

論文 フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性

大賀宏行*¹・國府勝郎*²・坂井悦郎*³・大門正機*⁴

要旨：石炭火力発電所における電気集塵器の集塵ホップごとに採取したフライアッシュの特性に及ぼす発電負荷および使用炭種の影響について検討するとともに、これらフライアッシュを混和したモルタルの流動性および圧縮強度特性についてフライアッシュの特性と関連させ検討を加えた。集塵ホップの煙道排気方向の位置によって採取されたフライアッシュの特性は異なり、排気方向に順次比表面積は大きくなっている。モルタルの流動性は、混和したフライアッシュの比表面積の増大とともに改善され、モルタルの圧縮強度は、物理的特性のみならず化学的特性にも影響を受けることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ、比表面積、流動性、強度特性、反応性

1. はじめに

フライアッシュはコンクリート用混和材として用いた場合、流動性の改善、発熱量の低減、アルカリ骨材反応の抑制などの長所を有するが、フライアッシュの品質変動および品質低下、混和剤の吸着などにより必ずしもこれらの長所が生かされない場合もある。既往の研究[1][2][3]によれば、分級されたフライアッシュで粒径の小さいものは、品質が良くコンクリート用混和材として適していることが明らかとなっている。フライアッシュは石炭火力発電所において電気集塵装置により捕集されるが、発電所によっては電気集塵装置内の集塵ホップごとに集められたフライアッシュを再度同一サイロに貯蔵して用いている場合がある。しかし、フライアッシュの粒径範囲は集塵ホップの位置により異なり、煙道排気方向に向かってフライアッシュは順次細くなる可能性がある。そこで、本研究は石炭火力発電所の電気集塵装置の集塵ホップごとに採取したフライアッシュの特性について検討を加えるとともに、これらフライアッシュを混和したモルタルの流動性および強度特性を、フライアッシュの特性と関連させ検討を加え、フライアッシュの潜在的品質を明らかにすること目的とする。

2. 実験概要

同一石炭火力発電所において発電負荷および使用炭種を変化させ、煙道の排気方向に設置された3ヶ所の集塵ホップから採取したフライアッシュを用いた。Aシリーズは、発電負荷600MW時（昼間操業時）に採取したものであり、A'シリーズは、Aシリーズと同一の石炭を用い発電負荷300MW時（夜間操業時）に採取したものである。Bシリーズは、Aシリーズと同一発電負荷で異なる石炭を用いて発電した際に採取したものである。燃焼に用いた石炭は全て海外炭であった。煙道排気方向に向かって手前の集塵ホップから採取したフライアッシュに順次1、2、

*1 東京都立大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 東京都立大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 東京工業大学助教授 工学部無機材料工学科、工博（正会員）

*4 東京工業大学教授 工学部無機材料工学科、工博（正会員）

3の記号を付けた。フライアッシュの物理化学的性質を表-1に示す。セメントは、鉍物質微粉末による置き換えをしていない研究用セメントを用いた。細骨材は、ISOに準拠したセメントの強さ試験用の細骨材を用いた。配合は、水結合材比50%と砂結合材比3.0を一定とし、フライアッシュの置換率を0および25%とした系を基本とし、フライアッシュを混和した系において無混和のモルタルとフローが同一となるように水結合材比を低減させた配合についても検討を加えた。また、水結合材比を35および60%、フライアッシュの置換率を15%とした配合についても検討を加えたが、水結合材比を変化させた系については、フライアッシュ無混和のモルタルのフローが水結合材比50%で無混和のモルタルのフローと同一となるように、高性能減水剤量(35%の場合)および砂結合材比(60%の場合)を決定した。4×4×16cmの3連型枠を用い、打設後24時間20℃の湿潤状態に保管し、脱型後10、20、30℃の水中養生を行い、所定の材齢において圧縮強度試験を行った。

3. フライアッシュの物性値

表-1に示すように、発電負荷および使用炭種によらず煙道排気方向に向かって順次細かなフライアッシュが採取され、ブレーン法による比表面積も、値自体は種類によって異なるものの順次大きくなっている。図-1は、フライアッシュの比表面積と45μmふるい残分との関係を示している。比表面積の増大とともにふるい残分は低減している。図-2にフライアッシュの比表

表-1 フライアッシュの物理化学的性質

	強熱減量 (%)	比重	45μm残分 (%)	比表面積 (cm ² /g)	ガラス量 (%)	発電負荷 (MW)
A-1	1.0	2.06	22.8	2760	70.6	600
A-2	1.5	2.22	3.8	4180	76.6	600
A-3	0.4	2.42	1.7	7360	76.8	600
A'-1	1.6	2.08	16.6	3580	65.9	300
A'-2	1.9	2.23	3.2	4920	68.7	300
A'-3	1.7	2.40	0.2	7290	74.1	300
B-1	1.2	2.24	22.6	2640	-	600
B-2	1.2	2.33	6.5	4490	-	600
B-3	1.2	2.48	0.4	9010	-	600

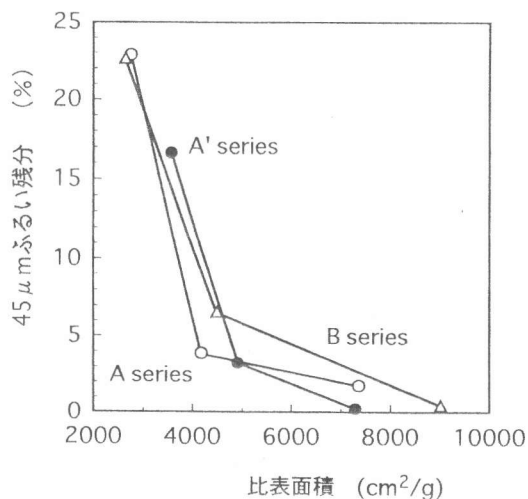


図-1 比表面積とふるい残分

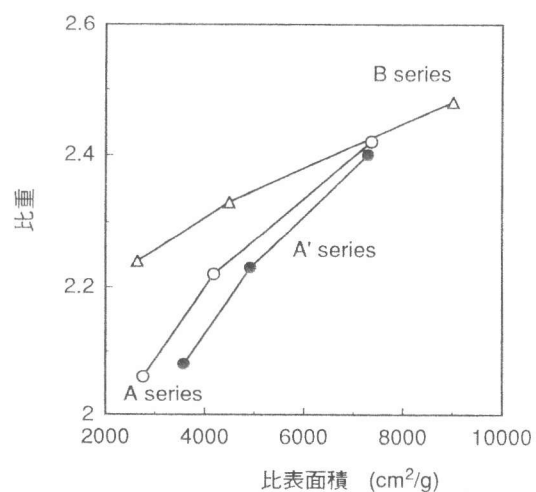


図-2 比表面積と比重

面積と比重との関係を示している。比表面積が大きくなるに従い、すなわち粒径が小さくなるに従い比重は大きくなっていることから、細かなフライアッシュほど中空粒子や内部に細かな粒子を含んでいる粒子が含まれる比率が低減しているものと考えられる。フライアッシュの比表面積と強熱減量との関係を図-3に示すが、両者にはほとんど相関は認められない。ブレン法により得られた比表面積は、粉体の細かさだけでなく、粉体に含まれる炭素の量とその比表面積に影響を受けるものと考えられるが、本研究で用いたフライアッシュの強熱減量は最大でも2%程度であり、この程度の強熱減量であれば比表面積に及ぼす影響は少ないと考えられる。

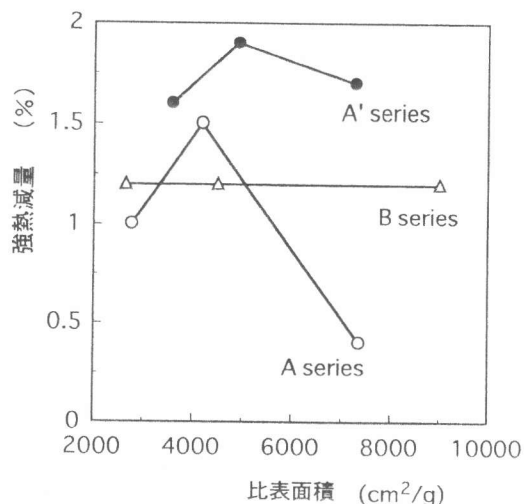


図-3 比表面積と強熱減量

4. モルタルの流動性と強度特性

4.1 モルタルの流動性

図-4に、モルタルのフローに及ぼすフライアッシュの比表面積の影響を示す。比表面積の増大とともにフローは大きくなるが、発電負荷や使用炭種によりその影響は異なっている。A'シリーズのように夜間操業により発電負荷を低下させた場合に採取したフライアッシュでも、採取位置（ホッパ位置）を考慮することにより、発電負荷の大きな場合に採取したものに比べ高い流動性改善効果を示している。

4.2 モルタルの強度特性

フライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度の経時変化の一例を図-5に示すが、圧縮強度の経時変化は、養生温度により異なった傾向を示している。養生温度の増大とともにフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度の増加量は大きくなっている。図-6にフライアッシュの置換率と圧縮強度との関係の一例を示すが、図-5と同様に圧縮強度はフライアッシュの置換率および養生温度により異なっている。全体の傾向としては材齢7日程度では置換率の増大とともに圧縮強度は低下するものの、長期材齢においてはフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度は無混和のものに比べ同等もしくは増大する場合もある。

図-7に養生温度とモルタルの圧縮強度との関係を示すが、フライアッシュを混和したモルタルの圧

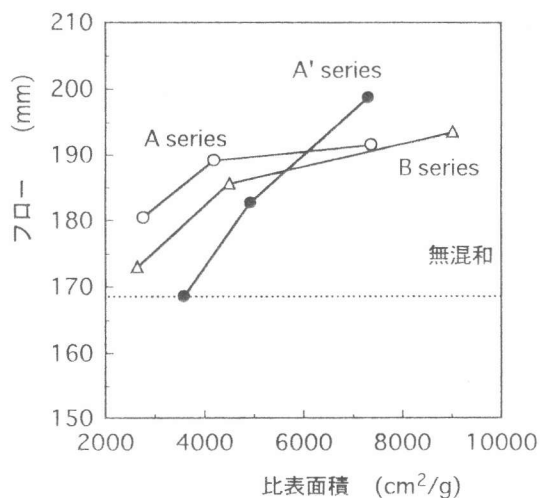


図-4 比表面積とモルタルのフロー

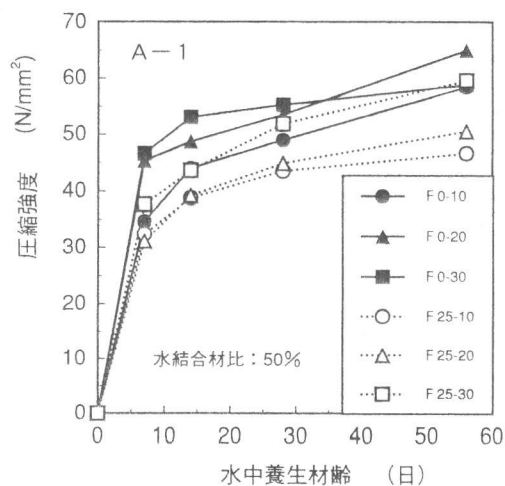


図-5 圧縮強度の経時変化

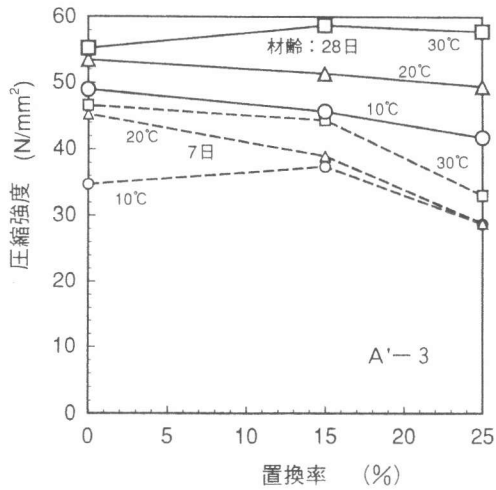


図-6 置換率の影響

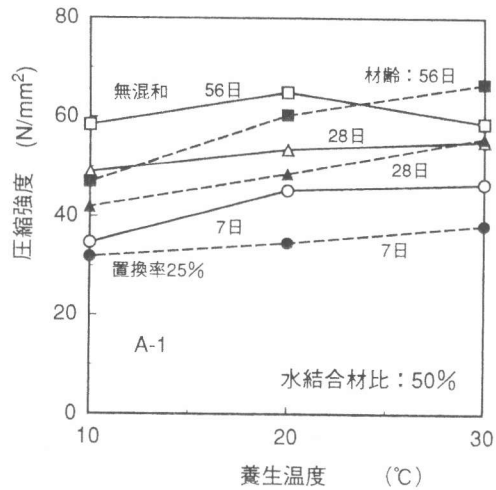


図-7 養生温度の影響

縮強度に及ぼす養生温度の影響は大きくなっている。フライアッシュを混和したモルタルの場合、温度が高くなればなるほど長期にわたって圧縮強度は増大しているが、無混和の場合、養生温度の影響は小さくなっている。

材齢28日におけるフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度を養生温度別に無混和のものとともに図-8に示す。養生温度が10°Cの場合にはフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度は無混和のものに比べ低下し、フライアッシュの種類の影響はほとんど認められない。養生温度20°Cの場合には、無混和のものに比べ低下しているものの、同一発電負荷のもとでは比表面積の増大とともに圧縮強度は増大している。養生温度30°Cの場合には、20°Cの場合と同様の傾向を示すが、無混和のものに比べ同等かそれ以上の圧縮強度を示している。発電負荷に比べ、フライアッシュを採取した集塵ホッパの位置の方がフライアッシュの品質に及ぼす影響は大きいものと考えられる。

フライアッシュを混和したモルタルのフローが無混和のモルタルのフローと同一となるように水結合材比を低減させた場合のモルタルの圧縮強度を図-9に示す。当然のことながら水結合材比の低減とともに圧縮強度は増

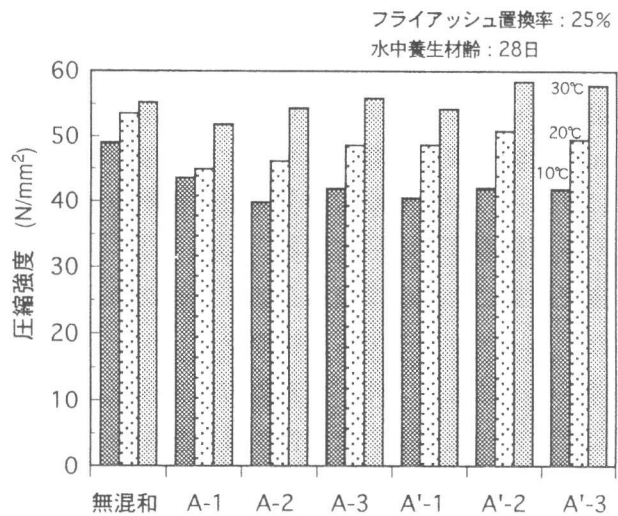


図-8 フライアッシュの種類の影響

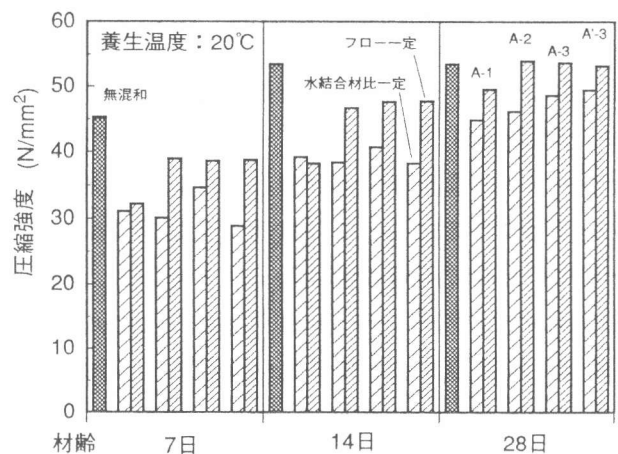


図-9 水結合材比低減効果

大し、材齢28日においてはフライアッシュの種類にかかわらず無混和のモルタルと同等の圧縮強度を示した。A-3フライアッシュを混和し、水結合材比を低減させたモルタルの圧縮強度に及ぼす養生温度の影響を図-10に示す。養生温度が30℃の場合には、無混和の場合よりも圧縮強度は著しく増大しており、水結合材比の差違によってフライアッシュの反応性は異なるものと考えられる。

活性度指数（無混和に対するフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度の比）の経時変化を図-11および図-12に示す。養生温度20℃の場合には材齢28日において全てのフライアッシュに対し活性度指数は80%を超えており、特にA-1およびA-2フライアッシュ以外のフライアッシュでは90%を超えている。養生温度が30℃の場合には、活性度指数は20℃の場合に比べ大きくなり、フライアッシュの影響も大きくなっている。特に比表面積の大きいフライアッシュを用いた場合には、材齢28日において活性度指数は100%を超えている。

養生温度20℃の場合の活性度指数に及ぼす水結合材比の影響を図-13に示す。材齢7日においては活性度指数は水結合材比の増大とともに低下しており、材齢の増加とともに水結合材比の影響は少なくなっている。

図-14に活性度指数に及ぼす比表面積の影響を示す。養生温度30℃の場合、初期材齢においては活性度指数はほとんど比表面積の影響を受けず、材齢28日において比表面積の増大とともに活性度指数は増大する傾向を示している。このように、フライアッシュの反応性は、フライアッシュの物理的特性のみでは説明できず、化学的性質についても検討を加える必要があると思われる。

フライアッシュの反応性に影響を及ぼす要因として、物理的特性を表す比表面積、化学的性質を表すガラス量、量を表す置換率が考えられるが、これらの特性値を組み合わせた指標（比表面積×ガラス量×置換率）について検討を加える。フライアッシュの反応性は、圧縮強度の絶対値ではなく、圧縮強度

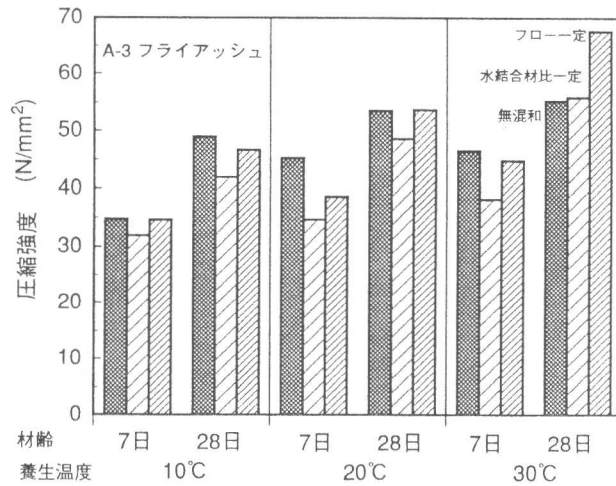


図-10 水結合材比低減効果と養生温度

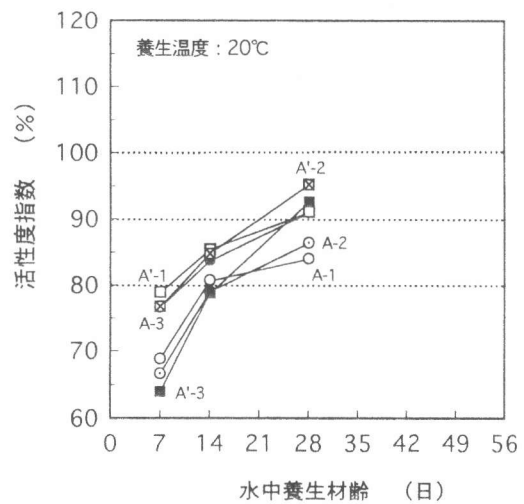


図-11 活性度指数の経時変化 (養生温度：20℃)

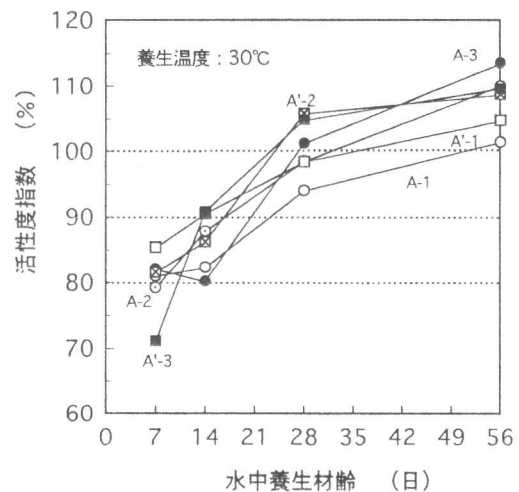


図-12 活性度指数の経時変化 (養生温度：30℃)

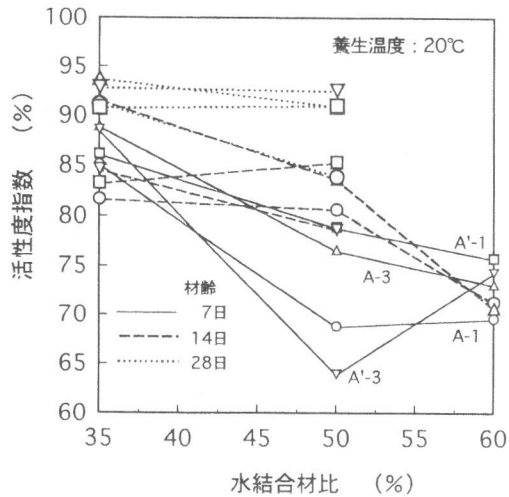


図-13 活性度指数と水結合材比

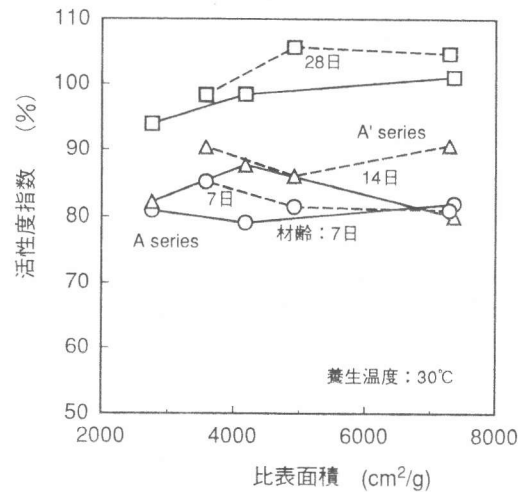


図-14 活性度指数と比表面積
(養生温度: 30°C)

の増加量に影響を及ぼすものと考えられるので、図-15に材齢7日から28日における圧縮強度の増加量と提案した指標との関係を養生温度毎に示す。養生温度10°Cの場合では、圧縮強度の増加量はほとんどフライアッシュの反応性に影響を受けないが、養生温度の増大とともに圧縮強度の増加量は反応性とともに増大している。しかし、提案した指標に示されるフライアッシュの特性値のみでは圧縮強度増加量を説明することができず、圧縮強度増加量の範囲やその他のフライアッシュの特性値についても検討を加える必要があると思われる。

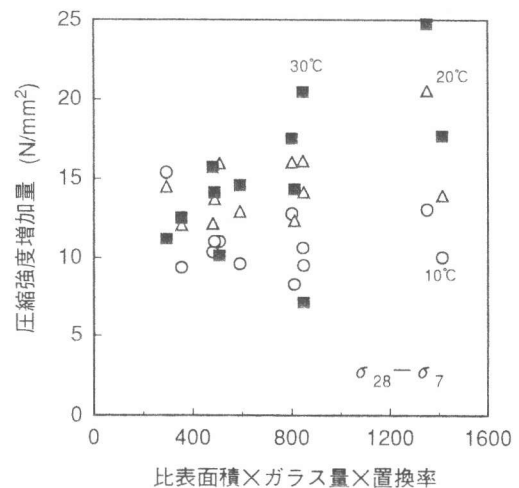


図-15 圧縮強度増加量の評価

5. まとめ

石炭火力発電所における電気集塵器の集塵ホップごとに採取したフライアッシュの特性は、集塵ホップの位置により異なり、コンクリート用混和材として適した特性を有するフライアッシュを採取することが可能であることを明らかにしたが、フライアッシュを混和したモルタルの流動性および強度特性を評価する方法については、フライアッシュの物理化学的特性を考慮して行う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Hemmings, R.T., Berry, E.E., Cornelius, B.J. and Scheetz, B.E.: Speciation in Size and Density Fractionated Fly Ash II. Characterization of a Low-Calcium, High-Iron Fly Ash Fly Ash and Coal Conversion By-Products Characterization, Utilization and Disposal III, Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol.86, pp.81-98, 1987
- [2] 長瀧重義、大賀宏行、三宅且仁: 分級したフライアッシュのコンクリート用混和材としての適用性、東京工業大学土木工学科研究報告、No. 35, pp. 17-31, 1985
- [3] 寺野宜成、福手勤、三浦幸治、石井光裕: 転圧コンクリートの締固め特性の改善に及ぼす分級フライアッシュの混入効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 1, pp. 1299-1304, 1994