

32. 大容量吹付機（スプレイメック9150WPC）による施工

東亜建設工業(株)：*泉 信也
 (株)ケー・エフ・シー：竹原 一弘

1. はじめに

近年、NATMにおける吹付コンクリート施工では、施工コストの縮減、坑内作業環境の改善、トンネルのシングルシェル化あるいは大断面化などを目的として高品質吹付コンクリート（日本鉄道建設公団）や高強度吹付コンクリート（日本道路公団）が採用されつつある。これらの開発、導入にあたり、市場の動向としては大断面トンネルの急速施工に対応可能な吹付機の実用化が模索されている。このような新技術の流れに沿う試みの一つとして、フィンランドのノルメット社より吹付機スプレイメック9140WPを国内導入した。

スプレイメックは欧州のみならず、中近東、中国、韓国などアジア各国のトンネル市場で高い評価を得ているが、欧州などの国々では、エアライト系セメントと玉砂利、液体急結剤の組合せによる吹付施工が一般的となっている。一方、我が国では普通ポルトランドセメントと粉体急結剤の使用が圧倒的に多く、粗骨材も碎石の使用が多数を占める。

現在、仁田山トンネルにおいて液体急結剤の試験施工を終え、秋浦トンネル並びに曾台トンネルにおいて粉体急結剤による吹付施工を行っている。今回は、液体急結剤における問題点と粉体急結剤を用いた場合の機械仕様（機械の改造事項等）、工事実績（実際の吹付能力、リバウンド等）更に、吹付コンクリート吐出量 20m³/h以上で吹付施工する場合の機械的要求事項について報告する。

2. スプレイメックの概要

スプレイメックは、吹付可能範囲が最大16m、高さ15mであり、需要の多い2車線トンネル上下半施工から、第2東名・名神自動車道クラスの大断面トンネルまで1台で対応可能な幅広い作業範囲を有している。

従来、欧州のトンネル施工において、リバウンドや粉塵発生量の低減を目的とした液体急結剤を使用した吹付施工を行ってきた。その作業性としては、メインブームの先端に吹付操作員が搭乗可能なバスケットを装備しており、操作員は着座した状態で、コンクリート吐出量、圧縮空気量、

表 2-1 スプレイメック仕様

吹付機タイプ	液体急結剤・コンプレックス分離型	粉体急結剤・コンプレックス分離型
使用現場	仁田山トンネル	秋浦トンネル
名称・型式	スプレイメック9140WP	スプレイメック9150WPC
吹付形式	道式・ポンプ圧送方式	
全体寸法	長さ	12.2m
	幅	2.4m
	高さ	3.0m
	重量	30.5t
吹付可能範囲	最大高さ	15.0m
	最大幅	15.0m
エンジン	最大電機吐出量	32.0m ³ /h(50Hz, 400V) 28.0m ³ /h(50Hz, 400V)
	名称・型式	トイワ 4M 1812-9
	空積出力	62kW/2,400rpm
	送付速度	最高20m/h
コンクリートポンプ	名称・型式	シャウイングOPH 300 RB
	ポンプ形式	12ステージ
	シリンダ内径×ストローク	φ180mm×600mm
	シリンダ容積×本数	16.0L×2本
コンプレッサ	シリンダストローク	35ストローク/min
	電動機出力	37kW(50/60Hz, 400, 440V)
	名称・型式	志摩PCE 60S2
	吐出能力	18 m ³ /min
ポンプ	エンジン出力	100PS
	吐出能力	12.0m ³ /min
	電動機出力	19kW(50/60Hz, 200/220V)
	名称・型式	CE15000
ポンプ	吐出能力	15.0m ³ /min(50Hz, 440V)
	吐出能力	13.3m ³ /min(50Hz, 400V)
	電動機出力	30kW(50/60Hz, 400/440V)
ポンプ	名称・型式	PAC330
ポンプ	名称・型式	スプレイメック標準装備
ポンプ	回転特性	0~10.7/min
ポンプ		0.8kg/cm ²

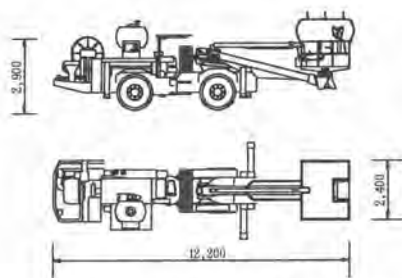


図 2-1 スプレイメックの外径寸法

急結剤供給量をそれぞれ遠隔操作による調整を行いながら吹付施工可能である。

表 2-1 に、液体急結剤を使用し、コンプレッサ分離型の 9140WP（仁田山トンネルにて使用）と、粉体急結剤を使用し、コンプレッサを搭載した 9150WPC（秋浦トンネルにて使用）の仕様を示す。また、図 2-1 に、スプレイメックの外形寸法（9150WPC）を示す。

3. 施工事例

3-1. 液体急結剤を用いた試験施工（仁田山トンネル）

(1) 工事概要

工事名称：仁田山トンネル築造工事

発注者：岩手県

工期：平成 9 年 10 月 9 日～平成 11 年 1 月 24 日

概要：延長 313m

工法：NATM、発破掘削

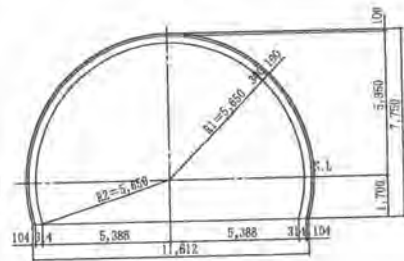


図 3-1 トンネル断面

(2) 試験施工の使用コンクリート材料

仁田山トンネルでは、粉体急結剤を使用した吹付施工と液体急結剤を使用した試験吹付を行った。試験吹付におけるコンクリート材料は国内産を使用し、液体急結剤（欧州産）との適応性を確認した。試験吹付で使用した吹付コンクリート材料を表 3-1 に示す。

表 3-1 試験吹付のコンクリート材料一覧

材料	種類・仕様	製造会社/生産場所
セメント	普通ポルトランドセメント 比重=3.15	秩父小野田(株)
細骨材	砕砂：比重=2.65	岩手県住田町世田米城内産
粗骨材	砕石：比重=2.69 Gmax=15mm	岩手県住田町世田米城内産
粉体急結剤	デンカナトミック Type-5 (カルシウム・アルミネート系)	電気化学工業(株)
液体急結剤	UMA GUNITE LIQUID N (アルミン酸ナトリウム系)	トルグラー社 (イタリア)
高性能減水剤	FTN-30 (ポリエチレングリコールエステル系)	デンカグレース(株)

(3) 液体急結剤と国産材料の適応性（問題点）

国産材料によって練混ぜた吹付コンクリートとイタリア製液体急結剤の適応性を確認するために、トンネル坑口部法面で試験吹付を行った。また、仁田山トンネルにおいては、スプレイメックの吹付能力の確認として、通常吹付コンクリートについても施工を行ったので、併せて結果（表 3-2 スプレイメックの吹付能力確認結果、表 3-3 吹付コンクリートの強度試験結果）を示す。

第 1 段階として、通常配合の吹付コンクリートに液体急結剤を添加した結果、吹付操作性は特に問題はなかった。しかし、粉体急結剤を使用した場合に比べ強度発現が低く、材令 7 日時点において材令 28 日における設計基準強度 18N/mm^2 の達成は不確実であった。（表 3-3 No.L-2 No.L-3）

このため、第 2 段階として、セメントの配合比率を 410kg/m^3 、W/C を 50% とし、高性能減水剤を添加させて法面の試験吹付を行った結果、粉体急結剤に近い強度発現を得られたが、コンクリートポンプの設定吐出量 $19.2\text{m}^3/\text{h}$ に対して実時間当たり吐出量 $14.4\text{m}^3/\text{h}$ 、ポンプ効率 75% となり、吹付効率が低下した。（表 3-2 No.L-3）これは、吹付コンクリートの粘着性増大による圧送性の低下などが原因と考えられる。

そこで第 3 段階として、圧送性の良い 1:3 モルタルに液体急結剤を添加させて試験を行い、スプレイメックの機械的な限界性能を確認した結果、最大で設定吐出量 $26.9\text{m}^3/\text{h}$ に対して実時間当たり吹付量 $24.0\text{m}^3/\text{h}$ 、ポンプ効率 89% を発揮できた。（表 3-2 No.L-5）

表 3-2 スプレイメックの吹付能力確認結果

No.	試験目的	吹付量 (m ³)	設定(理論) 吐出量 (m ³ /h)	実時間当り 吹付量 (m ³ /h)	ポンプ効率 (%)	スランブ値 (現場) (cm)	吹付場所	コンクリート 配合概要	急結剤	備考
P-1	粉体急結剤 適応性確認	6.0	11.5	10.9	94.8	11.2	坑内 (全断面)	通常配合 (別表)	粉体急結剤 デンカナトミック Type-5	強度試験 (別表)
P-2		2.5	11.5	11.1	96.5	10.0				
P-3		4.0	14.6	14.1	96.6	10.9				
P-4		4.0	14.6	13.3	91.1	11.0				
P-5		5.0	15.4	14.4	93.5	10.2				
P-6		5.0	15.4	13.9	90.3	9.2				
P-7		5.0	15.4	13.8	89.6	10.4	坑内 (上半)			
P-8		5.0	15.4	13.7	89.0	9.6				
P-9		6.0	16.4	14.4	87.8	9.4				
P-10		6.0	16.4	15.1	92.1	10.1				
P-11	4.5	21.0	19.2	91.4	10.8					
P-12	吹付性能確認 (粉体急結剤)	2.0	21.0	20.0	95.2	11.1	坑外 (坑口法面)	減水剤混入 1:03 モルタル	液体急結剤 トルグラー UMA GUNITE LIQUID N	強度試験 (別表)
P-13	4.5	25.0	22.5	90.0	10.7					
P-14	4.5	25.0	16.9	67.6	8.5					
L-1	液体急結剤 適応性確認	6.0	11.5	10.5	91.3	10.7	坑外 (坑口法面)	減水剤混入 1:03 モルタル	液体急結剤 トルグラー UMA GUNITE LIQUID N	強度試験 (別表)
L-2		6.0	14.4	12.0	83.3	10.1				
L-3		6.0	19.2	14.4	75.0	14.2				
L-4		5.0	20.2	17.6	87.1	-				
L-5		5.0	26.9	24.0	89.2	-				

注) 試験施工であるため、トラックミキサ1車分(5m³)の施工である。

表 3-3 吹付コンクリートの強度試験結果

No.	試験目的	コンクリート配合								スランブ (現場) (cm)	強度試験(平均値)				
		W/C	S/a	Gmax	水	セメント	細骨材	粗骨材	急結剤		減水剤	ブルアウト		コア	
		(%)	(%)	(mm)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)		(kg/m ³)	3H	1日	7日	28日
P-7	粉体急結剤 適応性確認								7.0		10.5	2.2	10.3	21.5	29.5
P-11	吹付性能確認 (粉体急結)	80	65	15	216	360	1,122	612	-		11.0	2.0	10.1	19.4	27.2
L-2	液体急結剤 適応性試験								6.0		10.0	1.7	10.7	13.1	19.4
L-3		50	70	15	205	410	1,161	497	1.39		14.0	1.5	11.3	16.5	26.3

注) 仁田山トンネル工事の設計基準強度は材令28日で18N/mm²、スランブ値は10cm±2cm記号No.コンクリート配合急結剤

3-2. 粉体急結剤を用いた吹付施工(秋浦トンネル)

(1) 工事概要

工事名称：東北幹、秋浦トンネル他工事
 発注者：日本鉄道建設公団
 工期：平成9年8月5日～平成12年2月12日
 延長：延長 835m (内トンネル区間 690m)
 工法：NATM、発破掘削

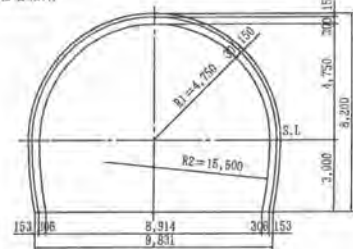


図 3-2 トンネル断面 (P-A) 曲

(2) 吹付施工における使用コンクリート

秋浦トンネルは、日本鉄道建設公団発注の新幹線トンネルであり、現在、分割練混ぜ (SEC) 工法による高品質吹付コンクリートの使用が標準となっている。

秋浦トンネルにおいては、二軸ミキサを採用し、練混ぜ方は以下のように実施した。

【全骨材造殻方式】 S+G+W₁→C+CaCO₃+SF→W₂+高性能減水剤→出荷

但し、SF と CaCO₃ は事前混合であり、C とは累積計量である。

(3) 粉体急結剤を用いた場合の機械仕様

秋浦トンネルで使用しているスプレイメック 9150WPC は、仁田山トンネルにおいて吹付施工した結果と粉体急結剤を使用する点から、以下のような変更がなされている。

1) コンプレッサを搭載

仁田山トンネルにおいて、分離していたコンプレッサを搭載し (仕様は表 2-1 参照)、機動性の向上とサイクルタイムの短縮を図った。これより、吹付コンクリートと急結剤の圧送系統は図 3-3 のようになった。

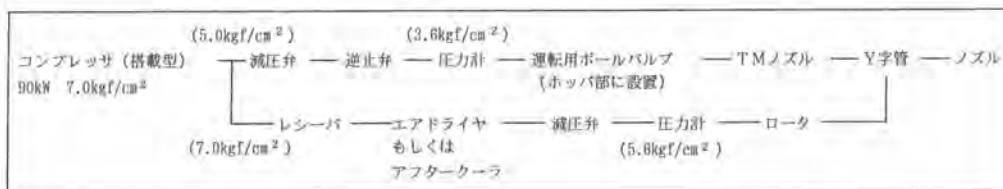


図3-3 吹付コンクリートと急結剤の圧送系統

尚、図3-3において、現在はエアドライヤ(RX-22B)を基本としているが、将来的には、機械性能及びメンテナンスの容易さから、アフタークーラ(SE-500)へ移行しようとしている。

2) 急結剤供給装置を粉体用に変更

スプレイメック9150WPC液体用の急結剤供給装置が標準装備となっていたが、これを粉体用に乗せ替えた。表3-4に各吹付コンクリートにおける粉体用急結剤添加装置の仕様を示す。

表3-4 各吹付コンクリートにおける粉体用急結剤添加装置の仕様

セメント量 (kg/m ³)	従来吹付機			スプレイメック9150WPC		
	型式	供給特性 (kg/rpm/h)	タンク容量 (L)	型式	供給特性 (kg/rpm/h)	タンク容量 (L)
360	PAC250	45	250	PAC250	90	250
450	—	—	—	PAC400		400

注) 急結剤添加装置は、電気化学工業製のものを対象とした。

スプレイメック9150WPCは、従来吹付機と比較して吹付能力が高いため、供給特性が2倍の90kg/rpm/hの急結剤添加装置を標準とした。

(4) 配合

現場配合を表3-5に示す。

表3-5 現場配合

W/C (%)	S/a (%)	Gmax (mm)	水 (kg/m ³)	結合材		細骨材		粗骨材 (kg/m ³)	減水剤 (kg/m ³)
				セメント (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	石灰 (kg/m ³)		
60	62	13	216	342	18	1,020	90	690	2.52

注) 高品質吹付コンクリートのW/Cは次式 水(W) / (セメント(C) + シリカフェーム(SF)) より求まる。

(5) スプレイメックの高品質吹付コンクリートと粉体急結剤に対する適応性

秋浦トンネルにおいては、高品質吹付コンクリートと粉体急結剤に対する適応性として、スランブの経時変化、吹付ポンプ効率、コンクリート強度、リバウンド率、適正な吹付方法と吐出量について、試験あるいは実施工として確認した。

1) スランブの経時変化

秋浦トンネルにおけるスランブ基準は、切羽作業段階において、8±2cmである。そこで、これを目標に経時変化を何点か測定した。吹付プラントの出荷から吹付開始までの時間は、40～60分程度と判断し、それに見合うスランブの経時変化(図3-4)を確認した。図3-4より、吹付プラント出荷時のスランブ基準を15±2cmとし、吹付施工を行ったところ、吹付時スランブ8cm程度が最適であった。

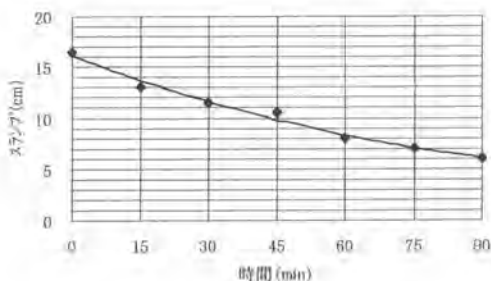


図3-4 スランブの経時変化

2) スランブと吹付ポンプ効率

次に、試験的に出荷時のスランブを変え、スプレイメックの吹付ポンプ効率を測定したところ、以下のような結果（表 3-6）が得られた。

表 3-6 スランブと吹付ポンプ効率

No.	スランブ値 (出荷時) (cm)	スランブ値 (吹付時) (cm)	吹付量 (m^3)	設定(理論) 吐出力 (m^3/h)	実時間当り 吹付量 (m^3/h)	ポンプ効率 (%)
1	15.5	8.0	6.0	16.8	15.1	89.5
2	21.0	13.5	2.5	14.7	13.3	91.0
3	18.0	11.5	2.0	12.1	11.1	91.7

表 3-6 より、吹付ポンプ効率は、設定吐出力 12.1~16.8 m^3/h 、スランブ（吹付時）8.0~13.5cm においては約 90%であり、問題ないことがわかった。

3) コンクリート強度

コンクリート強度は、冬期に得られた結果を表 3-7 に示す。

表 3-7 高品質吹付コンクリートの強度試験結果

スランブ (吹付時) (cm)	ブルアウト		供試体	コア
	3H (N/mm^2)	1日 (N/mm^2)	28日 (N/mm^2)	28日 (N/mm^2)
9.5	4.1	12.3	21.7	28.7

注) 秋浦トンネルにおける設計基準強度は、材令 3H で 1.5 N/mm^2 、材令 1日 で 8.0 N/mm^2 、材令 28日 で 18.0 N/mm^2

表 3-7 より、早期強度、材令 28 日強度とも、設計基準強度を満足していることがわかる。

4) 適正な吹付方法と吐出量

スプレイメックは、高い吐出能力を有するが、従来通りの吹付方法を行うと、急結剤の急結能力の限界から、吐出量が制限されてしまうことがわかった。以下に、従来吹付とその対策について述べる。

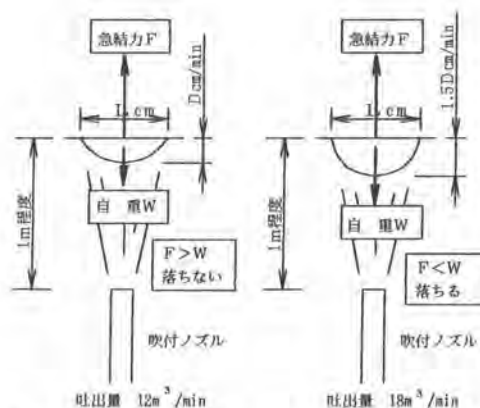
①従来（一層）吹付

実吐出量 18 m^3/h 、ノズル距離 1.0~1.5m 程度で、鋼製支保工の根付けから側壁部→肩部→天端部へ順次 1回で仕上げる吹付方法を行うと、肩部と天端部において頻りに肌落ちが確認された。この原因として、図 3-5 に示すように、通常の吹付（12 m^3/h ）に比べて単位面積における単位時間当たりの吹付量が多くなり自重が急結能力を上回ることによるものと考えられる。このため、一回仕上げにて吹付を行うと、同じ急結剤（デンカ Type-5）である限り、最大吐出量は 14 m^3/h 程度であることがわかった。

②薄吹の多層吹付（対策）

吹付領域全体に渡って、ノズルを吹付面から 1.5~2.0m 程度離して、薄吹の三回仕上げ（下地吹付、本吹付、仕上げ吹付）を行うと、肌落ちが無くなり、リバウンド率も向上して順調な吹付作業ができる。秋浦トンネルにおける適正な吐出量は、設定（理論）吐出量が 21 m^3/h 、実吐出量 18 m^3/h であった。

吹付状況により、機械能力（最大 28 m^3/h 、50Hz、400V）から判断すると、次に示す事項の改善により更に吐出量が大きくなるものと思われる。現時点では、実吐出量 20 m^3/h を目標としている。



* 吐出量を変化させた時の吹付流の広がり方はほぼ変わらないものとした。

図 3-5 一層吹付の肌落ち原因

4. 機械的要求事項

今後の課題として、作業性・操作性の改善、実吐出量 $20\text{m}^3/\text{h}$ 以上の吹付施工を可能とすることを考えている。以下に、改造事項または検討事項を列記する。

1) 配電関係

圧送・ノズル・急結剤・照明関係および予備電源をまとめ1つの配電盤内に納める。このとき、主電源 ON 時に照明・急結剤添加装置（アフタークーラー含む）も ON の状態となるように配電する。

2) ノズル

トンネル周方向（縦方向）に長く（1往復3m程度）吹付可能な構造とする。

（図3-6参照）

3) 足廻り

路盤の凹凸、斜路に対応可能とする。（エンジン馬力の検討）

4) 必要エア量の検討

実吐出量 $20\text{m}^3/\text{h}$ 以上の吹付施工を実施する際、圧送に必要なエア量、コンクリート圧送エアと急結剤圧送用エアのバランス及び吸入位置の検討が必要となる。

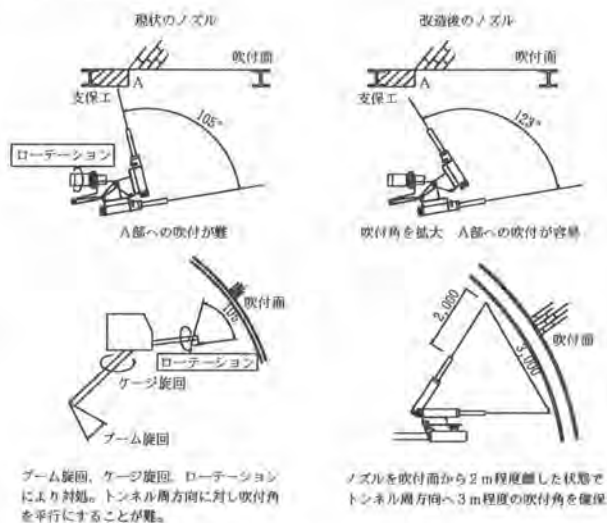


図3-6 ノズル機構の改善

5. おわりに

これまでに、スプレイメック 9150WPC において試験施工あるいは吹付施工した結果、以下の事が確認できた。

仁田山トンネルにおいて、液体急結剤（アルミン酸ナトリウム系）と国産材料を用い、試験吹付を行ったが、欧州などの国々で使用しているエーライト系セメントと比べ、国産の普通ポルトランドセメントは、液体急結剤（アルミン酸ナトリウム系）に適していないことがわかった。

また、秋浦トンネルにおいて、粉体急結剤を使用し高品質吹付コンクリートにおける吹付施工を行った結果、スプレイメックは高品質コンクリートにおいてスランブ 8cm 程度で最適な吹付が可能であり、粉体急結剤に対する適応性（吹付ポンプ効率、コンクリート強度、リバウンド等）も適切であることがわかった。

今後は、適正な吹付方法（薄吹きが多層吹付）による吹付施工と作業性・操作性の改善（ノズル機構の改善など）、更に吹付コンクリート品質の一定化（自動スランブ調整）技術、急結剤添加率を吹付箇所に応じて変化させる（急結剤添加率自動調整）技術を併用し、更なる急速化を目指したい。

最後に、本報告書の作成にあたり、多大なご協力を頂いた電気化学工業㈱をはじめ、関係者各位に深く御礼申し上げます。