

論文 フライアッシュの吹付けコンクリートへの適用に関する研究

林 透^{*1}・田辺 大次郎^{*2}・齋藤 敏樹^{*3}・石関 嘉一^{*4}

要旨：フライアッシュの大量使用の観点から，フライアッシュの品質，置換率および置換方法が，吹付けコンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に及ぼす影響を室内試験において検討した。その結果，吹付けコンクリートの単位水量はフライアッシュの種類および単位フライアッシュ量によって異なり，ある単位フライアッシュ量までは減少する傾向を示し，フライアッシュのフロー値比と相関性が高いことが確認できた。塑性粘度は水粉体容積比の影響を大きく受け，円筒貫入計により簡易評価が可能であると考えられ，強度発現特性はフライアッシュの置換率や置換方法により異なることが明らかとなった。

キーワード：フライアッシュ，吹付けコンクリート，フレッシュ性状，硬化性状

1. はじめに

近年，トンネルの施工法は NATM 工法が標準となっており，吹付けコンクリートは重要な支保部材の役割を担っている。また，ここ数年トンネルの大断面化などに伴って，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を目指した開発が行われている。

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(以下，FA と言う)で置換することにより，吹付け時の跳ね返りロス¹⁾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⁾，FA 使用による高付加価値化が期待されると報告されている。しかし，既往の研究では FA 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 FA コンクリートの欠点である初期強度発現の遅延によって，吹付けコンクリートに FA を大量に添加する事例が少ないのが現状である。

吹付けコンクリートに求められる特性には，フレッシュ性状(施工性確保のための練り上がり性状)，硬化性状(凝結性，強度)および施工性

(跳ね返り，粉塵，圧送性)等がある。

本報は，FA の大量使用を目的として，FA の品質，置換率および置換方法が，ベースコンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に与える影響を室内試験において検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に，FA の品質を表-2 に，FA 品質の影響等を検討する配合ケース 1(以下，ケース 1 と言う)を表-3 に，FA 原粉を使用して高品質化を検討する配合ケース 2(以下，ケース 2 と言う)を表-4 にそれぞれ示す。

表-3 に示すケース 1 のコンクリートは，単位結合材量 360kg/m^3 ，水結合材比 60%以下，細骨材率 60%の条件において，スランプ $12 \pm 1.5\text{cm}$ および空気量 $2 \pm 1.5\%$ を満足するように求めた。

表-4 に示すケース 2 のコンクリートは，単位結合材量および細骨材率の条件をケース 1 と同等にし，そのうち FA を置換しないで粉塵低減剤を添加した場合(以下，OPC-U と言う)は，

*1 北海道電力(株) 総合研究所 土木グループ (正会員)

*2 (株)熊谷組 土木事業本部 土木技術部副部長 工博 (正会員)

*3 北電総合設計(株) 企画営業部 技術管理室 (正会員)

*4 (株)ブリヂストン 土木・建築資材事業本部 土木・海洋資材開発部 (正会員)

スランプ 12±1.5cm, 空気量 2±1.5%を満足するように, また, FA 置換および FA を置換し高性能減水剤(以下 SP という)を添加した場合は, 粘性が増大するためスランプ 18±1.5cm, 空気量 2±1.5%を満足するように求めた。FA の置換方法は, セメント置換(以下, C 置換と言う), 細骨材置換(以下, S 置換と言う)およびセメントと細骨材の両方を置換(以下, CS 置換と言う)の3方法とし, C 置換は質量比, S 置換は容積比とした。(FA 置換の略号は表-3 および表-4 参照)

表-1 使用材料

材 料	名 称	記 号	諸 元・成 分	
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度3.16g/cm ³ 比表面積3.370cm ² /g	
細骨材	陸砂：厚真産	S	CT	密度2.74g/cm ³ , 吸水率1.55%, F.M 2.45
	砕砂1：手稲産			密度2.66g/cm ³ , 吸水率2.01%, F.M 2.83
	砕砂2：京極産			密度2.66g/cm ³ , 吸水率2.59%, F.M 2.81
粗骨材	砕石：手稲産1505 (JIS規格品)	G	密度2.86g/cm ³ , 吸水率1.59%, F.M 6.45	
フライッシュ	苫東厚真発電所4号機原粉	FA1	表-2 参照	
	“ 細粉	FA2		
	“ 細粉	FA4		
	“ 細粉	FA5		
	苫東厚真発電所2号機原粉	FA3		
混和材	高性能減水剤	SP	ポリエチレングリコール系高分子化合物	
	粉塵低減剤	U	セルロース系	
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	CA	カルシウムアルミネート系	

表-2 FA 品質

FA 種類	密 度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	70-値比 (%)	活性度指数	
					28日 (%)	91日 (%)
FA1	2.17	0.6	2,650	104	79	93
FA2	2.28	1.1	3,770	111	89	103
FA3	2.23	3.6	3,200	102	76	92
FA4	2.28	2.3	3,030	98	79	86
FA5	2.30	1.6	3,050	103	83	92

表-3 配合ケース 1

配 合 ケース	細骨材 種類	結合材量 B=C+FAc (kg/m ³)	FA置換の略号	セメント置換率 (質量比) (%)	細骨材置換率 (容積比) (%)	目標 スランプ (cm)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						フレッシュ性状			
									水		セメント		フライッシュ		細骨材	粗骨材	スランプ (cm)	空気量 (%)
									W	C	FAc*	FAs*	S	G				
OPC	陸砂	360	—	0	0	12±1.5	57.2	60	206	360	—	—	1,085	708	12.0	3.0		
FA1C1			C1	10	0		56.1	60	202	324	36	—	1,083	706	11.0	2.5		
FA1C2			C2	20	0		55.0	60	198	288	72	—	1,081	705	13.0	2.4		
FA1S1			S1	0	10		53.9	60	194	360	—	88	994	720	12.5	2.3		
FA1S2			S2	0	20		53.9	60	194	360	—	175	884	720	12.0	2.1		
FA1S3			S3	0	30		56.1	60	202	360	—	259	764	712	12.0	2.3		
FA1CS1			CS1	10	10		53.3	60	191	324	36	87	991	718	12.0	2.2		
FA2C1			C1	10	0		54.4	60	196	324	36	—	1,094	714	11.0	2.4		
FA2C2			C2	20	0		53.1	60	191	288	72	—	1,095	714	12.5	2.2		
FA2CS1			CS1	10	10		51.1	60	184	324	36	93	1,003	726	11.5	2.0		
FA3C1			C1	10	0		56.4	60	203	324	36	—	1,082	706	11.0	2.4		
FA3CS1			CS1	10	10		53.6	60	193	324	36	89	989	716	11.5	2.3		
FA4C1			C1	10	0		56.7	60	204	324	36	—	1,081	705	12.5	2.2		
FA4S1			S1	0	10		56.1	60	202	360	—	91	983	712	11.5	2.0		
FA5C1			C1	10	0		56.7	60	204	324	36	—	1,081	705	11.0	2.0		
FA5S1			S1	0	10		55.0	60	198	360	—	92	988	716	12.0	2.1		
CTFA1S1			砕砂1	S1	0		10	57.8	60	208	360	—	86	945	705	11.0	1.6	
COFA1S1			砕砂2	S1	0		10	57.8	60	208	360	—	86	945	705	12.0	1.7	

※ FAc：セメント置換による量, FAs：細骨材置換による量

表-4 配合ケース 2

配 合 ケース	細骨材 種類	結合材量 B=C+FAc (kg/m ³)	FA置換の略号	セメント置換率 (質量比) (%)	細骨材置換率 (容積比) (%)	目標 スランプ (cm)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						混和剤 B*U, B*SP		フレッシュ性状			
									水		セメント		フライッシュ		細骨材	粗骨材	U (%)	SP (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
									W	C	FAc*	FAs*	S	G						
OPC-U	陸砂	360	—	0	0	12±1.5	61	60	220	360	—	—	1058	690	0.10	—	12.0	3.5		
FA1S2SP			S2	0	20	18±1.5	50	60	180	360	—	179	899	733	—	1.05	18.0	2.6		
FA1S3			S3	0	30		60	60	216	360	—	254	745	694	—	—	18.5	1.3		
FA1S3SP			S3	0	30		50	60	180	360	—	268	787	733	—	1.17	17.0	2.3		
FA1CS2			CS2	20	10		56	60	200	288	72	85	967	700	—	—	18.0	1.1		
FA1CS2SP			CS2	20	10		50	60	180	288	72	88	996	722	—	0.95	18.0	2.7		
FA1CS3			CS3	30	10		54	60	196	252	108	85	965	699	—	—	18.0	1.0		

※ FAc：セメント置換による量, FAs：細骨材置換による量

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-5に示す。

凝結試験に使用したモルタルは、JIS A 5201に規定されたモルタルミキサで練り混ぜた。急結剤添加時の練り混ぜ時間は、供試体作製時間とモルタルの凝結始発時間を考慮し高速攪拌で10秒間とした。ベースコンクリートの塑性粘度は、コンクリートをウエ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)により測定した。また、塑性粘度を簡易的に評価する方法として、高流動コンクリートの材料分離抵抗性を評価する円筒貫入計³⁾⁴⁾(ϕ 7mmの孔が4方向に7個空いた ϕ 30×h275mmの円筒容器)を用いた。測定方法は、5Lのビーカーにコンクリートを入れ、円筒貫入計を10秒間挿入した時、内部に流入したモルタル量を計測した。なお、計測値は3回の平均値とし、モルタル量を流入モルタル値(mm)で表した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状に及ぼす影響

(1) 単位水量

ケース1の各置換方法におけるFA置換率と単位水量の関係を図-1に示す。なお、本実験では単位結合材量および細骨材率が一定の条件において同一スランプが得られる単位水量を求めた。

FAを置換した場合の単位水量は、置換方法によって異なったが、全般的にFAを置換しない場合(以下、OPCと言う)に比べ減少した。

FAをS置換した場合の単位水量と置換率の関係は、下に凸の傾向を示し、置換率10%および20%は同程度の単位水量となり、置換率30%では、置換率10%および20%に比べ単位水量が増加する結果であった。また、C置換およびCS置換の場合は、本実験条件ではFAを置換することにより単位水量が減少する傾向を示した。

FAの種類毎の単位FA量と単位水量の関係を図-2に示す。なお、単位FA量は、C置換、S置換およびCS置換を合わせて評価したもので

表-5 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に準拠した
空気量試験	JIS A 1128に準拠した
圧縮強度試験	JIS A 1128に準拠した 供試体寸法： ϕ 10×20cm 測定材齢：7, 28日 養生方法：標準水中養生
凝結試験	JSCE-D 102に準拠
塑性粘度試験	試料：フレッシュコンクリートを5mmふるいを用いてウエットスクリーニングしたモルタル 測定機器：HAAKE レオメータRS150
コンクリート粘度指標測定	円筒貫入計を使用

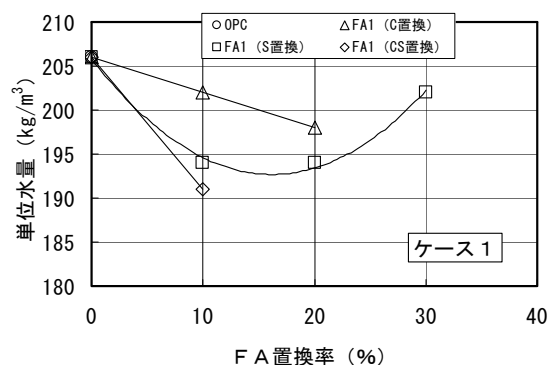


図-1 FA置換率と単位水量

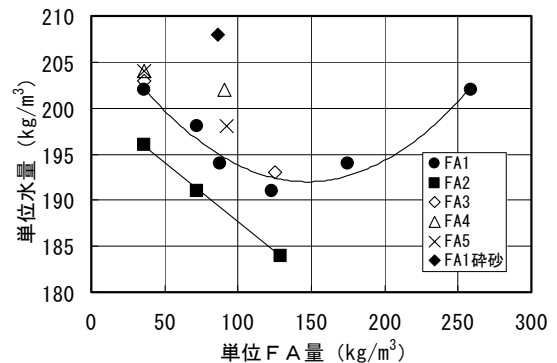


図-2 単位FA量と単位水量

ある。

FA1(原粉)を使用した場合の単位水量は、単位FA量129kg/m³(FA置換CS1)が最小となり、これを超える単位FA量(FA置換S2,S3)になると単位水量は増加する傾向となった。FA2(細粉)を使用した場合は、同一単位FA量で比較すると全てのFAの中で最も単位水量が少なく、単位FA量129kg/m³(FA置換CS1)までは、単位FA量の増加に従い単位水量は減少する傾向であった。

以上により、単位水量はFAを置換するとFA

のボールベアリング効果により一定の粉体量までは減少するが、その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。なお、FA 細粉は原粉より減水効果が高い結果となった。

図-2 において、FA 置換の方法および置換率が同じでも FA の種類によって単位水量が異なる結果であった。そこで、FA 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。

図-3 より、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従い減少する傾向が認められた。また、置換方法により区分すると相関性が高く、事前にフロー値比の相違する FA を用いて配合試験を行うことで単位水量の推定が可能と考えられる。

(2) 塑性粘度

既往の研究においては、吹付けコンクリート中の粉体量によって塑性粘度が変化し、吹付け時の圧送性や吐出量およびリバウンド等に影響するとの報告⁵⁾がなされている。

水粉体容積比と塑性粘度の関係を図-4 に示す。図中の近似線は、スランプごとに評価したものである。

塑性粘度は、水粉体容積比の増加に従い減少する傾向が示され、スランプによって同一水粉体容積比における塑性粘度が異なることが認められる。また、スランプごとに水粉体容積比と塑性粘度の相関性は高く、FA 品質による影響は小さいと考えられる。

C 置換の場合は OPC に比べ、CS 置換(CS1)の場合は S 置換(S1)に比べ、水粉体容積比が減少しているが塑性粘度は同程度以下となり、FA の持つボールベアリング効果が発揮されたと考えられる。S 置換および SP を添加した場合など塑性粘度が大きい配合は粉塵低減効果を期待できる可能性があるが、圧送性などの施工性を検討する必要がある。

塑性粘度の簡易評価方法として、流入モルタル値の検討を行った。

水粉体容積比と流入モルタル値の関係を図-

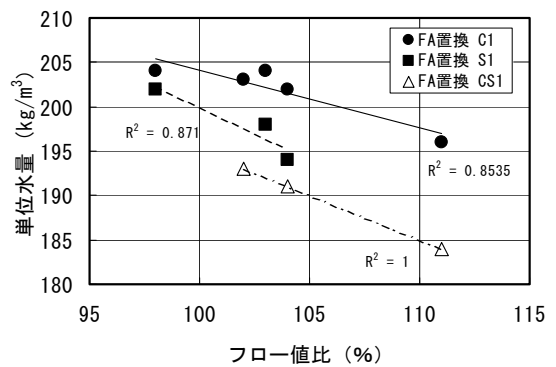


図-3 FA フロー値と単位水量

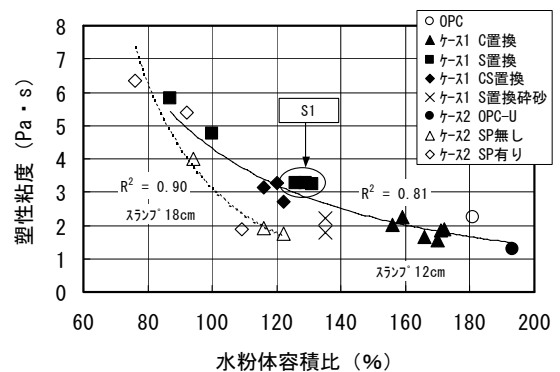


図-4 水粉体容積比と塑性粘度

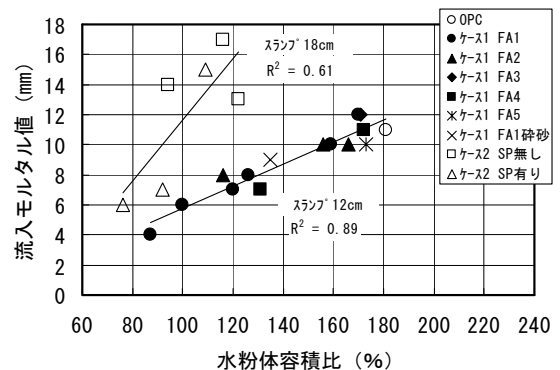


図-5 水粉体容積比と流入モルタル値

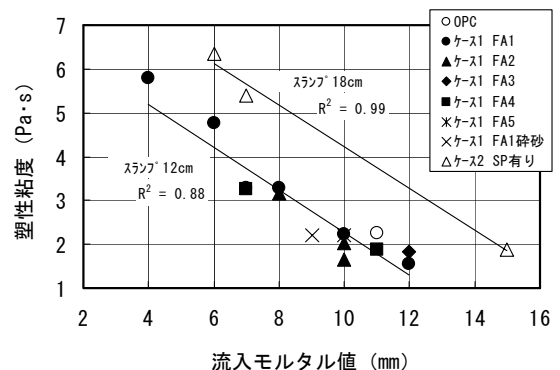


図-6 流入モルタル値と塑性粘度

5 に、流入モルタル値と塑性粘度の関係を図-6 に示す。

図-5 より、ケース 2 の SP 無しの場合ばらつ

きがあるものの、水粉体容積比の増加に従い流入モルタル値は大きくなる傾向を示し、スランブごとに区分されることが認められた。

図-6 より、流入モルタル値が大きくなるに従い塑性粘度は小さくなる傾向を示し、スランブごとに区分するとその相関性は高いものであった。また、流入モルタル値は粉体および細骨材の種類の影響が少ないことが認められた。

以上により、流入モルタル値はコンクリート中のモルタルの塑性粘度を表すものと考えられ、吹付けコンクリートの塑性粘度を評価できることが示唆された。

3.2 硬化性状に与える影響

(1) 圧縮強度

ケース 1 の各置換方法における FA 置換率と圧縮強度(材齢 28 日)の関係を図-7 に示す。

FA を C 置換した場合、置換率が増加するに従い水結合材比が小さくなるにも拘わらず圧縮強度は小さくなる傾向が示された。ただし、FA 細粉で置換した場合は、FA 原粉と比較すると圧縮強度の低下が小さい。これは、FA 原粉より FA 細粉で置換した方が水結合材比が小さくなることが一因と考えられる。

S 置換した場合、置換率 20%までは圧縮強度が大きくなる傾向を示し、置換率 30%では置換率 20%と同程度の圧縮強度となった。S 置換の場合は単位水量が減少し水セメント比が小さくなるだけでなく、単位セメント量 $360\text{kg}/\text{m}^3$ の他に FA を S 置換した分、粉体量が増加することになり、水粉体比が小さくなったことが圧縮強度増加の一因と考えられる。

CS 置換した場合、圧縮強度は OPC より大きくなり、C 置換と S 置換の中間程度の圧縮強度であった。

セメント水比と圧縮強度(材齢 28 日)の関係を図-8 に示す。

圧縮強度は、セメント水比が増加するに従い大きくなる傾向を示し、スランブごとに区分するとほぼ直線的な関係が認められた。すなわち、FA を用いた吹付けコンクリートの圧縮強度は、

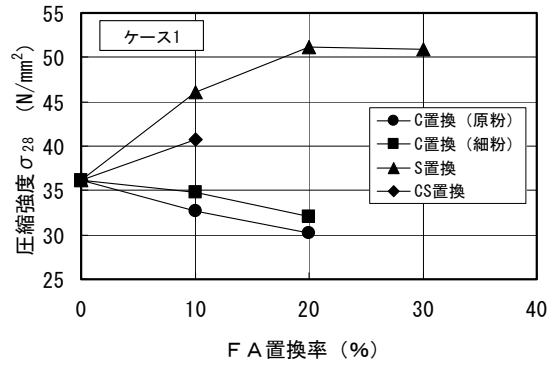


図-7 FA 置換率と圧縮強度

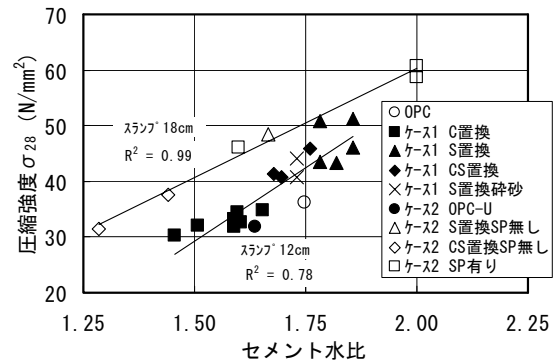


図-8 セメント水比と圧縮強度

セメント水比の影響が大きく、支配的であると判断された。したがって、単位セメント量が一定の場合は、単位水量の増加(水セメント比の増加)に従い圧縮強度は低下するものと推察される。

一方、FA を S 置換した場合、OPC より単位水量が増加し水セメント比が大きくなっても、S3 までの FA 置換であれば、OPC と同等以上の圧縮強度となった。これは、FA により粉体量が増加し水粉体比が小さくなり、FA のポズラン効果によりコンクリートが密実化されたことが一因と考えられる。

したがって、FA を S 置換により使用すると OPC より大きい水セメント比であっても圧縮強度は十分に発現することから、単位セメント量を削減できる可能性があり、コスト低減が期待できると考えられる。

(2) 凝結時間

本実験における凝結試験は、配合条件の相違を明確にするために急結剤添加率を結合材質量 (C+FAc) の 9% として実施した。

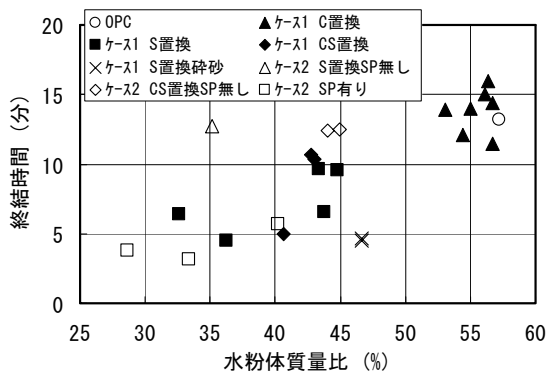


図-9 水粉体質量比と終結時間

水粉体質量比($W/(C+FAc+FAs)$)と終結時間の関係を図-9に示す。

図-9より、若干のばらつきがあるものの、水粉体質量比が減少するに従い終結時間は早くなる傾向が示された。すなわち、急結剤を使用した場合の凝結においても、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。ケース2SP無しの場合に水粉体質量比が小さくても終結時間が早くならなかったのは、スランブが18cmのため単位水量が多くなり水セメント比が大きくなったことが一因と考えられる。

OPCとFA置換の終結時間を比較すると、C置換の場合はOPCと同程度であるが、S置換、CS置換およびSP有りの場合はOPCと同程度かそれ以下の終結時間であった。したがって、単位水量がOPCより減少するS置換およびCS置換の場合、終結時間が早いため急結剤添加量を削減できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本検討で得られたことを以下にまとめる。

- (1) 吹付けコンクリートにFAを用いた場合は、FAの種類および単位FA量によって単位水量が異なるが、ある単位FA量までは単位水量が減少するものであった。また、単位水量はFAのフロー値比との相関が高く、施工時にFAの品質が異なってもフロー値比により単位水量を推定できることが示唆された。
- (2) 塑性粘度はスランブによって異なるが、水

粉体容積比の増加に従い減少する傾向が示され、塑性粘度に与えるFA品質の影響は小さいと判断された。また、塑性粘度は円筒貫入計による流入モルタル値により簡易的に評価できることが示唆された。

- (3) 圧縮強度は、同一スランブにおいてFAをC置換した場合OPCより低い強度となったが、S置換およびCS置換ではOPCより高い強度となり、スランブを増大させてもSPを使用することでOPCと同等以上の強度が得られた。また、圧縮強度はセメント水比との相関性が認められた。
- (4) 凝結試験による終結時間は、水和反応による影響が大きく、水粉体質量比との相関性が認められた。
- (5) FAを吹付けコンクリートに用いた場合、置換方法によっては単位セメント量の削減および急結剤添加量の削減が可能と考えられ、コスト低減が期待できることが示唆された。

参考文献

- 1) 飯島俊荘他：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) 富加見徳治他：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、電力士木、No.288, pp-84-88, 2000.7.
- 3) 松田敏他：円筒貫入計による高流動コンクリートのコンステンシー評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp511~512, 1994.9
- 4) 石田良平他：円筒貫入計およびミキサ電力値による高流動コンクリートのコンステンシー評価、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp455~456, 1995.9
- 5) 石関嘉一他；使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.109 - 114, 2000