

## 鉛直荷重作用時の山岳トンネル覆工の挙動に関する実験的考察

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○河田皓介, 日下敦, 砂金伸治

### 1. はじめに

山岳トンネルが地震被害を受ける場合に生じる変形モードはせん断変形だけでなく、トンネル周辺の地山に鉛直もしくは水平圧縮変形が生じた可能性があると考えられている<sup>1)</sup>。これらの結果を踏まえてこれまでに、水平圧縮変形が作用する場合の覆工の被害メカニズムや対策工の効果を明らかにするための模型実験および数値解析を実施した<sup>2)</sup>。本検討では地山が鉛直圧縮変形した場合を想定した模型実験を実施し、覆工に被害が生じる際の挙動、ならびに対策工として内巻補強工（繊維シート）を実施した場合の効果について考察した。

### 2. 模型実験の概要

本模型実験は過去に実施した方法<sup>2)</sup>と同様とし、载荷方向を覆工模型の天端方向から行うものとした。模型実験の概要および実験模型の諸条件を図-1 および表-1 に示す。模型実験の規模は一般的な2車線道路トンネルの約1/20とし、周辺の地山を貧配合モルタル、覆工はプレーンモルタルを用いて模擬した。なお、内面補強工は炭素繊維シート（円周一方向、目付50g/m<sup>2</sup>）を天端から脚部まで設置した。

### 3. 模型実験の結果

図-2 に荷重と覆工内部の変位の関係を示す。ここで、鉛直変位は天端(90°)とインバート中心(270°もしくは-90°)の間、水平変位はSL部(0°と180°の間)を示している。両ケースにおいて荷重の増加とともに鉛直変位は縮小し、水平変位は拡大している。しかし、Case1は約500kN、Case2は約830kNの荷重を境に水平変位が内空方向に変化するとともに鉛直変位は急激に増加している。Case1は変化後に荷重変位曲線の傾きがゆるやかに変化している。Case2は変化後、荷重の増加は見られず変位の増加のみが見られる。

図-3 に微小変位時（地山変位が0.5mm時）の覆工内面(in)と外面(out)のひずみ分布を示す。なお、ひずみの値はプラスが引張、マイナスが圧縮を示す。Case1, 2ともに90°付近の内面でプラス、外面でマイナス、0°と180°付近の内面でマイナス、外面でプラスとなっており、天端と側壁に曲げが生じる変形モードとなっている。

図-4 に圧縮ひずみが最大となる点における覆工内外面のひずみ分布を示す。ここでは、水平変位が内空側へ変化する前において、側壁周辺の圧縮ひずみが最大となる点とした。この時の荷重はCase1が約470kN（図-2丸）、Case2は430kN（図-2三角）である。両ケースのひずみの分布形状は類似しており、Case1は90°の外面で-4000μのひずみが生じている。また、Case2においても、90°の内面で1000μ以上、外面で-2000μ以上のひずみが発生しており、天端では曲げが生じている。また、0°~60°と135°~180°では内面と外面がともにほぼマイナスの値であり、全圧縮となっている。加えて150°では-3000μ以上のひずみが発生しており圧縮等の変状が発生しているもの

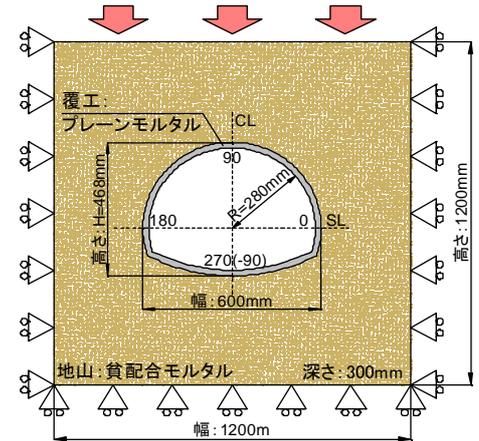


図-1 模型実験の概要

表-1 実験模型の諸条件

Case	対策工	地山		覆工	
		強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数	強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数
1	なし	0.43	115	24.7	14980
2	シート	0.47	88	32.3	17250

※強度は一軸圧縮強度である

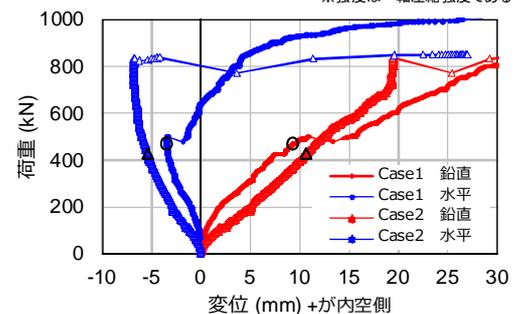


図-2 荷重と覆工内の変位

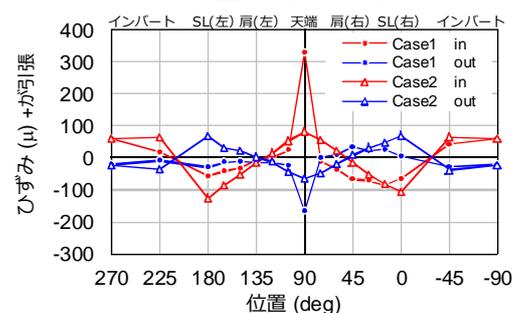


図-3 微小変位時の覆工のひずみ分布

キーワード 山岳トンネル, 模型実験, 耐震対策

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) TEL029-879-6791

と考えられる。さらに、インバートは $-45^\circ$ 、 $225^\circ$ において内面に $1000\mu$ 以上、外面に $-2000\mu$ 程度の曲げが発生している。

以上の結果から、本実験では覆工の強度が3割程度違うことなど条件の違いはあるが、覆工の破壊に近いひずみ分布の形状から天端で曲げ、側壁で全圧縮となる変形が生じていると考えられる。このような条件下で対策工を実施しても発生しているひずみ分布は両ケースで類似しており、側壁の圧縮ひずみの抑制は見られず、対策工による効果は明確ではなかった。また、図-3と4を比較するとひずみ分布の形状が異なる。これは、载荷の初期段階では側壁背面の地山から反力が取れず、側壁にも曲げが生じたものと考えられる。

図-5に覆工内面のひび割れ状況図を示す。ここで、Case2は炭素繊維シートを接着しているため、シートの亀裂やうきを示している。また、図中の数値はひび割れ等の発生時の荷重を示している。Case1は荷重約 $62\text{kN}$ で $90^\circ$ に縦断方向のひび割れが発生している。これは、図-3に示す、 $90^\circ$ の引張ひずみの発生する位置と荷重が一致しており、天端の引張により発生したものと考えられる。また、荷重約 $500\text{kN}$ で右側の側壁とインバートの接続部でひび割れと周辺部の破壊が生じており、図-2に示す水平変位の変化点と一致することから、同部の破壊により変形モードが変化したと考えられる。また、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $180^\circ$ 付近ではひび割れが発生しており、図-4に示す側壁のひずみが全圧縮となっていることから、圧ぎにより生じたものと考えられる。

Case2は荷重 $430\text{kN}$ で $150^\circ$ 付近でシートのはく離が見られた。図-4より、 $150^\circ$ の内外面でひずみが $-3000\mu$ を超えており、同部が圧ざしたことにより生じたものと考えられる。また、 $135^\circ$ から $180^\circ$ 付近においてシートに円周方向の亀裂やはく離が見られ、実験終了後には圧ぎによると考えられるひび割れが確認されている。また、 $-45^\circ$ でインバートが破壊したことにより、図-2に示す鉛直、水平変位の急激な変化が生じたものと考えられる。インバートのひび割れ等はCase1, 2ともに確認されており、側壁とのすり付け構造や半径の曲率等によって異なるが、インバート部の破壊が耐力に影響を及ぼした可能性があると考えられる。

4. まとめ

本実験による鉛直方向から载荷する方法により、地震による山岳トンネルの被害事例の一つである側壁に圧縮破壊が生じる変形モードをおおむね再現できていると考えられる。

シートによる対策工は天端付近で生じる可能性のある曲げによる引張ひずみやひび割れの発生を抑制する効果を期待したが、本模型実験の条件下では明確な効果は見られなかった。また、側壁に生じる圧ぎ等を抑制することはできないと考えられる。加えて、インバートの破壊が全体の耐力に影響を及ぼす可能性がある。

対策工を実施したケースでは荷重変位曲線が変化する荷重は大きくなり変化後の挙動にも違いが見られるが、対策の有無によらずひずみの分布が類似すること、覆工強度の違い、インバート部の破壊状況の違い等があるため、一概に対策工の効果による耐力の向上とは言い難い。今後は数値解析を用いた検討等さらなる効果の検証を行う必要があると考えられる。

参考文献

1) 日下ら：山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察，トンネル工学報告集，No.20，pp.1-8，2010  
 2) 日下ら：二次元静的载荷実験の再現解析による山岳トンネル耐震対策工の効果に関する一考察，第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.93-98，2015

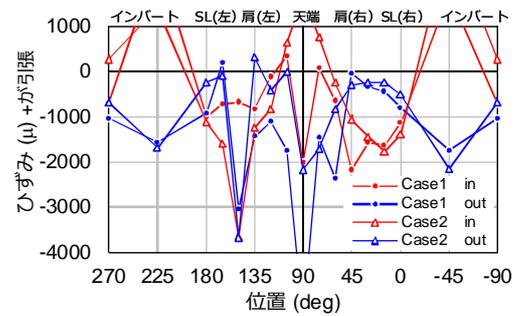
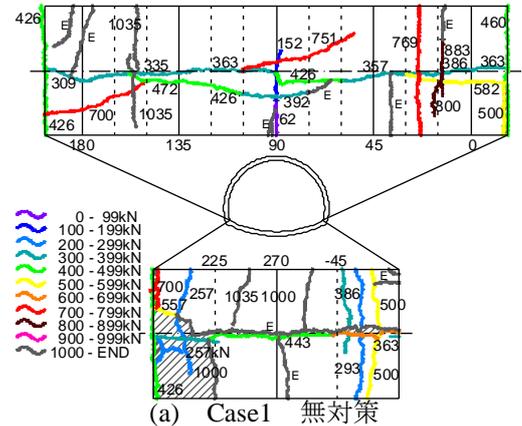
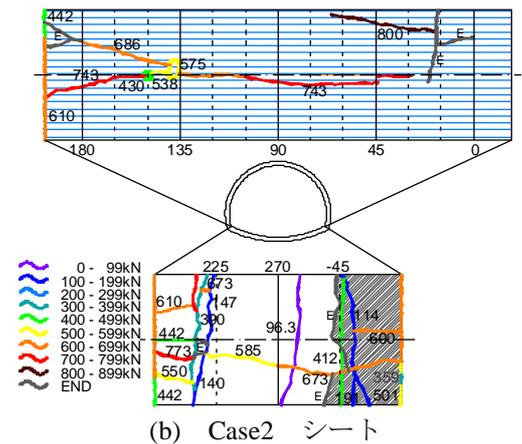


図-4 最大時の覆工のひずみ分布



(a) Case1 無対策



(b) Case2 シート

図-5 覆工内面のひび割れ状況