

論文 加熱改質フライアッシュを用いた現場打ちコンクリートの諸特性

齋藤 隆弘^{*1}・秋山 勇介^{*2}・上本 洋^{*3}・皆川 浩^{*4}

要旨： 加熱改質することにより、強熱減量を1.0%以下としたフライアッシュ（以後、加熱改質FAと称す）を用いて、室内試験および実機練りによる試験を行い、そのワーカビリティを確認するとともに大型の試験体を作製し、硬化体の性状を確認した。この結果、加熱改質FAの使用により配合条件によらず現場打ちコンクリートのワーカビリティは改善されることが確認でき、硬化体の性状においては、特に電気抵抗率は材齢が進行するとともに加熱改質FAの混和率が高いほど向上することが明らかになった。

キーワード： 加熱改質フライアッシュ, 間隙通過性, 表面透気係数, 電気抵抗率, 遮塩性能

1. はじめに

加熱改質 FA は、通常のフライアッシュの特徴である未燃カーボンの残留、ばらつきを極力抑えるため、フライアッシュを加熱し未燃カーボンを自然させることにより強熱減量を 1.0 % 以下としたものである。このフライアッシュは九州、沖縄等では多くの採用実績・各種報告があり、東北地方でもプレキャスト製品、護岸ブロック、コンクリート舗装などにおいて使用が進められてきた。しかしながら設備面、供給面の問題からその使用は一部に限られており、現場打ちコンクリートとして用いた場合の特性について、一部では実例がある²⁾ものの、十分に把握されていない。

筆者らはこのフライアッシュを使用して室内試験および実機練りのコンクリートを製造し、流動性に拘わる各種試験（タッピング試験、間隙通過試験等）を行った。さらに立方体形状の試験体を作製し、打設半年後にコア採取を行い、コンクリート表面における測定その他、コアを用いた各種計測を実施した。

2. 実験概要

2.1 配合

室内試験では、ベースとなる FA を使用しないケースに対し、FA を内割で 15 % 置換したケース、25 % 置換したケースを設定した。加熱改質 FA の炭種は N 社工場産の A, B, C の 3 種とし、炭種 A についてはその原粉（加熱処理前のフライアッシュ）についても試験を行った。練混ぜ後のスランブは 12±1.0 cm とし、AE 減水剤の結合材に対する添加率、細骨材率、および水結合材比は一定とし、単位水量、単位結合材量を変化させることで調整を行った。空気量は 4.5±1.5 % となるよう、AE 剤の添加量を変えることで調整を行った。ここでケース名における Cf とは加熱改質後の未燃炭素が少ない状態（Carbon Free）の略である。実機試験では、原粉、改質後ともに、

表-1 室内試験の配合

Case	種別	単位量(kg/m ³)					AE剤 A	スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	C	FA	S	G			
1	ベース	166	305	-	798	1046	3.5	12.0	4.6
2	Cf-A 15%	162	252	45	793	1045	5.0	13.0	4.8
3	Cf-A 25%	161	221	74	790	1039	6.0	11.0	4.6
4	Cf-B 25%	160	220	74	793	1045	6.0	12.0	5.1
5	Cf-C 25%	167	229	77	783	1029	6.0	12.0	4.2
6	原粉-A 25%	169	232	78	771	1018	15.0	12.0	5.0

表-2 実機試験の配合

Case	種別	単位量(kg/m ³)					AE剤 A	スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	C	FA	S	G			
1	ベース	166	305	-	798	1046	2.5	12.0	5.0
2	Cf-A 15%	162	252	45	793	1045	2.5	12.0	5.6
3	Cf-A 25%	161	221	74	790	1039	2.5	12.0	5.4
4	原粉-A 25%	169	232	78	771	1018	5.0	12.5	5.0

表-3 使用材料

<p>W/B = 54.5 % s/a = 44.0 % 混和剤添加率: B×0.01 C: 普通ポルトランドセメント(T社製) 3.16 g/mm³ Cf-A: 2.03 g/mm³ 強熱減量: 0.40 % 比表面積: 4030 cm²/g Cf-B: 2.19 g/mm³ 強熱減量: 0.62 % 比表面積: 3470 cm²/g Cf-C: 2.17 g/mm³ 強熱減量: 0.45 % 比表面積: 4890 cm²/g 原粉-A: 1.96 g/mm³ 強熱減量: 3.52 % 比表面積: 3230 cm²/g S₁: 山砂(黒川郡大和町鶴巣) 2.57 g/mm³ 表面水: 3.0 % S₂: 砕砂(登米市津山町) 2.66 g/mm³ 表面水: 2.8 % 細骨材混合比率 S₁: S₂=60:40 G: 砕石(石巻市湊字葛和田山) 2.70 g/mm³ AE 減水剤: AE 減水剤標準形 I 種 (高機能タイプ B×1.0%使用) AE 剤: AE 剤 I 種 (IA=B×0.001 %)</p>

炭種 A のみを使用した。室内試験の配合を表-1、実機試験の配合を表-2、使用材料を表-3に示す。

2.2 フレッシュ性状試験

室内試験における試験項目はスランブ、空気量その他、タッピング試験（スランブ試験後の平版叩きによるコン

*1 (株) 奥村組 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*2 日本製紙 (株) 技術本部 技術企画部

*3 (株) フローリック 技術本部 技術部 (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

クリートの簡易変形試験方法)³⁾、間隙通過試験 (JSCE-F701-2016)、加圧ブリーディング試験 (JSCE-F502-2013) を実施した。練混ぜには 50 L 練強制二軸ミキサを用いた。実機試験では、生コンプラントに常設している強制二軸練ミキサ (容量 2.3 m³) を使用し、各配合につき 1.5 m³ 練り混ぜ、そのうちの 1.0 m³ を現場暴露用の立方体形状の型枠に打設した。ブリーディング測定については、型枠に打設されたコンクリート表面に発生するブリーディング水を 30 分毎に採取し、その量を集計した。タッピング試験、間隙通過試験の状況を写真-1、立方体形状の型枠への打設状況を写真-2 に示す。

2.3 硬化後のコンクリートにおける試験

室内試験、実機試験の各配合において $\phi 100 \times 200$ mm の供試体を採取し、20 °C で水中養生をした後に、圧縮強度試験の他、供試体と電極間隔に応じた適切なセル定数を用いた 4 プローブ法⁴⁾にて電気抵抗率の測定を行った。圧縮強度試験は材齢 91 日まで、電気抵抗率試験は材齢 1 年まで測定した。

実機試験で作製した立方体形状の試験体を屋外・非塩分飛来環境で半年間暴露し、その表面において、Wenner 法による電気抵抗率、トレント法による表面透気係数の測定を実施した。その後、試験体中央部に水平方向に $\phi 100$ mm でコア抜きを行い、コンクリート表面から 14 cm の位置において分割した。

この表面側のコア、深部側のコアのそれぞれについて、飽水処理を実施した後に 4 プローブ法⁴⁾によって電気抵抗率を測定した。飽水処理は JSCE-G571 に規定される手順で脱気後、水中に 1 週間連続して浸漬し、その後 1 日間、室内気中で乾燥させ、再度、脱気した。

電気抵抗率の測定の後、そのコアを用いて、JSCE-G572 に準拠して塩水浸せき試験を行った。暴露面は表面側のコアについては型枠面、深部側のコアについては切断面とし、それ以外の面はエポキシ樹脂でシーリングした。浸せき期間は 182 日である。コアの採取位置、浸漬試験模式図を図-1 に示す。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

スランプを一定とし、単位水量、単位結合材量を変えることで、各ケースにおける配合調整を行った結果、表-1 に示すように、加熱改質 FA を使用したケースでは、単位水量、単位結合材量をほとんどのケースで減らすことになった。その減少量は最大 6 kg/m³ であり、加熱改質 FA の原炭の違いによる差はあるが、減水効果が確認できた。ここで、炭種 A の原粉を使用した Case 6 では、単位水量が増加したことから、本試験の範囲では同一炭において加熱改質により減水効果が付与されていることを確認した。今回使用した原粉は JIS II 種相当のフライ



タッピング試験 間隙通過試験
写真-1 フレッシュコンクリートの試験状況



写真-2 型枠への打設状況

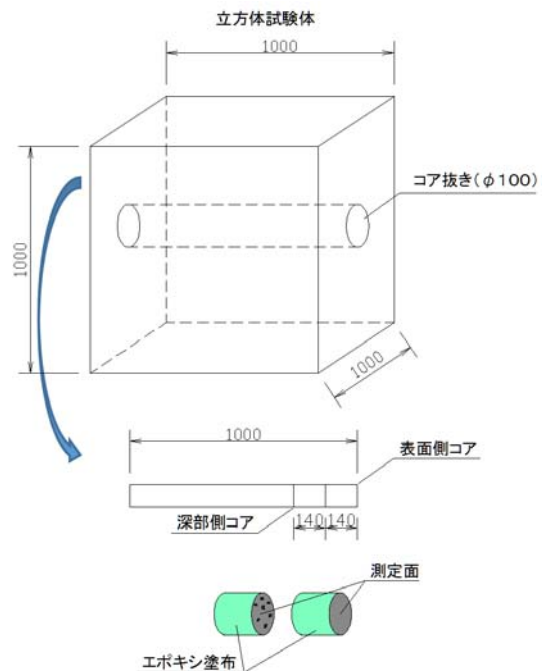


図-1 コアの採取位置、浸せき試験模式図

アッシュであり原粉としては比較的良質であるが、AE 剤の使用量は加熱改質 FA を使用したケースの倍以上となり、室内試験と実機試験における AE 剤の使用量の差は、原粉を使用したケースと比べて加熱改質 FA を使用したケースでは大幅に少なくなった。以上から加熱改質 FA の使用により AE 剤の使用量も低減・安定化することを確認した。なお、室内試験と実機試験での AE 剤使用量の差異は、練混ぜ機械の違いより AE 剤の起泡効果が

影響を受け発生したと考えられる。

タッピング試験において、いずれのケースでも打撃終了後に材料分離傾向は見られず、また過度に粘性が高い傾向も見られないことから、良好なワーカビリティを有していることを確認した。

図-2に室内試験における間隙通過試験結果、図-3に実機試験における間隙通過試験の結果を示す。室内試験においては加熱改質 FA を用いた場合の間隙通過性の向上は、大きくは見られないが、実機試験においては、加熱改質 FA を使用したケースで、室内試験と各単位量が変わらないにもかかわらず通過時間が大幅に低減している。このことから、実機練りの場合、加熱改質 FA の混和により加振時のフレッシュコンクリートの流動化の程度が向上し、間隙通過性が向上することを確認できた。ここで室内試験と実機試験で結果に差が生じるのは室内試験と実機試験でのコンクリートの練混ぜ量の違いが影響していると考えられる。このことから加熱改質 FA を使用する場合に、フレッシュコンクリートのワーカビリティを評価するためには室内試験だけでなく、実機試験も合わせて実施することが望ましいと思われる。

試験体を用いたブリーディング測定結果を図-4に示す。原粉-Aを使用したケースでは、日没に伴い測定不能になったため、打設後 120 分の時点で測定を中止した。フライアッシュの置換率が增大するのに伴い、ブリーディング量が多くなり、特に原粉-Aを使用したケースでは著しくブリーディング量が多くなった。この傾向は既往の研究⁵⁾において、フライアッシュを内割で使用した場合のブリーディング水の発生状態と同様の傾向である。本試験はフライアッシュを内割で使用しており粉体量が変わらないため、フライアッシュの混和による凝結遅延に加え、ボールベアリング効果による粘性低下がそのまま保水性の低下に繋がったと考えられる。原粉-Aを使用した場合にブリーディング量が多くなる要因の一つとして、保水性が低下しているのにもかかわらず単位水量が多いことが考えられる。

図-5に室内試験における加圧ブリーディング試験結果を示す。最大 480 秒まで計測しているが、ここでは傾向が顕著な 200 秒までをピックアップしている。フライアッシュを混和していないベース配合と比較して、フライアッシュを混和している配合では、加圧後 50~100 秒程度で脱水量が多くなっている。また原粉を使用したケースでは特に脱水量が多い。本実験では内割配合であることから、フライアッシュの混和だけでは加圧時の保水量の向上には寄与せず、粘性が低下することで脱水量が多くなると考えられる。全体として、非加圧のブリーディング測定結果と同様な傾向にあるといえる。

3. 2 強度特性・表面透気係数

材齢91日までの室内試験において水中養生された供試

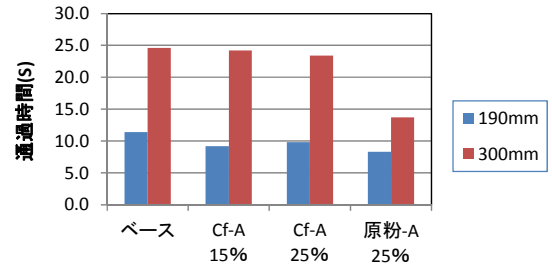


図-2 間隙通過試験の結果 (室内)

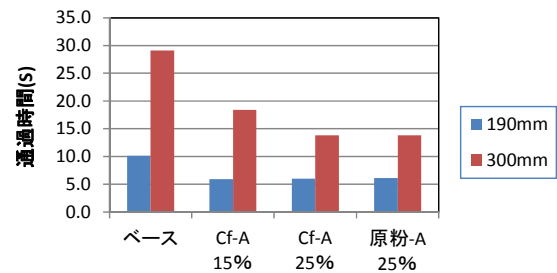


図-3 間隙通過試験の結果 (実機)

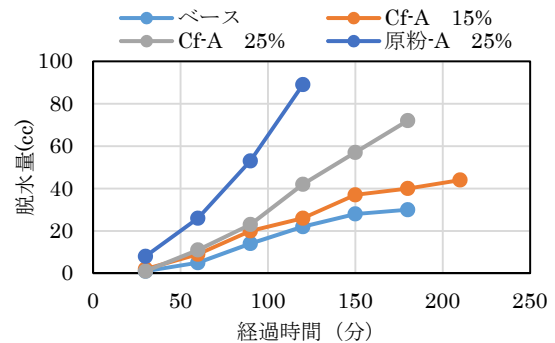


図-4 ブリーディングの測定結果 (実機)

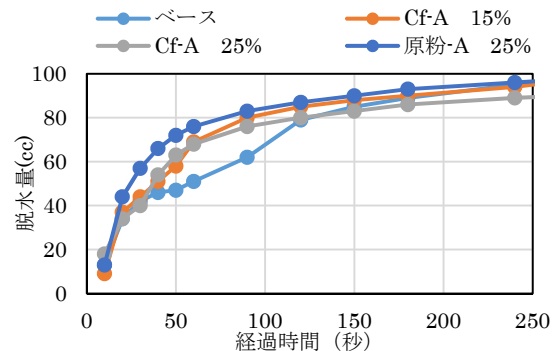


図-5 加圧ブリーディング試験の結果 (室内)

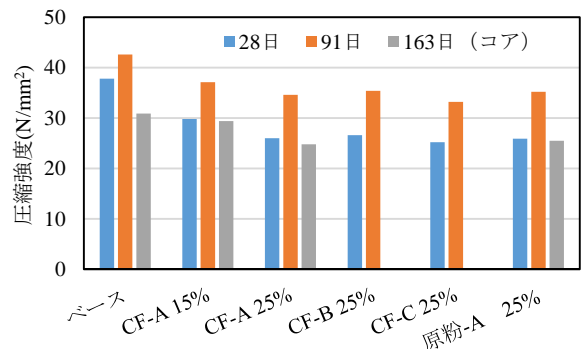


図-6 圧縮強度試験結果 (実機)

体の圧縮強度と、実機試験において材齢 163 日におけるコア供試体の圧縮強度を図-6 に示す。コア供試体は、電気抵抗率などを測定したコアのうち、その中央部分について圧縮強度試験を実施した。室内試験において水中養生を実施した供試体では、フライアッシュの置換率が多いほど強度が低下しているが、置換率が 25 % の場合でも原粉-A を含め炭種による強度の違いは大きくは見られない。実機試験におけるコア供試体についても、フライアッシュの置換率が大きいほど強度が低下しているが、水中養生した供試体と比較すると、材齢の違いはあるが、低下する程度は相対的に小さくなっている。また、同一炭種における、加熱改質 FA と原粉を使用したケースについて、水中養生された供試体、コア供試体のいずれにおいても有意な強度の差は見られない。

実機試験の立方体形状の供試体表面における表面透気係数試験結果を図-7 に示す。ベースと比較して、加熱改質 FA および原粉を用いたケースでは、表面透気係数が若干低下する傾向となっているが、いずれのケースでもトレント法によるグレーディングでは、「一般」の範囲に収まっており、フライアッシュの使用が表面透気係数の性状に有意な影響を及ぼしているとは言えない結果となった。

3.3 電気抵抗率

材齢 1 年までの供試体の電気抵抗率の測定結果を図-8 と図-9 に示す。室内試験・実機試験ともに、材齢の経過に伴い、フライアッシュの置換率が増加するほど、電気抵抗率も増大することが確認できる。電気抵抗率は塩化物イオンの拡散係数と相関がある^{例えは 6)}ことが知られており、AASHTO T 358-17 (Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration) では、コンクリートの塩化物イオン透過性の評価指標として電気抵抗率が用いられ、そのグレードが示されている。ただし、このグレードには電極間隔と供試体の寸法に影響を受ける見掛けの電気抵抗率に基づいている。そのため、本研究では、既往の研究⁴⁾に基づいてこの見掛けの電気抵抗率を真の電気抵抗率に換算し、コンクリートの塩化物イオン透過性の評価に用いた。

その結果、図-8 と図-9 に示すように、材齢 1 年時点のベース配合のコンクリートの塩化物イオン透過性は「High」に分類されるのに対し、フライアッシュを混和したコンクリートの塩化物イオン透過性は「Very Low」に分類された。このことから、港湾施設の構造物から得られた統計データなど⁷⁾で従来から言われているように、フライアッシュの混和はコンクリートの遮塩性能のポテンシャルを大幅に引き上げる効果があり、そのことは加熱改質 FA にも言えることが確認された。さらに、電気抵抗率は、フライアッシュを混和していないベース配合

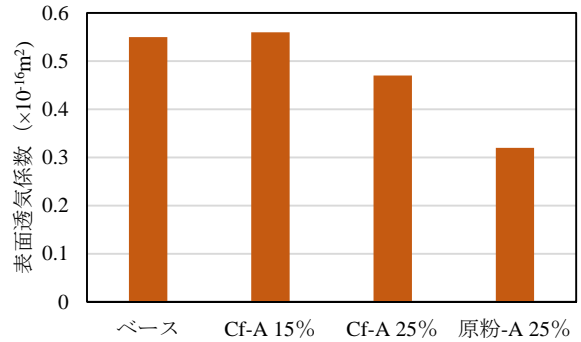


図-7 表面透気係数測定結果 (実機)

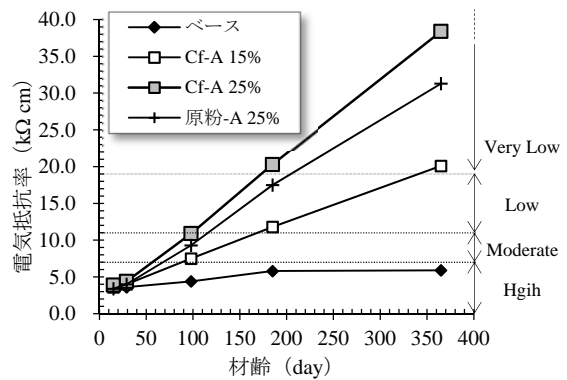


図-8 電気抵抗率 (供試体) (室内)

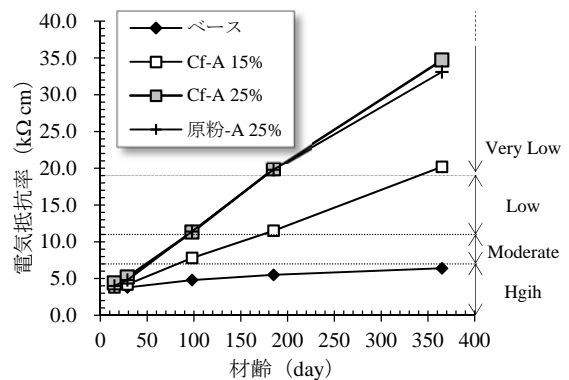


図-9 電気抵抗率 (供試体) (実機)

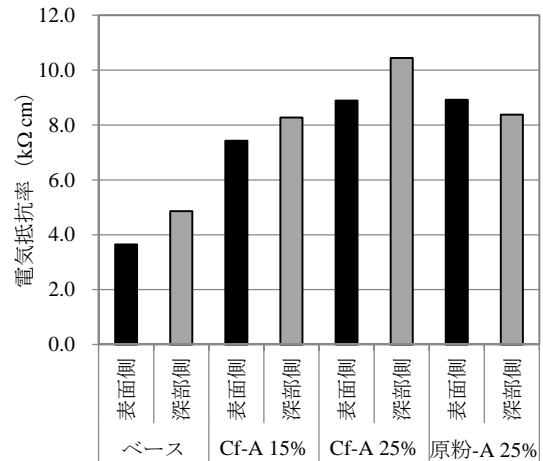


図-10 電気抵抗率 (コア・飽水処理済み) (実機)

と比較して、フライアッシュを混和した方が、材齢が350日を超えても増加傾向にあった。これは、フライアッシュのポズラン反応による空隙構造の緻密化がなお進行しているためと推察される⁸⁾。なお、Cf-A 25%と原粉-A 25%の結果を比較すると、加熱改質FAを用いた方が電気抵抗率は大きくなっている。これは、加熱改質FAの使用により、単位水量が減じられ、単位骨材量が増加したことに起因すると考えられる。

立方体形状の試験体から採取したコアの飽水处理後の電気抵抗率の測定結果を図-10に示す。ベースと比較して、フライアッシュを混和することで電気抵抗率が増加し、供試体と同様の結果になることが確認された。なお、表面側と深部側のコアの測定結果を比較すると、ベース、Cf-A 15%、Cf-A 25%では、深部側の電気抵抗率が大きくなった。これは、表面側では乾燥の影響を受けるため、結合材の水和率が深部側よりも低下することが一因であると考えられる。

一方、原粉-A 25%では、表面側と深部側の電気抵抗率の関係は他の水準とは逆の傾向を示していた。このような傾向が生じた原因としては未燃カーボンの調湿作用が推測されたが、明確な証拠を得るには現段階では至っていない。立方体形状の試験体は引き続き曝露試験を継続するため、この件については今後の課題としたい。

立方体形状の試験体から採取したコアの飽水处理後の電気抵抗率と供試体の電気抵抗率の比較結果を図-11に示す。ここで、供試体の電気抵抗率はコアの電気抵抗率の測定材齢と等しい材齢での推定値であり、その推定方法は図-9に示した材齢97日と材齢184日のデータの線形補間による。図-11を見ると、コアの電気抵抗率は供試体よりも小さくなり、その傾向はフライアッシュが高置換率になるほど大きくなった。これは、供試体は水中養生が継続されていたために、十分に水和反応が進行して組織が緻密化したためである。今回のケースでは、一般的な施工方法であっても、フライアッシュによる遮塩性能の向上が認められたが、遮塩性能に関するポテンシャルをより引き出すためには、フライアッシュが高置換になるほど、水分の供給を長期にわたって実施することが望ましいと言える。

現地非破壊試験（Wenner法）による電気抵抗率の測定結果、および、その電気抵抗率と表面側のコア（飽水处理済）の電気抵抗率との比を図-12に示す。現地非破壊試験による測定では、飽水处理は実施していない。図-12に示されるように、飽水处理済みのコアの電気抵抗率と比較して、現地非破壊試験による電気抵抗率の測定結果は大きな値となっている。これは、一般に、コンクリートは乾燥するほど内部空隙水の連続性が低下し、それに伴って電気抵抗率は大きくなるためである。しかし、その程度は、ベース配合では大きく、フライアッシュを

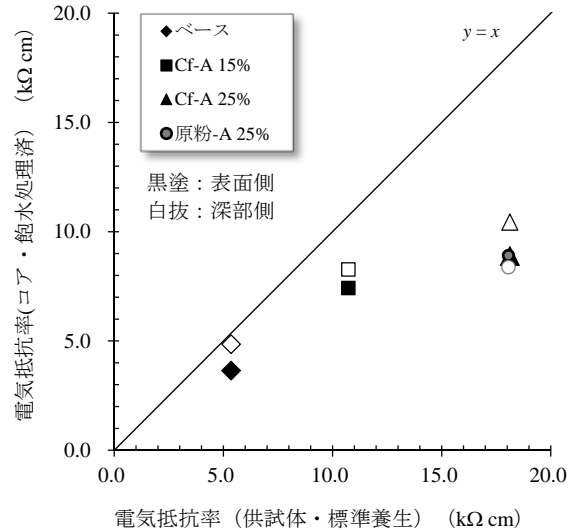


図-11 コアと供試体の電気抵抗率の比較（実機）

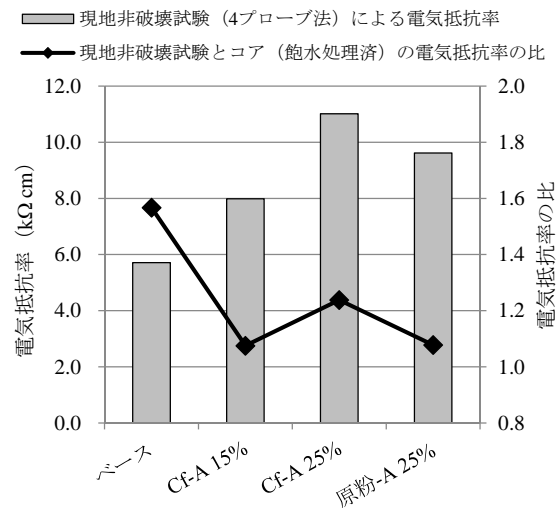


図-12 現地非破壊試験による電気抵抗率の測定結果とコア（飽水处理済）の電気抵抗率との比（実機）

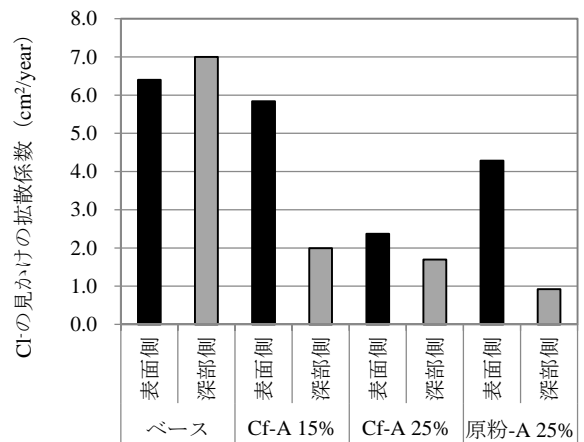


図-13 塩水浸せき試験の結果

混和したケースでは小さくなるのが、電気抵抗率の比の算出結果から確認できる。これは、フライアッシュを

混和することで物質透過抑制効果が向上し、コンクリートからの水分逸散が抑制されたことを示していると考えられる。

3. 4 塩水浸せき試験結果

図-13 に飽水処理後のコアの塩水浸せき試験結果を示す。図-13 より、フライアッシュを混和することで塩化物イオンの見かけの拡散係数が低下することが確認され、それは加熱改質 FA を使用しても同様であった。

表面側と深部側とで比較すると、フライアッシュを使用したケースで表面側の塩化物イオンの見かけの拡散係数が大きくなる傾向になった。これは、コンクリート表層部から大気中への水分が逸散し、フライアッシュの反応率が深部と比較して低下したためと考えられる。

なお、図-13 と図-10 を比較すると、塩化物イオンの見かけの拡散係数と電気抵抗率により評価されるコンクリートの遮塩性能の順位はほぼ同等になった。

4. まとめ

以上の研究から、加熱改質 FA を用いた現場打ちコンクリートのフレッシュ特性、硬化コンクリートの特性について、下記の事項が明らかになった。

- (1) 加熱改質 FA を内割りで使用することにより、未混和の場合と比較して、単位水量の低減が可能であり、フライアッシュに原粉を使用した場合、その原粉が比較的良質なものであっても、AE 剤の使用量を半分以下に抑えることが可能であり、なおかつその使用量を安定化することができる。
- (2) 加熱改質 FA の使用により、現場打ちコンクリートにおいて良好なワーカビリティの確保が可能になり、特に実機練りを行った場合では、間隙通過特性の向上が顕著にみられる。
- (3) 内割配合の場合、フライアッシュを混和した配合では、ブリーディング量、加圧ブリーディング試験時の脱水量が増加する傾向となるが、原粉を使用したケースと比較して、加熱改質 FA を使用したケースのほうが、その量を低減できる。
- (4) 水中養生を行った供試体、コア供試体いずれにおいても、フライアッシュの置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下するが、加熱改質 FA の種類や原粉の使用などによる強度の違いは見られない。
- (5) 本研究の範囲では、加熱改質 FA の使用が、コンクリート表面の表面透気係数には有意な影響を及ぼさない。
- (6) 遮塩性能の評価指標である電気抵抗率は、フライアッシュの置換率が増加するほど大きくなり、その傾向は材齢が経過するほど顕著になる。本研究の配合では、フライアッシュを混和することで、AASHTO T 358-17 の塩化物イオン透過性のグレード

が「High」から「Very Low」に2段階向上することが、材齢1年時点の測定結果より確認された。

- (7) 一般的な施工方法であっても、フライアッシュによる遮塩性能の向上が認められるが、遮塩性能に関するポテンシャルをより引き出すためには、フライアッシュが高置換になるほど、水分供給を長期にわたって実施することが望ましい。
- (8) フライアッシュを混和することで塩化物イオンの見かけの拡散係数が低下することが確認され、それは加熱改質 FA を使用しても同様であった。

謝辞：実験に際し、(株)平成生コンクリートの皆様には実験に際し多大なるご協力をいただきました。また、実験計画およびデータの分析にあたり東北大学大学院 久田 真教授には、多くのアドバイスを頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩：高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 167-172, 2011.
- 2) 齋藤隆弘, 東邦和, 佐藤貴之, 久田真, 皆川浩：加熱改質フライアッシュの現場打ちコンクリートへの適用, 土木学会 第 72 回年次学術講演会講演概要集, pp. 1677-1678, 2017.
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリートの確実な施工のためのPDCAサイクル研究委員会報告書, 2016.
- 4) 皆川浩, 駒井道哉, 藤田亮, 宮本慎太郎, 久田真：4プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 17, pp. 447-452, 2017.
- 5) 日本コンクリート工学会：構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, 2017.
- 6) 皆川浩, 久田真, 榎原彩野, 齋藤佑貴, 市川聖芳, 井上浩男：コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp. 119-131, 2010.
- 7) 佐藤道生, 有菌大樹, 蓮見亮, 皆川浩, 久田真：調査情報および設備重要度を考慮した発電所の維持管理費用算定手法, 土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 4, pp. 225-237, 2012.
- 8) 佐藤道生, 皆川浩, 久田真：強度および物質透過性に着目した混和材料による硬化過程への影響, 材料, Vol. 62, No. 8, pp. 479-485, 2013