論文　フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの特性に関する研究

田辺　大次郎[*1]・林　透[*2]・堀川　直機[*3]・石関　嘉一[*4]

要旨：環境保全の観点からフライアッシュを吹付けコンクリート材料として有効利用するために，実際の現場で施工実験を実施し，フライアッシュの使用量（0～260kg／m^3）が吹付けコンクリートの特性に及ぼす影響について検討した。その結果，フライアッシュを使用した，総粉体量の多いコンクリートは吐出量が多くなり，リバンド率ならびに粉塵量が少なくなることが明らかになった。また，フライアッシュの使用量により吹付け時における圧送圧力状態が大きく異なるなり，圧送圧力の変動係数は，コンクリート配合に関係なく，コンクリート中のペースト容積比と高い相関性が認められることが明らかになった。

キーワード：フライアッシュ，吹付けコンクリート

1. はじめに

石炭火力発電所から産出されるフライアッシュは，今後増加することが予想されており，環境保全の観点からさらなる有効利用が期待されている。

こうした背景の中，吹付けコンクリートへの適用も有力な利用分野として注目されており，これまでにも数例の研究がなされている。その結果，吹付けコンクリートの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により，吹付け時の跳ね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ることが明らかにされている[1)]。

しかしながら，既往の研究では，フライアッシュの使用量と吹付けコンクリートとしての性状との関係が十分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とされている初期強度発現の遅延によって，吹付けコンクリートにフライアッシュを大量に使用された事例がないのが現状である。

本稿では，実際の現場で施工実験を実施し，フライアッシュを使用したコンクリートの特性について検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 実験目的

本実験の目的は，実施工に用いる実機プラントならびに一体型吹付けシステムを用いて，セメントならびに粗骨材にフライアッシュを置換した12種類の吹付けコンクリート配合について性能比較を行い，フライアッシュの使用量（0～260kg／m^3）が吹付けコンクリートの特性に及ぼす影響について検討することである。なお，実験を実施したのは，北海道電力(株)が建設中の京極発電所新設工事のうち土木本工事（第３工区）の放水路トンネル（延長Ｌ=2483m）である。

2.2 吹付け条件

吹付け実験を実施するための基本的な条件は，これまでの吹付け実験等を参考に以下のように定めた。

①吹付け機：空気搬送式吹付け機（湿式 AL-285）
②吐出量：12m^3/hr（回転数を一定）
③急結剤添加機：添加率 7%（回転数を一定）

2.3 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を**表－１**に，今回使用したフライアッシュの品質を**表－２**に示す。また，コンクリート配合を**表－３**に示す。

*1 (株)熊谷組　土木事業本部　土木技術部技術第１Ｇ副部長　博士（工学）　(正会員)
*2 北海道電力(株)　総合研究所　土木グループ　(正会員)
*3 (株)熊谷組　北海道支店　京極作業所　副所長
*4 (株)ブリジストン　土木･建築資材事業本部　土木・海洋資材開発部　(正会員)

フライアッシュを使用した配合は，細骨材容積およびセメント質量の一部を置換した配合とした。ただし，今回は，フライアッシュを多量に使用したコンクリートの特性を検討する観点から，主に細骨材置換した配合を対象としている。比較の対象として，フライアッシュを使用していない標準的な配合 N と粉塵低減を目的とし，増粘剤を用いた配合 NSPSL を用いた。

基本的な配合条件として，単位結合材量は 360kg/m^3，細骨材率は 60%，空気量は 2.0±1.5% とした。スランプについては，粘性が増加することにより圧送性が悪くなることが予想される配合は 21±1.5cm，その他の配合については 12±1.5cm とした。

表－１　使用材料

材　料	記号	仕　　様	密度 (g/cm^3)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
水	W	地下水	1.00
細骨材	S	厚真産陸砂	2.77
粗骨材	G	虻田郡京極町春日産 最大寸法：15㎜	2.70
フライアッシュ	FA	苫東厚真発電所4号機細粉 （JIS A 6201 Ⅱ種）	2.16
高性能減水剤	SP	ポリエチレングリコールエステル系高分子化合物	－
粉塵低減剤	SL	セルロース系化合物	－
急結剤	－	カルシウムサルフォアミネート鉱物系	－

表－２　フライアッシュの品質

密　度 (kg/cm^3)	SiO_2 (%)	湿　分 (%)	強熱減量 (%)	ブレーン比表面積 (cm^2/g)	フロー値比 (%)	活性度指数（%）	
						28日	91日
2.16	70.1	0.04	1.7	3,780	103	82	92

表－３　コンクリート配合

配合No. 配合記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水結合材比 W/(C+Fc) (%)	水粉体比 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	C置換 S置換 (%)	単位量 (kg/m^3) 水 W	セメント C	フライアッシュF Fc	フライアッシュF Fs	フライアッシュF F=Fc+Fs	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	混和剤 SL
No.1 N	12±1.5	2.0±1.5	58.5	58.5	60.0	－ －	211	360	－	－	－	1089	708	－	－
No.2 NSPSL	12±1.5		55.8	55.8	60.0	－ －	201	360	－	－	－	1105	718	○	○
No.3 Fc0Fs10	12±1.5		56.9	46.1	60.0	0 10	205	360	0	85	85	988	714	－	－
No.4 Fc0Fs20	12±1.5		56.3	38.2	60.0	0 20	203	360	0	172	172	881	716	－	－
No.5 Fc0Fs20*	21±1.5		62.5	42.8	60.0	0 20	225	360	0	166	166	852	692	－	－
No.6 Fc0Fs30*	21±1.5		66.1	39.4	60.0	0 30	238	360	0	244	244	731	678	－	－
No.7 Fc10Fs10	12±1.5		55.0	44.4	60.0	10 10	198	324	36	86	122	991	718	－	－
No.8 Fc20Fs10	12±1.5		53.0	42.8	60.0	20 10	191	288	72	86	158	994	718	－	－
No.9 Fc20Fs10*	21±1.5		55.5	44.9	60.0	20 10	200	288	72	85	157	980	708	－	－
No.10 Fc0Fs20SP*	21±1.5		52.7	35.5	60.0	0 20	190	360	0	175	175	899	730	○	－
No.11 Fc0Fs30SP*	21±1.5		55.6	32.3	60.0	0 30	200	360	0	259	259	774	719	○	－
No.12 Fc20Fs10SP*	21±1.5		52.7	42.6	60.0	20 10	190	288	72	86	158	995	719	○	－

注）配合記号の＊はスランプが 21cm であることを示している

2.4 試験項目および試験方法

主な試験項目および試験方法を**表－4** に示す。なお，表中の円筒貫入計（透明なプラスチック製でφ7mm の孔が 4 方向に 7 個空いた円筒容器：長さ 275mm，内径 30mm）とは，コンクリート中に挿入し，内部に流入するモルタルの量を測定することで，コンクリートのコンシステンシーを簡易的に評価可能な試験器であり，高流動コンクリートの材料分離抵抗性を測定するために考案されたものである[2)]。

表－４　試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
フレッシュ性状	スランプ値	JIS A 1101に準拠
	空気量	JIS A 1128に準拠
	粘　度	円筒貫入計
施工性	吐出量	吹付量を吹付時間で除して算出
	圧送圧力	圧力計にて、吹付け機出口，中間位置，急結剤添加位置の圧力を測定
	圧送空気量	流量計にて圧送空気流量を測定
	急結剤添加率	吹き付けた量を急結剤使用量で除して算出
	リバウンド率	回収したリバウンド材の質量を使用したコンクリート質量で除して算出
	粉塵量	デジタル粉塵計により測定（吹付位置から5，50m）
硬化コンクリート	初期強度（プルアウト）	JSCE-G 561に準拠 材齢：3，24h
	長期強度（コア）	コア採取方法はJSCE-F 561に準拠。試験はJIS A 1108に準拠。 材齢7，28，91日
	長期強度（モールド）	JIS A 1108に準拠 材齢7，28，91日

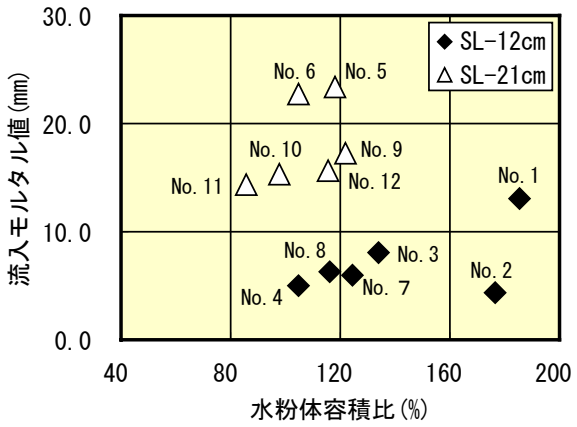
3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの特性

コンクリートの水粉体容積比 W/(C+F)（vol%）と円筒貫入計から得られた流入モルタル値との関係を**図－１**に示す。

吹付けコンクリートとしてスランプが小さい 12cm の配合では，既往の研究[3)]と同様に，フライアッシュの使用量に関係なく，流入モルタル値は水粉体容積比の増加に伴い大きくなる傾向を示す。なお，配合 No.2 が他の配合と異なる傾向を示したのは，増粘剤を添加している影響と思われる。

吹付けコンクリートとしてスランプが大きい配合 21cm については，スランプ 12cm ほど明確な関係は認められない。このような結果が得られたのは，単位水量でスランプを調整した配合 No.5 および配合 No.6 が多少分離状態になっており，そのため，他の配合と比べて流入モルタル値が大きい値を示したことが考えられる。

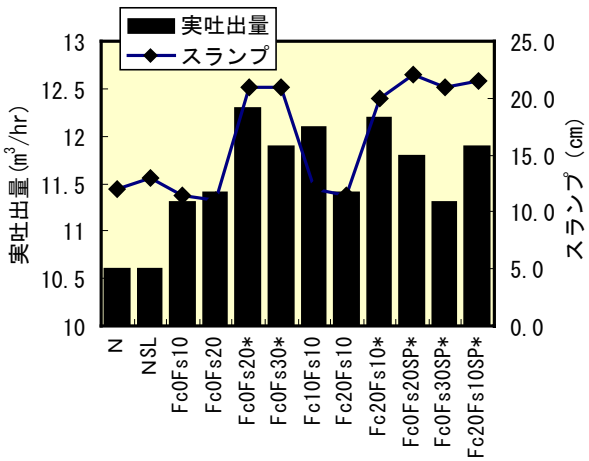


図－１　水粉体容積比と流入モルタル値の関係

3.2 吹付けコンクリートとしての施工性

(1) 吐出量

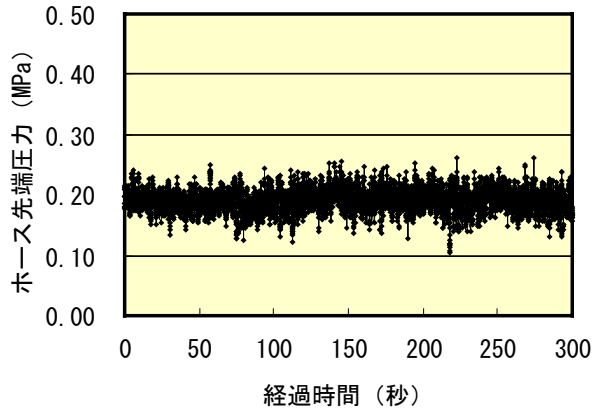
各配合の実吐出量の測定結果を**図－２**に示す。図より，フライアッシュを使用したコンクリートは，標準配合 N よりも吐出量が多くなっていることがわかる。スランプの違いについてみると，スランプが大きい 21cm の配合（図中の配合記号末尾に＊を付記している）で吐出量が多くなる傾向を示している。



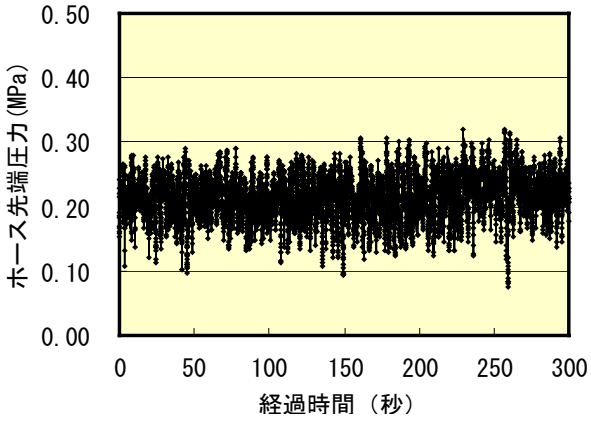
図－２　吐出量の測定結果

(2) 圧送圧力

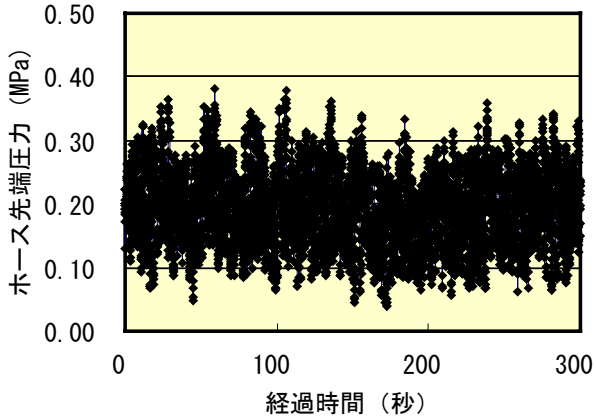
吹付け時の目視評価が良好（脈動が少ない）であった配合 No.1 および配合 No.7，逆に目視評価が悪かった（脈動が多い）配合 No.11 のホース先端部における圧送圧力測定結果をそれぞれ**図－３～図－５**に示す。



図－３　ホース先端部の圧送圧力（配合 No.1）



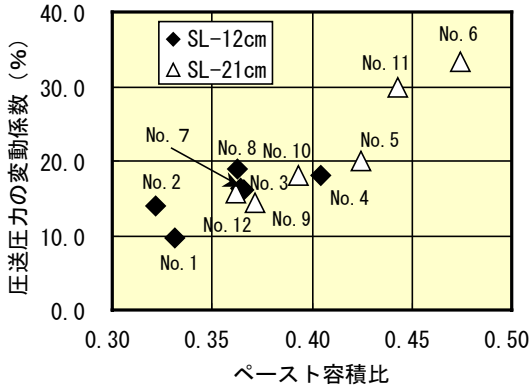
図－４　ホース先端部の圧送圧力（配合 No.7）



図－５　ホース先端部の圧送圧力（配合 No.11）

図より，配合の違いによりコンクリート吐出時の圧力状態が大きく異なることがわかる。今回の実験結果から，フライアッシュを使用したコンクリートでは吐出時の圧送圧力が大きく，しかも圧力の変動幅が大きくなる傾向が確認できた。このような結果が得られたのは，フライアッシュを使用したコンクリートでは吐出量が多くなることに加えて，コンクリートの粘性が高いことが影響しているものと考えられる。

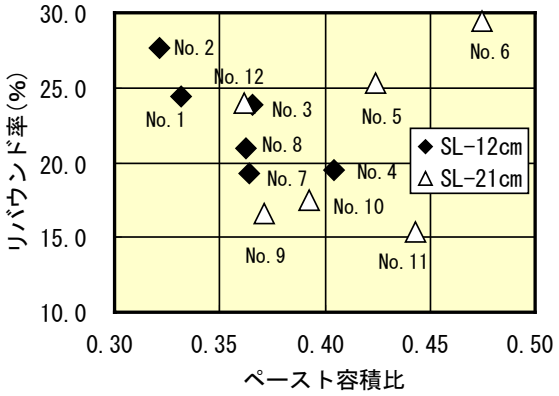
ペースト容積比 (C+W+F)/(C+W+F+S+G)（vol%）とホース先端部における圧送圧力測定値の変動係数（測定時間 300 秒）との関係を**図－６**に示す。図より，圧送圧力の変動係数は，コンクリート配合に関係なく，コンクリート中のペースト容積比と高い相関性が認められる。ペースト容積比が大きいコンクリートほど圧送圧力の変動が大きくなる傾向を示すことが明らかになった。ここで，圧送圧力の変動係数は，吹付け時における脈動状態を評価できる指標であると考えられる。圧送圧力の変動が大きいコンクリートは，連続した吹付け施工が困難になる可能性があるため，選定にあたっては十分に検討する必要があると思われる。



図－６　ペースト容積比と圧送圧力変動の関係

(3) リバウンド率および粉塵量

ペースト容積比とリバウンド率との関係を**図－７**に示す。図より，コンクリート中のペースト容積比が大きいほどリバウンド率が少なくなる傾向を示す。これまでの考察で多少材料分離傾向にあったと考えられる配合 No.5 および配合 No.6 を除けば，比較的高い相関が認められる。



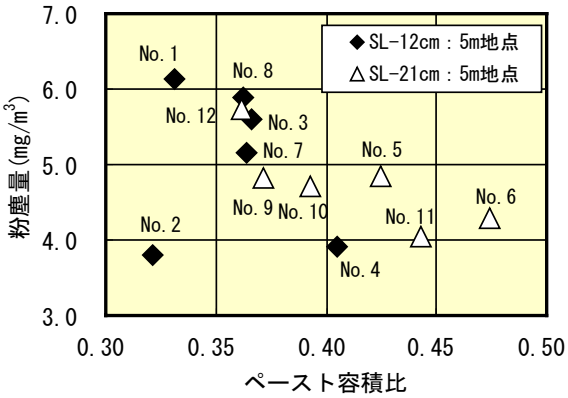
図－７　ペースト容積比とリバンド率との関係

ペースト容積比と吹付け位置から 5m離れた地点での粉塵量との関係を**図－８**に示す。図より，コンクリート中のペースト容積比が大きいほど粉塵量が少なくなる傾向を示す。図中の配合 No.2 は粉塵低減剤を使用している配合である。

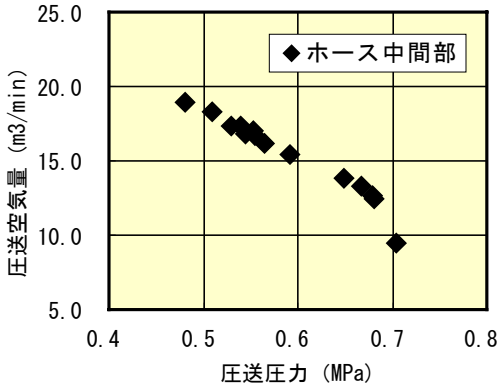
図－９にホース中間位置での圧送圧力と空気流量との関係を示す。図より，圧送圧力と空気流量には高い負の相関が認められる。

図－10 はホース中間部における空気流量と粉塵量との関係を示したものであるが，空気流量が多くなると，それに従い粉塵量が多くなる傾向を示している。

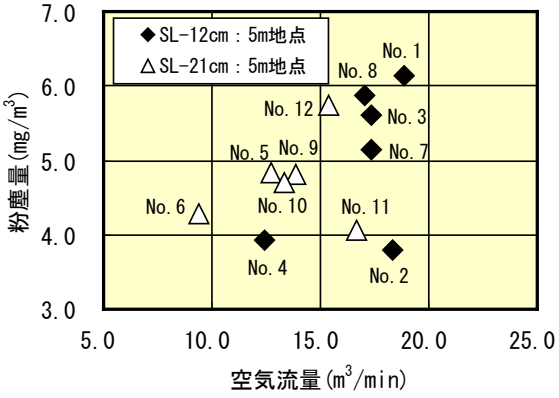
フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの粉塵量が少なくなる原因は，フライアッシュを使用した粉体量が多いコンクリートは適度な粘性と流動性を有するために吐出量が多く，その結果吹付け時の圧送圧力が高くなり，それに反比例して圧送空気量が低減したことによるものと推測できる。



図－８　ペースト容積比と粉塵量との関係



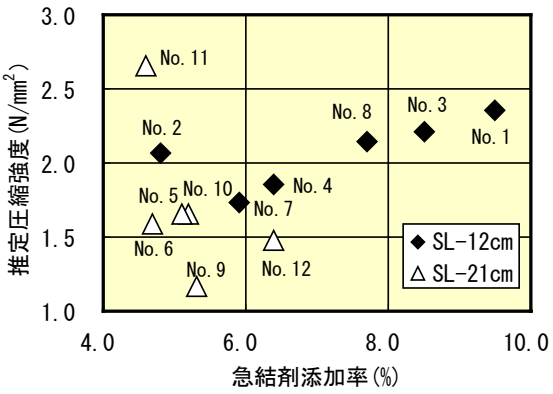
図－９　圧送圧力と圧送空気流量との関係



図－10　空気流量と粉塵量との関係

(4) 初期強度

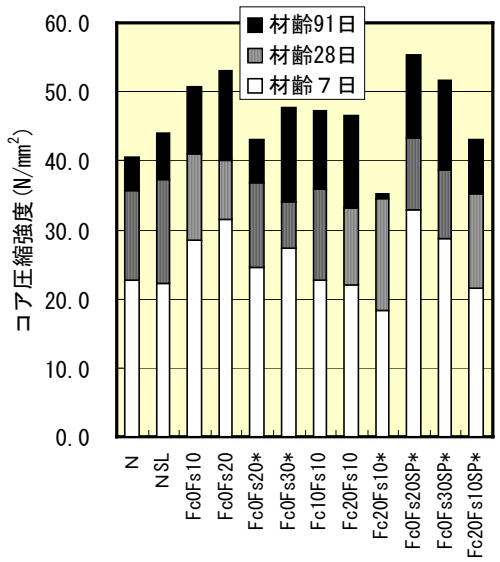
急結剤添加率と材齢 3 時間における推定圧縮強度との関係を**図－11** に示す。図より，多少ばらつきがあるが，スランプ 21cm の配合は，吐出量が多いために，相対的に急結剤添加率が少なくなり，初期強度が小さい値を示していることがわかる。



図－11　急結剤添加率と 3 時間材齢強度の関係

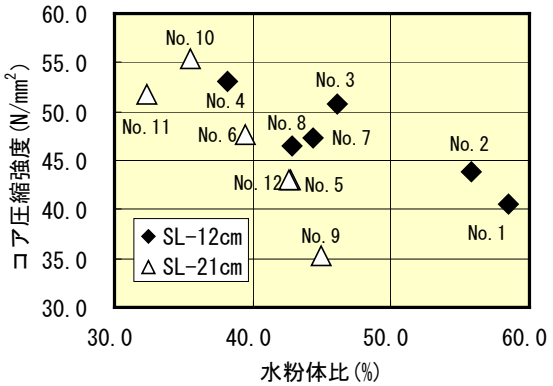
(5) 長期強度

各配合のコア圧縮強度試験結果を**図－12** に示す。図より，フライアッシュを使用したコンクリートで標準配合Nよりも91日材齢のコア圧縮強度が低い配合は配合 No.9 のみであり，フライアッシュを使用した吹付けコンクリートは，標準配合 N よりも長期強度の発現性に優れることがわかる。



図－12　コア圧縮強度試験結果

水粉体比 W/（C+F）と材齢 91 日コア圧縮強度との関係を**図－13** に示す。図より，同一スランプにおけるコア圧縮強度は，水粉体比が大きくなるにつれてほぼ直線的に低減しており，フライアッシュを使用した吹付けコンクリートにおいてもセメント水比説が成立していることがわかる。



図－13　水粉体比とコア圧縮強度との関係

4. まとめ

フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの特性について検討した結果，以下の結論を得た。

① 円筒貫入計から得られる流入モルタル値は，同一スランプにおける吹付けコンクリートの粘性を評価できる有効な指標となる可能性がある。

② フライアッシュを使用した総粉体量が多いコンクリートは，吐出量が多くなる傾向がある。

③ コンクリート中のペースト容積比が大きいほどリバウンド率ならびに粉塵量が少なくなる傾向を示す。このような結果が得られた原因には，粉体量が多いコンクリートは，吐出量が多くなるために圧送圧力が高くなり，それに反して空気流量が少なくなることが考えられる。

④ フライアッシュの使用量によりコンクリート吐出時の圧力状態が大きく異なる。また，圧送圧力の変動係数は，コンクリート配合に関係なく，コンクリート中のセメントペースト容積比と高い相関性が認められる。

⑤ フライアッシュを使用した吹付けコンクリートは，標準配合 N よりも長期強度の発現性に優れる。また，同一スランプにおける材齢 91 日コア圧縮強度は，水粉体比が大きくなるにつれてほぼ直線的に低減する。

参考文献

1) 例えば，油野邦人ほか：分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの品質改善に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp177-182，2002.

2) 森博嗣ほか：高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法（その 12），日本建築学会大会学術講梗概集，pp205-206，1995.8

3) 林ほか：フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの塑性粘度，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp1193-1194，2003.9