

(解説)

静電分級及び透水性舗装による石炭灰の有効利用

Utilization of Coal Combustion Ash by Electrostatic Separation and Water-permeable Concrete Pavement



木成寿秀*
Hisahide Kinari



片山昌人*
Masato Katayama



片岡秀樹**
Hideki Kataoka



松場洋了***
Hironori Matsuba

Electrostatic separation can reduce the carbon content of fly ash to less than 1%, producing a consistent, low loss-on-ignition (LOI) ash for use as a concrete admixture. Based on mortar test results, when low LOI ash was used, the amount of AE agent was even lower than in the original ash mixture. A new water-permeable concrete pavement method using clinker ash was developed. One of the remarkable and desirable features of this pavement is that it acts to suppress the road surface temperature.

まえばき = リサイクル法において、石炭灰はリサイクル促進を求められる副産物の一つに指定されている。相次ぐ石炭火力発電所の運転開始により、石炭灰の発生量は、2005年に1000万トン/年を超過する見込みであり¹⁾、有効な利用技術の開発が課題となっている。

当社では、石炭灰を利用した人工軽量骨材製造技術を実用化するとともに、石炭灰が発生する地域の事情に応じた土木・建築・窯業分野向けの利用方法を開発してきた。石炭灰は、燃焼排ガスから集塵機で採取されるフライアッシュとボイラ炉底に落下し粉碎採取されたクリンカアッシュとに大別される。フライアッシュとクリンカアッシュの発生率は9:1となっている。

本稿では、フライアッシュの利用技術である「静電分級処理」及びクリンカアッシュの利用技術である「透水性コンクリート舗装工法」を紹介する。

1. 静電分級処理

コンクリート用混和材としてのフライアッシュの利用は、流動性の向上及び水和熱量の低減によるひび割れ抑制など、利点が多い。2000年度時点でのコンクリート混和材としての利用量は約50万トン²⁾である。石炭灰に含まれる未燃焼炭素がコンクリート練混ぜ時に添加するAE剤(空気連行剤)を吸着し、コンクリートのスランブ及び空気量管理を難しくすることが知られている³⁾。

フライアッシュに含まれる未燃焼炭素の含有率を一定値以下に低減・管理することができれば、コンクリート混和材としての品質を向上させることができる。静電分級によりフライアッシュの脱炭素処理を行い、改質フライアッシュの評価を行った。以下に結果を報告する。なお、本研究は、東京電力(株)及び(財)電力中央研究所との共同研究として実施したものである。

1.1 静電分級の概要

2種類以上の粒子が混合されている粉体を帯電させ、電界の力を利用して運動させた場合、物性値の違いに起因する運動方向・運動量が異なる粒子を種類別に選別することができる。粉体を扱うプロセスでは、粒子が装置の器壁と接触や衝突をすることによって摩擦帯電する。摩擦による帯電極性は、接触あるいは衝突する物質の成分に依存する⁴⁾。フライアッシュ中の未燃焼炭素とそのほかの鉱物粒子が接触した場合、粒子表面の物理的性状及び化学的性状が異なるので、未燃焼炭素粒子とそのほかの鉱物粒子は相反する電荷に帯電する⁵⁾。静電分級装置の概念図を図1に、外観を写真1に示す。

原料は並行な電極の間に供給される。石炭灰の各粒子は、粒子同士の衝突により摩擦帯電する。このとき、未燃焼炭素粒子は+に、鉱物粒子は-に帯電する。帯電した粒子の運動は電界によってコントロールすることができる。静電気力により、+に帯電した粒子は負極に吸引され、-に帯電した粒子は正極に吸引される。連続的に回転している格子状ベルトにより、正極に吸引された鉱物粒子は図1において左側へ、負極に吸引された粒子は同じく右側へ移動する。粒子はベルトで搬送される間にも摩擦帯電と静電気力による移動を繰返しているため、装置の中で多段の分離をしていることになり、1回の静電分級処理で効率的な分離性能が得られる。本静電分級装置は、2002年時点で米国の3発電所、スコットランドの1発電所で合計6機が稼働している。分級機1機当たりの標準処理能力は、30トン/hである。

1.2 静電分級試験結果

日本国内の石炭火力発電所で発生したフライアッシュを用いて、静電分級試験を行った。本試験では、標準処理能力5トン/hの装置を用いた。静電分級処理により、未燃焼炭素を低減したフライアッシュを改質灰と称し、

*都市環境・エンジニアリングカンパニー エネルギーエンジニアリングセンター 技術部 **神鋼灘浜建設(株) ***鉄鋼部門 建設技術部

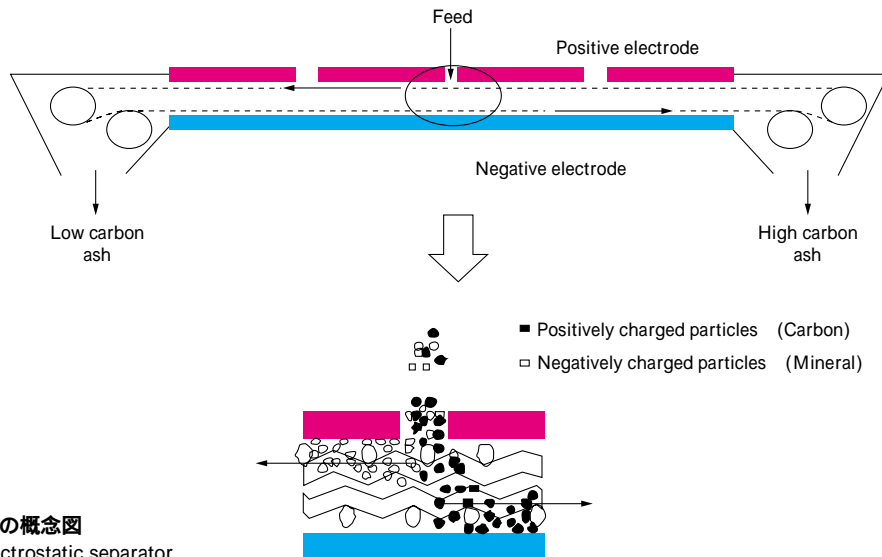


図1 静電分級装置の概念図
Fig. 1 Schema of electrostatic separator



写真1 静電分級装置の外観
Photo 1 Photograph of electrostatic separator

分離された未燃焼炭素を多く含むフライアッシュを高炭素灰と称した。本試験における目標条件を表1に示す。なお、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に基づきフライアッシュ中の未燃焼炭素分は強熱減量(LOI)で評価した。改質灰をコンクリート混和材として評価することから、改質灰中の未燃焼炭素を1%以下

表1 静電分級処理の目標条件
Table 1 Target condition of electrostatic separation

Loss on ignition of low carbon ash (%)	Recovery ratio (%)
Less than 1	More than 70

に設定した。改質灰の回収率については、静電分級処理の経済性を高めるために目標値を70%以上に設定した。静電分級試験は3種類の原料に対して実施した。表2に各原料灰、改質灰、高炭素灰の化学組成を示す。静電分級処理により、フライアッシュ中の未燃焼炭素が低減し、SiO₂、Al₂O₃の含有率が増加することを確認した。何れの原料灰に対しても強熱減量(LOI)が1%以下の改質灰が得られた。

原料灰、改質灰、高炭素灰の密度及び比表面積を表3に示す。比表面積については、原料灰と改質灰はほぼ同様の値を示した。また、改質灰の回収率は原料灰の種類

表2 原料灰、改質灰、高炭素灰の化学組成

Table 2 Chemical composition of original ash, low carbon ash, and high carbon ash (wt%)

Fly ash		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	LOI	C	SO ₃
Original ash	O	67.0	19.6	1.60	3.05	0.31	1.10	0.63	0.94	5.86	5.26	0.24
	L	72.4	20.5	1.39	2.80	0.28	1.00	0.59	0.92	0.96	0.67	0.20
	H	50.2	18.1	2.63	3.53	0.38	0.93	0.81	1.04	25.0	19.4	0.60
Original ash	O	52.1	29.1	5.89	4.59	0.62	0.47	1.97	1.29	2.01	1.75	0.70
	L	54.1	29.5	5.48	4.33	0.63	0.66	1.69	1.28	0.82	0.52	0.63
	H	37.6	22.5	12.2	6.55	0.50	0.55	3.72	1.60	9.97	9.71	1.34
Original ash	O	60.7	23.6	3.42	3.70	0.44	0.83	1.20	1.09	4.23	3.78	0.43
	L	62.6	24.7	3.26	3.46	0.43	0.84	1.13	1.15	0.93	0.56	0.38
	H	42.7	20.1	7.53	5.05	0.42	0.71	2.16	1.32	16.1	16.1	0.91

LOI : Loss on ignition, O : Original ash, L : Low carbon ash, H : High carbon ash

表3 原料灰、改質灰、高炭素灰の物理性状

Table 3 Density and specific surface area of original ash, low carbon ash, and high carbon ash

Fly ash		Density (g/cm ³)	Specific surface (g/cm ²)
Original ash	O	2.11	3 900
	L	2.10	3 900
	H	2.06	3 900
Original ash	O	2.18	3 700
	L	2.22	3 800
	H	2.44	4 000
Original ash	O	2.14	3 800
	L	2.19	4 000
	H	2.27	4 000

O : Original ash, L : Low carbon ash, H : High carbon ash

により異なったが、いずれの原料灰においても表1に示す目標値を満足した。

1.3 モルタル試験結果

モルタル試験により、改質灰をコンクリート混和材として評価した。原料灰、改質灰及び比較のために高炭素灰を対象にフロー試験、強度試験及びAE剤添加量試験を行った。

(1) フロー試験による流動性評価

フライアッシュがモルタルの流動性に及ぼす影響をフロー値比として評価した。試験はJIS A 6201に準拠して実施した。フロー値比とは、フライアッシュ無混和モルタルのフロー値に対するフライアッシュ混和値の比率(%)である。試験結果を表4に示す。改質灰を混和したモルタルのフロー値比は95~103で、原料灰混和時よりも高くなり、改質効果が認められた。一方、高炭素灰を混和した場合には、原料灰混和時よりも低くなった。以上より、未燃焼炭素粒子は、フライアッシュを混和したモルタル及びコンクリートの流動性を低下させる要因の一つであることを確認した。

(2) 強度評価試験

表4 モルタルの諸特性
Table 4 Properties of mortar

		Flow value (mm)	Strength (N/mm ²)	
Non-addition of fly ash		181.8	59.7	68.8
Fly ash	Percent flow (%)	Activity index		
		28 days	91 days	
Original ash	O	90	83	89
	L	95	83	93
	H	74	76	83
Original ash	O	99	83	79
	L	103	84	91
	H	99	83	91
Original ash	O	97	84	83
	L	100	83	80
	H	85	77	75

O : Original ash, L : Low carbon ash, H : High carbon ash

表5 AE剤添加量と進行空気量との関係

Table 5 Relation between addition of air-entraining admixture and volume of entrained air

Fly ash		Addition of air-entraining admixture (%)	Volume of entrained air (%)
Original ash	O	7.8	4.8
	L	0.9	5.4
	H	30	5.8
Original ash	O	2.1	5.2
	L	0.9	4.9
	H	14	4.3
Original ash	O	5.1	5.0
	L	0.9	4.8
	H	25	5.6
OPC (Non addition of fly ash)		0.2	5.0

O : Original ash, L : Low carbon ash, H : High carbon ash

(Note) The addition of air-entraining admixture (%) is weight ratio against the sum of cement and fly ash, when the addition of air-entraining is converted as the hundred times dilute.

フライアッシュのボゾラン反応性を活性度指数として評価した。試験はJIS A 6201に準拠して実施した。

活性度指数は、フライアッシュ無混和モルタルの強度に対するフライアッシュ混和モルタルの強度比(%)である。測定材齢は、28日と91日とした。フライアッシュのボゾラン反応はセメントの水和反応に比べて緩慢であるため、材齢91日における活性度指数がボゾラン反応を評価するのに適している。試験結果を表4に示す。改質灰を混和したモルタルの活性度指数は、原料灰を混和した場合に比べて同程度もしくは高い値を示した。

(3) AE剤添加量評価試験

コンクリートに凍結融解抵抗性を持たせるには、適切な空気量を確保する必要がある。フライアッシュを混和したコンクリートの品質を管理する上での課題は、未燃焼炭素の変動に伴うAE剤添加量の調整である。本試験では、AE剤添加量の変化により静電分級処理による改質効果を評価した。試験結果を表5に示す。原料灰を混和した場合には、適正進行空気量となるAE剤添加量(添加率)は各々7.8, 2.1, 5.1%と大きく変動することが示された。これに対して、改質灰を混和した場合には、AE剤添加量が全て0.9%となり、添加量が低減できた。なお、AE剤添加率は、AE剤原液を100倍希釈した場合の結合材(セメント+フライアッシュ)の重量に対するAE剤添加量の比率に換算した値を示した。

以上の評価試験結果より、静電分級はフライアッシュの有効な改質方法であることを確認した。

2. 透水性コンクリート舗装工法

都市部では、河川水の減少、地下水の枯渇現象への対応とヒートアイランド現象緩和のために地盤の保水機能を確保する必要性が唱えられ、公共建築物をはじめ公共空間において雨水の浸透設備を整備する動きが高まっている。透水性舗装は、排水、総合治水の対策の一つに加えて、地下水の涵養の一助にもなると期待されている。2000年度時点で東京都では全歩道の約4割(約1 830 km²)で使用されている。当社は、(株)鴻池組との共同開発により、石炭灰を用いた透水性コンクリートを舗装の

表6 使用材料

Table 6 Raw materials

Clinker ash	Generated at Kakogawa Works of Kobe Steel
Cement	Portland cement
Air-entraining and high-range water-reducing admixture	Polycarbonate
Color	Iron oxide

表7 配合割合

Table 7 Combination rate

C/ Pellet (%)	W/C (%)	Unit quantity (kg/m ³)						SP	Color
		W	C	Pellet					
				W	C	CA			
26	30	98	326	1256			3.26	9.8	
				112	470	674			

W : Water, C : Cement, CA : Clinker ash

SP : Air-entraining and high-range water-reducing admixture

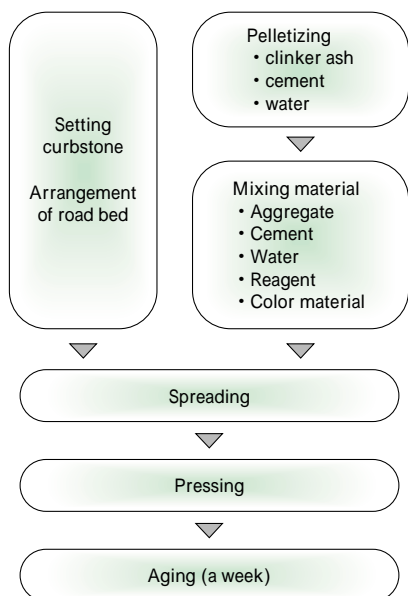


図2 施工フロー

Fig. 2 Flow sheet of execution

表層材として利用する工法を実用化した。本工法による透水性舗装の性能及び神鋼神戸発電所構内での施工例について報告する。

2.1 透水性コンクリート舗装工法の概要

本工法はクリンカアッシュを透水性コンクリートの主要材料として使用することを特徴とする。クリンカアッシュはボイラ内で生成する石炭灰の溶融塊を粗砂状に粉碎したものであり、保水性と排水性に優れている。使用材料を表6に、材料配合条件を表7に示す。また、施工フローを図2に示す。まず、クリンカアッシュにセメントと水を加えて造粒し、硬化させて骨材とする。この骨

表8 標準性能値

Table 8 Standard properties of water - permeable concrete pavement using coal combustion ash

	Item	Numerical value	Remark
Permeability	Percolation efficient (cm/s)	1×10^{-2}	-
	Strength		
	Compressive strength (N/mm ²)	16	28 days
	Bending strength (N/mm ²)	2.5	28 days
Resistance against the slippery		40	Wet condition



写真2 透水状況

Photo 2 Permeable state of developed pavement

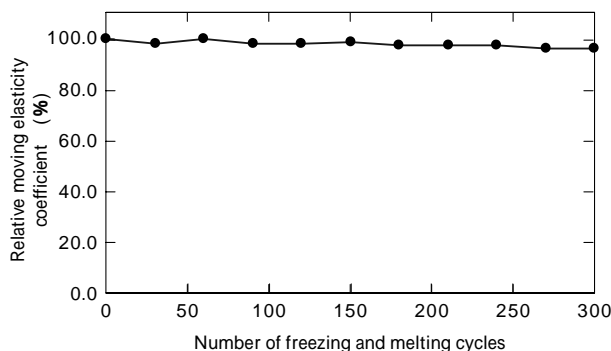


図3 凍結融解試験結果

Fig. 3 Results of freezing and melting cyclic tests

材、セメント、水、添加剤、着色材の混合したものを敷均し、そのあとに転圧・締め仕上げをし、養生させる。本透水性コンクリート舗装の透水状況を写真2に、舗装性能を表8に示す。

本透水性舗装の耐候性を示す性状として、「凍結融解抵抗性」及び「路面温度のヒート緩和効果」について以下に記載する。

2.2 凍結融解抵抗性

試験は、JIS A 1148の気中凍結水中融解試験方法(B法)に準拠して実施した。図3に相対動弾性係数(%)の変化を示す。300サイクルまで相対動弾性係数の低下は認められず、また、表層にもポップアウトやスケールリングの痕跡は無く、気中凍結の条件下では十分な凍結融解抵抗性を有していることを確認した。

2.3 路面温度上昇の緩和効果

10月上旬の同時間帯、同地点において、実際に舗装した本開発の透水コンクリート舗装、アスファルト舗装及び緑地(芝生面)の各表面温度を測定した。図4に経時変化を示す。本開発の透水性コンクリート表面温度をアスファルトの表面温度と比較すると最大温度で7度低か

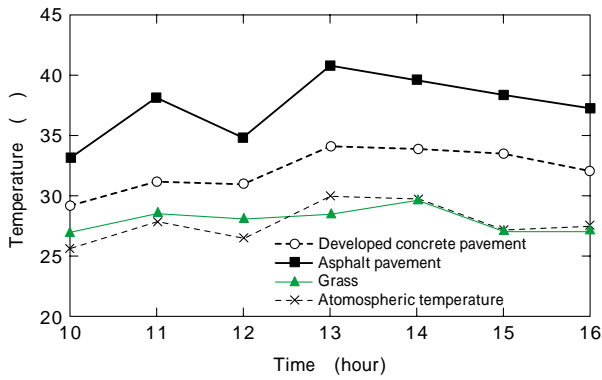


図4 路面温度の経時変化

Fig. 4 Change in surface temperature with time



写真3 舗装の外観（神鋼神戸発電所構内）

Photo 3 Photograph of pavement at Shinko-Kobe Power Station

った。本舗装工法は表面温度の上昇緩和に効果が認められた。

2.4 施工例

本工法を神鋼神戸発電所構内の歩道部に適用した事例を紹介する。当社加古川製鉄所で発生したクリンカアッシュを使用した。施工に際しては、2軸強制ミキサ（容量1m³）により骨材及び透水コンクリートを製造し、締固めには通常の舗装工に使用する0.55tハンドローラを用いた。舗設後は、表面の乾燥を防ぐためにブルーシートで覆い翌日散水養生を行った。舗装外観を写真3に示す。

むすび=静電分級により、フライアッシュのコンクリート混和材としての性状を改善できることを確認した。また、クリンカアッシュを活用した新しい透水性コンクリート舗装工法を開発した。2002年10月に「アッシュペイブ研究会」を設立し、本工法の普及と技術の向上を図っている。

最後に、共同研究者としてご指導を頂いた関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 石炭灰有効利用拡大技術調査報告書, (財)エネルギー総合工学研究所, p.4, 1997.
- 2) 石炭灰全国実態調査報告書(平成12年度分), (財)石炭利用総合センター, p.15, 2002.
- 3) 山本武志ほか: (財)電力中央研究所報告, U02058(2003), p.1.
- 4) 増田弘昭ほか: 静電気学会誌, 7, 5(1983), p.316.
- 5) H. Ban et al.: Fuel, Vol.76, No. 8(1997), p.801.