

## 戦-17 山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典，日下敦

### 【要旨】

これまで山岳トンネルは、経験的に地震の被害を受けにくいと言われてきたが、兵庫県南部地震や新潟県中越地震では、比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害が発生したトンネルが見られた。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを解明し、耐震対策が必要となるトンネル条件と効果的な耐震対策を確立する必要がある。

本年度は、坑口部等で事例の多い地震被害形態を対象として、地震時のインバートの効果について模型振動実験により検討を行った。その結果、地山のひずみレベルが小さい場合は、インバートの有無に関わらず、地震に対してトンネルは同様の挙動を示すことが分かった。ところが、地山のひずみレベルが大きくなってトンネルが内空に縮小する方向の外力が覆工に作用すると、インバートが無い場合は抵抗できず大きな変形を生じ、それとともに覆工のひずみレベルも増大することが分かった。

キーワード：山岳トンネル，地震被害，模型振動実験

### 1. はじめに

トンネルは地盤中に構築され、周辺地盤との相互作用で安定を保ち、地震時も周辺地盤と一体となって挙動することから一般に地震には強く、特に、開削トンネルやシールドトンネルに比較して地盤の良いところに非開削で構築される山岳トンネルにおいては、過去の経験からも地震の被害を受けにくいと言われてきた。しかし、平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震<sup>1)</sup>や平成 16 年 10 月の新潟県中越地震<sup>2)</sup>では、数は限られるものの比較的規模の大きい覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルがあった。これは、地震の大きさ、地山条件、トンネルの構造などによっては、山岳トンネルでも地震による被害を受ける可能性があることを示唆している。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを明らかにし、耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある。

本研究では、これまでに、地震被害の形態を図-1の5タイプに分類し、経験的に地震被害を受けにくいとされていた区間で比較的規模の大きな被害を生じた山岳トンネルの変状を再現することを目的とした現地調査や数値解析および模型実験等を実施してきた。その結果、当初 TYPE-III の被害形態に近いと思われた木

沢トンネルについては、現地調査により剛性が大きく異なる地質の境界面にトンネルが位置することが分かり、それらを忠実にモデル化することで、地震荷重を慣性力として作用させる静的 FEM 解析（応答震度法）により変状を概ね再現できること等が明らかとなった。

本年度は、坑口付近等で事例の多い TYPE-I の被害形態におけるインバートの効果について、模型振動実験により検討を行った。

### 2. 振動実験による軟質地山トンネルの地震時挙動

#### 2.1 実験の概要

実験は、図-2 に示すように、せん断土槽中に山岳トンネルを模擬した供試体を作製し、下面から正弦波を

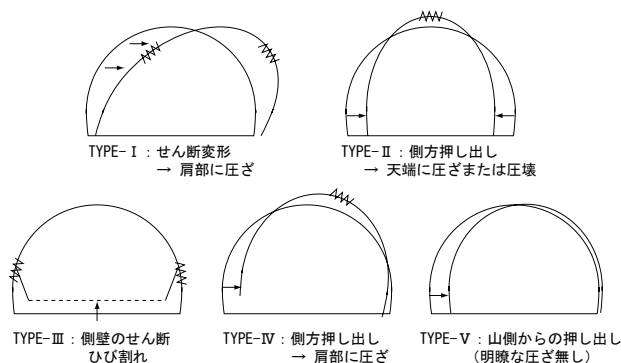


図-1 地震被害を受けたトンネルの変形モード

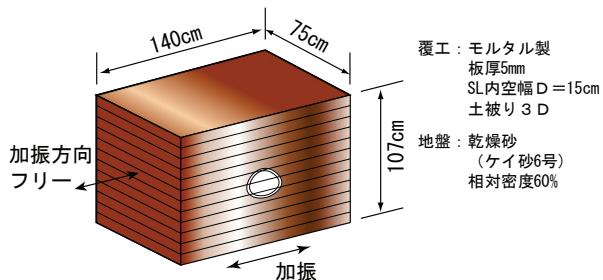


図-2 振動実験供試体の概要

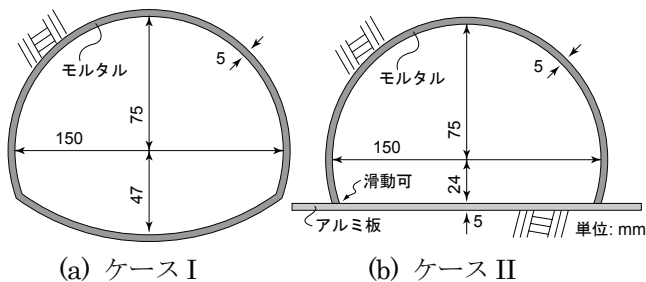


図-3 覆工模型の寸法

表-1 覆工模型材料の物性値

ケース	覆工模型の構造	一軸圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
I	インバート有り	52.12	2.47	28.11	0.26
II	インバート無し	50.20	2.39	20.34	0.24

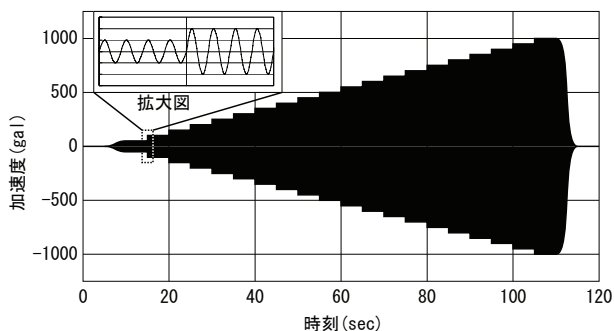


図-4 入力波形

入力することにより行った。せん断土層は、高さ約 5 cm のアルミニウム製のフレーム 20 段で構成され、加振方向に対しては変位を拘束しない構造となっている。トンネル覆工は SL 内空幅  $D = 15$  cm とし、5 mm 厚の高流動モルタルで作製した。載荷時の覆工模型の材料物性値は表-1 のとおりである。地山材料は、軟質地山を想定し、相対密度 60% の乾燥砂 (ケイ砂 6 号) とし、土被りは  $3D$  とした。本実験では、インバートによる挙動の差異を検討するため、図-3 に示すように、インバートを有するケース I と、インバートを設置せず脚部の内空側への変位を拘束しないケース II の 2 ケースで加振を行った。なお、ロックボルト等の支保工

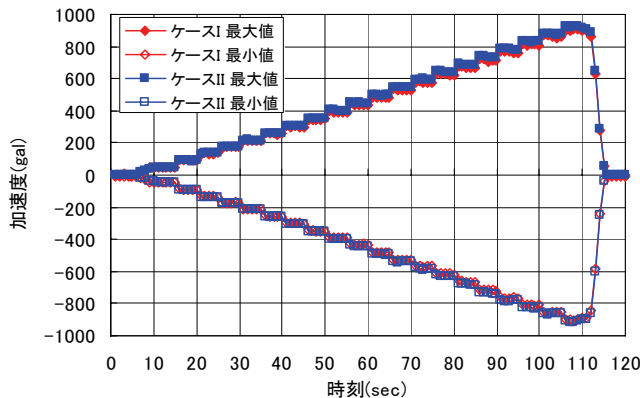


図-5 供試体底面加速度の 1 秒ごとの最大・最小

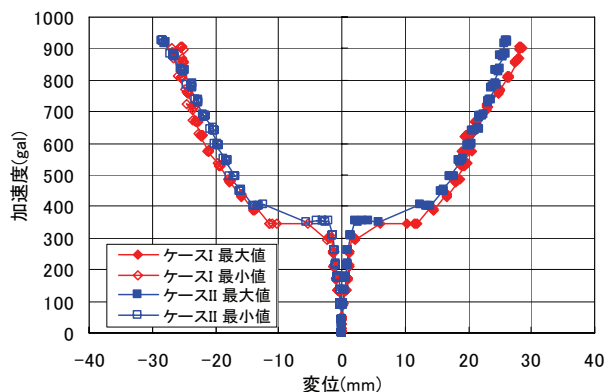


図-6 底面加速度とせん断土槽最上段の変位

は設置していない。

入力振動は、事前に行った 500 gal スウィープ加振で得られた供試体全体の固有振動数である 4 Hz の正弦波とし、図-4 に示すように 50 gal から 1000 gal まで 5 秒ごとに 50 gal ずつ加速度を増加させた。なお、乾燥砂は、せん断ひずみレベルの増加にもなってせん断剛性が低下する。これは、正弦せん断波を入力する本実験においては、加速度の増加にもなって剛性が低下し、固有振動数も小さくなることを意味している。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 地山の応答

図-5 は、実験で計測された供試体底面の加速度について、1 秒ごとに最大値と最小値をプロットしたものである。ケース I とケース II の加速度の時刻歴はほぼ同一で、図-4 に示した入力加速度と概ね一致し、正負ほぼ対称になっていることが分かる。

図-6 は、除荷直前の 105 秒までの、1 秒ごとの底面加速度の最大値と、せん断土槽最上段の変位の最大値・最小値の関係をプロットしたものである。この図から、両ケースとも地山は同様の挙動を示し、加速度

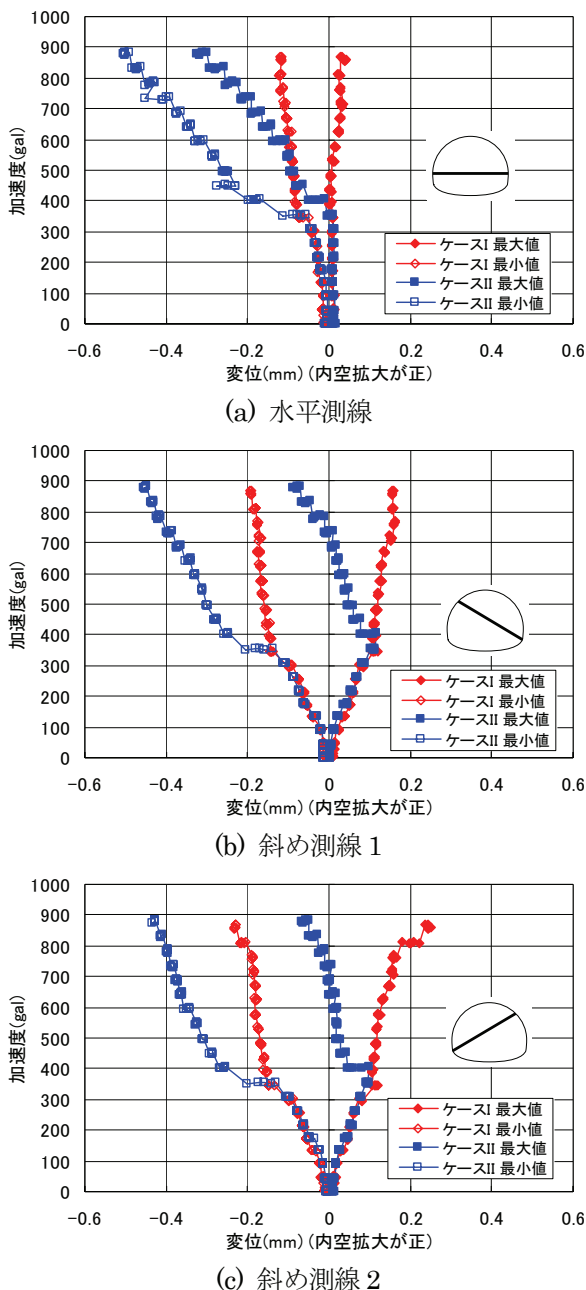


図-7 底面加速度とトンネル内空変位の関係

350 gal 付近を境に変位が急激に増大していることが分かる。これは、加速度が小さいときは、入力振動数が供試体の固有振動数と異なるため、共振現象が発生せず小さい変位に収まっているものの、加速度が増加するにつれ、共振現象が発生し、それにともなって変位が増大しているものと考えられる。

これらの結果から、ケース I とケース II の地山は、ほぼ同一の変形挙動を示し、350 gal 程度を境に共振現象を示すことが分かった。

### 2.2.2 覆工模型の応答

前項と同様に、底面加速度とトンネル内空変位の関

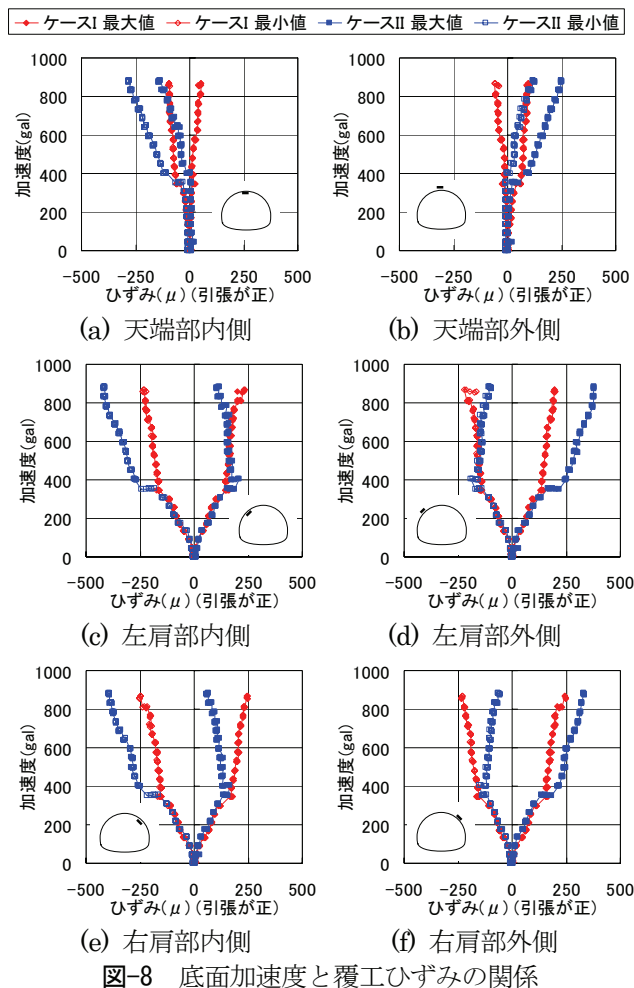


図-8 底面加速度と覆工ひずみの関係

係をプロットしたものを図-7 に示す。ケース I は、水平方向の伸縮と比較して斜め方向の伸縮が大きく、トンネル全体がせん断変形を受けるモードが卓越していると考えられる。地山の変形挙動が大きく変わる 400 gal 以降は、若干内空が縮小する方向へ変形モードがシフトしているものの、覆工の変形モードはほとんど変化していない。一方、ケース II は、地山が共振しない 300 gal 以下ではケース I と同様の変形モードを示したが、共振後の 400 gal 以降では、3 測線全てで内空が縮小する方向への変形モードとなった。

図-8 は同様に底面加速度と覆工ひずみの関係を示したものである。ケース I のひずみは、天端部よりも肩部の方が大きく、地山の共振発生に関わらず加速度にほぼ比例して大きくなり、正負対称に発生している。一方でケース II は、共振発生前はケース I と同様の挙動を示すものの、400 gal 以降では、天端部、右肩部とも内側のひずみが圧縮側へシフトするとともに外側のひずみが引張側へシフトした。これは、覆工が外に凸になる向きの曲げモーメントが作用している

ことを意味している。

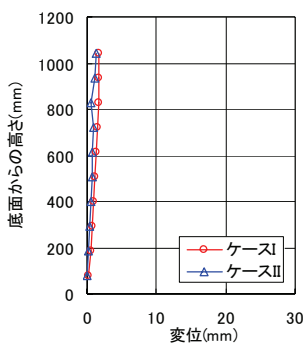
これらの結果から、表-2 に示すように、ケース I のトンネルの変形モードは、トンネル全体がせん断変形するモードが卓越し、地山に共振現象が発生しても変化しないことが分かった。しかしケース II は、地山に共振現象が発生する前はケース I と同様の変形モードを示すものの、共振現象発生後は側壁が内空側へ押し出す変形モードも現れることが分かった。

2.2.3 共振発生前後の挙動の差異

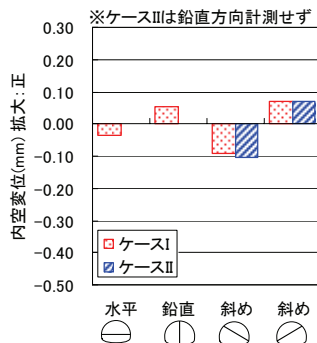
図-9 は、共振発生前の底面加速度 300 gal 付近において、肩部のひずみが極大となった時刻における変位とひずみの分布を示したものである。これらの計測値は位相の差がなく、ほぼ同時にピークに到達した。こ

表-2 トンネルの変形モード

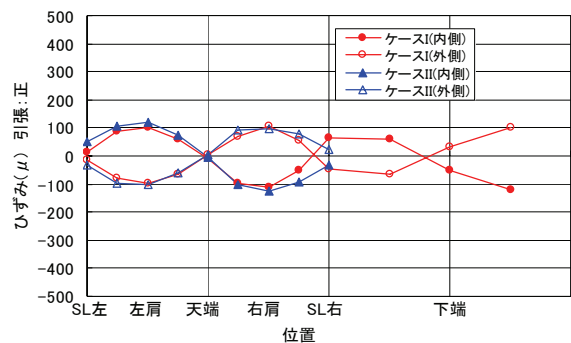
ケース	範囲	変形モード
I	全範囲	
II	300 gal以下	
	400 gal以上	



(a) せん断土槽の変位

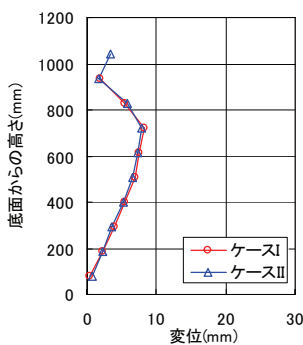


(b) トンネル内空変位

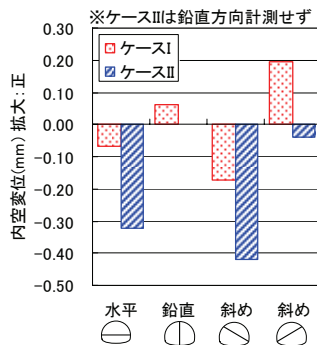


(c) 覆工のひずみ分布

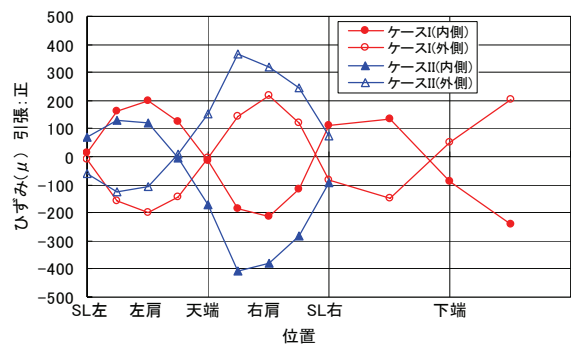
図-9 42.97 秒付近 (底面加速度約 300 gal) の肩部ひずみ極大時における供試体の挙動



(a) せん断土槽の変位

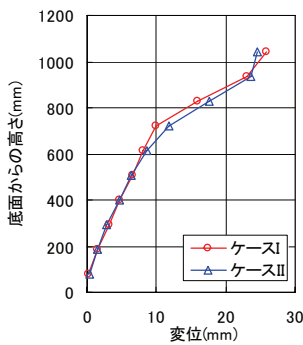


(b) トンネル内空変位

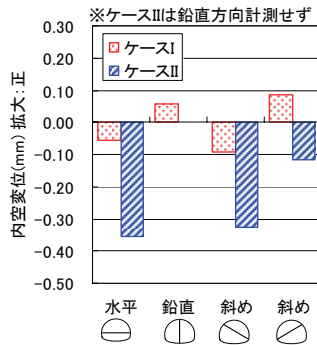


(c) 覆工のひずみ分布

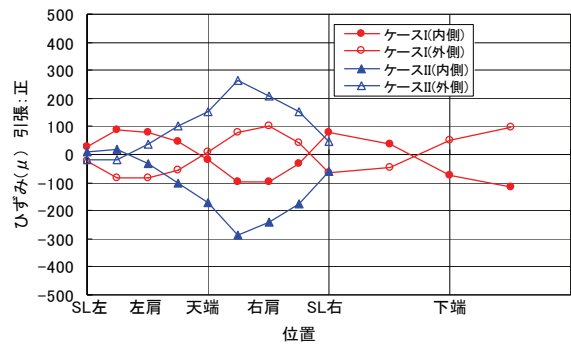
図-10 97.08 秒付近 (底面加速度約 810 gal) の肩部ひずみ極大時における供試体の挙動



(a) せん断土槽の変位



(b) トンネル内空変位



(c) 覆工のひずみ分布

図-11 97.14 秒付近 (底面加速度約 810 gal) の土槽最上段変位極大時における供試体の挙動

の図から、共振現象が発生する前は、せん断土槽の変位、トンネルの変位、ひずみ分布いずれにおいてもケースⅠとケースⅡは同様の挙動で、トンネルは全体的なせん断変形を生じ、肩部に曲げひずみが集中していることが分かる。

しかし、共振現象が発生すると、せん断土槽の変位やトンネル内空変位の各測点間に位相差が発生した。

図-10, 11 に示すように、土槽の変形モードはケースⅠとケースⅡで同様のものではあったが、ケースⅡではトンネルの内空変位、とくに水平方向の変位が内空縮小方向に増大するとともに、肩部のひずみも増大し、底面加速度約 810 gal のときのケースⅡのひずみレベルはケースⅠの 2 倍程度となった。

これらの結果から、地山が共振現象を起こさず地山のひずみレベルが小さい場合は、インバートの有無に関わらず、地震に対してトンネルは同様の挙動を示すことが分かった。ところが、地山が共振現象を起こし、地山のひずみレベルが大きくなってトンネルが内空に縮小する方向の外力が覆工に作用すると、インバートが無い場合は抵抗できず大きな変形を生じ、それにもなってひずみレベルも増大することが分かった。

### 3. まとめ

本年度は、坑口部等で事例の多い地震被害形態を対象として、地震時のインバートの効果について模型振動実験により検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 地震動が弱く地山のひずみレベルが小さい場合は、インバートの有無に関わらずトンネル覆工は同様の挙動で、全体的なせん断変形モードを示し、それにもない発生する曲げひずみは肩部に集中する。
- (2) 強い地震動により地山のひずみレベルが大きくなり、トンネルが内空に縮小する方向の外力が覆工に作用すると、インバートが無い場合は抵抗できず大きな変形を生じ、それにもなって覆工のひずみレベルも増大する。

今後は、本年度対象としなかった地震被害形態も加味し、数値解析や実験等により、被害発生メカニズムを解明するとともに、被害の発生する条件とその対策について検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神淡路大震災調査報告 土木建造物の被害，1998.

- 2) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害，トンネルと地下，第 36 巻，第 11 号，pp. 55-63，2005.

## RESEARCH ON EARTHQUAKE-PROOF TECHNOLOGY FOR MOUNTAIN TUNNEL

**Abstract:** Mountain tunnel has been considered as strong structure against earthquake. However, a few tunnels were damaged with collapse of lining in recent earthquake and the mechanism has not been clarified. In order to minimize those damages, the condition to need countermeasure and effective countermeasure should be established by clarifying the collapse mechanism. In FY 2008, shaking table tests with reduced-size model were conducted to clarify the effect of invert during earthquake intended for wholly-sheared seismic damage, which is typical around the portal area.

The result showed that the behavior of the tunnel without invert was the same as that with invert in the range of weak vibration. However, in strong vibration, the lining was subjected to the lateral pressure in addition to the wholly-sheared deformation. The tunnel without invert was not resistible to the pressure and deformed with large convergence. The strain level of the lining without invert was larger than that with one.

**Keywords:** mountain tunnel, seismic damage, shaking table test