

遠心力トンネル吹付け工法の実用化と その粉じん低減効果

—実大模擬トンネルでの吹付け評価試験—

Dust Reduction through Utilization of the Centrifugal Spraying System (Dustless Shotcrete) - Evaluation on a Full Size Test Tunnel -

長野 祐司 YUJI NAGANO
清水 安雄 YASUO SHIMIZU
丸山 信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA
魚住 雅孝 MASATAKA UOZUMI
山地 宏志 HIROSHI YAMACHI

トンネル建設工事に伴って発生する粉じん障害対策として、粉じん低減技術の開発は喫緊の課題となっている。当社は以前より遠心力トンネル吹付け工法（ダストレスショットクリート工法）を開発し、数現場での施工実績を重ねその低粉じん性を確認してきた。また当社は、(独)土木研究所が立ち上げた「粉じん対策技術開発」の官民共同研究に参加し、実大規模のトンネル実験施設で評価試験を実施して、本工法が十分実用性を有し粉じん低減効果が大きいことを実証した。本報では、その試験結果を含めて本工法の実用化について報告する。

キーワード：遠心力、低粉じん、吹付け、覆工、トンネル

In tunnel construction, the development of dust control measures designed to meet public environmental guidelines is an urgent issue.

In line with this, the low dust ‘Dustless Shotcrete’ spraying system which uses centrifugal force was developed, and the efficacy of the system was verified through the practical application at a number of tunnel construction sites.

In this paper, a summary of the Dustless Shotcrete system and the inspection results of dust reduction carried out in a full size test tunnel are included.

Key Words: Centrifugal Force, Low Dust Discharging, Shotcrete, Lining, Tunnel

1. はじめに

山岳トンネルの施工において、吹付けコンクリート工は重要な支保工として用いられている。昨今の作業環境の改善要求から、NATM工法における粉じん発生要因のうち、最大の発生量を占めるコンクリート吹付け時の粉じんの低減技術の開発が求められてきた。作業中の大量の粉じん発生は、作業の効率を低下させるだけでなく、人体に吸入されるとじん肺症等の悪影響を及ぼす。

平成12年には厚生労働省により「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」が示され、切

羽から50mの位置で $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下の粉じん濃度とする目標値が定められ、事業者や施工者に対して粉じん濃度低減対策の実施を求めている。

従来のトンネル吹付け工法は、圧縮空気をを用いた吹付け方式により、コンクリートと急結剤を圧縮空気の力で攪拌混合しながら、ホース先端のノズルより高速で吹き出し地山に吹き付けている。このときコンクリートと急結剤が完全には混合せず、先端ノズルより未混合の急結剤や、コンクリートの微粉末が大気中に拡散・飛散し大量の粉じんを発生させている。

このような状況では、ガイドラインの目標値を現行の

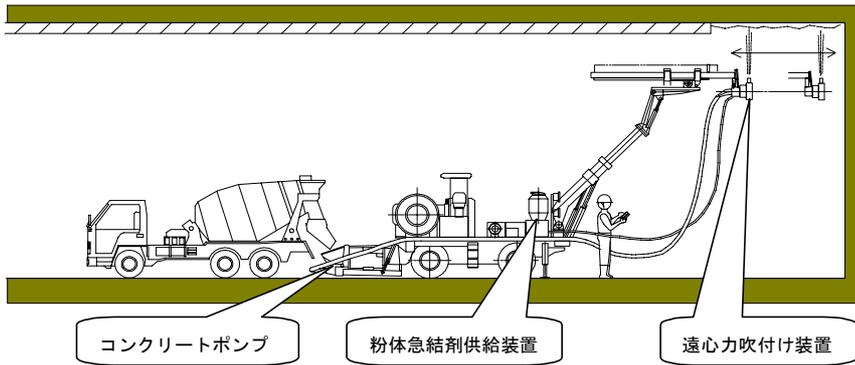


図-1 遠心力トンネル吹付け工法概念図



写真-1 遠心力トンネル吹付け機

吹付け技術で満足することは困難であり、様々な技術上の対策が行われている。すなわち換気設備の大型化、大型集じん機の設置や粉じん低減剤の使用などの対策が行われている。これらの技術は、ある程度の成果をあげているが、吹付け時の粉じん量が減少していないことやコストアップにつながることから根本的な解決策にはなっていない。

これらの問題点を解決するために、当社では、従来技術のトンネル吹付け工法で用いられている圧縮空気を使用せずに、高速回転するインペラから遠心力でコンクリートをトンネル地山に投射する方式の、遠心力トンネル吹付け工法（ダストレスショットクリート工法）¹⁾を開発してきた（写真-1）。

このような状況下、平成14年度から3年間にわたり（独）土木研究所で民提案型共同研究「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」²⁾が実施された。当社はそれに関する研究テーマの技術の一つとして遠心力トンネル吹付け工法で参加し、評価試験を行った。その成果は、（独）土木研究所より「トンネル工事における吹付け作業時の発生粉じん対策技術の手引き」として平成17年9月に一般に公表された。

本論文では、土木研究所の共同研究における遠心力トンネル吹付け工法による吹付け評価試験で行った、コンクリートの性状や急結剤を変化させた条件のもとでの粉じん濃度と仕上がりコンクリート品質に関する試験結果について述べる。

2. 遠心力トンネル吹付け工法の展開

開発着手から模型実験機により要素実験を経て、当社施工の80m²クラスの道路トンネル現場において、過去2現場で実証試験工事を行い、施工品質、施工性の確認

および実用化の改良を加えてきた。そして平成16年3月から、静岡支店網代トンネル工事においてトンネル掘削開始時から吹付け実施に投入し、実際の掘削サイクルの中で、従来のエア吹付け方式と同等の能率で施工を行い実用化を果たし、併せて低粉じん性を確認した。

同時期、20～5m²クラスの小断面トンネル専用の遠心力トンネル吹付けシステムを開発した。粉じん発生量を抑制した吹付け工法として作業環境改善の目的で、横浜支店の相模原トンネル、名古屋支店の豊川トンネルおよび北海道支店の占冠トンネル等の、切羽の粉じん低減対策が困難な小断面トンネル工事の実施工に導入、現在も展開中である。

3. 遠心力トンネル吹付け工法の概要

遠心力トンネル吹付け工法は、走行式台車に装着された多関節のアーム先端に遠心力吹付け装置（写真-2）を取付けた吹付けシステムである。図-1のようにコンクリートをアーム先端の遠心力吹付け装置までコンクリートポンプで圧送供給し、吹付け装置内部の混合攪拌部にてコンクリートと添加された粉体急結剤とを機械的に混合攪拌し、インペラ回転による遠心力を利用してノズルから投射する。その詳細構造を図-2に示す。吹付けるコンクリートの流れは次のとおりである。

- ①ベースコンクリートをブーム先端のヘッド部の遠心力吹付け装置まで、配管内をコンクリートポンプのピストン圧のみで圧送供給する。
- ②ヘッド部内部の混合攪拌部にて、コンクリートと添加された急結剤を攪拌翼で強制混合攪拌する。
- ③混合された吹付けコンクリートは、ヘッド部先端の高速回転するインペラにより遠心力を与えられ、吐出口より任意の方向に投射・吹付けを行う。

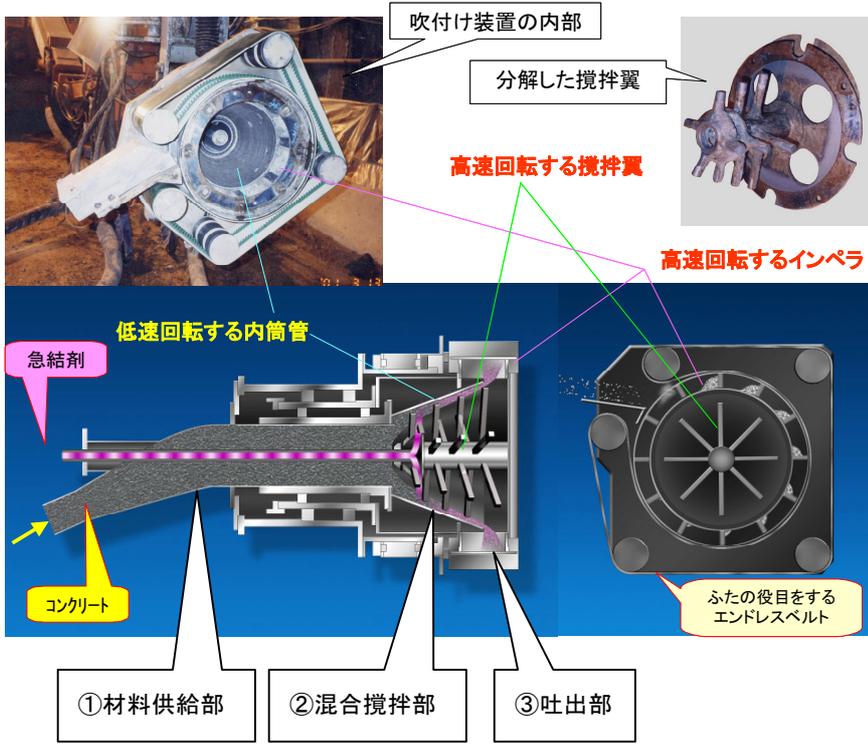


図-2 ヘッド部の遠心力吹付け装置構造図



写真-2 遠心力吹付け装置



写真-3 模擬トンネル外観

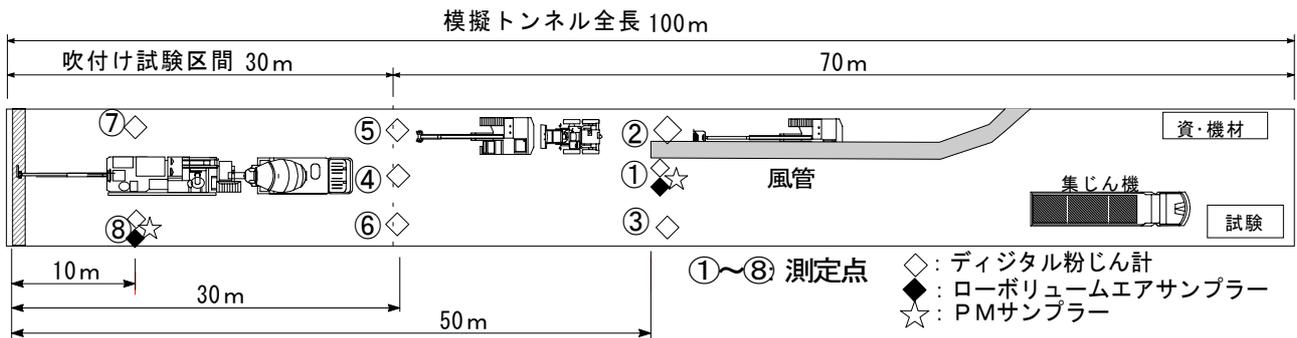


図-3 測定機器配置図

コンクリートと粉体急結剤を強制攪拌により確実に混合すること、高圧・大量の圧縮空気の噴出力によらないインペラ回転による遠心力で投射・吹付けすることにより、大気中への粉体急結剤やコンクリートの微粉末の拡散・飛散が少なく、粉じん発生量を大幅に低減した。

4. 共同研究試験

(1) 模擬トンネルの概要

(独)土木研究所により、平成14年度に建設工事環境改善実験施設(以下、模擬トンネル:延長100m,断面積80m²)が建設され、この施設で共同研究の評価試験を行ってきた。模擬トンネルでは、粉じん対策技術の効果を確認し、完成度を高める上で必要となる実大規模の実験を行うことができる。

(2) 実験項目および実験方法

模擬トンネル内の吹付け実験時の機械、計測器等の配置を図-3に示す。粉じん濃度測定は、デジタル粉じん計とローボリュームサンプラーでの併行測定を行った。

模擬トンネルの外観を写真-3に、50m後方地点のローボリュームサンプラーおよびデジタル粉じん計による粉じん計測状況を写真-4に示す。



写真-4 粉じん計測状況



写真-5 遠心力吹付け方式による粉じん発生状況



写真-6 エア吹付け方式による粉じん発生状況

表-1 推奨コンクリート配合

水セメント比	細骨材率	スランブ	単位重量kg				急結剤添加率 (粉体急結剤) C×%	
			水	セメント	陸砂	砕砂		粗骨材
W/C	S/a	cm	W	C	S1	S2	G	C×%
%	%							
58	60	12-18	210	360	714	306	684	7.0

表-4 一軸圧縮試験結果

供試体	7日強度 N/mm ²		28日強度 N/mm ²	
	プレーン供試体	コア供試体	プレーン供試体	コア供試体
2004年6月18日	27.2	17.3	36.4	22.9
2004年6月19日	27.4	17.3	36.6	22.2

表-2 粉じん発生影響評価試験ケース一覧

ケース名	M-1	M-2	M-3	G-1	G-2	G-3		
						G-31	G-32	G-33
細骨材の種別	混合砂			砕砂のみ				
急結剤の種別	汎用粉体急結剤	低粉じん型粉体急結剤	液体急結剤	汎用粉体急結剤	低粉じん型粉体急結剤	液体急結剤		
水セメント比 W/C	58.3 %			50 %		60 %		
細骨材率 S/a	60 %							
目標スランブ	10-12 cm		12-20 cm	10-12 cm		12-20 cm		
単位重量 kg	水 W	210	180	216	180	190	200	
	セメント C	360	360	360	360	380	400	
	細骨材 s1	736	747	0	0			
	細骨材 s2	308	320	1,040	1,084	1,057	1,031	
	粗骨材 G	685	716	689	716	700	681	
	混和剤 C×%	-	1.2 %	-	1.1 %	0.8 %	0.5 %	
	助剤	-	0.01	-	0.01			
急結剤添加率 C×%	7	10	7	10				

(3) 比較対象とされた対策技術グループ

今回共同研究に参加した民間17社の比較対象とされた粉じん対策技術グループは、次の3つである。

①エア吹付け粉体急結剤グループ

粉体急結剤を用いて、粉じん低減剤、SEC練り、スラリーショットにより発生粉じん量の低減を図る。

②エア吹付け液体急結剤グループ

アルカリフリー液体急結剤を用いたエア吹付けにより粉じん量の低減を図る。

③新方式グループ

エアを使用せず、回転力等を用いた吹付けシステムにより粉じん量の低減を図る。

上述のなかで、当社の遠心力トンネル吹付け工法の技術は、③新方式グループに属する。

遠心力トンネル吹付け工法による粉体急結剤を使用するの吹付け状況および粉じん発生状況を写真-5に示す。また同じ条件のもとで粉体急結剤を使用した従来工法であるエア吹付け方式での吹付け中の粉じん発生状況の比較を写真-6に示す。

5. 使用材料および試験方法

試験では、まず表-1に示す遠心力吹付け工法の推奨配合を用いての吹付け試験を実施し、粉じん発生状況なら

表-3 混合砂の場合の吹付け試験結果

ケース名	M-1				M-2				
番号	①	②	③	④	①	②	③	④	
出荷時スランプ cm	22.0	22.5	22.5	22.0	22.5	21.5	21.0	22.0	
吹付け時スランプ cm	15.5	15.0	13.0	-	18.0	12.5	18.0	20.0	
坑内換気量 m ³ /min	1,000				1,000				
坑内集塵量 m ³ /min	1,200				1,200				
急結剤種別	汎用粉体急結剤				低粉じん型粉体急結剤				
急結剤添加率 %	9.30	9.30	8.50	8.30	7.70	9.00	7.60	7.90	
はね返り率 %	-	-	-	25.70	-	-	-	32.30	
粉じん濃度 mg/m ³	10m後方	1.13	1.43	2.50	-	0.70	1.20	1.18	-
	50m後方	1.09	1.14	1.74	-	0.70	1.00	1.24	-
プリアウト試験 N/mm ²	3時間	2.04	1.88	2.06	-	2.76	2.31	2.50	-
	24時間	14.80	12.80	14.80	-	17.20	15.80	16.80	-

表-5 細骨材と急結剤の種類を変えた場合の吹付け粉じん濃度の変化

ケース名	M-2				M-3	G-1	G2		G-31	G-32				G-33
試験回数	⑤	⑥	⑦	⑧	①	①	①	②	①	①	②	③	④	①
急結剤添加率 %	4.50	6.70	5.30	8.60	12.10	7.00	8.30	8.30	11.20	10.40	14.40	10.60	10.50	10.10
10m 粉じん濃度 mg/m ³	0.75	0.75	-	1.67	-	2.09	2.49	3.29	1.62	1.30	2.40	1.50	1.77	2.09
50m 粉じん濃度 mg/m ³	0.44	0.47	1.54	1.23	1.59	1.26	1.61	2.37	1.30	1.22	1.87	1.38	1.34	1.47

びに吹付けられたコンクリートの品質を確認した。この粉じん濃度を基準として、骨材の粒度特性やスランプ変動等による粉じん濃度への影響等を調べるため、コンクリートの細骨材を混合砂とした場合と、一般的に現場で使用される砕砂のみの場合との比較を行った。また、一般的な粉体急結剤と、低粉じん型の粉体急結剤、さらに液体急結剤の3種を用いて吹付け試験を実施し、細骨材種類と急結剤種類を変えた場合の粉じん濃度への影響を確認した。表-2に試験ケースの一覧とその配合を示す。

6. 試験結果

表-3に混合砂の場合の吹付け試験結果の一覧を示す。表に示すように、当該試験は異なる急結剤を用いて行った。各試験では20分以上の吹付けを行い、粉じん濃度測定、コンクリート強度試験を実施した。さらに、1m³のコンクリートを用いてはね返り率の測定を2回行った。

なお、表中の粉じん濃度はローボリューム・サンプラーを用いて測定した値である。

- ①粉じん濃度をみると、一般的な粉体急結剤を用いた場合でも50m後方で1.09～1.74mg/m³、10m後方で1.13～2.50mg/m³と非常に小さく、低粉じん型急結剤を用いた場合では50m後方で0.70～1.24mg/m³、10m後方で0.70～1.18mg/m³にまで低下した。10m後方と50m後方で粉じん濃度にほとんど差が生じていないのは、発生する粉じん量が絶対的に少ないため、換気による希釈効果や集じんの効果が顕著に現

れないためと考えられる。

- ②はね返りについては、表-3にあるように吹付け時のスランプが若干大きいため、急結剤を多めに使用したが、はね返り率は25.7%と32.3%と若干大きなものとなった。しかし、これは吹付け方式によるものではなく、コンクリートの粘性に起因するものと考えられる。

- ③プリアウト試験結果については、24時間でいずれも10N/mm²以上の強度を発現している。

- ④一軸圧縮強度は表-4に示すように、28日でプレーン供試体が36N/mm²以上を、コア供試体が22N/mm²以上を発現し、コア供試体の7日強度でも17.3N/mm²と28日設計基準強度に近い値を発現しており、十分所要の性能を満たすものと判断できる。

- ⑤表-5に細骨材条件と急結剤条件の違いによる粉じん濃度の変化を示す。混合砂を使用したケースで比較すると50m後方、10m後方ともあまり有意な差は見られない。ただ10m後方では低粉じん型粉体急結剤を用いることで明らかに粉じん濃度が低く、発生する粉じんそのものが少ないことが分かる。また、砕砂のみの場合、粉体急結剤では混合砂より若干粉じん発生量が増えているが、液体急結剤では、細骨材の種類および50m後方、10m後方の位置のものとの差異がないようである。

遠心力トンネル吹付け工法は、エア吹付け方式とは異なる地山への吹付け方法であるので、吹付けコンクリート硬化後の地山との付着強度について検討した。そこで



写真-7 付着強度試験供試体採取



写真-8 付着強度試験供試体



写真-9 付着強度試験状況

表-6 吹付け方式の違いによる付着強度試験結果

吹付け方式	使用した急結剤	28日付着強度 N/mm ²	EFNARC基準の付着強度 N/mm ²
エア吹付け	粉体急結剤	0.84	構造物で0.5以上
遠心力吹付け	粉体急結剤	0.83	

模擬地山とした花崗岩ブロックに遠心力吹付け方式とエア吹付け方式で各々吹付けて、付着強度試験用の供試体を採取した（写真-7）。付着強度試験は、地山と吹付けコンクリート間における付着強度を求めるものであるが、日本ではまだ規準化されていない。付着面を挟んだ資料を採取して直接引張りで強度を求めるフランス EFNARC³⁾ 提案の試験法によった（写真-8、写真-9）。

付着強度試験結果は、表-6のとおり遠心力吹付け方式で0.83N/mm²、エア吹付け方式で0.84N/mm²であり、両者はほぼ変わらない値であった。これは、EFNARC基準の構造物に対する基準値 0.5N/mm² 以上を十分満足するものであった。一般的にエア吹付け方式の投射速度は40m/sec程度であり、これに対して遠心力吹付け方式の投射速度は30m/sec程度と若干遅いが、投射速度の差異による付着強度の差はなかった。

7. まとめ

これまでの遠心力トンネル吹付け工法の実用化に向けた実験や現場施工における粉じん計測より、次のことがわかった。

- ①掘削断面積 80m²、延長 700m 程度のトンネル吹付け作業時における切羽後方50m地点の粉じん濃度目標値を 3mg/m³ 以下とするための送風量は、エア吹付け方式では風量 2,000m³/min 程度の送風機が必要となるのに対し、遠心力トンネル吹付け工法では 700m³/min 程度で十分と考えられる。
- ②遠心力トンネル吹付け工法では、通常のエア吹付け方式に採用されている配合により吹付けコンクリー

トの設計基準強度 $\sigma_{28} = 18\text{N/mm}^2$ 以上を確実に得られる。

- ③配合や細骨材と急結剤の種類による粉じん濃度への影響は少ない。

当工法では、機械的な吹付け方式により粉じん発生源である吹付け機械自体からの発生量を確実に抑えるため、トンネル掘削作業環境向上を図ることができる。また、それに付随して大型の空気圧縮機を必要とせず換気設備の負荷を軽減できること等により、省エネにつながると考える。

謝辞：本稿は、（独）土木研究所との共同研究の成果の一部をとりまとめたものであり、関係各位に深謝致します。

参考文献

- 1)長野祐司他：粉じん発生量を抑えたトンネル用遠心力吹付け工法の開発，三井住友建設技術研究所報告，No.27,2002
- 2)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
- 3)（社）日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート，平成8年2月