

報告 高性能吹付けコンクリートシステムを用いた施工実験

酒井芳文*1・木村正孝*2・藤村満夫*3・牛島 栄*4

要旨：国内では未だ導入実績のない高効率・低粉塵型の高性能吹付けコンクリート機械と、新たに開発されたアルカリフリーの液体急結剤を用いた吹付けコンクリートシステムにより、吹付けコンクリートの施工実験を行った。その結果、リバウンド率が10%以下となる効率的な吹付け施工が可能となること、水平換算距離で300m以上の長距離圧送が可能となること、実大規模の模擬トンネル内の吹付け施工時で浮遊粉塵濃度が約4 mg/m³と少なく、作業環境が改善されること等がわかった。また、吹付けコンクリートの硬化性状も従来の粉体急結剤を用いた場合と比較して遜色のないことがわかった。

キーワード：吹付けコンクリート、アルカリフリー急結剤、リバウンド、粉塵濃度

1. はじめに

我が国における吹付けコンクリート工法は、NATMの普及に伴い進歩を遂げ、施工の自動化、省力化が図られてきている。しかし、従来の吹付けコンクリートシステムを用いて粉体急結剤を使用した場合は、リバウンド量、発生粉塵量が多くなるため、その作業環境は劣悪となる場合も多く、高効率・低粉塵型の吹付けコンクリート工法の開発が各方面で進められている[1]。また、粉体急結剤は定量供給性に課題を有しており、多量添加された場合は、吹付け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[2]。そこで、今回新たに開発導入した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、リバウンド量と発生粉塵量の低減効果およびコンクリートの長距離ポンプ圧送性等を確認するための施工実験を行った。その他、吹き付けられたコンクリートの硬化性状についても検討を行ったので、その結果について以下に述べる。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に用いた使用材料を表-1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

表-1 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, G _{max} 10mm
高性能減水剤	主成分：ポリアクリル酸エステル誘導体, 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：水溶性シリコーンオイル

れたアルカリフリーの液体急結剤と比較用に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-2に示す。

*1 (株)青木建設 研究所 材料研究室 主任研究員 (正会員)

*2 中部電力(株) 名古屋支店 工務部 土木課 副長

*3 中部電力(株) 名古屋支店 工務部 土木課 主任

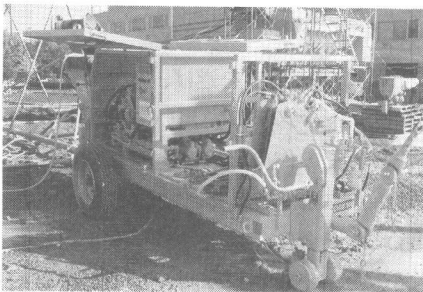
*4 (株)青木建設 研究所 材料研究室室長、工博 (正会員)

表－２ ベースコンクリートの配合

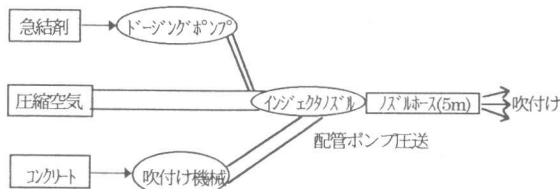
スラフ° (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				高性能減水剤 (C×%)	粉塵低減剤 (C×%)
				W	C	S	G		
12	4.0	46.3	65	185	400	1082	613	0.6	0.1

２．２ 吹付けシステム

実験に用いたコンクリート吹付け機械を写真－１に、機械仕様を表－３に示す。吹付けシステムの系統は図－１に示すように、ポンプ圧送されたコンクリートと液体急結剤がインジェクタノズル部分とノズルホース（５ｍ）内で圧縮空気により均一に混練・圧送され吹き付けられる。インジェクタノズル（図－２）内において、ポンプ圧送されてきたコンクリートは、圧縮空気（急結剤が霧状に混入）により分断され、渦流により急結剤と均一に練り混ぜられることに特徴を有する。なお、コンクリートポンプのピストンの動きに連動したドージングポンプにより、液体急結剤が定量的に供給されるシステムとなっているため、コンクリート圧送量が変化しても急結剤添加量はコンクリート量に対して一定割合となるような機構となっている。



写真－１ 使用吹付け機械



図－１ 吹付けシステム系統図

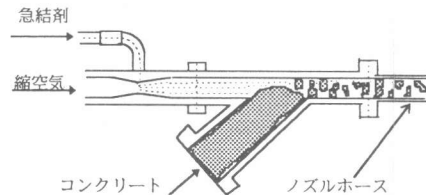
２．３ 実験方法

２．３．１ リバウンド試験

圧縮空気の消費量（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。吹付け時のコンクリート圧送量は 7m³/hr、ノズルと吹付け面の距離は約 120cm とした。エア量は、

表－３ 吹付け機械仕様

項 目	仕 様
ポンプ形式	ピストンポンプ式
最大理論吐出量	33.6m³/hr
最大吐出圧力	6.5N/mm²
最大主油圧	30N/mm²
シリンダ口径	180mm
ピストンストローク	630mm



図－２ インジェクタノズル部機構

表－４ リバウンド試験水準

試験 No.	エア量 (Nm³/min)	急結剤使用量 (C×%)
1	8	5
2		6
3		7
4		10
5	6	7
6	9.5	

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。

2.3.2 施工模擬実験

(1) 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 265m (水平換算距離約 330m) の圧送実験を行い、長距離圧送の可能性を確認するとともに、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。

(2) 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、キーストンプレートと溶接金網 ($\square 100 \times \phi 5\text{mm}$) を配し、吹付け厚さ 150mm 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 4m 、長さ 3m の範囲を $7\text{m}^3/\text{hr}$ の施工速度で約 2.2m^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 5m 離れ、地上高さ 1.5m の位置にピ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。

2.3.3 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表-5 に示す試験項目について試験を実施した。なお、吹付けコンクリートの試験体は、翌日コ

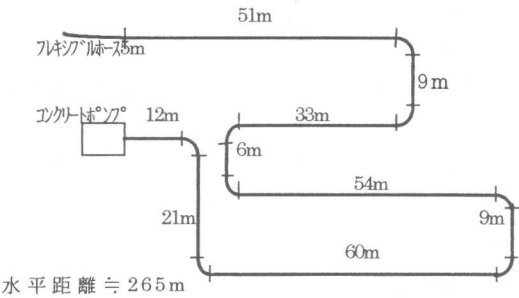


図-3 配管状況

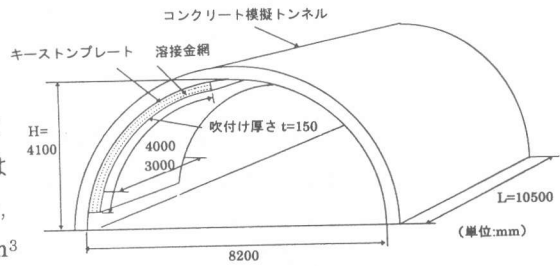


図-4 模擬トンネルの形状

表-5 硬化性状試験項目

試験項目		試験方法	備 考
ベース コンク リート	圧縮強度,単位容積質量	JIS A 1108	標準水中養生, 材齢 7,28 日, $\phi 50 \times 100\text{mm}$
	静弾性係数	土木学会規準 JSCE-G 502	標準水中養生, 材齢 28 日, $\phi 50 \times 100\text{mm}$
	自己および乾燥収縮試験	JCI 高流動コンクリートの自己収縮試験法	20℃ 気中養生、一面気中解放 100×100×400mm
吹付け コンク リート	圧縮強度 単位容積質量	初期	土木学会規準 JSCE-G 561
		中長期	JIS A 1107
			採取方法は JSCE-F 561 に準拠 標準水中養生, 材齢 7,28 日, $\phi 50 \times 100\text{mm}$
	静弾性係数	土木学会規準 JSCE-G 502	標準水中養生, 材齢 28 日, $\phi 50 \times 100\text{mm}$
	透水試験	インプット法	標準水中養生, 材齢 28 日, $\phi 100 \times 150\text{mm}$
	自己および乾燥収縮試験	JCI 高流動コンクリートの自己収縮試験法	20℃ 気中養生、一面気中解放 100×100×400mm

アを採取し、所定の養生を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 リバウンド試験結果

(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図-5、表-6 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 15 cm 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-7 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-7 リバウンド試験結果（エア量を変化）

エア量 (Nm^3/min)	リバウンド 率 (%)	コンクリート Vol. / エア Vol. (%)	施工性
6	11.2	1.9	吹付け速度が遅くなるため、コンクリートはノズル先端から弧を描いて吹き付けられていた。また、吐出状態が一定せず、ノズル先端部からノロ分の落下が顕著に認められた。締固めが不足する傾向であり、表面を平坦に仕上げるのが難しかった。
8	7.9	1.5	吹付け圧も適当で、脈動による反動等も認められなかった。仕上げ面の平坦性も他の条件に比べると良好であった。
9.5	13.0	1.2	吹付け圧が高いため、粗骨材のリバウンド量が多く、吹き付けられたコンクリートもエア圧によってつぶれるため、ダレの発生が認められた。

3. 2 施工模擬実験結果

(1) 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 N/mm^2 に近い値であった。圧送前後

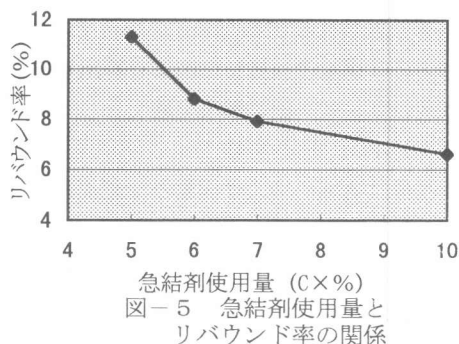


図-5 急結剤使用量と
リバウンド率の関係

表-6 リバウンド試験結果（急結剤使用量を変化）

急結剤使用量 (C x %)	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

表-8 圧送前後のフレッシュ性試験結果

項 目	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)
圧送前	13.1	4.9	23.0
圧送後（筒先）	12.5	3.1	24.0

におけるコンクリートのフレッシュ性状を表-8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。

(2) 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-9に、経過時間毎の粉塵濃度の推移を図-6に示す。吹付け施工時の浮遊粉塵濃度は、吹付け開始時より約10分経過した時点で最大値 3.95mg/m^3 を示した。なお、この時のリバウンド率は8.0%であった。

3.3 硬化性状試験

(1) 初期強度

ブルアウト試験による初期強度試験結果を図-7に示す。急結剤の使用量が増加するほど初期強度は増加する傾向を示した。また、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。

(2) 中長期圧縮強度

ベースコンクリート管理用供試体および吹付けコンクリートコア試験体による中長期圧縮強度試験結果を図-8に示す。液体急結剤使用の場合、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[3]。一方、粉体急結剤を使用した場合は、上記に示されるような強度低下は認められず、ベースコンクリートと同等の傾向を示した。

(3) 単位容積質量・静弾性係数

材齢28日の管理用供試体およびコア試験体を用いて実施した単位容積質量および静弾性係数の測定結果を表-10に示す。

吹付けコンクリートの静弾性係数はベースコンクリートの80~90%の値となり、圧縮強度試験結果との相関関係が認められた。コア試験体にジャンカ等の欠陥は認められず、良好な

表-9 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 (℃)
10.0	5.8	14.0

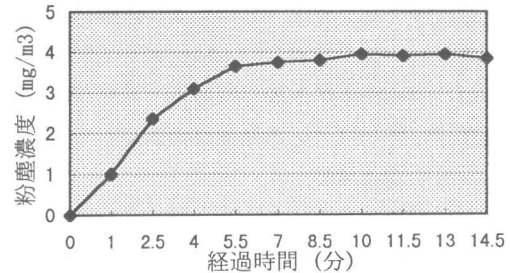


図-6 粉塵濃度と経過時間の関係

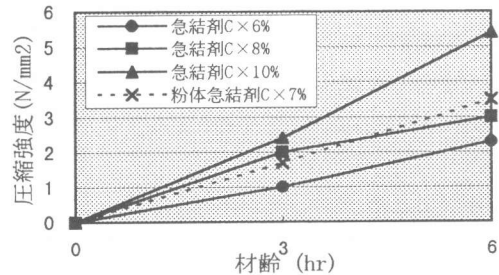


図-7 初期強度試験結果

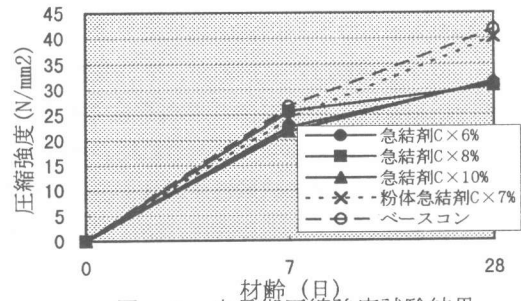


図-8 中長期圧縮強度試験結果

表-10 単位容積質量・静弾性係数測定結果

急結剤使用量 (C×%)	単位容積質量 (t/m³)	静弾性係数 (N/mm²)
0	2.29	2.33×10^4
6	2.25	2.03×10^4
8	2.24	1.93×10^4
10	2.23	2.15×10^4
7 (粉体)	2.27	2.14×10^4

充填状況であった。吹付け時に巻き込んだと思われる小さなエアが若干存在していたものの、単位容積質量はベースコンクリートと比べて大きな差異は認められなかった。

(4) 自己および乾燥収縮試験

吹付け直後より実施した自己および乾燥収縮試験の結果を図-9に示す。試験結果より、ベースコンクリートに比較して吹付けコンクリートの収縮量は多く、急結剤の使用量が多いほどその傾向は顕著であった。

(5) 透水試験

急結剤使用量を10%とした場合の吹付けコンクリートから採取したコアを用いて実施した透水試験結果を表-11に示す。

換算透水係数は 5.10×10^{-12}

cm/sec で吹付けコンクリートとしては高い水密性が得られているものと思われる。

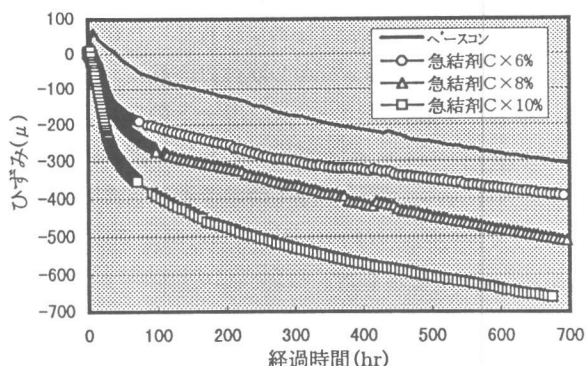


図-9 自己および乾燥収縮試験結果

表-11 透水試験結果

試料 No.	平均浸透深さ Dm(cm)	拡散係数 β_i^2 (cm ² /sec)		換算透水係数 k (cm/sec)
		(計算値)	(平均値)	
1	2.53	1.20×10^{-3}	1.09×10^{-3}	5.10×10^{-12}
2	2.21	0.92×10^{-3}		
3	2.48	1.16×10^{-3}		

※換算透水係数 $k = \beta_i^2 / E$ 、ここで、Eはヤング係数で 2.14×10^4 N/mm²

4. まとめ

以上の実験より得られた結果をまとめ以下に述べる。

- (1) 本吹付けコンクリートシステムにより、吹付け機械の搬入が困難な小断面トンネルにおいても効率の良い施工が可能となり、リバウンド率および発生粉塵量を大幅に低減できる。
- (2) アルカリフリーの液体急結剤を用いた場合、従来のセメント鉱物系粉体急結剤と同等の初期強度発現は得られるが、中長期強度はベースコンクリートおよびセメント鉱物系粉体急結剤を使用した場合の80%程度である。また、急結剤の使用量が多いほど初期強度は高くなるが、中長期強度は、急結剤の使用量により大きな差異は生じない。
- (3) 自己および乾燥収縮ひずみは、急結剤使用量が多くなるほど増加するため、ひび割れ抑制の面からは、上向き吹付け時の剥落が発生しない範囲で、急結剤の使用量をできるだけ少なくすることが望ましい。
- (4) 本吹付けシステムにより吹き付けられたコンクリートは、ジャンカ等の欠陥ができにくく、緻密で品質の高い吹付けコンクリートが得られる。

[謝辞]:本実験を行うにあたりご協力を頂いた(株)ジェー・フェック、ポゾリス物産(株)の関係各位に感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1]小林賢次、吉田博：高効率、低粉塵型の吹付けコンクリート工法の評価、建設の機械化、1986.9, pp.21-26
- [2]末永光弘ほか：耐久性に富む高強度吹付けコンクリートの施工、トンネルと地下、1991.12, pp.15-23
- [3]能町宏：最近のコンクリート用混和剤/2.9 急結剤、コンクリート工学、Vol.26, No.3, pp.85-70, 1988.3