

山岳トンネルにおける高性能大容量吹付けコンクリートシステムの開発

安藤ハザマ 正会員 ○稲田 匠吾
デンカ 串橋 巧
ニシオ T & M 嵯峨 豊
安藤ハザマ 横内 静二

1. はじめに

吹付けコンクリートは、山岳トンネル工法の主要な支保部材として、欠くことのできないものであり、低粉じん化、付着性の向上あるいは時間当りの吹付け量(以下、吐出量という)の向上などを目的として高性能化・高品質化が図られてきた。一般的には、吐出量をアップすると、はね返り率の増加により、付着量が減少し、粉じん量は増加する。また、コンクリート圧送を起因とする脈動は、仕上げにおける作業性の低下ともなる。

このような背景のもと、筆者らは、吐出量 20 m³/h 以上の大容量化とはね返り率 15 %以下の両立による施工サイクルの短縮を最大の目標とし、粉じん量や施工性の面でも既存の吹付けコンクリートと比較して遜色のない高性能大容量吹付けコンクリートシステムの実証実験を行った。

2. 開発概要

高性能大容量吹付けシステムの全体概要を図-1 に示す。

(1) 吹付けシステム

本システムでは吐出量 20 m³/h 以上を実現するために、吹付けロボットに搭載するコンクリートポンプの高性能化を図った。具体的には、圧送ピストンのストローク速度および切替速度をアップさせ、コンクリート搬送の大容量化と圧送時の脈動を抑制した。また、急結剤添加ノズル直近までポンプ圧送する構造とした。吹付けシステムに必要となる圧縮空気は、挿入位置での配管の内圧が高すぎたり、挿入量が多くなると、はね返り率が増加する傾向にあることから、「ほぐしエアー」を必要としない液体急結剤を採用した。付着面で早期の硬化は重要な要素であり、大容量化に対応する確実な混入と分散が求められるため、急結剤添加ノズルは、従来の添加ノズルよりも、脈動の影響が少ないものを採用した。

(2) ベースコンクリートの開発

大容量化とはね返り率低減の実現には、ベースコンクリートの性状・性能が重要となる。大容量化すなわち圧送量を確保するには、圧送ピストンへの確実な流入と圧送時の閉塞・脈動を起こさぬような流動性と粘性(材料分離抵抗性)が必要である。また、はね返り率の低減は、適度な粘性を付与することが効果的といわれている。本来、流動性と粘性は相反する性質であるため、スランプ試験のみで評価は難しいと判断した。そこで、配合選定におけるベースコンクリートの評価指標を、「スランプで 21 cm 程度、V ロート試験で 10 秒以内かつ連続的に閉塞することなく流下すること」とした。表-1 に使用材料の諸元を、図-2 に細骨材の粒度分布を示す。

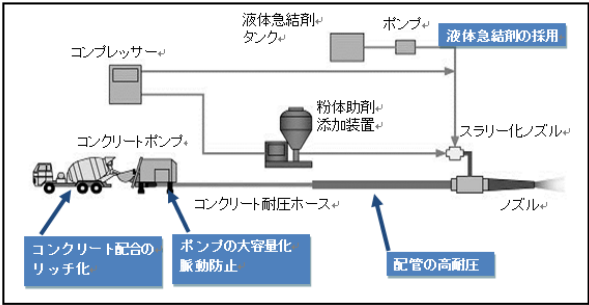


図-1 高性能吹付けシステム

表-1 使用材料

材料	種類・産地など	密度その他
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15 g/cm ³
細骨材	砕砂	2.52 g/cm ³ F.M.=3.06
粗骨材	6号砕石(S-13)	2.55 g/cm ³ F.M.=6.53
フライアッシュ	I 種	2.41 g/cm ³ 比表面積=5,250cm ² /g
急結剤	アルミニウム水溶性塩	1.25~1.50 g/cm ³
粉体助剤	カルシウムアルミネート系	2.60~3.00 g/cm ³
高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマー	1.03~1.06 g/cm ³

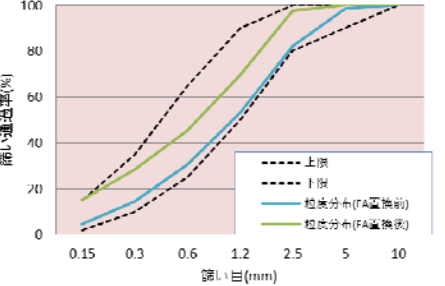


図-2 細骨材粒度分布

表-2 吹付けコンクリート配合

	呼び強度	スランプ (cm)	V ロート 試験	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)					備考
						W	C	S(内 FA 置換)	G	Ad	
現行配合	18N/mm ²	10±2	—	61	62	220	360	1045(-)	645	1.26(C×0.35%)	粉体急結剤
試験配合	18N/mm ²	21 以上	10 秒以内	50	70	225	450	1118(132)	485	3.6(C×0.8%)	液体急結剤

キーワード 吹付けコンクリート、N A T M、大容量吹付け、低粉じん、低リバウンド

連絡先 〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20 (株)安藤・間 土木事業本部 T E L 03-6234-3673

配合選定では、はね返り率が粗骨材の絶対量と相関があるといわれていることから、粗骨材の単位量を少なくすることが効果的であると判断し、細骨材率を 70 %と通常より大きい値とした。水セメント比は、液体急結剤の採用に対し圧縮強度の発現を担保するために 50 %とした。また、粘性および材料分離抵抗性は、細骨材の粒度分布で 0.3 mm 以下が 20 %程度、0.15 mm 以下が 15 %程度となるようにフライアッシュを重量で約 12 %内割置換し、単位粉体量を増加することで付与した。これに対し、流動性は、単位水量の増加と高性能減水剤の添加により確保している。表-2 に選定したベースコンクリート配合との比較として現在施工中の現場での配合を示す。

表-3 実証実験試験結果

	設定吐出量 (m^3/h)	実吐出量 (m^3/h)	吐出効率 (%)	はね返り率 (%)	時間当り付着する量 (m^3/h)	発生粉じん量 (mg/m^3)
通常吹付け	17.9	15.0	83.8	34.3	$15.0 \times 0.657 = 9.9$	2.098
新吹付け システム	22.0	21.1	95.9	9.7	$21.1 \times 0.903 = 19.1$	1.720
	25.0	23.9	95.6	-	-	-
	30.0	28.7	95.7	-	-	-

3. 実証実験

現在施工中の山岳トンネルの切羽にて、実証実験を行った。実験は、施工性を確認しながら、コンクリートポンプの吐出量を徐々に増大させ、 $22 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $25 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ の 3 種の吐出量で行った。表-3 に実証実験結果の一覧、および比較のために同現場で実施している通常吹付けコンクリートのデータを示す。



写真-1 吹付け状況

吐出量については、コンクリートポンプの設定吐出量は、ピストンの作動回数等により算出される理論吐出量であるため、実際の吐出量(以下、実吐出量という)とは差異が生じる。最初に設定した $22 \text{ m}^3/\text{h}$ の吐出量は、このような差異を考慮して、実吐出量で目標の $20 \text{ m}^3/\text{h}$ を達成するように定めたものである。吐出量を $22 \text{ m}^3/\text{h}$ に設定したときの実吐出量は $21.1 \text{ m}^3/\text{h}$ となり、目標数値をクリアした。なお、実吐出量は 1 台の生コン車に搭載したコンクリートを吹付ける時間で算出した。

また、この吐出量ではね返り率の測定を行った。はね返り率は土木学会規準(JSCE-F 563-2005)における実構造物による吹付け測定に準拠して、トンネルの天端部から側壁部に均等に吹付けを実施し単位時間あたりの吐出量とはね返り量で算出した。このときのはね返り率は 9.7 %と小さい数値であり、実際の時間当り付着量は $19.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ($=21.1 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.903$) と極めて良好な値となった。当現場で実施している通常吹付けの時間当り付着量は $9.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ($=15.0 \text{ m}^3/\text{h} \times 0.657$) であり、およそ 2 倍の速度で施工できることになる。

このときの理論吐出量に対する実吐出量の割合(以下、吐出効率という)は 95.9 %と非常に高い値であり、コンクリート配合とコンクリートポンプがうまく適合し、吹付けシステムが効果的に機能している目安になると考える。

その後、吐出量を上げて $23.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $28.7 \text{ m}^3/\text{h}$ の実吐出量での吹付けを実施した。この時のはね返り量は計測していないが、 $22 \text{ m}^3/\text{h}$ の吐出量の時と比べて、目視での差異は確認できない程度であり、十分に実用に耐えるものであると判断する。一連の試験において脈動や閉塞につながりそうな兆候は見られなかった。また、吹付け面の仕上げなど施工面で問題となるような点も認められず、通常吹付けと比べて遜色なかった。実験でノズル操作を担当した 2 名のオペレータに対して行ったヒアリングでは $28.7 \text{ m}^3/\text{h}$ の吐出量で施工しても、普段施工している通常の吹付けコンクリート(吐出量 $15.0 \text{ m}^3/\text{h}$)と操作性に遜色はなく、表面の仕上げ等を含めて全く問題なく施工できるとの回答であった。なお、粉じん量についても、吐出量向上による粉じん量増加は見られず、通常吹付けよりも小さい値となった。

4. まとめ

今回の開発および実証実験では想定以上に良好な結果が得られた。ただし、限られた期間での限られた実験であるため、コンクリートの安定供給やシステムの長期的な信頼性等については確認できていない。今後、実現場で中長期に吹付けシステムの実証実験を行い、信頼性を高めたい。