

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

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 石川県金沢南局内野々市町扇が丘7-1)

²正会員 工修 石川工業高等専門学校講師 環境都市工学科

³正会員 工修 三井建設(株)技術研究所 主任研究員

⁴正会員 工博 金沢工業大学教授 工学部土木工学科

本研究では石炭火力発電所産副産物であるフライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの道路下層路盤材としての有用性を検討するために、まず、室内でこれらを混合してから締固めるまでの時間間隔と作製した供試体の養生温度とを種々変えたときの軸圧縮強さや体積変化率を調べた。次に、2箇所の現道で試験舗装を実施して交通開放後の路面性状や路盤支持力などを測定した。試験結果より、当該材料は下層路盤材としての品質規格を満足し、舗装の供用性、耐久性はともに良好であることが示された。

Key Words: fly ash, flue gas desulfurization wastes, subbase course, test pavement, bearing capacity

1. まえがき

石炭火力発電所では、多量の石炭灰や排煙脱硫スラッジ(以後、単にスラッジと称する)が発生している。石炭灰は石炭燃焼時に生じる残滓であり、汎用的な燃焼装置である微粉炭燃焼式ボイラーにおける発生量は原炭の20%程度とされている。石炭灰はその排出形態によりクリンカーアッシュとフライアッシュとに大別されるが、両者の発生比率はクリンカーアッシュの15~20%に対してフライアッシュは80~85%となっている¹⁾。一方のスラッジは、ボイラーの排煙に含まれる硫酸化合物を石灰石スラリーで脱硫する際に生じるものであり、その発生量は石炭灰の5~50%とされている²⁾。

石炭灰はセメント分野などで発生量のおよそ半分が有効利用されているものの、残りは廃棄物として海面または陸上埋立処分されている実状にある。これに対して、石膏の原料となるスラッジはそのほとんどが石膏ボードや陶磁器型材などに製品化されている。しかし、電気事業における石炭の消費量は今後も増加する傾向にあり、場合によっては石炭灰のみならずスラッジについても現在の利用率をそのまま維持することが困難な状況にいたることも十分に予想される。そのため、このような材料の用途の拡大を目指して農業・水産、建築、土木の各分野においても利用技術の開発が積極的に進められている。

土木分野ではこれまでも石炭灰を道路材、埋戻し

材、鉱山充填材などに使用した実績があり、この中の道路材に関しては1988年に改訂されたアスファルト舗装要綱³⁾において初めてクリンカーアッシュが下層路盤材、遮断層材、凍上抑制層材の一部に組み入れられた。しかし、発生量のはるかに多いフライアッシュについては未だにアスファルトフィラー材への使用のみに止められている。これは、生産地が限定されている石炭灰の流通機構や経済評価の手法が確立されていないことに加えて、フライアッシュ単体あるいはこれにスラッジや安定材を混合した材料の交通荷重に対する耐久性、路面の平坦性を長期的に調べた事例が少ないことによるものと考えられる。

フライアッシュを用いた路盤の耐荷性能に関して、著者らは以前に鉄道線路の補修策として「砂層—フライアッシュ・消石灰混合層—砂層」からなる互層路盤を在来線の噴泥箇所試験的に築造し、約1年にわたって施工基面の振動量や高低下などを調査したことがあるが、この路盤に軌道狂いの要因となるような沈下や隆起は認められず、かつ、堅固な版となった混合層に亀裂や反りなどの変状は生じていなかった^{4)~6)}。また、別の研究においてフライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料の一軸圧縮強さの経時変化を調べてみたところ、混合材料の強度発現過程には配合割合とともに養生温度が深く関与していることが示された⁷⁾。しかし、その研究では、当該材料の路盤材への有効利用を図る際に検討すべき材料を混ぜ合わせてから締固めるまでの時間間隔、いわゆる放置

表-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
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.30	2.63
砂 分 (%)	11.6	15.4
シルト分 (%)	85.5	79.8
粘 土 分 (%)	2.9	4.8
均 等 係 数 U_c	2.00	1.80
曲 率 係 数 U_c'	1.09	0.90

表-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
重 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-3 フライアッシュおよび排煙脱硫スラッジの溶出試験結果

換 出 対 象 物 質	溶 出 量 (mg/l)		排 水 基 準 値 (mg/l)
	フライアッシュ	排煙脱硫スラッジ	
カドミウム化合物	定量限界以下	定量限界以下	0.1
シアン化合物	同上	同上	1.0
鉛化合物	0.1	同上	1.0
6価クロム化合物	0.1	同上	0.5
ヒ素化合物	定量限界以下	同上	0.5
総 水 銀	同上	同上	0.005

表-4 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	C-1	F: S = 3 : 1*	0	1.36	23.8
	C-2		2	1.30	25.0
	C-3		6	1.30	25.5
D	D-1	F: S = 6 : 1*	0	1.38	21.6
	D-2		2	1.40	22.6
	D-3		6	1.39	22.9

* 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

日数が締固め特性やその後の強度、変形特性におよぼす影響についてまでは明らかにしていなかった。

このことから、本研究ではフライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料の下層路盤材としての有用性を検討するために室内で放置日数、養生温度、養生日数の異なる混合材料についてその強度特性や変形特性を調べるとともに、積算温度を考慮に入れた数値計算を行って築造後の路盤強度を推定した。さらに、2箇所の現道で試験舗装を実施して施工性や交通開放後の供用性能などを調べた。

2. 混合材料の基本的性質

今回の室内試験および試験舗装には、微粉炭燃焼式を

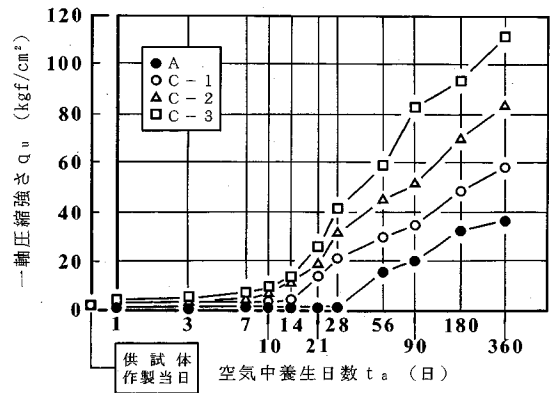


図-1 養生日数の経過にともなう一軸圧縮強さの変化 (A, Cシリーズ)

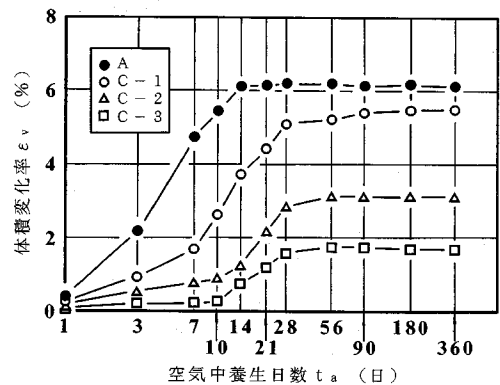


図-2 養生日数の経過にともなう体積変化率の推移 (A, Cシリーズ)

採用している火力発電所より排出されたフライアッシュとスラッジとを使用した。これらの物理的性質を表-1に、化学成分組成を表-2に示す。また、溶出試験の結果は表-3に示すとおりで、有害物質量は水質汚濁防止法による基準値以下となっている。

本研究では、フライアッシュとスラッジとの配合割合を実際の発生比率に倣って乾燥質量比で3:1および6:1とし、これにポゾラン活性を高める目的で市販の消石灰を0~6%添加することにした。ここでは配合割合を3:1とした混合材料をCシリーズ、6:1とした混合材料をDシリーズと称することにする。

表-4はC, Dシリーズの非繰返し法による締固め試験結果を示す。この表には、フライアッシュ単体(Aシリーズ)およびスラッジ単体(Bシリーズ)の結果も併せて示してある。なお、締固め試験は混合材料作製後直ちに実施したのではなく、水とのなじみをよくするために一旦ビニール袋に入れて密封し、約1時間が経過した時点で試験を開始した。C, Dシリーズを比較してみると、フライアッシュの配合量は後者の方が2倍多くなっ

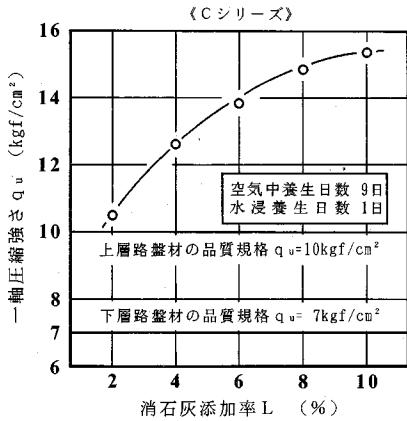


図-3 消石灰添加率と一軸圧縮強さとの関係

ているのに対し最適含水比、最大乾燥密度の値には両者間で大きな差のないことがわかる。

一般に、セメントや石灰などで安定処理した土の改良効果の大小を示す指標として一軸圧縮強さが用いられており、処理土の強度発現過程を推定するにあたっては材令と温度との積、いわゆる積算温度の考え方を適用することができる⁸⁾。著者らは、本研究で取り扱う混合材料も安定処理土の一種と判断して各シリーズの一軸圧縮強さを測定することとし、さらに、混合材料を用いて下層路盤を築造するのは今回が初めてということもあってその強度特性のみならず変形特性をも明らかにする目的で養生期間中の体積変化率の推移を調べてみることにした。供試体(直径約5cm、高さ約10cm)は二つ割りモールドの中に入れた混合材料を静的に締固めて作製することとし、供試体の含水比および乾燥密度はそれぞれの最適条件(表-4)を目標とした。作製した供試体はビニール袋に入れて厳封し、温度20°Cの恒温器内で最長360日まで空气中養生を行った。一軸圧縮試験は、1%/minのひずみ速度で実施した。

図-1および2はA、Cシリーズにおける空气中養生日数 t_a と一軸圧縮強さ q_u との関係および t_a と体積変化率 ϵ_v との関係を示す。ここで、 t_a は対数日盛で表してある。図-1より、フライアッシュだけを締固めて養生(Aシリーズ)しても初期の約1ヶ月間はほとんど強度を発現しないのに対して、フライアッシュにスラッジを混合(C-1シリーズ)し、さらに消石灰を添加(C-2, 3シリーズ)すると、養生10ないし14日目あたりから q_u は着実に増加していくことがわかる。また、図-2よりA、Cシリーズともに供試体は養生28日目までに数%の体積膨張を生じるものの、その量は消石灰添加率を高くするほど小さくなるがわかる。 q_u 、 ϵ_v のこのような経時変化の傾向は、フライアッシュとスラッジとの配合割合を6:1としたDシリーズにおいても認められた。

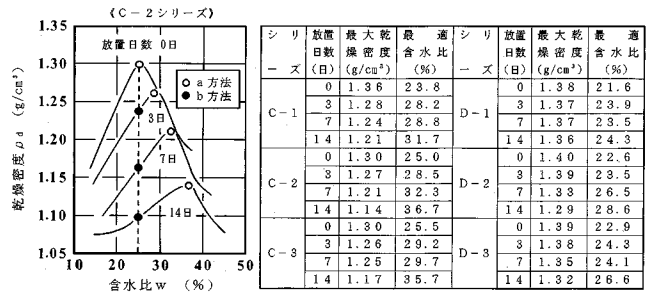


図-4 各放置日数における混合材料の締固め特性

以上のように、フライアッシュにスラッジと消石灰とを混ぜ合わせた材料を締固めて20°Cで空气中養生した場合の強度発現は大きく、また、消石灰の添加は固化反応の促進と体積膨張抑制の効果をもたらすことが確かめられた。そこで、次の段階として、本研究の主眼である道路下層路盤材としての適用性の有無、すなわち、この混合材料がアスファルト舗装要綱⁹⁾に示されている品質規格(石灰安定処理の場合:9日空气中養生,1日水浸後の q_u が7kgf/cm²(686.0kPa)以上)を満足するかどうかについて調べてみることにした。試験は安定処理混合物の一軸圧縮試験方法¹⁰⁾に準拠して行ったが、先の表-1に示したようにフライアッシュとスラッジには2mmより大きな粒子(礫)は含まれていなかったことから、供試体の寸法は直径約5cm、高さ約10cmとすることにした。供試体は、静的締固めによって作製した。

試験結果の1例を図-3に示す。この図はフライアッシュとスラッジとの配合割合を3:1とし、これに消石灰を2~10%添加したときの q_u をまとめたものである。参考までに、消石灰添加率を0%として作製した供試体の空气中養生10日目における q_u を測定してみたところ8.5kgf/cm²(833.0kPa)となっていた。この図から、消石灰添加率2%でも下層路盤材としての品質規格はもとより上層路盤材の品質規格である10kgf/cm²(980.0kPa)をも満足すること、また、消石灰添加率をさらに高くすれば q_u も大きくなるが、添加率の増加にともなう q_u の増加は比較的小さいことがわかる。なお、水浸養生終了時における体積変化率 ϵ_v は消石灰添加率2%の場合1.6%、添加率10%では1.1%となった。同様の結果は、配合割合を6:1とした供試体の一軸圧縮試験においても得られた。

以上に示した一軸圧縮強さおよび体積変化率の測定結果から、著者らはフライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料は下層路盤材として十分に適用できるものと判断した。

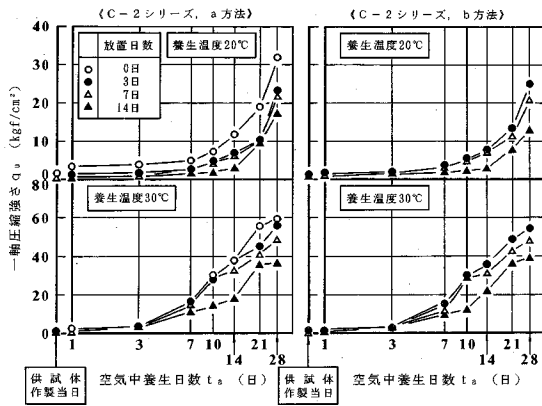


図-5 養生日数の経過ともなう一軸圧縮強さの変化 (C-2 シリーズ)

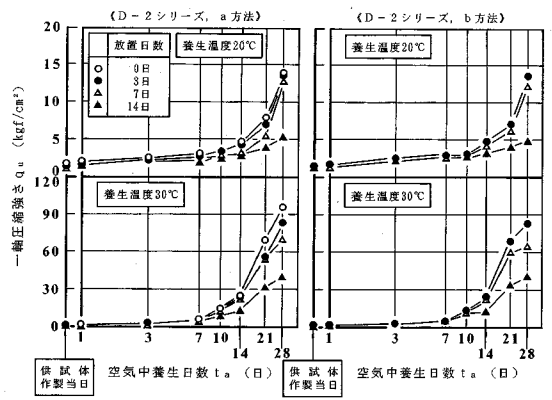


図-6 養生日数の経過ともなう一軸圧縮強さの変化 (D-2 シリーズ)

3. 締固め時期および養生温度が混合材料の強度発現過程におよぼす影響

下層路盤を安定処理工法によって築造する場合、通常は作業効率や経済性の観点から原位置で安定材散布、混ぜ合わせを行う路上混合方式が採用される。しかし、本研究で取り扱う混合材料は配合量の管理、含水比の調整や混合の均一性が要求されるために、品質の一定した材料を大量に製造するには中央プラント混合方式の方が有利と考えられる。その反面、中央プラント混合方式を採用する場合には混合材料を製造してから現地へ搬送、敷きならし、転圧作業を行うまでの時間間隔によって路盤築造時の施工性、締固め度や築造後の強度発現に差が生じることが懸念される。とりわけ、運搬距離が極端に長いときや現地に搬入したものの天候不順により施工が数日延期されたときなど、施工前に材料の固化反応が進行して敷きならし時に再混合する必要が生じるようでは、このような混合材料の下層路盤材としての利用価値はかなり低下することになる。

このことから、著者らは、まず、フライアッシュとスラッジと消石灰とを混ぜ合わせてから締固めるまでの時間間隔（放置日数）が変わると混合材料の最適含水比、最大乾燥密度はどれくらい変動するのかを、次のような試験によって調べてみることにした。すなわち、Cシリーズ（配合割合3:1）、Dシリーズ（6:1）それぞれの含水比を表-4に示した混合材料作製当日の最適含水比となるように調整し、これを密封状態で温度20℃、湿度90%の恒温室内に3、7、14日間放置した後に締固め試験を実施した。

試験結果の1例として、C-2シリーズで得られた各放置日数ごとの締固め曲線を図-4に示す。この図には、それ以外のシリーズにおける最適含水比、最大乾燥密度の値も併せて示してある。これらの値をみると、放置日

数が長くなるにつれて最大乾燥密度はわずかに小さくなり、放置3日、7日、14日の最大乾燥密度は平均して0日（混合材料作製当日）の98%、95%、91%となっていることがわかる。参考までにCシリーズについてのみ放置28日の締固め曲線も求めてみたが、そのときの最大乾燥密度は0日の77%にまで減少していた¹¹⁾。一方、最適含水比は日数の経過とともに漸次高くなっていく傾向にあることがわかる。この点に関して、ビニール袋に入れた混合材料の状態を観察したところ、放置している間に少しずつ顆粒状に変化していく様子が認められ、このことも締固め曲線が右下方へ移行していった理由の1つと考えられる。

アスファルト舗装要綱⁹⁾では上層および下層路盤の締固め度による品質管理の限界値を最大乾燥密度の93%以上としており、これを今回の試験結果に当て嵌めるとC、Dシリーズともに放置7日までの混合材料がこの基準に適合することとなって、保存状態が良好であればそのまま下層路盤材として使用しても差し支えないことになる。しかし、このような材料に関しては、保存時の性状や締固めの程度のみならず周辺環境、例えば温度などが築造後の強度発現過程におよぼす影響も少なくないと考えられる^{6),7)}。そこで、上述の締固め試験に引き続いて放置日数、供試体の作製方法および養生温度の組み合わせを種々変えた一軸圧縮試験を行ってみることにした。

この一軸圧縮試験では、放置日数は締固め試験と同じ3、7、14日の3通りとし、供試体（直径約5cm、高さ約10cm）は図-4に示してあるa、bの2種類の方法によって作製することにした。すなわち、a方法とは所定の放置日数に達した混合材料に水を加えてそれぞれの最適含水比、最大乾燥密度となるように供試体を作製する方法であり、b方法とは放置終了後も混合材料の含水比はとくに調整せず、その含水比とそれぞれの締固め曲線

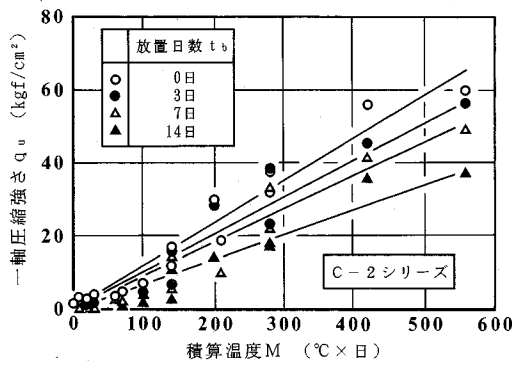


図-7 積算温度と一軸圧縮強さとの関係 (C-2 シリーズ)

とが交わる点の乾燥密度をもって供試体を作製する方法である。したがって、養生条件にもよるが、a方法で作製した供試体とb方法で作製した供試体との間に極端な強度差が現れた場合、つまり、後者の一軸圧縮強さに増加の傾向が認められないときには、放置した混合材料に対しては施工時にそのつど含水比や転圧回数の調整を図る必要があるということになり、これは作業効率の面からは不利な要件となる。作製した供試体はビニール袋に入れて厳封し、恒温恒湿器内で最長28日まで空气中養生を行った。養生温度は10、20、30℃の3段階（湿度75%）とした。

図-5および6はa方法、b方法で作製したC-2およびD-2シリーズの供試体を20℃、30℃で養生したときの一軸圧縮強さ q_u の経時変化を示す。空气中養生日数 t_b は対数目盛で表してあり、また、比較のためにa方法については放置しなかった場合の q_u の推移も示してある。これらの図より、同じシリーズでも放置日数が長いほど、養生温度が低いほど強度の発現は小さくなること、さらに、供試体の作製方法の違いによる強度差はほとんどないことがわかる。このような結果は、消石灰添加率を0%としたC-1、D-1シリーズおよび6%としたC-3、D-3シリーズにおける一軸圧縮試験からも得られた。ただし、全体の傾向として、 q_u は消石灰添加率にかかわらず養生温度20℃ではCシリーズの方が、30℃ではDシリーズの方が大きくなり、10℃の場合には両シリーズでほぼ同じ値となることが認められた。現段階において、20℃以上で養生すると配合割合によって締固めた混合材料の強度発現過程に微妙な違いが現れる原因は明らかでなく、この点についてはX線回折装置による反応生成物の確認などを含めて今後の検討課題とした。

この試験では体積変化率 ϵ_v の測定も行ったが、その結果、 ϵ_v は放置日数が長くなるにつれて大きくなること、養生温度や供試体の作製方法が異なっても顕著な差は生じないことが確かめられた。なお、空气中養生終了

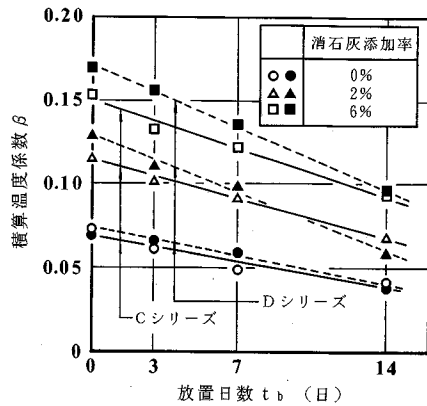


図-8 放置日数と積算温度係数との関係 (C、D シリーズ)

時における ϵ_v はCシリーズにおいて1.2~5.7%、Dシリーズでは1.1~3.7%となった。

このように、a方法とb方法とで一軸圧縮強さや体積変化率にはほとんど差がなかったことから、混合材料製造後数日が経過した時点で下層路盤を築造するような場合でも、敷きならしに先立って再度加水、混合を行う必要性は少ないと判断される。一方、放置日数が長くなると締固め度、凝結硬化の進行度はともに低下することになるが、それでも、今回の室内試験の結果より混合後およそ1週間以内に転圧が行われる場合には安定処理材料としての効力は遜色なく発揮されるものと考えられる。ただし、混合材料の強度発現の大小は養生温度によって左右される面も多分にあるので、フライアッシュとスラッジとの配合割合および消石灰添加率は施工時の外気あるいは路盤内温度に応じて適宜設定するのが路盤の耐久性を高める上にはより適切といえる。

4. 積算温度を用いた混合材料の強度推定法

前章までに述べたように、フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料の強度発現過程は養生の日数と温度とに深い関わりをもっている。そこで、著者らは積算温度を考慮に入れた手法でこのような材料の一軸圧縮強さを推定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^{12),13)}。本研究においては、積算温度を次のように定義した。

$$M = t_b \cdot (T + \alpha) \quad (1)$$

ここに、 M : 積算温度 (°C × 日)

t_b : 空气中養生日数 (日)

T : 養生温度 (°C)

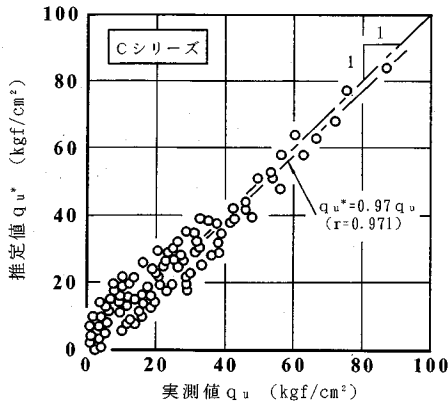
α : 加算温度 (°C)

なお、養生温度を10℃としたシリーズの強度発現はいずれも小さかったことから、加算温度 α の値は-10℃と置くことにした。

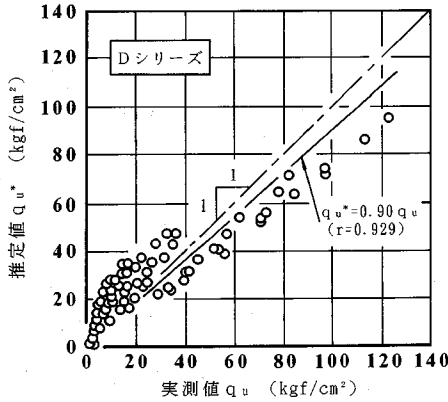
表—5 路床土の物理的性質

物理的性質	試験舗装Ⅰ		試験舗装Ⅱ*
	工区Ⅰ-1	工区Ⅰ-2	工区Ⅱ-1, 2
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.71	2.75	2.60
自然含水比 w_n (%)	15.7	18.1	11.1
液性限界 w_L (%)	29.7	NP	25.8
塑性限界 w_p (%)	22.5	NP	18.3
塑性指数 I_p	7.2	NP	7.5
機分 (%)	41.5	11.9	44.2
砂分 (%)	28.1	57.9	38.4
シルト分 (%)	20.3	22.9	10.0
粘土分 (%)	10.1	7.3	7.4
均等係数 U_c	484.62	42.11	452.70
曲率係数 U_c'	0.86	2.13	2.19

* 試験舗装Ⅱにおける物理的性質の値は工区Ⅱ-1, 2の平均を示す。



図—9 推定値と実測値との比較 (Cシリーズ)



図—10 推定値と実測値との比較 (Dシリーズ)

図—7は、積算温度 M と一軸圧縮強さ q_u との関係を示す。この図はC-2シリーズについてまとめたものであるが、 q_u の値はいずれもa方法によって測定された値である。図より、 M と q_u との間には放置日数 t_b ごとに式(2)に示すような直線関係が成立し、回帰直線の勾配は t_b が大きいほど小さくなることわかる。

$$q_u = \beta \cdot M \quad (2)$$

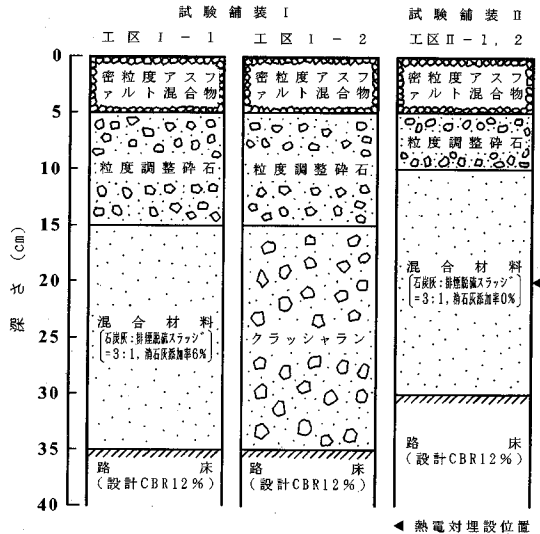
β の値はCシリーズにおいて0.04~0.15, Dシリーズでは0.04~0.17となり、フライアッシュとスラッジとの配合割合の違いによる差はとくに認められなかった。以下、 β を積算温度係数と称することにする。

図—8は、それぞれのシリーズにおける放置日数 t_b と積算温度係数 β との関係を示す。この図より、添加した消石灰量の多少にかかわらず t_b が大きくなるにつれて β の値は小さくなること、さらに、 t_b と β との関係についても式(3)に示すような回帰直線式で表現できることわかる。

$$\beta = \gamma \cdot t_b + \delta \quad (3)$$

ここに、 γ, δ : 実験定数

以上のことから、式(2)に式(1)および式(3)



図—11 舗装構造

を代入することによって混合材料の強度発現過程に関連をもつ放置日数 t_b 、養生温度 T 、養生日数 t_a の各項目をすべて組み入れた式(4)が得られ、この式を用いて積算温度 $M \leq 560$ (°C×日)における一軸圧縮強さ q_u の値を推定することが可能となる。すなわち、

$$q_u = (\gamma \cdot t_b + \delta) \cdot t_a \cdot (T + \alpha) \quad (4)$$

なお、室内試験から得られた q_u と上式から求めた q_u とを区別するために、これ以降後者の一軸圧縮強さを q_u^* で表すことにする。

図—9は、式(4)により一軸圧縮強さを評価することの妥当性を検証する目的でCシリーズにおける推定値 q_u^* と実測値 q_u との相関関係について調べた結果を示す。同様に、図—10はDシリーズについて整理した結果である。 $q_u^* - q_u$ 間で求めた回帰直線式の係数はCシリーズ、Dシリーズともにほぼ1となり、推定値は実測値に概ね対応していることがわかる。このことから、フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料に関しては材令、温度に加えてその保存期間をも含めた積算温度方式によって下層路盤築造後の強度を予測することができるものと判断される。

表一6 混合材料製造プラントの構成

構 成 機 器	寸 法	容 量 (m ³)
フライアッシュサイロ	φ 6.3m×H 15.9m	180
スラッジホッパー	□ 3.5m×H 4.9m	10
消石灰サイロ	φ 2.9m×H 11.4m	24
構 成 機 器	形 式	容 量 (t/h)
フライアッシュフィーダー	ロータリーバルブ	34
スラッジフィーダー	2軸スクリュウフィーダー	42
消石灰テーブルフィーダー	テーブル型オートフィーダー	2
ミキサー	高速型連続ミキサー	50

以上に示した室内試験および数値計算の結果をみるかぎり、フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料は少なくとも下層路盤材に要求される品質ならびに性能を具備しているものとみなすことができる。しかし、当該材料を用いて下層路盤を築造する場合の施工性及交通開放後の舗装の挙動については、実地における築造工事および長期的な現場計測を行って確認する必要がある。そこで、著者らは室内試験と並行して現道で試験舗装を実施し、路面性状や路盤の強度、支持力などについて詳細に調べてみることにした。

5. 試験舗装の施工

試験舗装は、1990年3月上旬に熊本県内の公道で2工区および同年8月と11月上旬に福岡県内の私道で1工区ずつの計4工区で実施した。ここでは前者を試験舗装Ⅰ、後者を試験舗装Ⅱと称することにする。試験舗装Ⅰ(工区Ⅰ-1, 2)では主としてフライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料を用いた下層路盤の施工性と路面性状とを確認することに、試験舗装Ⅱ(工区Ⅱ-1, 2)では供用性能(ある時点における舗装の支持力と路面性状の程度)⁹⁾を確認することに重点を置いて種々の計測を行った。

初めに、施工区間を午前7時から午後7時までの12時間に通過する大型車の台数を調べたところ、工区Ⅰでは上り線108台、下り線65台、工区Ⅱではそれぞれ61台、42台という結果が得られ、これより、設計交通量は工区ⅠをA交通、工区ⅡをL交通に区分することにした。

工区ⅠおよびⅡにおける路床土の物理的性質を表一5に、また、 T_4 法を用いて設計した舗装構造を図一11に示す。今回の試験舗装では、下層路盤材として工区Ⅰ-1にはフライアッシュとスラッジとの配合割合を乾燥質量比で3:1とし、これに消石灰を6%添加した混合材料(室内試験におけるC-3シリーズに対応)を、工区Ⅰ-2には通常のクラッシュランを用いた。一方の工区Ⅱ-1, 2にはいずれも配合割合3:1、消石灰添加率0%の混合材料(C-1シリーズに対応)を用いた。なお、本研究で取り扱う混合材料については未だ等値換算係数 a の値が確立されていない実状にあるので、舗装厚さの設計にあ

たっては取り敢えずこれを石灰で安定処理した路盤材料の1つとみなして $a=0.25$ と置いた。施工区間は車線幅員3.5m、横断勾配2%の2車線道路であり、舗装延長は工区Ⅰ, Ⅱともに100mとした。

先にも述べたように、工区Ⅱでは1年を通して外気温度が最も高くなる8月上旬(Ⅱ-1)と低温期を控えた11月上旬(Ⅱ-2)に試験舗装を実施した。これは、下層路盤を築造する時期の違いが混合材料の強度、支持力の増加過程にどのような影響をおよぼすのかについて調べる目的によるものであり、このため、工区Ⅱ-1および2では地上約1.6mの日陰で外気温度を、また、下層路盤の中央部(図一11参照)で路盤内温度を計測することにした。計測には温度測定用の熱電対(銅-コンスタンタン)を使用し、熱電対からの信号は1時間ごとにレコーダに記録した。

試験舗装には室内試験に用いたものと同じ火力発電所産のフライアッシュ、スラッジを使用した。混合材料の製造は、工区Ⅱに隣接する位置に設けたプラントで行った。プラントの主要な構成機器を表一6に示す。一般に、路盤の転圧具合、すなわち、締固め効果の大小は安定処理材料の含水比に左右される場合が多いので、今回は製造直後の混合材料の含水比を電子レンジ法により逐次測定して、所定の品質が保たれているかどうかを確認することにした。

製造した混合材料はプラント用地内にビニールシートで覆って保存し、工事の進捗状況に応じて随時ダンプトラックで現地へ運搬した。さらに、運搬中も混合材料にシートを被せて含水比の低下や粉塵の飛散を防いだ。プラント用地内での保存期間の最長は4日間、平均は3日間であり、また、工区Ⅰへの運搬には約30分を要した。

試験舗装に先立って、混合材料の適切な転圧回数を求めるために8~20tのタイヤローラーによる現場締固め試験を実施した。その際、混合材料の水分量は室内試験におけるb方法に倣って製造直後の状態のままとし、保存期間を考慮に入れた含水比の調整はとくに行わなかった。締固め試験の結果、転圧回数を4~6回としたときに所定の仕上がり厚さおよび乾燥密度となること、転圧回数を10回以上としても乾燥密度はそれほど増加しないことがわかった。このことから、試験舗装における1層あたりの転圧回数は6回とすることにした。

工区Ⅰ, Ⅱともに下層路盤の築造は粒状路盤工法に準じて行い、転圧作業には12tのタイヤローラーを使用した。いずれの施工日にも降雨はなく、地下水位の上昇もなかった。高温期に築造工事を実施した工区Ⅱ-1では敷きならし、転圧作業中に混合材料が乾燥する恐れがあったので、この工区のみ現地に搬入した時点の含水比を保持させる程度の水を散布した。転圧作業が終了した段階で下層路盤の締固め度を調べたところ、混合材料を使用

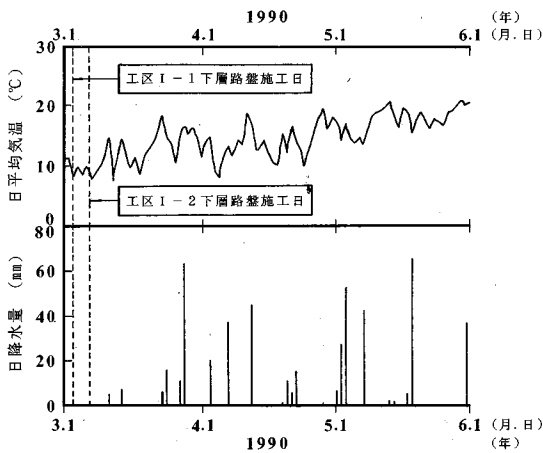


図-12 日平均気温および日降水量（試験舗装Ⅰ）

した工区Ⅰ-1およびⅡ-1, 2における締固め度は最低でも表-4に示した最大乾燥密度の97%に達しており、いずれも品質管理の限界値を満足していることが確かめられた。なお、施工中に粉塵量の測定も行ったが、周辺環境への悪影響が懸念されるような値は計測されなかった。

基層および表層（密粒度アスファルト混合物）の舗設は、工区Ⅱでは上層路盤の築造に引き続いて行い、工区Ⅰでは上層路盤築造後およそ2週間の交通開放を経てから行った。交通開放期間中に13mmの雨量が観測されたが、路盤面に沈下や隆起の兆候は認められなかった。

実験室とプラントとではフライアッシュ、スラッジ、消石灰を混合する装置、量や時間に違いがあったことに加えて、混ぜ合わせた材料を保存する方法、環境ならびに締固めの仕事量にも差があったことから、室内試験と実際とで混合直後および保存中の含水比や締固め度などに多少一致しない点がみられた。それでも、今回の試験舗装を通して、製造後4日程度が経過した混合材料であっても施工機械の作業性能を損なうことなく所定の厚さおよび密度を有する下層路盤を築造することが可能であること、さらに、築造にあたっては粒状路盤工法に準じた施工手順を採用できることが実証された。

6. 試験舗装の挙動

本研究では、交通荷重下における試験舗装の挙動を明らかにするために施工後3~7ヶ月にわたって現地調査を実施した。以下に、それぞれの施工区間で行った調査の内容と得られた結果について述べる。

(1) 試験舗装Ⅰ（工区Ⅰ-1, 2）

ここでは気温、降水量の計測と併せて路面性状の推移

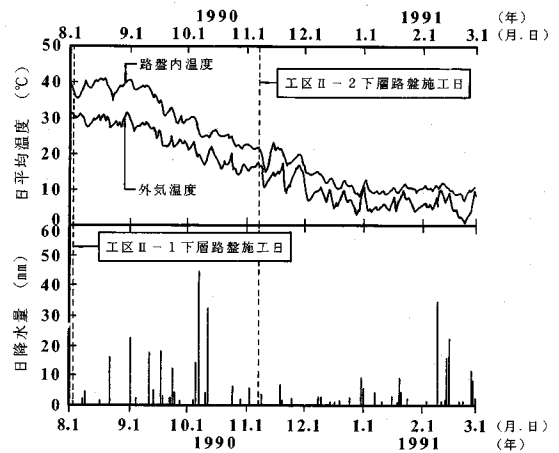


図-13 日平均温度および日降水量（試験舗装Ⅱ）

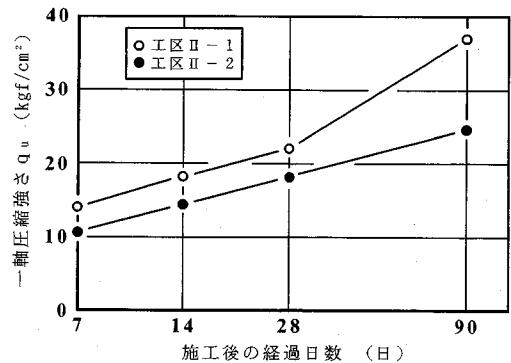


図-14 一軸圧縮強さの経時変化（試験舗装Ⅱ）

を調べる目的でわだち掘れ量、平坦性およびひびわれ率の測定を行った。

図-12は、試験舗装を実施した3月上旬から5月下旬までの日平均気温と日降水量とを示す。この図より、計測期間中に施工地域の日平均気温は約10°C上昇したこと、また、3月下旬と5月中旬に60mmを超える降雨があったことがわかる。月別の降水量は3月119mm、4月137mm、5月243mmであり、総降水量は499mmであった。

わだち掘れ量、平坦性、ひびわれ率の測定は、施工後90日が経過した6月上旬に実施した。その結果、下層路盤材としてクラッシュランを使用した工区Ⅰ-2のわだち掘れ量は4~6mmであったのに対し、フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料を使用した工区Ⅰ-1ではその1/3程度の1~2mmであった。また、路面の平坦性は工区Ⅰ-1では約1.5mm、工区Ⅰ-2では約2mmであった。なお、この時点で工区Ⅰ-1, 2の路面にひびわれの発生は認められなかった。

このことから、著者らは混合材料を断面構成に組み入れたアスファルト舗装の交通荷重下および自然環境下

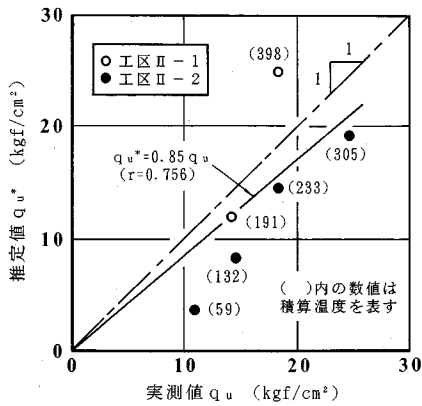


図-15 推定値と実測値との比較 (試験舗装Ⅱ)

における耐久性はクラッシュランを使用した場合と同程度であり、施工後短期間のうちに構造的破損、すなわち、路盤の沈下や支持力低下などを生じる恐れは極めて少ないものと判断した。

(2) 試験舗装Ⅱ (工区Ⅱ-1, 2)

ここでは、試験舗装Ⅰの施工区間で行った諸調査に加えて舗装強度の経時変化を調べる目的で一軸圧縮試験や平板載荷試験を実施した。

図-13は日平均気温、路盤内温度および日降水量の計測結果を示す。プラントで製造した混合材料の温度は数日の保存期間を経て下層路盤を築造した後も外気温度に比べて高くなっているが、両者の温度差は低温期が近づくにつれて徐々に小さくなっていくことがわかる。また、工区Ⅱ-1を施工した8月上旬の日平均気温はおよそ30℃、Ⅱ-2を施工した11月上旬は15℃であり、施工地域が寒冷期を迎えた翌年2月上旬までに日平均気温は10～25℃低下したことがわかる。なお、計測期間中の総降水量は400mmであった。

図-14は施工後7, 14, 28および90日目に表層、基層、上層路盤の一部を開削し、コア採取機を用いて抜き取った混合材料の一軸圧縮強さを示す。成形した供試体の寸法は直径約5.5cm、高さ約12cmである。フライアッシュとスラッジとの配合割合および下層路盤築造時の締固め度が同じであっても、混合材料の一軸圧縮強さは外気温度の高い時期に施工を行った工区Ⅱ-1の方が大きくなっていることがわかる。

この点に関して、先の図-13によれば、工区Ⅱ-1の路盤内温度は施工後3ヶ月が経過した11月上旬でも20℃以上となっていたのに対し、Ⅱ-2では1ヶ月半が経過した12月中旬には10℃にまで低下しており、したがって、本研究で取り扱った混合材料については締固めた後の材料温度の違い、すなわち、施工後10～20℃を超える状態にあった期間の長短が路盤強度の差となって現れた可能

性が高い。また、このことは混合材料自体の温度とその周辺の温度との違いはあるものの、室内試験において低い温度で養生した供試体ほど一軸圧縮強さは小さくなったこと、とりわけ、10℃の場合には強度の発現がほとんど認められなかったことと一致する部分が多い。

図-15は、式(4)における養生温度 T を路盤内温度に、放置日数 t_b を保存期間(3日)にそれぞれ置き換えて求めた一軸圧縮強さの推定値 q_u^* と実測値 q_u との関係を示す。この図で明らかのように q_u^* は q_u に概ね対応しており、したがって、式(4)の妥当性が室内試験のみならず現場試験の結果からも得られたことになる。参考までに $M > 560$ (℃×日)についても計算を行って見たところ、 q_u^* は q_u の2～5倍となった。

本研究では、施工後定期的の下層路盤の地盤反力係数 K_{30} を測定した。平板載荷試験にあたっては載荷位置を順次移動しながら表層、基層、上層路盤を1.2m四方にわたって開削した¹⁰⁾。下層路盤を築造した直後の K_{30} の値は工区Ⅱ-1, 2ともに21kgf/cm³ (0.2MN/m³)であったが、これが3ヶ月経過時には工区Ⅱ-1で170kgf/cm³ (1.7MN/m³)、工区Ⅱ-2では140kgf/cm³ (1.4MN/m³)となり、一軸圧縮強さと同様工区Ⅱ-1の方が大きいという結果が得られた。

一般に、舗装の供用性能を評価する指標としてひびわれ率、わだち掘れ量および平坦性を次式⁹⁾に代入して得られるMCI(維持管理指数)が用いられており、MCIが①5以上であれば望ましい管理水準、②3～5では修繕が必要、③以下では早急な修繕が必要とされている^{9), 10)}。

$$MCI = 10 - 1.48 \cdot C^3 - 0.29 \cdot D^{0.7} - 0.47 \cdot \sigma^2 \quad (5)$$

ここに、MCI: 維持管理指数

C: ひびわれ率 (%)

D: わだち掘れ量 (mm)

σ : 平坦性 (mm)

そこで、施工後3ヶ月が経過した時点でMCIを求めてみたところ工区Ⅱ-1で8.8、工区Ⅱ-2で8.9となり、施工区間は交通開放当初の管理水準を維持していることが確かめられた。なお、目視調査によるかぎり、試験舗装Ⅰ, Ⅱの各工区とも施工後約4年が経過した1994年6月現在もひびわれなどの損傷は全く認められていない。

次に、舗装構造の決定に際して混合材料の等値換算係数 a を0.25としたことを先に述べたが、この値の大きさは舗装の供用性能や経済性に深く関与するものであり、当該材料の汎用性を高めるためにもこの値の大きさについて検討を加えておく必要がある。係数 a を試算するにあたって、初めに、維持管理指数MCIと累積大型車交通量 N 、等値換算厚 T_a 、路床の設計CBRとの関係を示す次式を用いて T_a を求め、これを試験舗装と比較することによって定める方法^{10), 11)}を試みてみた。

$$MCI=9-65(\log N-5)^4 \cdot (2-\log T_A)^8 \cdot (2-\log CBR)^5 \quad (6)$$

上式の MCI には前述の 8.8 および 8.9 を、 N には 3 万台を、そして、 CBR には 12 を代入して計算を進めたところ係数 a の値が負となったためにこの方法による試算を断念し、次の段階として変形係数 E から定める方法¹⁰⁾を採用してみることにした。すなわち、平板載荷試験から得られた地盤反力係数、各層のポアソン比 (混合材料: 0.15, 路床: 0.4)⁹⁾ および層厚を、道路の舗装厚さや鉄道の強化路盤の厚さを設計する際に用いられることがある多層系弾性モデルによる路盤効果の推定法¹⁰⁾に適用して求めた E_1 と、別途コア供試体の一軸圧縮試験から求めた E_2 とを次式¹⁰⁾の E に代入することにした。

$$a=0.313 \cdot \log E+0.616 \quad (7)$$

ここに、 a : 等値換算係数

$$E: \text{変形係数} \times 10^{-4} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

本研究では式 (7) により算出した a を等値換算係数に準じる係数として取り扱うこととし、これを a^* と表示することにする。 E_1 と E_2 の両者を用いて算出した係数 a^* の平均値は施工当日で約 0.2 であったが、施工後 1 週間で約 0.6 にまで増加し、さらに 90 日では約 0.8 となった。このことから、プラントで製造してから数日が経過した混合材料を供用線の下層路盤に用いる場合には等値換算係数 a の値を少なくとも 0.25 と見積ることができ、また、新設線のように交通開放するまでにある程度の養生期間が確保できる場合には上層路盤材 ($a=0.45$) として使用することも可能であると判断される。

7. 結論

フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料の道路下層路盤材としての有用性を検討するために行った室内試験および 2 箇所の現道における試験舗装の結果から、以下のことが明らかになった。

(1) 混合材料の一軸圧縮強さは材令、温度に加えてその保存期間をも含めた積算温度方式によって予測することが可能である。

(2) 混合材料を下層路盤材として用いる場合の作業工程は粒状路盤工法に準じればよく、その施工性は概ね良好である。さらに、築造した下層路盤の締固め度は品質管理の限界値を満足する。

(3) 製造後 3~4 日が経過した混合材料を使用しても、舗装に沈下や支持力低下などに起因するような構造的破損が生じる恐れは極めて少ない。

(4) 混合材料を下層あるいは上層路盤材として使用する場合の等値換算係数は、石灰安定処理土に対する値を準用することができる。

以上のことから、施工地域の気象 (主として温度) な

どを考慮に入れて混合材料の強度を推定し、これに基づいて配合設計や養生を行えば、フライアッシュ・スラッジ・消石灰混合材料の下層あるいは上層路盤材としての利用価値は十分に高いものと判断される。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、三井建設 (株) 桑原武氏、山本三千昭氏には貴重な資料の提供をいただいた。また、金沢工業大学大学院修士課程保本敏伸君には実験や結果の整理に多大なる協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 桑原 武, 山本三千昭, 松村宏隆: 石炭灰・スラッジ・消石灰混合材料の特性におよぼすスラッジの影響, 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集, III-510, pp. 1042-1043, 1991.9.
- 3) (社) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1988.11.
- 4) 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.
- 5) 山田幹雄, 山崎和彦, 佐野博昭: 石炭灰を用いた噴泥対策工の施工, 日本鉄道施設協会誌, 第 32 巻, 第 2 号, pp. 23-26, 1994.2.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 日本材料学会・土質安定材料委員会: 地盤改良工法便覧, 日刊工業新聞社, 1991.7.
- 9) (社) 日本道路協会: アスファルト舗装要綱, 1992.12.
- 10) (社) 日本道路協会: 舗装試験法便覧, 1988.11.
- 11) 佐野博昭, 山田幹雄, 山本三千昭, 太田 実: 放置日数の違いが石炭灰・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料の強度・変形特性に及ぼす影響, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, III-131, pp. 302-303, 1992.9.
- 12) 山田幹雄, 佐野博昭, 山本三千昭, 太田 実: 放置日数および養生温度を考慮した石炭灰・排煙脱硫スラッジ・消石灰混合材料の一軸圧縮強さの評価手法, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, III-86, pp. 226-227, 1993.9.
- 13) 保本敏伸, 山田幹雄, 佐野博昭, 太田 実: 締固めた石炭火力発電所産副産物の強度, 変形特性に関する実験的研究, 土木学会中部支部平成 5 年度研究発表会講演概要集, III-51, pp. 425-426, 1994.3.
- 14) (社) 土質工学会: 土質工学会基準—地盤の平板載荷試験方法・同解説, 1983.1.
- 15) 菊川 滋, 猪股和義: 舗装の長期修繕計画システムの開発, 土木技術資料, 第 29 巻, 第 1 号, pp. 19-24, 1987.1.
- 16) 建設省道路局・建設省土木研究所: 舗装の維持修繕の計画に関する調査研究, 第 34 回建設省技術研究会報告書, 1980.11.
- 17) 飯島 尚, 小島逸平: 製鋼スラグを用いた路盤の等値換算係数, 土木技術資料, 第 27 巻, 第 3 号, pp. 15-20, 1985.3.
- 18) 建設省道路局・建設省土木研究所: 舗装廃材の再生利用に関する研究, 第 36 回建設省技術研究会報告書, 1982.11.
- 19) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物一, 1992.11. (1994.6.27 受付)

A STUDY ON UTILITY OF MIXED MATERIALS USING FLY ASH AND FLUE GAS DESULFURIZATION WASTES AS SUBBASE COURSE MATERIAL

Mikio YAMADA, Hiroaki SANO, Ichiro Kuroshima and Minoru OHTA

In order to investigate utility of mixed materials using fly ash and flue gas desulfurization wastes as subbase course material, firstly, unconfined compression tests were performed on specimens compacted at regular intervals after mixing materials and cured with various temperatures. Secondly, test pavements were conducted at two existing roads and both the conditions of road surface and bearing capacity of subbase course under traffic load were measured. As a result, it was found that the material concerned can be satisfied with the quality standard of subbase course, in addition, performance and durability seem to be maintaining satisfactory condition.