

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（その2） —小断面トンネルへの適用—

Dust Reduction through Utilization of the Centrifugal Spraying System (Part2) — Application of the Centrifugal Spraying System to a Small Cross Section Tunnel —

清水 安雄 YASUO SHIMIZU

丸山信一郎 SHIN-ICHIRO MARUYAMA

土木技術部 藤内 昭 AKIRA FUJIUCHI

土木技術部 中野 陽一 YOUICHI NAKANO

遠心力トンネル吹付け工法は、遠心力を利用してコンクリートを機械的に吹付けるもので、従来のエア吹付け方式に比べ、粉じんの発生量を低減できることが大きな特徴である。

北海道横断道占冠^{しほかつぶ}トンネル西工事の避難坑は、掘削断面 19m²の小断面トンネルである。この避難坑において、坑内作業環境の改善を目的として、遠心力トンネル吹付け工法を導入した。2005年3月から2008年4月までの約3年間にわたる運用を行い、施工延長約3,000m、設計吹付け総量7,000m³を達成し、粉じん低減効果を実証することができた。

キーワード：トンネル、遠心力、低粉じん、吹付けコンクリート

With the centrifugal spraying system, concrete is sprayed mechanically on a tunnel by centrifugal force. One of its great advantages is its ability to create lesser amounts of dust than the conventional pneumatically applied concrete lining method does.

An evacuation tunnel for the construction project of western part of the Shimukappu tunnel on the Cross-Hokkaido Expressway is a small cross section tunnel with a drilling cross section of 19m². In order to improve the in-tunnel working environment, the centrifugal spraying system was employed for this evacuation tunnel. For approximately three years from March 2005 to April 2008, this System was applied to achieve an execution length of approximately 3,000m and the total designed shotcrete amount of 7,000m³, demonstrating the effectiveness on dust reduction.

Key Words: Tunnel, Centrifugal Force, Dust Reduction, Shotcrete

1. はじめに

前回の報告¹⁾では、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、遠心力トンネル吹付け工法を開発し、数現場で施工を重ねその有効性を確認してきたこと、(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(全長100m、断面積80m²)で行った評価試験により、本工法が粉じん低減効果の大きいことを実証できたことを述べた。

これまでの現場施工は、実サイクルのなかで施工方法の検証と、粉じん濃度や吹付け材料の強度などのデータを得るための試験的な使用であった。

占冠トンネル西工事の避難坑は、本坑に沿って構築する掘削断面19m²の小断面トンネルである。このトンネルはNATMを採用しているため、コンクリート吹付け作業が組込まれており、吹付け時に発生する粉じんが坑内作業環境に最も悪い影響を及ぼす。

そこで、粉じん低減の効果確認と実サイクルでの施工性確認を目的として、遠心力トンネル吹付け工法の避難

坑への本格的導入を行い、約3年間の運用により延長約3,000mを施工した。本工法の採用により、粉じんの発生が抑制され良好な作業環境を保持できることが実証された。

2. 小断面トンネルへの展開

(1) 開発の経緯

平成12年、厚生労働省より「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」²⁾が発行され、坑内の粉じん濃度に関し、切羽後方50m地点で $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下の目標レベルが定められた。これにより、事業者は目標レベルを遵守し、坑内作業環境を良好に保つことが求められている。ただし、中小断面トンネルに関しては、粉じん濃度目標レベルを遵守することが一般的には難しいとされており、「 $3\text{mg}/\text{m}^3$ を達成することが困難と考えられるものについては、できるだけ低い値を目標レベルとすること」という解説が加えられていた。

しかし、この規制は、平成20年3月1日から施行された「粉じん障害防止規則の一部改正する省令」（平成19年厚生労働省令第143号）³⁾により強化され、「可能な限り $3\text{mg}/\text{m}^3$ に近い値を粉じん濃度目標レベルとして設定し・・・」と改められた。

このようにトンネル建設工事では、粉じんによる労働災害防止のため、坑内環境改善対策が大きな課題となっている。

従来のエアークリック方式は、吹付けコンクリートに粉体急結剤を添加しているものが一般的である。大量の圧縮空気によりコンクリートと急結剤を混合攪拌し、高速で地山に吹付ける。このとき、先端ノズルからコンクリートの微粉末や未混合の急結剤が大気中に拡散・飛散して、大量の粉じんが発生する。坑内の粉じん濃度目標レベルを達成するために、以下のような対策が実施されて

いる。

- ①粉じん低減剤を添加して、吹付けコンクリートの粘性を高める。
- ②粉体急結剤の代わりに液体急結剤やスラリー急結剤を用いる。
- ③換気設備や集じん機を大型化して、粉じんの希釈・除去を行う。

前記の粉じん低減技術に対して、遠心力トンネル吹付け工法は、回転力を利用した吹付けにより、発生する粉じんの低減を図る方法である。エアークリック方式と同じ配合のコンクリートと粉体急結剤を使用できることが大きな特徴である。

道路断面トンネル工事においては、大型の換気設備や集じん機を使用することが広く普及している。しかし、水路や避難坑などの小断面トンネル工事では、掘削断面が小さいことから大口径の風管や集じん機の設置が困難なために、十分な換気や集じんを行うことができず、坑内作業環境の改善が進んでいないのが現状である。

そこで、粉じん発生量が少ない遠心力トンネル吹付け工法の特徴を活かした小断面トンネル専用の遠心力トンネル吹付け機を開発し、数現場で試験施工を行ってきた。

(2) 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（ベースマシン）に装着された多関節のアーム先端に遠心力トンネル吹付け装置を取付けた吹付けシステムである。この装置を取付けた走行式台車が遠心力トンネル吹付け機である。写真-1に今回の施工に用いた遠心力トンネル吹付け機を、写真-2に遠心力トンネル吹付け装置の外観を示す。また、図-1に遠心力トンネル吹付け装置の構造図を示す。



写真-1 遠心力トンネル吹付け機



写真-2 遠心力トンネル吹付け装置

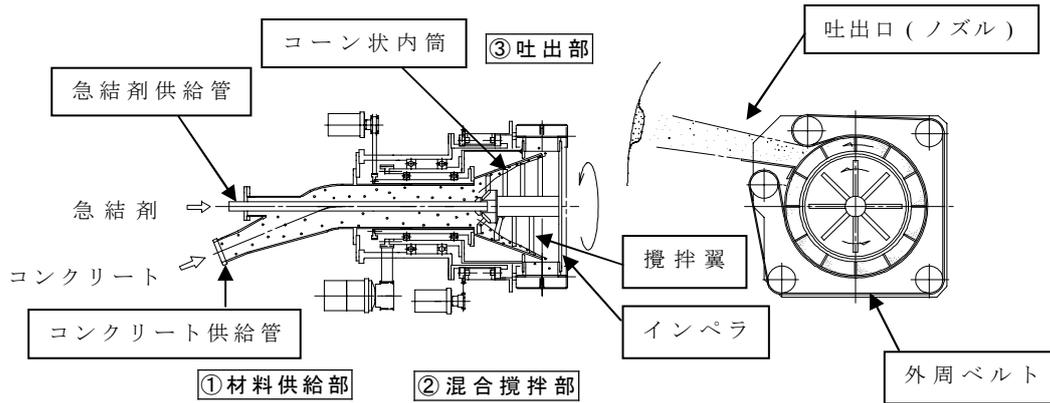


図-1 遠心力トンネル吹付け装置の構造図

表-1 トンネルの概要

トンネル名称	北海道横断道占冠トンネル避難坑
工事場所	北海道勇払郡占冠村
工事内容	NATM レール工法 発破掘削
断面積, 延長	掘削断面 19m ² 施工延長 3,000m
施工期間	2005年3月～2008年4月

表-2 遠心力トンネル吹付け機的主要仕様

吹付け能力	最大10m ³ /h
電動機出力	45kW (440V)
コンクリート供給	コンクリートポンプ 10m ³ /h
急結剤	粉体急結剤
コンクリート運搬	アジテーターカー 6m ³
バッテリーロコ	15t

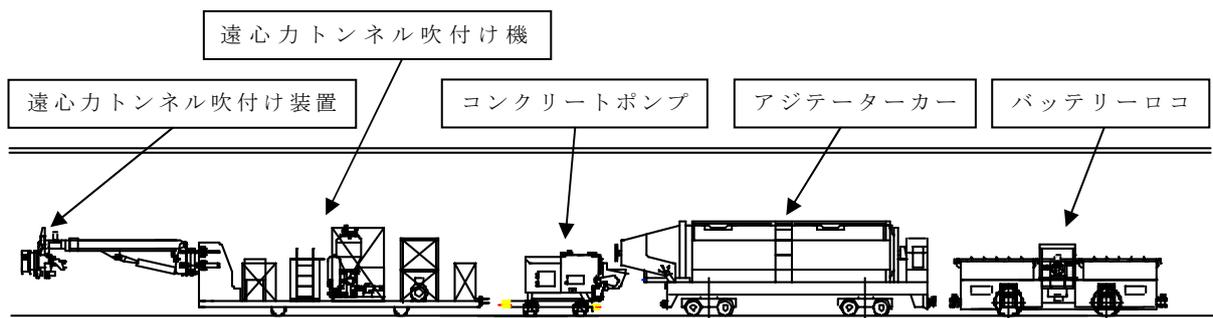


図-2 遠心力トンネル吹付け機の列車編成

遠心力トンネル吹付け装置は、従来の高圧・大量の圧縮空気を利用したエア吹付け方式の機械とは原理が全く異なる。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し、インペラの高速回転による遠心力で投射し吹付ける。このため、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1/3程度に低減できる。本吹付け装置は、以下に示す①～③の主要部分で構成される。

- ①材料供給部：コンクリートポンプからコンクリートを受取るコンクリート供給管と、急結剤を搬送する急結剤供給管とで構成される。
- ②混合攪拌部：コーン状の内筒管内を高速回転する攪拌翼で、コンクリートと急結剤を混合攪拌する。
- ③吐出部：高速回転するインペラで混合した吹付け材料に遠心力を与え、外周に巻付けた外周ベルトで投

射方向を一定方向に制限した後、吐出口（ノズル）より任意の方向へ投射する。

3. 占冠トンネル西工事避難坑への導入

東日本高速道路（株）発注の北海道横断道占冠トンネル西工事の避難坑は、掘削断面 19m² の小断面トンネルでNATM工法が採用されている。

今回、普通断面トンネルと同等レベルの坑内環境を実現するため、粉じん低減の効果確認と実サイクルでの施工性確認を目的に、遠心力トンネル吹付け工法の避難坑への本格的導入を行った。



写真-3 遠心カトンネル吹付け機の列車編成



写真-4 吹付け状況

表-3 吹付けコンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				粉体急結剤 添加率 (%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
60	62	216	360	1,085	663	7.0

表-4 強度試験結果

吹付け方式	プルアウト試験 24h (N/mm ²)	圧縮強度 28日 (N/mm ²)
遠心力吹付け	7.7	23.0
設計基準強度	5.0	18.0

表-5 粉じん濃度測定結果

遠心力吹付け方式		切羽～ 測定点距離 (m)	コンクリート 吐出量 (m ³ /h)	換気量 (m ³ /min)	質量濃度変換係数 K 値 (測定器：P-5L)	粉じん相対 濃度 (CPM)	粉じん質量 濃度 (mg/m ³)
粉じん低減剤 添加率 (%)	なし	50	8.0	640	0.044	51	2.2
	0.1	50	8.0	640	0.048	28	1.3

(測定日：2005年9月6,7日)

(1) トンネルの概要と吹付け機の仕様・構成

トンネルの概要を表-1に示す。遠心カトンネル吹付け機的主要仕様を表-2に、列車編成を図-2、写真-3に示す。坑内の運搬は軌条方式であるため、遠心カトンネル吹付け機は、吹付け装置や急結剤供給装置をコンパクトにまとめた台車搭載型とし、小断面用遠心カトンネル吹付けシステムとしてバッテリーロコで牽引した。コンクリートの供給はアジテーターカーで行った。

(2) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートは、通常のエアー吹付け方式と同配合のものを用いた。急結剤も同様に通常の粉体急結剤を用いた。表-3に吹付けコンクリート配合を、表-4に強度試験結果を示す。強度試験の結果、遠心力吹付け方式は設計基準強度を満たしていることが確認できた。

また、多量の湧水や地山膨張などの各種変状を含む地

山不良箇所では、高強度吹付けコンクリートやフライアッシュ添加吹付けコンクリートを用いた施工も行ったが、施工性・強度とも問題がなく、吹付け材料に対する汎用性を確認できた。

(3) 粉じん測定

表-3に示す配合の吹付けコンクリートを用いて、通常サイクルのなかで吹付け作業を行い、切羽50m後方で粉じん濃度の測定を行った。粉じん低減剤をセメントの0.1%添加した材料と、添加しない材料とで粉じん濃度の比較を行った。表-5に粉じん濃度測定結果を示す。測定の結果、いずれの材料とも、粉じん濃度規制値を遵守することが一般的には難しいとされている小断面トンネルにおいて、ガイドラインに示された「切羽後方50m地点で3mg/m³以下」を満足した。

粉じん低減剤は、エアー吹付け方式に使用されるが、

本吹付け方式においてもその効果が確認できた。発生する粉じんが低減されるため、切羽付近での視認性が改善され、安全性の向上にも寄与できる。写真-4に吹付け状況を示す。

（４）吹付け機の改良

施工品質に影響を及ぼす大きなものとして、遠心力トンネル吹付け機の導入初期に発生した吹付けコンクリートの仕上げ面の不良が挙げられる。発生した現象は、以下のとおりである。

- ①吹付け面が過度に盛り上がり左右に広がらず、吹付け面全体に凹凸が発生し、平滑性に乏しく見栄えが悪い。
- ②細かい動きに対する吹付けノズルの追随性が悪く、狙った箇所に的確に吹付けることが困難で、吹付け面の凹部を埋めにくい。
- ③コンクリートポンプによるコンクリート吐出脈動が、そのまま吹付け脈動となり作業性が悪い。

これらの現象に対して、オペレーターの意見を取入れながら、吹付け機に対して以下の改良を行った。

- ①吐出ノズルの開度を広げ、吹付けの拡散性を強めた。
- ②吐出ノズルの動作反応を的確にするため、油圧機器および回路を変更して、ノズル動作速度を安定化することで照準精度を向上させた。
- ③コンクリートポンプに起因する吐出脈動は、改良した吐出ノズルとオペレーターが操作に慣れることにより解決した。

吹付け機の改良とオペレーターの慣熟により、エア吹付け方式と同等以上の平滑な吹付け面を実現できた。

（５）吹付け工法の評価

遠心力トンネル吹付け工法により約3年間の施工を行い、工事を無事終了した。この間、本工法について以下の評価が得られた。

- ①小断面トンネルにおいて、ガイドラインに示す「粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下」を満足し、特に切羽付近での作業環境を向上させた。切羽での視認性が良好になったため安全性も向上した。
- ②吹付け機改良の結果、吹付け面の全体的な凹凸がなくなり、エア吹付け方式の吹付けと同等以上の仕上がりとなった。仕上がり表面に関しては、エア吹付け方式独特の小さな凹凸がなく良好であった。
- ③リバウンド率は約23%であり、強度とともにエア吹付け方式と同等であった。

以上の評価を得たが、同時に以下の留意点が挙げられた。

- ①吹付け作業中、アーム先端の吹付け装置を切羽鏡面へ衝突させないように、特に注意する必要がある。
- ②吹付け装置の清掃は、吹付け作業終了後に切羽でコンクリートポンプの清掃と並行して行うが、コンクリートが固着しやすい部分（吐出口、インペラ、攪拌翼など）の清掃・洗浄のために若干の手間を要する。

4. おわりに

占冠トンネル西工事の避難坑では、2005年3月～2008年4月の約3年間に渡り、遠心力トンネル吹付け工法による施工を行い、施工延長3,000m、総吹付け量 $7,000\text{m}^3$ （設計数量）を達成し、回転系の吹付け方式としては国内最長の施工実績となった。

今回の施工で、当初の目標である小断面トンネルにおいて、普通断面トンネルに適用される「粉じん濃度 $3\text{mg}/\text{m}^3$ 以下」の数値目標を達成し、普通断面トンネルと同等レベルの作業環境を実現できた。また、施工においてさまざまな意見や知見が得られ、機械の改良やノウハウの蓄積に生かすことができ、吹付け工法としての長期的な施工信頼性を得たことは幸いであった。

遠心力トンネル吹付け工法は、これらの実績により小断面トンネルにおいて、普通断面トンネルと同様な作業環境を得るための一つ的手段として、実用化に一步踏み出したと考えられる。今後、ランニングコストの低減などの課題を解決しながら、小断面トンネルのみならず需要の多い道路断面トンネルへの展開も図り発展させていきたい。

謝辞：遠心力トンネル吹付け工法の導入と運用に当たり、尽力くださった関係諸氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 長野祐司, 清水安雄, 丸山信一郎, 魚住雅孝, 山地宏志: 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）, 三井住友建設技術研究所報告, No.3, pp.29-34, 2005
- 2) 厚生労働省: 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, 基発第768号-2, 平成12年12月26日
- 3) 厚生労働省: 粉じん障害防止規則の一部改正に関する省令, 平成19年厚生労働省令第143号