

[74] フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの舗装路盤への適用性

正会員 ○鳥 居 和 之 (金沢大学工学部)

正会員 川 村 満 紀 (金沢大学工学部)

正会員 柳 場 重 正 (石川工業高等専門学校)

1. まえがき

近年、欧米の諸国では、通常のコンクリートとセメント安定処理土の中間的な力学的性状をもつ貧配合コンクリート（エコノクリート）をコンクリート舗装の路盤や複合コンクリート舗装の下層へ採用する機会が増大している¹⁾。貧配合コンクリート路盤には、大きな荷重分散効果と水の侵入に対する良好な耐侵食性が期待できるので、舗装の耐久性を向上させるために貧配合コンクリートの舗装路盤への適用を検討することは意義あることと考えられる²⁾。一方、石炭火力発電所より副産物として多量に発生するフライアッシュのコンクリート材料としてのより積極的な利用について大きな関心が寄せられている。貧配合コンクリートにおけるフライアッシュの使用は、ワーカビリティの改善、乾燥収縮の低減および長期にわたる強度発現の点で有効であると指摘されているが、混和材料としてのフライアッシュの効果は使用するフライアッシュの品質により大きく相違するものと予想される^{3,4)}。

このような観点より、本研究は、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートを舗装路盤へ適用することを目的として、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートのワーカビリティ、微視的構造、強度、乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性について実験的検討を加えたものである。さらに、このような貧配合コンクリートにおける再生骨材の利用の可能性についても検討を加えている。

2. 実験概要

本実験に使用した2種類のフライアッシュの化学成分および物理的性質を表-1に示す。使用セメントは普通ポルトランドセメントであり、混和剤は市販のビンゾールレジンを使用した。再生骨材は舗装の解体時に得られたコンクリート塊（骨材寸法: 40 mm、圧縮強度: 430 kg/cm²）をジョークラッシャーにて破碎したものである。

天然骨材としては早月川産の川砂および砕石を使用した。細骨材-粗骨材の組合せは、川砂-砕石（Ns-Ng）、川砂-再生粗骨材（Ns-Cg）および再生細骨材-再生粗骨材（Cs-Cg）の3種類である。再生細骨材は粒度を改善するために川砂との1:1の混合物を使用した。使用骨材の物理的諸性質は表-2に示すとおりである。

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの配合は、結合材量（C+F: 200 kg/m³）、細骨材率（s/a）: 0.42（Ns-Ng）、0.43（Ns-Cg）および0.45（Cs-Cg）、およびフライアッシュ置換率（F/(C+F)): 0, 30%, 50%および70%であり、アメリカコンクリート舗装協会の報告⁵⁾に基づいて3±1 cmのスラブおよび7±1%の空気量が得られるように試験練りによって単位水量およびA/E量を決定した。

本実験における試験項目は、SEMによる内部組織の観察、水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定、ブリージング試験（JISA 1123）、圧縮、圧裂引張および曲げの各強度試験、乾燥収縮試験（脱型後7日まで水中養生後、湿度55±3%の恒温恒湿室内に放置、JISA 1129（コンパレータ法））および凍結融解試験（脱型後14日または90日まで水中養生後、凍結融解の繰返し、ASTM C 666-75（A法））である。

表-1 フライアッシュの性質

	フライアッシュ 細 粉	フライアッシュ 粗 粉
湿 分 (%)	0.2	0.2
強 熱 減 量 (%)	1.9	3.2
シリカ分 (%)	54.7	48.5
アルミナ分 (%)	27.0	26.5
比 重	2.27	2.21
ブレン値 (cm/g)	3390	3140
BET比表面積 (m ² /g)	2.1	2.1
88 μm 残 分 (%)	0.3	11.4
単位水量比* (%)	96	99
28日強度比* (%)	87	76
90日強度比* (%)	105	91
M.B.吸水量 (mg/g)	0.213	0.347

* JIS6201によるフライアッシュモルタルの単位水量および強度比

表-2 使用骨材の物理的諸性質

	細 骨 材		粗 骨 材	
	川 砂	再 生 細骨材	砕 石	再 生 粗骨材
比 重	2.61	2.36	2.69	2.48
吸 水 率 (%)	1.3	9.2	0.8	4.9
単位容積重量 (kg/ℓ)	1.69	1.39	1.64	1.38
実 積 率 (%)	62.2	64.3	61.0	58.4
すりへり減量 (%)	—	—	20.0	34.8
安定性試験 (%)	8.5	17.1	4.2	28.1
B S 破 碎 値 (%)	—	—	17.1	23.6
粗 粒 率	2.46	3.38	7.13	6.96
モルタル付着量 (%)	—	38.7	—	38.6
最大寸法 (mm)	5	5	25	25

3. 実験結果および考察

3-1 フレッシュコンクリートの性質

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの単位水量を図-1に示す。貧配合コンクリートでも、通常のコンクリートと同様にフライアッシュを混入することによりコンクリートの流動性が改善されるために、フライアッシュ置換率の増加とともに所定のスランプを得るのに必要な単位水量を大きく減少することができる。また、再生骨材を使用したコンクリートでは、骨材の粒子形状が悪いために天然骨材を使用したコンクリートよりも川砂-再生粗骨材の場合で約8% 再生細骨材-再生粗骨材の場合で約15%単位水量を増加する必要がある。

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートのA E剤量を図-2に示す。フライアッシュ高含有貧配合コンクリートにおけるエントラップドエアは、0.5~1%程度であり、フライアッシュを多量に混入することによりエントラップドエアは減少する⁶⁾。一般に、フライアッシュコンクリートにおけるA E剤による空気連行性は、フライアッシュに含有される未燃カーボン量とフライアッシュ使用量との関係により決定される。このため、所定の空気を連行するのに必要なA E剤量は、使用骨材の種類にはあまり影響されず、フライアッシュ置換率にはほぼ比例して増大する。

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートのブリージング率を表-3に示す。フライアッシュ高含有貧配合コンクリートのブリージングは、結合材量が少ないために通常のコンクリートよりも大きく、とくにA E剤を使用しないコンクリートの場合にはブリージングにともなう材料分離が顕著に認められる。天然骨材を使用したA Eコンクリートのブリージング率は、フライアッシュ置換率の増加にともない増大し、またフライアッシュ粗粉を使用した場合にはフライアッシュ細粉と比較してブリージング率が20%程度減少する。一方、再生骨材の使用がコンクリートのブリージングに及ぼす影響については、川砂-再生粗骨材の場合には川砂-碎石よりもブリージングが増大するが、再生細骨材と再生粗骨材を組合せた場合には川砂-碎石と同程度までブリージングが減少する傾向がある。

3-2 圧縮強度、弾性係数と微視的構造

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの圧縮強度、弾性係数およびパルス速度を表-4に示す。フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの初期材令における圧縮強度は、フライアッシュ置換率の増加とともに大きく減少している。しかし、天然骨材および再生骨材のいずれの場合にもフライアッシュを混入したものは材令の経過にともなう強度の発達が非常に顕著であり、90日材令においてはフライアッシュ置換率が50%の場合でもプレーンコンクリートの70~80%の圧縮強度が得られる。また、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートでは骨材の品質がコンクリートの強度に及ぼす影響は比較的小さいようであり、再生骨材コンクリートは天然骨材コンクリートと比較して強度の面で大きく劣ることはない。一方、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの28日材令における弾性係数は、 $10 \sim 20 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。したがって、フライアッシュ高含有貧配合コンクリート路盤では従来のセメント安定処理路盤より3~5倍大きな荷重分散効果が期待できるといえる。

フライアッシュ高含有貧配合コンクリート内部のSEM像を写真-1に示

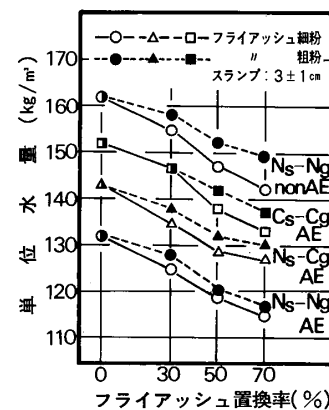


図-1 単位水量とフライアッシュ置換率の関係

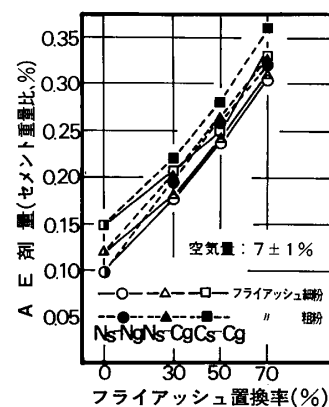


図-2 A E剤量とフライアッシュ置換率の関係

表-3 ブリージング率(%)

コンクリートの種類	フライアッシュ置換率	フライアッシュ細粉	フライアッシュ粗粉
Ns-AE	0%	14.0 (4.5)	13.1 (5.0)
	30%	14.2 (5.5)	13.1 (5.0)
	50%	4.8 (6.0)	6.0 (6.0)
	70%	7.1 (6.5)	6.0 (6.0)
Ns-Cg-AE	0%	8.8 (7.5)	7.4 (7.0)
	30%	11.4 (11.0)	8.5 (8.5)
	50%	7.6 (7.5)	9.6 (10.5)
	70%	4.2 (7.0)	4.5 (6.0)
Cs-Cg-AE	0%	4.2 (7.0)	4.5 (6.0)
	30%	4.4 (6.0)	4.5 (6.0)
	50%	4.4 (6.0)	4.5 (6.0)
	70%	4.4 (6.0)	4.5 (6.0)

():ブリージングが終了するまでに要する時間(時間)

す。フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの内部組織は、通常のコンクリートと比較してかなり多孔質である。また、貧配合コンクリート中におけるフライアッシュのポゾラン反応は、長期間にわたって進行し、フライアッシュ粒子の付近には、微細なC-S-Hゲルより成る網目状の組織、エトリンガイトの針状結晶およびアルミン酸石灰水和物の板状結晶が観察される。また、図-3に示すように、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの細孔径分布については、フライアッシュの種類にかかわらずフライアッシュ置換率が30%程度まではブレンコンクリートとの間に大きな相違が認められない。しかし、フライアッシュ置換率が50%以上に増大すると、フライアッシュ粗粉を使用したものではブレンコンクリートと比較して全細孔量の増加、とくに $0.1\mu\text{m}$ 以上の比較的大きな細孔の増加がかなり顕著になる。

3-3 乾燥収縮特性

フライアッシュ高含有貧配合コンクリート（川砂-碎石の場合）の乾燥収縮率を図-4に示す。

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの乾燥過程 表-4 圧縮強度、弾性係数およびパルス速度

における逸散水量の量は、ブレンコンクリートよりも25~70%程度大きく、フライアッシュ置換率の大きいものほど乾燥初期における逸散水量が増大する。このため、フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの乾燥収縮率は、乾燥材令14日まではブレンコンクリートの値を多少上回る。しかし、フライアッシュ置換率が50%以上のものは、乾燥材令1ヶ月以後においては乾燥収縮率の増加の割合がかなり小さくなり、ブレンコンクリートよりも小さな乾燥収縮率を示す。フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの乾燥収縮率は、フライアッシュの種類にはあまり関係がなく、 $4\sim6\times 10^{-4}$ 程度であり、フライアッシュ置換率の大きなものほど乾燥収縮率が減少する傾向を示す。このことより、貧配合コンクリートにおいてフライアッシュを多量に使用することは、舗装のリフレクションクラックの発生の原因となる路盤の乾燥収縮性状を改善するのに有効である。

3-4 凍結融解に対する抵抗性

フライアッシュ高含有貧配合コンクリートの凍結融解に対する抵抗性（水中養生：14日）を図-5および

図-6に示す。川砂-碎石を使用したフライアッシュ高含有貧配合コンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、フライアッシュ置換率が50%以下ではブレンコンクリートとの間に大きな相違が認められず、いずれも比較的良好な凍結融解に対する抵抗性を示す。しかし、フライアッシュ置換率が70%ではフライアッシュの種類に関係なく凍結融解の繰返しにともなう動弾性係数の低下および供試体表面のスケーリン

コンクリートの種類	圧縮強度 (kg/cm ²)			静弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm ²)	動弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm ²)	パルス速度 (m/sec)
	7日	28日	90日			
ブレン	119	184	219	2.1	2.9	4260
Ns	細粉 30%	69	113	1.9	2.5	4100
	50%	60	92	1.2	2.6	4030
	70%	23	37	7.9	1.8	3650
Ng	粗粉 30%	65	89	1.54	2.5	4060
	50%	49	79	14.7	2.3	4000
	70%	22	33	7.8	1.9	3610
ブレン	96	134	185	2.1	2.4	4060
Ns	細粉 30%	59	111	16.5	1.9	3900
	50%	55	109	16.9	1.9	3950
	70%	28	69	9.9	1.6	3600
Cs	粗粉 30%	53	101	13.6	1.7	3750
	50%	42	91	12.7	1.8	3740
	70%	16	46	7.1	2.1	3420
ブレン	109	157	176	1.9	2.4	3270
Cs	細粉 30%	62	105	15.0	1.6	3580
	50%	29	72	10.6	1.5	3740
	70%	16	42	8.7	1.5	3380
Cs	粗粉 30%	41	80	12.7	1.5	3490
	50%	43	87	13.8	1.7	3590
	70%	14	34	7.1	1.5	3290

* Es, Ed および Vp は 28 日材令における実験結果



写真-1 SEMによる内部組織の観察

（川砂-碎石, F/C+F=50%, 180日材令）

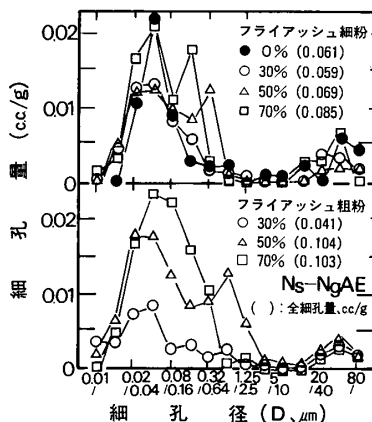


図-3 細孔径分布（川砂-碎石, 90日材令）

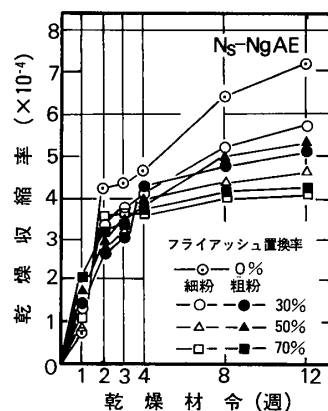


図-4 乾燥収縮率と材令の関係

グによる重量損失率の増大がかなり顕著になる。一方、再生骨材の使用はフライアッシュ高含有貧配合コンクリートの凍結融解に対する抵抗性に大きな影響を及ぼす。川砂-再生粗骨材を使用したフライアッシュ高含有貧配合コンクリートでは、川砂-碎石の場合と比較して凍結融解の繰返しにともなう動弾性係数の低下が大きく、フライアッシュ置換率が50%以上のものについては200サイクル前後で供試体の崩壊が認められた。事実、凍結融解の繰返しにより崩壊した供試体の破断面には、再生骨材中のモルタル部分が脆弱化し、原コンクリートの骨材からはく離しているのが観察された⁷⁾。しかし、舗装路盤では路肩部分を除いてコンクリート版ほど凍結融解の条件が厳しくないことを考慮すると、再生骨材のような低品質骨材を使用した場合でも、通常のコンクリートよりも連行空気量を2~3%程度多くすることによって舗装路盤に要求される凍結融解に対する抵抗性を十分に確保することができると考えられる。

4. 結 論

舗装の耐久性を向上させるためには、コンクリート版自身よりも舗装路盤の強度および耐久性を改善する方が得策であるとの判断より、アメリカおよびヨーロッパの諸国では、コンクリート舗装に貧配合コンクリートのような高強度・高剛性の路盤が採用されている。舗装路盤に適用される貧配合コンクリートの強度は、28日材令において50~150 kg/cm²程度のものが一般的であり、本研究の結果よりフライアッシュ置換率が50%程度のフライアッシュ高含有貧配合コンクリートでも舗装路盤としての強度および耐久性を確保できることが明らかになった。また、再生骨材を使用したフライアッシュ高含有貧配合コンクリートでは、強度および耐久性が多少低下することについて配慮することが必要になるが、あまり大きな強度が要求されない貧配合コンクリート路盤では再生骨材のような低品質骨材の利用も十分に可能である。舗装廃材の処理と有効利用の点より、耐用年数に達した舗装コンクリートを現地で破碎処理し、貧配合コンクリート又はセメント安定処理路盤用骨材として再利用することは検討する価値があると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたりご助力を頂いた大有建設(株)吉兼亨氏、竹島宏佑氏および実験等においてご協力を頂いた本学院生谷口裕史氏に感謝の意を表する。

＜参考文献＞

- 1). W.A. Yrjanson et al.: Econocrete Pavements • Current Practices, Transportation Research Record, No.741, 1980.
- 2). M. Ray et al.: Drainage and Erodability • Inter. Seminar and New Research Results Related to Field Performance, Proc. 3rd Inter. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 1985.
- 3). M. N. Haque et al.: High Fly Ash Concretes, ACI Journal, Title no. 81-8, 1984.
- 4). R. C. Joshi et al.: Roller Compacted High Fly Ash Concrete (Geocrete), ACI Publication SP-79, 1983.
- 5). American Concrete Pavement Association: Econocrete, Report No. 1, 1975.
- 6). V. A. Sturup et al.: Durability of Fly Ash Concrete, ACI Publication SP-79, 1983.
- 7). 川村満紀他：道路舗装コンクリート破碎骨材を使用した再生骨材コンクリートの諸性質、材料、No.353, 1983.

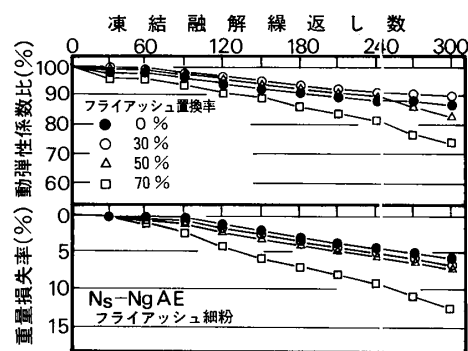


図-5 凍結融解試験の結果(川砂-碎石の場合)

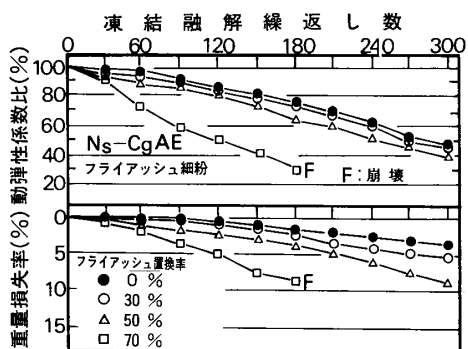


図-6 凍結融解試験の結果(川砂-再生粗骨材の場合)