

報告 吹付けコンクリート工の施工条件を変動させた場合の粉じん濃度について

赤坂 雄司*1・大下 武志*2・波田 光敬*3・井谷 雅司*4

要旨：山岳トンネル工法の吹付けコンクリート工において、一般的に用いられている粉体急結剤を使用して、実大規模の模擬トンネルと実際の施工設備を用い、施工条件を変動させて粉じん濃度を測定した。その結果、発生する粉じんの濃度は圧送エア流量に大きく依存すること、また圧送エア流量が同じ場合、吐出量およびノズルと壁面との距離には、粉じん濃度が最小となる距離があることが分かった。

キーワード：吹付けコンクリート, 施工条件, 圧送エア流量, 粉じん

1. はじめに

トンネル建設工事の粉じんに起因するじん肺症等の粉じん障害は、重大な社会問題となっており、平成12年12月に作成された厚生労働省の「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」の粉じん濃度の目標レベル $3\text{mg}/\text{m}^3$ を目標に、発注者・施工者は作業環境の改善に努めている。

独立行政法人土木研究所は、トンネル建設工事で最も作業環境の厳しい吹付けコンクリート工に着目し、平成14年度から実大規模の模擬トンネル(延長100m, 断面積約 80m^2)を建設し、官民19機関で粉じん対策技術の開発に関する研究¹⁾を実施している。

本報告は、粉じんの発生に関する基本的なデータを得るために、吹付けコンクリートの施工要因を変えて、発生する粉じんの濃度等について調査した結果について述べたものである。なお、ここで示す試験結果は上記共同研究の成果の一部である。

2. 実験概要

2.1 模擬トンネルの概要

吹付け試験を実施したのは、土木研究所内の内空高さ7.9m×内空幅12.8m×延長100m、内空断面積 81.7m^2 の2車線道路トンネルと同断面の模擬トンネルで、ここには風管径1500mm、最大送風量 $1500\text{m}^3/\text{min}$ の送風設備と、バグフィルター式の最大処理量 $1800\text{m}^3/\text{min}$ の集じん機がトラックマウントされて設備されている。模擬トンネル内の状況を写真-1に示す。



写真-1 模擬トンネル内部の状況

2.2 使用材料および配合

使用した吹付けコンクリートの材料を表-1に、コンクリートの標準配合を表-2に示す。配合は、単位セメント量を $360\text{kg}/\text{m}^3$ とした一

*1 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 技術開発土木グループ 副部長 (正会員)

*2 独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 主席研究員

*3 独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 主任研究員

*4 独立行政法人 土木研究所 技術推進本部 研究員

表-1 使用材料一覧表

材料名	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度:3.15g/cm ³
細骨材	S1	茨城県鹿島産陸砂, 密度:2.61g/cm ³ , F. M.=2.61
	S2	茨城県葛生産砕砂, 密度:2.67g/cm ³ , F. M.=2.79
粗骨材	G	茨城県岩瀬産砕石, 密度:2.64g/cm ³ , F. M.=6.34
急結剤	CA	粉体, カルシウムアルミネート系, 密度:2.57g/cm ³
備考	S1 : S2 = 7 : 3	

表-2 コンクリートの配合表

粗骨材最大寸法 Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
13	12	2.0	58.3	60.0	210	360	1044	685

一般的な吹付けコンクリートを想定したもので、細骨材は陸砂と砕砂を7 : 3で混合したものを使用した。また目標スランプは12.0cm, 配合設計上の空気量は2.0%とした。なお、コンクリートは、運搬時間で約30分の距離にあるJIS生コン工場から出荷した。

2.3 吹付け設備

吹付け方式は湿式方式, 吹付け機はポンプ圧送式のものをを用いた。また吹付け設備は, コンプレッサーや急結剤添加装置等を搭載し, 吹付けロボットのアームが取り付けられた一体型吹付けシステムである。生コン車から吹付け機のホッパーに供給されたコンクリートは, ポンプによって鋼管内を8.5m圧送された後, 圧縮空気によってさらにフレキシブルホース内を10.0m圧送され, ノズルの2.5m手前のY字管部で急結剤が混入されてノズルから吐出される。吹付

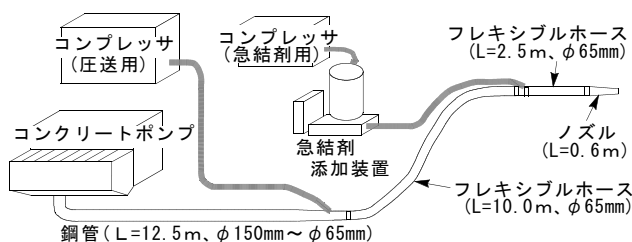


図-1 吹付けシステムの概要

表-3 一体型吹付けシステムの仕様・諸元

コンクリートポンプ	形式	2ピストン平行しゅう動型, 400V, 30kW
	吐出量	Max30m ³ /hr
コンプレッサー	圧送用	400V, 75kW, 12m ³ /min
	急結剤用	400V, 37kW, 5.8m ³ /min
	急結剤添加装置	吐出量:Max 8kg/min, 容量:250 L
	エアドライヤ	200V, 1.7kW, 処理量:6.1m ³ /min
	吹付けアーム	2段スライド式, 最大吹付け高さ:9965mm, スライド長:4500mm
	ベースマシン	173ps, 4WS, 最小回転半径:5.7m

けシステムの構成を図-1に, 一体型吹付けシステムの仕様・諸元を表-3に示す。

2.4 吹付け条件

吹付け条件を表-4に示すが, これらの中で試験のパラメータとした吹き付け条件は, 圧送エア流量, 吐出量, ノズルと壁面との距離, エア圧送距離(圧送エア挿入位置からノズルまでの距離, 図-1), 急結剤の添加率である。換気用風管の先端位置は, 吹付け箇所から50mの位置で送風量は1000m³/min, 集じん機は模擬トンネル出入り口の近傍に設置し, 処理量を12

表-4 吹付け条件

項目	仕様	備考
コンクリート圧送エア流量	5、7、9 m ³ /min	
設定コンクリート吐出量	8、12、16 m ³ /hr	
吹付け厚さ(計画)	15 cm	
ノズル~壁面の距離	1、2、4 m(目視)	
急結剤添加用エア流量	3 m ³ /min	
エア圧送距離	7.5、12.5、17.5 m	
風管先端位置	吹付け箇所から50m	
送風量	1000 m ³ /min	
集塵機処理空気量	1260 m ³ /min	

表-5 主な試験・測定項目一覧表

試験・測定項目	試験・測定方法等	
フレッシュ	スランプ	JIS A1101に準拠。
	空気量	JIS A1128に準拠。
	温度	デジタル温度計にて測定。
粉じん濃度	吹付け箇所から10m, 30m, 50mの位置, 壁から1.5mと中央, 高さ1.0m ローボリュームエアサンプラ、デジタル粉じん計	
硬化物性	初期強度	3hr, 24hrのプルアウト
	圧縮強度	材齢28日の標準養生供試体、コア供試体

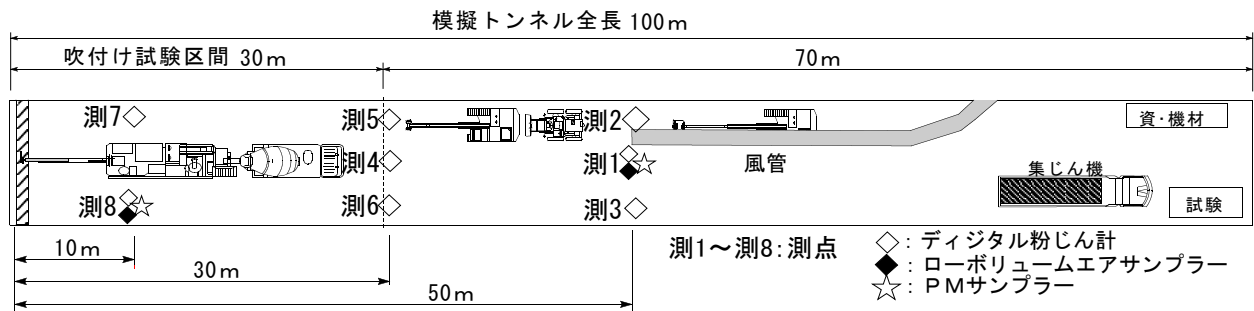


図-2 粉じん濃度測定位置

60m³/minとした。

2.5 試験項目および測定方法

主な試験・測定項目を表-5に示す。

(1) コンクリートの物性

コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ、空気量、温度を、また硬化特性は初期強度と圧縮強度等を求めた。

(2) 粉じん濃度

吹付け箇所から10m、30mと50mの地点において、側壁から1.5m離れとトンネル中央で、高さは作業床から1.0mの位置にデジタル粉じん計を、また吹付け箇所から10mと50mにローボリュームエアサンプラを設置した(図-2参照)。事前の測定から粉じん濃度が定常状態となる時間を吹付け開始から10分とし、ローボリュームエアサンプラに捕集された粉じん量とデジタル粉じん計のカウント値から質量濃度変換係数(K値)を求めた。

なお、K値を求めた箇所は、測1と測8であり、測7も測8のK値を用いて粉じん濃度に換算し、測7と測8を平均して、吹付け箇所から10m地点の粉じん濃度とした。また、測2および測3は、測1で求めたK値を用いて粉じん濃度に換算して、測1～測3の平均値を吹付け箇所から50m地点の粉じん濃度とした。

3. 試験結果および考察

供給するコンクリートのスランプ

を大・中・小という区分に分けて、圧送エア流量をパラメータとして実施した試験結果を表-6に、また吐出量、ノズルと壁面との距離、エア圧送距離、急結剤の添加率をパラメータとして実施した試験結果一覧を表-7に示す。なおここで示した粉じん濃度は、吹付けコンクリート作業によって発生したものとして、吹付けコンクリート作業前5分間にデジタル粉じん計でカウントされた値(バックグラウンド)を測定値から減じて、10mと50m位置について示した。

(1) 圧送エア流量・スランプの影響

スランプの区分は、「大」が18～20cm、「中」が12～14cm、「小」が8.5～10.5cmであったが、区分「大」と「小」の配合は表-2の標準配合を基に、

表-6 試験結果一覧表1

	スランプの区分	圧送エア流量 (m ³ /min)	フレッシュコンクリートの性状			粉じん			
			スランプ (cm)	空気量 (%)	温 度 (°C)	実測K値		粉じん濃度	
						10m (mg/m ³ /cpm)	50m (mg/m ³ /cpm)	10m (mg/m ³)	50m (mg/m ³)
1	中	9	13.5	2.2	24.6	0.0023	0.0024	9.61	4.66
2		7	13.0	1.8	24.2	0.0024	0.0023	4.67	3.50
3		5	13.5	2.6	24.0	0.0022	0.0025	3.09	2.70
4	大	9	20.0	1.6	24.0	0.0023	0.0027	6.25	5.40
5		7	20.0	2.0	24.4	0.0024	0.0024	5.15	3.51
6		5	18.0	2.0	26.2	0.0038	0.0025	5.33	2.40
7	小	9	10.5	3.5	27.0	0.0026	0.0022	8.42	5.40
8		7	10.5	3.2	27.3	0.0024	0.0037	5.11	7.13
9		5	8.5	2.6	27.8	0.0025	0.0026	3.06	2.27
摘要	<ul style="list-style-type: none"> 各ケースの試験回数は1回、吹付け量は5m³、吐出量は12m³/hr、ノズルと壁面との距離は2m。 ここで用いたデジタル粉じん計の標準K値はK=0.003 mg/m³/cpm。 エア圧送距離は12.5m、急結剤添加率は7%。 実測K値は、吹付け開始10分後から吹付け終了までのローボリュームエアサンプラとデジタル粉じん計の値より算出。 粉じん濃度は、デジタル粉じん計の吹付け開始10分後から吹付け終了までの平均値で、10m地点は2箇所、50m地点は3箇所の平均値として算出。 								

表-7 試験結果一覧表2

	施工条件				フレッシュコンクリートの性状			初期強度(換算) (ブルアウト)		圧縮強度 (材齢28日)		粉じん			
	吐出量 (m ³ /hr)	ノズルと壁面の距離 (m)	エア圧送距離 (m)	急結剤添加率 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	3hr (N/mm ²)	24hr (N/mm ²)	標準供試体 (N/mm ²)	コア供試体 (N/mm ²)	実測K値		粉じん濃度	
												10m (mg/m ³ /cpm)	50m (mg/m ³ /cpm)	10m (mg/m ³)	50m (mg/m ³)
10	12	2	12.5	7.0	12.0	2.2	26.7	1.8	13.1	35.3	23.8	0.0021	0.0023	8.45	5.68
11	8	2	12.5	7.0	10.0	2.2	27.2	2.4	11.2	—	23.9	0.0025	0.0027	12.68	8.76
12	16	2	12.5	7.0	11.0	3.0	26.4	2.0	15.6	32.6	20.7	0.0021	0.0025	8.02	5.91
13	12	1	12.5	7.0	10.0	1.8	27.9	2.3	10.8	33.4	23.7	0.0021	0.0025	10.28	6.65
14	12	4	12.5	7.0	14.0	1.5	27.9	2.1	16.4	—	18.3	0.0027	0.0028	11.86	8.32
15	12	2	17.5	7.0	8.5	2.9	29.5	2.3	12.6	32.5	22.1	0.0022	0.0025	9.22	7.33
16	12	2	7.5	7.0	11.0	2.1	29.8	2.3	11.5	31.6	23.6	0.0022	0.0025	10.12	8.28
17	12	2	12.5	5.5	12.5	1.9	25.9	1.9	12.4	34.2	26.2	0.0022	0.0021	9.51	6.61
18	12	2	12.5	0	12.0	1.9	30.3	—	—	30.9	—	0.0026	0.0028	9.81	7.02

摘要

- ・No. 10は5回の試験の平均値, No. 18は2回の試験の平均値, その他の試験回数は1回。吹付け量は全て5m³。
- ・コンクリートの圧送エア流量は9~10m³/min, スランプは8.5~14.0cm。
- ・実測K値は, 吹付け開始10分後から吹付け終了までのローボリュームエアサンプラーとデジタル粉じん計の値より算出。
- ・粉じん濃度は, デジタル粉じん計の吹付け開始10分後から吹付け終了までの平均値で, 10m地点は2箇所, 50m地点は3箇所の平均値として算出。(ここで用いたデジタル粉じん計の標準K値はK=0.003 mg/m³/cpm)

単位水量を調整して決めた。

スランプの区分毎に, 圧送エア流量を調整して5m³/min, 7m³/min, 9m³/minとし, 吹付け箇所から10mの位置と50mの位置の粉じん濃度をグラフにしたものが図-3~図-5である。なお, エア流量計は常時±0.2~0.5m³/min程度変動し, エア圧を見ながら設定値となるようにバルブの開度を調整した。

これらの図から, 多少のバラツキはあるが, いずれの区分のスランプであっても, 粉じん濃度は圧送エア流量に依存するところが大きいことが分かる。

また, スランプと粉じん濃度については相関は見られなかった。

通常の施工では, フレキシブルホースの閉塞を避けるために, 圧送エア流量はコンプレッサーの最大能力近辺とすることが多いが, 今回の施工条件の中で, 圧送エア流量の最小値5m³/minは, 若干の脈動傾向は見られるものの閉塞の心配が少ないレベルであり, 注意して施工にあたれば閉塞しないで吹付けが可能であると想定される圧送エア流量である。

(2) 吐出量の影響

吐出量を8m³/hr, 12m³/hr, 16m³/hrと変

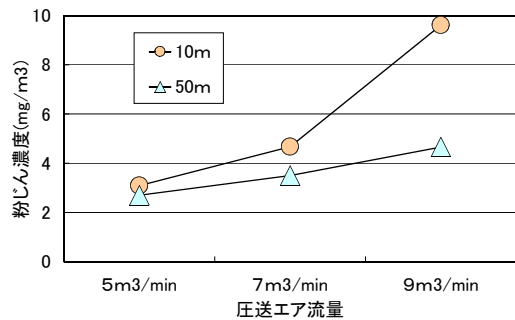


図-3 圧送エア流量と粉じん濃度(スランプ大)

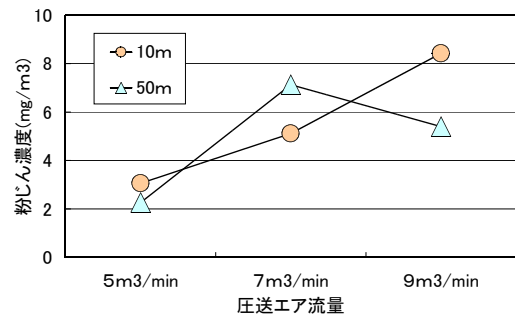


図-4 圧送エア流量と粉じん濃度(スランプ中)

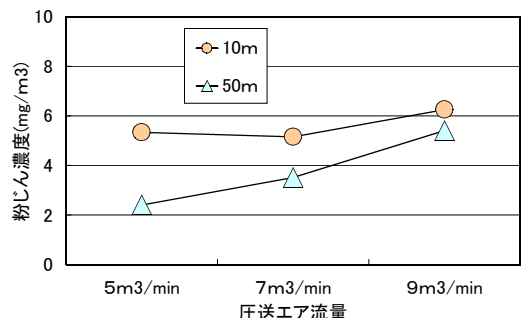


図-5 圧送エア流量と粉じん濃度(スランプ小)

えて、圧送エア流量を一定にして、コンクリートの粉じん濃度の変動を見たものが図-6である。この図から、吐出量 $12\text{m}^3/\text{hr}$ 、 $16\text{m}^3/\text{hr}$ はほぼ同じであるが、 $8\text{m}^3/\text{hr}$ では粉じん濃度が高くなっているのが分かる。

(3) ノズルと壁面との距離の影響

圧送エア流量を一定にして、ノズルと壁面との距離を1m、2m、4mと変えて、粉じん濃度の変動を見たものが図-7である。この図から、ノズルと壁面との距離が2m程度が最小であり、それよりも大きくても小さくても粉じん濃度が高くなるのが分かる。

(4) エア圧送距離の影響

圧送エア流量を一定にして、コンクリート圧送用の圧縮空気の挿入位置を変え、圧送エア流量を7.5m、12.5m、17.5mに変えて、粉じん濃度の変動を見たものが図-8である。今回の吹付けシステムでは12.5mが標準であるが、この時の粉じん濃度が一番小さく、これよりも小さくても大きくても粉じん濃度が大きくなるのが分かる。

(5) 急結剤添加の影響

圧送エア流量を一定にして、急結剤の添加率を7%、5.5%、0%に変えて、粉じん濃度の変動を見たものが図-9である。急結剤添加率5.5%と7%はほぼ同程度であったが、急結剤を添加しない場合は、粉じん濃度が高いことが分かった。

(6) 粉じんの発生、濃度

吹付けコンクリートの施工で発生する粉じんは次のような機構によると考えられる。

まずコンクリートが配管中をポンプによって圧送され、途中でコンクリートが圧縮空気の挿入によってほぐされ、閉塞されたフレキシブルホースの内部を高速で圧送される。ノズルから大気中に射出・開放される時に、セメントペーストが微細粒子として逸散し、また壁面に衝突してはね返った微細粒子が、粉じんとなって空气中に浮遊する。

供給されるコンクリート量が同じであれば、

圧縮空気量が多い時と少ない時では、閉塞され

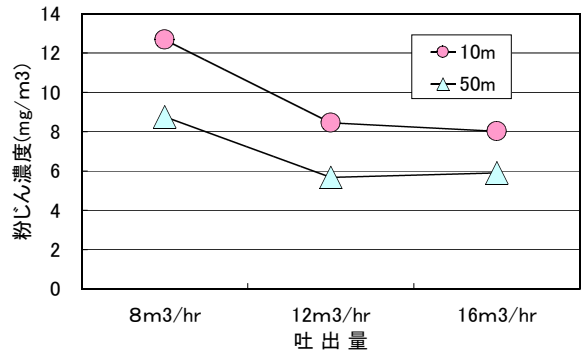


図-6 吐出量の影響

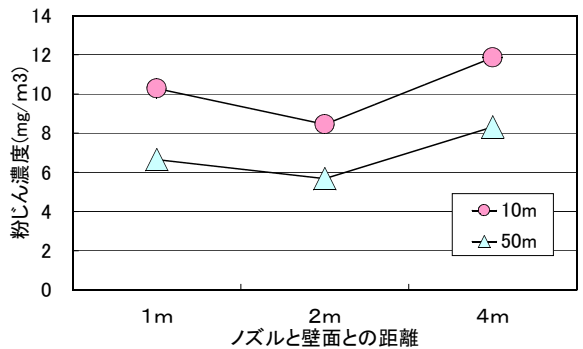


図-7 ノズルと壁面との距離の影響

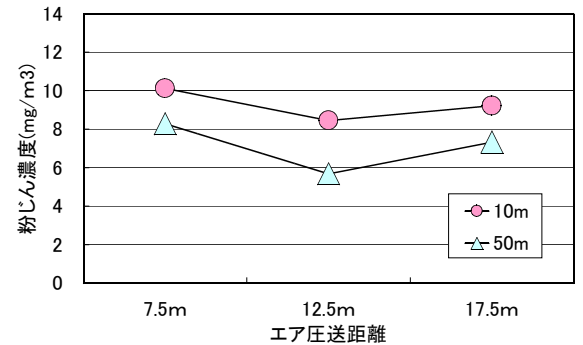


図-8 エア圧送距離の影響

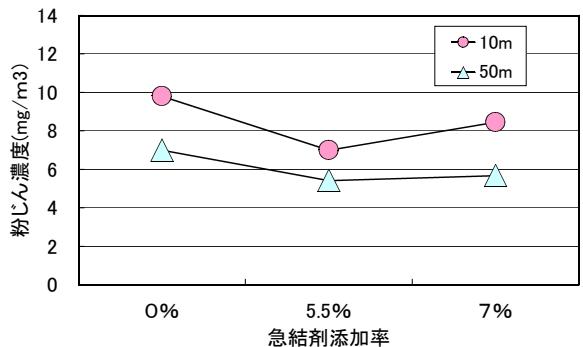


図-9 急結剤添加の影響

たフレキシブルホース内を移動する速度やノズから大気中に射出・開放される速度が変わり、これが空気中に浮遊させる微細粒子の量を変動させて、粉じん濃度に影響するものと考えられる。また供給されるコンクリート量が少なくなれば、圧送エア流量が同一であっても、相対的な圧送エア流量が多くなって、結果として発生粉じんが多くなるものと考えられる。

急結剤の添加と粉じん濃度との関係については、粉体急結剤を用いても粉じん濃度は若干小さくなっており、セメントペーストの逸散や壁面衝突後のはね返りの減少などによるものと考えられる。

なお、施工要因の変動に伴う強度特性については、ここでは触れなかったが、いくつか特徴のある現象も認められるので、過去の研究^{2),3)}等を参考にして、考察していきたいと考えている。

4. まとめ

ここで得られた知見を次に示す。

- 1) 粉じん濃度は圧送エア流量に依存するところが多い。
- 2) 圧送エア流量が同じ場合、吐出量が少ないと粉じんの多くなる。
- 3) 圧送エア流量が同じ場合、ノズルと壁面との距離およびエア圧送距離は、最小となる距離があり、近く(短く)ても、遠く(長く)ても、粉じん濃度は大きくなる。

5. おわりに

吹付けコンクリート工は、施工特性が大きく関わってくるため、室内レベルの試験で実際の現象を再現することは難しく、実施工に近い規模での試験を実施する必要がある。室内試験のみで、急結剤の作用や混合状況、硬化のメカニズムと粉じん発生との関係などを解明することが難しい。

また今回の報告は、粉じんの発生に対して無対策のものだけであるが、共同研究の中では、粉じん低減対策を施した場合や、急結剤をスラリー化したシステム、局所集じんシステムや、液体急結剤を用いた場合の他、圧縮空気を用いないで回転力を用いたシステムなどについて、粉じん低減効果を把握し、大きな成果を得ている。それらについては、別の機会に報告する予定である。

謝 辞

本報告は、「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」として、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)、(株)カテックス、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)三井三池製作所の共同研究の成果の一部であり、試験に携わっていただいた共同研究各位に深く感謝いたします。

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,2003.10.8
- 2) 安藤,大野,伊藤,魚本:吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.21, No.2, pp.1351-1356,1999.7
- 3) 杉山,平間,富山,魚本:吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.21, No.2, pp.1357-1362,1999.7