

# トンネル覆工の力学挙動を捉える実験技術

構造物技術研究部 トンネル研究室  
主任研究員 岡野法之

## 1. はじめに

トンネルは明かり構造物とは異なり、周囲を地山（岩や土）に囲まれた構造物である。そのため、トンネル覆工の力学挙動を捉えるには、トンネル覆工背面に存在する地山を考慮する必要がある。そこで、鉄道総研では、トンネルの力学的健全度評価法や補修法を確立するため、トンネル覆工と覆工背面の地山との相互作用を考慮可能な実験装置を用いて、トンネルの力学挙動の解明を進めている。

トンネル覆工に関する模型実験は、覆工模型を直接載荷する直接載荷実験と、模擬地山を介して荷重を覆工模型に作用させる間接載荷実験とに大別できる。鉄道総研ではその両方のタイプの実験装置を所有しているので、本報では、それら装置の概要および実験結果の一例を紹介する。

## 2. 覆工模型を直接載荷する実験装置

覆工模型を直接載荷する実験装置としては、昭和63年度に複線トンネル用小型覆工模型実験装置が、平成3年度に単線トンネル用小型覆工模型実験装置が、平成17年度に大型覆工模型実験装置を製作し、現在まで数多くの実験ケースを実施している。

ここでは、複線トンネル用の小型模型実験装置および大型覆工模型実験装置について述べる。

### 2.1 小型覆工模型実験装置

#### (1) 概要

実験装置は、載荷用部材、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、底板等からなる。載荷用部材は覆工模型断面に放射状に11組、軸方向に11列設置されており、載荷板、反力板、載荷用ボルトおよび硬質円筒形ゴムから構成されている（図1、図2）。載荷板および反力板は覆工模型外周面に面で接触するように曲率を有しており、その大きさは、二次元の実験を実施する際の模型の奥行き60 mmに合わせ、55 mm×55 mmとなっている。載荷用ボルトは反力フレームにねじ込む外側ボルトと、載荷板あるいは反力板と直接接続されている内側ボルトの2重ねじ構造となっている。内側のボルトによりゴムの圧縮・解放を行うことが可能で、載荷箇所以外はゴムの弾性力により地盤反力を表現できる。また、載荷箇所については、円筒形

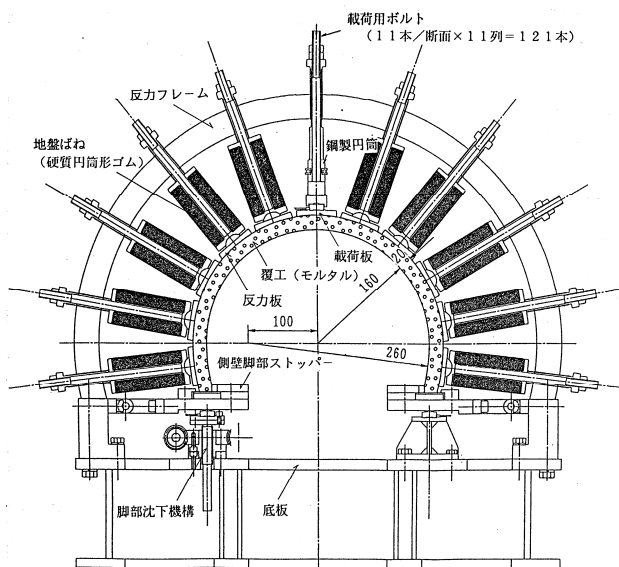


図1 小型覆工模型実験装置正面

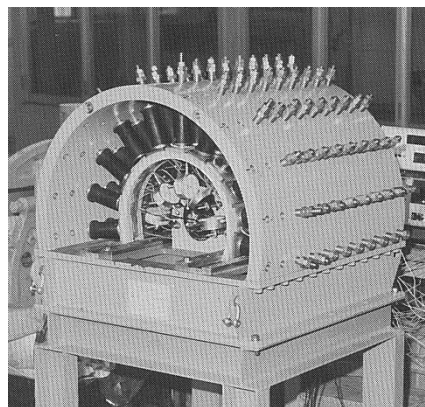


図2 装置全景写真

ゴムを鋼製円筒管に交換して外側のボルトをねじ込むことにより載荷板を介して直接覆工に変位を与えることができる。

現在まで、覆工材質（無筋モルタル、鉄筋モルタル、モルタルブロック）、地盤の剛性、載荷方向、欠陥（背面空洞、巻厚不足）、対策工、二次元・三次元といったパラメータを変化させ、様々な影響を検討してきている。

## (2) 実験結果の一例

二次元水平載荷の実験結果の一例（載荷重Pと内空変位uとの関係）を図3に示す<sup>1)</sup>。

Case1が健全な条件、Case2が天端部背面に空洞がある条件、Case3がCase2と同様の空洞があるが荷重低下時に対策工（裏込め注入）を施工した条件である。

本結果は、トンネルは背面空洞の存在により変形および耐荷性能が著しく低下すること、しかし、しかるべき時期に裏込め注入を施工することにより、それら性能を健全な状態とほぼ同等まで回復させることが可能であることを示している。

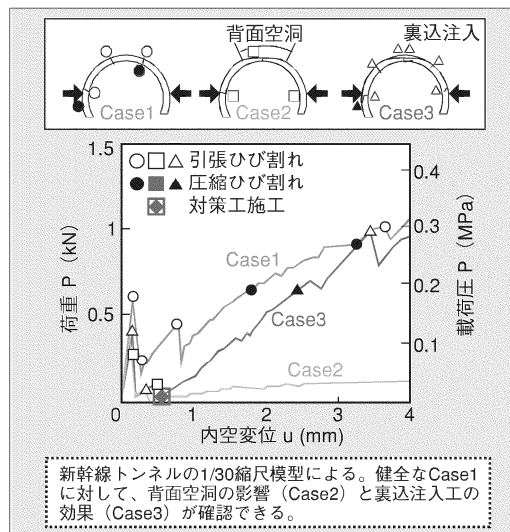


図3 実験結果の一例

## 2.2 大型覆工模型実験装置

### (1) 概要

実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺1/5であり、反力フレーム、反力用油圧シリンダ、載荷用油圧シリンダからなっている（図4、図5）。基本的な概念は小型覆工模型実験装置と同様であるが、模型の材質を実際の覆工と同様のコンクリートとすることができるのが最大の特徴である。

供試体の周囲に地盤ばねを模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねを配置しており、載荷用油圧ジャッキで与えた供試体の変形負荷を皿ばねの変形で受けることにより、覆工と地盤の相互作用を模擬している。各装置の仕様を以下に示す。

- ・載荷用油圧ジャッキ

最大載荷圧：500 kN（載荷板5.6MPa）

ストローク：250mm

- ・反力用油圧シリンダ

内径：φ125，ストローク：200mm

- ・皿ばね

寸法：外径200mm×内径102mm×厚さ12mm

ばね定数：3000kN/m（皿ばね20枚/1ヶ所）

地盤反力係数換算：16MN/m<sup>3</sup>

現在まで、覆工材質（無筋コンクリート、鉄筋

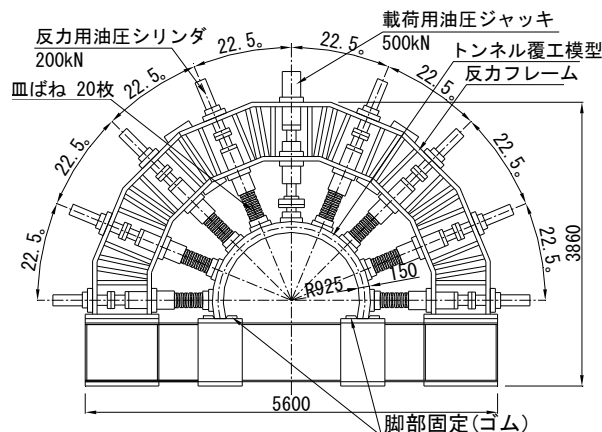


図4 大型覆工模型実験装置正面



図5 実験装置全景

コンクリート，繊維補強コンクリート，れんが積み，欠陥（背面空洞），対策工といったパラメータを変化させ，様々な影響を検討してきている。

## (2) 実験結果の一例

ここでは，小型覆工模型実験では評価が困難な繊維補強コンクリート覆工に関する実験について，結果の一例（載荷荷重と天端沈下量との関係）を図6に示す<sup>2)</sup>。なお，背面空洞等の欠陥はない条件のものである。

Case A が繊維補強なしのコンクリート（プレーンコンクリート），Case B が鋼繊維を 0.5Vol% 混入したコンクリート，Case C がポリプロピレン繊維（PP 繊維）を 0.5Vol% 混入したコンクリートである。

繊維補強されたCase B，Case CをプレーンコンクリートのCase Aと比較すると，圧ぎ発生時の荷重および最大荷重が35 kN～45 kN程度大きく，繊維を混入することにより耐荷性能を向上することが分かる。

しかし，鋼繊維補強コンクリートとポリプロピレン繊維補強コンクリートの圧ぎ発生時の荷重および最大荷重の差はほとんどなく明確な違いは見られず，トンネルの場合，ポリプロピレン繊維でも耐荷性能の向上に寄与することを把握した。

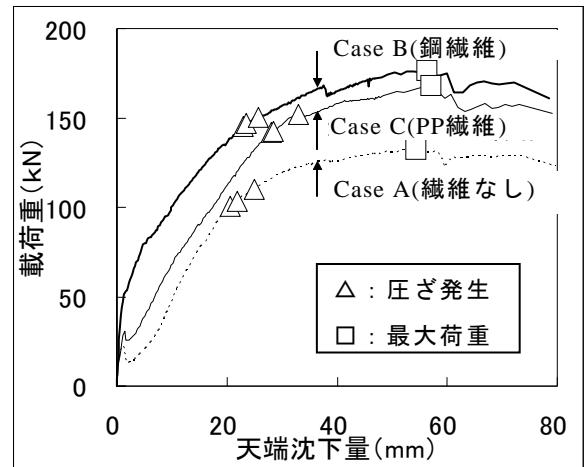


図6 実験結果の一例

## 3. 模擬地山を介して覆工模型を載荷する実験装置

### (1) 装置の概要

実験装置（図7）は新幹線トンネル断面の縮尺1/50で，土槽（600 mm×600 mm×300mm），反力フレーム，載荷用ジャッキ（200 kN），ロードセル，載荷板等からなっている。土槽の中にモルタル製覆工模型をセットし，その外周に模擬地山（低強度モルタル）を充填し，載荷板をジャッキにより載荷する（図8）。ジャッキは油圧により制御され，ジャッキの載荷による載荷板の変位が模擬地山を介して覆工模型に伝わる構造となっている。

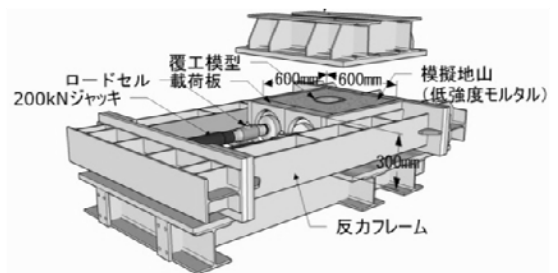


図7 実験装置

覆工模型の材質は無筋のモルタルであり，インバートの有無，欠陥（背面空洞，巻厚不足），対策工といったパラメータを変化させ，主に山岳トンネルの変形性能の評価や路盤ロックボルトの評価などに供してきている。

### (2) 実験結果の一例

ここでは，地質不良区間におけるトンネルの対策工の選定法を示すことを目的に実施した実験結果の一例を示す<sup>3)</sup>。実験ケースは，背面空洞があるが対策を実施しないケース1を基本とし，図9に示す5ケースである。なお，図中，「裏注」は裏込め注入を，「RB」はロックボルトを示す。

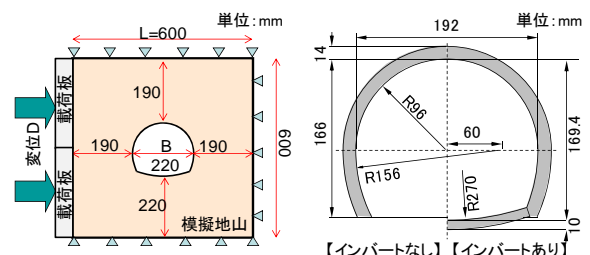


図8 土槽とトンネル模型の寸法

ケース1 空洞あり	ケース2 裏注	ケース3 裏注+路盤RB	ケース4 裏注+内面補強	ケース5 裏注+インバート
		 線路方向40mm間隔		

図9 実験ケースの模式図

覆工の変状（ひび割れ，圧ざ）と盤膨れの観点から，それぞれの変状が初めて生じる地山のひずみ（ $D/L$ ， $D$ ：載荷板変位量， $L$ ：土槽の長さ）をまとめたものを図10に示す．ひび割れは，裏注+内面補強のケース4を除き，他の変状に先駆けて発生し，発生時のひずみは  $D/L=0.2\sim$

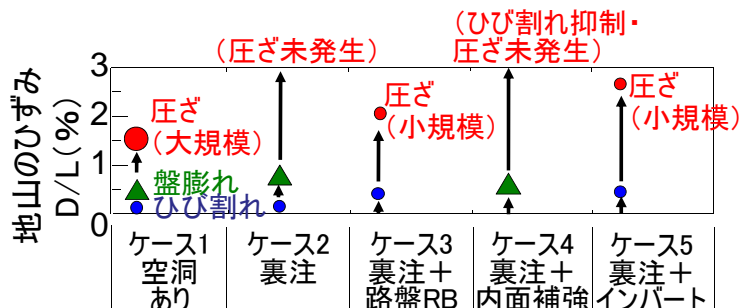


図10 実験結果の一例

0.5%程度である．盤膨れは，路盤RBがない，あるいはインバートがないケース1，ケース2，ケース4で発生し，ひずみは  $D/L=0.5\sim 1\%$ 程度である．圧ざは，背面空洞を有するケース1では  $D/L=1.5\%$ 程度で発生したが，ケース3，ケース5では  $D/L=2\sim 2.5\%$ 程度まで発生しないようになり，ケース2，ケース4では  $D/L=3\%$ においても発生しなかった．以上のことから，裏注により圧ざが，路盤RBにより盤膨れが，内面補強によりひび割れが，インバートにより，水平内空の縮小や盤膨れなどのトンネルの変形がそれぞれ抑制されることを把握した．

#### 4. おわりに

鉄道総研が所有しているトンネル覆工模型載荷実験装置の概要と実験結果の一例を紹介した．これらの実験を通じてトンネル覆工の力学挙動を明らかにし，健全度評価法や変状対策工の設計法等を提案してきているところである．

しかしながら，トンネル覆工の力学挙動については，まだまだ未解明な部分が多く，さまざまな課題が残されているので，今後ともこれら実験装置を活用し，トンネル工学の発展に寄与していきたいと考える．

#### 参考文献

- 1) 小島芳之，鶴飼正人：トンネルの健全度診断，Railway Research Review, Vol.63, No.5, p.17, 鉄道総合技術研究所，2006.5
- 2) 岡野法之，植村義幸，小島芳之，生駒末年馬，磯谷篤実：大型覆工模型実験による繊維補強コンクリート覆工の耐荷特性の把握，トンネル工学報告集，Vol.18, pp.143-148, 土木学会，2008.11
- 3) 野城一栄，嶋本敬介，小島芳之：地質不良区間における既設山岳トンネルの地震対策工の選定法，鉄道総研報告，Vol.25, No.2, pp.53-58, 鉄道総合技術研究所，2011.2