

報告 フライアッシュを細骨材の一部に置換したコンクリートの配合に関する研究

加地 貴^{*1}・石井 光裕^{*2}・岩原 廣彦^{*3}

要旨：石炭灰の有効利用と瀬戸内海沿岸地域における海砂採取規制強化を踏まえた細骨材使用量の低減を目的に，JIS A 6201 のⅡ種またはⅣ種適合フライアッシュを細骨材の一部に置換して使用したコンクリートにおいて，フライアッシュ使用量が配合に与える影響等の検討を行った。その結果，水セメント比 60%の場合ではフライアッシュ置換率の増加に伴い，単位水量の低減，AE 剤添加量の増加，および細骨材率の減少が確認され，減水性は JIS Ⅱ種の方が JISⅣ種フライアッシュよりも僅かに高い傾向が認められた。また，フライアッシュの使用により良好な強度発現を示す結果が得られた。

キーワード：石炭灰，フライアッシュ，Ⅱ種灰，Ⅳ種灰，細骨材置換，配合，圧縮強度

1. はじめに

石炭火力発電は，電力の安定供給確保の観点から，原子力とならび重要な電源として発電所の建設が進められており，これに伴い発電所から発生する石炭灰も年々増加する傾向にある¹⁾。現在，この石炭灰の約 1/4 は埋立処分され，残る 3/4 程度はセメント・コンクリート分野を中心に有効利用されている。しかし，近年，灰捨場の確保が困難になる状況や，有効利用の大半をセメント原料が占めているなか，セメント需要の低迷などの状況から，石炭灰の安定的な処理のため，新たな有効利用拡大技術の開発が急務となっている。

一方，瀬戸内海沿岸地域では，天然骨材資源の枯渇化や環境保全意識の高まりから海砂の採取規制強化が進められており，良質のコンクリート用骨材の確保が困難になることが懸念されている。

このような背景のもと，筆者らは，石炭火力発電所から発生するフライアッシュの有効利用と，コンクリートの細骨材使用量の低減を目的に，フライアッシュを細骨材の一部を補充する混和材としての研究を進めている。研究に使用

しているフライアッシュは，従来からコンクリート用混和材として使用されている JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」のⅡ種適合品（以下，Ⅱ種灰という。）と，これまで廃棄処分されることの多かった，フライアッシュ原粉を分級して JIS Ⅰ種適合の細粉フライアッシュを採取した後に残る粗粉フライアッシュ（JIS Ⅳ種適合品。以下，Ⅳ種灰という。）とし，石炭灰の更なる有効利用拡大を目指している。

本稿では，Ⅱ種灰とⅣ種灰を細骨材の一部に置換したコンクリートにおいて，フライアッシュの種別や使用量がコンクリートの単位水量や細骨材率などの配合に与える影響等について検討を行った結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料

瀬戸内海沿岸地域における海砂代替材の候補の一つとして，材料の安定供給面から砕砂が有望と考えられているため^{2),3)}，本研究の細骨材には，土木学会で示されている標準の粒度範囲内にある砕砂を使用した。フライアッシュは同じ発電所から発生したⅡ種灰およびⅣ種灰を使

*1 四国電力(株) 建設部石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム 工修 (正会員)

*2 四国電力(株) 建設部石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム主査 工博 (正会員)

*3 四国電力(株) 建設部石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム副主査

用した。

AE 減水剤 , AE 剤については , レディーミクストコンクリート工場での適用を想定して , 標準的なものを用いた。

本研究で使用した材料を表 - 1 , フライアッシュの電子顕微鏡写真を写真 - 1 , フライアッシュの品質を表 - 2 に示す。

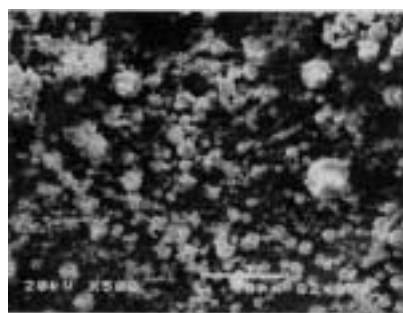
2.2 配合

コンクリートの配合条件として , 目標スランプ値を $8 \pm 1\text{cm}$, 目標空気を $4.5 \pm 0.5\%$ に設定して , それぞれ単位水量および AE 剤添加量で調整した。AE 減水剤添加率はセメント質量に対して 0.25% の一定とした。

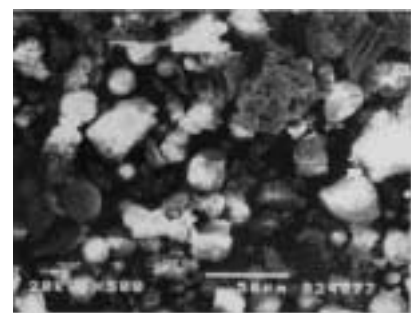
表 - 1 使用材料

材 料	性 状 など
セメント(C)	普通ポルトランドセメント 密度; $3.15\text{g}/\text{cm}^3$, プレーン; $3,350\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材(S)	砕砂A 徳島県阿波郡市場町産, 密度; $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, FM; 2.71
	砕砂B 徳島県阿波郡市場町産, 密度; $2.54\text{g}/\text{cm}^3$, FM; 2.76
粗骨材(G)	砕石A 大阪府高槻市産, G_{max} ; 20mm, 密度; $2.70\text{g}/\text{cm}^3$, 実績率; 59.1%
	砕石B 徳島県阿波郡市場町産, G_{max} ; 20mm, 密度; $2.59\text{g}/\text{cm}^3$, 実績率; 59.7%
細骨材に置換する フライアッシュ (FA)	JIS A 6201 II種フライアッシュ 密度; 2.28, プレーン値; $3,320\text{cm}^2/\text{g}$
	JIS A 6201 IV種フライアッシュ 密度; 2.21, プレーン値; $1,890\text{cm}^2/\text{g}$
混和剤	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体
	AE剤 アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤

注) 砕砂A, 砕石Bは水セメント比60%のコンクリートに使用
砕砂B, 砕石Bは水セメント比45~55%のコンクリートに使用



II 種灰



IV 種灰

写真 - 1 フライアッシュの電子顕微鏡写真

表 - 2 フライアッシュの品質

種別	項目	ig.loss (%)	SiO ₂ (%)	湿分 (%)	密度 (g/cm^3)	プレーン値 (cm^2/g)	フロー 値比 (%)	活性度指数 (%)	
								28日	91日
II種	試験品	1.3	59.2	0.07	2.28	3,320	103	83	92
	JIS規格	≤ 5.0	$45.0 \leq$	≤ 1.0	$1.95 \leq$	$2,500 \leq$	$95 \leq$	$80 \leq$	$90 \leq$
IV種	試験品	1.8	58.5	0.01	2.21	1,890	98	75	82
	JIS規格	≤ 5.0	$45.0 \leq$	≤ 1.0	$1.95 \leq$	$1,500 \leq$	$75 \leq$	$60 \leq$	$70 \leq$

表 - 3 コンクリートの配合

FA種別	FA 置換率 (%)	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					AE 減水剤 ($\text{C} \times \%$)	AE剤 (cc/m^3)	フレッシュ性状		
					W	C	FA	S	G			スランプ (cm)	空気量 (%)	C.T. ($^{\circ}\text{C}$)
II種	0	60	60	45	173	288	0	799	1,026	0.25	11.5	7.0	4.3	21.4
	10		48	42	163	272	68	686	1,104		51.0	7.5	4.1	21.2
	15		44	40	163	272	96	617	1,145		64.4	7.5	4.2	21.2
	20		42	38	165	275	121	550	1,177		116.8	8.0	4.0	21.3
	30		37	37	173	288	176	460	1,175		232.0	8.5	4.0	21.3
	10	45	48	42	163	272	66	686	1,104		59.2	7.5	4.4	21.1
	20		42	38	168	280	117	545	1,169		137.0	9.0	4.0	21.0
	30		38	37	176	293	168	457	1,166		322.7	8.5	4.4	21.3
	0	50	45	44	176	391	0	732	951		18.0	7.5	4.5	21.7
	10		40	39	182	404	55	577	1,018		53.0	8.5	4.5	21.5
IV種	20		37	35	188	418	97	452	1,067		124.0	8.5	4.3	21.7
	0	55	50	45	173	346	0	767	958		14.0	7.5	4.7	20.7
	10		43	41	177	354	60	625	1,018		48.0	9.0	4.8	20.6
	20		39	37	182	364	108	493	1,072		106.0	8.5	4.7	20.8
	0		55	46	173	315	0	798	953		13.0	7.0	4.9	20.2
	10		46	43	173	315	64	671	1,008		40.0	9.0	4.5	20.4
	20		40	38	173	315	115	526	1,096		99.0	8.0	4.2	20.5

表 - 4 試験項目および方法

試験項目	試験方法	備考
スランブ試験	JIS A 1101 「コンクリートのスランブ試験方法」	
空気量試験	JIS A 1128 「まだ固まらないコンクリートの空気量の試験方法(圧力法)」	
圧縮強度試験	JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」	供試体寸法は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験材齢まで標準養生 試験材齢は3日、7日および28日

細骨材率は、単位水量を決定する前段階に、単位水量を一定にした場合にスランブが最大となることを基本として、練上り状態も考慮して最適細骨材率を定めた。

コンクリートの配合を表 - 3 に示す。今回、フライアッシュは細骨材の一部と置換使用することから、配合設計上は細骨材と見なして取り扱っている。

2.3 試験項目および方法

試験項目および方法を表 - 4 に示す。なお、コンクリートの練混ぜは、容量 55 リットルの二軸強制練りミキサを使用し、セメント、フライアッシュ、骨材を投入して 30 秒間の空練りを行った後、水と混和剤を投入して 90 秒間の練混ぜを行った。

3. 試験結果

3.1 フライアッシュの種別・置換率とコンクリート配合との関係

(1) 単位水量

II 種灰または IV 種灰の置換率を変えて配合選定したコンクリートの、フライアッシュ置換率と単位水量との関係を図 - 1 に示す。

これから分かるように、II 種灰、IV 種灰のどちらも、置換率の増加とともに単位水量は一旦減少し、極小値を迎えて再び増加する結果が得られた。単位水量が最小となる時のフライアッシュ置換率は、II 種灰、IV 種灰ともに 10～15% であるが、II 種灰の方が若干大きい傾向が伺える。そのときの単位水量も試験では II 種灰、IV 種灰ともに 163kg/m^3 であったが、変化曲線の傾

向から II 種灰の減水性の方が高いことが伺える。

この要因としては、IV 種灰はフライアッシュ原粉から高ブレンの I 種灰を分級採取した後の粗粉であるため、II 種灰と比較して

粒形の悪いフライアッシュ粒子を若干多く含むこと、表—2 に示すとおり II 種灰よりも ig.loss が 0.5% 高く、同一置換率における AE 剤添加量が若干多くなっていることから、AE 減水剤の効果も若干低下していることなどが考えられる。

また、フライアッシュの置換率の増加に伴い極小値を有する曲線を示した理由としては、フライアッシュの使用によるコンクリートの流動性改善効果と粘性を増加させる影響度合の関係が考えられる。すなわち、極小値までは流動性改善効果の方が粘性の増加の影響よりも卓越するが、それ以降は逆に粘性の増加による影響の方が卓越するものと考えられる。この点については、今後の検討課題である。

本試験結果から、フライアッシュの使用により単位水量の減少を図る場合、II 種灰、IV 種灰ともに置換率 10%～15% が最適であると考えられる。また、フライアッシュの有効利用の観点

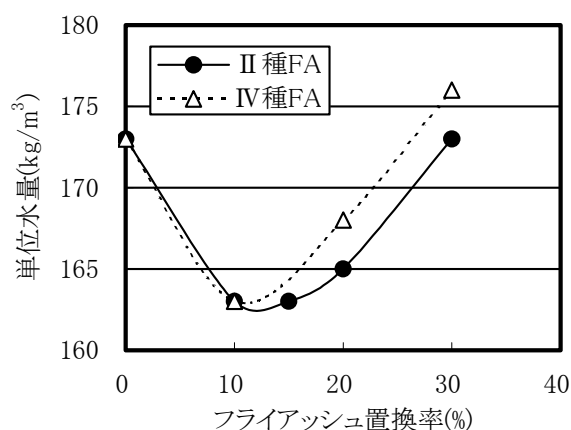


図 - 1 種別の異なるフライアッシュの置換率と単位水量の関係

から，品質面でプレーンの単位水量を上限としてできるだけ多くのフライアッシュを使用することとした場合，Ⅱ種灰で 30%程度，Ⅳ種灰で 25%程度までの置換が可能である。しかし，フライアッシュ置換率が 30%になると粘性が過大となり，現場でのポンプ圧送，締固め等の施工性に影響することが考えられることから，Ⅱ種灰，Ⅳ種灰ともに置換率 20%程度が実用的な範囲において最適であると考えられる。

また，フライアッシュの細骨材への置換は減水性だけでなく，練上がり時のプラスティシティーの向上も定性的に認められ，細骨材に砕砂を単独で使用するコンクリートの品質の改善に有効⁴⁾であると考えられる。

(2) AE 剤添加量

フライアッシュ置換率と AE 剤添加量との関係を図 - 2 に示す。この図より，Ⅱ種灰，Ⅳ種灰ともに置換率の増加とともに AE 剤添加量も増加している。これは，フライアッシュの含有炭素分の一部が AE 剤を吸着したため⁵⁾であると考えられる。

Ⅱ種灰とⅣ種灰とを比較すると，置換率 20%以下ではほぼ同等の AE 剤添加量であるが，30%ではⅣ種灰の AE 剤添加量がⅡ種灰の 4 割程度多い結果であった。これは表 - 2 の ig.loss から推測できるとおり，フライアッシュ中の未燃炭素分がⅣ種灰の方が多かったためであると考えられる。

(3) 細骨材率

フライアッシュ置換率と最適細骨材率との関係を図 - 3 に示す。この図のように，Ⅱ種灰，Ⅳ種灰ともに置換率の増加に伴い細骨材率は減少し，その程度は両者同等であった。

細骨材率の減少の理由としては，フライアッシュを細骨材の一部に置換使用することにより，コンクリート中の微粒分が増加し，粘性が増加したことが考えられる。すなわち，水セメント比を一定としているが，実質的には水粉体比が小さくなるため，所要のワーカビリティを得るためには細骨材率を減少する必要があったと

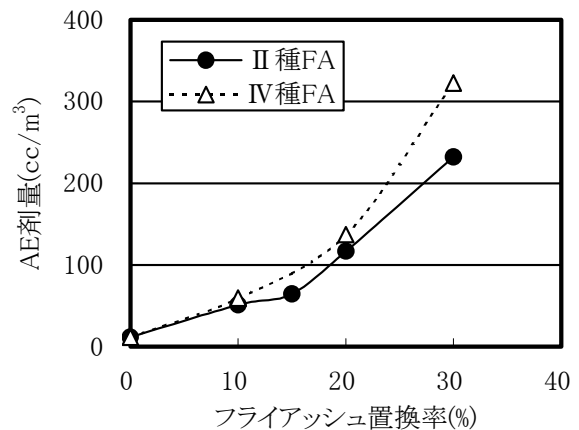


図 - 2 種別の異なるフライアッシュの置換率と AE 剤量の関係

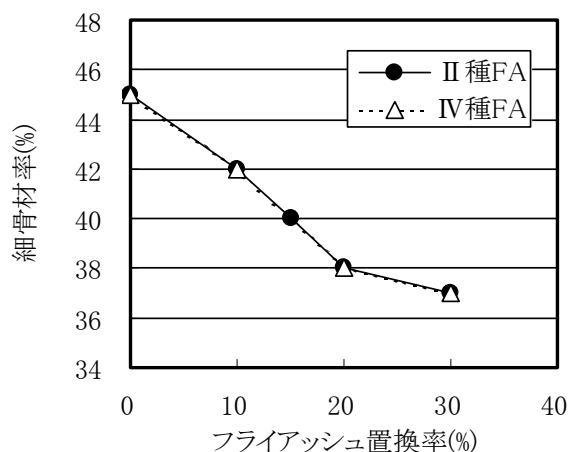


図 - 3 種別の異なるフライアッシュの置換率と細骨材率の関係

考えられる。

また，Ⅱ種灰とⅣ種灰の細骨材率に差が生じなかった理由については，単位水量の評価とともに練上がり状態を定性的に評価した結果を加味して細骨材率を選定したこと，すなわち定性的な状態には差が明確に現れなかったことが考えられる。

(4) 水セメント比

Ⅳ種灰を細骨材の一部と置換したコンクリートについて，水セメント比を 45～60%の範囲で変化させて配合試験を行った。水セメント比別のⅣ種灰置換率と単位水量との関係を図 - 4 に示す。この図より，水セメント比が 55%を

境として、これより小さい45%、50%ではIV種灰置換率の増加に伴い単位水量が増加し、前述の60%の場合とは異なる傾向を示した。

この理由として、水セメント比が比較的高い場合には、細骨材の一部を置換して微粉末であるフライアッシュを添加した場合でも、単位セメント量が少ないため使用水量にフライアッシュが拘束する水量の余裕があるが、水セメント比が低くなるとフライアッシュが拘束する水量が不足してしまい、所要のワーカビリティを確保するためには水量の増加が必要になってきていることが考えられる。

そこで、コンクリート中の細粒分容積に着目し、式(1)で表す細粒分容積と式(2)で表す減水率の関係を示したのが図 - 5 である。

$$\begin{aligned} \text{細粒分容積}(\text{l/m}^3) \\ = c + fa_{(IV)} + S_{(<0.15\text{mm})} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{減水率}(\%) \\ = (W_{\text{plain}} - W_{\text{FAIV}}) / W_{\text{plain}} \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、

c : セメント容積(l/m^3)

$fa_{(IV)}$: IV 種灰容積(l/m^3)

$S_{(<0.15\text{mm})}$: 細骨材のふるい目 0.15mm 通過分の容積(l/m^3)

W_{FAIV} : IV 種灰の使用コンクリートの単位水量 (kg/m^3)

W_{plain} : プレーンコンクリートの単位水量(kg/m^3)

この図より、細粒分容積の増加とともに減水率は低下し、細粒分容積が 165l/m^3 程度を越えると減水率が負、すなわちプレーンより単位水量が増加する傾向が認められた。このことは、フライアッシュの減水効果が得られるか否かは、コンクリート中の細粒分の総量によって決まり、フライアッシュの使用により細粒分が過多になるとプレーンよりも単位水量が増加することを示している。

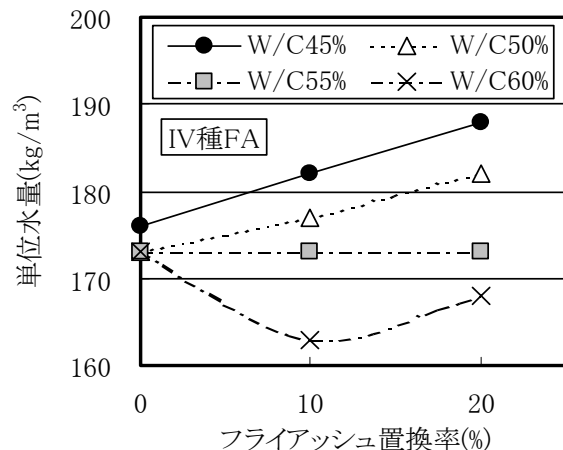


図 - 4 水セメント比が異なるコンクリートのフライアッシュ置換率と単位水量の関係

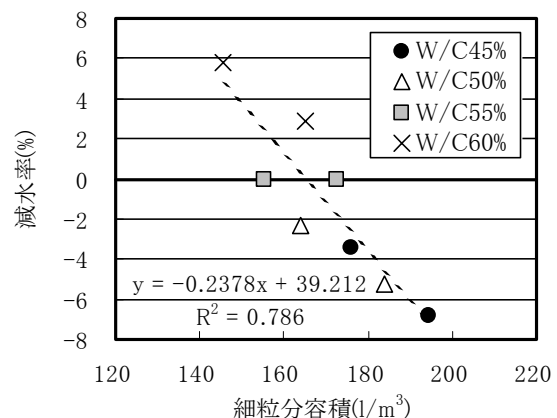


図 - 5 コンクリート中の細粒分容積と減水率の関係

3.2 フライアッシュの種別・置換率とコンクリート強度との関係

II 種灰または IV 種灰の置換率を変えて配合選定したコンクリートの品質を確認するため、水セメント比 60%のコンクリートにおいて、材齢 3 日、7 日、28 日の圧縮強度を測定した。フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係を図 - 6 に示す。II 種灰と IV 種灰の強度発現性を比較すると、置換率が同じ場合、材齢に関係なく同等の強度発現性を示している。また、置換率による強度発現性については、II 種灰と IV 種灰のどちらもフライアッシュを置換することにより材齢 3 日からプレーンに比べて強度は増加し、その傾向は材齢が長くなるほど顕著になっている。

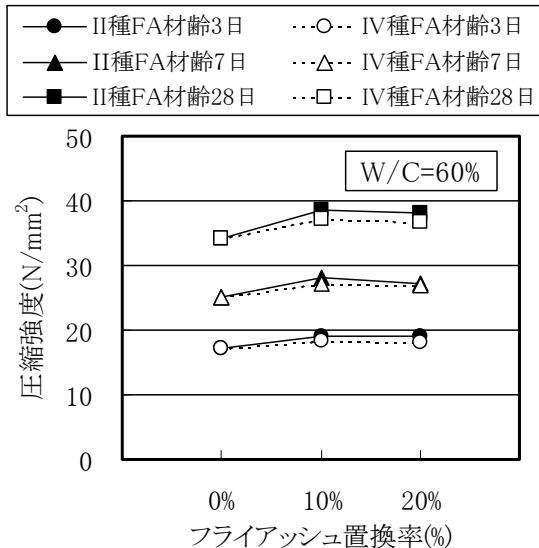


図 - 6 フライアッシュ置換率と圧縮強度の関係

これは、フライアッシュを置換したことによりブリーディングが減少したことや、フライアッシュによる鉱物質微粉末効果⁵⁾等によるものと考えられる。

4. まとめ

石炭灰の有効利用と瀬戸内海沿岸地域における海砂採取規制強化を踏まえたコンクリート細骨材使用量の低減を目的に、フライアッシュを細骨材の一部に置換して使用したコンクリートについて、フライアッシュの種別や使用量が配合に与える影響等について検討を行った結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 水セメント比 60%のコンクリートではⅡ種灰またはⅣ種灰の置換率 10～15%において単位水量は最小になり、その値はⅡ種灰の方が僅かに小さい。置換率がさらに増加すると単位水量は増加するが、増加の程度もⅡ種灰の方が小さい。
- (2) 水セメント比 60%のコンクリートではⅡ種灰またはⅣ種灰の置換率の増加とともに AE 剤添加量も増加し、その程度は ig.loss の大きいⅣ種灰の方が大きい結果となった。
- (3) 水セメント比 60%のコンクリートではⅡ種灰またはⅣ種灰の置換率の増加とともに細

骨材率は減少し、減少量はⅡ種灰とⅣ種灰と同等であった。

- (4) 水セメント比が 55%より小さいコンクリートではⅣ種灰置換率の増加とともに単位水量も増加するが、55%より大きい場合は単位水量の低減が認められた。
- (5) Ⅱ種灰またはⅣ種灰を細骨材の一部に置換したコンクリートでは、フライアッシュを使用しないコンクリートよりも良好な圧縮強度の発現が認められた。

以上より、Ⅱ種灰、Ⅳ種灰とも細骨材を補充する混和材として有効であることが明らかになった。また、ポゾラン反応による長期強度の増加が期待できることや、乾燥収縮、耐凍害性、中性化に対してもフライアッシュを使用しない場合と同等以上の性能を有することが報告^{4),6)}されていることから、フライアッシュを細骨材の一部に置換したコンクリートは良好な品質を有するものと考えられる。

参考文献

- 1) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック，2000
- 2) 井上 健：レディーミクストコンクリートにおける‘砂’の動向，土木学会誌，Vol.86，pp.80-82，2001.8
- 3) (社)セメント協会：西日本における骨材用砂の需給見通し，セメント・コンクリート，No.654，p.245，2001.8
- 4) 加地 貴，石井光裕，岩原廣彦，土居靖幸：粗粉フライアッシュ(JISⅣ種灰)を細骨材の一部に置換配合したコンクリートの性状，産業資源のコンクリート材料への有効利用に関するシンポジウム論文集，3-2，2001.11
- 5) 笠井芳夫，小林正凡：セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp.78-102，1986
- 6) 馬越唯好，河野 清，山地功二，川崎真治：非 JIS 灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，1997