

論文 混合によるフライアッシュの品質改善・安定化技術の検討

中嶋 周作^{*1}・佐藤 道生^{*2}・長谷川 登^{*3}・山中 謙^{*4}

要旨：本研究は、フライアッシュⅡ種の生産量拡大を図ることを目的として、複数の発電所から発生するフライアッシュを混合することで品質の改善・安定化を可能にする石炭灰混合均質化技術を検討したものである。室内試験およびミキサーの混合による実証試験により、フライアッシュを混合することで品質の調整および改善・安定化が可能であることが分かった。また、原粉を混合した灰を用いてコンクリート構造物への適用試験を行った結果、標準のフライアッシュⅡ種を用いたコンクリートと同等の性状を有することを確認した。さらに、大規模生産へ向けた実証試験の結果、サイロ間の移送により大量生産への見通しが立った。

キーワード：フライアッシュ, 原粉, 混合均質化, 品質安定

1. はじめに

近年、石炭火力発電所から産出されるフライアッシュは、低品位炭を含め、使用炭種が多様化しており、品質の変動が大きくなる傾向にある。このような背景から、近年、フライアッシュⅡ種の品質を維持することが難しくなる傾向にあり、生産量を維持拡大することが困難となっている。

また、各火力発電所によってボイラーの特性や使用する炭種が異なるため、火力発電所ごとにフライアッシュの品質が相違することが指摘されている¹⁾。7箇所の火力発電所から排出されるフライアッシュの強熱減量とメチレンブルー吸着量²⁾（以下、MB吸着量と称す）の関係について整理したものを図-1に示す。

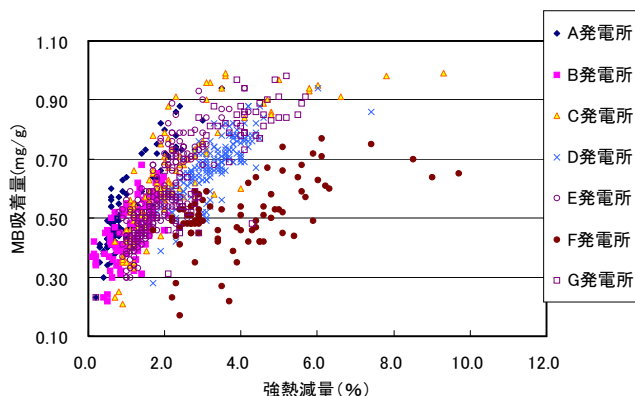


図-1 各火力発電所の強熱減量とMB吸着量の関係

図-1より、強熱減量とMB吸着量は概ね比例関係にあるが、火力発電所ごとに特徴をもった品質変動をしていることが分かる。このことから、現在、フライアッシュⅡ種は各火力発電所単位で生産・管理されているとい

うのが現状である。

そこで本研究は、フライアッシュⅡ種の生産量拡大を図る事を目的として、複数の火力発電所から発生するフライアッシュをそれぞれの特徴を考慮の上、適切な組み合わせ（例えば強熱減量の大きい灰と小さい灰との組み合わせ）で混合することにより、品質の改善・安定化を可能にする混合均質化技術の検討を行ったものである。

2. フライアッシュ混合基礎試験

2.1 試験方法

室内試験にて、2種類のフライアッシュ（A灰、B灰）を所定の割合（A:B=5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1）で均一に混合し、品質の調整が可能かどうかの試験を行った。A灰には一般的なフライアッシュⅡ種を使用し、B灰には比較的MB吸着量が大きい傾向にあるフライアッシュを使用した。試験項目は、JIS A 6201:1999に規定される品質およびMB吸着量（電発法）について試験を行った。

2.2 試験結果

試験結果を表-1に示す。

表-1より、SiO₂、湿分、強熱減量、フロー値比はA灰、B灰間の数値の差が小さかったため、混合割合による試験値の変化は見られなかったが、密度、ブレン比表面積、45μm篩残分、活性度指数、MB吸着量については、例として、ブレン比表面積と45μm篩残分のグラフをそれぞれ図-2、図-3に示すとおり、混合割合から算出した加重平均値と試験値とがほぼ等しくなった。このことから、フライアッシュを所定の割合で混合することにより、品質の調整が可能であることが分かった。また、MB吸着量も混合により値が下がっており、品質が改善されることが分かった。

*1 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 メンバー 工修 (正会員)

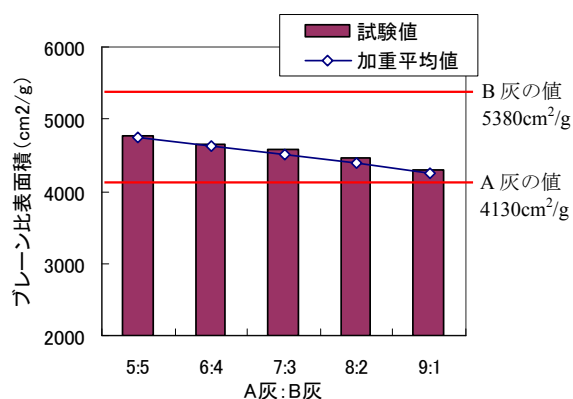
*2 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 リーダー 工修 (正会員)

*3 電源開発(株) 火力発電部 石炭灰利用推進グループ メンバー 工修 (正会員)

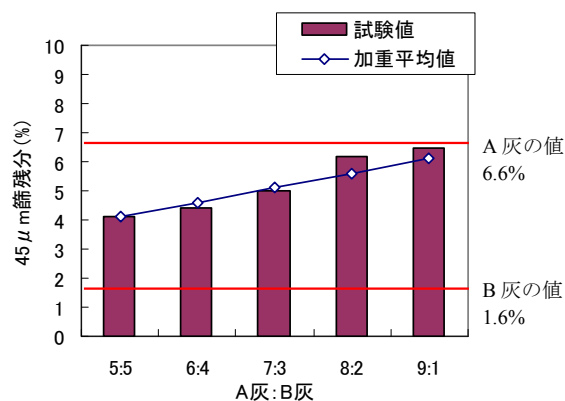
*4 (株)ジェイペック 環境・資源リサイクル事業部 資源グループ リーダー

表－1 フライアッシュ混合基礎試験結果

試験項目	A 灰	B 灰	A 灰 : B 灰				
			5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
SiO ₂ (%)	56.1	56.2	55.8	55.2	55.7	55.8	55.5
湿分(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
密度(g/cm ³)	2.25	2.40	2.34	2.33	2.31	2.29	2.27
強熱減量(%)	2.7	2.8	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0
比表面積(cm ² /g)	4130	5380	4780	4660	4580	4470	4300
45μm 篩残分(%)	6.6	1.6	4.1	4.4	5.0	6.2	6.5
フロー値比(%)	105	107	106	106	105	105	105
活性度 指数(%)	28 日	86	92	90	88	88	86
	91 日	101	109	106	104	104	101
MB 吸着量(mg/g)	0.66	0.89	0.78	0.78	0.78	0.73	0.64



図－2 各混合比率におけるブレン比表面積の試験結果



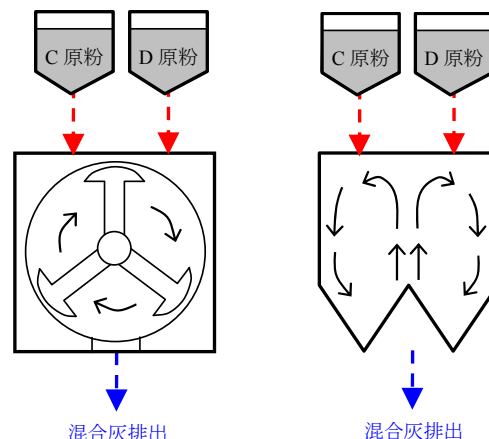
図－3 各混合比率における45μm 篩残分の試験結果

3. 原粉混合実証試験

3.1 試験方法

前章よりフライアッシュを所定の割合で混合することにより、品質の調整が可能であることが分かったことから、原粉（分級する前のフライアッシュ）³⁾を用いて、ミキサーの混合による実証試験を実施した。試験は2種類の原粉を5:5の割合でバッチ式ミキサー（プロシエアミキサー、製造能力：2.0t/バッチ）および連続式ミキサー（エアブレンダー、製造能力：20m³/min）により

混合した。混合方法の概略図を図－4に示す。試験項目は、JIS A 6201:1999に規定される品質およびMB吸着量（電発法）について試験を行った。



(a) プロシエアミキサー (b) エアブレンダー

図－4 ミキサーによる混合方法概略図

3.2 試験結果

原粉および混合灰のサンプルについて、バッチ式の試験結果を表－2に、連続式の試験結果を表－3に示す。

表－2、表－3より、混合灰の試験値は活性度指数を除き、バッチ式、連続式ともにC原粉とD原粉の値のほぼ中間値をとっており、ミキサーにより混合されていることが確認できた。活性度指数は原粉よりも混合灰のほうが大きくなったが、これはミキサーにより強制攪拌することで粒子同士の結合がほぐれ、反応性が向上したためと考えられる。また、品質管理上特に重要な指標である強熱減量、比表面積、活性度指数、MB吸着量に着目した場合、混合灰の変動係数は、変動係数が大きいほうの原粉よりも小さくなっており、混合によりバラツキが抑えられ、品質が安定していることが確認できた。なお、

表－2 各サンプル試験値（バッチ式）

		C 原粉 (試料数:3)		D 原粉 (試料数:3)		混合灰 (試料数:2)	
		平均	變動 係数	平均	變動 係数	平均	變動 係数
SiO ₂ (%)		56.8	0.2%	61.2	0.1%	59.5	0.3%
湿分(%)		0.1	70.7%	0.1	0.0%	0.1	0.0%
密度(g/cm ³)		2.33	0.4%	2.26	0.4%	2.30	0.7%
強熱減量(%)		0.9	5.1%	2.4	3.9%	1.9	0.0%
比表面積(cm ² /g)		3,790	3.9%	3,820	1.4%	3,810	2.4%
45μm 篩残分(%)		21.2	5.5%	21.1	5.5%	20.9	14.6%
フロー値比(%)		107	0.0%	102	0.8%	106	0.5%
活性度 指数 (%)	28 日	80	3.5%	82	1.0%	86	1.2%
	91 日	95	2.2%	93	3.5%	96	1.0%
MB 吸着量(mg/g)		0.52	7.5%	0.62	4.0%	0.62	4.1%

表－3 各サンプル試験値（連続式）

		C 原粉 (試料数:5)		D 原粉 (試料数:5)		混合灰 (試料数:5)	
		平均	變動 係数	平均	變動 係数	平均	變動 係数
SiO ₂ (%)		57.3	0.4%	60.3	0.3%	59.3	0.6%
湿分(%)		0.1	123%	0.1	0.0%	0.1	50.0%
密度(g/cm ³)		2.31	0.2%	2.29	0.4%	2.30	0.4%
強熱減量(%)		1.1	3.7%	2.6	1.9%	1.9	2.1%
比表面積(cm ² /g)		3,546	1.0%	3,858	2.7%	3,696	2.1%
45μm 篩残分(%)		24.0	4.4%	18.7	6.6%	21.7	6.8%
フロー値比(%)		106	0.5%	102	0.9%	104	0.5%
活性 度指 数(%)	28 日	76	1.2%	81	2.1%	83	1.7%
	91 日	91	1.4%	93	2.7%	93	2.1%
MB 吸着量(mg/g)		0.53	7.5%	0.67	2.3%	0.59	2.7%

混合灰は JIS のフライアッシュ II 種の規格値を満足していることも確認できた。

4. 混合灰の混和材としての適用試験

4.1 試験概要

前章までの結果から、原粉を混合することにより品質の安定化が可能であることが分かった。本章では、実証試験で混合した混合灰がコンクリート用混和材として十分な性状を有していることを確認するとともに、フライアッシュ II 種を使用した同配合コンクリートの性状と差がないことを確認するため、コンクリート構造物の一部で混合灰を使用し、試験を行った。試験対象構造物は、機械基礎コンクリート（コンクリート数量 0.71m³/基×全 25 基）とした。機械基礎の施工状況を写真－1 に示す。

4.2 使用材料

使用材料を表－4 に示す。フライアッシュは前章において、バッチ式ミキサーおよび連続ミキサーで混合した 2 種類の混合灰を用いた。別途施工の同配合コンクリートに用いられているフライアッシュ II 種灰（以下、標準灰と称す）および混合灰（バッチ式、連続式）の物性値を表－5 に示す。

4.3 コンクリート配合

機械基礎のコンクリート配合表を表－6 に示す。コン



写真－1 機械基礎施工状況

表－4 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント
水	上水道水
細骨材	福岡県産海砂：表乾密度 2.60g/cm ³ 福岡県産砕砂：表乾密度 2.70g/cm ³
粗骨材	福岡県産砕石：表乾密度 2.71g/cm ³
フライアッシュ	混合灰（2 種類）
AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール の複合体
AE 剤	高アルキリカルボン酸系陰イオン界面 活性剤と非イオン界面活性剤の複合体

表－5 使用フライアッシュの物性値（平均値）

		標準灰	混合灰 (バッチ式)	混合灰 (連続式)
SiO ₂ (%)		66.4	59.5	59.3
湿分(%)		0.1	0.1	0.1
密度(g/cm ³)		2.31	2.30	2.30
強熱減量(%)		1.4	1.9	1.9
比表面積(cm ² /g)		4071	3810	3696
45μm 篩残分(%)		5.9	20.9	21.7
フロー値比(%)		107	106	104
活性度 指数(%)	28 日	86	86	83
	91 日	100	96	93
MB 吸着量(mg/g)		0.47	0.62	0.59

表－6 コンクリート配合表

組骨材の 最大寸法 (mm)	水結合材比 W/(C+F) (%)	FA 置換率 F/(C+F) (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	フライアッ シュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
								AE 減水剤	AE 剤
20	45	25	165	275	92	784	1034	1.466	0.015※

※目標スランプ、空気量を満たすように添加量を調整した。

クリートの目標スランプは8±2.5cm、空気量は4.5±1%とし、その条件を満たすように AE 剤の添加量を調整した。

4.4 試験項目

試験項目を表-7 に示す。圧縮強度は標準灰と混合灰を用いた場合の強度を比較するとともに、混合灰については標準養生と現場封緘養生の2通り実施し、養生方法による圧縮強度を比較した。また現場封緘養生供試体付近に温度計を設置し、気温と強度の関係について調べた。

表-7 試験項目

試験項目	試験内容
AE 剤添加量	目標スランプ、空気量を満たす AE 剤添加量
圧縮強度	標準養生 (3,7,28 日) 現場封緘養生 (3,7,28 日)
色調	L*a*b*表色系
定性評価	コンクリートの性状について作業従事者に聞き取り調査

4.5 試験結果

(1)AE 剤の添加量

AE 剤の添加量の推移を図-5 に示す。

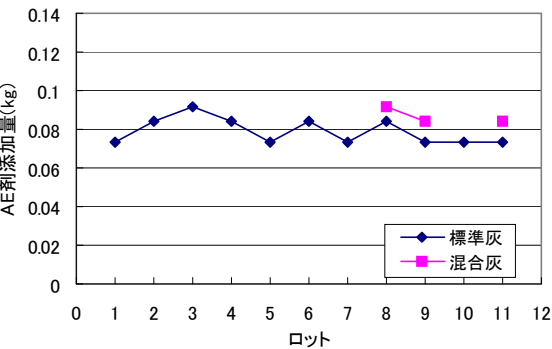


図-5 AE 剤添加量の推移

図-5 より、標準灰を用いた同配合のコンクリートの場合と比べて、AE 剤の添加量が若干多くなることが分かった。一般的に、フライアッシュの MB 吸着量が大きいと AE 剤の添加量が増える傾向にある^{2)・4)}とされているが、今回の混合灰は MB 吸着量が平均 0.61 mg/g で、標準灰の平均が 0.47mg/g であることから、それが AE 剤の添加量を増加させた要因の一つであると考えられる。

(2)圧縮強度

圧縮強度と計測温度から算出した積算温度との関係を図-6 に示す。

図-6 より、混合灰を用いたコンクリートの圧縮強度は、標準灰を用いた同配合のコンクリートの場合と比較して、標準養生の場合は強度が大きくなり、現場封緘養生の場合でも強度が同等という結果になった。活性度指数は標準灰と比較して混合灰は同等以下であったにも

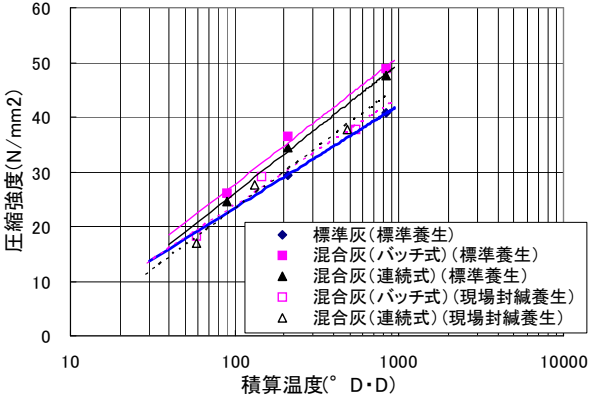


図-6 圧縮強度と積算温度の関係

関わらず、強度が大きくなった理由は不明だが、混合灰でも十分な圧縮強度が得られることが分かった。また、現場封緘養生と標準養生の強度の差は、標準養生に対し、現場封緘養生は水分の供給が十分でなかったことが原因と考えられる。

(3)色調

色調は、天端の色調を L*a*b*表色系により測定した。L*a*b*表色系において、L*は明度、a*および b*は色相と彩度を表している。混合灰を用いたコンクリートおよび標準灰を用いた同配合のコンクリート (A~D 構造物) について測定し、比較を行った。色調測定結果を表-8 に示す。

表-8 色調測定結果

	L*		a*		b*	
	平均	変動係数	平均	変動係数	平均	変動係数
混合灰	73.18	3.1%	-0.77	12.2%	3.49	14.5%
A 構造物	69.35	2.2%	-0.56	11.6%	5.23	12.4%
B 構造物	67.78	1.7%	-1.02	6.4%	2.16	8.7%
C 構造物	75.53	2.6%	-0.71	18.2%	3.25	21.8%
D 構造物	72.19	0.5%	-0.85	2.2%	2.42	13.1%

表-8 より、混合灰を用いたコンクリートは標準灰を用いた同配合のコンクリートと比較して、数値、ばらつきともに大きな差異はなく、見た目でも大きな違いは見られなかった。

(4)定性評価

コンクリート性状を定性的に評価するために、現場の作業従事者に性状に関する聞き取り調査を行った。調査内容は性状 (色、締固め前の性状、締固まり具合、打ち込みやすさ、表面の仕上がり具合) について、標準灰を用いた同配合のコンクリートと比較した場合の感触を聞き取り調査した。

調査結果の概要を以下に示す。

- ・標準灰を用いた同配合のコンクリートと比較しても

ほとんど遜色なく、特に大きな違いはないという意見が大半だった。

- ・多少粘りがあり、凝結時間が早く感じる。ただ、適度な粘りで敷均しやすい。
- ・ブリーディングの量は少ない。

4.6 試験結果のまとめ

以上の試験結果より、混合灰をコンクリート構造物へ用いた場合、混和材として十分な性状を有することが分かった。また、標準灰を用いたコンクリートと比較して、AE 剤の添加量が多少増加する傾向が見られたものの、ほぼ同等の性状を有することが確認できた。

5. 大規模生産に向けた実証試験

前章では、トラック輸送を念頭に 10t 程度の混合均質化を想定したが、船舶での輸送を想定した場合には数百～数千 t を 1 ロットとした混合均質化が必要である。そこで、品質の安定した混合灰を大量製造することを目的として、2000t サイロを 2 基用い、サイロ間の移送による混合均質化試験を実施した。

5.1 試験方法

混合均質化試験方法の概略図を図-7 に示す。

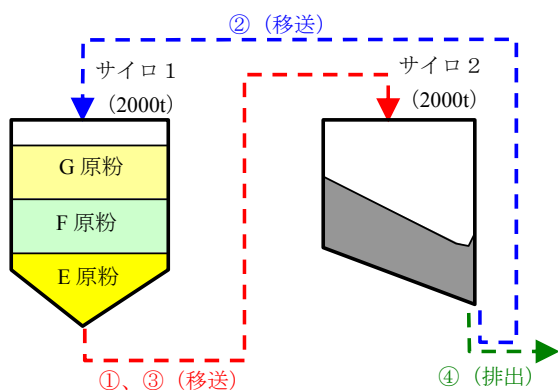


図-7 サイロ間移送混合試験概略図

3 箇所の火力発電所から発生した異なる原粉をサイロ 1 に 3 層に投入し、サイロ 1→サイロ 2→サイロ 1→サイロ 2 の順でサイロ間の移送を繰り返し、最終的にサイロ 2 より排出した。

5.2 試験項目

原粉および各移送過程においてサンプルを採取し、表-9 に示す試験項目について、試験を行った。また、灰排出時のサイロ内の灰の動きを観察するため、サイロ 1 内のビデオ撮影およびレーザー測距器により灰の表面形状の測定を行った。

表-9 試験項目

	試験項目
物性試験	粒度, 強熱減量, ブレーン比表面積
含有分析	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO

5.3 実証試験結果

混合前の原粉およびサイロ 2 より排出した混合灰の試験値を表-10 に示す。また、各移送過程における強熱減量および平均粒径 D₅₀ の推移を図-8 に示す。

表-10 大規模生産に向けた実証試験結果 (平均値)

	E 原粉	F 原粉	G 原粉	サイロ 2 排出時
D ₅₀ (μm)	15.4	16.3	17.7	16.8
強熱減量(%)	0.8	6.6	1.8	2.8
比表面積(cm ² /g)	3,627	3,973	3,460	3,422
SiO ₂ (%)	57.8	46.9	53.9	56.4
Al ₂ O ₃ (%)	17.7	23.7	25.4	22.7
CaO(%)	4.4	4.6	5.8	5.5

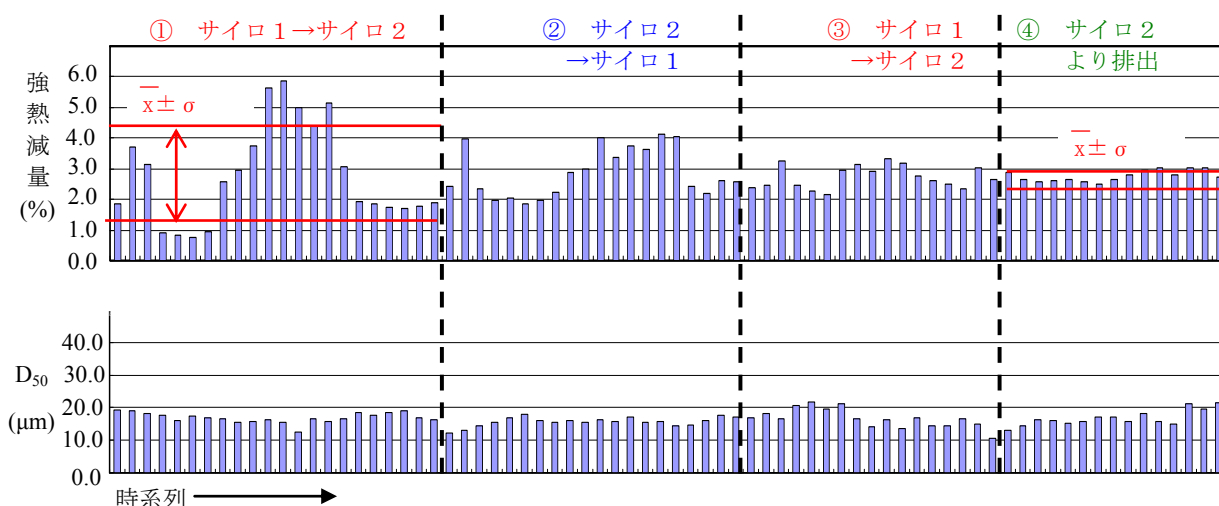


図-8 各移送過程における強熱減量および平均粒径 D₅₀ の推移

図-8より、 D_{50} はサイロ間移送を繰り返しても値が収束しなかったが、強熱減量はサイロ間の移送を繰り返すにしたがい値が収束しており、品質が安定していることが確認できた。

また、サイロ1内の石炭灰の表面形状の経時変化を図-9に、サイロ1内を撮影した写真を写真-2に示す。

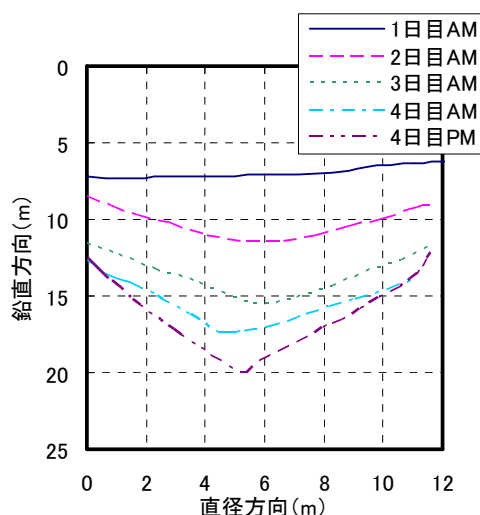


図-9 サイロ1内の石炭灰の表面形状の経時変化



写真-2 サイロ1内の状況（排出時）

これより、サイロ1内に貯蔵された灰は、排出開始直後は最も下層の灰（E 原粉）から排出され、その後、排出口の上部の石炭灰が徐々に崩れ、上層石炭灰の排出口直上部が抽出されていき、以後、サイロ1内の石炭灰は内部摩擦角以上の角度を持つ部分から崩れていく様子が観察された。イメージ図を図-10に示す。

このことから、サイロ間の移送により、フライアッシュの品質安定化が可能であることが分かり、大量生産

への見通しが立った。

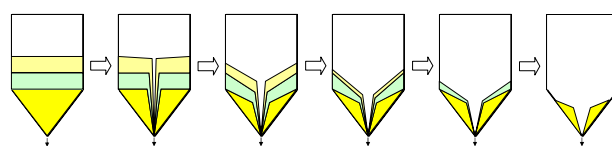


図-10 サイロ1内の石炭灰の動きのイメージ

6. まとめ

フライアッシュⅡ種の生産量拡大を図ることを目的として、複数の発電所から発生するフライアッシュを混合することで品質の改善・安定化を可能にする石炭灰混合均質化技術の検討を行った。

これらの成果をまとめると以下になる。

- (1) 室内試験による混合基礎試験の結果、フライアッシュを所定の割合で混合することにより、品質の調整・改善が可能であることが分かった。
- (2) 原粉混合実証試験の結果、ミキサーを用いて原粉を混合することにより、品質の安定化が可能であることが分かった。
- (3) 混合灰を用いてコンクリート構造物への適用試験を行った結果、混和材として十分な性状を有することが分かった。また、標準灰を用いたコンクリートと比較して、AE剤の添加量が多少増加する傾向が見られたものの、ほぼ同等の性状を有することが確認できた。
- (4) 大規模生産に向けた実証試験の結果、サイロ間の移送によりフライアッシュの品質を安定化させることが可能であることが分かり、大量生産への見通しが立った。

参考文献

- 1) 川口正人ほか：石炭灰フライアッシュのキャラクターリゼーション(8)，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 2241-2242，2008
- 2) 吉越盛次：混和材としてのフライアッシュに関する研究，土木学会論文集第31号，pp. 1-62，1955
- 3) 環境技術協会，日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック（第4版），pp. I-16-17，2005.5
- 4) 環境技術協会，日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック（第4版），pp. I-19-23，2005.5