

フライアッシュの吹付けコンクリートへの適用性に関する基礎的実験

Study on application of fly ash to shotcrete

北海道電力（株）総合研究所 ○正 員 林 透 (Toru Hayashi)
北海道電力（株）総合研究所 正 員 小野寺収 (Osamu Onodera)
（株）熊谷組技術研究所 正 員 石関嘉一 (Yoshikazu Ishizeki)
北電興業（株）土木部 正 員 齋藤敏樹 (Toshiki Saito)

1. まえがき

近年トンネルの施工において NATM 工法が主流となっており、吹付けコンクリートは重要な支保部材の一つである。ここ数年トンネルの大断面化などに伴い、吹付けコンクリートの信頼性向上が求められており、トンネル工事のコスト縮減や作業環境改善のための高品質化の開発が行われている。

また、吹付けコンクリートの使用材料であるセメントや細骨材の一部をフライアッシュで置換することで、吹付け時の跳返りロスの低減による使用材料の節約や粉塵量の低下が可能となり¹⁾²⁾、フライアッシュ使用による高付加価値化が期待される。しかしながら、既往の研究ではフライアッシュの品質とコンクリート性状との関係が十分に把握されていないことやフライアッシュコンクリートの欠点である初期強度発現の遅延の理由によって、吹付けコンクリートに大量に添加する事例がないのが現状である。

本研究は、フライアッシュの品質、置換率および置換方法が、コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に与える影響について検討した。また、吹付けコンクリートの圧送性に影響を与えるコンクリート中のモルタルレオロジーについて検討した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

使用材料を表-1、フライアッシュの品質を表-2、配合ケースを表-3に示す。

試験に用いたフライアッシュは、ブレン比表面積、フロー値比および活性度指数の異なるものを選定した。コンクリートは、単位結合材量 360kg/m³、水結合材比 60%以下、細骨材率 60%の条件において、スランプ 12±1.5cm および空気量 2±1.5%となるように配合した。フライアッシュの置換方法は、セメント置換、砂置換およびセメント・砂置換の3方法とし、セメント置換は質量比、砂置換は容積比とした。

2. 2 実験項目および実験方法

実験項目および実験方法を表-4に示す。凝結試験に使用したモルタルは、コンクリートの粗骨材を除いた配合を JIS A 5201 に規定されたモルタルミキサーで練混ぜた。急結剤添加時の練混ぜ時間は、供試体作製時間とモルタルの始発時間を考慮して高速攪拌で 10 秒間とした。

吹付けコンクリートのレオロジーを評価するために、コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルを用いて、レオメータ (HAAKE RS150) による測定を行なった。

表-1 使用材料

材 料	名 称	記 号	密 度 (kg/cm ³)	諸元・成分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	3.16	
細骨材	陸砂：厚真産	S	2.74	吸水率1.55, F.M 2.45
粗骨材	碎石：手稲産1505 (JIS規格品)	G	2.68	吸水率1.59, F.M 6.45
フライアッシュ	苫東厚真発電所2号機原粉	DR/BA	2.28	表-2 参照
		MS	2.30	
	苫東厚真発電所4号機原粉	OB-O	2.17	
		MO-O	2.23	
	〃 細粉	OB-F	2.28	
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	CA	2.57	主成分 カルシウムアルミネート系

表-2 フライアッシュの品質

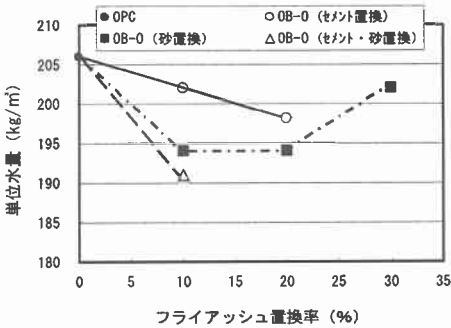
FA 種類	SiO ₂ (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数		備 考
						28日 (%)	91日 (%)	
DB/BA	60.2	0	2.3	3,030	98	79	86	原 粉
MS	56.6	0.03	1.6	3,050	103	83	92	
OB-O	65.5	0.04	0.6	2,650	104	79	93	
MO-O	55.7	0	3.6	3,200	102	76	92	
OB-F	62.2	0.04	1.1	3,770	111	89	103	分級細粉

表－3 配合ケース

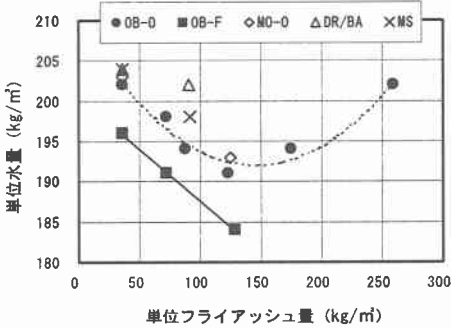
配 合 ケース	細骨材 種類	フライアッシュ 種類	結合材量 (kg/m ³)	セメント 置換率	砂 置換率	目標 スランプ (cm)	水結合材比 W/(C+Fc) (%)	細骨材率 (Fsv+Sv)/ (Fsv+Sv+Gv) (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
				Fc/(C+Fc) (%)	Fsv/ (Fsv+Sv) (%)				水 W	セメント C	フライアッシュ			細骨材 S	粗骨材 G
											F	Fc	Fs		
											(Fc+Fs)				
OPC	陸砂	—	360	0	0	12±1.5	57.2	60	206	360	—	—	—	1,085	708
OB0C10S0		OB-0		10	0		56.1	60	202	324	36	36	—	1,083	706
OB0C20S0				20	0		55.0	60	198	288	72	72	—	1,081	705
OB0C0S10				0	10		53.9	60	194	360	88	—	88	994	720
OB0C0S20				0	20		53.9	60	194	360	175	—	175	884	720
OB0C0S30				0	30		56.1	60	202	360	259	—	259	764	712
OB0C10S10				10	10		53.3	60	191	324	123	36	87	991	718
OBFC10S0				OB-F	10		0	54.4	60	196	324	36	36	—	1,094
OBFC20S0		20			0		53.1	60	191	288	72	72	—	1,095	714
OBFC10S10		10			10		51.1	60	184	324	129	36	93	1,003	726
MO0C10S0		MO-0		10	0		56.4	60	203	324	36	36	—	1,082	706
MO0C10S10				10	10		53.6	60	193	324	125	36	89	989	716
DRBAC10S0		DR/BA		10	0		56.7	60	204	324	36	36	—	1,081	705
DRBAC0S10				0	10		56.1	60	202	360	91	—	91	983	712
MSC10S0		MS		10	0		56.7	60	204	324	36	36	—	1,081	705
MSC0S10				0	10		55.0	60	198	360	92	—	92	988	716

表－4 実験項目および実験方法

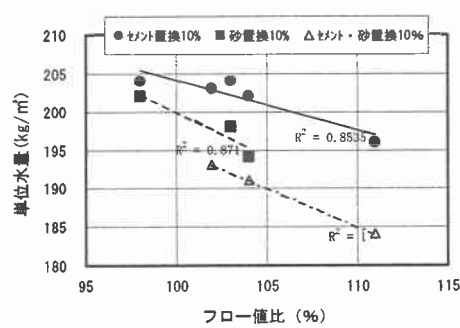
実験項目	実験方法
スランプ試験	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠
空気量試験	JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験法」に準拠
圧縮強度試験	JIS A 1128「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠 供試体寸法：φ10×20cm 測定材齢：7, 28日 養生方法：標準水中養生
凝結試験	JSCE-D 102「吹付けコンクリート用急結剤品質規格」付属書 貫入抵抗によるモルタルの凝結時間測定方法に準拠
塑性粘度試験	モルタル：フレッシュコンクリートを5mmふるいを用いたウェットスクリーニング 測定機器：HAAK レオメータRS150



図－1 フライアッシュ置換率と単位水量



図－2 単位フライアッシュ量と単位水量



図－3 フライアッシュフロー値比と単位水量

3. 実験結果

3. 1 フレッシュ性状に及ぼす影響

各配合方法におけるフライアッシュ置換率と単位水量の関係を図－1に示す。フライアッシュを置換したケースの単位水量は、配合方法によって異なるがフライアッシュを置換しないケース（以下 OPC）に比べ減少している。フライアッシュを砂置換したケースは、置換率10%まで単位水量が減少し、置換率20%では置換率10%と同じ単位水量となった。また、置換率30%のケースは、置換率10、20%に比べ単位水量が増加する傾向を示した。セメント置換およびセメント・砂置換についてもフライアッシュを置換することにより、単位水量が減少する傾向にある。

フライアッシュの種類毎の単位フライアッシュ量と単位水量の関係を図－2に示す。なお、フライアッシュ量については、セメント、砂およびセメント・砂置換を合わせて評価したものである。

フライアッシュ原粉 OB-0 を使用したケースの単位水量は、単位フライアッシュ量 123kg/m³（セメント10%、砂10%置換）のケースが最小となり、これを超える単位フライアッシュ量（砂置換20%、30%）になると単位水量は増加傾向を示している。フライアッシュ細粉 OB-F

については、原粉 OB-0 のどの置換ケースに比べても単位水量が小さくなる傾向を示し、単位フライアッシュ量 129kg/m^3 （セメント 10%、砂 10%置換）までは、単位量の増加に伴い単位水量が減少した。

図－1、2より単位水量は、フライアッシュを置換するとフライアッシュのボールベアリング効果により、一定の粉体量まで減少するが、一定の粉体量を超えると比表面積の増加により単位水量が増加するものと推察される。また、フライアッシュ原粉と細粉を比較すると原粉より減水効果が高い結果となった。

図－2において、置換方法、置換率が同じでもフライアッシュの種類によって単位水量が異なった。このため、フライアッシュのフロー値比と単位水量について検討した結果を図－3に示す。単位水量は、置換方法によって異なるが、フロー値比が大きくなるにしたがって減少する傾向にある。

3. 2 強度特性に及ぼす影響

(1) 圧縮強度

各ケースの吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を図－4に示す。フライアッシュをセメント置換したケースの圧縮強度は、材齢 7, 28 日いずれも OPC より低下し、砂置換あるいはセメント・砂置換したケースの圧縮強度は、OPC より大きくなった。

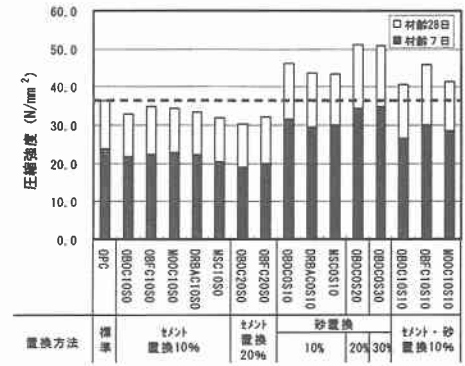
置換方法の異なるフライアッシュ置換率と圧縮強度の関係を図－5に示す。フライアッシュをセメント置換したケースは、置換率が増加するに従い圧縮強度は減少する傾向にあるが、フライアッシュ細粉で置換したケースは、原粉に比べ圧縮強度の低下は少ない。砂置換のケースは、置換率 20%までは置換率の増加に伴い圧縮強度は増大する傾向を示し、置換率 30%では置換率 20%と同程度の圧縮強度を示した。また、結合材・砂置換率 10%の圧縮強度は、OPC に比べ大きくなり、セメント置換および砂置換の中間程度となった。

図－6にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度は、セメント水比が増加するほど増大する傾向を示し直線的な関係が認められ、フライアッシュを用いた吹付けコンクリートについてもセメント水比法則が成立すると考えられる。

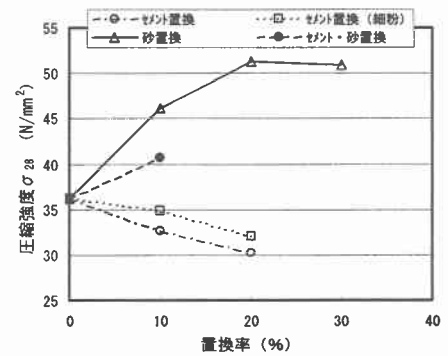
以上の結果から吹付けコンクリートの圧縮強度は、セメント水比の影響を受け、単位セメント量が一定の場合は、単位水量の増加に伴い圧縮強度が低下する。また、フライアッシュを砂置換すると単位水量が増加しても強度低下が見られない。これは、コンクリートの密実化とポゾラン活性の影響を受けたものと推察される。

(2) 凝結性状

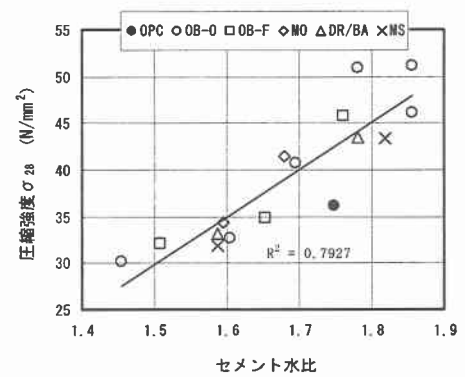
急結剤添加率の凝結への影響を把握するために行った実験結果を図－7に示す。OPC の終結時間は、急結剤添加率を7%から8%にすると10分と大きく短縮されたが、8%から9%での短縮時間は、1分程度と小さかった。原粉 OB-0 でセメント・砂 10%置換したケースの終結時間は、OPC に比べ短かつ急結剤添加率の影響が小さい。また、OB-0 の砂置換率 20%と細粉 OB-F をセメント・砂 10%置換したケースは、上記ケースより終結時間が短く



図－4 圧縮強度試験結果



図－5 フライアッシュ置換率と圧縮強度



図－6 セメント水比と圧縮強度

5分程度短縮された。

本実験においては、配合による相違を明確にするため、以下急結剤添加率を 9%として全ケースの凝結試験を行った。

水粉体質量比と終結時間を図－8に示す。OPC およびセメント置換したケースの凝結時間は、15分前後であり、砂置換、セメント・砂置換のケースは5～10分程度となった。凝結時間は、水粉体比の増加に伴い遅くなる傾向が示され、急結剤を使用した凝結時間は、コンクリートの圧縮強度と同様に水和反応の影響が大きいと考えられる。このことから、フライアッシュを砂置換またはセメント・砂置換したケースは、OPC に比べ単位水量が減少し急結剤添加量を削減できるものと考えられる。また、

終結時間が著しく遅い配合は吹付け時のだれ、剥落および初期強度の低下の原因になるため、急結剤の増加などの処置が必要となると考えられる。

3. 3 塑性粘度に及ぼす影響

吹付け時の圧送性および吐出量に影響を及ぼすモルタルの塑性粘度について検討を行った。

フライアッシュ置換率と塑性粘度の関係を図-9に示す。フライアッシュをセメント置換したケースの塑性粘度は、置換率10%で最小となった。一方、砂置換およびセメント・砂置換の場合は、置換率の増加に伴い塑性粘度が増大する傾向を示す。これらは、単位水量の減少と単位粉体容積の増加が起因するものと考えられる。

水粉体容積比と塑性粘度の関係を図-10に示す。塑性粘度は、水粉体容積比の増加に伴い塑性粘度は減少し、相関性が高いことがわかった。しかし、使用材料の種類（混和材、砂の品質）によって水粉体容積比と塑性粘度は変化すると予想されたため、吹付け時の圧送限界や吹付け性状の最適な塑性粘度を把握し、これを簡易的に評価できる試験が必要と考えられる。

4. あとがき

フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの各種実験結果から以下の知見を得た。

- (1) フライアッシュに置換した吹付けコンクリートは、単位フライアッシュ量によって単位水量が変化する傾向を示した。また、単位水量は、置換方法毎にフライアッシュのフロー値比と相関性が高いことがわかった。
- (2) 吹付けコンクリートの圧縮強度は、フライアッシュを砂置換すると置換率20%まで増大する傾向にある。また、フライアッシュ細粉を使用した場合、原粉に比べ強度が増大する傾向を示した。
- (3) 凝結試験による終結時間は、フライアッシュを砂置換することによって短縮し、急結剤量を低減できると考えられる。
- (4) ウェットスクリーニングモルタルの塑性粘度は、水粉体容積比と高い相関が得られた。

今後は、これら室内試験の結果を基に現場試験を実施し、吹付け時の圧送性、吐出量、リバウンド、粉塵量などを検討する予定である。

参考文献

1) 飯島俊荘、樋野和俊、斉藤直、新谷登、松田敦夫：石炭灰原粉の吹付けコンクリートの適用性について、土木学会第54回年次学術講演会、v-489、pp.978-979、1999。
2) 富加見徳治、石井光裕、油野邦弘、松野義治：分級フライアッシュ（JIS I種）のトンネル吹付けコンクリートへの適用、電力土木、No288、pp-84-88、2000.7。
3) 松田敦夫、小西正郎、廣中哲也、斉藤直、樋野和俊：石炭灰原粉の吹付けコンクリートの配合選定、土木学会第55回年次学術講演会、v-212、pp.424-425、2000。

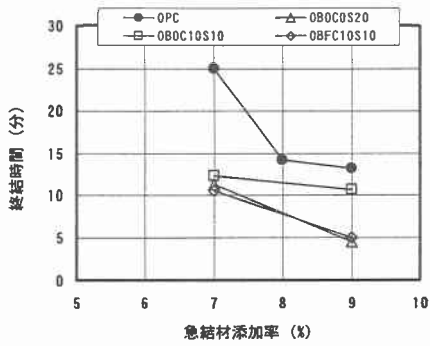


図-7 急結剤添加率と終結時間

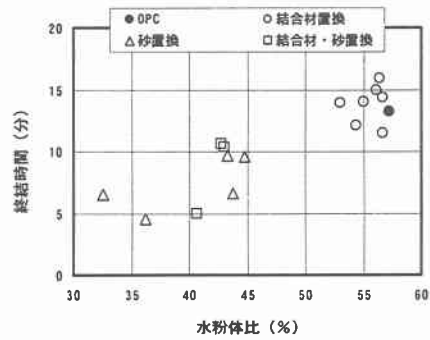


図-8 水粉体比と終結時間

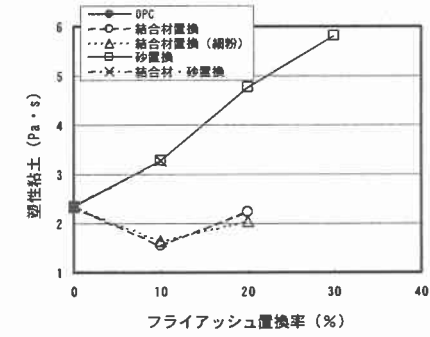


図-9 フライアッシュ置換率と塑性粘度

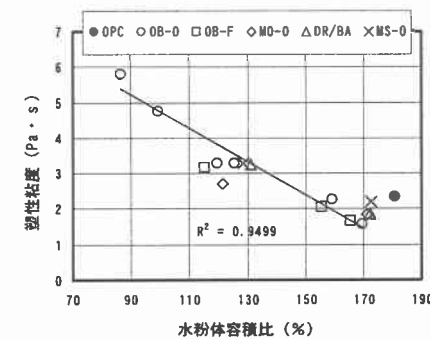


図-10 水粉体比と塑性粘度

4) 石関嘉一、駒田憲司、西村次男、魚本健人：使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響、日本コンクリート工学会、コンクリート工学会年次論文集、Vol. 22、No2、pp-1387-1392、2000。