

論文 細骨材として砕砂とフライアッシュ IV 種を用いたコンクリートの諸特性

松家 武樹^{*1}・堺 孝司^{*2}・空保 政行^{*3}・山形 秀之^{*4}

要旨：本研究は，細骨材として砕砂を用い，その一部をフライアッシュ IV 種に置換したコンクリートのフレッシュおよび硬化コンクリートの基本的特性を実験的に検討したものである。その結果，砕砂やフライアッシュ IV 種の利用は，海砂を用いる場合より，フレッシュコンクリートの性能確保のために高性能 AE 減水剤や AE 剤の使用量を増加させるが，硬化コンクリートの性能は向上することが明らかになった。

キーワード：砕砂，フライアッシュ IV 種，凝結，ブリーディング，圧縮強度，中性化

1. はじめに

近年，あらゆる分野で環境に対する配慮が益々その重要性を増している。コンクリートの分野も例外ではあり得ない。

瀬戸内海地域においてはこれまで海砂を骨材資源として利用してきたが，環境保全の観点からその採取を禁止する動きが加速している。このことは，海砂に代わる骨材の確保が喫緊の課題であることを意味する。代替骨材の可能性としてはいろいろあるが，量的な確保を考えれば「砕砂」が最も現実的である。また，砕砂を補填するものとして，産業副産物や都市ごみの高温溶融残渣等が考えられる。すなわち，フライアッシュや各種スラグがその対象となる。

しかしながら，砂の全量を砕砂としたコンクリートに関する研究¹⁾や，セメントの一部代替材としての利用以外におけるコンクリートへのフライアッシュの活用に関する研究²⁾⁻³⁾は極めて少ない。

以上のことを背景に，本研究では，細骨材として砕砂を試験製造し，これらを一本砂として用いると共に，細骨材の一部をフライアッシュ IV 種で置換したコンクリートのフレッシュおよび硬化コンクリートの基本的特性について，

山砂と海砂の混合砂を用いたコンクリートとの比較において検討することにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) セメント

セメントは，普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，比表面積 3280cm²/g）を使用した。

(2) フライアッシュ

フライアッシュは，四国の火力発電所から発生したフライアッシュ II 種を直径 20 μm 以下となるように風力分級し，フライアッシュ I 種を選別した後の残滓であるフライアッシュ IV 種（密度 2.2g/cm³，比表面積 1720 cm²/g，強熱減量 1.9%）を使用した。

(3) 骨材

粗骨材は，徳島県市場産の砕石 G1（岩種：砂岩，最大寸法 20mm，密度 2.58g/cm³，吸水率 2.08%，F.M. 7.07）および砕石 G2（岩種：砂岩，最大寸法 15mm，密度 2.57g/cm³，吸水率 2.31%，F.M. 6.40）の 2 種類を 1:1 の割合で使用した。

細骨材は，香川県塩江産の砕砂 S1（岩種：花崗岩・風化花崗岩，密度 2.60g/cm³，吸水率

*1 香川大学 工学部安全システム建設工学科（正会員）

*2 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博（正会員）

*3 (株)穴吹工務店 研究開発部研究開発課

*4 (株)穴吹工務店 研究開発部研究開発課

1.32% , F.M. 2.71) , および香川県坂出産の山砂 S2(岩種 : 花崗岩・風化花崗岩 , 密度 2.53g/cm³ , 吸水率 2.45% , F.M. 3.15) と香川県直島沖産の海砂 S3(密度 2.55g/cm³ , 吸水率 1.75% , F.M. 2.20) を F.M. が 2.71 となるよう混合したものの (以下 , 混合砂と略) を使用した。

(4) 混和剤

混和剤は , ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤の AE 剤を使用した。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートは , 温度 20 , 相対湿度 60% の

試験室で容量 55 リットルのパン型ミキサーを用いて , 練混ぜ量を 40 リットルとして製造した。練混ぜは , 最初にセメントと細骨材を 15 秒間空練りし , 次に水と混和剤を加えて 30 秒間練り混ぜた。最後に粗骨材を加えて 90 秒間練り混ぜた。

コンクリートの配合においては , 目標スランブを 18±1.5cm , 目標空気量を 4.5±1.0% とし , 水セメント比 W/C として 55 , 50 , 45 および 35% を考慮した。フライアッシュは , 細骨材の容積の 0 , 5 , 10 および 15% の混入とした。配合においては , 単位水量 , 単位粗骨材量を一定とし , スランブおよび空気量は混和剤の添加量によって調整した。配合の一覧を表 - 1 に示す。

表 - 1 コンクリートの配合

記号	水セメント比 (%) W/C	フライアッシュ置換率 (%) FA/(S+FA)	単位量 (kg/m ³)								高性能 AE 減水剤		A E 剤 C×0.001%	
			水		セメント			細骨材		フライアッシュ		粗骨材		C×%
			W	C	S1	S2	S3	F A	G1	G2				
A55F00	55	0	180	327	858				0	441	439	1.60	2.0	
A55F05	55	5			815				36			1.65	3.0	
A55F10	55	10			772				73			1.60	5.0	
A55F15	55	15			729				109			1.65	7.0	
A50F00	50	0	180	360	829				0	441	439	1.45	1.0	
A50F05	50	5			788				35			1.45	3.0	
A50F10	50	10			746				70			1.45	4.5	
A50F15	50	15			705				106			1.50	6.5	
A45F00	45	0	180	400	796				0	441	439	1.30	1.0	
A45F05	45	5			756				34			1.25	3.0	
A45F10	45	10			716				67			1.40	4.0	
A45F15	45	15			676				101			1.35	8.0	
A35F00	35	0	180	514	702				0	441	439	1.10	1.2	
A35F05	35	5			667				30			1.20	3.0	
A35F10	35	10			632				59			1.30	5.0	
A35F15	35	15			597				89			1.45	8.0	
B55F00	55	0	180	327		451	387		0	441	439	0.87	3.0	
B45F00	45	0		400		418	359		0			0.68	2.5	

A : 砕砂 B : 混合砂

2.3 検討項目

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートに対してスランブ試験 , 空気量試験 , プリーディング試験 , および凝結試験を行った。各試験は , それぞれ JIS A 1101 , JIS A 1128 , JIS A 1123 , および JIS A 6204 附属書 1 に準拠して行った。

(2) 硬化コンクリート

a) 圧縮試験

圧縮強度は 10×20cm の供試体を用い , JIS

A 1108 に準拠して行った。試験材齢は , 7 , 28 および 91 日とした。養生は , 供試体作成後 1 日湿気養生し , 脱型後 , 所定の材齢まで 20 で水中養生を行った。

b) 静弾性係数試験

静弾性係数は , JIS A 1149 に準拠して行い , 検長 70mm のひずみゲージを用いて最大荷重の 1/3 に相当する応力と供試体の縦ひずみ 50×10⁻⁶ の時の応力とを結ぶ線分の勾配として求めた。

表 - 2 実験結果

記号	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			ブリーディ ング量 (cm ³ /cm ²)	凝結 (h)	
			1週	4週	13週		始発	終結
A55F00	18.5	4.8	30.9	38.0	43.1	0.131	6.0	8.2
A55F05	19.5	4.2	32.9	42.4	49.3	-	-	-
A55F10	19.5	4.3	33.3	42.7	56.7	0.110	6.0	8.2
A55F15	18.5	3.9	35.3	46.4	57.5	0.088	6.0	8.2
A50F00	19.5	4.3	36.9	46.0	52.2	-	-	-
A50F05	19.5	5.1	36.2	46.1	54.9	-	-	-
A50F10	19.0	4.7	38.4	47.6	58.2	-	-	-
A50F15	19.5	5.0	38.7	49.8	61.7	-	-	-
A45F00	19.5	4.8	41.9	50.0	60.0	0.088	5.3	6.9
A45F05	17.5	4.1	42.3	53.5	60.8	-	-	-
A45F10	18.5	4.6	43.8	55.6	65.0	0.049	5.2	7.2
A45F15	18.5	4.5	45.7	56.5	66.7	0.043	5.1	7.5
A35F00	19.0	4.9	58.3	66.2	78.8	0.034	4.8	6.6
A35F05	17.5	3.8	59.5	71.0	80.9	-	-	-
A35F10	18.0	4.5	61.4	72.5	81.1	0.009	4.8	7.0
A35F15	19.5	4.8	62.2	76.5	85.1	0.003	5.0	7.3
B55F00	19.5	5.0	26.5	33.8	37.9	0.177	5.0	6.7
B45F00	17.5	5.2	34.1	42.7	49.2	0.118	4.6	6.3

c) 促進中性化試験

日本建築学会のコンクリートの促進中性化試験方法(案)⁴⁾に準じて行った。供試体は、10×10×40cmの角柱とし、試験に用いた供試体は4週間水中養生し、その後4週間は、温度20±2℃、相対湿度60±5%の気中で養生した。その後、温度20±2℃、相対湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%の条件で促進中性化試験を実施した。中性化深さは、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を用いて測定した。中性化深さの測定は、促進中性化開始日からそれぞれ1、4、8および13週としたが、本論文では、8週までの結果について述べる。

3. 実験結果および考察

表 - 2 に実験結果の一覧を示す。

3.1 フレッシュコンクリート

(1) 高性能 AE 減水剤添加量

単位水量および単位粗骨材量を一定とした場合、高性能 AE 減水剤添加量に影響するのは、主に細骨材の粒状と粉体量と考えられる。図 - 1 に、粉体量(セメント量とフライアッシュ量の和)に対する高性能 AE 減水剤添加量の変化を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、砕砂を用いた場合の方が混合砂を用いた場合より高性能 AE 減水剤の添加量が著しく増大することがわかる。これは、砕砂の粒状に起因すると考えられる。混合砂および砕砂の実績率は、それぞれ62.8%および58.3%であった。

図 - 1 から、粉体量が300~500kg/m³の範囲では粉体量に関係なく高性能 AE 減水剤の添加量はほぼ一定であることがわかる。しかし、粉体量が500kg/m³を越えると急激に高性能 AE 減水剤の添加量が増大する。

図 - 2 は、粉体量に対するフライアッシュ量の比(以下、粉体比と略)と高性能 AE 減水剤添加量の関係を示す。

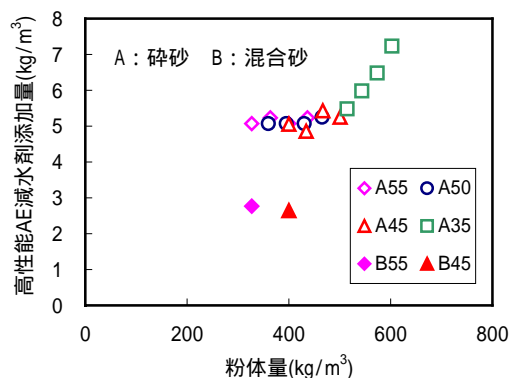


図 - 1 高性能 AE 減水剤添加量

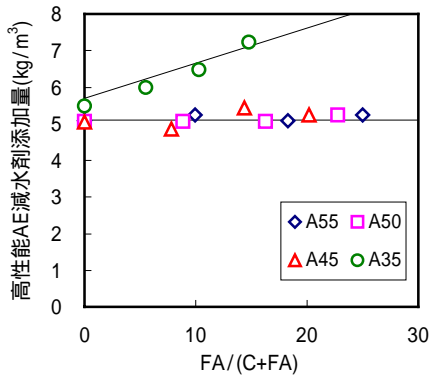


図 - 2 粉体量に対するフライアッシュ量の比と高性能 AE 減水剤添加量の関係

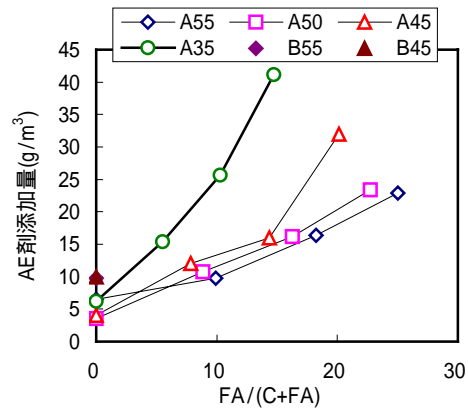


図 - 3 粉体量に対するフライアッシュ量の比と AE 剤添加量の関係

(2) AE 剤の添加量

図 - 3 に、粉体比と AE 剤添加量の関係を示す。

図から、粉体比の増加および水セメント比の減少と共に、AE 剤添加量が増加することが分かる。フライアッシュの混入は、その中に含まれる未燃焼炭素の AE 剤への吸着により、所定の空気量を確保するために AE 剤の量を増加させる必要があることが知られている⁵⁾。フライアッシュ量の増加に伴う AE 剤量の増加は、粉体量の増加と強熱減量 1.9%に相当する未燃焼炭素の増加の両方に起因すると考えられるが、それぞれの寄与の程度は分からない。

(3) プリーディング量

図 - 4 に、プリーディング試験結果を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、砕砂の方がプリーディング量が少ない傾向となっている。これは、混合砂と砕砂の微粒分量がそれぞれ 2.91% および 3.81% であり、砕砂の微粒分量が結果として混合砂よりプリーディングを抑制したことによると考えられる。また、水セメント比が大きいほどプリーディング量が増加し、フライアッシュの置換率の増加と共にプリーディング量は減少する傾向がある。

プリーディングの継続時間についてみると、混合砂では 4 時間でプリーディングが終了しているのに対して、砕砂では 5 時間を越えている。これは、砕砂を用いた場合、高性能 AE 減水剤の量が増加したことによってセメントの硬化にお

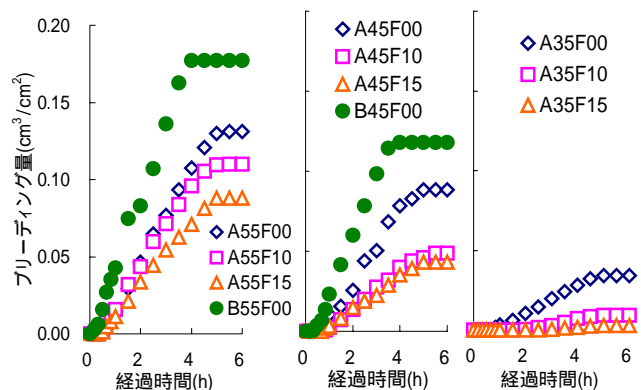


図 - 4 プリーディング量

ける遅延効果が表れたと考えられる。また、フライアッシュの置換率は、プリーディングの終了時間に影響しない結果となった。

(4) 凝結時間

図 - 5 に、凝結試験結果を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、始発および終結時間とも砕砂の方が遅くなっていることがわかる。これは、砕砂を用いた場合、所定のスランプを得るために高性能 AE 減水剤の添加量が増加したためと考えられる。また、W/C を小さくすることにより、始発および終結時間が早くなった。これは、セメント量の増加による強度発現が高性能 AE 減水剤による遅延効果の影響より大きくなったことを意味する。フライアッシュ置換率増加に伴う終結時間の遅れは、高性能 AE 減水剤、AE 剤、およびプリーディングに起因すると考えられるが、それぞれの影響の程度についての定量的な評価は困難である。

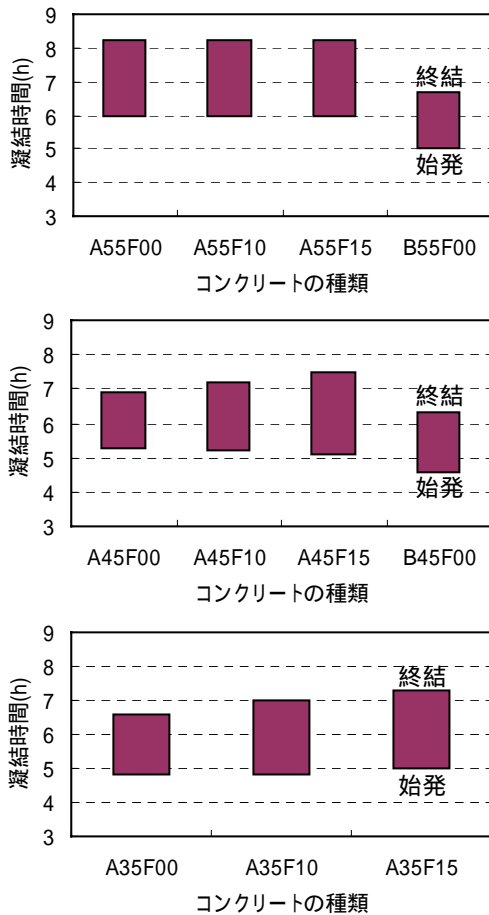


図 - 5 凝結時間

3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

図 - 6 に、コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、砕砂を用いた方が圧縮強度が大きくなった。これは、骨材界面の緻密化によるものと考えられる。

フライアッシュの置換率の増加は、圧縮強度

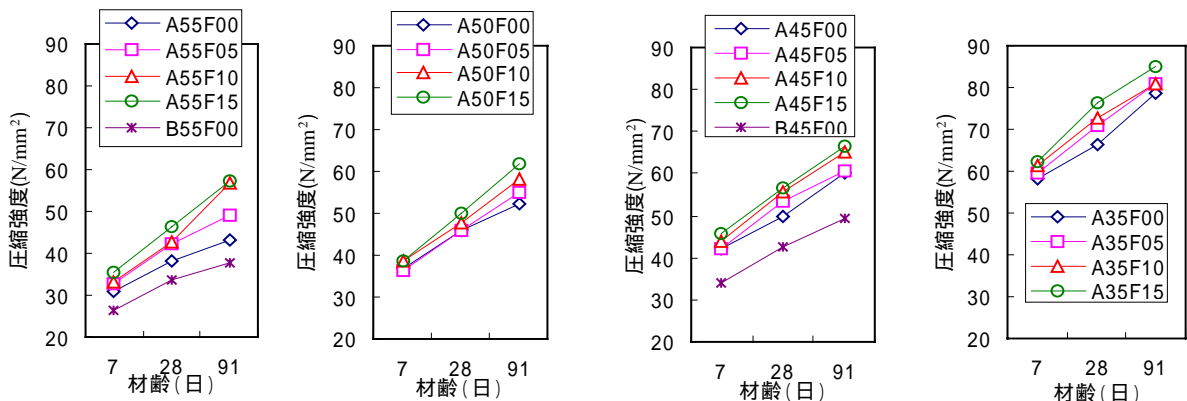


図 - 6 圧縮強度

の増加をもたらす傾向がある。これは、フライアッシュの微粉末充填効果と考えられる。材齢 91 日における強度発現は、フライアッシュのポゾラン反応による寄与があると考えられるが、その程度についてはわからない。

(2) 静弾性係数

図 - 7 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、有意な差が見られない結果となった。細骨材の一部をフライアッシュに置換して用いた場合、フライアッシュ置換率を増加させると強度は増加し、それに伴って静弾性係数も増加した。また、材齢 28 日と 91 日と比較すると、同じ強度に対する静弾性係数は、材齢 91 日の方が大きくなる傾向を示した。

図 - 7 には、日本建築学会 RC 規準式⁶⁾による結果も示す。本研究で得られた静弾性係数の値は、全体的に同規準式より小さなものとなった。同規準式におけるフライアッシュの影響は、静弾性係数の値を増加させるものとなっているが、本研究ではそのような傾向は見られなかった。なお、RC 規準式におけるコンクリートの単位容積重量として、 23.0kN/m^3 を用いたが、本実験で得られた静弾性係数が RC 規準式に比べて相対的に小さくなった原因については、今後検討が必要である。

(3) 中性化深さ

図 - 8 に、促進中性化試験の材齢 8 週までの結果を示す。

混合砂と砕砂を比較すると、砕砂を用いた場合

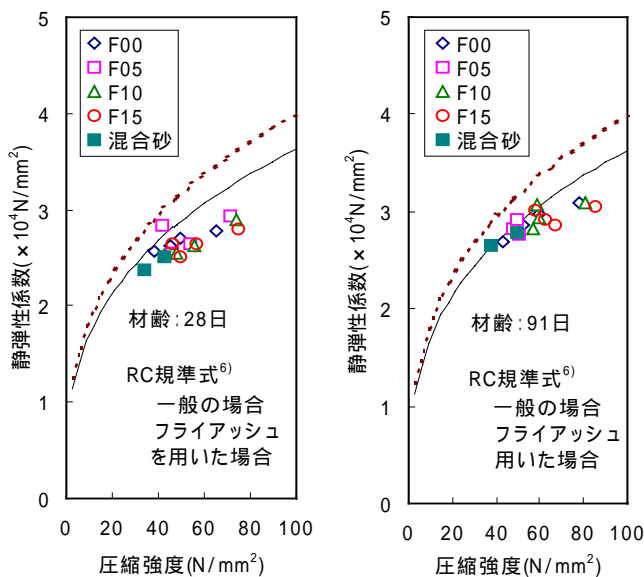


図 - 7 静弾性係数

の中性化深さが小さくなる傾向となった。これは砕砂を用いた場合、骨材界面の緻密化が中性化の進行を抑制した結果と考えられる。また、W/C が小さくなるにつれて、中性化深さは小さくなる傾向となった。さらに、フライアッシュ置換率の増加は、中性化深さを減少させる結果となった。これは、本材齢の範囲においては、主としてフライアッシュの微粉末充填効果によるものと考えられる。

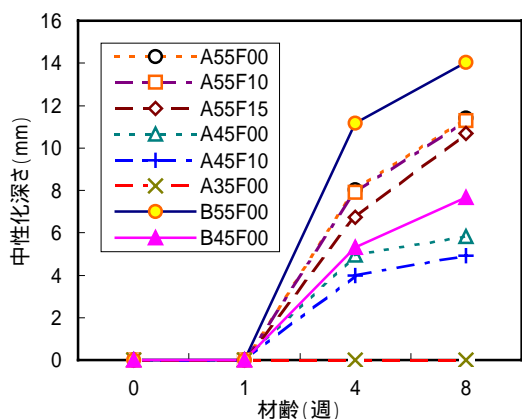


図 - 8 中性化深さ

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 砕砂およびフライアッシュ IV 種の利用は、海砂を用いる場合より、高性能 AE 減水剤および AE 剤の使用量を著しく増大させる。

- (2) 砕砂およびフライアッシュ IV 種の利用は、ブリーディング量を著しく減少させる。
- (3) 砕砂およびフライアッシュ IV 種の利用は、圧縮強度を増加させる。
- (4) フライアッシュ IV 種の利用は静弾性係数に影響しないが、その値は、日本建築学会 RC 規準式と較べて、相対的に小さなものとなった。
- (5) 砕砂の利用は中性化深さを減少させる。また、フライアッシュ IV 種の利用はポゾラン反応の影響が小さい段階において、その充填効果により中性化深さを減少させる。

以上の結果、細骨材として砕砂とフライアッシュ IV 種を用いるコンクリートは十分利用可能であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(株)穴吹工務店の赤松氏および(株)四電産業の村井氏の協力を得た。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 池田正志，他：砕砂の表面形状がフレッシュコンクリートの諸性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.325-328，1994.
- 2) 長岡誠一，他：粗粉フライアッシュのコンクリートへの利用に関する研究，日本材料学会，Vol.50，No.8，pp.818-823，2001.
- 3) 石丸啓輔，他：実機プラントで製造した FAIV 種混入コンクリートのフレッシュ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.2，pp.181-186，2001.
- 4) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）付録 1・同解説，1999.
- 5) 町勉，他：コンクリート材料としてのフライアッシュの適用限界に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.199-204，1997.
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999.