

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (20)

— トンネル施工現場における吹付けコンクリートの強度特性 —

Properties of Shotcrete (20)

— Strength property of shotcrete at tunnel construction site —

大野俊夫*・細川佳史**・石関嘉一***・西村次男****・魚本健人*****

Toshio OHNO, Yoshifumi HOSOKAWA, Yoshikazu ISHIZEKI, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

岩盤などに吹き付けられたコンクリートの強度は、練り混ぜられたコンクリートに用いる材料・配合のほか、圧縮空気によって搬送されたことによる配合変化、急結剤の種類・混ざり具合・添加率、ノズルと吹付け面の距離、吹付け角度や圧力などの施工条件や地山条件など様々な要因が影響することが知られている^{1,2)}。そこで本研究では、実際のトンネル現場で吹付け距離や圧送空気流量などを要因として吹付け実験を行い、練混ぜコンクリートの強度とパネル型枠の強度、岩盤吹付け後の強度の関係などについて報告する。

2. 実験概要

2.1 実験実施トンネルの概要

吹付け実験を実施したトンネルは上信越自動車道五里ヶ峯トンネル（二期線工事，西工事）である。トンネルの掘削は発破による補助ベンチ付全断面掘削工法であり、実験実施区間の支保パターンは、図1に示すC1パターン（吹付けコンクリートの設計厚さ100mm）であった。

2.2 実験要因と水準の組合せ

表1に実験の要因と水準の組合せを示す。吹付け実験の要因はノズルから吹付け面までの距離と圧送空気の流量であり、圧送空気流量の開放は空気バルブの開放状態、下限は圧送限界までバルブを絞った状態とした。ノズルと吹付け面までの距離は実験ケースごとにスタッフによって検尺した。また、高強度配合を使用した実験ケース（実験No.O-2.5-H）も採用した。なお、本工事の標準的な施工方法は吹付け距離約2.5m、圧送空気流量：開放（実験No.O-

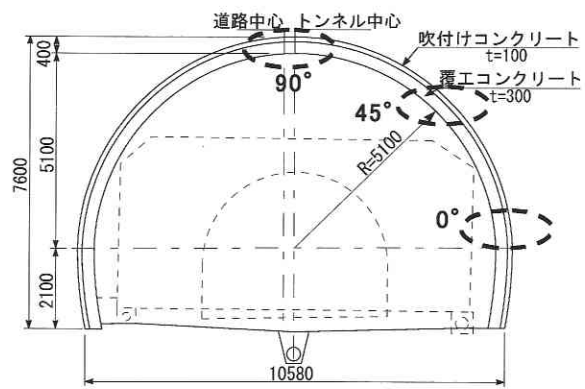


図1 トンネルの標準断面図とコア採取位置

表1 実験要因と水準の組合せ

| 実験 No. | 吹付け距離 (m) | 圧送空気量 (m ³ /min) | 単位セメント量 (kg/m ³) | トンネルからのコア採取位置 |
|---------|-----------|-----------------------------|------------------------------|---------------|
| O-1 | 1 | 開放 | 360 | 90° |
| O-2 | 2 | | | 0° ,45° ,90° |
| O-2.5 | 2.5 | | | 90° |
| O-3 | 3 | | | |
| C-1 | 1 | 下限 | 360 | 90° |
| C-2 | 2 | | | |
| C-3 | 3 | | | |
| O-2.5-H | 2.5 | 開放 | 450 | 0° ,45° ,90° |

2.5) である。

2.3 コンクリートの配合及び使用材料

表2にコンクリートの配合と使用材料を示す。配合は単位セメント量を 360 kg/m³ (C-360) と 450 kg/m³ (C-450) とした2種類であり、C-360の配合ではコンクリートの吐出量が安定し、急結剤添加率が一定になるようにスランプ17cmを目標とした。また、圧縮強度の目標値（材齢28

*鹿島建設株式会社

**太平洋セメント株式会社

***株式会社熊谷組

****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

表2 コンクリートの配合及び使用材料

| 記号 | 粗骨材の最大寸法 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 (%) | 単体量 (kg/m ³) | | | | | | |
|-------|--------------------|-------------|-----------|----------------|--------------|--------------------------|--------|-------|-------|------------|------------|---------|
| | | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 高性能減水剤 C×% | 空気量調整剤 C×% | 急結剤 C×% |
| C-360 | 15 | 17 | 2.0 | 60.3 | 60.4 | 217 | 360 | 1007 | 686 | 0.5~1.6 | 0.01~0.02 | 7 |
| C-450 | 15 | 21 | 2.0 | 45.0 | 59.5 | 203 | 450 | 970 | 685 | 1.8~1.9 | 0.01 | 5 |

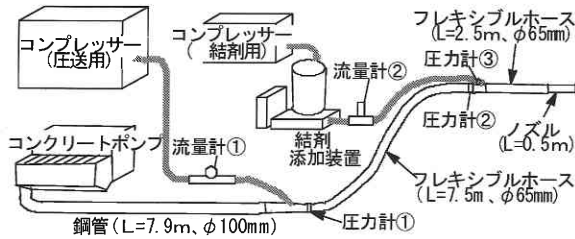


図2 吹付けシステムの概要

表3 試験項目

| 試験項目 | 摘要 | |
|----------|---------------|---|
| スランプ | JIS A 1101に準拠 | |
| | 空気量 | JIS A 1128に準拠 |
| | 温度 | 棒状温度計による |
| 硬化コンクリート | 初期強度 | ブルアウト: JSCE G561に準拠 材齢3, 24時間にて実施, 各3体 空気圧ピン貫入法: 文献 ³⁾ による 材齢3, 24時間にて実施, 各12本, ブルアウト終了後のコンクリートにて実施 |
| | 長期強度 | ベースコンクリート: JIS A 1108に準拠 φ100×h200mm, 材齢7, 28日, 各3本 コア箱: JSCE F561, JIS A 1107に準拠 φ75×h150mm, 材齢7, 28日, 各4本 壁面コア: JIS A 1107に準拠 φ75×h150mm, 材齢28日, 各4本 |
| | 静弾性係数 | JSCE G502に準拠, コンプレッソメータ法 圧縮強度試験時に実施, 材齢28日 |
| | 空隙率 | ASTM C642に準拠, 煮沸法による ベース, コアとも材齢28日, 各3本 |

日で18 N/mm²)を満足するため, 単体量を減じる目的で高性能減水剤を使用した。

2.4 吹付けシステム

吹付けシステムは図2に示す実際の工事に使用している湿式方式で, 吹付け機はポンプ圧送式である。

2.5 試験項目

表3にフレッシュ及び硬化コンクリートについて実施した試験項目を示す。長期強度試験は急結剤を添加する前の練混ぜコンクリート(以下ベースと略記), パネル型枠に吹き付けたコンクリート(以下コア箱と略記)と岩盤に吹

き付けたコンクリートについて実施した。岩盤に吹き付けたコンクリートからのコア採取部位は水平部(コア0°と略記), 天端部(コア90°)とその中間(コア45°)であり, それぞれ直径1m程度の範囲を対象とし(図1参照), コア供試体の長さが150mm確保できる部位から材齢7日~10日において採取した。

コア箱及びモールドは材齢2日まで坑内のむしろ中(温度20~26°C, 湿度約99%RH)で養生し, コア箱は材齢2日でコア採取を行った後, 材齢3日から標準水中養生を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュコンクリート

スランプは一部の実験条件(実験No.O-2及びO-2.5)では目標スランプの範囲(17±2.5cm)に対して小さかった。このスランプが小さかった実験条件では, コンクリートの吐出量が低下し, 急結剤の実添加率が増加する結果であった。

3.2 初期強度

図3に初期強度試験の結果算定した推定圧縮強度を, 図4に空気圧ピン貫入法とブルアウト法の両試験結果を対比して示す。

図3から, 材齢3時間における推定圧縮強度は1.5~3.5 N/mm²であり, 材齢24時間ではいずれも13 N/mm²以上に達し, 十分な初期強度に発現していることが分かる。また急結剤の実添加率が大きかった実験No.O-2及びO-2.5では初期強度が大きくなっていると思われる。このことを勘案すると, 吹付け距離の影響はほとんど見られないこと, 高強度配合(C-450)の初期強度は普通配合(C-360)よりも大きいこと, などが分かる。

空気ピン貫入法による推定圧縮強度は, 円柱供試体の強度に一致するような換算式を用いてピンの貫入深さから求めているが³⁾, 今回の実験においては図4に示すようにブルアウト法の推定圧縮強度とほぼ1:1の対応が認められた。

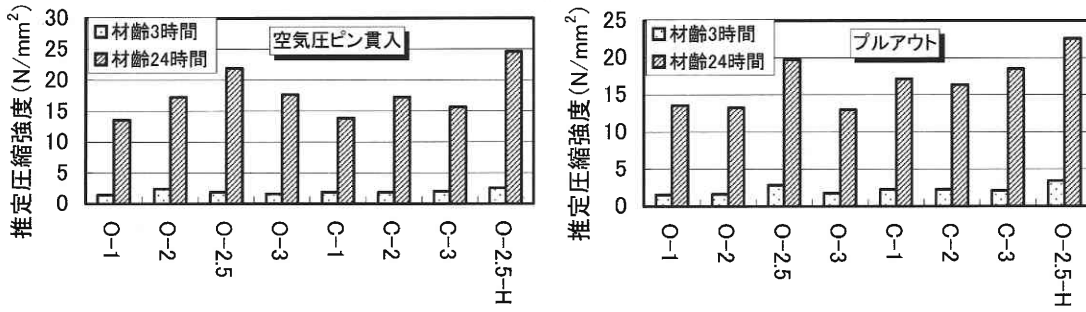


図3 初期強度試験結果

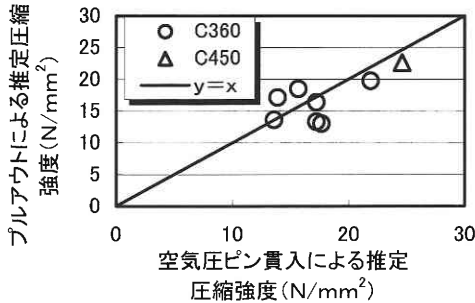


図4 初期強度試験結果の比較

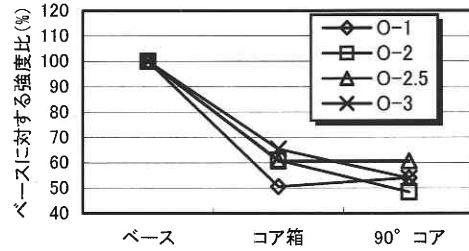


図5 (a) 圧縮強度ベース比 (圧送空気量:開放)

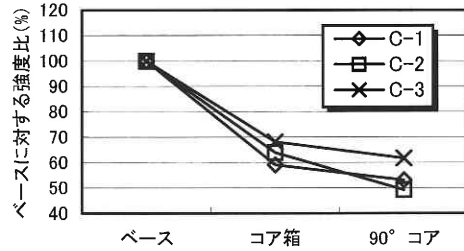


図5 (b) 圧縮強度ベース比 (圧送空気量:下限)

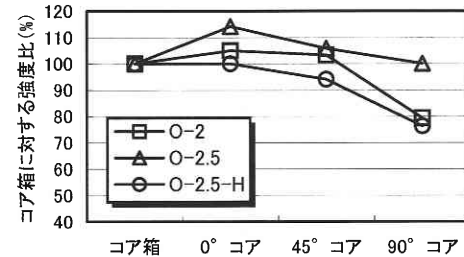


図6 コア採取部位ごとのコア箱比 (圧縮強度)

3.3 長期強度,単位容積重量

図5 (a), (b) に材齢28日の圧縮強度に対するベース比を, 図6に吹き付けたトンネル部位のコア強度に対するコア箱比, 図7に単位容積質量のコア箱比の関係を示す。

図5 (a), (b) から圧縮強度のベース比はコア箱で約50~70%, 90°コアで約50~60%の範囲にあることが分かる。また, 吹付け距離が1mの場合にはコア箱の圧縮強度が低下する傾向が認められるが, ノズル先端が移動できず, 強すぎる吹付け力が吹き付けられた直後のコンクリートを押しつけ, 吹付け圧による締固め効果が期待できなかった影響と思われた。

図6から, コア採取部位に関するコア箱強度比は0°コア > 45°コア > 90°コアの順に小さく, 天端付近に吹き付けることによる強度低下(コア箱に対して80%程度)が認められる。これは, 天端に近いほど吹き付けられた直後の硬化が不十分な段階で自重が作用するためと考えられ, 既往の研究成果にも示されているように⁴⁾, 実トンネルに吹き付けられたコンクリートの最低強度は天端部であることが確認された。この傾向は図8に示す単位容積質量のコア箱比によっても確認される。

また, コア箱とほぼ同様な吹付け条件である0°コアの強度比はいずれも100%を超えており, 合板より剛性の高い岩盤の方が吹付け時のたわみによる圧力の吸収が生じに

くいため, 吹き付け圧がより有効に締固め効果として発揮されるため, 圧縮強度の面で有利であると思われ, 吹付けコンクリートの圧縮強度は地山特性の影響を受けると考えられた。

上記のことから、吹き付けられた後のコンクリートの圧縮強度が設計で要求される場合、この吹き付け作業による強度低減率（吹き付け強度低減率と略記、本実験では 50～60%）を広範に明らかにし、この低減率で除した圧縮強度を練混ぜコンクリートの目標強度とすることで合理的な支保を設計する必要があると考えられた。

3.4 空隙率

図 8 に吹き付け距離と空隙率の関係、図 9 に空隙率とコアの圧縮強度との関係を示す。

ベースコンクリートの空隙率が 16～19%であったこと

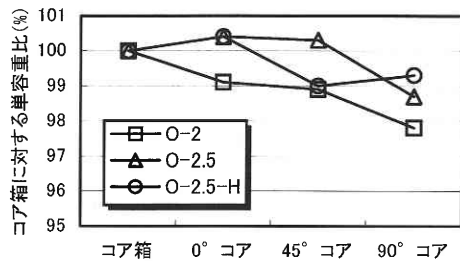


図 7 コア採取部位ごとのコア箱比（単位容積重量）

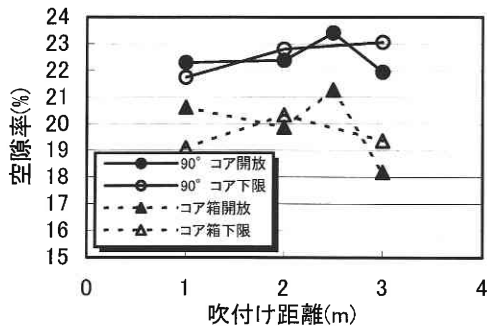


図 8 吹き付け距離と空隙率の関係（普通強度）

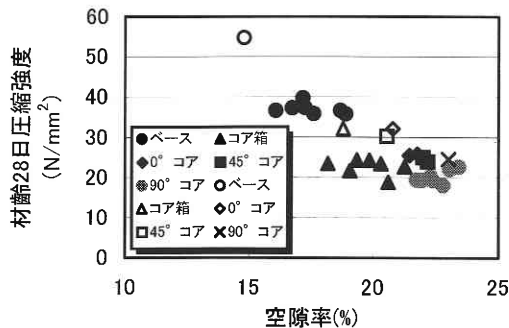


図 9 空隙率と圧縮強度の関係（白：高強度）

から、図 8 より空隙率はベース<コア箱<90° コアの順であることが分かり、また、圧送空気流量開放の場合には吹き付け距離が 3m の方が（2.5m は急結剤が過添加のため除外）、下限の場合には 1m の方が空隙率が小さい傾向にあることが分かる。

図 9 から、空隙率の増加に伴って圧縮強度が低下する傾向が見られ、吹き付けコンクリートの強度には空隙率と急結剤添加率が大きく影響するとの既往の研究成果⁵⁾とほぼ同様な傾向が認められた。

4. ま と め

実際のトンネルにおいて吹き付け実験を行った結果、以下の点が明らかになった。

- (1) 初期強度試験において、空気圧ピン貫入法とプルアウト法による推定圧縮強度はほぼ 1 : 1 の関係が認められた。
- (2) 吹き付けコンクリートの圧縮強度は水平部より天端部の方が小さく、水平部ではパネル型枠より大きい、天端部ではパネル型枠に対して 80% 程度の圧縮強度であった。
- (3) 吹き付け作業によって圧縮強度は低下し、天端付近の吹き付け強度低減率は練混ぜコンクリートに対して 50～60% であった。

謝 辞

今回、現場において吹き付け実験を行うに当たり、ご理解とご協力を頂戴し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五里ヶ峯トンネル西作業所 前田建設工業・本間組共同企業体の皆様には深く感謝致します。

(2002年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネルコンクリート施工指針（案），コンクリートライブラリー 102, 2000.7
- 2) 石関嘉一ほか：吹き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
- 3) 岩城圭介ほか：空気圧を用いたピン貫入試験による吹き付けコンクリートの強度管理方法の提案，土木学会論文集，No. 644, VI-46, pp. 99-112, 2000.3
- 4) 安藤慎一郎ほか：吹き付けコンクリートの品質に及ぼす各種吹き付け条件の影響，コンクリート工学年次論文集 Vol. 21, No. 2, pp. 1351-1356, 1999.6
- 5) 魚本健人：吹き付けコンクリートの特性と技術の現状，コンクリート工学，Vol. 37, No. 8, pp. 3-13, 1999.8