

# 論文 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

春日 翔平\*1・高江 直樹\*2・岡崎 慎一郎\*3・氏家 勲\*4

**要旨:** フライアッシュを混和材として使用し, 様々なかぶり厚さをもつ RC 供試体を塩水乾湿繰り返し試験に供し, 分極抵抗や自然電位に加え物質移動の観点から鉄筋腐食抵抗性に関する検討を行った。フライアッシュを混和させた場合, 腐食抵抗性は養生時の水分状態に大きく影響を受けることが確認された。この原因としては湿潤状態を施した場合には, 鉄筋近傍のコンクリートの含水状態が極めて高く, 腐食に必要な酸素が供給されないことが要因である可能性があると考えられる。

**キーワード:** フライアッシュ, かぶり, 鉄筋腐食, 塩化物イオン

## 1. はじめに

我が国では東日本大地震に伴う福島原子力発電所事故に伴い, 原子力発電事業の根本的な見直しを迫られている。このような背景のもとで, 国内では現状, 石炭火力発電に依存せざるを得ない状況であり, 今後, 石炭火力発電に伴って発生する多量の石炭灰の処分が問題となるのは確実な情勢である。このような状況下において, 石炭灰の処分方法の一つであるコンクリート用混和材としてセメント代替での利用が, 廃棄物処分法として一段と注目を浴びている。

フライアッシュを混和材として使用したコンクリートは, フレッシュ性状や物質移動抵抗性に優れていることがこれまでの研究成果により明らかにされており<sup>1)</sup>, 今後, RC 部材への適用のためには, 塩害や中性化などによる鋼材腐食性状を検討する必要がある。

フライアッシュをセメント置換で混和させた場合, 湿潤養生が施された場合において, 十分に材齢を確保する

と, 水や気体などの流体移動抵抗性を高め<sup>2)</sup>, さらに各種イオン移動抵抗性が高まる<sup>1)3)</sup>一方で, 塩化物イオンの固定・吸着性状が優れているために, 普通コンクリートよりも全塩分量の分布が多く分布する傾向にあり, さらに, フライアッシュのポズラン反応により水酸化物イオンが消費されることから, コンクリート中の細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>比が増加し, 鉄筋腐食抵抗性が低下する傾向にある<sup>4)</sup>。以上の事実により, フライアッシュの混和が塩化物イオンなどの物質移動抵抗性を高めるものの, 細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>比の低下に伴う鉄筋腐食抵抗性は低下するため, フライアッシュの使用が常には鉄筋腐食抵抗性を高めるのではなく, フライアッシュコンクリートが十分な耐久性能を供用期間中に保有するためには, 普通コンクリートよりもかぶりを十分に確保する必要があると思われる。

以上の推察により, 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, かぶりが重要な因

表-1 示方配合

供試体	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		C	W	S	G	FA	AE	AE減水
FA40	40	305	174	667	943	131	6.53	0.26
FA50	50	244	174	783	904	104	3.48	0.21
OPC40	40	435	174	684	966	-	6.53	0.02
OPC50	50	348	174	798	921	-	3.48	0.01

表-2 結合材の化学成分

粉体名	ig.loss	成分 (mass%)										
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
普通ポルトランドセメント	3.6	19.95	5.08	3.11	63.35	1.18	2.18	0.26	0.43	0.26	0.27	0.06
フライアッシュ	1.59	63.91	23.86	4.16	1.83	0.86	0.3	0.48	1.08	1.18	0.33	0.04

\*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 講師 博(工) (正会員)

\*4 愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

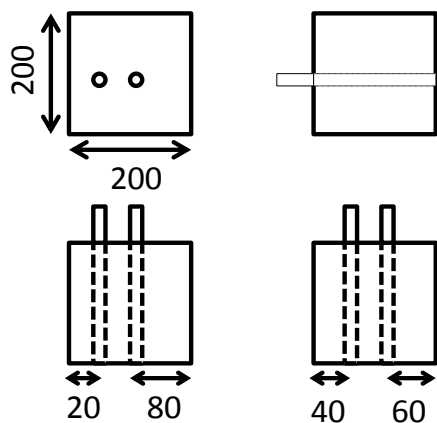


図-1 供試体寸法

子であると考えられ、本研究ではこれに着目した検討を実施することとした。フライアッシュの混和や、かぶり厚さ、コンクリートの養生を変化させた部材を用意し、塩水の乾湿繰り返しを施すことによる自然電位、分極抵抗、さらに腐食性状に影響を与える水分浸潤位置、 $Cl^-$ イオン拡散性状に着目して、実験を行った。

## 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 40%と 50%の 2 配合として、混和材にⅡ種フライアッシュ(密度:2.21g/cm<sup>3</sup>)をセメント重量の 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。示方配合を表-1 に、結合材の化学成分を表-2 に示す。

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16(g/cm<sup>3</sup>)を使用した。混和剤には、AE 減水剤および AE 助剤を使用した。AE 助剤は OPC に対しては 100 倍に希釈したものを、FA に対してはフライアッシュ用の AE 助剤を 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、D10 の鉄筋を供試体毎にそれぞれ 2 本配筋した。鉄筋のかぶりは、供試体に配置された 2 本の鉄筋毎に異なっており、かぶりの組み合わせとして 20mm, 80mm(20-80 と表記)のもの と 40mm, 60mm のもの(図-1)を作製した。打設ののち、24 時間経過時に脱型し、20℃恒温室内において、室内気中曝露養生と、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った湿布養生を 20℃ の恒温室内でそれぞれ 28 日間行った。養生終了後は設定したかぶりを確保した面以外から物質が侵入しないようにエポキシ樹脂を塗布した。なお、呼称の簡単のため、気

中曝露養生供試体に Air、湿布養生供試体に Wet という表現を、各供試体の名称の最後に付記している。

### 2.3 腐食促進試験および測定

養生およびエポキシ樹脂の塗布が終了した供試体は、20℃の恒温室内において塩水への浸漬 3 日と乾燥 4 日の 1 週間をサイクルとした乾湿繰り返しを行った。塩水は腐食をより速めるために 10%の濃度に設定した。1 サイクルごとの浸漬後に自然電位および分極抵抗を測定した。照合電極には飽和銅硫酸銅照合電極を用いた。分極抵抗に関しては測定値を基に腐食電流密度<sup>5)</sup>を算出し、腐食速度の判定を行った。

一定期間後、供試体を割裂して塩水の浸潤位置を目視により確認した。区間ごとにボール盤を用いて粉体を採取し、その粉体を JIS A 1154 に示されている塩化物イオンの抽出方法に準じて、硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの全量を抽出した後、コンクリート中の塩化物イオン量に換算した。

また、割裂前の、1 サイクル中の 4 日間の乾燥後に、トレント法に基づく透気試験を実施し、鉄筋腐食の一要因となる酸素のコンクリート中の透過性を、当該現象と相関のある透気係数により評価した。

## 3. 自然電位・分極抵抗

はじめに、本実験で得られた測定結果の一例を示す。図-2、図-3 に、養生終了後から腐食促進試験に 262 日供したかぶり厚さ 20mm および 60mm の位置での自然電位を示す。かぶりが 20mm の場合、すべてのケースにおいて自然電位はおよそ 50 日程度で-300mV を下回っており、鉄筋が十分に腐食していると考えられる。また、かぶりが 60mm の場合、フライアッシュを混和し養生が不良であると自然電位の低下が著しい一方で、良好な養生の場合は 260 日経過後であっても腐食が見られないと考えられる。

図-4、図-5 に、W/B=40%における各供試体の腐食電流密度を示す。フライアッシュ混和コンクリートで養生が不良なものの腐食電流密度が著しく高い。

次に、すべての供試体の腐食性状を確認するために、262 日経過時の自然電位を図-6、図-7、図-8、図-9 に示す。OPC の場合は、養生の相違により、大きな相違が見られないものの、フライアッシュコンクリートの場合は、養生方法により自然電位の相違が非常に大きい。気中養生の場合は腐食の激しい状態にある一方で、湿布養生の場合は腐食のない健全な状態を維持している傾向にあった。以上の結果から、フライアッシュコンクリートに施す養生の相違が鉄筋腐食性状に与える影響は極めて大きいことがいえる。

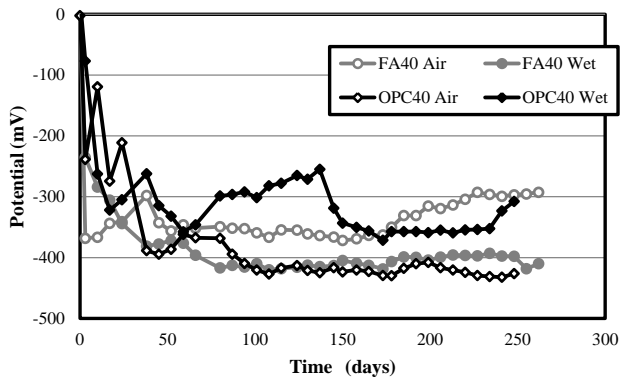


図-2 自然電位の経時変化(かぶり 20mm)

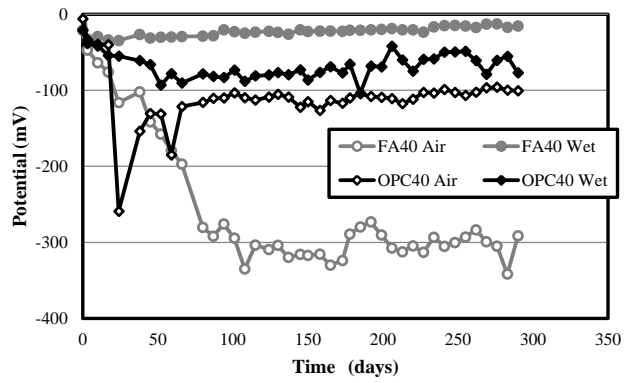


図-3 自然電位の経時変化(かぶり 60mm)

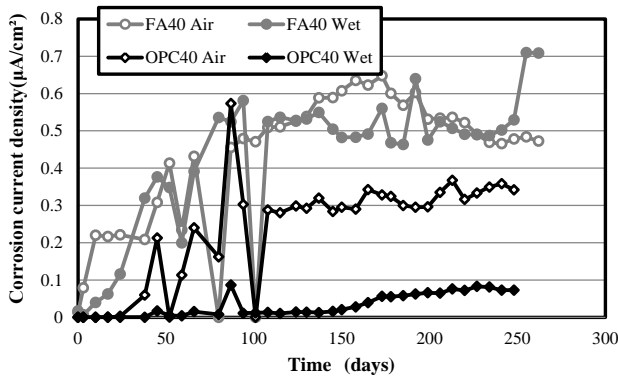


図-4 腐食電流密度の経時変化(かぶり 20mm)

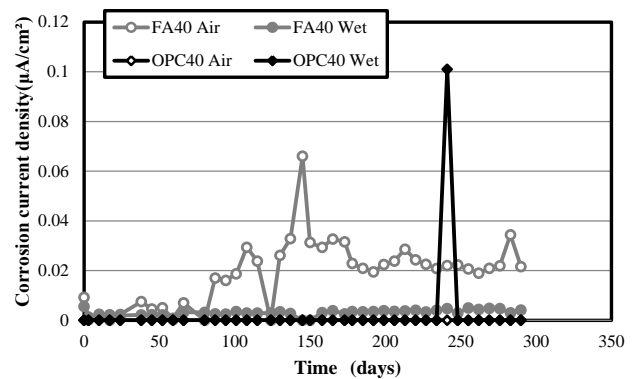


図-5 腐食電流密度の経時変化(かぶり 60mm)

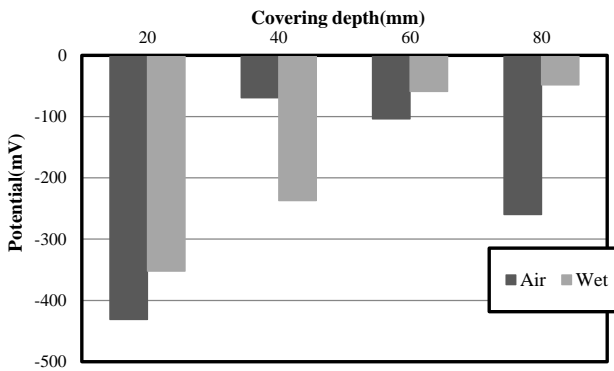


図-6 自然電位(OPC40, 234日)

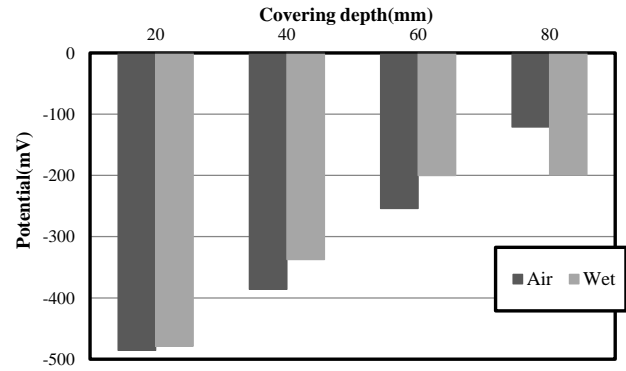


図-7 自然電位(OPC50, 234日)

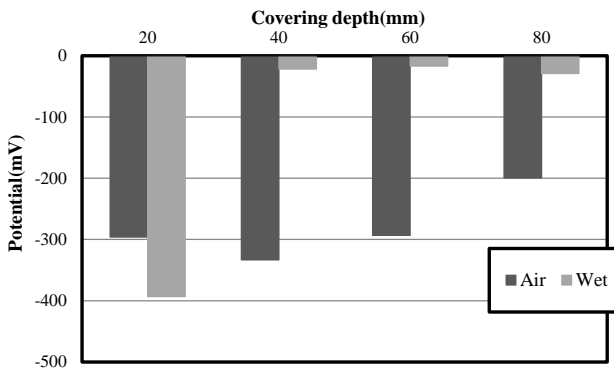


図-8 自然電位(FA40, 234日)

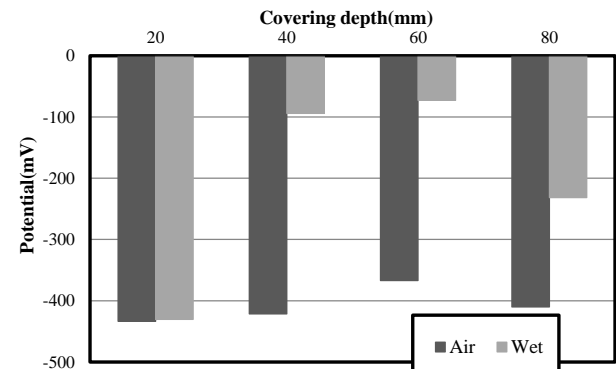


図-9 自然電位(FA50, 234日)

#### 4. 水および塩化物イオンの浸透性状

##### 4.1 水の浸潤性状

次に、水や塩化物イオンなどの腐食要因に関する検討を行う。図-10に供試体毎に2つある解放面からの液状

水の浸潤深さの平均値を示す。どのケースにおいても、湿布養生の場合は気中養生の場合よりも液状水の浸潤深さが小さい。湿潤養生を施したために、空隙構造が緻密化したためと考えられる。また、普通コンクリートより

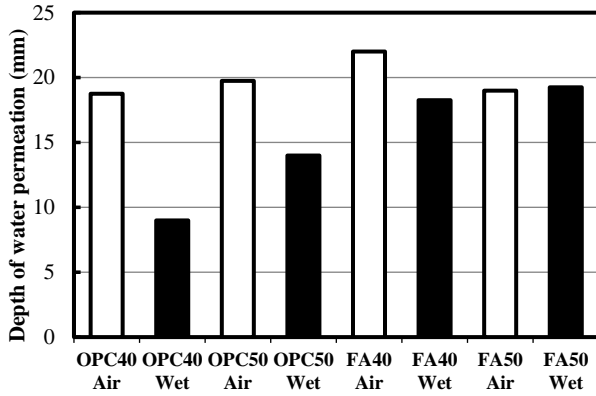


図-10 液状水の浸潤深さ

もフライアッシュコンクリートは液状水の浸潤深さが大きい。一般にフライアッシュコンクリートは普通コンクリートよりもポズラン反応により空隙が緻密化し、液状水の浸潤量は押さえられるが、フライアッシュの混和により、硬化体の化学組成に  $\text{SiO}_2$  が増加し、表面エネルギー増加に伴う水の濡れ性状の増加<sup>9)</sup>や、ポズラン反応に伴う空隙の緻密化や細孔径減少の影響から、空隙中の液状水に作用する毛管張力の増加から浸潤深さが増加したものと考えられる。

#### 4.2 塩化物イオン拡散性状

図-11, 図-12, 図-13, 図-14 供試体毎の塩化物イ

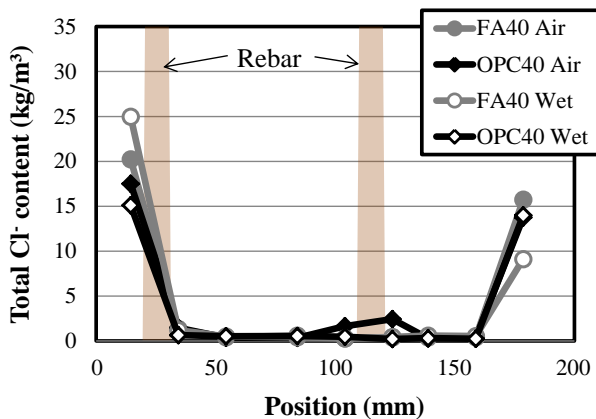


図-11 塩化物イオン量 (W/B=0.4, かぶり 20, 80mm)

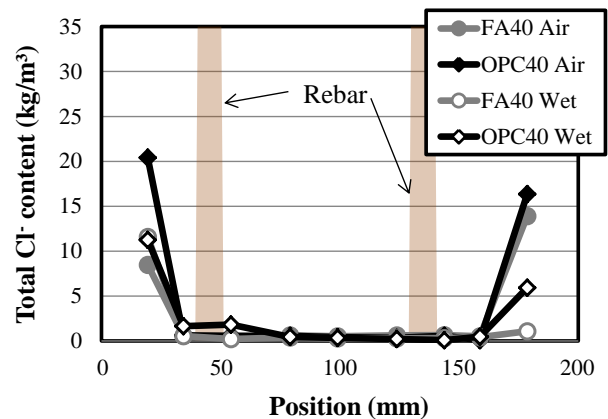


図-12 塩化物イオン量 (W/B=0.4, かぶり 40, 60mm)

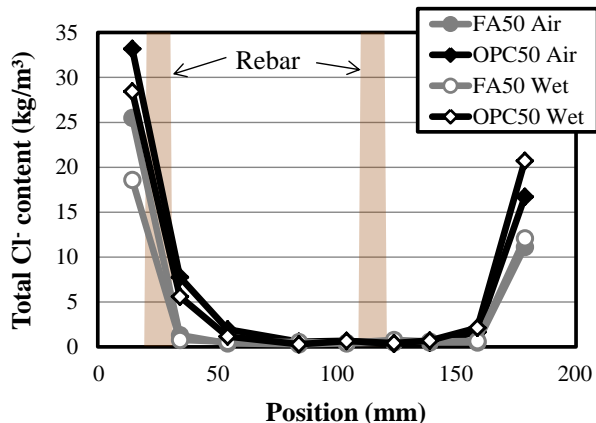


図-13 塩化物イオン量 (W/B=0.5, かぶり 20, 80mm)

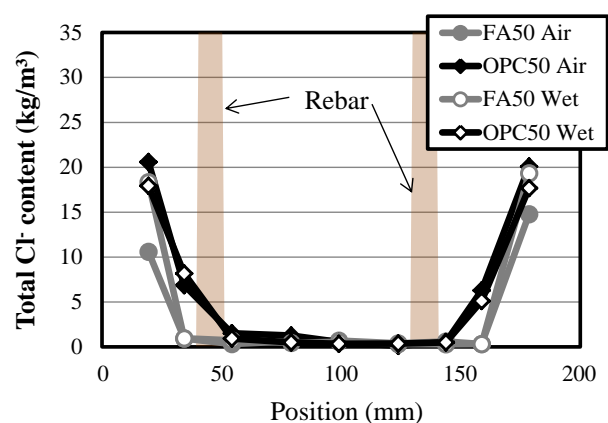


図-14 塩化物イオン量 (W/B=0.5, かぶり 40, 60mm)

オン拡散性状を示す。水結合材比が 40% の場合には、塩水浸潤面から 30~40mm 程度まで塩化物イオンが拡散しており、拡散性状は、養生やフライアッシュの有無によりほとんど相違が見られないものの、水結合材比が 50% の場合は、普通コンクリートの場合 50mm 程度の拡散であるのに対して、フライアッシュコンクリートの場合は、30mm 程度であり、拡散位置がフライアッシュの混和により 20mm 程度押さえられていることが確認できる。フライアッシュコンクリートの物質移動抵抗性が高いことに起因していると思われる。

次に、各供試体の塩化物イオンの実効拡散係数を図-15 に示す。なお、実効拡散係数は、表面塩化物イオン濃度  $C_0$  および実効拡散係数  $D$  を含む誤差関数により表現される拡散方程式の解を、実験値に対してカーブフィットして得られた結果を示している。OPC のケースは水結合材比 40% よりも 50% のものが実効拡散係数は大きい、FA のケースでは水結合材比が変化しても実効拡散係数はほぼ同程度の値を示した。この結果からフライアッシュの混和により遮塩効果があると考えられる。

#### 5. 透気性状

トレント法に基づく透気試験法により、各供試体の透気係数を測定した。図-16 に供試体毎の透気係数を示

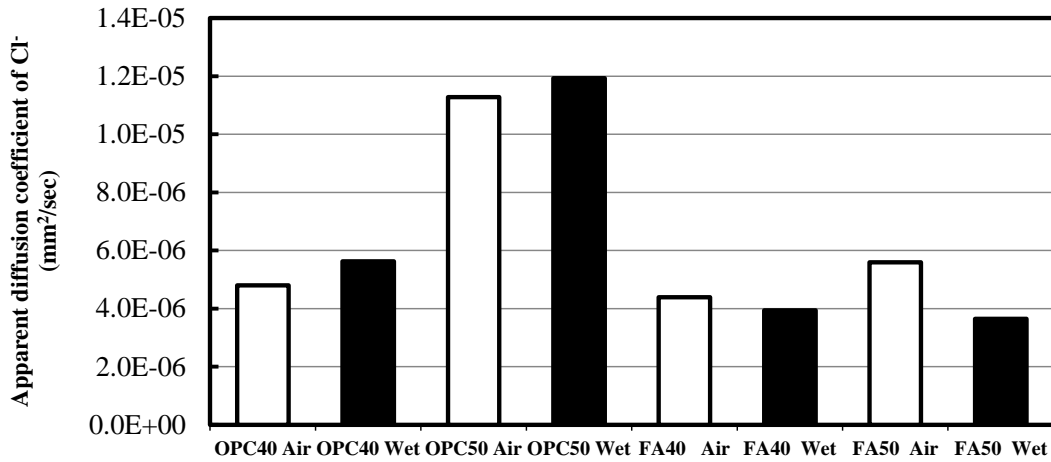


図-15 実効拡散係数

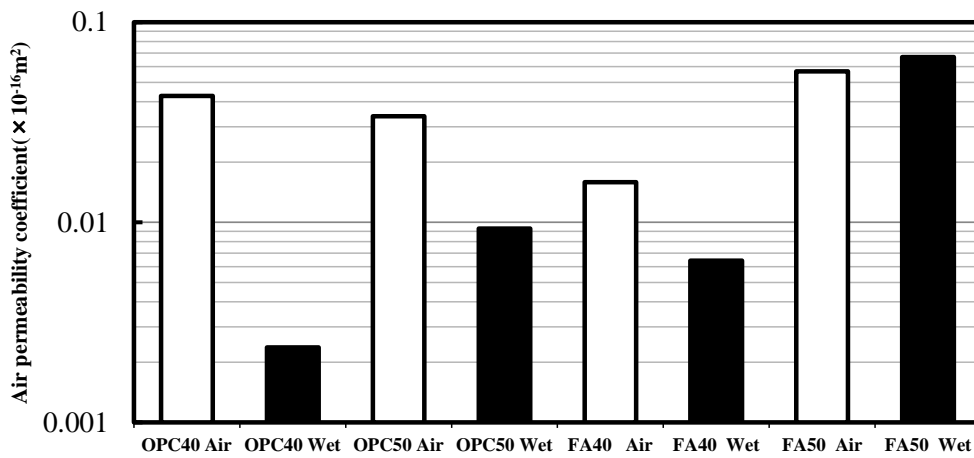


図-16 透気係数

す。なお、各ケースの測定値には、同一配合の2体の供試体それぞれ2面の解放面があり、それら合計4計測の中での異常値を排除したものの平均値を採用している。

FA50のケースを除き、湿潤養生を施すと透気係数が低下していることが確認される。また、気中養生を施した場合、フライアッシュの混和の有無によらず、ばらつきが生じている一方で、湿潤養生を施した場合は、水結合材比が大きくなると透気係数も増加する。すなわち、湿潤養生により、セメントの水和およびフライアッシュのポゾラン反応により、空隙構造が緻密化し、その度合いは水結合材比に依存するものと考えられる。しかし、水結合材比が40%の場合は湿潤養生により低下するものの、養生や水結合材比の相違により何オーダーも変化する透気係数の特徴に対して、高々2倍程度の相違でしかなく、透気性能はほとんど同じと評価されるうえに、水結合材比が50%の場合は透気性能の相違が見られない。

以上の事実から、透過性の影響はないと考えられる。

## 6. 物質移動抵抗性による鉄筋腐食抵抗性の検討

自然電位の測定結果により、フライアッシュコンクリ

ートの場合、養生が不良であると普通コンクリートと比較して極めて早い段階で腐食が開始する。一方で、湿潤養生を施した供試体は、自然電位の低下がほとんど見られずに、腐食抵抗性が普通コンクリートよりも格段に増加している。また、260日程度ではあるが、腐食促進環境下において、高水結合材比の普通コンクリートではかぶりを80mm程度確保し、湿潤養生を施しても腐食を呈することに対し、フライアッシュコンクリートでは腐食はしていないと判断された。以上の事実により、フライアッシュコンクリートに施す養生の相違が鉄筋腐食性状に与える影響は極めて大きいことがいえる。以下、このメカニズムについて議論を進める。

まず、液状水移動および塩化物イオン拡散に着目する。図-10によると液状水の浸潤深さは、フライアッシュの混和により増加傾向にあるものの、図-11、図-12、図-13、図-14に示す塩化物イオン拡散性状は普通コンクリートよりも押さえられている傾向が、特に高水結合材比において顕著に確認されている。なお、同一水結合材比のフライアッシュコンクリートにおいて、養生の相違により、塩化物イオン拡散性状はほとんど変化していな

い。養生時に乾燥の影響を受けたフライアッシュコンクリートの腐食抵抗性が低く、養生時に湿潤環境にあるものよりも腐食抵抗性が高い理由として、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の相違によるものではなく、さらに5章で記述したが、酸素などの気体の透過性の相違でもないと考えられる。

フライアッシュコンクリートの場合、ポゾラン反応に伴うアルカリ分の消費により、鉄筋近傍の $Cl^-/OH^-$ 値が高くなるため、鉄筋腐食抵抗性は低くなり、乾燥養生を受けた場合はその影響を受けて自然電位が早い段階で低下したと考えられるが、その現象が作用したとしても、湿潤養生を受けた供試体は普通コンクリートよりも格段に鉄筋腐食抵抗性が高いということは、鉄筋腐食に必要な酸素もしくは、水分が著しく不足していたことに起因すると思われる。微小空隙を多く有する多孔体であるコンクリートにおいては、大気中に湿分が僅かでも存在した時点で空隙中に水分が凝縮し、ある程度の水分は常に存在するために、鉄筋腐食に必要な水分が不足するという事態は起こりえないと考えられる。したがって、良好な養生の場合に腐食抵抗性が向上する理由として、鉄筋近傍における含水状態が極めて高く、酸素が鉄筋近傍までに到達できないことが挙げられる。

液状水の浸潤性状に関する検討において、フライアッシュの混和は空隙壁面の液状水濡れ性状を向上させ、さらに、空隙が緻密化することが確認されたため、フライアッシュコンクリートの部材内部は、含水量が比較的高い環境にあるといえる。したがって、湿潤養生を施されたコンクリートにおいては、部材内部の鉄筋近傍の含水状態は養生時から高く、養生を終えて乾湿繰り返し試験に供し乾燥の影響を受けたとしても、含水性状は非常に高い状態を維持しており、そのために腐食に必要な酸素が鉄筋まで十分に供給されないゆえに、腐食抵抗性が極めて高くなったものと推察される。一方で、養生時に乾燥を受けた部材内部の鉄筋近傍は、同じ養生を施された普通コンクリートと比較して含水量が多く、また、ある程度透気係数も大きいいため、鉄筋の腐食に必要な水と酸素が適度に供給される環境にあり、そのために腐食の進

行が著しいと考えられる。

以上の議論の検証には、実際に部材内部の含水状態を測定する必要がある。今後の検討としたい。

## 7. 結論

本研究では以下の結果が得られた。

- ・本実験では、セメント代替でフライアッシュを混和させた場合、養生時に乾燥の影響を受けた供試体の腐食抵抗性は、普通コンクリートよりも極めて低くなる。一方で、養生時に湿潤状態を保持させた供試体においては、極めて高い腐食抵抗性を有する。
- ・養生の相違により、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の変化が見られなかった。さらに、透気性能についても大きな相違が確認できなかったことから、養生の相違が与えるフライアッシュコンクリートの腐食抵抗性の大きな相違については、鉄筋近傍における水分状態が養生によって大きく異なり、特に湿潤養生を施した場合には、鉄筋近傍のコンクリートの含水状態が極めて高く、腐食に必要な酸素が供給されないことが要因である可能性がある。

## 参考文献

- 1) 笠井 芳夫, 坂井 悦郎編:新セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, 2007
- 2) 村田二郎:コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計, 技報堂出版, 2002
- 3) 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
- 4) 上田隆雄, 田中 慎吾, 新藤義勝, 大津政康, 鎌田敏郎, 山田和夫, 永山 勝:フライアッシュの混和が塩害によるセメント硬化体中の鉄筋腐食環境に与える影響, 土木学会論文集E, Vol.66, No.3, pp.255-267, 2010.7
- 5) M.G.Fontana and N.D.Greene : Corrosion Engineering , Second Edition , p.345 ,1983,McGraw-Hill
- 6) 中島章:固体表面の濡れ制御, 内田老鶴圃, pp.36-39, p.45, 2007.10