

# 論文 コンクリートの強度に及ぼすフライアッシュおよびシリカフェームの複合効果に関する研究

塚常 圭介<sup>\*1</sup>・堺 孝司<sup>\*2</sup>・石井 光裕<sup>\*3</sup>・梅沢 健一<sup>\*4</sup>

**要旨:**セメント代替材としてのフライアッシュの利用は、産業副産物の有効利用につながり、なおかつ二酸化炭素排出量の削減を可能とする。しかし、フライアッシュの利用は、一般に初期強度低下を招くことが知られている。一方、シリカフェームの利用は、若材齢からの強度改善が期待できる。そこで、本研究では、コンクリートの強度に及ぼすこれら混和材の複合効果について検討した。その結果、フライアッシュによる初期強度の低下をシリカフェームの混入によって改善できる場合があるものの、その効果には限度があることが明らかになった。

**キーワード:**フライアッシュ, シリカフェーム, 圧縮強度, 割裂引張強度, 複合効果

## 1. はじめに

近年、地球環境問題が重要な課題となっている。例えば、石炭火力発電所などから発生するフライアッシュは、日本で平成14年度の発生量が924万トンであり、その後も年々増加している<sup>1)</sup>。そのために、今後、処理場の逼迫や資源の有効利用などの観点から、大量かつ有効に利用することが社会的に要請されている。一般に、フライアッシュが流動性の向上や硬化体組織の緻密化等の優れた性質を持つことはよく知られている。また、フライアッシュのコンクリートへの利用方法は、従来、セメント代替材としての利用、すなわち内割の概念で配合設計が行われてきたが、最近では、細骨材の一部としての利用、すなわち外割の概念での利用の考え方も生まれてきており、その検討が行われ始めている<sup>2),3)</sup>。内割でのフライアッシュの利用は、産業副産物の有効利用につながり、なおかつセメント製造時に排出される二酸化炭素量の削減につながるといった環境負荷低減効果が期待できる。しかし、この利用は一般に初期強度の低下を招くという弱点を持っている。

一方、同じく産業副産物であるシリカフェームは超微粒子であり、コンクリートの混和材として使用した場合、コンクリート内部の充填効果やポゾラン反応などによって強度の改善に寄与することが報告されている<sup>4),5)</sup>。

このように、フライアッシュまたはシリカフェームそれぞれを利用したコンクリートの強度特性に関する研究は数多く行われている。しかしながら、両者を併用した研究<sup>6),7),8)</sup>は、かなり限定された範囲のものであり、より広範な検討が必要であると考えられる。

そこで、本研究では、コンクリートの強度特性に及ぼすフライアッシュ及びシリカフェームの複合効果について検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本研究で使用した材料の種類及び品質を表1に示す。

### 2.2 コンクリートの製造及び配合

コンクリートの製造は、温度20℃、相対湿度

\*1 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻 (正会員)

\*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 工博 (正会員)

\*3 四国電力(株) 土木建築部 工博 (正会員)

\*4 (株)ポゾリス物産 混和剤営業技術部 (正会員)

表-1 使用材料

材料(記号)	種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3310cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ (FA)	四国電力 西条発電所産 フライアッシュ11種	密度: 2.32g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 3960cm <sup>2</sup> /g 強熱減量: 2.02% メチレンブルー吸着量: 0.31mg/g
シリカフェーム (SF)	エジプト産粉末 シリカフェーム	密度: 2.24g/cm <sup>3</sup> 比表面積: 153000cm <sup>2</sup> /g 強熱減量: 1.30%
細骨材 (S)	砂岩砕砂	表乾密度: 2.55g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.23% 粗粒率: 2.68 実績率: 62.9% 微粒分量: 2.31%
粗骨材 (2015)	砂岩砕石	表乾密度: 2.56g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 2.50% 粗粒率: 7.10 実績率: 60.1%
粗骨材 (1505)	砂岩砕石	表乾密度: 2.55g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 2.67% 粗粒率: 6.33 実績率: 59.1%
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と 分子内架橋ポリマーの複合体
	AE剤	変性アルキルカルボン酸化合物系 陰イオン界面活性剤

60%の試験室で、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて、1 バッチの練混ぜ量を 40 リットルとして行った。練混ぜは、最初にセメント、フライアッシュ、シリカフェーム、細骨材、粗骨材を 60 秒間空練りし、次に水、混和剤を 30 秒間で加え、その後 90 秒間練り混ぜた。

コンクリートの配合は、水結合材比を 40%、50%、60%とした。フライアッシュ及びシリカフェームはセメントの容積置換とし、フライアッシ

ユの置換率は 0, 15, 25%, シリカフェームの置換率は 0, 5, 10%とした。細骨材率は全ての配合において 40%で一定とした。

各水結合材比におけるセメント 100%の基本配合は、目標スランプ及び目標空気量を満足するように、高性能 AE 減水剤、単位水量及び AE 剤によって調整した。また、フライアッシュ及びシリカフェーム混入した配合は、基本配合の単位水量を用い、を同様に目標スランプ及び目標空気量を満足するように、調整は高性能 AE 減水剤及び AE 剤によって行った。表-2 にコンクリートの配合及び性状の一覧を示す。

### 2.3 実験項目

スランプ試験は JIS A 1101, 空気量試験は JIS A 1128, 圧縮強度試験は JIS A 1108, 割裂引張強度試験は JIS A 1113, 静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠して行った。なお、目標スランプは 10.0±2.0cm, 目標空気量は 4.0±1.0%とした。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 フレッシュコンクリートの特性

図-1 にコンクリートの配合ごとの高性能 AE 減水剤添加率を示す。全ての水結合材比にお

表-2 コンクリートの配合及び性状

水結合材比 (%)	結合材の混合割合「容積置換率」 (%)			細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						高性能AE減水剤	AE剤	スランプ (cm)	空気量 (%)		
					水		セメント		フライアッシュ	シリカフェーム					粗骨材	
					W	C	FA	SF	S	2015					1505	
W/B	B			s/a	W	C	FA	SF	S	2015	1505	B×%	B×%	(cm)	(%)	
W/(C+FA+SF)	OPC	FA	SF													
40	100	0	0	40	164	410	0	0	680	512	510	0.95	0.0025	11.1	3.6	
	95	0	5			390	0	21	677	510	508	0.95	0.0010	11.4	4.0	
	90	0	10			369	0	41	674	508	506	1.00	0.0010	10.8	4.9	
	85	15	0			349	62	0	672	506	504	0.90	0.0075	11.3	4.5	
	80	15	5			328	62	21	670	504	502	0.90	0.0045	11.2	4.1	
	75	15	10			308	62	41	667	502	500	0.90	0.0045	10.6	4.1	
	75	25	0			308	103	0	668	503	501	0.80	0.0090	10.0	3.3	
	70	25	5			287	103	21	665	501	499	0.90	0.0080	10.7	3.6	
	65	25	10			267	103	41	662	499	497	0.90	0.0050	9.7	3.3	
	50	100	0			0	40	165	330	0	0	704	530	528	1.20	0.0035
95		0	5	314	0	17			702	529	527	1.20	0.0030	10.6	4.4	
90		0	10	297	0	33			700	527	525	1.25	0.0025	10.6	3.5	
85		15	0	281	50	0			699	526	524	1.10	0.0110	11.1	4.7	
80		15	5	264	50	17			696	524	522	1.10	0.0080	11.2	4.7	
75		15	10	248	50	33			694	523	521	1.20	0.0060	11.6	4.5	
75		25	0	248	83	0			695	523	521	1.00	0.0120	11.6	3.7	
70		25	5	231	83	17			693	522	519	1.00	0.0085	11.0	3.7	
65		25	10	215	83	33			690	520	518	1.05	0.0080	10.6	4.3	
60		100	0	0	40	168			280	0	0	718	540	538	1.20	0.0040
	95	0	5	266			0	14	716	539	537	1.20	0.0040	8.7	3.3	
	90	0	10	252			0	28	714	537	535	1.25	0.0040	8.7	3.5	
	85	15	0	238			42	0	713	537	534	1.05	0.0120	10.0	4.8	
	80	15	5	224			42	14	711	535	533	1.20	0.0090	10.0	4.5	
	75	15	10	210			42	28	709	534	532	1.25	0.0070	10.0	4.1	
	75	25	0	210			70	0	709	534	532	0.95	0.0130	10.6	3.8	
	70	25	5	196			70	14	707	533	531	1.05	0.0100	10.8	3.5	
	65	25	10	182			70	28	706	531	529	1.10	0.0090	9.0	3.9	

いて、フライアッシュを混入すると、フライアッシュの置換率の増加とともに高性能 AE 減水剤添加率は減少しており、フライアッシュのボールベアリング効果によってコンクリートの流動性が向上したことが分かる。また、シリカフュームを混入すると、高性能 AE 減水剤添加率は若干増加している。これは、シリカフュームが超微粒子であるために、水分を吸着する粒子表面積が大きいことによるものと考えられる<sup>4)</sup>。

次に、図-2 にコンクリートの配合ごとの AE 剤添加率を示す。全ての水結合材比において、フライアッシュを混入すると、フライアッシュの置換率の増加とともに AE 剤添加率が大幅に増加している。これは、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素が AE 剤を吸着したことによるものと考えられる。また、シリカフュームを混入すると、シリカフュームの置換率の増加とともに AE 剤添加率が減少し、シリカフュームの添加が空気連行性を向上させることが明らかになった。

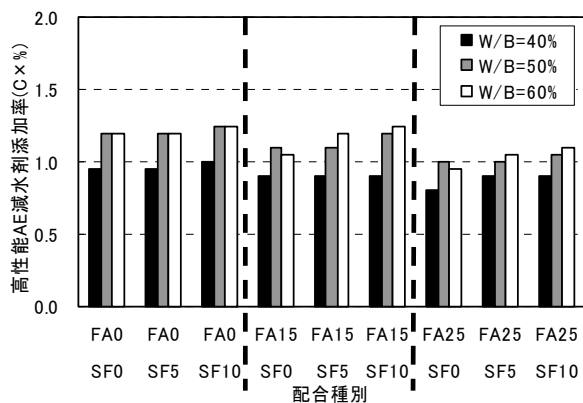


図-1 高性能 AE 減水剤添加率

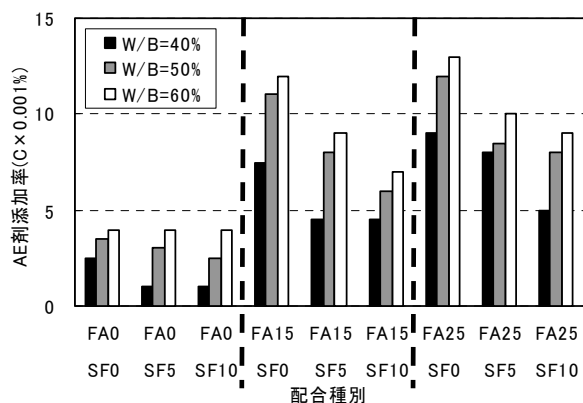


図-2 AE 剤添加率

### 3.2 圧縮強度

図-3 に水結合材比 40%, 50%, 60%の圧縮強度試験結果を示す。

全ての水結合材比において、フライアッシュのみを混入すると、フライアッシュの置換率の増加に伴い、初期材齢における強度が低下している。これは、主に単位セメント量の減少によるものである。

また、全ての水結合材比において、シリカフュームのみを混入すると、材齢 3 日における強度はシリカフューム無混入のものと同様か、若干増加している。しかし、材齢 7 日における強度はシリカフューム無混入のものより若干低下して

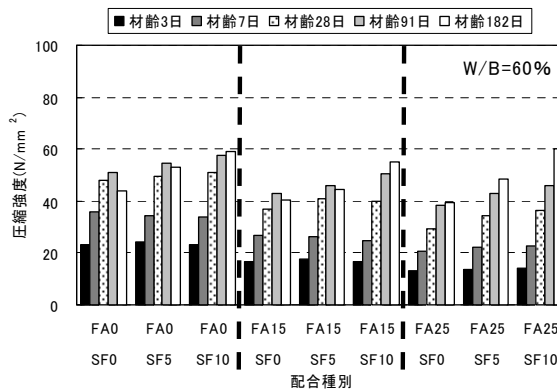
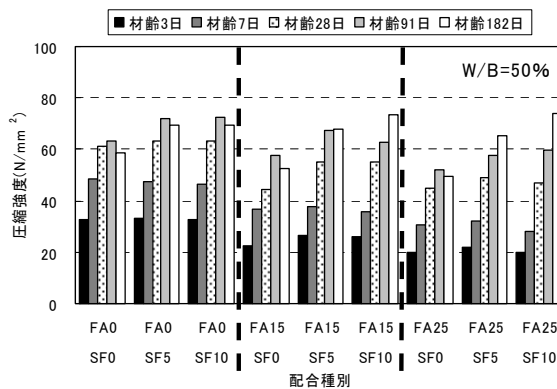
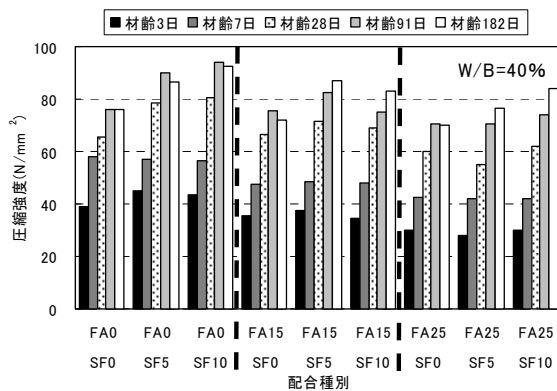


図-3 圧縮強度

いる。材齢 28 日以降では、シリカフェームのポズラン反応及び充填効果によってシリカフェーム無混入のものより強度発現の増加が見られる。材齢 91 日～182 日にかけては、水結合材比 60%、シリカフェーム置換率 10%の場合を除いて、強度発現の低下が見られる。この原因としては、シリカフェームによるポズラン反応の進行がコンクリートの内部に膨張圧を引き起こし、その結果としてマイクロクラックが発生したことが考えられる。

ここで、単位セメント量一定、すなわち混和材置換率一定の条件での、フライアッシュのみの配合とフライアッシュとシリカフェームを併用している配合を比較する。すなわち、フライアッシュ置換率 25%の場合とそのうちの 10%をシリカフェームに置換した場合について比較すると、後者の場合が全ての材齢で強度が改善している。つまり、シリカフェームを混入することによって、フライアッシュのみのものよりも強度発現が大きくなることを示している。このことは、後述する斉藤らの研究の結果と対応している。

図-4に材齢3日をベースとするフライアッシュ置換率と圧縮強度の増加率の関係を示す。材齢3日～28日の圧縮強度の増加率から、フライアッシュのポズラン反応によって置換率の増加とともに強度の増加率が大きくなっていることが分かる。この傾向は、水結合材比が大きいほど著しいものとなっている。

次に、フライアッシュの混入による初期強度の低下の、シリカフェームの混入による改善効果について検討した。図-5に、材齢3日、7日におけるフライアッシュ置換率、シリカフェーム置換率及び圧縮強度の関係を示す。フライアッシュ置換率0%を斑点、15%を灰色、25%を白色で表し、フライアッシュの強度低下がシリカフェームの混入によって改善されている配合を斜線で表す。また、図中には既往の研究における水結合材比45%のデータ<sup>8)</sup>も示している。なお、斉藤らの研究<sup>6)</sup>では、水結合材比=0.30、単位セメント量=400kg/m<sup>3</sup>、単位結合材量=550kg/m<sup>3</sup>、フライアッ

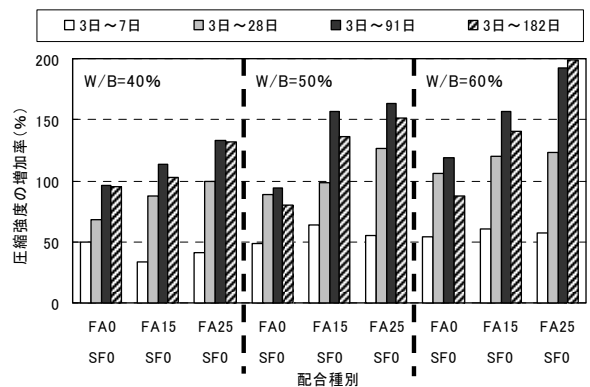


図-4 圧縮強度の増加率

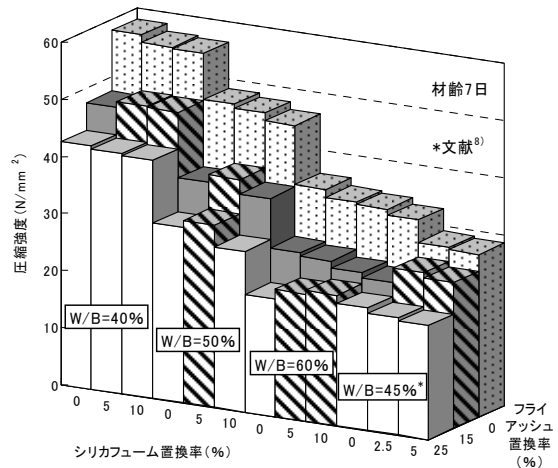
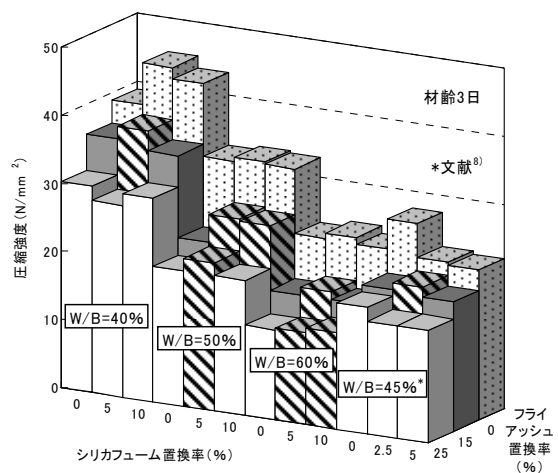


図-5 初期材齢における強度改善効果

シュ/(フライアッシュ+シリカフェーム)=100, 80, 70%の条件で、フライアッシュの一部をシリカフェームに置換すると、材齢3日、7日、28日、91日で強度が改善する結果が得られている。また、Thomasらの研究<sup>7)</sup>では、水結合材比=0.26～0.35、目標空気量=4.5～7.0%、フライアッシュ置換率=20～30%、シリカフェーム置換率=3～6%の条件で、フライアッシュのみのものよりもフラ

イアッシュとシリカフュームを併用したものが材齢 1~365 日で強度が改善する結果が得られている。

図-5 に示すように、フライアッシュによる初期強度低下の一部をシリカフュームの混入により改善できる場合がある。つまり、シリカフュームを混入することによってセメント量が減少し、そのぶん強度低下につながると考えられるが、フライアッシュ及びシリカフュームの複合効果によってシリカフューム無混入のものよりも初期材齢で強度発現が大きい場合があることを示している。しかし、その増加率はそれほど大きくはなく、フライアッシュによる強度低下を全て補填することはできない結果となった。以上のことは、前述した Thomas らの研究の結果や図中に示す Lane らの研究の結果と対応している。

また、水結合材比 60%の材齢 7 日の場合を除いて、フライアッシュ置換率 15%、シリカフューム置換率 5%のものは、シリカフューム無混入のものより強度が改善している。その他のケースにおいても、強度改善が見られるものがあり、更なるデータの蓄積が必要と思われる。

### 3.3 圧縮強度と割裂引張強度の関係

図-6 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。図中の実線は、土木学会標準示方書の構造性能照査編の式<sup>9)</sup>、破線は施工編の式<sup>10)</sup>を示しているが、本実験結果では全強度域において土木学会の式よりも割裂引張強度が  $1\text{N/mm}^2$  程度大きくなっている。圧縮強度と割裂引張強度の関係にフライアッシュ及びシリカフュームの混入による有意な差は見られなかった。

### 3.4 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-7 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の実線は、土木学会標準示方書の構造性能照査編の式<sup>9)</sup>、破線は総プロ New RC 式<sup>11)</sup>を示しているが、本実験結果では全強度域において土木学会の式よりも静弾性係数が小さくなっており、その差は圧縮強度の増加に伴い大きくなっている。本実験結果と New RC 式との比較においても、本実験結果はほとんどの場合 New RC 式よりも静弾性係数が小さくなっている。また、圧縮強度と静弾性係数の関係にフライアッシュ及びシリカフュームの混入による有意な差は見られなかった。

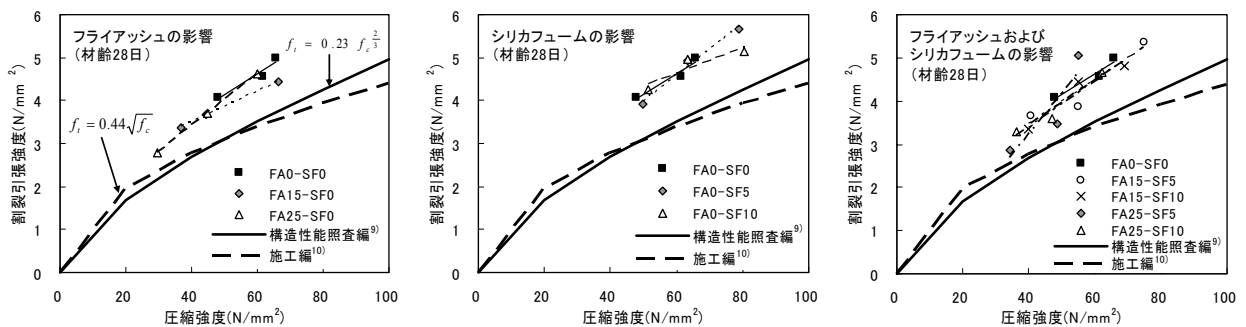


図-6 圧縮強度と割裂引張強度の関係

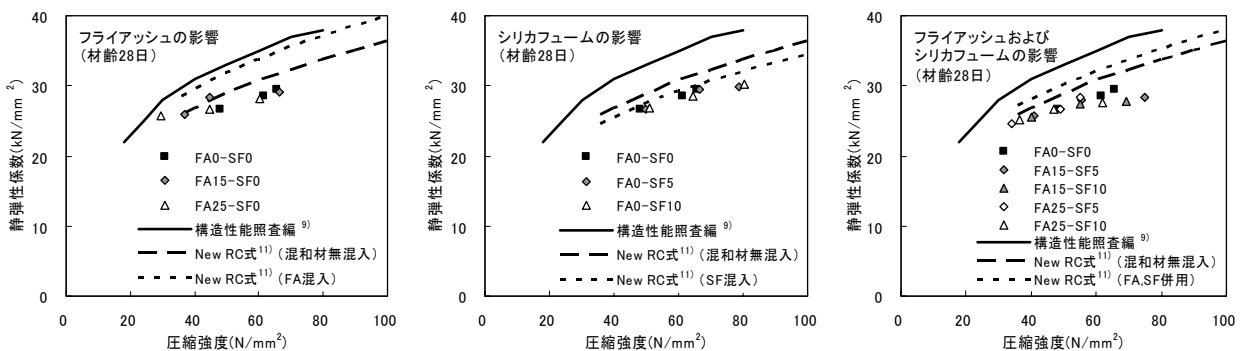


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

#### 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) フライアッシュの混入は流動性を増大させ、空気連行性を低下させる。
- (2) シリカフェームの混入は流動性を若干低下させ、空気連行性を向上させる。
- (3) フライアッシュの一部をシリカフェームに置換すると、全ての材齢で強度を改善できる。
- (4) フライアッシュによる初期強度低下の一部をシリカフェームの混入により改善できる場合がある。
- (5) 割裂引張強度は、土木学会の式よりも  $1\text{N/mm}^2$  程度大きくなった。また、フライアッシュ及びシリカフェームの混入は圧縮強度と割裂引張強度の関係に大きな影響を及ぼさなかった。
- (6) 静弾性係数は、土木学会の式及び総プロ New RC 式よりも小さくなった。また、フライアッシュ及びシリカフェームの混入は圧縮強度と静弾性係数の関係に大きな影響を及ぼさない。

以上の結果から、フライアッシュによる初期強度の低下をシリカフェームの混入によって改善できる場合があるものの、その効果には限度があることが明らかになった。

#### 謝辞

CONSTRUCTION RESEARCH INSTITUTE の Mohamed Anwar El-Sayed 助教授には本研究の実験計画及び実験に御協力いただきました。香川大学学部生の増田裕氏には本実験に御協力いただきました。ここに、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 石炭灰利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書，2004.3
- 2) Matsuka, T. , Sakai, K. and Mokubo, M. : Properties of Concrete Using Crushed Sand and

Class IV Fly Ash as Fine Aggregate, Proceedings of International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Vol.1 , pp490-497, Jun.2004.

- 3) 塚常圭介，堺孝司，石井光裕，藤枝正夫：細骨材として砕砂を使用したコンクリートに対する細骨材充填混和材としてのフライアッシュの効果に関する研究，土木学会四国支部第 10 回技術研究発表会講演概要集 V, pp.276-277, 2004.5
- 4) 土木学会：シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針（案），1995.10
- 5) 菅田紀之，寺澤貴裕，田中健司：シリカフェームを用いた高強度コンクリートの強度特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, 2005.6
- 6) 斉藤隆弘，大即信明，宮里心一，長瀧重義：分級フライアッシュとシリカフェームを混合使用したコンクリートの硬化体性状に関する研究，土木学会，フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集，pp17-24, 1997.12
- 7) Thomas , M.D.A. et.al. : Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete, Cement and Concrete Research , Vol.29, No.8, pp.1207-1214, Apr.1999
- 8) Lane, D.S. and Ozyildirim, C. : Combinations of Pozzolans and Ground, Granulated, Blast Furnace Slag for Durable Hydraulic Cement Concrete , Virginia Transportation Research Council Report No.00-R1, Charlottesville, Aug.1999
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的能照査編]，2002.3
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002.3
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 -許容応力度設計法-，1999.10