

論文 フライアッシュを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

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、今後発生量の急激な増加が予測される。その有効利用として、多量に細骨材をフライアッシュで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縮減の観点からも期待が大きい。また、将来の海砂の不足も考慮し、本研究では、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配合設計方法及び強度性状等を検討した。

キーワード：転圧コンクリート、フライアッシュ置換率、擬似表面水量、曲げ強度

1. まえがき

近年、アスファルト舗装の摩耗や損傷が問題となっており、その維持補修管理費も年々増大している。そこで、耐久性や耐摩耗性に優れた転圧コンクリート舗装(Roller Compacted Concrete Pavement)が注目されている。

また一方では、海砂の不足に伴って、産業廃棄物や建設副産物として産出される各種の粉体をその代替材料として使用する研究が盛んに行われている。その場合、粉体に多く含まれる微粒子が単位水量の増加を引き起こし、それに伴ってセメント量も増加せざるを得ないことや、混和剤の使用量が増加すること等が問題となる。しかしながら、微粒子内部への水分の浸透や、微粒子表面にファンデルワールス力により吸着している水分が全てセメントと反応すると計算して強度低下率を計算すべきか否かについてはまだ検討例が少ない。それは、マサ土微粒子¹⁾に代表されるように、吸水性が極めて高い粉体は表乾状態の定義が困難なことや、吸水作用自体は全くないスラグ等においても増加水量を定量化することが困難なこと等が原因として考えられる。

本研究では、それらの中でも発生量が2,000年には約1,000万tにもものぼると予想されているフライアッシュ(以下FA)を対象粉体として選定し、前述の転圧コンクリートにおいて細骨材の海砂代替材料としての大量利用方法の検討を行ったものである。

上記の問題点に加え、転圧コンクリートの場合には骨材全体の粒度を揃えることが重要な配合条件であるため、細骨材をFAに容積置換するにつれて図-1に示すように粒度分布は偏ったものとなることも問題となる。しかしながら転圧コンクリート作製時には振動による締固めを行うことから、振動による流動化²⁾が明らかにさ

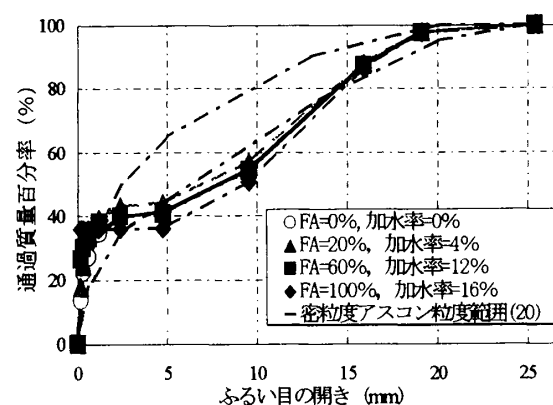


図-1 合成粒度曲線

*1 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (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

れている FA を用いる場合、
水量の適切な選定を行えば十分な締固め率とポゾラン反応による長期強度の増進も期待できる。よって FA 混入量によってワーカビリティ保持のために加水する水量 (W_2 、

図-2 参照) のうち、強度

へ関与すると考えるべき割合すなわち強度影響率の定量化を行った。

表-1 フライアッシュの性状

試験の対象	結果	JIS 品質規格			
		I 種	II 種	III 種	IV 種
水分(%)	0.1	1.0 以下			
強熱減量(%)	4.5	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
SiO ₂ (%)	71.7	45.0 以上			
密度(g/cm ³)	2.12	1.95 以上			
フロー値比(%)	101	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
粉末度	45 μ m ふるい残分(%)	21	10 以下	40 以下	70 以下
	比表面積(cm ² /g)	3120	5000 以上	2500 以上	1500 以上
活性度指数	28 日(%)	81	90 以上	80 以上	80 以上
	91 日(%)	90	100 以上	90 以上	90 以上

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。

2. 実験方法

2.1 使用材料及び配合

本研究で用いた FA の物理的性状を表-1 に示す。JIS の規格では II 種に相当する。セメントは早強ポルトランドセメントで比重 3.14 のものを、海砂は表乾比重が 2.60 のものを使用した。本研究で用いた締固め率測定用供試体および強度測定用供試体の配合を表-2 に示す。普通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ては締固め機械の性能、骨材の粒

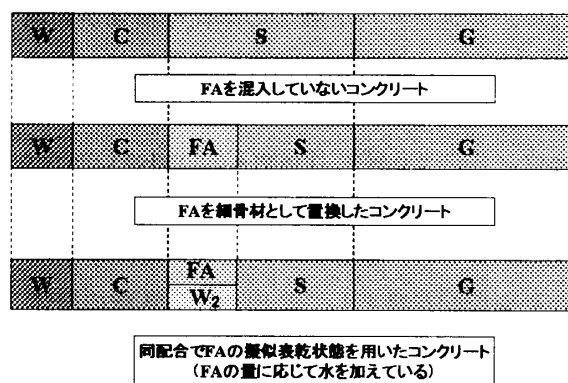


図-2 擬似表乾状態概念図

表-2 配合表

配合種類	FA 置換率 (%)	W_{add} (%)	G_{max} (mm)	W_1/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						W_1	C	S	FA	W_2	G
A	0	0	20	42	39.4	110	263	826	0	0	1325
B	20							661	135		
C	40							496	270		
D	60							331	404		
E	80							165	539		
F	100							0	674		
* G	20	4	20	42	39.4	110	263	661	124	5	
H	40							496	247	10	
I	60							331	371	16	
J	80							165	495	21	
K	100							0	619	26	
L	20	8	20	42	39.4	110	263	661	114	10	
M	40							496	228	20	
N	60							331	341	30	
O	80							165	455	40	
P	100							0	569	50	
Q	20	12	20	42	39.4	110	263	661	105	14	
R	40							496	209	28	
* S	60							331	314	43	
T	80							165	418	57	
U	100							0	523	71	
V	20	16	20	42	39.4	110	263	661	96	18	
W	40							496	192	37	
X	60							331	288	55	
Y	80							165	384	73	
* Z	100							0	480	92	

*については強度測定用供試体を作製

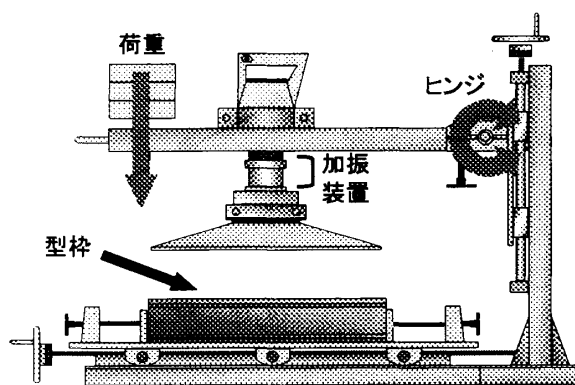


図-3 振動締固め装置

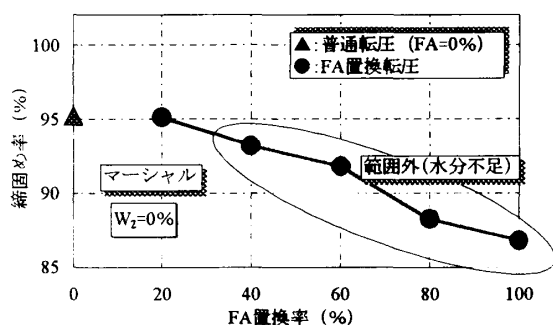


図-4 FA置換率と締固め率の関係

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行った。配合強度は普通セメントにおいて材齢 28 日曲げ強度で 5.6MPa とした。FA 置換転圧コンクリートについては、表-2 中の 0-0 に示す普通転圧コンクリートの配合をもとに細骨材を海砂から FA に容積置換する際、FA に加水し擬似的な表乾状態を作り、これを配合設計において細骨材として取り扱うこととした。ただし、加水率は転圧コンクリートとしてのワーカビリティを損なわない範囲で加水率が最も小さくなるようにした。配合要因としては海砂の FA への置換率 (FA 置換率, 容積比), FA への加水率 (W_{add} , 質量比) とした。

2.2 締固め率の測定

転圧コンクリートにおいては、強度が締固め率やセメント空隙比と高い相関関係にあるという報告があり、転圧コンクリート設計技術指針の中でも目標締固め率 96%を規定している。こ

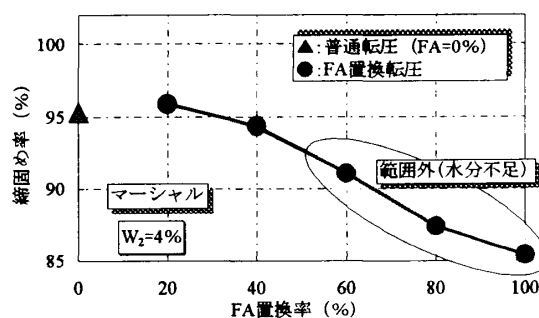


図-5 FA置換率と締固め率の関係

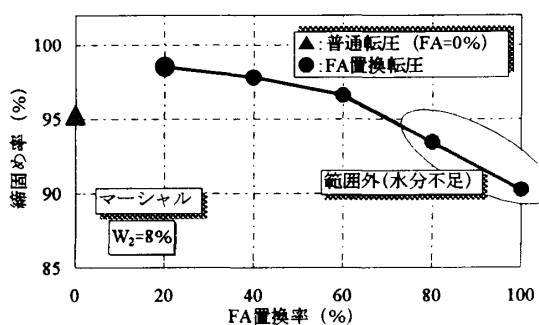


図-6 FA置換率と締固め率の関係

のため FA を多量置換した転圧コンクリートにおいても締固め率と強度の間に高い相関があるものと考えられる。そこで強度測定用供試体作製の前に表-2 に示す配合において締固め率の測定を行った。締固め率の測定は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱型枠に試料を入れ、マーシャル突固め試験機で 50 回突固めを行い翌日測定した。

2.3 締固め方法

締固めについては、各研究者ごとにさまざまな方法を用いているが、本研究では、円柱供試体については 1 層ごとに試料を計量し、マーシャル突固め装置において 50 回突固めを行ったのち、テーブルバイブレータにより流動化が確認できるまで締固めを行い、2 層目は振動ダンパにより突き固めたのち、テーブルバイブレータにより流動化が確認できるまで締固めを行った。曲げ供試体においては図-3 に示すような振動締固め装置により 1 層ごとに試料を計量し流動化が確認できるまで締固め、この操作を繰り返し 2 層で行った。

2.4 強度測定用供試体

締固め率測定用供試体において、締固め率およびワーカビリティを満足するものについて強度測定用供試体を作製した。圧縮強度測定用としては $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱を、曲げ強度測定用としては $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱とした。また試験材齢は1, 3, 7日とし、養生方法は、水中養生とした。圧縮強度、曲げ強度ともに5本平均で求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 締固め率の把握

図-4に $W_{\text{add}}=0\%$ におけるFA置換率と締固め率の関係を示すが、FA置換率の増加に伴い締固め率は低下する傾向が確認できる。これはFAをセメントの外割りで使用すると粉体の量が増加するために水粉体比が小さくなることによるものと考えられる。すなわち、FA置換率の大きな領域においては、必要な単位水量が確保されていないことによるものと考えられ、特にFA置換率40%以上の領域においては目視観察からも、明らかに水量不足により実用範囲外であった。このためFAに加水し、 W_{add} を4~16%の範囲(4%刻み)で変化すなわち水粉体比を変化させて締固め率を調べた。この結果を図-5~8に示す。これらのグラフに示す結果より W_{add} を大きくすることによりFA置換率の大きな領域においても締固め率はFAを使用しない普通転圧コンクリート(FA置換率=0%)と同等程度かそれよりも大きな値をとる。このことから、FAなどの粉体を多量に使用する際には、適切な水粉体比を確保することが必要であると考えられる。

図-9にFA置換率と最適 W_{add} の関係を示す。これは、FA置換率と締固め率の関係において普通転圧コンクリートの締固め率と同等以上の締固め率が得られた配合において、最も加水率が小さなものをプロットしたものである。これより、 W_{add} はそれぞれのFA置換率によって異なり、FA置換率の増加に伴い W_{add} も線形的に大きくなることわかる。

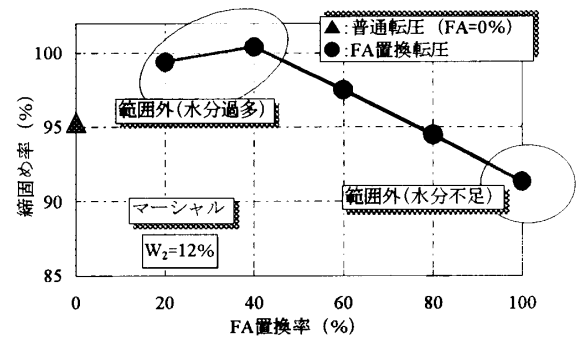


図-7 FA置換率と締固め率の関係

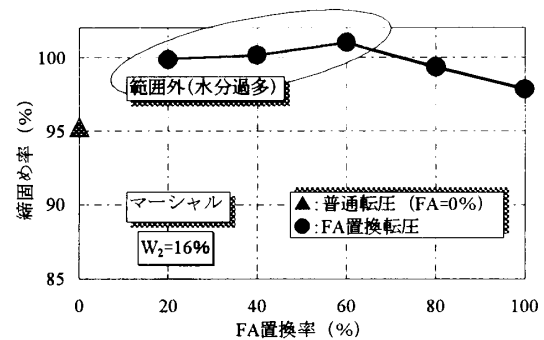


図-8 FA置換率と締固め率の関係

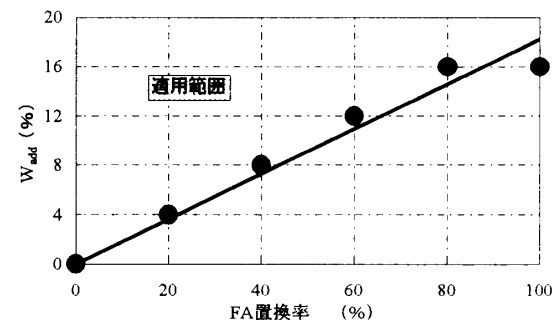


図-9 FA置換率と最適 W_{add} の関係

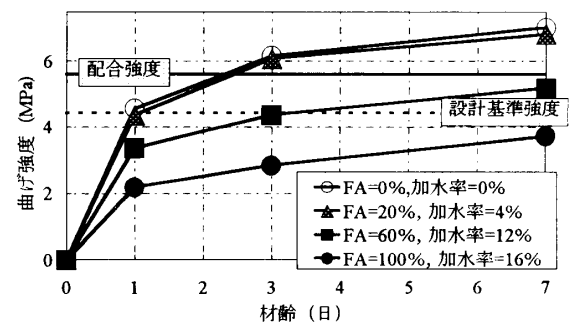


図-10 曲げ強度の経時変化

3.2 強度性状

先に W_2 使用による締固め率の変化を調べ、各 FA 置換率による最適 W_{add} を決定した。この W_{add} を考慮した表-2* に示す配合において圧縮及び曲げ強度測定用供試体を作製した。

図-10 に曲げ強度の経時変化を示す。本研究においては早期の道路開放を図ることを想定し、材齢 7 日で普通セメントの 28 日の強度に相当する強度発現が得られる早強セメントを使用した。その結果、FA=0, 20%においては、材齢 3 日で曲げにおける配合強度 5.6MPa が得られた。FA=60%においては、材齢 3 日では配合強度、設計基準強度共に満足しなかったものの、材齢 7 日では設計基準強度が得られた。FA=100%においては、材齢 7 日においても配合強度は得られなかった。図-11 に FA 置換率と曲げ強度の関係を示す。この図より、材齢 7 日では FA 置換率 40%以上の領域で、普通転圧コンクリートの 28 日における配合強度は得られないものの、転圧コンクリートの設計基準強度については、FA=80%までの領域で満足している。加えて、長期的には FA のポズラン反応による強度増加が期待できることを考慮すれば、さらに高置換率な転圧コンクリートの実用化の可能性のあるものと考えられる。

図-12 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中に土木学会コンクリート標準示方書の基準値を示すが、同一強度において、普通転圧コンクリートのヤング係数は、一般的なコンクリートに比べ若干大きく、特に、強度が大きいほどその傾向が顕著となる。また、FA 置換率がこの傾向に与える影響は小さい。すなわち十分な剛性の確保が期待できる。しかしながら、材齢 1 日のように初期材齢の場合には、強度が小さいため同示方書の値を下回る傾向にある。

以上では締固め率をもとに各 FA 置換率に最適な W_2 を加水し擬似表乾状態 FA を作り配合設計を行った。しかし、締固め率から決定した W_2 がどの程度最適であるかを強度からも検討する必要があると思われる。

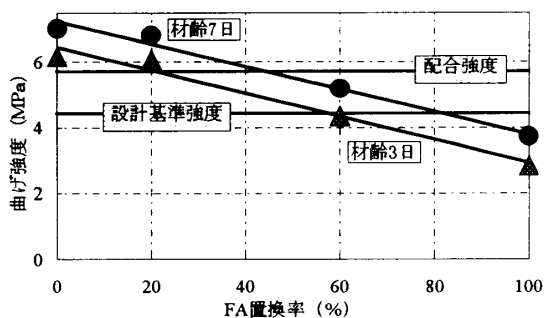


図-11 FA 置換率と曲げ強度の関係

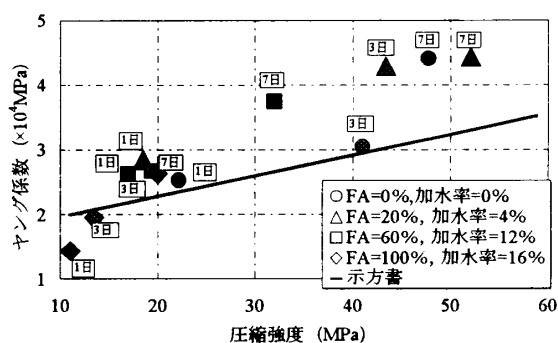


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

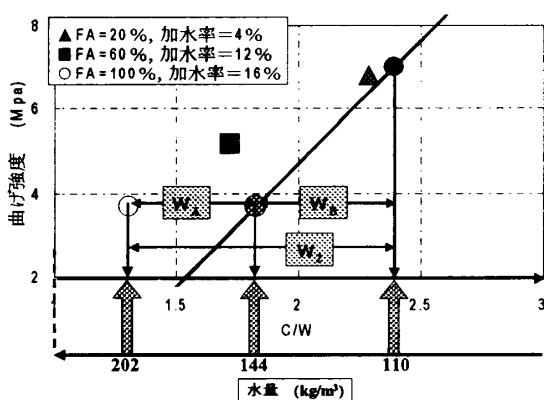


図-13 強度影響率の概念図

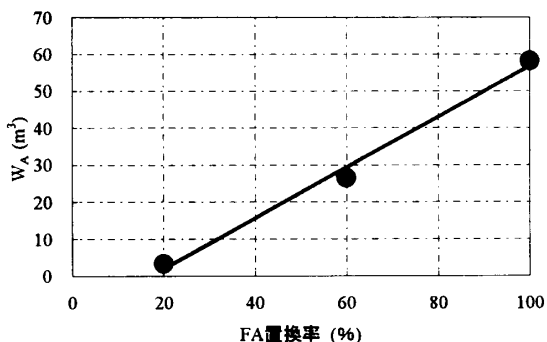


図-14 FA 置換率と W_A の関係

そこで、 W_2 のうちどの程度が強度に影響するかを強度影響率 (R_s) を(1)のように定義し、定量的に検討した。強度影響率の概念図を図-13 に示す。図中に示す直線は材齢 7 日における海砂を使用した転圧コンクリート ($FA=0\%$) の曲げ強度と C/W の関係である。

$$R_s = W_B / W_2 \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで $\left\{ \begin{array}{l} R_s : \text{強度影響率} (\%) \\ W_B : \text{強度に影響する水量} (m^3) \\ W_2 : \text{加水量} (m^3) \end{array} \right.$

また、式(1)より強度影響率を計算した結果、 $FA=100\%$ において強度影響率は 37%であり、残りの 63%は FA の擬似表面水量として使用されたものと考えられる。まず、先に示した FA 置換率と最適加水率 W_{add} の関係 (図-9) からワーカビリティを保持するための FA への混合水量が求まる。さらに図-14 より、各 FA 置換率における擬似表面水量 W_A が決定される。 $FA=100\%$ においては、 W_2 のうちの $58kg/m^3$ は FA の擬似表面水量として作用したのと考えられる。同様にして $FA=60\%$ においては $27kg/m^3$, $FA=20\%$ においては $3.4kg/m^3$ が擬似表面水量として作用したのと考えられる。すなわち、加水量から擬似表面水量を差し引いた水量のみに対して、水セメント比に応じたセメント量を増加させることで強度の確保が可能となる。またポゾラン反応による長期強度の増進も考慮すれば、さらにセメント量を減じることができるため、より経済的な転圧コンクリートの作製が可能になると思われる。

4. 結論

本研究は、普通転圧コンクリートの細骨材部分を多量に FA へ置換した FA 転圧コンクリートの初期強度を対象としたものである。すなわち、 FA 置換にともなうワーカビリティおよび強度の低下を、水量を増加させることのみによって

抑制する手法および増加水量が実際に強度へ及ぼす影響について明らかにした。主要な結論は以下の通りである。

- (1) W_2 の使用により細骨材を FA に大量に置換した転圧コンクリートにおいても FA を混入しない場合と同等以上の締固め率が得られる。
- (2) 各 FA 置換率に応じた最適な加水量が存在する。
- (3) 加水量から擬似表面水量を差し引いた水量のみに対して、水セメント比に応じたセメント量を増加させることで FA 転圧コンクリートにおいても強度の低減を抑制できる。
- (4) 初期強度において普通転圧コンクリートに対する強度低下を抑制することが可能であることから、長期強度においてはポゾラン反応分の強度増進を見込めば、セメント量をさらに低減できると予想される。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、河原良宏氏 (現壺山建設 (株)) をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室の各位に多大の協力を受けました。ここに記して、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 矢原隆, 和崎正令, 梅田俊夫: 風化花崗岩を細骨材としたコンクリート, コンクリート工学年次論文報告種, Vol.18, No.1, pp.429~434, 1996
- 2) 福留和人, 長瀧重義, 坂本守, 鈴木達雄, 喜田達夫: 最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-4, pp.55~66, 1999.8
- 3) 日本道路協会: 転圧コンクリート設計技術指針, 1990.5