

# 報告 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

安藤慎一郎<sup>\*1</sup>・大野 俊夫<sup>\*2</sup>・伊藤 正憲<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

**要旨：**吹付けコンクリートの高品質化を目的に、各種吹付け条件による影響を明らかにするための吹付け実験を行った。吹付け条件は、吹付け距離、圧送圧力、コンクリート吐出量、吹付け角度等である。実験の結果、吹付け条件が吹付けコンクリート（急結剤無添加）のフレッシュ性状およびリバウンドに与える影響を確認するとともに、硬化コンクリートの品質については各種吹付け条件における圧縮強度、空隙率をもとに分散分析を行い、各吹付け条件内における効果の大きな条件を抽出した。以上によって、良好な吹付けコンクリートの品質を得るための吹付け条件を示した。

**キーワード：**吹付けコンクリート、吹付け条件、品質、リバウンド、分散分析

## 1. はじめに

吹付けコンクリートは、トンネル工事における1次ライニング材や石油備蓄基地等の地下構造物の覆工ライニング材として重要な地位を占めている。施工機械は比較的コンパクトで、掘削後型枠を用いず直ちにコンクリート覆工を施工できることが大きな特徴である。しかし、施工条件やノズルマンの技術により、施工性、品質等がバラツキを生じやすいといった短所も持ち合わせている。

近年検討が進んでいる吹付けコンクリートを永久構造物として取扱うための高品質化には、コンクリートの配合条件<sup>1),2)</sup>とともに吹付け条

表-1 実験要因と水準

| 実験要因                   | 水準                                                             |
|------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 圧送方式                   | 2 空気圧送方式、ポンプ圧送方式                                               |
| 圧送圧力                   | 3 0.2、0.25 <sup>*4</sup> 、0.35、0.3、0.4 <sup>*3</sup> 、0.5(MPa) |
| コンクリート吐出量              | 3 4.0、6.0、8.0 <sup>*3,*4</sup> 、10.0、12.0(m <sup>3</sup> /hr)  |
| 吹付け距離                  | 3 0.5、1.5 <sup>*3,*4</sup> 、2.5(m)                             |
| 吹付け角度円周                | 3 0 <sup>*3</sup> 、45、90(度)                                    |
| 吹付け角度軸                 | 3 0 <sup>*3</sup> 、22.5、45(度)                                  |
| 急結剤添加位置 <sup>*1</sup>  | 3 1.6、2.6 <sup>*3,*4</sup> 、4.6(m)                             |
| 圧縮空気添加位置 <sup>*2</sup> | 3 2.6、12.6 <sup>*4</sup> 、22.6(m)                              |

\*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縮空気添加Y字管位置の圧力

\*2: 吹付けノズル先端からの距離

\*3: 空気圧送方式の基本水準

\*4: ポンプ圧送方式の基準水準

件についての検討が重要である。

本報告は、吹付け条件を変動させて行った吹付け実験により、各種吹付け条件が吹付けコンクリートの品質に与える影響について検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因と水準

実験要因と水準を表-1に、実験の組合せを表-2に示す。実験要因は圧送方式、圧送圧力、コンクリート吐出量、吹付け距離、吹付け角度(円周方向・軸方向)、急結剤添加位置、圧縮空気添加位置とした。各要因の水準には、予備吹付け試験の結果、安定した吹付けが可能であった水準を基本として、3水準を設定した。

### 2.2 実験方法

#### 2.2.1 吹付け方法および吹付け設備

コンクリートの吹付けは、湿式吹付けとし、半径4.5m×延長17.0mで半円形の模擬トンネル内にて行った。吹付け設備は、空気圧送方式および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種類とした<sup>3)</sup>。

\*1 (株)竹中土木 技術本部技術部 課長 (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員 (正会員)

\*3 東急建設(株) 技術研究所土木研究部 土木材料研究室 研究員 工修 (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 実験の組合せ

| 圧送方式      | 実験要因      | 吹付け条件 <sup>*1</sup> |                                   |              |                  |                 |                |                 |
|-----------|-----------|---------------------|-----------------------------------|--------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|
|           |           | 圧送圧力<br>(MPa)       | コンクリート吐出量<br>(m <sup>3</sup> /hr) | 吹付け距離<br>(m) | 吹付け角度<br>〔円周〕(度) | 吹付け角度<br>〔軸〕(度) | 急結剤添加<br>位置(m) | 圧縮空気<br>添加位置(m) |
| 空気<br>圧送  | 圧送圧力      | 0.3,0.4,0.5         | 8                                 | 1.5          | 0                | 0               | 2.6            | 12.6            |
|           | コンクリート吐出量 | 0.4                 | 4,0.6,0.8,10.0                    | 1.5          |                  |                 |                |                 |
|           | 吹付け距離     |                     | 8                                 | 0.5,1.5,2.5  |                  |                 |                |                 |
|           | 吹付け角度円周   |                     | 8                                 | 1.5          | 0,45,90          |                 |                |                 |
|           | 吹付け角度軸    |                     | 8                                 | 1.5          | 0                | 0,22.5,45       |                |                 |
|           | 急結剤添加位置   |                     | 8                                 | 1.5          |                  | 0               | 1.6,2.6,4.6    |                 |
| ポンプ<br>圧送 | 圧送圧力      | 0.2,0.25,0.35       | 8                                 | 1.5          | 0                | 0               | 2.6            | 12.6            |
|           | CON吐出量    | 0.25                | 4,0.8,12.0                        | 1.5          |                  |                 |                |                 |
|           | 吹付け距離     |                     | 8                                 | 0.5,1.5,2.5  |                  |                 |                |                 |
|           | 圧縮空気添加位置  |                     |                                   | 1.5          |                  |                 |                | 2.6,12.6,22.6   |

\*1   は実験要因の水準を示す。なお、水準以外は設定条件とした。

空気圧送方式の場合は、ローター方式の吹付け機(アリバー社製アリバー280)を用い、ポンプ圧送方式の場合は、ピストン式のコンクリートポンプ(メイコ社製シューブリーマ)を用いた。また、いずれの場合も急結剤添加装置はナトムクリートPAC150(電気化学工業社製)とし、コンクリートを圧送するフレキシブルホースおよび吹付けノズルの位置固定装置には遠隔操作の可能な吹付けロボット(富士物産社製)を用いた。

なお、吹付けノズルの方向は、実験要因が吹付け角度(円周方向および軸方向の各3水準)の場合には図-1に示す角度とし、他の場合では鉛直・水平方向とも0度とした。

### 2.2.2 使用材料およびコンクリート配合

本実験に用いた吹付けコンクリートの使用材料および配合を、表-3および表-4に示す。

### 2.2.3 コンクリートの製造および運搬

実験に使用したコンクリートは、実験場所より直線距離で約2.5kmに位置するJISマーク表示許可工場にて製造した(以下、ベースコンクリートと称す)。工場から実験位置までの所要時間は約20分である。コンクリートの運搬にはトラックアジテータ車を使用した。

### 2.2.4 試験項目および試験方法

#### (1)物性試験

図-2は、物性試験の実施フローを示す。フレッシュコンクリートについては、スランプ、空気量、コンクリート温度、単位容積質量の測定をJIS A 1101およびJIS A 1118に準じて行い、

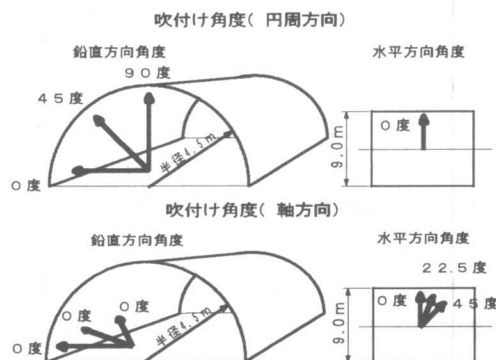


図-1 吹付けノズルの方向(吹付け角度)

表-3 使用材料

| 区分     | 種類           | 仕様                   |
|--------|--------------|----------------------|
| セメント   | 普通ポルトランドセメント | 比重=3.16              |
| 細骨材    | 山砂(君津産)      | 比重=2.60<br>F.M.=2.60 |
| 粗骨材    | 砕石(名栗産)      | 比重=2.72<br>F.M.=6.24 |
| 急結剤    | カルシウムアルミネート系 | 比重=2.70              |
| 高性能減水剤 | ポリグリコールエステル系 | 比重=1.05              |

表-4 コンクリートの配合

| 圧送方式  | 粗骨材の最大寸法(mm) | スランプの範囲(cm) | 空気量の範囲(%) | 水セメント比(%) | 細骨材率(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |           |          |          |              |        |
|-------|--------------|-------------|-----------|-----------|---------|-------------------------|-----------|----------|----------|--------------|--------|
|       |              |             |           |           |         | 水<br>w                  | セメント<br>C | 細骨材<br>S | 粗骨材<br>G | 急結剤<br>C×(%) | 高性能減水剤 |
| 空気圧送  | 13           | 12±2.5      | 2.0±1.0   | 63.9      | 60      | 230                     | 360       | 988      | 684      | 7            | —      |
| ポンプ圧送 | 13           | 12±2.5      | 2.0±1.0   | 56.9      | 60      | 205                     | 360       | 1031     | 719      | 7            | —      |

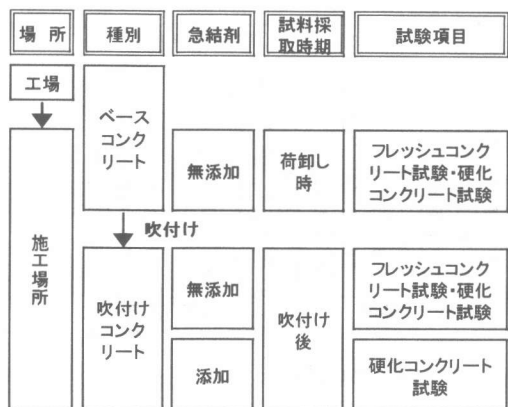


図-2 物性試験の実施フロー

硬化コンクリートについては、圧縮強度、空隙率、単位容積質量の測定を行った。

硬化コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1108に準拠し、材齢7日、28日(空気圧送方式では91日まで)で測定した。ベースコンクリートの供試体(管理用)は、JIS A 1132に準じて $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の型枠を用いて作成した。吹付けコンクリートでは、JSCE-G502に準じて箱型枠( $60 \times 60 \times 25\text{cm}$ )に吹き付けた試験体から $\phi 10 \times 20\text{cm}$ および $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ のコアを採取した。なお、吹付け角度(円周方向および軸方向)については、模擬トンネル内面に直接吹き付けたコンクリート試験体から $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ のコアを採取した。各供試体数は各材齢につき3本である。各供試体の養生は、所定の材齢までの標準水中養生とした。

空隙率の測定は、材齢28日においてASTM C642-90に準じ、各コア供試体および管理供試体について行った。

## (2)リバウンド測定

リバウンド率は、コンクリートを箱型枠に向けて吹き付け、箱型枠および周囲の壁面に付着したコンクリートと、付着せずに落下したコンクリートの重量を測定して算出した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状の変化

図-3は、ベースコンクリートおよび吹付けコンクリート(急結剤無添加)のスランプ、空気

量および単位容積質量の関係を示す。

ベースコンクリートのスランプは、吹付けによって5~10cm程度低下した。空気量は同等か1~2%程度低下し、単位容積質量は空気量の増加に伴い同等か増加した。

スランプおよび空気量の低下は、圧送圧力の高い場合ほど、コンクリート吐出量が少ないほど大きい傾向にあり、圧送圧力および圧送に用いる圧縮空気とコンクリートの混合比率が関係していると考えられる。

### 3.2 リバウンド

図-4は、圧送方式毎の各種吹付け条件とリバウンド率との関係を示す。

実験要因を吹付け距離、圧送圧力およびコンクリート吐出量とした場合のリバウンド率は、両圧送方式とも同様の傾向を示した。吹付け距離および圧送圧力については、基本水準である空気圧送では1.5mおよび0.4MPa、ポンプ圧送

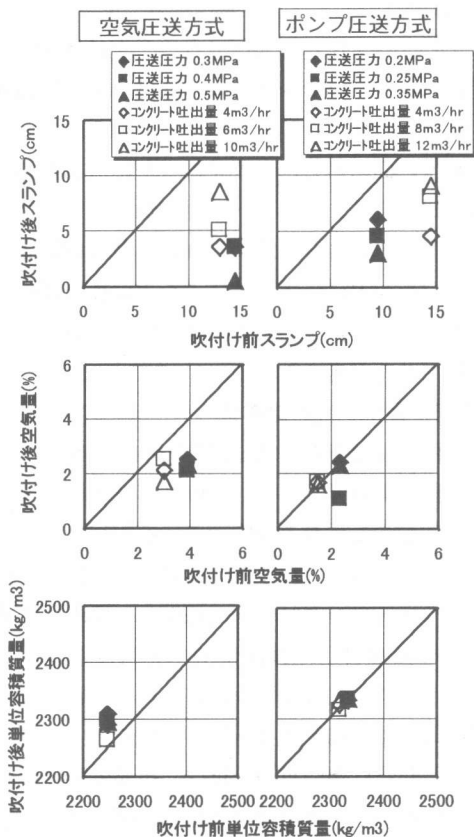


図-3 吹付けによるフレッシュ性状の変化

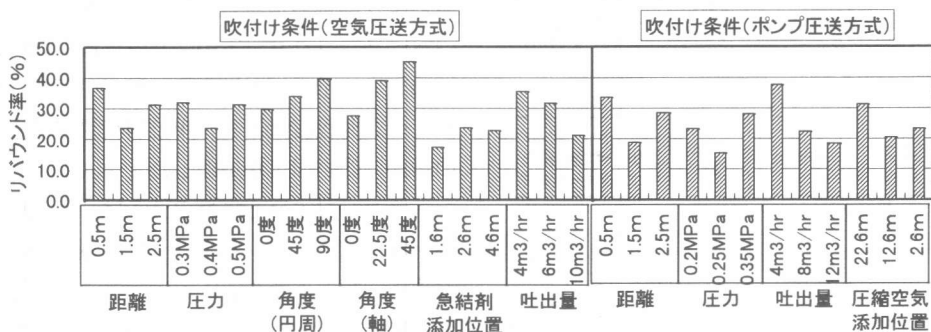


図-4 各種吹付け条件とリバウンド率との関係

では1.5mおよび0.25MPaにおいて最も小さな値となり、コンクリート吐出量では、その増大とともに小さくなった。

コンクリート吐出量の増大に伴うリバウンド率の低下は、急結剤の実質添加率の増加等が推定される。また、低压送圧力時にリバウンドが増加した理由は、急結剤の混合状態が悪く箱型枠への供試体採取時にダレが多く発生したためと考えられる。

また、空気圧送方式にて行った吹付け角度の変化に伴うリバウンド率は、吹付け角度（円周・軸方向）が大きくなるに従って増大した。特に吹付け面に対して角度を振った場合（軸方向）に差が大きく、吹付けノズルの角度がリバウンドに影響することが認められた。他の実験要因のリバウンドは圧送方式によらず同様の傾向であり、吹付け角度による差は、ポンプ方式でも同様であると考えられる。

### 3.3 硬化物性への影響

各種吹付け条件による硬化物性への影響を分散分析により評価した。評価は、各吹付け条件毎に圧縮強度比および空隙率比を算出し、この値を効果と考えて行った。ただし、圧縮強度比は、ベースコンクリートで採取した管理用供試体の材齢28日圧縮強度に対する吹付けコンクリートのコア供試体圧縮強度の比率である。空隙率比は圧縮強度比と同様に求めた。

各種吹付け条件毎の分析は、圧縮強度比についてはその水準3項目と2材齢に関する二元配置、繰返し数3回で行った。空隙率比では一元

表-5 各種吹付け条件による分散分析結果

| 圧送方式  | 吹付け条件       | 実験要因     |        | 効果         |                      |            |          |
|-------|-------------|----------|--------|------------|----------------------|------------|----------|
|       |             | 基本水準     | 分散分析結果 | 圧縮強度比      |                      | 空隙率比       |          |
|       |             |          |        | 水準間の差の検定結果 | 分散分析結果               | 水準間の差の検定結果 | 分散分析結果   |
| 空気圧送  | 圧送圧力        | 0.4 MPa  | **     | 2          | 0.3~0.4・0.5          | *          | —        |
|       | コンクリート吐出量   | 8m³/hr   | **     | 2          | 4~6・10               | —          | —        |
|       | 吹付け距離       | 1.5m     | **     | 3          | 0.5~1.5・2.5, 1.5~2.5 | —          | —        |
|       | 吹付け角度（円周方向） | 0度       | **     | 2          | 0~90, 45~90          | **         | 2        |
|       | 吹付け角度（軸方向）  | 0度       | **     | 2          | 0~22.5・45            | —          | —        |
|       | 急結剤添加位置     | 2.6m     | **     | 2          | 1.6~2.6・4.6          | —          | —        |
| ポンプ圧送 | 圧送圧力        | 0.25 MPa | —      | —          | —                    | 1          | 0.2~0.35 |
|       | コンクリート吐出量   | 8m³/hr   | *      | 1          | 8~12                 | —          | —        |
|       | 吹付け距離       | 1.5m     | **     | 2          | 0.5~2.5, 1.5~2.5     | —          | —        |
|       | 圧縮空気添加位置    | 12.6m    | **     | 3          | 20~10・0, 10~0        | *          | 2        |

\*\*：1%有意、\*：5%有意

配置、繰返し数3回とした。表-5に分散分析結果の一覧を、図-5に空気圧送方式の要因効果図を、図-6にポンプ圧送方式の要因効果図を示す。

#### (1) 圧送圧力の影響

空気圧送方式では、圧縮強度比および空隙率比に有意差が認められ、平均値の差の検定にも0.3MPaと0.4MPa間に有意差が認められた。一方、ポンプ圧送方式では、圧縮強度比、空隙率比に有意差はなく、各水準間に差は認められなかった。これは、ポンプ圧送方式では水準間の設定幅が空気圧送方式の1/2であり、この影響によるものと考えられる。吹付けコンクリートの品質確保のためには、一定以上の圧送圧力を確保することが必要と考えられる。

#### (2) コンクリート吐出量の影響

両圧送方式とも圧縮強度比のみに有意差が認められた。圧縮強度比は、空気圧送方式におい

て  $4\text{ m}^3/\text{hr}$ 、ポンプ圧送方式では  $8\text{ m}^3/\text{hr}$  以上で低下しており、ある吐出量以上では強度比が低下することが認められた。

### (3) 吹付け距離の影響

両圧送方式とも圧縮強度比のみに有意差が認められた。平均値の差の検定では、空気圧送方式が  $1.5\text{ m}$  で最も高いが、ポンプ圧送方式は  $2.5\text{ m}$  で高く、圧送方式による違いが認められた。

### (4) 吹付け角度の影響

円周方向では、圧縮強度比および空隙率比に、軸方向では圧縮強度比のみに有意差が認められ

た。軸方向の空隙率比は有意でなかったが、角度とともにバラツキが大きくなる傾向にある。

吹付け角度による圧縮強度比の変化は空隙量の差と関係していると考えられる。

一方、平均値の差の検定では円周方向の  $45^\circ$ 、 $90^\circ$  間および軸方向の  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$  間に有意差があり、円周方向では  $45^\circ$  度までは影響ないが、軸方向に少しでも角度を振ると圧縮強度に影響することが認められた。

なお、吹付け角度については、空気圧送方式による結果であるが、ポンプ圧送方式でも同様であると考えられる。

### (5) 急結剤添加位置の影響

急結剤添加位置では、圧縮強度比のみに有意差が認められた。平均値の差の検定では、 $1.6$ 、 $2.6\text{ m}$  間に有意差が認められ、吹付けノズル側に添加位置を移動することが圧縮強度を増加させると考えられる。

### (6) 圧縮空気添加位置の影響

ポンプ圧送方式の圧縮空気添加位置には、圧

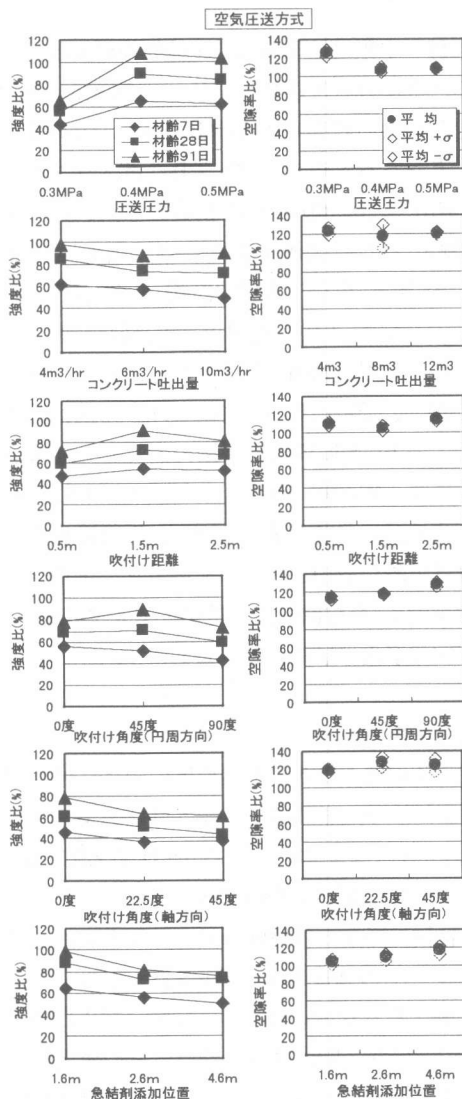


図-5 要因効果図 (空気圧送方式)

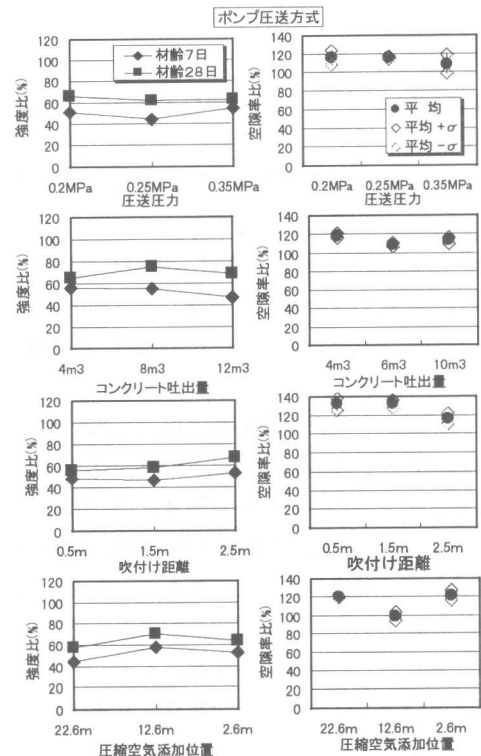


図-6 要因効果図 (ポンプ圧送方式)

縮強度比および空隙率比ともに有意差が認められた。平均値の差の検定では、すべての水準間が有意であった。12.6mは圧縮強度比で最も大きく、空隙率比では最も小さな値となり、最適な添加位置の存在が認められた。

#### (7)吹付け条件の交互作用

ポンプ圧送方式の結果をもとに、圧送圧力と距離、および圧送圧力とコンクリート吐出量との関係について分散分析を行った。分析は、各要因の3水準について二元配置、3回繰り返しを行った。結果をまとめて表-6に、要因効果図を図-7に示す。

圧縮強度比における分析の結果、圧送圧力と吹付け距離との関係には距離に、圧送圧力とコンクリート吐出量との関係では各々に有意差が認められた。距離2.5m×圧力0.25MPa、および吐出量8m<sup>3</sup>/hr×圧力0.25MPaは最も大きな値となり、最適な組合せの存在が認められた。

なお、交互作用については、空気圧送方式でも同様であると考えられる。

#### 4. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下にまとめる。

- 1)フレッシュ性状の変化は、圧送圧力およびコンクリート吐出量の影響を受ける。
- 2)リバウンドは、各吹付け条件の影響を受ける。圧送方式によらず、吹付け距離、吹付け圧力、コンクリート吐出量および吹付け角度が影響する。
- 3)吹付けコンクリートの品質確保のためには、一定以上の圧送圧力、一定以下のコンクリート吐出量が必要である。吹付け角度については、円周方向では45度までは影響ないが、軸方向では少しでも角度を振ると影響する。また、急結剤添加位置およびポンプ圧送方式の圧縮空気添加位置には、最適な設定が存在する。
- 4)吹付け条件には交互作用があり、最適な組合せが存在する。

表-6 分散分析結果(吹付け条件の交互作用)

| 実験要因      |         |     | 効果 |
|-----------|---------|-----|----|
| ポンプ<br>圧送 | 圧送圧力×圧力 | 距離  | —  |
|           | 吹付け距離   | 距離  | ** |
|           | 圧送圧力×圧力 | 吐出量 | ** |
|           | 吐出量     | 吐出量 | ** |

\*\* : 1%有意、\* : 5%有意

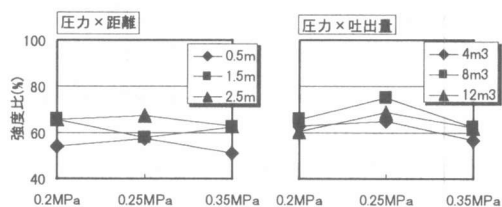


図-7 要因効果図(吹付け条件の交互作用)

**謝辞** 本報告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、共同研究員である(株)青木建設 牛島 栄氏、(株)エヌエムビー 富山 徹氏、(株)大林組 田湯正孝氏、熊谷組 (株) 岡田 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、電気化学工業(株) 入内島克明氏、飛鳥建設(株) 平間 昭信氏、西松建設(株) 佐藤幸三氏、太平洋セメント(株) 綾田隆史氏、(株)間組 杉山 律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、協力会社として参加頂いた富士物産(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、吹付け実験に参加された多くの方々、千葉工業大学卒論生 今村信仁氏、芝浦工業大学卒論生 久保田雄彦氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1)荒木昭俊ほか：各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性状およびリバウンド特性、コンクリート工学年次論文報告集、第20巻、pp.1159-1164、1998.6
- 2)小林裕二ほか：各種配合要因に伴う吹付けコンクリートの強度および空隙特性、コンクリート工学年次論文報告集、第20巻、pp.1153-1158、1998.6
- 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、第21巻、1999 (投稿中)