

模型振動実験による地震時における インバートの効果に関する一考察

日下 敦¹・砂金 伸治¹・森本 智¹・真下 英人¹・角湯 克典²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)
E-mail: kusaka@pwri.go.jp

²独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

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。本検討では、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、それにともなって覆工のひずみレベルも増大することが分かった。

Key Words : mountain tunnel, seismic damage, shaking table test

1. はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルにおいては、過去の地震^{1)~4)}ではトンネル構造に大きな損傷を受けるのは非常に限定的な条件であり、一般に地震に強い構造物とされてきた。他方、断層破碎帯等の極端に地山の悪い箇所や不安定な斜面内、トンネル自体が既に変状を生じていた箇所、坑口部等では、比較的地震被害を受けやすいことが知られているものの、その被害発生メカニズムについては不明確な部分が多く、経験的に覆工の補強等の対策を行っているのが現状である。

そのような状況のなか、1995年1月の兵庫県南部地震⁵⁾や2004年10月の新潟県中越地震⁶⁾⁷⁾では、比較的軽微ではあるものの坑口部等の損傷や、数は限られるものの耐震対策が必要とされてこなかった箇所においても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、トンネルの構造等によっては、山岳トンネル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の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。

山岳トンネルの地震被害は、地山条件等により図-1に例示するようにいくつかの変形モードが考えられる⁸⁾が、本検討では、坑口付近等で事例の多い TYPE-I の被害形態に着目し、トンネルに水平方向の震動が作用した場合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。

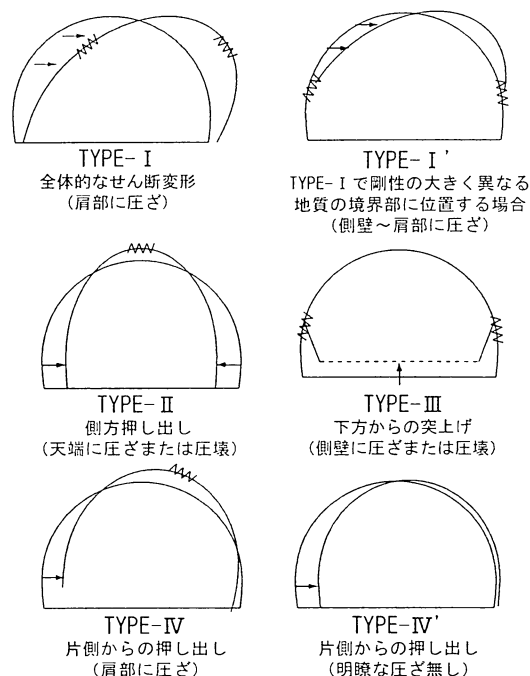


図-1 地震被害を受けたトンネルの変形モードの例

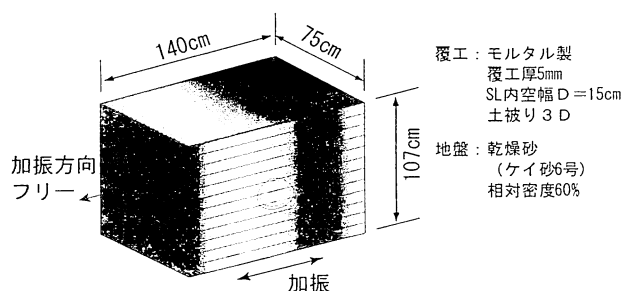


図-2 振動実験供試体の概要

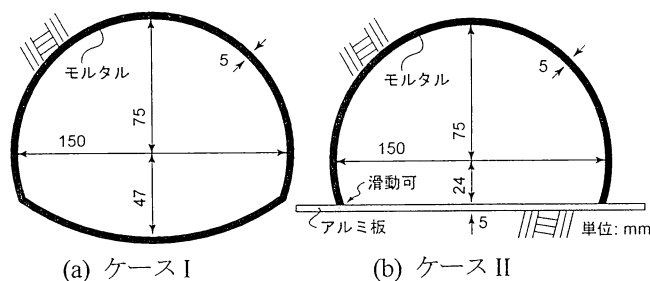


図-3 覆工模型の寸法

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 ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	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

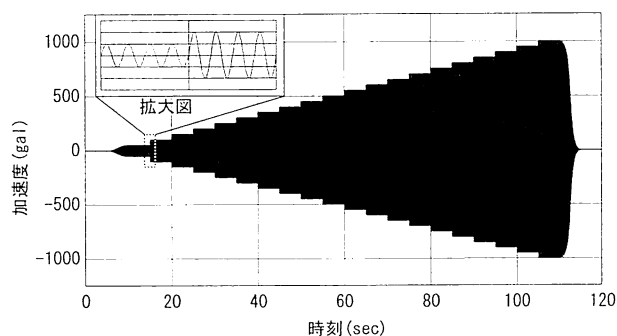


図-4 入力波形

2. 振動実験による軟質地山トンネルの地震時挙動

(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、下面から正弦波を入力することにより行った。せん断土層は、高さ約5cm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、5mm厚の高流動モルタルで作製した。载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

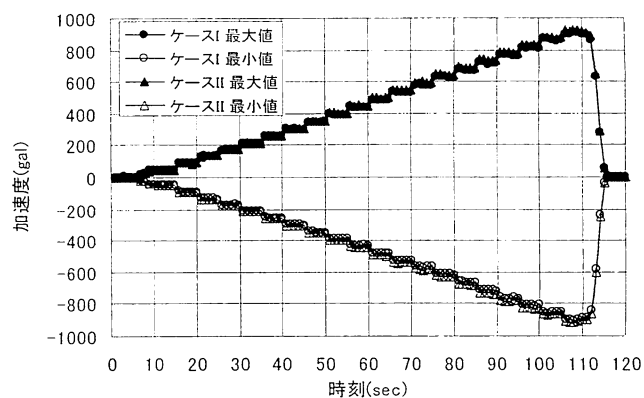


図-5 供試体底面加速度の1秒ごとの最大・最小

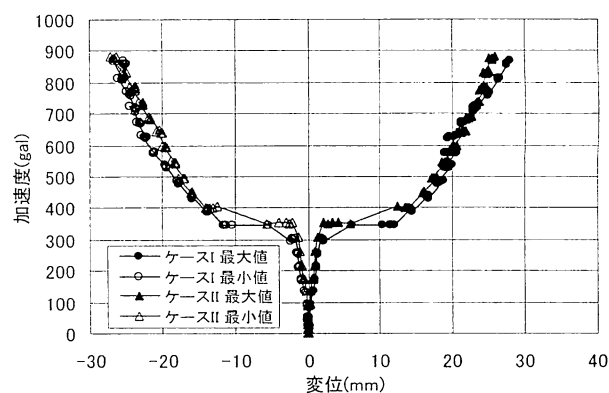


図-6 底面加速度とせん断土槽最上段の変位

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は設置していない。

入力振動は、事前に行った500gal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4Hzの正弦波とし、図-4に示すように50galから1000galまで5秒ごとに50gal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伴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、加速度の増加に伴って地山の剛性が低下し、供試体の固有振動数も小さくなることを意味している。

(2) 実験結果

a) 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350gal付近

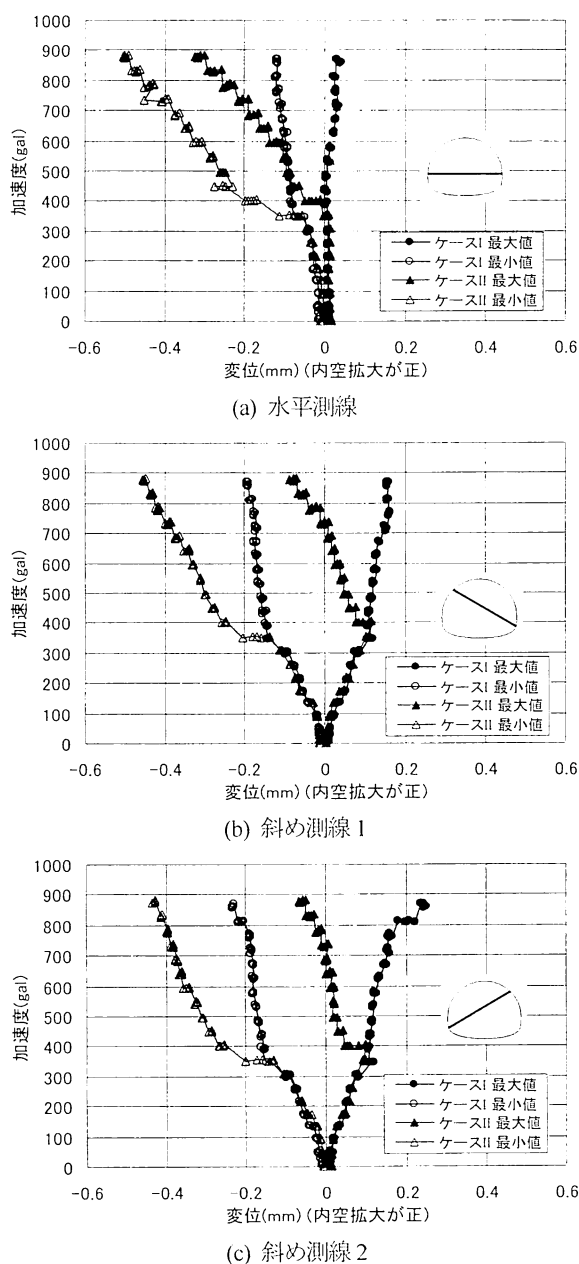


図-7 底面加速度とトンネル内空変位の関係

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、それによっても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。

b) 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

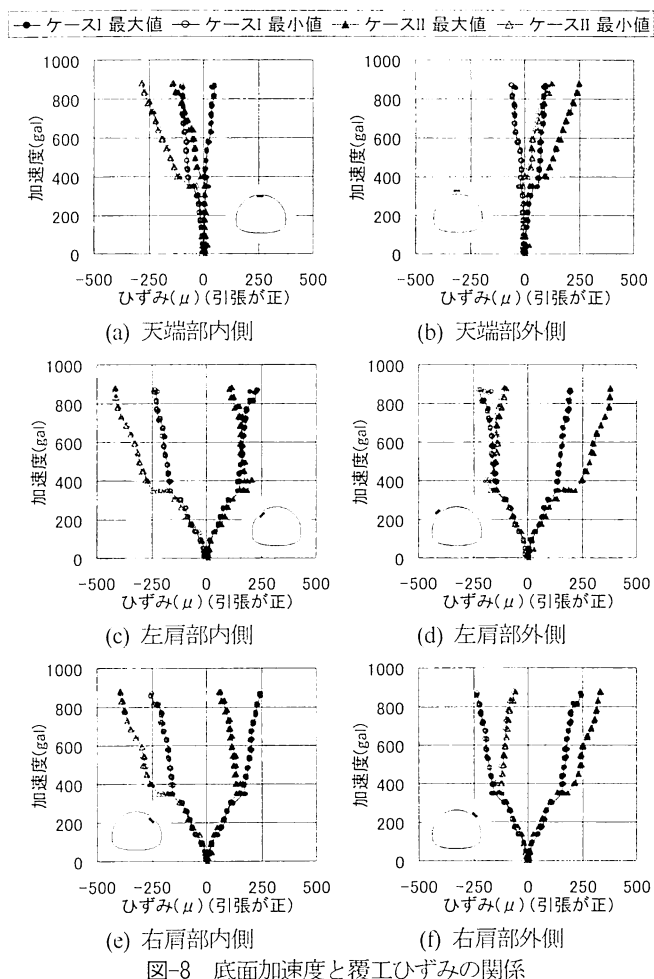


図-8 底面加速度と覆工ひずみの関係

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。いずれのケースも天端部よりも肩部の方が大きな値となっており、300 gal 以下では同様の挙動を示している。しかし、ケース I では地山に共振現象が発生したと思われる 400 gal 以降も大きなひずみが発生していないのに対し、ケース II は天端部、左肩部、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、ケース II では 400 gal 以降において、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

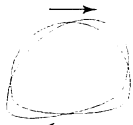
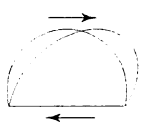
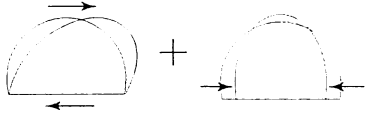
が発生する前はケース I と同様の变形モードを示すものの、共振現象発生後は脚部が内空側へ押し出す变形モードも現れることが分かった。

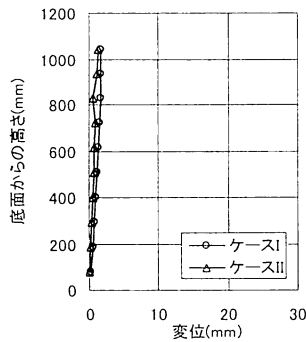
c) 共振発生前後の挙動の差異

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、それぞれ測点ごとの位相の差がなく、ほぼ同時にピークに到達した。この図から、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。

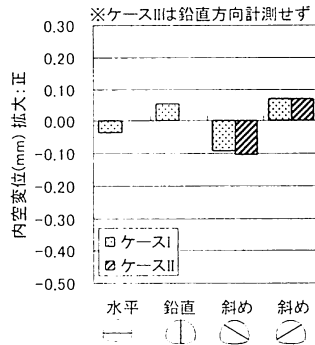
しかし、共振現象が発生すると、せん断土槽の変位やトンネル内空変位は、それぞれの測点間で位相差が発生

表-2 トンネルの変形モード

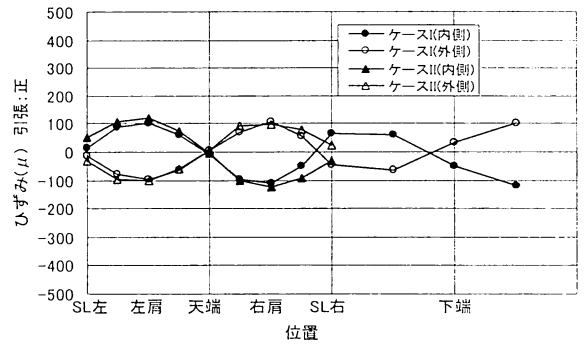
ケース	範囲	変形モード
I	全範囲	
II	300 gal 以下	
	400 gal 以上	



(a) せん断土槽の変位

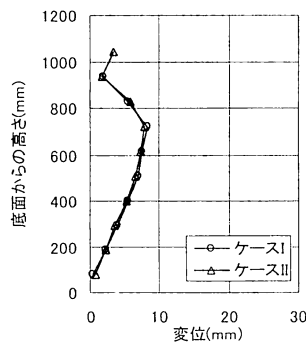


(b) トンネル内空変位

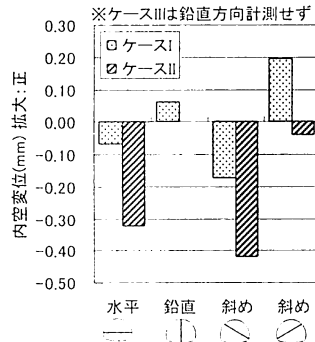


(c) 覆工のひずみ分布

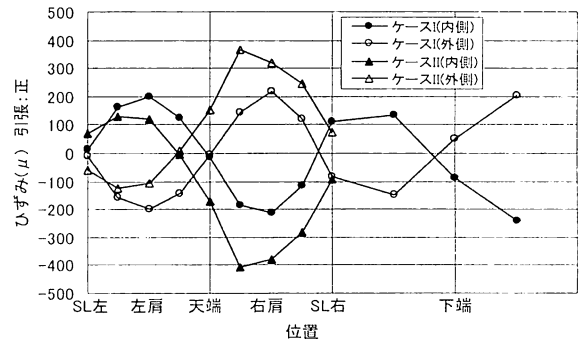
図-9 42.97 秒付近 (底面加速度約 300 gal) の肩部ひずみ極大時における供試体の挙動



(a) せん断土槽の変位

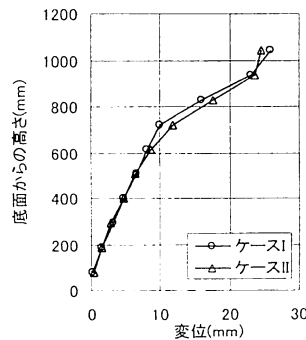


(b) トンネル内空変位

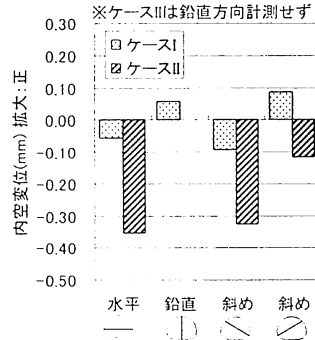


(c) 覆工のひずみ分布

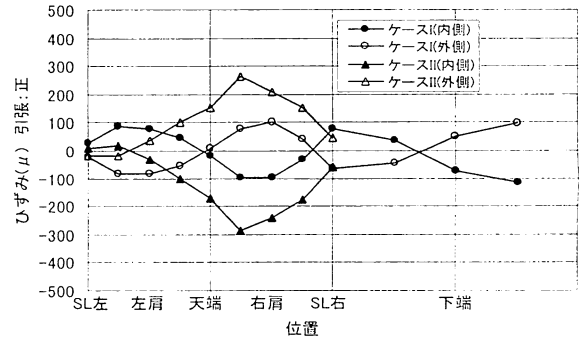
図-10 97.08 秒付近 (底面加速度約 810 gal) の肩部ひずみ極大時における供試体の挙動



(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

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、それにともなうひずみレベルも増大することが分かった。

3. まとめ

本検討では、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、それにと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、それにともなう覆工のひずみレベルも増大する。一方で、インバートが有る場合は変位が発散せず、ひずみレベルも小さいものにとど

まる。

今後は、本稿で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) 吉川恵也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究所報告，No.1123，pp.1-43，1979.
- 2) 小野田耕治，楠山豊治，吉川恵也：伊豆大島近海地震による被害(1) 鉄道トンネルの例，トンネルと地下，第9巻，第6号，pp.7-12，1978.
- 3) 今田徹，川島一彦：第7編道路トンネルおよび道路橋の被害 土木研究所報告(1978年伊豆大島近海地震災害調査報告)，pp.106-119，1982.
- 4) 国田雅人，竹俣隆一，役田徹：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧 大谷狼煙飯田線木の浦トンネル，トンネルと地下，第24巻，第11号，pp.7-13，1993.
- 5) 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 土木構造物の被害，1998.
- 6) 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.
- 7) 清水満，齋藤貴，鈴木尊，朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果，トンネルと地下，第38巻，第4号，pp.49-57，2007.
- 8) 日下敦，真下英人，水川雅之，森本智：地震による山岳トンネルの被害発生メカニズムに関する基礎的研究，トンネル工学報告集，No.18，pp.15-21，2008.

EFFECT OF INVERT DURING EARTHQUAKE BY SHAKING TABLE TEST

Atsushi KUSAKA, Nobuharu ISAGO, Satoshi MORIMOTO, Hideto MASHIMO and Katsunori KADOYU

Mountain tunnel has been empirically supposed as a strong structure against earthquake, rather than other structures. However, a few tunnels were damaged with collapse of lining in recent earthquake in Japan. In order to minimize those damages, the effective countermeasures and the condition where the countermeasure is required should be established by clarifying the collapse mechanism. In this study, 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.