

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

福手 勤¹・寺野宣成²・石井光裕³・國府勝郎⁴

¹正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室長 (〒239 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 住友大阪セメント(株) 中央研究所セメントコンクリート研究所 (〒274 千葉県船橋市豊富町585)

³正会員 工博 テクノ・リソース(株)企画開発部 (〒760 高松市丸の内2-5)

⁴正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-08 八王子市南大沢1-1)

近年、転圧コンクリート舗装(RCCP)が注目されているが、締固めと平坦性の確保の観点から1層施工の版厚が最大25cmに制限されている。このことが、RCCPを空港・港湾のような重荷重を対象とした舗装に適用していく上で大きな欠点となっている。この問題点に対処するため、一般のコンクリートにおいてコンシスティンシーの改善効果や耐久性向上の効果が認められている。粒径20μm以下に分級されたフライアッシュが、RCCPの締固め特性の向上、1層施工厚さの増大等の性能向上に及ぼす効果を検討した。一連の室内実験、試験舗装から、フライアッシュを混入することにより、①必要締固めエネルギーが低減できる、②単位水量が低減できる、③舗装版の下層部分の強度が上昇する、等の結果が得られ、35cmの版厚を有する RCCP の1層施工が可能であることが確認できた。

Key Words: classified fly ash, roller compacted concrete pavement, compactibility, airport pavement

1. まえがき

転圧コンクリート舗装 (Roller Compacted Concrete Pavement, 以下 RCCP という)は、従来の舗装用コンクリートより、大幅に水量を減じた超硬練りのコンクリートを路盤上に敷き均し、これを振動ローラによって転圧して締め固めて作られる舗装である。この RCCP の利点として、①特殊な施工機械を必要とせずアスファルト舗装と同様に施工速度が早い、②早期の交通解放が可能である、③従来のコンクリート舗装と同様に耐荷力に富む等があげられる。

ローラ転圧時には、コンクリート中の振動加速度は表面からの深さとともに減少し、締め固められたコンクリートの密度は下層ほど小さくなるので¹⁾、1層で転圧できる版厚には限度がある。「転圧コンクリート舗装技術指針(案)」²⁾(以下、指針(案)とする)では25cmを上限としている。そのため、エプロンなどの空港基本施設や港湾エプロンのように、一般的な道路舗装に比べて荷重が大きく、厚いコンクリート版厚が必要とされる場合には、上記の理由より上下2層に分けて施工せざるを得ない。このことが、空港・港湾の舗装に RCCP を本格的に適用していく上で解決すべき大きな技術課題となっている。

RCCP 用コンクリートの配合に関しては、機械による

施工性の確保のためには硬いコンクリートが望まれ、また密実で高い充填性を得るために柔らかいコンクリートが必要とされるため、その両面から適切な締固め特性を有するコンクリートの配合が決定されなければならない。1層施工厚さを今以上に増大させるために与える締固めエネルギーを大きくすることは施工機械の特殊化、大型化につながり、一般的には得策とはならないことから、材料面からの改善により必要締固めエネルギーの小さいコンクリートとすることが有効であるものと考えられる。

一方、石油代替エネルギーとして石炭が見直されている現在、火力発電所における石炭使用量の増大に伴い、その産業副産物である石炭灰の発生量が増大している。この石炭灰のうち JIS A 6201「フライアッシュ」の規定を満足するものは、コンクリート用混和材としてしばしば用いられている。

フライアッシュのコンクリート用混和材としての効果は、①ワーカビリティーの改善、②単位水量の低減、③化学抵抗性の向上、④水和熱の低減、⑤アルカリ骨材反応の抑制、等が挙げられる。しかし、近年、環境対策に伴う燃焼条件の変化や使用炭の多様化に伴って品質が低下しており、コンクリート用混和材としての品質を満足するものが減っている。こうしたことから、フライアッシュの品質低下の克服を目的として、微粒分だけを気流

分級することにより、フライアッシュの粒度および粒形を改良した分級フライアッシュ^{3),4)}が開発されている。

このような背景から、分級フライアッシュを混和材として転圧コンクリートに有効的に利用し、その結果として1層施工可能な版厚を増大させることができれば、環境対策をも念頭に置いた、重荷重を対象としたRCCPの発展・普及につながることになる。

本研究では、まず分級フライアッシュを混入した転圧コンクリートを用いて締固め性試験(Compactibility test)⁵⁾を実施し、その結果から配合上の種々のパラメータがコンクリートの締固め特性に及ぼす影響を考察する。さらに、実際に厚さ35cmの版を1層で転圧した試験舗装を施工し、その結果から1層で締固め可能な舗装版厚の増大を検討する。

2. 分級フライアッシュの混入効果確認のための室内試験

(1) 概要

本章では、分級フライアッシュを混入した配合と混入していない配合を比較し、分級フライアッシュの使用が、転圧コンクリートの締固め特性の改善に及ぼす効果を室内試験から検討する。

(2) 使用材料

a) セメント

セメントはJIS R 5210を満足する普通ポルトランドセメント(以下、OPCとする)で、表-1に示す化学成分および物理的性質を有するものを用いた。

b) フライアッシュ

フライアッシュは、JIS A 6201を満足する一般市場品(以下JFAとする)および20μm以下の粒径に気流分級した分級フライアッシュ(Classified Fly Ash, 以下、CFAとする)で、表-2に示す化学成分および物理的性質を有するものを用いた。

c) 骨材

細骨材として香川県室木産の海砂(粗粒率F.M.=2.73)、また粗骨材として大阪府高槻産の2005碎石(F.M.=6.63)を用いた。

(3) 転圧コンクリートの配合

本実験に用いたコンクリートの配合を表-3に示す。まず、骨材の粒度構成や水量の影響を排除するために、単位水量および骨材の種類・配合を一定とし、結合材の容積を一定とした状態で、セメント質量の20%をJFAおよびCFAで置換した表中(a)の配合を用いて実験を行った。次に単位水量および細骨材率を変化させた配合(b)、(c)について実験を行った。以下、本報告では、

表-1 普通ポルトランドセメントの化学成分および物理的性質

項目 区分	比重	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	化学組成(%)				圧縮強度(MPa)		
				MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl	3日	7日	28日
OPC	3.16	3240	1.5	1.6	2.1	0.65	0.007	17.0	27.0	42.1

表-2 フライアッシュの化学成分および物理的性質

項目 区分	比重	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	化学組成(%)					メレバーレ 吸着量 (mg/g)	材齢28日での 圧縮強度比(%) (A~B=41.1MPa)	
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		
CFA	2.36	5400	3.3	59.8	26.5	2.5	3.6	1.5	0.0	0.50	90.5
JFA	2.23	3100	1.7	53.7	28.2	6.3	4.7	1.4	0.6	0.20	82.4
JIS規格値 以上 以下	1.95 2.400	5 45 以上 以下	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	60以上	

表-3 転圧コンクリートの配合

(a)

項目 区分	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	F	S	G
OPC			342	—		
OPC+JFA	40	100	252	63	817	1278
OPC+CFA			256	64		

(b)

項目 区分	細骨材(%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	F	S	G
OPC	95 100 105 110 115 120	320	—	—	829	1297
					824	1289
					819	1281
					814	1273
					809	1265
					804	1257
OPC + JFA	95 100 105 110 115	256	64	—	821	1284
					816	1276
					810	1267
					805	1259
					800	1251
OPC + CFA	95 100 105 110	256	64	—	822	1286
					817	1278
					812	1270
					807	1262

(c)

項目 区分	細骨材(%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	F	S	G
OPC	36 38 40 42 44	115	320	—	728	1349
					768	1307
					809	1265
					849	1223
OPC + JFA	40 42 44 46	110	256	64	890	1180
					805	1259
					845	1217
					886	1175
OPC + CFA	40 42 44 46	100	256	64	926	1133
					817	1278
					858	1236
					899	1193

セメント単独を OPC, OPC の一部を JFA で置換したものを OPC+JFA, CFA で置換したものを OPC+CFA と記すこととする。

(4) 試験方法

a) 締固め性試験⁶⁾

転圧コンクリートの締固め特性の検討に用いた試験装置は、加振部とコンピュータによるデータ処理部から構成される装置である。この装置では、加振機に固定した円筒形型枠 ($\phi 15 \times 30 \text{ cm}$) 中の試料の締固めに伴う沈下量から試料の充填率を求め、充填率と締固めエネルギーとの関係（締固め曲線）からコンシスティンシーの評価を行うことができる。ここでいう充填率とは、示方配合において、空隙ゼロでの理論密度で試料密度を除したものを見積り表示したものである。

試料は、ゼロ空隙の状態、すなわち充填率が 100% となった場合に、型枠内で厚さが 20 cm となる量を計り取って 3 層に分けて投入し、各層を突棒で 22 回突いて準備した。最後に上面を均して上載板をセットした。

試料を入れた型枠を振動数一定で上下に振動させ、そのときの型枠の加速度を加速度計で測定するとともに、試料上面の上載板の変位を 0.3 秒ごとに変位計により計測する。これらのデータはコンピュータに転送された後、変位は充填率に変換され、締固めエネルギーとの関係として CRT 画面上に表示される。

なお、締固めエネルギーは、式(1)によって計算している⁶⁾。

$$E = \frac{m \cdot a_{\max}^2 \cdot t}{4\pi^2 n} \quad (1)$$

ここに、
E : 締固めエネルギー (J/ℓ)

m : 試料の単位容積質量 (kg/ℓ)

a_{\max} : 振動機の最大加速度 (m/s^2)

n : 振動数 (Hz)

t : 締固め時間 (s)

b) セメントおよびフライアッシュの粒度分布

セメント、フライアッシュおよびセメントの一部をフライアッシュで置換した試料の粒度分布をレーザー回折式粒度分布計により測定した。

c) セメントおよびフライアッシュの粒子形状

セメントおよびフライアッシュの粒子形状を走査型電子顕微鏡により観察した。

(5) 室内試験結果および考察

a) 分級フライアッシュの混入が充填率に及ぼす影響

図-1 は、単位水量および骨材量を一定とし、結合材の容積を一定とした状態において、セメント質量の 20% を JFA および CFA で置換した試料の締固め曲線を示す。この図より、JFA による置換では充填率の上昇は見

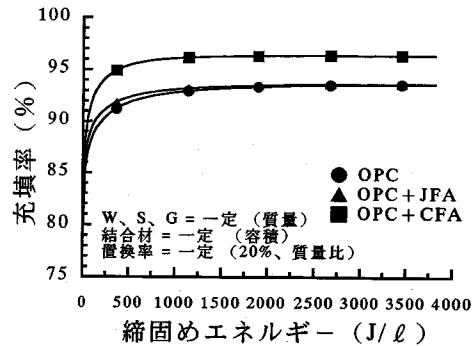


図-1 締固めエネルギーと充填率の関係

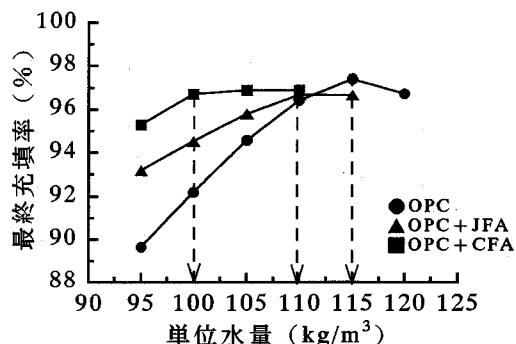


図-2 単位水量と最終充填率の関係

られないが、CFA による置換によって締固め特性は改善され、同じ締固めエネルギーのもとで充填率は上昇することがわかる。

このことは、CFA の混入によって細骨材粒子間の摩擦がポールベアリングの効果^{3),7)}によって減少し、結果として締固め特性が改善されるとともに、マイクロフィラー効果による充填率が向上したものと考えられる。また、JFA は通常のコンクリートにおいて同様なポールベアリング効果が認められているが、転圧コンクリートのように単位水量が極端に少ない配合では、そのような効果は明瞭には現れていないようである。

b) 分級フライアッシュの混入による単位水量の低減効果

図-2 は、締固め性試験で得られる最終的な充填率(最終充填率)と単位水量との関係を示したものである。配合は細骨材率を 45%, 結合材(OPC, OPC+JFA, OPC+CFA) 量は $320 \text{ kg}/\text{m}^3$ で一定とした。この図から、OPC では、単位水量が $115 \text{ kg}/\text{m}^3$ の場合に最大の最終充填率を示すことがわかる。また、JFA および CFA で置換した場合には、単位水量が $110 \text{ kg}/\text{m}^3$ および $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ で最終充填率がそれぞれ最大となることがわかる。このことより、セメント質量の 20% を JFA, CFA で置換すること

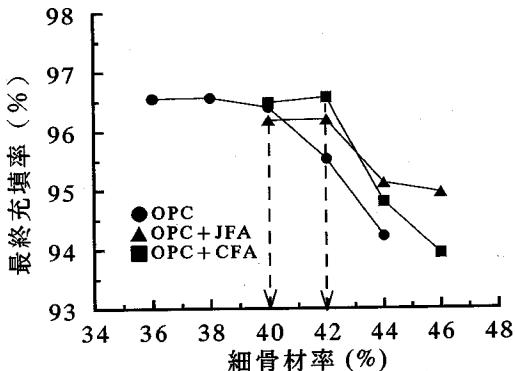


図-3 細骨材率と最終充填率の関係

により約5 kg/m³および15 kg/m³の単位水量がそれぞれ減少できることがわかる。

c) 分級フライアッシュの混入が最適細骨材率に及ぼす影響

図-3は、単位水量および単位結合材量を一定としたときの最終充填率と細骨材率との関係を示したものである。

この図において、OPCでは、細骨材率が36%から40%の間ではほぼ一定の充填率を示しているが、40%の値を越えると充填率は減少することから最適細骨材率は40%と評価される。また、OPC+JFAおよびOPC+CFAでは、両配合ともに40%～42%の細骨材率では同程度の充填率を示しており、最適細骨材率は42%であるといえる。

転圧コンクリートのような超硬練りコンクリートにおいては、細骨材率が小さいと粗骨材粒子相互の内部摩擦抵抗が大きくなり、また、細骨材率が大きすぎると微細空隙を追い出し難くなることから、締固め効率の良い最適細骨材率が存在することが指摘されている⁶⁾。OPC+CFAまたはOPC+JFAを用いた場合に細骨材率をある程度増大しても一定締固めエネルギーにおける充填率が低下しにくいのは、フライアッシュによるボールベアリング効果あるいはマイクロフィラー効果によるものと考えられる。

一般に、細骨材率は所要のワーカビリティーの得られる範囲内で単位水量が最少となるよう定めるのが原則である。

一方、加形ら⁸⁾によれば、ある程度細骨材率を大きくした方が RCC 版の上下層の充填率の差が小さくなることが指摘されている。OPC+CFAを使用することによって締固め性が向上するので、舗装材料として許容できる範囲内で細骨材率を大きくすることは、1層で舗設できる版厚を増大することが可能となり、重荷重に対応した RCCP を施工できることにつながるものと考えられる。

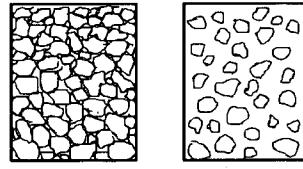


図-4 粗骨材粒子の配列

d) 骨材の粒子間隔と充填率の関係

転圧コンクリートの締固め特性について、その細骨材率が影響することが明らかとなった。ここでは、骨材粒子の間隔と充填率との関係より、締固めについての考察を加える。

細骨材率、すなわち骨材の粒度分布のほかに、モルタル中の細骨材の空隙に対するペーストの容積の割合(K_p)、およびコンクリート中の粗骨材の空隙に対するモルタルの容積の割合(K_m)を用いて、コンクリートの締固め特性を表現しようとする研究が中原らによって行われている⁹⁾。

$$K_p = \frac{\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3\text{ 中のペーストの容積}}{\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3\text{ 中の細骨材が作る空隙の容積}}$$

$$= \frac{W/\rho_w + C/\rho_c + F/\rho_f}{(1/T_s - 1/\rho_s)S} \quad (2)$$

$$K_m = \frac{\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3\text{ 中のモルタルの容積}}{\text{コンクリート } 1 \text{ m}^3\text{ 中の粗骨材が作る空隙の容積}}$$

$$= \frac{W/\rho_w + C/\rho_c + F/\rho_f + S/\rho_s}{(1/T_c - 1/\rho_c)G} \quad (3)$$

ここに、

W : 単位水量 (kg/m³)

C : 単位セメント量 (kg/m³)

F : 単位フライアッシュ量 (kg/m³)

S : 単位細骨材量 (kg/m³)

G : 単位粗骨材量 (kg/m³)

ρ_w : 水の比重、 ρ_c : セメントの比重

ρ_f : フライアッシュの比重

ρ_s : 細骨材の表乾比重、 ρ_c : 粗骨材の表乾比重

T_s : 細骨材の単位容積質量 (kg/l)

T_c : 粗骨材の単位容積質量 (kg/l)

図-4は、粗骨材粒子の配列と K_m の関係を概念的に表したものである。 $K_m=1$ の場合には粗骨材が形成する空隙をモルタルが完全に満たし、しかも粗骨材粒子が相互に接している状態を表わす。密実なコンクリートを得るためにには、粗骨材間にモルタルがゆきわたり、十分に締固めできるものでなければならない。このためには、粗骨材の空隙よりも多いモルタル量、すなわち $K_m > 1$ であることが必要となる。 K_p についても細骨材粒子とペースト量との間に同様な関係が考えられる。

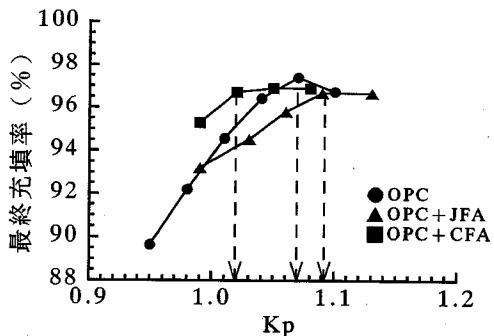


図-5 Kp と最終充填率の関係

図-5は、図-3をKpと最終充填率の関係に表現し直したものである。いずれの配合に関してもKpの値が1.0から1.1の範囲で最大の充填率を示している。また、OPCおよびOPC+JFAと比較して、OPC+CFAでは小さいKpで高い充填率が得られていることがわかる。このことは、細骨材のつくる間隙がより少ないペースト量で充填されていることを示しており、CFAを混入することにより、ペーストをより充填しやすい状態に変化させ、結果として少ない量のペーストで十分に間隙が満たされるようになったためと考えられる。

つぎに、式(2)、(3)に加えて、コンクリート全体積を表す式(4)を用いてコンクリートの配合を考えてみる。

$$1000 = W/\rho_w + C/\rho_c + F/\rho_f + S/\rho_s + G/\rho_g \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)のうち未知数は、W、C（または単位結合材量：C+F）、S、G、およびKp、Kmの6個であるので、このうち3個を仮定すれば配合が決定できることになる。したがって、骨材の粒子間隔を示すKp、Kmの値とペースト自体の粘性を示すと思われる水結合材比をパラメーターとして配合が決定できる。

まず、骨材粒子間隔が充填率に及ぼす影響について明らかにするため、普通セメント単独の配合で粗・細骨材の粒子間隔（Kp、Km）を変化させた場合での締固め特性を考える。

一方、図-6は水セメント比を一定（W/C=35.9%）とし、Kp、Kmを変化させて締固め性試験で得られた最終充填率の変化を等高線で示したものである。この図において、充填率が最大となるようなKpおよびKmの範囲を表現できることがわかる。

一方、図-7は、図-6に示した実験に用いた配合におけるKpおよびKm、単位水量の関係を等高線で表したものである。コンクリートの配合においては、少ない単位水量で同等の充填率を達成できることが理想的である。

したがって、図-6と図-7を重ね合わせ、最も高い

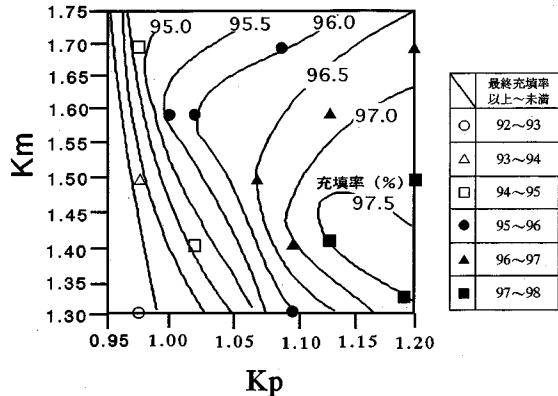


図-6 Kp, Km と最終充填率の関係

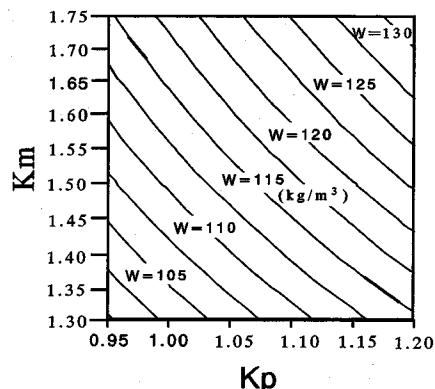


図-7 Kp, Km と単位水量の関係

充填率の97.5%を示す等高線と最も少ない単位水量の等高線の交差する点が最適単位水量と考えられ、今回の実験では最適単位水量は115 kg/m³と決定できる。

以上の結果から、水セメント比が一定、すなわちペーストの粘性、流動性が一定の状態で、最大の充填率を得る細骨材および粗骨材の粒子間隔、すなわち最適な骨材粒度構成が存在し、そのときの最適な単位水量が求められることがわかった。また、Kp値が同じであってもKm値が異なることによって、すなわちある配合でモルタルの構成は同じでも粗骨材とモルタルの構成比率が違うことによって、充填率が左右されることから、コンクリートの締固め特性はモルタルの流動性および締固め特性だけではなく、粗骨材のつくる空隙とモルタル量の関係も大きく関与することがわかった。

e) 粒度分布および粒子形状の測定結果¹⁰⁾

図-8は本実験に用いたOPCおよびJFA、CFA、OPC+JFA、OPC+CFA、5種類の試料の粒度分布を示したものである。これらの図より、CFA粒子はOPC、

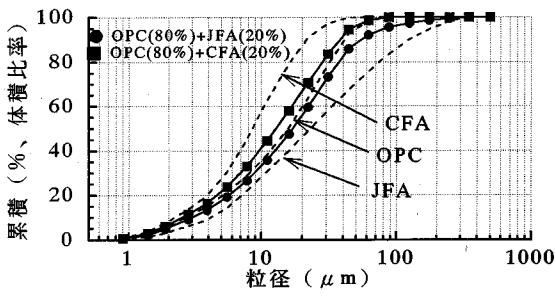


図-8 粒度分布

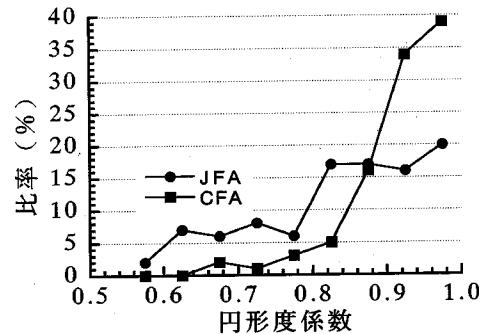


図-9 円形度係数測定結果

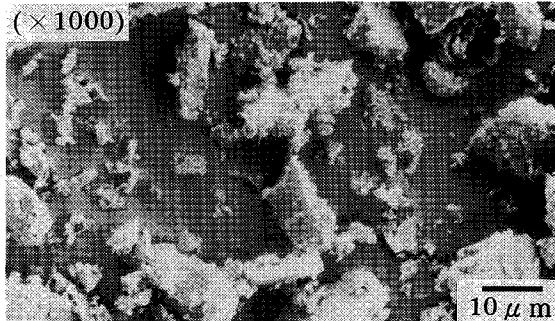


写真-1 (a) OPC の粒子形状

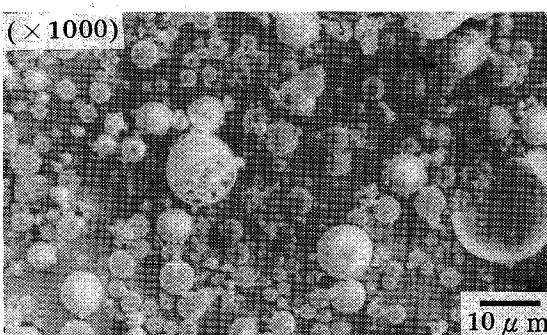


写真-1 (b) JFA の粒子形状

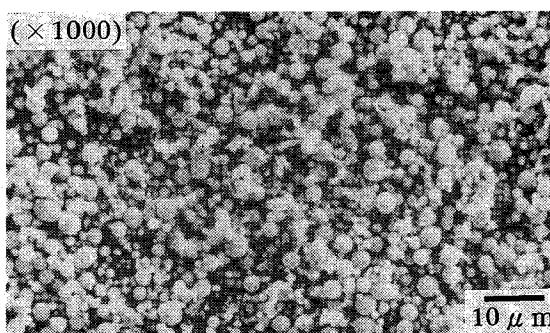


写真-1 (c) CFA の粒子形状

JFA よりも粒度が細かく、その粒度範囲も狭いことがわかる。また、JFA, CFA を混入したものの粒度分布にはあまり差がみられず、20%の置換では粒度分布に見かけ上大きな変化を与えていないことがわかる。

写真-1は OPC および JFA, CFA の粒子形状の電子顕微鏡写真である。OPC はフライアッシュと比べて不規則な形状を示している。また JFA 粒子は、比較的細かい粒子はなめらかな球形を示しているものの、粗い粒子は碎けた形状で不規則なもののが一部みられる。これに対し、CFA 粒子はなめらかな球形を示していることがわかる。

図-9 は JFA および CFA に対し、画像解析装置を用いて粒子の円形度係数を求めた結果を示したものである。円形度係数は球形度を評価する一つの指標であり、式(5)によって計算され、この値が1に近づくほど円に近い形を示すものである。

$$\text{円形度係数} = \frac{4\pi \times \text{面積}}{(\text{周囲長})^2} \quad (5)$$

図-9 から、JFA 粒子は円形度係数が広い範囲に分布しているのに対し、CFA 粒子は1付近の比率が高くなっていることがわかる。粒度分布および粒子形状の測定結果より、CFA は、JFA と比較して非球形の粗粒子がほとんど認められない、ほぼ球形の微粒子であるといえる。

以上の結果から判断して、JFA および CFA の混入による単位水量減少の効果の違いは、粒度分布の差によるものだけではなく、粒子の形状の違いと、それに起因するボルベアリング効果の違いによるものと思われる。

しかしながら、図-3において OPC+JFA, OPC+CFA とともに、最適細骨材率は 42% となっていることから、フライアッシュの粒子形状および表面形状の違いが細骨材率に及ぼす影響は認められなかった。

f) 分級フライアッシュの混入が品質安定性の向上に及ぼす効果

図-10 は、OPC および OPC+CFA において、夏場の施工を想定し、練上がり直後より 35°C の高温養生室内に

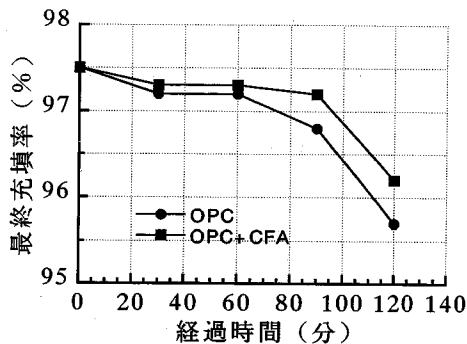


図-10 最終充填率の経時変化

放置し、30分ごとに締固め性試験を行い、経過時間と最終充填率の関係を示したものである。なお、試料は表面の乾燥を防ぐためビニールシートで覆ったが密封しない状態とした。この図より、高温状態における経過時間、すなわち夏場におけるコンクリートの練混ぜ直後から転圧までの経過における、その締固め性能の低下は、CFAを混入することによって少なくなることがわかる。

これらの結果により、CFAを混入することによりコンクリート自体の品質は安定したものとなり、プラントおよび現場施工における品質管理が容易となることがわかる。

以上、室内試験の結果より、分級フライアッシュの混入によりコンクリート自体の締固め特性が改善され、1層施工が可能な版厚を増加させる可能性を示しているものと考えられる。

3. 分級フライアッシュの混入効果の確認のための試験舗装

(1) 概要

室内試験の結果により、転圧コンクリートの締固め特性の改善並びに品質安定性の向上に及ぼすCFAの効果が明らかとなり、1層で施工可能な舗装版厚の増大が可能であることが示された。しかし、実際の施工において、版厚が厚い場合に版の下層部分で十分な締固め密度や強度が得られるものか、また、1層施工される版厚が増した際に路面の平坦性の確保が可能かどうか確認する必要がある。

このようなことを目的として、実際に普通セメントのみを用いたコンクリートとともに、CFAを混入したコンクリートを用いて、厚さ35cmの版を1層で施工する試験舗装を行った¹¹⁾。

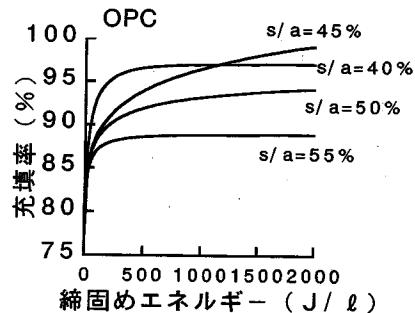


図-11(a) 締固めエネルギーと充填率の関係(OPC)

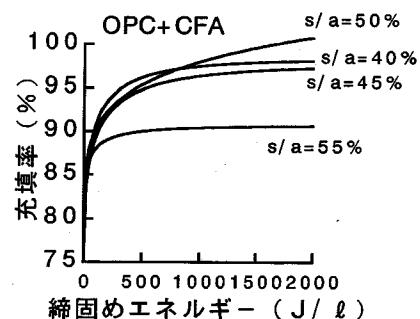


図-11(b) 締固めエネルギーと充填率の関係(OPC+CFA)

(2) 使用材料

試験舗装に用いたOPCおよびCFAは、室内試験に用いたものと同じものを用いた。細骨材は千葉県君津産の山砂(F.M.=2.46)、粗骨材には山口県美祢産の一般舗装用に用いられている石灰石碎石(F.M.=6.60)を用いた。

(3) 転圧コンクリートの配合

転圧コンクリートの設計基準曲げ強度は、45kgf/cm²(4.4MPa)とした。2.(5)c)に示したように、転圧コンクリートでは細骨材率が大きいほど、施工されたRCCP版の上層と下層の充填率の差は減少することがわかっている。25cmを超える版厚では、細骨材率はできるだけ施工性を損なわない程度に大きくすることが望ましいと考えられる。よって配合設計は室内試験の結果を考慮し、以下の手順で行った¹²⁾。

① 単位水量の決定

まず、単位結合材量(C+F)を320kg/m³、細骨材率(s/a)を45%と仮定した。単位水量は振動締固め試験の結果より、OPCで97kg/m³、OPC+CFAで93kg/m³と決定した。ここで得られたCFAによる単位水量の低減効果は2.(4)で得られたものよりも小さいが、これは主に骨材の性質の違いに起因するものであろう。

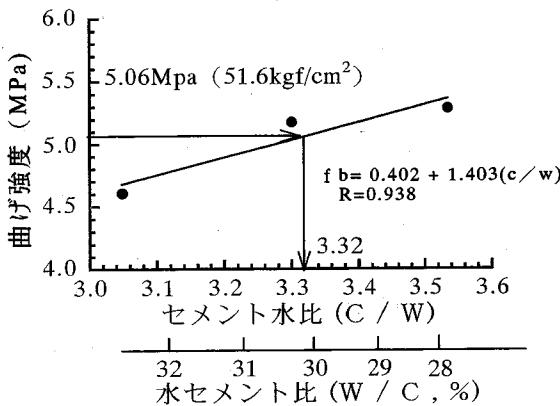


図-12 セメント水比と曲げ強度の関係

表-4 転圧コンクリートの配合 (試験舗装)

セメント	粗骨材 の 最大寸法 (mm)	W/B* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						材齢91日 曲げ強度 室内 (MPa)
				W	C	分級 フライ アッシュ F	S	G	AE 減水剤 (C×%)	
OPC	20	30.1	42	97	322	—	868	1255	0.25	5.9
OPC+CFA		28.9		93	258	64	865	1250		5.6

* B = C + F 設計基準曲げ強度: 4.4 MPa (45 kgf/cm²)

② 細骨材率の決定

①で得た単位水量および単位結合材量により、細骨材率を変化させた配合で振動締固め性試験を行い、施工性を損なわない程度にできるだけ大きい細骨材率を採用した。図-11(a), (b)の結果より、最終充填率が最大となるOPCで45%, OPC+CFAで50%を採用した。

③ 単位結合材量の決定

①および②で得られた細骨材率および単位水量を用い、単位セメント量の異なる普通セメント単独の配合のセメント水比と材齢28日曲げ強度の関係は図-12のようになる。作製した供試体の本数は各3本であり、その3本の強度の分散を計算すると10.6となった。実際の施工でのばらつきをやや大きく見積もり、分散値15.0の場合の割り増し係数1.146を用い、配合強度を51.6 kgf/cm²(5.06 MPa)と定めた。なお、指針(案)では、実際の施工での強度のばらつきや、深さ方向へ充填率が減少することによる強度低下を考慮して配合強度を8 kgf/cm²(0.8 MPa)割増している。しかし、今回の試験舗装では、コンクリート材料を変えたときの実施工での強度の変化、特に深さ方向の強度変化を確認することを目的としているため、配合強度の8 kgf/cm²(0.8 MPa)の割増は採用しなかった。

この配合強度に対応するC/Wは3.32となり、単位水量97 kg/m³に対して単位セメント量322 kg/m³となる。CFAを混入した場合の配合は、単位結合材量を322 kg/m³

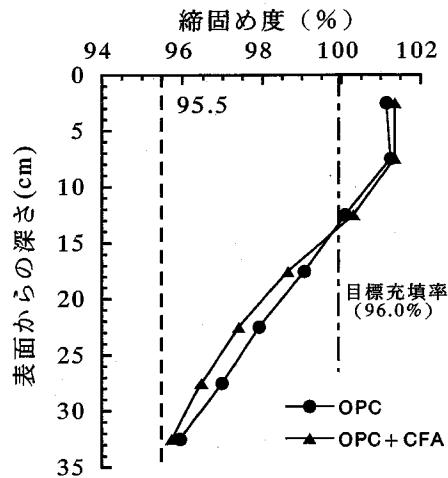


図-13 表面からの深さと締固め度の関係

m³一定とし、CFA置換率を20%（質量比）とした。

④ プラントでの試験練りによる配合の決定
施工前日にプラントにて実機による試験練りを行い、表-4のような最終的な配合を決定した。

(4) 舗装構造

試験舗装における転圧コンクリートのセメントにはOPCおよびOPC+CFAを用い、各レーンとも幅員7m、延長50m、版厚35cmである。路盤は粒調碎石路盤（層厚15cm）とセメント安定処理路盤〔弾性係数E=40,000~100,000 kgf/cm²(3.9~9.8 GPa)、層厚15~20cm〕で構成され、その上に厚さ5cmのアスファルト中間層が施工されている。

(5) 転圧コンクリートの舗設

コンクリートの初期転圧には水平振動ローラを使用し、無振動で2回、有振動で4回転圧を行った。2次転圧には大型振動ローラを使用し、十分な締固めが得られるよう無振動で2回、有振動で6回程度転圧した。仕上げ転圧はタイヤローラで行った。また、舗設後1週間は養生マットを用いた散水養生を行った。

(6) 試験項目

- ① コアによるコンクリート充填率
各レーンにおいて舗設7日後に、Φ10×35cm(版厚)のコアを切り出し、深さ方向5cm毎に切断してコンクリートの密度を測定し、充填率の深さ分布を求めた。
- ② 曲げ強度
指針(案)に記されている供試体作製手順に従って現場で管理試験用供試体を作製し、20°Cの恒温水槽で養生を

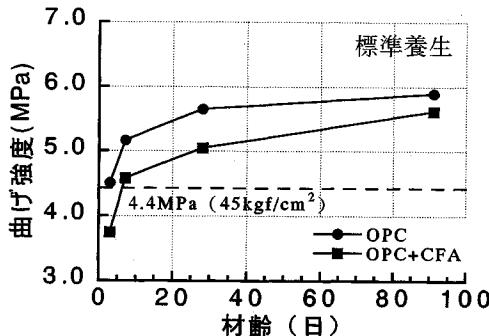


図-14 曲げ強度試験結果（管理試験用供試体）

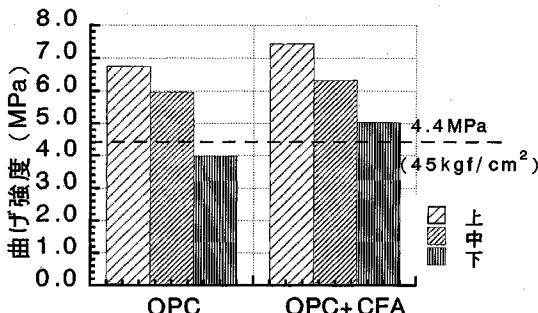


図-15 曲げ強度試験結果（現場採取）

行った。そして材齢 3, 6, 28, 91 日に達した時点で、JIS A 1106 に従って曲げ強度試験を行った。

また、材齢 4 ヶ月の時点で、各レーンから幅 10 cm × 深さ 10 cm × 長さ 40 cm の曲げ強度試験用供試体を深さ方向に 3 体切り出して、ただちに曲げ強度試験を行った。
③ 平坦性

平坦性試験は、「舗装試験法便覧」¹³⁾に従い、3 m プロフィルメーターを用いて、ひずみ計埋設位置を避けた各レーンの縦断方向に 2 測線で測定を行った。

(7) 試験舗装の結果および考察

a) コアによる充填率

図-13 に、RCCP 版より切り出したコアの充填率を、目標充填率 (96.0%) で除した値である「締固め度」で表した結果を示す。指針(案)では充填率そのものの値よりも、締固め度を用いて出来型管理を行っており、合格判定値を締固め度 95.5% 以上としている。図-13 はいずれの配合もこの値を満足しており、35 cm 版厚の 1 層施工が可能であることを示唆している。

b) 曲げ強度

図-14 に、標準養生を行った管理試験用供試体による曲げ強度試験の結果を示す。

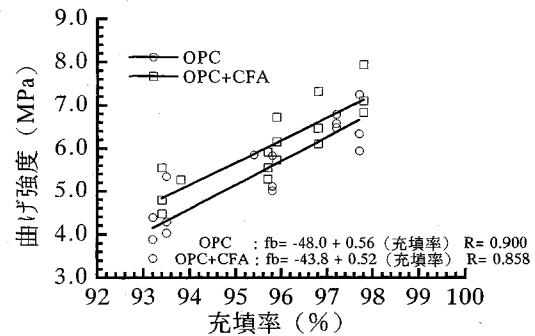


図-16 曲げ強度試験の関係

この図より、CFA によりセメントの 20% を置換すると、セメント単独のものと比べて幾分強度は低下するものの、両者とも材齢 7 日で設計基準強度の 45 kgf/cm^2 (4.4 MPa) を越えており、また材齢 91 日ではセメント単独のものとほぼ同じ強度発現を示すことがわかる。

図-15 に、施工 4 箇月後に現場より切り取った供試体の曲げ強度試験結果を示す。図より、OPC では下層部分で設計基準強度の 45 kgf/cm^2 (4.4 MPa) を満足してはいないが、OPC+CFA では 50 kgf/cm^2 (4.9 MPa) に達している。また、上層部分の強度も高いものとなった。

図-16 は、曲げ試験に用いた切り取り供試体の充填率と曲げ強度の関係を示している。図より、データにばらつきはあるものの、CFA を混入することにより、同一充填率において曲げ強度が高くなることがわかった。これは、水粉体比の違いに起因するペースト自体の強度の違いのほか、一定体積中に存在する空隙量が同じであっても、その空隙の分布の状況が異なれば曲げ強度に影響を与えるためと考えられる。すなわち、比較的大きな空隙が存在した場合、その部分に応力集中が起こり破壊のきっかけとなりやすいために強度低下の原因となるが、CFA を混入したコンクリートでは大きな空隙は CFA 粒子に充填されて、小さい空隙が多く分散しているためと思われる。このような現象は、指針(案)に示されている方法にしたがって作製した供試体による曲げ強度試験の結果(図-14)の結果には表れていない。この原因としては、室内における電動タンパによる締固めと、実際の施工の締固め方法およびエネルギーの伝達等の影響が考えられる。

d) 平坦性試験結果

縦断方向 2 測線で測定された平坦性の結果は、OPC を使用したレーンで 3.2 mm, OPC+CFA のレーンで 3.6 mm であった。指針(案)に示される合格判定値は 3.0 mm とされており、今回の試験舗装ではこれを満たしていないが、施工延長が 50 m と短いことを考慮すると、実際の長距離での施工ではより平坦性が向上し、セメントト

単独およびCFAを混入した配合ともに合格判定値を満足するものと考えられる。

4. 結論

本報告では分級フライアッシュを混入した転圧コンクリートを対象として、室内試験および試験舗装を行い、いくつかの新たなる知見が得ることができた。

室内試験より得られた結論は、以下のとおりである。

(1) 分級フライアッシュの混入により、締固め特性の改善、充填率の上昇効果が得られる。

(2) 分級フライアッシュの混入により、普通セメント単独の配合のものと比較して、約 15 kg/m³程度単位水量が低減できる。

(3) 分級フライアッシュの混入により、細骨材率を増加させても締固め性能が低下しにくくなる。

(4) 分級フライアッシュの混入により、水量の変動に対する充填率の変化が小さくなり、安定した品質を得ることができる。

(5) 転圧コンクリートの充填率は、モルタルの締固め特性だけではなく、粗骨材のつくる空隙とモルタル量との関係にも左右される。

(6) フライアッシュの粒子形状、球形度の違いが単位水量減少の効果に大きく左右する。

試験舗装より得られた結論は、以下のとおりである。

(1) コアによる充填率測定結果より、セメント単独および分級フライアッシュを混入した両配合とも、十分な締固め度を示しており、35 cm 版が 1 層施工できる可能性を示唆するものである。

(2) 曲げ強度の深さ方向の変化に関し、分級フライアッシュを混入することは、RCCP で一般的に見られる下層部分の強度低下を軽減させる効果があり、下層部でも設計基準曲げ強度を満足する。

(3) 平坦性試験結果より、35 cm 版厚の施工でも平坦性の確保は可能であると思われる。

室内試験および試験舗装により得られた結果を総括、整理すると、分級フライアッシュを混和材として転圧コンクリートに用いることにより、現行の 1 層施工上限厚の 25 cm を越える 35 cm の版厚が 1 層により施工可能となることが示された。また、このことは特に空港・港湾のような重荷重を対象とした舗装への RCCP の適用、普及につながるものである。

本研究では、フライアッシュ粒子の形状、表面性状が最適細骨材率の増大効果に及ぼす影響、すなわち、フライアッシュ粒子の持つ特性が、締固めメカニズムにどのように関与しているものなのか、また、単位水量の低減が、RCCP 版のひずみ変化に及ぼす影響など明確にはできなかった。今後の研究課題であると思われる。また、

舗装の構造上、コンクリート版の上層と下層の強度やヤング係数の違いが舗装版自体の耐荷性、耐久性にどのような影響を与えるものか検討が必要であろう。

謝辞：本研究の遂行にあたり東京都立大学 上野敦助手、運輸省港湾技術研究所 濱田秀則主任研究官およびテクノコンサルタント(株)真下昌章氏に御協力いただいたことに、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 前田強司、西岡 哲、丸山光義、森田純一：超硬練りコンクリートの振動締固め施工実験、土木学会第 43 回年次学術講演会, pp.344-345, 1988.
- 2) 日本道路協会：転圧コンクリート舗装技術指針(案), 1990.
- 3) 浮田和明、石井光裕、重松光裕、野尻陽一：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性、第 10 コンクリート工学年次論文報告集, pp.1-6, 1988.
- 4) 石井光裕、浮田和明、重松光裕：分級フライアッシュによるコンクリートの品質向上について、土木学会第 42 回年次学術講演会, pp.628-629, 1987.
- 5) 國府勝郎、近藤拓也、上野 敦：RCCP 用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究、セメントコンクリート論文集, Vol. 46, pp.964-969, 1992.
- 6) Kokubu, K., A.Ueno and T.Kondoh: Studies on Compatability and Its Test Method of Extremely Dry Concrete Used for Roller Compacted Concrete Pavement, *Fifth International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Vol. 2, pp.271-280, 1993.
- 7) 国分正胤：フライアッシュおよびフライアッシュセメント、セメント・コンクリート, No. 267, pp.2-18, 1969.
- 8) 加形 譲、渕上 学、坂田廣介：舗装用転圧コンクリートの配合設計法に関する一検討、第 43 回セメント技術大会講演集, pp.812-817, 1989.
- 9) 中原 康、横田慎一、平田重信：超硬練りコンクリートの配合の考え方とコンシスティンシー、セメント・コンクリート, No. 384, pp.12-18, 1979.
- 10) Fukute, T., Nakano, K. and Ishii, M.: Improvement of Cahracteristics of Roller Compacted Concrete by Classified Fly Ash, *Proceedings of Fly Ash, silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, ACI SP-153 Vol. 2, pp.367-383, 1995.
- 11) 福手 勤、三浦幸治、寺野宣成、石井光裕：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混入効果、運輸省港湾技術研究所報告、第 33 卷、第 4 号, pp.43-68, 1994.
- 12) 福手 勤、寺野宣成、石井光裕：分級フライアッシュを混入した転圧コンクリートの重荷重を対象とした舗装への適用性について、セメント・コンクリート論文集, No. 48, pp.888-893, 1994.
- 13) 日本道路協会：舗装試験法便覧、1988.

(1995.2.3 受付)

EFFECTS OF CLASSIFIED FLY ASH ON IMPROVING PERFORMANCE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS

Tsutomu FUKUTE, Yoshinari TERANO, Mitsuhiro ISHII
and Katsuro KOKUBU

A series of laboratory tests and a full scale test pavement were carried out to examine the effects of classified fly ash (CFA) on improving quality and workability of roller compacted concrete (RCC) pavements. From those experiments, it became clear that CFA can improve the compactibility and reduce the unit water content. Furthermore, CFA can contribute to increase RCC slab thickness up to 35cm executed in one layer without loss of flexural strength in lower part of compacted slabs. These are desirable results to apply RCC for heavy duty pavements such as airport and seaport pavements.