# 地層境界に位置する山岳トンネルの 模型振動実験

河田 皓介1・日下 敦2・砂金 伸治2・真下 英人3

<sup>1</sup>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1-6) E-mail:kawata55@pwri.go.jp

<sup>2</sup>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1-6) <sup>3</sup>正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部 (〒305-0804茨城県つくば市旭1番地)

山岳トンネルは主として岩盤中に構築されるため、地震による被害を受けにくい構造物とされている. しかし、剛性の大きく異なる地層の境界部にトンネルが位置する場合は地震の被害を受ける可能性が高い ことは経験的に知られているものの、地震時における動的な挙動に関する知見は非常に少ないのが現状で ある.本研究では、このような条件の中でも特に被害発生の可能性が高いと考えられる、トンネル上半地 山が軟質である場合について、地震時のトンネルの動的挙動を模型振動実験により検討した. 実験の結果から、剛性の大きく異なる地層の境界部に位置するトンネルに地震動が作用した場合は、剛 性の異なる境界部において覆工に比較的大きなひずみが発生するとともに、覆工の破壊が生じる可能性が あること等が明らかとなった.

Key Words: mountain tunnel, geological boundary, shaking table test, seismic design

# 1. はじめに

山岳トンネルは極端に地山の悪い箇所や坑口部等の限 定的な条件においては比較的地震被害を受けやすいこと は知られているが、一般には岩盤内に構築されることが 多いことから、地震に強い構造物とされている. そのた め、地震時の被害発生メカニズムについては不明確な部 分が多く, 坑口部等において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<sup>1)</sup>. しかし, 2004年新潟 県中越地震等では、数は限られるもののこれまで耐震対 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 の大きな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<sup>2)</sup>.これは、地震の規模や地山条件、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 条件の解明や効果的な耐震対策の方法と設計手法を確立 する必要がある.

地震の被害を受けやすい山岳トンネルの限定的な条件 として、地山内の剛性が大きく異なる地層境界部や、断 層・破砕帯などの境界部にトンネルが位置する場合など があり、地震発生時にそれぞれの異なる地層等での挙動 に違いがあるため、境界部において被害を受ける可能性 が高いことは経験的に知られている<sup>344</sup>. しかしながら、 対策を必要とする地山条件や必要な対策規模等に関する 設計手法は確立されていない. また、これまでの被害発 生メカニズムの解明に関しては、地震時のような動的な 挙動に関する知見は非常に少ないのが現状である.

本研究では、地山の剛性が異なる地層境界に位置する 山岳トンネルの中でも特に被害発生の可能性が高くなる と考えられる、トンネルの上半地山が軟質である場合に ついて、地震時のトンネルの動的挙動を模型振動実験に より検討した.

#### 2. 模型振動実験の概要

#### (1) 実験装置

写真-1に本実験で用いた実験装置の概要を示す.本実 験には土木研究所が所有する三次元大型振動台,および せん断土槽を用いた.振動台のテーブルの大きさは8m 四方であり,最大加速度は2000 galで任意の波形の加振 が可能である.また,せん断土槽は1層が50 mmのアル ミ製のフレームを20段重ねており,内寸は幅1400 mm, 高さ1070 mm,奥行き750 mmであり,加振方向に対して は変位を拘束しない構造になっている.

テーブル上にせん断土槽を設置し、土槽内にトンネル と地山を模擬した供試体を設置し、加振することにより 地震時の挙動を模擬した.

#### (2) 実験ケースおよび実験模型

図-2に覆工模型の概要を示す.本実験では実山岳トン ネルの約80分の1のスケールを模擬しており,覆工模型 のサイズは内径150mm,外径160mm(覆工厚5mm),長 さ650mmで作製した.また,覆工模型にはインバートを 設ける構造とした.さらに,本実験において,支保は地 山内に含まれているものとして模擬していない.実験の 際に覆工模型と土槽との接触に伴う摩擦の影響を極力除 去するため,覆工模型と土槽との境界面にテフロンシー トを設置した.

図-3に加振時の加速度時刻歴波形を示す.加振は4Hz の正弦波を5秒ごとに50 galずつ増加させて覆工模型が破 壊と判断されるまで実施した.

**表-1**に実験に用いた模型の物性値を,図-4に実験ケースの概要を示す.本実験ではトンネル横断面に地層境界が出現する場合を模擬するものとした.

Caselは日下ら(2009)により実施された<sup>3</sup>もので,軟 質な地山に位置する山岳トンネルを模擬しており乾燥砂

(ケイ砂6号)を使用し,相対密度60%を目標として作 製されている.このケースを比較の対象として用いるものとする.

Case2はトンネル横断面に地層境界が存在する場合を 模擬しており,硬質な地山の上部に軟質な地山が存在す る場合を想定した.地山模型の材料は下部は貧配合モル タルにより目標強度0.5N/mm<sup>2</sup>で作製した.また,上部は Case1と同様の乾燥砂(ケイ砂6号)を使用し,相対密度 60%を目標として作製した.地層境界面の位置はスプリ





図-1 実験装置の概要



図-2 覆工模型の概要



図-3 加振時の加速度時刻歴波形

<b>表-1</b> 実験に用	いた模型の物性値
硬質な地山	一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一

	(貧配合刊	ミルタル)		覆工	
Case	一軸圧	ヤング	一軸圧	ヤング	ポア
	縮強度	係数	縮強度	係数	ソン
	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	$(kN/mm^2)$	比
1	なし		52.1	28.1	0.26
2	0.503	200.5	58.5	22.8	0.25



図-4 覆工模型の概要

ングライン (SL) とした. なお, 両ケースの土被りは 3D (450mm) とした.

(3) 計測データ

本実験では地山の挙動およびトンネル内の挙動を確認 するため、以下の計測を実施した.

①加速度(振動台,地山模型内,覆工模型内)
②変位(せん断土槽,覆工模型内)

③ひずみ(覆工模型の周方向の内外 15° ピッチ)

④ひび割れ状況(覆工模型のスケッチおよび内部の動 画撮影)

### 3. 振動実験の結果

#### (1) 地山模型の挙動

図-5に加速度の1秒ごとの加速度時刻歴の最小と最大値 を示す.図より約110秒までは振動台の加速度と底面の 加速度は一致しており、振動台から入力した波形が地山 模型に伝達されていることが分かる.ここで、110秒以 降は計測不能な加速度が発生しており、撮影した動画に よる分析の結果から、土槽最下部のフレームの移動が生 じており、地山模型の底面と土槽底面との間にすべりが 発生したものと考えられる.この結果、実験装置の制約 から入力加速度が大きくなると、地山模型の底面と土槽 底面の間にすべりが生じる可能性があり結果の解釈に注 意が必要である.そのため、約1100 galまでの結果を精 査し、それ以降の実験結果は参考とした.

図-6に入力加速度が約800galを計測した時間における土 槽の最大変位を示す. Caselは土槽最下部から上部に向 かうにつれて変位が大きくなるせん断変形の挙動を示し ている.一方でCase2は計測位置が500mm以下の硬質な 地山部分の変位は最上部で0.30 mmと極めて小さく,深 さ方向に対してほぼ一定であるが,地層境界を境に計測 位置が600mm以上の軟質な地山部では土槽上部に向かう につれて変位が大きくなるせん断変形を示す.同等の加 速度における土槽の最上部の変位はCaselが27.4 mm, Case2が18.5mmとCase2がCaselに比べて小さい.これは, 土槽の最上部の変位が最下部からの地山の累積変位とな るため, Case2の場合は硬質な地山部の変位が小さく, 最上部の累積変位が小さくなったものと考えられる.

この結果から、均質で軟質な地山であれば土槽(地山) 全体でせん断変形を示すが、下部が硬質な地山で上部が 軟質な地山の場合には硬質な地山部の変位は小さく、軟 質な地山部でせん断変形を示す.また、剛性の異なる地 山が存在する場合には剛性の異なる地層境界部において 変位の差が生じる可能性がある.

図-7に加振終了までの1秒ごとの振動台の最大加速度と 土槽の最大・最小変位を示す.図-7(a)は土槽最上部を, (b)はCase2の地層境界直近の軟質な地山部(上部),(c) は硬質な地山部(下部)の計測位置の結果を示している. 図より,Case1では加速度が350 gal付近において変位の急 激な増加が見られており,過去の研究<sup>10</sup>によれば,共振





現象による結果と考えられている. Case2においても軟 質地山の結果である図の(a)と(b)では、Caselに比べ変位 は小さいものの480 gal付近で同様の現象が確認できる. しかし,硬質な地山の結果である図-7(c)では, Case2の結 果は加速度に対して土槽の変位はほとんど発生せず、こ の現象は確認できなかった. さらに、加振終了、すなわ ち,覆工模型の破壊を確認した加速度はCaselが約900 gal に対してCase2は1100 galであった. 過去の実験において 本実験とほぼ同じ条件で作製した地山模型の拘束圧 50kPaで実施した動的三軸試験による初期のせん断剛性 は貧配合モルタルが300MN/m<sup>2</sup>であり、乾燥砂は 33.8MN/m<sup>2</sup>で約9倍程度あった. この結果から, 同一の供 試体ではないため詳細な数値としての比較はできないが, 下部の硬質な地山部分の剛性が高いことにより、入力し ている加速度の値に対して変位が発生しにくくなったと 考えられる.

#### (2) 覆工模型の挙動

図-8にトンネル内空変位と加速度の関係を示す.これは、図-7と同様に加振終了までの1秒ごとの振動台の最大加速度とトンネル内のSL位置の水平変位と斜め変位の関係を整理したものである.図より、Case1とCase2はともに水平変位は斜め変位に比べて小さく、覆工模型はせん断変形を示すような変形モードを示している.また、同一の加速度においてCase1に比べ、Case2の変位が小さい.これは、図-7に示す同一の加速度での地山変位が小さいことによる影響が考えられる.さらに、水平変位が急激に伸びる直前の変位の値がCase2はCase1に比べて小さい.これは、Case2の水平変位の計測位置がSL位置の硬質な地山部にあり、発生した変位が小さかったためであると考えられる.

図-9に覆工模型の各計測位置での1秒ごとの最大・最小 ひずみと最大加速度の関係を示す.図より,覆工模型に 発生するひずみは,Caselは天端部と側壁部に比べ肩部 の値が大きくなっており,特に天端部が100~150 μ程度 と最も小さい.しかし,Case2においては,天端部のひ ずみは小さいものの肩部と側壁部では同等程度の大きさ のひずみが発生している.また,Caselでは800 gal程度で



肩部, Case2では1100 gal程度で両側壁部において過大な ひずみが発生しており,これは初期のひび割れが発生し たことによるものと考えられる.

図-10に覆工模型の内・外面のひずみ分布を示す. これ はCaselで共振前と考えられている約300 gal 時点と、共 振現象発生後でかつ、ひび割れ発生直前の約800 gal, ひ び割れ発生直後 (Case1は約850 gal, Case2は約1050 gal) においてひずみの値が最大となる時刻を抽出している. 図-10 (a).(b)より、Case1は天端部に比べ45°および135°の 肩部のひずみが大きく, せん断に起因する変形モードと なっている. また, Case2も天端部が小さく肩部で大き なひずみが発生しているが、さらに0°と180°の側壁部 においても肩部と同等程度の大きなひずみが発生してい る. 加えて, Case2では45°から-135°のインバート部 に発生しているひずみは小さい. これらの傾向は共振発 生前の300galの結果と共振発生後の800galの結果と類似 している.これらは、下部の硬質な地山の影響と地層境 界の影響を受けていると考えられる. また, 図-10 (c)よ りCase1では肩部の45°外側, 135°内側で, Case2では側 壁部の0°内側で1000µを超える引張ひずみが発生してお り、これらの位置で初期のひび割れが発生したと考えら れる. また, Caselは肩部で先にひび割れが発生したの に対して、Case2では側壁部で先にひび割れが発生した.

以上の結果から、トンネル横断面(SL位置)に地層 境界があり、下部が硬質な地山の場合には、下部の硬質 な地山内にある覆工に発生するひずみは小さく、上部の 軟質な地山部においてせん断変形し、肩部でひずみが大 きくなるとともに、地層境界のある側壁部においても大 きなひずみが発生すると考えられる.また、地層境界が ある場合には境界部のある側壁部で先にひび割れが発生 する可能性がある.

# (3) 覆工模型の変状状態

図-11に実験終了後のひび割れ展開図を示す. Caselは 45°の右肩部および120°付近と右側壁部にトンネル縦 断方向のひび割れが発生している.一方でCase2はSL両 側,両肩部,天端部にトンネル縦断方向のひび割れが発 生しており,図-10でひずみ分布で得られた増大個所と おおむね一致している.

## (4) まとめ

以上の結果から、均質で軟質な地山では地山全体がせん断変形し、それに伴なってトンネル全体でせん断のような変形モードとなった。そのため、覆工模型の天端部のひずみは小さく、肩部に大きなひずみが発生し、肩部に近い位置のひび割れにより破壊が生じたと考えられる。 一方で、トンネル横断方向に地層境界が存在し(本実験ではSL位置)、下部が硬質、上部が軟質な地山であ



る場合には、硬質な地山部の変位は小さく、軟質な地山 部はせん断のような変形モードとなった.それに伴って 硬質な地山内の覆工模型の変位は小さいものの、軟質な 地山内の覆工模型はせん断のような変形モードとなった. そのため、硬質な地山内(SLより下の側壁部からイン バート部)にある覆工に発生するひずみは小さく、軟質 な地山内(SLより上の側壁部から天端部)にある覆工 は肩部に大きなひずみが生じた.また、剛性が変化する 地層境界部(SL位置)では地山の変位に差が生じるた め、覆工模型に大きなひずみが発生した.その結果、地 層境界のある側壁部と肩部にひび割れが発生し、破壊が 生じたと考えられる.また、覆工模型の破壊は肩部より も側壁部から先に生じたと考えられる.

# 4. おわりに

本研究では、トンネル横断面に地層境界が存在し、上 部が軟質、下部が硬質な地山に地震動が作用した場合の 覆工の破壊メカニズムを解明するため、三次元大型振動 台とせん断土槽を用いた振動実験を実施した.得られた 知見は以下の通りである.

(1)トンネルの変形は硬質な地山部にある覆工はほとん ど変形せず発生するひずみは小さいが、軟質な地山部 ではせん断変形するため、肩部のひずみが大きくなる 可能性がある.

(2)地層境界にトンネルが位置する場合の覆工の破壊は

せん断変形に伴う肩部だけでなく、地層境界部におい ても生じる可能性がある.また、地層境界部に近い箇 所での覆工の破壊は肩部での破壊よりも先に発生する 可能性がある.

今回の動的な実験により得られた知見や課題をもとに、 山岳トンネルにおいて耐震対策が必要となる条件や効果 的な対策工等が明らかにするために、今後、追加の実験 や数値解析等を実施していく予定である.

#### 参考文献

- (社)日本道路協会:道路トンネル技術基準(構造編)・ 同解説,丸善,2003.
- 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, pp55-63, 2005.
- 3) 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.
- 野城栄一,小島芳之,深沢成年,朝倉俊弘,竹村次 郎:地質不良区間における山岳トンネルの地震被害 メカニズム,土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp1045-1061, 2009
- 5) 日下敦,砂金伸治,森本智,真下英人,角湯克典: 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,pp.205-209,トンネル工学報告集, No.19, 2009.

(2014.9.15受付)

# A SHAKING TABLE TEST OF ROCK TUNNEL LOCATED ON STRATUM BOUNDARY

# Kosuke KAWATA, Atsushi KUSAKA, Nobuharu ISAGO and Hideto MASHIMO

Rock tunnels are generally considered to have the required structural strength to resist earthquakes; recently, however, a number of rock tunnels in Japan have suffered severe earthquake damage to their permanent lining. It is empirically known that mountain tunnel in different stiffness geological feature condition is easily damaged, however dynamic behavior under these conditions are not fully understood. In this study, shaking table test of rock tunnel has geological boundary to SL was carried out.

As a result of experiment, large strain and fracture of lining around the boundary are occurred when earthquake motion affects rock tunnel that was located on a stratum boundary.