

論文 圧送方式が吹付けコンクリートの諸性状に及ぼす影響

赤坂雄司^{*1}, 杉山 律^{*2}, 田湯正孝^{*3}, 魚本健人^{*4}

要旨:吹付けコンクリートの圧送方式には、ポンプ圧送と空気圧送の2方式がある。これらの代表機種として、ピストンポンプ式とロータリー空気圧送式の吹付け機を用いた吹付け実験を実施し、吹付けコンクリートの諸性状や管内圧力特性について検討した。

その結果、管内圧力の変動は、ポンプ圧送方式の方が空気圧送方式よりも小さく、コンクリートは比較的連続した一定の圧力で吐出されていることが確認された。しかし、いずれの圧送方式とも、圧縮空気を用いてコンクリートをノズルから高速で吐出する施工法であり、吹付けコンクリートの圧縮強度などの諸性状に、有意な差は認められなかった。

キーワード:吹付けコンクリート、圧送方式、ポンプ圧送、空気圧送、管内圧力

1.はじめに

吹付けコンクリートは、トンネルの主要な支保部材であり、施工機械には、ポンプ圧送方式と空気圧送方式の2種類の方式がある¹⁾。どの機械を用いて施工するかは、施工条件や技術者の判断に任せられている。

筆者らは吹付けコンクリートの高品質化を目指した共同研究を進めており、これまでにも、吹付け性状におよぼす吹付け条件の影響等について、報告している²⁾。この中では、ポンプ圧送、空気圧送の両圧送方式の管内圧力特性などを比較検討しているが、諸物性の違いなどは明確にはならなかった。本研究は、吹付け機の圧送方式の違いによって生じる、圧送前後のフレッシュ性状、管内圧力特性、硬化後の物性について比較検討し、それらの差異を明確にしたものである。

2.圧送方式の比較

ポンプ圧送、空気圧送それぞれの吹付け方式の代表として、ピストンポンプ式とロータ

リ空気圧送方式の吹付け機を用いて比較実験を実施した。それぞれの吹付け機の構造と、コンクリート圧送の模式図を図-1～図-4に示す。

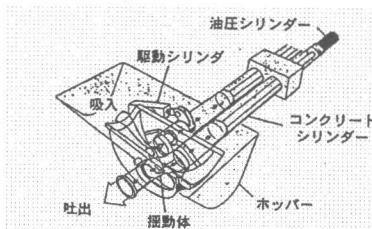


図-1 ピストン式のコンクリートポンプ²⁾

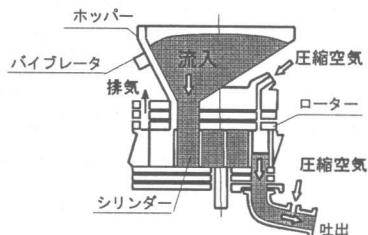


図-2 ロータリーエアコンクリートポンプ²⁾

各々の方式によるコンクリートの圧送状態は次のように推察できる。

*1前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 (正会員)

*2(株)間組 本店土木本部 技術設計部 (正会員)

*3(株)大林組 土木技術本部 技術第二部

*4東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

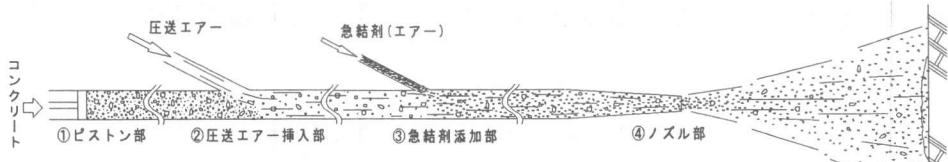


図-3 ポンプ圧送方式のコンクリート圧送の模式図

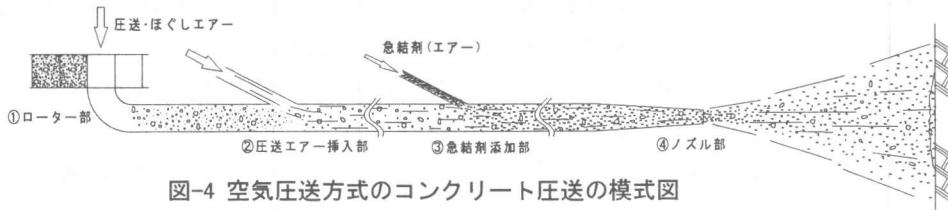


図-4 空気圧送方式のコンクリート圧送の模式図

ポンプ圧送方式では、ピストンで押されて配管内を充実圧送されたコンクリートが、②の部分で挿入エアーによってほぐされると同時に高速で射出され、固体粒子と空気との混相流³⁾の状態で搬送され、③のノズル手前で急結剤がエアとともに混入されて、壁面に吹付けられる。

一方、空気圧送方式では、コンクリートはローター部の隔壁で仕切られたシリンダーに流下し、ローターが回転してエアー圧送部に来た時に吐出され(①)、固体粒子と空気との混相流となり、フレキシブルホース内を高速で圧送され、ノズル手前(③)で急結剤がエアとともに混入されて射出される。この、圧縮空気によってコンクリートがノズルから高速で吐出するのは、両者とも同じであるが、コンクリートが連続して順次射出されるポンプ圧送式に比較して、空気圧送式ではシリンダーに入ったコンクリートがほぐされ、断続的に、ひとかたまりとなってホース内を圧送される。のことと、圧縮空気で圧送される距離の違いが、ポンプ圧送と空気圧送との主な違いである。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの配合および使用材料

使用材料および実験に用いた吹付けコンクリートの配合を、表-1、表-2に示す。

使用したセメントは、普通ポルトランドセメ

ント、細骨材は山砂、粗骨材は碎石であり、急結剤は、カルシウムアルミニネート系の粉体のものを、セメントに対して所定の質量比率で混入した。

また、コンクリートの配合は、セメント量360 kg/m³(以後C360と称す)と450kg/m³(以後C450と称す)の2配合とした。

なお、コンクリートは試験用の生コンプレンツで製造し、運搬時間は20~30分であった。

表-1 使用材料

仕 様	
セメント	普通ポルトランド、密度:3.16g/cm ³
細骨材	君津産山砂、密度:2.59~2.62g/cm ³ , F.M.=2.60
粗骨材	秩父産碎石、密度:2.68~2.69g/cm ³ , F.M.=6.24
急結剤	カルシウムアルミニネート系、密度:2.70g/cm ³

表-2 コンクリートの配合

	骨材最大寸法 Gmax (mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
C360	空気圧送	15	12	2.0	63.9	60.0	230	360	988 684
	ポンプ圧送	15	12	2.0	56.7	59.7	204	360	1027 718
C450		15	21	2.0	45.6	58.2	205	450	964 708

3.2 吹付け設備および吹付け方法

吹付け方式は湿式方式のみとし、ポンプ圧送方式では図-5に示す配管・システム、空気圧送方式では図-6に示すものとした。なお、ノズルの固定は、遠隔操作が可能なクローラ搭載型マニュピレータ(通称吹付けロボット)を用い、配管長や使用資機材などを、実際の施工現場に近い形のものとした。

また、主な吹付け設備を表-3に示す。

ポンプ圧送方式では、ポンプによって鋼管内を6m、フレキシブルホース内を10m圧送した後、圧縮空気によってさらにフレキシブルホース内を10m圧送し、ノズル手前でY字管を用いて急結剤を混入してノズルから吐出させた。

一方、空気圧送方式の場合は、急結剤を混入するY字管手前までフレキシブルホース内を20m圧縮空気で圧送し、Y字管で急結剤を混入してノズルから吐出させた。

3.3 吹付け条件および実験ケース

それぞれのケースの主な吹付け条件を表-4に示す。なお、吹付け条件のうち、圧送エアーアー圧力の設定は、ノズル先端から吹付け面までの離れが最適である1.5m⁴⁾の時に、コンクリートの付着状態が最良となるように、事前に実施した予備吹付けによって決定した。

実験要因としては、吹付け方式の2水準(ポンプ圧送式、空気圧送式)とコンクリートの配合2水準(C360とC450)とし、この組み合わせの4ケースについて実験を実施した。

3.4 実験項目および実験方法

(1) 圧送前後のフレッシュ性状

試料は、吹付け前にアジテータトラックから採取した現地到着時(以後「現着」と称す)、および各ケースで急結剤を添加せずにコンクリートを容器に吹付け、容器より採取したコンクリート(以後「筒先」と称す)の2種類とした。

(2) 管内圧力

図-6および図-7に示す各位置で、管内圧力を

0.05secの間隔で測定した。

(3) 硬化コンクリートの品質

硬化コンクリートの品質としては圧縮強度に着目し、圧送方式の違いが硬化コンクリートに及ぼす影響について検討した。供試体は、吹付けコンクリートおよび筒先の2種類とした。なお、吹付けコンクリートは、JSCE-F561「吹付けコンクリートの圧縮強度用供試体の作り方」に準拠し、パネル型枠(60×60×25cm)に吹付けたコンクリートよりφ75mmのコアを採取した。また、「筒先」については、φ100×200mmの型枠に直接打設して供試体を作成した。

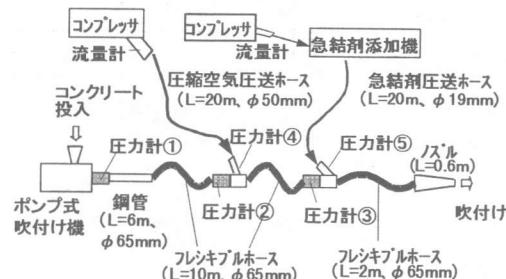


図-5 ポンプ圧送方式の配管と圧力測定位置



図-6 空気圧送方式の配管と圧力測定位置

表-3 主な吹付け設備の仕様

圧送方式	ポンプ圧送式	空気圧送式
吹付け機	シユーブリーマ	アリバ280FF型
吹付け吐出装置	アリバ304	
急結剤添加機	ナトムクリート PAC150	
コンプレッサー	19m ³ /min、5 m ³ /min	

表-4 吹付け条件

コンクリートの種類	圧送方式	圧送エア-圧力(MPa)	エア-圧送距離(m)	急結剤添加量(C×%)
C360	ポンプ圧送	0.25	12.6	7
	空気圧送	0.40	22.6	7
C450	ポンプ圧送	0.35	12.6	5
	空気圧送	0.45	22.6	5
備考	急結剤種類 吐出量 吹付け面とノズルとの離れ 急結剤添加位置(ノズル先端から)	カルシウムアルミニネート系 : 8 m ³ /hr : 1.5m : 2.6m		

4. 実験結果

4.1 圧送によるフレッシュ性状の変化

現着と筒先のスランプ、空気量を図-7、図-8に示す。これらの図から、いずれのケースも筒先のスランプは低下する傾向であり、C360では4~8cm程度であり、C450では10cm程度の低下となつた。

このスランプ低下の原因としては、コンクリートがエア圧送によってノズルより大気中に吐出される際の、コンクリート中のペースト分の飛散等であると推察される⁵⁾。

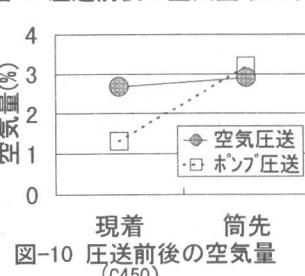
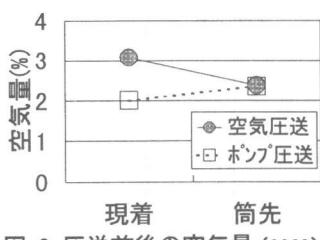
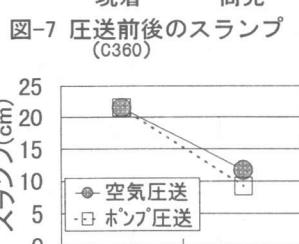
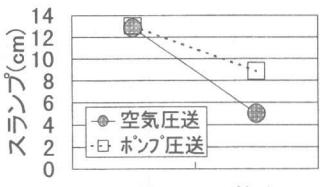


図-9、10には、空気量を示すが、特に顕著な傾向は見受けられず、スランプ低下の大きいC360空気圧送ケースだけは、圧送後に空気量が減少しており、このこともスランプ低下を大きくした要因の一つと考えられる。

4.2 配管内圧力

(1) 管内圧力波形の特徴

各ケースの管内圧力波形の代表的なものを図-11~14に示す。圧送のメカニズムで圧力波形は大きく異なり、図-11および図-13に示すように、ポンプ圧送方式では、シリンダーに吸入されたコンクリートが一定間隔で吐出され、これに伴って吹付け機出口の管内圧は周期的に変動する。エア-圧送区間である中間位置や急結剤添加位置でも、ほぼ同じ周期の圧力変動は生じるが振幅は小さくなる傾向であった。

一方、空気圧送方式の管内圧力波形を図-12および図-14に示す。空気圧送方式では、ローターの1つのシリンダーに流下したコンクリートは、今回実施した吐出量8m³/hrの条件では、1秒に1回程度の間隔で吐出され、この吐出に伴って、吹付け機出口での管内圧力が周期的に変動する。この管内圧力の変動は、中間位置や急結剤添加位置では、より大きな周期の、管内圧力変動となっており、C450ではその傾向が顕著であった。

既報²⁾において、施工時に問題となる「脈動」は、この急結剤添加位置の圧力変動との相関が強いことを報告しており、今回の実験では、空気圧送方式の方がこの位置での管内圧力変動が大きい結果であった。特にC450の空気圧送のケースでは、「脈動」を生じる可能性が高いことが管内圧力波形から判断できる。

また、ノズル手前の急結剤添加位置のエア-圧力に着目し、定常状態と判断した時間のデータを用いて、圧力の平均値、標準偏差を求めた結果を表-5に示す。この数値からも、フレッシュルホースの管内圧力の変動は、ポンプ圧送式の方が空気圧送式よりも小さく、コンクリートは

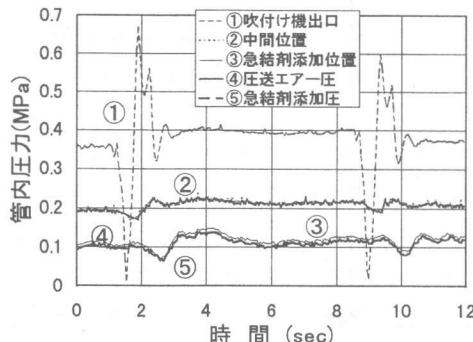


図-11 C360ポンプ圧送方式の管内圧力波形

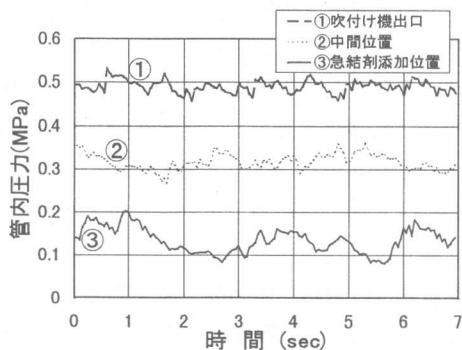


図-12 C360空気圧送方式の管内圧力波形

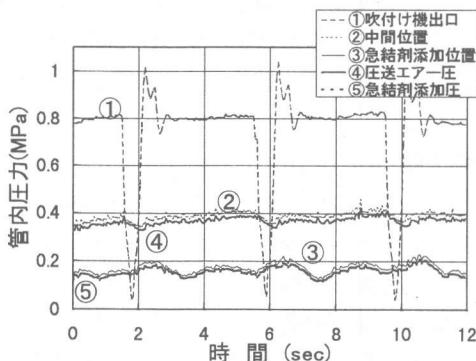


図-13 C450ポンプ圧送方式の管内圧力波形

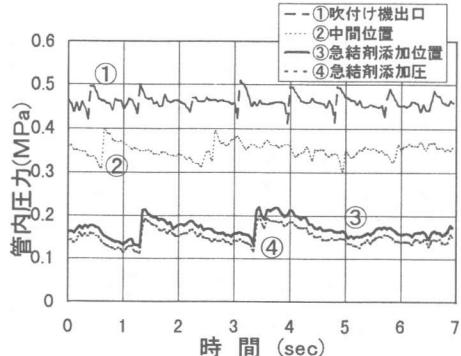


図-14 C450空気圧送方式の管内圧力波形

比較的連続した一定の圧力で吐出されていることが分かる。

表-5 急結剤添加位置の管内圧力

	C360	C450		
ポンプ圧送	空気圧送	ポンプ圧送	空気圧送	
平均値	0.206MPa	0.129MPa	0.180MPa	0.171MPa
標準偏差	0.012MPa	0.030MPa	0.019MPa	0.028MPa
変動係数	0.059	0.235	0.103	0.166

4.3 硬化性状

図-15～18

に、7, 28, 91日における材齢と圧縮強度の関係を示す。

図中の「吹付コア急有」とは、パネル型枠に吹付けたコンクリートから採取したコアで、「吹付コア急無」とは、比較のために急結剤を混入せず同様の方法で吹付けて採取したコアである。

C360, C450共に、ポンプ圧送、空気圧送を比較すると、どちらの圧送方式も急結剤の混入によって、混入しないものに比較して圧縮強度は

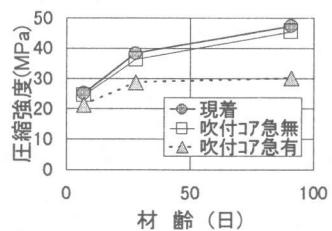


図-15 強度発現状況
(C360ポンプ圧送)

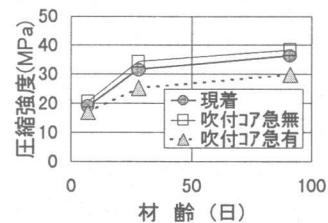


図-16 強度発現状況
(C360空気圧送)

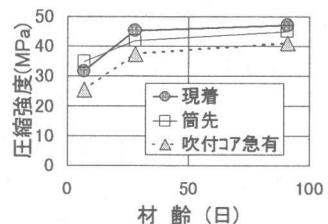


図-17 強度発現状況
(C450ポンプ圧送)

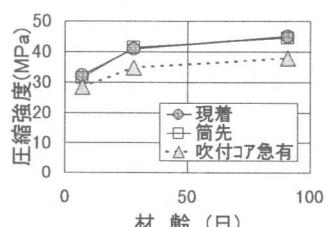


図-18 強度発現状況
(C450空気圧送)

低下するが、急結剤を添加した場合の圧縮強度は、ポンプ圧送か空気圧送かの違いによって生じる差違よりは、急結剤の添加量や混合具合による差が顕著となり、圧送方式の差に起因する差異がわからなくなるため、ここでは急結剤を添加しないものに着目した。

図-15, 16から、C360では各材齢における現着と吹付けコア急無の強度比はほぼ等しく、圧送による強度の増減傾向は、ポンプ圧送と空気圧送とで同じであるといえる。また、図-17, 18から、C450でも多少データにバラツキはあるが、各材齢における現着と吹付けコア急無の強度比はほぼ等しく、圧送による強度の増減傾向は、ポンプ圧送と空気圧送とで同じであるといえる。

このように、ポンプ圧送と空気圧送では、急結剤を添加しない時の、圧送前後の圧縮強度比はほぼ等しく、圧送による強度の増減傾向には、差は見られなかった。

5.まとめ

本実験の範囲内において、ポンプ圧送方式と空気圧送方式の違いが、吹付けコンクリートの施工性および品質に及ぼす影響に関して、以下の知見が得られた。

(1)ポンプ圧送方式と空気圧送方式で、圧送前後のコンクリートのフレッシュ性状に大きな差異は見受けられなかつたが、いずれの方式も圧送後に採取した筒先のスランプは低下する傾向がある。

(2)急結剤添加位置の管内圧力は、ポンプ圧送式では、吹付け機出口の圧力変動の周期とほぼ同じであったのに対し、空気圧送式では、圧力変動の周期が大きく、特にセメント量の増大にともない、空気圧送式では「脈動」を生じる可能性が高いことが管内圧力波形から判断できる。

(3)フレキシブルホースの管内圧力の変動は、ポンプ圧送式の方が空気圧送式よりも小さく、コンクリートは比較的安定した圧送圧力で吐出されていたと推察される。

(4)急結剤を添加しない時の、圧送前後の圧縮強度比はほぼ等しく、圧送による強度の増減傾向には、圧送方式の差は見られなかつた。

以上、ポンプ圧送方式と空気圧送方式の吹付け機は、エアーを用いてコンクリートをノズルから高速で吐出するという点では同じであり、吹付けコンクリートの物性に有意な差は見られなかつた。今後とも、更なる基礎資料の収集は必要と思われるが、これまで、同じ材料および条件で両方式を直接比較実験して報告された実績がなく、漠然と、両方式によって吹付けられたコンクリートの物性に差がないとされていた認識が、本研究によってほぼ確認できたと言える。

謝 辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「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の成果であり、東京大学生産技術研究所技官 西村次男氏、および共同研究各社、協力会社、ならびに関係各位に深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) トンネルの吹付けコンクリート、平成8年2月、(社)日本トンネル技術協会、pp. 114-133
- 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) 機械工学便覧 A5 流体工学、日本機械学会編、pp150, 1986. 4
- 4) 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, pp. 1351-1356, 1999. 6
- 5) 伊藤正憲ほか、吹付けコンクリートにおける圧送前後の品質変化に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 22, 2000. 6(投稿中)