

# 18. 高性能吹付けコンクリートシステムの開発

(株)青木建設：\*駒田 恵司，牛島 栄  
太平洋機工(株)：石橋 良正

## 1. はじめに

我が国における吹付けコンクリート工法は、山岳トンネルにおける NATM の普及に伴い進歩を遂げ、吹付けロボットの開発等により、施工の自動化・省力化が図られ、 $15\text{m}^3/\text{hr}$  を超える高速吹付けも可能となっている。しかし、従来の粉体急結剤を使用した吹付けコンクリートシステムを用いた場合は、リバウンド量、発生粉塵量が多く、その作業効率および作業環境は決して良いとは言えない。その原因となるものに、粉体急結剤の定量供給性の低さおよび急結剤とコンクリートの混合性の低さがあげられる。急結剤の均一な添加がなされずに、多量添加された場合には、発生粉塵量およびリバウンド量も増加し、急結剤の種類によってはコンクリートの長期強度が低下するなど品質が低下することが指摘されている。一方、急結剤の添加量が少なくなった場合には、吹き付けられたコンクリートが自重で剥落するため、リバウンド量の増加につながる。

本報では、コンクリートと圧縮空気および急結剤の混合部分に特徴を有するポンプ圧送方式の吹付けコンクリート機械とアルカリフリーの液体急結剤を組み合わせた吹付けコンクリートシステムにより、従来の上記問題点を解決し、リバウンド量と発生粉塵量を大幅に低減することが可能となったので、以下に報告する。

## 2. 新しい吹付けシステムの概要

本吹付けシステムのフローを図-1に、混合管の形状を図-2に示す。また、システムの機械設備構成を表-1に示す。本システムは、ピストンポンプによりコンクリートが圧送される湿式吹付け方式であり、急結剤はコンクリートポンプのピストンの動きに連動した（油圧回路が連動）ドージングポンプ（液体急結剤仕様）により定量圧送され、混合管手前で圧縮空気と合流し霧化された後、コンクリートと合流する。急結剤とコンクリートはノズルホース（5m）内で混合攪拌されながら移動し、ノズルより吹き付けられる。従来の混合方式に比べ、本システムはコンクリートが分断され易く、液体急結剤の使用により、急結剤が均一分散混合されるため、均質な吹付けコンクリートが得られるとともに、リバウンド、発生粉塵の少ないことが特徴である。

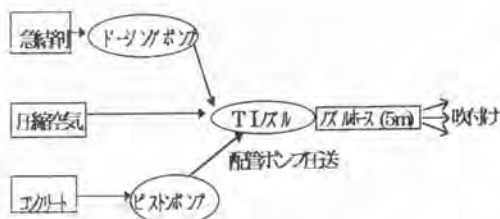


図-1 吹付けシステムフロー図

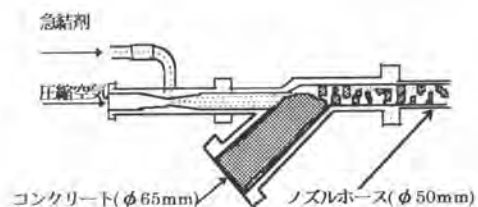


図-2 混合管機構図

表-1 機械設備構成一覧表

機 械 設 備 名	項 目	仕 様
コンクリートポンプ (BP300RE-15)	ポンプ形式	ピストンポンプ式
	モーター出力	37KW
	最大理論吐出量	33.6m <sup>3</sup> /hr
	最大吐出圧力	6.5Mpa
	最大主油圧	30Mpa
	シリンダ口径	180mm
	ピストンストローク	630mm
	寸 法 (L×W×H)	5378×1810×1740mm
	重 量	3100kg
ドージングポンプ (コンクリートポンプ連動)	ポンプ形式	ピストンポンプ式
	最大理論供給能力	約18 L/min
モノポンプ (高粘度液体急結剤用)	ポンプ形式	一軸偏心ネジポンプ
	供給能力	2~20L/min
コンプレッサ	搬送空気量	9.5Nm <sup>3</sup> /min
	空気圧	0.7MPa
ジェネレータ	電 圧	200V
	出 力	60KW

### 3. 施工模擬実験

#### 3.1 実験概要

##### 3.1.1 使用材料

実験に用いた使用材料を表-2に示す。急結剤はアルカリ骨材反応の防止と接触によるアルカリ焼けの防止を考慮して新たに開発されたアルカリフリーの液体急結剤と比較用に

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.15
細骨材	霞ヶ浦産陸砂, 表乾比重 2.57, 粗粒率 2.60
粗骨材	筑波産碎石, 表乾比重 2.70, Gmax10mm
高性能減水剤	主成分: ポリグリコ-カルボキシ誘導体, 比重 1.03~1.07
液体急結剤	主成分: 水溶性アルミニウム塩, 比重 1.44, pH2.5~3
粉体急結剤	主成分: 急結性セメント鉱物, 真比重 2.8, pH13 以上
粉塵低減剤	主成分: 水溶性セチルアルコール

急結性セメント鉱物系の粉体急結剤を用いた。ベースコンクリートの配合を表-3に示す。

表-3 ベースコンクリートの配合

スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能減水剤 (C×%)	粉塵低減剤 (G×%)
				W	C	S	G		
12	4.0	46.3	65	185	400	1082	613	0.6	0.1

##### 3.1.2 実験方法

###### (1) リバウンド試験

圧縮空気消費量(以下エア量と称す)および急結剤の使用量がリバウンドに及ぼす影響を把握するため、表-4に示す水準でコンクリートを吹き付け、リバウンド試験を実施した。試験は、幅 2000mm、高さ 1000mm の範囲で鉛直鋼製壁面に厚さ 200mm を目標に吹き付けを行い、跳ね返ったコンクリート重量と壁面に付着したコンクリート重量を計量し、リバウンド率を算出した。吹き付け

表-4 リバウンド試験水準

試 験 No.	エア量 (Nm <sup>3</sup> /min)	急結剤使用量 (C×%)
1	8	5
2		6
3		7
4		10
5	6	7
6	9.5	

時のコンクリート圧送量は  $7\text{m}^3/\text{hr}$ 、ノズルと吹付け面の距離は約  $120\text{cm}$  とした。エア量は、最適と思われる  $8\text{Nm}^3/\text{min}$  の他に、コンプレッサーの最大能力  $9.5\text{Nm}^3/\text{min}$  とした場合と、不足気味と思われる  $6\text{Nm}^3/\text{min}$  の場合で吹付けを行った。エア量はコンプレッサーのエンジン回転数とエア吐出量の機械特性図より算出して調整を行った。

### (2) ポンプ圧送実験

吹付け機械の搬入が困難な小断面のトンネルを想定して、4B管 ( $\phi 100\text{mm}$ ) 配管、水平距離約  $265\text{m}$  (水平換算距離約  $330\text{m}$ ) の圧送実験を行い、長距離圧送の可能性を確認した。また、圧送前後のコンクリートのフレッシュ性状試験を行った。ポンプ圧送配管図を、図-3に示す。

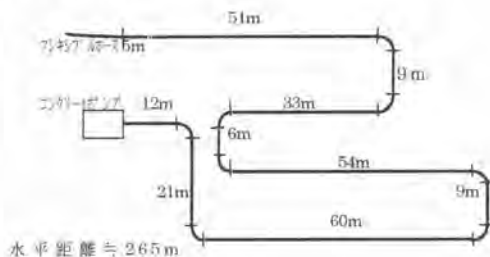


図-3 配管状況

### (3) 実大模擬トンネル吹付け実験

図-4に示すような実大規模のトンネル試験体 (内空  $H=4.1\text{m}$ ,  $L=10.5\text{m}$ ) の内側に、キーストプレートと溶接金網 ( $\square 100 \times \phi 5$ ) を配し、吹付け厚さ  $150\text{mm}$  を目標に吹付けを行った。実験に用いた急結剤の使用量はセメント重量の  $8\%$  とし、半断面の周方向  $4\text{m}$ 、長さ  $3\text{m}$  の範囲を  $7\text{m}^3/\text{hr}$  の施工速度で約  $2.2\text{m}^3$  の吹付けを行った。試験項目は、浮遊粉塵濃度、リバウンド率とし、浮遊粉塵濃度は、吹付け面から  $5\text{m}$  離れ、地上高さ  $1.5\text{m}$  の位置にヒエゾバランス粉塵計を設置して測定を行った。リバウンド率は、跳ね返ったコンクリート重量とポンプ圧送されたコンクリート量から算出した。なお、トンネルの両端部はシートで覆い、空気の出入りが無い状態で実験を行った。

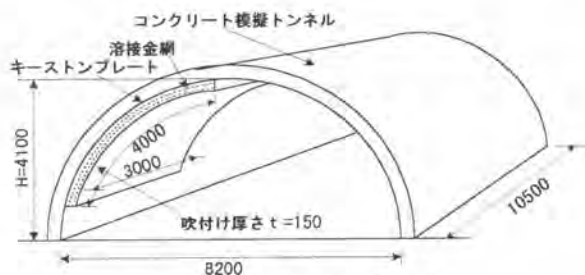


図-4 模擬トンネルの形状

### (4) コンクリートの硬化性状試験

吹付け前のベースコンクリートと吹付け後の吹付けコンクリートの硬化性状を把握するため、初期および中長期における強度試験を実施した。なお、吹付けコンクリートの試験体は、翌日コアを採取し、所定の養生を行った。

## 3.2 実験結果および考察

### (1) リバウンド試験

#### ① 急結剤使用量を変化させた場合

急結剤使用量を  $5, 6, 7, 10\%$  に変化させた場合のリバウンド試験結果を、表-5に示す。試験結果より、急結剤の使用量が増加するにつれてリバウンド率は低下する傾向で

表-5 リバウンド試験結果 (急結材使用量を変化)

急結剤使用量 (C×%)	リバウンド率 (%)	施工性
5	11.3	吹付け面でダレが認められた
6	8.8	壁面では良好だが、天端吹付け時に剥落があった
7	7.9	良好だが天端吹付け時に若干の剥落があった
10	6.6	良好

あった。今回実験を行った垂直壁面においては 7%の使用量で十分であったが、天端のような上向き吹付け時に 15cm 以上の厚吹きをした場合には、若干の剥落が認められており、リバウンド率は試験結果より大きくなると思われる。しかし、使用量を 10%とした場合は、20cm 厚さで天端を吹き付けた場合でも剥落は認められず、施工性も良好であった。

#### ②エア量を変化させた場合

エア量を変化させた場合のリバウンド試験結果を表-6に示す。コンクリート圧送量  $7 \text{ m}^3/\text{hr}$  時の最適エア量は  $8 \text{ Nm}^3/\text{min}$  程度であり、その時のエア Vol.に対するコンクリート Vol.の割合は 1.5%であった。

表-6 リバウンド試験結果 (エア量変化)

エア量 (Nm <sup>3</sup> /min)	リバウンド率 (%)	コンクリート/エア (Vol.%)	施工性
6	11.2	1.9	吐出状態が一定しない。ノズル先端部からノロ分が落下。表面の平坦性を欠く。
8	7.9	1.5	脈動による反動等は認められない。仕上げ面の平坦性も良好。
9.5	13	1.2	粗骨材のリバウンド量が多い。吹き付けたコンクリートはエア圧によってダレる。

#### (2) ポンプ圧送実験

コンクリート圧送時のピストンポンプ主油圧は  $25 \sim 29 \text{ N/mm}^2$  で限界圧の  $30 \text{ N/mm}^2$  に近い値であった。圧送前後におけるコンクリートのフレッシュ性状を表-7に示す。圧送後に空気量の減少が認められたものの、スランブの大きなロスは認められなかった。

#### (3) 実大模擬トンネル吹付け実験

吹付け実験に用いたコンクリートのフレッシュ性状を表-8に、経過時間毎の粉塵濃度の推移を図-5に示す。吹付け施工時の浮遊粉塵濃度は、吹付け開始から 10 分後に最大値  $3.95 \text{ mg/m}^3$  を示した。また、この時のリバウンド率は 8.0%であった。これらの値は昭和 60 年度における建設省建設技術評価制度の研究開発課題である吹付けコンクリート工法に関する発生粉塵の目標値  $5.0 \text{ mg/m}^3$ 、リバウンドの目標値 25%を十分に満足していた。

#### (4) 硬化性状試験

圧縮強度試験結果を、表-9に示す。アルカリフリー液体急結剤を使用した場合の初期強度発現性状は、セメント鉱物系の粉体急結剤を用いた場合と同等の強度発現性状を示した。また、液体急結剤

表-7 圧送前後のフレッシュ性状試験結果

項目	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
圧送前	13.1	4.9	23
圧送後(筒先)	12.5	3.1	24

表-8 フレッシュ性状試験結果

スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
10.0	5.8	14.0

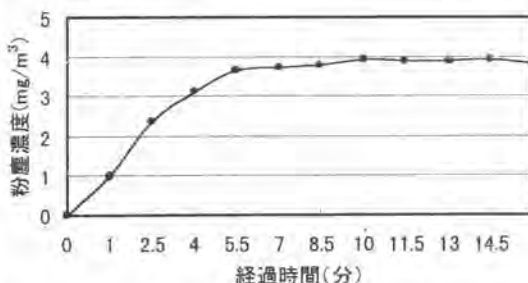


図-5 粉塵濃度と経過時間の関係

表-9 圧縮強度試験結果

急結剤添加量 (C×%)	初期強度(N/mm <sup>2</sup> )		中長期強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	3時間	6時間	1週	4週	13週
6%	1	2.3	22.5	31.3	33.7
8%	2	3	25.7	30.7	35.1
10%	2.4	5.4	21.7	31.6	34.7
7%(粉体)	1.7	3.5	24.3	40.2	40.3
0%	—	—	26.7	41.8	44.2

を使用した場合、急結剤の使用量が中長期強度に及ぼす影響は、初期強度発現性状と比較すると小さく、材齢 28 日強度では急結剤の使用量にかかわらずほぼ同等の圧縮強度となっていた。ベースコンクリートの強度と比較すると約 80%程度であり、通常の吹付けコンクリートの強度低下割合と同等程度であった。

#### 4. 施工事例

##### 4.1 工事概要

中部電力名北東洞道新設工事において、小断面シールドトンネルの鋼製セグメント使用区間の耐久性を確保するため、本システムを用いた吹付けコンクリートによる二次覆工が適用された。

小断面シールドトンネルの発進・到達立坑および曲線部には鋼製セグメントが使用されることが多く、従来は型枠支保工を用いてコンクリートを打設する二次覆工方法が適用されるが、工期および工費の面で負担が大きかった。そこで、型枠支保工が不要で連続的な施工が可能となる吹付けコンクリートを用いて二次覆工を施工する合理化施工について検討を行い、実施に至ったものである。工事平面図を図-6に示す。吹付けコンクリートの施工区間は R=20~100m の曲線区間と発進・到達立坑部の計 182m で、総延長 533m の約 1/3 にあたる。施工区間中央部の 100R 部分は、両立坑から最も遠く、到達立坑上に設置したコンクリートポンプからの配管（4B 管）は最長で約 280m に及ぶ。トンネル断面は、仕上がり内径が  $\phi 3000\text{mm}$  で、 $\phi 2.6 \times \#100\text{mm}$  のラス網を設置後、 $t=200\text{mm}$  のコンクリート吹付けを行うものである。このような施工条件のなか、適用される吹付けシステムには以下のような条件を満足する必要があった。

- ① 300m以上の長距離圧送が可能。
- ② リバウンド量が 10%以下。
- ③ 吹付け能力が  $5\text{m}^3/\text{hr}$  以上。
- ④ 少ない粉塵量、安全な作業環境。
- ⑤ 高耐久性な吹付けコンクリート。

上記条件を満足する吹付けシステムとして、本システムを採用し、約  $300\text{m}^3$  の吹付けコンクリートを施工した。

##### 4.2 使用材料

吹付けコンクリートの使用材料を表-10に、ベースコンクリートの配合を表-11に示す。

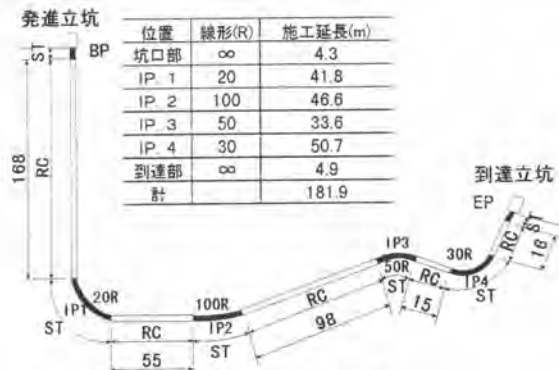


図-6 工事平面図

表-10 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.15
細骨材	笠原産山砂、表乾比重 2.56、粗粒率 2.80
粗骨材	小野田産碎石、表乾比重 2.61、Gmax 10mm
高性能減水剤	主成分：ポリカルボキシレート誘導体、比重 1.03~1.07
液体急結剤	主成分：水溶性アルミニウム塩、比重 1.44、pH 2.5~3
粉塵低減剤	主成分：水溶性シリカペースト

表-11 ベースコンクリートの配合

スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )				高性能減水剤 (C×%)	粉塵低減剤 (C×%)
				W	C	S	G		
10±2	4.5±1.5	47.5	55	190	400	899	749	0.6	0.1

#### 4.3 施工実績

##### (1) リバウンド

幅1m区間における跳ね返ったコンクリートの重量を計量して設計数量(3740kg/m)からリバウンド率を算出した結果を表-12に示す。なお、急結剤使用量は、C×7~10%で施工を行い、全体使用量から逆算すると平均8.9%の使用量であった。

##### (2) 浮遊粉塵濃度

ピエゾバランス粉塵計を用いて、吹付け位置から5m離れ、高さ1.5m位置で、施工中6区間において測定を行った結果の平均が0.4mg/m<sup>3</sup>であった。なお、施工中は、65m<sup>3</sup>/minの送風機(φ300mm風管)による強制送風+自然換気の条件であった。

##### (3) コンクリート強度

吹付けコンクリートの強度試験結果を表-13に示す。材齢28日強度は、25.0~34.9N/mm<sup>2</sup>とバラツキが大きかった。これは、途中から粘性が高く圧送抵抗が高くなる粉塵低減剤の使用を中止したため、水セメント比が小さくなり強度が増加したためと思われる。全区間平均では29.5N/mm<sup>2</sup>となり、設計強度の21N/mm<sup>2</sup>を満足する結果であった。また、標準養生を行ったベースコンクリートの強度と比較すると77~80%の強度発現状況であった。

表-12 リバウンド実績

吹付け区間	リバウンド量(kg/m)	リバウンド率(%)
E.P.	220	5.6
30R	150	3.9
50R	180	4.6
100R	120	3.1
20R	210	5.3
B.P.	175	4.5
平均	176	4.5

表-13 コンクリート強度実績

吹付け位置	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )					強度低下率
	3時間	6時間	7日	28日	ベースコン28日	
E.P.	2.19	3.78	—	31.7	38.7	0.82
30R	1.44	3.1	—	34.9	41.1	0.85
50R	1.14	2.29	19.6	25	—	—
100R	2.09	2.97	17.9	26.9	—	—
20R	1.21	2.97	—	33.7	43.6	0.77
B.P.	1.63	2.78	14	25	—	—
平均	1.62	2.98	17.2	29.5	41.1	—

#### 5. まとめ

今回の施工実験および実施工から、本吹付けコンクリートシステムを用いることにより、リバウンド量と発生粉塵量を大幅に低減できることが確認できた。施工実験、実施工とも7m<sup>3</sup>/hr程度の吹付け速度でノズルマンの手吹きにより実施したものであるが、機械設備スペックには15m<sup>3</sup>/hr以上の吹付け速度で施工が可能であると記載されており、吹付けロボットを使用し、ノズルホース径やエア量の調整等を行えば、15m<sup>3</sup>/hr以上の高速吹付けも可能であると考えられる。

今後の課題として、今回使用したアルカリフリー液体急結剤は、吹付けコンクリートの高品質化、リバウンド・発生粉塵の低減化の面で有効となることが確認されたが、吹付け直後の急結性は若干劣るので、湧水箇所への対応策等について検討を要する。また、吹付けコンクリート分野への高強度化についても検討を行っていく必要があると思われる。