

論文 [1011] 舗装路盤用貧配合コンクリートの強度と耐久性

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)

谷口裕史 (K.K. 間 組)

1. まえがき

諸外国で普及しているローラーの転圧により舗装コンクリートを打設する R. C. C. 舗装工法では、施工の合理化による経済性の改善や早期における供用開始などが利点として挙げられる。同様な方法で舗装路盤を作成するものとして、ドライリーンコンクリート工法 (Dry Lean Rolled Concrete) があり、イギリスを中心としたヨーロッパの諸国では従来より重交通道路用の路盤材料として使用されている¹⁾。ドライリーンコンクリートの配合は、ソイルセメントにおける最適含水比の概念をコンクリート材料に拡張したものであり、結合材としてのセメントの一部をフライアッシュで置換する場合には長期にわたる強度の発現、乾燥収縮の低減および熱応力発生の減少などの効果により舗装路盤材料として重要になるクラックの発生を大きく低減できる²⁾。PCA の舗装設計法の改訂でも指摘されているように、交通量の多い道路では舗装路盤の荷重分散機能や耐水性の向上が重要になってきており、我が国でも今後はリーンコンクリートに代表されるような高強度・高剛性の路盤材料が積極的に採用されるものと考えられる^{3), 4)}。

本研究は、締固めにより打設されたフライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの締固め性状、強度特性、乾燥収縮および凍結融解抵抗性などについて調べることにより、舗装路盤材料としての適用性とフライアッシュ添加の効果について検討を行なったものである。

2. 実験概要

使用したセメントは普通ポルトランドセメント (N 社) であり、フライアッシュ (T 火力発電所産) は表-1 に示す 2 種類のもの (A (細粉) および B (原粉)) を使用した。使用骨材はコンクリート用の川砂 (比重: 2.61、吸水率: 1.3%) および碎石 (比重: 2.69、吸水率: 0.8%、最大寸法: 25mm) であり、ドライリーンコンクリートの配合設計 (BS 1881、BS 1377) を参考にして粒度を調整した⁵⁾。フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートにおけるセメントおよびフライアッシュの添加率は骨材の乾燥重量に対して 10~15% であり、その中でセメントに対するフライアッシュの比率を各種に変化させた (セメント添加率 10% はコンクリートの単位量に換算すると約 200 kg/m³ に相当する)。ドライリーンコンクリートの締固めは、JIS A 1210 (突固めによる土の締固め試験) に準じて最適含水比および最大乾燥密度となるようにランマーにて突固めた (本実験で採用した締固め含水比 6.2% はコンクリートの単位量に換算すると約 130 kg/m³ に相当する)。供試体は直径 7.5 × 15cm の円柱供試体 (圧縮および圧裂引張強

表-1 フライアッシュの化学成分および物理的性質

	フライアッシュ A	フライアッシュ B
湿分 (%)	0.1	0.1
強熱減量 (%)	2.5	2.7
SiO ₂ (%)	53.2	54.6
比重	2.28	2.16
ブレン値 (cm ³ /g)	3960	2960
88μm 残分 (%)	1.3	4.5
44μm 残分 (%)	9.2	12.9
単位水量比 (%) *	96	96
28 日強度比 (%) *	80	76
90 日強度比 (%) *	88	94

* JIS A 6201 フライアッシュセメントモルタル試験の結果

度用)と10×10×40cmの角柱供試体(曲げ強度用)を使用し、養生方法は水中養生(温度20℃の水中に浸せき)および気中養生(温度20℃、湿度80%の屋内に放置)の2種類である。乾燥収縮試験は脱型後7日間水中養生を行なった後、湿度60%の屋内に放置し、コンタクトゲージにより長さ変化を測定した。凍結融解試験は脱型後28日および90日間水中養生を行なった後、ASTM C-666 Aに準じて凍結融解の繰返しを10サイクル毎に60サイクルまで実施し、動弾性係数および重量の変化を測定した。また、ドライリーンコンクリートにおけるフライアッシュの反応過程と微視的構造の特徴を明らかにする目的で、DSC-TG分析、SEM観察および水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定を実施した。

3. 実験結果および考察

3-1. 締固め性状

フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの最適含水比および最大乾燥密度は、それぞれ5.6~6.8%および2.23~2.32 g/cm³程度であり、配合による相違は比較的小さいが、含水比が7%以上になると締固めがかなり困難になる。ドライリーンコンクリートにおいてセメントの一部をフライアッシュで置換して使用すると、ペースト量の増大およびフィラーとしての効果により、ドライリーンコンクリート混合物の保水性および間隙充填性が良好となり、締固め性状が改善される。

3-2. 強度および弾性係数

フライアッシュ含有ドライリーンコンクリート(水中養生および気中養生)の圧縮強度、弾性係数および超音波パルス速度を表-2および3に示す。セメント単味のドライリーンコンクリートの圧縮強度は、セメント添加率にほぼ比例して増大するが、90日以後の強度の増加は比較的小さい。また、初期材令においては気中養生供試体が水中養生供試体よりも多少大きな強度を示しているが、長期においては同程度の強度が得られており、セメント単味の場合は養生の影響が比較的小さいことがわかる。一方、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリート(水

表-2 水中養生を行なったフライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの強度および弾性係数

記号	混 合 割 合 C: セメント FA: フライアッシュA FB: フライアッシュB	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)					弾性係数* (×10 ⁴) (kgf/cm ²)	パルス速度* (m/sec)
		7日	28日	90日	180日	365日		
A ₁₀	C=10%	136	164	198	223	228	21	4390
B ₁	C=7.5% FA=2.5%	113	156	210	257	285	17	4220
B ₂	C=7.5% FB=2.5%	106	145	210	243	236	16	4290
C ₁	C=5% FA=5%	63	93	152	191	245	16	4030
C ₂	C=5% FB=5%	65	98	151	185	269	17	4100
D ₁	C=2.5% FA=7.5%	29	41	62	85	137	15	3580
D ₂	C=2.5% FB=7.5%	28	51	63	109	136	14	3440
E ₁	C=5% FA=10%	109	167	251	294	478	20	4350
E ₂	C=5% FB=10%	109	150	226	284	455	19	4300

* 28日材令における試験結果

表-3 気中養生を行なったフライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの強度および弾性係数

記号	混 合 割 合 C: セメント FA: フライアッシュA FB: フライアッシュB	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)					弾性係数* (×10 ⁴) (kgf/cm ²)	パルス速度* (m/sec)
		7日	28日	90日	180日	365日		
A ₁₀	C=10%	146	193	209	202	214	18	3770
B ₁	C=7.5% FA=2.5%	127	172	179	179	176	18	3640
B ₂	C=7.5% FB=2.5%	136	201	210	212	238	20	3780
C ₁	C=5% FA=5%	84	133	174	140	134	14	3670
C ₂	C=5% FB=5%	84	132	163	138	141	15	3540
D ₁	C=2.5% FA=7.5%	42	67	74	78	68	12	3180
D ₂	C=2.5% FB=7.5%	38	56	63	49	62	9	3000
E ₁	C=5% FA=10%	116	195	243	254	226	18	3900
E ₂	C=5% FB=10%	112	154	218	205	195	17	3640

* 28日材令における試験結果

中養生)は、28日材令以後材令の経過とともに圧縮強度が大きく増大しており、このような長期にわたる強度の増大はフライアッシュの混合割合の多いものほど顕著になっている。それに対して、気中養生したものは90日材令以後いずれの配合のものも圧縮強度の増大がほとんど認められない。一般に、フライアッシュを使用したコンクリートでは、結合材量が少ないほど、またフライアッシュの添加率が多くなるほど養生の影響を受けやすく、十分な水分が供給されない状態では強度の発現が小さくなることが知られている⁶⁾。本実験の結果より、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートでは、締固め時の含水比が小さいこともあり、通常のコンクリート以上に強度の発現における養生の影響が重要となる。フライアッシュの品質が圧縮強度に及ぼす影響は、水中養生および気中養生ともに比較的小さいようであり、フライアッシュAおよびBの強度には大きな相違が見られない。さらに、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの圧裂引張強度、曲げ強度と圧縮強度との比は、図-1および2に示すようにそれぞれ $1/6 \sim 1/10$ および $1/4 \sim 1/6$ 程度であり、圧縮強度が 100 kgf/cm^2 以上になると通常のコンクリートに似た性状を示す。路盤材料の弾性係数は荷重分散機能との関係から重要になるが、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの静弾性係数と圧縮強度の間には良好な関係が存在し、ACIの実験式と同様に放物線近似すると水中養生のもので $E_s = 16800\sqrt{\sigma}$ 、気中養生のもので $E_s = 13130\sqrt{\sigma}$ の関係が得られる。図-3に示すように、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの静弾性係数は同一の碎石を混入したソイルセメントの約2倍となり、通常のコンクリートに近い弾性係数が期待できる。また、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの動弾性係数は、配合にはあまり影響されず静弾性係数の1.6倍程度の値を示す。

3-3. 反応過程および微視的構造

ドライリーンコンクリート(セメント単味)の内部組織は、セメント添加率10%では通常のコンクリートに近い密実な組織(骨材間の間隙がセメントペーストで完全に充填された状態)を示しているのに対して、セメント添加率5%以下ではソイルセメントに近い組織(セメントペーストが少ないために比較的大きな空隙が残存する状態)を示している(写真-1、a、b)。一方、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの内部組織は、水中養生した場合にはフライアッシュのポゾラン反応の進行過程でフライアッシュ粒子の周囲に反応生成物が生成し、セメントの少ない混合割合のもの(D_{1,2})でも連続

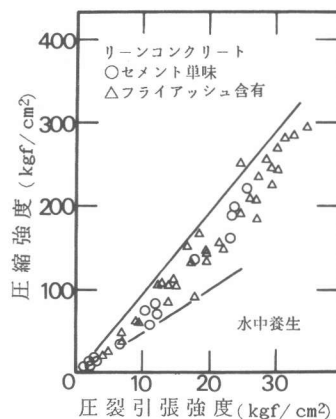


図-1 圧縮強度と圧裂引張強度の関係

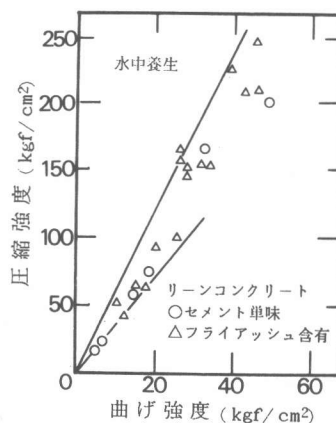


図-2 圧縮強度と曲げ強度の関係

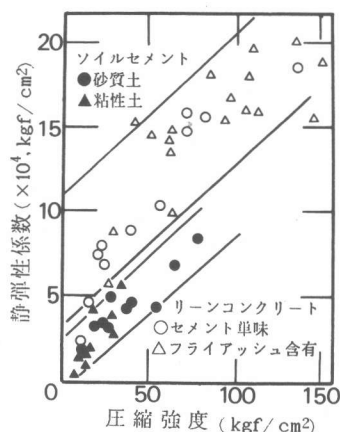
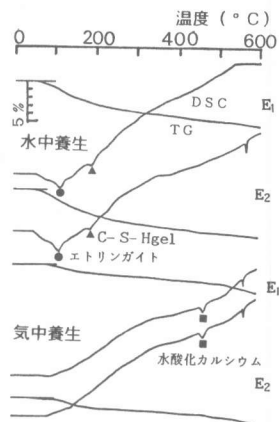


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

的に結合された組織が形成されている（写真－1、c、d）。とくに、フライアッシュの混合割合の多いもの（E_{1,2}）ではフライアッシュ粒子の周囲が反応生成物で完全に充填され、間隙の少ない密実な組織が形成されている（写真－1、e、f）。また、気中養生したものでは、28日材令までは水中養生したものと大きな相違は見られないが、1年材令になると気中養生したものは反応生成物の生成量が少なく、多くの間隙が残存した組織が観察される。気中養生した供試体の含水比の測定（110℃の炉乾燥24時間）では、フライアッシュの混合割合が大きいものほど気中養生期間における含水比の低下が大きくなっており、フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの含水比は90日材令以後において1%以下になることが確認

されている。DSC-TG測定の結果（図－4）にも示されているように、気中養生したものは長期材令において供試体の含水比の低下の影響を受けるので、フライアッシュのポズラン反応がかなり抑制されており、このようなフライアッシュの反応状況の相違が強度発現に大きな影響を及ぼしているようである。また、細孔径分布の測定結



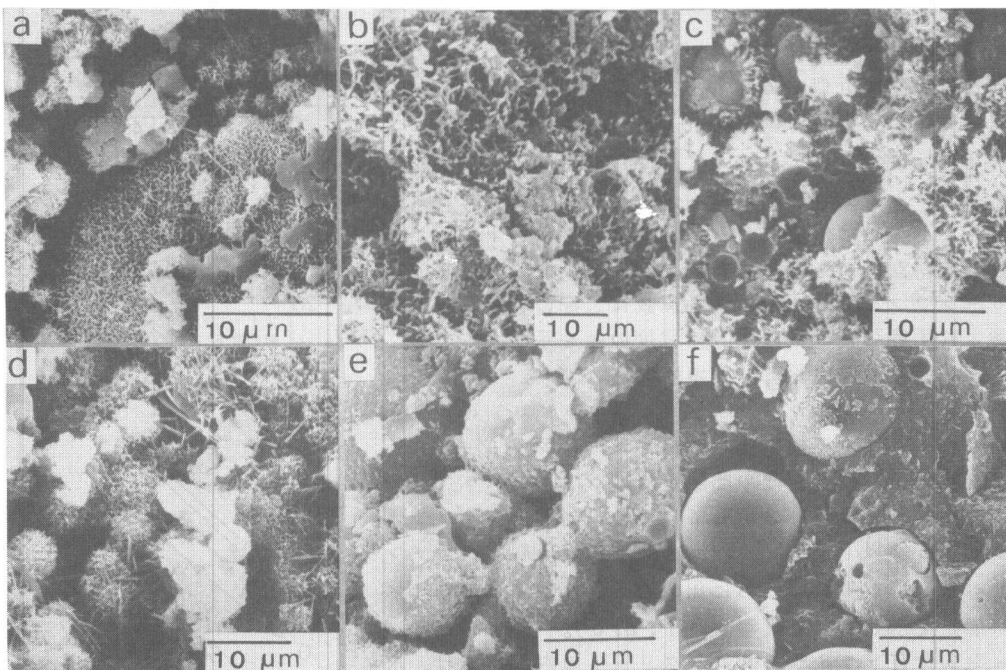
図－4 DSC-TG曲線

表－4 細孔径分布の測定結果（全細孔量、 $\times 10^{-3} \text{cc/g}$ ）

記号	水中養生		湿空養生	
	28日	365日	28日	365日
A _{2.5}	11 (8)	20 (10)	21 (14)	27 (19)
A ₅	28 (16)	23 (12)	39 (31)	53 (45)
A ₁₀	66 (55)	66 (55)	50 (41)	51 (47)
B ₁	22 (8)	27 (7)	30 (18)	24 (14)
C ₁	12 (10)	26 (10)	29 (20)	18 (14)
D ₁	32 (22)	30 (16)	23 (16)	16 (14)
E ₁	24 (8)	21 (7)	12 (7)	6 (6)

() : 0.1 μm 以上の細孔量、 $\times 10^{-3} \text{cc/g}$

(A_{2.5}:C=2.5% A₅:C=5%、記号は表－2参照の事)



写真－1 ドライリーンコンクリートの内部組織のSEM観察結果

(a : A₅, 材令28日、b : A₁₀, 材令28日、c : D₁, 材令28日、
d : D₁, 材令1年、e : E₁, 材令28日、f : E₁, 材令1年)

果（表-4）より、フライアッシュ含有ドライリーコンクリートの全細孔量はフライアッシュの混合割合が大きくなるにつれて増大するが、水中養生したものではフライアッシュのポズラン反応の進行につれて細孔径分布が細かい径の方向に移行するのが認められる。それに対して、気中養生したものでは細孔径分布の細かい径への移行があまり見られず、細孔径分布において1 μm 程度の細孔量が卓越している。フライアッシュ含有ドライリーコンクリートの圧縮強度と全細孔量との間には、図-5に示すようにある程度の比例関係が存在する。

3-4. 乾燥収縮および凍結融解抵抗性

フライアッシュ含有ドライリーコンクリートの乾燥収縮特性を表-5に示す。ドライリーコンクリート（セメント単味）は、セメント添加率が2.5~10%の範囲においてセメント添加率が大きいものほど乾燥過程での逸散水量が小さくなり、乾燥収縮量も減少する。一方、フライアッシュ含有ドライリーコンクリートは、いずれのフライアッシュを使用した場合にもフライアッシュの混合割合が大きくなるにつれて乾燥収縮量は減少し、セメントの少ない混合割合のもの（D_{1,2}）の乾燥収縮量はセメント単味（C=10%）と比較して1/2以下になる。締固めにより作成したフライアッシュ含有ドライリーコンクリート（Dry Lean Rolled Concrete）の最終乾燥収縮量は $2 \sim 3 \times 10^{-4}$ であり、スリップホーム工法によるフライアッシュ含有リーコンクリート（Wet Lean Concrete）の $4 \sim 6 \times 10^{-4}$ と比較して乾燥収縮量が大きく減少する⁷⁾。フライアッシュ含有ドライリーコンクリートの凍結融解試験結果を表-6に示す。ドライリーコンクリート（セメント単味）では、セメント添加率10%のものは動弾性係数の低下も小さく、60サイクル終了時まで残存するが、セメント添加率5%以下のものは30サイクルまでに崩壊した。一方、フライアッシュ含有ドライリーコンクリートでも、フライアッシュの添加が凍結融解に対する抵抗性に及ぼす効果は比較的小さく、結合材中のセメント混合割合に比例して凍結融解に対する抵抗性が増大する。また、水中養生期間の増加が凍結融解に対する抵抗性に及ぼす影響もあまり顕著には認められない。Dry Lean Rolled Concreteの凍結融解抵抗性を検討したVerhasselt（BS 1957、凍結融解繰返し14回⁸⁾は圧縮強度が40kgf/cm²、パルス速度が3400 m/secになれば舗装路盤材料とし

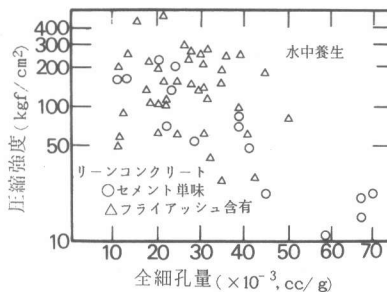


図-5 圧縮強度と全細孔量の関係

表-5 乾燥収縮試験の結果

(収縮ひずみ、 $\times 10^{-4}$)

記号	乾燥週間		
	1週	4週	8週
A ₁₀	0.7 (2.1)	2.2 (2.6)	2.9 (2.8)
B ₁	0.9 (2.5)	2.1 (3.1)	2.8 (3.2)
B ₂	1.1 (2.5)	2.1 (3.1)	3.1 (3.2)
C ₁	0.6 (2.8)	1.7 (3.4)	2.1 (3.5)
C ₂	0.6 (2.3)	2.3 (2.9)	3.4 (3.0)
D ₁	0.4 (3.5)	1.3 (4.1)	1.5 (4.2)
D ₂	0.4 (3.7)	1.3 (4.2)	1.7 (4.3)
E ₁	0.9 (2.6)	2.5 (3.2)	3.1 (3.4)
E ₂	1.5 (2.6)	2.9 (3.1)	3.5 (3.3)

() : 逸散水量 (%)

表-6 凍結融解試験の結果

(相対動弾性係数 (%), 水中養生28日後、ASTMC-666Aにて実施)

記号	凍結融解繰返し数					
	10	20	30	40	50	60
A _{2.5}	50 (2.3)	崩壊	—	—	—	—
A ₅	87 (0.5)	75 (1.3)	60 (2.5)	50 (4.1)	46 (5.8)	崩壊
A ₁₀	92 (0.0)	90 (0.1)	86 (0.3)	81 (0.5)	78 (0.8)	73 (1.1)
B ₁	71 (0.3)	53 (0.3)	48 (0.5)	41 (0.8)	36 (1.3)	38 (1.8)
C ₁	80 (0.0)	62 (0.3)	43 (1.1)	37 (1.5)	崩壊	—
D ₁	32 (0.4)	崩壊	—	—	—	—
E ₁	74 (0.2)	46 (0.3)	崩壊	—	—	—

() : 重量損失率 (%)

での十分な凍結融解抵抗性が確保できるとしている。この結果を考慮すると、本実験で採用した ASTM C-666 の条件は舗装路盤材料としては非常に厳しいものであり、少なくとも60サイクルまでに供試体の破壊が生じなかったものは十分な凍結融解抵抗性を持っていると判断して良いと考えられる。

4. 結 論

締固めにより作成したフライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの舗装路盤材料としての適用性について検討した結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) 舗装路盤用ドライリーンコンクリートでは比較的多量のフライアッシュを使用することにより締固め性状が大きく改善できる。
- (2) 水中養生を行なったフライアッシュ含有ドライリーンコンクリートは長期にわたる強度発現性が優れているが、セメント単味の場合と比較して養生の影響を受けやすく、十分な水分が供給されないとフライアッシュのボゾラン反応の進行が抑制されるため強度の増大が得られない。
- (3) フライアッシュ含有ドライリーンコンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係は通常のコンクリートとほぼ同様であり、フライアッシュ含有リーンコンクリートにはコンクリート舗装版に近い曲げ剛性が期待できる。
- (4) フライアッシュ含有リーンコンクリートの乾燥収縮量はかなり小さくなり、舗装のクラックの発生を防止する点で有利となる。

本研究の一部は昭和62年度文部省科学研究費・一般研究B（課題番号 61460160）で行なったことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1). M. Dunstan : High Fly Ash Content Concrete : A Review and Case History, ACI SP - 91, 1986.
- 2). P. T. Sherwood et al. : The Use of Fly - Ash in Lean Concrete Roadbases, Silicates Industriels, No. 82 - 9, 1982.
- 3). W. A. Yrjanson et al. : Econocrete Pavement - Current Practices, Transportation Research Record, No. 741, 1980.
- 4). M. Ray et al. : Drainage and Erodability - Inter. Seminar and New Research Results Related to Field Performance, Proc. of 3rd Inter. Conf. on Concrete Pavement and Rehabilitations, 1985.
- 5). R. I. T. Williams : Cement - Treated Pavements, Elsevier Applied Science Pub., 1986.
- 6). M. K. Gopalan et al. : Effect of Curing Regime on the Properties of Fly - Ash Concrete, ACI Journal, No. 84 - M3, 1987.
- 7). 鳥 居 和 之 他 : 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, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986.
- 8). A. Verhasselt : Low - Calcium Fly Ash as a Mineral Admixture for Lean Concrete, ACI SP - 91, 1986.