

論文 フライアッシュ混和コンクリートを用いた実構造物の追跡調査

横田 優^{*1}・上田隆雄^{*2}・川崎末和^{*3}・河野 清^{*4}

要旨：約 10 年前に細骨材一部代替材としてフライアッシュ（以下「FA」という）を 20%使用して試験施工されたコンクリート構造物（重力式擁壁）を対象に、試験施工時の書類調査の他、現地での目視調査および採取したコアによる圧縮強度、引張強度、弾性係数などの物性試験や、中性化深さ、透水性能（拡散係数）、細孔径分布など耐久性に関わる試験を実施した。その結果、外観にはひび割れ等の劣化変状の進行は全く認められず、圧縮強度に約 20%の増進が認められるなど、その他の結果もすべて、FA 混和コンクリートは無混和の普通コンクリートに比べて組織が密実であり高い耐久性を有していることを示していた。

キーワード：フライアッシュ、実構造物調査、耐久性、ひび割れ、中性化速度係数、拡散係数

1. はじめに

我が国では、これまで電力需要の増大に対応するため、エネルギー戦略上、電源の多様化を推進してきた。その結果、石炭火力発電所が占める割合は 18%程度まで増加し、年間 1000 万トン程度の石炭灰が排出されている。石炭灰の有効利用方法の確立は、未利用資源の有効活用および環境負荷の低減の観点から、電気事業においてのみならず、解決すべき重要な課題である。

石炭灰の大部分を占めるフライアッシュ（以下「FA」という）は、微細な球形の粒子が多いこと（物理的特性）からフレッシュコンクリートのワーカビリティの改善や単位水量の低減ならびに、それに伴う初期ひび割れの抑制が、またポズラン反応（化学的特性）によりコンクリート組織が密実になることから耐久性の向上や長期にわたっての強度増進がそれぞれ期待されるために、古くからコンクリート用混和材として利用する研究が行われてきた。特に、最近の骨材事情の悪化や厳しい環境下へのコンクリート構造物の進出等に伴い、コンクリート品質の長期的な保証、構造物としての長期的な性能保証など、コンクリート構造物の耐久性向上に関する要求が強まる中、FA のもつ耐久性向上に寄与できる潜在能力に再び注目が集まっている。仕様規定から性能規定への移行とも相まって、強度、施工性、耐久性の観点から FA 混和コンクリートの適正な配合設計方法の確立が望まれている。2003 年 6 月には土木学会四国支部から「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）」が発行された¹⁾。

本調査は、FA を細骨材一部代替材として混和した施工後約 10 年を経過したコンクリート構造物（重力式擁壁）を対象に、FA の混和がコンクリート構造物の耐久性に与

える影響を定量的に評価するための基礎資料を得ることを目的に実施したものである。

2. 調査概要

2.1 調査対象構造物

平成 9 年 9 月に国土交通省四国地方整備局松山工事事務所が、国道 11 号の新居浜バイパスにおいて、技術活用パイロット事業として、フライアッシュ多量混和コンクリートの現場での適用性を検討するため試験施工を実施した。構造物は図-1 に示す重力式擁壁である。また、調査時点（平成 19 年 8 月）の状況を図-2 に示す。

地先名：愛媛県新居浜市岸の上町～東田

工事名：平成 8 年度 岸の上改良工事

（施主：国土交通省四国地方整備局松山工事事務所）

対象構造物：国道 11 号バイパス国領川橋左岸側道路

南側重力式擁壁（L=12.7m, H=3.3～3.2m）

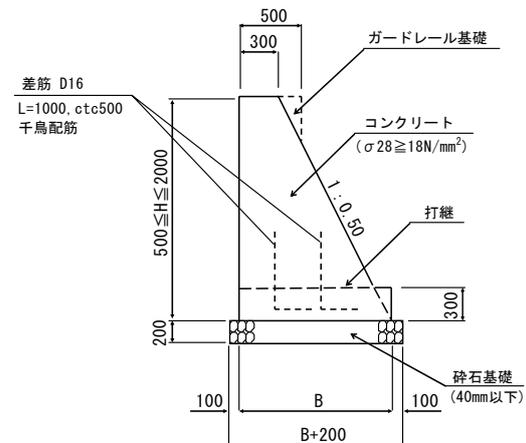


図-1 重力式擁壁（構造図）

*1 (株) 四国総合研究所 土木技術部部长 博(工) (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部准教授 博(工) (正会員)

*3 国土交通省 四国地方整備局四国技術事務所所長

*4 徳島大学 名誉教授 工博 (正会員)



西側：FA 混和コンクリート

東側：普通コンクリート

写真-1 調査対象構造物(重力式擁壁)の全景

表-1 コンクリート配合 (I : 普通コンクリート, II : FA 混和コンクリート)

区分	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									混和剤① (%)	混和剤②
						水 W	セメント C	細骨材 S				粗骨材 G				
								砕砂	海砂	石灰石 砕砂	FA	G1 1505	G2 2015	G3 4020		
I	40	8±2.5	4.5±1.5	62	40.6	157	253	514	219	—	—	270	272	555	×C	10A
								733				1097				
II	40	8±2.5	4.5±1.5	65	41.4	148	228	201	201	252	137	325	328	442	×C	30A
								791				1095				

注) FA : フライアッシュⅢ種またはⅣ種灰 (使用当時は JIS 規格外の石炭灰で、「非 JIS 灰」と呼ばれていた)
 混和剤① : (I) 普通 AE 減水剤, (II) 高性能 AE 減水剤, 混和剤② : AE 補助剤
 混和剤②の表中の A : 1A はセメント 1 kg に対して 0.01cm³ 添加

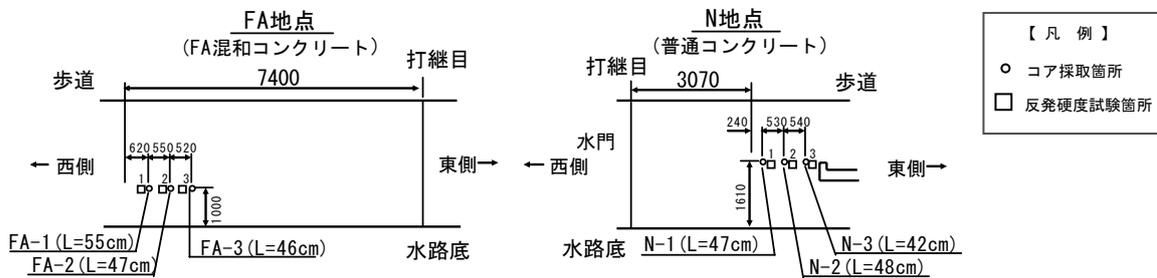


図-2 コア採取箇所および反発硬度試験箇所

2.2 コンクリート配合

試験施工された FA 混和コンクリートについては、普通コンクリートに対して、同等の施工性を確保しながら強度や耐久性などの品質を向上させることを目指して、スランプ、空気量および水セメント比 (以下、W/C という) は普通コンクリートとほぼ同じ値が設定され、細骨材代替混和材とし細骨材に対する容積置換率で 20% 程度の FA が外割使用されている。なお、使用された FA は現在の JIS A 6201 「フライアッシュの品質規格」によると、Ⅲ種またはⅣ種灰 (当時は JIS 規格外の石炭灰で、「非 JIS 灰」と呼ばれていた) に相当する。

普通コンクリートおよび FA 混和コンクリートの配合を表-1 にそれぞれ示す。FA 混和コンクリートは、FA に含まれる未燃カーボン等の影響で所定のスランプおよ

び空気量を確保するために高性能 AE 減水剤や AE 補助剤の使用量が多くなっているが、単位セメント量および単位水量は、普通コンクリートに比べてそれぞれ約 10% (25kg/m³) および約 6% (9kg/m³) 少なくなっている。また W/C は 62% に対して 65% と若干大きいが、水結合材比 W/(C+FA) としては 40.5% になっている。その他特徴的なこととしては、細骨材に使用されている砕砂のうちほぼ半分が石灰石砕砂であること、粗骨材は粒径の小さい G1 や G2 の割合が多くなっていることが挙げられる。

2.3 調査・試験項目ならびに方法

図-2 に現地でのコア採取位置ならびに反発硬度試験箇所を示す。試験施工時の書類調査の他、現地にてコンクリート表面の目視調査を行うとともに、採取したコアによる圧縮強度、引張強度、弾性係数などの物性試験や、

表-2 調査試験項目一覧表

区分	試験項目等	仕様, 試験方法	試験位置(コンクリート表面からの距離)等
	設計時および施工時の記録等	書類調査	
現地調査	外観観察	コンクリート表面の目視調査	
	コンクリートの反発度測定	JIS A 1155, リバウンドハンマー	図-2
	コンクリートコアの採取	簡易ボーリングマシン φ10cm, それぞれ3本	図-2
採取したコアによる試験	中性化深さ測定	JIS A 1152 フェノールフタレイン法	0~6cm までの長さ6cm を使用
	透水性試験(拡散係数)	インプット法	6~20cm の区間の長さ10cm を使用
	圧縮強度試験・静弾性係数試験	JIS A 1108・JIS A 1149	20cm 以上の区間の長さ20cm を使用
	単位体積質量測定・吸水率測定	採取時, 表乾状態, 絶乾状態	圧縮強度試験用コアを利用
	引張(割裂)強度試験	JIS A 1113	中性化深さ測定用コア(長さ6cm)を利用
	細孔径分布測定(全空隙量, 全表面積, 平均細孔径)	水銀圧入式ポロシメーター (絶乾状態の試料から3~5mm 程度のモルタルを取り出し3日間真空乾燥させて測定)	・0~2cm, 2~4cm, 4~6cm(共通) ・20~22cm(普通コンクリート) ・30~32cm(FA 混和コンクリート)

・現地調査実施日：平成19年8月23日(木)

中性化深さ, 透水性能(拡散係数), 細孔径分布など耐久性に関わる試験を実施した。表-2 に実施した調査・試験項目ならびに方法の一覧を示す。

3. 調査結果

3.1 外観観察結果

目視観察を行った擁壁の普通コンクリートと FA 混和コンクリートの代表的な側面および天端の外観写真を写真-2 に示す。今回調査した構造物の施工試験時の報告書には「脱型後の FA 混和コンクリートの表面はやや黒っぽい, 普通コンクリートより緻密で光沢があり, つややかな仕上がりとになっていた」とある。また, 「FA 混和コンクリートは, 普通コンクリートと比較して, 粘性が強く作業性が若干劣るものの, ブリージングの影響を受けにくい。」とも記録されていた。

今回観察した範囲の FA 混和コンクリート表面に乾燥収縮に伴うひび割れの発生は認められなかった。普通コンクリートと FA 混和コンクリートの外観について, コンクリート表面の黒ずみ程度の違いは, 路面に降った雨水の擁壁側面への流下状況が異なるので一概には言えないが, 雨水が直接当る擁壁天端面においては, 差が歴然としていた。普通コンクリートの天端面では, セメント部分が洗い流されコンクリート中の砂が現れザラザラした状態になっており, ブリージングの影響が認められた。しかし, FA 混和コンクリートの天端面では, そのような変状は一切認められなかった。

3.2 コアを用いた試験結果

普通コンクリートおよび FA 混和コンクリートから採



(a) 普通コンクリート (b) FA 混和コンクリート

写真-2 擁壁コンクリート表面の外観状況



(a) 普通コンクリート (b) FA 混和コンクリート
写真-3 採取したコアの一例

表-3 FA 混和コンクリート試験施工時の品質管理試験結果

	打設日 (H9.9.19)		平均 値	規格値	[参考] 普通コン クリート	
	1台 目	8台 目				
スランプ(cm)	10.0	9.5	10.0	8±2.5	—	
空気量(%)	4.8	4.3	4.6	4.5±1.5	—	
コンクリート 温度(°C)	24.0	27.0	25.5	—	—	
圧縮 強度 (N/mm ²)	材齢 7日	26.0	27.3	26.7	—	16.4
	材齢 28日	40.0	41.3	40.7	18以上	27.9

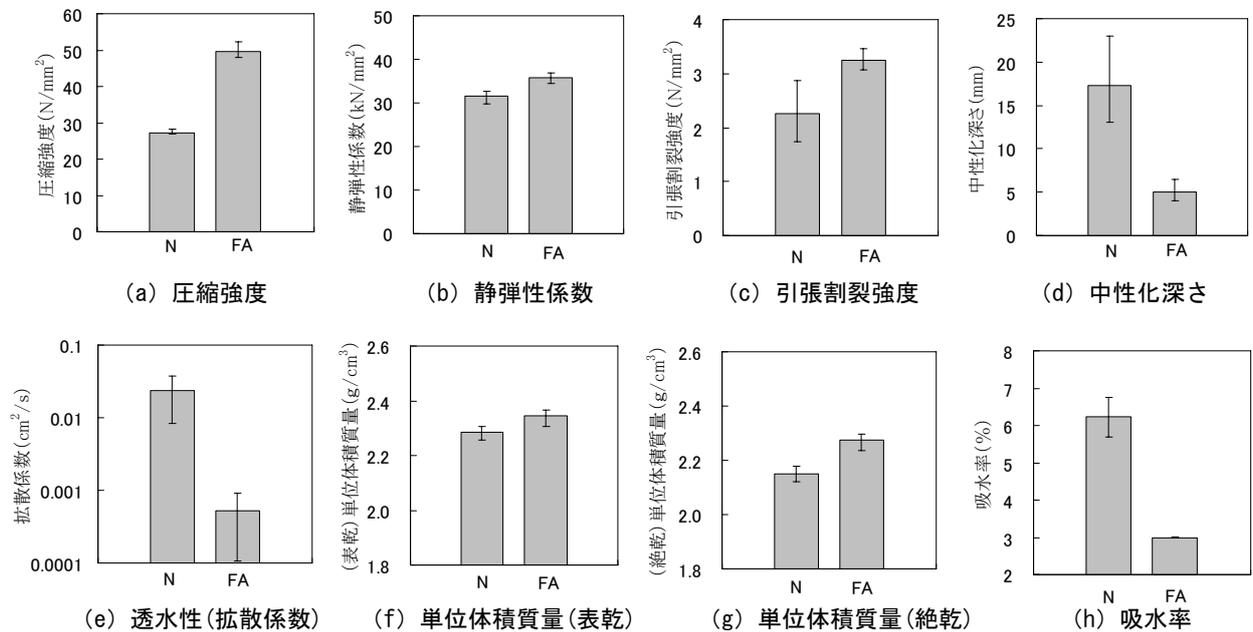


図-3 コアを用いた試験結果—3個の平均— (N: 普通コンクリート, FA: FA 混和コンクリート)

取したコアの側面ならびに奥(上部写真の右側)の破断面の状況を写真-3に示す。また、これらコアを用いた圧縮強度、弾性係数、引張強度などの物性試験や、中性化深さ、透水性(拡散係数)、吸水率および細孔構造に関する試験結果を図-3~6にそれぞれ示す。細孔径分布以外はいずれも3個の平均値である。また、施工試験時の報告書に記載されていたFA混和コンクリート試験施工時(材齢28日まで)の品質管理試験結果を普通コンクリートの結果とともに、表-3に示す。

今回調査した細骨材代替材としてFAを混和したコンクリートは無混和の普通コンクリートと比較して、次のようなことが分かった。

(1)コンクリートコアの外観(写真-3)

FA混和コンクリートは、普通コンクリートと比較して、モルタル部の色は青黒い色をしているが、普通コンクリ

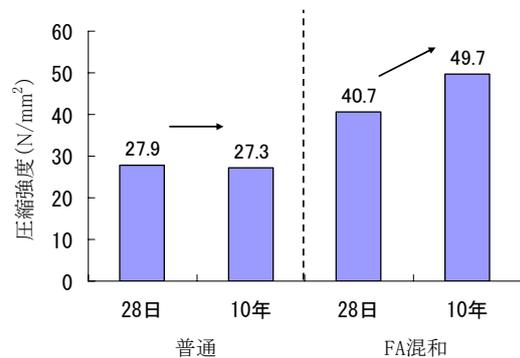


図-4 圧縮強度の経時変化

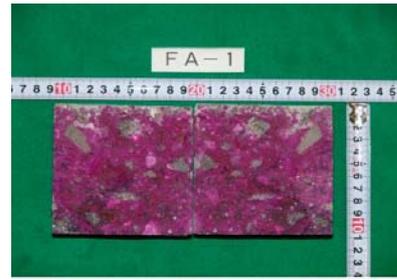
ートと比較して全く遜色はない。反対に、3.1の外観観察結果のところ記載したように、FA混和コンクリートの方がより緻密で光沢が認められる。

(2)圧縮強度等の力学的特性(図-3(a)~(c), 図-4)

FA混和コンクリートの圧縮強度、静弾性係数および

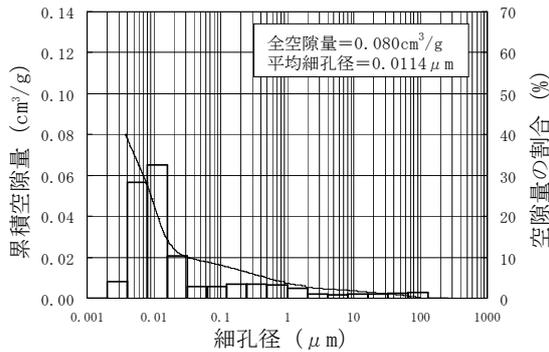


(a) 普通コンクリート

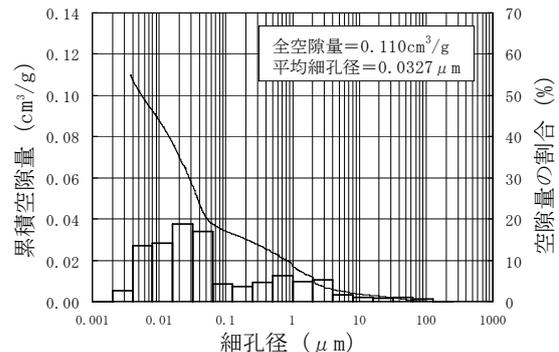


(b) FA 混和コンクリート

写真-4 中性化深さ



(a) 普通 (深さ: 20-22cm)



(b) FA 混和 (深さ: 30-32cm)

図-5 普通と FA 混和コンクリートの細孔径分布の代表例

引張強度はいずれも普通コンクリートより大きかった。

特に、圧縮強度については、普通コンクリートの場合、いずれの材齢も 27~28N/mm² 程度で強度増進は認められなかったが、FA 混和コンクリートの場合、材齢 28 日強度が 40.7 N/mm²であったのに対して、今回の強度は 49.7 N/mm²と 10 年間で約 20%強度が増進していることが分かった。FA のポズラン反応の進展によるものと考えられる。

一方、竹中らは、沿岸部の干満帯部に 5 年 4 ヶ月暴露したコンクリート供試体の圧縮強度を調べ、材齢 28 日強度に対して、プレーンコンクリートで 13%、今回と同様に FA を外割で混和した FA 混和コンクリートで 31% の強度増進があったと報告している²⁾。コンクリートの配合や材齢ならびに構造物の置かれている環境が異なるが、竹中らの実験結果と比較して、今回陸上部の擁壁コンクリートとして 10 年間で約 20%の強度増進が認められたことは妥当な結果と考えられる。

以上、スランプ、空気量、W/C を一定にして、細骨材の一部代替材として FA を外割で混和したコンクリートについては、もとのセメントの硬化反応に FA のポズラン反応が加わることにより、初期の強度発現も良く、長期にわたる強度増進も期待できることが確認された。

(3) 中性化 (図-3 (d), 写真-4)

FA 混和コンクリートの 10 年間の中性化深さは普通コンクリートが 17.3mm に対して 5.0mm と小さく、中性化速度係数を求めると 1.6 mm 年^{-0.5}となる。

(4) 透水性 (図-3 (e))

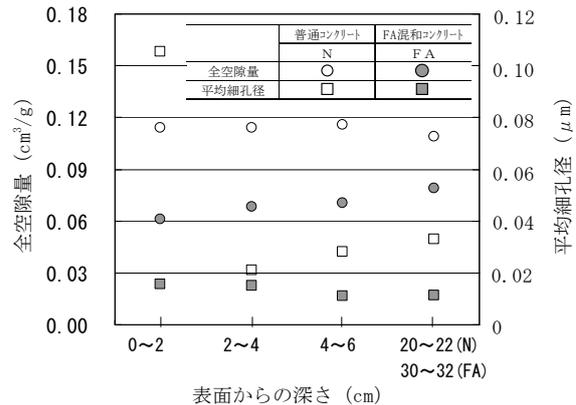


図-6 普通と FA 混和コンクリートの全空隙量ならびに平均細孔径の深さ方向の分布

インプット法による透水試験から得られた FA 混和コンクリートの拡散係数は $5.3 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ と非常に小さく、水密性に優れていることが分かる。

(5) 単位体積質量 (図-3 (f) (g))

FA 混和コンクリートの単位体積質量は、表乾と絶乾いずれの状態でも、普通コンクリートより大きい。

(6) 吸水率 (図-3 (h))。

普通コンクリートの吸水率が 6.2% に対して、FA 混和コンクリートの吸水率は 3.0% と小さく、コンクリート中の空隙量が半分程度と少ないことが分かる。

(7) 細孔構造

普通コンクリートと FA 混和コンクリートのモルタル部の代表的な細孔径分布を図-5 に、全空隙量と平均細孔径の深さ方向の分布を図-6 にそれぞれ示す。

図-6 より、普通コンクリート表層部(0~2cm を除く)の平均細孔径を除いて、普通コンクリートおよび FA 混和コンクリートの全空隙量および平均細孔径は深さ方向にほぼ一定の値をとっている。普通コンクリートの全空隙量および平均細孔径(表層部の0.106 μm を除く)の深さ方向の平均値は 0.11 cm^3/g および 0.027 μm であるのに対して、FA 混和コンクリートの全空隙量は 0.070 cm^3/g と少なく、平均細孔径も 0.013 μm と小さいことから、FA 混和コンクリートの組織は普通コンクリートよりも緻密なことが分かる。特に、図-5 より、FA 混和コンクリートの細孔構造については、細孔径が 0.030 μm 以下の非常に細かい空隙が多く、全空隙量の 75%を占めていることが分かる。

以上、いずれの試験結果も、単位セメント量をほとんど減らすことなく、細骨材の一部代替材として FA を外割で混和したコンクリートは、長期にわたり強度が増進しており、普通コンクリートに比べて組織がより緻密になり耐久性に優れていることを示していた。

3.3 反発度測定結果

現場の擁壁側面で測定したリバウンドハンマーによるコンクリートの反発度およびそれより推定した圧縮強度を、コアによる実測値とともに表-4 に示す。今回の調査では、3 つの機関から提案されている強度推定式のうち日本材料学会式が最も実測値と近かった。

表-4 反発度測定結果

		普通コンクリート	FA 混和コンクリート
反発度	3 個所の測定値	38, 38, 39	53, 53, 53
	平均値	38.3	53.0
推定強度 (N/mm^2)	日本材料学会式	30.6	49.3
	東京都建築材料試験所式	26.7	41.1
	日本建築学会式	37.4	47.7
(参考)コアによる 圧縮強度試験結果		27.3	49.7

4. まとめ

約 10 年前に FA (現在の JIS 規格ではフライアッシュ III 種または IV 種灰に相当) を使用して試験施工されたコンクリート構造物(重力式擁壁)の調査を行った。この FA 混和コンクリートは、普通コンクリートに対して、同等の施工性を確保しながら強度や耐久性などの品質を向上させることを目指して、スランプ、空気量および W/C は普通コンクリートとほぼ同じ値が設定され、細骨材一部代替混和材とし細骨材に対する容積置換率で 20% 程度の FA が外割使用されている。本調査から得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 施工試験時の報告書に「FA 混和コンクリートは、普通コンクリートと比較して、粘性が強く作業性が若干劣るものの、ブリージングの影響を受けにくい。また、脱型後のコンクリート表面はやや黒っぽいが、普通コンクリートより緻密で光沢があり、つややかな仕上がりとなっていた」との記述が見られるように、FA 混和コンクリート表面には乾燥収縮ひび割れをはじめとする変状は認められなかった。特に、普通コンクリートの天端面では雨水によりセメント部分が洗い流されザラザラした状態になっており、ブリージングの影響が認められたが、FA 混和コンクリートの天端面では、そのような変状は一切認められなかった。
- (2) スランプ、空気量、W/C を一定にして、細骨材の一部代替混和材として FA を外割使用した今回の FA 混和コンクリートは、もともとのセメントの硬化反応に FA のポゾラン反応が加わることにより、普通コンクリートよりも、初期の強度発現が良く、長期にわたる強度増進も期待できることが確認された。
- (3) 圧縮強度の他、引張強度、弾性係数、単位体積質量、吸水率などの物性値も、中性化深さ、透水性能(拡散係数)、細孔径分布の試験結果もすべて、FA 混和コンクリートは普通コンクリートに比べて組織が密実であり高い耐久性を有していることを示していた。
- (4) 試験施工後 10 年目の 1 回のみ調査結果であるが、劣化の進行は全く認められなかった。

本調査は(社)コンクリート工学協会四国支部「フライアッシュの有効利用と混和コンクリート構造物の耐久性に関する研究委員会」の活動の一環として実施したものである^{3),4)}。最後に、本調査を実施するにあたり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)，2003.6
- 2) 竹中佳，高橋利昌，武知隆男：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの強度および遮塩性—大型ブロックによる5年間屋外暴露試験結果—，電力土木，No.339，pp.66-70，2009.1
- 3) (社)日本コンクリート工学協会四国支部：フライアッシュの有効利用と混和コンクリート構造物の耐久性に関する研究委員会報告書，2008.3
- 4) 上田隆雄：フライアッシュの有効利用と混和コンクリート構造物の耐久性に関する研究委員会の活動について，コンクリートテクノ，Vol.27，No7，pp.35-41，2008.10