

報告 吹付けコンクリートの圧送性に関する研究

藤井 剛^{*1}, 清水哲史^{*2}, 伊藤正憲^{*3}, 魚本健人^{*4}

要旨：吹付けコンクリートの圧送性を管理するための方法を見出すため、コンクリートの練混ぜから吹付けコンクリートの圧送までの各種実験データに基づき、吹付けコンクリートの圧送性に影響を及ぼす要因を分析した。その結果、フレッシュ性状と積算電力の関係、圧送空気流量やスランプと管内圧力との関係等が明らかになった。

キーワード：吹付けコンクリート, 積算電力量, フレッシュ性状, 圧送性, 圧力変動

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、低粉じん化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目指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ングルシェル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。

このような現状を踏まえ、筆者らは吹付けコンクリートの高品質化を目指して東京大学と民間17社の共同研究を進めており、これまでに模擬トンネルでの吹付け実験を実施して、吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響について様々な観点から検討した結果を報告している¹⁾。

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）である。トンネル掘削は発破による補助ベンチ付き全断面掘削工法であり、全体的に良質な岩質であった。実験区間の支保パターンはCであり、吹付け厚は100mmであった。

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

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:3.15g/cm ³
細骨材	長野県松代産陸砂, 密度:2.59g/cm ³ F.M.=2.76
粗骨材	長野県松代産6号砕石 密度:2.69g/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:2.57g/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, ポリアルケンリコール誘導体

*1 (株)大林組 土木技術本部 技術第二部 課長代理 工修(正会員)

*2 (株)エヌエムビー 中央研究所 開発第二グループ 主任研究員(正会員)

*3 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 研究員 工修(正会員)

*4 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 教授 工博(正会員)

表 - 2 コンクリート配合

配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ目標範囲 (cm)	空気量目標範囲 (%)	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 ± 2.5	2.0 ± 1.0	60.3	60.4	217	360	1007	686	0.5 ~ 1.6	0.02
C450	15	21 ± 1.5	2.0 ± 1.0	45.0	59.5	203	450	970	685	1.8 ~ 1.9	0.01

用していたものを用いた。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 360kg/m³ (以下 C360 と称す) と 450kg/m³ (以下 C450 と称す) の 2 種類とした。ここで、それぞれの目標スランブは、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ブロスを考慮し、ポンプの吸込み効率が低下しない範囲でのスランブとした。

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 0.5m³ 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 - 1 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 7.9m 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 7.5m 混相流としてエア圧送し、ノズルの 2.5m 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

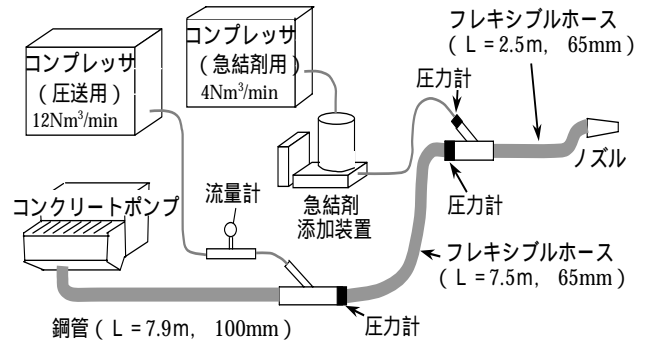


図 - 1 吹付けシステムの概要

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	
			目標吐出量 (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

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 1 水準につき 3 回実施した。なお、C450 の圧送空気流量は 1 水準 1 回のみとした。また、今回の実験における吹付け機の目標吐出量は 16m³/hr とした。

2.5 実験項目と方法

実験項目は、フレッシュ性状、施工性、強度特性に関する項目を実施した。ここでは、フレッシュ性状と施工性に関して以下にまとめた。

(1) 積算電力量

積算電力量は、図 - 2 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状

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 - 1 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、0.05sec 間隔でデータを採取した。

(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

実験結果の一覧を表 - 4 に示す。

3.1 フレッシュ性状

(1) スランプと空気量の経時変化

コンクリート出荷時から実験終了までのスランプ、空気量の経時変化をそれぞれ図 - 3、図

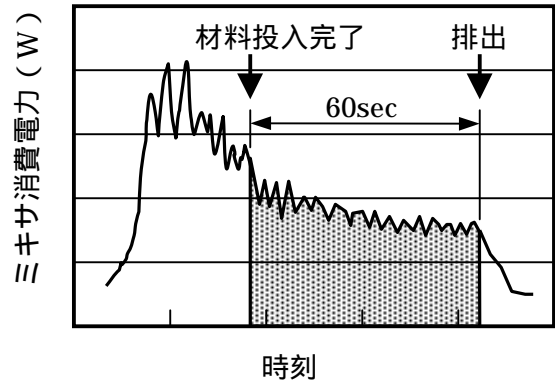


図 - 2 積算電力量算出例

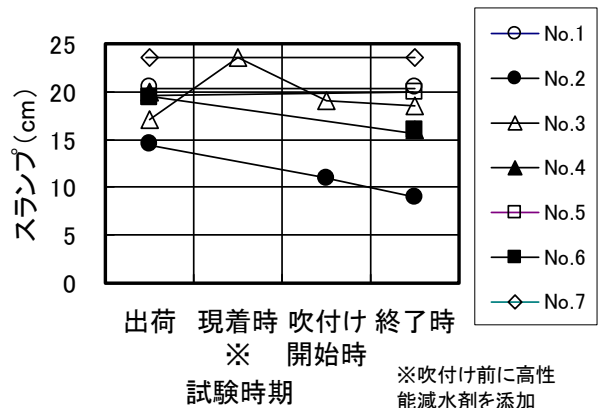


図 - 3 スランプの経時変化

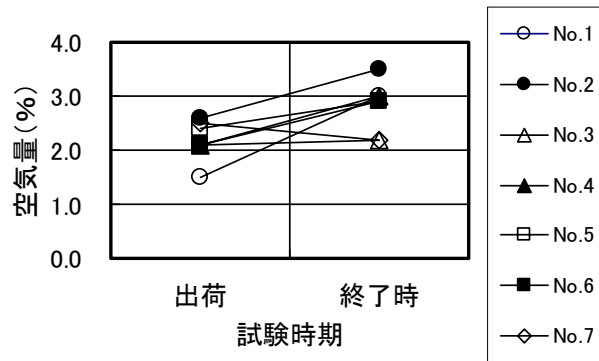


図 - 4 空気量の経時変化

表 - 4 実験結果一覧

No	スランプ (cm)			空気量 (%)		積算電力量 (kWh/m ³)	平均配管圧力 (Mpa)		圧力変動係数 (%)		平均圧送空気流量 (m ³ /min)	実吐出量 (m ³ /h)
	出荷時	吹付け開始時	終了時	出荷時	終了時		挿入部	Y 管部	挿入部	Y 管部		
1	20.5	-	20.5	1.5	3.0	-	0.42	0.22	5.92	19.30	10.16	16.51
2	14.5	11.0	9.0	2.6	3.5	0.178	0.33	0.18	11.58	27.18	10.17	14.46
3	17.0	19.0	18.5	2.1	2.2	0.162	0.46	0.23	6.84	21.22	9.90	16.33
4	20.0	-	16.0	2.1	3.0	0.157	0.49	0.20	7.95	27.58	6.28	17.35
5	19.5	-	20.0	2.4	2.9	0.172	0.38	0.18	9.06	27.11	6.52	16.90
6	19.5	-	16.0	2.1	2.9	0.158	0.42	0.21	9.89	24.57	5.63	16.50
7	23.5	-	23.5	2.5	2.2	0.230	0.35	0.22	7.87	24.39	10.51	16.01

- 4に示す。なお、図 - 3中の No.3 は、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ため、実験開始前に高性能減水剤を添加しスランプ調整を行い、また No.2 は、吹付け実験途中でスランプ調整（調整後スランプ 21.0cm であった）を行った。

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、吹付け開始前後にスランプ調整を行ったケースを除くと、時間経過に伴うスランプロスは最大で 4cm 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違いによる影響と考えられる。

一方、空気量の経時変化を見ると、終了時において 1 ケースのみ空気量が 3.5% になったが、ほぼ目標範囲を満足した。

(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認められ、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、C450 に関してはデータ数が少ないが、C360 と比較して同等スランプを得るためにはより多い積算電力量が必要となるものと判断される。この理由としては、C450 のほうが C360 に対して粉体量を増加させ水セメント比を低下させたために、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ものと考えられる。

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 C360 に着目して整理した。

(1) 吐出量と圧送空気流量

圧送空気流量と実吐出量の関係を図 - 6 に示す。これによると、今回の圧送空気流量の範囲内では圧送空気流量が少ない場合でも、吐出量にはあまり影響を及ぼさないという結果となった。今回の実験では、先に述べたように吐出状

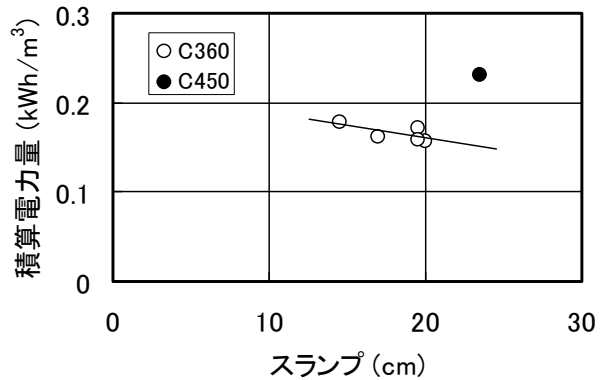


図 - 5 積算電力量とスランプの関係

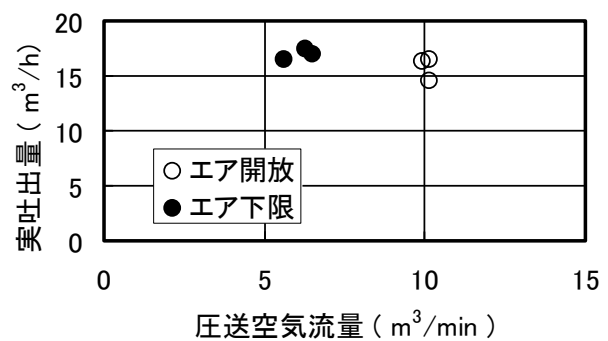


図 - 6 圧送空気流量と実吐出量の関係

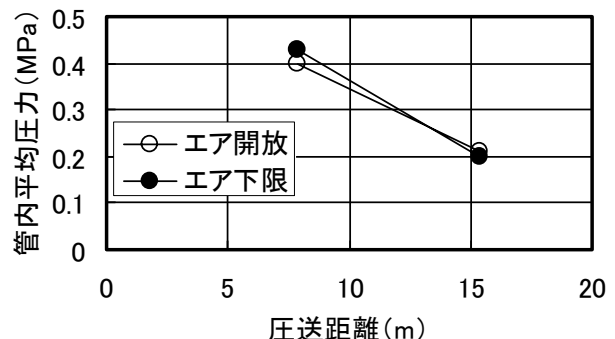


図 - 7 配管内圧力の変化

態を確認しながら圧送空気流量を低下させ、不安定状態になる手前を下限としている。したがって、圧送空気流量をあるレベル以上確保すれば吐出量は比較的安定するものと考えられる。

(2) 配管内圧力

図 - 7 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 回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

(急結剤添加位置)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。1m 当たりの圧力損失は 0.02 ~ 0.03MPa/m 程度であった。

(3) 圧力変動

図 - 8、図 - 9 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。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。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²⁾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見てみると、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³⁾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 - 10 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

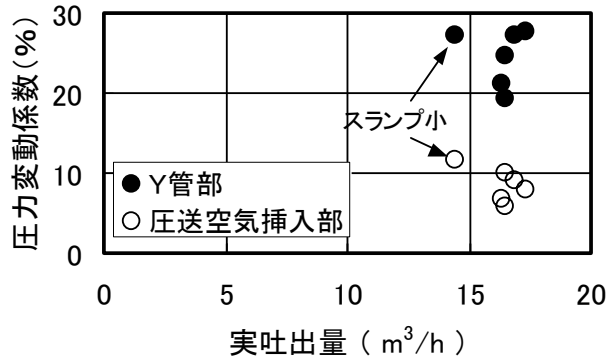


図 - 8 実吐出量と圧力変動係数

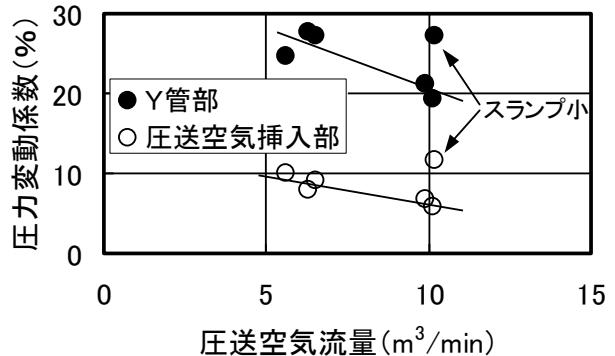


図 - 9 圧送空気流量と圧力変動係数

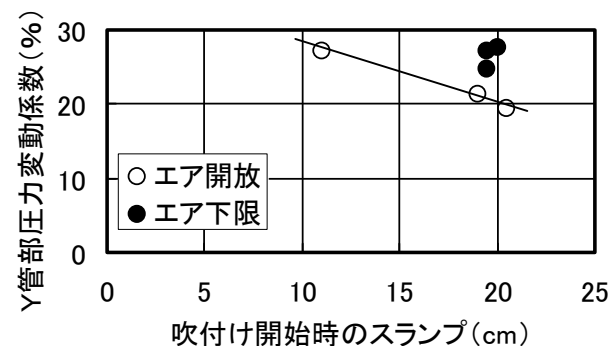


図 - 10 スランプと圧力変動係数の関係

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⁴⁾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

今回の現場実験から，フレッシュ性状と圧送性に関して以下のことが確認できた。

- (1)コンクリートのスランプは，ミキサの積算電力量と相関関係にあり，スランプが大きいほど積算電力量は小さくなる傾向となった。
- (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(急結剤添加位置)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，1m当たりの管内圧力損失は0.02～0.03MPa/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

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，東京大学生産研究所技官 西村次男氏をはじめ，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。

参考文献

- 1) 安藤慎一郎ほか：吹付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹付け条件の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1351 - 1356，1999.6
- 2) 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.39，No.10，pp.25 - 33，2001.10
- 3) 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，No.2，pp.1357 - 1362，1999.6
- 4) 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，Vol.39，No.1，1997.3