

# 論文 フライアッシュを混和したコンクリート及びモルタルの比抵抗の経時的变化

佐藤 道生\*1・酒井 隆行\*1・皆川 浩\*2・久田 真\*3

**要旨:** コンクリートの健全性を評価する指標としての比抵抗に着目し, 比抵抗の経時変化と各因子の影響について検討した。コンクリート試験では, フライアッシュの混和により比抵抗が増加する傾向を示した。モルタル試験により, 初期材齢で細孔溶液のイオン強度と比抵抗は正比例関係にあり, 材齢 14 日以降はポゾラン反応による比抵抗の増加が顕著であることが明らかとなった。フライアッシュ混和の効果を比抵抗により評価した結果, 物質移動抑制による耐久性向上に大きく寄与している可能性を見出した。

**キーワード:** 比抵抗, 電気抵抗, 細孔溶液, イオン濃度, フライアッシュ, 耐久性

## 1. はじめに

フライアッシュは, コンクリートに混和することで, 長期にわたる強度増進, 耐久性の向上, 温度ひび割れの抑制, 単位水量の抑制などの効果が期待できる。このうち, 耐久性については緻密性が向上するため遮塩性の向上が期待できるが, 一方では, 中性化の進行が大きくなる, Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>比が増加するなど, 鉄筋腐食を促進する負の影響も懸念されている。

コンクリート構造物のライフサイクルコストを検討するうえで, 進展期以降で重要となる鉄筋腐食の進行をどのように評価するかが大きく影響する。関ら<sup>1)</sup>によると, 初期における鉄筋腐食速度は酸素の拡散速度が支配する場合とコンクリート抵抗が支配する場合があります。コンクリートの比抵抗は鉄筋腐食速度と関係があるとしている。また, コンクリートの比抵抗と緻密性について検討した事例<sup>2)</sup>がある他, 比抵抗と Cl<sup>-</sup>の見掛けの拡散係数との相関性を明らかにした事例<sup>3)</sup>がある。以上を鑑みて, コンクリートの比抵抗は, 鉄筋の腐食過程を含めた健全度予測を行ううえでの評価指標になりうると考えた。

本研究では, コンクリートの健全性を評価する指標としての比抵抗に着目し, 神奈川県内に設置したコンクリート供試体の比抵抗の計測結果をもとに, 比抵抗の経時変化と各因子の影響について検討した。また, 比抵抗に及ぼす配合の影響を詳細に把握することを目的にモルタル試験を実施し, 材齢, 水結合材比, フライアッシュの混和による影響を評価した。

## 2. コンクリートを対象とした比抵抗モニタリング試験

### 2.1 概要

筆者らは, コンクリートの比抵抗を含めた物性の経時

変化を評価するため, 同じ初期養生を施したコンクリート供試体を環境の異なる全国 5 箇所に設置し, 10 ヶ年にわたる長期モニタリングを開始している。ここでは, 標準的な暴露環境 (神奈川県, 海岸から約 2km 内陸) に設置した供試体のモニタリング結果について報告する。

### 2.2 試験方法

#### (1) コンクリート配合及び使用材料

コンクリートの配合を表—1 に, 使用材料を表—2 に示す。試験で用いた配合は, 水結合材比は 55%, フライアッシュ置換率 3 水準の 3 配合とした。使用する配合は予め試験練りによりスランプ 12cm となるよう決定した。

#### (2) 供試体の作製

コンクリートは練混ぜ後, 木製型枠内に打設し, 幅 77cm, 高さ 54cm, 厚さ 30cm の大型供試体を作製した。供試体内に温度計測センサー, 比抵抗測定用のステンレス製端子を設置している他, 経年ごとに耐久性評価用のコンクリートコアが採取できるものとした。大型供試体の外観を図—1 に示す。

コンクリート打設後の大型供試体には乾燥防止のため濡れむしろを掛けた後, 散水養生を 1 週間実施した後脱枠を行った。脱枠後は, 材齢 4 週にいたるまで温度変化の少ない室内に静置し, 材齢 4 週以降屋外暴露を開始した。

表—1 コンクリート配合

記号	W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	F	S	G
OPC	55	0	159	289	0	779	1,144
FA20%	55	20	151	220	55	785	1,154
FA30%	55	30	146	186	80	790	1,161

\*1 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 工修 (正会員)

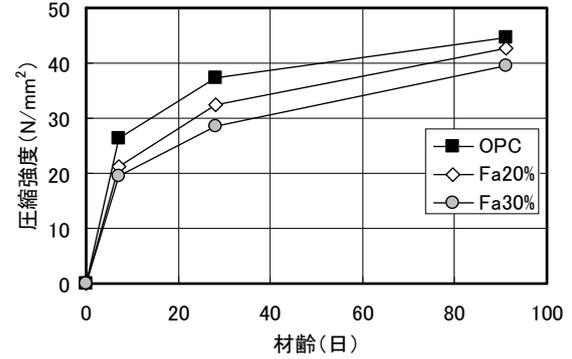
\*2 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 (正会員)

\*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 博 (工) (正会員)

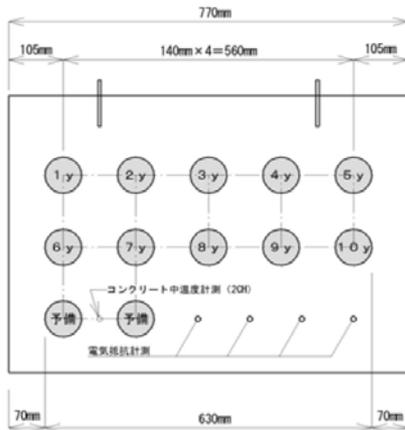
\*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博 (工) (正会員)

表—2 使用材料

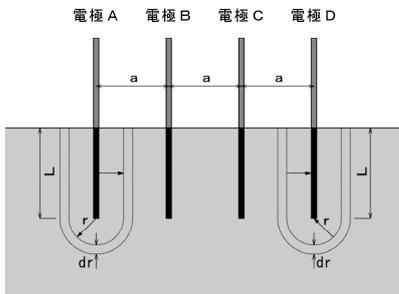
材料名	諸元
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup> ブレン比表面積 3310cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	密度2.25g/cm <sup>3</sup> ブレン比表面積 3800cm <sup>2</sup> /g
細骨材	岐阜産海砂、密度2.57g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.30%
粗骨材	玄武岩碎石2005、密度2.85g/cm <sup>3</sup> 吸水率1.58%
混和剤	AE減水剤：リグニンスルホン酸化合物とホリオルの複合体 AE助剤：高アルキルホリオン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体



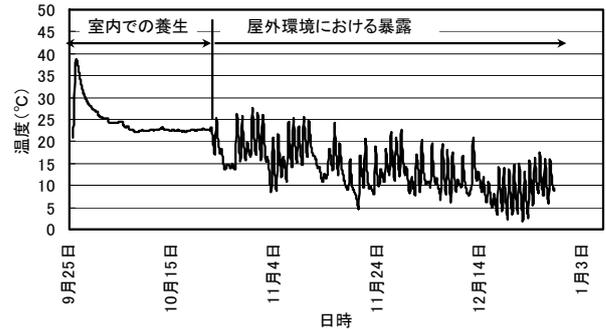
図—3 圧縮強度の経時変化



図—1 大型供試体寸法



図—2 供試体内部の電流密度



図—4 大型供試体コンクリート温度（深さ15cm）

親本ら<sup>4)</sup>は供試体内部の電流密度を図—2のようになるものとし、電極Aから流出して電極Dに流入する電流により電極B、Cに生じる電位差 $\Delta\phi$ を式(1)により算定している。これを参考に端子寸法 ( $a=9\text{cm}, L=10\text{cm}$ ) を代入し、式(2)により比抵抗 $\rho$ を算定した。

なお、 $i$ は電流 (A)、 $\rho$ は比抵抗 ( $\Omega\text{m}$ )である。

$$\Delta\phi = 2 \times \int_a^{2a} \frac{i\rho}{2\pi r(r+L)} dr \quad (1)$$

$$\rho = \frac{32.7}{100} \times \pi \times \frac{\Delta\phi}{i} = \frac{32.7}{100} \times \pi \times R \quad (2)$$

## (2) 圧縮強度試験

大型供試体の初期の状態を確認する目的で圧縮強度試験を実施した。供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ とし、養生は標準養生及び現場封緘養生とし、所期の材齢においてJISA1108に準じて試験を実施した。

## (3) 比抵抗の計測

供試体内に比抵抗計測用の端子を設置し、4電極法(Wenner法)を参考に実施した。電流及び電圧の測定にはデジタルマルチメータを使用した。交流電源装置を用いて印加する電圧は30V、周波数は70Hzとした。

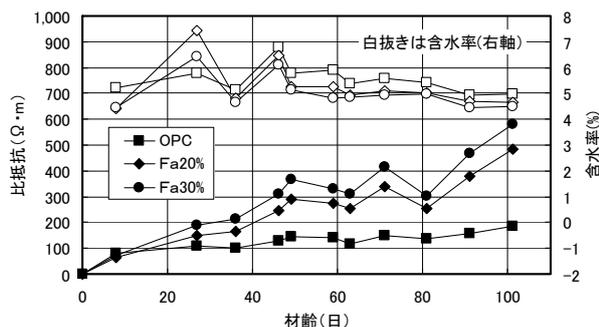
端子の埋込長が10cmであるため、表面の乾燥による比抵抗計測値への影響は少ないと判断し、測定時の供試体への散水は行っていない。

## 2.3 試験結果

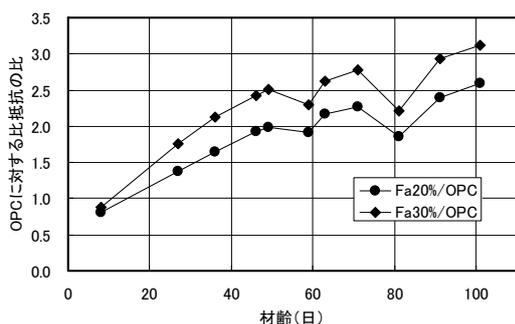
### (1) 圧縮強度の変化

標準養生を施した供試体についての圧縮強度を図—3に示す。材齢91日時点ではフライアッシュ置換率に応じて圧縮強度が低下し、 $\text{OPC} > \text{Fa20\%} > \text{Fa30\%}$ であるが、材齢を経るに従いポゾラン活性に伴う強度増進が見られ、配合間の強度差は小さくなる傾向にある。

作製した大型供試体中に設置した温度計による内部温度の経時変化を図—4に示す。打設後硬化に伴い温度上昇しているが、打設後約10日でほぼ室温と一致している。この大型供試体近傍に封緘養生した供試体の28日強度は概ね標準養生供試体の28日強度と同等であった。



図—5 コンクリート大型供試体の比抵抗の変化



図—6 フライアッシュの混和による比抵抗の変化

## (2) 比抵抗の変化

榎原ら<sup>3)</sup>は、フライアッシュをはじめ、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末の混和材の使用により比抵抗が増加すると報告している。これは、比抵抗の大きな混和材を混和することによる効果とともに硬化体の緻密性が向上したためと考えられる。

材齢約 100 日までの比抵抗の経時変化を図—5 に示す。前述とおり、フライアッシュを混和したコンクリートは圧縮強度が小さいが、比抵抗の順列は、Fa30% > Fa20% > OPC となっており、フライアッシュを混和した配合は OPC と比較して 2~3 倍の比抵抗値を示している (図—6)。置換率に応じて比抵抗が増加する傾向にあることから、フライアッシュを混和したことによる効果と考えられる。

コンクリートの含水率はコンクリートの比抵抗に影響を与えることから、図—5 には高周波容量式水分計により計測した表層付近の含水率が示してある。コンクリート中の水分量は長期的に漸減傾向にあるが、比抵抗の増加と比べ緩慢な変化である。

## (3) まとめ

コンクリート供試体を対象とした材齢約 100 日までの計測結果によると、水結合材比一定の条件では圧縮強度は OPC > Fa20% > Fa30% となっているが、比抵抗は OPC < Fa20% < Fa30% と逆の順列となっており、フライアッシュを混和することによる影響が著しい。そこで、フライアッシュ混和による比抵抗への影響をより詳細に評価

表—3 モルタル配合表

W/(C+F) (%)	F/(C+F) (%)	重量 (g)			
		W	C	F	S
45	0	1,013	2,250	0	6,750
45	10	1,013	2,025	225	6,750
45	20	1,013	1,800	450	6,750
45	30	1,013	1,575	675	6,750
55	0	1,238	2,250	0	6,750
55	10	1,238	2,025	225	6,750
55	20	1,238	1,800	450	6,750
55	30	1,238	1,575	675	6,750
65	0	1,463	2,250	0	6,750
65	10	1,463	2,025	225	6,750
65	20	1,463	1,800	450	6,750
65	30	1,463	1,575	675	6,750

表—4 モルタル試験の使用材料

材料名	諸元
普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> ブレン比表面積 3310cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	密度 2.25g/cm <sup>3</sup> ブレン比表面積 3800cm <sup>2</sup> /g
細骨材	ISO標準砂 密度 2.64g/cm <sup>3</sup>

するため、モルタル供試体を用いた検討を実施した。

## 3. モルタル供試体を対象とした比抵抗

### 3.1 概要

水結合材比とフライアッシュ置換率を変化させた 12 配合について、比抵抗の経時変化を計測するとともに、比抵抗に影響する要因のうち細孔溶液のイオン濃度の計測を実施した。

### 3.2 試験方法

#### (1) 供試体の配合、使用材料

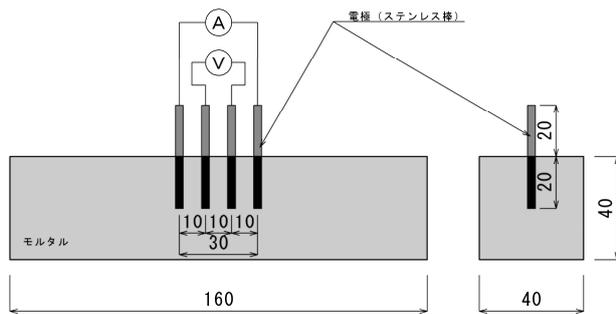
モルタルの配合を表—3 に、使用材料を表—4 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、フライアッシュは JIS II 種の規格を満足するものを用いた。砂は ISO 標準砂を使用した。

練混ぜは JISR5201 セメントの物理試験方法に準じて行い、供試体を作製した。比抵抗計測用供試体は 40mm × 40mm × 160mm とし、中央部に比抵抗測定用の端子を 4 本設置した。細孔溶液抽出用供試体は φ 50mm × 100mm の円柱供試体とした。

いずれの供試体も、気温 20℃ 湿度 100% の湿気箱中に養生し、1 日後に脱型した後、乾燥を防ぐために湿布をまいてポリ袋で密封し、20℃ に管理した湿気箱内にて所定の材齢まで養生を行なった。

#### (2) 比抵抗の計測

モルタル配合についても供試体内に比抵抗計測用の端子を設置し、4 電極法 (Wenner 法) を参考に実施した。



図—7 モルタル供試体の計測状況

供試体の外観を図—7に示す。測定にはデジタルマルチメータを使用し、電極 AD で電流を、電極 BC で電圧を測定した。印加した電圧は 30V、周波数は 70Hz とした。

比抵抗の算定方法については、前述のコンクリートと同様であり、端子の寸法は  $a=1\text{cm}$ ,  $L=2\text{cm}$  なので、比抵抗  $\rho$  は式(3)により算出した。

$$\rho = \frac{4.93}{100} \times \pi \times \frac{\Delta \phi}{i} = \frac{4.93}{100} \times \pi \times R \quad (3)$$

### (3) 細孔溶液の抽出と分析

$\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$  の円柱供試体を細孔溶液抽出装置に納め、2000kN の一軸圧縮試験装置を用いて载荷を行い、細孔溶液の抽出を行った。载荷圧力は分析に必要な細孔溶液が得られるように調整した。

得られた細孔溶液を所期の濃度に希釈したのち、OH<sup>-</sup>については滴定法により、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>については ICP により濃度を測定した。

抽出した細孔溶液のイオン濃度 (OH<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>) を代表する値として、活量と関係するイオン強度 I を式(4)により算定した。

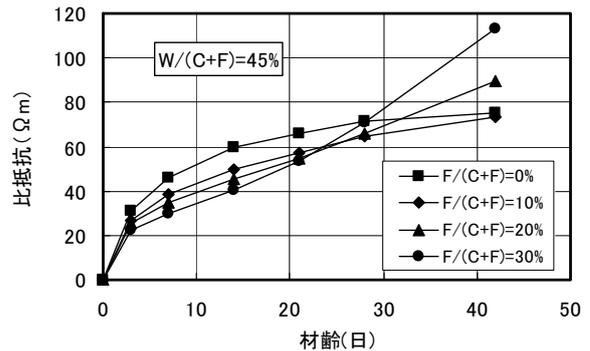
$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i \times z_i^2 \quad (4)$$

ここに、 $m_i$ :モル濃度、 $z_i$ :イオンの電荷

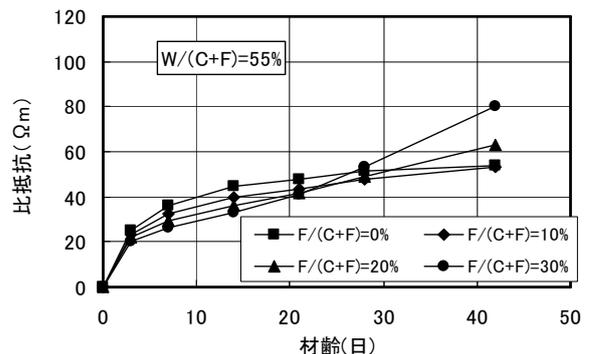
## 3.3 試験結果

### (1) 比抵抗の経時変化

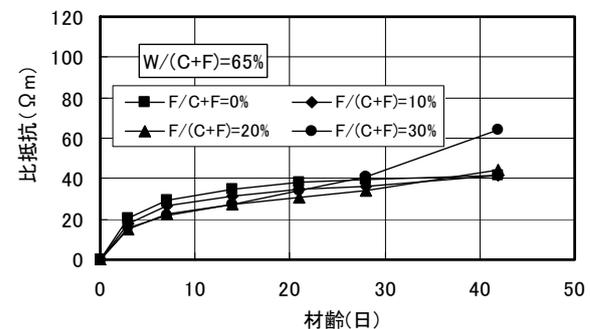
材齢 42 日までの比抵抗の経時変化を図—8～10に示す。まず、 $F/(C+F)=0\%$ に着目すると、水結合材比により比抵抗値が 40～70  $\Omega\text{m}$  の範囲で変化しており、比抵抗値がモルタルの緻密性と関係があることを示している。フライアッシュを混和した配合については、フライアッシュ置換率の高い配合ほど、比抵抗の上昇が著しい。最も変化の大きい  $F/(C+F)=30\%$ の配合に着目すると、材齢 14 日近傍に変曲点がありその後比抵抗が大きく増加している。



図—8 比抵抗の経時変化 (水結合材比 45%)



図—9 比抵抗の経時変化 (水結合材比 55%)



図—10 比抵抗の経時変化 (水結合材比 65%)

一般的にフライアッシュの反応は材齢 28 日以降に活性化するといわれるが、本試料では材齢 14 日以降にポズラン反応が活性化しているものと考えられる。

### (2) 細孔溶液のイオン強度と比抵抗の関係

水結合材比 55% についての細孔溶液のイオン濃度の経時変化を図—11に示す。フライアッシュを混和したものは、単位セメント量が少ないためイオン濃度が低くなっており、既往の知見<sup>5)</sup>と一致する。

イオン強度と比抵抗の経時変化を図—12～15に示す。材齢 7 日までの初期においては、フライアッシュの混和による影響は少なく、水結合材比による影響が大きい。比抵抗の大きさによる順位は、水結合材比 45% > 水結合材比 55% > 水結合材比 65% となる。また、イオ

ン強度と比抵抗は比例関係にあり、すべての水結材比が同じ直線関係となる。材齢 14 日以降になると、フライアッシュ置換率の大きな配合では比抵抗が大きくなり、材齢 42 日以降では勾配が逆転する。同一のフライアッシュ置換率についてみれば、水結材比が小さいほど比抵抗は大きくなり、イオン強度と比抵抗は比例する。

水結材比 45% のイオン強度と比抵抗の関係を 図-16 に示す。材齢 14 日頃までのイオン強度と比抵抗の関係は、フライアッシュの影響は見られず、正比例の関係を保ったまま材齢とともに比抵抗が増加する。材齢 14 日～28 日以降になると、フライアッシュ置換率の高いものほど OH<sup>-</sup>を消費しながらポズラン反応が進むことから、材齢 42 日では勾配が逆転するに至る。他の水結材比でも、比抵抗の絶対値は異なるものの同様の傾向を示す。

一般的にはイオン強度は比抵抗と反比例するとされており、例えば土質地盤を対象とした比抵抗の評価では地盤に含まれる地層水中のイオン濃度が比抵抗に影響する<sup>6)</sup>。しかし、若材齢ではイオン強度と比抵抗が正比例であることやポズラン反応によりイオン強度が低下しても比抵抗が上昇していることから、硬化体の比抵抗はイオン強度など化学的要因だけではなく、水和による屈曲率の上昇など物理的要因が大きいと推察される。なお、本検討では分析に必要な液量を得た時点で圧搾をとめたため、細孔容積の影響を検討するには至らなかった。

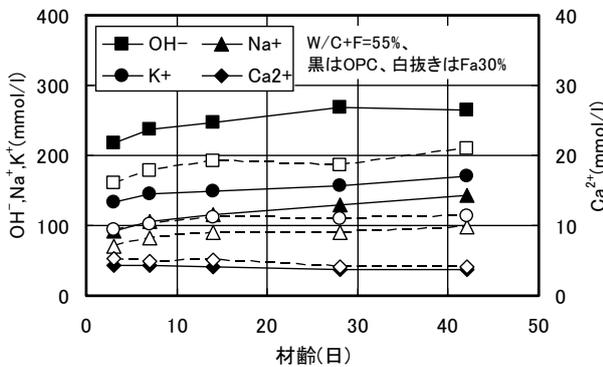


図-1 1 イオン濃度の経時変化

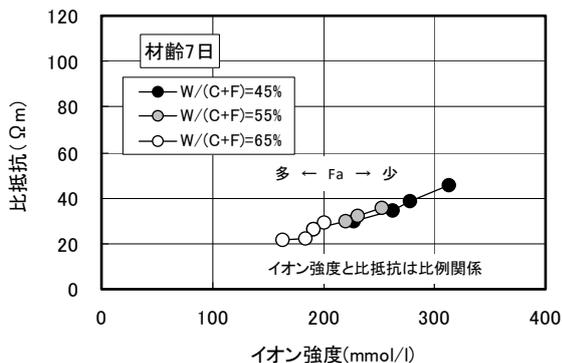


図-1 2 イオン強度と比抵抗の関係 (材齢 7 日)

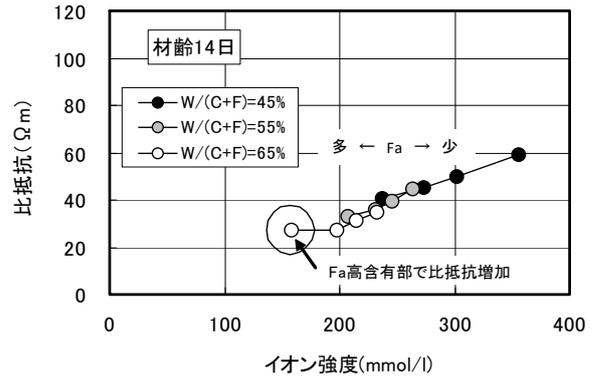


図-1 3 イオン強度と比抵抗の関係 (材齢 14 日)

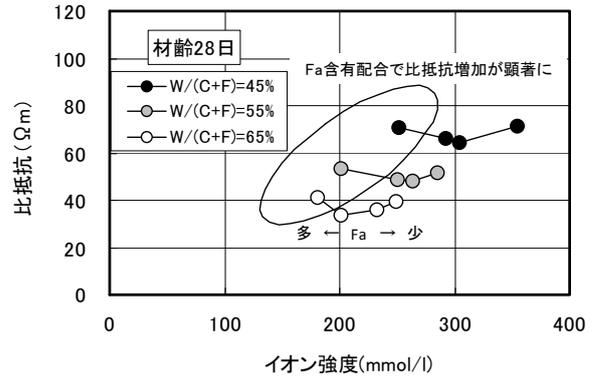


図-1 4 イオン強度と比抵抗の関係 (材齢 28 日)

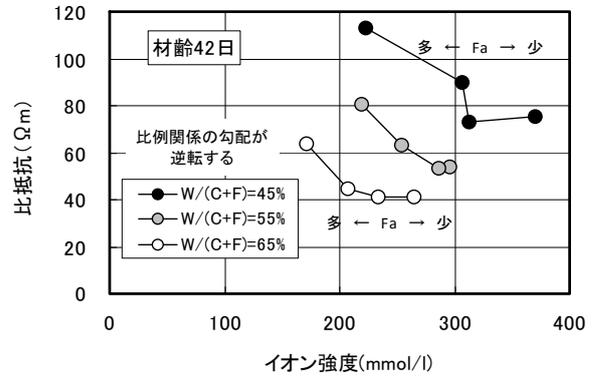


図-1 5 イオン強度と比抵抗の関係 (材齢 42 日)

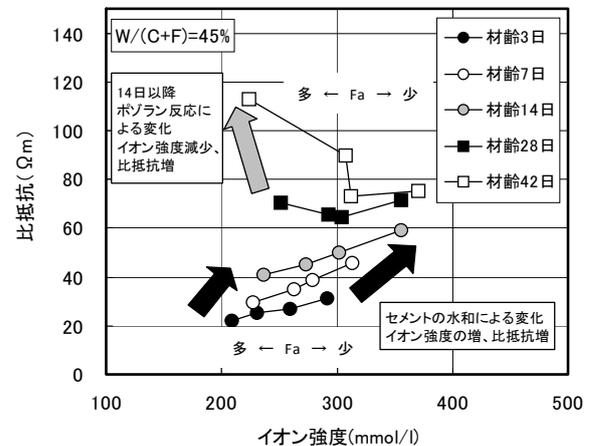


図-1 6 イオン強度と比抵抗の変化

### (3) フライアッシュの比抵抗増加への影響

比抵抗  $\rho$  はセメント水比 (C/W)、フライアッシュ水比 (F/W) 及び比抵抗へのフライアッシュの寄与率  $k_i$  により式(5)で表現できると仮定して、モルタル試験の結果について重回帰分析により寄与率  $k_i$  を計算した。

$$\rho = A(C/W + k_i \times F/W) + B \quad (5)$$

ここに、A、Bは重回帰分析で定まる係数

寄与率  $k_i$  の経時変化を図-17に示す。図中には別途実施したモルタル強度試験の結果<sup>7)</sup>および既往の検討事例<sup>8)</sup>から得られた強度寄与率  $k_c$  についても併記している。フライアッシュの強度への寄与は材齢1年後でもセメントに対して4割程度であるのに対して、比抵抗に対する寄与は材齢42日時点でセメントの2倍以上となっており、フライアッシュの混和が比抵抗に与える影響は非常に大きい。これらは若材齢での評価ではあるが、フライアッシュの混和による影響は力学的な効果よりも物質移動抑制による耐久性向上に大きく寄与している可能性がある。今後は長期材齢における比抵抗の計測を行うとともに、コンクリートの耐久性評価との比較を通じて評価を行う予定である。

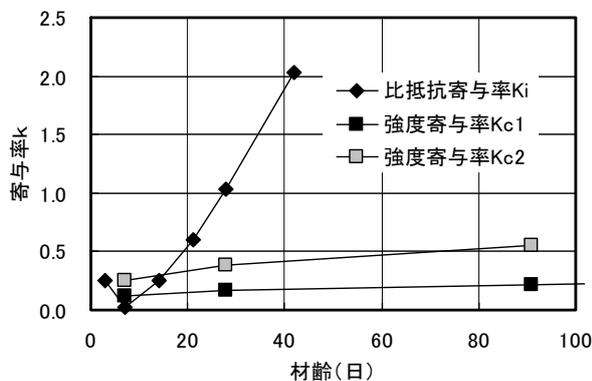


図-17 比抵抗寄与率の変化

### 4. まとめ

コンクリートおよびモルタルを対象に、フライアッシュを混和したコンクリートの比抵抗について評価を行った。その結果は下記の通りである。

- 1) 数カ月の養生を経たコンクリートでは、フライアッシュを混和した配合のほうが無混和のものより比抵抗が大きく、材齢42日以降のモルタル試験でも同様の傾向を示した。
- 2) 初期の材齢における比抵抗は水結合材比の影響が大き

く、細孔溶液のイオン強度と比抵抗は正比例関係にある。

3) 材齢14日以降は比抵抗の増加が著しく、フライアッシュ反応の活性化によるものと考えられる。

4) 比抵抗に対するフライアッシュの寄与率を算定した結果、フライアッシュ混和による寄与率はセメントの2倍以上であった。

5) フライアッシュの混和による影響は力学的な効果よりも物質移動抑制による耐久性向上に大きく寄与している可能性がある。

今後は長期材齢における比抵抗の計測を継続するとともに、大型供試体を用いたコンクリートのモニタリングを通じて、遮塩性、中性化など耐久性と比抵抗の関係についても検討する予定である。

### 謝辞

本研究の遂行にご協力をいただきました東北大学大学院工学研究科喜多雄士君に心より感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 関博ほか：コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，vol. 9, No. 1, pp381-386, 1987
- 2) 関博ほか：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察，土木学会論文集，No. 451, pp49-57, 1992. 8
- 3) 榎原ほか：モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 30, No. 1, pp789-793, 2008
- 4) 親本俊憲ほか：モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学的検討，コンクリート工学年次論文集，vol. 27, No. 1, pp907-912, 2005
- 5) 小早川真ほか：硬化フライアッシュセメントモルタルの空隙水中の溶存イオン濃度の経時変化，セメント・コンクリート論文集，No. 53, pp102-109, 1999
- 6) 例えば，島 裕雅ほか：建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法，古今書院，1995
- 7) 佐藤道生，前田哲宏：フライアッシュを高含有したモルタルの強度に対するセメントの影響について，土木学会年次学術講演会講演概要集，vol. 54, pp1036-1037, 1999
- 8) 土木学会：コンクリートライブラリ 132 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，pp86, 2009