

石炭灰を原料とする固化碎石の 土木資材としての利用

小笹 和夫¹・安田 登²・泉 秀俊³・柴田 泰典⁴

¹(財)石炭利用総合センター (〒106-0032 東京都港区六本木 6-2-31)

²工博 東京電力株式会社 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎 4 番 1 号)

³日本舗道株式会社 (〒331-0052 埼玉県大宮市三橋 6-70)

⁴工博 川崎重工業株式会社 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1 番 1 号)

石炭灰は現在約750万t/年排出され、約75%がセメント原料などに利用されているが、2010年には現在の約1.5倍の排出が予想されるため、セメント原料以外的大量利用技術の開発が望まれている。大量利用の用途として土木資材が注目され、石灰、セメントなどの添加で、常温にて安定化された石炭灰を路盤材や地盤改良材などに利用する研究が実施されているが、安定的な利用には至っていない。

本報では、粉末状の石炭灰に少量の石灰と石膏を加え、蒸気処理にて固化させ、破碎することにより製造した碎石状固化体の路盤材、地盤改良材としての品質について試験を行なった。その結果上層路路盤材あるいは地盤改良材として適用可能な品質を有することを明らかとした。

Key Word : coal ash, base road material, soil improvement material, solidified macadam

1. はじめに

石炭エネルギーは一次エネルギーの約16%を占め、2010年の需要量は、現在の約1.5倍になると予想されている。石炭は10~20%の灰分を含有するため、石炭灰排出量は、2010年には現在の約1.5倍相当に当たる1100万t/年に達すると考えられる。一方、石炭灰の最大の利用先は、セメント原料用であるが、セメント消費量の低迷により、将来の石炭灰の増大に対応できる用途として期待するのは難しい。したがって、新たな大量利用技術の開発、開拓が強く望まれている。石炭灰の大量利用として土木資材が注目され、現場対応型として石灰安定処理工法、セメント安定処理工法による路盤材としての利用^{1)~3)}、裏込材などとしての利用^{4),5)}などの研究が行われている。一方、オンサイト対応型として、分級後の細粉をセメント混和材などとして利用する研究⁶⁾、セメント添加による造粒体を常温養生後、路盤材として利用する研究⁷⁾などが実施されている。しかしながら、これらの研究は幅広い特性を有する石炭灰への適用、製品の貯蔵、安定的な大量利用、季節や地域による温度の変化などによる品質、安全性の確保などに課題を有している。

そこで、これらの課題を解決する方法として、石炭焚流動層ボイラからの燃焼灰において、す

でに実用化されている蒸気処理による固化体を破碎して碎石状固化体（以下、固化碎石と称する）とするオンサイト対応型技術^{8),9)}の発展的な展開を図り、微粉炭焚ボイラからの石炭灰に適用できる技術の開発を行った。

本報では、微粉炭焚ボイラからの石炭灰特性を踏まえ、固化碎石の蒸気処理による製造方法、路盤材、グラベルドレンなどの地盤改良材としての適用性評価試験結果について述べる。

2. 石炭灰特性

石炭灰を原料とした固化碎石の製造技術は、石炭灰のポズラン反応性を蒸気処理にて促進させ、固化・安定化された固化体を製造することを特徴としている。石炭灰のポズラン反応性は、塩基度(CaO/SiO_2 重量比)の影響を受けることをすでに明らかにしているが¹⁰⁾、さらに、 R_2O 量($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$)の影響を受けることを確認した。現在、発電用ボイラで数十種類の石炭が、主に混炭にて使用されているので、ボイラより排出される石炭灰は、数百種類となり、各々の性状が異なる。石炭灰を原料とした固化碎石の製造技術は、石炭灰性状の変化に追従できるものであることが必須である。そこで、数十ヶ所の発電所より入手した石炭灰について、塩基度と R_2O 量で整理したところ、図-1に示す結果を得た。これより、次のことが判明した。

- ①塩基度は0.00～0.20の範囲に分布する。
- ② R_2O 量は0.3～3.0%の範囲に分布する。
- ③塩基度と R_2O 量とは相関が認められる。

さらに、塩基度、 R_2O 量の異なる石炭灰について、電子顕微鏡 (SEM) 観察にて外観観察、粉末X線回折によるガラス化率 (全体量より結晶質成分量を差し引いた値) の測定、混練水量を定める指標となる塑性限界 (JIS A 1205 土の液性限界・塑性限界試験方法に準拠して測定) の測定を実施し、次のことが判明した。

- ①塩基度が大きく、 R_2O 量が小さいほど、球形粒子が多くなる。
- ②ガラス化率、塑性限界は、 R_2O 量よりも塩基度との相関が高い。

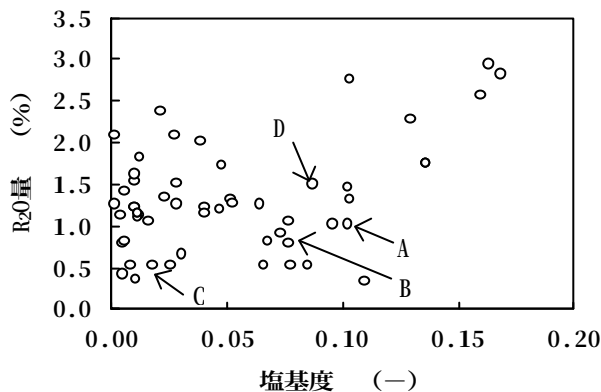


図-1 石炭灰における塩基度と R_2O 量の関係

3. 固化碎石製造方法の適正化

固化碎石の路盤材、クラベルドレン材、グラベルコンパクション材などとしての利用技術は、多種灰に対して固化体の品質 (比重、強度)・安全性 (有害物の溶出特性) を確保でき、経済的に製造でき、さらに貯蔵できることが重要となる。そこで多種灰に対応できる安価な添加材の検討、養生条件の検討を、現在、運転中のボイラより発生する代表的な図-1に示したA～Dの4種類の石炭灰、すなわち表-1に示した石炭灰を用いて行った。

表-1 試験に用いた石炭灰の性状

	組成 (%)						塩基度	R_2O	塑性限界
	強熱減量	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O			
A	2.52	52.8	26.5	5.42	0.58	0.67	0.10	1.02	30.7
B	2.07	55.3	28.3	4.25	0.43	0.55	0.08	0.79	26.3
C	1.53	61.1	27.5	1.09	0.30	0.34	0.02	0.52	24.7
D	1.63	52.7	27.6	4.61	1.00	0.75	0.09	1.49	27.1

固化体 ($\phi 50 \times 100H$) の製造は、JIS A 5308

附属書 3 (モルタルの圧縮強度による砂の試験方法) に準拠し、図-2で示す方法で行った。

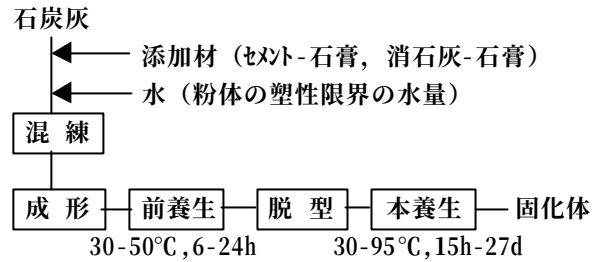


図-2 固化体の製造方法

(1) 添加材の検討

石炭灰のポゾラン反応性を生かし、より水和固化を促進するための安価な添加材として、セメント、石灰、石膏が用いられている。石膏は単独ではあまり効果がないが、セメント、石灰と併用して用いることでより効果が発揮できる。そこで、石炭灰A～Dを用い、普通ポルトランドセメント-石膏、石灰-石膏の組み合わせにて、同量の添加量、同一の養生条件、すなわちセメント10%、石膏8%の系と消石灰10%、石膏8%の系で、60°C、24hの養生条件で製造した固化体の圧縮強度より、添加材の検討を行った。

固化体の圧縮強度と石炭灰の塩基度の関係を図-3に示す。これより、次のことが判明した。

- ①石灰-石膏系はセメント-石膏系と比較し、石炭灰の塩基度が小さい場合には、高い強度を発現する。
- ②塩基度が小さい石炭灰では、石灰-石膏系とセメント-石膏系との強度差が大きくなる。これは、セメントのフリーCaOが、石灰と比較し、少ないことに起因すると考えられる。

また、固化体の圧縮強度について、石炭灰の塩基度/ $(R_2O \text{ 量})^3$ で整理すると図-4に示すような正の相関が認められた。すなわち、固化体の強度は、石炭灰の塩基度に比例し、 R_2O 量の3乗に反比例し、その比が大きい方が高い強度を発現すると考えられる。

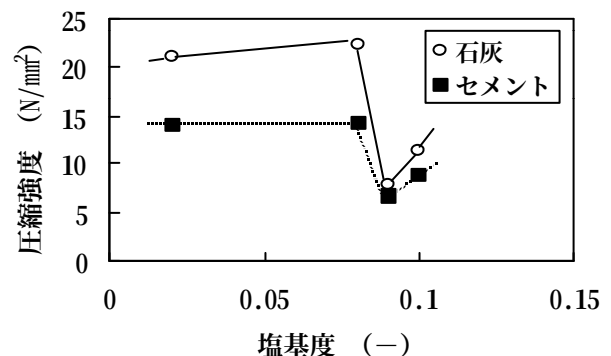


図-3 石炭灰の塩基度と固化体強度との関係

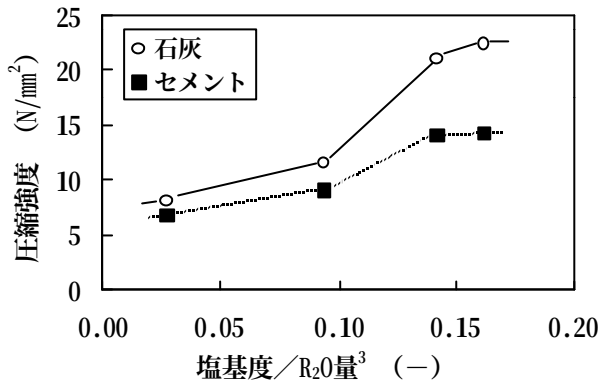


図-4 石炭灰の塩基度/ $(R_2O$ 量)³と固化体強度との関係

以上より、添加材としては、多種灰対応、高い強度発現性などより、石灰－石膏系が好適と判断される。

(2)養生条件の検討

4種類の石炭灰で塩基度/ $(R_2O$ 量)³比に差が認められる石炭灰BとCを用い、消石灰10%、石膏8%の添加で、30～95℃、15h～27dの養生で製造した固化体の圧縮強度と養生条件(温度、時間)の関係を図-5、図-6に示す。これより、次のことが判明した。

- ①30℃、27d 養生による固化体の圧縮強度は、60℃で36h、95℃で15hで発現し、養生温度が高くなるに伴い、短時間に強度が高くなる。
- ②石炭灰の塩基度/ $(R_2O$ 量)³比が小さい石炭灰Cの固化体は、石炭灰Bの固化体と比較し、低い養生温度での強度発現がよくない。これは、水和反応速度の促進に関係のある塩基度と水和反応の阻害に関係のある R_2O 量において、後者の方が温度による影響が大きいためと考えられる。

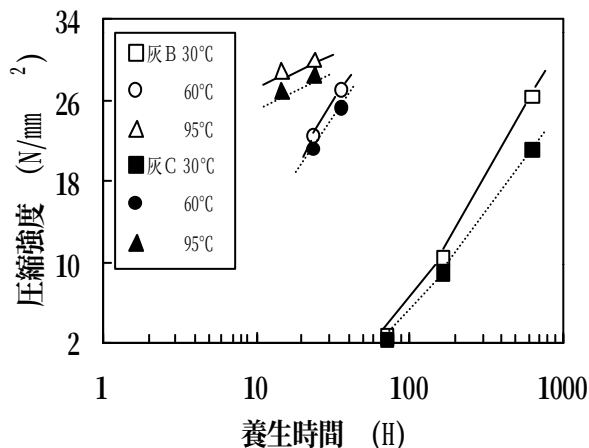


図-5 養生時間と固化体の圧縮強度の関係

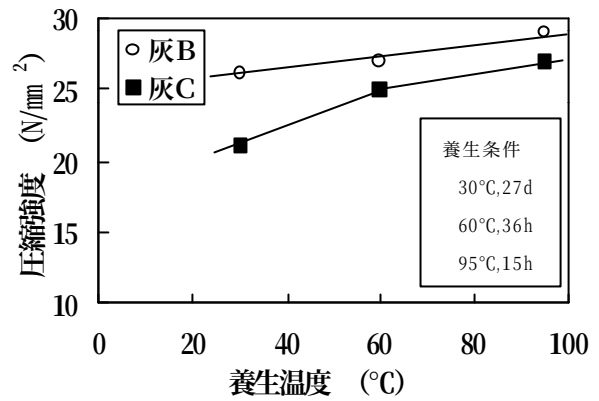


図-6 養生温度と固化体の圧縮強度の関係

以上より、養生温度として、多種灰への対応性、経済性などより、常温よりも高い温度、すなわち、60℃程度が適していると考えられる。なお、固化碎石は、固化体を破碎処理することにより製造される。破碎機として、クラッシャラン、あるいは粒度調整碎石の粒度を確保するため、衝撃式破碎機が好適と判断した。

4. 固化碎石の製造

固化碎石の土木資材としての評価を行うため、図-7に示すフローにて構成される3t/hの製造能力を有する設備にて、表-1に示すC相当の石炭灰を用い、添加材(消石灰、石膏)量と破碎条件を変化させて、強度と粒度の異なる固化碎石を製造した。

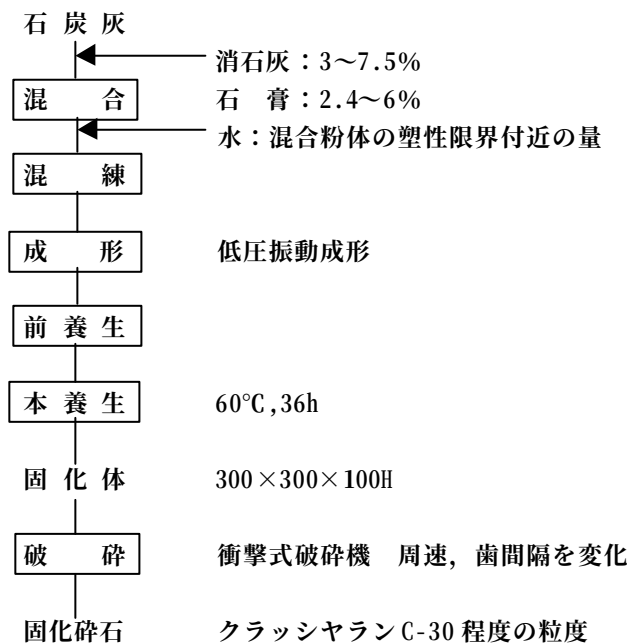


図-7 固化碎石の製造フロー

5. 固化碎石特性

(1) 物理・化学的特性

固化碎石は、図-8 に示すような平均粒径 $20\mu\text{m}$ 程度の球形粒子よりなる石炭灰に、石灰と石膏を添加し、水和反応にて、図-9 の固化碎石断面の SEM 写真に示すようにコンクリートと同様な水和物である針状晶のエトリンガイトと微細晶の C-S-H を生成させて製造する。外観は、図-10 に示すように、天然碎石状である。

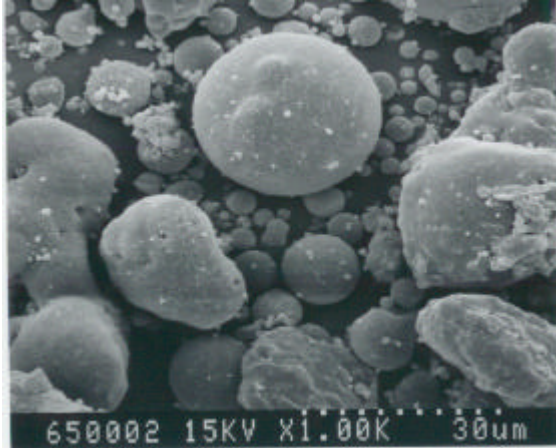


図-8 石炭灰の SEM 観察結果

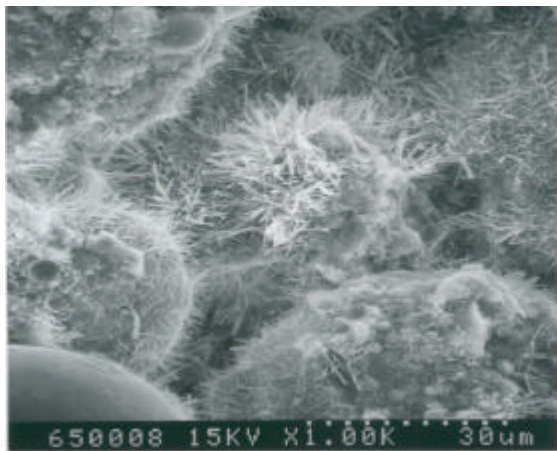


図-9 固化碎石断面の SEM 観察結果

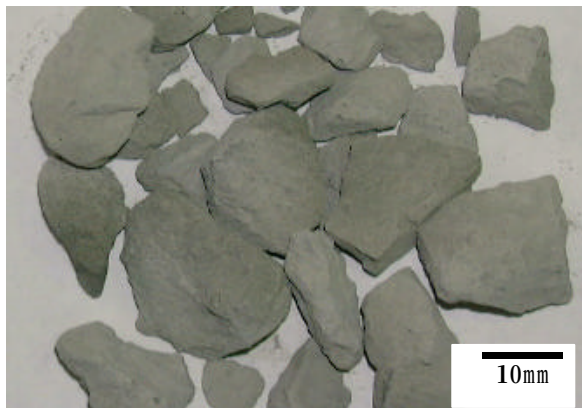


図10 固化碎石の外観

製造した固化碎石の物理・化学的特性を表-2 に示す。これより、次のことが判明した。

- ① 固化碎石の表乾比重は天然碎石の約 $2/3$ である。
- ② 固化碎石の圧壊強度は天然碎石の約 $1/10$ である。
- ③ 固化碎石の圧壊強度と粗粒率に相関が認められる。
- ④ 有害物溶出量は土壌環境基準を満足する。

以上より、固化碎石は、天然碎石と異なった特性を有した骨材と位置づけられる。

表-2 固化碎石の物理・化学的特性

		H	I	J	K	L	M	N	碎石
粒 度 分 布 (%)	37.5mm	100	100	100	100	98.9	98.7	98.7	98.9
	19.0	95.2	83.4	83.5	88.6	79.8	74.1	69.3	67.4
	9.5	75.4	61.7	61.1	56.6	52.1	44.8	40.5	50.3
	4.75	53.7	44.4	42.7	38.6	33.8	26.2	23.6	31.3
	2.36	35.4	32.3	30.2	25.8	22.3	15.7	14.4	18.9
	1.18	24.3	24.7	22.7	19.1	16.1	10.8	10.1	14.2
	0.60	16.5	19.2	17.6	14.6	12.1	7.6	7.7	7.3
	0.30	10.5	13.6	12.6	10.4	9.0	5.1	5.4	4.0
	0.15	7.5	10.0	9.7	7.4	5.9	3.3	3.8	3.6
粗粒率	(-)	4.82	5.11	5.20	5.39	5.71	6.14	6.27	6.03
表乾比重	(-)	1.72	1.61	1.64	1.53	1.53	1.60	1.56	2.68
圧壊強度	*(N)	120	268	260	197	198	256	323	2540
									—

* 木屋式硬質計を用いて測定した10mm 粒子が破壊する強度

** 環境庁告示46号の準拠

碎石はケラヤン C-40 のデータ

(2) 路盤材としての特性

表-2 に示した同一破砕機による固化碎石の路盤材としての評価結果を表-3、および圧壊強度とすりへり減量の関係を図-11 に、粗粒率と修正 CBR の関係を図-12 に示す。

これらより、次のことが判明した。

- ① すりへり減量は、圧壊強度との負の相関が認められ、圧壊強度が約150N 以上で、上層路盤規格の 50%以下を満足する。
- ② 修正 CBR は、粗粒率との相関が認められ、粗粒率が5.0～5.5で修正 CBR が極大となり、4.75～5.75 程度で上層路盤材規格の80%以上を満足する。

圧壊強度は固化体製造時の添加材量などで調整ができ、粗粒率は破砕条件で調整ができるので、オンサイト型固化碎石製造設備においては所定の圧壊強度と粗粒率を有した固化碎石の製造が可能となる。

一方、固化碎石は碎石(クラッシュラン)と比較し、次の特徴を有する。

- ①圧壊強度が小さいので、すりへり減量は大きい。
- ②粗粒率が粒度調整碎石相当であるので、修正 CBR は大きい。

これらの特徴が施工性(転圧回数による密度変化など)や供用性(平坦性、ひびわれ率など)に及ぼす影響に関しては、今後、実路試験で明らかにしていきたいが、すでに多くの実績を有する石炭焚流動層ボイラ燃焼灰路盤材の性能^{(11),(12)}と同等と考えている。

表3 固化碎石の路盤材としての特性

種 類	粗粒率 (-)	すりへり減量 (%)	修正 CBR (%)
A	4.82	58	83
B	5.11	35	125
C	5.20	35	122
D	5.39	47	97
E	5.71	45	65
F	6.14	33	57
G	6.27	24	32
碎石(C-40)	6.03	18	77

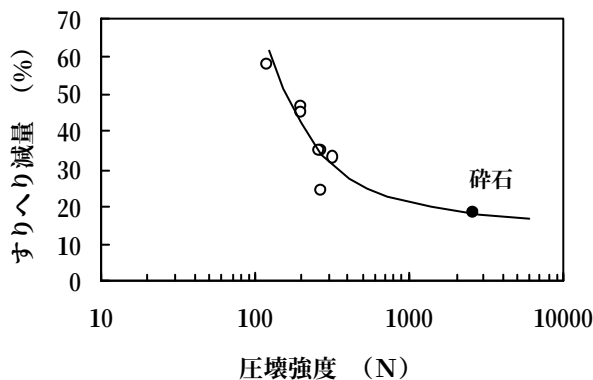


図-11 固化碎石の圧壊強度とすりへり減量の関係

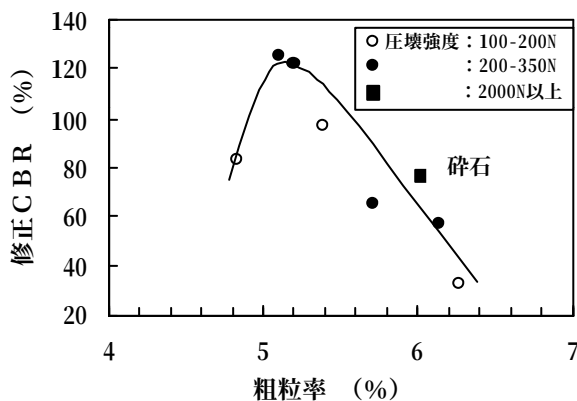


図-12 固化碎石の粗粒率と修正 CBR の関係

(3)地盤改良材としての特性

固化碎石のグラベルドレン材などの地盤改良材としての適用性を評価するために、破碎条件の調整を行い、表-4 に示す 20mm 以下の固化碎石(圧壊強度:256N)を製造した。地盤改良材としての品質は、内部摩擦角と透水係数が重要であるので、次に示すように供試体を製造し、三軸圧縮(CD)試験、透水試験を行った。三軸圧縮試験状況を図-13 に示す。

三軸圧縮試験:JIS A 1210(突固めによる土の締固め試験方法)に準拠し、15cm 径モールドで最大乾燥密度となる水量を求め、その水量で 92 回締固め後(乾燥密度:1.01g/cm³)、拘束圧 196.2kN/m² で試験

透水試験:三軸圧縮試験と同じ締固めのサンプルを用い、JIS A 1218(土の透水試験方法)の定水位透水試験方法で測定

表-4 地盤改良材試験用の供試体

粒 度 (%)										粗粒率 (-)
37.5 mm	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
100	93.9	60.7	36.5	22.8	15.8	11.4	7.6	5.1	5.0	5.46

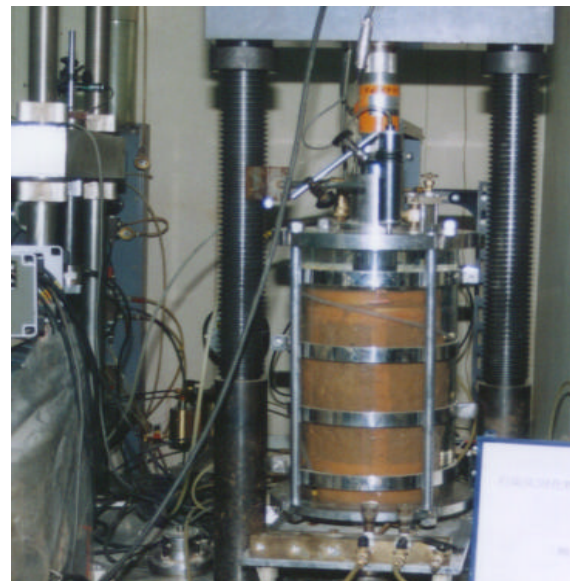


図-13 三軸圧縮試験状況

地盤改良材としての試験結果を表-5 に示す。これより、固化碎石は、碎石よりも強度が小さいので突固めで破碎がおり、粗粒率が 5.46→4.92 と小さく、FC(75μm 以下割合)が 5→8 と幾分大きくなっているが、地盤改良材としての品質を満足し、グラベルドレン材などとしての適用が期待できる。

表-5 地盤改良材としての試験結果

		固化碎石	目安 *
最大乾燥密度 (g/cm ³)		1.01	——
最適含水比 (%)		35.9	——
内部摩擦角 (度)		42	35 以上
透水係数 (cm/s)		2.0×10^{-3}	10^{-4} 以上
粒度割合 (%)	9.5 mm	71.2	——
	4.75	48.1	
	1.18	22.0	
	0.3	12.0	
粗粒率 (—)		4.92	——
F C (%)		8 (突固め前 5)	15 以下

* 地盤改良メーカで目安とされる数値

6. まとめ

石炭灰の大量利用技術を確立するために、需要量が多い土木用碎石の用途（路盤材、地盤改良材）への展開を目指した研究を実施した。

石炭灰を碎石状の固化体（固化碎石）とするために、石炭灰に少量の添加材を加え、水で混練し、蒸気処理を行って水和固化させた後、破碎処理を行った。

固化碎石の製造方法、製造した固化碎石の路盤材、地盤改良材としての評価試験を行い、次の結果を得た。

- (1) 添加材としてセメントー石膏系と石灰ー石膏系について検討を行い、多種灰特性に対応し、高い強度を発現する観点より、石灰ー石膏系が好適である。
- (2) 多種灰特性に対応し、水和固化反応を促進するには、養生温度の高い方が優れている。したがって、処理方式として、現場対応型（常温養生）よりもオンサイト型（蒸気養生）の方が、短期に安定した品質の製品が確保できる。
- (3) 固化碎石は、圧壊強度を150N 以上、粗粒率を4.75～5.75 程度とすることで、上層路盤材規格のすりへり減量50%以下、上層路盤規格の修正CBR80%以上を満足する。
- (4) 固化碎石は、内部摩擦角が42 度程度で、透水係数が 10^{-3} cm/s 程度であり、グラベルドレーンなどの地盤改良材としての適用が期待できる。
- (5) 固化碎石は、有害物溶出において、土壤環境基準を満足し、安全性が確保されている。

謝辞：本研究は東京電力（株）と川崎重工業（株）との共同研究、及び石炭生産・利用技術振興費補助事業として（財）石炭利用総合センター、川崎重工業（株）、日本舗道（株）、電源開発（株）、東京電力（株）、北海道電力（株）の共同研究による成果の一部を用いた。

関係各社の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 菅原勝彦，中西達夫，長屋洋司，斉藤義明：石炭灰と排煙脱硫スラッジの有効利用，資源処理技術，vol.42,No.4,pp.35-41,1995
- 2) 三浦雅彦：石炭灰の道路路盤材への利用，環境管理，Vol.32,No.5,pp.538-543,1996
- 3) 及川隆仁：セメント安定処理フライアッシュの道路路盤材への利用に関する研究，中国電力技研時報，第82号,pp.57-61,1993
- 4) 池田弘，本田勉，堀内晴生，園山尋三，渡部聡，河村彰男：石炭灰の土工材としての有効利用の研究，熊谷技報，第46号,pp.111-118,1989
- 5) 伊藤功：盛土材料へのフライアッシュ利用の適合性について，北海道電力研究報告，第575号,pp.1-29,1995
- 6) 浜田秀則，福手勤，石井光裕：混和材としての分級フライアッシュを用いたコンクリートの港湾・海洋構造物への適用性に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.35,No.4,pp.75-77,1996
- 7) 中川信矢，椎正幸：石炭灰を固化した道路路盤材（粒状骨材）について，中国電力技研時報，第70号,pp.125-131,1987
- 8) 石原勲，甘楽和夫，泉秀俊，長岡茂徳：石炭焚き流動層ボイラ燃焼灰の路盤材への利用，骨材資源，No.112,pp.181-191,1997
- 9) 柴田泰典，小笹和夫，甘楽和夫，泉秀俊：石炭灰の蒸気処理による固化体の安定性に関する研究，廃棄物学会論文誌，Vol.9,No.4,pp.157-163,1998
- 10) 柴田泰典，近藤篤：微粉炭だき石炭灰の路盤材製造技術に関する研究，火力原子力発電，Vol.49,No.12,pp.102-109,1998
- 11) Takada.T, Hashimoto.I, Tsutsumi.K, Shibata.Y, Yamamuro S, Kamada.T, Inoue.K, Tsuzura.K and Yoshida.K: Utilization of coal ash from fluidized-bed combustion boilers as road base material, *Resource, conservation and Recycling*, No.14, Vol.42, No.4, pp.69-77, 1995
- 12) 石原勲，泉秀俊，甘楽和夫，長岡茂徳：石炭灰を原料とした路盤材の実用化，道路建設，No.8/9,pp.43-48,1996

USE OF SOLIDIFIED MACADAM MADE OF COAL ASH FOR CIVIL MATERIALS

Kazuo OZASA , Noboru YASUDA , Hidetoshi IZUMI and Yasunori SHIBATA

Civil materials are expected to be one of major application targets for coal ash recycling. Previous attempts to use coal ash for such as road base materials and soil improvement materials, where coal ash is solidified with lime or cement in an ambient temperature, are not fully satisfactory.

In this study, a novel process, where powdery coal ash is solidified with lime and gypsum in a hot saturated steam atmosphere, and the solidified coal ash is crushed to macadam, is proposed. The evaluation by a testing reveals the satisfactory usability of the solidified macadam.