

石炭灰の鉄道盛土材料への適用に関する研究

A STUDY ON UTILIZATION OF FLYASH FOR EMBANKMENT MATERIALS IN RAILWAY

関根 悦夫*・須長 誠**
by Etsuo SEKINE and Makoto SUNAGA

1.はじめに

石炭火力発電所から発生している石炭灰は、各分野での利用が検討されているものの、一部がセメントの原料として利用されている以外は有効利用率は低く、全発生量の約60%が沿岸部や山間部へ埋立処分されている。また、この発生量は増加の傾向を示しており、2000年には1200~1300万トンになると推定される。

日本での石炭灰火力発電所の燃焼方式の主流である微粉炭燃焼方式では、石炭灰の発生過程において、粒径の大きい順にクリンカーアッシュ、シンダーアッシュ、フライアッシュに分けられ、本研究で対象としたフライアッシュは全発生量のうち約70%を占め、このフライアッシュは次のような特徴を持つ。

- ・自己硬化性（水と混合した場合に強度を発現する性質）を持つ。
- ・一般の土に比べて軽量である。

これは通常の土にはない性質であり、土とともに土木材料として広い適用範囲があると予想される。

そこで、盛土建設の際、良質な盛土材料が入手しにくくなっている背景を踏まえ、これを補う材料として着目し、石炭灰（特にフライアッシュ）の有効利用の一環として、鉄道盛土への適用を図るための研究を行ってきた。

鉄道盛土の材料として要求される条件には

- ・圧縮性が小さいこと。
- ・列車荷重に対して十分な支持力があること。
- ・噴泥や凍上が発生しないこと。

等があり、石炭灰もこの条件を満足する事が必要である。

そこで、上記項目の検討及び盛土の施工性の確認のために行った盛土の施工試験^{1),2)}、盛土の長期安定性の確認²⁾等これまで実施した研究の概要と石炭灰を利用した鉄道盛土の実施例について述べる。

2.盛土の施工試験

2.1 事前検討

フライアッシュを盛土材料として適用する場合、粉体で用いる場合と水等と混合したスラリーで用いる場合が考えられるが、現地での施工性等を考慮し、粉体で用い、

* (財) 鉄道総合技術研究所 土質・基礎研究室 研究係長
(〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

** 同 主任研究員

締固め方式による施工を前提とした。

そこで、盛土の施工試験の前に盛土材料（フライアッシュ）、盛土材料の締固め特性、盛土の転圧機械についての検討を行った。また、締固めたフライアッシュの養生条件、特に、温度、拘束条件についての検討も併せて行った。なお、低含水比であるフライアッシュを締固め方式で盛土を構築するには含水比調整が必要となるが、これには同じ石炭火力発電所から発生する高含水比の排煙脱硫スラッジを用い、フライアッシュと6:1の割合で混合することにより行った。表1に検討に用いたフライアッシュの諸特性を示す。フライアッシュの比重は、通常の土の比重（2.7程度と考えると）より20%程度小さいため、通常の土の盛土より軽量となる。

(1) 締固め特性

含水比調整した混合材料は化学反応（ポズラン反応）が伴い、実際の施工では含水比調整後数日してから施工を行う場合も考えられるため、含水比調整後1,3,7日放置した3種について、締固め特性の検討を締固め試験により行った。その結果を図1に示す。放置時間が増加するにつれて最大乾燥密度の低下の傾向が見られ、同時に最適含水比は増加した。これは、放置している間に混合した材料の化学反応が始まり、粒子間の結合が進むことにより締固め特性が変化したものと想定され、材料の放置時間が長くなると同じ締固めエネルギーでは締固め密度の低下を招き、盛土材料に使用する際には十分な材料管理が必要であることを示している。

表1 フライアッシュの物理・化学特性

項目	フライアッシュ	排煙脱硫スラッジ ¹⁾
比重	2.18	2.58
粒度	60%粒径 (mm)	0.033
	30%粒径 (mm)	0.025
	10%粒径 (mm)	0.016
化学成分 (%)	SiO ₂	52.0
	Al ₂ O ₃	22.8
	Fe ₂ O ₃	6.7
	CaO	10.4
	CaSO ₄	—
	CaSO ₃	—
強熱減量 (%)	0.97	9.23

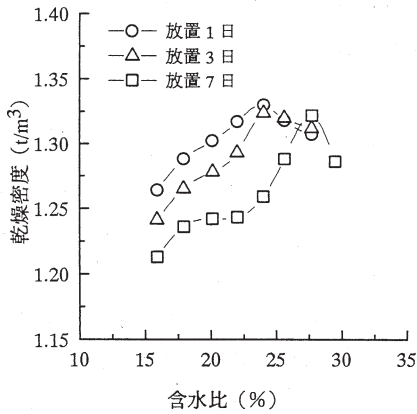


図1 フライアッシュの締固め特性

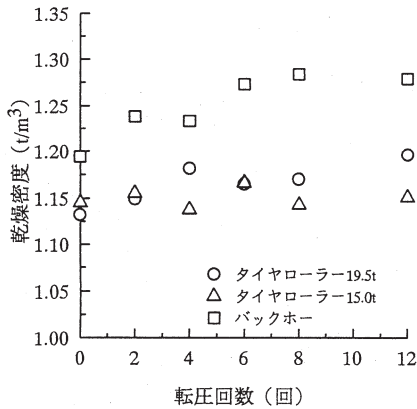


図2 転圧回数と乾燥密度

(2) 転圧機械の検討

通常、鉄道盛土を施工する場合、転圧機械に振動ローラー等を用いているが、フライアッシュについては未知の材料であるために、これに適合する転圧機械の検討のための転圧試験を行った。

転圧試験に用いた機種は、ローラー系とキャタピラ系の2種である。ローラー系は自重15ton、19.5tonのタイヤローラー、キャタピラ系は自重18.7tonのバックホーを用いた。

転圧試験の結果を図2に示す。図中の密度の測定にはRI(ラジオアイソトープ)による方法を用いた。これは、最近、通常の盛土の密度測定にRIによる方法が多くなってきており、フライアッシュについても実施工の場合、RIが使われることを考慮したものである。

図2より、タイヤローラーよりバックホーのほうが締固め密度が大きくなり、バックホーの場合概ね6回程度で密度の増加が収束することがわかる。従って、今回用いたフライアッシュについては、ローラー系よりキャタピラ系のほうが、締固めについて適合性があると考えられる。

(3) 養生条件の検討

養生条件の違いによる石炭灰の特性を把握するために、石炭灰を締固めて作成した供試体について一軸圧縮試験

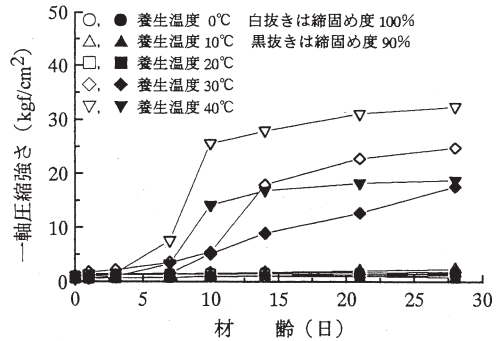


図3 材齢と一軸圧縮強さ(フライアッシュのみ、非拘束養生)

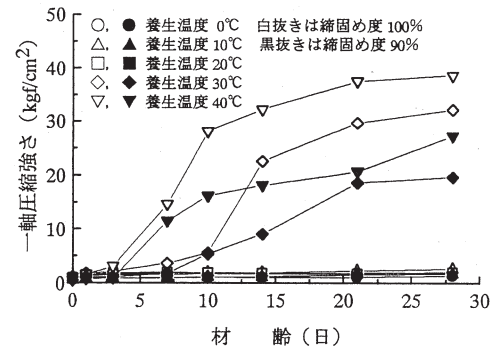


図4 材齢と一軸圧縮強さ(フライアッシュのみ、拘束養生)

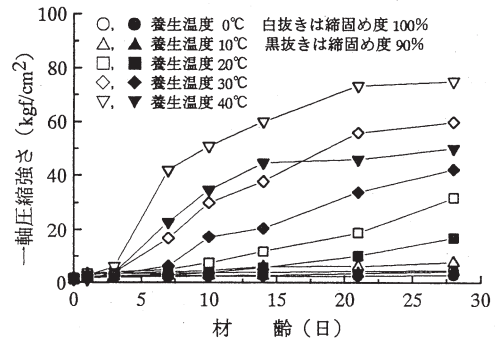


図5 材齢と一軸圧縮強さ(混合材料、非拘束養生)

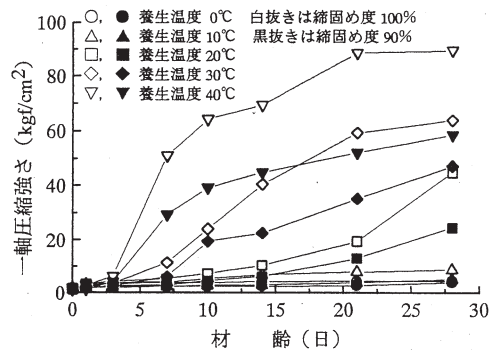


図6 材齢と一軸圧縮強さ(混合材料、拘束養生)

を行った。養生条件は、5種の温度(0, 10, 20, 30, 40℃)、供試体の拘束の有無である。供試体の拘束無しの場合、円形モールドにて供試体作成の後、モールドを脱型し、フリーの状態での養生であり、拘束有りの場合は、モールドのままでの養生で、側方のみ拘束の状態である。

供試体の作成条件として、締固め密度を締固め度100%, 90%の2種を設定し、材料はフライアッシュのみ、フライアッシュと排煙脱硫スラッジを3:1の割合で混合したもの2種とした。

図3~6に材齢と一軸圧縮強さとの関係を示す。フライアッシュのみの場合は養生温度が30℃以上、混合材料は20℃以上となると材齢とともに強度が増加する傾向となり、養生温度が高いほど、また、締固め度が大きいほどその増加率は大きくなった。

材齢28日における養生温度と一軸圧縮強さとの関係を示したのが図7, 8である。フライアッシュのみの場合は、20℃以下では強度の変化が見られないが、30℃以上となると急激に強度が増加し、混合材料の場合は、10℃以上となると強度が増加する。これよりフライアッシュの強度には養生温度依存性があることがわかる。その温度依存性もフライアッシュのみより混合材料のほうが、非拘束養生より拘束養生のほうが、また供試体の締固め度が

大きいほうが顕著となる。ただし、混合材料の場合では養生温度0℃でも3kgf/cm²程度の強度があるため、よほどの厳寒期に施工を行わない限りは、盛土体としての強度については問題がないと考える。

2.2 施工試験

施工試験では、フライアッシュを盛土材として適用した場合の施工性、混合材料の放置時間による締固め程度、盛土のり面、盛土体の長期安定性等の検討・確認のために図9に示す盛土を構築した。

試験盛土の材料は、フライアッシュと排煙脱硫スラッジの比が6:1の混合材料について、締固め特性を考慮し、放置時間1, 2, 4日の材料を使用した。盛土の施工は転圧試験の結果を踏まえ、バックホーを用いて行った。また、転圧層1層当たりの敷き均し厚さは20cm、仕上がり厚さは15cmであり、盛土高さ3mから盛土全体の転圧層数は20層となる。

表2に転圧各層で測定した密度を示す。これから、締固め試験の結果と同様に、放置時間が増加すると締固め程度が低下することがわかる。放置1, 2日の層では締固め度は約90%以上確保されているの対し、放置4日では90%以下であった。

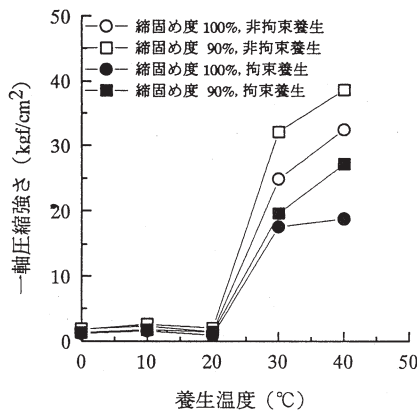


図7 養生温度と一軸圧縮強さ(フライアッシュのみ)

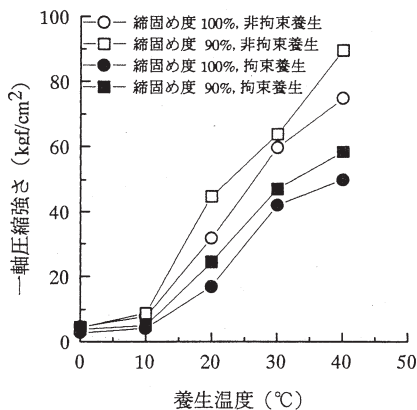


図8 養生温度と一軸圧縮強さ(混合材料)

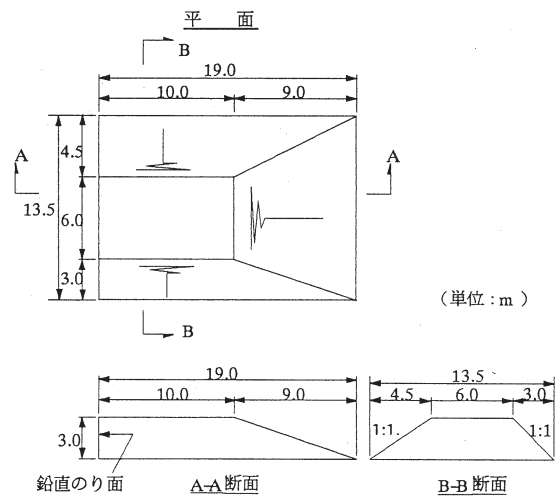


図9 試験盛土の形状

表2 各層の締固めの程度

層番号	乾燥密度 (t/m ³)	放置日数 (日)	締固め度 (%)
4	1.175	4	88
6	1.131	4	85
8	1.140	4	86
10	1.187	2	89
12	1.232	2	93
14	1.205	2	91
16	1.211	2	91
18	1.237	1	94
20	1.201	1	91

盛土のり面については、勾配を1割5分勾配、1割勾配の2種を設定し、また、材齢とともに高強度になるフライアッシュの特性を活かして、のり面を急勾配にした場合の施工性及び安定性についても検討した。その結果、補強盛土等で使用されているジオテキスタイルの補強ネットで補強すれば、フライアッシュについても鉛直のり面を施工できることが確認された。ただし、ジオテキスタイルは施工時の重機の安定を確保するために敷設するものであるため、その強度は補強盛土に使用する補強材より小さく、敷設長も短いものである。また、フライアッシュは強アルカリであるために、補強材の材質はアルカリに対して耐久性のある材質でなければならない。

1割5分勾配、1割勾配のり面についても、張り芝工、植生土のう工、張りコンクリート工、無処理のり面工を施工し、通常の土と同様に施工可能であること、安定性保っていることを確認した。

3. 盛土の長期安定性の確認

盛土の長期安定性を確認するために、盛土の施工試験終了後、盛土の強度、盛土の変状、重金属の溶出（フライアッシュは重金属を含んでいるため）等について検討を行った。

3.1 盛土の強度

盛土の強度はボーリングによって採取したコアサンプルの一軸圧縮強さによって確認した。図10は放置1日の層の材齢と一軸圧縮強さとの関係である。材齢1日の強度は 3kgf/cm^2 程度とすでに通常の土より大きく、材齢7日から14日の間で急激に強度が増加し、材齢1年程度までは強度が増加するが、その後1000日程度までは変化がない。また、材齢28日では材齢1000日の約7割程度の強度の発現があった。

事前検討で、締固め度が大きいほうが強度が大きいことを確認しているが、試験盛土においても、締固め程度と強度との関係を乾燥密度と一軸圧縮強さとの関係で整理した。その結果を図11に示す。図中の乾燥密度は採取

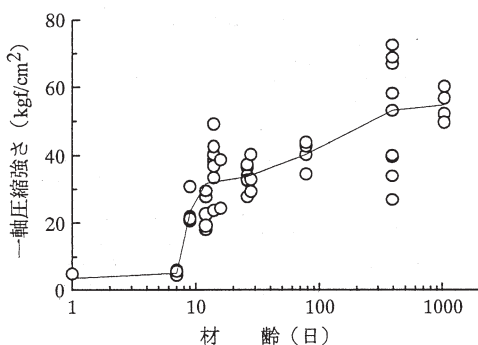


図10 材齢と一軸圧縮強さ

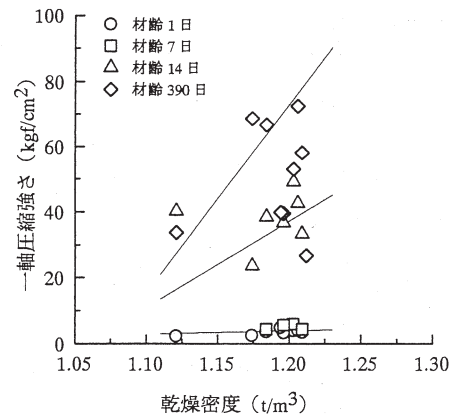


図11 乾燥密度と一軸圧縮強さ

したコアの乾燥密度である。

試験盛土の場合、若材齢時（材齢1、7日）では、密度の増加による一軸圧縮強さの増加の傾向はほとんど見られないが、材齢が進むにしたがって乾燥密度の増加による一軸圧縮強さの増加の割合が大きくなる。つまり、盛土構築時の密度は、大きな材齢の強度に影響を与えることになる。ただし、測定された密度は、締固め度85%～95%の範囲にあった。

従って、盛土構築時の締固め密度に10%程度のばらつき（ただし、下限の締固め度は85%以上）がある場合、材齢初期における盛土体は全体的に均一な強度となるが、材齢とともに盛土体の強度は均一ではなくなる。しかし、強度が均一ではないといっても最低の強度はかなり大きいため、盛土の安定は十分保てると考える。

3.2 盛土の変状

盛土の沈下について、1年間沈下測定を行ったが、ほとんど沈下は生じていなかった。

盛土のり面については、各種勾配のり面工とも変状は生じておらず、張り芝工、植生土のう工の芝は良く繁茂していた。ただし、無処理のり面については雨水による表面のわずかな浸食がみられた。

3.3 重金属の溶出

フライアッシュには重金属類が含まれており、環境上問題となるのはこの重金属類が溶出することであるが、重金属類を含んでもその重金属類が溶出しなければ問題とならない。そこで、重金属類の溶出に対する検討として環境庁の指定した溶出試験（環境庁告示第13号、産業廃棄物に含まれる金属等の検出方法、昭和48年2月17日）を盛土構築後コアサンプリングした供試体について行った。重金属の溶出試験の項目には、カドミニウム、六価クロム、鉛、全水銀、ひ素、シアン化合物の7項目がある。

表3 溶出試験結果

項目	採取したコア	フライアッシュ	排煙脱硫スラッジ	排出基準 ^{*)}
カドミウム (ppm)	N.D	N.D	N.D	0.1 以下
六価クロム (ppm)	N.D	0.13	N.D	0.5 以下
鉛 (ppm)	0.10	0.11	N.D	1 以下
全水銀 (ppm)	N.D	N.D	N.D	0.005 以下
ひ素 (ppm)	N.D	N.D	N.D	0.5 以下
シアン化合物 (ppm)	N.D	N.D	N.D	1 以下

*)は水質汚濁防止法の排出基準

N.D は検出されなかったことを示す。

また、溶出試験はフライアッシュ、排煙脱硫スラッジについても行った。その結果を排出基準値とともに表3に示す。各金属類は、採取したコア、フライアッシュ、排煙脱硫スラッジとも全て検出されなかったか、検出されても環境基準値を大きく下回っていた。

また、溶出物は、主に雨水による表面水や浸透水により溶出するものと推定され、固結した石炭灰の透水係数は非常に小さいこと、盛土表面は、急勾配の場合はコンクリート壁、通常の勾配の場合には土羽工により覆われていること、溶出試験の条件は自然条件に比較して過酷であること等から、アルカリ性を呈する (pH10.5) フライアッシュの盛土については重金属の溶出について問題ないと考える。

4. 実施例

盛土の施工試験から、フライアッシュを用いた盛土には、

- ① 圧縮性が小さい。
- ② 強度が大きい。
- ③ 軽量である。
- ④ 鉛直のり面を有する盛土の構築が可能である。
- ⑤ 締固め方式による盛土の構築が可能である。

等の特徴が有り、フライアッシュが鉄道盛土の材料としての条件を十分満足していることや長期的安定性が確認された。これら結果をもとに現地において実施工を行った

4.2 実施例の概要

実施例は、JR九州長崎本線東諫早駅行き違い設備新設に伴って既設盛土に腹付け盛土を行ったものである^{3),4)}。

既設盛土は高さが約 5.5 m で用地境界が盛土尻付近にあるために、安全側線の線路幅を確保するためには盛土ののり面を急勾配にしなければならない。その際、通常の土を盛土材料として腹付け盛土を構築すると、図 12 に示すように、既設盛土は軟弱地盤上に位置しているため、何らかの地盤処理を行わないと沈下、安定上問題が生じることになる。

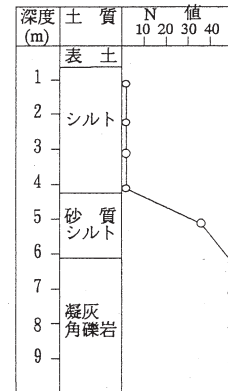


図12 地盤概況

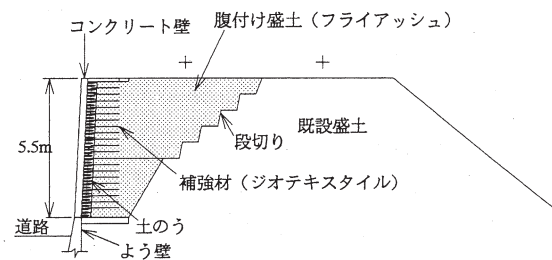


図13 腹付け盛土の概略断面

そこで、通常の土に比べて2~3割軽量であり、ジオテキスタイル等の補強材を用いれば鉛直のり面の施工が容易であるフライアッシュが腹付け盛土の材料として採用されたものである。鉛直のり面の施工法は、鉄道で用いられている補強盛土工法の施工法⁵⁾と同様な方法(ジオテキスタイルの補強材と土のうを用いる方法)を用い、のり面の表面にははジオテキスタイルの紫外線による劣化防止と美観上から厚さ 20cm のコンクリート壁を設けた。盛土の概略断面図を図 13 に示す。盛土延長は約 60m であり、盛土量は約 750m³である。

4.3 施工概要

(1) 材料の搬入

施工箇所は鉄道営業線が走る既設盛土と道路に挟まれ、用地に制約がある狭隘な箇所であり、民家が近接しているため、あらかじめプラントにて含水比調整した混合材料をパックに詰めて現場に搬入することにした。パックの下は開封可能となっており、現場では、混合材料をパック下より落下させ、盛土材料に供した。

パックを用いての材料搬入は以下の点で有効であった。

- ① 公道における運搬、現場搬入時の材料の飛散を防止できる。
- ② 運搬時等の乾燥による材料の含水比変化が少なく、品質を最適な状態に維持できる。
- ③ クレーンで容易に吊れることにより、盛土高さが高くなった場合でも材料の搬入が容易である。
- ④ パックに詰めることにより材料の散失がなくなる。

(2) 転圧・管理

転圧はキャタピラ系を用いた転圧のほうが好ましいが、現場が狭隘な箇所であるために、大型機械による施工ができず、小型のバックホーにより材料のまき出し、敷き均しを行い、転圧は事前に行った転圧試験結果から自重650kgの小型の振動ローラーを用いた。

また、含水比調整した材料は放置時間が長くなると締固め特性が変化し、締固め密度の低下をまねくため、材料のストックは行わず、材料の含水比調整量、現場への搬入量、転圧量の工程管理を行い、含水比調整した材料をその日に盛土材料に供するようつとめた。

施工管理は密度管理とし、測定はRIを用いて、施工厚さ30cm毎に行った。測定された密度から締固め度を算出するとほとんどが90%前後であり、転圧面も通常の土の転圧面と同様に平滑に仕上げる事ができた。このように、小型の振動ローラーでも十分転圧可能であることが確認された。

今回の施工は鉄道営業線近接工事であり、既設盛土を段切りしながらの施工であるため、既設盛土の挙動を観測しながら行ったが、既設盛土にはなんら変状はなく無事腹付け盛土を完成することができた。

(3) 盛土の強度

腹付け盛土施工後に、盛土からボーリングを行い、採

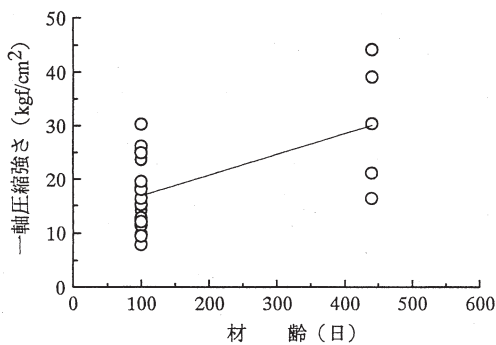


図14 材齢と一軸圧縮強さ（腹付け盛土）

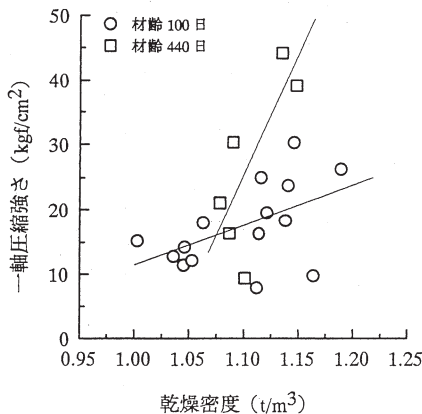


図15 乾燥密度と一軸圧縮強さ（腹付け盛土）

取したコアサンプルの一軸圧縮試験により盛土の強度の確認を行った。その結果、図14に示すように、一軸圧縮強さは、材齢100日で平均16kgf/cm²程度、440日で平均30kgf/cm²程度あり、鉄道盛土として十分な強度を有していることがわかる。

密度と強度との関係については、図15から、試験盛土と同様材齢が大きくなると強度の密度依存性が強くなる事がわかる。

盛土の沈下に関しては、施工後約1年以上を経過しても沈下はほとんど生じていなく、採取したコアについての重金属の溶出試験結果についても問題がなかった。

長崎本線以外でも、JR九州香椎線の長者原駅付近の架道橋改良に伴う工事として、盛土のかさ上げ部分にフライアッシュが用いられ、ジオテキスタイルを用いて鉛直のり面を有する盛土の施工を行っている。

6. おわりに

盛土の試験施工や現場での実施工の結果をもとに「鉄道構造物設計標準・同解説 土構造物」⁹⁾の中で、フライアッシュが鉄道盛土の材料の一つとして採用された。しかし、フライアッシュを利用する際の問題に、その供給場所が限定されていることがある。このため産業副産物として非常に安価であるにもかかわらず、運搬費が非常に高くなる場合があり、石炭火力発電所が現場から近距離にあることが前提となる。また、フライアッシュの有効利用量が限定されているため、廃棄することを前提とした設備になっている石炭火力発電所もあり、利用しにくい場合もあるが、事業者によるフライアッシュの有効利用に必要な設備投資については昭和62年に税制改正が行われ税制上の優遇処置が適用されることとなり、今後はフライアッシュの有効利用を前提とした発電所も増加すると考えられる。

<参考文献>

- 1) 桑原 武, 須長 誠, 関根悦夫, 黒島一郎: 石炭灰を用いた盛土の構築試験, 土木学会第44回年次学術講演会概要集第3部, PP798~799, 1989年10月
- 2) 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, 1990年12月
- 3) 関根悦夫, 須長 誠, 長田晴道, 桑原 武: 石炭灰を用いた鉄道盛土の構築, 土木学会第45回年次学術講演会概要集第3部, 1990年10月, pp798~799
- 4) 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, No12, 1990年12月
- 5) 村田 修, 館山 勝, 青木利明, 金沢芳信: 補強盛土工法の開発, 土木施工, 第32巻10号, 1991年10月
- 6) (財) 鉄道総合技術研究所編: 建造物設計標準・同解説 土構造物, pp34~35, 丸善, 1992年10月

(1994年12月5日受付)