

論文 細骨材使用量をゼロとしたフライアッシュ転圧コンクリートの性状

岡田 亮太^{*1}・松尾 栄治^{*2}・斉藤 直^{*3}・浜田 純夫^{*4}

要旨：石炭灰の発生量は年々増加傾向にあり，将来的に海砂の不足問題が予想されるセメント・コンクリート分野において，石炭灰を細骨材の代替として用いるメリットは大きい。本研究では，石炭灰，特にフライアッシュ（以下 FA）が振動締固めにより高い締固め効果を示す特性¹⁾を利用することで，細骨材の使用量をゼロとし，代替材料として FA を用いたノーサンド FA 転圧コンクリートの配合設計方法を検討した。

キーワード：転圧コンクリート，フライアッシュ，振動締固め，配合設計

1. はじめに

近年，地球環境保全などの観点から，循環型社会を目指す動きが活発である。年々増加傾向を示す産業廃棄物や建設副産物として排出される各種粉体の有効利用もその一環である。石炭火力発電所における石炭灰も例外ではない。その排出量は 2010 年には 1000 万トンを超えると見積もられ，処分地不足，処分費の高騰，環境負荷の深刻化が問題となっている。一方，海砂の過剰採取による環境への悪影響から，中国地方を中心に良質な細骨材の採取が極めて困難になっている。

このような背景から，FA をコンクリート用細骨材の一部として利用する研究が盛んに行われている²⁾。しかしながら，細骨材として大量置換すると，単位水量が増加し強度低下を引き起こすなどの問題から，FA への置換率は限定されている。また，FA への置換率が極端に大きい場合は，骨材全体の粒度分布が不連続になるうえ，細骨材率という概念自体が存在しなくなる。

筆者らはこれまでに，細骨材を FA に大量置換した転圧コンクリートの強度性状について報告してきた^{3)~4)}。その場合は，従来の配合設計方法⁵⁾による基本配合の細骨材部分を FA に体積置換する方法とした。その結果，単位水量を

分割して考えることにより配合設計が可能となり，締固め率や強度発現も一般的な転圧コンクリートと同等以上の値が確保できた。しかしながら，それでも FA 置換率は 80～90%程度で限界が生じている。これは，基本配合を設定することがのちの配合条件を制約してしまうことによる，すなわち手法的なワンクッションとなるためと考えられる。

本研究では，単位水量の低減が最重要であると考え，そのための配合をダイレクトに設計する方法を提案した。その上で目標締固め率の確保を考慮し，目標強度の確保を実験的に確認することで最適配合設計の提案を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料及び配合

(1) 使用材料

全配合において早強ポルトランドセメントを，粗骨材には山口県宮野産安山岩碎石（最大寸法 20mm）を使用した。また，FA として中国電力（株）新小野田発電所の石炭灰原粉を使用した。その物理試験結果を表-1 に示すが，強熱減量，28 日活性度指数以外は JIS 規格の Ⅱ種に相当する。なお，配合条件を出来るだけ簡素化するため混和剤は使用しないこととした。

*1 山口大学大学院 理工学研究科（正会員）

*2 山口大学助手 工学部社会建設工学科 博（工）（正会員）

*3 中国電力（株）土木部 石炭灰有効活用プロジェクト 副長 博（工）

*4 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D.（正会員）

(2) 配合

締固め率試験用配合表を表-2 に示す。配合要因は、単位セメント量、単位粗骨材量（容積）および水粉体比である。単位セメント量は、一般的な転圧コンクリートと同程度の 270, 300, 330kg/m³ の 3 種類とした。単位粗骨材容積は 480, 540, 590l/m³ としたが、これらはそれぞれ粗骨材の実積率に対して 81, 91, 100% に相当する。すなわち粗骨材容積は、590l/m³ が理論上最大値であり、粗骨材が完全に噛み合った状態となる。

強度測定用配合については、締固め率測定用配合において、その締固め率および材齢 7 日の強度性状から単位粗骨材量を決定し、単位セメント量を 270, 300, 330, 360kg/m³ の 4 種類とした。表-3 に強度測定用配合表を示す。

2.2 練混ぜ方法

練混ぜは強制練りミキサーを用い、粗骨材と細骨材(FA)を投入後 60 秒間空練りを行った。その後、セメント、水の順に投入し、それぞれ 60 秒間練混ぜを行った。なお、それぞれの材料投入後 30 秒で一旦ミキサーを停止させ、ミキサー側面のかき落としを行った。

2.3 締固め試験方法

(1) 突固め方法

突固めは、アスファルト混合物のマーシャル安定度試験に用いられる突固め試験装置を用いて行った。試料を φ 10 × 20cm の円柱型枠に目標締固め厚（50 回で約 10cm）となるように試料質量を計量して入れた。次にマーシャル突固め用ハンマ（ハンマ重量：4.5kg、落下高：45.7cm）で 50 回突固め、その試料の容積及び質量から翌日、締固め率を求めた。なお、養生中は試料の乾燥を防ぐため型枠の上面をラップで覆った。

(2) 振動締固め方法

10 × 10 × 40cm の角柱供試体に、目標締固め率 96%⁵⁾ となるように供試体 1 体分の試料質量を求め、その質量の 50% を計量して型枠に詰め、練りさじで敷き均した。次に、振動締固め試験機を用いて、ペースト部分の流動化が認められ

表-1 石炭灰原粉の物理的性状

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	45×10 ⁻⁶ m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

表-2 締固め率試験用配合

粗骨材容積 (l/m ³)	W/(C+FA) (％)	W/C (％)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	FA	G
480	22	65.9	270	178	541	1301
	24	70.0		189	518	
	26	73.7		199	496	
540	22	58.9	270	159	454	1463
	24	62.6		169	434	
	26	65.9		178	414	
590	22	53.0	270	143	382	1599
	24	56.3		152	363	
	26	59.3		160	346	
480	22	60.0	300	180	517	1301
	24	63.7		191	494	
	26	67.0		201	473	
540	22	53.7	300	161	431	1463
	24	56.7		170	410	
	26	60.0		180	391	
590	22	48.3	300	145	358	1599
	24	51.3		154	340	
	26	54.0		162	322	
480	22	54.8	330	181	494	1301
	24	58.2		192	471	
	26	61.5		203	449	
540	22	49.1	330	162	407	1463
	24	52.1		172	386	
	26	54.8		181	367	
590	22	44.2	330	146	335	1599
	24	47.0		155	316	
	26	49.4		163	299	

表-3 強度試験用配合

粗骨材容積 (l/m ³)	W/(C+FA) (％)	W/C (％)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	FA	G
590	23	54.8	270	148	372	1599
		49.7	300	149	349	
		45.8	330	151	325	
		42.2	360	152	302	

るまで全体を満遍なく締め固めた。2 層目も同様とし、目標締固め厚 10cm となるまで締め固めた。振動締固め試験機の概略を図-1 に示す。

2.4 強度試験方法

供試体寸法は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体とし、締固めは振動方法を用いた。

供試体は翌日脱型し、水中養生 (20 ± 2) を行い材齢 7, 28, 56, 91 日で強度試験を行った。曲げ強度試験は JIS A1108 に準拠して行った。圧縮強度試験は、曲げ強度測定後の割れた供試体 2 体を用いて行った。

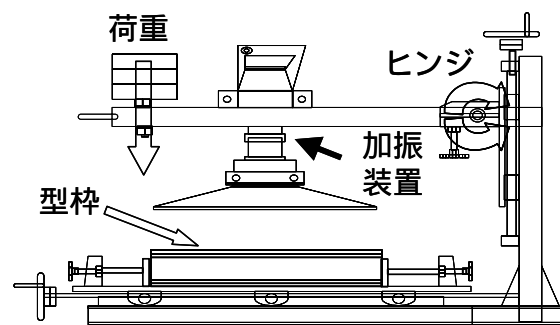


図-1 振動締固め試験機

3. 締固め率

3.1 締固め方法の影響

転圧コンクリートの配合設計においては、一般にマーシャル突固め試験が用いられているが、実施工においては、転圧ローラーやアスファルトフィニッシャーなどによる圧密及び振動エネルギーによる締固めを行うため、実験室におけるマーシャルやランマーなどの衝撃エネルギーによる締固めとは性質が大きく異なる。本研究では、まず、前述の配合条件において、締固め方法が締固め率に及ぼす影響を明らかにした。

配合は、単位セメント量 300kg/m^3 を一定とし、単位粗骨材容積を $480, 540, 590\text{l/m}^3$ 、水粉体比を 22, 24, 26% と変化させた。この結果を表-4 に示す。また、図-2 に単位粗骨材容積と締固め率の差（振動締固め - マーシャル突固め）の関係、図-3 に W/P と締固め率の差の関係を示す。

図-2 より、単位粗骨材容積が大きいほど両者の締固め効果の相違が明瞭に確認できる。これは、振動による締固めがマーシャルによる突固めに比べ、振動エネルギーに加え圧密効果も加わることから、粗骨材が互いに位置を変えやすく、間隙の減少、ペースト部の流動化を促すことで、締固め効果が高まるためと考えられる。また、図-3 より、W/P が小さいほど両者の締固め効果の相違が明瞭に確認できる。これは、W/P が大きい場合にはペーストの粘性が低下することから、W/P が小さい場合に比べ相対的に締め固めやすくなるためと考えられる。

以上の結果から、単位粗骨材容積が大きいほ

表-4 各締固め方法による締固め率の測定値

セメント量 (kg/m^3)	粗骨材容積 (l/m^3)	W/P (%)	締固め率 (%)	
			振動	突固め
300	480	22	95.6	90.8
300	480	24	96.7	92.9
300	480	26	97.3	96.7
300	540	22	95.6	87.0
300	540	24	96.7	90.6
300	540	26	97.8	98.1
300	590	22	95.8	83.9
300	590	24	96.9	87.9
300	590	26	98.1	90.9

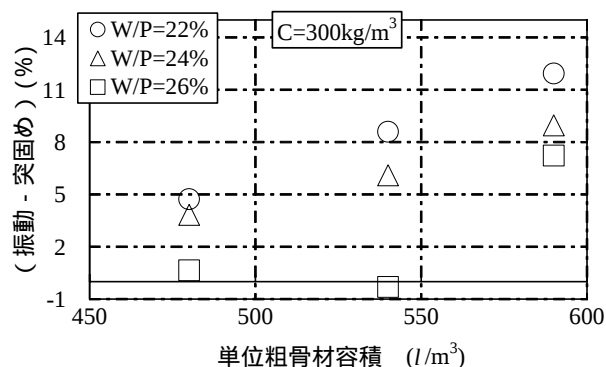


図-2 単位粗骨材容積と締固め率の差の関係

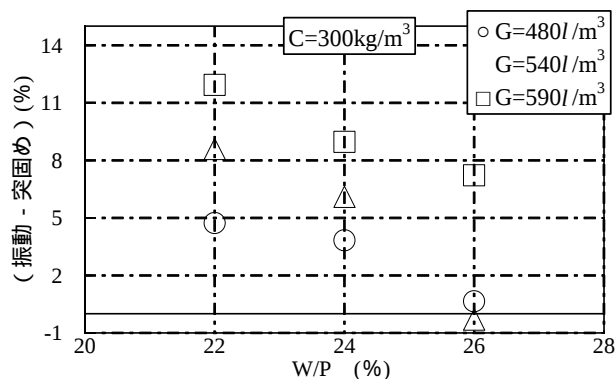


図-3 W/P と締固め率の差の関係

ど, また W/P が小さいほど振動締固めとマーシャル突固めにおける締固め効果の違いが大きいことが確認された。すなわち, 締固めが困難である配合条件ほど, 振動締固めに有効性があることが明らかになった。すなわち従来のマーシャル試験によって締固め率が不十分な配合についても, 実機においては所要の締固め率を得ることが可能であり, その評価方法の再検討が必要と思われる。以下, 本研究においても, 供試体作製時には, 振動による締固めを行うこととした。

3.2 配合条件の影響

(1) 粗骨材容積が締固めに与える影響

FA などの粉体を大量に用いる時, 一般的な細骨材に比べ比表面積が大きいことから, 単位水量の増加を招くことが問題となる。一般に FA などの粉体系材料を多量に使用した場合, コンクリートのコンシステンシーは W/P により決定される。すなわち, コンシステンシー一定条件で考えれば, 主に粉体量の増加に伴い単位水量も増加することとなる。このため, 単位水量の低減には粉体量の低減が不可欠となる。その場合, FA の混入量は, 主にコンクリートの流動性に影響するものであるから, 適宜に調整しても強度への影響は小さい。しかしながら, セメント量は流動性のみならず, 強度性状にも影響を与えるため, 最小限の混入量は確保しなければならない。

このことから, 単位粗骨材容積を大きくすることで, FA 量を低減し, これにより単位水量を最小限に抑えることとした。図-4 に配合設計概念図を示す。まず, ワークビリティを損なわない範囲で単位水量の低減を目的に単位粗骨材容積の増減が, 締固め率に与える影響を検討した。ここでは, 単位セメント量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ を一定とし, 単位粗骨材容積を $480, 540, 590\text{l}/\text{m}^3$, 水粉体を $22\sim 26\%$ の 2% 刻みで変化させた。単位粗骨材容積と締固め率の関係を図-5 に示す。この結果から, 単位粗骨材容積の違いによる締固め

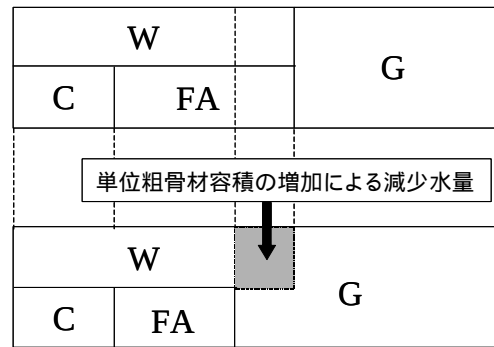


図-4 配合設計の概念図

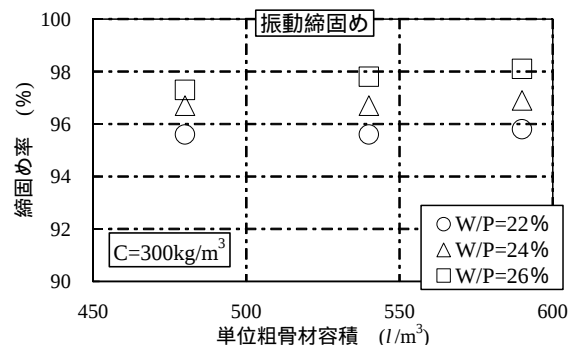


図-5 単位粗骨材容積と締固め率の関係

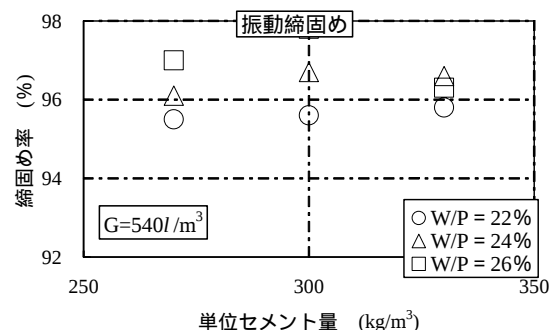


図-6 単位セメント量と締固め率の関係

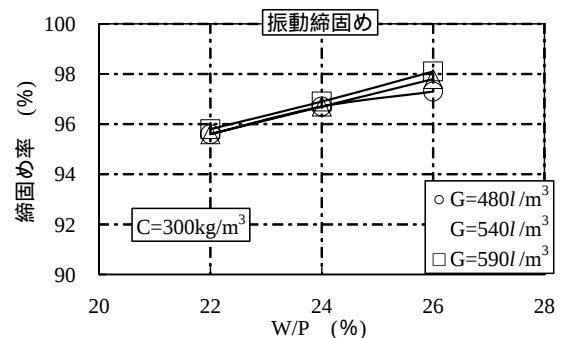


図-7 W/P と締固め率の関係

率の大きな変化はみられない。

(2) セメント量が締固めに与える影響

ここでは、セメント量が締固めに与える影響をみるため、単位粗骨材容積 540l/m^3 で一定とし、W/P を 22~26% の 2% 刻み、単位セメント量を $270\sim 330\text{kg/m}^3$ の 30 刻みで変化させた。単位セメント量と締固め率の関係を図-6 に示す。この結果から、振動締固めにおいてはセメント量が締固めに及ぼす影響は小さいと考えられる。

(3) W/P が締固めに与える影響

W/P が締固めに与える影響を検討するため、単位セメント量 300kg/m^3 を一定とし、単位粗骨材容積 $480, 540, 590\text{l/m}^3$ 、W/P を 22~26% の 2% 刻みで変化させた。W/P と締固め率の関係を図-7 に示す。この結果より、W/P の増加に伴い締固め率が増加し、締め固めやすくなることがわかる。また、転圧コンクリートにおける目標締固め率 96% に相当する W/P は 23% 近傍であることがわかる。

4. 強度性状と配合設計

4.1 セメント量と強度の関係

本研究で使用する材料においては、一般的な転圧コンクリートの目標締固め率 96% を満足するための配合条件として W/P=23%、単位粗骨材容積 590l/m^3 を決定した。そこで、表-2 に示す配合において打設を行い、配合強度 5.7MPa を満たす最小セメント量の決定を行った。養生期間 7, 28, 56, 91 日の圧縮強度と単位セメント量の関係を図-8 に、曲げ強度と単位セメント量の関係を、図-9 に示す。材齢 28 日までの初期強度発現に注目すると、単位セメント量 300kg/m^3 を境に強度は頭打ちとなっており、強度発現の初期段階ではセメント量の増加に強度が必ずしも比例しないことがわかる。また、単位セメント量 300kg/m^3 において、材齢 28 日で配合強度 5.7MPa を満たしている。これにより、初期強度を得ることを目的とする場合、必要最小セメント量は 300kg/m^3 と考えられる。

これに対して、単位セメント量 330kg/m^3 、

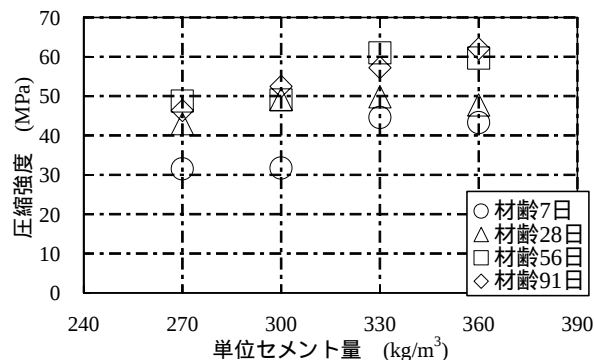


図-8 単位セメント量と圧縮強度の関係

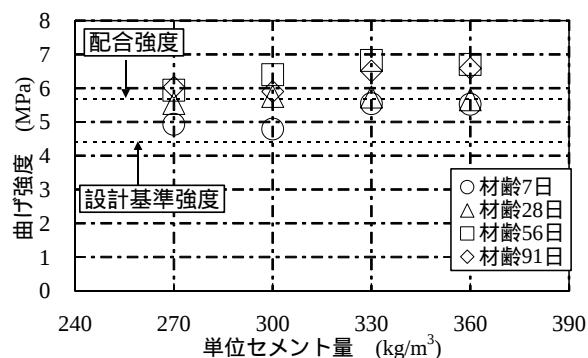


図-9 単位セメント量と曲げ強度の関係

360kg/m^3 について、材齢 28~56 日までの長期強度発現に注目すると、曲げ・圧縮強度の両方において強度の大幅な増加がみられる。しかしながら、本研究において対象とする構造物は、早期開放が重要である舗装であることから、経済性の面についても考慮すると、単位セメント量は 300kg/m^3 で十分と考えられる。

また、材齢 56~91 日の強度に注目すると、曲げ圧縮強度ともに、強度の増進は確認できなかった。この原因としては、早強セメントを使用していること以外に、水粉体比が極めて小さいことが考えられる⁶⁾。すなわち、フレッシュコンクリート中の水は、練混ぜ中にセメントあるいはフライアッシュのいずれかに接触し拘束される。その量的な差は、両粉体の比表面積の差程度であり、あまり大きくないと思われる。よって水粉体比が小さければ、実質的な水セメント比も小さくなっており、セメント水和物の生成量も極めて少ないと予想される。このためポゾラン反応が緩慢になり、長期強度の増進が確

認できなかったものと推察される。

4.2 配合設計法の提案

以上の結果をもとに、NS-FA 転圧コンクリートの配合設計法を提案する。図-10 は配合設計法のフローである。

・ W/P および単位セメント量を一定とし、単位粗骨材容積を実積率の 80～100%程度の範囲で変化させ 締固め試験を行う。その結果から、単位粗骨材容積を増加させても締固め率が低下しない最大の単位粗骨材容積を決定する。

・ で決定した単位粗骨材容積を固定し、W/P を 22～26%程度の範囲で数点変化させ、W/P と締固め率の関係を求める。この関係から、目標締固め率に応じた W/P を決定する。

・ 及び で決定した単位粗骨材容積および W/P を固定し、単位セメント量を 270～360 kg/m³程度の範囲で 4、5 点程度変化させ強度測定用供試体を作製する。そして、所定の材齢で強度試験を行い単位セメント量と曲げ強度の関係を求める。この関係より、目標強度に応じた最小セメント量を決定する。

5. 結論

突固めに比べ振動による締固めの方の効果が大きく、その違いは単位粗骨材容積が大きい時、また W/P が小さい時に顕著に現れる。振動締固めを用いれば、単位粗骨材容積を実積率まで増加させても、材料分離などを起こすことなく、十分な締固め率が得られる。

振動による締固め効果は、単位粗骨材容積及び単位セメント量との相関は小さく、W/P にのみによって評価できる。

材齢 28 日において 単位セメント量 300kg/m³ で目標曲げ強度 5.7MPa を満たす。

FA による長期強度の増進は小さい。

参考文献

1) 福留和人，長瀧重義，坂本 守，鈴木達雄，

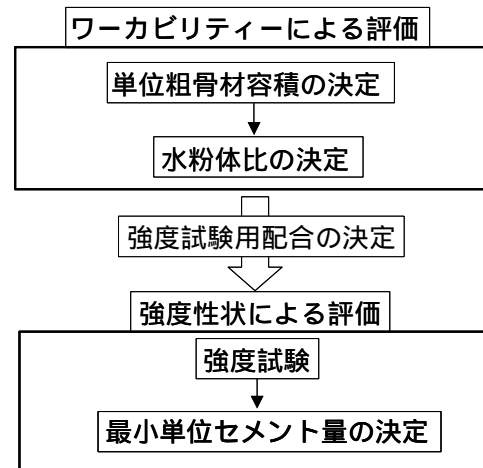


図-10 配合設計フロー

喜多達夫：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，Vol.44，No.627，pp.55～66，1998.8

- 2) 黄 光律，友澤史紀，野口貴文：フライアッシュを細骨材の代替材として使用したモルタルのレオロジー・強度特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.211～216，1997
- 3) 扇 正典，浜田純夫，松尾栄治，斉藤 直：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1147～1152，2000
- 4) 扇 正典，浜田純夫，松尾栄治，斉藤 直：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.295～300，2001
- 5) 舗装委員会 セメントコンクリート舗装小委員会：転圧コンクリート舗装技術指針(案)，(社)日本道路協会，平成 2 年 5 月
- 6) 小早川 真，黄 光律，羽原俊祐，友澤史紀：水比，混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.121～126，1999