

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (21)

—— トンネル施工現場における吹付けコンクリート施工時の圧送性 ——

Properties of Shotcrete (21)

—— Pumpability of shotcrete at the tunnel construction site ——

藤 井 剛*・細 川 佳 史**・石 関 嘉 一***・西 村 次 男****・魚 本 健 人*****

Tsuyoshi FUJII, Yoshifumi HOSOKAWA, Yoshikazu ISHIZEKI, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

吹付けコンクリートは NATM において重要な支保部材の一つであり、近年、トンネルの大断面化、低粉じんといった社会的要請に対応すべく、高強度化や高品質化などを旨とした技術開発が進められている。また、これらの技術開発に伴い、吹付けコンクリートの高耐久性化によるシールド管への適用に関しても検討が進められている。

しかしながら、NATM における吹付けコンクリートの品質には、材料の不均質性や配合条件、さらには吹付け圧力、吐出量などといった各種の施工条件等、様々な要因が大きく影響を与える。そのため、吹付けコンクリートの実施工において発生する粉じん量やリバウンド、強度等にバラツキを生じさせ、吹付けコンクリートの品質評価を難しくしているのが現状である。

本報告は、トンネル実施工において吹付け実験を実施し、吹付けコンクリートの品質変動の主要因の一つである圧送性に着目して、コンクリートのフレッシュ性状や吹付け条件が及ぼす影響について報告するものである。

2. 実 験 概 要

2.1 実験場所

今回吹付け実験を実施したトンネル現場は、上信越自動車道五里ヶ峯トンネル西工事（二期線工事）であり、発破による補助ベンチ付き全断面掘削工法で施工中であった。図1に切羽付近の状況を示す。

2.2 使用材料およびコンクリート配合

今回の実験で使用した資機材は全て現場で使用していたものをを用いた。本実験に用いた吹付けコンクリートの使用

材料を表1に、配合を表2に示す。

配合は、セメント量 360 kg/m^3 （以下 C 360 と称す）と 450 kg/m^3 （以下 C 450 と称す）の2種類とした。ここで、それぞれの目標スランプは、プラントから坑内へのコンクリート搬送時間（約7分）と吹付け実験に要する時間によるスランプロスを考慮し、ポンプの吸込み効率が低下しな



図1 切羽付近の状況

表1 使用材料

材料名	仕 様
セ メ ン ト	普通ポルトランド, 密度: 3.15 g/cm^3
細 骨 材	長野県松代産陸砂, 密度: 2.59 g/cm^3 F. M. = 2.76
粗 骨 材	長野県松代産 6 号砕石 密度: 2.69 g/cm^3 , F. M. = 6.37
急 結 剤	粉体, カルシウムアルミネート系 密度: 2.57 g/cm^3
高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
空気量調整剤	消泡剤, ポリアクリンゲリコール誘導体

*株式会社大林組

**太平洋セメント株式会社

***株式会社熊谷組

****東京大学生産技術研究所 物質・生命部門

*****東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

表2 コンクリート配合

配合	粗骨材の 最大寸法 (mm)	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)				高性能減 水剤 C×%	空気量 調整材 C×%
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
C360	15	17	2.0	60.3	60.4	217	360	1007	686	0.5~1.6	0.02
C450	15	21	2.0	45.0	59.5	203	450	970	685	1.8~1.9	0.01

い範囲でのスランプとした。

2.3 吹付けコンクリート用設備

吹付けコンクリートの供給は、坑口近傍に設置されているバッチャープラントで練混ぜ、アジテータトラックにより切羽まで運搬した。ミキサは0.5 m³二軸強制練りであり、実験に必要なコンクリートはアジテータトラック1車にて運搬した。

吹付け方式は湿式吹付けであり、図2に示すようにコンプレッサー、急結剤添加装置を搭載した一体型の吹付け機を使用した。

今回使用した吹付けシステムでは、アジテータトラックによって供給されたコンクリートをポンプによって鋼管内を7.9 m圧送した後、圧送用エアによってさらにフレキシブルホース内を7.5 m混相流としてエア圧送し、ノズルの2.5 m手前のY字管で急結剤を混入してノズルから吐出させた。

2.4 吹付け条件および実験ケース

吹付け条件と実験ケースを表3に示す。実験要因として、コンクリート配合の2水準 (C360とC450)、圧送空気流量の2水準 (空気バルブの開放状態と限界までバルブを絞って圧送空気流量を低下させた状態) とし、C360では圧送空気流量の各水準を3ケースずつ実施した。なお、C450の圧送空気流量は1水準のみとした。

また、今回の実験における吹付け機の設定吐出量は16 m³/hrとした。

2.5 実験項目と方法

(1) 積算電力量

積算電力量は、図3に示すように材料投入完了からコンクリート排出までの60秒間の練混ぜ時間におけるミキサ消費電力の積分値 (ハッチング部分) として各バッチ毎に算出した。

(2) コンクリートのフレッシュ性

コンクリートのフレッシュ性状を把握するため、プラント出荷時アジテータトラックから試料を採取し、スランプと空気量を測定した。

(3) 配管内圧力

配管内圧力の測定は、図2に示したように圧送空気挿入直後の本管位置と急結剤添加直前のY字管位置、さらに

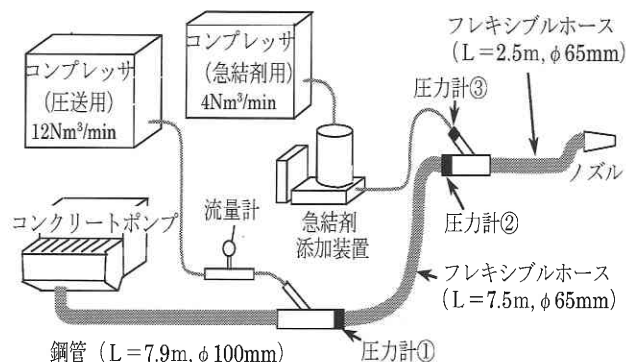


図2 吹付けシステムの概要

表3 吹付け条件と実験ケース

No.	配合	設定 急結剤 添加率 C× (%)	吹付け条件	
			吐出量 (m ³ /hr)	圧送空気バルブ
1	C360	7	16	開放
2				
3				
4				下限 (絞り)
5				
6				
7	C450	5		開放

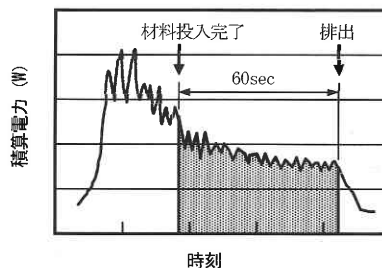


図3 積算電力量算出例

急結剤添加ホースと本管合流直前位置の3個所に、それぞれ圧力センサーを取り付け、0.05 sec 間隔でデータを採取した。

研 究 速 報

(4) 圧送空気流量

圧送空気挿入ホース部に流量計を取り付け、圧送空気流量を測定した。

(5) 吐出量

実吐出量は、実際に吹付けに使用したコンクリート量（練混ぜた量から試料採取した量とポンプ等に残った量を差し引いた量）と吹付けに要した時間により算出した。

3. 実 験 結 果

(1) フレッシュ性状

コンクリート出荷時から実験終了までのスランプの経時変化を図4に示す。図中のNo.3に示すように、現着時にスランプロスが大きくポンプ圧送が困難と判断されたコンクリートについては、実験開始前に高性能減水剤を添加し、スランプ調整を図った。

実験ケースによっては、出荷時から実験終了までほとんどスランプが変化していないものもあったが、時間経過に伴うスランプロスは、4 cm 程度が最大であった。ケース毎のスランプロスの違いに関しては、高性能減水剤の添加量や細骨材に含まれる微粒分量の相違による影響と考えられる。

(2) 積算電力量とスランプの関係

コンクリートの単位体積当たりの積算電力量とスランプの関係を図5に示す。

積算電力量とスランプの関係は相関性が高く、スランプが低下するほど、積算電力量は増加する傾向になった。また、C 450 に関してはデータ数が少ないが、C 360 と比較して C 450 のほうが同等のスランプでも積算電力量が大きくなった。さらに、スランプ低下による積算電力量への影響は C 450 のほうが大きい傾向にある。この理由としては、C 450 のほうが C 360 に対して粉体量が多く粘性が増加したことによって、練混ぜ時のミキサへの負荷が大きくなった影響であると考えられる。

3.2 圧送性に影響を及ぼす要因

ここでは、ケース数の多い C 360 に着目して整理した。

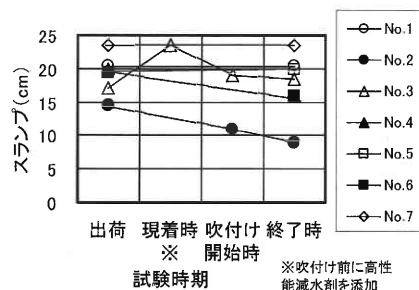


図4 スランプの経時変化

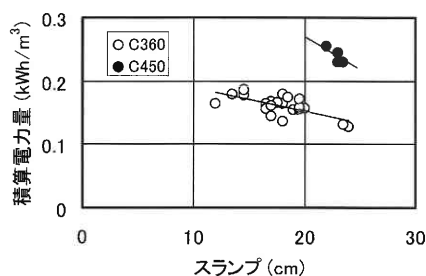


図5 積算電力量とスランプの関係

(1) 配管内圧力

図6に圧送空気流量を変化させたことによる配管内平均圧力の変化を示す。圧送空気流量の開放・下限はそれぞれ3ケースのデータの平均値としてプロットした。ノズル先端に近いY管部の方が配管内圧力が小さいことがわかる。また、圧送空気流量の圧力損失に対する影響は比較的小さいが、空気バルブを絞った場合のほうが圧送空気挿入部で圧力が若干大きくなり、圧力損失も大きい結果となった。1 m 当たりの圧力損失は 0.02 ~ 0.03 MPa/m 程度であった。

(2) 圧力変動

圧力変動の指標として各測点における配管内圧力の変動係数を算定した。図7、図8に圧力変動係数と吐出量および圧送空気流量の関係をそれぞれ示す。これによると、圧送空気挿入部よりノズル先端に近いY管部での管内圧力の変動係数が大きくなり、これまでの報告¹⁾と同様に、この位置での圧力変動が圧送の安定性に大きく影響していることがわかる。吐出量の圧力変動に及ぼす影響は、今回の実験では明確に得られなかったが、同一の吐出量でも圧力変動にバラツキがあり、特に圧送の安定性を左右するY管部のバラツキが大きくなった。

一方、圧送空気流量の圧力変動に及ぼす影響をみると、開放時において大きい変動係数を示した1ケースを除けば、圧送空気流量が大きいほど圧力変動が小さい傾向にある。よって、圧送の安定性を確保するためには、あるレベル以上の圧送空気流量の確保が必要であり、既報²⁾と同様な結果となった。開放時において大きい変動係数を示したケースは、他のケースと比較してスランプが小さいケースであり、この影響を受けて圧力変動が大きくなったものと推定される。

次に、吹付け開始時のスランプとY管部の圧力変動係数の関係を図9に示す。吹付け開始時にスランプ測定していないケースについては、出荷時のスランプを用いて整理した。

今回の実験ではケース数が少なかったこともあるが、スランプの圧力変動に及ぼす影響については、エア開放時に

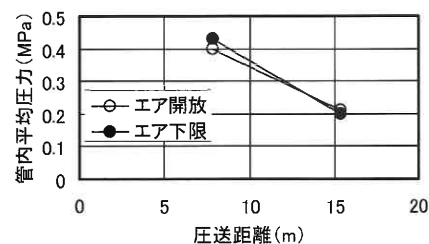


図6 配管内圧力の変化

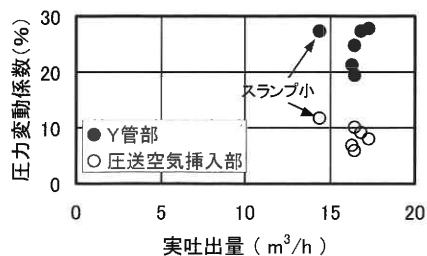


図7 実吐出量と圧力変動係数

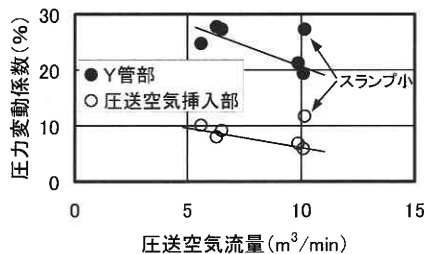


図8 圧送空気流量と圧力変動係数

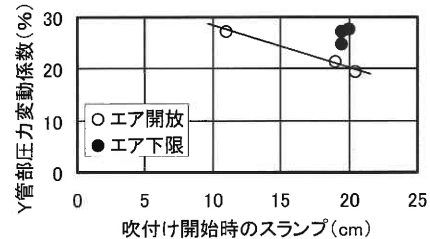


図9 スランプと圧力変動係数の関係

においてスランプが大きくなると圧力変動が小さくなる傾向になった。ここで、図5からスランプが大きくなると積算電力量が小さくなるという知見を得ていることを加味すると、圧力変動を小さくし圧送の安定性を確保するためには積算電力量を小さくしたほうがよいという見方ができる。

しかしながら、既報³⁾において、“スランプはいずれの配合でも練混ぜ時間とともに増大し、最大値に達した後に減少する。そして、これが最大となる時間で練り混ぜることがコンクリートの品質管理上有利な条件となり、その管理指標として積算電力量が有用である”との報告がされている。このことから、ある配合においてスランプが最大となる積算電力量で練り混ぜることが、圧送の安定性を確保する一つの方法になり得るものと考えられる。つまり、この積算電力量を管理することが、圧送性を管理する一つの手法となる可能性があることがわかった。ただし、積算電力量を使用した具体的な管理方法や高性能減水剤を添加することによるスランプと積算電力量への影響については今後の課題としたい。

4. ま と め

- (1) コンクリートのスランプは、ミキサの積算電力量と高い相関関係にあり、スランプが大きいかほど積算電力量は小さくなる。また、粘性が高い高強度コンクリートほど一般強度と同程度のスランプ積算電力量は大きくなる。
- (2) 同一の吐出量でも圧力変動にバラツキがあり、特に圧送距離の長いY管部のバラツキが大きくなった。
- (3) 配管内の圧力はノズル先端に近いほど小さくなり、1 m当たりの管内圧力損失は0.02～0.03 MPa/m程度であった。また、圧送空気流量が少ないほど圧力損失は大きい傾向にあった。
- (4) 圧送の安定性は、ノズルに近い圧送距離の長い急結剤添加手前の位置の圧力変動で評価できる。また、この圧力変動は圧送空気流量の影響を受け、圧送空気流量

が大きいほど圧力変動は小さくなる傾向になった。

- (5) 吐出量の安定性、圧送の安定性を確保するためには、あるレベル以上の圧送空気流量の確保が必要である。
- (6) スランプの圧力変動に及ぼす影響については、圧力変動が小さくなる圧送空気流量が大きい場合において、スランプが大きくなると圧力変動が小さくなる傾向になった。
- (7) ある配合においてスランプが最大となる積算電力量で練り混ぜることが、圧送の安定性を確保する一つの方法になり得るものと考えられる。この積算電力量を管理することが、圧送性を管理する一つの手法となる可能性があることがわかった。

謝 辞

今回、現場での吹付け実験を実施するにあたり、ご理解とご協力をいただきました日本道路公団東京建設局 佐久工事事務所ならびに前田建設工業・本間組共同企業体 五里ヶ峯トンネル西工事作業所の皆様には、深く御礼申し上げます。

また、本研究は、東京大学生産技術研究所における「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究による成果であり、共同研究員、協力会社ならびに実験にご協力いただきました皆様に深く感謝の意を表します。

(2002年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 石関嘉一ほか、吹付けコンクリートの高品質化技術の開発、コンクリート工学, Vol. 21, No. 10, 2001. 10
- 2) 杉山律ほか、吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, pp. 1357-1362, 1999. 6
- 3) 魚本健人ほか、新しいコンクリートの製造管理システムに関する研究、東京大学生産技術研究所報告, 第39巻, 第1号, 1997. 3