$ とする）や塩化物イオン（以下 $Cl^-$ とする）がコンクリート中に浸透し，コンクリート中で鋼材を腐食から保護する不動態被膜を破壊することで，鋼材腐食が開始すると考えられている。この考え方に基づき，土木学会コンクリート標準示方書では，中性化や塩害による鋼材腐食に対する耐久性照査として，不動態被膜の破壊に伴う鋼材腐食の開始を耐久性上の限界状態と設定してきた。

これに対して，2017 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]では，「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査」という概念を導入した。この照査においては，コンクリート中の鋼材腐食は，コンクリート中を浸透する水分の鋼材への到達に伴って進行し，鋼材腐食深さの経時的累積値が限界値に達した時を，耐久性上の限界状態と設定している。このような照査の考え方が導入された背景としては，実構造物におけるコンクリート構造物中の鋼材腐食進行プロセスにおいて，中性化よりは降雨等による水分供給が支配要因となっている，との指摘がある [1)]。すなわち，水分供給の少ない乾燥した環境では，コンクリートの中性化速度は大きいが，鋼材腐食の程度は軽微であるのに対して，水掛かりのある部位では，比較的中性化速度は小さくても顕著な劣化が認められる，といった事例が新しい照査法の導入を促したと言える [2)]。

一方で，本照査法で導入された水分浸透に伴う腐食速度の設計式では，コンクリートの中性化の影響が十分に考慮されているとは言えない。また，内在塩分を含有する場合には，中性化と塩害の複合劣化状態の形成に伴って，腐食が顕著に促進される場合があるが，設計や維持管理の基本的な考え方が確立されていない。さらに，フライアッシュ等の混和材の添加は，コンクリート中の鋼材腐食に顕著な影響を与えるが，この点についても，現状では定量的評価には至っていない。

そこで本研究では，中性化や塩害の影響を受けた RC 供試体中の鋼材腐食について，乾湿繰返しによる水分供給を行いながら，電気化学的腐食指標により評価することとした。また，モルタル細孔溶液のイオン濃度分析や，コンクリート中の pH 値および各種イオン濃度分布を測定することで，コンクリート中の鋼材腐食環境の変化を併せて評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の作製

本研究で用いたコンクリートの配合と諸性状を**表－1** に示す。中性化を促進させるために，コンクリートの水セメント比は 60%で一定とした。配合名の N は基準配合で，FA はセメント代替で 30%のフライアッシュを混和した。また NC，FC は，それぞれ N，F 配合に対して，除塩不足の海砂使用を想定して，$Cl^-$ 量が 3.0 kg/m$^3$ となるように細骨材代替で NaCl を混入した。また，細孔溶液の抽出を行ったモルタルの配合は，コンクリート配合から粗骨材と混和剤を除いたものとした。**表－1** には，材齢 35 日で測定したコンクリートの圧縮強度を併せて示す。ただし，圧縮強度試験は $Cl^-$ 無混入の N および F 配合のみで実施した。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm$^3$，比表面積：3290 cm$^2$/g）を用い，細骨材 S は砂岩砕砂（表乾密度：2.57 g/cm$^3$，吸水率：1.77%），粗骨材 G

*1 徳島大学大学院　社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系　教授　工博　(正会員)
*2 四国建設コンサルタント（株）　(非会員)
*3 デンカ（株）　青海工場　セメント・特混研究部　工博　(正会員)

表－1　コンクリートの配合と諸性状

| 配合名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m³) C | W | S | G | FA | NaCl | WRA* | AEA** | SL (cm) | Air (%) | 圧縮強度 (N/mm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N | 60 | 48 | 300 | 180 | 833 | 902 | － | 0 | 1.05 | 0.0162 | 18.0 | 4.7 | 30.1 |
| NC | | | | | 828 | 902 | － | 4.9 | 0.9 | 0.0162 | 20.0 | 4.2 | － |
| F | | | 210 | | 819 | 887 | 90 | 0 | 0.42 | 0.0336 | 16.5 | 3.0 | 24.9 |
| FC | | | | | 814 | 887 | | 4.9 | 0.42 | 0.0336 | 20.0 | 3.6 | － |

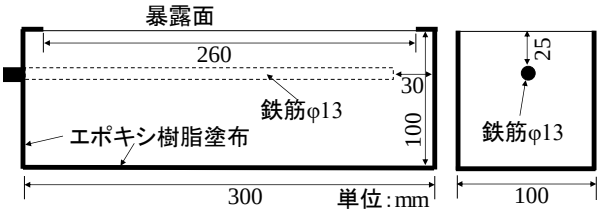
*WRA：AE 減水剤，**AEA：AE 剤

は砂岩砕石（表乾密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.60%，Gmax：20 mm）を用いた。また，フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ（密度:2.21 g/cm³，比表面積：3970 cm²/g，強熱減量：2.3%）を使用した。

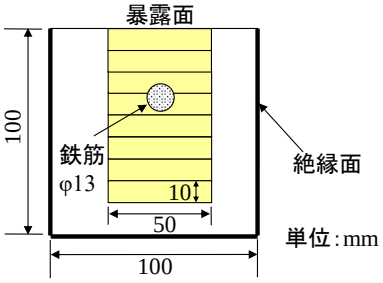
本研究で作製した供試体の概要を**図－1** に示す。RC 供試体のコンクリート部分は 100×100×300 mm とし，かぶり 25 mm となるように丸鋼φ13mm を 1 本配置した。コンクリートの打設翌日に脱型し，20℃の恒温室中で 14 日間の封かん養生を行った。その後 20℃，60%R.H.環境で 4 週間乾燥させ，型枠側面の暴露面 1 面を除いて，他の 5 面についてはエポキシ樹脂を塗布した。この他に，圧縮強度試験または水分浸透試験用にφ100×200 mm の円柱コンクリート供試体と，中性化深さ確認用の一辺 100 mm 立方体供試体を併せて作製し，RC 供試体と同条件で養生，乾燥を行った後に，水分浸透試験用の円柱供試体と立方体供試体は暴露面以外にエポキシ樹脂を塗布した。立方体供試体の暴露面は型枠側面 1 面とし，水分浸透試験用供試体は「JSCE-G 582-2018 短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）」に従って底面側端面から 25 mm 部分を切除した上で円形上下面を暴露面とした。また，細孔溶液抽出用に，φ50×100 mm 円柱モルタル供試体を作製し，RC 供試体と同条件で養生，乾燥を行った。円柱モルタルは全面を暴露面とし，エポキシ樹脂の塗布は行わなかった。

### 2.2 促進中性化試験および乾湿繰返し試験

養生終了後さらに 4 週間乾燥させた RC 供試体およびモルタル供試体を用いて，JIS A 1153 に準拠した促進中性化（20℃，60 %R.H.，$CO_2$ 濃度 5%）を実施した。この時の中性化深さの目標値は，20 mm とした。中性化深さ 20 mm は，かぶり 25 mm の RC 供試体の中性化残り 5 mm となるため，コンクリート中の鋼材腐食開始時点を想定して設定した。なお，円柱コンクリート供試体と円柱モルタル供試体は RC 供試体と同時期に中性化を終了した。また，これらの供試体は，促進中性化を実施しない供試体も併せて作製し，促進中性化期間中は，20 ℃，60 %R.H.の恒温恒湿室中で気中保管した。




図－1　RC 供試体の概要




図－2　化学分析用供試体の切断方法

F および FC 配合の供試体については，40 日間の促進中性化によって中性化深さが 20 mm 程度に達した後に，乾燥（20 ℃，60%R.H.）3 日間，湿潤（40 ℃，95%R.H.）4 日間を 1 サイクルとする乾湿繰返しを実施した。

### 2.3 各種試験

#### (1) 中性化深さ測定

促進中性化期間中，中性化の進行を確認するために，N 配合は 1 カ月間隔，F 配合は 2 週間間隔を目安として立方体供試体を割裂し，コンクリート粉を除去した割裂面に対して 1.0 %フェノールフタレイン溶液を噴霧し，JIS A 1152 に準拠した方法により，コンクリートの中性化深さを測定した。この測定値を用いて各配合コンクリートの中性化速度係数を算出し，RC 供試体のコンクリートの中性化深さが 20 mm に達する時期を推測した。

#### (2) モルタル細孔溶液の抽出および細孔径分布測定

F および FC 配合のコンクリートの中性化深さが 20 mm に達した時点で，F および FC 配合モルタル円柱供試体の細孔溶液を，1400 kN を上限とする圧縮載荷と除荷

を繰返す高圧抽出により採取した。各供試体から 5 ml 以上抽出された細孔溶液を用いて 100 倍希釈液を作製し，$Cl^-$濃度を 0.01 mol/L 硝酸銀による電位差滴定法により求めた。また，細孔溶液原液の pH 値を，pH 測定電極を用いて測定した。さらに，別途作製したモルタル円柱供試体を用いて，アセトンによる水和停止処理後に，水銀圧入法による細孔径分布測定を行った。細孔径分布測定用の試料はモルタル供試体を 5 mm 角程度まで粉砕して作製した。

(3) RC 供試体中の各種イオン濃度分布

FC 配合の中性化深さが 20 mm に達した時点で，RC 供試体のコンクリート中における $Cl^-$濃度分布および pH 値分布を測定した。**図－2** に示す通り，暴露面から深さ 80 mm までの範囲で切り出した厚さ 10 mm のコンクリートプレート 8 枚を，それぞれ微粉砕したものを分析試料とした。$Cl^-$濃度として，JIS A 1154 に準拠した電位差滴定法により，全 $Cl^-$濃度，温水抽出 $Cl^-$濃度を測定した。pH 値は，50 ml ビーカーに試料 12.5 g と純水 25 ml を入れ，スターラーで 3 分間撹拌後 5 分間静置し，上澄み液を用いて測定した。

(4) 電気化学的指標

促進中性化期間中および乾湿繰返し期間中の RC 供試体を用いて，定期的に自然電位，分極抵抗，コンクリート抵抗を測定した。照合電極として飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl），対極にチタンメッシュを使用して水道水に浸漬させた供試体全体の平均値として測定を行った。分極抵抗の測定は矩形波電流分極法で印加電流 100 μA，周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値として求めた。コンクリート抵抗は高周波数側（800 Hz）のインピーダンス値として求めた。なお，促進中性化期間また気中保管期間中に測定を実施する場合には，測定前に 3 時間湿布で包むことで供試体を湿潤状態とした。また，乾湿繰返し期間中に測定を実施する場合には，湿潤期間終了後，供試体の湿潤状態を維持したまま，40 ℃環境から 20 ℃環境へ移行した翌日に実施した。

(5) コンクリートの水分浸透試験

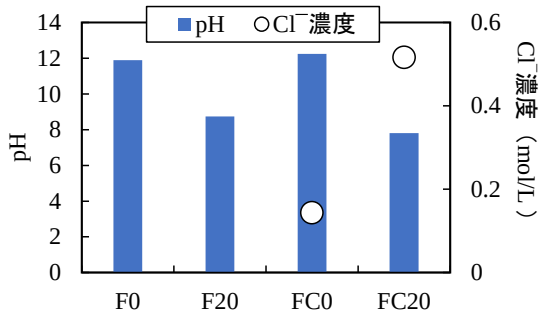
促進中性化を行った円柱コンクリート供試体，および，未中性化供試体について，材齢 6 カ月の時点で JSCE-G 582-2018 に準拠した方法により，水分浸透試験を実施した。ただし，本実験では，各配合の供試体数は 3 本のみで，水分浸透深さの測定時期は浸漬開始から 48 時間後のみとした。このため，コンクリートの水分浸透係数は，48 時間後の水分浸透深さを 48 時間の平方根で除した値として簡易に求めた。

## 3. コンクリートの中性化進行状況

各配合コンクリートの促進中性化試験を実施した結果，

**表－2　促進中性化試験結果**

| 配合名 | N | NC | F | FC |
|---|---|---|---|---|
| 中性化速度係数（mm/√週） | 5.03 | 4.28 | 8.80 | 8.04 |
| 20mm 到達促進中性化期間（日） | 139 | 153 | 36 | 45 |




**図－3　モルタル細孔溶液中の pH 値と $Cl^-$濃度**

促進中性化時間の平方根に比例して中性化深さが大きくなった。中性化深さの予測式として√t 則を適用した時に，得られた中性化速度係数と，中性化深さ 20 mm 到達推定日数を**表－2** に示す。これによると，F 配合の中性化速度係数は，N 配合の場合の 2 倍程度大きくなっている。これは，F 配合がセメント代替で 30%のフライアッシュ混和を行っているために $Ca(OH)_2$ 含有量が小さいことが主原因と考えられる。また，本実験条件では，NaCl を添加することで，中性化速度はやや低下している。NaCl を含有することで，中性化が促進されるとする報告[3]もあるが，本実験では，NaCl 添加量は比較的小さいために，中性化速度への影響は軽微であったものと考えられる。

## 4. 中性化に伴うモルタルおよびコンクリートの諸物性の変化

### 4.1 モルタル細孔溶液の pH 値と $Cl^-$濃度

F 配合および FC 配合モルタル供試体から高圧抽出した細孔溶液の pH 値と $Cl^-$濃度を**図－3** に示す。これ以降の図において，凡例は配合名の後ろに中性化深さ（mm）を付した形とする。**図－3** によると，中性化をしていない F 配合や FC 配合の細孔溶液 pH 値が 12 程度の値を示しているのに対して，促進中性化を行った F20 や FC20 では，細孔溶液の pH 値が 8 付近まで低下しており，細孔溶液中の $OH^-$濃度は顕著に低下していることがわかる。一方で，中性化なしの FC0 と比較して，中性化の進行した FC20 は，細孔溶液中の $Cl^-$濃度が増加している。これは，中性化によりモルタル中の固定 $Cl^-$が遊離し，

細孔溶液中の $Cl^-$ 濃度が高くなったためと考えられる[3]。

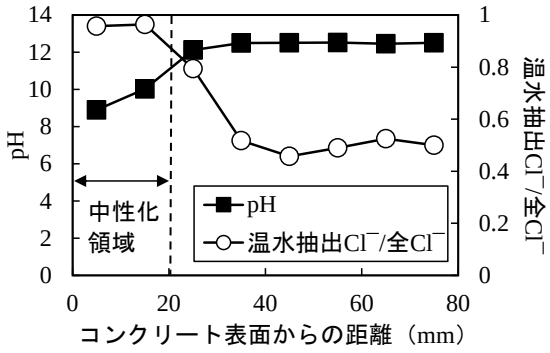
### 4.2 RC 供試体中の pH 値分布および $Cl^-$ 濃度分布

FC 配合で中性化深さが 20 mm となった時点（FC20）のコンクリート中の pH 値分布と（温水抽出 $Cl^-$ 濃度/全 $Cl^-$ 濃度）割合分布，および，$Cl^-$ 濃度分布をそれぞれ**図－4** および**図－5** に示す。**図－4** によると，中性化したコンクリート部分では，pH 値が 9 程度まで低下しているのと同時に，（温水抽出 $Cl^-$ 濃度/全 $Cl^-$ 濃度）の値が 1.0 近傍の大きな値を示している。これは，**図－5** に示すように，中性化部分ではフリーデル氏塩として固定されていた $Cl^-$ が，コンクリートの炭酸化反応によりほぼすべて遊離し，細孔溶液中で自由な $Cl^-$ となっているためである。このような傾向は，4.1 に示した細孔溶液中の $Cl^-$ 濃度測定結果とも整合している。細孔溶液中に遊離した $Cl^-$ は，濃度拡散によってコンクリート内部方向に移動することで，**図－5** に示すように，中性化部分に隣接する未中性化部分である中性化フロント部分に $Cl^-$ の濃縮層が形成されている。このような現象は塩害と中性化の複合劣化でしばしば報告[3]されており，コンクリート中の鋼材腐食促進の一因となっている。本研究の場合も，コンクリート中鋼材はかぶり 25 mm 位置に配置されていることから，**図－5** に示した $Cl^-$ の濃縮層の影響を強く受けるものと考えられる。

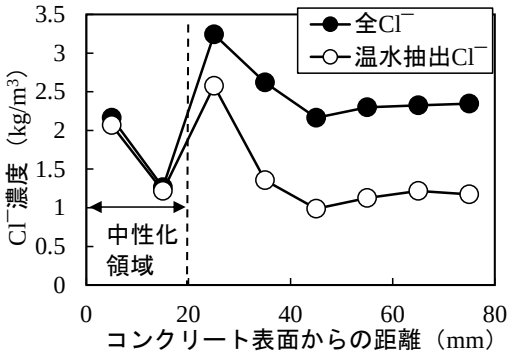
### 4.3 モルタル細孔径分布およびコンクリートの水分浸透試験

F 配合および FC 配合モルタルで，中性化していない F0，FC0 と，中性化した F20，FC20 の中性化部分について，細孔径分布測定結果を**図－6** に示す。これによると，F 配合，FC 配合ともに，中性化することで総細孔量は若干減少するものの，直径 0.1～1 μm の範囲の細孔量が増加している。一般に，セメント硬化体が炭酸化すると，$Ca(OH)_2$ が $CaCO_3$ に変化することで体積が増加し，細孔組織は緻密化するとされているが，高炉スラグ微粉末などの混和材を用いた場合には，C-S-H の炭酸化に伴って多孔化することが報告されている[5]。今回の測定は，比較的若材齢でフライアッシュ混和モルタルに促進中性化を実施した結果であるため，実構造物における中性化とコンクリートの細孔構造の関係については，他の様々な要因を適切に考慮する必要がある。

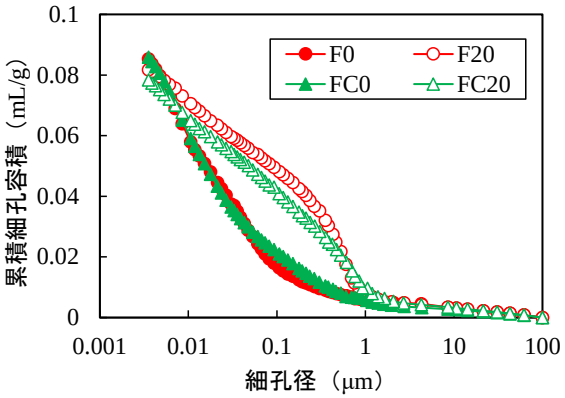
材齢 6 カ月時点で実施したコンクリートの水分浸透試験に関して，水分浸透深さ測定時のコンクリート割裂面への水分発色現像剤噴霧状況例を**図－7** に，水分浸透試験により得られた各配合コンクリートの水分浸透速度係数を**図－8** に示す。なお，本試験は N20 および F20 については実施していない。JSCE-G 582-2018 によると，水分浸透深さを求める場合には，変色領域のうち，浸せき面から最も遠い境界部分から浸せき面までの距離を求めることとなっている。すなわち，わずかでも着色してい



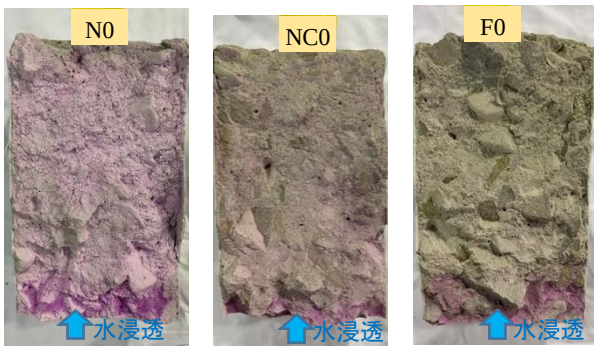

**図－4　RC 供試体(FC20)中の pH 値および（温水抽出 $Cl^-$ 濃度/全 $Cl^-$ 濃度）分布**



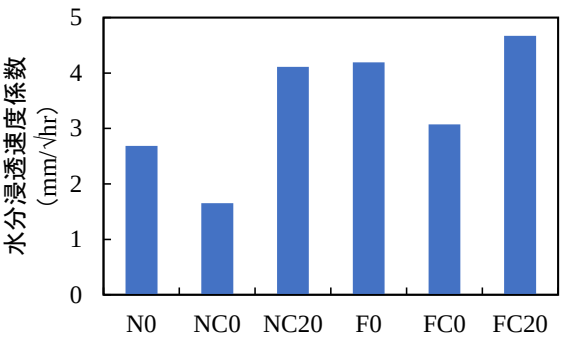

**図－5　RC 供試体(FC20)中の $Cl^-$ 濃度分布**




**図－6　モルタルの細孔径分布曲線**




**図－7　割裂面への水分発色現像剤噴霧状況例**



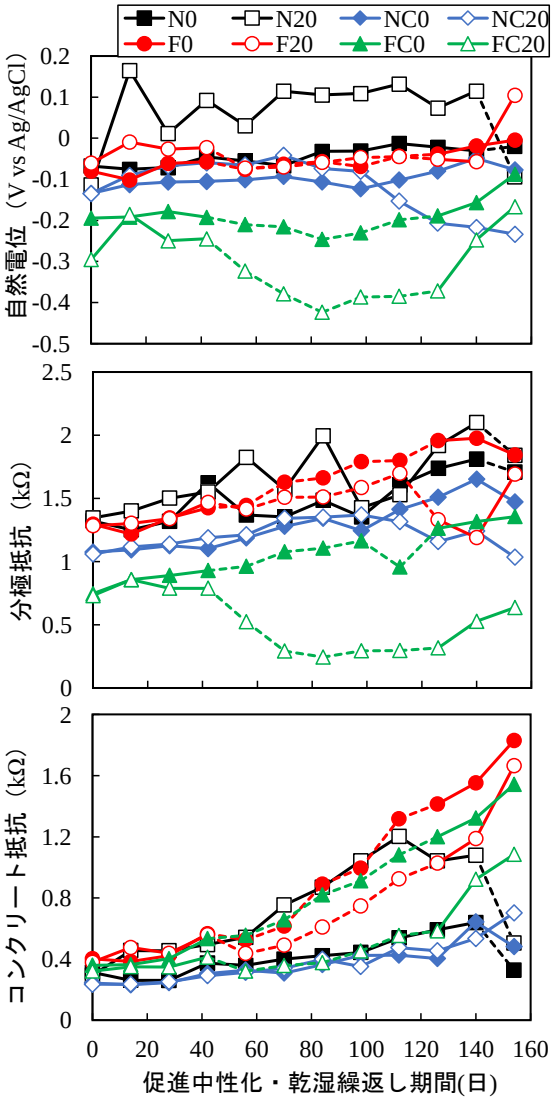

図－8　コンクリートの水分浸透速度係数

る部分があればそこは水分浸透領域に含めることになっている。これに対して，実際の変色状況の例が**図－7** であるが，配合条件によって，着色状況が大きく異なる。この例では, N0 は供試体全体が薄いピンク色に着色され, 境界線を判定するのが困難となっている。NC0 は，N0 よりさらに薄いピンク色の領域が供試体全体に広がっているように見える。さらに F0 に関しては，浸せき面付近の濃い着色領域以外は, 着色していないように見える。水分発色現像剤の感度が高すぎる可能性もあるが，本実験に関しては，薄い着色部分は水分浸透領域とは見なさず，濃い着色部分のみで水分浸透深さと水分浸透速度係数を算出することとした。このような試験方法の詳細については，試験者が正しく判断できるような改善が必要と考えられる。

**図－8** によると，N 配合，F 配合ともに，$Cl^-$を添加することで，水分浸透速度係数は低下している。これは，$Cl^-$の潮解性に起因して見かけ上，コンクリート中の水分浸透が遅れた可能性が考えられる。また，NC 配合，FC 配合ともに，中性化が進行することによって，水分浸透速度係数は大きくなっている。これは，**図－6** に示したように，中性化したコンクリート中では，セメント硬化体の炭酸化反応によって，細孔組織の粗大化が進んだことによるものと考えられる。

## 5. 電気化学的指標によるコンクリート中鋼材腐食評価

養生終了後に促進中性化試験やその後の乾湿繰返し試験に供した RC 角柱供試体に関して，試験期間中の鋼材自然電位，分極抵抗およびコンクリート抵抗の経時変化を**図－9** に示す。なお，各折れ線グラフの実線部分は促進中性化または気中保管期間中の測定データを示しており，点線部分は乾湿繰返し期間中の測定データを示している。すなわち，F20 と FC20 のコンクリート中性化深さが 20 mm に達した促進中性化 40 日時点で，F0，F20，FC0，FC20 はすべて乾湿繰返し環境に移行したが，**図－9** の 126 日時点で中性化深さ 25 mm を目指して再度促進中性化環境に移している。N20，NC20 は中性化深さ 20 mm に達するまで促進中性化を継続し，その間 N0，NC0 は通常の気中保管を行ったが，N20 は**図－9** の 140 日目時点で中性化深さ 20 mm に達したため，N0 とともに 2 週間の乾湿繰返しを実施している。




図－9　RC 供試体の電気化学的鋼材腐食指標の経時変化

### 5.1 促進中性化を行わなかった供試体

**図－9** の自然電位および分極抵抗の経時変化によると，促進中性化を行わなかった N0，F0，NC0，FC0 は，いずれの場合も自然電位や分極抵抗の低下はほとんど見られない。これらの中では，FC0 の自然電位が低く，ASTM C876-91 の判定基準における不確定領域（$-0.24<E<-0.09$ V vs Ag/AgCl）を推移している。NC 配合と FC 配合には 3.0 kg/m$^3$ の $Cl^-$を初期混入しているが，コンクリート中の鋼材腐食促進の観点からは小さい $Cl^-$濃度と言える。ただし，FC 配合の場合は，フライアッシュをセメント代替で 30%混和していることから，細孔溶液の pH が NC 配合より低下しており，$Cl^-/OH^-$モル比が上昇する

ことで，鋼材自然電位や分極抵抗が相対的に低くなったものと考えられる。さらに，F0 と FC0 は，**図－9** の 40 日目以降約 3 カ月間の乾湿繰返しを行ったが，水分供給による自然電位や分極抵抗の低下はほとんど見られず，鋼材腐食の促進効果は小さいものと考えられる。

**図－9** のコンクリート抵抗の経時変化によると，F0 と FC0 は主として乾湿繰返し期間中に抵抗値が大きく増大しており，フライアッシュのポゾラン反応の進行による細孔組織の緻密化の寄与が大きいものと考えられる。一方で N0 と NC0 の場合の経時変化は小さいが，N0 は 140 日目から乾湿繰返しを実施することで，コンクリートに水分が供給され，抵抗値が大きく低下している。

### 5.2 促進中性化を行った供試体

**図－9** の自然電位および分極抵抗の経時変化によると，促進中性化を行った N20 と F20 は，促進中性化期間中の自然電位や分極抵抗の低下は見られないことから，中性化残り 5 mm まで中性化が進行しても，乾燥したコンクリート中では鋼材腐食は進行していないと考えられる。ただし，N20 は**図－9** の 140 日目に乾湿繰返しに切り替えた直後に，自然電位が大きく低下し，分極抵抗も低下していることから，鋼材近傍の pH が低下した状態で水分の供給によって，鋼材腐食が開始したものと推定される。同様の結果は，鋼材位置まで中性化を行った既往の検討 [6]においても確認されている。これに対して，F20 は，促進中性化終了後に乾湿繰返しに切り替えても，自然電位の大きな低下は見られないが，分極抵抗は**図－9** の 112 日目に大きく低下している。**図－8** では，F 配合の水分浸透速度係数は，N 配合の値より大きいが，一般にフライアッシュを混和することで物質移動抵抗性は向上することから，F20 への水分供給による鋼材腐食開始は，N20 の場合より遅延したものと推定される。

NC20 と FC20 は，促進中性化期間中に自然電位と分極抵抗が低下しており，FC20 については促進中性化後の乾湿繰返しによって，さらにこれらの低下幅が拡大している。NC20 と FC20 は，内在塩分と中性化の複合劣化供試体であるため，**図－5** に示したように，中性化フロント部分に $Cl^-$の濃縮層が形成されている。中性化が進行して $Cl^-$の濃縮層が鋼材位置に達すると，コンクリートの含水率が低い促進中性化期間であっても，鋼材腐食が開始，進行することがわかる。さらに乾湿繰返しによって水分が供給されると，鋼材腐食は加速するものと考えられるが，この点については，今後 NC20 の乾湿繰返しを実施した結果と併せて評価を行いたい。

今後は，さらに電気化学的鋼材腐食指標の長期的な測定を 1 年程度継続したのちに，実際の鉄筋腐食状況を確認する予定である。

## 6. まとめ

(1) 塩分無混入，または，初期混入 $Cl^-$濃度 3.0 kg/m$^3$ のコンクリートを用いた供試体に促進中性化を行わない場合には，乾湿繰返しを実施しても自然電位や分極抵抗の低下は見られず，コンクリート中の鋼材腐食は進展していないものと推定された。ただし，フライアッシュをセメント代替で混和し，3.0 kg/m$^3$ の $Cl^-$を初期混入した場合は緩やかな鋼材腐食進行が推測された。

(2) 塩分無混入供試体に対して，中性化残り 5 mm まで促進中性化を行った場合，促進中性化期間中の自然電位や分極抵抗の低下は見られなかった。ただし，促進中性化後に乾湿繰返しを実施することで，自然電位や分極抵抗の低下が認められた。

(3) 初期混入 $Cl^-$濃度 3.0 kg/m$^3$ のコンクリートを用いた供試体に対して，中性化残り 5 mm まで促進中性化を行った場合，促進中性化期間中に自然電位や分極抵抗が低下した。また，フライアッシュを混和した供試体に対して，促進中性化後の乾湿繰返しを実施したところ，自然電位と分極抵抗は促進中性化期間中の値からさらに大きく低下した。

**謝辞**：本研究を遂行するに当たり，四国電力（株）からフライアッシュのご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

1) 轟俊太郎，石田哲也，田所敏弥，上田　洋：コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリートの中性化の影響，土木学会論文集，Vol. 75，No. 4，pp. 226-238，2019.
2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書改訂資料　設計編・施工編，コンクリートライブラリー 149，2018.3
3) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433，V-15，pp1-14，1991.2
4) 岸谷孝一，小林一輔，樫野紀元，宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化の関係，コンクリート工学論文集，Vol. 2，No. 1，pp. 77-84，1991.1
5) 佐伯竜彦，関谷　輝：混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，pp. 729-734，2002.7
6) 酒井正樹，神代泰道，小林利充：中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 1，pp. 603-608，2018.7