

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

山田幹雄*・佐野博昭**・徳岡研三***・伊能忠敏****

本研究においては、既存の対策工では容易に解決されなかった噴泥箇所に対する補修策として、あるいは、列車速度の向上によって噴泥の再発が懸念される箇所に対する事前策として、当該箇所石炭灰を用いた置換互層路盤を施す場合の適用性について実験的に検討した。各種の室内試験、数値計算の結果は、石炭灰層自体の耐水性および互層路盤全体の耐荷性能は概ね良好であり、期待すべき改善効果が得られることを示した。

Keywords : mud-pumping, improvement of roadbed, fly ash, durability

1. はじめに

かつて、鉄道路盤の果たすべき役割を長く阻害していた要因の1つに路盤噴泥があった。路盤噴泥とは、列車通過時の繰り返し荷重によって道床砂利が徐々に路盤土へ圧入されるとともに、雨水や地下水によって軟弱化した路盤土が道床の間隙を上昇して道床表面に噴き出す現象である。噴泥が発生すると、道床の弾性的機能や路盤の支持機能、荷重分散機能が極端に低下して、著大な軌道狂いが生じる。この軌道狂いは列車の円滑な走行を妨げるばかりか、整正しても短期間のうちに再び発生するので、噴泥防止策が講じられる以前の線路の維持管理には多大な労力と費用とが費やされていた。このため、当時、噴泥は軌道保守上の最大の問題ともいわれていた。

この問題の解決にあたっては、噴泥箇所の実態調査を端緒に発生機構の解明および対策工の考案がなされた^{1)~4)}。対策工には道床厚増加工法など9種類の工法があり、噴泥の程度、路盤の土質や線路の敷設状態に応じてその中から1つを選定、あるいは、複数の工法を併用して施工されている⁵⁾。このような噴泥対策の徹底と軌道整備力の強化双方の効果が相俟って、大部分の区間で噴泥による著大狂いは解消され、同時に保守周期の延長が達成された。それでも、部分的にはあるが、各種の対策工を施しても健全な軌道状態を長期間維持することができず、頻繁に斑直しを行うなど将来にわたって保守労力の軽減を目論めない箇所も未だに存在している。

近年、JR各社ではよりよい旅客サービスの提供を目指して在来線の高速度運転を推し進めており、とくに、軟弱地盤上に敷設されている線路に対しては地盤の支持

力調査や線路各部の振動調査を行って高速運転時の安定性を評価しつつ、順次営業運転に移行している^{6),7)}。しかし、一般的には、噴泥箇所や道床砂利の路盤土への長期圧入を生じている箇所が点在する線区では容易に列車速度を向上することはできず、ますます激化する他の輸送機関との競合に備えるためにも、保守費の低廉化を含めたより改善効果の高い対処法の提案が望まれている。また、対策工によって著大狂いが解消された区間でも、その後周辺地形や環境が変化して地下水水位が上昇したり、あるいは、列車回数や速度が増加して過酷な荷重条件となっている箇所では噴泥の再発が懸念され、高頻度・高速輸送体制を整備していく上には、現存の局所的な不良箇所に対する補修策と併せてこのような場合に対応できる策も事前に検討しておく必要がある。

既存の対策工の主な特徴は、①軌道構造を修正することによる路盤圧力の低減、②粗悪な路盤土の撤去、③排水機能の回復、④路盤表面を被覆することによる水の遮断にある。しかし、これまでの経験によると、このような特徴を組み合わせても十分な改善効果が期待できない箇所に対しては、「道床と路盤との界面部分の補強」および「荷重分散機能の向上」に重点を置いた方策も併せて講じる必要があると考えられる。そして、そのためには、入手や取り扱いが比較的容易であるとともに、道床の下に剛性の高い、強さの大きい版を形成するような固化性の材料を用いるのが適切と考えられる。

上記の要件を満たす材料の1つとして、石炭火力発電所などから多量に排出され、各方面で有効利用策が検討されている石炭灰を挙げることができる。石炭灰(主としてフライアッシュ)は、ポズラン反応による自硬性があること、環境を汚染するような有害物質の溶出は認められないこと、通常の土に比べて軽量であることなどの化学的、物理的性質に加えて、これを十分に締固めた場合には時間の経過とともに強度は漸次増加し、圧縮

* 正会員 工博 金沢工業大学助教授 土木工学科
(〒921 金沢南局区内野々市町扇が丘7-1)

** 正会員 工修 石川工業高等専門学校助手 土木工学科

*** 正会員 西日本旅客鉄道(株)施設部 管理課長

**** 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科

性や透水性は低下するといった工学的性質をもっている^{8)~10)}。したがって、このような特性を有する石炭灰を噴泥箇所の路盤材料に使用すれば、支持機能の向上と路床伝達圧力の低減とが同時に図れる路盤を築造できる可能性が高いと判断される。従来より、土木分野でも石炭灰利用技術の開発が進められており、道路路盤^{11)~13)}、埋立^{14),15)}、鉄道盛土^{16),17)}などで使用された例がある。鉄道路盤に関しては、国外では粘性土の路盤を石炭灰と石灰、あるいは、セメントで安定処理したところ過剰水分や凍結、融解に対する抵抗力が大幅に増加したという報告¹⁸⁾もあるが、国内での使用例は見当たらない。

以上のことより、著者らは在来線の噴泥対策の一環として、また、石炭灰の有効利用の一策として、石炭灰を用いた新たな軟弱路盤改良策の開発に着手した。本研究では、著者らの提案する改良路盤の適用性を検討するために、石炭灰と安定材とを混合した材料の

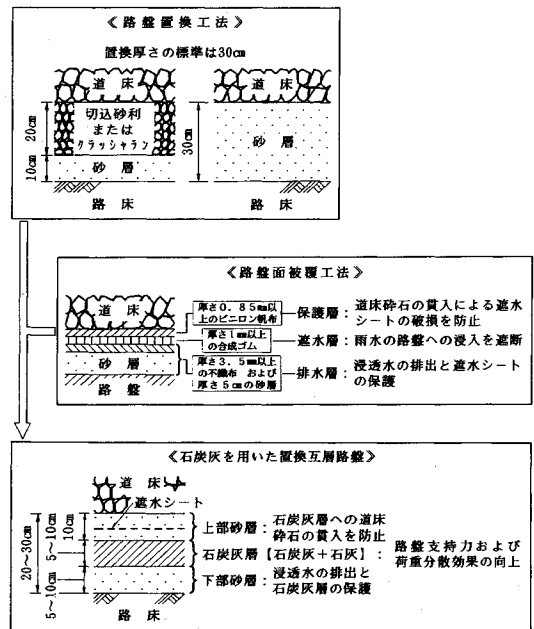
- i) 強度発現や体積変化におよぼす水の影響
 - ii) 沈下や支持力の大きさにおよぼす荷重の影響
- を各種の室内試験によって明らかにし、さらに、
- iii) 改良路盤を施すことによる改善効果を数値計算によって調べた。

2. 提案する改良路盤の構造

一般に、新たに線路を敷設する場合はともかくとして、すでに営業を開始している線路に対して路盤改良を施す場合には、路盤構造や施工法についても検討を行う必要がある。従来より、路盤改良にあたっては、道路に限らず鉄道においても不良な現場土に石灰やセメントを混合する手法が用いられているが^{9),19)}、昨今の作業間合の実状を考えると、このような手法は作業効率や運行の安全性の面からみて必ずしも得策とは言い難い。とくに、噴泥対策として工事の範囲がレール継目部などに限定される場合には、単に不良な現場土を良質な材料に置き換える方が作業時間の短縮を図る上では有効と考えられる。

このことから、改良路盤の構造としては石炭灰と安定材との混合層を砂層の間に挟み込んだ構造、いわゆる互層路盤を採用することにした。安定材は石灰系、セメント系のいずれでもよいが、作業効率を高めるために事前に攪拌混合を実施する場合には、混合材料の保存期間や転圧の機会を計りやすい点から遅硬性である消石灰を用いる方が取り扱いが容易と判断される^{20),21)}。

図—1に示すように、この3層構造はこれを1つの路盤材料とみなせば既存の路盤置換工法に相当し、また、石炭灰層を1つの安定処理材とみなせば、その上下に置く砂はこれを保護するための層となって路盤面被覆工法に類似する。つまり、この構造は、形状的には既存の2つの対策工の特徴を加味したものといえる。なお、上部砂層の厚さ10 cm というのは、過去に噴泥対策として



図—1 既存の代表的な路盤噴泥対策工法と石炭灰を用いた置換互層路盤との構造比較

砂置換工を施した箇所の17ヶ月経過時における道床砂利貫入量が最大でも5 cm程度であったという実績⁴⁾を参考にしたものである。また、現行の凍上防止対策においても、道床砂利の貫入から断熱材の損傷を防ぐために断熱材の上には厚さ10 cmの砂層を置くように規定されている⁵⁾。

本研究では、まず、この互層路盤の核ともいべき石炭灰・消石灰混合層の強度および変形特性を調べるために、空気中養生と水浸養生とを組み合わせた一軸圧縮試験を行った²²⁾。次に、互層路盤の沈下性状と支持力特性とを調べるために、石炭灰・消石灰混合層の上下に川砂、あるいは、粘性土の層を詰めた供試体（以下、互層状供試体と称する）に対する載荷試験とコーン貫入試験とを実施した²³⁾。なお、実際には一旦撤去した粘性土を互層路盤の構成材料として再び使用することはないが、今回は砂に置き換えた場合と比較する目的で試験項目の中に取り入れた。最後に、一般に用いられている多層系弾性モデルによる構造解析を行って、この互層路盤を適用したときに期待される地盤反力係数について考察した。

3. 試料の性質および供試体の作製条件

室内試験には手取川流域より採取した川砂、小松市八幡地区より採取した砂、JR北陸線倶利伽羅駅構内より採取した粘性土および礫石・石炭火力発電所にて発生したフライアッシュを使用した。以下、それぞれを手取砂、八幡砂、倶利伽羅粘土および石炭灰と称することにす。なお、倶利伽羅駅付近は過去に噴泥対策として路盤面被

表-1 試料の物理的性質

試料名	手取砂	八幡砂	俱利伽羅土	石灰灰 (75(72%) ₂₃)
比重	2.68	2.65	2.70	2.22
シルト分 (%)	98.5	79.5	34.2	12.7
シルト分 (%)	1.0	10.5	44.3	86.9
粘土分 (%)	0.5	10.0	21.5	0.4
均等係数	3.33	3.00	34.38	1.54
曲率係数	1.16	36.80	1.14	1.11
塑性指数	—	—	71.5	—
液性指数	—	—	45.4	—
稠度指数	NP	NP	26.1	NP

表-2 試料の化学的性質

試料名	手取砂	八幡砂	俱利伽羅土	石灰灰 (75(72%) ₂₃)
シリカ (%)	71.85	77.45	65.60	51.40
アルミナ (%)	13.70	11.60	17.10	24.20
酸化第二鉄 (%)	3.41	2.93	5.47	5.32
酸化カルシウム (%)	2.13	0.56	0.53	10.50
酸化マグネシウム (%)	1.21	0.49	1.26	1.98
酸化カリウム (%)	2.84	2.32	1.98	1.16
酸化ナトリウム (%)	3.24	1.64	0.98	1.61
乾燥密度 (g/cm ³)	1.45	2.48	6.31	0.94

表-3 試料の締固め特性

試料名	八幡砂	俱利伽羅土	石灰灰と消石灰 [*] との混合試料	
			石灰灰:消石灰 (乾燥重量比)	乾燥密度 (g/cm ³)
最適含水比 (%)	14.4	32.7	10:0	1.83
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.83	1.28	8:2	1.43
			2:0	1.33

* 工業用消石灰、比重2.24、酸化カルシウム含有率約74%

表-4 手取砂を用いた場合の作製条件

充填時の状態	乾燥状態	湿潤状態
含水比 (%)	0.5	10.0
乾燥密度 (g/cm ³)	1.31	1.83

覆工が施されたが、現在でも斑直しなど保守投入量の多い箇所である。手取砂、八幡砂および俱利伽羅粘土は採取後十分に空気乾燥し、2000 μmふるいに通過した部分のみを試料土として用いることにした。表-1は試料の物理的性質を示し、また、表-2は化学的性質を示す。一般に、石灰灰の自硬性の大小にはそれに含まれるシリカ、アルミナ、酸化カルシウムの量が関係するとされているが、今回用いた石灰灰の各化学成分値は国内炭、海外炭における平均的な含有量の範囲内に入るものである³⁾。

石灰灰に加える安定材の量は強度発現の進行度を左右する大きな要因となるが、これに関して、国外で道路路盤を石灰灰と石灰との混合材料を用いて築造するにあたり、両者の配合割合(乾燥重量比)を上層路盤については10:0~5:5の間で4種類、下層路盤に対しては10:0~0:10の間で6種類とし、施工後舗装面のたわみ量を追跡調査したところ、路床土の土質によって多少の差はあるものの、配合割合を9:1ないし7:3としたときに良好な改善効果が得られたという結果が報告されている²⁴⁾。本研究では、この施工例を参考にして石灰灰と消石灰との配合割合を乾燥重量比で10:0, 8:2および5:5とした。

表-3は締固め試験の結果をまとめたものであるが、手取砂については締固め試験において最大乾燥密度が認められなかったため、表-4に示した含水比、乾燥密度を目安にして互層状供試体を作製することにした。八幡砂、俱利伽羅粘土および石灰灰と消石灰との混合試料に

ついては、表-3に示した値を目標にした。

4. 石灰灰・消石灰混合供試体の強度および変形特性

路盤改良に限らず、営業線の補修工事の大部分は夜間の作業間合を利用して実施されており、通常は工事終了後間もなくして始発列車の進入を許すことになる。石灰灰を用いた置換互層路盤は、それによる改善効果の主体を石灰灰・消石灰混合層の強度発現に期待するものであり、最終的には十分な強度が得られる可能性の高い材料とはいえ、施工直後の強度が道床を通して伝達される圧力未満であった場合には不当な軌道狂いを生じる原因となる。さらに、施工後浸透水によって著しい強度低下を生じて沈下したり、大きな膨張を生じて隆起したりして反って保守周期の短縮を招くようでは、それだけでもこれを路盤材料として使用することは困難となる。

石灰灰の水に対する抵抗性を検証した例として、締固めた石灰灰を7日間、あるいは、28日間空気中養生した後に最長90日間まで水浸養生したときの一軸圧縮強さの変化を測定した実験²⁵⁾を挙げることができるが、ここでは、空気中養生時の強度が5 kgf/cm² (490.0 kPa)以上であった石灰灰は水浸中に強度低下を生じなかったと報告している。しかしながら、実際への適用を目論む際に懸念される初期の段階、あるいは、より長い期間水が作用した場合の強度変化や体積変化の動向については、その研究では触れられていないようである。

このことから、本研究では、石灰灰と消石灰との混合試料の長期にわたる強度特性、変形特性を空気中および水浸の2つの養生条件のもとで詳細に調べてみることにした。具体的には、二つ割モールドの中で静的に締固めて作製した多数の円柱供試体(直径50 mm, 高さ100 mm)をビニール袋に入れて密封し、これらを温度20°Cの恒温室の中で0, 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 360日間空気中養生し、その後供試体をビニール袋から取り出して、引き続き同じ恒温室の水槽の中で1, 3, 7, 14, 28, 56, 90, 180, 360日間水浸養生したものに対して、それぞれの一軸圧縮強さと体積変化率とを求めた。なお、空気中養生0日は供試体作製当日を意味する。

供試体の作製条件としては、石灰灰と消石灰との配合割合は10:0, 8:2, 5:5の3種類、初期含水比は10%, 20%の2種類、乾燥密度は前出表-3に示したそれぞれの配合割合における最大乾燥密度とした。ただし、配合割合5:5についてのみ、後述する互層状供試体を用いた試験において石灰灰・消石灰混合層の乾燥密度の平均が目標とした最大乾燥密度のほぼ85%の値となっていたので、これに相当する供試体も作製することにした。

作製した供試体および所定の養生日数に達した供試体の直径はパイテプを用いて3箇所、また、高さはダイ

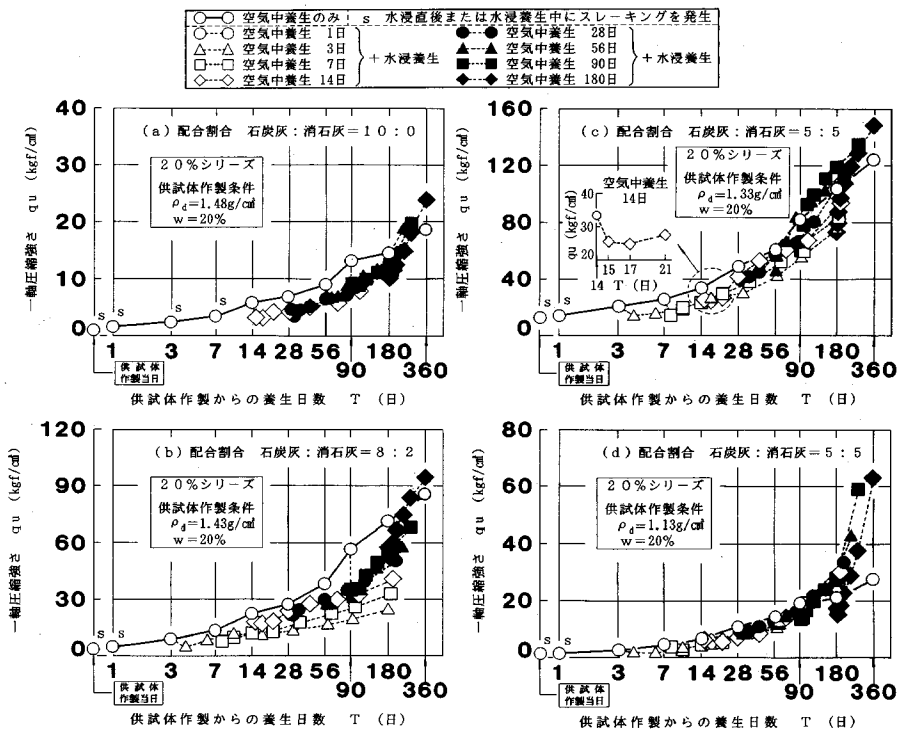


図-2 養生日数の経過にともなう一軸圧縮強さの変化

ヤルゲージを取り付けた器具によって6箇所測定した。一軸圧縮試験は、1%/minのひずみ速度で実施した。

図-2は、初期含水比を20%として作製したシリーズの一軸圧縮強さ q_u と養生日数 T との関係を示す。(a)は配合割合を10:0とした場合、(b)は8:2とした場合、(c)は5:5とした場合、(d)は乾燥密度を(c)の85%とした場合の測定結果である。ここで、養生日数は空气中養生とこれに引き続いて実施した水浸養生双方の日数を合計したものであり、横軸にはそれを対数目盛で表してある。記号sは空气中養生から水浸養生へ移行した直後、あるいは、水浸養生中に供試体にスレーキングが生じたことを表す。なお、各種の記号が重畳して個々を判別しにくくなる恐れがあったので、図には取敢えず水浸養生180日までの結果を記入した。

この図において、水浸養生中にスレーキングを生じなくなるまでの空气中養生日数をみると、(a)ではそれまでに14日間を要するのに対して(b)~(d)では3日間となっている。したがって、改良路盤の初期の耐水性を重視するならば、石炭灰のみの使用は不適切ということになる。ここで、(a)においてスレーキングを生じなくなったときの強度は5.5 kgf/cm² (539.0 kPa)であり、石炭灰の種類や性質は異なるものの、上述した文献(25)とほぼ同様の傾向が今回の試験でも認められた。

次に、スレーキングを生じなかった供試体の水浸強度の変化をみると、いずれも水浸後に強度は一旦低下

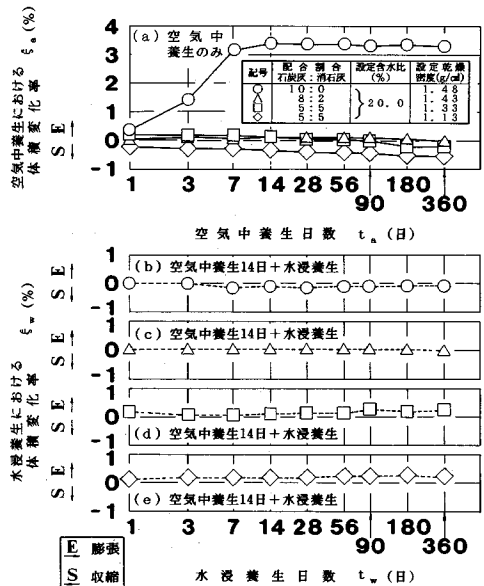


図-3 養生日数の経過にともなう石炭灰供試体の体積変化率

するが、その後は日数の経過にともなって漸次増加し、とくに、空气中養生を28日間以上施した供試体においては、水浸養生の途中で空气中養生のみを施した供試体の強度を超越している。文献によれば、概念的に、水分が十分に供給されるほどボジラン反応の進行は速くなる²⁰⁾とされており、今回の試験で水浸強度が増加して

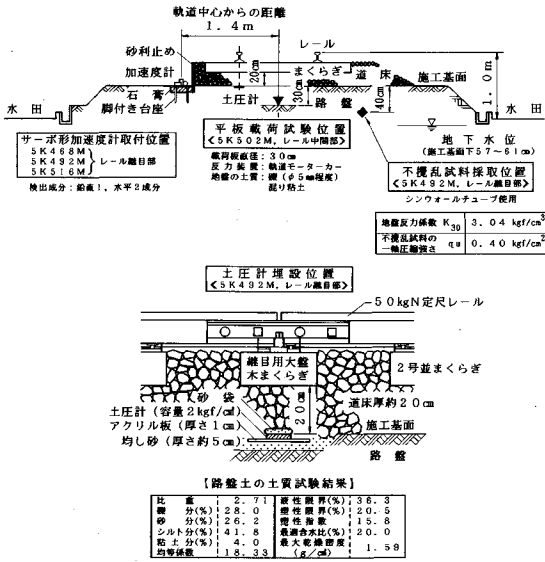


図-4 振動計と土圧計の設置位置および路盤・路床の状態(調査, 測定区間: JR七尾線, 津幡起点5 K 468 M~5 K 516 M)

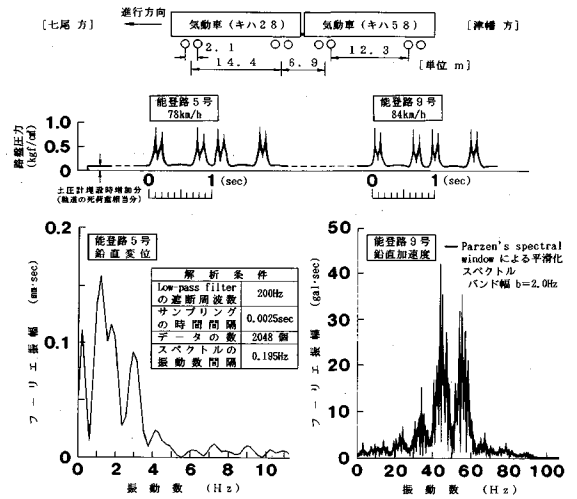


図-5 列車通過時に生じた路盤圧力の変動と施工基面で測定した鉛直変位, 鉛直加速度のフーリエスペクトル(測定地点: JR七尾線, 津幡起点5 K 492 M, レール継目部)

いったこともそれに当て嵌まるものと考えられる。(b), (c), (d)を比較すると, 消石灰の配合割合は高くても供試体作製時の乾燥密度が小さい(d)の強度発現は这其中で最も小さくなっている。このことは, 消石灰の混合量のみならず, 締め固め度も強度特性に大きな影響をおよぼすことを意味している。なお, 初期含水比を10%として作製した供試体に関する試験からも同様の結果が得られた。また, いずれの供試体においても, 水浸1日ないし3日の時点で飽和度は約90%に達していた。

図-3は, 初期含水比を20%として作製したシリーズの体積変化率の推移を示す。配合割合を10:0とした場合は空气中養生14日目までに3.4%の体積膨張を生じたが, 14日以降は空气中においても水中においても大きな変化は生じなかった。これに対して, 配合割合を8:2および5:5とした場合は, 供試体作製時の乾燥密度を小さくした場合も含めて養生期間中に膨張も収縮もほとんど生じなかった。したがって, 石炭灰に消石灰を加えることで, 水浸強度を向上する効果に併せて体積変化を抑制する効果も発揮されることとなり, これは, 線路保守の立場からすれば有利な方向にあるといえる。

これまでに行われた軟弱路盤の実態調査において, 噴泥や道床砂利の長期圧入を生じていた箇所の路盤土の一軸圧縮強さは1.0 kgf/cm² (98.0 kPa) 以下であったと報告されている^{2), 4), 7)}。また, 列車の高速運転に対応するためには, 3.0 kgf/cm² (294.0 kPa) 以上の強度は必要とされている⁵⁾。今後, 在来線に対しては後者の値を目標とした路盤補修策を講じていく必要があるが, 先の図-2において, 施工当日に相当する供試体作製当日の

強度および水浸強度の動向をみると, 配合割合を8:2とすれば後者の値は十分に満足されると判断することができる。しかし, 室内強度と現場強度との間にはかなりの差があるのが通例であり, この点を考慮して, 次の段階では, 石炭灰・消石灰混合層の配合割合を5:5として作製した互層状供試体について, その耐荷性能を調べることにした。

5. 互層状供試体の沈下性状およびコーン支持力特性

互層状供試体に対する載荷試験に先立って, 現在も噴泥を生じている線路の実態調査を行った。調査地点は, JR七尾線能瀬駅付近(津幡起点5 K 468 M~516 M)である。この区間は単線で平坦, かつ, 直線である。急行列車(キハ28, 58形気動車)は, ここを75~95 km/hの速度で通過している。図-4に示すように, レール頭頂面は線路両側の田面より1 mの高さにあり, 50 kgN定尺レールおよび2号並まくらぎ敷設, 道床厚は約20 cmである。これまでに道床更换や側溝の改良が施されたが, 未だにレール継目部を中心として道床噴泥や路盤噴泥が発生している。この区間は, 近い将来, 石炭灰を用いた置換互層路盤を試験的に施工することが予定されている所であり, 今回の調査はそのための事前調査も兼ねている。

この区間で測定した項目は地盤反力係数, 不攪乱試料の一軸圧縮強さ, 路盤圧力, 施工基面の鉛直振動, 水平振動および地下水位である。図-4には, 地盤反力係数など得られた結果や各種計測器の設置状態も併せて記入してある。なお, 地下水位を観測した期間は10~3月で

あり、5月の田植えの時期には地下水位はさらに高くなることが予想される。また、路盤土の土質試験より、この路盤土は噴泥しやすい土であることが示された²⁶⁾。

図-5は、列車通過時の土圧計の出力記録およびそのときに施工基面に生じた鉛直変位、鉛直加速度のフーリエスペクトルの解析例を示す。路盤圧力の変動は個々の車輪ごとに明確に現れ、その大きさは約0.8 kgf/cm² (78.4 kPa)であることがわかる。フーリエスペクトル図において鉛直変位の卓越振動数は1.1 Hz、また、鉛直加速度の卓越振動数は44.3 Hzに存在しているが、既往の研究において前者は列車速度と1車両長との関係から定まる振動数²⁷⁾、後者は車輪とその下の軌道および路盤とを含めた振動系の固有振動数²⁸⁾、あるいは、列車速度とまくらぎ間隔との関係から定まる振動数⁷⁾とされている。

載荷試験にあたって、互層状供試体には土圧計の出力記録を参考にして実際の路盤圧力の変動状態に近い条件のもとで荷重を加えることにした。図-6は、載荷試験に用いた装置および互層状供試体の構成を示す。載荷試験には、小形の振動発生機を使用した。互層状供試体には正弦波状の荷重を12.5 Hzで加えることにしたが、この振動数は列車速度95 km/hのときに車輪中心間隔2.1 mに起因して発生するレールのたわみ運動の周期に倣ったものである。このときの荷重の変動範囲は190~610 kgf (1.86~5.98 kN)となった。試験容器の底部に固定した土圧計の記録によると、加振時に互層状供試体に伝達された圧力の変動は0.35~1.15 kgf/cm² (34.3~112.7 kPa)、すなわち、圧力全振幅0.8 kgf/cm² (78.4 kPa)であった。この圧力全振幅だけに注目すると、これは先の図-5に示した路盤圧力の実測値に相当するものである。

今回の載荷試験においては、振動荷重を長期間継続して加えるのではなく、実際の線路における列車の通過頻度を考慮して1日をA~Dの4つの時間帯に分け、制御装置によって振動発生機の運転内容を変えることにした。ここに、AおよびCブロックは列車回数の比較的小さい時間帯、Bブロックは通過頻度の高い時間帯、Dブロックは列車の通過がほとんどない時間帯を想定したものである。運転プログラムにはA~Dを連続して7、14、28または56回繰り返すように入力した。載荷試験中に振動発生機本体が鉛直下方向に移動した量がそのまま互層状供試体に生じた圧縮沈下量となるが、沈下の測定には容量20 mmの変位計を使用し、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。

互層状供試体の作製にあたっては、まず、内径286 mmの硬質塩化ビニール製の底板無し円筒（以下、モールドと称する）の内面にシリコングリースを塗布したビ

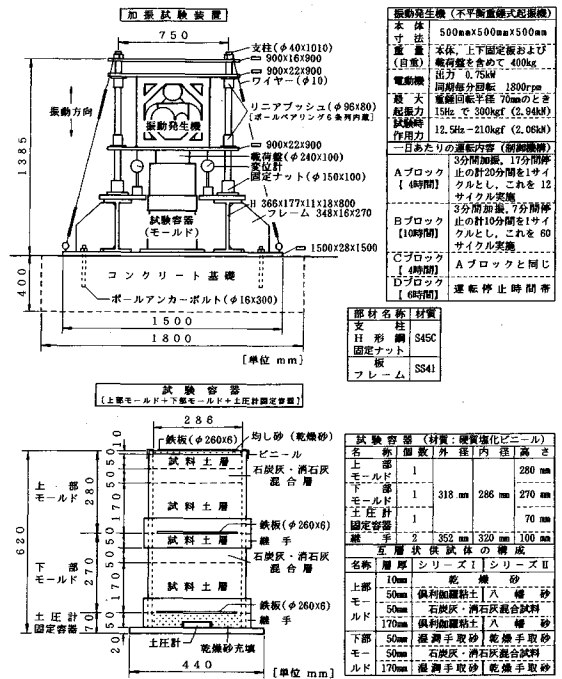


図-6 加振試験装置および互層状供試体の構成

ニールを充て、続いて、その中にランマーを用いて厚さ170 mmの試料土層、50 mmの石炭灰・消石灰混合層、50 mmの試料土層の順に詰めていくことにした。試料土のうち、八幡砂と俱利伽羅粘土はそれぞれの最適含水比、最大乾燥密度（前出表-3）を目標として詰めたが、手取砂については、乾燥状態のまま詰める場合と水を加えて湿潤状態としてから詰める場合に区別した（前出表-4）。石炭灰と消石灰との配合割合は乾燥重量比で5:5とし、この層の含水比は15%と20%の2種類に設定した。石炭灰・消石灰混合層の密度は体積置換法（水銀法）により求めたが、先にも述べたように、この層の乾燥密度は最大乾燥密度のほぼ85%の値になっていた。

図-6に示すように、今回の載荷試験では試験期間の短縮を図る目的で、土圧計を固定した容器の上に2つのモールドを重ねて、その上から振動荷重を加えることにした。この図には、そのときの互層状供試体の組み合わせをシリーズ I、シリーズ IIとして示してある。

載荷試験終了後には上部の互層状供試体、下部の互層状供試体別々にコーン貫入試験を行い、石炭灰・消石灰混合層におけるエトリンサイト生成反応やボゾラン反応による凝結硬化の進行度、すなわち、コーン支持力の増加傾向を調べることにした。なお、互層状供試体に動荷重を加える場合と静荷重を加える場合、あるいは、荷重を全く加えない場合ではコーン支持力の大きさにどれくらいの差を生じるのかを調べる目的で、振動荷重を断続的に作用させる試験のほか、振動発生機を動作させず

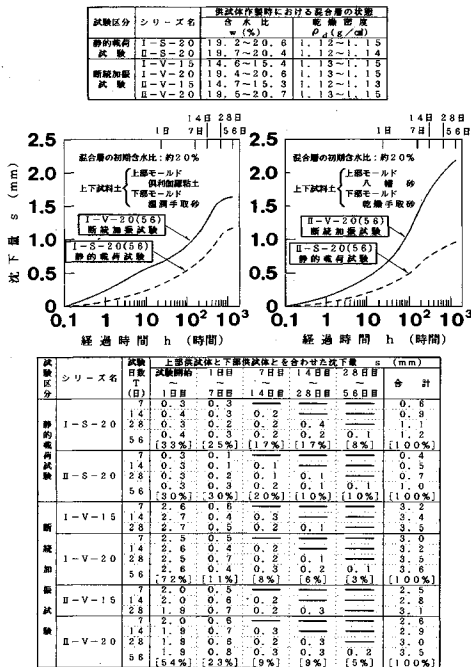


図-7 振動発生機を用いた静的載荷試験および断続加振試験において生じた沈下量

にその自重のみを作用させる試験および作製した互層状供試体をモールドごとビニール袋に覆い、密封した状態で実験室内に放置しておく試験も実施した。試験期間はいずれも7, 14, 28および56日間とし、所定の日数に達した時点でコーン貫入試験を行った。この論文では、それぞれの試験のことを断続加振試験、静的載荷試験および放置試験と呼ぶことにする。

図-7は、シリーズIおよびシリーズIIにおける沈下量の測定結果を示す。なお、沈下量sは上部の互層状供試体と下部の互層状供試体とを合わせた全体の量である。横軸は、経過時間hを対数目盛で表してある。沈下の進行過程をみると、静的載荷の場合には試験を開始した当日に最終沈下量の約30%までが進行するが、断続加振の場合にはその50~70%までが進行し、7日を過ぎるとほとんど進行しなくなることがわかる。また、断続加振試験で生じた沈下量は静的載荷試験に比べて大きくなっているが、これには荷重量の差、すなわち、静荷重は400 kgf (3.92 kN)であったのに対して振動荷重は190~610 kgf (1.86~5.98 kN)であったことも多分に影響しているものとみられる。いずれにしても、上部と下部とを合わせた供試体全体の初期高さは540 mmであることを考えれば、最終沈下量自体も極めて小さいものといえる。

後述するコーン貫入試験が終了した時点で各層の厚さを測ったところ、層厚の減少が認められたのは石炭灰・消石灰混合層の下に詰めた試料土層(初期厚170 mm)

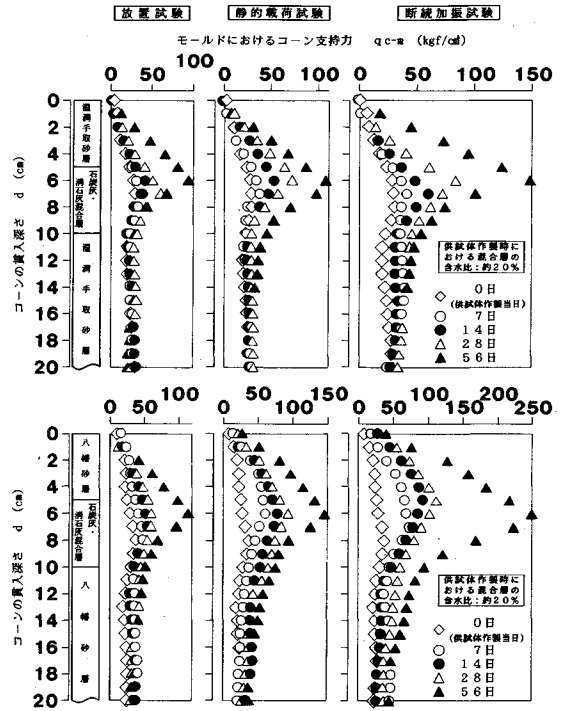


図-8 モールドにおけるコーン支持力の測定例(混合層を湿潤手取砂層または八幡砂層で挟み込んだ場合)

の部分のみであった。したがって、測定された沈下量の大部分はこの層の圧縮量であったことになる。また、その時点における石炭灰・消石灰混合層の乾燥密度は、当初この層を詰めたときとほとんど変わっていなかった。

コーン貫入試験には先端角27°、先端部の長さ56 mm、底面積5.73 cm²のコーンを使用した。ロッド部には力計を装着し、油圧試験機を用いてコーンを互層状供試体の中央に貫入させていったときの抵抗力を測定した。なお、力計の指示値は貫入深さ10 mmごとに読み取ることとし、コーンの底面が供試体の上面に一致したときを測定の開始点とした。コーンの貫入速度は5 mm/minとしたが、これは、予め放置試験用に作製した互層状供試体に対して25 mm/minの速度でコーンを貫入してみたところ、抵抗力は5 mm/minの場合の4割程度しか大きくなっていなかったことから決めたものである。

図-8は、コーン貫入試験の結果の例を示す。ここで、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る。コーン支持力は、いずれの互層状供試体においても石炭灰・消石灰混合層で最大となった。この最大値は試験日数の経過にもよって漸次増加し、また、同じ試験日数でも放置試験より静的載荷試験の方が、静的載荷試験より断続加振試験の方が大きくなった。しかし、石炭灰・消石灰混合層の初期含水比とこの最大値との関係は認められなかった。結果の整理にあたっては、初期

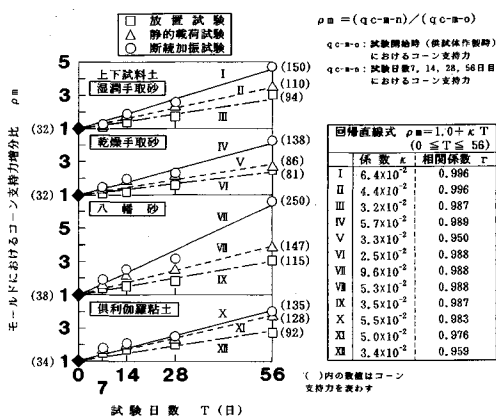


図-9 試験日数とコーン支持力増分比との関係 (互層状供試体)

含水比 15% の場合、20% の場合双方の最大値の平均をもってそのシリーズを代表するコーン支持力とした。そして、各試験日数におけるコーン支持力の最大値 $q_c - m - n$ と別途互層状供試体作製当日に測定しておいたコーン支持力の最大値 $q_c - m - o$ との比をコーン支持力増分比 ρ_m とし、これと試験日数 T との関係を求めることにした。

図-9 は、この ρ_m と T との関係を示したものである。回帰直線式の係数 κ の値を試験別にみると、放置試験では $2.5 \sim 3.5 \times 10^{-2}$ 、静的載荷試験では $3.3 \sim 5.3 \times 10^{-2}$ 、断続加振試験では $5.5 \sim 9.6 \times 10^{-2}$ となっており、荷重を加えた場合と加えなかった場合、さらには、加えた荷重が静的であった場合と動的であった場合との差が明らかに現われている。先にも述べたように、石炭灰・消石灰混合層の乾燥密度は当初この層を詰めたときもコーン貫入時ほぼ同じ値であったので、このような結果が得られた理由として載荷による密度増加を挙げることはできない。それでも、今回実施した 3 種類の試験において荷重の存在、とりわけ、動荷重は少なからず石炭灰・消石灰混合層の固化反応促進効果を有する可能性の高いことだけは示されたことになる。

図-1 に示したように、本研究の主眼は石炭灰・消石灰混合層を砂層で挟み込んだ構造を有する対策工にあるが、図-9 に示した係数 κ の値をみると、砂層を乾燥状態とした場合の κ は湿潤状態とした場合の κ に比べて小さいものの、その差をもって石炭灰・消石灰混合層の凝結硬化の進行度を議論するほどのものとはいえず、結果的には、砂層自体の含水比が互層路盤の耐久性におよぼす影響は少ないと判断される。

6. 置換互層路盤を適用した場合の改善効果に関する数値計算例

石炭灰を用いた置換互層路盤を噴泥箇所施工した場

合の改善効果を調べるには、施工後周期的に平板載荷試験やコア採取成形試料の強度試験などを行って当該箇所の実態を追跡していくのが最も直接的で確実な方法といえる。しかし、営業線において、そのつど軌桁や道床砂利を撤去して所定の調査を行うのは容易なことではなく、事実上不可能に近い。したがって、予め施工後の路盤支持力や沈下量について検討しておく必要がある。そこで、本研究では、この互層路盤を軟弱な路床上に築造したときに期待される地盤反力係数を、一般に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使用されている多層弾塑性モデルによる路盤効果の推定法²⁹⁾を用いて計算することにした。なお、断続加振試験において互層状供試体に生じた沈下量は極めて小さかったことより、沈下に関する計算は検討事項に含めなかった。

表-5 は、今回の計算に用いた変形係数 E 、ポアソン比 ν および層厚 h の値を示す。ここで、砂層の変形係数は、平坦地の一部を掘削して設けたピット (長さ 14.2 m、幅 0.85 m、深さ 0.3 m) で実施した平板載荷試験の結果より算出したものである。このピットには、石炭灰と消石灰との配合割合を数種類に変えた互層状の模型路盤も築造し、位置を移しながら周期的に平板載荷試験を実施した。石炭灰・消石灰混合層の変形係数は、この平板載荷試験より得られた値と第 4 章に述べた一軸圧縮試験より得られた値双方を比較検討して決定した。石炭灰・消石灰混合層のポアソン比は、既往の研究を参考にして 0.15²⁴⁾、0.30⁴¹⁾ と仮定した。計算の対象には、前章に述べた能瀬駅付近と廃線前は路盤噴泥箇所であった線路³⁰⁾を選定し、それぞれをケース A~D とした。なお、比較のために、既存の噴泥対策工の 1 つである砂置換工を施した場合についても計算を行った。

図-10 は、ケース A について、石炭灰・消石灰混合層のポアソン比を 0.15 とし計算したときの結果をまとめたものである。土路盤が確保すべき地盤反力係数を路盤表面に作用する道床圧力から算出すると K_{30} で 8.5 kgf/cm^3 (83.3 MN/m^3) 程度となるが、通常は、軌道の不整や列車速度の影響を見込んで 11 kgf/cm^3 (107.8 MN/m^3)、 K_{75} に換算して 5 kgf/cm^3 (49.0 MN/m^3) を基準値としている。図より、この箇所に砂置換路盤を施工した場合の地盤反力係数は、置換厚さを 20 cm としたときには現状の約 2.5 倍、30 cm としたときには約 3 倍に増加するが、それでも基準値を満足しないことから、砂置換路盤では十分に改善されないといえる。一方、石炭灰を用いた置換互層路盤については、石炭灰と消石灰との配合割合を 8:2 または 5:5 とし、各層の厚さを 10 cm としたときに施工当日もしくは施工後 1 日で基準値をほぼ満足するという結果が得られた。さらに、地盤反力係数は施工後 7 日で当初の約 1.5 倍、28 日で約 1.7 倍、90 日では約 2 倍にも達することから、この互層路

表一 地盤反力係数 K_{75} , K_{30} の計算に用いた諸値

I. 砂置換路盤に対する E, ν , h

区分	層の構成	変形係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	層厚 h (cm)	
				①	②
第1層	路盤; 砂層	390*	0.30	20	30
第2層	路床 下表 III		0.40		∞

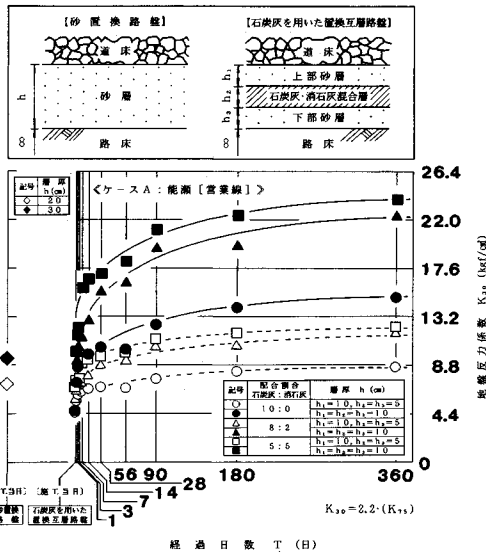
II. 石炭灰を用いた置換互層路盤に対する E, ν , h

区分	層の構成	変形係数 E (kgf/cm ²)	ポアソン比 ν	層厚 h (cm)	
				①	②
第1層	上部砂層	390*		10	10
第2層	路 石炭灰・消石灰	E(T)**	(a) 0.15 (b) 0.30	5	10
	層 混合層				
第3層	下部砂層	390*	0.30	5	10
第4層	路床 下表 III		0.40		∞

III. 路盤の地盤反力係数 K_{30} および変形係数 E (実測値)

ケース	平板載荷試験実施場所	統一工費分類	地盤反力係数 K_{30} (kgf/cm ²)	変形係数 E (kgf/cm ²)
A	能瀬 [営業線]	CI	3.0	59
B			3.7	72
C	茂原 [南線敷]**	CH	4.5	86
D			5.8	115

* 平板載荷試験の結果より算出。 ** 所定の目数ごとに実施した平板載荷試験および一軸圧縮試験より得られた2種類の变形係数を参考にして決定。
*** 文献 3) より抜粋



図一〇 地盤反力係数 K_{75} , K_{30} の計算例 (ケース A)

盤による改善効果は高いと判断される。また、ここでは、石炭灰と消石灰との配合割合を 8 : 2 としても、支持機能の向上および路床伝達圧力の低減は十分に図れることになる。しかし、同じ配合割合でも石炭灰・消石灰混合層の厚さと下部砂層の厚さが小さいときには、期待すべき改善効果は認められない。

石炭灰・消石灰混合層のポアソン比を 0.30 として計算すると、この図に示した曲線の勾配は全体的に大きくなり、また、ケース A に比べて原地盤の支持力の大きい B~D に関する計算では、配合割合 8 : 2、置換互層路盤厚 20 cm としても十分な改善効果が得られる場合もあった。

いずれにしても、この互層路盤を施工するにあたっては、当該箇所の現状、とりわけ、施工基面における支持力に応じて経済的な配合割合および置換厚さを選定する

必要がある。さらに、施工時の環境、例えば、地下水位や外気温度の状況によっては、速硬性であるセメントを安定材として用いる方が有利となる場合も考えられる。

7. まとめ

在来線の噴泥箇所は、保守周期の延長および列車速度の向上を図る際の大きな障害となっている。本研究では、噴泥箇所に対する新たな補修策として、そこに石炭灰を用いた置換互層路盤を施す場合の適用性について検討した。各種の室内試験および数値計算より得られた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 提案する改良路盤の核をなす石炭灰・消石灰混合層は水浸条件下でも十分な強度発現を呈し、かつ、体積変化は小さい。
- (2) 改良路盤全体で生じる圧縮沈下は小さく、また、列車荷重を受けることによって石炭灰・消石灰混合層の支持力は一層増加する可能性が高い。
- (3) 原地盤の支持力に応じた配合割合と置換厚さを設定すれば、基準値 ($K_{75} \geq 5 \text{ kgf/cm}^2$, $K_{30} \geq 11 \text{ kgf/cm}^2$) を満足する鉄道路盤を築造することができる。

これらの結果は、石炭灰を用いた置換互層路盤の耐久性や耐荷性能は良好であり、また、これを施すことによって高い改善効果が得られることを示すものであるが、この方策を噴泥対策工の1つとして確立する上には、さらに、経済性、作業機材の選定や工程などについても検討を加える必要がある。なお、数値計算に用いる変形係数を求めるために、ピットに互層状の模型路盤を築造したことを先に述べたが、その際には小形の電動コンパクターを使用した転圧試験も併せて実施した。結果としては、各層いずれも1層まき出し、転圧回数を8~10回としたときに、最大乾燥密度の85~90%の乾燥密度をもって所定の厚さに仕上がることが示された。したがって、この互層路盤の施工性も概ね良好であると判断されるが、材料を混合してから転圧するまでの時間間隔と締固め度および強度発現過程との関係については、反応生成物の確認など微視的レベルの調査を含めて別途検討する必要がある、この点についても今後の研究課題としたい。

本研究を遂行するにあたり、金沢大学鳥居和之助教授および(財)鉄道総合技術研究所伊東孝之主任研究員、須長誠主任研究員、関根悦夫研究員には多くの資料をご提供いただくとともに、貴重なご助言を賜った。また、西日本旅客鉄道(株)金沢支社の方々と金沢工業大学大学院酒井英美氏(現、大成道路(株)勤務)には多大なご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表する。

参考文献

1) 伊東孝之・岩崎高明・野口達雄：噴泥の実態とその対策 (1), 鉄道技術研究報告, No.1062 (施設編第472号),

- 1977.11.
- 2) 伊東孝之・岩崎高明・野口達雄・大脇康孝：噴泥の実態とその対策（2），鉄道技術研究報告，No.1077（施設編第479号），1978.3.
 - 3) 山田幹雄・小野一良：鉄道線路上における噴泥発生機構の基礎的研究，土木学会論文報告集，第325号，pp.107～118，1982.9.
 - 4) 伊能忠敏：鉄道路盤の噴泥現象の解明とその防止対策，鉄道技術研究報告，No.1252（施設編第546号），1983.11.
 - 5) (財)鉄道総合技術研究所：営業線路盤改良の設計・施工の手引き，1987.7.
 - 6) 須長 誠・関根悦夫・近間靖志：軟弱地盤上における速度向上試験（中央本線），鉄道技術研究所速報，No.A-87-25，1987.2.
 - 7) 須長 誠・関根悦夫：軟弱地盤上における速度向上試験（長崎本線），鉄道技術研究所速報，No.A-87-56，1987.2.
 - 8) 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.
 - 9) (財)国土開発技術研究センター・建設事業への廃棄物利用技術の開発委員会：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書，1983.3.
 - 10) Schubenz, D. : Hydraulisch gebundene Tragschichten mit Flugasche Technologie Technik Erfahrungen, Beton, Vol.33, No.3, pp.93～96, 1983.3.
 - 11) Laverne, W. : Lime-Fly Ash Stabilization for Pavement Repair, Public Works, Vol.113, No.12, pp.51～53, 1982.12.
 - 12) Barenberg, E.J. and Thompson, M.R. : Design, Construction, and Performance of Lime, Fly Ash, and Slag Pavement, Transportation Research Record, No.839, pp.1～6, 1982.
 - 13) 苗村正三・小野寺誠一：石炭灰を用いた盛土，基礎工，Vol.18, No.12, pp.59～67，1990.12.
 - 14) 岡本敏郎・片岡哲之・田中幸久：石炭灰埋立地盤の物理的，力学的特性—陸上埋立地の場合—，電力中央研究所報告，No.U88009，1988.6.
 - 15) 佐野 暁・川崎博巳：白鳥大橋における石炭灰スラリーによる築島工，基礎工，Vol.18, No.12, pp.95～101，1990.12.
 - 16) 関根悦夫・須長 誠：鉄道盛土への石炭灰の適合性に関する研究，鉄道総研報告，Vol.4, No.12, pp.31～38，1990.12.
 - 17) 関根悦夫・須長 誠・長田晴道：石炭灰を用いた鉄道盛土の施工例，基礎工，Vol.18, No.12, pp.91～94，1990.12.
 - 18) Thompson, M.R. : Use of Stabilized Layers in Track Structure, Transportation Research Record, No.802, pp.8～12, 1981.
 - 19) 山田幸男：石灰・石膏による鉄道路盤の安定処理例，基礎工，Vol.9, No.2, pp.63～69，1981.2.
 - 20) 日本石灰協会・石灰安定処理委員会：石灰による軟弱地盤の安定処理工法，鹿島出版会，1983.
 - 21) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル，技報堂出版，1985.
 - 22) 佐野博昭・山田幹雄・酒井英美：水浸養生が石炭灰供試体の強度特性におよぼす影響，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-212，pp.460～461，1990.9.
 - 23) 酒井英美・山田幹雄・佐野博昭・伊能忠敏：石炭灰を用いた鉄道互層路盤のコーン支持力特性に関する実験的研究，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-210，pp.456～457，1990.9.
 - 24) 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.
 - 25) 鳥居和之・川村満紀・榎場重正：締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.65～74，1986.8.
 - 26) 西亀達夫：鉄道路盤表層土の材質判定法について，土と基礎，Vol.9, No.3, 1961.3.
 - 27) 垂水尚志・須長 誠：軟弱地盤上低盛土の列車走行時の挙動に関する研究，土木学会論文集，第400号/Ⅲ-10，pp.1～11，1988.12.
 - 28) 小野一良・山田幹雄：鉄道線路の軌道および路盤に生ずる振動の解析，土木学会論文報告集，第339号，pp.167～176，1983.11.
 - 29) 須田 熙・佐藤勝久：多層系路盤面上におけるK値の推定方法に関する研究，港湾技術研究所報告，第11巻，第1号，pp.107～148，1972.3.
 - 30) 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.

(1991.6.19 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON APPLICATION OF IMPROVEMENT OF ROADBED USING FLY ASH FOR CONVENTIONAL LINE

Mikio YAMADA, Hiroaki SANNO, Kenzou TOKUOKA and Tadatashi INO

Various laboratory tests have been performed to investigate the strength, bearing capacity and deformation characteristics of fly ash and the application of the improvement of roadbed using fly ash for railway track causing mud-pumping. In addition, numerical calculations used the results of tests were performed to compare the effect of the improvement of roadbed using fly ash with that of the sand blanketing measures. It was found that fly ash has enough durability against repeated load and seepage water and that the calculated coefficients of subgrade reaction increase as the elapsed day. The improvement of roadbed using fly ash is useful for taking preventive measures against mud-pumping.