

論文 フライアッシュを細骨材代替として使用した転圧コンクリートの強度性状

扇 正典^{*1}・浜田純夫^{*2}・松尾栄治^{*3}・斉藤 直^{*4}

要旨: 石炭火力発電において発生する石炭灰は、今後も発生量の急激な増加が見込まれている。その有効利用方法の一つである「細骨材をフライアッシュで多量に置換したコンクリート」の実用化は、環境問題のみならず建設コスト削減の観点からも期待が大きい。本研究では、示方書の性能照査型設計法への移行も鑑み、海砂のフライアッシュへの置換率を種々変化させた転圧コンクリートの強度性状およびポズラン反応性状について検討した。

キーワード: フライアッシュ, 転圧コンクリート, ポズラン反応, 強度増加率, 曲げ強度

1. まえがき

石炭火力発電所から産業廃棄物として産出されるフライアッシュ（以下FA）の発生量は、年々飛躍的に増加しており、今後もさらなる発生量の増加が見込まれている。現在FAは、セメントの粘土代替材料やコンクリート用混和材などとして発生量の約60%程度が有効利用されているに過ぎず、依然として大量に埋立て処分されている。このため、埋立て処分場不足の問題や、埋立てに伴う環境への悪影響からも大量有効利用法の確立が望まれている。このような背景から、FAをセメントの内割りで使用したコンクリートや、細骨材の一部をFAで内割り置換したコンクリートに関する研究¹⁾が行われている。しかしながら、強度の増進あるいは保持という目標が、粉体量増加に伴うワーカビリティ低下の抑制という問題に阻まれる形となっており、現状でのFAのセメント内割り置換率は、最大でも40%程度に限定されており、さらなる大量利用法の検討が必要である。

筆者らは、これまでに現状の海砂の不足も鑑み、FAの大量有効利用の観点から、FAを細骨材の代替材量として使用した転圧コンクリートの配合設計法について検討を行った。その結果、FAを多量

に使用した場合、すなわちノーファインズ転圧コンクリートに近い状態では、骨材全体の粒度分布が極めて偏ったものとなるにもかかわらず、ワーカビリティ保持に必要な最小水量を確保することのみにより、十分な締固め率が得られることなどを報告²⁾した。

本研究では、FAの細骨材（＝海砂）代替材料としての適用性を明らかにする目的から、普通転圧コンクリートの配合を基準に、海砂をFAへ体積置換したFA転圧コンクリートの強度性状について検討した。特に、材齢28日以降、91日までの長期強度性状について考察し、FAのポズラン反応性状についても定量的に評価した。

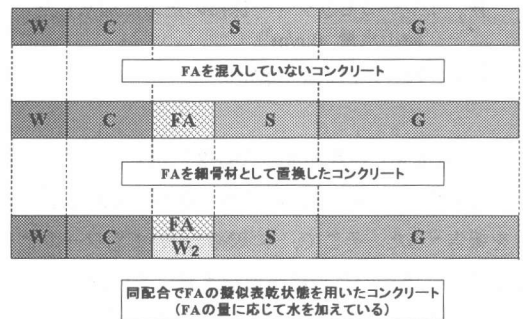


図-1 FAの擬似表乾状態概念図

*1 山陰建設工業(株) 工修 (正会員)

*2 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D. (正会員)

*3 山口大学助手 工学部社会建設工学科 工博 (正会員)

*4 中国電力(株) 土木部

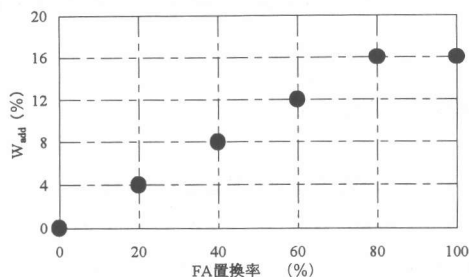


図-2 FA置換率と最適 W_{add} の関係

2. 実験方法

2.1 単位水量の考え方

細骨材をFAで多量に置換した転圧コンクリートにおいては、単位水量が大きく増加する。これはFA置換率の増加すなわち粉体総量の増加に伴って拘束水量が増加し、ワーカビリティ保持のためには単位水量を増加せざるを得ないためである。その場合、図-1に示すようにFAの擬似的な表乾状態を規定し、FA置換率とワーカビリティ保持のために必要な加水量W₂から加水率W_{add}を次のように定義した。

$$W_{add} = \frac{W_2}{FA + W_2} \times 100 \quad (1)$$

ここで、

W_{add} : 加水率 (%)

W₂ : ワーカビリティ保持のために加水した最小水量 (kg/m³)

FA : FAの単位量 (kg/m³)

FA置換率と最適加水率は図-2に示すようになり、水量の増加のみで十分な締固め率が得られることを報告²⁾した。そこで、本実験においてもワーカビリティ保持のために必要な水量はこの関係により決定することとした。

表-1 FAの物理的性状

試験項目		結果
湿分(%)		0.1
強熱減量(%)		5.30
SiO ₂ (%)		55.4
密度(g/cm ³)		2.12
フロー値比(%)		103
粉末度	45 μmふるい残分(%)	21
	比表面積(cm ² /g)	3560
活性度指数	28日(%)	75
	91日(%)	91

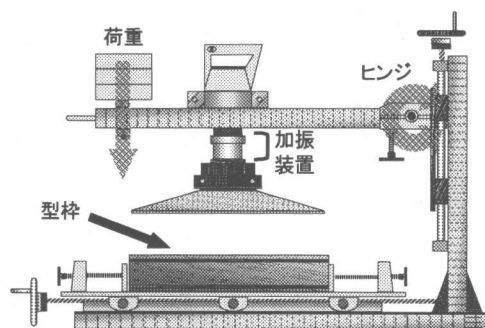


図-3 振動締固め装置

2.2 使用材料及び配合

本研究で使用したFAの物理的性状を表-1に示すが、強熱減量および28日活性度指数においてのみJIS規格外に相当する。セメントは普通ポルトランドセメントで密度3.15 g/cm³のものを、海砂は北九州産で、表乾密度が2.60 g/cm³のものを使用した。混和剤は、より経済的な転圧コンクリートの作製を目的としていることや、FAに含まれる未燃炭が混和剤を吸着し、不経済になることから使用しないこととした。

配合を表-2に示す。一般的に、コンクリートの配合は空気(空隙)を含む練り上がりの単位体積当たりの質量で表すが、転圧コンクリートにおい

表-2 配合表

FA置換率 (%)	W _{add} (%)	G _{max} (mm)	(W ₁ +W ₂)/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						締固め率 (%)
					W ₁	C	S	FA	W ₂	G	
0	0	20	41.8	39.4	110	263	826	0	0	1325	95.6
20	4		43.7				661	124	5		97.6
60	12		58.2				331	314	43		95.5
100	16		76.8				0	480	92		95.6

ては締固め条件、骨材の粒度分布、水量等によって空気量（空隙）が大きく変化するため、空気量0%における配合として示す。

普通転圧コンクリートの配合は、転圧コンクリート設計技術指針³⁾における配合設計方法を用いて予備実験として行った。配合強度は、同指針により、普通セメントを使用した場合において材齢28日曲げ強度で5.7MPaとした。

FA 転圧コンクリートについては、普通転圧コンクリートの配合をもとに、単位セメント量および単位粗骨材量を一定とし、海砂をFAに容積置換していった。

2.3 強度試験方法

供試体寸法は、10×10×40 cmの角柱供試体とし、目標締固め率96%となるように供試体1個分の試料質量を求め、その質量の1/2を計量して型枠に詰め、練りさじで表面が平らになるように敷き均した。その後、図-3に示すような振動締固め装置を用いてペーストの浮上が確認できるまで締固めめた。2層目も同様の手順を繰り返し、目標締固め厚10 cmとなるまで締固めめた。

供試体は、打設後約24時間で脱型し、その後水中養生（20±2℃）を行い、材齢7、28、91日で強度試験に供した。曲げ強度試験はJIS A1108に準拠して行った。圧縮強度試験は、曲げ強度測定後の供試体により、JIS A1114に準拠して行った。

3. 実験結果および考察

3.1 強度性状およびポゾラン反応性状の評価

図-4に曲げ強度の経時変化を示す。この結果から、材齢7日までの初期材齢においては、FA置換率が小さいほど曲げ強度が大きいことがわかる。しかし、材齢7日以降は普通転圧コンクリート（FA=0%）よりもFA=20%の方が高い強度発現が確認でき、長期的にはFAのポゾラン反応によりさらに強度が増進している。また、FA=60%においても材齢50日程度で普通転圧コンクリート（FA=0%）の強度を上回っている。しかし、FA=100%においては初期強度が小さく、材齢91日までの強

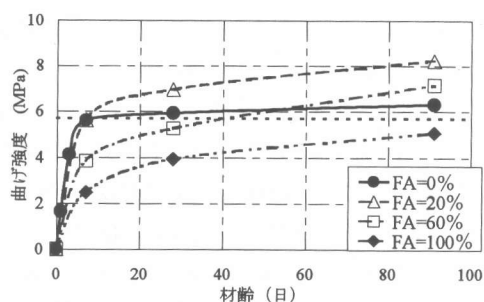


図-4 曲げ強度の経時変化

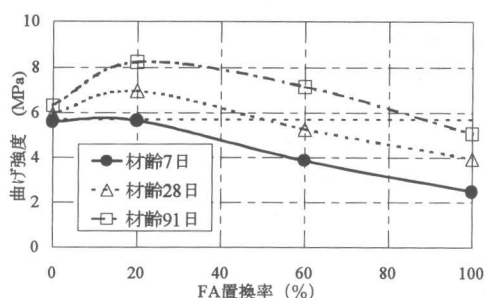


図-5 FA置換率と曲げ強度の関係

度増進は明らかであるものの、普通転圧コンクリート（FA=0%）の9割程度の強度になる。以上から、FA転圧コンクリートの強度発現は、セメントの水和反応によって初期強度の目標達成を期待し、FAのポゾラン反応による長期強度の目標達成に期待するのが効率的であると考えられる。このことから、FAを多量に使用した場合、初期強度の発現が小さいことが問題となるが、養生期間に応じた適切なFA置換率の選定を行えば、普通転圧コンクリート（FA=0%）に比べ経済的な転圧コンクリートの作製が可能になる。

図-5にFA置換率と曲げ強度の関係を示す。この結果から、材齢7日ではFA=20%までの領域で普通転圧コンクリートにおける配合強度を満足している。また、材齢28日ではFA=50%程度までの領域で配合強度を満足している。このことから、現行基準においてもFA=50%程度までは細骨材の代替材料としてFAの使用が可能である。さらに、材齢91日ではFA=90%程度までの領域で配合強度を満足していることから、長期強度を基準

とすれば、より高置換率な転圧コンクリートの実用化の可能性があるものと思われる。

図-6に圧縮強度の経時変化を示す。この結果より、FA=20%においては材齢 91 日で強度増進はほぼ一定となっているが、FA=60%、100%においては、さらに強度増進する傾向が確認できる。そこで、ポズラン反応による強度増進を定量的に評価することが必要である。既往の研究において、FA のポズラン反応による強度増進は材齢 28 日ごろから現われ始めるという報告⁴⁾から、ポズラン反応による強度増加率を式(2)のように定義し、強度増加率による評価を行った。

$$\delta = \left(\frac{\sigma_{91} - \sigma_{28}}{\sigma_{28}} \right) \times 100 \quad (2)$$

ここで、

δ : ポズラン反応による強度増加率 (%)

σ_{28} : 材齢 28 日における強度 (MPa)

σ_{91} : 材齢 91 日における強度 (MPa)

図-7にFA置換率と強度増加率の関係を示す。この結果より、いずれの配合においても強度増加率は、圧縮強度よりも曲げ強度のほうが大きいことがわかる。すなわち、ポズラン反応による強度増進は圧縮強度に比べ曲げ強度のほうが著しい。一般に、FAのポズラン反応による強度増進は、圧縮強度よりも曲げ強度に著しいことが報告⁵⁾されており、転圧コンクリートにおいても、同様の結果が確認された。

また、強度増加率は曲げにおいても圧縮においてもFA=60%のときに最大となることが確認できる。これは、セメントの水和で生じる水酸化カルシウムの生成量とポズラン反応を行うシリカやアルミナの存在量とのバランスによるものと考えられる。ここで、河野⁶⁾は、圧縮強度においてはセメントとFAの比が1.3 (質量比) のときに最もポズラン反応が促進されることを報告しており、本研究においてもFA=60%すなわちセメントとFAの質量比が約1.2のときに圧縮強度の強度増加率

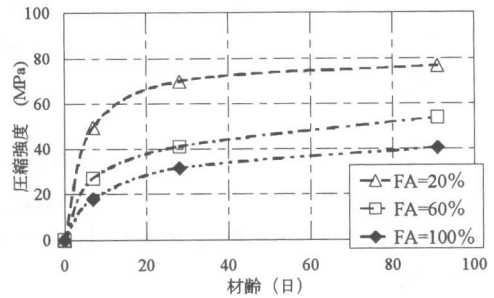


図-6 圧縮強度の経時変化

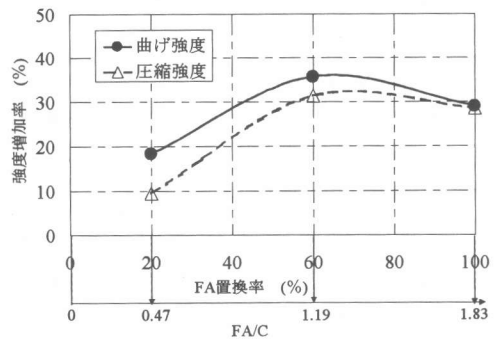


図-7 FA置換率と強度増加率の関係

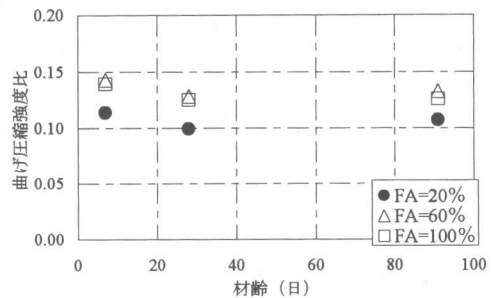


図-8 材齢と曲げ圧縮強度比の関係

が最も大きく、同報告とほぼ同程度である。また、FA=20%においては、曲げのほうが圧縮よりも強度増加率が大きい³⁾が、FA置換率の増加に伴いその差は次第に小さくなる傾向にある。

一般にコンクリートの曲げ圧縮強度比は 1/5～1/8 (0.2～0.125) 程度であるが、普通転圧コンクリートの場合には 1/4～1/8 (0.25～0.125) 程度であることが報告⁷⁾されている。一方、FA 転圧コンクリートにおいては、図-8に示すようにFA=60、

100%では1/7～1/8程度であり、FA=20%では1/8～1/10程度の範囲にあることが確認でき、普通転圧コンクリートに比べ若干小さな傾向にある。

図-9にC/Wと曲げ強度の関係を示す。図中に示す直線は材齢28日における普通転圧コンクリート（FA=0%）のC/Wと曲げ強度を示したものである。この結果より、FA転圧コンクリートにおける強度は、いずれも材齢の経過と共に増加していることが確認できる。また、いずれも材齢28日では、普通転圧コンクリートと同等程度か、それ以上の強度発現が確認できる。特に、FA=20%においては、材齢7日で普通転圧コンクリート同等の強度発現が確認でき、顕著にその傾向が表れている。さらに材齢91日では、FAのポズラン反応により強度が大きく増加している。

表-3に曲げ強度の変動係数を示す。この結果より、FA転圧コンクリートの曲げ強度の変動係数は、いずれも10%以下であり、ばらつきが小さいことが確認できた。

3.2 配合設計法に関する提案

前述のように、FAとセメントの適切な混合割合を選定すれば、材齢91日で曲げ強度においても圧縮強度においても28日強度の1.3倍程度となり、長期強度の増進が著しい。また、示方書の性能照査型設計法への移行も考慮すれば、現在の基準材齢および配合強度についてもFAなどのポズラン系混和材を使用した場合には、長期強度も視野に入れた幅広い設計が可能となる。

転圧コンクリートの配合強度は材齢28日で5.7 MPaが一般的であり、FAなどのポズラン系混和材を使用した場合における長期強度の増加分については、配合設計において現状では何ら考慮しない。これは、転圧コンクリートが舗装の利用であり、早期の交通解放が必要であるためだが、L交通などの比較的交通量の少ない道路などにおいては、十分使用可能であると予想される。

そこで、材齢28日における目標強度を転圧コンクリートの設計基準強度（4.4 MPa）、材齢91日における目標強度を転圧コンクリートの配合強度（5.7 MPa）とし、強度比（実験値／目標強度）と

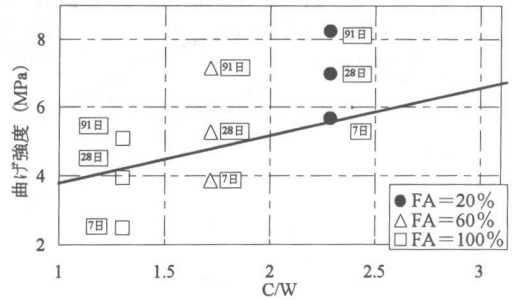


図-9 C/Wと曲げ強度の関係

表-3 曲げ強度の変動係数（%）

		材 齢		
		7日	28日	91日
F A 置 換 率	0%	6.03	7.30	4.09
	20%	5.09	9.73	4.76
	60%	5.04	2.89	7.27
	100%	9.68	4.05	5.83

フライアッシュセメント比（FA/C）および材齢 d との関係を求めた。まず、FA/Cと強度比の関係にはピークが生じることから、図-10に示すように2次式により回帰を行いつた。さらに、2次式の係数が材齢により変化すると仮定し、これらを材齢により回帰式を求めた。すなわち材齢の経過によりポズラン反応が進行することから、2次関数のピーク値と尖度は、FA/Cの大きな範囲へ移動することを考慮して、その関係から、強度比とFA/C、材齢との関係を求めた。式(3)および(4)にその算定式を示す。

$d < 28$ の場合

$$f_{FA} = \sigma_{bk} \left(-3.3 \times 10^{-3} d - 0.18 \right) \times \left[\left\{ R_{FA} - (4.7 \times 10^{-3} d + 0.3) \right\}^2 + 4.8 \times 10^{-3} d + 1.3 \right] \quad (3)$$

$d \geq 28$ の場合

$$f_{FA} = \sigma_{bk} \left(-3.3 \times 10^{-3} d - 0.18 \right) \times \left[\left\{ R_{FA} - (4.7 \times 10^{-3} d + 0.3) \right\}^2 + 1.4 \right] \quad (4)$$

ここで

σ_{bk} : 設計基準強度 (MPa)

f_{FA} : FA転圧コンクリートの算定強度 (MPa)

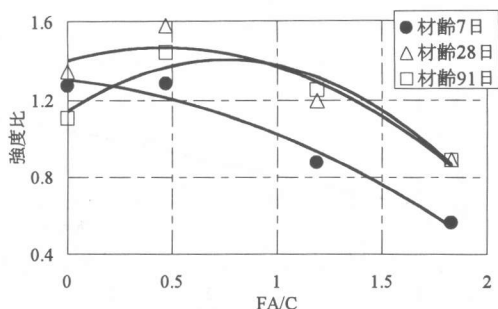


図-10 FA/C と強度比の関係

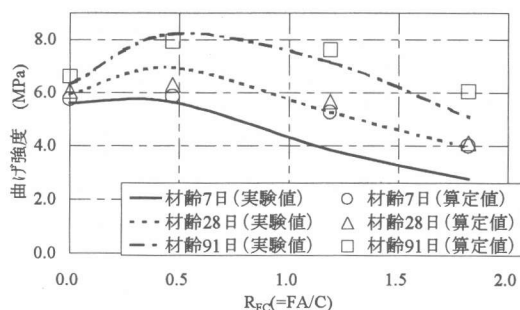


図-11 実験値と算定値の関係

d: 材齢 (日)

図-11に、この式より算定した各材齢における曲げ強度の算定値および実験値の値をそれぞれ示す。この結果より、材齢7日における算定値は実験値に比べ大きな傾向にある。また、材齢28日においては比較的良好に回帰していることがわかる。

4. 結論

- 1) FA 転圧コンクリートにおいては長期強度の増進が著しく材齢91日では、FA=90%程度までの領域で転圧コンクリートにおける一般的な配合強度 5.7 MPa を満足する。
- 2) FA のポズラン反応による強度増進は圧縮強度よりも曲げ強度において著しく、FA 置換率が小さいほどその傾向が顕著である。
- 3) FA 転圧コンクリートの配合設計においては FA/C=1.2 を保ちながら、目標強度が得られる範囲で細骨材 (海砂) 量を減らしていく方法

が有効である。

参考文献

- 1) 町勉, 荒島猛, 上原匠, 梅原秀哲: コンクリート材料としてのフライアッシュの適用限界に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.199-204, 1997
- 2) 扇正典, 浜田純夫, 松尾栄治, 斉藤直: FA を RCC 細骨材として用いた場合の配合設計方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.1147-1152, 2000.6
- 3) 日本道路協会: 転圧コンクリート舗装技術指針, 1990.5
- 4) M.Venuat, : Fly Ash Cement, Influence of the Proportion of Fly Ash on Properties of Cement, Rev.Mater.Constr.Trav.Publics, 565, pp.271-279, 566, pp.315-324, 567, pp.349-356, (Oct., Nov./Dec.1962)
- 5) 塚山隆一, 三好章公: 各種セメントを用いた舗装用コンクリートの材令 10 年試験, セメント技術年報, 22, pp.214-219, 1968
- 6) 河野清, 川口修宏, 三田正和, 馬越唯好: ハイボリューム FA コンクリートの特性, セメント・コンクリート, No.593, pp.10-17, 1996.7
- 7) 森濱和正, 西川正夫: 転圧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報告集, 12-1, pp.943-948, 1990