

報告 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

赤坂 雄司^{*1}・大下 武志^{*2}・波田 光敬^{*3}・鈴木 裕一^{*4}

要旨：実大規模の模擬トンネルと実施工の吹付け機器，換気設備を用いて，粉体急結剤を用いた一般的な吹付けコンクリートと，同一条件で粉体急結剤を添加しない吹付けコンクリートの吹付け試験を実施し，発生する粉じん量を比較した。その結果，粉体急結剤を添加しない吹付けコンクリートの方が，発生粉じん量が多くなるという結果を得た。

キーワード：吹付けコンクリート, 粉じん, 粉体急結剤, 急結剤添加なし

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 mg/m^3 を目標に，発注者・施工者は作業環境の改善に努力している。

独立行政法人土木研究所は，トンネル建設工事でも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 80 m^2)を建設し，官民19機関と共同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，一般的な粉体急結剤を添加した場合と添加しない場合とで吹付け試験を実施し，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報告するものである。

なお，ここで示す試験は上記共同研究の一環として実施した，一連の模擬トンネルにおける吹付け試験の中で実施したものの一部である。

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，土木研究所内に新たに建設された内空高さ7.9m × 内空幅12.8m × 延長100m，内空断面積 81.7 m^2 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，バグフィルター式の最大処理量 $1800 \text{ m}^3/\text{min}$ の集塵機もトラックマウントされて設備されている。模擬トンネルの全景を写真 - 1 に示す。



写真 - 1 模擬トンネルの全景

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

*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 課長 (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 (株)フジタ 技術センター 土木研究部

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:2.56g/cm ³ , F. M.=2.61
	S2	茨城県葛生産砕砂, 密度:2.67g/cm ³ , F. M.=2.73
粗 骨 材	G	茨城県岩瀬産碎石, 密度:2.65g/cm ³ , F. M.=6.01
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	セメント	細骨材	粗骨材
13	12	3.0	58.3	60.0	210	360	1035	694

に、コンクリートの配合を表 - 2 に示す。配合は、単位セメント量を360kg/m³とした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で混合したものをを使用した。また目標スランプは12±2.5cm、配合設計上の空気量は3.0%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であり、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、電動コンプレッサーや急結剤添加装置等を搭載し、吹付け操作のためのアームが取付けられた一体型吹付けシステムである。生コン車によって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

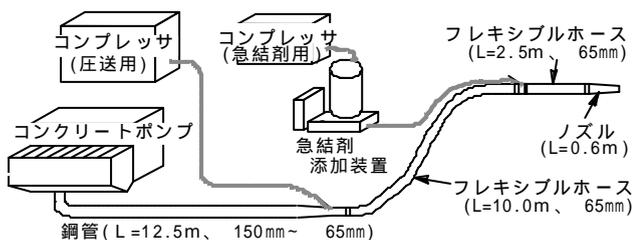


図 - 1 吹付けシステムの概要

ース内を7.5m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。

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	2ピストン平行しゅう動型, 400V, 30kW,	
コンプレッサ	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 8 kg/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	
吹付け能力	max30m ³ /hr	
ベースマシン	173ps, 4WS, 最小回転半径: 5.7m	

2.4 吹付け条件と試験ケース

吹付け条件を表 - 4 に示すが、試験のパラメータは、急結剤の添加の有無である。換気用風管の先端位置は、吹付け箇所から50mの位置で

表 - 4 吹付け条件

項 目	仕 様	備 考
設定コンクリート吐出量	12 m ³ /hr	
吹付け厚さ(計画)	15 cm	
ノズル～壁面の距離	約2m(目視)	
圧送エア流量(推定)	10 m ³ /min	バルブ全開
急結剤添加エア流量(推定)	4 m ³ /min	
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 ユ	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。
施 工 性	急結剤添加量	満タン返し法
	粉じん量	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ブラ, デジタル粉じん計, PMサンブラ(簡易型粉じん分級器)
	目視観察	脈動, 付着状況, 急結状況, 粉じんなど

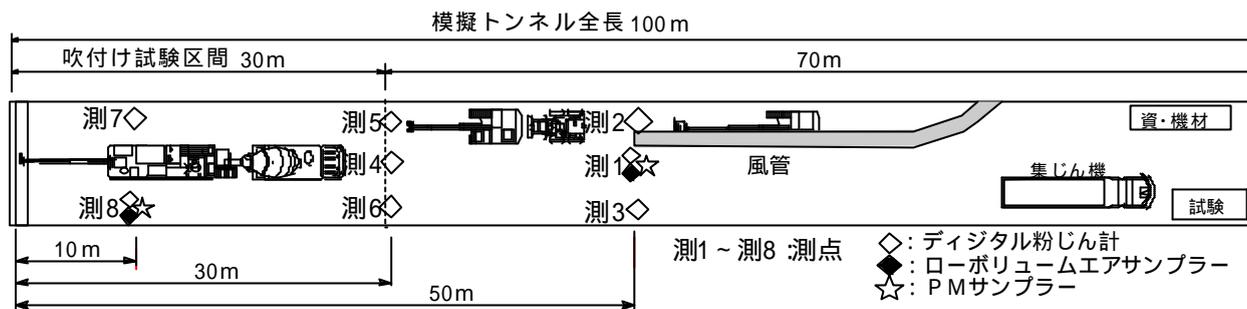


図 - 2 粉じん濃度測定位置

送風量を $1000\text{m}^3/\text{min}$ とし、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 $1260\text{m}^3/\text{min}$ とした。

なお、コンクリートの圧送空気量は調整せず、バルブを全開にした状態で吹付けを行い、推定で $10\text{m}^3/\text{min}$ の空気量が供給されたものと考えられる。また、急結剤混入用の圧縮空気は推定で $4\text{m}^3/\text{min}$ であり、添加しないケースの場合も、バイパス回路に切り替えて圧縮空気を供給したため、両ケースのトータルの供給空気量は



写真 - 2 吹付け試験実施状況



写真 - 3 粉じん濃度測定状況

同じである。

2.5 実験項目および実験方法

主な試験・測定項目を表 - 5 に示す。

(1) 実験項目および実験方法

コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ、空気量、温度等について試験を実施した。また、急結剤を添加したケースについては、施工特性としてリバウンド率や目視観察を実施し、硬化特性は強度等を求めた。

なお急結剤の添加率は、セメント量の7%を目標に調整し、その添加量は、吹付け開始前にタンクを満杯にしておき、吹付け終了後に同じレベルまで補給する、いわゆる「満タン返し」法で求めた。

(2) 粉じん濃度

吹付け箇所から10m、30mと50mの位置で、側壁から1.5mと中央、高さ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ーと簡易型粉じん分級器(PMサンプラー)を設置した(図 - 2 参照)。吹付けコンクリートの施工に伴う発生粉じん量を求めるために、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ー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値を求めたのは、測1と測8であり、吹付け箇所から10m地点は測7も測8のK値を用いてデジタル粉じん計のカウント値を粉じん量に換算し、測7、測8を平均して、吹付け

表 - 6 試験結果一覧表

	スラン プ (cm)	空気量 (%)	温度 ()	吹付 け量 (m ³)	所要 時間	吐出量 (m ³ /hr)	急結剤 添加率 (C×%)	初期強度 (プルアウト)		長期強度				はね返 り率 (%)
								3hr (N/ mm ²)	24hr (N/ mm ²)	標準		コア供試体		
								7day (N/ mm ²)	28day (N/ mm ²)	7day (N/ mm ²)	28day (N/ mm ²)			
急結剤添加	15.0	1.6	23.0	4.8	25 10"	11.9	7.4	1.79	19.1	34.7	42.6	21.5	28.2	27.4
急結剤なし ^{*1}	14.5	2.4	27.7	3.8	20 00"	11.4	-	-	-	-	-	-	-	-
摘 要	急結剤添加ケースは、3回実施した試験のうち、2回目のデータを示した。なお、急結剤を添加しないケースの実施回数は、1回のみである。 ^{*1} 急結剤を添加しないケースでは、強度特性に関する試験は実施しなかった。													

箇所から10m地点の粉じん濃度とした。また、測2，測3は、測1で求めたK値から、粉じん量に換算して、測1，測2，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。さらに、吹付け箇所から30m地点の粉じん濃度は、測1と測8のK値の平均値を用いて測4，測5，測6の粉じん濃度を算出し、これらを平均して算出した。デジタル粉じん計のカウントは30秒ごとの自動計測で実施した。

このほかに、ローボリュームエアサンプラと同じ箇所でも、捕集粉じんを粒径2.5μm以下と2.5~10μmとに分級できるPMサンプラを用いて、簡易的に粉じんの粒径割合を調べた。

なお、粉じんを捕集したフィルタはデシケータ等での乾燥は行わずに、捕集後すぐ(30分程度)に重量を測定した。

3. 試験結果

ここで実施した吹付け試験の結果の内、施工性に関するものを中心に表-6に示すが、急結剤を添加しないケースでは、強度特性に関する試験は実施しなかった。

また、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、測定値から減じて示した。

ただし、吹付けに際して、圧送空気量は調整せず、そのまま試験を実施したため、一般的な

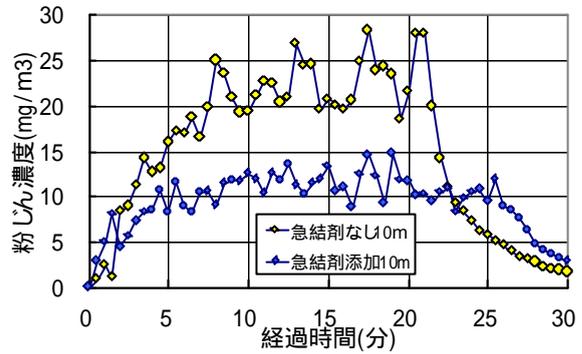


図 - 3 経過時間と粉じん濃度(10m)

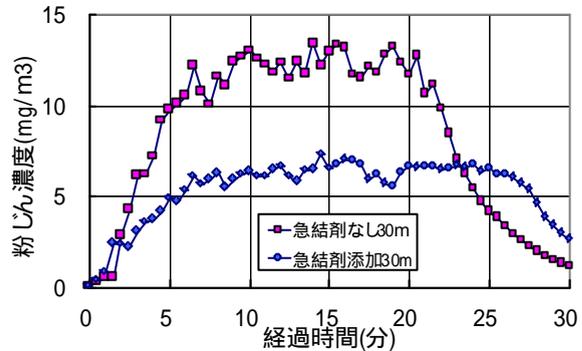


図 - 4 経過時間と粉じん濃度(30m)

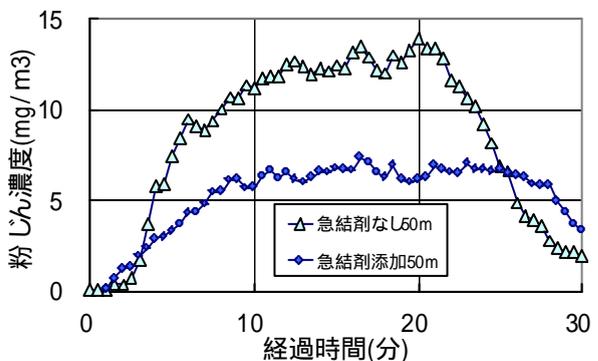


図 - 5 経過時間と粉じん濃度(50m)

表 - 7 粉じん濃度とK値

		吹付け箇所からの距離		
		10 m	30 m	50 m
急結剤添加 ケース	粉じん濃度 (mg/m ³)	11.86	6.37	6.37
	K値 (mg/m ³ /cpm)	0.00224	—	0.00234
急結剤なし ケース	粉じん濃度 (mg/m ³)	23.45	13.05	13.09
	K値 (mg/m ³ /cpm)	0.00331	—	0.00277
備 考		・粉じん濃度は、吹付け開始 10 分後から20分までの平均値。 ・K値は、吹付け開始10分後から吹付け終了までの、ローボリユームエアサンプラとデジタル粉じん計の値より算出。		

適正な空気流量よりも多くなり、一般的な吹付けコンクリートの発生粉じんと比較すると、多いようである。図 - 3 ~ 図 - 5 は、吹付け箇所から10m, 30m, 50mの急結剤の有無による粉じん濃度の経時変化を示したものである。また、表 - 7 は同じく10m, 30m, 50mの位置での粉じん濃度とK値を示したものである。

これらから、10m, 30m, 50mそれぞれの位置での粉じん濃度は、どの位置でも急結剤を添

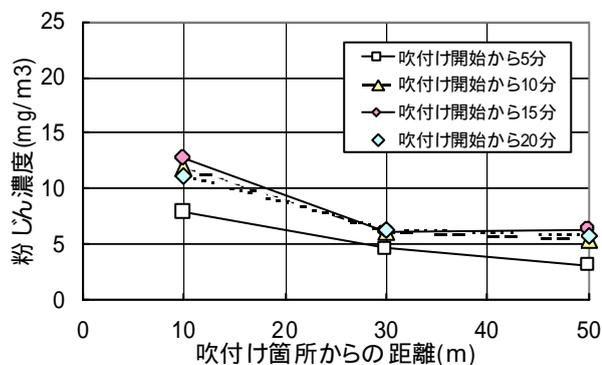


図 - 6 距離ごとの粉じんの経時変化(急結剤添加)

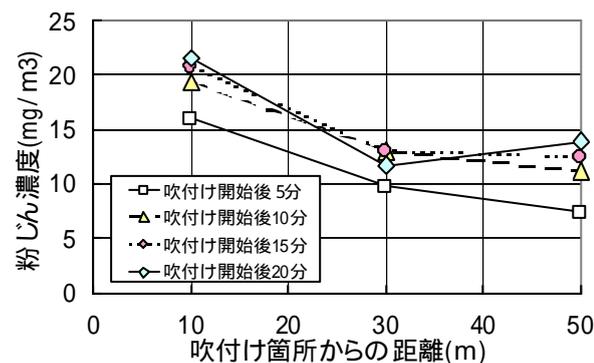


図 - 7 距離ごとの粉じんの経時変化(急結剤なし)

加したケースは添加しないケースのほぼ1/2となっていることがわかる。またK値は急結剤の添加の有無, ならびに測定場所によって大きく変わることも明らかとなった。

次に図 - 6, 図 - 7 は、それぞれのケースの10m, 30m, 50mの位置での粉じん濃度を吹付け開始からの時間ごとに示したものである。

これらの図から、両ケースともに、10m地点の粉じん濃度は、30m, 50mの倍程度あるが、粉じん濃度が定常状態となる吹付け開始から10分経過以後は、30m地点と50m地点はほぼ同じ粉じん濃度となっていることがわかる。

図 - 8 及び図 - 9 は、それぞれのケースの10mと50mの位置での粉じんの粒径割合(2.5µm以下と2.5~10µm)を示したものである。

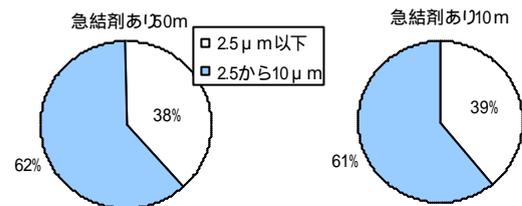


図 - 8 急結剤添加ケースの粉じんの粒径割合

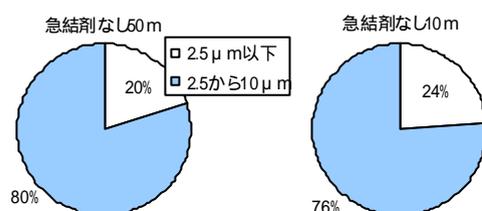


図 - 9 急結剤なしケースの粉じんの粒径割合

これらの図から、急結剤添加ケースと添加しないケースでは、それぞれで50mと10mの分級した粉じんの割合がほぼ同じである。また、急結剤を添加したケースの方が添加しないケースより、2.5µm以下の粉じんの割合が多いことがわかる。なお、粉体急結剤自体の粒径分布は2.5~10µmの部分が多い。

コンクリートがノズルから勢いよく吐出されるときに粉じんが発生し、換気の風に載って粉じんは出口に向かうが、浮遊していた粉じんが、

吹付け箇所から離れるにしたがって沈降堆積するのは、粒径の大きなものだけでなく、粒径の小さなものも同様に沈降堆積していると考えられる。また、デジタル粉じん計は、微細な水の浮遊粒子(ミスト)も一緒に測定していると考えられるが、ここではそれらの区別ができず、今後の課題である。

4. まとめ

粉体急結剤を添加した一般的な吹付けコンクリートと添加しないケースとの粉じん濃度等の比較で、次のことが明かとなった。

- 1)吹付け箇所から10m, 30m, 50mのそれぞれの位置での粉じん濃度は、どの位置でも急結剤を添加したケースは添加しないケースのほぼ1/2となり、急結剤を添加しないと粉じん濃度は大幅に大きくなる。
- 2)発生粉じんを簡易的に分級した結果、粉じんの粒径割合(2.5 μm以下と2.5~10 μm)は、急結剤を添加しないケースでは、急結剤添加ケースに比較して2.5~10 μmの大きな粒径の占める割合が多い。
- 3)浮遊していた粉じんが、吹付け箇所から離れるにしたがって沈降堆積するのは、粒径の大きなものだけでなく、粒径の小さなものも同様に沈降堆積する。

5. おわりに

ここまで、一般的な吹付けコンクリートにおいて、粉体急結剤添加の有無によって、発生する粉じん量や、吹付け箇所からの距離の違いによる相違、粒径の割合等が、どのように変わるのかを見てきた。

従来から、吹付けコンクリートによって発生する粉じんの中には粉体急結剤が多く含まれていると言われ、粉体急結剤の使用が粉じん量を増大させていると考えられてきた。今回の急結剤を添加しないケースの方が粉じんが多いという結果は、これを否定するものではないが、急結剤の作用によって粉じんが少なくなることが

わかった点では、大きな成果と言える。

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、実施工と同じ機械・設備、材料を用い、実施工に近い規模での試験を実施する必要がある、それだけに室内試験から、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分野となっている。

なお、今回は考察を行うためのデータも十分に揃っておらず、結果の報告が中心となったが、より微視的な分野に立ち入った粉じんの発生機構や、粉体急結剤の効果などについては、今後の課題として行きたいと考えている。

また、ここで示した吹付け試験は、粉じんの発生に対しては無対策のものについてであるが、共同研究の中では、一般的な吹付け施工システムで粉じん低減対策を施した場合の発生粉じんや、急結剤をスラリー化した場合、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吹付けコンクリートの施工システムなどについて、模擬トンネルを用いた吹付け試験を実施し、粉じん低減効果等についてデータを収集し、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、独立行政法人 土木研究所と(財)先端建設技術センターならびに民間17社とで実施している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い感謝の意を表します。

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