

24. 遠心力トンネル吹付け工法の実施工への展開

三井住友建設㈱：○丸山 信一郎、山下 高俊、長野 祐司

1. はじめに

近年、山岳トンネル工事などの坑内で発生する微細な浮遊鉱物性粉じんは、視界不良による作業効率の低下を引き起こすばかりでなく、人体に吸入されるとじん肺にかかるおそれがあり、作業環境上非常に問題視されている。H12年には厚生労働省より「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」¹⁾が示され、その中で「トンネル切羽から坑口に向かって50mの位置で粉じん濃度目標レベル 3 mg/m^3 以下にすること」という数値目標が表された。一般的にトンネル工事では削孔・発破・ずり積み・ずり出し・吹付けコンクリート・鋼アーチ支保工・ロックボルトのサイクルにて地山を支持し、繰り返し掘削を進めるが通常換気設備でのコンクリート吹付け時の発生粉じん量が他の作業より多いのが現状である。このような状況のもと開発したのが、エアを多量に使用せず機械的な吹付け方式により発生粉じん量を抑えた遠心力トンネル吹付け工法である。現在、本工法をトンネル工事の実施工に導入して作業環境改善を目的に実績を積み重ねている。本報では、工法の概要とその実施工の導入効果について報告する。

2. 遠心力トンネル吹付け工法の概要

本工法は、コンクリートと急結剤を機械的に高速攪拌し混合させエアの噴出力によらず高速回転羽根車の遠心力により吹付け材料を地山へ投射する。このことにより、大気中への粉体急結剤やコンクリートの微粒子の拡散・飛散を従来のエア吹付け方式より大幅に抑えることができる。

(1) 遠心力トンネル吹付け装置の基本構造

遠心力トンネル吹付け装置の基本構造を図-1に示す。また、本装置の基本構造は次の事項により構成される。

- ①コンクリートと急結剤を別々に導く材料供給部
- ②高速回転する攪拌翼よりなる混合攪拌部
- ③吹付け材料を目標の地山方向に投射する吐出部

(2) 施工上の留意点

吹付け施工上の留意点は次のとおりとする。

- ①吹付けの投射速度は、これまでの実績よりインペラの回転数で1000～1500r.p.mの範囲とする。
- ②吐出口（ノズル）と吹付け面（地山）との離隔距離は、1.0～1.5mが適切である。
- ③吹付け終了後は、インペラを回転させながら圧送部

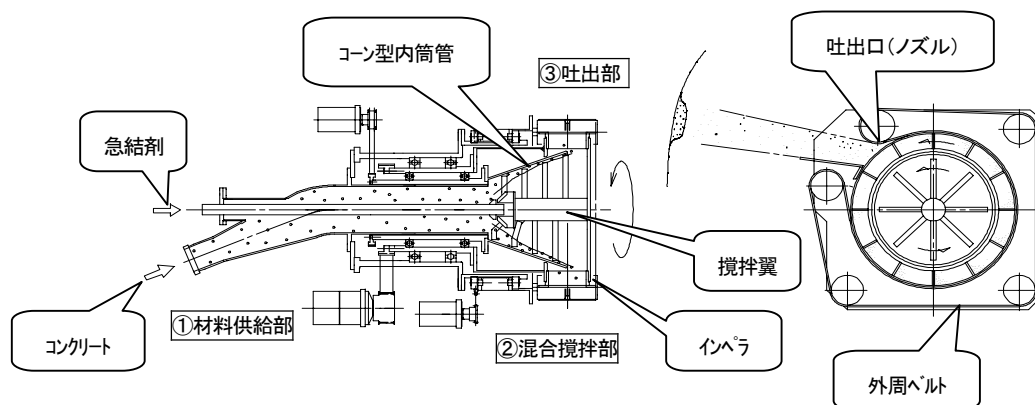


図-1 遠心力吹付け装置基本構造

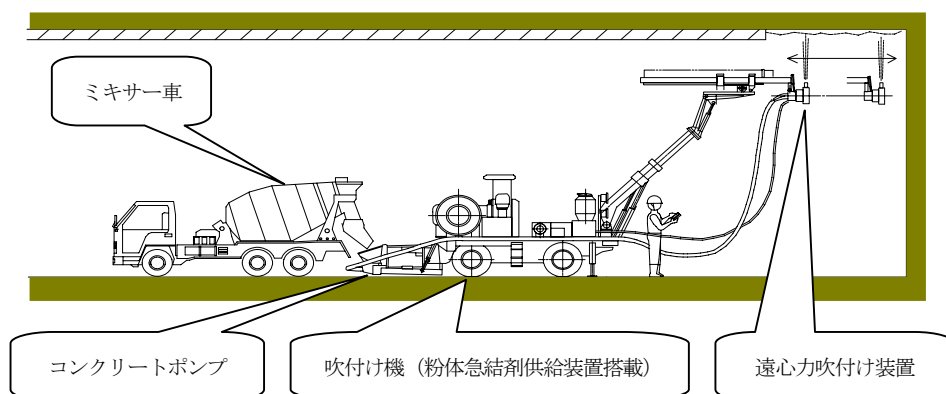


図-2 遠心力吹付け工法の施工概念図

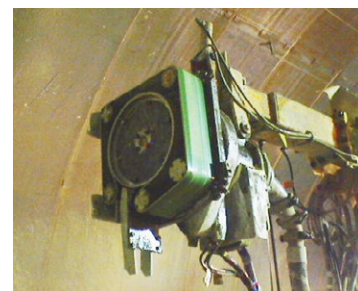


写真-1 遠心力吹付け装置

混合攪拌部、吐出部を高圧水洗浄する。

3. 現場実施工

コンクリートの吹付けに本工法を展開した現場は道路断面トンネルと小断面トンネルの工事現場である。

3-1. 道路断面トンネルへの展開

(1) 展開目的

実際の掘削サイクルの吹付け施工において、次に掲げる事項を主な目的とした。

- ①坑内作業環境向上のため、粉じん濃度の計測を行い発生粉じん量の低減効果を確認すること
- ②吹付けの材料強度が従来工法と同等以上であること
- ③施工能率が従来工法と同等以上であること

(2) 工事概要

静岡県立岩のトンネル工事に、平成16年3月から5月末までの2ヶ月間実際の掘削サイクル工程にのせて本工法を導入した。坑口付けより吹付けを開始し、吹付け延長160m、総吹付け量1147m³を施工した。工事概要を以下に示す。

工事場所：静岡県熱海市網代地内

工事内容：NATM工法タイヤ式機械掘削

トンネル延長L=284m

掘削断面積 A=87.2~123.3m²

工期：平成15年10月～平成17年6月

(3) 施工設備

図-2に、本工法の施工概念図を示す。吹付け施工設備は、主にコンクリートポンプ、粉体急結剤供給装置搭載の吹付け機および遠心力吹付け装置で構成され、その施工設備の主要仕様は表-1のとおりである。ま



写真-2 遠心力トンネル吹付け機

表-1 主要仕様 (道路断面トンネル)

吹付け方式	回転力方式 (遠心力タイプ)
実吹付け能力	15~6m ³ /h級
急結剤攪拌方式	強制攪拌方式
使用急結剤	粉体急結剤 (液体急結剤も使用可)
コンクリート供給	コンクリートポンプ (吐出量20m ³ /h級)
台車	タイヤ走行式
所要電源	105KW

た、遠心力吹付け装置を写真-1に示し、遠心力吹付け機を写真-2に示す。

(4) 粉じん計測

吹付け施工中の粉じん計測については、同時期に独立行政法人土木研究所と「吹付け作業時の発生粉じん量の低減技術の開発」の共同研究を行っており、共同研究メンバーによる「遠心力トンネル吹付け機の粉じん濃度の低減効果を確認するための粉じん計測」としてH16年4月に実施した。粉じん濃度の計測位置は切羽後方50m地点とし、上半掘削時の二次吹付け中に行いデジタル粉じん計5台とローボリウムサンプラ1台を

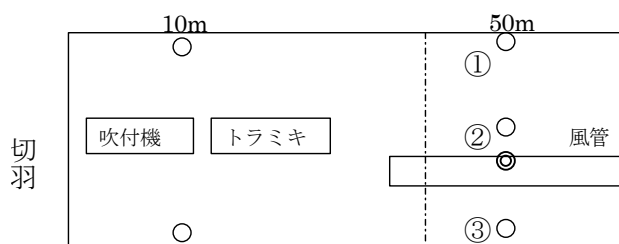


図-3 器材配置図 (○: デジタル粉じん計
◎: ローボリウムサンプラ)



写真-3 粉じん濃度計測状況

表-2 発生粉じん量の濃度測定結果

			単位	1回目	2回目	3回目
坑内換気量			m ³ /min	720	720	720
ローボリウムサンプラ LV-40B	質量濃度	切羽より50m	mg/m ³	1.09	1.66	0.08
デジタル粉じん計 LD-3K	相対濃度 (カウント値)	①切羽より50m左	cpm	997	1,448	208
		②切羽より50m中	cpm	1,106	1,393	214
		③切羽より50m右	cpm	1,234	1,591	206
		①②③平均	cpm	1,112	1,477	209
	算出K値	切羽より50m	mg/m ³ /cpm	0.00099	0.00119	0.00039
質量濃度(算出K値使用)			mg/m ³	1.10	1.76	0.08

図-3のように配置した。その時の粉じん濃度測定結果を表-2に示す。表-2より粉じん濃度は 0.08～1.66 mg/m³の範囲にあり、厚生労働省ガイドラインの切羽後方50mにおける粉じん濃度基準値3 mg/m³を下回る結果を得た。

ここで、デジタル粉じん計の質量濃度(表-2の最下段)はデジタル粉じん計で計った相対濃度(単位cpm)にK値(質量濃度変換係数)をかけて質量濃度に換算した値である。ローボリウムサンプラによる質量濃度と比較するとほぼ同等の値であり、ガイドラインの粉じん濃度基準値3 mg/m³以下であることが確認できる。粉じん濃度計測状況を写真-3に示す。

(5) 吹付けコンクリートの配合と強度

現場で使用したコンクリートの配合を、表-3に示す。通常のアエラ吹き方式で採用するものと同等の配合である。

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 C * %
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
5.8	5.8	20.9	36.0	103.0	75.5	7

また、採取した吹付けコンクリートの強度試験の結果を表-4に示す。この結果より、材齢圧縮強度は 24 時間と 28 日ともに設計基準強度を十分満足するものであった。

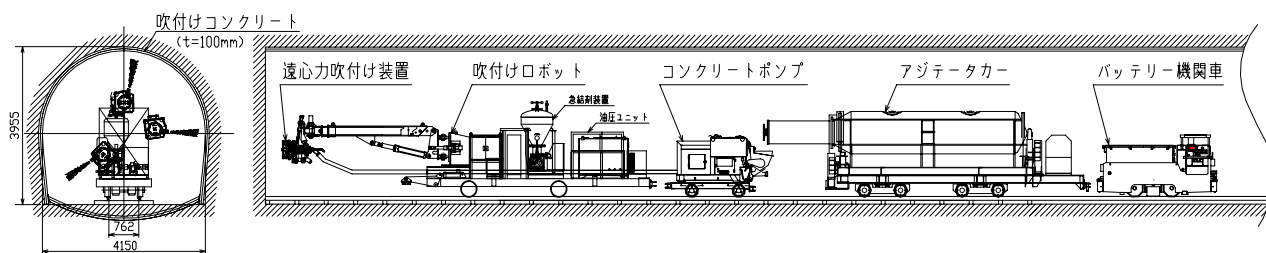
表-4 吹付けコンクリート強度

吹付け方式	材 齢 24 時 間 圧 縮 強 度 (N / mm ²)	材 齢 28 日 圧 縮 強 度 (N / mm ²)
遠心力吹付け	9.9	27.7
設計基準強度 ²⁾	5	18

3-2. 小断面トンネルへの展開

(1) 展開目的

3-1で述べた道路等の普通断面規模のトンネル工事では、昨今、送風機や集じん機の大型化が進み広く普及している。しかし水路等の小断面トンネル工事においては、道路トンネル工事に比べ施工上大口径の風管や大型の集じん機の設置が難しいため十分な換気ができず、坑内環境の改善が行いにくいのが現状である。前途のガイドラインにおいても、粉じん濃度目標レベルの達成が困難とされる中小断面トンネル工事については緩和処置がとられている。そこで、遠心力吹付け機のコンパクト化の開発を進め、5～20m³規模の小断面トンネルの実施工への展開を進めた。



図－４ 小断面トンネル吹付けシステム概念図

(2) 工事概要

神奈川県相模原のトンネル工事に、平成 16 年 9 月からこの工法を導入し、実際に吹付け施工を行った。吹付け延長 102m、総吹付け量 276m³を施工した。工事概要を以下に示す。

工事場所：神奈川県相模原市麻溝台 5 丁目

工事内容：NATM工法レール式機械掘削

トンネル延長 L=945.272m

仕上がり内径φ3750mm

掘削断面積 A=17.630m²

内空断面積 A=11.039m²

工 期：平成 15 年 6 月～平成 18 年 2 月

(3) 施工設備

図－3 に、小断面トンネルに導入した吹付けシステムの概念図を示す。この小断面トンネル吹付けシステムはコンクリートポンプからレール走行型吹付けロボット及び吹付け装置本体までを一連で編成したものである。システムの特徴は次のとおりである。

- ①遠心力吹付け装置は小型化を図り、普通断面トンネル用の装置に比べ重量を軽減した。吹付け装置の重量は 250 kg である。
- ②吹付けロボットは、遠心力吹付け装置の重量に耐える構造とするため、エア吹きで使用している既製のロボットのブームを強化型のブームに改造した。
- ③コンクリートポンプは、汎用型油圧式ポンプでピストン径が小さく、シリンダ切替え時コンクリートの脈動が小さいものである。

また、この吹付けシステムの主要仕様を表－5 に、外観を写真－5 に示す。

(4) 粉じん計測

粉じん計測は、発生粉じん量の数値の把握とその比較を行うために、遠心力吹付け方式およびエア吹付け

表－5 主要仕様（小断面トンネル）

吹付け方式	回転力方式（遠心力タイプ）
実吹付け能力	10～3m ³ /h級
急結剤攪拌方式	強制攪拌方式
使用急結剤	粉体急結剤（液体急結剤も使用可）
コンクリート供給	コンクリートポンプ（吐出量10m ³ /h級）
台 車	レール走行式
所要電源	75Kw
総重量	9,000Kg

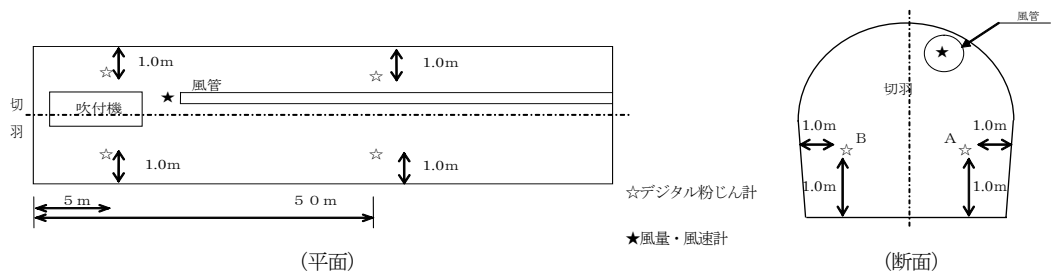


写真－5 小断面トンネル吹付けシステム

方式について実施した。計測機器はデジタル粉じん計（P－5L）を用いて行い、計測箇所は坑内切羽から 5m および 50m 後方の地点にした。その粉じん測定位置について図－5 に示す。デジタル粉じん計による測定方法は、吹付けによる粉じんが定常状態に達した時点の吹付け開始後約 3 分から開始し、測定時間は切羽後方 5m について 2 箇所を各 10 分間、50m について 2 箇所を各 5 分間とした。また、粉じん濃度の経時変化を把握するため、1 分毎に粉じん濃度を記録した。

a) 遠心力吹付け方式の粉じん計測結果

遠心力吹付け方式の場合の切羽後方 5m 地点では、表－6 の粉じん濃度（相対濃度）測定結果より粉じん濃度（相対濃度）は 218～318cpm である。また、吹付け中の切羽の視界は良好で吹付けコンクリートの付着



図－５ 粉じん測定位置図

表－６ 粉じん濃度（相対濃度）測定結果

吹付方式	測定日	吹付け条件					粉じん濃度(相対濃度)		使用機器
		切羽位置	スランプ	コンクリート吐出量	吹付け量	換気量	切羽から 5m	切羽から 50m	
		支保工No.	cm	m ³ /h	m ³	m ³ /min	cpm		
遠心力吹付け	平成16年9月3日	650	9.0	9.0	2.8	63.0	247		P-5L
		651	8.5	9.0	2.8	63.0	218		
		652	8.0	8.5	2.8	63.0	318	4	
	平成16年9月8日	671	9.0	9.0	2.6	63.0	298	3	
エア吹付け	平成16年7月9日	463	9.0	9.5	2.8	59.6	610		
		464	9.0	9.5	2.8	59.6	658	104	
	平成16年9月29日	775	12.0	10.5	2.7	53.0	815		
		776	11.0	10.5	2.7	53.0	791	9	



写真－５ 吹付け状況
(遠心力吹付け方式)



写真－６ 吹付け状況
(エア吹付け方式)

面は目視で十分確認することができた。遠心力吹付け方式による吹付け状況を写真－５に示す。

次に、吹付けロボット後方のコンクリートポンプやアジテータ付近の視界は非常に綺麗な状態で、風管先端から坑口側への粉じん拡散はほとんど見られなかった。切羽後方 50m 地点の粉じん濃度（相対濃度）は 3～4cpm で、75cpm(ガイドラインで定める切羽後方 50m 地点での濃度目標レベル、質量濃度 3 mg/m³に相当する値)に対して、非常に低い値であった。

遠心力吹付け方式は、吹付け材料の搬送に圧縮空気を使用しないことより、外部から切羽への空気の流入が少なく坑内の風向きが一定である。そのため、切羽で発生した粉じんのほとんどが風管内に吸い込まれ坑内での粉じんの拡散は少ないと考えられる。

b) エア吹付け方式の粉じん計測結果

エア吹付け方式の場合は、表－６より切羽後方 5m 地点での粉じん濃度（相対濃度）は 610～815cpm、切羽後方 50m 地点での粉じん濃度（相対濃度）は 9～104cpm であった。エア吹付け時は吹付けコンクリートの付着面が目視で確認できないほど多量の粉じんが発生し、切羽付近は骨材の跳ね返りが激しかった。エア吹付け方式による吹付け状況を写真－６に示す。

また、切羽後方 50m 地点の粉じん濃度測定結果では大きなバラツキが生じ、遠心力吹付け方式と比較すると粉じん濃度の計測値は非常に高い数値を示す場合があった。エア吹付け方式の場合は、切羽後方においては視界を確保するために、作業中局所的に粉じんを拡散する目的で圧縮空気によるエアブローを行っている。

よって、吹付け材料圧送のエアの他にこのようなエアが付加されたことにもより、発生した粉じんが十分に風管内に吸い込まれなかったものと考えられる。

(5) 吹付けコンクリートの配合と強度

使用した配合を表－7に示す。通常のエア吹付け方式で採用するコンクリートの配合と同等のものである。また、遠心力吹付け方式による吹付けコンクリート強度は、採取した吹付けコンクリートの強度試験の結果より同一現場で行ったエア吹付け方式による吹付けコンクリート強度とほぼ同等で、かつ基準の設計基準強度を十分満足したものであった。吹付けコンクリート強度の試験結果を表－8に示す。

表－7 コンクリートの配合

水 セメント 比	細 骨材 率	ス ラ ン プ	単 位 重 量 kg				急 結 剤 添 加 率 (粉 体 急 結 剤) C×%
			水	セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	
W / C	S / a		W	C	S	G	
%	%	cm					
56	65	12-18	202	360	1075	596	7.0

表－8 吹付けコンクリート強度

吹付け方式	材齢24時間 圧縮強度 (N/mm ²)	材齢28日 圧縮強度 (N/mm ²)
遠心力吹付け	7.2	26.2
エア吹付け	7.7	28.5
基準強度	5	18

4. 実施工導入の効果

道路断面トンネルと小断面トンネル工事における本工法の導入効果を以下の事項に示す。

(1) 粉じん発生量

本工法における粉じん発生量については、両現場とも切羽後方50m地点で粉じん濃度3mg/m³以下とする厚生労働省ガイドラインの基準値を下回る効果を確認した。また、表－5より小断面トンネルにおいて遠心力吹付け方式の発生粉じん濃度はエア方式の約 1/3～1/4 程度の粉じん濃度となっていることが確認された。

(2) 吹付けコンクリートの強度

本工法における吹付けコンクリートの強度は、通

常のエア吹付け方式に採用されている配合のコンクリートを使用しても、設計基準強度を十分満足することが確認された。

(3) 施工性

遠心力吹付け方式の場合、道路断面トンネル工事では吹付け能力平均12m³/hとして施工し、小断面トンネル工事では吹付け能力平均8m³/hとして施工した。その結果、一連の工程に狂いを生じることなく、通常のエア吹付け方式と同等の施工サイクルを実現することができた。

5. 今後の課題

今回、本工法を現場の実施工で適用したことで、作業環境向上を目的とした吹付け中の粉じんの低減効果と吹付けコンクリートの強度についてほぼ満足する結果が得られた。今後の課題は本工法の施工性を更に向上させることにあり、次の事項とする。

- ① 遠心力吹付け装置の耐摩耗性の向上
- ② 吹付け面の仕上りの向上
- ③ 吹付け終了時の装置の清掃方法の明確化

おわりに

遠心力トンネル吹付け工法は、機械的な吹き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粉じん発生量を確実に抑え、坑内作業環境の向上を図ることが可能である。また、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ため、省エネが可能であると考えられる。

現在も小断面トンネルの工事現場において、遠心力トンネル吹付け工法を実施しており、今後もこの工法の粉じん低減効果の促進や吹付けの品質向上および遠心力吹付け装置の耐摩耗性等の施工性について検討を重ねていくこととしている。

参考文献

- 1) 厚生労働省：ずい道建設工事における粉じん対策に関するガイドライン，2000.12
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕，2005.7