

石炭灰の有効利用 — 特に道路下層路盤への適用試験

UTILIZATION OF COAL FLY ASH — FIELD TEST FOR ROAD BASES

松本正毅*・原田俊之**・小池章久***

by Masaki MATSUMOTO, Toshiyuki HARADA
and Akihisa KOIKE

1. はじめに

平成元年度の石炭の国内消費量は、11,340万トンであるが、その約6割は鉄鋼用の原料炭であり、残りの多くは消費される結果として石炭灰を発生する。石炭灰を発生させている産業のうち、電気事業はその約8割を占めている。石炭灰発生の現状と将来予測を図-1¹⁾に示しているが今後かなりの伸びが予測されている。

石炭灰は、その発生箇所からクリンカーアッシュとフライアッシュに大きく分けられるが、クリンカーアッシュは発生割合で約十数%程度であり、大半はフライアッシュが占めている。これらの灰の基本的特性を表-1²⁾に示す。一般に、粒度等から見るとクリンカーアッシュは砂に相当し、フライアッシュは粘土に相当する。

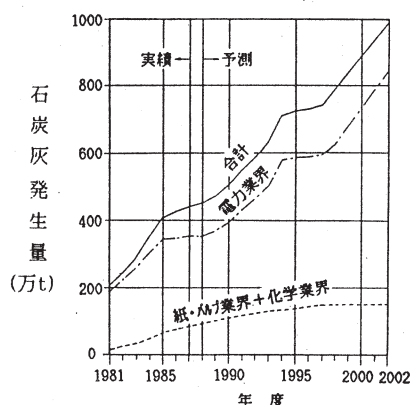


図-1 電気事業における石炭灰発生量の予測

表-1 石炭灰の材料特性 (概要)

化学的 特性	1. 化学組成	・山土に近い物質である。
	主な化学成分	国内炭灰 外国炭灰 粘土 (日本)
物理的 特性	2. 反応性	・ボゾラン活性がある。 Ca分の多い灰：自硬する。 Ca分の少ない灰：安定材数%添加で自硬する。 ・有害な産業廃棄物の判定に係わる溶出試験 (環境庁告示13号) に合格する。
	3. 有害物質の溶出性	
物理的 特性	1. 形状 2. 形態 3. 比重	・球形粒子、不定形粒子、多孔質不定形粒子の混合 ・結晶質を含むガラス状物質 ・普通の土砂より軽い 真比重 1.9 ~ 2.3 嵩比重 0.8 ~ 1.0
	4. 粒度	フライアッシュ クリンカーアッシュ 数ミクロン〜数10ミクロンで、シルト〜粘土に相当する。 平均径数ミリで砂に相当する。
物理的 特性	5. 粘着性 6. 熱伝導性	・粘着性がなく、砂質土に近い。 ・普通の土砂より断熱性が高い。

電力業界においては、これらの石炭灰をできるだけ有効利用するように努力しており、昭和61年度実績によれば年間発生量の4割以上を有効利用し、残りは埋立てにより処理している。昭和61年度の主な有効利用先を表-2¹⁾に示す。有効利用先としては、その特性からセメント原料として使われているものが多く、その他では土木分野等での埋戻し材あるいはコンクリートの2次製品などがある。

さらに、平成3年10月25日に「再生資源の利用の促進に関する法律」が施行され、電気事業者については当面石炭灰が指定されていることから、今後の有効利用の必要性がますます高まっている。

表-2 石炭灰の有効利用の現状

利用内容		主な用途	リサイクル	リサイクル	計
有効利用 分野 数量	コンクリート野ト	セメント原料	11	92	103
	土木分野	道路材	6	2	8
		埋戻し材等	4	44	48
		コンクリート製品	2	4	6
		小計	12	50	62
	肥料	ケイ酸カリ肥料 土壌改良材	0	4	4
	その他	融雪散布材	3	4	7
	計		26	150	176
	廃棄数量		海面埋立 陸上埋立	25	180
年間発生量合計		51	330	381	

(1986年度 (昭和61年度) 実績、単位: 万t)

2. 石炭灰の道路路盤材への使用について

石炭灰の道路材料としての有効利用については、海外では大量に利用されている例が報告されているが、我国においては表-2にも示したように全体からみればごくわずかである。しかし、昭和63年11月に「アスファルト舗装要綱」(日本道路協会)が改訂され、フライアッシュがフィラー材として、クリンカーアッシュが下層路盤材、凍上抑制層材、遮断層材として利用できるようになり、今後、この方面での利用増大が図られていくであろう。これまでも、石炭灰の道路材としての利用については電力各社等により試験研究が実施され、いくつかの施工事例が報告されている。例えば、クリンカーアッシュについては上下層路盤及び路床材に使用した市・私道の例

* 関西電力株式会社 建設部土木課長 (〒530-70 大阪市北区中之島3丁目3-22), ** 総合技術研究所構築研究室主幹, *** 建設部土木課

がある。また、セメント安定処理をしたフライアッシュの上下層路盤あるいは路床材に使用した市・私道構築の例もあり、これらについては今後はますます期待がもてる状況にある。しかし、これらは主に北海道、東北あるいは中国、九州地方の事例であり、関西においては道路材への有効利用の観点から見れば、立ち遅れた状況にある。当社においても、利用拡大を目的としてセメント安定処理を施したフライアッシュを道路路盤材に適用する研究を実施している。今回は、その中でセメント安定処理を施したフライアッシュを下層路盤に適用した試験の状況について報告する。

本試験は、火力発電所の新設工事に伴い、その構内道路の一部を使って行った。試験規模(平面図)は図-2に示すとおりである。試験は、①事前調査試験、②舗装構造設計、③施工、④追跡調査の順で行った。試験施工の全体フローを図-3に示す。

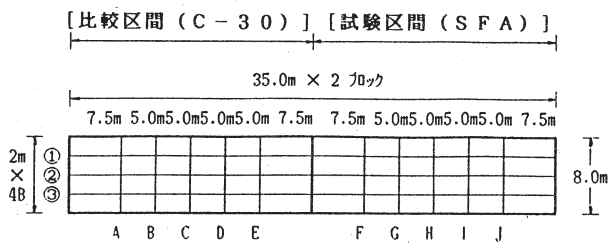


図-2 試験舗装規模(平面図)

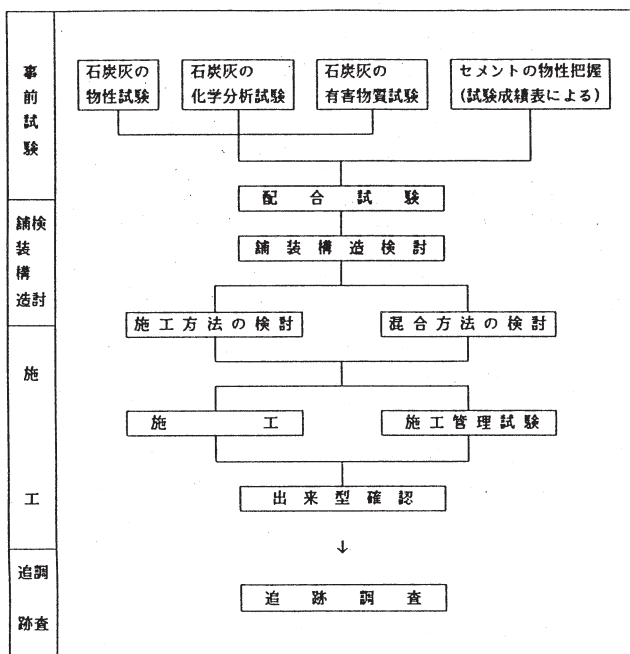


図-3 試験施工フロー

2.1 事前調査試験

(1) 材料試験

今回の試験には、国内炭を燃料とした火力発電所で発生したフライアッシュを用いて行った。このフライアッシュについて事前に行った物理試験及び化学分析試験結果を表-3、表-4に、粒度分布結果を図-4に示す。

これらの結果から、今回のフライアッシュの特性として①比重が一般の土砂やポルトランドセメント等に比べて小さい。②総体的に細かい粒度構成で、特に5 μ m以下(粘土分)の微粉を多く含んでいることがわかる。また、化学分析試験結果から主成分はSiO₂及びAl₂O₃であり、両者で全体の約80%を占めている。一般的にもフライアッシュの比重は炭種や燃焼方法により異なるものの、2.0~2.3程度で、細粒分(74 μ m以下)が50~95%と大部分を占める集中粒度の材料であり、国内炭ではSiO₂は50~55%、Al₂O₃は25~30%と言われており、当該フライアッシュについてもやや細粒分が多いものの一般的な性質と大差ないことがわかる。

表-3 フライアッシュの物理性状試験結果

試験項目	比重	粉末度 (比表面積) (cm ² /g)	自然 含水比 (%)	コンシステンシー		
				液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数 (%)
測定値	2.25	3,290	0.14	NP	22.6	NP

表-4 フライアッシュの化学分析結果

(単位: %)

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	lg. Loss
測定値	53.3	27.2	5.6	6.7	1.6	1.8	2.1	1.1	0.0	1.8

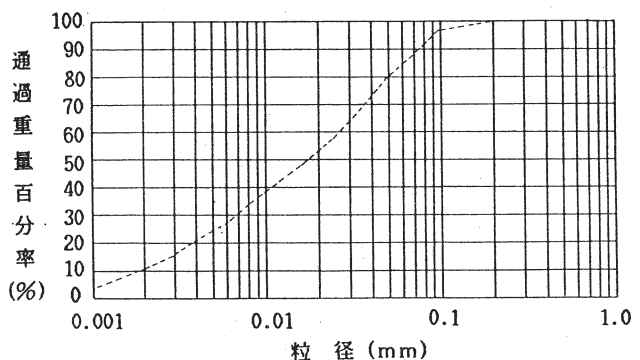


図-4 フライアッシュの粒度分布

次に、環境への影響を調べるために有害物質含有量試験及び有害物質溶出試験を実施したが、いずれの値も基準を十分満足する結果であった。

比較試験のために使用するクラッシュランと上層路盤に用いる粒調碎石は兵庫県家島郡西島産のものであり、アスファルト混合物とともに「アスファルト舗装要綱」の規格値を十分満足するものであった。

(2) 配合試験

今回の試験ではフライアッシュそのものにセメントを添加して安定処理することから、事前に配合試験を行い最適セメント量の決定を行った。セメント添加量を決定するための一軸圧縮強度の基準は「アスファルト舗装要綱」より10kgf/cm²(7日養生時)とし、この強度に対応するセメント量を過去の文献等より10%程度と予想し、6~14%で試験を行った。結果を図-5に示す。これより基準強度に対応するセメント量は5.5%程度となったが、混合時の材料ロス等を考慮して6.0%と設定した。このときの特性値は表-5に示すとおりである。

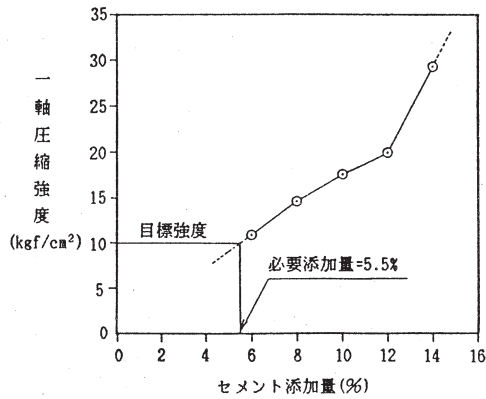


図-5 セメント添加量と一軸圧縮強度

表-5 最適セメント添加量(6%)に対する特性値

セメント添加量 (%)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)
6.0	10.9	17.7	1.484

2.2 舗装構造設計

舗装構造の設計は、「アスファルト舗装要綱」に定められた一般的な手順に従って設計した。

交通量については、構内道路としての設計値であるB交通とし、設計CBRは8%を採用した。その結果、試験区間、比較区間の各層厚は図-6に示す値と決定した。

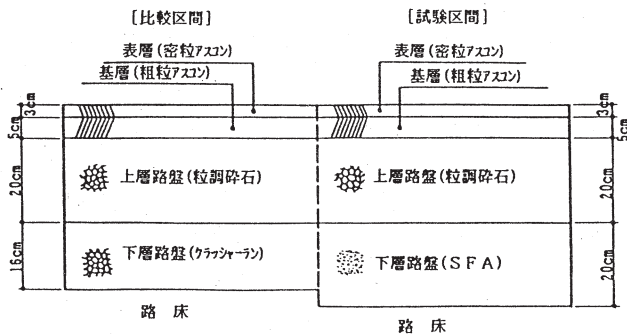


図-6 試験舗装の断面図

2.3 施工

現場の施工は、平成元年11月末から約1カ月かけて行われた。セメント安定処理フライアッシュ（以下SFAと記す）の製造方法としてはプラント混合方式と現場でのロードスタビライザ混合方式の2種類が考えられるが、今回はフライアッシュを乾灰の状態で搬出したこともあり、混合精度・粉塵に対する配慮からプラント混合方式を採用し、試験施工ということで路盤の安定処理に使用されているソイルミキサーを一部改造して使用した。

試験区間における下層路盤の施工状況は次のとおり行った。ダンプトラックで搬入されたSFAは、小型ブルドーザで所定の厚さとなるように敷きならした。敷きならし後の締固め作業には、大型タイヤローラのみにより実施した。締固め後、表面の保護及び急激な乾燥を防止する目的でアスファルト乳剤を0.6ℓ/m²の割合で全面に塗布し、7日間の養生期間を経たのち、上層路盤の施工にあたった。

施工時、現場では、含水比の管理試験及び一軸圧縮強度試験のための供試体の作成並びに現場密度試験、平板載荷試験を行ったほか、プラントでは、粒度管理試験のための試料採取並びに含水試験を実施した。また、施工1週間後に再び平板載荷試験を行った。これら試験結果のうち、主なものを表-6に示す。

表-6-1 現場密度試験結果

測定箇所	G-2	I-2	平均値
含水比	15.58%	16.81%	16.20%
測定密度	1.425 g/cm ³	1.417 g/cm ³	1.421 g/cm ³
基準密度	1.484 g/cm ³		1.484 g/cm ³
締め固め度	96.0%	95.5%	95.8%

表-6-2 平板載荷試験管理結果

測定箇所	G-2	I-2	平均値
施工直後	19.2 kg/cm ²	11.4 kg/cm ²	15.3 kg/cm ²
一週間後	23.0 kg/cm ²	31.8 kg/cm ²	27.4 kg/cm ²

表-6-3 一軸圧縮強度試験管理結果

	材令7日			材令28日			備考
	供試体 乾燥密度 (g/cm ³)	供試体 含水率 (%)	一軸 圧縮強度 (kg/cm ²)	供試体 乾燥密度 (g/cm ³)	供試体 含水率 (%)	一軸 圧縮強度 (kg/cm ²)	
平均	1.483	7.5	13.3	1.484	7.7	19.7	N=12

2.4 追跡調査結果

(1) 追跡調査の概要

石炭灰の下層路盤への適用性の長期安定性確認のため、試験施工を行った区間において追跡調査を実施した。これは、供用後の車両通過台数と路面性状の変化を測定することにより行っている。交通量の測定には、ゴムホース式のポータブルタイプの測定器を現地に据付け、平成3年9月までの21カ月間車両通過台数を毎日計測、記録した。また、路面性状の調査としては、目視、ひびわれ、わだち掘れ、平坦性、たわみの5項目について舗装試験法便覧に基づく測定方法に従い測定している。表-7にその数量を示す。

表-7 調査項目一覧表

調査項目	数 量
目 視	全 工 区
ひびわれ	各工区全面
わだち掘れ (横断凹凸量)	5測線/工区
平 坦 性 (縦断凹凸量)	2測線/工区
た わ み	10点/工区

(2) 追跡調査結果についての考察

1年3カ月経った時点での計測結果を表-8に示す。交通量としては、平均約260台/日・方向の車両通過があり、特異な車両通過はなかった。

表-8 追跡調査結果

(単位: mm)

項目	位置	試験区間 (SFA)	比較区間 (クラッシャー)	備考
縦断 凹凸量測定 (平坦性) [標準偏差]	左車線	I.W.P 1.37 (1.29)	1.27 (0.78)	レーザー式 プロフィルメーター 使用
		O.W.P 1.70 (1.84)	0.98 (0.58)	
	右車線	I.W.P 1.14 (0.73)	0.96 (0.75)	
		O.W.P 0.95 (1.04)	0.96 (0.83)	
横断 凹凸量測定 (わだち堀れ) [最大凹凸量]	左車線	5.6	4.2	プロフィルメーター 使用
	右車線	3.0	4.0	
たわみ量測定 [最大たわみ量]	左車線	0.28	0.60	ベンケルマンビーム 使用
	右車線	0.26	0.54	
ひびわれ量測定 [%]	左車線	0	0	目視観察
	右車線	0	0	

※ () 内は初期値

目視観察の結果では、試験区間、比較区間ともに、目立った損傷もなく差異は特に認められていない。ひびわれについても、確認されていない。縦断の凹凸量について見ると、試験区間では比較区間よりも値がやや大きくなっているものの、それは施工後の初期値においても同様な傾向であり、また、「アスファルト舗装要綱」にある目標値としての2.4mm以内であり特に問題はない。横断方向の凹凸量測定結果を見ると、両車線、両区間とも大差なく特徴的な傾向は判断できなかった。最大たわみ量については、試験区間の方が比較区間よりも小さく、約半分程度となっている。ただし最大でも0.6mmであり、今後の観測結果も含めて議論する必要がある。いずれの結果も、SFAの使用に起因すると思われる不具合は全く発生しておらず、下層路盤への適用は問題ない結果となっている。

今回の試験施工では、材料に係わる基本的な試験及び出来形、追跡調査についての一般的な計測を行っているが、SFAの下層路盤材料としての適用性については、日本フライアッシュ協会でも詳細な計測を入れた試験を行っている³⁾。報告によると、この試験はSFAの路盤機能としての性能評価を目的としたもので、30cmの載荷板に2.5t±2.5tの荷重を載荷周波数5Hzで100万回の繰返し載荷を行っている。対象とした舗装構造は、SFA及びセメント安定処理山砂並びにクラッシャーを下層路盤材料とした3種類である。性能評価の1つの指標として、路床に対する路盤の支持力係数の比を路盤効果として見ると、路床と下層路盤上の平板載荷試験の結果、SFA

は通常のセメント安定処理と同等以上の路盤効果を示し、クラッシャーよりも大きい値を示している(図-7参照)。別の指標として、荷重の分散効果を下層路盤の上下面に設置した土圧計の測定結果から検討しているが、SFAの荷重分散効果はクラッシャーよりもかなり大きくセメント安定処理山砂と同程度の効果を示しており、100万回の載荷結果でも荷重分散効果はいずれの場合でもほとんど変化せず、路盤としての耐久性は十分確認されている。また、舗装の支持力、下層路盤層としての材料強度(変形係数)の相対比較を行うためにF.W.D(フォリングウェイトフルクトメータ)によるたわみ測定を行っている。結果を図-8に示す。これより、SFAよりなる舗装の支持力はセメント安定山砂よりなる舗装と同程度であり、クラッシャーより大きいことがわかる。ただし、これら試験の結果は舗装が破損状態を呈するまで載荷されたものではないことから、こうした状況を表すような長期の耐久性、さらにはフライアッシュの強度の長期発現性(遅効性)の点などの検討課題が残されていると報告している。

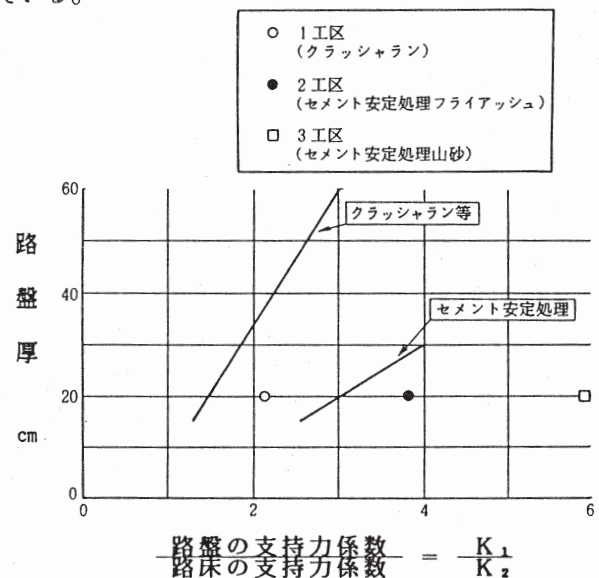


図-7 路盤効果の相対比較

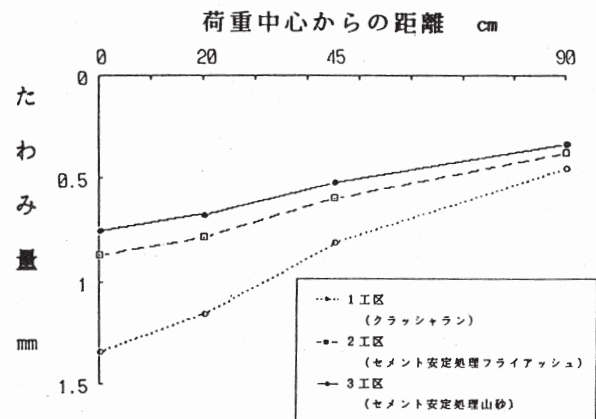


図-8 たわみ形状(100万回載荷後)

3. 今後の課題

今回、一例として当社で行ったSFAの下層路盤への適用例などについて述べてきたが、施工性を含めた今後の課題としては一般的に言われているものも含めて、

① SFAの遅効性を考慮した、規定強度を下げた設計方法の確立とデータの蓄積

② 粉体混合物を取扱う施工性

③ フライアッシュの屋外貯蔵管理

④ セメントとの混合方法

⑤ 十分な締固め度の確保

⑥ フライアッシュの体積膨張による舗装への影響

⑦ 材料の安定供給と流通機構の整備

等がある。

4. おわりに

今回の試験では、SFAを使用した下層路盤と一般の工法とを各種試験によって比較した結果、両者に大差がないことがわかった。しかし、品質の規格化、混合方法、締固め方法、長期安定性の評価等残された課題も多い。今回ののは、粉体混合物としての利用のアプローチであるが、それ以外のアプローチとして骨材化の事例もあり⁴⁾、今後の利用拡大もますます期待できる。当社でも、上記課題に加え様々な有効利用の可能性を目指して、フライアッシュやクリンカーアッシュを下層路盤のみならず上層路盤等への利用についても計画しており、またクリンカーアッシュの保水性および透水性の改善、保肥力の改善、酸性土壌の中和という点に期待した土壌改良材への適用についても研究していく予定であり、できるだけ多くの実証データを積み上げていくとともに、機会があれば逐次紹介していきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望，pp.31，pp.53，(1990)
- 2) 環境技術協会他：石炭灰ハンドブック，pp. II-13 (1990)
- 3) 日本フライアッシュ協会他：石炭灰を道路舗装用材料として利用するための調査研究報告書，pp.148～pp.177 (1989)
- 4) 資源・素材学会他：建設用原材料，Vol.1，No.1，pp.2～9 (1991)