

フライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの軽交通道路用 路盤材としての利用に関する研究

山田幹雄¹・佐野博昭²・黒島一郎³・太田 実⁴

¹正会員 工博 金沢工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

²正会員 博(工) 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-03 石川県河北郡津幡町北中条)

³正会員 三井建設(株)土木本部土木技術部 課長 (〒101 東京都千代田区岩本町 3-10-1)

⁴正会員 工博 金沢工業大学教授 工学部土木工学科 (〒921 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

本研究では、設計交通量の区分がL, A交通に該当するアスファルト舗装や簡易舗装などの軽交通道路で路床の改良工事をとまなう区間を対象として、そこにフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料を用いた単一層の路盤を築造した場合の強度、支持力の経時変化や路面性状の推移を調べた。試験舗装に先立って室内で実施した動的載荷試験の結果ならびに現場計測の結果から、混合材料の水分量および締固め度が最適条件に近い状態であれば、このような構造断面を有する舗装であっても沈下や支持力低下に起因する損傷が早期に発生する恐れはなく、また、交通荷重を分散して路床へ伝達する機能は損なわれないことが確かめられた。

Key Words : fly ash, flue gas desulfurization wastes, light traffic, road base, subgrade, strength, bearing capacity

1. はじめに

砕石、砂利、砂などの骨材は道路の新設および修繕に不可欠な材料であり、統計によれば、1994年度における道路用資材としての需要量は推定値で約2億7800万トン(骨材全需要量の35%相当)とされている¹⁾。また、道路事業における骨材需要の見通しについては、すでに実施に移されている第11次道路整備5ヶ年計画および策定済みの公共投資基本計画の進捗ともなって今後も増加する傾向にあるといわれている²⁾。

その一方で、天然資源の温存、保護ならびに環境保全の観点から砂利や砂の採取量は数年来概ね一定水準にあり、さらに、使用量の最も多い砕石についても昨今の都市化の急速な進展、景観上および輸送上の制約などによって容易に採石場を開発できない情勢にある。このことから、骨材の使用量がこのまま推移すると、近い将来には需要と供給との間に不均衡が生じるという指摘もなされている³⁾。

このような状況に対応し、資源の節約と未利用材料の活用とを積極的に推し進める意図をもって、1992年に改訂されたアスファルト舗装要綱⁴⁾には舗装用材料として従来よりの骨材(再生材を含む)、フィラー材、安定材などに加えて新たに地域産材料や副産物が組み入れられた。一般に、地域産材料や副産物はそれ単独では表層、基層、路盤の構成材料に供し得ない場合が多いが、そこ

では何らかの処置、例えば路盤への適用を図る際には安定処理などを施した後の性状が既存の舗装用材料の品質規格に準じていれば、また、屋外試験で良好な施工性や供用性が確認できれば、その材料に関しては採用を前提に工程の精査や経済性の評価にあたることとしている。

以上の事柄を踏まえて、著者らは文献⁵⁾の研究で石炭火力発電所副産物であるフライアッシュと排煙脱硫スラッジ(石膏の原料)とを所定の割合で混ぜ合わせ、これに数%の消石灰を添加した材料の下層路盤材としての利用価値を検討する目的で、室内で混合材料の保存期間や養生の温度、日数と一軸圧縮強さとの関係を調べるとともに、2箇所の現道(設計交通量L, A交通)で試験舗装を行って施工性や交通開放後の路面性状などを調べた。

その研究からは、土木分野における用途の拡大が望まれているフライアッシュの配合量を排煙脱硫スラッジの3ないし6倍としても混合材料の締固め、強度、変形の各特性に配合割合の違いによる差は現れないこと、プラントで製造してからの経過日数が4日以内の混合材料であれば、作業に支障なく品質管理の限界値を満足する下層路盤が築造でき、かつ、施工後短期間のうちに舗装に構造的破損が生じる恐れは少ないことが示された。さらに、平板載荷試験およびコア採取成形供試体の一軸圧縮試験の結果をもとに混合材料の等値換算係数を試算してみたところ、数値上では下層路盤のみならず上層路盤に

もこのような材料を使用できる可能性の高いことが示された。

次に、現行のアスファルト舗装要綱には先に述べた地域産材料や副産物の舗装用材料への導入と併せて路床構築の概念、すなわち、目標とする路床の設計 CBR を定めた上でそれに応じた改良工法の選定や舗装構造の設計を行うという考え方が取り入れられている^{4),6),7)}。したがって、交通条件にもよるが、これからはより大きな支持力を有する路床の上に厚さの小さい舗装を設けた道路の施工例が徐々に増えていくことになると考えられる。

その舗装厚さに関して、舗装断面全体の寸法は路盤に用いる材料によって決定される部分が多く、また、上層と下層とでは使用する材料が異なるのが通例である。しかしながら、新設道路などで供用後の補修費の低減を図る目的で路床構築を実施し、その結果、強度および支持力が十分に改善された施工基盤の上にも2つの層からなる路盤は常に必要とされるか、とりわけ、設計交通量の小さい区間については品質規格を満足し、所定の締固め度が確保される材料であれば、それを上層にも下層にも用いて見掛け上1つの層の路盤を築造しても舗装構成上とくに差し支えはないのではないかと疑問が残る。さらに、その材料が安定処理を施した路盤材のように経時的に強度を発現する性質を有するのであれば、たとえ1つの層であってもたわみ性舗装の路盤としての機能、すなわち、曲げの作用を受けながらも交通荷重を広く分散して路床へ伝達する機能は損なわれないものとも考えられる。

そこで、著者らは文献5)の研究で示された石炭火力発電所副産物の上層路盤材への利用の可能性を念頭に置いて、大型車の往来が比較的少ない道路を対象に、例えば、設計交通量の区分がLおよびA交通に該当するアスファルト舗装で路床の改良工事をともなう区間、あるいは、簡易舗装⁹⁾で在来砂利層の厚さや乱れを補整する必要のある区間などに、このような副産物を用いて上層路盤と下層路盤双方の機能を保持し、かつ、耐久性の高い単一層の路盤を築造することができるかどうかについて検討を加えてみることにした。

本論文では、次章以下にフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料の CBR 特性や耐荷性能を調べるために行った室内試験の結果、現道における試験舗装の概要と現場計測の結果、さらに、路床の設計 CBR、路盤の厚さと地盤反力係数との関係を調べるために行った数値計算から得られた結果を述べる。

2. 材料の性質

石炭火力発電用のボイラーを大別するとストーカ燃焼ボイラー、流動床燃焼ボイラー、微粉炭燃焼ボイラーと

表一 1 フライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの物理的性質

物理的性質	材 料	
	フライアッシュ	排煙脱硫スラッジ
比重 G _s	2.30	2.63
砂分(2~0.075mm)(%)	11.6	15.4
シルト分(0.075~0.005mm)(%)	85.5	79.8
粘土分(0.005mm以下)(%)	2.9	4.8
均等係数 U _c	2.00	1.80
曲率係数 U _c ¹	1.09	0.90

表一 2 フライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの化学成分組成

化学成分等	材 料	
	フライアッシュ	排煙脱硫スラッジ
シリカ [SiO ₂]	52.20	-
アルミナ [Al ₂ O ₃]	21.80	-
酸化第二鉄 [Fe ₂ O ₃]	7.67	-
酸化カルシウム [CaO]	9.12	-
酸化マグネシウム [MgO]	1.28	-
酸化カリウム [K ₂ O]	1.38	-
酸化ナトリウム [Na ₂ O]	1.93	-
硫酸カルシウム [CaSO ₄]	-	16.60
亜硫酸カルシウム [CaSO ₃]	-	63.10
強熱減量 [Li]	1.08	9.23
水素イオン濃度指数 [pH]	12.1	11.5

表一 3 混合材料の締固め特性

シリーズ	配合割合	消石灰添加率 L (%)	最大乾燥密度 ρ _{dmax} (g/cm ³)	最適含水比 w _{opt} (%)
A	フライアッシュ単体	-	1.36	20.8
B	排煙脱硫スラッジ単体	-	1.15	40.7
C	F : S = 3 : 1*	0	1.36	23.8
D		2	1.30	25.0
E		6	1.30	25.5

* フライアッシュ (F) と排煙脱硫スラッジ (S) との乾燥質量比

なるが、国内の発電所における主流は現在のところ微粉炭燃焼ボイラーとなっている^{9),10)}。このことから、本研究では室内試験、試験舗装ともにこの形式のボイラーを設置、稼働している三井石炭火力発電所で発生したフライアッシュおよび排煙脱硫スラッジを用いることにした。これらの物理的性質を表一1に、また、化学成分組成を表一2に示す。

フライアッシュと排煙脱硫スラッジとの配合割合に関して、先にも述べたように、前回の研究⁹⁾で両者の乾燥質量の比を3または6倍としたかぎりにおいては供試体の強度発現過程や体積膨張過程などにとくに違いが認められなかったことを踏まえて、今回の室内試験では配分量をフライアッシュ : 排煙脱硫スラッジ = 3 : 1とし、これに消石灰を2%あるいは6%添加することにした。

表一3は、JIS A 1210, A-bに準拠¹¹⁾して行ったフライアッシュ単体 (A シリーズ)、排煙脱硫スラッジ単体 (B シリーズ) の締固め試験およびフライアッシュと排煙脱硫スラッジとの混合物に消石灰を0, 2, 6%添加 (C, D, E シリーズ) したときの締固め試験の結果をまとめたものである。この表より、消石灰の添加率を高くしても

空気中養生日数	水浸日数
○	0日
△	3日
□	7日
●	10日
▲	14日

《Dシリーズ》

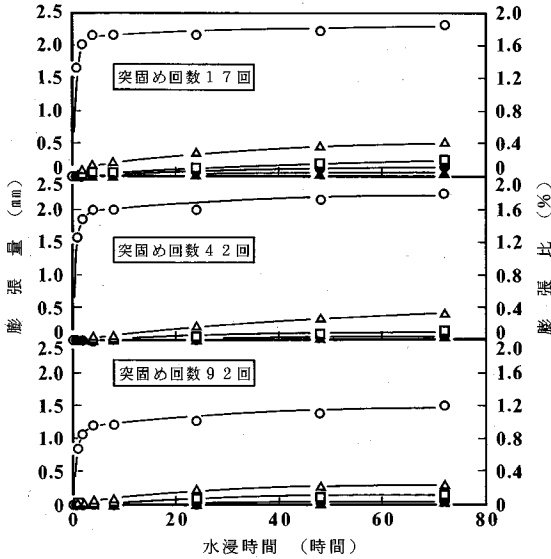


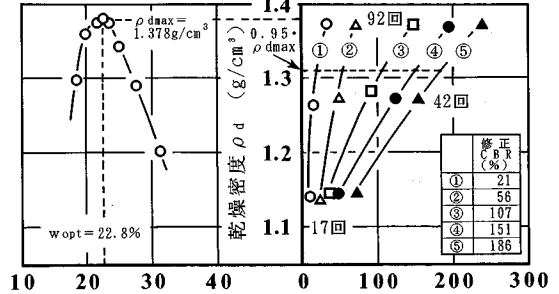
図-1 吸水膨張量の推移

混合材料の最適含水比，最大乾燥密度はほとんど変わらないことがわかる。なお，D，Eシリーズについて，それぞれの最適条件を目標に静的に締固めて作製した供試体（直径約50mm，高さ約100mm）の空气中9日，水中1日養生後の一軸圧縮強さ¹²⁾を測定したところ，Dシリーズで11.7 kgf/cm²（1.15 MPa），Eシリーズでは14.4 kgf/cm²（1.41 MPa）となり，いずれもアスファルト舗装要綱に示されている石灰安定処理材料の上層路盤材としての品質規格10 kgf/cm²（0.98 MPa）を満足すること，また，簡易舗装要綱⁹⁾に照らした場合でも規格値の7 kgf/cm²（0.69 MPa）を十分に上回ることが確かめられた。

次に，本研究ではフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料の工学的特質を知るもう1つの手掛かりとして所要の締固め度に相当する水浸 CBR，いわゆる修正 CBR を求めてみることにした。試験は JIS A 1210，E-b および JIS A 1211 に示されている方法¹³⁾に準じて行ったが，今回は締固めた混合材料（D，Eシリーズ）を水浸させるまでの時間間隔が吸水膨張の過程や貫入抵抗の大きさにおよぼす影響を明らかにする目的で，試験法に倣って供試体作製後直ちに水中に静置する場合と作製した供試体をモールドごと一旦ビニール袋に入れて厳密封し，これを温度20℃の恒温室内で3，7，10，14日間空气中養生した後に水浸する場合とについてそれぞれの耐水性や支持力特性を調べてみることにした。

空気中養生日数	水浸日数	合計日数
○	0日	3日
△	3日	6日
□	7日	10日
●	10日	13日
▲	14日	17日

《Dシリーズ》



《Eシリーズ》

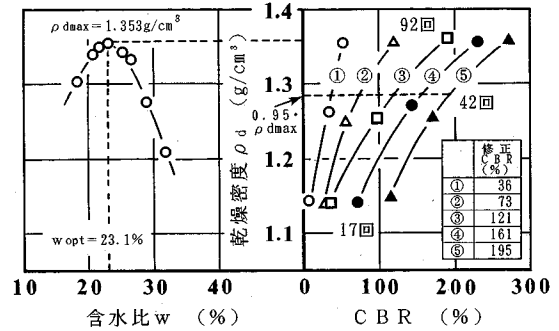


図-2 乾燥密度と含水比および CBR との関係

図-1は，消石灰添加率を2%としたDシリーズにおける吸水膨張試験の結果を1層当たりの突固め回数ごとに示したものである。水浸に先立つ空气中養生を3日施すと供試体の膨張量は極端に小さくなること，水中に静置してから1ないし2日が経過した時点で膨張はほとんど進行しなくなることがわかる。同じような結果が消石灰を6%添加したEシリーズからも得られたが，膨張量はDシリーズに比べてさらに小さい値となった。

ここで，吸水膨張量の測定は4日間継続するのが通例であるが，フライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料に関しては上述のように水浸後2日までに膨張の進行はほぼ停止することから水浸時間を短縮してもとくに差し支えはないと判断した。そこで，本研究では水中に3日間静置した供試体に対して貫入試験を行うことにした。

図-2は，DおよびEシリーズにおける乾燥密度と含水比，CBRとの関係を示す。結果の整理にあたって，所要の締固め度は最大乾燥密度の95%に相当する値とした。D，Eシリーズともに事前の空气中での養生期間を長くするほど水浸後の CBR は大きくなること，さらに，双方のシリーズを比較して，添加する消石灰の量を3倍多

くしても *CBR* の増加は 1.1~1.7 倍に止まることがわかる。参考までに、フライアッシュと排煙脱硫スラッジとの配合割合を乾燥質量比で 6 : 1 とし、これに消石灰を 2% 添加した混合材料の修正 *CBR* を求めたところ、空气中養生日数が 0, 3, 7 日まではこの図の D シリーズよりも 5% 程度大きな値となったものの、10 および 14 日の *CBR* には差が認められなかった。

本研究で取り扱う混合材料は礫分を主体とするものではなく、また、これに砂や碎石などの補足材を加えて用いる必要性も少ないと考えられることから、図-2 に示した修正 *CBR* の値を道路路盤の材料規定に照らし合わせて適用の可否あるいは品質の善し悪しを判定するのは難しい。それでも、今回の試験を通して、この混合材料は遅硬性ながらも時間の経過とともに水に対する抵抗力を着実に増加するという新たな知見が得られたことになる。

3. 模型路盤の沈下性状および強度、支持力特性

第 1 章で述べたように、本研究の主眼は、軽交通道路の新設あるいは打換えにあたって供用後に要する諸経費の面から予め原地盤あるいは在来路床を改良した方が得策と判断された場合に、新たに構築した路床の上に石炭火力発電所副産物を構成材料とする単一層の路盤を築造することができるかどうか、さらに、施工性のみならず交通開放後にその路盤に路面の平坦性を損なうような圧縮沈下や強度、支持力の低下が生じないかどうかを検証することにある。

このため、一軸圧縮試験、空气中養生と水中養生とを組み合わせた修正 *CBR* 試験に引き続いて、締固めたフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料に対する動的載荷試験を実施した。

この試験では、円筒容器に充填した混合材料(D, E シリーズ)に油圧サーボ式試験機を用いて車両通過時に表層、基層を通して路盤面に伝達される荷重を舗装面たわみ運動の周期を模倣した振動数をもって継続的に作用させたときの沈下量を測定するとともに、除荷後の一軸圧縮強さ q_u 、コーン支持力 q_c および非水浸 *CBR* を求めた。また、荷重を加える場合と加えない場合とで強度特性や支持力特性にどれくらいの違いが生じるのかを調べるために、円筒容器に充填してからの経過日数を動的載荷試験が終了するまでの日数と同じとし、その間ビニール袋に入れて厳封した状態で恒温室内に静置しておいた混合材料の q_u 、 q_c 、非水浸 *CBR* も併せて求めることにした。この無載荷の試験を、本論文では放置試験と称することにす。

以下に、仮定した舗装断面、載荷条件、試験方法およ

層	層厚	等値換算厚 T_A
表層+基層	5cm	$5 \times 1.00 = 5.00\text{cm}$
路盤	45cm	$45 \times 0.25 = 11.25\text{cm}$
合計	50cm	$5.00 + 11.25 = 16.25\text{cm} > 16\text{cm}$ $T_A = 16\text{cm}$ (設計 <i>CBR</i> 6% の場合の目標値)

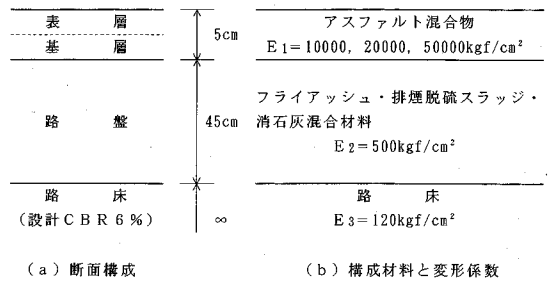


図-3 舗装断面の設計

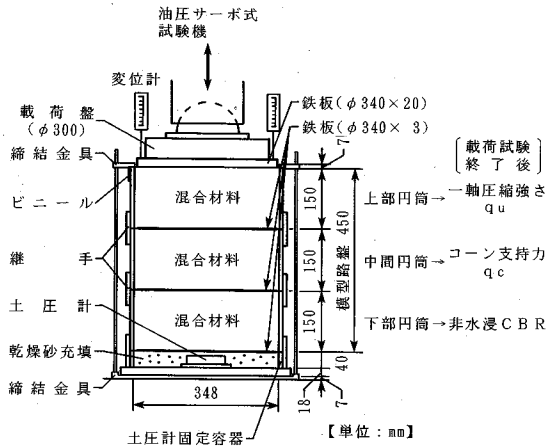
び結果について詳述する。

(1) 動的載荷試験

締固めた混合材料の高さ、すなわち、模型路盤の厚さを設定するにあたって、その端緒となる設計交通量の区分を A 交通、また、路床改良による目標設計 *CBR* を 6% として舗装断面の計算を進めることにした。その際、著者らの提案する路盤は単一層であることから、混合材料の等値換算係数 a を 0.25 と置くか 0.45 と置くか (いずれも石灰安定処理材料の値を準用) によって路盤厚はかなり増減することになるが、ここでは安全側を見込んで、そして、石炭火力発電所副産物のより多くの有効利用を目論んで $a=0.25$ と置くことにした。その結果、図-3 (a) に示すように上記の交通条件および路床条件に対応する単一層の厚さ、言い換えれば、模型路盤の厚さは 45 cm となった。

図-3 (b) に示した舗装各層と路床の変形係数 (弾性係数) $E_1 \sim E_3$ について、このうちの E_1 は文献 13) を、 E_3 は文献 14) を参考にして設定した値であり、また、 E_2 は文献 5) を含め著者らがこれまでにこの混合材料を用いて行った平板載荷試験の結果から概算した値 (ただし、施工当日の値) である。その E_1 および E_2 、輪荷重 $P=5 \text{ tf}$ (49.0 kN)、タイヤの接地半径 $r=17 \text{ cm}$ 、タイヤの接地圧 $\sigma=5.5 \text{ kgf/cm}^2$ (0.54 MPa) などを用いて路盤面に作用する圧力 p を「ナシメントらによる多層弾性体変位の近似計算法¹⁵⁾」に適用して求めたところ、それぞれの E_1 に対して $p=2.6, 2.0, 1.4 \text{ kgf/cm}^2$ (0.25, 0.20, 0.14 MPa) が得られた。

このことから、先の図-3 (a) に示した断面通りの舗装が現道で施工されたならば、そのときに単一層の路盤が受ける圧力は 2.0 kgf/cm^2 (0.20 MPa) 程度になると判断して、動的載荷試験を始めるにあたって、模型路盤にこの圧力に相当する荷重が均一に作用するような正弦



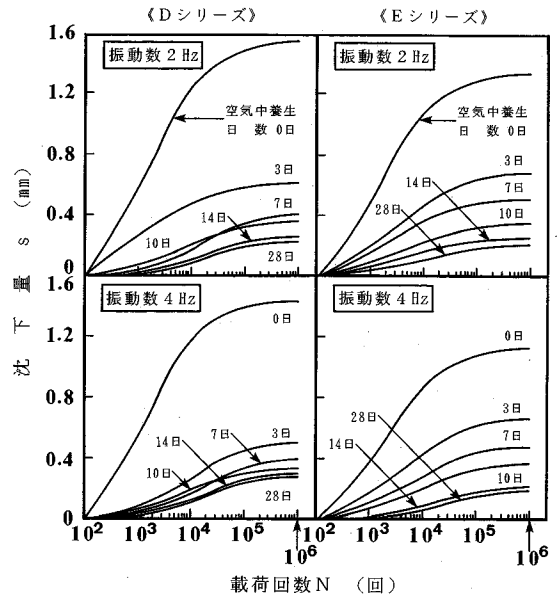
図一四 動的荷重試験における模型路盤の構成

波繰り返し荷重の大きさと円筒容器の寸法との組み合わせを考えることにした。使用する試験機の容量、荷重盤の直径や円筒容器（硬質塩化ビニール製）の耐用性などを勘案した上で容器の内径は約 350 mm、繰り返し荷重の最大値は 1.8 tf (17.6 kN) とすることにした。なお、繰り返し荷重の最小値は 0 としたかったが、試験機の機能上の制約から 0.2 tf (2.0 kN) とした。

荷重振動数について、軸距 6.5 m、4.0 m の車両（例えばトラック、セミトレーラー連結前部）が 60 km/h の速度で走行するとき、それぞれの車輪中心間隔に起因して発生する舗装面たわみ運動の振動数は計算上 2.6 Hz、4.2 Hz となる。そこで、今回の試験ではこれらを模倣した 2 Hz および 4 Hz の振動数で繰り返し荷重を加えることにした。荷重回数は、いずれの振動数についても 100 万回を上限とした。1 回の動的荷重試験に要した期間は 2 Hz の場合に約 6 日間、4 Hz の場合には約 3 日間である。

仮定した舗装断面より模型路盤の厚さは 45 cm となることを先に述べたが、動的荷重試験にあたっては、除荷後直ちに模型路盤の一軸圧縮強さ q_u 、コーン支持力 q_c および非水浸 CBR を求めることを考慮して、図一四に示すように高さ 150 mm の底板無し円筒 3 つに混合材料を個別に充填し、これらを容量 5 kgf/cm^2 (0.49 MPa) の土圧計を取り付けた円筒容器の上に順次重ねて、その上から繰り返し荷重を加えることにした。

ここで、円筒に充填する D シリーズ、E シリーズの混合材料の含水比と乾燥密度は表一三に示したそれぞれの最適条件を目標とした。材料と水との混合作業にはソイルミキサーを、円筒への充填作業には容量 50 tf (490.0 kN) の油圧試験機を使用した。その際、円筒の内面には予めシリコングリースを塗布したビニールを充てておき、混合材料が円滑に詰まるようにした。充填後には土



図一五 繰り返し荷重による沈下の進行

質試験法 JSF T 191 に準拠した体積置換法（水銀法）¹¹⁾ による密度試験を行って、目標値に合っているかどうかを確かめた。混合材料を詰めた円筒は 3 つ組み合わせて直ちに動的荷重試験に使用するものとビニール袋に入れて厳封し、温度 20°C の恒温室内で 3～28 日間空气中養生した後に用いるものとに区別した。

荷重に先立って上部、中間、下部の各円筒および土圧計を取り付けた容器を締結金具で固定して、試験中にこれらが横方向へずれるのを防いだ。また、荷重が下方へ確実に伝達するように円筒と円筒の間には直径 340 mm、厚さ 3 mm の鉄板を置くとともに、円筒と鉄板との密着および土圧計の周囲に詰めた乾燥砂の圧縮を促すために、繰り返し荷重を作用させる前に 1.8 tf (17.6 kN) の静荷重を 1 時間加えた。3 つ合わせて 45 cm の厚さとなる模型路盤全体で生じる圧縮沈下量は容量 20 mm の変位計を用いて測定することとし、その出力は土圧計の出力とともに動ひずみ計を通してデータレコーダに記録した。

土圧計の出力記録によれば、荷重の変動範囲 0.2～1.8 tf (2.0～17.6 kN) に対して圧力は 0.2 kgf/cm^2 (0.02 MPa) から 1.9 kgf/cm^2 (0.19 MPa) の間で変動しており、動的荷重試験中模型路盤には目標とした 2.0 kgf/cm^2 (0.20 MPa) にほぼ見合った圧力が作用していたことが確認された。

図一五は、模型路盤に生じた圧縮沈下量の測定結果を示す。横軸は、荷重回数 (100 回～100 万回) を対数目盛で表してある。D シリーズ、E シリーズともに沈下の進行過程に振動数の違いによる差は認められず、繰り返し荷

重を2 Hzで加えても4 Hzで加えても載荷回数が30万回を越えると沈下はほとんど進行しなくなることがわかる。変位計の出力記録を調べたところ、繰り返し載荷1回当たりの変位全振幅は概ね30万回までは0.25~0.45 mm、それ以降は0.13~0.20 mmとなっていた。DシリーズとEシリーズとを比べてみると、消石灰添加率を6%としたEシリーズの方が空气中養生日数0日(混合材料充填当日)の模型路盤にかぎり最終沈下量はいくらか小さくなってはいるものの、養生日数3~28日については消石灰の配合量との関係は明らかでない。それよりも、空气中での養生期間が長くなるにしたがって締固めた混合材料の圧縮性は着実に小さくなっていくこと、そして、混合材料のこのような耐荷性能に繰り返し荷重の作用時間が関与する部分は極めて少ないことに注目される。

動的載荷に移行する前の1時間の静載荷中に生じた沈下量は0.4~0.9 mmであり、これと消石灰添加率、空气中養生日数との関係はとくに認められなかった。また、図-5に載荷回数99回までに進んだ圧縮沈下を加算した沈下量の最大は約1.8 mm(空气中養生日数0日の場合)、最小は約0.2 mm(28日の場合)であった。いずれにしても、模型路盤の初期厚さが45 cmであることを考えれば、繰り返し荷重による沈下はかなり小さいものといえる。

動的載荷試験が終了した時点で上部、中間、下部に配置した円筒内の混合材料に対してそれぞれ一軸圧縮試験、コーン貫入試験、非水浸CBR試験を行って、空气中での養生期間や繰り返し荷重の振動数が強度、支持力特性に与える影響について調べた。なお、除荷後の混合材料の乾燥密度を体積置換法(水銀法)により求めたところ、DシリーズもEシリーズも振動数にかかわらず載荷前に比べて0.7~2.1%大きくなっていった。

一軸圧縮試験には混合材料からコア採取機を用いて抜き出した3本の円柱供試体(成形後の直径約55 mm、高さ約110 mm)を使用した。試験は1%/minのひずみ速度で実施した。コーン貫入試験には先端角30°、先端部の長さ53.5 mm、底面積6.45 cm²の単純コーンを使用し、コーンの先端を混合材料の中央に徐々に貫入させていったときの抵抗力を測定した。この試験には容量25 tf(245.0 kN)の油圧試験機を用い、ロードセルの出力およびコーンの貫入深さは試験機に接続するペンレコーダに記録した。貫入速度は5 mm/minとしたが、これは著者らが以前に行った別の実験¹⁰⁾において、凝結硬化が進行中のフライアッシュ・消石灰混合層にコーンを5 mm/minと25 mm/minの速度で貫入したところ、速度を5倍にしても抵抗力は1.4倍程度しか大きくならなかったことにもとづいて決めたものである。非水浸CBR試験では混合材料の中央に質量1.25 kgの荷重板を4枚載

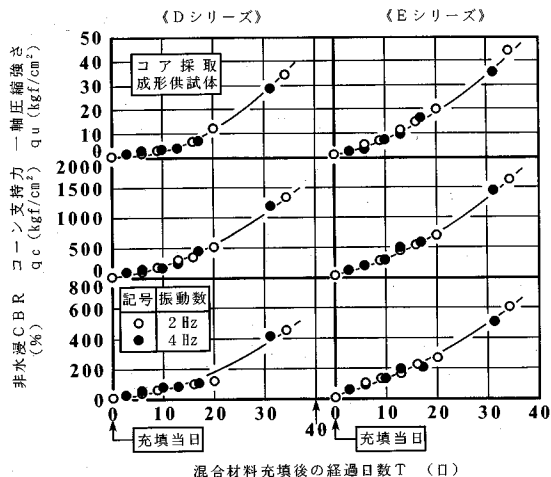


図-6 動的載荷試験終了時における模型路盤の一軸圧縮強さ、コーン支持力および非水浸CBR

● 動的載荷試験【T=空气中養生日数+載荷日数(4 Hzの場合: 3日)】
○ 放置試験【T=空气中養生日数+放置日数(3日)】

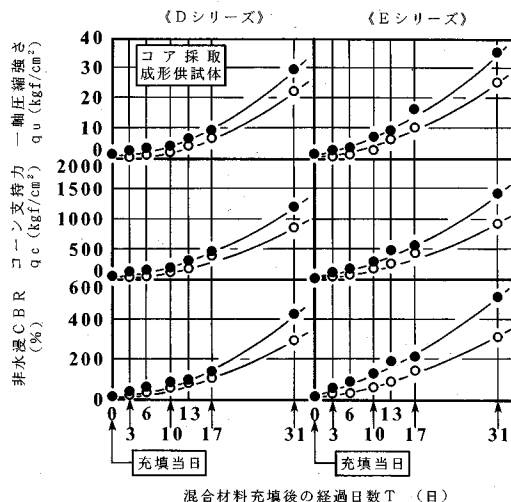


図-7 経過日数と一軸圧縮強さ、コーン支持力、非水浸CBRとの関係(動的載荷試験と放置試験との比較)

せ、直径50 mm、高さ200 mmの貫入ピストンを上記の25 tf(245.0 kN)試験機により1 mm/minの速度で押し込んでいったときの抵抗力を測定した。

図-6は、DおよびEシリーズにおける試験結果をまとめたものである。横軸は混合材料を円筒に充填してからの経過日数、すなわち、空气中での養生期間に載荷期間を加えた日数を表すが、振動数を2 Hzとした場合(記号○)と4 Hzとした場合(記号●)で経過日数がずれているのは、養生期間は同じでも載荷期間に3日の長短があることによる。また、コーン支持力 q_c は抵抗力をコーンの底面積で割った値であり、この図には q_c の最大値を記入してある。 q_c の最大値は、コーンの底面積が混合材料上

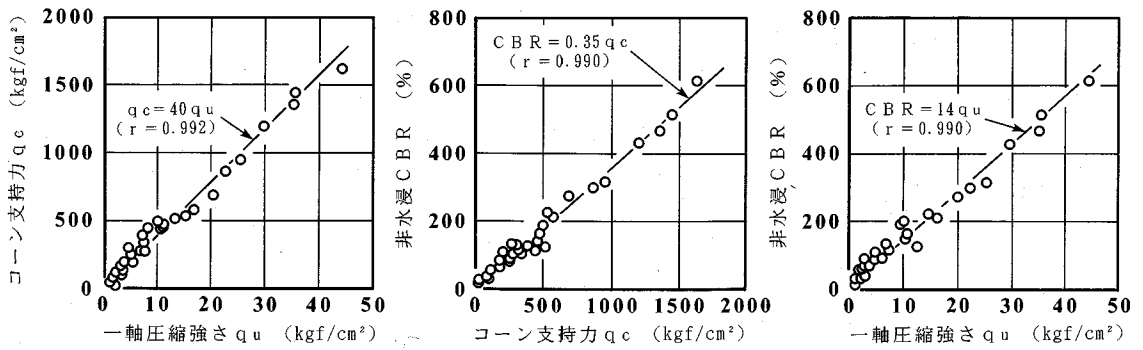


図-8 模型路盤における一軸圧縮強さ、コーン支持力、非水浸 CBR 相互の関係

面から 30~40 mm の深さに達したときに多く認められた。この図より、一軸圧縮強さ q_u 、コーン支持力 q_c および非水浸 CBR はいずれも日数の経過にともなって増加し、それらの大きさに振動数はまったく関与していないことがわかる。D、E シリーズを比較してみると、先の圧縮沈下量の測定結果 (図-5) とは幾分異なっており、ここでは消石灰添加率の違いによる差が現れており、添加率を 6% とした E シリーズの方が q_u 、 q_c 、非水浸 CBR のすべてにおいて大きくなっていることがわかる。ただし、D シリーズとの強度差、支持力差は消石灰の配合量に比例するというほどのものではない。

混合材料の含水比に関して、D シリーズ、E シリーズともに一軸圧縮試験用の成形供試体のみコア採取時に使用した水 (刃先の摩擦防止) の影響を受けて除荷直後に比べて 3~8% 高くなっていた。したがって、図-6 に示した q_u は、とりわけ、経過日数の短い時点の q_u は実際よりも小さい値になっていると推察される。

(2) 放置試験

上述したように、本研究では円筒に充填した混合材料を最長 28 日まで空气中養生した後、動的載荷試験で繰り返し荷重を加えていた期間と同じ日数だけ養生を継続した場合の一軸圧縮強さ q_u 、コーン支持力 q_c 、非水浸 CBR の経時変化についても調べてみた。継続した養生日数は、繰り返し荷重を 4 Hz の振動数で加えたときの q_u 、 q_c および非水浸 CBR と比較する場合は 3 日、2 Hz で加えたときと比較する場合は 6 日である。

試験結果の 1 例を図-7 に示す。この図は所定の空气中養生日数である 0~28 日にさらに 3 日間養生を施したときの q_u 、 q_c 、非水浸 CBR をまとめたものであり、比較を容易にするために前出図-6 における 4 Hz での結果 (記号●) も併せて示してある。D、E シリーズともに、厳封した状態で温度 20°C の恒温室内に静置しておくだけでも混合材料の強度および支持力は漸次増加していくものの、それらの値は 4 Hz で動的載荷を行った後と比

べると明らかに小さいことがわかる。同様の傾向は、養生期間を 6 日間延長した放置試験 (2 Hz に対応) においても認められた。

このような結果が得られた理由の 1 つとして載荷による密度増加を挙げることができるが、前節で述べた通り体積置換法 (水銀法) で求めたかぎりにおいては除荷後の密度は平均して 1.4% しか大きくなっていなかったことから、それだけで図-7 にみられる q_u 、 q_c および非水浸 CBR の差を説明することはできない。したがって、この差は本研究で取り扱った混合材料に特有の凝結硬化の進行に与える荷重の効果を現しているものと推察される。このため、一部の混合材料については小塊を採取して微視的領域の分析を行ったが、荷重の効果を裏付ける明確な根拠を見出すまでにはいたらなかった。

次に、動的載荷試験および放置試験で求めたすべての q_u 、 q_c 、非水浸 CBR を用いて $q_c - q_u$ 、 $CBR - q_c$ および $CBR - q_u$ 間の関係を調べたところ、図-8 に示すような結果が得られた。それぞれの間にはいずれも直線関係が成立し、石灰安定処理材料の一種とみなされるこの混合材料の q_c は q_u の 40 倍、非水浸 CBR は q_c の 0.35 倍で、かつ、 q_u の 14 倍の大きさに相当することが明らかとなった。参考までに、文献 17) によれば、セメントで安定処理した火山灰質粘性土の CBR と q_u との関係も回帰直線式で表され、その係数はおよそ 5 とのことである。

以上、この章に述べた室内試験の結果から設計 $CBR \geq 6\%$ の路床上にフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料を用いた単一層の路盤を築造しても通過輪荷重によって大きな変形を生じたり、舗装強度の即時的な低下を生じる恐れは少なく、むしろ、築造してから供用を開始するまでの時間間隔が長くなるほど交通荷重を路床の許容支持力値以内に分散する機能は高まるものと判断される。さらに、第 2 章で述べた試験結果と併せて考えれば、固化反応を促進するために加える消石灰は少量としても強度の発現はさほど遅延せず、また、その方が経済性の面からは有利とみなすことができる。

表-4 地盤土の特理的性質

土質名	礫質土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.57
自然含水比 w_n (%)	10.8
液性限界 w_L (%)	25.4
塑性限界 w_p (%)	17.2
塑性指数 I_p	8.2
礫分 (%)	51.8
砂分 (%)	29.6
シルト分 (%)	9.3
粘土分 (%)	9.3
均等係数 U_c	757.90
曲率係数 U_c'	0.63

このことから、プラントで試験舗装用に製造する混合材料の消石灰添加率は2%とすることとし、フライアッシュと排煙脱硫スラッジとの配合割合は、現在のところ排煙脱硫スラッジに比べて有効利用率のはるかに低いフライアッシュの消費拡大を念頭に置いて6:1とすることにした。なお、路床の改良工事と単一層の路盤の築造工事とを同時に行った上で舗装の供用性能を確認するのが本研究の趣旨に最も適うところであるが、今回試験舗装の候補に挙げていた数区間はいずれも堅固な路床であったために、やむを得ずそれを改良工事が施された後の路床とみなして、あるいは、簡易舗装における在来砂利層と想定して研究を進めていくことにした。次章には、実地において検分された主な事柄を記述する。

4. 試験舗装の概要および調査結果

試験舗装は九州地方（福岡、熊本、佐賀県）の公道と私道合わせて3箇所を実施した。これらの工区において事前に大型車の通行台数を12時間にわたって実測し、また、路床土の調査を行ったところ、3工区ともに設計交通量はA交通に区分され、また、路床の設計CBRはいずれも12%以上となった。本論文では、このうち築造した路盤（単一層）の一軸圧縮強さ、現場CBR、地盤反力係数の経時変化の確認に最も重点を置いて追跡調査を行った私道での試験舗装（夏季施工）を代表例に取り上げて施工状況や計測結果の詳細を報告することとする。

この私道は貯炭場に通じる石炭運搬道路であり、車線幅員3.0m、横断勾配2%の2車線道路である。ここを通行する車両の大部分はダンプトラックであり、その交通量は平日で約160台/日・方向である。一帯は石炭採掘時に発生した岩石のくず（ずり）を用いた埋立地で在来路床は堅く、区間のCBRから求めた設計CBRは20%となった。表-4は、路床面下約1.8mの深さから抜き取った土の物理的性質を示す。

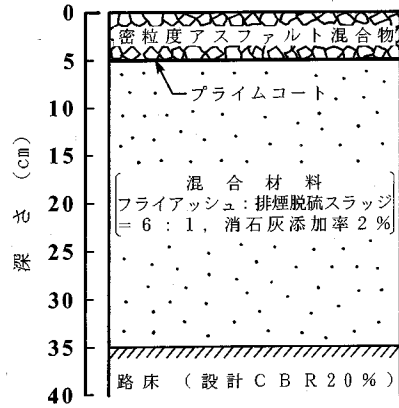
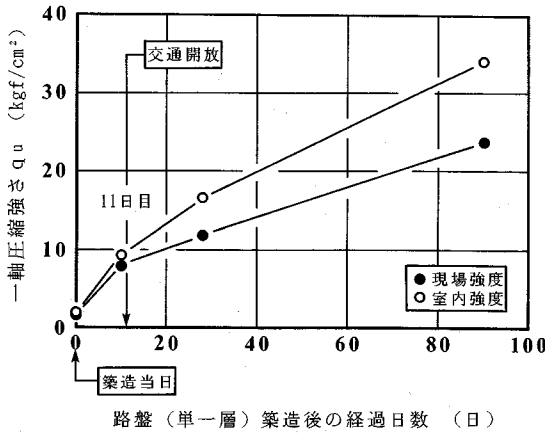


図-9 舗装構造

図-9は、当該工区交通条件および路床条件にもとづいて T_A 法により設計した舗装構造を示す。舗装延長は30mである。ここで、上層と下層とを合わせた単一層の路盤に使用する混合材料（フライアッシュ：排煙脱硫スラッジ=6:1、消石灰添加率2%）の等値換算係数 a の値は、前出図-3(a)と同じく安全側に小さく見積もって0.25と置いた。締固め試験より、試験舗装に用いる混合材料の最適含水比は22.6%、最大乾燥密度は1.40 g/cm³という結果が得られたが、施工時期が外気温度の最も高くなる8月上旬に差し掛かること、また、工程の都合上プラント⁶⁾で混合材料を製造してから転圧作業を完了するまでに最長3日の時間間隔があることなどを考慮に入れて、混合材料の含水比は最適含水比よりも3%程度高くなるように調整した。このように、プラントで製造した混合材料は適度の水分を保持しているので現地へ搬送する際も、敷きならしおよび転圧作業中にも粉塵の飛散は一切認められなかった。

施工手順としては、まずバックホウで在来舗装を計画路床面まで掘削、撤去し、ブルドーザにより路床面の不陸整正ならびに整形を行った。続いて、ダンプトラックで搬入した混合材料をモーターグレーダによって敷きならした後、10~15tのタイヤローラで4往復の転圧を行った。その際、混合材料の敷きならし、転圧作業は2回に分けて実施することとし、1回の仕上がり厚は15cmを目安とした。当初、転圧作業にはマカダムローラとタイヤローラとを併用することを考えていたが、予備的な転圧試験においてマカダムローラが走行したときにまれに混合材料の表面が剝離する現象がみられたので、実施ではタイヤローラのみを使用することにした。上記の往復回数は、このときの経験をもとにして決めた回数である。

転圧作業が終了した時点で路盤の密度を砂置換法によって測定したところ、締固め度は品質管理の限界値(最大乾燥密度の93%以上)⁴⁾を上回る95~98%に達してい



図一〇 一軸圧縮強さの経時変化
(現場強度と室内強度との比較)

ることが確かめられた。

ここでの試験舗装においては室内試験で得られた成果を踏まえて、すなわち、空気中での養生期間が長くなるほど締固めた混合材料の耐荷性能や強度、支持力特性は向上するという結果にもとづいて、単一層の路盤を築造した段階で路盤面をシートで覆って10日間車両の通行を止めることにした。その間、車両は迂回路へ誘導して往来に支障をきたさないようにした。10日後、路盤面にひびわれや隆起などが発生していないことを確認した上でプライムコートを施し、次いで密粒度アスファルト混合物をアスファルトフィニッシャーで敷きならしてマカダムローラ、タイヤローラにより十分に転圧した。

この工区では単一層の路盤の強度および支持力の経時変化を調べる目的で路盤を築造した当日、築造後10日目(交通開放前日)、28日目、90日目に一軸圧縮試験、現場CBR試験、平板載荷試験を実施した。このうち28日目と90日目の試験は、表層および基層(密粒度アスファルト混合物)の一部を開削して行った。なお、一軸圧縮試験については現場強度と室内強度との差を明らかにするために、所定の日数ごとに路盤からコア採取機を用いて抜き出し、成形した供試体の一軸圧縮強さ q_u の測定と併せて、試験舗装に使用した混合材料を路盤築造時の締固め度に相当する乾燥密度を目標に静的に締固めて作製した供試体の空気中養生時(温度20°C、材令0、10、28、90日)における q_u も測定して、両者を比較することにした。

図一〇は、一軸圧縮試験の結果をまとめたものである。コア採取成形供試体(記号●)、室内養生供試体(記号○)ともに初期の10日間で約5倍の強度増となっていること、さらに、コア採取成形供試体の q_u の推移をみると交通荷重下においても強度は着実に発現していることがわかる。それでも、コア採取時や成形時に供試体にい

表一五 現場CBR試験および平板載荷試験の結果

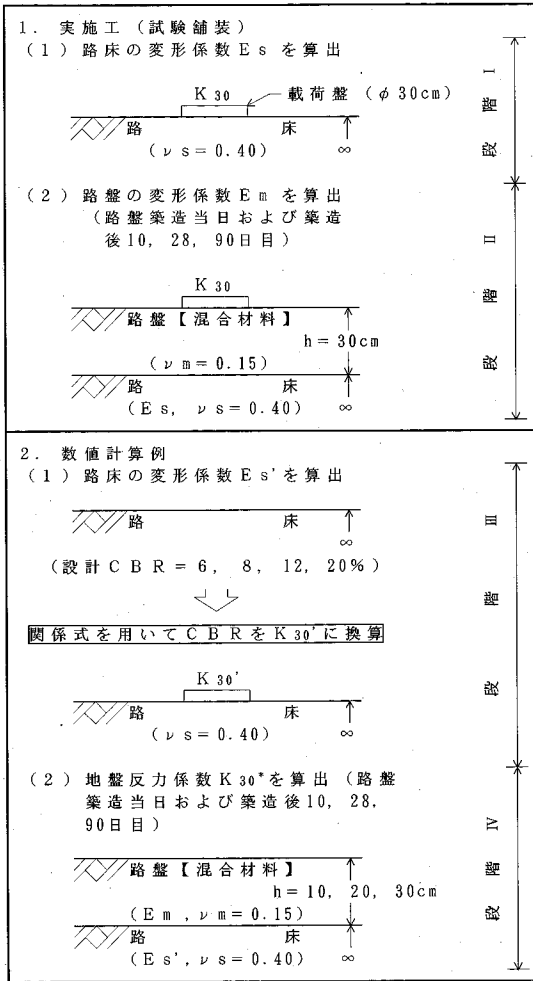
路盤築造後の経過日数(日)	現場CBR(%)	地盤反力係数 K_{30} (kgf/cm ³)
0(築造当日)	12.5	23.8
10	91.0	102.7
28	129.9	133.6
90	152.8	162.3

くらかの乱れが生じることは避けられず、現場強度は室内強度のおよそ75%の大きさとなった。著者らがこれまでに行った種々の室内試験によれば、フライアッシュに消石灰を添加して締固めると長期的な強度発現が期待されることに加えて体積膨張率が1~3%未満に抑制される効果も同時に現れ^{18),19)}、このことと今回の q_u の測定結果ならびに上述した交通開放前の路盤面にとくに変状が認められなかったことは一致する部分が多い。

表一五は、現場CBR試験および平板載荷試験の結果をまとめたものである。これらの値からも交通荷重が作用するしないにかかわらず、混合材料の凝結硬化の進行にともなって路床上に剛性の高い版状の路盤が徐々に形成されていくことがわかる。ただし、一般に路盤面で測定される現場CBR、地盤反力係数 K_{30} の大きさには路床の支持力や路盤の厚さによる影響が多分に含まれるので、この表に示した値だけで単一層の路盤の有用性を汎用的なものとして評価するのは難しく、この点については次章でさらに検討を加えることとする。

一方、2箇所公道で行った試験舗装(このうちの1箇所は冬季施工)では、単一層の路盤の築造に引き続いて基層および表層(密粒度アスファルト混合物)を舗装し、交通開放後の路面性状の推移を調べることに重点を置いてわだち掘れ量、ひびわれ率、平坦性を約10ヶ月にわたって計測した。その結果、2つの工区ともに構造的破損の発生は認められず、維持管理指数からみた供用性能は比較的高い水準を維持していた。

以上のように、今回の試験舗装を通して、フライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料はプラントで製造してから敷きならすまでの時間間隔や施工時期に応じて含水比の調整を図る必要はあるものの、これを用いて単一層の路盤を築造するにあたって使用する施工機械および施工手順は通常の舗装工事に準じればよく、また、作業効率も良好であることが実証された。さらに、築造した路盤の強度、支持力の経時変化ならびに供用後の舗装面の状況から判断して、動的載荷試験や放置試験(第3章)で示された模型路盤の性状は実際の挙動にかなり近いものであったと考えられる。



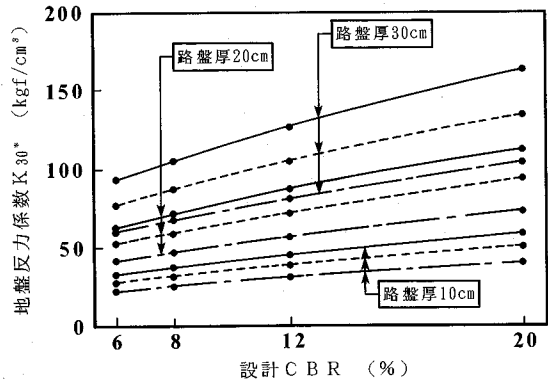
図一11 地盤反力係数 K_{30}^* の算出手順

5. 単一層の路盤を築造した場合の支持力増分に関する数値計算例

ここでは、先の表一5に示した地盤反力係数 K_{30} の実測値をもとに、設計 CBR が 6~20% の路床上にフライアッシュ・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料を用いて仕上がり厚さが 10, 20, 30 cm の単一層の路盤を築造したときに、これらの路床条件と路盤厚との組み合わせに対応して K_{30} の値が築造後 90 日間でどれくらい増加するのかについて検討した結果を述べる。

ここで、設計 CBR の下限値を 6% としたのは、第 3 章で模型路盤の厚さを設定した際と同様に計算の対象を路床の改良工事をとまなう区間に限定していることと併せて、設計 CBR ≤ 4% の路床上に直接混合材料だけを敷きながらして転圧しても品質管理の限界値を満足する締固め度に達しない恐れがあると推断したことによるものであ

線種	路盤築造後の経過日数	路床の設計 CBR (%)			
		6	8	12	20
—	10日	8.6	9.9	12.3	16.7
- - -	28日	2.0	12.6	14.0	16.6
· · ·	90日	3.0	15.9	17.4	19.9



図一12 路床の設計 CBR と計算により求めた地盤反力係数との関係

る。また、前章までは等値換算係数 a の値が確立されていない混合材料に対して $a=0.25$ と置いて舗装断面を算定していたが、実際には a の値は 0.25 以上 0.45 未満の範囲内で見積もっても差し支えないと考えられ、このことから、路盤厚の最大は取り敢えず試験舗装区間と同じ 30 cm として計算を行うことにした。一方の最小厚 10 cm というのは、乱れの少ない在来砂利層の上に築造する簡易舗装の路盤を想定したものである。なお、平板載荷試験から得られた地盤反力係数と計算で求めた地盤反力係数とを区別するために、これ以降後者を K_{30}^* で表すことにする。

図一11は、地盤反力係数 K_{30}^* の算出手順を示す。解析には「多層系弾性モデルによる路盤効果の推定法²⁰⁾」を参考にして作成した演算プログラムを使用し、これに入力する路床のポアソン比 ν_s 、単一層の路盤（混合材料）のポアソン比 ν_m の値は既往の論文を参照してそれぞれ $\nu_s=0.40^{21)}$ 、 $\nu_m=0.15^{22)}$ と仮定した。 K_{30}^* の算出にあたって、まず、築造当日および 10, 28, 90 日目の路盤の変形係数 E_m を得るために、計算の第 I 段階として試験舗装時に在来路床面で測定した $K_{30}=13.0 \text{ kgf/cm}^3$ (127.4 MN/m^3) と ν_s とをプログラムに入力して路床の変形係数 E_s を求め、第 II 段階においてこの E_s および ν_s 、 ν_m 、路盤厚 $h=30 \text{ cm}$ 、さらに、路盤面で測定した K_{30} (表一5) の諸値を入力した。次に、路床の状況（堅さ、土性、粒度組成）により試験では CBR、 K_{30} のどちらか一方しか求めることができず、その値から他方を推定する必要がある場合などに適用されること多い次式²³⁾を用いて CBR = 6, 8, 12, 20% に対応する K_{30} を計算した。

$$K_{30} = 0.55 \cdot \text{CBR} + 2.2 \quad (1)$$

ここでは、式(1)により CBR から換算した地盤反力係数を K_{30}' と表示することにする。計算の第 III 段階では 4

種類の K_{30}' と ν_s を入力して、それぞれの K_{30}' に相対する路床の変形係数 E_s' を改めて算定した。そして、第IV段階ではそれまでの演算で求めた E_m 、 E_s' および定数として扱った ν_m 、 ν_s に加えて路盤厚 $h=10, 20, 30$ cm を入力し、計算を繰り返し実行して路盤築造当日から 90 日目までの地盤反力係数 K_{30}^* を算出した。

図-12 は、計算機の出カデータを単一層の路盤の厚さごとに整理した結果を示す。第4章に述べた試験舗装区間(私道)はこの図では路盤厚 30 cm、路床の設計 CBR 20% の K_{30}^* に相当することになるが、同じ厚さの路盤を設計 CBR が 6% の路床上に築造していたならば、そのときの K_{30}^* は 4 割ほど小さな値となつて、この場合は厚さを 20 cm としても支持力の面では大差がないことになる。 K_{30}^* の経時変化をみると、路盤の厚さにかかわらず築造当日から 10 日目までの K_{30}^* の増分が最も大きく、それ以後は厚さが小さいほど増分も小さくなる傾向にあることがわかる。また、路盤厚が K_{30}^* の値に与える影響の割合については、 $6 \leq$ 設計 CBR $\leq 20\%$ の路床上では概ね厚さに比例する範囲内にあるとみなされる。

ここに示した計算結果の 1 例は、路床改良を施す際の目標設計 CBR に応じて、あるいは、舗装の仕上がり高さが制限されているときにはその構造断面に応じて単一層の路盤の厚さを適宜設定し、それを築造した後に期待される舗装強度を推定する上には有用なものと考えられる。しかし、より正確な路盤支持力の増分予測を行うには路床の堅さ、単一層の厚さ、締固め度によって実際は均一ではない路盤のポアソン比や変形係数を精査する必要があり、この点に関しては今後の検討課題としたい。

6. まとめ

限りある骨材資源を温存しつつ、これに替わる舗装用材料として地域産材料や副産物などを積極的に活用していくための技術開発、さらに、舗装の強化、延命化ならびに補修費の低廉化を達成するための路床の構築法と舗装構造の設計法とに関する技術開発、これらがアスファルト舗装を新設あるいは補修するにあたっての当面の、かつ、重要な課題となっている。

著者らはこのうちの舗装用材料と舗装構造との組み合わせに着目して、路床改良との併用施工を前提に、大型車の通行量が比較的少ない区間に石炭火力発電所副産物であるフライアッシュおよび排煙脱硫スラッジに消石灰を混合した材料からなる単一層の路盤を築造することを提案し、室内で混合材料の水浸 CBR や耐荷性能を調べるとともに現道で施工性や築造後の強度、支持力の経時変化などを調べた。さらに、単一層の路盤を種々の設計 CBR の路床上に築造したときに期待される支持力増分

を数値計算によって求めた。

以下に、本研究で得られた結果を要約する。

(1) 締固めた混合材料の一軸圧縮強さはアスファルト舗装要綱、簡易舗装要綱に示されている路盤材としての品質規格をいずれも満足する。また、水浸に先立つ空气中での養生期間を長くするほど混合材料の吸水膨張量は小さくなり、修正 CBR は大きくなる。

(2) 円筒容器に混合材料を充填して作製した模型路盤に現道に近い条件で繰り返し荷重を加えたときの圧縮沈下量は小さく、沈下の進行に載荷振動数または載荷時間が関与する部分は少ない。さらに、繰り返し荷重を受けることによって模型路盤の一軸圧縮強さ、コーン支持力、非水浸 CBR は一層大きくなる傾向が認められる。

(3) プラントで製造する混合材料は敷きならし、転圧作業時の外気温度や工程を考慮に入れて含水比を調整する必要はあるものの、施工機械の作業性能に支障なく所定の締固め度を有する単一層の路盤を築造することができる。

(4) 交通荷重下においても単一層の路盤の強度および支持力は着実に増加し、また、供用後の路面に早期の修繕を要するような損傷や変状は見当たらない。

(5) 地盤反力係数の実測値を組み入れた演算手法を用いて、路床の設計 CBR と単一層の路盤の厚さとに対応した舗装強度を概ね推定することができる。

これらのことから、限られた交通条件および路床条件のもとではあるが、本研究で取り扱った石炭火力発電所副産物を単一層の路盤の構成材料として有効利用することは十分に可能と判断することができる。なお、混合材料の等値換算係数 a に関して、前回の研究に続いて今回も現道での計測結果をもとに試算してみたところ、 $a=0.25$ (路盤築造当日)~ 0.85 (90 日後)となった。したがって、石灰安定処理材料の a の値を準用すること自体にはとくに差し障りはないと考えられるが、混合材料の等値換算係数を確立するには未だ不十分な点もみられ、配合割合や路盤厚を変えた試験舗装を今後も継続して行った上で改めて検討することとしたい。

謝辞：各種の室内試験および結果の整理には、金沢工業大学土木工学科卒業研究生諸君ならびに石川工業高等専門学校校技官澤真周氏のご協力をいただいた。また、試験舗装の実施にあたっては地元の役所、企業の方々の深いご理解と多大なご尽力をいただいた。ここに、厚く御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 江良誠至：骨材の需給と現状の問題点，舗装，第 30 巻，第 11 号，pp.4-9，1995.11.
- 2) 藤田晃弘：人工骨材・カラー骨材の現状と適用例，舗装，

- 第30巻, 第11号, pp.29-32, 1995.11.
- 3) 村山祐典, 佐藤育正: ロシア沿海州地方の碎石事情, 舗装, 第30巻, 第11号, pp.33-37, 1995.11.
 - 4) (社)日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1992.12.
 - 5) 山田幹雄, 佐野博昭, 黒島一郎, 太田 実: 石炭火力発電所産副産物の道路路盤材としての有用性に関する研究, 土木学会論文集, 第510号/VI-26, pp.125-135, 1995.3.
 - 6) (社)土木学会・土構造物および基礎委員会・「舗装工学」編集委員会: 舗装工学, 1995.2.
 - 7) 苗村正三, 小川伸吉: 路床の安定処理, 舗装, 第28巻, 第9号, pp.4-10, 1993.9.
 - 8) (社)日本道路協会: 簡易舗装要綱, 1979.10.
 - 9) (社)燃料協会・石炭利用技術用語辞典編集委員会: 石炭利用技術用語辞典, 1984.2.
 - 10) (社)土木学会・エネルギー土木委員会・新エネルギー技術小委員会: 石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望—埋立, 盛立, 地盤改良—, 1990.3.
 - 11) (社)土質工学会: 土質試験の方法と解説, 1990.3.
 - 12) (社)日本道路協会: 舗装試験法便覧, 1988.11.
 - 13) 永康 進, 加藤朝雄: 軟弱路床上の試験舗装—その概要と力学的考察—, 土木技術資料, 第17巻, 第10号, pp.26-33, 1975.10.
 - 14) (社)土質工学会: 土質工学ハンドブック, 1982.11.
 - 15) 植下 協: 舗装の力学(第7回), 舗装, 第8巻, 第5号, pp.31-34, 1973.5.
 - 16) 山田幹雄, 佐野博昭, 徳岡研三, 伊能忠敏: 在来線噴泥対策としての石炭灰を用いた置換互層路盤の適用性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第444号/VI-16, pp.31-40, 1992.3.
 - 17) 関根悦夫, 村本勝巳: 安定処理した路盤の力学特性に関する研究, 鉄道総研報告, 第7巻, 第10号, pp.55-62, 1993.10.
 - 18) 佐野博昭, 山田幹雄, 太田 実, 山本三千昭: 養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響, 土木学会論文集, 第463号/III-22, pp.45-53, 1993.3.
 - 19) 山田幹雄, 山崎和彦, 佐野博昭, 伊能忠敏: 石炭灰を用いた路盤補修策による噴泥防止効果に関する研究, 土木学会論文集, 第486号/VI-22, pp.105-114, 1994.3.
 - 20) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物—, 1992.11.
 - 21) 伊東孝之, 関口吉男, 板井幸市: 鉄道路盤の支持力, 鉄道技術研究所速報, No. A-87-91, 1987.3.
 - 22) Alam, S. and Little, D. N.: Evaluation of Fly Ash and Lime-Fly Ash Test Sites Using a Simplified Elastic Theory Model and Dynaflect Measurements, *Transportation Research Record*, No. 1031, pp.17-27, 1985.
 - 23) 植下 協: 舗装の力学(最終回), 舗装, 第8巻, 第9号, pp.33-38, 1973.9.

(1996.1.29 受付)

A STUDY ON UTILIZATION OF FLY ASH AND FLUE GAS DESULFURIZATION WASTES FOR ROAD BASE UNDER LIGHT TRAFFIC

Mikio YAMADA, Hiroaki SANO, Ichiro KUROSHIMA and Minoru OHTA

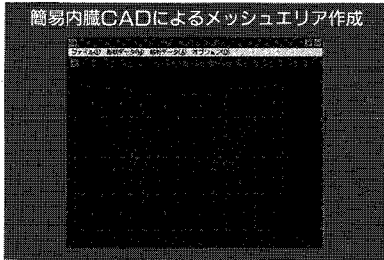
In order to investigate utilization of fly ash and flue gas desulfurization wastes for road base under light traffic, authors performed various laboratory tests. Furthermore, we conducted test pavements at three existing roads (L, A-traffic) for field observations investigating bearing capacity, strength and condition of road surface after construction.

The results obtained from laboratory tests and field observations showed that mono-layer base constructed with mixed materials using fly ash and flue gas desulfurization wastes had sufficient durability against repeated load and, in addition, could transfer sufficiently traffic load to subgrade.

Mr.SOIL Ver.3.5 for Windows

It's NEW!

業界すべてのエンジニアへ
優れた機能を抜群のコストパフォーマンスで。



Step 1

オートメッシュで簡単に
メッシュデータ作成



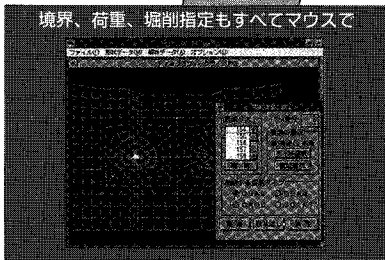
Step 4

さらに詳細検討へ

Real Easy! Real Speedy!

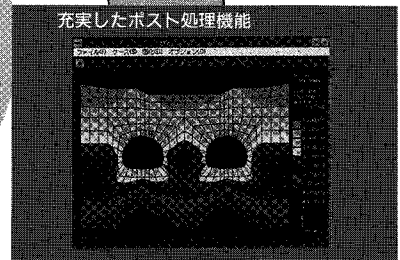
Mr. SOILは地盤の応力、
変形特性、土木構造物との
相互作用を総合的に解析可能
な強力なFEM解析ツールです。

販売実績：400本超
(国内外含：'95.3現在)



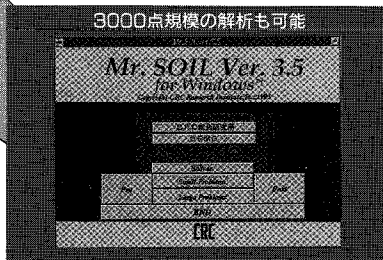
Step 2

高速、高精度ソルバーへ



Step 3

各種ポスト処理へ



3000点規模の解析も可能

●動作環境

CPU：80386以上（推奨 80486以上）
Windows 3.1
メモリ640Kbyte+7Mbyte以上
ハードディスク10Mbyte以上

●価格 ¥980,000-（税別）

旧バージョンをご使用中のお客様は、
バージョンアップ価格を、また、ご本日以
降マルチライセンス価格も設定しておりま
すのでお問い合わせ下さい。

※Windowsは米国マイクロソフト社の商標です。

■詳細資料または、ご検討のためのDemo Systemをご希望のお客様は、
下記の問い合わせ先までご連絡下さい。

土木CAE業界をリードするCRC土壌ソフトウェアラインアップ

地下水解析：3次元地下水解析…SEEPAGE-3D
広域地下水変動解析…UNISSF(V-2)、PC/UNISSF
地質解析：3次元地質解析…GEORAMA
地盤解析：2、3次元地盤解析…Mr.SOIL
連成解析：土・水の連成（逆）解析…UNICOUP
岩盤・地盤解析：個別要素法…UDEC、3DEC
*これらのソフトを使用しての受託解析業務も行ってあります。

●開発/販売元  株式会社CRC総合研究所
(問合わせ) 日本技術開発株式会社

- 西日本事業部/科
〒541 大阪
TEL：06-2
- 科学システム事業
〒136 東京
TEL：03-5



* 8 0 1 4 6 0 4 *

3

|37

土と水の連成逆解析プログラム

UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

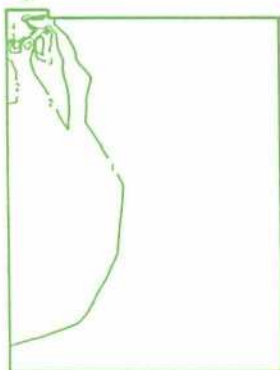
出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。
 - 非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)
 - 弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)
 - 弾粘塑性(関口・太田モデル)

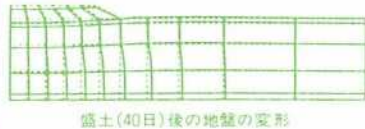
(荷重)



応力増分コンター (De V)
(10日後)



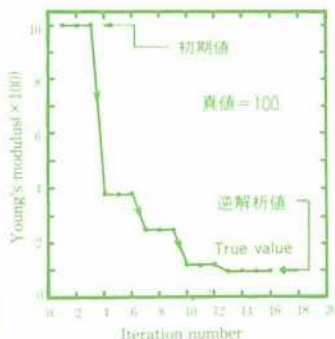
変位ベクトル図 (40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭
コンターおよび自由水面



ヤング率と繰り返し回数の関係
逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 CRC 総合研究所

西日本事業部

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号
TEL. (03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06) 241-4121 営業担当: 岩 崎
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅 原