

報告 フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性

古賀 善雄^{*1}・船本 憲治^{*2}・藤本 浩^{*3}

要旨：現在，その大半をセメント原料として処理されているフライアッシュをセメント外割り使用した土木および建築工事仕様コンクリートについて，その諸特性を室内配合試験によって確認した。その結果，フライアッシュを外割り使用することで，土木工事仕様では細骨材代替率 10%以下，建築工事仕様では 20%以下で流動性改善効果があり，硬化性状や耐久性(中性化，乾燥収縮，アルカリ骨材反応，塩分浸透)も普通コンクリートと比べて概ね同等以上の性能を有していることが確認された。

キーワード：フライアッシュ，セメント外割混合，フレッシュ性状，圧縮強度，耐久性

1. まえがき

我が国の石炭灰の発生量が年々増加傾向にある中，石炭灰の約 90%を占めるフライアッシュ(以下，FA と称す)は，これまでそのほとんどがセメント原料として有効利用されているが，近年のセメント需要の低迷によりそれも限界になりつつある¹⁾。また，レディミクストコンクリートに使用される細骨材を取り巻く環境は，海砂の採取規制の拡大や良質な砕砂原石の枯渇など深刻な状況となりつつある。その結果，九州の一部地域でも代替骨材の検討がなされ，FA も代替骨材の一つとして選定されており，セメント外割り使用の確立が求められている。

現在，FA をセメント外割りで使用する場合，土木学会では「FA を用いたコンクリートの施工指針(案)」の 18 章「その他の特殊な用途」で細骨材を補充する混和材としての使用が記載されている。また，土木学会四国支部の「FA 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)」では，FA II・IV種の使用が認められている。

一方，建築分野では，公共建築協会が発刊されている建築工事仕様書および建築工事監理指針の中で「ポンプ圧送が困難な場合には FA I 種

または II 種の外割混合(骨材の一部)が可能で，この場合には単位セメント量を減じない」との記載がある。しかしながら，建築学会関連指針での記載がなかったことから，建築学会では平成 17 年 3 月に「FA を使用するコンクリートの調合設計・施工ガイドライン(案)・同解説」を作成し，その中で FA の使用方法の一つとして FA を結合材とみなさない方法が示された。

上記のとおり，FA の外割り使用については，施工指針類の整備がなされつつあるが，まだ一般的なものになっていないのが現状である。

したがって，本研究では，レディミクストコンクリート(土木および建築工事仕様)への適用を目的として，FA をセメント外割り使用したコンクリートの諸特性(フレッシュ性状，圧縮強度，耐久性)を把握するため室内配合試験を行った。

2. 使用材料

本研究で使用した FA は，セメント原料用として有効利用されているもの(以下，セメント原料用 FA と称す)，電気集塵機の 1 段目で発生する原粉から II 種灰を分級した後のもの(以下，粗粉と称す)を対象とした。セメント原料用 FA は，R 石炭火力発電所の節炭器・空気予熱器から発生

*1 九州電力(株) 総合研究所主幹研究員 (正会員)

*2 九州高圧コンクリート工業(株) 技術部次長 工博 (正会員)

*3 西日本技術開発(株) 調査解析部課長 (正会員)

表－１ 使用材料

区分	使用材料	土木工事仕様	建築工事仕様
コンクリート	セメント	・高炉セメントB種 密度:3.02g/cm ³ ,比表面積:3900cm ² /g	・普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3290cm ² /g
	フライアッシュ	・セメント原料用FA 密度:2.29g/cm ³ ,比表面積:3930cm ² /g	・同左
	粗骨材	・4020と2002砕石を5:5の割合で使用 4020砕石(硬質砂岩) 絶乾密度:2.64g/cm ³ ,吸水率:0.60%,粗粒率:7.96 2002砕石(硬質砂岩) 絶乾密度:2.63g/cm ³ ,吸水率:0.87%,粗粒率:6.62	・2002砕石(硬質砂岩) 絶乾密度:2.63g/cm ³ ,吸水率:0.87%,粗粒率:6.62
	細骨材	・粗砂と細砂を6:4の割合で使用 海砂(粗砂) 絶乾密度:2.54g/cm ³ ,吸水率:1.58%,粗粒率:2.79 海砂(細砂) 絶乾密度:2.53g/cm ³ ,吸水率:2.54%,粗粒率:1.62	・同左
	混和剤	・リグニンスルホン酸系AE減水剤 ・アニオン系AE剤(空気量調整用)	・ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 ・アニオン系AE剤(空気量調整用)
モルタル	セメント	・アルカリ骨材反応性試験用セメント(セメント協会) 密度:3.16g/cm ³ ,比表面積:3250cm ² /g	
	フライアッシュ	・セメント原料用FA 密度:2.24g/cm ³ ,比表面積:3860cm ² /g ・粗粉(原粉からJISⅡ種灰を分級した後のFA) 密度:2.41g/cm ³ ,比表面積:2100cm ² /g	
	細骨材	・アルカリ骨材反応性砕砂(安山岩) 表乾密度:2.57g/cm ³ ,吸水率:3.46%	

するシンダーアッシュ、電気集塵機の1段目で発生する原粉のうち非分級と判定されたもの、電気集塵機の2～3段目で発生する微細粉、原粉分級後の粗粉からなる混合灰であり、その品質は概ねJISⅡ種を満足した。また、粗粉の品質は、JISⅣ種を満足した。なお、本研究に使用した全ての材料を表－1に示すが、今回FAの用途をレディミクストコンクリートとしたことから、発電所近傍の生コン工場のセメント、骨材、混和剤を使用することとした。

3. 配合および試験方法

本研究でのコンクリートおよびモルタルの配合を表－2に示す。本試験でのFAは、細骨材の一部として用い、その容積置換率FA/(FA+S)(以下、FA代替率と称す)は事前の試し練りでコンクリートの流動性改善効果が期待できる実用的な範囲とし、空気量はAE剤の使用量で調整した。フレッシュ性状試験としてスランプ、空気量、ブリーディング量、硬化性状試験として圧縮強度(材齢2,7,28,91日)を測定した。また、耐久性試験のうち乾燥収縮は、JIS A 1129に準じ埋設ゲ

表－２ コンクリート・モルタル配合および耐久性試験結果

仕 様	配合条件				単位量(コンクリート:kg/m ³ ,モルタル:g/バッチ)										試験結果										
	骨材 最大寸法	スラン プ	空気量	フライ アッシュ の種類	W/C	FA 代替率 FA (FA+S)	水	セメン ト	フライ アッシュ	細骨材	粗骨材	混和剤	AE剤	ブリー ディング 量	圧縮強度(N/mm ²)	最終 長さ 変化率	最終 中性化 深さ	モルタル バー法で の最終 膨張率	デンマー ク法での 最終 膨張率	デンマー ク法での 最終塩分 浸透深さ					
	(mm)	(cm)	(%)		(%)	(%)	W	C	FA	S	G	(C×%)	(1A=C× 0.002%)	(cm ³ /cm ²)	材齢 7日	材齢 28日	材齢 91日	(×10 ⁻⁶)	(mm)						
土木工事 仕様コン クリート	40	8±1	4.5±1	セメン ト原料 用FA	45	0	157	349	0	634	1155	AE 減水剤 1.0	7A	0.09	25.1	37.3	47.3	613	6.5	—	—	—			
						5	160	356	27	599	1147		16A	0.10	25.6	37.7	47.9	599	6.0						
						10	163	362	55	563	1140		25A	0.09	26.0	36.6	45.4	623	5.5						
					55	0	159	289	0	687	1150		6A	0.14	21.6	35.2	43.5	628	16.0						
						5	157	285	30	658	1155		20A	0.07	20.1	32.6	42.7	639	15.5						
						10	154	280	62	625	1163		35A	0.07	20.1	33.2	42.0	600	16.0						
	65	0	163		251	0	733	1126	5A	0.21	17.5	29.0	33.5	638	22.5										
		5	158		243	32	705	1140	18A	0.14	16.9	29.4	37.6	617	22.5										
		10	153		235	66	673	1150	30A	0.12	17.3	30.5	39.9	590	25.0										
		建築工事 仕様コン クリート	20		18±1	4.5±1	セメン ト原料 用FA	45	0	174	387	0	766	959	高性能 AE 減水剤 1.5	0	0.06	42.8	55.0				56.8	693	2.5
									10	164	364	69	708	986		15A	0.02	44.8	54.4				60.7	617	0.5
									20	174	387	135	613	959		50A	0.01	41.3	53.5				61.8	583	0.0
55	0			181				329	0	814	941	0.3A	0.12	33.2		43.6	47.6	782	12.0						
	10			166				302	76	756	973	5A	0.04	37.1		48.6	54.7	656	6.5						
	20			167				304	149	672	973	50A	0.04	33.7		46.7	52.6	639	6.5						
65	0	188	289	0	856	914		0	0.17	24.1	32.8	36.0	796	14.0											
	10	171	263	78	800	949		4A	0.14	28.5	39.7	46.3	696	13.5											
	20	167	257	158	716	957		40A	0.06	27.8	40.7	49.1	673	12.0											
モルタル	5	—	—	セメン ト原料 用FA	50	0				0	1350		—	—	—	—	—	—	—	—	0.130	0.510	20		
						5				61	1283										0.053	0.390	20		
						10				122	1215										0.023	0.076	11		
					粗粉	20			244	1080		0.019									-0.003	8			
						0			0	1350		0.130									0.510	20			
						5			66	1283		0.126									0.708	20			
	粗粉	10				131	1215		0.056	0.577	20														
		20				262	1080		0.030	0.413	12														

ージ法で行い、促進中性化は JIS A 1153 に準じて実施した。アルカリ骨材反応は、JIS A 1146 のモルタルバー法と外部からアルカリイオンの供給を受ける過酷な環境下での評価方法として用いられているデンマーク法(温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬し、その長さ変化を測定する方法)に準じて実施した。なお、デンマーク法については、試験終了後の試験供試体を割裂し、その面に硝酸銀水溶液(0.1mol/l)を噴霧して白色部の長さを測ることにより塩分浸透深さを測定した。

4. 試験結果

表－2 に室内配合および耐久性試験結果を示すが、FA 代替による違いを明確に把握するため、アルカリ骨材反応等の一部試験結果を除き、FA 無混入コンクリートの試験値を基準とし、FA 混入コンクリートの試験値との比で試験結果を示した。

4.1 フレッシュ性状

FA 代替率と単位水量比の関係を図－1、ブリーディング量比の関係を図－2、AE 剤使用量の関係を図－3 に示す。これらの図より、以下のことが確認された。

(1) 土木工事仕様の場合

水セメント比 55, 65% の場合、FA 代替率が増加するにつれ単位水量比は減少し、10% 以上では逆に増大している。また、45% では、FA 代替することで逆に増大している。これは、FA の使

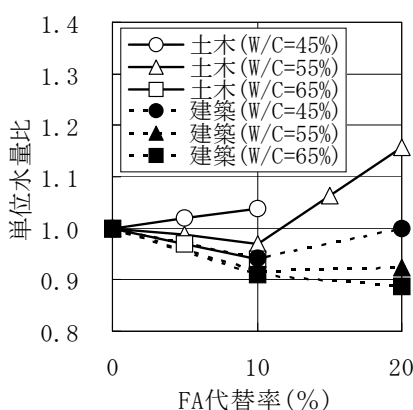
用による流動性改善効果と単位粉体量増による粘性増大の関係によるものと考えられ²⁾、単位セメント量が比較的少ない水セメント比 55, 65% では、FA 代替率 10% まで FA の球状粒子が流動性改善に効果的に働いたものと考えられる。

ブリーディング量比は、水セメント比 55, 65% の場合、FA 代替率が増加するほど小さくなっており、これは単位水量の低減効果の影響と考えられる。一方、水セメント比 45% では、FA 代替率が増加するにつれて単位水量が増えるにもかかわらずほぼ一定となっており、これは単位粉体量の増加によるコンクリートの保水性向上の影響²⁾と考えられる。

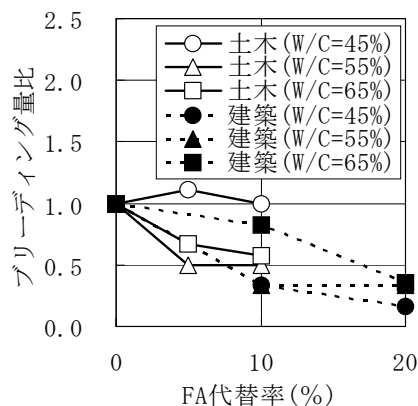
AE 剤使用量は、FA 代替率に比例して増大しており、実用化にあたって凍結融解の恐れがない環境下では、目標空気量を低減する等の方策が必要と思われる。

(2) 建築工事仕様の場合

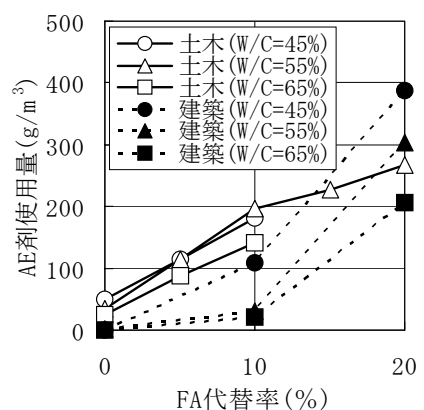
単位水量比は、全ての水セメント比において FA 代替率 10% までは低下しているが、それを超えると水セメント比 45, 55% で増大しており、文献 2) と同様の結果となっている。これは、土木工事仕様で述べたメカニズムの影響と考えられ、使用材料の全体の粒度分布に影響されるが^{3), 4)}、水セメント比 65% の場合、単位セメント量も少なく FA の流動性改善効果と高性能 AE 減水剤を使用したことによる粉体の分散効果で流動性が大幅に向上したためと考えられる。



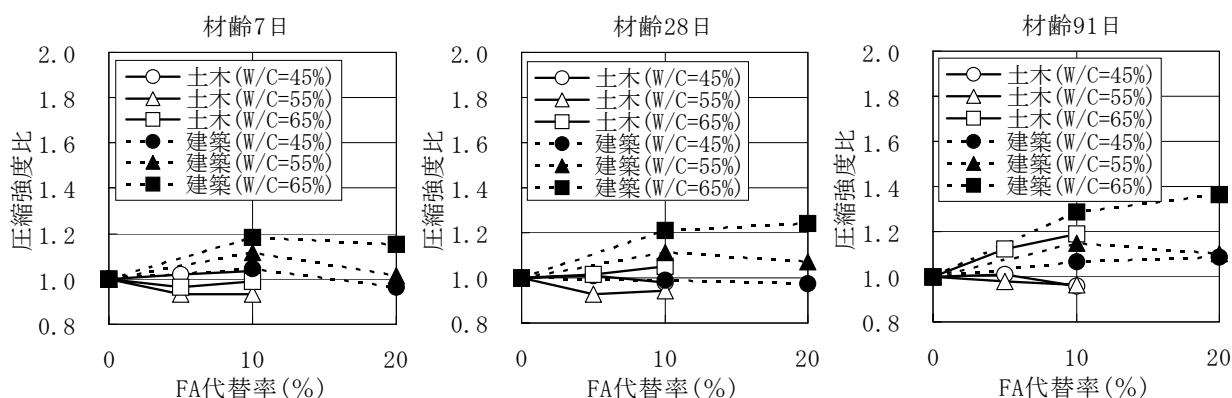
図－1 FA 代替率と単位水量比の関係



図－2 FA 代替率とブリーディング量比の関係



図－3 FA 代替率と AE 剤使用量の関係



図－4 FA 代替率と圧縮強度比の関係

ブリーディング量比は、いずれの水セメント比でも FA 代替率が増加するほど小さくなっており、これは単位水量の低減効果と単位粉体量の増加による保水性効果の影響と考えられる²⁾。

AE 剤使用量は、水セメント比 45% 以外では FA 代替率 10% から急増し、水セメント比が小さいほど使用量が多くなる傾向にあることから、土木工事仕様の場合と同様の実用的な方策の検討が必要と考えられる。

4.2 圧縮強度

FA 代替率と圧縮強度比の関係を図－4 に示す。この図より、以下のことが確認された。

(1) 土木工事仕様の場合

水セメント比 65% の材齢 91 日を除き、全ての水セメント比および材齢において、FA 代替率が増しても強度増加はほとんど認められず、文献 7) と異なる結果となった。これは、水セメント比 55, 65% で単位水量が減少したことによって単位セメント量も減ったことが影響しているものと考えられるが、その低減率は少なく材齢 28 日での圧縮強度比は、普通コンクリートとほぼ同等といえる。また、水セメント比 65% の材齢 91 日では、文献 7) と同じく普通コンクリートに比べてやや強度増進が認められ、これは FA 自体が持つポズラン反応の影響によると考えられるが、高炉セメント B 種を使用しているため、顕著な効果は認められなかった。

(2) 建築工事仕様の場合

水セメント比 55, 65% の場合、文献 3)～5) と同じく全ての材齢において、普通コンクリート

と比べて強度増加が認められる。これは、FA が強度増進に寄与したもので、若材齢ではマイクロファイラー効果⁶⁾、長期材齢ではポズラン反応の影響と考えられる。一方、水セメント比 45% では、文献 5) と異なり FA 代替率が増しても圧縮強度比はほぼ同じとなった。

4.3 乾燥収縮

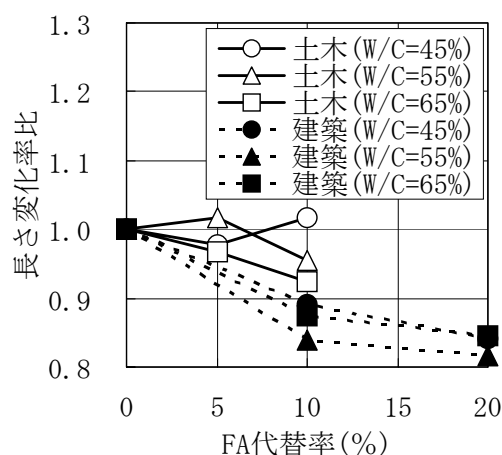
FA 代替率と長さ変化率比の関係を図－5 に示す。この図より、以下のことが確認された。

(1) 土木工事仕様の場合

長さ変化率比は、いずれの水セメント比および FA 代替率の場合でも、普通コンクリートとの優位な差は認められなかった。

(2) 建築工事仕様の場合

長さ変化率比は、文献 2) と同様にいずれの水セメント比および FA 代替率の場合でも、普通コンクリートより小さくなっている。これは、FA 代替による単位水量の低減効果と考えられる。



図－5 FA 代替率と長さ変化率比の関係

4.4 促進中性化

FA 代替率と中性化深さ比との関係を図-6に示す。この図より、以下のことが確認された。

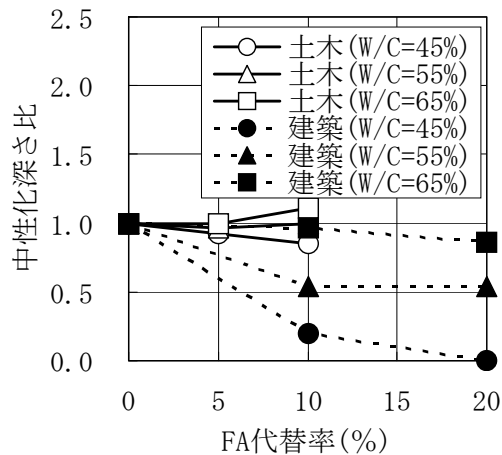


図-6 FA 代替率と中性化深さ比の関係

(1) 土木工事仕様の場合

中性化深さ比は、水セメント比 65%の FA 代替率 10%のみ普通コンクリートよりやや大きくなった。これは、単位セメント量が少ないこと、高炉セメント B 種を使用しているためセメント中のアルカリ分が少ないこと、FA のポズラン反応の影響等によって、コンクリート中のアルカリ量が少なくなったことが原因と考えられる。

(2) 建築工事仕様の場合

中性化深さ比は、文献 3),8)と同じくいずれの水セメント比および FA 代替率の場合でも、普通コンクリートより小さい値を示した。これは、建築工事仕様の場合、普通ポルトランドセメン

トを使用しているため、コンクリート中のアルカリ量が多いこと、さらに FA 自体が持つポズラン反応によりコンクリート組織の緻密化が促進されたことなどによる影響と考えられる。

4.5 アルカリ骨材反応

モルタルバー法およびデンマーク法による FA 代替率と膨張率の関係を図-7に示す。この図より、以下のことが確認された。

(1) モルタルバー法

セメント原料用 FA では、いずれの FA 代替率でも十分なアルカリ骨材反応の抑制効果が確認された。一方、粗粉では、FA 代替率 10%以上で抑制効果が認められたが、5%の場合は FA 無混入の場合と同程度の膨張率を示した。以上のことから、FA の品質によってアルカリ骨材反応の抑制効果が異なることが確認された。

(2) デンマーク法

セメント原料用 FA では、FA 代替率 5%においてアルカリ骨材反応の抑制効果がさほど認められないが、FA 代替率 10%以上では十分な抑制効果が確認された。一方、粗粉の場合、FA 代替率 10%以下では普通コンクリートより膨張率が大きくなり、さらに FA 代替率を 20%まで高めても無害水準まで膨張率を抑制できない結果となった。したがって、粗粉のような低品質 FA では、外部からアルカリが供給される環境下において、アルカリ骨材反応の抑制効果が十分得られない可能性があることが確認された。

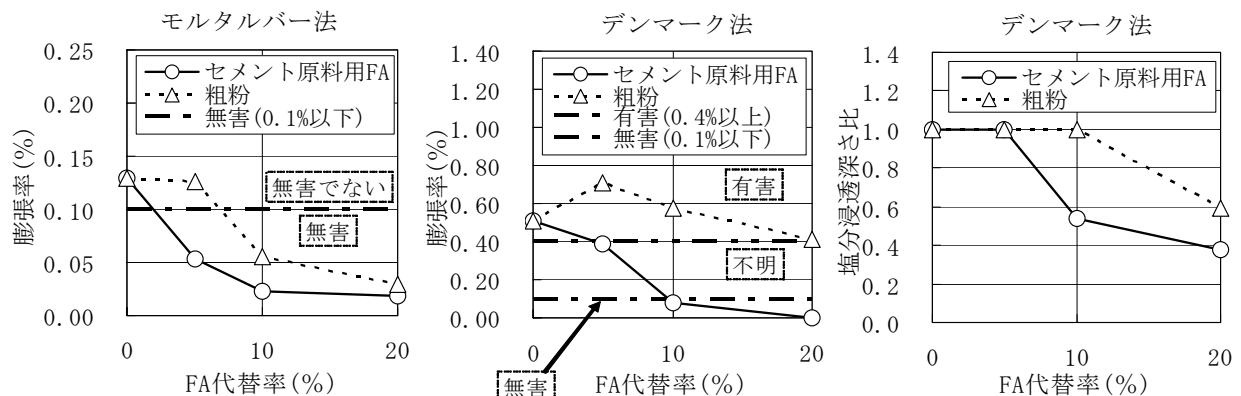


図-7 FA 代替率と膨張率および塩分浸透深さ比の関係

4.6 塩分浸透

デンマーク法による FA 代替率と塩分浸透深さ比の関係を図-7 に示す。この図より、セメント原料用 FA では、FA 代替率 10%以上で普通モルタルと比べ十分な塩分浸透の抑制効果が確認された。一方、粗粉では、10%まで塩分浸透の抑制効果は認められないが、20%では十分な抑制効果が確認された。以上のことから、FA によるアルカリ骨材反応の抑制効果には、外部からの塩分の浸透抑制効果も影響していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、石炭火力発電所から発生する最も一般的な FA としてセメント原料用 FA、また FA の品質の違いによるアルカリ骨材反応の抑制比較のため粗粉を用い、外割配合のレディミクストコンクリートへの適用性を室内試験で検討した。その結果、土木および建築工事仕様のコンクリートについて、以下の知見が得られた。

(1) 土木工事仕様の場合、高水セメント比では FA 代替率 10%程度まで FA による流動性改善効果が認められた。一方、建築工事仕様の場合、高水セメント比では FA 代替率 20%程度まで FA による流動性改善効果が認められた。

(2) 圧縮強度および耐久性(乾燥収縮、中性化、アルカリ骨材反応、塩分浸透)について、普通コンクリートとほぼ同等以上の性能を有することが確認できた。

なお、FA の外割り使用では、セメントや細骨材の種類、水セメント比等の種々の要因によって、その特性は大きく異なる。

したがって、FA を外割り使用する場合には、各地域で使用している細骨材に対して、最適な材料の組合せを検討し、その地域に適した配合を標準化していくことが重要と考えられる。

謝辞

本研究の報告にあたり、耐久性のうちアルカリ骨材反応試験については、九州大学大学院工

学研究院 松下博通教授と共同研究を実施するとともに、本研究についてのご指導、ご助言をいただきました。ここに、関係各位の皆様深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松藤泰典, 小山智幸, 山口謙太郎ほか: 持続可能な火力発電を実現するための電力産石炭灰の環境負荷低減処理システム, 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第2号, pp.57-68, 2002.7
- 2) 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), 2003.3
- 3) 松藤泰典, 小山智幸, 船本憲治ほか: 石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp.51-60, 2001.5
- 4) 船本憲治, 松藤泰典, 小山智幸ほか: 粗粉フライアッシュを外割大量使用するコンクリートの特性, 廃棄物のコンクリート材料への再資源化に関するシンポジウム論文集(コンクリート工学協会), pp.53-56, 2002.9
- 5) 伊藤智章, 松永篤, 仲松照隆ほか: フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.219-222, 2000
- 6) 宮川美穂, 松藤泰典, 小山智幸ほか: 空隙構造モデルによる石炭灰外割コンクリートの強度発現メカニズムに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.205-206, 2001.9
- 7) 鯉江利夫, 吉兼亨, 中島佳郎ほか: 再生骨材の簡易コンクリートへの適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1099-1104, 1997
- 8) 船本憲治: フライアッシュを使用したコンクリートの中性化特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.751-752, 2002.8