論文 フライアッシュを用いたコンクリートの強度・細孔構造特性と CO₂ 削減効果に関する研究

吉田 潤平^{*1}·堺 孝司^{*2}·石井 光裕^{*3}·武知 隆男^{*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強度・細孔構造に及ぼす影響について検討を行 った。その結果、フライアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度は、水結合材比および材齢に依存し、内 外割 20%併用した場合に、無置換のものに比べて同等以上の性能を示すこと、強度影響係数を用いて圧縮強 度が推定できること、総細孔容量や特定領域の細孔径から圧縮強度が推定できること、および同じ圧縮強度 を得るための CO₂排出量はフライアッシュの内外割置換の場合に最も小さくなること、等が明らかになった。 **キーワード**:フライアッシュ、圧縮強度、細孔構造、CO₂

1. はじめに

コンクリートの分野におけるフライアッシュの利用 は、産業副産物の有効利用やコンクリートの性能向上の 観点で行われてきた。つまり、フライアッシュコンクリ ートの性能評価は、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に関する研究は少ない。

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。(以後セメント代替材としての利用を 内割置換,細骨材の一部としての利用を外割置換とす 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,短所を補うことが期待できる。

著者等は、これまでこのような観点からフライアッシ ュの内割・外割置換のコンクリートについての強度特性 及び環境負荷等について検討してきた¹⁾。しかしながら、 配合上の問題、フライアッシュの影響の定量的な評価、 強度・細孔構造についての詳細な検討が必要であった。

以上の背景に基づいて,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強度発現に及ぼす影響,圧縮強度 の推定,細孔構造と強度発現との関係について詳細な検 討を行った。更に、フライアッシュ利用による CO₂削減 効果についても検討した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

表-1 に本研究で使用した材料の種類および品質を示 す。

<u>材料(記号)</u>	種類	品質				
カント(0)	普通ポルトランド	密度3.16g/cm ³				
	セメント	比表面積3290cm ² /g				
	四国電力	密度2.27g/cm ³				
フライアッシュ(FA)	橘発電所産	比表面積4270cm ² /g				
	フライアッシュ Ⅱ 種	強熱減量2.58%				
		表乾密度2.60g/cm ³				
		吸水率1.70%				
細骨材(S)	砕砂	粗粒率2.65				
		実積率61.4%				
		微粒分量2.8%				
		表乾密度2.58g/cm ³				
粗骨材(1505)	砕石	吸水率2.01%				
在月17(1000)	н. ти	粗粒率6.35				
		実積率59.8%				
		表乾密度2.58g/cm ³				
粗骨材(2015)	砕石	吸水率2.01%				
10月19(2013)	н. ти	粗粒率7.14				
		実積率59.6%				
	AE減水剤	高変性ポリオール複合体				
汨和刘		変性アルキルカルボン酸				
/比个山月小	AE剤	化合物系				
		陰イオン界面活性剤				

表-1 材料の種類および品質

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

*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 ㈱四国総合研究所 土木技術部 (正会員)

*4 四国電力㈱ 土木建築部 (正会員)

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45、55、65%と し、フライアッシュは、セメントまたは細骨材の重量置 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18ケースとした。

細骨材率は,予備試験練り時の状態で判断し,45%一 定とするとともに,単位水量についても,土木 RC の上 限と考えられる 175kg/m³一定とした。また,スランプお よび空気量については,目標スランプを10.0±1.0cm,目 標空気量を4.5±1.0%とし,これらの調整は,化学混和剤 (高性能 AE 減水剤, AE 助剤,および消泡剤)で行った。

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,空気量試験は,JIS A 1128 に準拠して行った。

(2) 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、JISA1108に準拠して行った。

(3) 細孔径分布

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメーターを用 いて行った。なお、細孔径はその直径を測定した。試料 は、10×10×40cmの供試体を所定の期間まで20℃水中養 生を行い、前処理としてコンクリートカッターで切断し た後破砕し、2.5mm~5mmに粒度調整を行った。さらに、 モルタル部を取り出し、アセトンに浸漬させ水和反応を とめた後2週間のD-Dry 乾燥を行い、試料とした。測定 範囲は128 μm~0.003 μmとした。

3. 試験結果および考察

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。いずれも所定の範囲に入っていることが分かる。

3.2 圧縮強度

図-3 および図-4 にコンクリートの材齢 365 日まで の圧縮強度試験結果を示す。

図-3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、水結合材比に拘わらず、材齢91日 までは置換率の増加に伴い圧縮強度は減少している。こ れは主にセメント量の減少によるものである。材齢365 日ではフライアッシュを用いない場合と同等程度とな っており、水結合材比65%では内割置換した場合のほう が大きくなっている。また、フライアッシュを外割で用 いた場合は、置換率の増加に伴い圧縮強度は増加し、フ ライアッシュを用いない場合と比べ、置換率10%におい ても概ね同等以上で、材齢91日以降では明らかに高い 圧縮強度となった。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。

フライアッシュの内割 20%,外割 20%の場合,フライ アッシュを用いない場合と比較すると,水結合材比が 65%では,材齢 28日,水結合材比が 55%,45%において も材齢 91日でフライアッシュを用いない場合と同等程 度の圧縮強度となり,それ以降も強度は増加し,水結合 材比 65%では,材齢 365日においてフライアッシュ用い ない場合の 1.5倍程度の圧縮強度となった。

また,フライアッシュの内割 20%の場合と内割 20%,外 割 20%の場合を比較すると,材齢に拘わらず内割 20%, 外割 20%の方が圧縮強度は大きくなっている。このこと は,内割のみの配合より多くのフライアッシュを用いて 外割 20%の方が圧縮強度は大きくなっている。このこと は,内割のみの配合より多くのフライアッシュを用いて 所要の強度を確保できる可能性があるということを意 味するものである。

表-2 コンクリートの配合

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 (原液)	AE剤 (原液)	スランプ	空気量
W/B	FAc	FAs	s/a	W	С	Fc	Fs	S	G				
(%)			(kg/m ³)				結合材×%		(cm)	(%)			
65	0	0	45	175	269	0	0	814	986	0.45	0.0000	10.5	4.8
	10	0	45	175	242	27	0	809	980	0.40	0.0000	10.0	4.9
	20	0	45	175	215	54	0	806	975	0.40	0.0015	10.0	4.9
	0	10	45	175	269	0	80	720	986	0.20	0.0150	10.5	3.7
	0	20	45	175	269	0	158	632	986	0.60	0.0150	11.0	5.0
	20	20	45	175	215	54	157	628	975	0.60	0.0165	10.5	3.9
55	0	0	45	175	318	0	0	796	962	0.40	0.0000	10.0	4.4
	10	0	45	175	286	32	0	790	957	0.35	0.0000	9.5	4.1
	20	0	45	175	254	64	0	785	955	0.30	0.0030	10.5	4.1
	0	10	45	175	318	0	78	702	962	0.30	0.0120	9.5	5.5
	0	20	45	175	318	0	155	620	962	1.00	0.0120	9.5	4.0
	20	20	45	175	254	64	153	612	955	0.75	0.0150	11.0	4.3
45	0	0	45	175	389	0	0	770	931	0.45	0.0000	9.5	4.8
	10	0	45	175	350	39	0	762	926	0.40	0.0000	9.5	3.7
	20	0	45	175	311	78	0	759	918	0.40	0.0030	11.0	5.2
	0	10	45	175	389	0	76	684	931	0.60	0.0060	10.0	5.5
	0	20	45	175	389	0	150	600	931	1.10	0.0120	9.5	4.0
	20	20	45	175	311	78	148	592	918	1.05	0.0150	10.0	3.6



図-3 圧縮強度に及ぼすフライアッシュ利用の影響

3.3 圧縮強度の推定

本研究では,得られた圧縮強度試験結果をもとにフラ イアッシュを用いたコンクリートの圧縮強度の推定式 の導出を試みた。圧縮強度はセメント水比説を利用して 一般的に用いられている²⁾以下のような式とした。

$$f = a \frac{\left(C + kF\right)}{W} + b \tag{1}$$

ここで, *f*: 圧縮強度(N/mm²), *C*: 単位セメント量(kg/m³), W: 単位水量(kg/m³), *F*: 単位フライアッシュ量(kg/m³), *k*: フライアッシュの強度影響係数, *a*, *b*: 係数, である。

まず,フライアッシュを用いない場合のセメント水比 と圧縮強度より係数*a*,*b*を算定する。その結果を**表**-3 に示す。次に,全ての場合の圧縮強度と,係数*a*,*b*を 用いて*k*を算出した。図-4 から,*k*と材齢の関係は以下 のようになった。

$$k = 0.128 \ln(t) - 0.103 \tag{2}$$

ここで, t:材齢(日), である。

式(2)で算定したkを用いて算定した推定圧縮強度と実際の圧縮強度の関係を図-5 に示す。圧縮強度が大きくなると実測値との差が大きくなる傾向がある。



そこで, 強度影響係数 k をセメント置換したフライア ッシュと, 細骨材置換をしたフライアッシュで分けて考 えると以下の式で表すことができる。

$$f = a \frac{\left(C + k_c F_c + k_s F_s\right)}{W} + b \tag{3}$$



図-8 kc, ksを用いた推定強度と実測強度の関係

ここで、 F_c :セメント置換フライアッシュ量(kg/m^3)、 F_s :細骨材置換フライアッシュ量(kg/m^3)、 k_c :セメント 置換フライアッシュの強度影響係数、 k_s :細骨材置換フ ライアッシュの強度影響係数、である。

まず,先ほどと同様に係数*a*, *b* を算定する。次に, *a*, *b* と内割のみを用いた場合の圧縮強度を用いて *k*_cを求めた。図-6 から, *k*_c と材齢の関係は以下の式で表すことができる。

$$k_c = 0.170\ln(t) - 0.0726 \tag{4}$$

式(4)で得られた k_c と、フライアッシュの内外割 20% 併用の場合の圧縮強度を用いて k_s を求めた。その関係は 以下の式で表すことができる。

$$k_s = 0.000671t + 0.113 \tag{5}$$

式(4)(5)で得られた k_cおよび k_sを用いて算定した推定 圧縮強度と実際の圧縮強度との関係を図-8 に示す。圧 縮強度の大きいところで推定値より実測値のほうが若 干大きくなっているが、概ね実測値と合う結果となった。 しかし、フライアッシュの強度影響係数には骨材の増減 等の影響が含まれており、また、検討した水セメント比 の数も限定されていることから、今後より詳細な検討が 必要であるものの、フライアッシュを混和材として扱い 1 つの強度影響係数で評価することは難しいことが明 らかになった。

3.4 圧縮強度と細孔容量の関係

コンクリートの細孔構造と圧縮強度や中性化等の関係についてはこれまで多くの研究がなされてきた^{例えば 3),} ⁴⁾。本研究では、圧縮強度と総細孔容量およびある範囲 の細孔容量との関係について検討した。細孔径の範囲に ついては、細孔径分布のピーク点やフライアッシュを置 換したことによる変化の大きい範囲等の特徴から 0.003~0.01 µ m, 0.01~0.1 µ m, 0.1~0.4 µ m の範囲を考慮 した。

図-9 は全ての配合の圧縮強度と総細孔容量との関係 を示す。マクロに見ると,水結合材比,フライアッシュ 置換率,および材齢に拘わらず,圧縮強度は総細孔容量



とほぼ線形関係にあると言える。

図-10(a)~(c)は材齢7日における各範囲の圧縮強度と 細孔容量の関係を示す。細孔径が 0.003~0.01 µ m と 0.01~0.1µm の範囲では相関がみられず, 0.1~0.4µm の 範囲では良い相関が見られ, 細孔容量の減少に伴い圧縮 強度は増加する。また, 細孔容量が小さい領域では圧縮 強度の増加率は大きくなることが分かる。

図-10(d)~(f)は材齢 28 日における各範囲の圧縮強度 と細孔容量の関係を示す。0.003~0.01µm では相関がな く,0.01~0.1µm では線形の関係が見られる。0.1~0.4µm で材齢7日と同様の良い相関が見られ,細孔容量が小さ くなるにつれて圧縮強度の増加率は大きくなっている。

図-10(g)~(i)は材齢 91 日における各範囲の圧縮強度 と細孔容量の関係を示す。0.003~0.01µm では相関がな く,0.01~0.1µmでは28日と同様に線形の関係が見られ る。細孔径が0.1~0.4µmでは,細孔容量は小さくなって おり,圧縮強度の増加率は非常に大きい。

図-10(j)~(l)は材齢 182 日における各範囲の圧縮強度 と細孔容量の関係を示す。材齢 91 と同様に 0.01~0.1 µm で相関が見られる。0.1~0.4 µm は 91 日と同様に細孔容 量が小さく,圧縮強度の増加量も大きい。さらに,細孔 径が 0.003~0.01 µm の範囲で相関が見られるようになっ た。

図-10(m)~(o)は材齢 365 日における各範囲の圧縮強 度と細孔容量の関係を示す。材齢 182 日と同様に 0.003~0.01 µm, 0.01~0.1 µm の範囲で線形の相関が見ら れ, 0.1~0.4 µm についても 182 日ほぼ同様である。

図-10(p)~(r)に全材齢における各範囲の圧縮強度と細 孔容量の関係を示す。0.003~0.01µm ではほぼ相関が見 られず,0.01~0.1µm では線形の相関が見られる。 0.1~0.4µmでは非常に良い相関が見られ,細孔容量が小 さくなるにつれて圧縮強度の増加率は大きくなる。

これまで述べたように、圧縮強度は 0.1~0.4 µ m の範囲 の細孔容量に大きく影響され、さらに材齢が変化するこ とによって細孔径の小さな範囲も相関がみられる。



図-10 細孔容量と圧縮強度の関係



図-11 圧縮強度とCO2排出量の関係

3.4 圧縮強度と CO2の関係

各コンクリートの圧縮強度とCO₂排出量との関係を見 るために、コンクリート原材料の使用量に対応するCO₂ 排出量を算定した。CO₂排出原単位は、「コンクリート構 造物の環境性能照査指針(試案)」⁵⁾から引用した。

図-11 に各材齢における圧縮強度と CO₂ 排出量の関係を示す。何れの材齢においても、圧縮強度と CO₂ 排出 量と間にはほぼ線形関係がある。しかし、材齢の増加に 伴い、同じ圧縮強度を得るための CO₂ 排出量は、フライ アッシュを用いた場合のほうが小さくなっている。特に、 材齢 91 日以降においてフライアッシュを内割、外割を 併用した場合は、CO₂ 削減量は大きなものとなることが 分かる。コンクリートの設計材齢をのばすことで CO₂ 排 出を削減できることを意味する。

4. まとめ

本研究で得られた,フライアッシュの内外割の併用 20%までの範囲における結果をまとめると以下のとおり である。

- (1) フライアッシュの内外割の併用は、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以上 の強度発現が期待できる。
- (2) 強度影響係数 k_cおよび k_sを用いることで、フライア ッシュコンクリートの推定強度を算定することが できる。
- (3) 水結合材比、フライアッシュ置換率、および材齢に 拘わらず、圧縮強度は総細孔容量とほぼ線形関係に なる。
- (4) コンクリートの圧縮強度に大きく影響する細孔径

の範囲があり,細孔径が 0.1~0.4µm の範囲の細孔 容量は非常に良い相関を示し,細孔容量が小さくな るにつれて圧縮強度の増加率は大きくなる。また, 材齢が経つにつれて圧縮強度に影響する細孔径の 範囲は,細孔径の小さい範囲の影響が大きくなる。

(5) フライアッシュを内外割で併用した場合、フライア ッシュを用いない場合に比べて、同じ圧縮強度を得 るための CO₂を低減することができる。設計材齢を のばすことでCO₂を大幅に削減することも可能であ る。

参考文献

- 堺孝司ほか:フライアッシュを用いた環境負荷低減 コンクリートに関する研究,土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, 332-342, 2009
- 2) 土木学会:循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新技術利用技術-利用拡大に向けた設計施工指針試案-,コンクリートライブラリー 132,2009
- 3) 堺孝司ほか:ビーライト系セメントの改質によるコンクリートの高性能化、土木学会論文集 No.620/V-43, 55-70, 1999
- 松下博通,佐川康貴,川端雄一郎:再生骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下,土木学会論文集 EVol.62, No.1, 230-242, 2006
- 5) 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