

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (19)

—吹付けコンクリートの粒子速度が吹付け性状に及ぼす影響—

Properties of Shotcrete (19)

— Effect of Shotcreting speed on Various Properties of Shotcrete —

石 関 嘉 一*・西 村 次 男**・魚 本 健 人***

Yoshikazu ISHIZEKI, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

今日, NATM (New Austria Tunnel Method) 工法は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は, 材料や施工システムの開発により発展し, 道路, 鉄道および導水路などのトンネル工事における一次ライニング材として重要な地位を占め, 様々な研究開発がなされてきた. しかしながらその品質やメカニズムを詳細に検討した研究報告は少なく吹付けコンクリートにおける理論的な解釈がないままに新規材料および施工が導入している傾向が強い. そこで, 本研究は吹付けコンクリートの吹付け速度がリバウンド等の施工性にどのように影響するのかを検討するために, 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. よって, 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の撮影画像処理を行い, 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

使用材料および配合は, 通常吹付け施工に用いる標準的なものを使用した. 配合は目標スランプおよび単位セメント量を一般の吹付けコンクリートで用いる 12 cm および 360 kg/m³ とした. 配合の詳細は, 事前に試験練りを行いスランプ 12 cm, 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.

* (株) 熊谷組技術研究所

** 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

2.2 吹付け設備および吹付け方法

吹付けシステム図を Fig 1, 吹付け設備および吹付け条件を Table 1 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 22.6 m 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デジタル空気流量計を取り付け目標空気流量になるように行った. 急結材は一般的な粉体急結材を用い, ノズル先端から 2.6 m の位置で Y 字管より圧送コンクリー

Table 1 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ュレータ
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

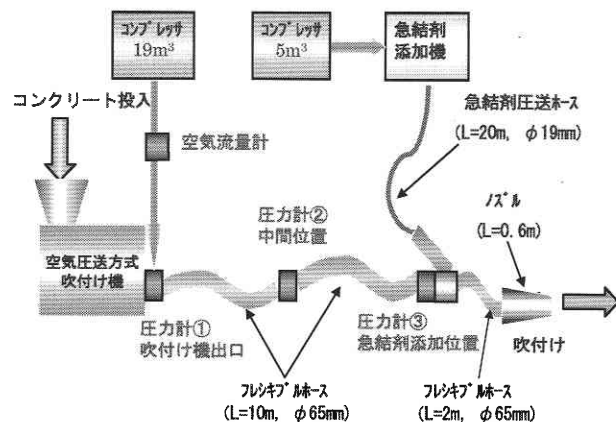


Fig 1 吹付けシステム図

トに添加した。コンクリート吐出量は 8.0 m³/hr 一定とした。

2.3 実験水準

Table 2 に実験水準を示す。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。(7.0 m³/min : 脈動が発生し閉塞する危険性が生じる, 9.0 m³/min : 粉じんリバウンドを低減でき安定した吹付けができる, 16.0 m³/min : コンプレッサーの限界能力値) そこで, 本実験は空気流量を 3 水準変化させた実験を行った。

2.4 撮影条件および撮影概要

撮影条件を Table 3 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。シャッタースピードは 1/6000 秒とし, 記憶容量を考慮して 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。

2.5 解析概要

2.5.1 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 Traking 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。

2.5.2 粒子検出

連続する 2 時刻 T0, T1 の可視化画像を Fig 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

2.5.3 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。

$$U_{ij} = \sum_{i=1}^N \frac{u_{ij}}{N} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{ij} = \sum_{i=1}^N \frac{v_{ij}}{N} \dots \dots \dots (2)$$

U_{ij}, V_{ij} : X, Y 方向の時間平均速度

u_{ij}, v_{ij} : X, Y 方向の瞬間速度

N : 速度データ数

2.5.4 解析範囲

解析領域を Fig 3 に示す。本解析は 2.5.3 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 ~ 80 mm 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 1200 mm ~ 1500 mm 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 Fig 3 に示す実線内 (X : 80 mm ~ 1200 mm, Y : 240 mm ~ -240 mm) に決定した

Table 2 実験水準

実験 No.	水準	
	空気流量 (m ³ /min)	吹付け距離 (m)
1	7.0	1.5
2	9.0	
3	16.0	
4	9.0	0.5
5		2.0
6		3.5

Table 3 撮影条件

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

3. 実験結果

3.1 吹付け速度

Fig 4 にノズル中心位置 (Fig3 : Y = 0) における吹付

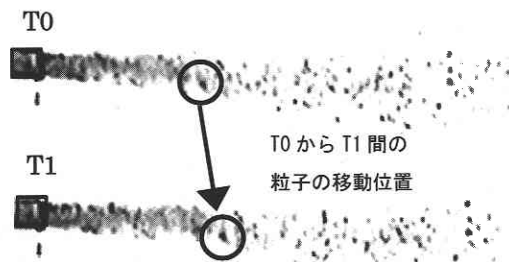


Fig 2 連続する 2 時刻 T0, T1 の可視化画像

研 究 速 報

けコンクリートの粒子速度を示す。ノズル出口付近のコンクリート粒子速度は、実験 No. 1 (空気流量 7.0 m³/min) において 18 m/s, 実験 No. 2 (空気流量 9.0 m³/min) において 19 m/s, 実験 No. 3 (空気流量 16.0 m³/min) において 25 m/s 程度であった。実験 No. 2, 3 はノズルから噴出後、距離に比例して粒子速度が上昇している。それに対して実験 No. 1 は、距離に比例して粒子速度は減少している。固気混相噴流⁴⁾ において、ノズル出口で気流の速度が粒子速度よりも著しく高速な場合、速度の速い気流に引き寄せられ粒子は加速されるといわれている。今回の実験で、実験 No. 2, 3 の気流速度は粒子速度に比べて著しく高速なので粒子速度が加速されたと考えられる。しかし、実験 No. 1 はノズル付近の粒子速度と気流速度が同等程度であったと考えられ、粒子が気流に引き寄せられることなく距離に比例して粒子速度が減少したと思われる。

Fig 5, 6 に X = 400 mm, X = 1200 mm 断面の粒子速度分布をそれぞれ示す。Fig 5 において実験 No. 2,3 は全体的にきれいな凸型を示している。しかし、実験 No. 1 は凸型を示しているものの、ノズル中心位置 (Y = 0) で速度のばらつきが見られる。これは、気流速度が粒子速度に比べて著しく高速なために粒子の流れに乱れが生じたものと考

えられる。また、粒子の広がり、実験 No. 1, 2, 3 それぞれ 0.24 m, 0.28 m, 0.3 m と大差ない結果となった。Fig 6 において、実験 No. 2, 3 はきれいな凸型を示しているのに対して、実験 No. 1 はノズル中心位置 (Y = 0) で速度のばらつきが生じている。Fig 4 からわかるように実験 No. 1 は、距離に比例して速度が低下している。噴流が減速する場合、気流速度は拡散により急激に減速されるが、粒子速度は、粒子の持つ慣性により気流ほど減速されない⁶⁾。これにより、粒子の流れに乱れが生じたと考えられる。また、粒子の拡散は、実験 No. 1, 2, 3 それぞれ 0.44 m, 0.52 m, 0.52 m と大差ない結果となった。

これらより、圧送する空気流量の相違によって、ノズルから噴出するコンクリート粒子速度に大きく影響することが確認できた。しかし、粒子の拡散は空気流量の相違による影響をあまり受けない結果となった。

3.2 乱流強度

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。またその結果として、Fig 7 にノズル中心位置 (Y = 0) の乱流強度、Fig 8, 9 に X = 400, X = 1200 断面における乱流強度分布を示す。

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

- 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 方向の時間平均速度
- N : 速度データ数

Fig 7 より実験 No. 2, 3 は 1.5 ~ 2 m/s, 4 ~ 5 m/s 程度と安定した乱流強度を示している。それに対して、実験 No. 1 は距離に比例して乱流強度が増加している。Fig 4 からわかるように粒子速度が上昇もしくは安定している場合、乱流強度も安定し低い値を示す。また、粒子速度が低下すると乱流が発生し乱流強度も増加する結果となった。

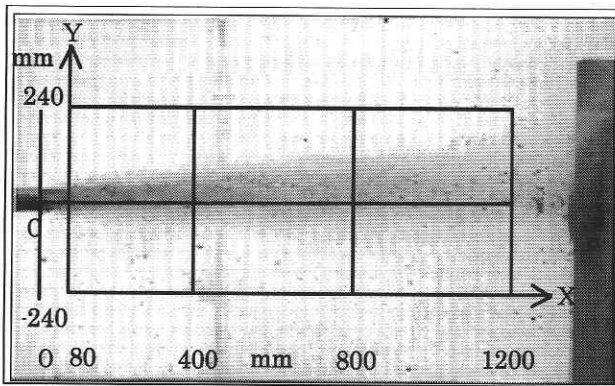


Fig 3 解析範囲

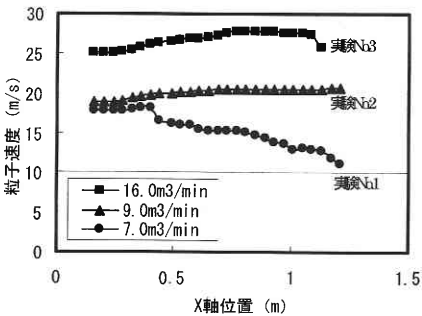


Fig 4 ノズル中心位置の粒子速度

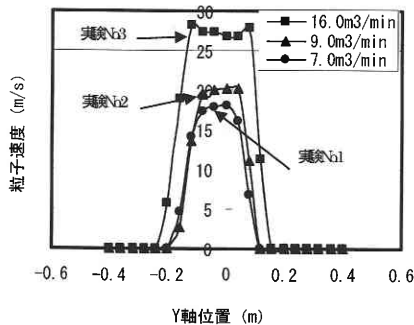


Fig 5 X = 400 断面粒子速度分布

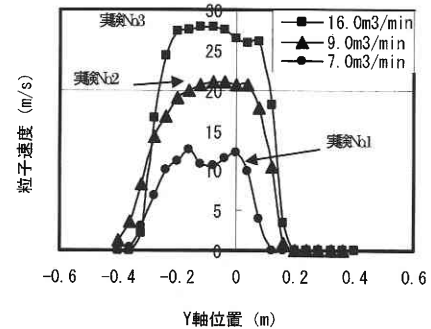


Fig 6 X = 1200 断面粒子速度分布

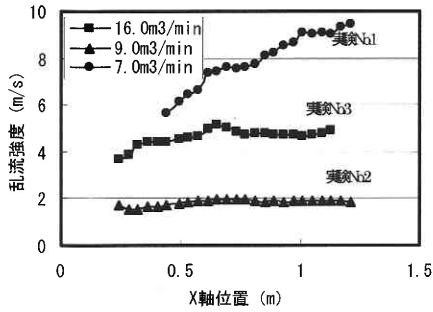


Fig 7 ノズル中心位置の乱流強度

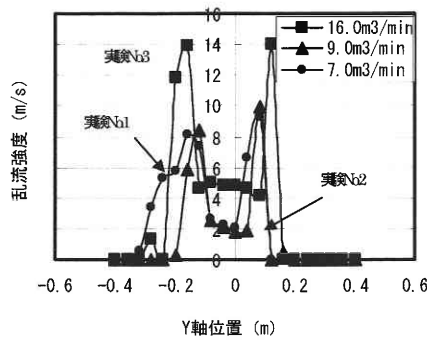


Fig 8 X = 400 断面乱流強度分布

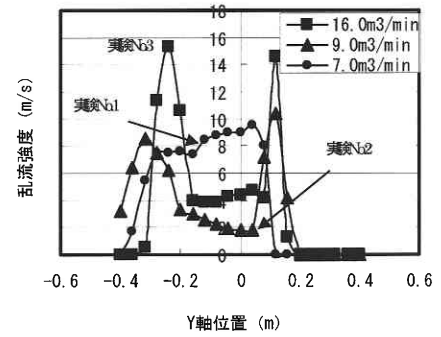


Fig 9 X = 1200 断面乱流強度分布

次に断面より検討する。Fig 8において-0.2 m および 0.2 m 付近で乱流強度が増加していることが確認できる。特に、実験 No. 3 は他と比較して顕著である。Fig 5 において実験 No. 3 は粒子速度にばらつきがみられた。その理由として、粒子速度分布がノズル中心付近と外側では著しい速度の差が生じていることにより、粒子の流れ上にはく離⁸⁾現象が生じてしまい乱流強度が上昇してしまったと考えられる。同様に Fig 9 においても 0.2 m および 0.2 付近で乱流強度が増加していることが確認できる。また、実験 No. 1 はノズル中心位置 (Y = 0) で全体的に乱流強度が上昇していることで、Fig. 5 で粒子速度にばらつきが生じてしまったと考えられる。これらより、粒子速度にばらつきが生じる場合や速度低下が発生する場合に乱流強度が大きくなることが確認できた。

4. ま と め

- ① 粒子追跡法を用いることで、吹付けコンクリートの粒子速度を測定することが可能となった。
- ② 吹付けコンクリートの粒子速度は、気流速度が著しく速い場合、加速される。
- ③ ノズルから噴出するコンクリート粒子の広がり、は空気流量に影響されない。
- ④ 空気流量が一定以上の場合、乱流強度は安定する。しか

し、空気流量が少ない場合、乱流強度は距離に比例して大きくなる。

- ⑤ 粒子速度のばらつきは、乱流強度に影響される。

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。ここで各社共同研究員、吹付け実験に派遣された多くの方々に深く感謝の意を表します。

(2002年3月13日受理)

参 考 文 献

- 1) 石関ほか：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, No. 2, 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) 日本流体力学会：混相流体の力学，朝倉書店，pp. 179-197
- 5) 萩原ほか：新体系土木工学 25 流体力，技報堂出版