

論文 乾湿繰り返し作用を受けるフライアッシュコンクリートの鉄筋腐食性状に及ぼす初期養生および水結合材比の影響

門屋 朱里^{*1}・春日 翔平^{*2}・河合 慶有^{*3}・氏家 勲^{*4}

要旨：本研究は、フライアッシュをセメント代替として混和し、塩水を用いた乾湿繰り返し試験により水結合材比および初期養生が鉄筋腐食抵抗性に及ぼす影響について検討を行った、その結果、材齢初期に乾燥の影響を受けた場合においても水セメント比を小さくすることで塩化物イオンの拡散を抑制できることが分かった。また、養生の相違により、試験期間が長くなるに従い塩水の浸透深さおよび供試体内部の含水分布が変動し鉄筋腐食抵抗性に影響することが示唆された。

キーワード：フライアッシュ, 鉄筋腐食, 塩化物イオン, 水分浸透, 含水分布

1. はじめに

近年、我が国においては東日本大地震に伴う福島原子力発電所事故により原子力発電事業の根本的な見直しを迫られており、石炭火力発電に依存せざるを得ない状況となっている。そのため、石炭火力発電に伴って多量に発生する産業副産物であるフライアッシュをコンクリート用の混和材として有効利用することが推進されている。さらに、戦後復興期に集中的に整備されてきたコンクリート構造物の早期劣化や損傷の顕在化、また高齢化に伴い適切な維持管理を通じた長寿命化が求められている。

コンクリート構造物の耐久性の中で鉄筋腐食に対する抵抗性は非常に重要である。コンクリート構造物において鉄筋腐食を発生させる原因の一つに塩害がある。塩害は、主に海洋環境下の構造物に外部から塩化物イオンが侵入することで鉄筋が腐食する現象である。鉄筋付近の塩化物イオン含有量が限界値に達すると不動態皮膜が破壊され鉄筋腐食は発生する。したがって、鉄筋コンクリートの耐久性を向上させるためにはコンクリート内部への腐食因子の侵入を抑制し物質移動抵抗性に優れたかぶりコンクリートが必要となる。既往の研究によると、フライアッシュをセメント置換でコンクリートに混和し十分な湿潤養生を施すことで、外部からの塩化物イオンの侵入を抑制する効果が確認されている。一方で、材齢初期に乾燥の影響を受けたコンクリートにおける鉄筋腐食抵抗性は著しく低下することが指摘されている¹⁾。しかし、養生条件の異なる低水結合材比のフライアッシュコンクリートにおけるかぶりの透気性や水の浸透性、また塩化物イオンの拡散性の観点からは鉄筋腐食抵抗性について明確な差が認められていない²⁾。

コンクリート中の塩分浸透は、移流・拡散により深部

へ進行するため、水分の浸透深さに影響を受ける。さらに塩化物イオンは空隙中の不飽和領域における水中を移動することから塩化物イオンの移動速度はコンクリート中の含水状態に依存すると考えられる。特に、コンクリート中の含水率の低下により塩分浸透は抑制されることが指摘されている²⁾。さらに、乾燥環境において十分な材齢が経過したコンクリート中における含水状態は初期のものとは異なると予想される。なかでも、フライアッシュコンクリートにおいては、ポゾラン反応により水酸化カルシウムや水が消費されるとともに、空隙構造が緻密化されることから、水の浸透深さや含水分布に影響すると考えられる。

以上より、フライアッシュの使用が鉄筋腐食抵抗性に与える影響を検討するには水分が重要な因子であると考えられる。そこで、本研究では乾湿繰り返し試験による水分の浸透および乾燥に伴う水分の逸散がコンクリート中の塩化物イオン濃度分布および鉄筋腐食性状に及ぼす影響を把握することを目的とした。また、水結合材比、フライアッシュの混和や初期養生条件をパラメータとして供試体を作製し、自然電位および分極抵抗測定さらに割裂後の供試体より採取した鉄筋を用いて腐食減量を測定することにより腐食性状の検討を行った。水分の浸透深さおよび乾燥に伴う水分の逸散状況については供試体中に銅電極を埋設し LCR メータにより抵抗値の経時変化を測定することにより検討を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合

本実験では、水結合材比を 50 および 65% の 2 水準とした。混和材にはⅡ種フライアッシュ(密度:2.21g/cm³)を

*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 助教 Ph.D. (正会員)

*4 愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

表-1 配合

供試体	W/B(%)	単位量 kg/m ³						
		水 W	セメント C	FA	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
OPC50	50	175	350	-	845	922	2.80	2.45
OPC65	65	175	269	-	877	957	1.61	1.35
FA50	50	175	245	105	827	903	2.45	1.75
FA65	65	175	188	81	863	942	1.61	1.35

使用し、セメント重量の 30%を内割り置換した。なお、簡単のためフライアッシュを混和したものをFA、混和していないものを OPC、水結合材比をアルファベットの後に表記した数字により示す。コンクリートの配合を表-1に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を使用した。細骨材には、愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用砕砂(表乾密度 2.55g/cm³、吸水率 1.65%、粗粒率 2.8)、粗骨材には愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用碎石(表乾密度 2.61g/cm³、吸水率 0.80%)を使用した。化学混和剤には、変性リグニンスルホン酸系 AE 減水剤、また OPC に対しては変性ロジン酸化合物系 AE 剤を 100 倍に希釈したものを使用し、FA に対してはフライアッシュ用の高アルキルカルボン酸系 AE 剤を 10 倍に希釈したものを使用した。

2.2 供試体の作製および養生

供試体寸法は 200×200×200mm の角柱供試体とし、D22 の異形鉄筋を 1 本埋設した。鉄筋のかぶりはいずれの供試体においても 40mm とした。供試体概要を図-1 に示す。打設後、24 時間経過時に脱型し気中養生または湿布養生を施した。気中養生は 20℃恒温室内において屋内曝露とし、湿布養生は水に濡らしたウエスを供試体に巻きつけビニルシートで覆い 20℃ の恒温室内で材齢 28 日まで行った。養生終了後に設定したかぶりを確保した面以外から腐食因子が侵入することを防ぐためダクトテープを用いてシールを施した。また、かぶり面の供試体中央部に塩ビ管をエポキシ樹脂により固定した。なお、供試体はいずれの配合においても 2 体ずつ作製した。

2.3 塩害促進試験および測定

塩害促進試験は、20℃ の恒温室内において塩水による湿潤期間 3 日と乾燥期間 4 日の 1 週間を 1 サイクルとした乾湿繰り返しにより実施した。試験に使用した塩水の濃度は、腐食の発生を早めるために 10%とした。1 サイクル毎の湿潤期間直後に自然電位および分極抵抗を測定した。測定には日鐵テクノリサーチ製の CM-SE1 に照合電極として Ag/AgCl を用いた。また、得られた自然電位は、測定値から 130.1mV を減ずることにより CSE 値に換算した。腐食電流密度に関しては、測定された分極抵抗値から Stern-Geary 式の K 値を 0.026 として算出した。

水結合材比 65%の供試体は 43 サイクル後、水結合材

比 50%の供試体は 45 サイクル後に供試体を割裂し、水分の浸潤位置をマークした。腐食減量は、採取した埋設鉄筋を 40℃の環境試験槽でクエン酸二アンモニウム溶液 (10%) に 3 日間浸漬し、測定された重量減少より算出した。また、塩水を浸透した面から 5, 20, 40, 50, 70mm の深さにおいて電動ドリルを用いて粉体を採取した。採取した試料は、JIS A 1154 に準じて塩素濃度を電量滴定方式デジタル塩分計ソルメイト-100/W を用いて測定し、塩化物イオン含有量に換算した。

2.4 埋設銅電極による抵抗測定

乾湿繰り返し試験の湿潤・乾燥期間における水分浸透および乾燥に伴う水分逸散状況を把握するために 200×200×200mm の角柱供試体を作製した。供試体にはリード線を接続した銅電極 φ5mm をかぶり面から 10, 30, 50, 70mm の深さに埋設し、乾湿繰り返しに伴う抵抗値の変動を LCR メータ (KOKUYO ELECTRIC, KC-555) により測定した。写真-1 に打設前の銅電極配置状況を示す。

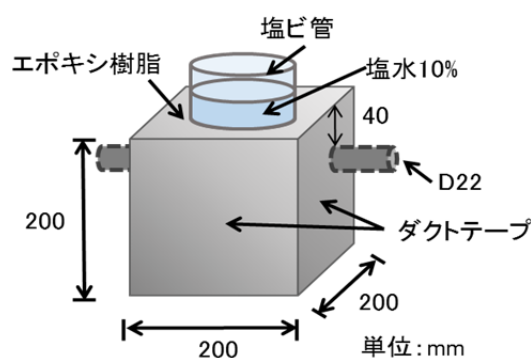


図-1 供試体概要

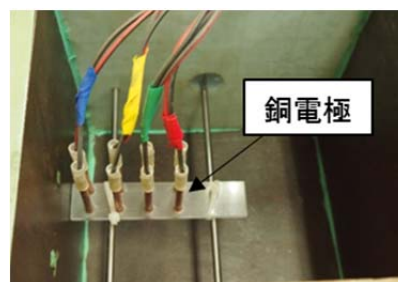


写真-1 銅電極配置状況

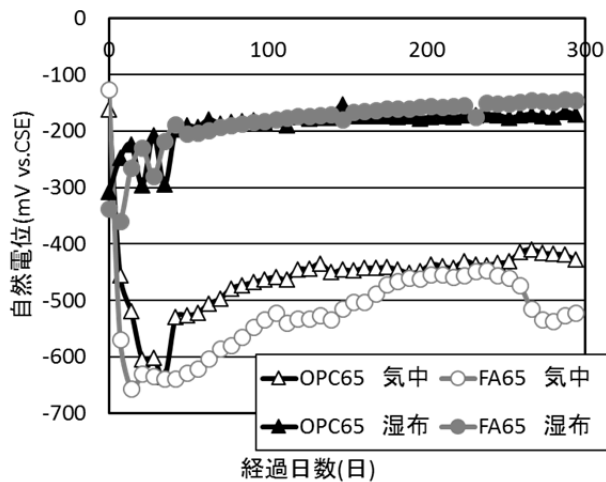


図-2 自然電位（水結合材比 65%）

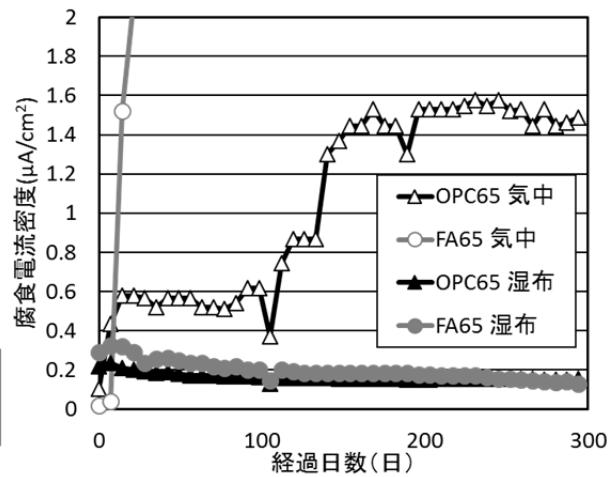


図-3 腐食電流密度（水結合材比 65%）

2.5 トレント法による透気試験

材齢 28 日および割裂前の乾燥期間直後に、トレント法による透気試験を供試体底部より実施した。本実験では、エフティーエス製の Permea-TORR を使用した。測定は、各供試体において 1 回行った。

3. 塩害促進試験結果

3.1 自然電位および分極抵抗

図-2 に、乾湿繰り返し試験に 294 日間供した水結合材比 65%の供試体において測定された自然電位を示す。この図より、OPC65 気中および FA65 気中の供試体においては、2 サイクル後に自然電位が-350mV vs. CSE より卑な方向に変化していることが認められる。一方で、FA65 湿布の供試体においては、乾湿繰り返し 42 サイクル後の自然電位が約-145mV vs. CSE と比較的貴な値を示していることから鉄筋腐食は発生していないものと判定される。OPC65 湿布の供試体においては、本実験の試験範囲において自然電位がわずかに卑な方向に変化し始めているため、鉄筋表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達した可能性があるかと推察される。図-3 に各供試体において測定された分極抵抗値から推定した腐食電流密度の結果を示す。OPC65 気中においては、乾湿繰り返し 2 サイクル後に約 $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と中程度の腐食を呈した。また、試験期間が長くなるに従い、腐食電流密度は大きくなる事が認められる。特に、試験期間が 140 日を経過した供試体において腐食電流密度の著しい増大が確認された。また、3.3 節で後述する見掛けの拡散係数から当該試験期間におけるかぶり表面の塩化物イオン濃度を Fick の拡散方程式に基づき算出すると、約 $1.9\text{kg}/\text{m}^3$ に達していたと推定される。FA65 気中の供試体においては、乾湿繰り返し 2 サイクル後に推定される腐食電流密度が $2.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超える非常に激しい腐食を呈した。

一方、水結合材比 50%の供試体は、本実験の試験期間においていずれの供試体においても自然電位および腐食電流密度は腐食傾向を示さなかったため結果のグラフを割愛している。以上のことから、水結合材比が高く気中養生により材齢 28 日経過したコンクリートにおいては、塩水の浸透および塩化物イオンの拡散を抑制する効果が低いといえる。また、鉄筋表面の塩化物イオン濃度が腐食発生限界イオン濃度に達し鉄筋腐食が発生すると、水と酸素が十分に供給されることにより非常に激しい腐食を呈するものと考えられる。塩水の浸透および乾燥に伴う水分の逸散状況、またコンクリートの透気性については 4 章で検討を行う。

3.2 鉄筋腐食性状および腐食減量

写真-2 に割裂後の FA65 および OPC65 気中の供試体および鉄筋腐食の発生状況を示す。FA65 気中の供試体においては、水分の浸潤深さが鉄筋まで到達し、鉄筋腐食が全面に拡大していることが認められる。一方で、OPC65 気中の供試体においては、浸潤深さが約 23mm と鉄筋には到達していないものの局所的な腐食の発生が確認された。乾湿繰り返し試験に 43 サイクル供した各供試体より採取した鉄筋の腐食減量は、約 5.9~6.6%であった。



写真-2 割裂後の供試体
(左：FA65 気中、右：OPC65 気中)

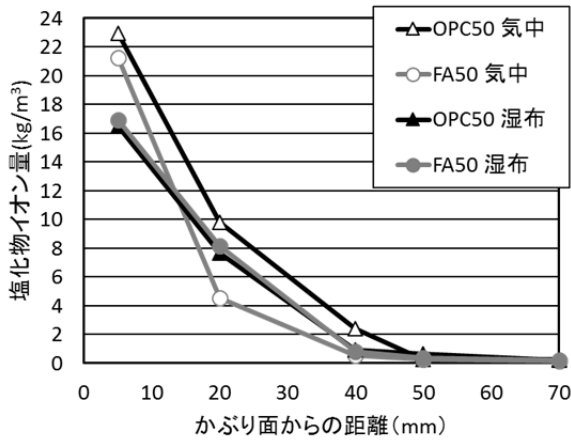


図-4 塩化物イオン濃度分布 (水結合材比 50%)

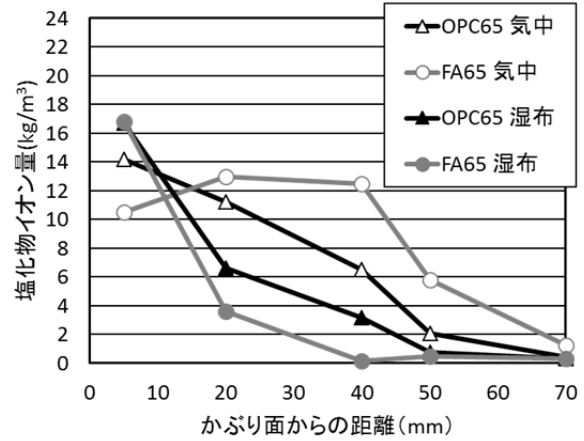


図-5 塩化物イオン濃度分布 (水結合材比 65%)

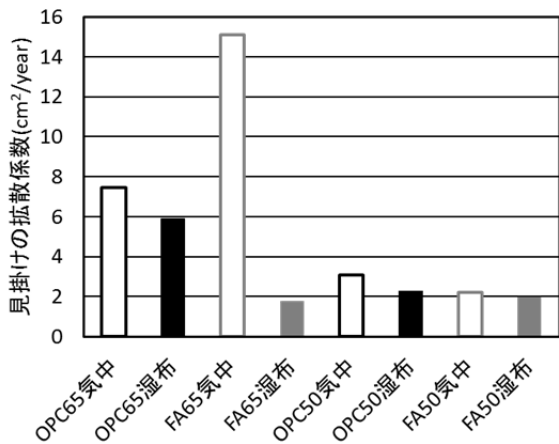


図-6 見掛けの拡散係数

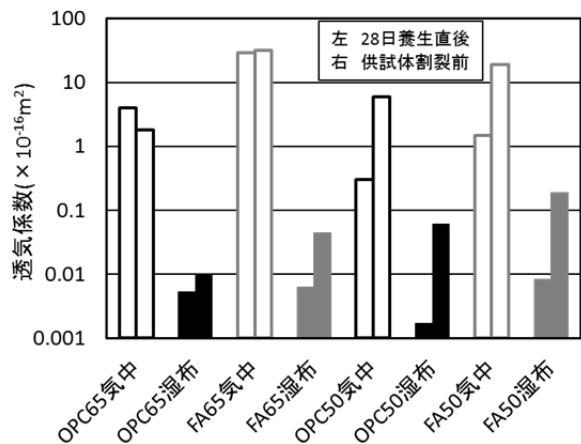


図-7 透気係数

3.3 塩化物イオンの拡散性状

図-4 および図-5 に各供試体において測定された塩化物イオン濃度の分布を示す。OPC50 気中の供試体においては、かぶり 40mm の深さにおいて測定された塩化物イオン濃度は約 2.4kg/m^3 と比較的高い値を示しているが、他の供試体ではいずれのケースにおいても腐食発生限界塩分濃度 1.2kg/m^3 に達していないことが確認された。これらの結果は、電気化学的測定により検討した結果および割裂後の鉄筋表面の目視確認による結果と合致している。特に、フライアッシュを混和したコンクリートまたは湿布養生を施したコンクリートにおいては、かぶり 40mm より深部における塩化物イオンの拡散を抑制する効果が高いことが確認された。また、FA50 気中と FA50 湿布の供試体における深さ 20mm の結果を比較すると、FA 湿布の供試体における塩化物イオン濃度が FA 気中の供試体に比べ高い結果となっていることが認められる。この結果は、水分の浸透深さの違いに起因する移流層による影響と推察され、4.1 節で詳述することとする。

また、水結合材比 65% の供試体においては、3.1 節および 3.2 節で腐食の発生・進展が確認された FA65 気中、OPC65 気中および OPC65 湿布の 3 ケースの供試体にお

いて、かぶり 40mm の深さでの塩化物イオン濃度が約 $3 \sim 12.5\text{kg/m}^3$ と非常に高い濃度となっていることが確認された。しかしながら、FA65 湿布の供試体における塩化物イオンの濃度分布は FA50 気中において測定された分布と同様の傾向を示した。以上の結果を用いて、Fick の拡散方程式に基づき各供試体における見掛けの拡散係数を推定した。なお、表層部においては中性化が同時に進行していることも考えられるため、20mm 以深の測定値を回帰分析に使用した。

$$C = (C_0 - C_i) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここで D_{ap} :見掛けの拡散係数(cm^2/year)、 t :期間(year)、 x :距離(cm)、 C_0 :表面塩化物イオン濃度、 C_i :初期に含有していた塩化物イオン濃度である。

図-6 に各供試体における見掛けの拡散係数を示す。鉄筋腐食の発生が確認されなかった供試体において推定された拡散係数は、約 $1.8 \sim 2.2\text{cm}^2/\text{year}$ と鉄筋腐食の発生が確認された供試体における拡散係数より比較的低い値となった。また、養生の相違に着目すると、いずれの供試体においても湿布養生より気中養生を施した供試体

における拡散係数は大きくなることが認められる。この結果は、図-7 に示す透気係数においても同様の結果が得られている。特に FA65 の供試体においては初期養生の効果が顕著であることが確認された。一方、FA50 の供試体においては見掛けの拡散係数に関して養生の相違による明確な差は認められなかった。このことから、水結合材比によって、フライアッシュを混和したコンクリートにおける乾湿繰り返し作用による塩害に対する鉄筋腐食抵抗性に及ぼす初期養生の効果は異なるものと考えられる。4 章では、乾湿繰り返し作用によるコンクリート深部への塩水の浸透および乾燥に伴う水分逸散について検討を行う。

4. 乾湿繰り返し作用が含水・乾燥過程に及ぼす影響

4.1 水分の浸潤深さ

図-8 に各供試体の割裂面において測定された水分の浸潤深さの最大値と見掛けの拡散係数の関係を示す。この図より、水分の浸潤深さおよび見掛けの拡散係数には相関があることが認められる。すなわち、浸潤深さが大きくなるほど塩化物イオン濃度から推定される見掛けの拡散係数も大きくなることが確認された。特に、気中養生を施したコンクリートにおける浸潤深さは大きくなる傾向が認められることから、塩化物イオンの拡散性の増大が懸念される。しかしながら、FA50 の供試体において

は、湿布養生を施した供試体における浸潤深さが気中養生を施した供試体と同程度、もしくはわずかに大きくなることを確認されており、他のケースとは異なる傾向を示した。この結果は、3.3 節において FA50 湿布の供試体におけるかぶり面から 20mm の深さにおける塩化物イオン濃度が FA50 気中の供試体における濃度より高い値を示したことと関連していると推察される。

4.2 抵抗測定による含水・乾燥過程に関する考察

図-9 および図-10 に LCR メータにより測定した抵抗値の結果を示す。水結合材比が 50% の供試体においては塩水を浸透させた面より 10mm に配置した電極における抵抗値に乾湿作用による変動が明確に認められた。気中

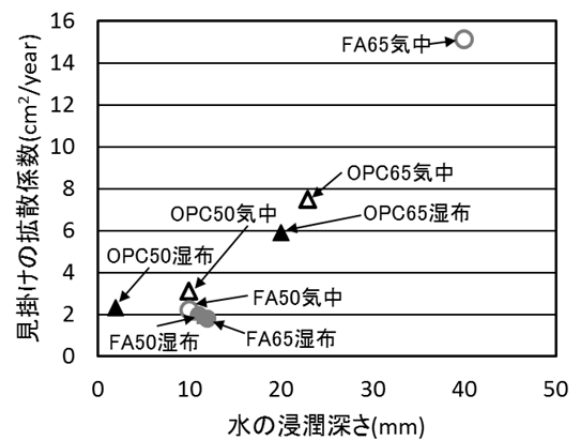


図-8 見掛けの拡散係数と水の浸潤深さ

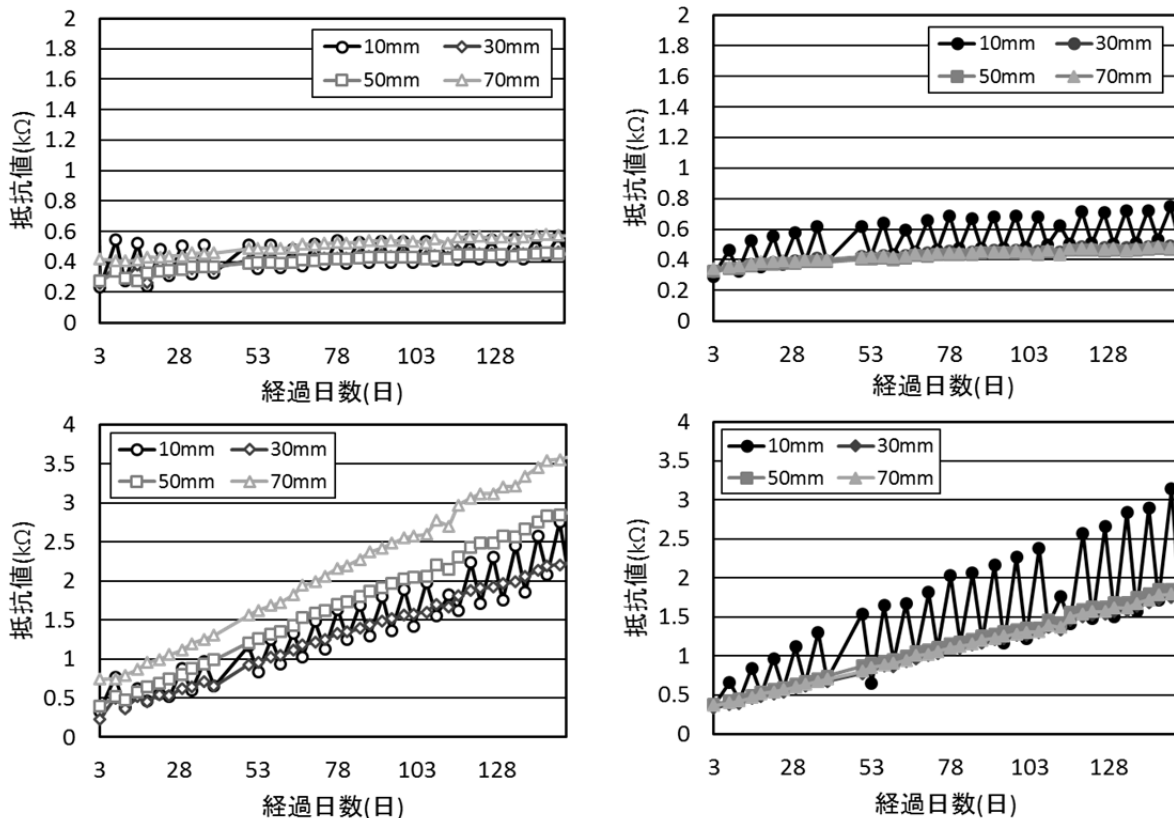


図-9 水結合材比 50% の抵抗値の変化 (左上: OPC 気中, 右上: OPC 湿布, 左下: FA 気中, 右下: FA 湿布)

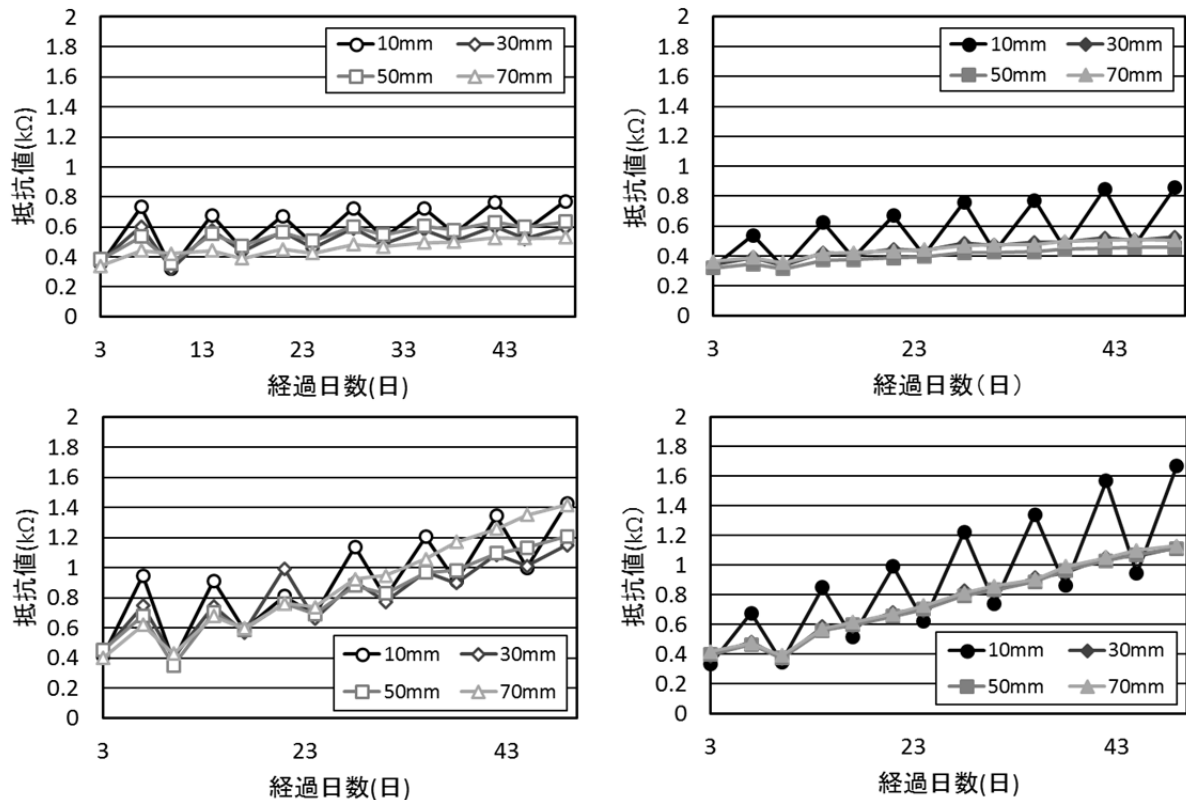


図-10 水結合材比 65%の抵抗値の変化 (左上：OPC 気中，右上：OPC 湿布，左下：FA 気中，右下：FA 湿布)

養生を施した供試体においては、試験初期に深さ 30mm においても抵抗値の変動が確認されており、塩水は試験開始後に深さ 30mm まで到達していたと考えられる。さらに、試験期間が長くなるに従い供試体内部の乾燥が進行すると、深さ 30mm における抵抗値の変動は小さくなっていくことが認められる。すなわち、塩水の浸透深さは供試体の乾燥に伴う水分の逸散および空隙構造の緻密化に伴い徐々に小さくなる傾向があり本試験期間においては 10~30mm の範囲に収まると推察された。これらの結果は、割裂後に確認された水分の浸潤深さの結果と合致している。一方、湿布養生を施した供試体においては 30~70mm の深さにおける電極の抵抗値に大きな差は無いことが認められる。また、フライアッシュを混和した供試体の方が養生の相違に関わらず供試体内部の乾燥傾向が高いことが認められる。これらの結果は、乾燥に伴う水分の逸散およびポズラン反応による水分の消費による効果と考えられる。

水結合材比 65%の供試体においては、特に気中養生の供試体において深さ 70mm まで抵抗値の変動が認められ、乾湿繰り返し 2 サイクル後に鉄筋腐食の発生が確認された結果と合致している。また、水結合材比 50%の供試体における結果と同様に、試験期間が長くなるに従い供試体深部に配置した電極における抵抗値の変動は小さくなることを確認された。特に FA65 気中の供試体においては、塩水の浸透深さが小さくなるとともに深部ほど乾燥

が進んでいる含水分布にあることが分かった。

5. 結論

本研究により、セメント代替でフライアッシュを混和させた場合、養生の相違により塩水の浸透深さおよび供試体内部の含水分布が変動し鉄筋腐食抵抗性に影響することが示唆された。また、水結合材比 50%の供試体では、養生の相違により塩化物イオンの拡散性については差が認められなかった。しかし、透気性については明確な差が確認されていることから、含水分布の結果を踏まえると鉄筋腐食反応で消費される鉄筋表面の酸素透過についてはさらなる検討を要する。

参考文献

- 1) 岡崎慎一郎，氏家勲：養生の相違がフライアッシュコンクリートの物質移動抵抗性および空隙組織構造に与える影響，材料，Vol.61，No.10，pp.811-818，2012
- 2) 春日翔平，高江直樹，岡崎慎一郎，氏家勲：フライアッシュコンクリートのかぶり厚さがRCの腐食性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vo1.35，No.1，pp.109-114，2013
- 3) 佐伯竜彦，二木央：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.963-968，1996