

報告 実施工における吹付けコンクリートの施工性

赤坂 雄司*1・安藤 慎一郎*2・杉山 律*3・魚本 健人*4

要旨：実際のトンネル施工の中で吹付け試験を実施し，吹付けコンクリート工の配管内圧力や圧送エア流量，粉じん濃度やリバウンド率などのデータを得た。これらから，圧送ホース内の圧力特性が把握でき，圧送エア流量と圧力の関係，ノズル～壁面距離とリバウンド率等の関係が明らかになった。

キーワード：吹付けコンクリート, 管内圧力特性, 施工特性, 圧送エア流量, リバウンド率

1. はじめに

吹付けコンクリートは，山岳トンネルの標準工法である NATM の主要な支保部材であり，導入以来，機械や材料，施工法などについて開発が重ねられている。

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，模擬トンネルを用いた吹付け試験を実施し，配合条件と吹付け性状や施工性¹⁾，硬化特性，ならびに施工条件を変えた場合の施工特性や硬化特性²⁾，高速度ビデオ撮影によるノズルから吐出される吹付けコンクリートの射出状況の把握³⁾，耐久性等について報告している⁴⁾。本報告は，実際のトンネル施工の中で実施した吹付け試験で明確となった，吹付けコンクリート工の配管内圧力特性や，圧送エア流量と圧力の関係，ノズル～壁面距離とリバウンド率，粉じん量等の施工特性について報告するものである。

2. 実験概要

2.1 現場概要

現場吹付け試験を実施したのは，上信越自動車道 五里ヶ峯トンネル西工事(トンネル本坑2, 493m)の二期線工事(避難坑の拡幅工事)であり，工事場所は長野県更埴市大字森地内(坂城

I.C.～更埴J.T.)であった。

使用した資・機材は全て実施工で使用しているものをそのまま用いた。なおトンネルの掘削は発破による補助ベンチ付き全断面掘削工法であった。吹付け試験を実施したC1パターンの標準断面図を図-1に示す。

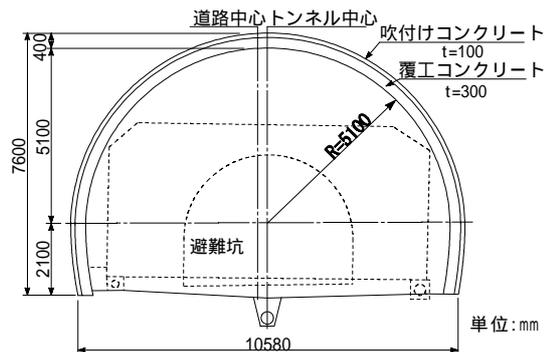


図-1 トンネル標準断面図(C1パターン)

2.2 使用材料および配合

使用した吹付けコンクリートの材料を表-1に，配合を表-2に示す。配合は，単位セメント量を 360kg/m^3 (以後C360と称す)および 450kg/m^3 (以後C450と称す)とし，目標スランプはC360の場合 $17 \pm 2.5\text{cm}$ ，C450の場合 $21 \pm 1.5\text{cm}$ とした。C360のスランプを通常よりも大きくしたのは，通常のスランプでは時間経過によるスランプロスによってポンプの吸込み効率が低下し，その

*1 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 研究第1グループ 課長 (正会員)

*2 (株)竹中土木 技術本部 技術部 課長 (正会員)

*3 (株)間組 本店 土木事業総本部 技術設計部 課長 (正会員)

*4 東京大学 教授 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 工博 (正会員)

表-1 使用材料一覧表

| 材 料 名 | 記号 | 仕 様 |
|--------|----|---|
| セメント | C | 普通ポルトランド, 密度:3.15g/cm ³ |
| 細 骨 材 | S | 長野県松代産陸砂, 密度:2.59g/cm ³ , F.M.=2.76 |
| 粗 骨 材 | G | 長野県松代産6号碎石, 密度:2.69g/cm ³ , F.M.=6.37 |
| 高性能減水剤 | Ad | ポリグリコールエステル誘導体 |
| 空気量調整剤 | Ac | ポリアルギレングリコール誘導体 |
| 急 結 剤 | CA | 粉体, カルシウムアルミネート系, 密度:2.57g/cm ³ |

表-2 コンクリートの配合表

| | 粗骨材最大寸法 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) | | | 高性能減水剤 Ad Cx% | 空気量調整剤 Ac Cx% | |
|------|-------------------------|----------------|--------------|----------------------|--------------------|---------------------------|-----------|----------|---------------------|---------------------|------|
| | | | | | | 水 W | セメント C | 粗骨材 S | | | |
| C360 | 15 | 17 | 2.0 | 60.3 | 60.4 | 217 | 360 | 1007 | 686 | 0.5 1.6 | 0.01 |
| C450 | 15 | 21 | 2.0 | 45.1 | 59.5 | 203 | 450 | 970 | 686 | 1.8 1.9 | 0.02 |

結果急結剤添加率が増大してしまうため、試験終了まで吸込み効率が低下しない範囲のスランプを保つためである。また目標空気量は、両配合とも2.0±1.0%とし、これらスランプと空気量の調整のため、高性能減水剤および空気量調

表-3 主要吹付け設備

| | | |
|-----------|--|-----------------------------------|
| ミキサ | 0.5m ² 二軸強制練り, 18.5kW | |
| セメントサイロ | 容 量 : 30 ton | |
| 骨材ストックピット | 細骨材:60m ³ , 粗骨材30m ³ | |
| コンクリートポンプ | 2ピストン平行摺動型, 400V, 22kW, 圧送距離:150m | |
| コンプレッサー | 圧送用 | 400V, 75kW, 12m ³ /min |
| | 急結剤用 | 400V, 27kW, 4 m ³ /min |
| 急結剤添加装置 | 吐出量:Max10kg/min, 容量:150 L | |
| エアドライヤー | 200V, 0.96kW, 処理量:4.4m ³ /min | |
| 吹付けアーム | 3段スライド式, 到達高さ:max13000mm, スライド長:4400mm | |
| 吹付け能力 | max18m ³ /hr | |
| ベースマシン | 165ps, 4WS, 最小回転半径:5.3m | |

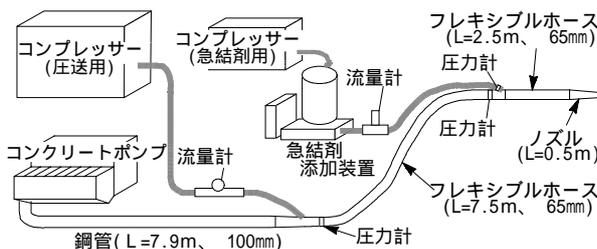


図-2 吹付けシステムの概要

整剤を適宜用いた。なお、コンクリートの練りまぜは、坑口近くに設置された専用のバッチャープラントで行い、アジテータ車を用いて切羽まで運搬したが、試験当時、切羽は坑口から約2000mの地点であったため、運搬時間は7~8分を要した。

2.3 吹付け設備

吹付け方式は湿式方式であり、吹付け機はポンプ圧送式のものであった。また吹付け設備は、電動コンプレッサーや急結剤添加装置等を搭載し、吹付け操作のためのアームが取り付けられた一体型システムであった。生コン車によって供給されるコンクリートは、ポンプによって鋼管内を8.5m圧送された後、圧縮空気によってさらにフレキシブルホース内を7.5m圧送され、ノズルの2.5m手前のY字管部で急結剤が混入されてノズルから吐出される。主な吹付け設備を表-3に、吹付けシステムの構成、および圧力計、流量計の設置位置を図-2に示す。

2.4 吹付け条件と試験ケース

吹付け条件と試験ケースを表-4, 5に示す。試験のパラメータとしては、コンクリートの配合を2水準(C360とC450)、吹付け距離を3水準、

表-4 吹付け条件

| 項 目 | 仕 様 | 備 考 |
|-----------|------------------------|-----------|
| コンクリート吐出量 | 16m ³ /hr | 所要時間から計算 |
| 吹付け厚さ(設計) | 10cm | |
| 急結剤添加率 | C360:C×7% C450:C×5% | |
| 吹付け対象箇所 | 上 半 | 1掘進長:1.5m |

表-5 試験ケース

| No. | 配 合 | 吹付け距離 (m) | 圧送エアの バルブ開度 |
|-----|------|--------------|----------------|
| A-1 | C360 | 1.0 | 解放 |
| A-2 | | 2.0 | 解放 |
| A-3 | | 3.0 | 解放 |
| A-4 | | 1.0 | 下限 |
| A-5 | | 2.0 | 下限 |
| A-6 | | 3.0 | 下限 |
| B-1 | C450 | 2.5 | 解放 |

圧送エアバルブの開度を2水準とし、この組合せの7ケースについて試験を行った。

2.5 実験項目および実験方法

主な試験・測定項目を表-6に示す。コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ、空気量、温度等について試験を実施した。また、施工特性は、配管圧力、圧送エア流量、リバウンド率や粉じん量について測定し、硬化特性は強度、弾性係数、空隙率等について試験を実施した。

表-6 主な試験・測定項目一覧表

| 試験・測定項目 | 試験・測定方法等 | |
|---------|----------|--|
| フレッシュ | スランプ | JIS A1101に準拠。 |
| | 空気量 | JIS A1128に準拠。 |
| | 温度 | 棒温度計にて測定。 |
| 施工性 | 配管圧力 | 圧送エア挿入部, Y管部, 急結剤添加圧 |
| | エア流量 | 圧送エア, 急結剤エア |
| | 急結剤添加率 | 満タン返し法 |
| | リバウンド率 | 天頂部から45°にかけ, 2分間の吹付けを行い, ブルーシートに落下した材料の重量を測定。 |
| | 粉じん量 | 切り羽から10m, 50mの位置, 向かって左側, 壁から1.5m, 高さ1.5m |
| 硬化特性 | 目視観察 | 脈動, 付着状況, 急結状況, 粉じんなど |
| | 初期強度 | プルアウト JSCE-G561に準拠。材齢: 3 hr, 24hr |
| | 長期強度 | ベースCon(供試体): JIS A1128に準拠。吹付けCon(コア): JIS A1107に準拠。材齢: 7日, 28日 |
| | 弾性係数 | コンプレッションメーター, JSCE-G502に準拠。 |
| | 空隙率 | ASTM C642に準拠。 |

なお急結剤の添加率は、C360ではセメント量の7wt%, C450では5wt%を目標に調整した。急結剤の使用量は、吹付け開始前にタンクを満杯にしておき、吹付け終了後に同じレベルまで補給する、いわゆる「満タン返し」法で求めた。

(1) 配管圧力

配管圧力の測定は、圧送エアを挿入した箇所と急結剤を添加するY字管、ならびに急結剤添加ホースで行った。それぞれの箇所に圧力センサーを取付け、AD変換して0.05sec間隔でデータを採取した。

(2) 圧送エア流量

圧送エア部には渦流量計、急結剤への供給エア部にはフロー式流量計を取付けてエア流量を測定した。なお、圧送エア流量は通常はバルブをほぼ解放にして施工している。今回は、解放にしたケースと、閉塞しないで圧送出来る下限近くまでバルブを絞って、圧送エア流量を低下させたケースで試験を実施した。

(3) リバウンド率

リバウンド率は、トンネル掘削部を一度薄く吹付け(一次吹付け)した後、天頂部から向かって右側45°にかけての部分に2分間吹付け、下方に敷設したブルーシート上に落下した材料を集めて重量を測定して、算出した。

(4) 粉じん量

表-7 試験結果一覧表

| No. | 距離 (m) | バルブ開度 | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 配管圧力(平均) (MPa) | | | 圧力の標準偏差 (MPa) | | | 平均エア流量 (m ³ /min) | | 急結剤添加率 C x % | リバウンド率 (%) | 粉じん量 (mg/m ³) | | 目視点総合 (平均) |
|-----|--|-------|-----------|---------|----------------|------|------|---------------|------|------|------------------------------|-----|--------------|------------|---------------------------|-----|------------|
| | | | | | 挿入部 | Y管部 | 急結剤 | 挿入部 | Y管部 | 急結剤 | 圧送用 | 急結剤 | | | 10m | 50m | |
| A-1 | 1.0 | 解放 | 20.5 | 1.5 | 0.41 | 0.19 | 0.26 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 10.2 | 3.6 | 7.4 | 32.3 | 0.6 | 1.5 | 3.0 |
| A-2 | 2.0 | 解放 | 14.5 | 2.6 | 0.33 | 0.16 | 0.24 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 10.1 | 3.7 | 9.7 | 25.1 | 0.6 | 1.6 | 3.0 |
| A-3 | 3.0 | 解放 | 17.0 | 2.1 | 0.46 | 0.22 | 0.23 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 10.2 | 3.6 | 8.2 | 18.1 | 0.7 | 1.1 | 2.9 |
| A-4 | 1.0 | 下限 | 20.0 | 2.1 | 0.47 | 0.14 | 0.16 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 7.3 | 3.6 | 8.2 | 36.6 | 0.5 | 1.5 | 3.2 |
| A-5 | 2.0 | 下限 | 19.5 | 2.4 | | 0.12 | 0.19 | | 0.04 | 0.02 | 7.7 | 3.6 | 8.0 | 23.5 | 0.4 | 0.9 | 3.3 |
| A-6 | 3.0 | 下限 | 19.5 | 2.1 | 0.50 | 0.21 | 0.20 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 6.5 | 3.6 | 6.7 | 25.0 | 0.5 | 0.9 | 3.1 |
| B-1 | 2.5 | 解放 | 23.5 | 2.2 | 0.35 | 0.25 | 0.25 | 0.03 | 0.06 | 0.04 | 10.4 | 3.6 | 5.9 | 44.6 | 0.6 | 1.6 | 2.8 |
| 備考 | <p>これらの試験ケースは、繰返しはなく、全て1回の試験結果である。 試験途中で流動化して吹付けを実施した。 1 粉じんは、試験前のバックグラウンドの計数値を減じる前の値であり、バックグラウンドの数値を減じると負(マイナス)となるケースもあった。 2 このケースは圧力変動が大きかった。 3 吹付けコンクリートの塊状の剥落があった。</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |

切羽から10mと50mの位置で、向かって左側の壁から1.5m、高さ1.5mの位置にデジタル粉じん計を設置して、1分ごとの計数値を記録し、これに校正係数(K値)を乗じて粉じん量とした。なお、トンネル内の換気は、切羽から200m程度の地点に2台のコントラファンを設置し、坑外へは2000m³/minの排気を、また切羽へは1000m³/minの送気を行っていた。

(5) 目視観察

筆者らは、吹付けコンクリートの良否は、その全てを数値で捉えることは難しいと考えており、各試験ケース毎の脈動や付着性等を4人の経験ある技術者で目視観察して、1~5の点数で相対評価した。基準としたのは、吹付け距離2m、圧送エアバルブを解放にしたケースである。

3. 試験結果

ここで実施した吹付け試験の結果の内、施工性に関するものを中心に表-7に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、材齢28日のコアで全て18N/mm²以上であった。

3.1 配管内圧力特性と圧送エア流量

C360でエア調節のバルブを解放にした時と下限の時の、10秒間の管内圧力波形の代表的なものとその時の圧送エア流量を図-3、4に示す。

また、図-5にはC450の解放時の圧力波形と圧送エア流量を示す。

C360では、エア調節バルブを下限近くまで絞ると、解放の時と比較して挿入部の圧力は0.05~0.1MPa程度上昇して圧力の変動も大きくなるが、Y管部の圧力は反対に0.05~0.1MPa程度低下する。また、圧送エア流量を絞ることで、挿入部とY管部間の圧力差が大きくなることがわかる。なお、Y管部で生じている圧力の変動は、コンクリートポンプの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ることによる圧力の変動によるものである。

またC450では、C360より単位セメント量が多いが、挿入部の圧力が若干低く、Y管部の圧力は高めとなり、この間の圧力損失は小さい。

これは、圧送抵抗や圧力損失に対しては、単位セメント量が増大してコンクリートの粘性が増し、フレキシブルホースとの間の圧送抵抗が増大する影響より、スランプが大きくなって圧送抵抗が少なくなる影響の方が大きかったためと考えられる。

一方、圧送エア流量は、バルブを解放と下限近くまで絞ったケースで比較すると、バルブを解放にした時は約2秒の間隔で流量が変動しているが、下限近くまで絞ると変動がなくなり、ほぼ一定となることがわかる。なお、この圧力

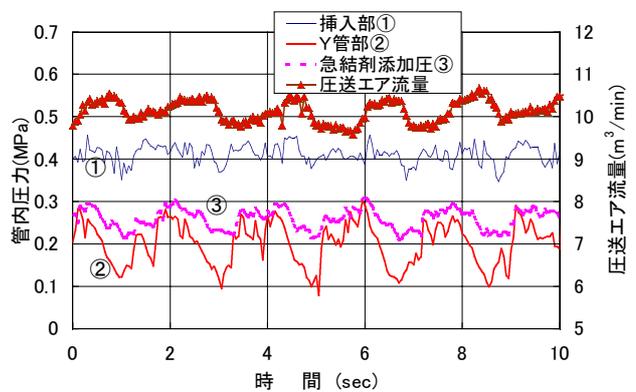


図-3 圧力波形と圧送エア流量(C360,解放)

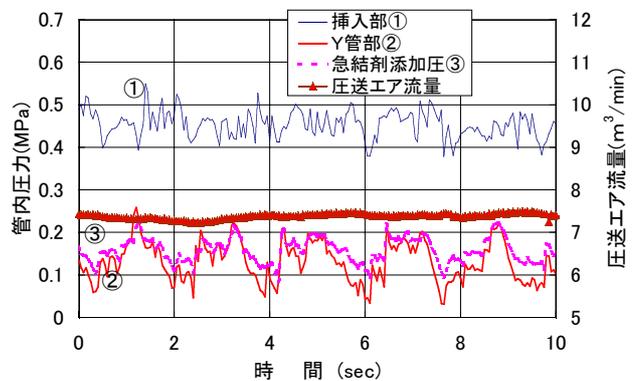


図-4 圧力波形と圧送エア流量(C360,下限)

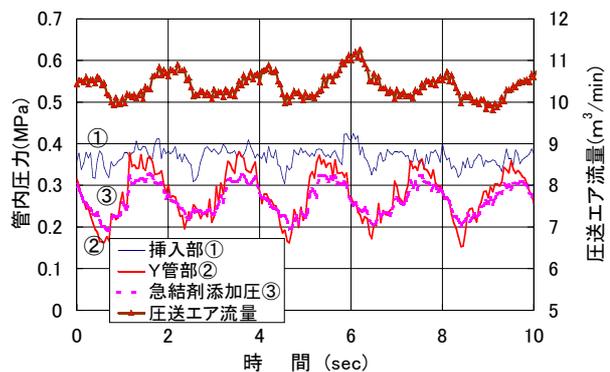


図-5 圧力波形と圧送エア流量(C450,解放)

の変動は、使用していた電動コンプレッサの作動特性によるものと考えられる。

吹付けコンクリートの施工では、圧送管(ホース)の閉塞は、大きなタイムロスとなるため、最も回避したいトラブルの1つである。圧送エア流量を下限近くまで絞ってしまうと、コンクリートの性状の変化などで閉塞の可能性が高くなるため、解放状態に近い形で施工せざるを得ない。今回、適切な圧送エア流量までは把握できなかったが、今後の課題として行きたいと考えている。

3.2 リバウンド率

図-6,7にノズルと壁面との距離、ならびに圧送エア流量とリバウンド率との関係を示す。

圧送エア流量が解放の場合は、吹付け距離の増大とともにリバウンド率が減少するが、下限近くまで絞った場合は、3mまで距離を離すと、リバウンド率は増加する傾向となった。

前者の理由としては、距離が1mのときは、圧送エアによって、硬化が始まる前に吹き飛ばされて、落下するものが多いが、ノズル～壁面

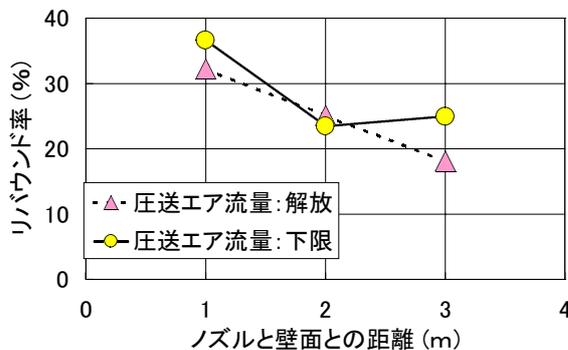


図-6 ノズル-壁面の距離とリバウンド率の関係

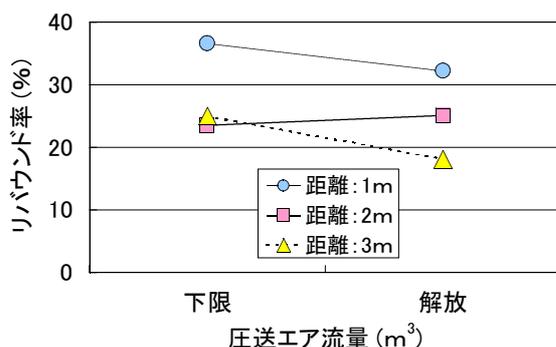


図-7 圧送エア流量とリバウンド率の関係

の距離が大きくなると、圧送エアによって吹き飛ばされるものが少ないことが挙げられる。

一方、後者の理由として、圧送エア流量が下限近くでノズル～壁面の距離が大きくなると、壁面までコンクリートが届かないか、あるいは付着するだけのエネルギーが不足していることが上げられる。

また、距離を一定にして吹き付けた場合、圧送エア流量が解放の方がリバウンド率は小さくなる傾向であることがわかった。

3.3 粉じん量

図-8に距離50mの地点におけるノズル～壁面の距離と粉じん量との関係を示が、試験前のバックグラウンドの計数値を減じると負(マイナス)となるケースもあるため、バックグラウンドの計数値は、減じていない。

このように粉じん量は、吹付け作業によってマイナスとなるケースや時間経過と共に低下してするケースがあったが、これは次のような理由によるものと考えられる。

トンネルの中央部には避難坑が貫通していたため若干の通風があり、時間や気候条件によって、方向や風速が異なり、この影響を受けた。

換気設備が整備されていた。

試験・測定のために、吹付け作業が頻繁に中断し、粉じん粒子が滞留せずに落下・飛散した。

また、ここではサンプラーによって、実際の粉じんを採取したものではなく、校正係数を求めた場所・タイミングは今回の吹付け試験とは

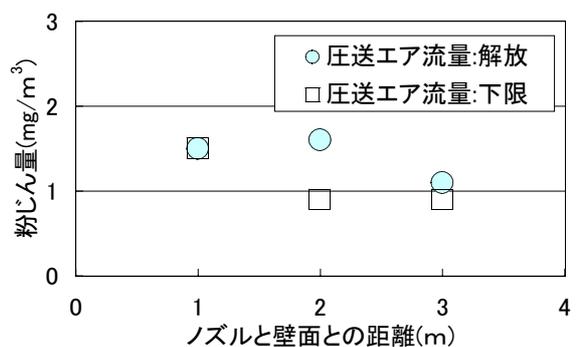


図-8 ノズル-壁面の距離と粉塵濃度(距離50m)

一致しておらず，これも一因と考えられる。

圧送エア量の大・小やノズル-壁面距離の遠・近によって，発生粉じん量に差異生じるのではないかと想定して測定したが，今回のような条件の下では，差異は明確とはならず，発生粉じん量も一般のトンネルよりは少ないことがわかった。

3.4 目視観察

図-9に試験ケース毎の目視観察の評価点(総合・平均)を示す。

いくつかある目視観察項目の評価点を総合した結果では，圧送エア流量を下限近くまで絞って，距離を2mとした場合が若干良好で，圧送エア流量は解放とするよりも下限近くまで絞った方が良い評価となる結果となったものの，各ケースに大きな差異はなかった。

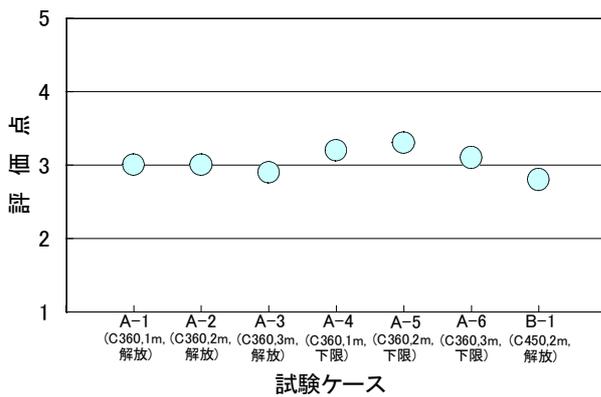


図-9 各ケースの目視評価(総合，平均)

4. まとめ

吹付けコンクリート工の施工性を配管の閉塞とリバウンド率として考えると，次のことが明らかとなった。

ノズル～壁面の距離は2～3mが適している。

圧送エア流量は，バルブを解放で $10\text{m}^3/\text{min}$ とする方が，バルブを絞って $7\text{m}^3/\text{min}$ とするよりも施工性は良好であった。

また，配管内圧力特性としては，

圧送エア流量を絞ると挿入部とY管部の圧力差が大きくなることがわかった。

ここまで，吹付けコンクリートの管内圧力特

性や，圧送エア流量と圧力の関係，ノズル～壁面距離などについて述べてきたが，今回の報告により，これまで乏しかった実施工での吹付けコンクリートの施工特性の一部が明らかになったと考えられる。ただし，これらの結果は前述の設備，条件の下でのものであり，吹付けコンクリートの施工特性とするには，さらに他の設備，条件の下での確認が必要である。

なお，ここで明確とならなかった，適切な圧送エア流量などに関しては，今後の課題として行きたいと考えている。

謝辞

本研究の主旨をご理解いただき，現場での吹付け試験にご協力いただきました日本道路公団東京建設局 佐久工事事務所ならびに前田建設・本間組共同企業体五里ヶ峯トンネル西作業所のみなさんには 紙面をかりて御礼申し上げます。

また，本研究は，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) 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
- 2) 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
- 3) 石関嘉一ほか：吹付け速度が吹付けコンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，pp. 1327-1332，2001. 7
- 4) 石関嘉一ほか：吹付けコンクリートの高品質化技術の開発，コンクリート工学Vol. 39，No. 10，pp. 25-33，2001. 10