論文　環境負荷低減を目指したフライアッシュ利用コンクリートの開発に関する研究

増田　裕[*1]・堺　孝司[*2]・高野　剛[*3]・石井　光裕[*4]

要旨：本研究では，環境負荷低減を目指したフライアッシュ利用コンクリートの開発を目的として，フライアッシュのセメントおよび細骨材置換によるコンクリートのフレッシュ性状および強度発現に及ぼす影響について検討を行った。また，フライアッシュ利用による環境負荷低減効果，具体的には，CO_2 排出削減量および骨材削減量についても検討を行った。その結果，フライアッシュの内外割の併用は，フライアッシュを用いない場合と比べて，ブリーディングを抑制し，置換率内割 10%，外割 10%の場合，水結合材比および材齢に依存して同等かそれ以上の強度発現を生じ，さらに，環境負荷を低減させることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ，圧縮強度，環境負荷低減

1.　はじめに

現在，地球環境問題が深刻化している。建設分野において，建設工事に用いられる主な材料であるセメント，高炉鋼, 電炉鋼の年間使用量はそれぞれ, 約 7000 万トン，1500 万トン，1000 万トンにのぼり，これに伴う年間 CO_2 排出量は，合計約 8004 万トンにもなる。さらに，施工などを考慮した建設工事全体の年間 CO_2 排出量は，材料による CO_2 排出量の 1.3 倍となると仮定すると，約 1.04 億トンとなる。これは，国内全体の CO_2 排出量の約 8%にもなり，建設分野は大きな環境負荷を生み出しているといえる。このことから，建設分野は，環境負荷の低減を積極的に行っていかなければならないといえる。さらに，社会的説明責任を果たす上で，これらを定量的に評価することが重要である。このような背景から，コンクリート構造物について幾つかの先進的な研究[1) 2)]が行われている。

コンクリートの分野における環境負荷低減策として，これまでフライアッシュの有効利用をはじめとする様々な技術開発が行われてきた。しかしながら，それらは，産業副産物の有効利用の観点で行われ，その評価は，強度や耐久性を対象としており，環境の観点からの定量的な評価はほとんど行われていない。

フライアッシュは，石炭火力発電所などから発生する産業副産物で, 日本での平成 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[3)]。現在，フライアッシュのコンクリートへの利用については，セメント代替材として用いる，いわゆる内割での利用と，細骨材の一部として用いる外割での利用の 2 つの考え方がある。前者は，セメント量を低減することによりセメント自体が有する大きな環境負荷を低減する効果があるが，フライアッシュがセメント代替材として機能するためには長期材齢が必要であり，その置換率には自ずと限界がある。後者は，骨材資源の延命化を図ることが可能であるが，セメント代替ほどの環境負荷低減効果は期待できない。

そこで，内割と外割を併用することにより，両者の長所を活かし，短所を補い合うことが期待できる。

以上の背景をもとに，本研究では，環境負荷低減を目指したフライアッシュ利用コンクリートの開発を目的とし，フライアッシュのセメントおよび細骨材置換のフレッシュ性状およびコンクリート強度発現に及ぼす影響について検討するとともに，フライアッシュ混和による環境負荷低減効果，具体的には，CO_2 排出削減量および骨材削減量についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料の種類および品質を**表－1** に示す。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は，温度 20℃，相対湿度 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 50 リットルで行った。コンクリートは，最初にセメント，フライアッシュ，細骨材，粗骨材を 30 秒間空練りし，次に水，混和剤を加え 90 秒間練混ぜを行い製造した。

コンクリートの配合は，水結合材比を 40，50，60%とし，フライアッシュは，セメントまたは細骨材の容積置

*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（株）四国総合研究所　土木技術部
*4 四国電力（株）　土木建築部　工博　(正会員)

表－1 材料の種類および品質

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^3
		比表面積3290cm^2/g
フライアッシュ(FA)	四国電力橘発電所産フライアッシュII種	密度2.27g/cm^3
		比表面積4270cm^2/g
		強熱減量2.58%
細骨材(S)	砕砂	表乾密度2.60g/cm^3
		吸水率1.70%
		粗粒率2.65
		実績率61.4%
		微粒分量2.8%
粗骨材(1505)	砕石	表乾密度2.58g/cm^3
		吸水率2.01%
		粗粒率6.35
		実績率59.6%
粗骨材(2015)	砕石	表乾密度2.58g/cm^3
		吸水率2.01%
		粗粒率7.14
		実績率59.6%
混和剤	AE減水剤	高変性ポリオール複合体
	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

換で，内割の置換率を 0，10，20%，外割の置換率を 0，10, 20%とし, これらを組み合わせた計 11 ケースとした。

細骨材率は，各配合の最適細骨材率とした。また，AE 減水剤は全ての配合において結合材の 0.25%で一定とし, スランプおよび空気量の調整は, 単位水量および AE 剤によって行った。**表－2** にコンクリートの配合を示す。

2.3 試験項目

(1) スランプおよび空気量

スランプ試験は，JIS A 1101 に準拠して行った。

空気量試験は，JIS A 1128 に準拠して行った。なお，目標スランプを 10.0±1.0cm, 目標空気量を 4.5±1.0%とした。

(2) ブリーディング

ブリーディング試験は，JIS A 1123 に準拠して行った。

(3) 圧縮強度

圧縮強度試験は，供試体を作成後 1 日で脱型し，所定の期間まで 20℃水中養生を行い，JIS A 1108 に準拠して行った。

3．実験結果および考察

3.1 スランプおよび空気量

スランプおよび空気量試験の結果を**表－2** に示す。

3.2 単位水量および AE 剤添加率

図－1，**図－2** および**図－3**，**図－4** に，所定のスランプおよび空気量を得るために要した各配合の単位水量および AE 剤添加率を示す。

各配合の単位水量は，まず，**図－1** より，フライアッシュを用いない場合と比べて，フライアッシュを内割で用いた場合，外割で用いた場合，内外割を併用した場合のいずれの場合も減少していることがわかる。次に，**図－2** より，まず，フライアッシュを用いない場合，水結合材比 60%の場合と比べて，水結合材比 50%の場合は，単位水量は減少していることがわかる。しかしながら，水結合材比 40%の場合は，逆に単位水量は増加していることがわかる。フライアッシュを用いた場合は，水結合材比の減少に伴い単位水量は増加していることがわかる。これらの挙動は，単位粉体量が少ない領域ではフライアッシュのボールベアリング効果による減衰効果があるが，単位粉体量が多い領域では，コンクリートの粘性が増し所要のスランプを得るための単位水量が増加することによると考えられる。

各配合の AE 剤添加率は，まず，**図－3** より，フライアッシュを内割で用いた場合は，用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率の増加に伴い増加していることがわかる。フライアッシュを外割で用いた場合，用いない場合と比べ, フライアッシュ置換率の増加に伴い AE 剤添加率は著しく増加していることがわかる。フライアッシュを内外割で併用した場合は，用いない場合と比べて，置換率の増加に伴い AE 剤添加率は, さらに著しく増加し

表－2 コンクリートの配合表

水結合材比	内割フライアッシュ置換率	外割フライアッシュ置換率	細骨材率	水	セメント	内割フライアッシュ	外割フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤	スランプ	空気量
W/B	FAc	FAs	s/a	W	C	FAc	FAs	S	G	結合材×%		(cm)	(%)
	(%)			(kg/m^3)									
60	0	0	45	177	295	0	0	801	972	0.25	0.0011	10.6	4.5
	10	0	46	173	260	21	0	826	962	0.25	0.0039	10.9	4.9
	20	0	47	173	231	41	0	844	945	0.25	0.0072	9.9	4.9
	0	10	43	166	277	0	68	706	1031	0.25	0.0165	10	4.3
	10	10	44	165	248	20	70	724	1015	0.25	0.027	9.5	5
	0	20	40	171	285	0	126	577	1074	0.25	0.0435	9.4	4.8
	20	20	42	171	228	41	132	606	1038	0.25	0.054	9.2	4.3
50	0	0	44	170	340	0	0	775	979	0.25	0.0014	9.2	4.8
	10	10	42	170	306	33	65	666	1014	0.25	0.0195	9.2	4.5
40	0	0	42	172	430	0	0	706	968	0.25	0.0036	9	4.8
	10	10	40	182	410	33	57	588	973	0.25	0.0204	9.2	4.7

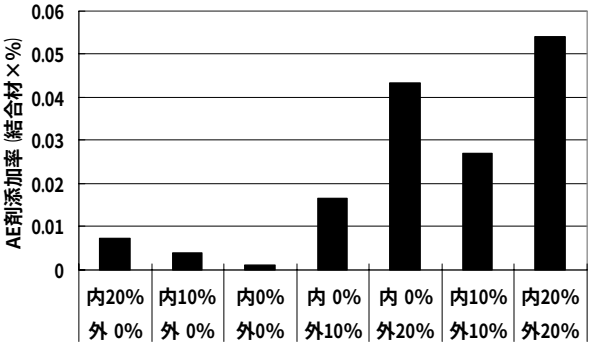
ていることがわかる。次に，**図－4** より，フライアッシュを用いない場合は，水結合材比の減少に伴い AE 剤添加率は若干増加していることがわかる。フライアッシュを用いた場合は，水結合材比 60%の場合と比較して，水結合材比 50%の場合のほうが AE 剤添加率は減少していることがわかる。水結合材比 50%の場合と水結合材比 40%の場合は，ほぼ同程度の AE 剤添加率となっている。これらの挙動は，フライアッシュ中に含まれる未燃炭素に AE 剤を吸着する性質を有することによると考えられる。また，内割に比べ外割は AE 剤添加率が大きくなっているが，これは，同じ置換率で使用しても，外割のほうがフライアッシュの単位量が多くなるためである。

3.3 ブリーディング

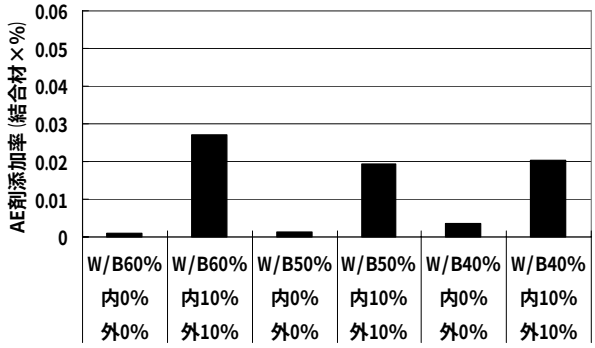
図－5 および**図－6** に，コンクリートのブリーディング試験結果を示す。先ず，**図－5** より，フライアッシュを内割で用いた場合は，用いない場合と比べて，置換率の増加に伴いブリーディング率は増加していることがわかる。これは，フライアッシュを内割で用いたコンクリートの凝結時間は，置換率の増加に伴い遅延する傾向にある[4]ため，結果としてブリーディング率が増加したと考えられる。

フライアッシュを外割で用いた場合は，用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率の増加に伴いブリーディング率は減少していることがわかる。これは，単位セメント量がほとんど減少しないため凝結が遅延しないこと[5]，および，単位粉体量増加によって，コンクリートの保水性が高まったことが考えられる。フライアッシュを内外割で用いた場合は，用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率の増加に伴いブリーディング率は減少していることがわかる。

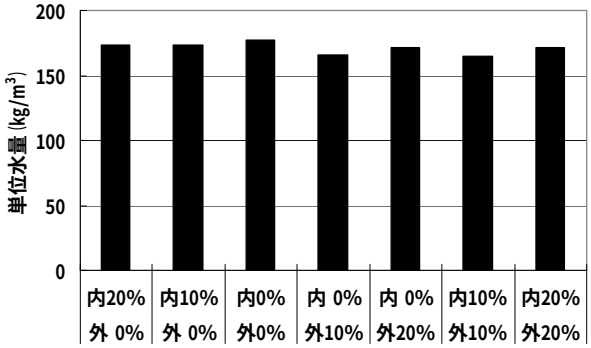
次に，**図－6** より，フライアッシュの利用の有無にかかわらず水結合材比の減少に伴い，ブリーディング率は



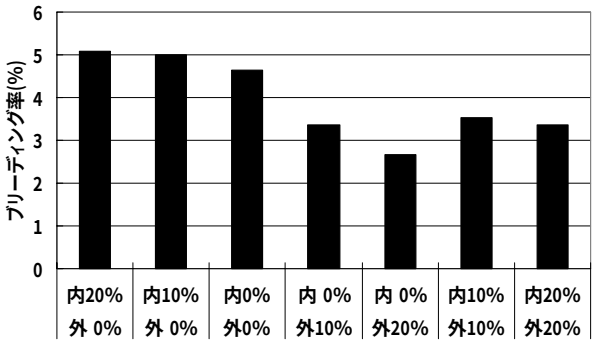
図－3 AE 剤添加率（W/B=60%）



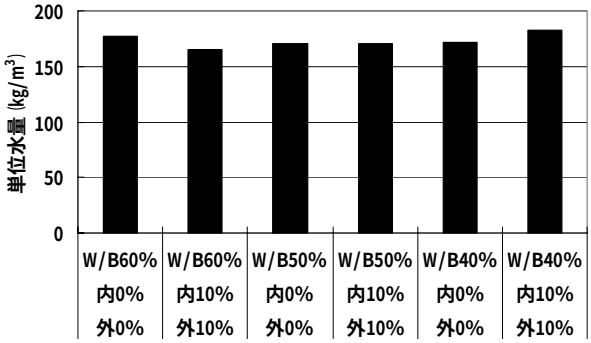
図－4 AE 剤添加率（W/B=60，50，40%）



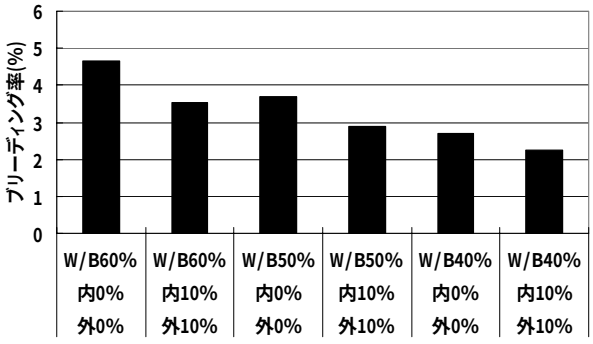
図－1 単位水量（W/B=60%）



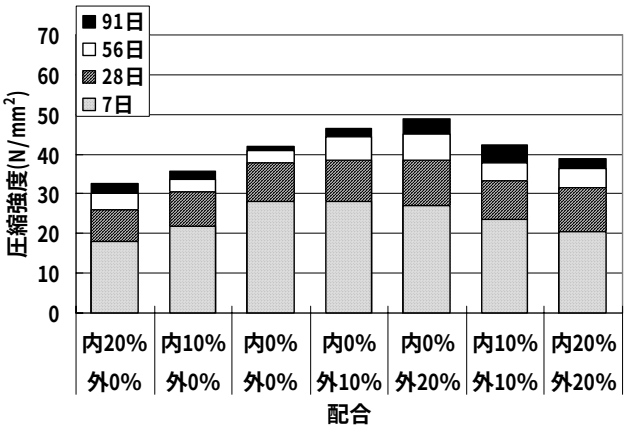
図－5 ブリーディング試験結果（W/B=60%）



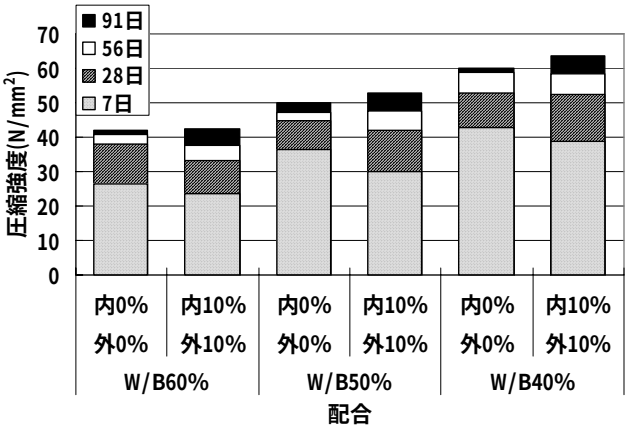
図－2 単位水量（W/B=60，50，40%）



図－6 ブリーディング試験結果（W/B=60，50，40%）



図－7 圧縮強度試験結果（W/B=60%）



図－8 圧縮強度試験結果（W/B=60，50，40%）

減少していることがわかる。また，水結合材比に関わらず，フライアッシュを用いた場合の方がブリーディング率は減少していることがわかる。何れの場合も，粉体量が増加することに起因する。

3.4 圧縮強度

図－7 および**図－8** にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。まず，**図－7** より，フライアッシュを内割で用いた場合，用いない場合と比べ，いずれの材齢においても置換率の増加とともに圧縮強度は 15～32%の範囲で減少していることがわかる。これは，主にセメント量の減少によるものである。フライアッシュを外割で用いた場合，用いない場合と比べ，材齢 28 日まではほぼ同等の圧縮強度となった。材齢 56 日以降は，フライアッシュ置換率の増加とともに圧縮強度は 8～16%の範囲で増加していることがわかる。これは，フライアッシュのポゾラン反応によるものである。内割 10%，外割 10%の場合とフライアッシュを用いない場合とを比較すると，材齢 7 日では，内割 10%，外割 10%の方が圧縮強度は小さいが，材齢の経過に伴い，徐々にその差は縮まり，材齢 91 日では，フライアッシュを用いない場合と同等の圧縮強度となった。内割 20%，外割 20%の場合とフライアッシュを用いない場合を比較すると，材齢に関わらず内割 20%，外割 20%の方が圧縮強度は小さくなっている。しかしながら，材齢の経過に伴い，その差は徐々に小さくなっている。内割 10%の場合と内割 10%，外割 10%の場合を比較すると材齢に関わらず内割 10%，外割 10%の場合の方が圧縮強度は大きくなっている。また，内割 20%の場合と内割 20%，外割 20%の場合を比較すると，材齢に関わらず内割 20%，外割 20%の場合の方が圧縮強度は大きくなっている。このことは，内割のみの配合に外割でフライアッシュを混和することによって強度が増加する，つまり，内割のみの配合より多くのフライアッシュを用い所用の圧縮強度を確保できる可能性があるということである。次に，**図－8** より，フライアッシュの有無に関わらず，全ての材齢において水結合材比が小さくなるほど，圧縮強度は増加していることがわかる。水結合材比 50%の場合，材齢 28 日までは，フライアッシュを用いない場合の方が圧縮強度は大きくなっているが，材齢 56 日で圧縮強度は同等となり，材齢 91 日では，フライアッシュを用いた場合の方が圧縮強度は大きくなっている。水結合材比 40%の場合，材齢 7 日では，フライアッシュを用いない場合の方が圧縮強度は大きくなっているが，材齢 28 日および 56 日で圧縮強度は同等となり，材齢 91 日では，フライアッシュを用いた場合の方が圧縮強度は大きくなっている。

4．フライアッシュ利用による環境評価

4.1 環境負荷量の算出方法

評価項目としては，まず，温暖化について着目した。温暖化ガスとして CO_2，メタンなどが考えられるが，本研究では，インベントリデータが整備されている CO_2 排出量を算出の対象とした。インベントリデータは，「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」[6] より引用した。

算定方法については，**表－2** の配合表をもとに $1m^3$ あたりの材料の単位量に CO_2 排出原単位を乗じることによって行った。

また，骨材資源については，資源の延命化が重要であると考えたため，ここでは，フライアッシュを用いない場合に対する骨材の削減量に着目して評価を行った。算定方法は，示方配合の骨材単位量を用い，各水結合材比において，フライアッシュを用いた場合の単位骨材量からフライアッシュを用いない場合の単位骨材量を減ずることで行った。

環境負荷の算出は，コンクリートの製造に必要である，セメント，骨材，AE 減水剤，AE 剤を評価の対象とした。フライアッシュは，分級や集塵などの過程で電力が消費され環境負荷が発生していると考えられるが，これらの環境負荷は電力に含まれる負荷として考慮し，ここでは、

表－3 CO_2排出原単位

材料名	CO_2排出原単位 kg-CO_2/t
ポルトランドセメント	767
天然粗骨材　砕石	2.9
天然細骨材　砕石	3.7
AE減水剤	121

対象外とした。また，フライアッシュの輸送には環境負荷が発生するが，ここでは，いずれの材料についても輸送にかかる環境負荷は，対象から除外することとした。

なお，AE 減水剤の環境負荷原単位については，「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」[6] に該当する成分系の項目がなかった。そこで，全成分系の環境負荷原単位の平均値を用いることとした。AE 剤に関しては，使用量が少量であることから，対象から除外することとした。

今回用いた CO_2 排出原単位を**表－3** に示す。

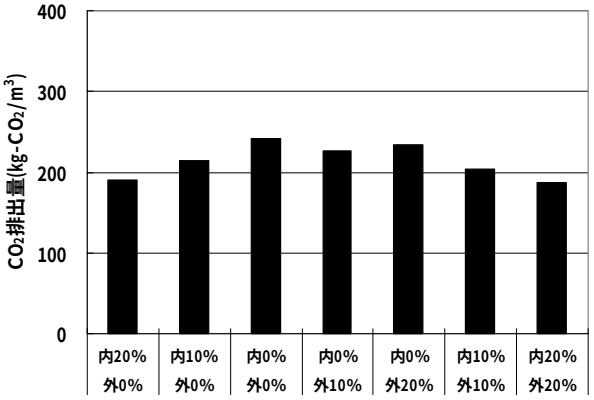
4.2 CO_2排出量

表－4 および**図－9**，**図－10** に各配合における CO_2 排出量の算定結果を示す。先ず，**表－4** よりコンクリートに用いられる材料では，セメントが CO_2 排出量の大部分を占めていると言うことがわかる。

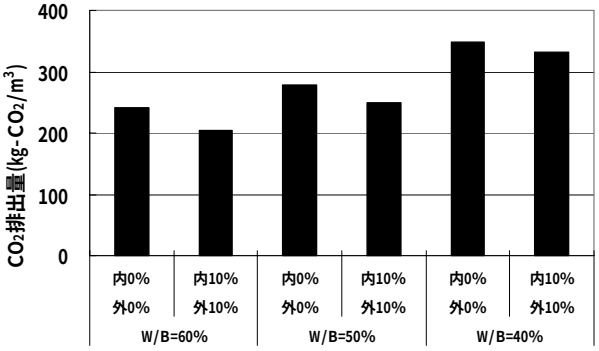
次に，**図－9** より，フライアッシュを内割で用いた場合は，用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率 10%では 11.5%，置換率 20%では 21.1%の CO_2 排出量を削減できる。次に，フライアッシュを外割で用いた場合は，用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率 10%では 6.0%，置換率 20%では 3.5%の CO_2 排出量を削減できる。フライアッシュ置換率 10%の場合より置換率 20%の方が CO_2 排出削減率は低くなっているが，これは，置換率 20%の場合，コンクリートの粘性が高くなったため所要のスランプを得るための単位水量が増加した結果，単位セメント量も増加したからと考えられる。また，内割での使用の方が，外割での使用に比べて高い CO_2 排出削減率となっているが，これは，内割による単位セメント量の減少による。フライアッシュを内外割で併用した場合は，フライアッシュを用いない場合と比べて，フライアッシュ置換率内割 10%，外割 10%では 15.6%，内割 20%，外割 20%では 22.3%の CO_2 排出量を削減できる。フライアッシュ置換率内割 10%も場合と内割 10%，外割 10%の場合に注目すると，前者に比べて，後者のほうが CO_2 排出量は増加していることがわかる。**図－10** より，フライアッシュの使用の有無にかかわらず，水結合材比の減少に伴い CO_2 排出量は増加していることがわかる。また，全ての水結合材比において，フライアッシュを使用すると CO_2 排出量は減少する。これらは，単位セメント量の変化が主な原因である。

表－4 各配合における CO_2 排出量

水結合材比 W/B	内割FA置換率 FAc (%)	外割FA置換率 FAs (%)	セメント C (kg/m³)	細骨材 S (kg/m³)	粗骨材 G (kg/m³)	AE減水剤 (kg/m³)	計 (kg/m³)
60	20	0	177.08	3.12	3.50	7.00	190.70
	10	0	199.32	3.06	3.56	7.88	213.81
	0	0	226.15	2.96	3.60	8.94	241.64
	0	10	212.35	2.61	3.81	8.39	227.17
	0	20	218.48	2.13	3.97	8.63	233.22
	10	10	190.12	2.68	3.76	7.51	204.06
	20	20	174.78	2.24	3.84	6.91	187.77
50	0	0	260.64	2.87	3.62	10.30	277.43
	10	10	234.58	2.46	3.75	9.27	250.07
40	0	0	329.64	2.61	3.58	13.03	348.86
	10	10	314.31	2.18	3.60	12.42	332.50



図－9 CO_2 排出量（W/B=60%）



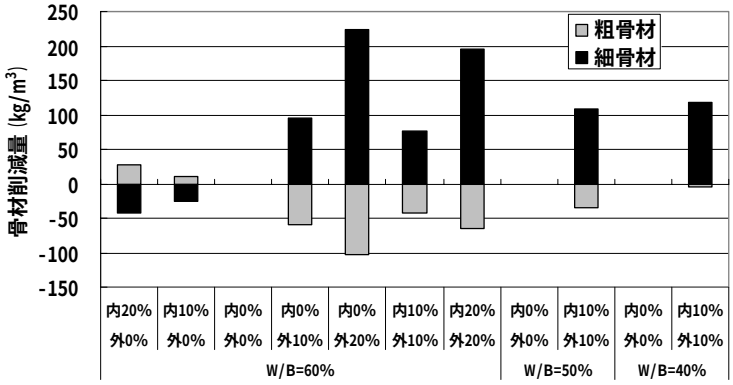
図－10 CO_2 排出量（W/B=60，50，40%）

圧縮強度と CO_2 排出量の関係は，材齢 56 日以降では，同じ圧縮強度を得るための CO_2 排出量は，フライアッシュを外割で利用した場合，または内外割で併用した場合のほうが小さくなる。

4.3 骨材削減量

図－11 に，各配合における骨材削減量の算定結果を示す。

フライアッシュを内割で 10%置換した場合は，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 25kg/m³ の増加，粗骨材は 10kg/m³ の減少，全体では 15kg/m³ の増加となった。フライアッシュを内割で 20%置換した場合は，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 43kg/m³ の増加，粗骨材は 27kg/m³ の減少，全体では 16kg/m³ の増加となった。これらの増減は，フライアッ



図－11 骨材削減量

シュのボールベアリング効果によって単位水量および単位セメント量が減少したことや，細骨材率が変化したことによる。フライアッシュを外割で 10%置換した場合は，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 95kg/m^3 の減少，粗骨材は 59kg/m^3 の増加，全体では 36kg/m^3 の減少となった。フライアッシュを外割で 20%置換した場合は，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 224kg/m^3 の減少，粗骨材は 102kg/m^3 の増加, 全体では 122kg/m^3 の減少となった。これらの増減は, 前述の理由に加え,フライアッシュを細骨材代替として用いていることによる。フライアッシュを内外割で併用した場合は，先ず，水結合材比 60%の場合は，フライアッシュを内割 10%，外割 10%置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 77 kg/m^3 の減少，粗骨材は 43kg/m^3 の増加，全体では 34kg/m^3 の減少となった。フライアッシュを内割 20%, 外割 20%置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 195kg/m^3 の減少, 粗骨材は 66 kg/m^3 の増加, 全体では 129 kg/m^3 の減少となった。次に，水結合材比 50%の場合は，フライアッシュを内割 10%，外割 10%置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 109kg/m^3 の減少，粗骨材は 35kg/m^3 の増加，全体では 74kg/m^3 の減少となった。さらに，水結合材比 40%の場合は，フライアッシュを内割 10%，外割 10%置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，細骨材は 118kg/m^3 の減少，粗骨材は 5kg/m^3 の増加，全体では 113kg/m^3 の減少となった。このように，単純にフライアッシュを細骨材置換した分だけ骨材使用量が減少するわけではなく，フライアッシュに起因する配合の変化も骨材使用量に影響を及ぼすことが明らかとなった。

5．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) フライアッシュの内外割の併用は，フライアッシュを用いない場合と比べて，コンクリートのブリーディングを減少させる。

(2) フライアッシュ置換率内割 10%，外割 10%での利用は，水結合材比と材齢に依存して，フライアッシュを用いない場合と比べて，同等かそれ以上の強度発現を生じさせる。しかし, 内割 20%, 外割 20%置換の場合は，材齢 91 日までの範囲では，フライアッシュを用いない場合の強度に到達しなかった。

(3) フライアッシュの内外割の併用は，フライアッシュを用いない場合と比べて，CO_2 排出量を削減させる。特に，水結合材比 60%，フライアッシュを内割 20%，外割 20%で置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，CO_2 排出量を 22.3%削減させる。これに対して，内外割 10%の場合には，CO_2 排出量を 15.6%削減させる。

(4) フライアッシュの内外割での利用は，フライアッシュを用いない場合と比べて，骨材使用量を減少させる。特に，水結合材比 60%の場合，フライアッシュを内割 20%，外割 20%で置換すると，フライアッシュを用いない場合と比べて，129 kg/m^3 の骨材使用量を減少させる。

謝辞

四国電力（株）土木建築部 亀田 進グループリーダーには，本研究の実験計画および実施に御協力いただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

1) 石原　明日子，大脇　英司，新藤　竹文，堺　孝司：超高強度繊維補強コンクリートの適用による環境負荷低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp1651-1656，2006

2) 小嶋　克宏，堺　孝司，入谷　祥王，草薙　悟志：交通渋滞道路における地下道および鉄道高架橋建設による環境便益，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp1645-1650，2006

3) 石炭灰利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書，2004

4) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999

5) 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) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005