

報告 吹付けコンクリートの圧送性状に関する基礎的研究

杉山 律¹・平間 昭信²・富山 徹³・魚本 健人⁴

要旨：吹付けコンクリートの圧送性状を把握する目的で空気圧送方式およびポンプ圧送方式の2種類の湿式吹付け実験を行った。圧送条件として圧送圧力、吐出量、急結剤添加位置および圧送空気挿入位置を選定し、これらが変化した場合の配管内圧力および圧送空気量を測定した。測定結果から各圧送方式における配管内の圧力波形の特徴、圧送条件と圧力損失、圧力変動および圧送空気量の関係を明らかとした。その結果、圧送の安定性の指標として、配管内の圧力変動ならびに圧送空気量が有効であることがわかり、これを用いて適正な圧送条件が選定可能であることを示した。

キーワード：吹付けコンクリート、空気圧送方式、ポンプ圧送方式、管内圧力、脈動

1. はじめに

近年の大断面化するトンネル工事においては、より安全で合理的かつ経済的なトンネル施工法の確立が要求されている。これらの要求に伴って吹付けコンクリートに対しても、高強度、低粉塵、低リバウンド等の高品質特性が要求されるようになり、さらには、永久構造物としての高耐久性も要求されるようになってきた。

一方、これらの高品質吹付けコンクリートを含め、吹付けコンクリートの品質を確保するためには、その施工法の理論的裏付けが不可欠である。しかしながら、特に吹付けコンクリートの品質変動の主要因の1つである圧送性状あるいは圧送メカニズムに関して、これまで体系的な検討がなされていないのが現状である。

以上の観点から本報告では、吹付けコンクリートの施工法選定技術を確立する上での基礎資料を得ることを目的に、2種類の圧送方式による吹付け実験を行い、圧送性状におよぼす吹付け条件の影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

本実験に用いた吹付けコンクリートの使用材料、配合およびフレッシュコンクリートの性状をそれぞれ表-1、表-2に示す。

使用セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材に山砂、粗骨材に碎石を使用した。急結剤はカルシウムアルミネート系の材料をセメントに対し7%の重量比率で使用した。配合条件は、吹付け方式の違いを明確にするため同一（目標スランプ12cm、単位セメント量360kg/m³、細骨材率60%）とし、事前に試験練りでワーカビリティの確認を行った。なお、コンクリートは生コン工場において製造したものをアジテ

表-1 使用材料

区分	種類	仕様
セメント	普通ポルトランド	比重=3.16
細骨材	山砂 (君津産)	比重=2.60 F.M.=2.60
粗骨材	碎石 (名栗産)	比重=2.72 F.M.=6.24
急結剤	カルシウムアルミネート系	比重 2.70

*1 (株)間組本店土木本部技術設計部 (正会員)

*2 飛鳥建設(株)技術研究所材料研究室 (正会員)

*3 (株)エヌエムビー中央研究所混和剤開発第二グループ

*4 東京大学国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状

圧送方式	粗骨材の最大寸法(mm)	目標スランプ ^a (cm)	目標空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)					測定値	
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	急結剤 C×(%)	スランプ ^a (cm)	空気量(%)
空気	13	12	2.0	63.9	60.0	230	360	988	684	7	12.0 ~ 14.5	2.2 ~ 3.9
ポンプ ^a	13	12	2.0	56.9	60.0	205	360	1031	719	7	9.5 ~ 14.5	1.5 ~ 2.3

ータトラックで約 20 分運搬したのち実験に使用した。

2.2 吹付け設備および吹付け方法

吹付け実験は、湿式吹付けとし、図-1 に示す空気圧送方式および図-2 に示すコンクリートポンプ+空気圧送方式（以下ポンプ圧送方式と称す）の 2 種類の異なる吹付けシステムにより行った。吹付け機械を含む主な吹付け設備の機種および仕様を表-3 に示す。

空気圧送方式の場合は、コンクリートをローター方式の吹付け機で空気圧送するもので、急結剤を混合する Y 字管までフレキシブルホース内を 20m 圧送し、Y 字管で急結剤と混合し吹付けノズルより吐出させた。ポンプ圧送方式の場合は、コンクリートを揺動弁形式のピストン式コンクリートポンプにより鋼管内を 6m、フレキシブルホース内を 10m 圧送し、最初の Y 字管から圧縮空気により空気圧送した。さらに、10m 急結剤混合用 Y 字管までフレキシブルホース内を圧送したのち、急結剤と混合し吹付けノズルより吐出させた。ノズルの固定は、遠隔操作が可能な吹付けロボットを使用した。

いずれのシステムにおいても実際の施工現場で行われているシステムを参考¹⁾にし、できる

だけこれに近い形のシステムとした。吹付け機およびポンプの圧送部分の詳細をそれぞれ図-3、図-4 に示す。

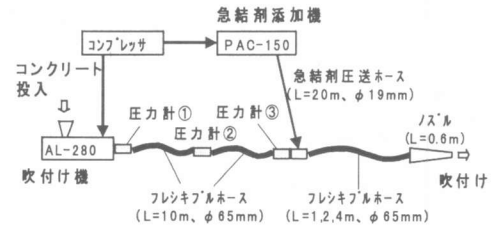


図-1 空気圧送方式

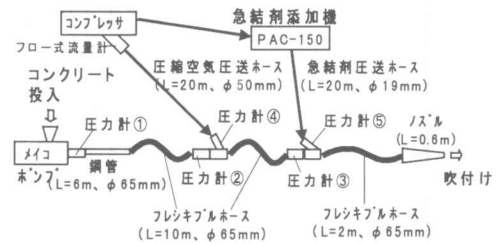


図-2 ポンプ圧送方式

表-3 主な吹付け設備の仕様

設備名	空気圧送方式	ポンプ圧送方式
吹付け機	アリバ-社製、アリバ-280	マイコ社製シュ-ブリ-マ
急結剤添加機	電気化学工業社製 ナムクリト PAC150	
コンプレッサ	吐出能力：15.3m ³ /min	
発電機	200V,75KVA	

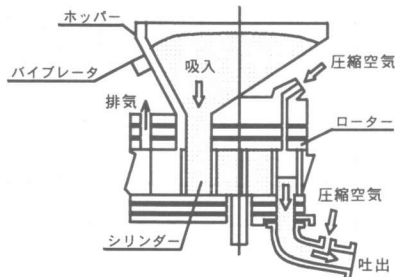


図-3 空気圧送方式の吹付け機

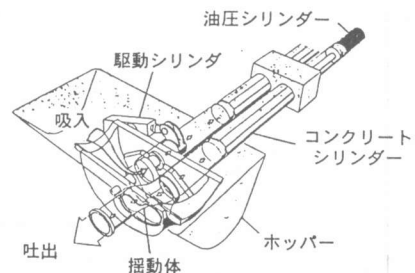


図-4 揺動弁形式のコンクリートポンプ

表-4 吹付け条件および実験ケース一覧表

圧送方式	実験要因	配合条件				圧送条件			
		スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	圧送圧力*1 (Mpa)	吐出量 (m ³ /hour)	急結剤添加位置*2 (m)	圧送空気の挿入位置*2 (m)
空気圧送	圧送圧力	12	2.0	63.4	60.0	0.3,0.4,0.5	8	2.6	22.6 (吹付け機出口)
	吐出量					0.4	4,6,8,10		
	急結剤添加位置						8	1.6,2.6,4.6	
ポンプ圧送	圧送圧力	12	2.0	56.9	60.0	0.2,0.25,0.35	8	2.6	12.6
	吐出量						4,8,12		
	圧送空気挿入位置						0.25	8	1.6,12.6,28.6

*1: 空気圧送方式では吹付け機出口の圧力、ポンプ圧送方式では圧送空気挿入圧力

*2: ノズル先端からの距離

2.3 吹付け条件および実験ケース

各システムの実験にける圧送条件および実験ケースをまとめて表-4に示す。実験要因としては、圧送圧力、吐出量、急結剤の添加位置および圧送空気の挿入位置とした。各要因の水準の選定は、予め吹付け予備試験を行い、安定した吹付けが可能な水準を中心とし、それを挟む3水準を選定した。

2.4 実験項目および実験方法

(1)フレッシュコンクリートの性状

アジテータトラックから吹付け機に荷卸しする際のフレッシュコンクリートの性状としてスランプおよび空気量を測定した。その値を表-2に示す。

(2)管内圧力と評価点

図-1および図-2に示すように、吹付け機およびポンプの出口、急結剤添加位置および圧送空気挿入位置等の管内圧力を圧力計により0.05secの間隔で測定した。ポンプ圧送方式の実験においては、急結剤および圧送空気の挿入圧力の測定も行った。また、圧送性状の良否を、主にフレキシブルホースの脈動に着目し、最良点を5点とした5段階評価で採点した。

(3) 圧送空気量

ポンプ圧送方式の実験においては、圧送空気量をコンプレッサ出口でフロー式流量計により測定した。

3. 実験結果

3.1 管内圧力波形の特徴

各システムの管内圧力波形の典型的なパターンとして圧送圧力を変化させた場合の管内圧力波形の一例を図-5に示す。

圧送方式ごとの吹付け機およびポンプ出口の圧力波形（圧力計①）のパターンは図-3および図-4に示すコンクリート圧送部分のメカニ

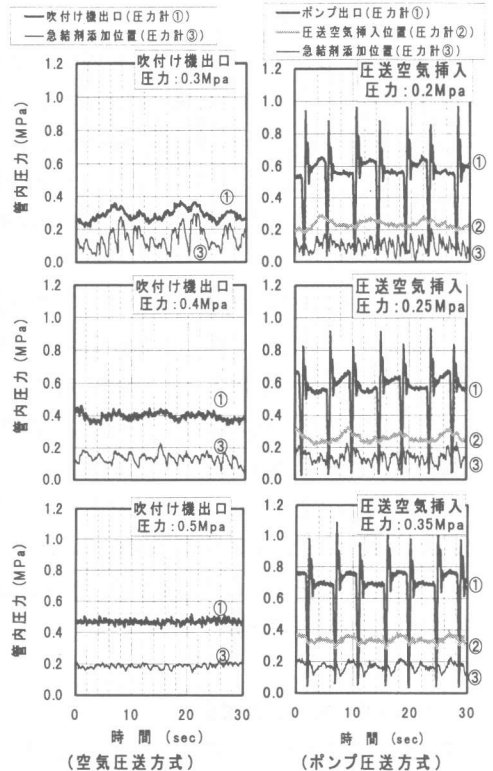


図-5 管内圧力波形の一例

ズムに大きく依存する。空気圧送方式では、ローターの1つのシリンダーに吸入されたコンクリートは、約1秒に1回の間隔(吐出量: $8\text{m}^3/\text{h}$)で吐出されるため、周期が短く振幅の小さい波形が支配的である。一方、ポンプ圧送方式では、空気圧送方式に比べ圧力が高く、ポンプのシリンダーに吸入されたコンクリートが約4秒に1回の間隔(吐出量: $8\text{m}^3/\text{h}$)で吐出される。したがって、波形は、圧力上昇区間、定常区間およびシリンダ閉塞区間の過程に区別できる。

いずれの方式の管内圧力も、ノズルに近いほど小さく、また、圧力波の振幅が大きくなり、変動の周期も異なってくる。この時、ホースの脈動が大きくなる。また、ポンプ圧送方式における圧送空気挿入圧力は、途中までポンプにより圧送されることから、空気圧送方式の吹付け機出口の圧力より小さい。

3.2 管内圧力に及ぼす実験要因の影響

(1)管内圧力の変化

各実験要因ごとに、圧送距離と管内圧力の関係を図-6に示す。各点の圧力は定常状態と判断した30秒間の全データ600個の平均値として算出した。ただし、ポンプ出口の圧力のみ、圧力上昇区間およびシリンダー閉塞区間を除く値の平均値²⁾とした。

空気圧送方式の場合の管内圧力は、圧送距離にほぼ比例して減少し、吹付け機出口の圧力が大きいほどその減少量は大きい。また、吐出量、急結剤の添加位置の圧力変化への影響は小さい。一方、ポンプ圧送方式の圧力減少量は、ポンプ圧送区間では、空気圧送方式に比べ大きく、吐出量が大きいほど、また、圧送空気挿入位置がノズル先端に近づくほど大きくなる。空気圧送区間では、実験要因の明確な影響はみられない。

(2)1m当りの管内圧力損失

管内のそれぞれの圧力計測点間の1m当りの圧力損失を求め実験要因ごとに図-7に示した。空気圧送方式の場合、吹付け機出口の圧力が

小さいと圧力損失も小さくなる傾向があるものの、吐出量、急結剤添加位置の影響は小さく、 $0.01 \sim 0.02\text{Mpa/m}$ の範囲にある。一方、ポンプ圧送方式の場合、図-7(右側)に示すように、ポンプ圧送区間(図中△印)と空気圧送区間(図

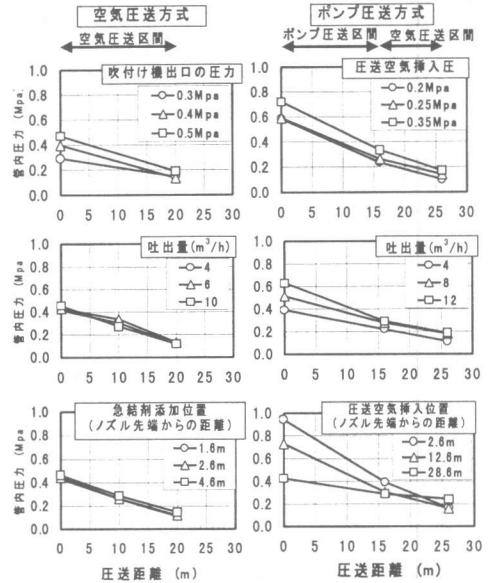


図-6 管内圧力の変化におよぼす実験要因

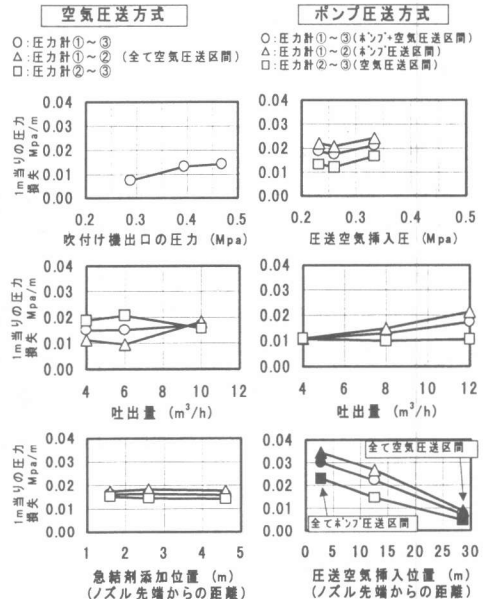


図-7 1m当りの管内圧力損失

中口印)では、前者の圧力損失が後者より大きい傾向にある。これは、ポンプ圧送区間のコンクリートの流れは、主に摩擦抵抗を伴う管壁付近の滑りにより生じているのに対し、空気圧送区間の流れは、比較的摩擦抵抗の少ない固体粒子と空気との混相流³⁾となっているためと考えられる。また、圧力損失に対する圧送空気挿入圧の影響は小さく、吐出量が多いほど、圧送空気挿入位置がノズル先端に近いほど大きい。

(3) 圧力変動と脈動

圧力変動の大きさを評価する目的で圧力測定値を標本とした標準偏差および変動係数を算出し、各要因ごとに整理し図-8に示した。いずれのケースにおいても、急結剤添加位置の圧力変動が大きく、しかも水準の変化に対して敏感である。つまり、この位置の圧力変動が最も圧送の安定性の程度を顕著に表している。管内圧力の変動傾向は、圧送圧力が小さいほど、吐出量が多いほど、また、急結剤添加位置がノズル先端から離れるほど大きくなる。ただし、ポンプ圧送方式の場合、圧送空気挿入位置の変化と圧力変動の関係は明確には認められなかった。これは、ポンプのピストン運動で生じる圧力変動の影響度合いが測定位置により大きく異なるためと考えられる。

主にホースの脈動に着目した圧送性状の評価点と、圧力の変動係数の関係を図-9に示した。これによれば、特に急結剤添加位置での評価点と管内圧力変動に明確な関係がみられる。つまり、この位置の圧力変動は圧送性状の良否の判定に有効であるといえる。この関係を利用して、例えば、評価点3点以上となるために必要な圧送条件をまとめると表-5のようになる。ただし、この条件は、本実験における吹付けシステムに対応するものであり、吹付け機的能力、配管条件、その他設備の形式や能力が異なる場合には、当然、異なってくる。また、一方で適正な圧送条件は、配合条件や吹付け後のコンクリートの品質との関係を明らかとした資料⁴⁾に基

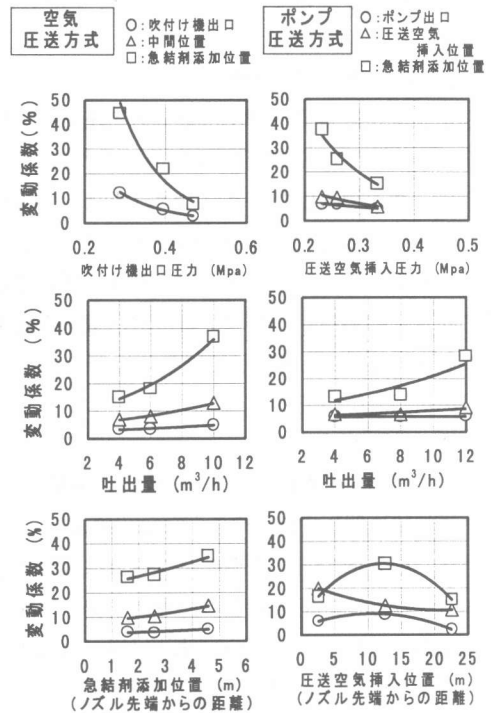


図-8 管内圧力の変動におよぼす実験要因

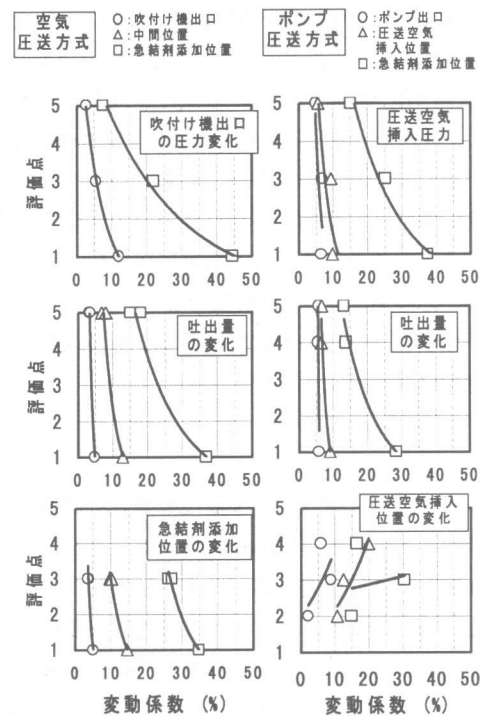


図-9 管内圧力の変動と圧送評価点の関係

づいて総合的に選定されなければならない。

3.3 圧送空気の流量

ポンプ圧送方式での圧送空気挿入圧および吐出量と圧送空気量の関係を図-10に示す。

圧送空気挿入圧が大きいほど、また、吐出量が小さいほど圧送空気の流量が多くなり、圧送性状が安定する傾向にある。これは、圧送性状の安定にはあるレベル以上の圧送空気量の確保が必要であることを示している。

4. まとめ

2種類の圧送方式による湿式吹付け実験から、圧送性状に関して以下のことが確認できた。

(1) 配管内の圧力波形のパターンは吹付け機のコンクリート圧送部分の機構に依存し、配管に脈動が生じると、圧力波の振幅が大きくなり、変動の周期が異なってくる。

(2) 空気圧送方式の場合、管内圧力は圧送距離にほぼ比例して減少し、1 m 当りの管内圧力損失は概ね 0.01 ~ 0.02Mpa/m の範囲にある。

(3) ポンプ圧送方式の場合、管内圧力損失は、ポンプ圧送区間のほうが空気圧送区間より大きく、吐出量、圧送空気挿入位置の影響を受ける。

(4) 圧送性状の良否（主に脈動の程度）は圧送距離の長い急結剤添加位置の圧力変動で評価できる。また、この圧力変動は圧送圧力、吐出量、急結剤添加位置の影響を受ける。

(5) 圧送性状の安定にはあるレベル以上の圧送空気量の確保が必要である。

謝 辞

本実験は、東京大学生産技術研究所において組織されている「高品質吹付けコンクリートの開発」の共同研究における実験結果についてまとめたものであり、東大生産研技官の西村次男氏、および受託研究員の荒木昭俊氏、小林裕二氏をはじめ、共同研究員としてご協力いただいた(株)青木建設 牛島栄氏、(株)大林組 田湯正孝氏、鹿島建設(株) 大野俊夫氏、(株)熊谷組 岡田

表-5 評価点と圧送条件

区分	吹付け要因	評価点	変動係数*1	水 準
空気 圧送	圧送圧力	3点 以上	20%以下	0.38Mpa以上
	吐出量		23%以下	7m ³ /h以下
急結剤添加位置	27%以下		2.5m以下*2	
ポンプ 圧送	圧送圧力		24%以下	0.27Mpa以上
	吐出量		18%以下	8m ³ /h以下

*1: 急結剤添加位置における管内圧力の変動係数

*2: ノズル先端からの距離

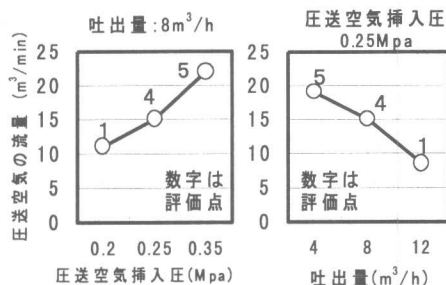


図-10 圧送圧力および吐出量と圧送空気量

喬氏, 佐藤工業(株) 大野一昭氏, 清水建設(株) 浅野篤氏, 大成建設(株) 坂本淳氏, (株)竹中土木 安藤慎一郎氏, 電気化学工業(株) 入内島克明氏, 東急建設(株) 伊藤正憲氏, 西松建設(株) 佐藤幸三氏, 太平洋セメント(株) 綾田隆史氏, 前田建設工業(株) 赤坂雄司氏, また、協力会社として参加いただいた富士物産(株) 阿部隆夫氏, (株)北川鉄工所 見浦光夫氏, (株)東京測器研究所 佐藤達也氏の方々, ならびに、芝浦工業大学 卒論生 久保田雄彦氏, 千葉工業大学 卒論生 今村信仁氏, 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, (社)日本トンネル技術協会, pp.98-137, 1996.2
- 2) コンクリートのポンプ施工指針(案), 土木学会, pp.127-129, 1985.11
- 3) 機会工学便覧 A5 流体工学, 日本機械学会編, pp.150, 1986.4
- 4) 例えば, 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, 1999.6 (投稿中)