

# 粉じん・はね返りを低減する型枠併用吹込み方式による トンネル一次支保工構築工法「Smart Lining System™」の開発

Development of the Smart Lining System™ as a Tunnel Primary Support Method  
Based on Formwork in Combination with Shotcrete to Reduce Dust and Rebound

松田 浩朗\*<sup>1</sup>  
Hiroaki Matsuda

平間 昭信\*<sup>1</sup>  
Akinobu Hirama

折田 現太\*<sup>1</sup>  
Genta Orita

金子 泰明\*<sup>1</sup>  
Yasuaki Kaneko

熊谷 幸樹\*<sup>2</sup>  
Koki Kumagai

筒井 隆規\*<sup>3</sup>  
Takanori Tsutsui

山田 博\*<sup>4</sup>  
Hiroshi Yamada

## 【要旨】

山岳トンネル建設工事において、工期短縮やコスト低減を目的に施工のサイクルタイムの短縮が望まれている。特に、吹付けコンクリート工事は、サイクル全体の15~25%を占めていることから、時間当たりの吹付けコンクリート施工量の大容量化などにより、施工時間を短縮することが行われている。ただし、時間当たりのコンクリート吐出量の増加は、吹付けコンクリートの粉じんやはね返りが増加することから、材料ロスの増加や坑内環境の悪化といった課題がある。

筆者らは、吹付けコンクリートの施工時間の短縮と、粉じんやはね返りの低減を同時に実現することを目的に、型枠併用吹込み方式によるトンネル一次支保工構築工法「Smart Lining System™」を考案した。本報では、本工法の概要と有効性を検証する目的で実施した実験について示す。

【キーワード】 トンネル一次支保工 粉じん低減 はね返り低減

## 1. はじめに

山岳トンネル建設工事において、工期短縮やコスト低減を目的に施工のサイクルタイムの短縮が望まれている。特に、吹付けコンクリート工事は、サイクル全体の15~25%を占めていることから、吹付けコンクリートの生産性向上技術が注目されている。この対応として、時間当たりの吹付けコンクリート施工量の大容量化などにより、施工時間を短縮することが行われている。

ただし、時間当たりのコンクリート吐出量の増加は、吹付けコンクリートの粉じんやはね返りが増加するため、材料ロスの増加や坑内環境の悪化といった課題があり、この対応も必要となる。特に、粉じんに関しては、「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」の改正により、2021年4月より坑内粉じん濃度目標値が $3\text{mg}/\text{m}^3$ から $2\text{mg}/\text{m}^3$ に引き下げられ<sup>2)</sup>、坑内環境において更なる粉じん低減が求められている。

前述の課題に対して、筆者らは、吹付けコンクリートの施工時間の短縮と、粉じんやはね返りの低減を同時に

実現することを目的に、型枠併用吹込み方式によるトンネル一次支保工構築工法「Smart Lining System™」(以下、本工法と呼ぶ)を考案した。

本報では、本工法の概要と有効性を検証する目的で実施した実験について示す。

## 2. Smart Lining System™の概要

従来の吹付けコンクリート工法(以下、従来工法と呼ぶ)の施工イメージを図-1に示す。従来工法は、圧縮空気を用いてコンクリートを地山に直接吹き付けるため、多量の粉じんが発生する。また、コンクリートの一部は地山に付着せず、20~30%のはね返りが発生する<sup>3)</sup>。

本工法は図-2に示すように、吹付けコンクリート仕上がり面の位置に専用型枠をセットし、地山と専用型枠との間にコンクリートを吹き込むものである。専用型枠で囲まれた空間内にコンクリートを吹き込むため、従来工法に比べ、粉じんやはね返りの発生を大幅に抑制できると考えられる。従って、本工法では、はね返りを抑制で

1.技術研究所 研究開発G 2.土木事業本部 土木技術部 技術企画2G 3.札幌支店 新幹線ニセコトンネル作業所  
4.名古屋支店 伊那山地トンネル西作業所

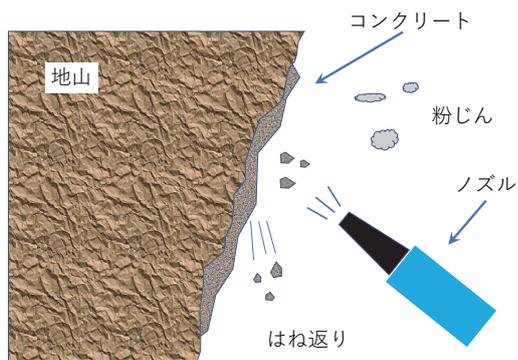


図-1 従来工法のイメージ

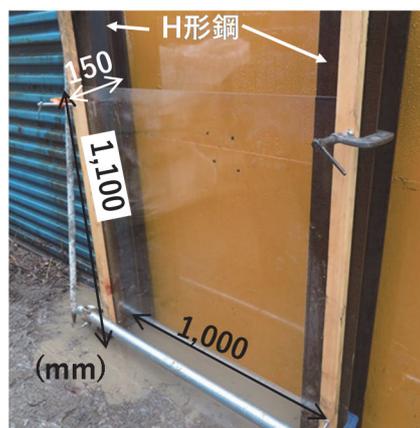


写真-1 要素実験用型枠

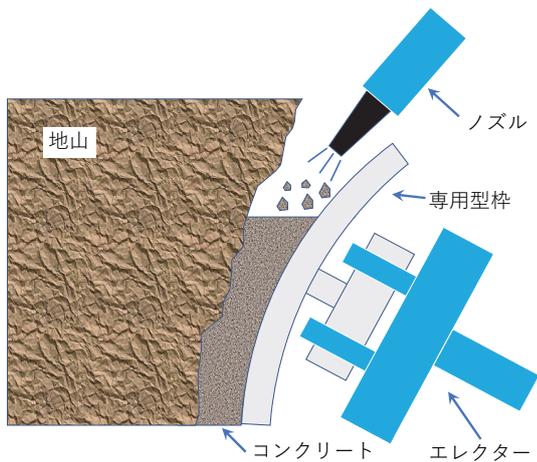


図-2 Smart Lining System™のイメージ



写真-2 要素実験用コンクリート (練上がり)

きることから材料ロスの低減が可能で、その材料ロス低減分の施工時間の短縮が見込まれる。加えて、コンクリート吐出量の大容量化により、施工時間の更なる短縮が期待できる。

### 3. 要素実験

本工法の実現可能性を検証する目的で、型枠内にコンクリートを吹き込み、構築されたコンクリートの品質を確認する要素実験を実施した。

要素実験に用いた型枠を写真-1に示す。トンネルの一次支保工を模擬し、H=150mmのH形鋼を1,000mmの間隔で設置し、背面をコンクリート型枠用合板、前面を高さ1,100mmの亚克力板の構成とした。

使用したコンクリートを写真-2に示す。配合条件は一般的な吹付けコンクリートに準じ、水セメント比 W/C = 60%、細骨材率 s/a = 60%、単位セメント量 C = 360kg、スランプ SL = 12cm とした。なお、コンクリート吹付け直前のスランプは SL = 10.5cm、コンクリート温度は 11℃であった。

実験状況を写真-3に示す。外気温は 10℃で、吹付け機を使用し、前述のコンクリートに粉体系急結剤をセメント重量に対して 4%添加して、実験用型枠内へ吹き込み



写真-3 要素実験実施状況

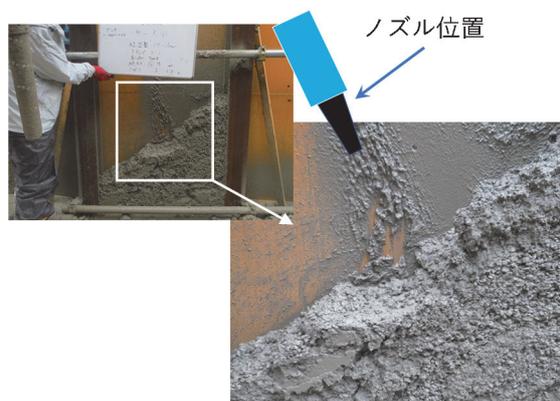


写真-4 吹込み後のコンクリートの状況

表-1 Smart Lining System™用のコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプフロー (mm)
		W	C	S	G	混和剤	
55.0	62.0	209	380	1054	657	C×1.1%	450×450



写真-5 Smart Lining System™用コンクリート(練上がり)

を行った。なお、使用した粉体系急結剤の標準添加量はセメント重量に対して9%であるが、本実験では、吹込み時のコンクリートの流動性を確保できるように、急結剤添加量は少なくした。吹込み後のコンクリートの状況を写真-4に示す。吹込み時は、左上より右下方向にノズルを配置した。同写真より、コンクリート上面が水平にはならず、傾斜していることが分かる。また、コンクリート表面は豆板状になっており、密実とは言い難い。これは、急結剤の反応により急速に凝結が進行したことから、吹込みエアによる締固め不足が要因であると推察される。

本実験では、急結剤の添加量が標準添加量に比べ少なかったにもかかわらず、吹込み時のコンクリートの流動性や構築したコンクリートの密実性の確保ができなかった。本工法の実現においては、吹込み時に流動性が確保可能かつ、コンクリートの締固め不足を解消できるコンクリート配合および手法が必要であることが判明した。

#### 4. Smart Lining System™用材料の開発

##### 4.1 要求性能

3. で示したように、本工法では、従来の吹付け用コンクリート材料をそのまま使用すると、コンクリートの品質が確保できないため、本工法専用の材料を開発した。以下に開発するコンクリート材料の要求性能を示す。

- ① 吹込み時にコンクリートが隅々まで充填される高い流動性を有すること
- ② 吹込み直後は吹込みエアで締固めできる可塑性を有しながら、従来の吹付けコンクリートと同様に早期に強度を発現すること

##### 4.2 流動性の高いコンクリート配合

吹込み時にコンクリートの流動性を確保するために、流動性の高いコンクリート配合を選定した。



写真-6 特殊混和剤の添加量による凝結時間試験状況

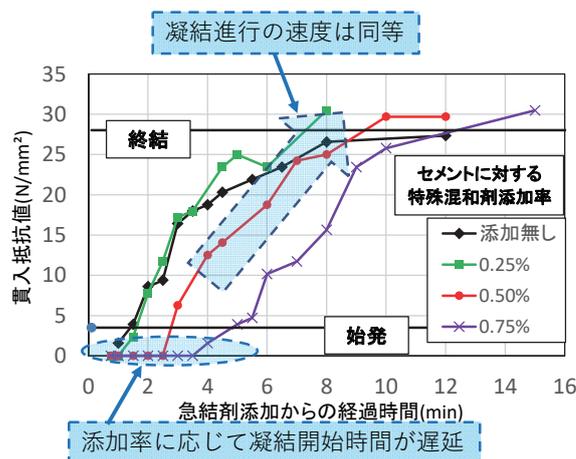


図-3 特殊混和剤添加率と貫入抵抗値の関係

選定したコンクリートの配合を表-1に、本配合の練上がり後のコンクリートを写真-5に示す。本配合では、目標スランプフローを450mmとした。また、流動性と材料分離抵抗性を確保するため、混和剤に特殊増粘剤一体化型高性能減水剤を使用し、セメント量を380kg、細骨材率を62%とした。

#### 4.3 凝結時間の制御

急結剤による急激な流動性低下に対し、コンクリート吹込み初期の流動性を確保する目的で、凝結調整機能を持つ特殊混和剤を添加することとした。

写真-6に示すような実験により、特殊混和剤添加量の違いによる凝結時間を確認した。本実験はモルタルで実施し、配合は表-1に示す吹付けコンクリートの配合から粗骨材を除いたモルタルに特殊混和剤を添加したものとした。また、モルタル練上がり後に、セメント量に対して9%の粉体系急結剤を添加し、高速で7秒間攪拌した。その後、供試体を作製し、プロクター貫入抵抗試験(JISA1147)を実施することで、貫入抵抗値との関係を測定した。

貫入抵抗値と急結剤添加からの時間の関係を図-3に示す。同図より、特殊混和剤を添加しないものに比べ、特殊混和剤の添加率が多いものほど、凝結時間が遅延している。一方で、特殊混和剤の添加に関わらず、凝結の進行速度は同等となっている。これは、特殊混和剤の添加量

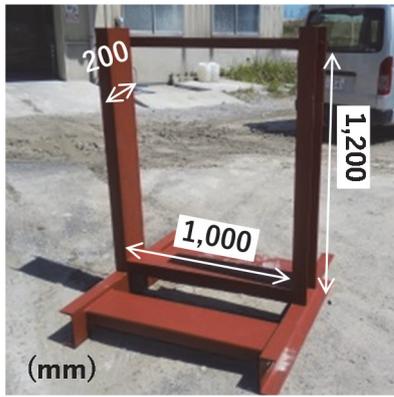


写真-7 検証実験用型枠

により凝結時間を制御することが可能で、吹込み初期におけるコンクリートの流動性を確保できること、コンクリートの強度増進を阻害しないことを示している。

## 5. 検証実験

特殊混和剤を添加したコンクリートの流動性および、充填性を検証する目的で、吹付け機械を使用した吹込み実験を実施した。表-1で示した配合に、セメント重量比 0.5%の特殊混和剤ならびにセメント重量比 9%の粉体系急結剤を添加した。

本実験に使用した型枠を写真-7に示す。型枠の寸法は幅 1,000 mm、高さ 1,200 mm、奥行き 200 mm とした。なお、実験時は前面および背面にコンクリート型枠用合板を設置した状態であり、上部中央より鉛直下向きにコンクリートを吹き込んだ。

型枠脱型後の試験体を写真-8に示す。同写真から分かる通り、コンクリートは隅々まで充填され、上端はほぼ水平となっていることが確認できる。また、大きな豆板等は観察されず、仕上がりも良好であった。空気圧式ピン貫入試験およびコアによる圧縮強度試験から、材齢 3 日および 24 日の圧縮強度はそれぞれ  $8 \text{ N/mm}^2$  以上、および  $18 \text{ N/mm}^2$  以上であることを確認した。

以上より、流動性の高いコンクリート配合の選定および特殊混和剤の凝結遅延効果によって、吹込みエアの締め固め効果が得られたと考えられる。

**Summary** In the construction of mountain tunnels, it is preferable to have shorter cycle times in order to shorten the total construction time and reduce costs. In particular, since shotcrete application accounts for 15 to 25% of the total cycle time, it is possible to shorten cycle times by increasing the volume of shotcrete applied per hour. However, increasing the amount of shotcrete applied per hour creates other problems, including increased material loss and degradation of the working environment associated with an increase in dust and rebound.

The authors have developed the Smart Lining System™, a method for constructing a primary support with formwork to reduce the time required for shotcrete application and to reduce dust and rebound.

This paper presents an overview of the method and the experiments performed to verify the efficacy of the method.

**Key Words :** Tunnel primary support, Dust reduction, Rebound reduction



写真-8 脱型後のコンクリート

## 6. おわりに

本報では、考案したSmart Lining System™の概要と、トンネル一次支保工構築工法としての有効性を検証する実験の結果を示した。

実験結果から、本工法専用の材料を使用することで、トンネル一次支保工としての所定の品質を確保でき、一次支保工構築工法として有効であることを示した。

今後は実際のトンネル工事に適用し、粉じんやはね返り低減効果などの有効性を検証していく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 稲田匠吾, 横内静二, 串橋巧, 嵯峨豊, 多宝徹: 山岳トンネルにおける大容量吹付けコンクリートシステムの開発, トンネル工学報告集, Vol.27, I-29, pp.1-8, 2017.
- 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, p.6, 2020.
- 3) 土木学会: 吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編], コンクリートライブラリー121, 2005.