

スラリー急結剤を用いた TBM吹付けモルタルシステムの開発 DEVELOPMENT OF A SPRAY MORTAR SYSTEM FOR TBM USING SLURRY TYPE ACCELERATOR

市川健作¹⁾・平間昭信²⁾・岩城圭介²⁾・寺島勲³⁾・有水栄一³⁾

Kensaku ICHIKAWA, Akinobu HIRAMA, Keisuke IWAKI, Isao TERASHIMA and Eiichi USUI

In conventional spray mortar systems for TBM, liquid type accelerator based on inorganic salts is usually used for the sake of decreasing amount of dust caused by spraying. Using the liquid type accelerator, however, becomes a cause of problems, later strength, durability, and causticity. A new spray mortar system using slurry type accelerator based on calcium sulfo-aluminate is proposed as a solution of problems in conventional systems. In the paper, applicability of the new system and characteristics of the sprayed mortar are verified through field tests. It is concluded that the amount of dust by the system is comparable to that by conventional systems. Additionally, using slurry type accelerator based on calcium sulfo-aluminate is effective to improve the strength increase.

Key Words: amount of dust, calcium sulfo-aluminate, slurry type accelerator, spray mortar system, TBM

1. はじめに

近年、我が国においてもトンネル工事の急速施工とコスト低減を目指して、上下水道や水力発電所の導水路トンネルや、道路トンネルの導坑にTBM工法が積極的に採用される状況になっている。

TBM工法における支保の一つとして、吹付けモルタル（あるいは吹付けコンクリート）がある。TBM工法における吹付けモルタルには、その工法の特徴から、坑内環境の保全や機械装置の保守のための発生粉塵の抑制およびTBMの速い掘進速度に対応する支保効果発現のための早強性が要求される¹⁾。

吹付けモルタルの施工は、小断面TBMの一次覆工用に向けて開発された吹付けシステムが主に採用されている。その吹付けシステムは、メーカー間でシステム、材料に若干の違いはあるが、連続練りミキサー・ポンプにより特殊プレミックスモルタル材を練り混ぜ・圧送し、ノズルにて無機塩系の液体急結剤を混合するものである。しかし、これらの吹付けシステムで使用している無機塩系の液体急結剤は、モルタルとの混合性や発生粉じんの抑制などで有利な反面、急結性および長期強度でセメント系粉体急結剤に劣ることや、急結剤の取扱いに注意を要するなどの課題を有している²⁾。

上述の液体急結剤の利点を生かし、その課題を解決する手法として粉体急結剤のスラリー化を考案し、スラリー急結剤を用いたTBM吹付けモルタルシステムの開発を行った。本報告は、本吹付けシステムの実施工への適用性を検証する目的で行った施工実験における、吹付けモルタルの強度特性および粉じんについて報告するものである。

1) 飛島建設（株）土木本部土木技術部

2) 正会員 飛島建設（株）技術研究所

3) 電気化学工業（株）セメント・特殊混和材研究所

2. 吹付けシステムの概要

2. 1 吹付けシステム

開発した吹付けシステムの特徴は、粉体急結剤のスラリー化である。粉体急結剤をスラリー化することによりノズルから直接噴射される粉体急結剤の量を低減し、粉体急結剤の欠点である粉じんの発生を抑制可能である。このことから、セメント系粉体急結剤の特長である急結性、長期強度、取り扱いの容易さなどをTBM工法においても有効に活用できると考えた。

従来の無機塩系液体急結剤を用いる吹付けシステムを図-1に、今回開発したスラリー急結剤を用いる吹付けシステムを図-2に示す。開発した吹付けシステムは、連続ミキサポンプによるモルタルの供給は従来のシステムと同一であり、混合器手前に位置するスラリー化装置にて、粉体急結剤を連続的にスラリー化し、モルタルと混合させるシステムである。従って、本吹付けシステムは、スラリー急結剤の供給に必要な装置以外は従来の吹付けシステムで使用されている施工機械で構成されており、これまでの施工機械を有効に利用可能なシステムとなっている。また、粉体急結剤の供給は、通常のNATMの吹付けコンクリートシステムで使用されている粉体急結剤添加装置に若干の改良を加えた装置により行われる。

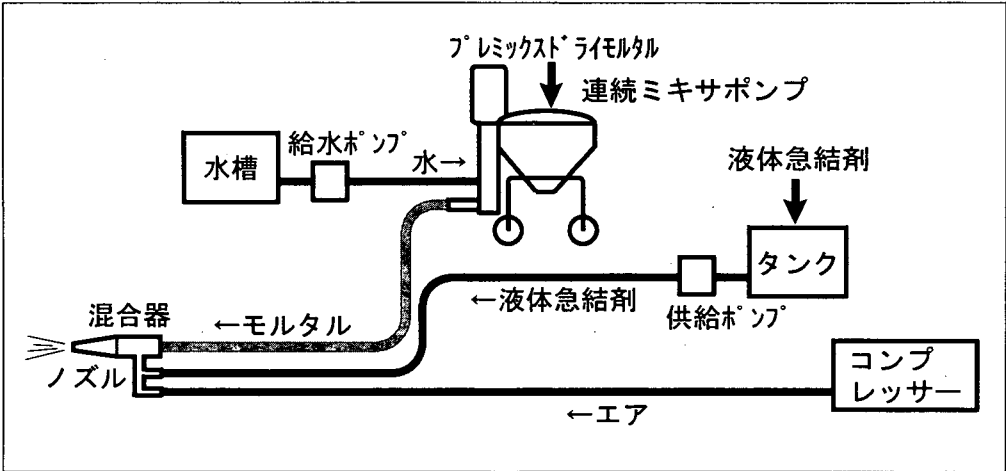


図-1 従来の吹付けシステム

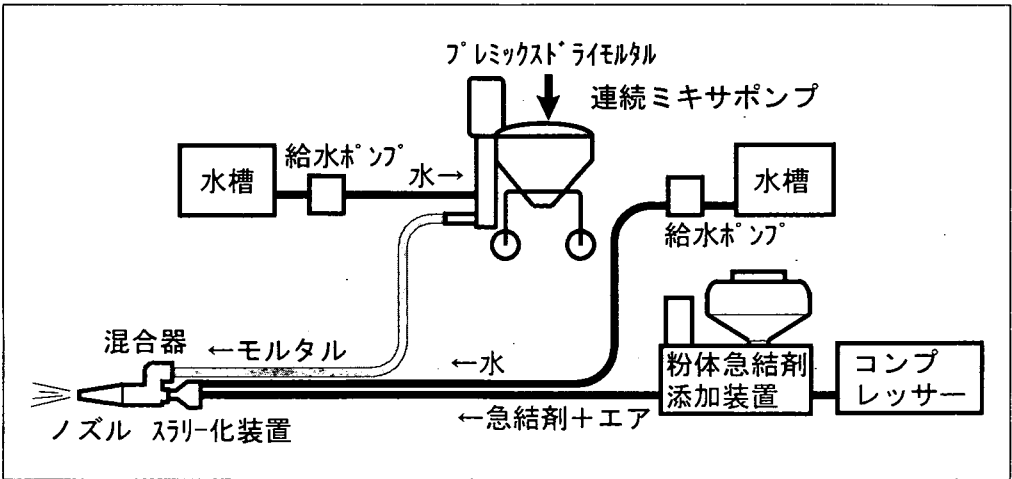


図-2 開発した吹付けシステム

2. 2 スラリー化装置

粉体急結剤のスラリー化を行う装置をスラリー化装置と称する。スラリー化装置は、モルタルとの混合装置直前に設置される。

粉体急結剤は、従来の吹付けコンクリートシステムと同様に空気搬送され、スラリー化装置にて高压水によりスラリー化される。このスラリー化装置により、スラリー急結剤は連続的に製造、供給され、モルタルと混合される。

事前実施したスラリー化に関する要素実験において、水急結剤比 50 % 以上で粉体急結剤を均一にスラリー化できることを確認した³⁾。

(写真-1 参照)



写真-1 スラリー化の状況

2. 3 使用材料

(1) 急結剤

本吹付けシステムで使用する粉体急結剤は、長期強度の増進を阻害しないこと、および、適切な凝結性能が得られ、作業環境に優しいなどの事由から、NATM工法の高強度吹付けコンクリートに用いられているカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤⁴⁾を選定した。

無機塩系の液体急結剤は、セメントの水和により生成した水酸化カルシウムと反応して C_3AH_6 を急速に生成し急結させるものである⁵⁾。これに対し、選定したカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤は、セメント中の C_3A の反応を促進すると同時に、急結剤自体が水和反応により硬化する(自硬性)。また、水和反応によるエトリンガイド($3C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)の急速な生成により、セメント水の中の間隙水から多量の水を結合し、この水が失われた空隙中にエトリンガイドの針状の結晶が成長して、より緻密な硬化体を形成することから、無機塩系の液体急結剤に比べて、強度特性の向上が図れる²⁾。さらに、スラリー化した急結剤は、コンクリートと同等のアルカリ性であることから、従来の無機塩系の液体急結剤に比べて作業性(取扱い)が改善される。

ただし、市販されている粉体急結剤では水との反応が速く、モルタルとの混合に至るまでに固結することから予測され、スラリー化に適合する粉体急結剤の開発が不可欠であった。そこで、水との反応時間、モルタルと混合した時の凝結性状や強度発現性などについて室内実験による検討を行い、新たにスラリー化に適合するカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤を開発した。

(2) 遅延剤

上述したように、粉体急結剤では水との反応が速く、モルタルとの混合に至るまでに固結することから、スラリー化に適合するカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤を新たに開発した。しかし、環境温度などが粉体急結剤と水との反応速度に影響するため、より確実なシステムの構築を考え、その反応速度をコントロールする目的で遅延剤を用いることとした。遅延剤は、スラリー化装置に供給する水に溶解した。

(3) 特殊プレミックスモルタル

従来の特殊プレミックスモルタルは、セメントと粒度調整した細骨材、プラスチック繊維、粉じん低減剤などをプレミックスしたドライモルタルである。開発した吹付けシステムで使用する特殊プレミックスモルタルは、カルシウムサルフォアルミネート系急結剤に適合すべく、従来品に若干の改良を加えたものである。

3. 施工実験

3. 1 実験計画

(1) 吹付けモルタルの配合

小断面TBMで施工実績のある従来の吹付けシステムと開発した吹付けシステムの性能および施工性などについて比較検討するために、表－1に示した吹付けシステムと配合を組み合わせた施工実験を実施した。

表－1 吹付けモルタルの配合

吹付けシステム	材 料	モ ル タ ル 材	配 合					
			主材 (kg/m³)		急 結 剤 (kg/m³) **			
			モルタル材	水	液体急結剤	スラリー急結剤		
		急 結 剤				粉体急結剤	水	遅 延 剤
従来の吹付けシステム		特殊ﾌﾟﾚﾐｯｸｽﾓﾙﾀﾙ ^{＊1} (従来品)	1770	354	44	－	－	－
		液体急結剤						
本吹付けシステム		特殊ﾌﾟﾚﾐｯｸｽﾓﾙﾀﾙ ^{＊1} (改良品)	1864	336	－	93	47	0.24
		スラリー急結剤						

注) * 1 : 特殊プレミックスモルタルとは、特殊セメント、特殊骨材、プラスチック繊維および混和材を工場でプレミックスした材料である。

* 2 : 急結剤は、外割である。

(2) 硬化モルタルの試験項目および試験方法

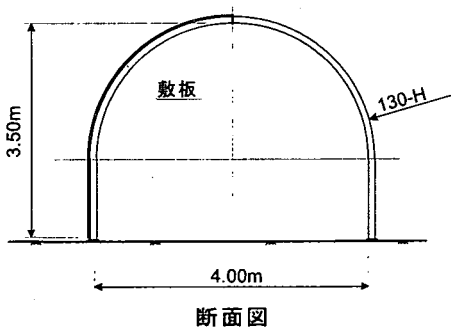
施工実験における硬化後のモルタルに関する試験項目および試験方法を表－2に示す。

表－2 硬化後のモルタルに関する試験項目および試験方法

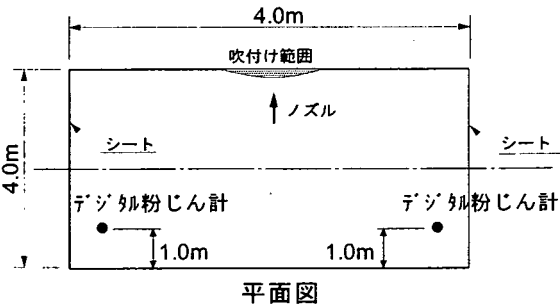
区 分	試 験 項 目	試 験 方 法	備 考
強 度 特 性	初期圧縮強度	土木学会規準JSCE-G561 引抜きによる試験方法	20℃気中養生 試験材齢：1, 3, 6, 24時間
	長期圧縮強度	JIS R 5201セメントの物理試験方法 (10. モルタルの強さ試験)	材齢1日迄20℃気中養生, 以降標準水中養生 試験材齢：1, 7, 28, 91日 供試体寸法：4×4×16cm
	長期圧縮強度 (ﾊﾞｰｽﾓﾙﾀﾙ)	JIS R 5201セメントの物理試験方法 (10. モルタルの強さ試験)	材齢1日迄20℃気中養生, 以降標準水中養生 試験材齢：1, 7, 28, 91日 供試体寸法：4×4×16cm

(3) 粉じん測定方法

図－3に示す模擬トンネルにおいて、図－4に示す位置に設置した2基のデジタル粉じん計を用いて、粉じん測定を実施した。なお、模擬トンネルは、坑口をシートで覆い、無換気状態とした。



図－3 模擬トンネル形状



図－4 粉じんの測定方法

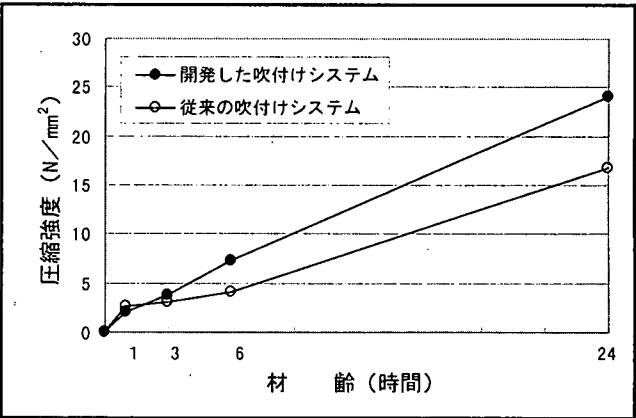
3. 2 実験結果

(1) 初期強度

初期強度の試験結果を図－5に示す。

材齢 3 時間までの初期強度は、本吹付けシステム（特殊プレミックスモルタル（改良品）＋スラリー急結剤）と、従来の吹付けシステム（特殊プレミックスモルタル＋液体急結剤）は、ほぼ同等の強度発現である。

しかし、材齢 6 時間以降については、本吹付けシステムは良好な強度発現を示し、材齢 6 時間で 8N/mm²、材齢 24 時間で 24N/mm² の高強度が得られた。

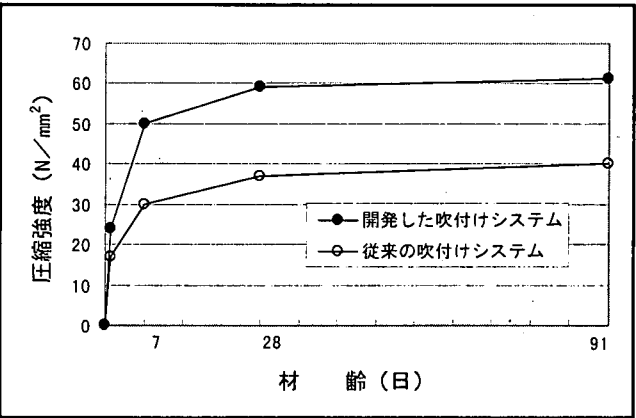


図－5 初期強度の試験結果

(2) 長期強度

初期強度の試験結果を図－6に示す。

材齢 24 時間以降の長期強度は、本吹付けシステムが従来の吹付けシステムに比べて、材齢の経過に伴う良好な強度増進が認められ、材齢 28 日における圧縮強度は、60N/mm² 程度の高い値が得られた。このことは、使用材料で述べたカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤の特徴がスラリー化によって損なわれることなく、十分に発揮されたことによると考えられる。



図－6 長期強度の試験結果

(3) 施工性

①粉じん

粉じん測定の結果を表－3に示す。

表－3に示すCPMは、約 5 分間の吹付けで測定されたデジタル粉じん計による累積カウント数を 1 分間当りの値としたものである。粉じんの絶対量は明確ではないが、各吹付けシステムとも CPM が同程度であり、本吹付けシステムの粉じんは、従来の吹付けシステムと同等であることが確認された。

粉体急結剤をスラリー化する本吹付けシステムは、粉じん抑制に対して有利といわれている液体急結剤に匹敵する粉じん抑制効果を有することが確認された。

表－3 粉じん測定結果

吹 付 け シ ス テ ム 種 別		CPM
従来の吹付けシステム		3 9 1
開発した吹付けシステム	1 回 目	3 9 7
	2 回 目	4 1 3

②吹付け状況

目視による吹付け状況の観察結果を以下に示す。

液体急結剤を使用した従来の吹付けシステムは、既に小断面 TBM でかなりの施工実績のあるシステムであり、良好な吹付け状況であった。これに対し、スラリー急結剤を使用した本吹付けシステムは、付着性およびリバウンドについては従来の吹付けシステムとほぼ同等の吹付け状況と見受けられた。また、今回の施工実験において、30 分以上の吹付けを実施したが、閉塞などの施工トラブルもなく、比較した従来の吹付けシステムと遜色ない施工性を有していることを確認した。

3. 3 考察

施工実験で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本吹付けシステムは、従来の吹付けシステムに比較して、初期材齢および長期材齢とも優れた強度発現を示しており、より品質の高い吹付けモルタルが得られることが確認された。このことから、選定したカルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤の特徴はスラリー化によって損なわれることなく、十分に発揮されたと思われる。
- (2) 粉体急結剤をスラリー化する本吹付けシステムは、粉じん抑制に対して有利といわれている液体急結剤に匹敵する粉じん抑制効果を有することが確認された。
- (3) 本吹付けシステムは、付着性およびリバウンドについては従来の吹付けシステムとほぼ同等の吹付け状況であった。また、施工実験を通じて、閉塞などの施工トラブルもなかったことから、従来の吹付けシステムと遜色のない施工が行えるものと判断された。

4. まとめ

TBM工法における吹付けモルタルには、その工法の特徴から、発生粉じんの抑止や早期に支保効果が得られる強度発現が必要とされている。新たに開発したスラリー急結剤を用いた吹付けモルタルシステムは、今回の施工実験の結果において、従来の吹付けシステムに比べて優れた急結性、強度発現が得られ、発生粉じんについても従来システムと同等であることが確認された。このことから、本吹付けシステムは、TBM工法における吹付けシステムとして適用可能であるとともに、その優れた強度発現から、支保としての吹付けモルタルの品質向上に寄与できるものと判断される。

5. 今後の課題

本吹付けシステムは、まだ施工実験により実施工への適用が可能であることを確認した段階であるため、実施工での再現性を確認する必要がある。また、吹付けエア圧の調整やモルタルとの混合装置の改良、改善により、さらに粉じんを抑制することも可能であると思われる。これらの課題については、実施工を通じて検討を行い、本吹付けシステムの完成度を高めることが肝要であると考えている。

近年、コスト縮減に向けて発注機関を中心に吹付けコンクリートの高強度化、高品質化にともなう支保形態の合理化が検討、試行されている。本報告で提案したスラリー急結剤は、吹付けコンクリートにも応用可能であり、吹付けコンクリートの品質（強度特性、耐久性）の向上に寄与できるものと考えられる。また、スラリー急結剤の優れた攪拌効果は、吹付けコンクリートで特に問題視される品質変動⁹⁾の低減にも効果を発揮する可能性がある。今後は、スラリー急結剤の吹付けコンクリートへの適用について検討を進め、吹付けコンクリートの高強度化、高品質化に有効な吹付けコンクリートシステムを構築したいと考えている。

【参考文献】

- 1) 水谷憲三：トンネルボーリングマシン入門(7) TBMの実施工(2)，トンネルと地下第27号4巻，1996.4
- 2) 五味秀明：急結セメント（超速硬性結合材／急結材），セメント・コンクリート No.535，1991.9
- 3) 市川健作・川端康夫・平間昭信・岩城圭介：一次覆工の高度化（新吹付けシステムの開発），土木学会最新の施工技術・12，1997.8
- 4) 三谷浩二・武内 淳：高強度吹付けコンクリートの開発，土木学会第52回年次学術講演会概要集（VI部門），1997.10
- 5) 急結セメント，セメント・コンクリート No.560，1993.10
- 6) 平間昭信・藤本晃生・原田 進・岩城圭介：高強度吹付けコンクリートの品質変動について，土木学会第50回年次学術講演会概要集（V部門），1995.9