論文　使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響

石関嘉一[*1]・駒田憲司[*2]・西村次男[*3]・魚本健人[*4]

要旨：混和材が吹付けコンクリートの施工性にどのように影響を及ぼすか検討をした。混和材料として，シリカフューム微粉末，フライアッシュおよび石灰石微粉末を使用し，吹付け時における管内圧力，空気流量，リバウンド等を測定した。また，モルタルを使用してレオロジー試験を実施しモルタルの物性値を測定した。その結果，混和材が，吹付けコンクリートの圧送性に影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：吹付けコンクリート，管内圧力，リバウンド，空気流量，レオロジー

1．はじめに

こんにちNATM工法がトンネル施工に導入されてから数十年が経過し山岳トンネルの標準工法として定着している。その間NATM工法の主要な支保部材である吹付けコンクリートにおいては，様々な研究開発がなされてきた。また，ここ数年大断面トンネルや吹付けコンクリートで永久覆工とするシングル・シェルライニングの導入を目的として，吹付けコンクリートの高品質，高強度化の開発が行われるようになり，シリカフューム，フライアッシュや石灰石微粉末等の混和材が使用されつつある。しかしながら，これらの混和材を使用した吹付けコンクリートの施工性について検討した研究は，充分に行われていないのが現状である。

本研究は，使用材料のうち混和材に注目し，結合材および細骨材の一部をこれらの混和材と置換することにより混和材が吹付けコンクリートの圧送性状にどのように影響するか検討した。また，室内実験において，コンクリート中のモルタルが吹付けコンクリートの圧送性状にどのような影響を及ぼすかレオロジー試験を実施し検討してみた。

表-1 使用材料

材料	名称	記号	密度 (g/cm³)
ｾﾒﾝﾄ	普通ポルトランドセメント	C	3.16
細骨材	千葉県君津市産山砂	S	2.61
粗骨材	東京都八王子産６号砕石	G	2.66
混和剤	高性能減水剤（ﾎﾟﾘｶﾞﾘｺｰﾙｴｽﾃﾙ誘導体）	AD	1.05
混和材	シリカフューム	SF	2.20
	フライアッシュ	FA	2.27
	石灰石微粉末	LS	2.71
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	CA	2.57

2．実験概要

2．1 使用材料および配合

使用材料を表-1，配合を表-2および実験水準を表-3に示す。単位結合材量は，360kg/m³および450kg/m³の2水準とし，単位水量と細骨材率（s/a）は，事前に実施した室内試験により決定した。

粗骨材最大寸法は15㎜とし単位粗骨材量は，

*1　㈱熊谷組　技術研究所　先端技術研究グループ　研究員（正会員）
*2　㈱青木建設　研究所　材料研究室　研究員
*3　東京大学　生産技術研究所　第五部　技術官（正会員）
*4　東京大学国際・産学共同研究センター　教授　工博（正会員）

表-2 配合

水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		セメント	水	細骨材	粗骨材		
56.9	60.0	360*1	205	1035*2	703	12	2
45.6	58.2	450*1	205	960*2	703	21	2

*1：結合材置換率によってセメントの一部を混和材に置換する。

*2：セメントと混和材の密度の差によって生じる，体積減少を調整する。

全ての配合とも703kg/m³に一定とした。混和材の置換方法は，単位結合材量2水準に対して，結合材の一部を結合材質量比で置換する結合材置換と細骨材の一部を体積比で置換する細骨材置換の2方法とした。結合材置換は，シリカフューム（以下SF）およびフライアッシュ（以下FA）とし，細骨材置換はFAおよび石灰石微粉末（以下LS）とした。混和材置換によるコンクリート単位体積変化は，細骨材量によって調整した。スランプは各単位結合材量360kg/m³および450kg/m³においてそれぞれ12cmおよび21cmとし高性能減水剤によって調整した。なお，コンクリートの練混ぜはコンクリートプラントで行い，品質を確認後アジテータトラックで30分程度運搬し使用した。

2．2 吹付け設備および吹付け方法

吹付け実験は湿式吹付けとし，吹付け方法は空気圧送方式を用いて行いてそれに伴う配管システムを図-1に示す。

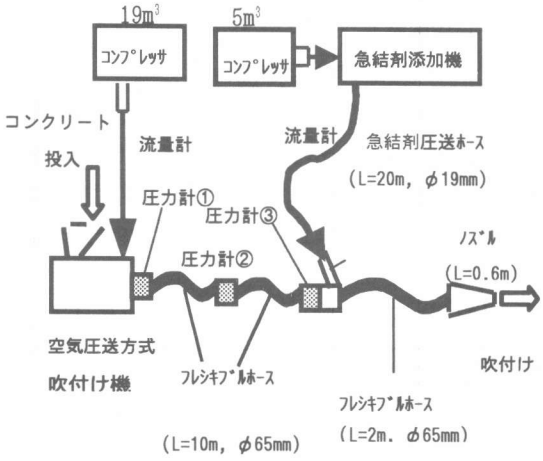


図-1 配管システム図

空気圧送方式は，フレッシュコンクリートをローター方式の吹付け機で空気圧送するもので，急結剤を混合するY字管までフレキシブルホース内を20m圧送しY字管で急結剤と混合し吹付けノズルより吐出させた。ノズルの操作は，遠隔操作可能な吹付けロボットを使用した。これらの吹付けシステムは，実際の施工現場で行われているシステムを参考[1]にして，できるだけこれに近い形のシステムとした。なお，吹付けコンクリートの吐出量は8.0m³/hr一定とし，スムーズな吹付け実験を実施した。

2．3試験項目および試験方法

(1) フレッシュコンクリートの性状

吹付け機に投入する前にアジテータ車から直接抜き取り，フレッシュ状態の試験を実施した。

(2) 管内圧力

図-1に示すように，配管内の吹付け機出口，急結剤添加位置および中間位置に圧力センサーを取り付け0.05sec間隔で測定した。測定時間は，

表-3 実験水準

実験要因	実験水準	
吹付けシステム	空気圧送式	
結合材量	360(kg/m³), 450 (kg/m³)	
混和材の種類	無添加	——
	シリカフューム	結合材置換(5, 10, 15%)
	フライアッシュ	結合材置換(10%)
		細骨材置換(10%)
	石灰石微粉末	細骨材置換(5, 10, 15%)
急結剤の種類	カルシウムアルミネート系粉体急結剤	
急結剤添加率	B=360(kg/m³)の配合：B × 7.0%	
	B=450(kg/m³)の配合：B × 5.0%	

は，箱供試体（寸法600mm×600mm×250mm）採取時間とした。

(3)　空気流量

空気流量の測定は，コンプレッサー出口にフロー式流量計を取り付け測定した。

(4) リバウンド測定

リバウンド測定は，箱供試体採取時に測定した。測定方法および計算方法は，トンネル技術協会の方法[2)]に準じて実施した。

(5) モルタル試験

モルタルは，吹付け実験終了後吹付け実験に使用した材料を用いて新たに練混ぜを実施し，配合は，吹付け実験に使用した配合から粗骨材を抜いたものとした。ワーカビリティーの調整は，ミニスランプコーンを用いて結合材量360kg/m³および450kg/m³の混和材無添加配合のフロー値を基準とし，フロー値が±10mmとなるように高性能減水剤を用いて調整した。

レオロジー試験は，B型粘度計を用いて塑性粘度を測定した。

3　実験結果

3．1　管内圧力と空気量

混和材要因別の管内圧力と空気流量の関係を図-2から図-4に示し，そのときの圧力損失を図-5から図-7に示す。

(1)　結合材置換

図-2から分かるように，SF置換率の増加に伴う管内圧力の変動は15％の置換率で13%程度の増加のみ認められた。また，管内圧力損失は，図-5に示すとおり置換率の違いによる差を確認できなかった。一般的には，SFを混和することによって，モルタルの粘度が高まり管内抵抗が大きくなるため管内圧力は上昇する傾向にある。しかし，空気圧送方式は，圧送の際コンクリートが空気を伴って管内を移動するため管内圧力の上昇が抑えられたと考えられる。空気流量はSF置換率の増加に反して，減少しているものの空気流量10m³/minを下限に収束した。

図-4に結合材置換率10％における，各種混和材の管内圧力および空気流量を示す。急結剤添加位置でFAの管内圧力が他の配合に比べ60%程度低いものの，吹付け機出口および中間位置での管内圧力差は認められなかった。FAの圧力損失は，SFに比べて17%大きい結果となった。また，管内圧力と空気流量の相関は，特に認められなかった。

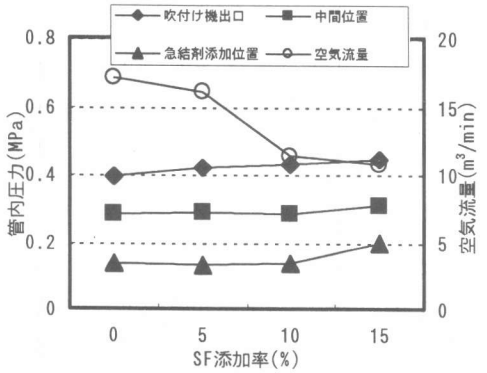
(2) 細骨材置換

図-3から分かるようにLSの置換率が増加することにより，多少ではあるが管内圧力もほぼ比例的に上昇している。さらに，図-6よりLSの置換率が増加すると圧力損失も増加している。特に，置換率15%は，無添加に比べ圧力損失が50%以上大きくなっている。これは，単位粉体量の増加によるものであると考えられる。結合材置換では，単位粉体質量の増加はない。しかし，細骨材置換の場合，置換率が増加することで細骨材体積分の粉体量が増加してしまう。例えば，LSでは，置換率が5%，10%，15%のとき，単位粉体量は質量で415kg/m³，465 kg/m³，521 kg/m³となり，無添加に比べ15%から45%増加している。よって，圧力損失の増大は，著しく増加した粉体によってモルタル粘度が高くなり，管内抵抗が増大したためといえる。図-3より空気流量は，結合材置換と同じく，管内圧力が大きくなるにつれて低下する。また，空気流量10m³/min付近を限度に空気流量の低下はなくなった。

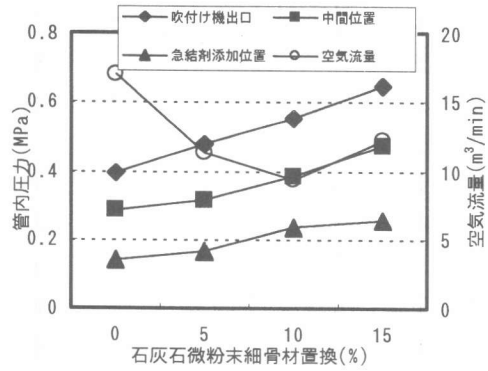
図-4の細骨材置換について，FAとLSの管内圧力を比較すると吹付け機出口および中間位置では大差ない。しかし，急結剤添加位置において，若干ではあるがFAに比べLSの管内圧力が高い値を示している。細骨材置換において，FAとLSの単位体積は同一であるが，これら混和材の密度差によって，FAとLSの単位質量はそれぞれ450kg/m³および467 kg/m³となる。加えて，FAのベアリング効果によって管内抵抗が軽減されるので，単位質量が多いLSがFAに比べて，管内圧力が上昇したと考えられる。

3．2　空気流量とリバウンド率

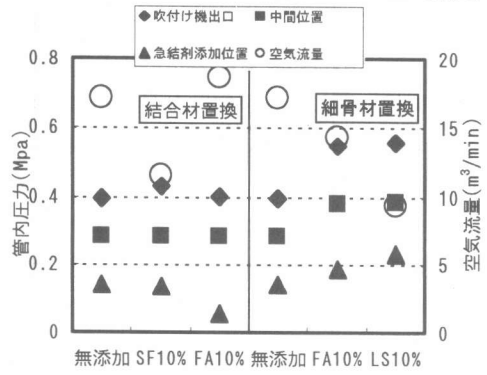
図-8 に空気流量とリバウンド率を示し，また



図－2　SF 結合材置換の管内圧力と空気流量

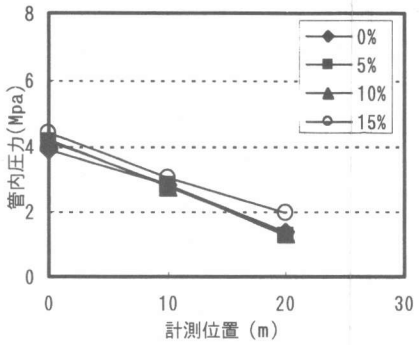


図－3　LS 細骨材置換の管内圧力と空気流量

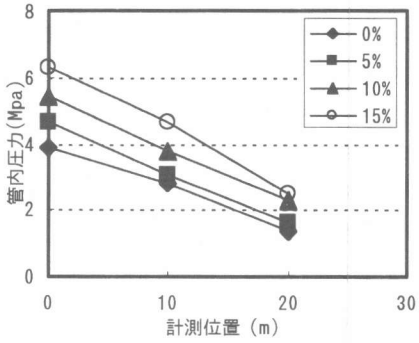


図－4　置換率 10%の管内圧力と空気流量

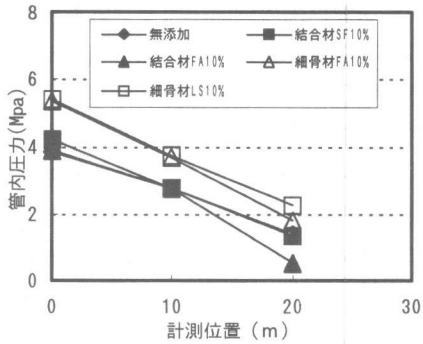
図-9 に LS 細骨材置換における空気流量とリバウンド率の関係を示す。図-8 から全体的に，空気流量が増加するとリバウンド率も増加する傾向にある。配合要因別に見てみると，図-9 から分かるように置換率 15%を除き混和材置換率が高くなることにより空気流量が減少し，それに伴いリバウンド率も減少している。つまり，吹



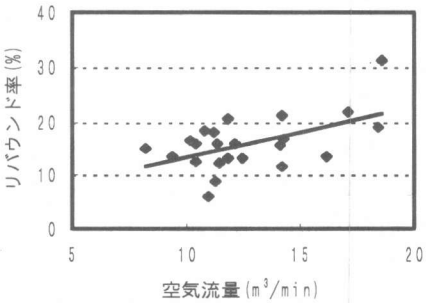
図－5　SF 結合材置換圧力損失



図－6　LS 細骨材置換圧力損失



図－7　置換率 10%圧力損失



図－8　空気流量とリバウンド率

付けコンクリートのリバウンドは空気流量に大きく影響を受けている。これは，空気流量が増大することによりノズルから吐出する際のコンクリート速度が大きくなり，付着面への衝突エネルギーの増大によってリバウンド率が増加する。また，空気流量が増加することで配管内のコンクリート流速が早くなり，急結剤とコンクリートの混合性能が悪化してしまうので，コンクリートの凝結性能が著しく低下してしまうためだと考えられる。

3．3　空気流量とモルタルの塑性粘度

図-10 から図-13 に単位結合材量 360kg/m³ における空気流量とモルタルの塑性粘度の関係を示す。本実験において結合材量が同じ場合，各配合のスランプ値はすべて同一であり，また，粗骨材量も同一である。よって，同一結合材量の配合におけるモルタルの降伏値はほぼ同じである[3]といえるので，今回の実験は，塑性粘度に着目し塑性粘度と諸物性について検討した。

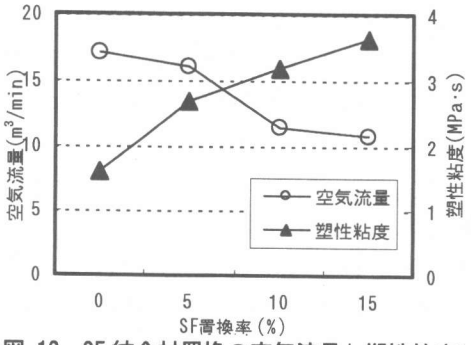


図-10　SF 結合材置換の空気流量と塑性粘度

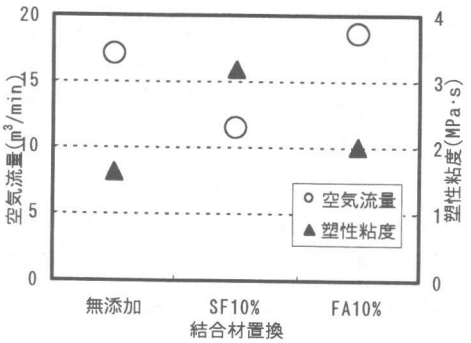


図-11　結合材置換 10%の空気流量と塑性粘度

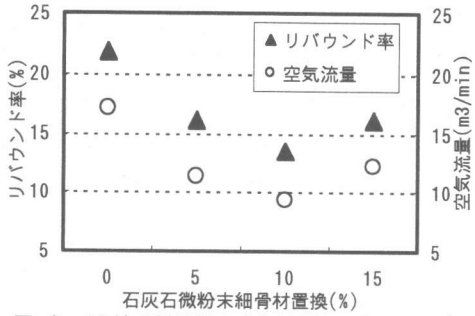


図-9　LS 結合材置換の空気流量とリバウンド率

(1) 結合材置換

図-10 より SF の添加率が 5%上がる毎に塑性粘度は大きくなっている。通常ポンプ圧送の場合，塑性粘度が大きくなるとともに，管内抵抗が大きくなり，管内圧力は増大する。今回の吹付け実験においても，SF の置換率が大きくなるにつれて管内圧力は，上昇する傾向にあった。つまり，塑性粘度が上昇すると管内圧力が大きくなる。また，それに伴い空気流量が低下し，リバウンド率も低下することがわかった。

図-11 より結合材置換率を 10%に固定して，

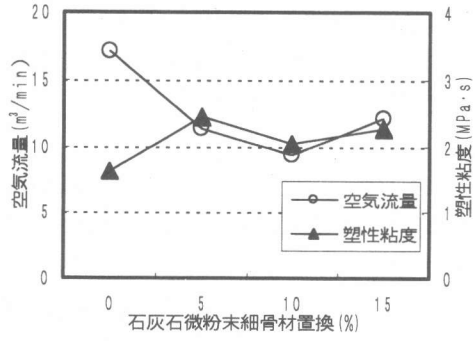


図-12　LS 細骨材置換の空気流量と塑性粘度

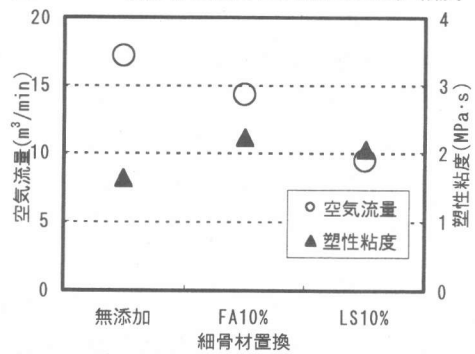


図-13　細骨材置換 10%の空気流量と塑性粘度

各種混和材配合について検討した。図からわかるように塑性粘度が低い場合，空気流量は，高い値を示している。これは，塑性粘度の増減によって，管内圧力が変動しているためである。また，SF と FA を比較すると，FA に対して SF の塑性粘度は，60%近く高い値を示している。FA を置換することによって，FA の持つベアリング効果が発揮され，管内抵抗が低減されたためであると考えられる。

(2) 細骨材置換

図-12 より LS を細骨材置換について検討した。多少のばらつきはあるものの置換率の増加に伴い，塑性粘度は大きくなっている。3．1 (2) で述べたように，細骨材置換をした場合は，粉体量の著しい増加があるので，塑性粘度も増加すると考えていたが，添加率に伴う塑性粘度の増加はあまり認められなかった。

同様に図-13 から LS の塑性粘度は，FA と比較すると 8%程度低い値となったが，顕著な差はないといえる。FA と LS は無添加の場合より 38%，27%と高い値を示した。また，吹付け時の管内圧力においても 40%，38%と高い値を示していることより，吹付け時の管内圧力と塑性粘度はある程度相関があることが分かった。

4 まとめ

混和材が吹付けコンクリートの圧送性状にどのような影響を及ぼすかについて検討した結果，次のことが明らかとなった。

① 吹付けコンクリートに混和材を結合材置換することによって，管内圧力は上昇する傾向にある。

② 混和材を置換することで管内圧力が上昇すると，圧送空気流量は減少する。

③ 管内圧力の増加とともに圧送空気流量は減少するが，10m³/min を限度に収束する。

④ 圧送空気流量が増加すると，リバウンド率も増加する。

⑤ 吹付けコンクリートのモルタル塑性粘度を測定することにより，管内圧力の傾向が分かる。

⑥ モルタルの塑性粘度を測定することにより，空気流量の傾向が分かりリバウンドの想定ができる。

謝辞

本実験は，東京大学国際・産学共同研究センター　における「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究による成果である。ここで共同研究員である（株）ポゾリス物産　富山徹氏，大成建設（株）坂本淳氏　（株）大林組　田湯正孝氏，鹿島建設（株）　大野俊夫氏　（株）熊谷組　岡田喬氏　佐藤工業（株）　小林裕二氏　（株）竹中土木　安藤慎一郎氏　東急建設（株）　伊藤正憲氏　飛島建設（株）　田中斉氏　西松建設（株）　松浦誠司氏　太平洋セメント（株）　大森啓至氏　（株）間組　杉山律氏　前田建設工業（株）　赤坂雄司氏　および協力会社として御協力いただいた（株）戸田建設　田中徹氏　（株）北川鉄工所　見浦光夫氏　（株）東京測器研究所　佐藤達也氏　また，吹付け実験に各社より派遣された多くの方々やコンクリートプラントを提供していただいた太平洋セメント（株）佐倉研究所の方々，さらに，芝浦工業大学卒論生　中沢穣氏　伊藤秀彰氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

1) トンネルの吹付けコンクリート，（社）日本トンネル技術協会，pp.98-137，1996.2

2) トンネルの吹付けコンクリート，（社）日本トンネル技術協会，pp170-173，1996.2

3) コンクリート総覧，技術書院 pp.294-300

4) フレッシュコンクリートの挙動とその施工性への応用に関するシンポジウム，日本コンクリート工学協会，1989.4

5) 杉山律ほか：吹付けコンクリートの圧送性に関する基礎的研究，コンクリート工学協会年次論文報告集，vol.21，1999