

論文 吹付け速度が吹付けコンクリートの諸性状に及ぼす影響

石関嘉一*1・駒田憲司*2・西村次男*3・魚本健人*4

要旨: 吹付けコンクリートの吹付け速度を解析する目的で、高速度ビデオカメラを用いてノズル先端から噴出するコンクリートを撮影し、吹付けコンクリートの可視化画像を画像処理することによって、吹付け直前のコンクリート速度分布を計測することができた。その結果、吹付け条件の違いによりコンクリートの速度分布および速度の乱れに大きく影響することが確認できた。

キーワード: 吹付けコンクリート, 速度, 乱流強度, 空気流量, 高速度カメラ

1. はじめに

今日 NATM 工法がトンネル施工に導入されてから数十年が経過し山岳トンネルの標準工法として定着している。その間 NATM 工法の主要な支保部材である吹付けコンクリートにおいては、様々な研究開発がなされてきた。また、ここ数年大断面トンネルや吹付けコンクリートで永久覆工とするシングル・シェルライニングの導入を目的として、新しい急結剤や施工機械の開発、各種混和材の添加やコンクリート製造方法の研究開発が行われるようになった。しかしながら施工性に関する研究は十分に行われていない。特に、吹付け速度や圧送空気流量等の管理は、施工者の経験に委ねられているのが現状である。

本研究は、吹付けノズルから吹付け面までのコンクリート挙動に注目した。そこで、高速度ビデオカメラを用いてノズル先端から噴出するコンクリートを撮影し、画像処理を行った。それによって得られた吹付け速度計測の結果について報告する。

2. 実験概要

2. 1 使用材料と配合

使用材料を表-1、配合を表-2に示す。使用材料は、通常吹付け施工に用いる標準的なものを使用した。配合は鋼繊維混入高強度配合とし、水セメント比を一定とした。鋼繊維混入率はコンクリート体積に対して、0.5%、1.0%、1.5%の3水準とした。配合の詳細は、事前に試験練りを行いスランプ 21cm、空気量 2%を満足するように決定した。なお、吹付け実験は湿式吹付けとし、事前に生コンプラントでコンクリートの練り混ぜを行い、アジテータトラックで 30 分程度運搬した。到着後直ちに所定の品質を確認し吹付け実験を実施した。

2. 2 実験水準

実験水準を表-3に示す。既往の研究¹⁾により空気流量が吹付けコンクリートの圧送性状に大きく影響を及ぼすことが確認されている。
(9.0 m³/min : 脈動が発生し閉塞する危険性

表-1 使用材料

材料	名称	密度 (g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	千葉県君津市産山砂	2.61
粗骨材	東京都八王子産 6号砕石	2.66
混和剤	高性能減水剤 (ホリガ [®] リコルエス誘導体)	1.05
急結剤	セメント鉱物系粉体急結剤	2.57
繊維	鋼繊維	7.85

*1 (株)熊谷組 技術研究所 先端技術研究グループ 研究員 (正会員)

*2 (株)青木建設 研究所 材料研究室 研究員

*3 東京大学 生産技術研究所 第五部 技術官 (正会員)

*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 配合

No.	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				繊維量 (vol%)	急結剤添加率 (G×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			セメント	水	細骨材	粗骨材				
1	44.4	61.0	450	200	1004	657	0.5	5	21	2
2		63.8	462	205	1024	598	1.0			
3		66.6	473	210	1048	539	1.5			

表-3 実験水準

配合 NO.	実験 No.	空気流量 (m ³ /min)
1	1J	12.0
	10	18.5
	1U	9.0
2	2J	12.0
	20	18.5
	2U	9.0
3	3J	12.0
	30	18.5
	3U	9.0

が生じる, 12.0 m³/min: 粉じんリバンドを低減でき安定した吹付けができる, 18.0 m³/min: コンプレッサーの限界能力値) そこで, 各配合において空気流量を3水準変化させた実験を行った。

表-4 吹付け設備および吹付け条件

吹付け機械	・ロータリー式空気圧送方式 (コンプレッサー容量 19m ³ /min)
急結材添加装置	・粉体空気圧送方式 (コンプレッサー容量 5m ³ /min)
ノズル部	・クローラ搭載型マニピレータ
配管条件	・圧送ホース径: φ65mm ・コンクリート圧送ホース長: 22.6m ・急結材圧送ホース径: φ19mm ・急結材添加位置: ノズルから 2.6m
吐出量	・8.0m ³ /hr
吹付け距離	・1.5m (吹付面とノズル先端の距離)

2. 3 吹付け設備および吹付け条件

吹付け設備および吹付け条件を表-4 に示す。吹付け機はロータリー式空気圧送方式を使用し, コンクリート圧送距離を 22.6m とした。コンクリートの圧送に用いる空気流量の調節は, コンプレッサー出口にフロー式流量計を取り付け目標空気流量になるように調節した。急結材は一般的な粉体急結材を用い, ノズル先端から 2.6m の位置で Y 字管より圧送コンクリートに添加した。コンクリート吐出量は 8.0m³/hr, ノズルから吹付け面までの距離は 1.5m 一定とした。

表-5 撮影条件

高速度ビデオカメラ	・シャッター速度 1/6000 秒
ビデオカメラ	・撮影素子数 500 コマ/秒
記憶媒体	・リムーバブルハードディスク 2GB
照明	・自然太陽光

2. 4 撮影条件および撮影概要

撮影条件を表-5 に示す。また, 撮影概要を図-1 に示す。高速度ビデオ撮影は, 多量の光量が必要なため晴れた日の午前 10 時から午後 2 時の間で行われた。各実験の撮影はコンクリートの吐出状態が安定し空気流量が目標値に達した後, 5 秒程度行った。シャッター速度は 1/6000 秒とし, 記憶容量を考慮し

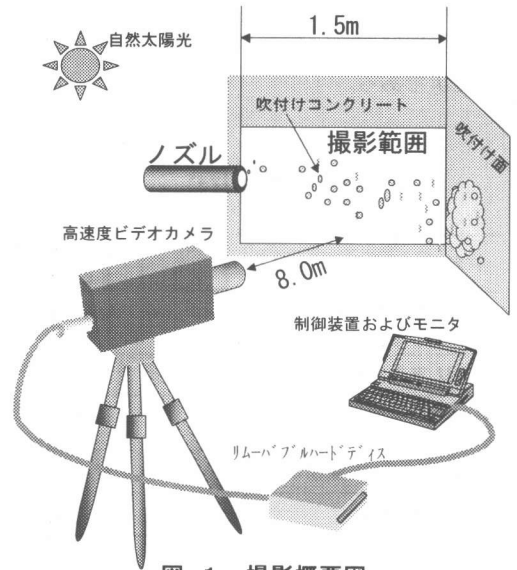


図-1 撮影概要図

て 1 秒あたり 500 コマの画像をデータとして取り込んだ。データはモニターで確認後, リムーバブルハードディスクに保存した。

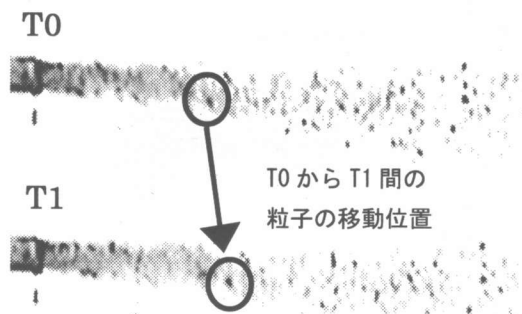


図-2 連続する2時刻T0, T1の可視化画像

3 解析概要

3. 1 解析方法

本実験の解析方法として濃度相関法をベースとした粒子追跡法²⁾³⁾(Particle Tracking Velocimetry:以下PTV)を用いた。PTVは粒子画像速度計測法の一手法であり流れ上の粒子を可視化し、可視化画像を画像処理することによって、流れ空間の速度分布を計測する手法である。

3. 2 粒子の検出

連続する2時刻T0, T1の可視化画像を図-2に示す。まず、時刻T0の可視化画像上に存在する粒子のうち濃度相関法より求められた最大輝度の粒子を中心位置とした濃度分布を検出する。これを可視化画像の全領域で走査して、マスクパターンを検出する。

3. 3 粒子の追跡

粒子の追跡は粒子中心位置とその周辺の濃度分布を用いて2時刻(1/500秒間)で行う。まず、時刻T1上において時刻T0で検出した粒子の位置から適切な範囲内にある粒子を検出し、濃度相関法を用いて時刻T0の粒子との相互相関値を算出し、最大相関値を与える粒子を同一粒子と判定する。この走査を全領域で実施し、連続する全可視化画像についても実施した。瞬間速度は粒子の移動距離、方向と撮影時間間隔から決定され、式(1)、(2)を用いて平均粒子速度を算出した。

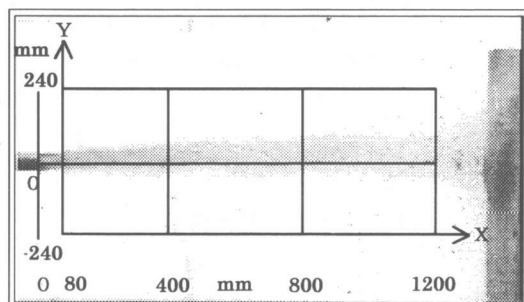


図-3 解析領域図

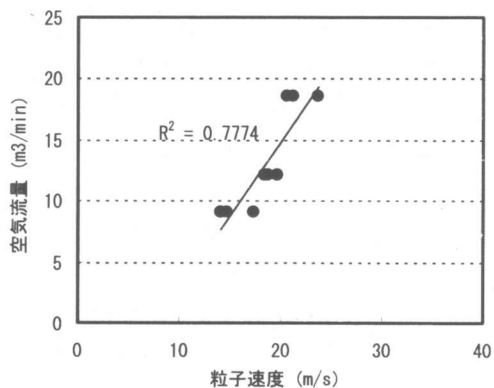


図-4 平均粒子速度と空気流量

$$U_{i,j} = \sum_{t=1}^N \frac{u_{i,j,t}}{N} \quad (1)$$

$$V_{i,j} = \sum_{t=1}^N \frac{v_{i,j,t}}{N} \quad (2)$$

$U_{i,j}$, $V_{i,j}$: X, Y方向の時間平均速度

$u_{i,j}$, $v_{i,j}$: X, Y方向の瞬間速度

N : 速度データ数

3. 4 解析領域

解析領域を図-3に示す。本解析は3.2から分かるようにまず粒子を検出する必要がある。本実験で得られた可視化画像を検討した結果、X軸0~80mmのノズル周辺はコンクリートが密集しているため、粒子の検出が困難であった。X軸1200mm~1500mmの衝突面付近は付着したコンクリートによって光量が不足し、また、リバウンドの粒子と吹付けの粒子を判別できず解析を断念した。Y軸は飛散している粒子の90%以上が検出できる範囲とし

た。よって、解析範囲は図-3 に示す実線内 (X : 80mm~1200mm, Y : 240mm~-240mm) に決定した。

4 解析結果

4.1 平均粒子速度と空気流量

平均粒子速度と空気流量の関係を図-4 に示す。また、平均粒子速度分布図を図-5 に示す。空気流量が増加するとともに平均粒子速度は上昇していることが確認された。また、相関係数も高い値を示していることから平均粒子速度と空気流量に高い相関関係があることが分かる。加えて図-5 から分かるように空気流量が増加すると全体的に粒子速度は上昇する。これまでの既往の研究¹⁾において空気流量が増加すると吹付け速度が上昇し、リバウンド率が増加する結果となっている。その際、吹付け速度の評価として目視や衝撃力試験⁴⁾を用いていた。そのため、吹付け速度の評価は多少曖昧になっていたが本研究によって既往の研究結果の原因が明確になった。

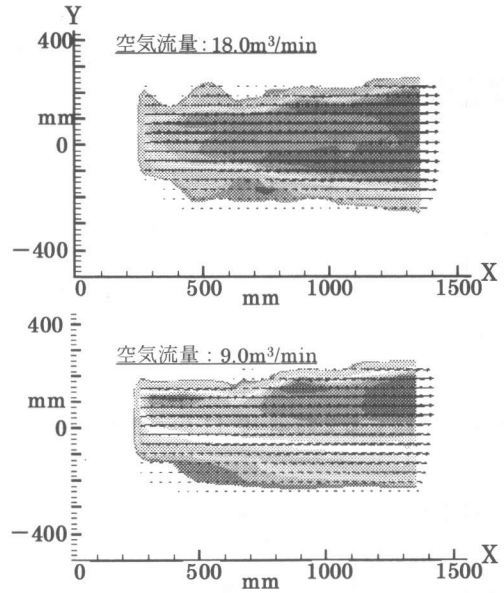


図-5 平均粒子速度分布図

4.2 平均粒子速度

X=400mm における平均粒子速度分布①~③、X=1200mm における平均粒子速度分布④~⑥をそれぞれ図-6、図-7 に示す。図-6①~③か

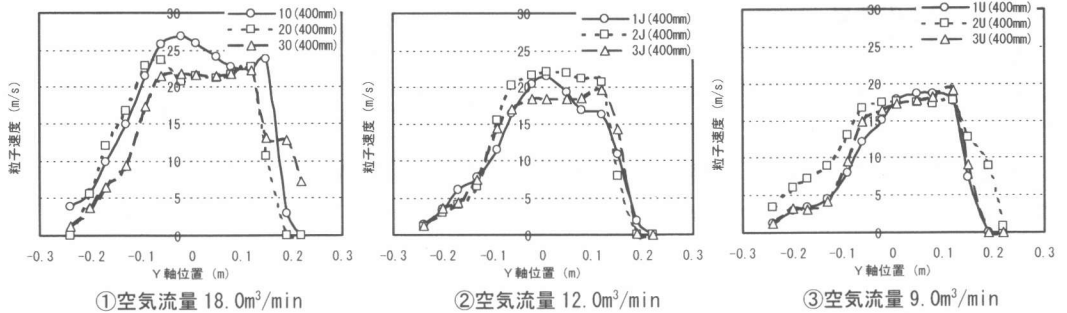


図-6 X=400mm における平均粒子速度分布①~③

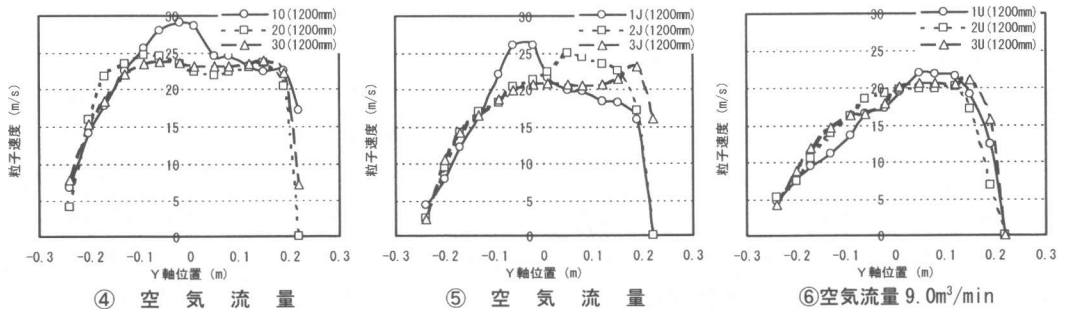


図-7 X=1200mm における平均粒子速度分布④~⑥

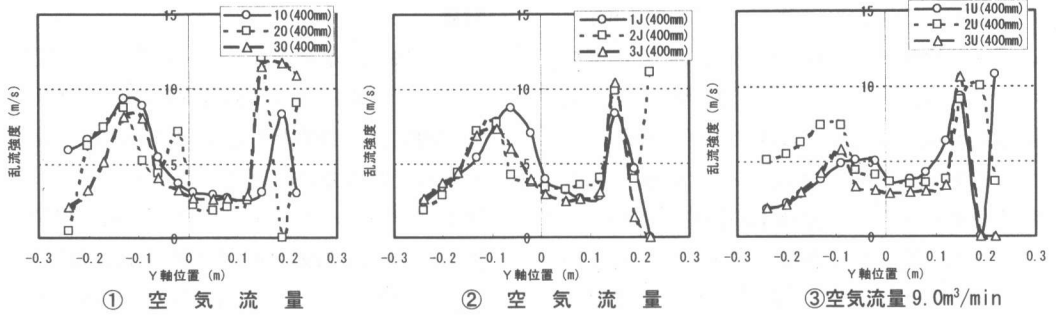


図-8 X=400mmにおける乱流強度①～③

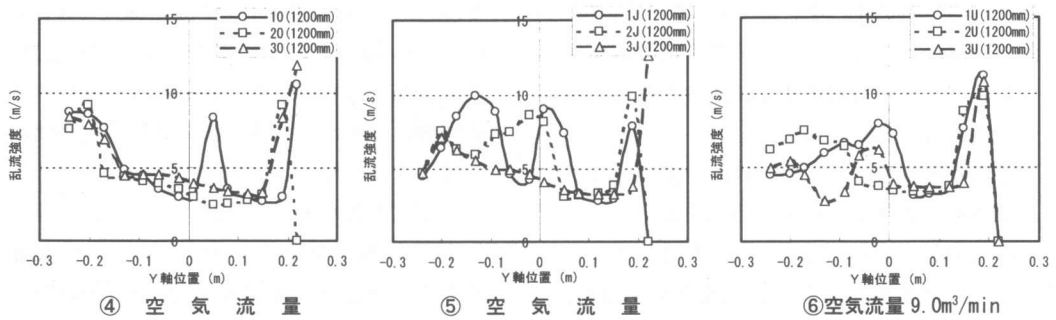


図-9 X=1200mmにおける乱流強度④～⑥

ら分かるように空気流量が増加する毎に $Y=0$ (ノズル中心位置) の粒子速度は上昇していることが分かる。しかし、グラフの形状を比較した場合、②、③は $Y=0$ を頂点に比較的整った凸型を示しているに対して、①は形の崩れた凹型を示している。これは、空気流量が増加することによって流れ上に粒子速度の大きな差が生じてしまい流れ上に乱れが増加したと考えられる。

図-7④～⑥においても空気流量が増加する毎に粒子速度は上昇している。また、ノズルからの距離が図-6に比べ離れているため速度分布が広がっていることが分かる。しかし、図-6、図-7を比較すると⑥は③と同様に整った凸型の形状を示しているのに対して、④、⑤は凹型を示している。④は①の時点での乱れ状態を持続し、⑤は粒子が流れる過程で大きな乱れが生じてしまったと考えられる。つまり、空気流量の強弱により速度分布が異なることが確認できた。

図-6、図-7の平均粒子速度を比較すると、

空気流量が同一の場合、図-7に比べ図-6の方が多少高い値を示している。通常吹付けコンクリートは、円錐状に拡散するが、ノズル近傍では拡散するコンクリート量が少ないので、速度の遅い粒子が多く含まれると思われる。よって、2次元で撮影をした場合、ノズル近傍では、コンクリートコア部以外の粒子を多く撮影したため、平均粒子速度は遅くなったと考えられる。

4. 3 乱流強度

$X=400\text{mm}$ における乱流強度、 $X=1200$ における乱流強度をそれぞれ図-8①～③、図-9④～⑥に示す。粒子の流れ上の乱れをはかる指標として式(3)を用いて乱流強度⁵⁾を算出した。

$$T_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{l=1}^N (u_{i,j,l} - U_{i,j})^2 + \sum_{l=1}^N (v_{i,j,l} - V_{i,j})^2}}{N} \quad (3)$$

$T_{i,j}$: 乱流強度

$U_{i,j}, V_{i,j}$: X, Y 方向の時間平均速度

$u_{i,j}, v_{i,j}$: X, Y 方向の瞬間速度

N : 速度データ数

図-8①~③において $Y=0$ (ノズル中心位置) 近傍で乱流強度はそれぞれ大差なく低い値を示している。また、本文 4.2, 図-6①より空気流量が増加すると $Y=0$ 近傍で粒子の流れに大きな乱れが生じると考えていたが、図-8①の乱流強度の結果から図-6①の速度分布の乱れは、速度の遅い粒子が多く含まれていたため生じたと考えられる。しかし、 $Y=0$ の左右 (ノズル上下) では急激に増加していることが確認できる。特に①は②, ③と比較して大きい値を示す結果となった。このことより空気流量が増加すると流れの上下に大きな乱れが発生することが分かる。

図-9④~⑥において $Y=0$ 付近で図-8 に比べ乱流強度が大きくなっていることが分かる。これは粒子が流れる過程において流れ上に大きな乱れが発生したことが確認できる。また、粒子の初速が小さい方が $Y=0$ 近傍での乱れ強度が大きくなることが分かった。よって、空気流量が大きい場合はノズル上下で粒子速度の乱れが大きくなるが、その後の粒子速度の乱れは収束してしまう。空気流量が小さい場合、ノズル付近の粒子速度の乱れは小さいものの、流れ上において大きな乱れが発生することが確認された。

5. まとめ

以上のことから次の事柄が確認された。

- ① 吹付けコンクリートの粒子速度は高速度ビデオカメラを用いて撮影することで、コンクリートの粒子速度を計測することができた。
- ② 吹付けコンクリートの粒子速度は、空気流量の影響を大きく受ける。
- ③ 粒子の初速が速い場合、ノズルの上下で大きい乱れが生じるが、その後収束してしまう。初速が遅い場合、ノズル付近での乱れは小さいものの、ノズルからの距離が大きくなると乱れは大きくなる。

謝辞

本実験は、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による成果である。ここで共同研究員である(株)エヌエムビー 清水哲史氏、(株)大林組 保岡哲治氏、鹿島建設(株)大野俊夫氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株)小林裕二氏、清水建設(株)磯部哲氏、大成建設(株)坂本淳氏、(株)太平洋セメント(株)大森啓至氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業(株)荒木昭俊氏、東急建設(株)伊藤正憲氏、戸田建設(株)田中徹氏、飛鳥建設(株)田中齊氏、西松建設(株)松浦誠司氏、および協力会社として御協力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 佐藤辰也氏、(株)ブリヂストン 深津章文氏、また、吹付け実験に各社より派遣された多くの方々やコンクリートプラントを提供していただいた太平洋セメント(株)佐倉研究所の方々、さらに、千葉工業大学卒論生 飯土井達也氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石関嘉一ほか：使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響，コンクリート工学協会年次論文報告集，vol. 22, 2000, pp. 1387~1392
- 2) 佐賀ほか：濃度相関ベースの粒子追跡法の開発と評価，日本機会学会関東支部総会講演会講演論文集，2000. 3, pp. 171-172
- 3) 佐賀ほか：濃度相関ベースの粒子追跡法の改良，可視化情報(札幌 2000) 講演論文集 vol. 200, suppl. No2, pp. 123~126
- 4) 小林裕二ほか：湿式吹付けコンクリートの施工条件が強度特性および空隙特性に与える影響，土木学会第 54 回年次学術講演会概要集 V, pp. 954~955
- 5) 萩原国宏ほか：新体系土木工学 25 流体力，技報堂出版