

吹付けコンクリート施工時の粉じん濃度 に及ぼすコンクリートの塑性粘度の影響

Influence of plastic viscosity of concrete to density of dust of shotcrete

室賀陽一郎¹・大下武志²・伊藤祐二³

Yoichiro Muroga, Takeshi Oshita and Yuji Ito

¹正会員 石川島建材工業株式会社 技術研究所 (〒252-1211 神奈川県綾瀬市小園720)

E-mail:youichiro_muroga@ikk.co.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 技術推進本部 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³正会員 工修 石川島建材工業株式会社 技術研究所 (〒252-1211 神奈川県綾瀬市小園720)

Influence of plastic viscosity of concrete to density of dust of shotcrete was examined. In the case of quantity of air uniformity, it was cleared that density of dust of shotcrete was decrease with increase of plastic viscosity of concrete at traditional ways of system that concrete is shot by compressed air. The effect above was confirmed at system which concrete was shot without compressed air.

Key Words : shotcrete, density of dust, plastic viscosity

1. はじめに

トンネル建設工事に伴って発生する粉じんに起因するじん肺症等の粉じん障害は、重大な社会問題になっており、関係各機関は作業環境の改善に努力しているところである。このうち、作業環境が最も厳しいとされるコンクリートの吹付け作業について、対策技術の開発を目的に土木研究所、先端建設技術センターおよび民間17社で共同研究開発「ずい道建設における吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術および局所集じんシステムの開発」¹⁾を行い、粉じん低減方法(技術)として、粉じん低減剤による方法、液体急結剤による方法、および吹付け時に圧縮空気を使用せず回転力によりコンクリートを吹付ける新しいシステム(エアレス吹付け機)による方法など様々な技術の効果を確認した。

本報告は、これの一環として行ったものであり、吹付けコンクリートの施工時に発生する粉じんの濃度に及ぼすコンクリートの塑性粘度の影響を定量的に評価することを目的としたものである。

工事現場において、吹付ける前のコンクリートの塑性粘度を測定し、それを吹付けた時の粉じん濃度を測定することは可能であるが、当然、吹付け装置、吹付け面の状態およびコンクリート材料・配合などは現場ごとに異なり、比較的環境が整った実験の場合に比べるとバラツキが大きい。測定結果を評価するのに十分なデータを採ることは困難である。

一方、本報告での実験は模擬トンネル内にて、同じ吹付け装置により行われ、コンクリートにおいても同じ生コン工場で製造したものを使用し、ほぼ一定条件のもとで行われ、粉じん濃度に及ぼすコンクリートの塑性粘度の影響を評価することが可能な環境と考えた。

2. 実験概要

(1) 実験設備

吹付け機には電動コンプレッサー、急結剤添加装置などを搭載、吹付けアームが取り付けられた一体型の吹付けシステム(ポンプ圧送方式)を用いた。

実験は、一般的な歩道付片側1車線道路を想定した表-1に示す断面形状、送風、集じん設備を有した模擬トンネル内で行った。粉じん濃度は、吹付け位置後方10m、30mおよび50mにおいてローボリュームサンプラーにより捕集した粉じんから算出した。

なお、実験で使用したコンクリートは生コン工場で製造し実験場まで運搬した（運搬時間：約30分）。

(2) 塑性粘度の測定方法

塑性粘度は、操作・取り扱いの容易な現場向け試験器（羽根沈入型試験器）²⁾によって測定した。

本試験器の測定対象はモルタルであるため、今回の実験では、コンクリートをウェットスクリーニングしたものを試料とした。

試験器は、図-1に示すような3枚の羽根を有する治具をモルタルに自重で沈入させて粘性を測定するものである。1試料について数種類の沈入羽根の重量 W_f （以下、記号については図-1参照）を用いて試験を行うことにより、せん断速度 v_t （ $=L/T$ ）とせん断応力度 τ （ $=W_f/A$ ）の関係が得られる。せん断速度をモルタルのせん断領域の幅 h で除した値 v_t/h がせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ となる。モルタルをビンガム流体と考えると、塑性粘度は $\tau/\dot{\gamma}$ で与えられる（図-2）。なお、本試験では、沈入時に作用する浮力およびせん断面積が一定になるように羽根がモルタルに完全に埋まった状態から沈入させ、測定を開始した。得られた結果は、校正線により塑性粘度を算出した。

また、塑性粘度の測定は、コンクリートを吹付ける前の生コン受け入れ検査時にコンクリートをサンプリングし、直ちにウェットスクリーニングしたモルタルについて行った。

表-1 模擬トンネルの寸法および主要な設備

模擬トンネル	構造	RC造(30m), S造(70m)
	内空寸法	7.9m×12.8m×100m
	内空断面積	81.7m ²
送風機	送風量	最大 1,500m ³ /min
	風量制御	無段階
	風管径	1,500mm
集じん機	集じん形式	バグフィルター
	処理風量	最大 1,800m ³ /min

(3) 塑性粘度に及ぼす配合要因の影響

コンクリート（モルタル）の塑性粘度に及ぼす主な配合要因の影響をこの試験器で測定した結果を以下に示す。

図-3は、コンクリートの砂粉体比（S/P）をパ

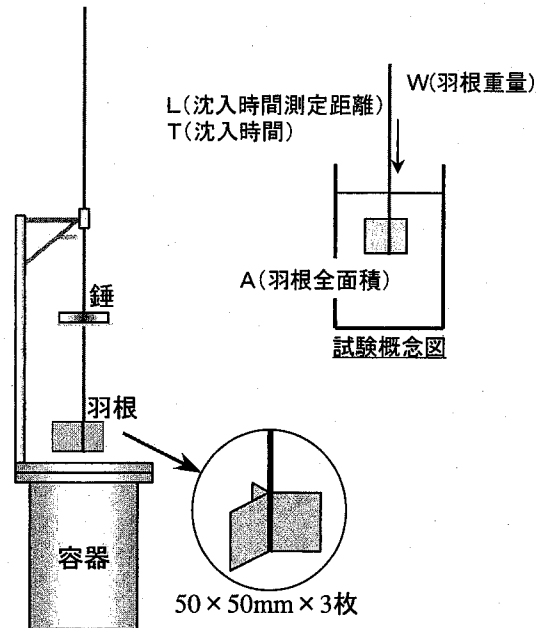


図-1 試験器

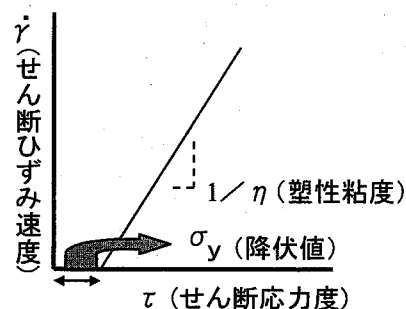


図-2 ビンガム流体概念

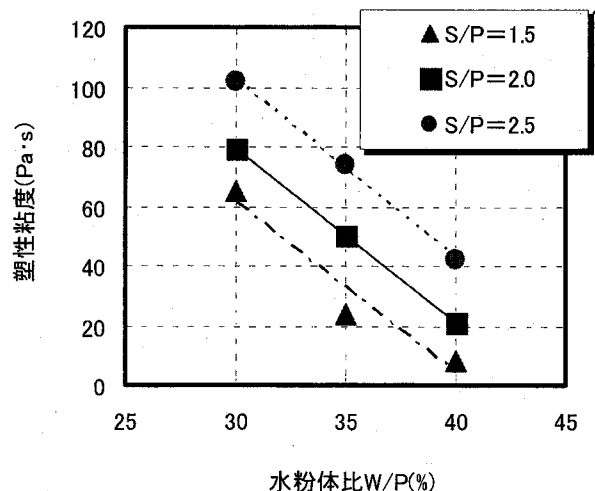


図-3 塑性粘度と水粉体比の関係

ラメータとして水粉体比 (W/P) と塑性粘度の関係²⁾を示したものである。これは、セメント量を一定として、水量および細骨材量を調整しモルタルを練混ぜ、塑性粘度を測定した結果である。なお、塑性粘度は降伏値の影響を受ける³⁾ことからモルタルフロー値は一定とした。その結果、W/Pが大きいほど、また、S/Pが小さいほど塑性粘度は小さくなった。

図-4には、コンクリートの混和材として一般に使用されている石灰石微粉末 (200mesh)、高炉スラグ微粉末 (およそ4000cm²/g)、およびシリカフュームをセメント量の内割り置換した場合の塑性粘度の測定結果⁴⁾を示す。これは、図-3に示すW/P:35%, S/P:2.0の配合において、混和材を粉体量の内割りで置換したモルタルについて塑性粘度を測定したものである。

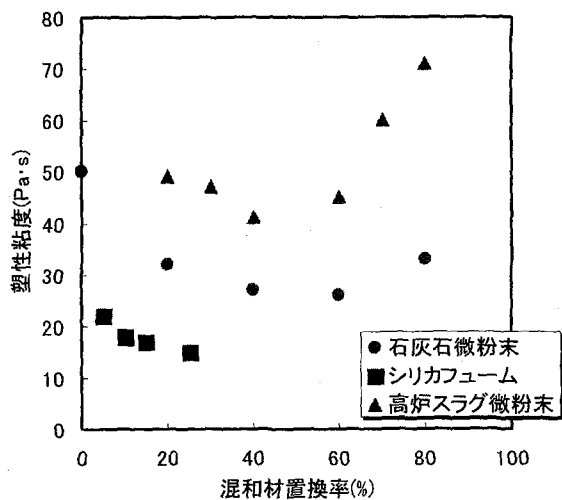


図-4 塑性粘度と各種混和材置換率の関係

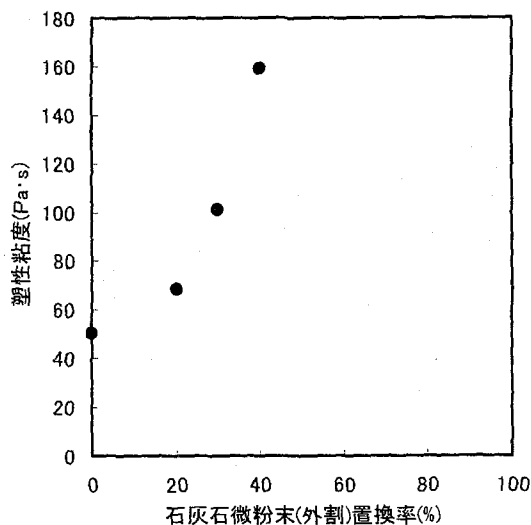


図-5 塑性粘度と石灰石微粉末添加率の関係

石灰石微粉末、高炉スラグ微粉末をセメントに置換した場合、置換率40%程度までは置換率の増加とともに塑性粘度は低下する傾向にあり、それより置換率が増えると塑性粘度は増加した。シリカフュームは、5%の置換で塑性粘度が大幅に小さくなった。セメントの外割りで石灰石微粉末を添加した場合の塑性粘度を図-5に示す。この場合、添加率の増加とともに水粉体 (セメント+石灰石微粉末) 比は低くなることもあり、石灰石微粉末の添加率増加にともない塑性粘度は増加した。

3. 実験結果

粉じん低減効果の確認が行われた様々な方法 (技術) の内、

- ① 粉じん低減剤、分割練混ぜ (SEC) による方法
- ② 液体急結剤による方法
- ③ 新しいシステムによる方法

について塑性粘度の測定を行い、コンクリート吹付け時の粉じん濃度との関係を調べた。

(1) 粉じん低減剤、分割練混ぜによる場合

コンクリートの使用材料を表-2に、配合条件を表-3に示す。目標スランプは12±2.5cmとした。また、吹付け条件を表-4に示す。

表-2 コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランド, $\rho: 3.15\text{g/cm}^3$	
細骨材	S1	茨城県鹿島産陸砂, $\rho: 2.56\text{g/cm}^3$, F. M. : 2.61
	S2	茨城県葛生産砕砂, $\rho: 2.67\text{g/cm}^3$, F. M. : 2.67
粗骨材	茨城県岩瀬産碎石, $\rho: 2.65\text{g/cm}^3$, F.M.: 6.01	
備考) 細骨材はS1 : S2=7 : 3の混合使用		

表-3 配合条件

水セメント比	55.6~56.1%
細骨材率	60%
単位セメント量	360kg/m ³

表-4 吹付け条件

設定コンクリート吐出量	12m ³ /hr
圧送エア流量 (推定)	10m ³ /min (バルブ全開)
送風量	1000m ³ /min
集じん機処理空気量	1260m ³ /min

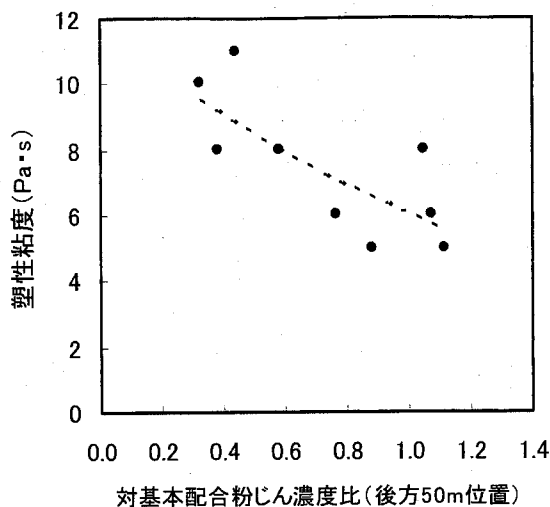


図-6 塑性粘度と対基本配合粉じん濃度比の関係

実験結果は、一般的な吹付けコンクリートの配合である『基本配合』に対する、粉じん低減剤を添加したケース、および分割練混ぜを行ったケースの結果との比で表す（対基本配合粉じん濃度比、以降、粉じん濃度比）。『基本配合』と同じ粉じん濃度の場合は1となる。図-6に切羽後方50m位置における粉じん濃度比とウェットスクリーニングモルタルの塑性粘度の関係を示す。塑性粘度の増加にともない、粉じん濃度は小さくなる傾向が認められた。なお、図中のプロットは、粉じん低減剤を添加したケース、もしくは分割練混ぜを行ったケースそれぞれ実験1ケースにつき、3回実施した実験結果を示している。また、粉じん低減技術を実施したほとんどのものが基本配合の粉じん濃度よりも小さくなることが確認された。

(2) 液体急結剤による場合

配合条件を表-6に、吹付け条件を表-7に示す。

ここでは、一般的な吹付けコンクリートの配合である『基本配合』を吹付け空気の総量（＝コンクリートを圧送するための空気量＋粉体急結剤を添加するための空気量）が12.9m³で、粉体急結剤を使用した場合の粉じん濃度に対する粉じん濃度の比で表す。図-7に示す塑性粘度と粉じん濃度比は、今回の共同研究より吹付け時の発生粉じん濃度は上記吹付け空気総量に依存している⁵⁾ことが確認されており、表-7に示すように吹付け空気の総量(圧送エア流量)を(A)、(B)に分けて示した。

表-6 配合条件

水セメント比	44.0～50.0%
細骨材率	63～65%
単位セメント量	360～420kg/m ³

表-7 吹付け条件

コンクリート吐出量	11.3～12.8m ³ /hr
圧送エア流量	(A) 4.25～4.99m ³ /min (B) 5.00～6.00m ³ /min
送風量	1000m ³ /min
集じん機処理空気量	1260m ³ /min

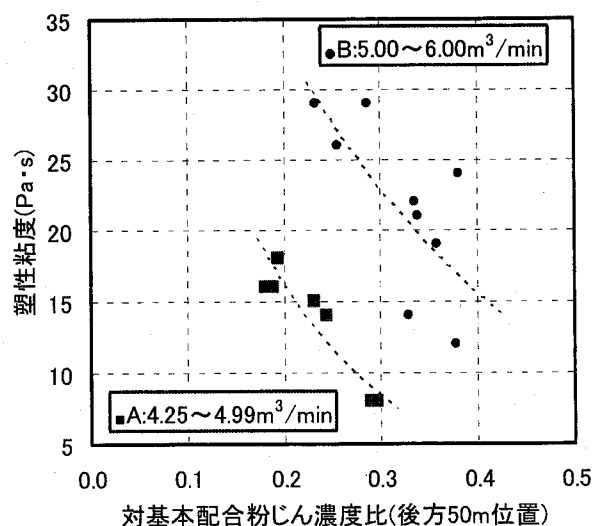
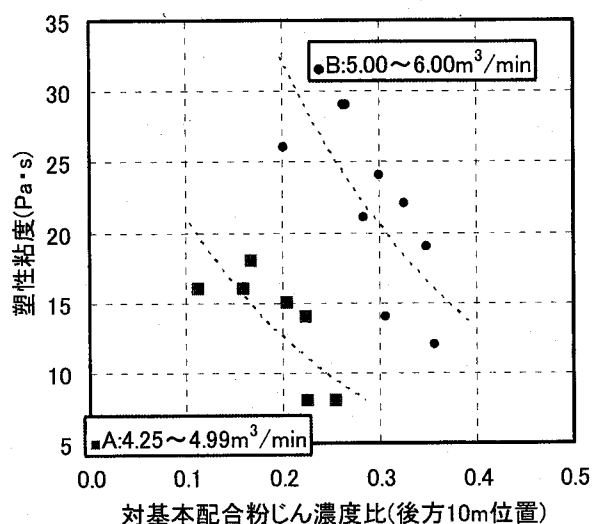


図-7 塑性粘度と対基本配合粉じん濃度比の関係
(上：後方10m位置，下：後方50m位置)

いずれの場合も基本配合の粉じん濃度よりも大幅に小さくなり、圧送エア流量および液体急結剤を使用することによる低減効果が認められた。前項の結果と同様に、粉じん濃度比は塑性粘度の増加にともない小さくなる傾向であった。また、同じ塑性粘度において圧送エア流量で比較すると圧送エア流量が少ない(A)の方が粉じん濃度比は小さくなった。

(3) 新しいシステムによる場合

新しいシステム⁵⁾は、ブームの先端部分に回転装置を搭載した機械により、圧縮空気を用いず、コンクリートに急結剤を添加し回転装置の回転力でコンクリートを吹付けるものである。

実験で使用したコンクリートの配合条件を表-8に、吹付け条件を表-9に示す。

新しいシステムにおいても、基本配合に対する粉じん低減効果が認められ、塑性粘度が高くなると粉じん濃度比は小さくなった(図-8)。結

表-8 配合条件

水セメント比	42.2~55.0%
細骨材率	58~60%
単位セメント量	360~450kg/m ³

表-9 吹付け条件

コンクリート吐出量	12.6~13.4m ³ /hr
送風量	1000m ³ /min
集じん機処理空気量	1260m ³ /min

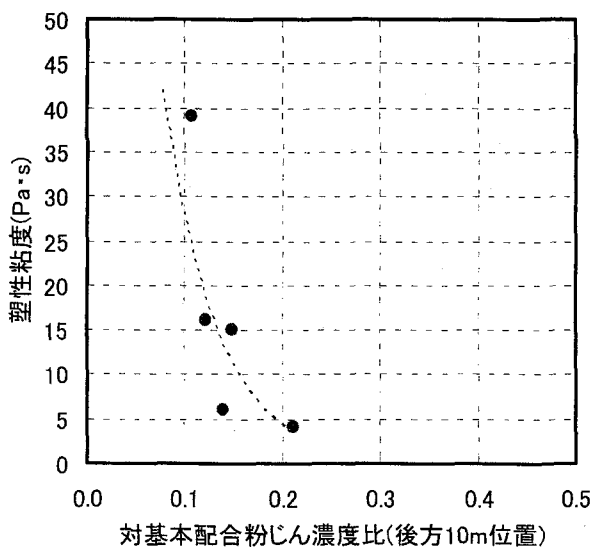


図-8(a) 塑性粘度と対基本配合粉じん濃度比の関係(後方10m位置)

果の一部をベースコンクリートの単位セメント量と塑性粘度および粉じん濃度比の関係で示す(図-9)。単位セメント量を増すことで塑性粘度は高くなり、それにともない粉じん濃度比は小さくなる関係が認められる。

最後に、塑性粘度と同時に測定される降伏値(コンクリートではスランプ値で代表される)をすべてのウェットスクリーニングモルタルについて、フロー値との関係で図-10に示す。

(4) 粉じん濃度とコンクリート(モルタル)の塑性粘度の関係について

共同研究の結果から、急結剤を使用せずにコンクリートを吹付けた時の粉じん濃度は、急結

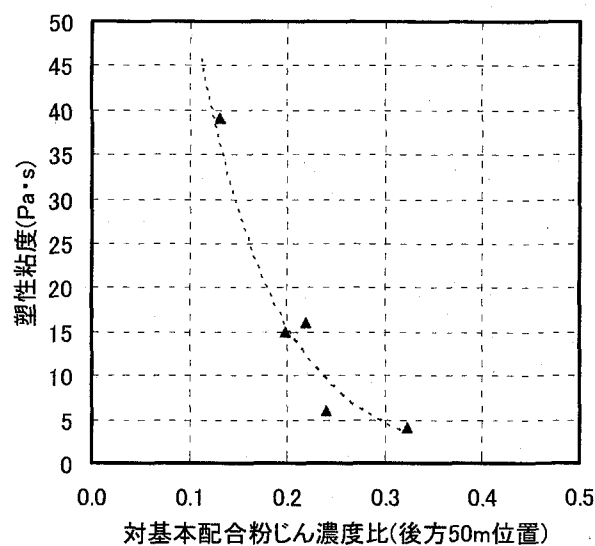


図-8(b) 塑性粘度と対基本配合粉じん濃度比の関係(後方50m位置)

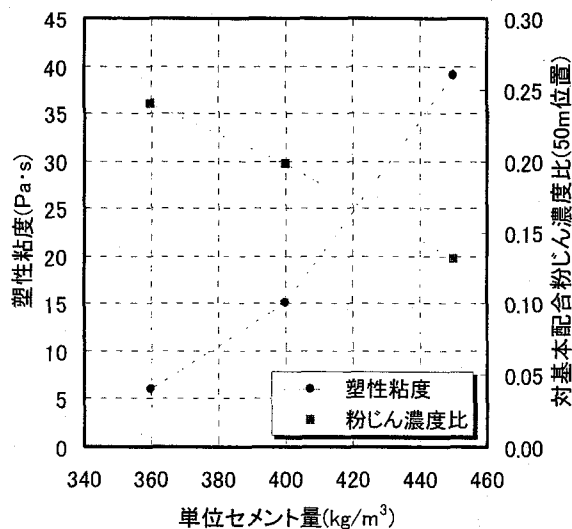


図-9 塑性粘度および粉じん濃度比と単位セメント量の関係

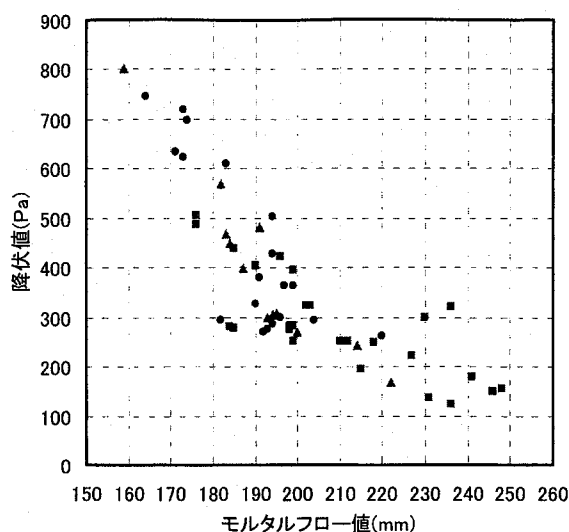


図-10 降伏値とモルタルフロー値の関係

剤を使用した場合の粉じん濃度よりも大幅に高くなることがわかった⁶⁾。これより、吹付け時に発生する粉じんの主なものは、吹付けノズルから吹き出された直後にコンクリートが一体性を失い、空中に分散したセメントなどの粒子であると推測される。また、今回の試験結果から、吹付け空気の総量が同じであれば、コンクリート（モルタル）の塑性粘度が高いものの方が粉じん濃度が低くなることが確認されている。このことから、塑性粘度はコンクリートの一体性を高める（材料分離抵抗性が增大する）ことに寄与しているものと考え、ポンプ圧送が良好な状態であることが前提となるが、塑性粘度を高くするとコンクリート（モルタル）の材料分離抵抗性が増大し、その結果として粉じん濃度が低くなるものと考えられる。

実際にコンクリートの塑性粘度を現場で活かすには、例えば、鉄道建設・運輸施設整備支援機構（旧 日本鉄道建設公団）開発の高品質吹付けコンクリート⁷⁾のように、細骨材の微粒分量に応じた量の石灰石微粉末を2項・図-5に示すように骨材置換して使用することで適切な粘度を付与させるなど、他にも2項・図-3に示すように細骨材量による粘度の調整なども考えられる。

4. まとめ

実大模擬トンネルにおいて、吹付けコンクリート施工時に発生する粉じんに対する様々な粉じん低減技術に関する実験の一環として、コン

クリート（モルタル）の塑性粘度が吹付け時に発生する粉じんに及ぼす影響を調べた。

その結果、圧縮空気を用いて吹付けを行う従来システムでは、吹付け空気の総量が粉じん濃度に大きく影響しており、コンクリートの塑性粘度の影響を明確に捕らえにくい、空気の総量が同じであれば塑性粘度の増大とともに粉じん濃度が低下する傾向が明らかであった。これは、圧縮空気を用いないタイプの吹付けにおいても同じことが確認された。

謝辞：本報告は、平成14年度から平成16年度にかけて、（独）土木研究所、石川島播磨重工業（株）、小林エンジニアリング（株）、（財）先端建設技術センター、西松建設（株）、（株）フジタ、リブコンエンジニアリング（株）、（株）エヌエムビー、鹿島建設（株）、カテックス（株）、ケービーシーマシナリ（株）、（株）鴻池組、信越化学工業（株）、太平洋マテリアル（株）、電気化学工業（株）、日鉄鉱業（株）、前田建設工業（株）、三井住友建設（株）、（株）三井三池製作所で実施した共同研究の成果の一部であり、実験に携わっていただいた関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 大下武志：トンネル建設工事における粉じん対策技術の開発、平成15年度土木研究所講演会講演集、2003
- 2) 室賀陽一郎、伊達重之、大須賀哲夫：モルタルの粘性評価試験装置の開発、土木学会第55回年次学術講演概要集、2000
- 3) 例えば 長瀧重義、米倉亜州夫：回転粘度計によるモルタルの流動性解析の1考察、セメント技術年報、1975
- 4) 室賀陽一郎、越智修、小山昭、末永充弘、伊達重之：新しい粘性試験器によるモルタルの塑性粘度の評価、土木学会第58回年次学術講演概要集、2003
- 5) 野間達也、大下武志、堀内喜久雄、赤坂雄司、坂口武：粉じん低減を目的とした実大模擬トンネルでの吹付け実験、トンネル工学報告集Vol. 16、2006（投稿中）
- 6) 赤坂雄司、大下武志、波田光敬、鈴木裕一：吹付けコンクリートにおける急結剤の有無による粉じん発生量の相違について、コンクリート工学年次論文集、Vol. 26, No. 1, 2004
- 7) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構（旧 日本鉄道建設公団）：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）、1997