

流動層石炭燃焼灰の路盤材への有効利用

Utilization of Coal Ash from Fluidized-Bed Combustion Boilers as Road Base Material

堤 香津雄*

Kazuo Tsutsumi

1. はじめに

日本における石炭の利用は、一次エネルギーの一つの柱として位置付けられており、着実に使用量が増加しています。これに従って、排出される燃焼ガス、石炭灰の量も増加し、石炭灰については、2000年には年間1000万トンを越えるものと予想されています¹⁾。

石炭の利用に必要な条件として、高いエネルギー変換効率の他に、ゼロエミッションがあります。これはNO_x、SO_xなど公害物質の排出量低減と共に、残渣、灰などの固体廃棄物を無害化して、さらに有効利用することにより、廃棄物をなくすというものです。微粉炭燃焼灰の有効利用については、早くから着手され、セメント原料、特殊肥料などに使用されてきていますが流動層燃焼灰は、未反応の脱硫剤(生石灰:CaO、石灰石:CaCO₃)や使用済み脱硫剤(石膏:CaSO₄)を含んでいるため、従来の微粉炭燃焼灰と同じようには利用できませんでした。

川崎重工(株)では1981年に、電源開発(株)、バブコック日立(株)と共に、石炭焚き流動層ボイラの開発で、20T/Hパイロットプラント試験を開始しましたが、同時に流動層ボイラから排出される石炭灰処理の研究も開始し、水和固化することによって重金属が溶出しなくなり、埋め立てに使用できることを確認しました。

その後、固化体の有効利用に着目し、1984年度より日本鋪道(株)と、流動層ボイラ石炭燃焼灰の路盤材への有効利用に関する共同研究を行い、1985年12月に川崎重工(株)八千代工場内で実際に道路を施工し、10年以上にわたって調査したところ、流動層ボイラ石炭燃焼灰の固化体は、天然碎石に比べて、強固な路盤材となることを確認しました。

そこで、流動層ボイラのユーザーである鳴門塩業(株)

が中心となって、(財)石炭利用総合センターの指導の下、通産省資源エネルギー庁の石炭利用技術振興補助事業として、実用化の為の製造技術、施工技術の研究、開発を4者で行い、1993年に蒸気量75t/hの流動層ボイラから排出される燃焼灰を全量路盤材にする試験装置を完成させ試験運転に入りました。この試験によって、路盤材製造条件の最適化、安定した製品の製造技術、路盤材評価、施工方法、高品質化などの試験研究を重ねた結果、現在、排出される灰のほぼ全量(1994年度から今日までの3年間で95%)路盤材として利用することができるようになり、また、性能も良好であることから、路盤材として利用することができる見通しとなりました。

これまでの試験結果の中で、路盤材製造技術と、路盤材性能について報告します。

2. 路盤材製造技術

2.1 目標

路盤材製造技術の研究、開発目標は、

- (1) 路盤材として十分な性能を持った固化体をつくること。
- (2) 廃棄物のリサイクル条件としての溶出試験に於いて、土壤環境基準を満足すること。
- (3) 材料物性と重金属安定性が何年にもわたって持続すること。
- (4) 材料物性と重金属安定性がバラつかず、常に一定値で再現性良く製造できること。
- (5) 掃除、メンテナンスなどの作業を減らし、製造コストを下げること。
- (6) 設備を簡略化、高効率化し、設備費を下げること。

2.2 固化原理と重金属の安定化原理

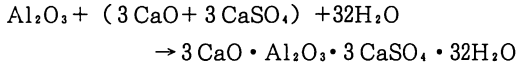
石炭の流動層燃焼灰は活性度が高く²⁾、水で混練すると固化し、特に60℃程度の雰囲気中で水蒸気養生をすると高強度の固化体になります。これは次のような反

* 川崎重工(株)明石技術研究所粉体技術研究部主査
〒673 兵庫県明石市川崎町1-1

表1 常圧流動層石炭燃焼灰の化学組成例 単位 [%]

灰 分				脱 硫 剤			未燃炭素
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	その他	CaO	CaCO ₃	CaSO ₄	
36.6	22.7	2.7	5.2	13.0	7.2	1.3	11.5

応によるエトリンガイトが生成され、主強度要素となるものと考えます³⁾。



一方、この固化体は、Pb, Cd, Crなどの重金属と化学的に結合して安定化し、雨水などに溶出しにくい性質を持っています。

表1に鳴門塩業(株)の常圧流動層ボイラの灰の化学組成を示します。この灰は、ボイラ各所から排出された灰を排出割合で混合したものです。

2.3 路盤材製造実証試験装置の概要

図-1に路盤材製造装置の実証試験装置のフローシートを示します。灰は流動層から直接抜き出されるBM灰(粒径が数百マイクロメートルの灰: Bed Material)と、流動層から飛び出して、後段で捕集されたF A灰(主にボイラ出口マルチサイクロンで捕集された粒径が数十マイクロメートルの灰)の二種類あり、これを排出割合で同時に切り出して、排出量と混合割合の均一化を図っています。調合した灰は真空空気搬送によって原料ビンに投入し、計量器で一定量計測して混練機に入れ、水分割合が、自立成形にも固化にも適当な量に調整します。混練した灰は、加圧振動式の成形機で、

300mm×280mm×100mmの直方体にして養生室に入れます。養生室では、初めに常温にて6時間程度養生し、次に60℃の蒸気によって12時間蒸気養生します。

最後に、一次破砕機、二次破砕機によって、必要とする粒度分布に調整して、長期養生試験場に貯蔵して一部はその後の性状変化を測定し、残りの大部分は実際の道路、駐車場などの建設に使用し、材料評価を行います。

2.4 試験結果

試験結果の概要を報告します。

(1) 材料物性について

粒度調整固化体の路盤材としての規格項目の結果とアスファルト舗装要綱規格を表2に示します。

本路盤材はM-30相当品を目標として粒度分布を調整したものです。本路盤材の圧縮強度は100kg/cm²ですが、修正CBR値やすりへり減量など路盤材としての材料強度を十分満足しています。一方、本路盤材は天然採石に比べて吸水率が大きく、また、嵩比重が小さいことも特徴です。物質がポーラスであることから吸水率が大きいですが、締め固めによる密度曲線は天然材料に比べて緩い凸型で、含水率の変化に対しての密度変化が少なく施工時の含水比が締め固め密度に及ぼ

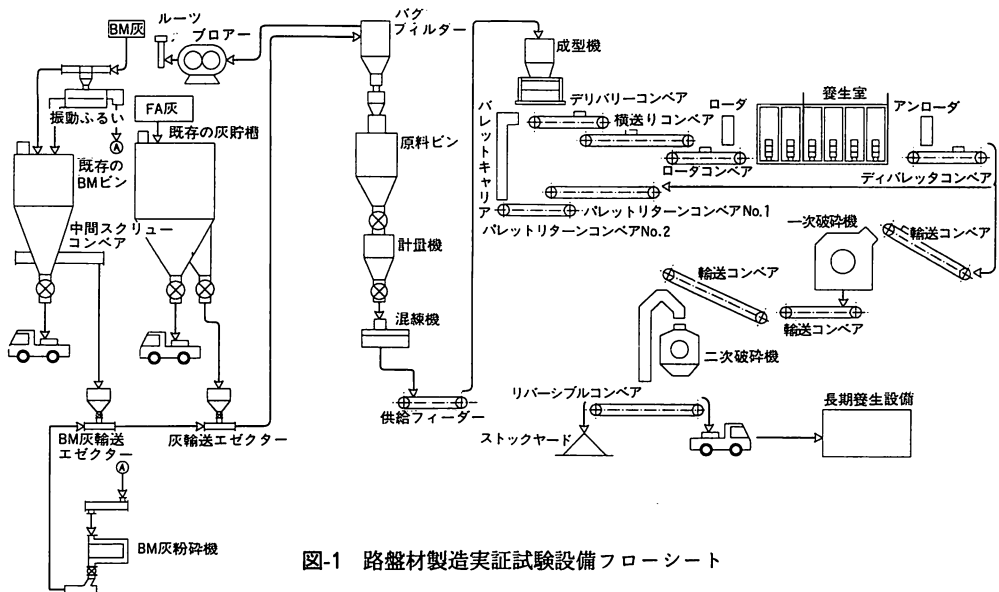


図-1 路盤材製造実証試験設備フローシート

表2 路盤材の性状値例

項 目		本路盤材	アスファルト舗装 要 綱 等
粒 度 通過質量百分率 [%]	40	100	100
	30	99	95 ~ 100
	20	82	60 ~ 90
	5	49	30 ~ 65
	2.5	38	20 ~ 50
	0.4	12	10 ~ 30
	0.075	5	2 ~ 10
修正 C B R	[%]	135	80 以上
塑性指数		N. P	4 以下
すりへり減量	[%]	28.8	[50 以下]
表 乾 比 重	[%]	1.66	(2.621)
最適含水比	[%]	46.6	(6.6)
最大乾燥密度	[g/cm ³]	1.100	(2.240)

注) 右欄の粒度はM-30, ()内は一例を, []内は目標値を示す。

表3 固化体の溶出試験結果

	含 有 量 [mg/kg]	室内試験溶出量 [mg/l]	屋外試験溶出量 [mg/l]	土壌環境基準値 [mg/l]
カドニウム	0.14	0.005 未満	0.005 未満	0.01 以下
全シアン	0.3	ND (0.03)	ND	ND
有機磷	0.1 未満	ND	ND	ND
鉛	20	0.005 (0.03)	0.005 未満	0.01 以下
六価クロム	50	0.05 未満(0.09)	0.05 未満	0.05 以下
砒素	3.8	0.005 未満	0.005 未満	0.01 以下
総水銀	0.55 未満	0.0005 未満	0.0005 未満	0.0005 以下
アルキル水銀	0.01 未満	ND	ND	ND
PCB	0.01 未満	ND	ND	ND
ジクロロメタン	1	0.002 未満	0.002 未満	0.02 以下
四塩化炭素	0.1 未満	0.0002 未満	0.0002 未満	0.002 以下
1,2-ジクロロエタン	5 未満	0.0004 未満	0.0004 未満	0.004 以下
1,1-ジクロロエチレン	5 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.02 以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	5 未満	0.004 未満	0.004 未満	0.04 以下
1,1,1-トリクロロエタン	0.1 未満	0.01 未満	0.01 未満	1 以下
1,1,2-トリクロロエタン	1 未満	0.0006 未満	0.0006 未満	0.006 以下
トリクロロエチレン	0.1 未満	0.003 未満	0.003 未満	0.03 以下
テトラクロロエチレン	1 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.01 以下
1,3-ジクロロプロペン	0.5 未満	0.0002 未満	0.0002 未満	0.002 以下
チウラム	0.01 未満	0.0002 未満	0.002 未満	0.006 以下
シマジン	0.01 未満	0.0003 未満	0.003 未満	0.003 以下
チオベンカルブ	0.01 未満	0.002 未満	0.002 未満	0.002 以下
ベンゼン	50 未満	0.001 未満	0.001 未満	0.001 以下
セレン	3.4 未満	0.005 未満	0.005 未満	0.01 以下

す影響は少ないと言えます。

(2) 重金属安定性について

廃棄物のリサイクル条件として溶出試験に於いて、土壌環境基準を満足することが必要です。溶出試験は、基準となる室内試験方法（平成3年環境庁告示46号に

よる）と、実際に運用する際の屋外貯蔵を想定して、2.5m四方、高さ1mでつみつけて、降り注いだ雨水を1ヶ月間にわたって回収し、2リットルを採取して昭和46年環境庁告示59号の「水質汚濁に係る環境基準について」によって測定しました。含有量と基準値と

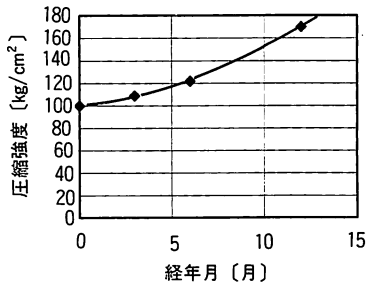


図-2 圧縮強度の経年変化

表 4 固化体安定性の経年変化

分類	項目	製造直後	経過月			
			3ヶ月	6ヶ月	12ヶ月	
含有量 [mg/kg]	T-Hg	0.53	0.53	0.55	0.52	
	Pb	<30	<30	<30	<30	
	Cd	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	
	Cr	160	158	155	157	
	As	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	
	Se	<2.0	<2.0	<2.0	<2.0	
溶出量 [mg/l]	pH	12.1	12.0	11.8	11.4	
	導電率	1320 μ S/cm	1210 μ S/cm	990 μ S/cm	280 μ S/cm	
	T-Hg	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
	Pb	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
	Cd	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
	Cr	-	-	-	-	
	Cr ⁶⁺	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
	As	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
	Se	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	

共に表3に測定結果を示します。

室内溶出試験では、固化に使った灰の溶出試験も行った結果、全シアン、鉛、六価クロムは土壤環境基準を越えました。(表3の()に値を示しました。)固化することによってこれらの溶出量を抑えることができ、土壤環境基準を満足することができました。また、室内試験に対して常に弱酸性の雨が降り注ぐ屋外試験においても、溶出量は少ないことから、路盤材として使用した場合の有害物質溶出量は少ないと考えます。

有害重金属の溶出が少なくなる理由を示します。

- ① エトリンガイト中にCrO₃(Cr⁶⁺)やPbO が取り込まれ、化学結合し、固定化される。
- ② 原料灰を水和固化させることにより、生石灰のアルカリはエトリンガイト等の難溶性化合物となり、溶出液のpHが低下し、Pbは水酸化物として安定化される。

(3) 経年安定化

粒状の固化体は、路盤材として利用するまでは、一

定期間ストックヤードに貯蔵します。さらに路盤材としての供用は、施工後、15年程度に及ぶと考えられます。そこで貯蔵方法の適正化、および路盤材として供用しても劣化がないかどうかを調べるために屋外密閉下(常時湿潤)に固化体を1年間置き、強度、安定性などに関する実験を行いました。図-2に圧縮強度の変化を、表4に安定性の変化を示します。

圧縮強度は時間が経過すると大きくなっています。これは、飽和下で水和反応が進行し、エトリンガイト反応が進行したためと考えられます。従って、屋外では散水によって常に湿潤状態を保つことが有効であり、路盤材として供用された後は、月日と共に強度が増すものと判断されます。

安定性の経時変化試験では、有害重金属の含有量の変化がなく、かつ溶出量も検出限界以下となっており重金属の安定性は良好であると考えられます。この結果は、屋外密閉下では常に湿潤雰囲気下にあるため、有害重金属を固定しているエトリンガイト等の水和物が安定しているためと考えられます。

以上の強度、安定性の経時変化試験結果より、固化体の貯蔵、及び利用に際して、常に湿潤状態を保持すれば、長期的に安定であることを確認しました。川崎重工(株)八千代工場内の試験道路では、施工後10年で、圧縮強度は150kg/cm²から215kg/cm²へと向上し、また、CO₂とSiO₂の比から判断した炭酸ガスによるエトリンガイトの分解はほとんど進行していないことがわかりました。

(4) 固化体製造における品質管理

材料物性と重金属安定性がバラつかず、常に一定値で安定して製造できることを確認するため圧縮強度と粒度分布測定、溶出試験を行いました。

圧縮強度は路盤材強度と関係あるとして、70kg/cm²を管理値としていますが、平均値は102.4kg/cm²標準偏差14.9kg/cm²で、安定して圧縮強度を出しています。

粒度分布については、14回の測定で一度37.5mm通過質量割合が93.7%となり、95%に達しませんでした。これは用途がM-30ではなく、粒度分布の基準が緩かったため、一次破砕機のみでの粒度調整をおこなったことによります。二次破砕機、振動篩を併用すれば、粒度調整は基準値内に収まるものと考えます。

溶出量は、1年間で14回測定しましたが、すべて土壤環境基準に合格しています。

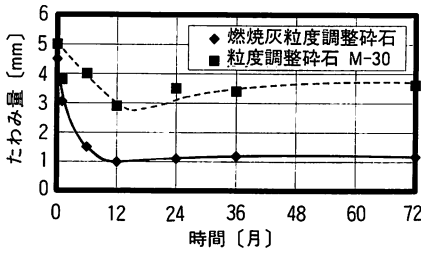


図-3 たわみ量の経年変化

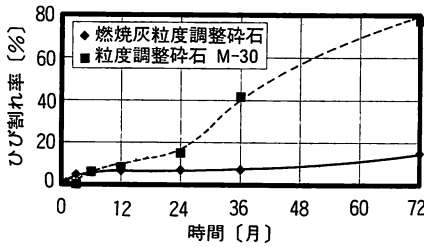


図-4 ひび割れ率の経年変化

3. 路盤材性能

3.1 目的

試験舗装を行い、経時変化を追跡調査して、供用性、耐久性を確認します。

3.2 試験方法

幅7.5m、長さ56mの道路を二つに分けて、第一工区の25m区間には燃焼灰を固化して、調粒した路盤材を使用し、第二工区には天然の砕石を使用しました。道路の施工には二つの工区とも同じ方法、機械、作業員同じ粒度分布を採用して、比較できるようにしました。また、道路の断面構造は、日本国の基準よりも薄くし破損速度を速くして比較試験結果の短縮化を図りました。

3.3 調査結果

6年間にわたって調査した、たわみ量とひび割れ率をそれぞれ図-3、図-4に示します。たわみ量は、タイヤを介して荷重をかけ、垂直方向の路面の変化量を示しており¹⁾、どちらの道路も12ヶ月で安定していますが、たわみ量は燃焼灰粒度調整砕石からつくった道路の方が少なく、安定してから5年間(12~72月)は天然石の粒度調整砕石からつくった道路のたわみ量の1/3となっています。この結果は、石炭灰の水和固化

体は、路盤材としての支持力が、現在使われている天然砕石の路盤材よりも高いことを示しています。

ひび割れ率⁴⁾は、路面に生じたひび割れの度合いを示すもので、天然石の粒度調整砕石では、施工後単調に増加し、6年後には80%近くになり、この傾向はその後も続いて、12年後には、道路として使えなくなるまでに達したので、施工し直しました。これに対しまして、石炭燃焼灰を利用した路盤材ではひび割れ率は施工後数ヶ月は天然砕石よりも大きな値を示しましたが、半年で安定し、ひび割れの発生が止まりました。この道路は現在も使用されています。

以上の結果を基に、実用化試験として鳴門塩業(株)で製造しました、流動層石炭燃焼灰の水和固化体を路盤材として、県道、国道構内道路を施工して、追跡調査試験を行ないました結果、石炭の流動層燃焼灰から製造した固化体と、天然石の粒調砕石を路盤材として使用した場合、3年間の経年変化では、両者に差は認められませんでした。従いまして、本路盤材は粒調砕石に比べて材料的に劣ることはなく、また、水硬性を持っていることから、今後の変化は、粒調砕石に比べて、勝るものと予想されます。

4. まとめ

実用規模の路盤材製造試験装置で、石炭の流動層燃焼灰を水和固化して固化体を製造した場合、路盤材に必要な材料の力学的性質、および重金属などの安定性が全て満足する固化体が、再現性良くできることを実証しました。本固化体を路盤材として供用して建設した道路は、従来の粒調砕石と比べて材料として劣ることはなく、十分な性能があることを確認しました。

今後、実用化技術として石炭灰の有効利用を推進していくつもりです。

引用文献

- 1) 働石炭利用総合センター、平成6年度石炭灰安定供給調査報告書、1995. 3
- 2) 堤香津雄他、流動層石灰焼成炉の開発、化学工学論文集 Vol. 21, No. 1, 1995
- 3) 柴田泰典他、石炭灰を原料とした粒度調整砕石、舗装、Vol. 23, No. 8, 1988
- 4) 社団法人 日本道路協会 舗装試験法便覧1988. 11