

加熱改質フライアッシュを用いたコンクリートの 諸特性

－実機練りによるワーカビリティおよび硬化体性状の評価－

Properties of Concrete Incorporating Carbon-Free Fly Ash

- Evaluating Fresh and Hardened Concrete Mixed in a Plant -

齋藤隆弘* 東 邦和* 大久保新助**

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（以下、加熱改質 FA）を用いたコンクリートに対して、室内試験および実機練りによる試験を行い、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。その結果、加熱改質 FA の使用により配合条件によらず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た。また、硬化体の性状、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、実機練りコンクリート、間隙通過性、遮塩性能

1. まえがき

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、およびばらつきを極力抑えるために、フライアッシュを加熱し、未燃炭素を減量して改質したものである。この加熱改質 FA は、九州、沖縄等では多くの採用実績・各種報告¹⁾があり、東北地方でもプレキャスト製品、護岸ブロック、ケーソン、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、加熱改質 FA 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、流動性にかかわる各種試験（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のほか、コアを用いた各種計測を実施した。これらの試験から、加熱改質 FA を使用したコンクリートのフレッシュ性状、および硬化体の性状を評価した。

加熱改質FAは、フライアッシュ原粉を800℃～900℃で加熱改質することで、強熱減量を1.0%未満に低減したものである。未燃炭素によるAE剤の吸着が殆どなくなることで、加熱改質FAを用いたコンクリートは、標準的なフライアッシュセメントに用いられるフライアッシュⅡ種（JIS、強熱減量5.0%以下）を用いた場合よりも空気の管理が大幅に容易になる。

写真-1に、加熱処理前のフライアッシュ原粉と加熱改質FAの色調を示す。未燃炭素の影響により原粉は濃灰色を呈しているが、加熱改質FAはフライアッシュ本来の色彩である乳白色を呈している。また、フライアッシュ原粉をコンクリートに用いる場合、未燃炭素の量によっては、その影響により打重ね部に色むらが発生し美観を損ねる恐れがあるが、加熱改質FAを使用することにより、美観上のリスクも低減できる。

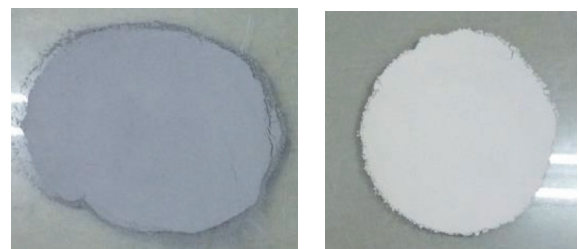


写真-1 フライアッシュの色調（左：原粉、右：改質後）

2. 改質フライアッシュの特徴

*技術研究所土木研究グループ **東北支店営業部

3. 概要

3.1 配合

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。室内試験では、炭種の違いの影響を把握するため、日本製紙(株)石巻工場で使用した3種類の炭種を用いた。ここでは炭種A、B、Cと表記し、これを加熱改質したものをそれぞれ、Cf-A、Cf-B、Cf-Cと表記する。炭種Aについてはその原粉も使用し、これを原粉-Aとした。ここで加熱改質FA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。FAの置換率は、ベースとなるフライアッシュを使用しないケースに対し、フライアッシュを内割で15%置換したケース、25%置換したケースを設定した。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て調整した。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した。実機試験の配合は、室内試験をベースとしたが、原粉、改質後ともに、上記の工場において研究実施時に使用された炭種Aのみを使用した。

3.2 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、空気量のほか、タッピング試験(スランブ試験後の平板叩きによるコンクリートの簡易変形試験方法)³⁾、間隙通過試験(JSCE-F701-2016)を実施した。練混ぜには50L練強制二軸練ミキサを用いた。実機試験では、生コンプラントに常設された強制二軸練ミキサ(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1.0 m³を1辺1mの立方体形状の型枠に打設した。試験項目は、室内試験の項目に加え、ブリーディング測定を実施した。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分ごとに採取し、その量を集計した。

3.3 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φ100×200 mmの供試体採取し、20℃で水中養生をした後に、圧縮強度試験のほか、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⁾により電気抵抗率の測定を行った。圧縮強度試験はポズラン反応の影響を考慮し、材齢91日まで、電気抵抗率試験は材齢1年まで測定した。

立方体形状の試験体の寸法、コアの採取位置、浸せき試験模式図を図-1に、立方体形状の型枠への打設状況を写真-2に示す。実機試験で作製した立方体形状の試験体を、屋外の風雨、日射にさらされるが飛来塩分のない環境で半年間曝露し、トレント法による表面透気係数の測定を実施した。図-1に示すように、試験体中央部に水平方向にφ100 mmのコアを採取し、コンクリート

表-1 室内試験の配合

Case	FA種 置換率	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)	— 0%	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

※ W/B=54.5% s/a=44.0%

表-2 実機試験の配合

Case	FA種 置換率	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)	— 0%	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

※ W/B=54.5% s/a=44.0% スランブ=12±1.0cm 空気量=4.5±1.5%

表-3 使用材料

セメント C	普通ポルトランドセメント 3.16g/cm ³		
フライアッシュ Cf-A Cf-B Cf-C 原粉-A	Cf-A	2.03g/cm ³	強熱減量:0.40% 比表面積 4030cm ² /g
	Cf-B	2.19g/cm ³	強熱減量:0.62% 比表面積 3470cm ² /g
	Cf-C	2.17g/cm ³	強熱減量:0.45% 比表面積 4890cm ² /g
	原粉-A	1.96g/cm ³	強熱減量:3.52% 比表面積 3230cm ² /g
細骨材 S	S1:山砂(黒川郡大和町鶴巣) 2.57 g/cm ³ S2:砕砂(登米市津山町) 2.66 g/cm ³ 細骨材混合比率 S1:S2=60:40		
粗骨材 G	碎石(石巻市湊字葛和田山) 2.70 g/cm ³		
AE減水剤 AE剤	AE減水剤標準型 I 種(高機能タイプ B×1.0%使用) AE剤 I 種(1A=B×0.001%)		

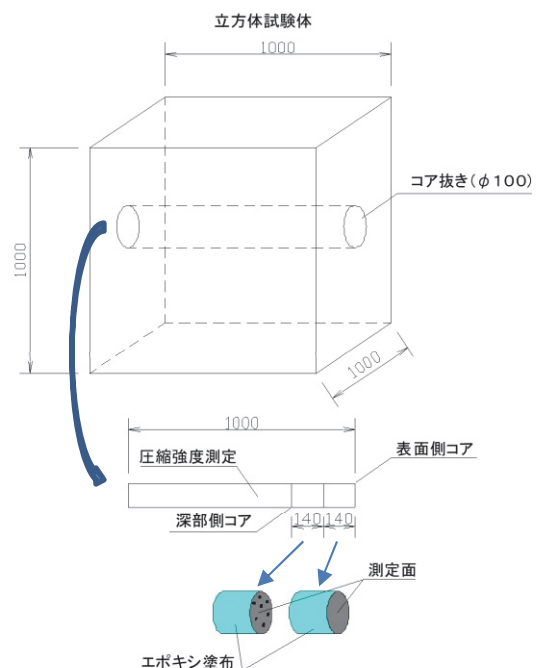


図-1 コアの採取位置、浸せき試験模式図

表面から 14 cm、28cm 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 週間連続して浸せきし、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型枠側の切断面とし、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。また、電気抵抗率試験の供試体の深部側のコアを用い、材齢 28 日における圧縮強度試験を行った。

4. 結果

4.1 配合調整に基づく考察

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、単位結合材量は Case5 を除き減じられた。単位水量の減少量は $-1\sim 6\text{ kg/m}^3$ であり、加熱改質 FA の原炭の違いにより、減水効果を有するものと、期待できないものがあることがわかった。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の双方において、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 AE 剤の使用量が大幅に少なくなった。なお、室内試験と実機試験での AE 剤使用量の差異は、練混ぜ機械の違いにより AE 剤の起泡効果が影響を受けたものと考えられる。

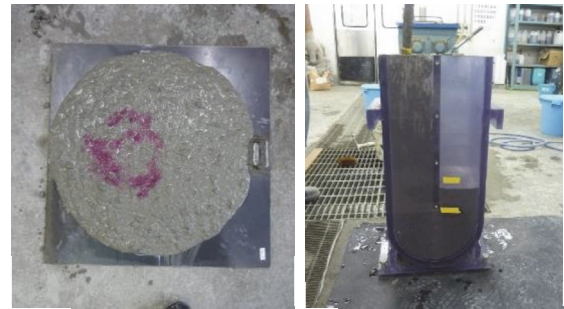
4.2 フレッシュ性状

タッピング試験、間隙通過試験の状況を写真-3 に示す。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、実機試験における間隙通過試験の結果を示す。加熱改質 FA、原粉ともフライアッシュを使用したケースで、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、原粉ともに、混和により加振時のフレッシュコンクリートの流動性が向上し、間隙通過性が向上することを確認できた。

立方体形状の試験体を用いたブリーディング測定結果



写真-2 型枠への打設状況



タッピング試験 間隙通過試験

写真-3 フレッシュコンクリートの試験状況

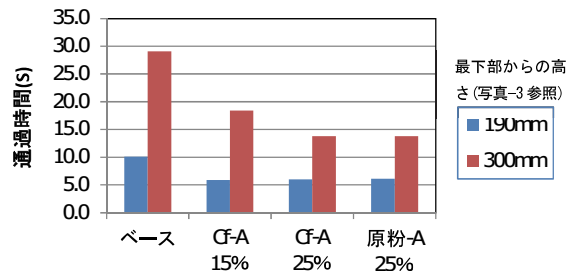


図-2 間隙通過試験の結果 (実機)

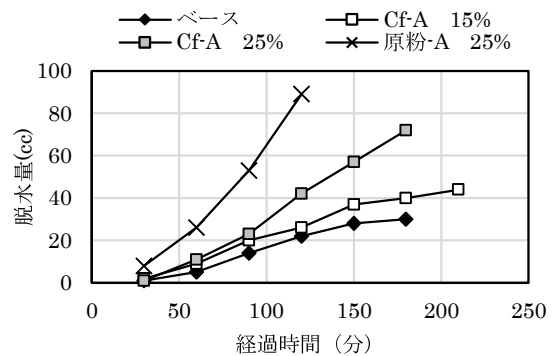


図-3 ブリーディングの測定結果 (実機)

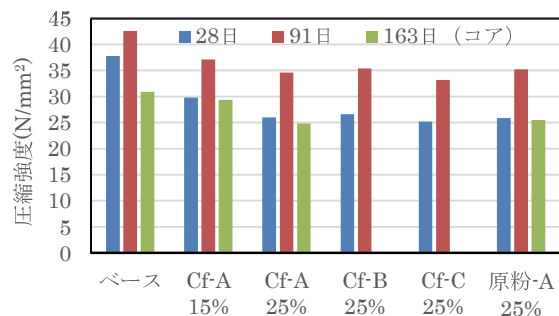


図-4 圧縮強度試験結果

を図-3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。加熱改質 FA 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、それ以上に原粉-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⁾における、フライアッシュを内割り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り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。さらに、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ことに加え、単位水量および AE 剤の使用量が多いことが考えられる。

4.3 強度特性・表面透気係数

室内試験において、材齢91日まで水中養生された供試体の圧縮強度と、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-4に示す。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%の各ケースの強度の違いは大きく見られず、炭種の違いが強度に及ぼす影響は少ないといえる。コア供試体のケースは水中養生のケースより強度が低いが、これはコアの内部側で強度を測定しており、水分の供給が水中養生したものよりも少ないためと考えられる。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、水中養生した供試体、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ことから、フライアッシュの改質自体は強度に影響しないことがわかる。

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-5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」の範囲となり、フライアッシュの使用が表面透気係数に有意な影響を及ぼしているとはいえない結果となった。

4.4 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-6と図-7に示す。電気抵抗率は塩化物イオンの拡散係数と相関があることが知られており⁶⁾、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、既往の研究に基づいてこの見掛けの電気抵

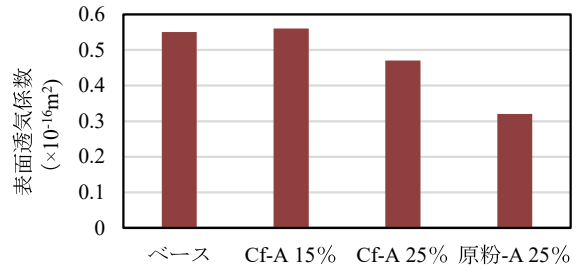


図-5 表面透気係数試験結果 (実機)

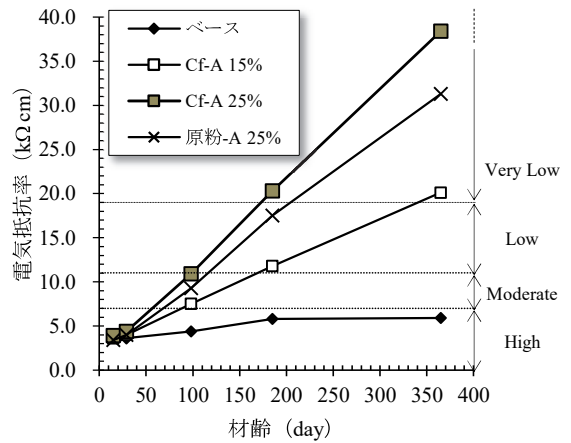


図-6 電気抵抗率 (供試体) (室内)

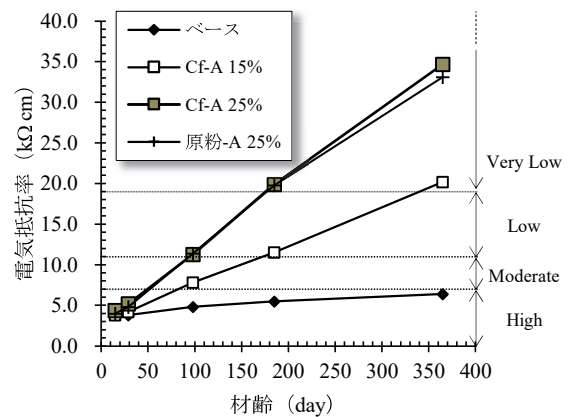


図-7 電気抵抗率 (供試体) (実機)

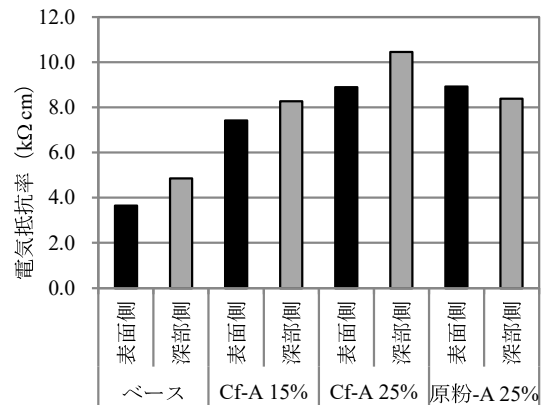


図-8 コアの飽水処理後の電気抵抗率

抗率を真の電気抵抗率に換算し⁴⁾、コンクリートの塩化物イオン透過性の評価に用いた。図より、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。また、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と比較して、フライアッシュを混和した方が、材齢350日までは増加傾向にあった。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。

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-8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ケースとは逆の傾向を示した。このような傾向が生じた原因としては未燃カーボンに含まれる水分の影響が推測されたが、現段階では確認を得るには至っていない。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-9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(163日)での推定値であり、その推定方法は図-7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-9より、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ことが原因として考えられる。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、

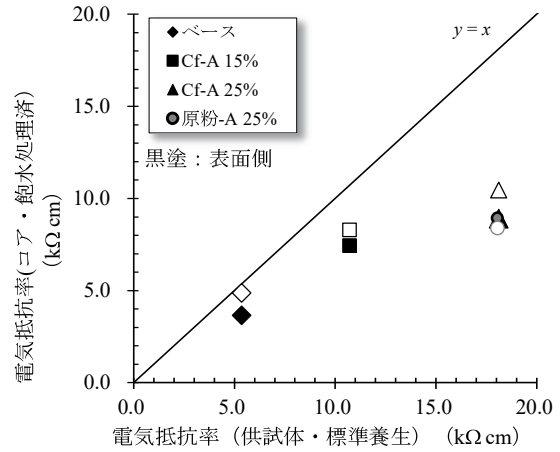


図-9 コアと供試体の電気抵抗率の比較 (実機)

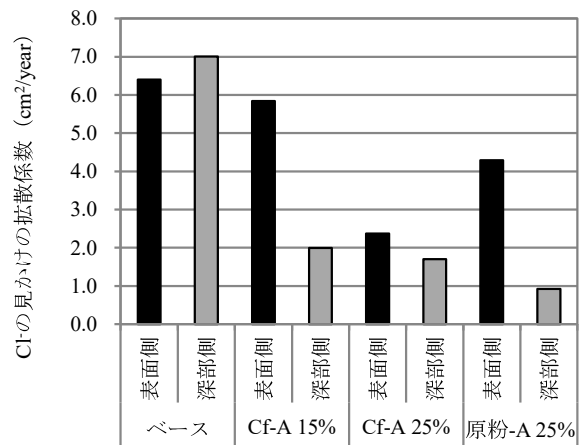


図-10 塩水浸せき試験の結果



写真-4 山田町織笠漁港における現場適用 (左: 打設時、右: 完成時)



写真-5 山田町大沢水門における現場適用 (左: 打設時、右: 打設後)

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、水分の供給を長期間にわたって実施することが望ましいといえる。

4.5 塩水浸せき試験結果

図-10に飽水处理後のコアの塩水浸せき試験結果を示す。図-10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-10 と図-8 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り、拡散係数と電気抵抗率の相関を確認できた。

5. 現場適用事例

写真-4、写真-5 に、山田町織笠漁港および山田町大沢水門において、本研究で得られた結果をもとに、加熱改質 FA を適用した状況を示す。山田町織笠漁港では、防潮堤の頂部被覆コンクリートに使用した。設計スランプは 8cm であったが、骨材の品質上、このスランプでは十分なポンパビリティーの確保が困難であった。しかしながら、加熱改質 FA を使用することにより、設計スランプの範囲内で十分なポンパビリティーを確保することができた。

山田町大沢水門は、海水に接する RC 構造物で、塩害を受ける可能性があることから、加熱改質 FA を使用した。

6. 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。

- i. 加熱改質 FA を内割りで使用することにより、原炭の種類によっては、未混和の場合と比較して単位水量を低減できる場合があり、フライアッシュに原粉を使用した場合と比較して、AE 剤の使用量を半分以下に抑えることができる
- ii. 加熱改質 FA の使用により、良好なワーカビリティーの確保が可能になり、特に間隙通過特性の向上が顕著にみられる
- iii. 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
- iv. 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 の炭種や原粉の使用などによる強度の違いは少ない
- v. 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

- vi. 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
- vii. 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

7. あとがき

本研究は、加熱改質 FA のコンクリート用混和材としての特性を解明するため、東北大学、日本製紙（株）と共同研究を行ったものである。加熱改質 FA は長期にわたり反応性を示すものであり、耐久性への効果を把握するためには、長期的な計測が必要である。また、継続して現場適用を進めることで、さらなる普及展開を図っていきたい。

【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、有蘭大樹、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