

# ノーサンドフライアッシュ転圧コンクリートの 配合設計方法に関する実験的研究

扇 正典<sup>1</sup>・松尾栄治<sup>2</sup>・浜田純夫<sup>3</sup>・斉藤 直<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士(工学) 宇部市役所 (〒755-8601 山口県宇部市常盤町 1-7-1)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>4</sup>正会員 博士(工学) 中国電力株式会社 (〒730-8701 広島県広島市中区小町 4-33)

地球環境保全の観点から産業廃棄物の有効利用は大きな課題である。本研究では、石炭火力発電所から産出されるフライアッシュに着目し、転圧コンクリートの細骨材代替材料としての適応性を検討した。その結果、細骨材代替率 100%いわゆるノーサンド状態においても十分に利用可能であることを確認するとともに、ノーサンドフライアッシュ転圧コンクリートの配合設計方法を提案した。また、同コンクリートは、単位粗骨材容積を実積率近傍とすることで単位水量を  $150\text{kg/m}^3$  程度まで抑制することが可能であること、単位セメント量も  $300\text{kg/m}^3$  程度で一般的な転圧舗装コンクリートと同程度であることなどを確認した。

**Key Words:** roller compacted concrete pavement, fly ash, unit coarse aggregate volume, flexural strength, mix design

## 1. はじめに

全国の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、2010年には1,000万トンを超えるものと予想されている<sup>1)</sup>。現在FAは発生量の約60%が、セメント原料の粘土代替材料やコンクリート用混和材などとして有効利用されているが、依然として管理型産業廃棄物として大量に埋立て処分されている。このため、処分地不足による処分費の増大、埋立てに伴う環境への悪影響などが深刻な問題となっている。

一方、コンクリート用細骨材の枯渇は、中国地方では徐々に深刻になりつつある。特に瀬戸内海においては砂の採取が極めて困難になってきた。このため、砕砂や山砂が採用されるようになったが、これらは角張った骨材であるためにスランプの低下など、ワーカビリティの大きな低下が問題となる。

このような背景から、FAもゆくゆくは用いざるを得ないコンクリート材料とも考えられており、近年、FAの有効利用に関する研究が各機関において盛んに行われている。中でもFAをセメントの内割で使用したコンクリートや、細骨材の一部をFAで置換したコンクリートに関する研究例<sup>2)~4)</sup>が多数を占めてい

る。しかしながら、いずれの研究においても強度とワーカビリティ保持の観点から、セメントの内割および外割においてもFA置換率は最大で50%程度に限定されている<sup>5)</sup>。これは、FAが細骨材と比較して極めて微細な球形粒子であることが原因である。すなわち極端に大量混入した場合には、比表面積の増大による拘束水量の増加がワーカビリティの低下を引き起こし、ひいてはそれに伴う単位水量の増加が強度低下へつながると考えられる。

FA混入によるワーカビリティへの影響については、改善効果があるとする研究報告<sup>6)7)</sup>や流動性が低下するという報告<sup>3)8)</sup>など相反する報告例があり、FAの品質のばらつきとの関係について更に十分な議論が必要である。筆者らは、FAが均質な球形粒子であることによる流動性改善効果よりも、拘束水量の増加や、未燃カーボン絶対量の増加による悪影響の方が卓越し、単位水量を大きく増加せざるを得ないことが問題となると考えている。このように、FAは必ずしもコンクリート材料として適しているわけではない。しかし、不適切と考えられる材料も循環型社会においては最大限に有効活用することが望まれている。したがって、大量にFAを用いたコンクリートでは最良のコンクリートを目指さず、いかにコンクリートに利用できるかに着目せざるを得ない。

すなわち、目標品質を満足する範囲においていかにFAを大量に使用できるかを考える必要があり、その最大値を定量的に求める手法の確立が重要となる。

さらに、FAを大量に使用するための概念として、セメントに対する置換率という観点ではなく、新しいコンクリート材料のひとつと考える必要がある。ただし、前述のようにFAは微粉であるためコンクリート用骨材としては捉え難い点がある。細骨材の定義として5mm以下という点だけをみれば、細骨材とも考えられる。しかし、粒度分布など適切な細骨材とは遠く離れることになるため、粉体材料あるいはフィラーと捉える（称する）べきであるが、本研究では細骨材代替材として考えることとする。

以上の基本的概念に対し、現状においては、FAを大量に用いたコンクリートが普通のコンクリートと同程度の性能を有するためには施工法を考えざるを得ない。このような中で、福留ら<sup>9)</sup>によれば、FAの均質な球形粒子という性状を利用すれば振動締固めに対して極めて有効な流動化現象が安定して再現できることを示している。

本研究ではその考え方の応用として、振動ローラーによる締固めを行う転圧コンクリートを対象とした。すなわち、基本的にFAを細骨材代替材料として位置づけ、代替率100%を目標としたノーサンドFA転圧コンクリート（以下、NS-FA転圧コンクリート）の配合設計方法について検討を行った。なお目標強度は、普通転圧コンクリートの材齢28日における配合強度と同様に曲げ強度で5.7N/mm<sup>2</sup>とした。

舗装用コンクリートの目標強度を達成し、なおかつ、経済性も考慮すれば単位セメント量を従来のコンクリートと同等にしてその配合方法を決定する必要がある。また前述のように、粉体を多く用いるほど水量の増加が伴う。この水量を減少させるためには、単位粗骨材容積を増やす必要があることを考えた。このような条件を克服し、NS-FA転圧コンクリートの配合方法を求めることを目標として研究を行った。

## 2. NS-FA転圧コンクリート

### (1) 細骨材の一部をFAに置換した場合の性状

筆者らは既往の研究<sup>10)</sup>において、ノーサンド状態の前段階として、細骨材の一部をFAへ置換し、その置換率を変化させた場合の諸性状について検討した。その場合、FA置換率の増加に伴うワーカビリティの低下を水量の増加のみによって抑制した。

その結果、いずれのFA置換率においても高い締固

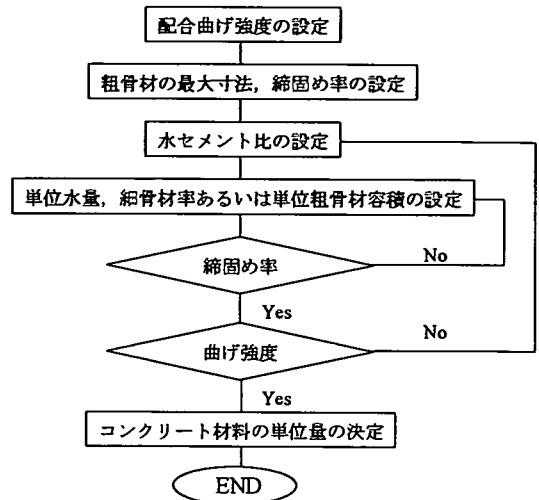


図-1 コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>の配合設計フロー

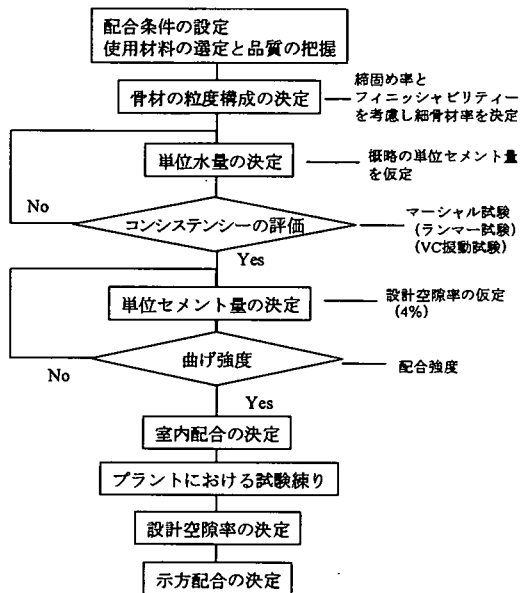


図-2 転圧コンクリート舗装技術指針(案)<sup>12)</sup>の配合設計フロー

め率は確保できたものの、FA置換率の増加に伴う強度の絶対値の低下は否めないことが明らかになった。すなわち、粉体量が極端に多くなる配合条件については、従来の配合設計方法では対処できないことが明らかとなった。

コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>における転圧コンクリートの従来の配合設計方法は、所要の施工性、力学的性能、耐久性などを満足する範囲内で、所定の締固め率を達成でき、単位水量をできるだけ少なくすることが基本となっている。図-1)にその配合設計フ

ローを示す。また、図-2に転圧コンクリート舗装技術指針(案)<sup>12)</sup>における配合設計フローを示す。いずれも基本的な考え方は同じであり、骨材の粒度構成を調整することにより高い締固め率を実現させているが、本研究では中間粒度(細骨材)が存在しないため細骨材率が規定できないなど、これらの概念が適用できず、新しい手法を構築する必要がある。またこれらの目標締固め率は96%であり、設計曲げ強度の標準は4.5N/mm<sup>2</sup>である。コンクリート標準示方書においては、配合のおおよその標準について、単位水量が95~115kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材容積は73%程度、単位セメント量は265~310kg/m<sup>3</sup>と定められている。本研究では、セメント量を一般的な転圧舗装コンクリートの範囲とすること、細骨材のFA置換率を100%すなわちノーサンド状態とすることを前提条件として、配合設計方法を再構築した。

## (2) NS-FA転圧コンクリートの課題

一般の転圧コンクリートは、セメントから粗骨材まで全ての材料の粒度分布を揃えることで低い空隙率(=高い締固め率)を実現し、強度を確保している。しかしながら、NS-FA転圧コンクリートにおいて細骨材の代替材料として用いるFAは、その全てが微粒分である。このため、NS-FA転圧コンクリートの粒度分布は、一般の転圧コンクリートに比べ中間層の粒度が存在せず微粒分側に偏ったものとなる。また、FAの比表面積は、一般的な細骨材に比べ非常に大きいことから、コンクリートの練混ぜにおいて必要となる各材料表面への吸着水量すなわち拘束水量が増加する。このため、FAを大量に使用する場合には、粘性の増加とともに所要のコンシステンシーを確保するための単位水量が大幅に増加する<sup>10)</sup>。この単位水量の増加に伴い、所要強度を得るための単位セメント量を増加せざるを得ないことから経済的に不利になる。

また、FAに含まれる未燃炭が混和剤を吸着することから<sup>13)</sup>、単位水量低減のために混和剤を使用する場合、その使用量が大幅に増加し不経済となることも問題である。

このため、経済的なNS-FA転圧コンクリートの配合設計方法を検討するにあたり、単位水量の低減が大きな課題となる。一般に、FAなどの粉体系材料を大量に使用した場合、コンクリートのコンシステンシーは水粉体比により決定される。すなわち、コンシステンシー一定条件で考えれば、総粉体量の増加に伴い単位水量も増加することとなる。よって、単位水量の低減には総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

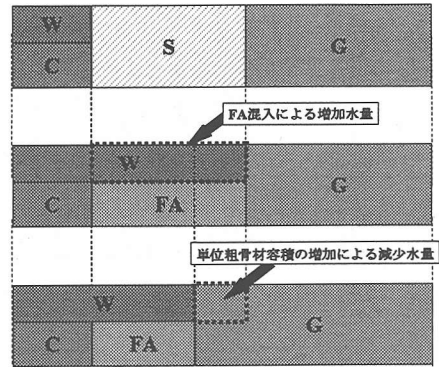


図-3 配合設計概念図

表-1 セメントの物理試験結果

試験項目	結果	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.12	
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	4800	
強熱減量(%)	1.2	
凝結	始発(h-min)	1-28
	終発(h-min)	2-23

表-2 粗骨材の物理試験結果

試験項目	粗骨材
表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.71
吸水率(%)	0.64
単位容積質量(kg/l)	1.60
実積率(%)	59.0
粗粒率	7.81

表-3 FAの物理試験結果および化学成分

試験項目	結果	化学成分(%)	
湿分(%)	0.1	SiO <sub>2</sub>	57.9
強熱減量(%)	5.30	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.7
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.12	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.6
フロー値比(%)	103	CaO	0.78
粉末度	45μmふるい残分(%)	MgO	0.48
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	SO <sub>3</sub>	0.21
活性度指数	28日(%)	Na <sub>2</sub> O	0.63
	91日(%)	K <sub>2</sub> O	1.01

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基本的な強度発現のための最小限の混入量は確保されなくてはならない。したがって、総粉体量を低減する場合、FA量を減らさざるを得ず、これがいわゆる「目標品質(=設計曲げ強度)を確保したうえでのFA使用量の最大値」となる。図-3に配合設計概念図を示

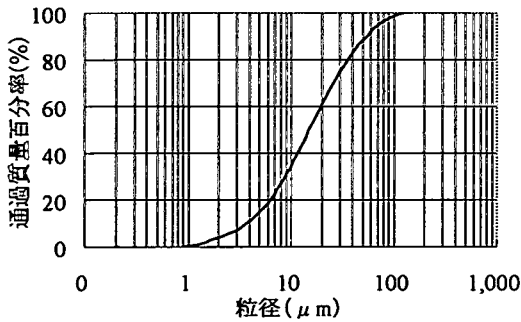


図-4 FA原粉の粒度分布

すが、コンクリート中のFA量の低減には単位粗骨材容積の増加が考えられる。すなわち、単位粗骨材容積を増加させることで、図中に示すようにFA量が減少し、単位水量の低減が可能となる。

以上の問題点を踏まえ、筆者らはまずは混和剤を使用しないことを前提に、単位水量を最小限に低減することで、経済的となるNS-FA転圧コンクリートの配合設計方法について検討した。

### 3. 実験方法

#### (1) 使用材料

転圧コンクリートにおいては、早期の交通解放を図ることが必要であるが、FAを大量に使用した場合、初期強度発現の遅延が問題となる。このため、本研究では、初期強度発現を目的に早強ポルトランドセメントを使用した。その物理試験結果を表-1に示す。粗骨材は、山口市宮野産の安山岩砕石を使用した。粗骨材の物理試験結果を表-2に示す。また、中国電力(株)新小野田発電所産のFA原粉を使用した。その物理試験結果およびJIS M 8815による主要化学成分試験結果を表-3に示す。強熱減量および28日活性度指数についてのみJIS規格外に相当し、その他はII種に相当する。またFA原粉の粒度分布を図-4に示す。

#### (2) 配合および練混ぜ方法

転圧コンクリートにおいては締固め機械の性能、骨材の粒度分布、水量などによって空気量(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。練混ぜは、強制練りミキサーを使用し全材料投入後90秒間練り混ぜた。

##### a) 締固め率測定用配合

表-4に締固め率測定用配合表を示す。単位セメント量は270, 300, 330kg/m<sup>3</sup>の3水準としたが、これは標準的な転圧舗装コンクリートと同程度である。ま

表-4 締固め率測定用配合表

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

表-5 強度測定用配合表

W/P (%)	W/C (%)	単位粗骨材容積 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			C	W	FA	G
23	54.8	100	270	148	372	1599
	49.7		300	149	349	
	45.8		330	151	325	
	42.2		360	152	302	

表-6 線膨張試験における温度履歴

20℃	→上昇→	70℃	→下降→	20℃
3時間		3時間		3時間

た単位粗骨材容積は80, 90, 100%とした。なお、水粉体比は22, 24, 26%としたが、これは水粉体比を18~28%として行った予備実験により、良好なコンシステンシーが得られる範囲に絞った結果である。

#### b) 強度測定用配合

表-5に強度測定用配合表を示す。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単位水量から単位粗骨材容積を決定し、単位セメント量を270, 300, 330, 360kg/m<sup>3</sup>の4水準とした。

#### (3) 締固め率測定方法

##### a) 突固めの場合

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マーシャル突固め試験装置を用いて行った。試料を $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円柱型枠に目標締固め厚さ(50回で約100mm)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ー(ハンマー質量:4.5kg, 落下高:45.7cm)で50回突固め、翌日試料の容積および質量を測定し、締固め率を求めた。なお、脱型までは試料の乾燥を防ぐため型枠上面をラップで覆った。

#### b) 振動締固めの場合

振動締固めは、図-5に示すような振動締固め装置を用いて、角柱供試体(10×10×40cm)に1層ごとに試料を詰めペーストの浮上を確認できるまで締め固め、この操作を繰り返し2層で行った。24時間後に脱型し、翌日締固め率を求めた。

なお、この振動締固め装置の加振装置にはハンドバイブレーターを使用しており、振動数が9,000~10,000v.p.m.で、振幅は0.5mmである。従来の転圧コンクリートのコンシステンシーは、マーシャル突固め法、ランマー突固め法、VC振動締固め法により評価している。本研究の配合は粉体の流動化特性による締固め効果に期待するため、マーシャル突固め試験のような衝撃のエネルギーによる評価は不適であると考えた。その場合、振動エネルギーと締固め効果との定量化が重要となる。

しかしながら、理論計算上の振動エネルギーがすべて締固めに使用されることはなく、実際にはエネルギーが逸散してしまうこと、コンクリートと型枠の慣性力も影響があること、加振装置の仕様(振幅、振動数など)が一定で変化させることが難しいこと、などの理由から、エネルギーを評価するための条件設定が極めて複雑になる。したがって、ここでは従来のマーシャル突固め試験との比較すなわちエネルギーの種類のみに着目することとし、硬化コンクリートとしての締固め率を議論する。

#### (4) 強度試験

供試体は、脱型後直ちに標準養生(20±3℃)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 A 1108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折片を用いてJIS A 1114に準拠して行った。

#### (5) 熱的性質

本研究では、吉武ら<sup>14)</sup>の提案する簡易断熱温度上昇試験法に基づき、断熱温度上昇量を求めた。同試験の主な手順を以下に示す。

- ① 円柱供試体( $\phi 20 \times 20 \text{cm}$ )を恒温装置により50℃まで加熱。

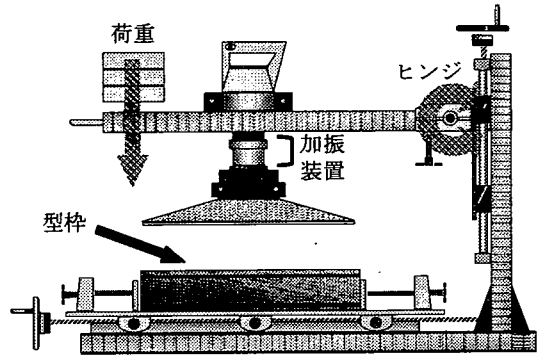


図-5 振動締固め装置

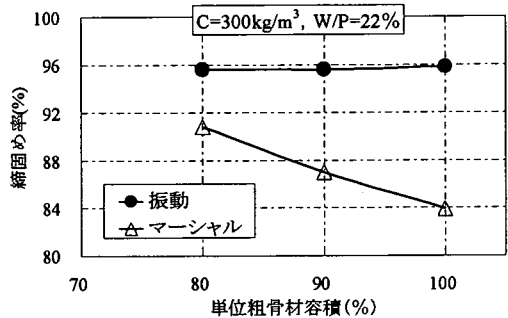


図-6 単位粗骨材容積と締固め率の関係

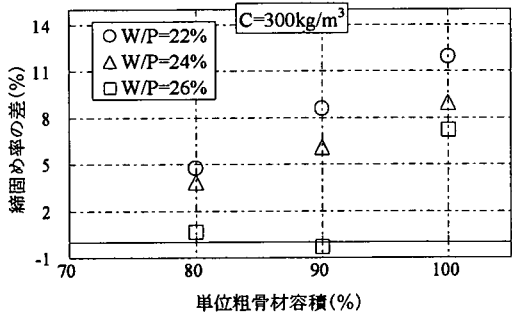


図-7 単位粗骨材容積と締固め率の差の関係

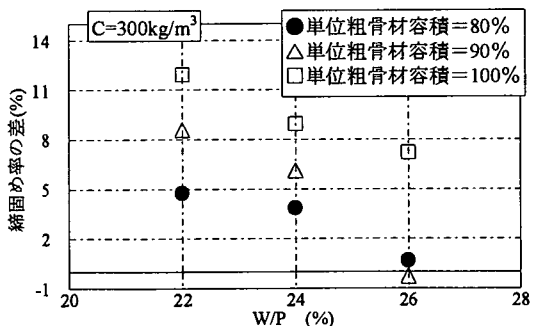


図-8 水粉体比と締固め率の差の関係

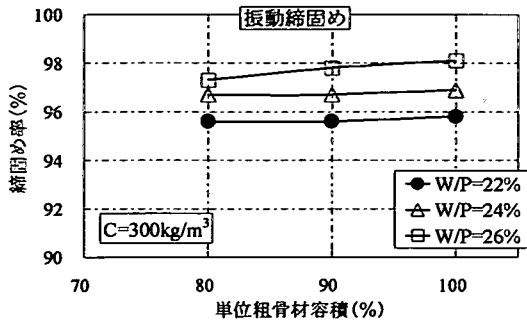


図-9 単位粗骨材容積と締固め率の関係

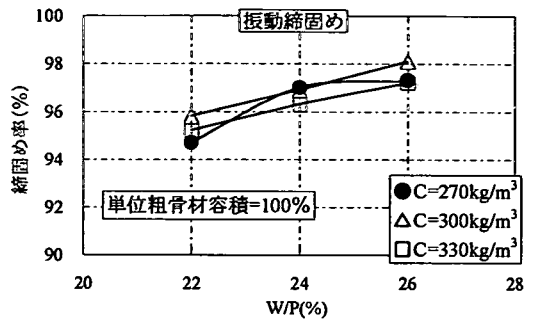


図-11 水粉体比と締固め率の関係

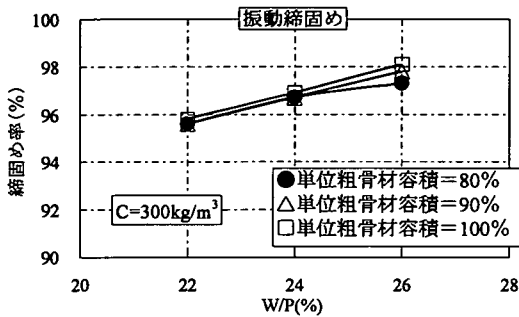


図-10 水粉体比と締固め率の関係

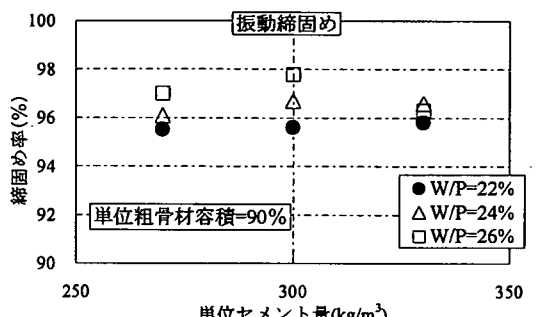


図-12 単位セメント量と締固め率の関係

- ② 加熱した供試体を発泡スチロール製の断熱型枠 (30×30×40cm) に挿入後、20℃の恒温養生室に静置。
- ③ 供試体中央温度および外気温の経時変化を基に温度降下勾配式を算定。
- ④ 断熱型枠内にコンクリートを打設後、白金測温体を用いて供試体中央温度および外気温を測定。
- ⑤ 外気温との温度差に基づく放熱量を供試体中央温度に積算することで断熱温度上昇量を算定。

また線膨張率は、埋込型ひずみゲージ (ゲージ長さ: 60mm) および熱電対 (Tタイプ) を埋設した10×10×40cmの角柱供試体において、表-6に示す温度履歴を与え、その際の温度とひずみ測定値の直線回帰勾配から算定した。

#### 4. 実験結果および考察

##### (1) 配合要因が締固めに与える影響

##### a) 振動および突固めによる締固め効果の相違

転圧コンクリートの配合設計方法においては、一般にマーシャル突固め試験装置 (以下、マーシャル突固め) による方法が用いられている。しかし、実施工においては転圧ローラーなどによる圧密および振動

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、その締固め機構が大きく異なる。加えて、FAなどの粉体大量使用時には、振動による締固め効果が大きいことが報告されている<sup>9)</sup>。そこで、まず振動と突固めにおける締固め率について比較検討した。

図-6に単位粗骨材容積と締固め率の関係を示す。この結果より、突固めよりも振動締固めの方が締固め効果が大きい傾向が伺える。そこで、単位粗骨材容積および水粉体比が両者の締固め効果の相違に与える影響を検討するため、振動締固めによる締固め率からマーシャル突固めによる締固め率を差し引いたものを締固め率の差と定義し、これにより評価した。

図-7に単位粗骨材容積と締固め率の差の関係を示す。この結果より、締固め率の差はいずれの水粉体比においても単位粗骨材容積の増加に伴い増加していることがわかる。すなわち、単位粗骨材容積が大きいほど、振動締固めとマーシャル突固めにおける締固め率が大きく異なる。これは、振動締固めはマーシャル突固めに比べ、粗骨材が相互に位置を変えやすく、振動エネルギーにより、次第に間隙が減少し締固め率が高まることおよび流動化により締固めが行われていることによると考えられる。土質工学

的には、砂質土や粗粒分の含有率の高い土は振動による締固め効果が大きく、その場合と同様に粗骨材混入量の増加に伴い、振動締固めの方が締固め効果が大きいと考えられる。

図-8に水粉体比と締固め率の差の関係を示す。この結果より、締固め率の差はいずれの単位粗骨材容積においても水粉体比の増加に伴い減少していることがわかる。すなわち、水粉体比が大きいほど振動締固めとマーシャル突固めの差が小さい。これは、水粉体比が大きい場合にはペーストの粘性が低下することから、水粉体比が小さい場合に比べ相対的に締め固めやすくなるものと考えられる。

以上から、単位粗骨材容積が大きく水粉体比が小さい場合には、振動の方が締固め効果が大きく、振動と突固めで締固め性能が大きく異なることが確認できた。また、締固め率が大きく異なるのは、低水粉体比かつ骨材混入量が極めて大きな場合に限定された現象である。普通転圧コンクリートの単位粗骨材量が最大でも $1350\text{kg/m}^3$ 程度であること<sup>15)~17)</sup>を考慮すれば、普通転圧コンクリートの配合設計方法においては、マーシャルによる締固め率の評価は妥当なものと考えられる。しかしながら、本研究のように骨材混入量が実積率近傍と極めて大きい場合には、振動による締固め率の評価の方が適切である。よって以後は、締固め率は振動締固めにより評価を行った。

#### b) 単位粗骨材容積が締固めに与える影響

単位粗骨材容積が締固め率に及ぼす影響を検討するため、単位セメント量、水粉体比を一定とし、単位粗骨材容積を80, 90, 100%と変化させた。

図-9に単位粗骨材容積と締固め率の関係を示す。この結果より、単位粗骨材容積が増加した場合においても締固め率は低下せずほぼ一定の値をとり、単位粗骨材容積が締固めに与える影響は小さいことがわかる。

#### c) 水粉体比が締固めに与える影響

水粉体比が締固め率に及ぼす影響を検討するため、単位セメント量および単位粗骨材容積を一定とし、水粉体比を22~26%まで2%刻みで変化させた。

図-10に単位セメント量を一定とした場合の水粉体比と締固め率の関係を示す。また、図-11に単位粗骨材容積を一定とした場合の水粉体比と締固め率の関係を示す。これらの結果より、締固め率はいずれの単位粗骨材容積および単位セメント量においても、水粉体比の増加に伴い線形的に増加していることが確認できる。

#### d) 単位セメント量が締固めに与える影響

単位セメント量が締固め率に及ぼす影響を検討す

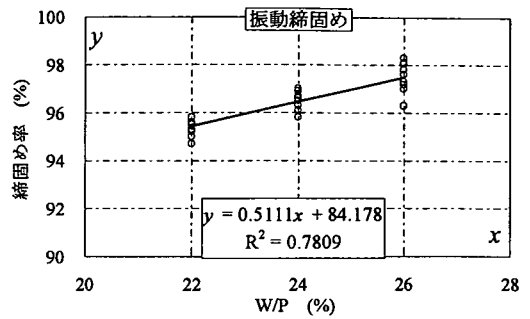


図-13 水粉体比と締固め率の関係

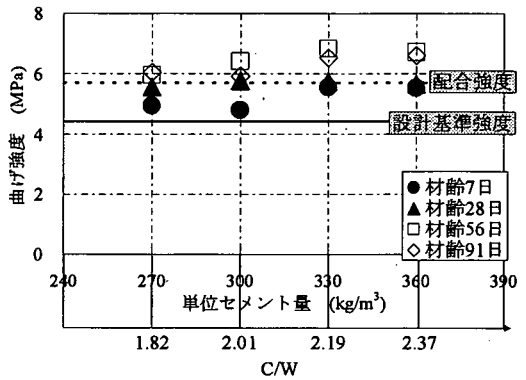


図-14 単位セメント量と曲げ強度の関係

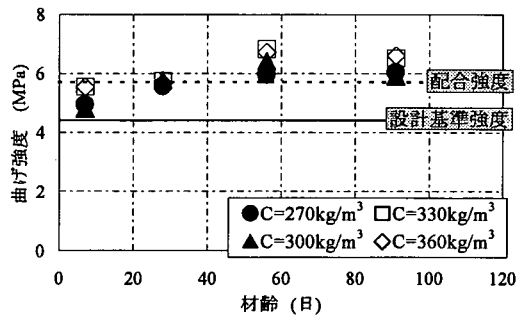


図-15 曲げ強度の経時変化

るため、単位粗骨材容積および水粉体比を一定とし、単位セメント量を $270\sim 330\text{kg/m}^3$  ( $30\text{kg/m}^3$ 刻み)で変化させた。図-12に単位セメント量と締固め率の関係を示す。この結果より、振動締固めにおいては、セメント量が締固めに与える影響は小さいことがわかる。

以上から、NS-FA転圧コンクリートの締固め率は単位セメント量および単位粗骨材容積に関わりなく、水粉体比のみで評価できる。強度発現の要因を考慮すると、後述のように単位セメント量の確保が最も

重要である。また、水セメント比を大きくすることは、普通コンクリート同様に強度低下につながるおそれがある。したがって水粉体比を増加させるには、必然的にFAを減じることになる。すなわち、目標締固め率を達成できる最小の水粉体比をFA量の調節によって実現すべきであり、このときのFA量が最大限にFAを使用するときの限界量になる。

また、水粉体比以外の要因が締固め率に及ぼす影響が小さいことから、本研究における全ての配合条件を総括して水粉体比と締固め率の関係を調べた。その結果を図-13に示す。この関係より、任意の目標締固め率を満足する水粉体比の選定が可能となる。

## (2) 強度性状

強度測定用供試体の作製に用いた配合を表-5に示す。単位水量を最小限に抑制するため、単位粗骨材容積は100%とした。また、水粉体比は、図-13より締固め率96%を満足するよう水粉体比 $W/P=23\%$ とし、単位セメント量を270, 300, 330, 360 $\text{kg/m}^3$ の4水準とした。一般的な転圧舗装コンクリートにおいては、単位水量が締固め率との関係より予め決定されており、強度面から導かれる配合条件は水セメント比である。これが配合強度を満足するように決定されることにより単位セメント量が求まる。しかし、本研究では前述のようにコンシステンシーを水粉体比により決定することから、また粗骨材量が既定されていることから単位水量は強度を考慮する前の段階で決定される。このため、水セメント比と強度の関係によらず単位セメント量と強度の関係により単位セメント量が決まる。

### a) 曲げ強度性状

図-14に単位セメント量と曲げ強度の関係を示す。この結果より、曲げ強度は、いずれの材齢においても単位セメント量の増加に伴いほぼ線形的に増加していることがわかる。しかしながら、単位セメント量330 $\text{kg/m}^3$ 以上においては、単位セメント量の増加に伴う曲げ強度の増加量は非常に小さい。転圧コンクリートの配合強度5.7N/mm<sup>2</sup>(材齢28日)を満足する最小セメント量としては、300 $\text{kg/m}^3$ 程度と判断できる。このセメント量は標準的な転圧舗装コンクリートとほぼ同程度である。

曲げ強度の経時変化を図-15に示すが、いずれの配合も各材齢においてほぼ同様の強度性状を示している。また、材齢56日以降は、いずれの配合においても強度の増進はみられなかった。一般に、FAをコンクリート用混和材やFAセメントとして使用するとポズラン反応により長期強度、特に曲げ強度の増進が著しいことは古くから多く報告<sup>18)~20)</sup>されている。

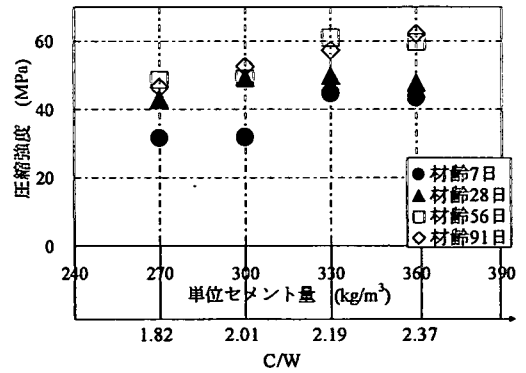


図-16 単位セメント量と圧縮強度の関係

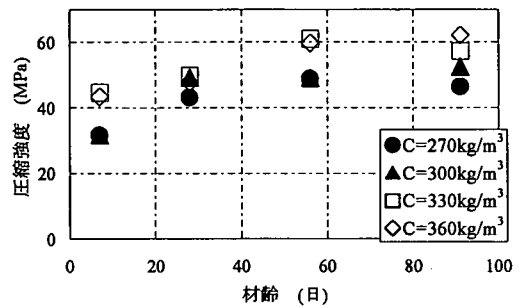


図-17 圧縮強度の経時変化

しかしながら本研究では異なる結果となった。これは、本研究では早期強度の改善を目的に早強ポルトランドセメントを使用したことによるためと考えられる。ポズラン反応性状に関する研究<sup>21)~23)</sup>は、そのほとんどが普通ポルトランドセメントによるものであり、早強ポルトランドセメントによるポズラン反応性状に関する研究は極めて少なく、今後さらなる検討を要するところである。

### b) 圧縮強度性状

図-16に単位セメント量と圧縮強度の関係を示す。この結果より、曲げ強度の場合と同様に圧縮強度は単位セメント量の増加に伴い、増加する傾向にある。

図-17に圧縮強度の経時変化を示す。この結果より、単位セメント量270 $\text{kg/m}^3$ と300 $\text{kg/m}^3$ および330 $\text{kg/m}^3$ と360 $\text{kg/m}^3$ はそれぞれ各材齢においてほぼ同様の傾向を示していることがわかる。また、曲げ強度の場合と同様に材齢56日以降は、強度増進していないことからポズラン反応による長期強度の増進は期待できない。これは前述の理由に加え、カルシウムの絶対量が不足していることも原因と考えられる。

曲げ強度に比べて、圧縮強度の発現は良好といえる。本研究では舗装を対象としているため、曲げ強



度により評価がなされるが、今後の課題として、圧縮強度の良好な発現性を利用してダムコンクリートなどを対象とした有効利用に期待できる。

図-18に圧縮強度  $f_c$  の(2/3)乗と曲げ強度  $f_b$  の関係を示す。圧縮強度は立方体の強度から円柱強度への換算<sup>24)</sup>を行った値を使用した。この結果より、NS-FA転圧コンクリートの圧縮強度の(2/3)乗と曲げ強度の関係は、材齢によらず、土木学会コンクリート標準示方書の規準よりも曲げ強度の卓越が確認できる。特に、強度の小さい範囲でその傾向が顕著であり、NS-FA転圧コンクリートにおいては下記の式(1)が適応可能であると考えられる。

$$f_b = 0.20 \cdot f_c^{2/3} + 3.41 \quad (1)$$

また、強度のばらつきについても検討を行った。表-7に曲げ強度の変動係数を、表-8に圧縮強度の変動係数を示す。これらの結果より、FAの品質が一定条件の場合でも、圧縮強度および曲げ強度は、配合や材齢によらず大きくばらつく場合があることが確認された。

### (3) 熱的性質

転圧コンクリート舗装においては、膨張収縮などによる応力を軽減するために目地が設置される。また、FAをセメントの外割で使用した場合には、FAのポズラン反応により水和熱が上昇する<sup>25)</sup>。このため、本研究のようにFAを極端に大量に使用した場合には、水和熱の大幅な増加が予想されることから、NS-FA転圧コンクリートの断熱温度上昇量の把握を試みた。図-19に断熱温度上昇量測定結果を示す。この結果より、NS-FA転圧コンクリートの断熱温度上昇量は、材齢初期において示方書の値<sup>26)</sup>を若干上回るものの、その後はコンクリート標準示方書の値とほぼ同様の結果となった。すなわち、終局断熱温度上昇量は一般的なコンクリートと同程度であり、FAを大量に混入しても水和熱は上昇しないことが確認された。このため、NS-FA転圧コンクリートの断熱温度上昇量は示方書式により、推定可能であると考えられる。

図-20に線膨張係数測定結果を示す。この結果より、NS-FA転圧コンクリートの線膨張係数は、一般的なコンクリートの線膨張係数10( $\mu\text{P}^\circ\text{C}$ )の約8割程度と小さいことが確認された。

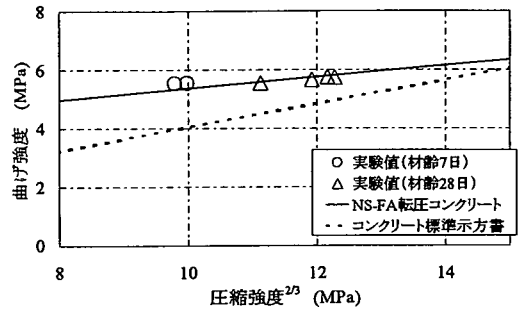


図-18 圧縮強度の(2/3)乗と曲げ強度の関係

表-7 曲げ強度の変動係数 (%)

		単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )			
		270	300	330	360
材 齢 (日)	7	7.79	3.90	10.02	4.63
	28	3.11	6.28	4.78	6.36
	56	5.47	4.22	6.82	9.04
	91	7.98	7.42	14.38	9.73

表-8 圧縮強度の変動係数 (%)

		単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )			
		270	300	330	360
材 齢 (日)	7	5.32	15.08	9.18	8.21
	28	8.44	8.14	12.41	12.80
	56	16.40	9.19	7.77	10.09
	91	15.38	18.17	12.77	10.22

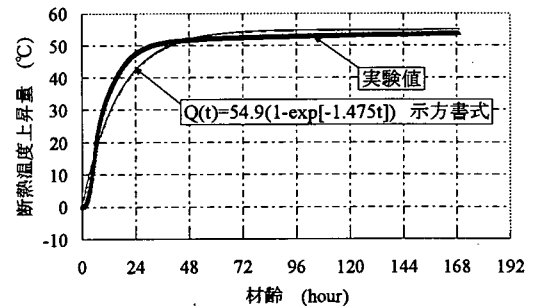


図-19 断熱温度上昇量測定結果

## 5. 配合設計方法の提案

### (1) 本研究で提案する配合設計方法

#### a) 配合設計のターゲット

コンクリートの配合は、基本的に強度、施工性、経済性を観点に入れて決定しなければならない。しかしながら、循環型社会において産業副産物を用いる場合、経済性をどの様にとらえるか困難な面がある。FAの最終処分費をFAの価格にとるか、あるいは有価な商品として価格をとるかについては大きい差

が生じる。本研究においては、セメント量のみで経済性を考慮することとし、材料全体のコストパフォーマンスについては論及することができないと判断した。よって、本配合のターゲットはFAをより大量に使用することとし、当然ながら設計曲げ強度を満足することを最優先の条件とした。すなわち、FAを単純に多く使用することだけを考えるのではなく、FA使用量の最大値を求めることを配合の主目的とした。図-21に配合設計のフローを示すとともに、以下にその手順を示す。

### b) 単位粗骨材容積の決定

一般に転圧コンクリートの単位粗骨材容積は、最も締め固めやすい細骨材率の決定後に、二次的に決定される。しかし、NS-FA転圧コンクリートにおいては、細骨材が存在せず、FAを細骨材とみなしてもFAが海砂と比表面積が大きく異なり、表乾状態の規定もないため、FAの混入量により単位水量が大きく変化する。すなわち、一般的なコンクリートのように水セメント比や細骨材率を配合要因とすることができない。また前述の結果からも、NS-FA転圧コンクリートにおいては、締め固めやすさは水粉体比のみに依存し、FAとセメントのバランスには無関係である。

そこで、単位粗骨材容積の決定においては、単位水量を最小限に抑制できる単位粗骨材容積を選定するのが効率的である。すなわち、単位粗骨材容積は、ワーカビリティを満足する範囲で最大とすることが合理的である。具体的には、「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法 (JIS A 1104-1999)」により粗骨材の実積率を求める。次に単位セメント量と水粉体比を仮定して単位粗骨材容積と締固め率の関係を求め、単位粗骨材容積が締固め率の低下を引き起こさない範囲において、最大の単位粗骨材容積を決定する。

本研究では、単位セメント量 $300\text{kg/m}^3$ および水粉体比24%程度を一定とし、単位粗骨材容積を80~100%の範囲で変化させ、締固め試験を行った。その結果、単位粗骨材容積が100%の場合においても締固め率の低下は認められなかった。

### c) 水粉体比の決定

筆者らの提案する配合設計方法では、単位水量を決定するのではなく、水粉体比により間接的に単位水量が定まる。これは、品質の異なる種々のFAおよび粉体においても、水粉体比と締固め率は線形回帰できることが予測されるためである。その場合、粉体種類および粗骨材種類の組合せごとに水粉体比と締固め率の関係を求め、目標締固め率に応じた水粉体比を決定する。

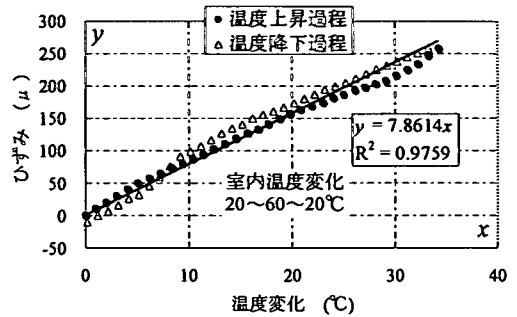


図-20 線膨張係数測定結果

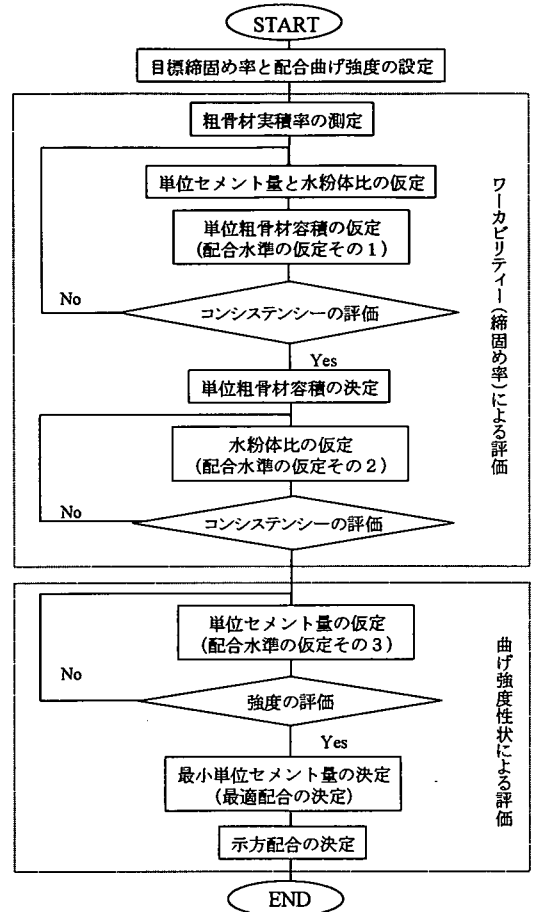


図-21 本研究の配合設計フロー

コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>や転圧コンクリート舗装技術指針(案)<sup>12)</sup>では、目標締固め率96%を規定しており、既往の研究<sup>17)27)</sup>からも締固め率が強度に大きく影響することが報告されていることから、目標締固め率を96%以上とする。ただし、単位粗骨材容積が100%に近い場合は従来の転圧コンクリートよりも締め固め作業が困難になり、達成可能充填率<sup>28)</sup>も

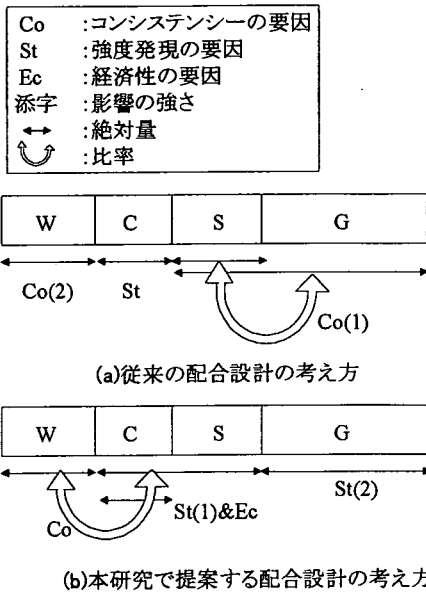


図-22 配合設計方法の比較

100%より小さくなるおそれがある。その場合は目標締固め率を96%に拘らず、これより小さく設定しても差し支えないと思われるが、その際は次の手順すなわち単位セメント量を決定する段階において、セメント量の増大による経済性の低下に留意する必要がある。本研究では比較のために従来の規準である96%を目標締固め率として議論した。

具体的には、(1)で決定した単位粗骨材容積を固定し、水粉体比 $W/P=22\sim 26\%$ 程度の範囲で3, 4点程度変化させ、水粉体比と締固め率の関係を求める。この関係から目標締固め率を満足する水粉体比を決定すればよい。

d) 単位セメント量の決定

b) およびc) で決定した単位粗骨材容積および水粉体比を固定し、単位セメント量を $270\sim 360\text{kg/m}^3$ の範囲で4点程度変化させ、所定の材齢における強度を求める。強度と単位セメント量の関係から、所要強度を満足する最小セメント量が決定される。

(2) 従来の設計方法との比較

図-22に従来と本研究の配合設計方法の比較を概念図として示す。従来は細骨材率を中心にコンシステンシーを調節していたが、ノーサンド状態においては細骨材率そのものが存在しないため、水粉体比によりコンシステンシーを定める。このとき、単位粗骨材量は決定しているため、水粉体比でコントロールできる配合条件の幅はやや小さくなる懸念され、その場合は粗骨材量を減じることになる。

水粉体比の決定により、総粉体量が定まり、その中でセメントの比率によって強度をコントロールすることになる。ここで、設計強度が発現する最小のセメント量にすることにより、経済性に対処する。粗骨材量の増加は単位水量の減少を目的としており、間接的な強度発現の要因と考えられる。

両者の共通点は強度発現がセメント量によることであり、それまでのアプローチが異なるところに特徴がある。本実験の結果からは、最終的なセメント量の違いは小さかった。また、FAのポズラン反応による長期強度の増進や、混和剤の減水効果は設計に入れていないことから、それらの有効性を導入することが出来れば、より経済的な配合も可能になると考えられる。

6. まとめ

本研究は、産業廃棄物であるFAの有効利用および海砂不足の観点から、NS-FA転圧コンクリートの配合設計方法を検討したものである。経済性を考慮し、JIS規格のII種に準ずるFA原粉をそのまま使用し、また混和剤無混入を条件とした場合において得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 振動締固めの方が突固めよりも締固め効果が大きく、単位粗骨材容積が大きく水粉体比が小さいほど両者の締固め効果の差異は顕著となる。
- (2) 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生じることなく十分な締固めが可能である。
- (3) NS-FA転圧コンクリートの締固め率は、単位粗骨材容積および単位セメント量とは相関が小さく水粉体比によって評価してよい。
- (4) NS-FA転圧コンクリートは単位セメント量 $300\text{kg/m}^3$ 程度で転圧コンクリートの配合強度が確保できる。
- (5) NS-FA転圧コンクリートの曲げ強度においては、FAのポズラン反応による長期強度の増進は非常に小さい。
- (6) NS-FA転圧コンクリートにおいて、FAを細骨材代替材料として十分適用できる。

なお、本研究の結果に基づいて、山口県道の一部において実施工を想定した現場試験を行い、NS-FA転圧コンクリートの施工性の確認と密度および強度の発現性を実験的に求めた。その結果、十分な施工性が確認でき、目標締固め率と目標強度の確保も可能であったことを追記する。今後はより大規模な現

場試験においても本コンクリートの実用性を確認する予定である。

#### 参考文献

- 1) 石炭灰ハンドブック：環境技術協会，日本フライアッシュ協会，pp. I-1-1-5，1995.
- 2) 馬越唯好，河野清，山地功二，川崎真治：非 JIS 灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.349-354，1997.
- 3) 河野清，川口修宏，三田正和，馬越唯好：ハイボリュームフライアッシュ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.
- 4) 藤江理生，疋田敬博，相馬達夫，辻子雅則：超固練りフライアッシュ高含有コンクリートの物性実験，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.673-676，1985.
- 5) 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.
- 6) 長瀧重義，大賀宏行，三宅且仁：フライアッシュを混和したコンクリートの強度とクリープ特性，セメント技術年報，No.37，pp.190-193，1983.
- 7) 三岩敬孝，戸川一夫，中本純次：フライアッシュの品質がセメントペーストの諸特性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.320-325，1998.
- 8) 川上俊器，原稔明，自閑茂治，日野浩二：フライアッシュの品質とダムコンクリート，セメント・コンクリート，No.538，pp.50-58，1991.
- 9) 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-44，pp.55-66，1999.
- 10) 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.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書（舗装編），pp.200-203，2002.
- 12) 日本道路協会：転圧コンクリート舗装技術指針（案），1990.
- 13) 小林正几：コンクリート混和材料，コンクリートブックス，No.21，セメント協会，pp.45-46，1972.
- 14) 吉武勇，中村秀明，谷本俊夫，浜田純夫：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.103-110，1998.
- 15) 福手勤，寺野宜成，石井光裕，國府勝郎：転圧コンクリート舗装の性能向上に及ぼす分級フライアッシュの効果，土木学会論文集，No.526/V-29，pp.85-95，1995.
- 16) 國分修一，加賀谷誠，徳田弘，川上洵：舗装用転圧コンクリートの締固め程度に及ぼす振動加速度および地盤係数の影響，土木学会論文集，No.571/V-36，pp.119-129，1997.
- 17) 中原康，万木正弘：転圧コンクリート舗装の施工実験およびコンクリートの品質管理，配合修正方法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.427/VI-14，pp.173-182，1991.
- 18) 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，pp.214-219，1968.
- 19) Timms, A.G. and Grieb, W.E.: *Use of Fly Ash in Concrete*, Proc. ASTM, 56, pp.1139-1157, 1956.
- 20) Kokubu, M., Yoshikoshi, M., Tashiro, N. and Ohashi, K.: *Design of Concrete Mixtures Using Fly Ash in Various Type of Large Dams*, Trans.8th Int. Congress on Large Dams, Edinburgh, Vol.3, Q. No.30, R-8, pp.139-160, 1964.
- 21) 桜井敏生，佐藤建，橋本匡史，福永誠：フライアッシュのボゾラン反応性，セメント技術年報，pp.101-109，1967.
- 22) 桑野陵一，篠田佳男，窪泰浩，今井澄雄：フライアッシュの品質変動がコンクリートの性状に及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文報告集，12-1，pp.45-50，1991.
- 23) 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ボ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.
- 24) 西村昭，藤井学，湊俊：最新土木工学シリーズ，最新土木材料第2版，pp.117-118，森北出版，1988.
- 25) 横田英嗣，寺田大治，伊藤秀敏：石炭灰を大量に使用したコンクリートの開発研究，土木学会中国支部第52回研究発表会，V-28，pp.623-624，2000.
- 26) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），pp.185-186，1996.
- 27) 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.
- 28) 杉森誠志，國府勝郎，三栖幸彦，上野敦，早川健司：転圧コンクリートの配合設計，転圧設計および施工管理に対する締固め性試験の応用，土木学会・フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題（コンクリート技術シリーズNo.37），pp.1-8，2000.

(2002. 2. 20 受付)

# AN EXPERIMENTAL STUDY ON MIX DESIGN OF NO SANDS FLY ASH ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT

Masanori OGI, Eiji MATSUO, Sumio HAMADA and Tadashi SAITOH

Recently, effective use of various industrial wastes has become a social problem seriously. Fly ash (FA) is one of those materials, which is produced from coal-fueled power plants plentifully. In this study, applicability of FA as a substitute of fine aggregate for roller compacted concrete was investigated experimentally. As a result, sufficient usability was confirmed even in 100% of replacing ratio so called no sands (NS) condition. Mix design method of NS-FA roller compacted concrete was proposed. Furthermore, unit weight of water can be reduced to  $150\text{kg/m}^3$  on this concrete by taking the unit volume of coarse aggregate for the percentage of absolute volume. The unit weight of cement was approximately  $300\text{kg/m}^3$ , which is almost the same as general roller compacted concrete.