

論文 水分供給が中性化モルタル中の鋼材腐食に与える影響の近赤外分光法による評価

小山 悠太*1・上田 隆雄*2・時実 悠*3・山本 晃臣*4

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、コンクリートの塩化物イオン濃度が加わると鋼材腐食が加速するが、このような複合的な劣化要因を現場で同時に評価する手法は確立していない。そこで本研究では、近赤外分光法による吸光度スペクトルにより、鋼材腐食に影響を与える複数の要因を同時に評価することで、精度の高い鋼材腐食挙動評価の可能性を実験的に検討した。この結果、フライアッシュ混和モルタル中の鋼材腐食挙動を、モルタルの中性化、含水状況、塩化物イオン濃度の観点から近赤外分光法で評価できる可能性が示された。

キーワード: 中性化、鋼材腐食、モルタルの含水状態、近赤外分光法

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コンクリート中の鋼材腐食が挙げられる。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」という概念が導入されている¹⁾。このような照査の考え方が導入された背景として、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²⁾。

一方で、コンクリート中の鋼材腐食の支配要因である、コンクリートの中性化、含水状況、および、塩化物イオン（以下 Cl^- とする）濃度を現場で同時に測定し、コンクリート中の鋼材腐食環境を多角的に評価することで鋼材腐食状況を精度良く評価する手法は確立されていない。

これに対して、著者らは既往の検討で、近赤外分光法により、このようなコンクリートの劣化因子を検出できることを報告してきた。すなわち、コンクリートが含有する Cl^- は、波長 2266 nm 付近の吸光度ピーク³⁾、水分は波長 1425 nm 付近の吸光度ピーク⁴⁾、中性化と関係の深い $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、1412 nm 付近の吸光度ピーク⁵⁾により検出が可能であることを報告している。ただし、これらの劣化要因が複合的に作用する状況での測定データは不足しており、さらに、近赤外分光法による測定結果と、コンクリートやモルタル中の鋼材腐食状況との関係については十分に検討されていない。

そこで本研究では、フライアッシュを混和したモルタルに鋼材を埋設した供試体を用いて、中性化と Cl^- の作用を考慮するとともに、水分供給を行いながら、モルタル

中の鋼材腐食環境を近赤外分光法で評価し、電気化学的鋼材腐食指標の測定結果と比較することとした。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

本研究で用いたモルタル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、コンクリートの水結合材比は 60%とし、セメント代替で 30%のフライアッシュを混和した。また基準となる Cl^- 無混入の F 配合に対して、FC 配合には Cl^- 量が 5.0 kg/m^3 となるように細骨材代替で NaCl を混入した。表-1には、材齢 28 日で測定した圧縮強度を併せて示す。

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： $3290 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）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% ）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/cm^3 、比表面積： $3970 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、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。供試体のモルタル部分は $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ とし、かぶり 25 mm となるように丸鋼 $\phi 13 \text{ mm}$ を 1 本配置した。モルタルの打設翌日に脱型し、 20°C の恒温室中で 28 日間の封かん養生を行った。その後型枠側面の暴露面 1 面を除いて、他の 5 面はエポキシ樹脂を塗布した。この他に、圧縮強度試験用に $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の角柱モルタル供試体と、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、鉄筋モルタル供試体と同条件で養生、乾燥後に、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 面とした。

*1 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻 社会基盤デザインコース (学生会員)

*2 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 博士 (工学) (正会員)

*3 徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所講師 博士 (工学) (非会員)

*4 (株) フジタ建設コンサルタント 構造計画グループ 博士 (工学) (正会員)

表-1 モルタルの配合と諸性状

配合名	W/B (%)	S/B	単位量 (kg/m ³)					モルタルフロー (mm)	28 日圧縮強度 (N/mm ²)
			C	W	S	FA	NaCl		
F	60	2.7	330	284	1286	142	-	236	38.7
FC					1278				

2.2 促進中性化試験および水分浸透試験

養生終了後の鉄筋モルタル供試体を用いて、JISA 1153 に準拠した促進中性化 (20°C, 60 %R.H., CO₂ 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 の鉄筋モルタル供試体の中性化残り 5 mm となるため、モルタル中の鋼材腐食開始時点を想定して設定した。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°C, 60 %R.H.の恒温恒湿室中で気中保管した。

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、20°C, 60%R.H.恒温室内において、暴露面を水面に付けて水分浸透試験を実施した。

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、4 週間間隔を目安として立方体供試体を割裂し、モルタル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、JISA 1152 に準拠した方法により、モルタルの中性化深さを測定した。この測定値を用いて各配合モルタルの中性化速度係数を算出し、鉄筋モルタル供試体のモルタルの中性化深さが 20 mm に達する時期を推測した。

(2) 鉄筋モルタル供試体の水分浸透試験

中性化深さ 20 mm 程度まで促進中性化を行った鉄筋モルタル供試体、および、4 ヶ月間気中乾燥保管を行った未中性化鉄筋モルタル供試体について、材齢 5 カ月の時点で JSCE-G 582-2018 に準拠した方法により、暴露面 1 面からの水分浸透試験を実施した。

水分浸透試験を開始直前に、供試体側面 1 面から、図-1 に示したように φ7 mm, 20 mm 深さまでのドリル削孔を行った。水分浸透開始後、0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 12, 24, 48 時間経過した時点で、モルタル中の鋼材について電気化学的鋼材腐食指標の測定を行うとともに、供試体のかぶり位置、鋼材位置、鋼材奥位置のそれぞれについて、ドリル孔に棒状プローブを挿入した上で電気抵抗法によるモルタル含水率と、近赤外分光法による吸光度スペクトルの測定を行った。なお含水率測定用プローブは 2 本を 30 mm 離れたドリル孔に挿入し、2 点間の含水率を測定した。電気化学的鋼材腐食指標と近赤外分光法に

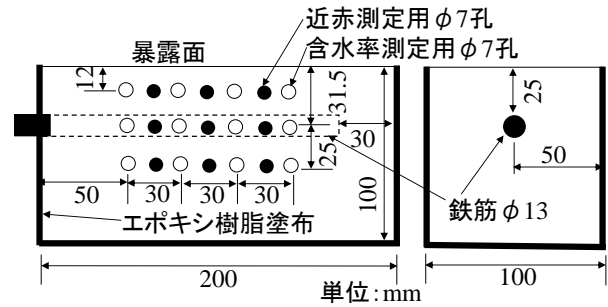


図-1 鉄筋モルタル供試体の概要 (測定位置)

よる吸光度スペクトルの測定の方法は後述する。なお、本研究ではドリル削孔が水分浸透や鋼材腐食に与える影響は考慮していない。

(3) 電気化学的鋼材腐食指標

促進中性化期間中および水分浸透試験中の鉄筋モルタル供試体を用いて、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。モルタル液抵抗は高周波数側 (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、水分浸透期間中に測定を実施する場合には、供試体の湿潤状態を維持したまま、20 °C 環境で測定を実施した。

(4) 近赤外分光法による吸光度スペクトルの測定

近赤外分光法による吸光度スペクトルの測定には、可搬型近赤外分光計 (波長域: 350~2500 nm, サンプリング間隔: 1.4 nm) を用いた。光源受光一体型細径プローブを図-1 に示したドリル孔先端面付近まで挿入し、以下の手順で吸光度の測定を行った。また、かぶり位置、鋼材位置、鋼材奥位置の各部位でドリル粉を 10 g 以上別途採取し、金属製専用セル (外径 φ25 mm, 測定面 φ10 mm) に 9 g 程度充填した上で、吸光度測定を実施した。

- 1) 白板の反射光の強さ $I_s(\lambda)$ を測定
- 2) 試料の反射光の強さ $I(\lambda)$ を測定
- 3) 式(1)により反射率 $R(\lambda)$ を算定し、これを用いて式(2)により吸光度 $A(\lambda)$ を算出する。

$$R(\lambda) = \{I(\lambda)/I_s(\lambda)\} \quad (1)$$

$$A(\lambda) = \log \{1/R(\lambda)\} \quad (2)$$

3. モルタルの中性化進行状況

各配合モルタルの促進中性化試験を実施した結果、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 \sqrt{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、FC 配合ともに、100 日程度の促進中性化期間で 20 mm の中性化深さに達している。これは、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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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、中性化速度はやや大きくなっているが、本実験条件では、NaCl の添加が中性化速度に与える影響は比較的軽微であったものと考えられる。

4. 電気化学的指標によるモルタル中鋼材腐食評価

養生終了後の促進中性化試験または気中保管と、その後の水分浸透試験に供した鉄筋モルタル供試体に関して、試験期間中の鋼材自然電位、分極抵抗およびモルタル液抵抗の経時変化を図-2 に示す。なお、図中に示した供試体名は配合名の後に目標中性化深さ (mm) が示されて

表-2 促進中性化試験結果

配合名	F	FC
中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$)	5.0	5.4
20 mm 到達促進中性化期間 (日)	112	93

おり、気中乾燥を行った供試体は F0 および FC0 としている。各データは 2 体の供試体測定値の平均値とし、供試体間のばらつきは比較的小さかった。F20 および FC20 は表-2 に示した日数の促進中性化を行ったため、FC20 の方が先に促進中性化期間が終了し、その後 F20 の促進中性化が完了するまで気中乾燥保管を行った。このため、F20 と FC20 の水分浸透試験は同時に開始している。F0 と FC0 の水分浸透試験は、F20 と FC20 の水分浸透試験終了後に同時に開始した。

4.1 促進中性化期間

図-2 (左側) の自然電位および分極抵抗の経時変化によると、塩分を混入していない F0, F20 は、いずれの場合も促進中性化期間中における自然電位や分極抵抗の低下はほとんど見られない。促進中性化を行った F20 は、中性化残り 5 mm まで中性化が進行しても、乾燥したモルタル中では鋼材腐食は進行していないと考えられる。

一方で、塩分を混入している FC0 と FC20 は、塩分無混入の場合と比較して自然電位が低く、ASTM C876-91

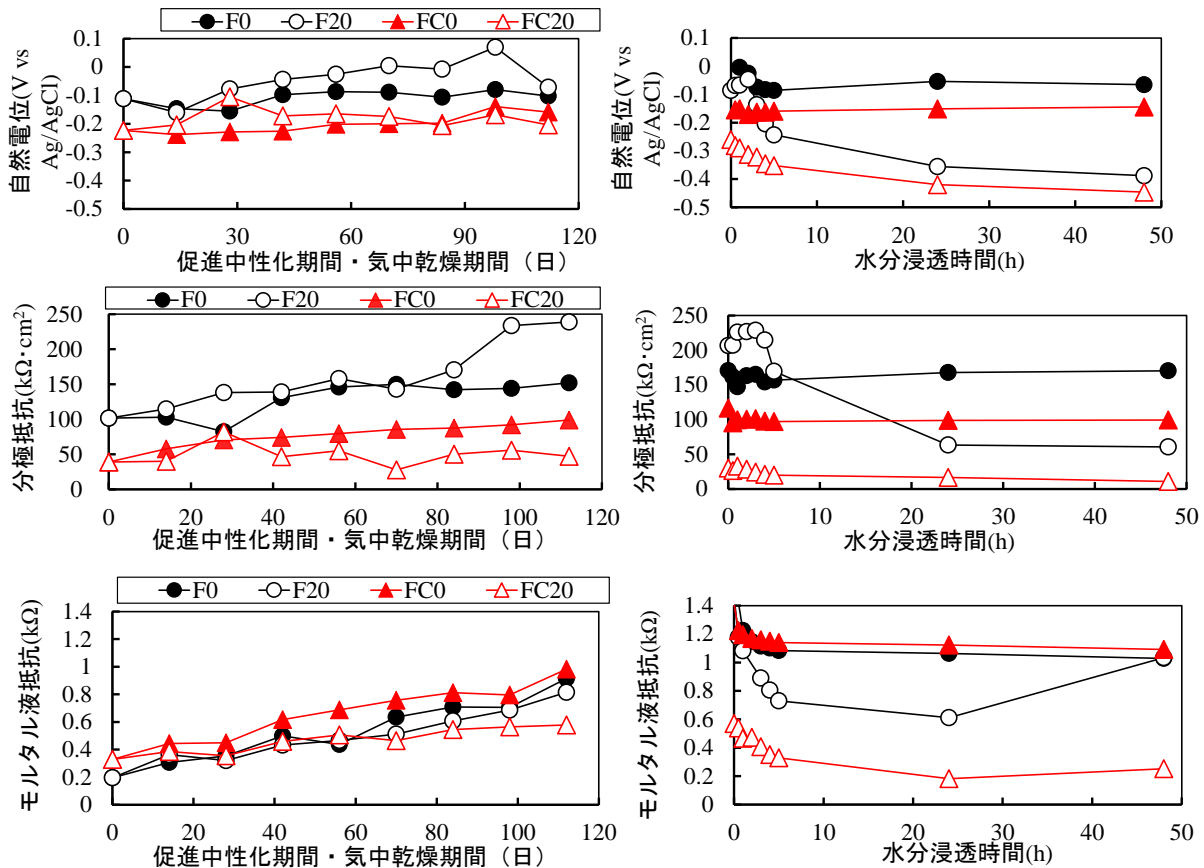


図-2 鉄筋モルタル供試体の促進中性化期間および水分浸透期間中における電気化学的鋼材腐食指標経時変化

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。FC 配合には 5.0 kg/m^3 の Cl^- を初期混入しており、さらに、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 低下と Cl^-/OH^- モル比の上昇でモルタル中の鋼材腐食は発生していると考えられる。特に、FC20 は、内在塩分と中性化の複合劣化状態であり、中性化が進行して Cl^- の濃縮層⁹⁾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、進行することから、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。

図-2 のモルタル液抵抗の経時変化より、いずれの場合も促進中性化期間中に抵抗値が増大している。これは促進中性化または気中保管によるモルタル乾燥の影響に加えて、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考えられる。ただし、FC20 は他の場合より抵抗値の上昇が小さく、促進中性化による細孔構造粗大化⁷⁾の影響が卓越した可能性がある。

4.2 促進中性化後の水分浸透期間

図-2 (右側) に示した水分浸透期間中の自然電位、分極抵抗とモルタル液抵抗の経時変化より、促進中性化を行っていない F0 および FC0 は、水分浸透に伴う測定値の変化が小さい。これは、前述したように、フライアッシュの混和により、緻密な細孔構造が形成されたことにより、今回実施した水分浸透試験期間では、モルタル中の鋼材位置まで水分が到達しなかったためと考えられる。

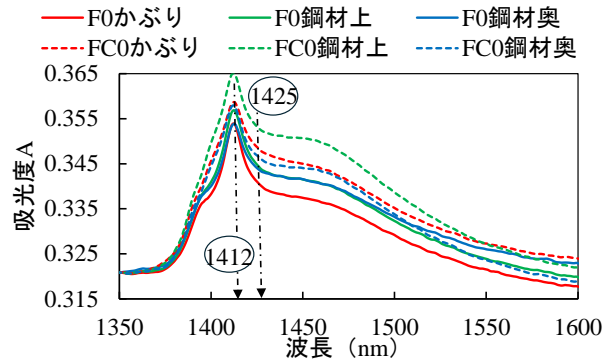
一方で、促進中性化を行った F20 と FC20 は水分浸透試験を開始後に、各測定値が大きく低下する傾向を示している。これより、促進中性化期間中のセメント硬化体の炭酸化により、細孔組織が粗大化し、比較的速やかに水分がモルタル中の鋼材近傍まで供給されたことによるものと考えられる。これより、促進中性化を行った、F20 と FC20 は水分の供給によって、鋼材腐食が急速に進行し、特に塩害と中性化の複合劣化である F20 は、厳しい腐食環境が形成されているものと考えられる。同様の傾向は、鋼材位置まで中性化を行った既往の検討⁸⁾においても確認されている。

5. 近赤外分光法

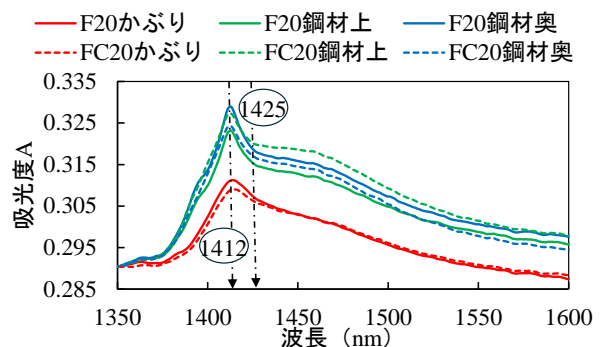
5.1 中性化に伴う吸光度スペクトルの変化

養生終了後の促進中性化試験または気中保管を行った鉄筋モルタル供試体を用いて測定した、供試体中各位置の吸光度スペクトルの一部を図-3 に示す。なお、同一要因の供試体間で測定結果のばらつきは小さかったことから、これ以降の実験結果は代表例を示すこととする。

近赤外分光法で測定される吸光度スペクトルの様々な波長で現れる吸光度ピークは、光の照射対象物が含有す



(a) 中性化なし供試体



(b) 中性化供試体

図-3 促進中性化期間終了後の供試体中各位置における吸光度スペクトル(波長 1350~1600)

る種々の物質濃度に相当するが、水 (H_2O) に相当すると考えられる吸光度ピークの一つは波長 1425 nm 付近に存在し、図-3 に示した 1400~1500 nm が水の波長域と考えられる。また、図中の波長 1412 nm 付近に見られる吸光度のピークは、著者らの既往の検討⁸⁾より、モルタルが含有する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の OH 基の第一倍音に相当するものであることが明らかになっている。

図-3 より、促進中性化を行っていない F0 および FC0 では、1412 nm 付近の吸光度ピークが供試体中の位置に関わらず同程度の高さで検出されているのに対して、中性化を行った F20 と FC20 については、かぶり部分の吸光度ピークのみが大きく減少している。これは、かぶり部分 20 mm 深さまでの中性化により、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の大部分が消失したためと考えられる。このような波長 1412 nm 付近の吸光度ピークの変化を定量的に表す指標として、水のピーク波長 1425 nm からの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の OH 基の寄与分として 2 つの波長に相当する吸光度の差を差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ と定義する。

促進中性化期間終了後の供試体中各位置における差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ を図-4 に示す。これによると、ドリル粉による測定結果では、中性化を行っていない F0 および FC0 の差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ は、供試体中位置によらず、同程度の値となっているが、中性化を行った F20

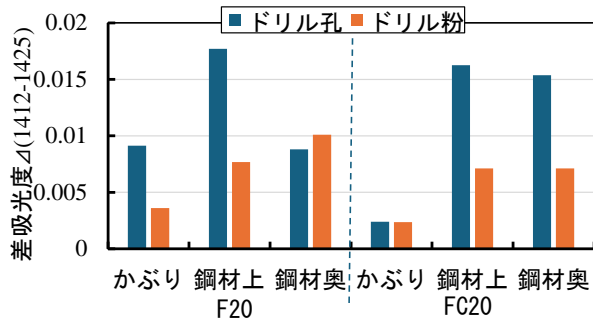
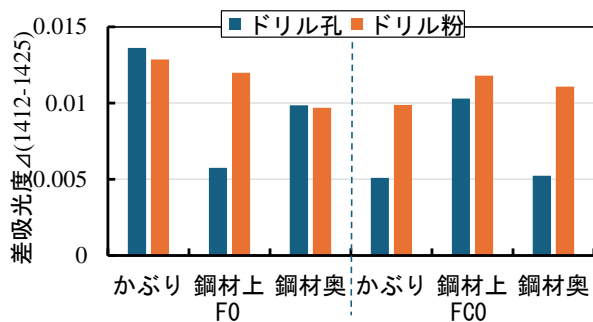


図-4 促進中性化期間終了後の供試体中各位置における差吸光度 $\Delta(1412-1425)$

および FC20 の場合は、かぶり位置の差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ が他の位置の測定値より明確に低下しており、中性化による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の減少を確認できる。

一方で、ドリル孔先端面の測定結果から得られた差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ の傾向はややばらついている。これは、ドリル粉がドリル孔全体の平均を示しているのに対して、ドリル孔先端面の場合は、測定面のみの値となることやドリル削孔時の摩擦等の影響が考えられる。

5.2 塩分濃度の変化に伴う吸光度スペクトルの変化

著者らは過去の検討³⁾において、コンクリートやモルタル中の Cl^- 濃度は、近赤外分光法における波長 2266 nm の吸光度と相関性が高いこと、さらには、下記の式に示される差スペクトル $\Delta 2266$ を指標として定量的評価が可能となることを報告してきた。

$$\Delta 2266 = A_{2266} - \left[\left(A_a + \frac{A_b - A_a}{\lambda_a - \lambda_b} \right) \times (\lambda_{2266} - \lambda_a) \right] \quad (3)$$

ここに、 A_{2266} 、 A_a 、 A_b ：波長 2266 nm、波長 a(2230 nm)、波長 b(2300 nm)に対する吸光度

λ_a 、 λ_b ：波長 a(2230 nm)、波長 b(2300 nm)

促進中性化を行っていないモルタル供試体について、3 ヶ月間の気中保管後に測定した吸光度スペクトルを図-5 に示す。これより、既往の検討と同様に、塩分を混入した FC0 供試体の場合には、供試体中の場所によらず、波長 2266 nm 付近に、モルタル中の Cl^- に起因すると考えられる吸光度ピークが検出されている。

一方で、促進中性化または気中保管期間終了後の FC0 および FC20 供試体中各位置における差スペクトル $\Delta 2266$ を図-6 に示す。これによると、気中保管を行った

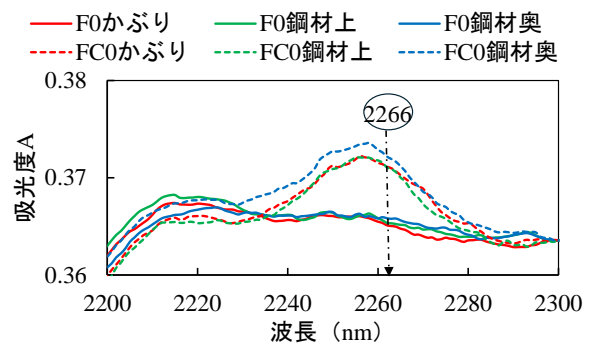


図-5 Cl^- 濃度の変化に伴う供試体中各位置における吸光度スペクトルの変化

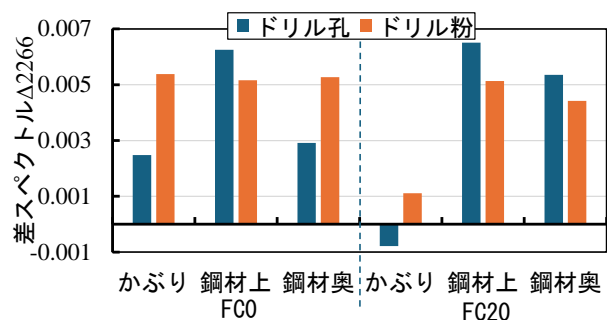


図-6 促進中性化期間終了後の供試体中各位置における差スペクトル $\Delta 2266$

FC0 供試体は、供試体中位置によらず、ほぼ一定の差スペクトル $\Delta 2266$ を示しているのに対して、促進中性化を行った FC20 供試体は、かぶり位置の差スペクトル $\Delta 2266$ のみが大きく低下している。これは、近赤外分光法によって検出している Cl^- は、セメント水和物にフリーデル氏塩として固定されている状態のものである³⁾ことから、中性化した部分では、フリーデル氏塩が分解され、遊離した Cl^- は本手法で検出できないためと考えられる。

5.3 水分浸透に伴う吸光度スペクトルの変化

養生終了後の促進中性化試験または気中保管と、その後の水分浸透試験に供した鉄筋モルタル供試体に関して、水分浸透 48 時間の間に経時的に測定した F20 供試体かぶり部分の吸光度スペクトルの一部を図-7 に示す。

図-7 より、供試体暴露面からの水分浸透時間に伴って水分に相当する波長 1425 nm 付近の吸光度ピークが徐々に増大していることがわかる。このような吸光度ピークの変化を定量的に表す指標として、図に示すようにほとんど吸光度が変化しない波長 1350 nm からの波長 1425 nm における吸光度の差を差吸光度 $\Delta(1350-1425)$ と定義する。

促進中性化を行った F20 および FC20 供試体について、水分浸透に伴うかぶり位置における含水率と差吸光度 $\Delta(1425-1350)$ の変化を図-8 に示す。これによると、F20、FC20 ともに水分浸透時間に伴って、かぶり位置の含水率

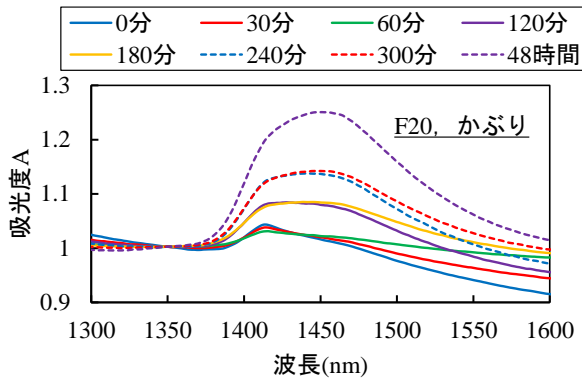


図-7 水分浸透に伴うかぶり位置における吸光度スペクトルの変化 (F20 供試体)

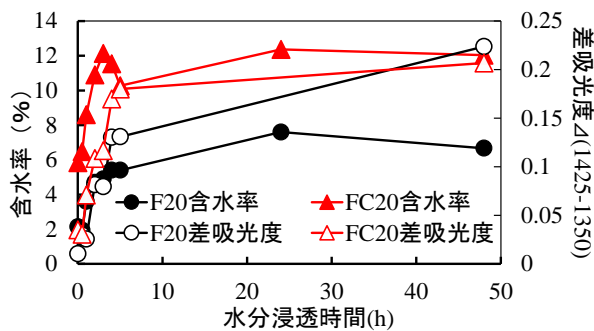


図-8 水分浸透に伴うかぶり位置における含水率と差吸光度 $\Delta(1425-1350)$ の変化

は上昇しており、特に最初の5時間で急速に水分浸透が進んでいることが分かる。また、塩分を含有しているFC20は塩分を含有していないF20よりも高い含水率を示している。これは、モルタル中の Cl^- 濃度が高いほど平衡含水率が高くなる⁹⁾ためと考えられる。このような含水率の増大傾向に対して、差吸光度 $\Delta(1425-1350)$ も同様の増大傾向を示していることから、モルタル内部への水分浸透に伴う含水率の変化を近赤外分光法で検出することは可能であると考えられる。

図-2に示したように、モルタル中の鋼材腐食はモルタルの中性化、含有塩分、水分供給の影響を強く受けて進行するが、これらの各要因は近赤外分光法で検出可能であり、得られた吸光度スペクトルを解析することで、モルタルやコンクリート中の鋼材腐食挙動を多角的に評価・予測することができると考えられる。今後は、実際の鋼材腐食状況との整合性を検証するとともに、適切なドリル削孔の方法やデータ解析の手法についてさらに検討を進めたい。

6. まとめ

(1) フライアッシュを内割30%混和したモルタルに対して促進中性化を行わない場合には、水分供給を行ってもモルタル中铁筋の自然電位や分極抵抗の低

下は見られなかった。一方、促進中性化後に水分供給を行った場合には、自然電位や分極抵抗の低下が見られた。特に、 5.0 kg/m^3 の Cl^- を初期混入した場合は、促進中性化期間中から分極抵抗が低下した。

- (2) 促進中性化を行った鉄筋モルタル供試体のかぶり部分の吸光度スペクトルを測定した結果、中性化に伴って差吸光度 $\Delta(1412-1425)$ が低下するとともに、 Cl^- を初期含有する場合には、中性化に伴って差スペクトル $\Delta 2266$ の低下が確認された。
- (3) 促進中性化を行った鉄筋モルタル供試体の暴露面から水分供給を行った結果、かぶり部分の含水率上昇に伴って、差吸光度 $\Delta(1425-1350)$ が上昇する傾向を示した。

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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 郡 政人，古川智紀，上田隆雄，水口裕之：近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定，セメント・コンクリート論文集，No. 61，pp. 189-196，2007.12.
- 4) 山川和輝，上田隆雄，郡 政人，七澤 章：近赤外分光法によるモルタル表層物性の評価に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 1801-1806，2013.7
- 5) 上田隆雄，松田彩妙，山本晃臣，塚越雅幸：フライアッシュの混和と中性化が反応性骨材含有コンクリートの近赤外分光スペクトルに与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp. 1816-1821，2012.7
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 原田健二，佐藤駿介，下村 匠：塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 745-750，2015.7