

# 小型載荷試験装置を用いた 吹付けコンクリートの若材齢における 応力～ひずみ特性に関する検討

A Consideration on the Stress-Strain Property of Shotcrete  
at a Young Age using Small Loading Test Equipment

中谷篤史<sup>1</sup>・高橋圭一<sup>2</sup>・熊坂博夫<sup>3</sup>・石田 積<sup>4</sup>・岩崎昌浩<sup>5</sup>  
Atsushi Nakaya, Keichi Takahashi, Hiroo Kumasaka, Atsumu Ishida  
and Masahiro Iwasaki

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 技術研究所 研究開発支援センター (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

E-mail:nakaya@shimz.co.jp

<sup>2</sup> 清水建設株式会社 技術研究所 研究開発支援センター (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

<sup>3</sup>正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター (〒135-8530 江東区越中島3-4-17)

<sup>4</sup> 学博 電気化学工業株式会社 無機材料研究センター (〒949-0393 新潟県糸魚川市青海2209)

<sup>5</sup> 電気化学工業株式会社 無機材料研究センター (〒949-0393 新潟県糸魚川市青海2209)

For design to stabilize the tunnel, it is necessary to identify the properties of shotcrete of developing rigidity at a young age (three to four hours) and mechanical properties beyond the peak strength. In this study, small loading test equipment that could be operated in the field was produced to conduct an unconfined compression test under constant strain loading. This paper describes the test results.

Shotcrete at a young age saw the stress reduced slowly at the peak strength. Thus, shotcrete was not subjected to any brittle failure as originally expected but exhibited high ductility. Strain decreased beyond the peak strength more moderately where less time elapsed after the application of shotcrete. Conversely, stress decreased with the increase of strain at a greater margin where more time elapsed.

**Key Words :** *properties of shotcrete, peak strength, small loading test equipment*

## 1. はじめに

大深度あるいは地山のもつ強度が小さい場合、地山強度比が小さく、このようなトンネルを建設するには、最終的なトンネルの安定性を確保することに加えて、掘削直後の切羽近傍の安定性を確保することも重要となる。

山岳トンネルの標準工法の一次支保は、吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルトが主な支保部材であり、掘削によって生じる地山の応力変化や変形などを生じさせる掘削応力の再配分過程において、周辺地山の支保機能を十分に発揮させ、安定化を図るために用いられる。

特に、吹付けコンクリートは、掘削後直ちに地山に密着させて施工することができ、断面形状と寸法

に左右されにくく、点や線状に支保するロックボルトや鋼製支保工と比べ、面状に支保するため、支保工の主要な部材といえる。

トンネルの切羽近傍を含めた安定性の検討では、掘進長や掘進速度と関連する吹付けコンクリートの若材齢の剛性発現特性が重要であることを既に報告している<sup>(1)</sup>。

このトンネル切羽近傍の吹付けコンクリートには、切羽の進行により周辺地山の変形を拘束しようとすることで、その反力として荷重を受ける。このため、吹付けコンクリートの材料試験では、荷重載荷条件ではなく、ひずみ載荷条件に近いと考えられる。

以上のことを踏まえ、本論文では、トンネルの安定性の検討・設計に重要な吹付けコンクリートの若材齢時のピーク強度以降の応力～ひずみ関係も含め

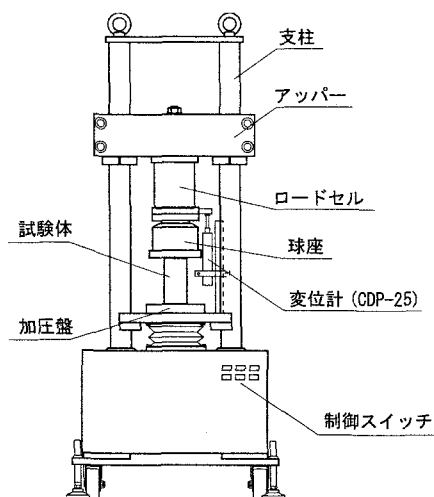


図-1 小型載荷試験装置の概要図

た力学特性を把握することを目的として、現場において試験可能な小型の載荷試験装置を製作し、トンネル側壁で施工された吹付けコンクリートを用いた若材齢の応力～ひずみ特性を検討した結果を報告する。

## 2. 試験装置と載荷試験

### 2. 1 試験装置の概要

「吹付け直後の載荷試験を行うこと」「ピーク強度以降の力学特性を把握すること」を目的としているため、現場において定ひずみ載荷条件で試験を行える装置を製作した。今回製作した小型載荷試験装置の概要と装置の仕様を図-1と表-1に示す。

### 2. 2 載荷条件の相違による影響の確認

室内試験において、小型載荷試験装置と高剛性の載荷試験装置（MTS社製）を用いて、同一の載荷条件で試験を実施し、小型載荷試験装置で得られる物性値の載荷方法による影響を確認した。また、JIS規格の試験方法で得られる物性値と比較するため、荷重制御での試験を実施した。試験のケースを表-2に示す。なお、試験にはモルタル供試体（ $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ ）で軸ひずみの測定にはひずみゲージを用いた。

試験ケースAとBの応力～ひずみ曲線を図-2(a)に、試験ケースAとCの応力～ひずみ曲線を図-2(b)示す。また、試験から得られた物性値を表-3に示す。これらより、試験装置や載荷条件によって、弾性係数や破壊ひずみに違いがなく、また、JIS規格の試験との比較においても、破壊ひずみや弾性係

表-1 小型載荷試験装置の仕様

|               |                                 |
|---------------|---------------------------------|
| 試験体寸法 (mm)    | $\phi 50 \times h100$           |
| 最大荷重 (kN)     | サーボモーター<br>スクリュージャック式<br>(変位制御) |
| 載荷方式          | 150                             |
| 載荷速度 (mm/min) | 0.033～16.67                     |
| 重量 (kg)       | 約 125                           |
| その他           | レベラー付キャスター                      |

表-2 室内確認試験の載荷条件

| 試験ケース | 載荷条件     |      |            |
|-------|----------|------|------------|
| A     | 高剛性試験装置  | 変位制御 | 0.15mm/min |
| B     | 高剛性試験装置  | 荷重制御 | JIS 規格     |
| C     | 小型載荷試験装置 | 変位制御 | 0.15mm/min |

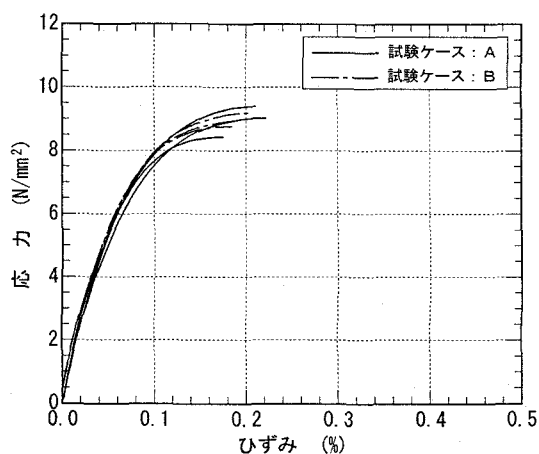


図-2(a) 応力～ひずみ曲線（試験ケースA, Bの比較）

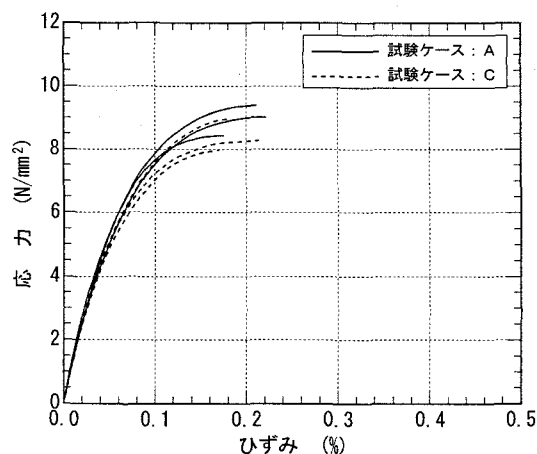


図-2(b) 応力～ひずみ曲線（試験ケースA, Cの比較）

数に違いがないことを確認した。

### 2. 3 軸ひずみ計測方法についての検討

事前検討により、軸ひずみは以下の計測方法により相違があることが明らかとなった。

- ①ひずみゲージによる計測
- ②コンプレッソメータータイプによる計測
- ③载荷盤間の変位計 (CDP-10) による計測
- ④装置の変位計 (CDP-25) による計測

①と②による弾性係数はほぼ同じとなることがわかったが、③と④はそれらよりも小さな値 (小さな勾配) になった。これは端部の影響と考えられる。ピーク強度以降の勾配は③と④で大きな相違がみられないことより、②と④を併用して载荷試験を行い、若材齢の吹付けコンクリートの応力～ひずみ特性を求めることとした。軸ひずみ計測機器の設置状況を図-3に示す。

### 3. 現場吹付けコンクリートの力学試験

#### 3. 1 試験の概要

トンネル側壁において吹付けコンクリートの施工試験を行った。吹き付け後、ボーリングを行いコアを採取し、若材齢における一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験に用いたコア番号と試験材齢を表-4に示す。コア番号は採取位置を意味しており、No. 5は吹付け終了直前の位置である。吹付け状態はNo. 2の方が良かったことより、材齢3時間で試験することが必要だったためNo. 5のコアを利用したが、これ以外はNo. 2のコアを用いた。

#### 3. 2 試験結果と考察

一軸圧縮試験は材齢 3 Hr, 6 Hr, 1 Day, 7 Day, 28Day でそれぞれ3供試体を用いて実施した。試験ケースを表-4に示す。各材齢において、コンプレッソメータータイプの計器での計測と装置の変位計 (CDP-25) での計測による代表的な応力～ひずみ曲線を図-4と図-5に示す。材齢と一軸圧縮強度の関係および材齢と弾性係数の関係をそれぞれ図-6、図-7に示す。また、コンプレッソメータータイプの計器での計測から得られた物性値を表-5に示す。

また、図-5の応力～ひずみ曲線を用いて、ピーク強度の95～90%の割線勾配とピーク強度とひずみ1%の割線勾配から求めた材齢とひずみ軟化勾配を図-8に示す。

なお、No. 5の結果は他のNo. 2と若干異なる傾向を持っている。この施工時に同時に実施した箱吹きしたブロックから作製した供試体の材齢3時間の力学

表-3 モルタル供試体による試験結果

| 試験ケース | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 破壊軸ひずみ<br>(%) | 静弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|------------------------------|---------------|--------------------------------|
| A     | 8.99                         | 0.20          | 12.2                           |
| B     | 8.97                         | 0.19          | 11.4                           |
| C     | 8.46                         | 0.19          | 11.5                           |

表-4 一軸圧縮試験に用いたコア番号と試験材齢

| コア No. | 3Hr | 6Hr | 1Day | 7Day | 28Day |
|--------|-----|-----|------|------|-------|
| No. 2  |     | ○   | ○    | ○    | ○     |
| No. 5  | ○   |     |      |      |       |

载荷条件：変位制御 0.15mm/min

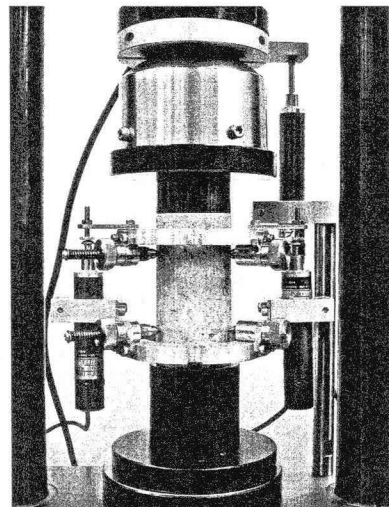


図-3 供試体の軸ひずみ計測機器の設置状況

試験結果では、一軸圧縮強度と弾性係数がそれぞれ 19N/mm<sup>2</sup>, 18kN/mm<sup>2</sup>程度となっており、吹き付け状況の影響を受けていると考えられる。

これらの図より、以下のことがわかる。

- ①吹付けコンクリートの一軸圧縮強度は材齢とともに大きくなるがわかる。
- ②吹付けコンクリートの弾性係数も材齢とともに大きくなるがわかる。
- ③一軸圧縮強度の応力に達したときのひずみは、材齢とともに小さくなる。
- ④ピーク強度以降のひずみ軟化勾配は材齢とともに大きな勾配となる。

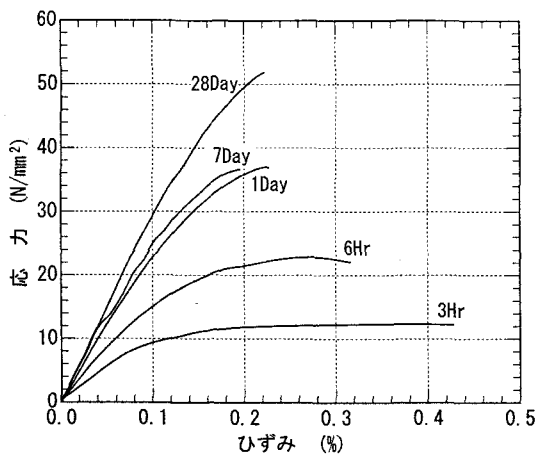


図-4 コンプレッソメータータイプの計器の計測による  
応力～ひずみ曲線

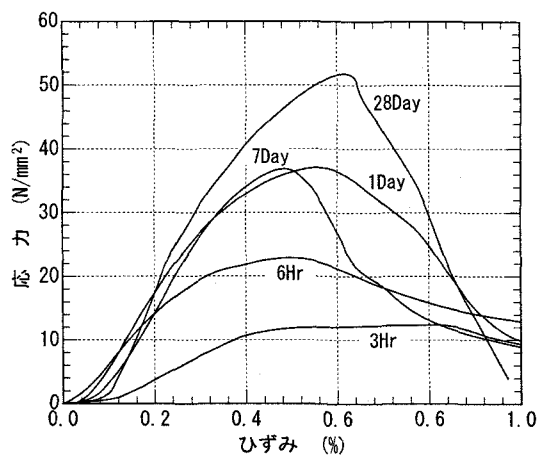


図-5 装置の変位計 (CDP-25) の計測による  
応力～ひずみ曲線

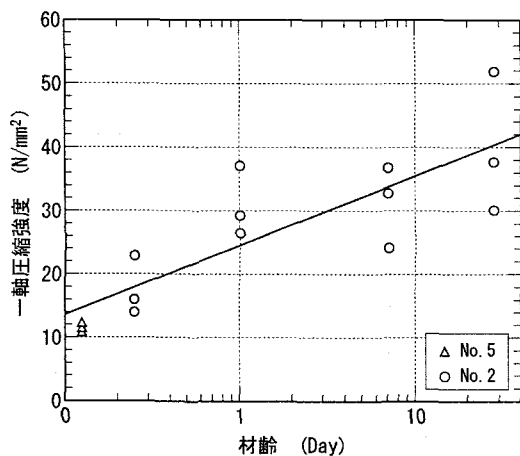


図-6 材齢と一軸圧縮強度の関係

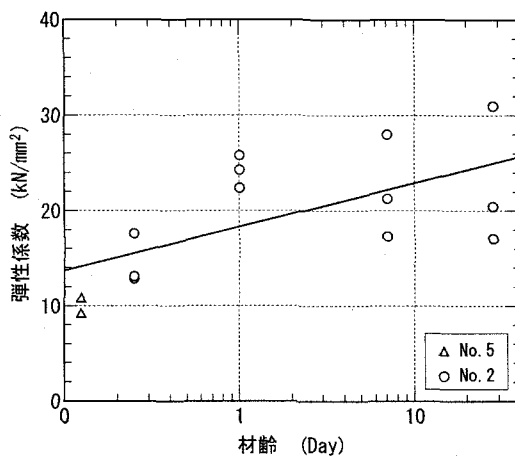


図-7 材齢と弾性係数の関係

表-5 現場供試体による試験結果

| 材齢    | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 破壊軸ひずみ※<br>(%) | 静弾性係数※<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|------------------------------|----------------|---------------------------------|
| 3Hr   | 11.6                         | 0.33           | 10.1                            |
| 6Hr   | 17.7                         | 0.26           | 14.5                            |
| 1Day  | 31.0                         | 0.22           | 24.2                            |
| 7Day  | 31.3                         | 0.22           | 22.2                            |
| 28Day | 39.9                         | 0.21           | 22.9                            |

※コンプレッソメータータイプの計測結果

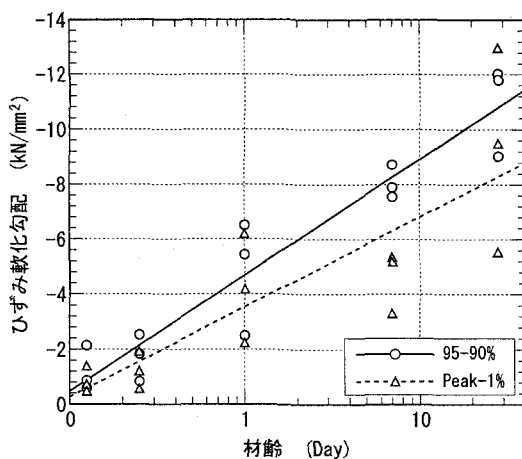


図-8 材齢とひずみ軟化勾配の関係

- ⑤材齢 3 Hr, 6 Hrではピーク強度のひずみの 2 倍のひずみ ( $\approx 1\%$ ) でも, ピーク強度の半分程度の強度を有する.

以上のように, 若材齢の吹付けコンクリートは, ピーク強度において応力は緩やかに低減し, 当初想定していたような脆性的な破壊現象を生じず高い靱性を持つ挙動を示した.

また, ピーク強度以降のひずみ軟化挙動は吹き付け後の経過時間が短いほど緩やかであり, 逆に, 時間が経つとともにひずみの増加に伴う応力低下が大きい傾向にあることがわかった.

#### 4. おわりに

安定性に関し厳しい条件下や高速掘進を行うトンネル施工では, 吹付けコンクリートは吹き付け直後から大きな地圧を受けることが予想される. このため, 若材齢における吹付けコンクリートの強度特性と剛性発現特性を把握するために, 実際のトンネルにおいて吹き付け試験を実施し, そこで採取した供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した. その結果, 若材齢の吹付けコンクリートは当初想定していたよりも高い靱性を持つことがわかった.

今後もデータの蓄積を行うとともに, これらの吹付けコンクリートの力学特性を考慮したトンネルの安定性の設計方法について検討を進めたい.

#### 参考文献

- 1) 熊坂博夫: 掘進長と吹付けコンクリート硬化速度が支保特性曲線に及ぼす影響について, トンネル工学研究論文集, 第 14 巻, pp. 35-44, 土木学会, 2004. 11.