

# 不連続性岩盤における浅い近接トンネルの 動的安定性に対する実験的研究

玉城道雄<sup>1\*</sup>・伊東孝<sup>2</sup>・村山有祈<sup>1</sup>

<sup>1</sup>琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

<sup>2</sup>琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース (同上)

\*E-mail: [k208472@eve.u-ryukyu.ac.jp](mailto:k208472@eve.u-ryukyu.ac.jp)

**Key Words :** twin tunnels, shallow, earthquake, shaking table test, discontinuous rock, rock slope

## 1. はじめに

岩盤斜面に掘削された土被りが浅いトンネルの安定性は岩盤の性質に大きく左右される。近年、都市環境を含めて、写真-1に示すように土被りが浅い近接トンネルや山岳トンネルの建設が増加しており、その耐震性が注目されている<sup>1)~3)</sup>。報告されているものはトンネル完成後に外力の影響を考慮した設計や土砂地山を想定した実験であり、トンネル掘削中や無支保の場合による外力の影響を考慮した研究は耐震性を考える上で重要である。また、2016年4月に発生した熊本地震では俵山トンネルが被害を受けた。写真-2に示すように同様な被害例は増加する傾向にあることが示唆される。太田と藍檀(2011)<sup>4)</sup>は、地下構造物の地震に伴う被害は断層運動に伴う永久変形によるものが一因と述べており、俵山トンネルでも布田川断層帯に近く、連続した脆弱層が確認されたとの報告<sup>5)</sup>がある。

本研究では、岩盤斜面に隣接する土被りが浅い近接トンネルを対象に地震時の挙動に注目し、比較的簡単に作成できる模型を用いて、破壊現象を実験的に検討する。

## 2. 模型材料の作成および振動実験の概要

### (1) 模型材料

本実験で使用した模型材料は、硫酸バリウム( $\text{BaSO}_4$ )、酸化亜鉛( $\text{ZnO}$ )、白色ワセリンを70:21:9の重量比で配合したものであり<sup>6)</sup>、亜炭廃坑<sup>7)</sup>や浅所トンネル<sup>8)</sup>、海食崖<sup>9)</sup>などを対象とした模型実験が行われている。模型材料の強度が単位体積重量に大きく依存しているため、締め固め圧力の程度により模型材料の強度を簡

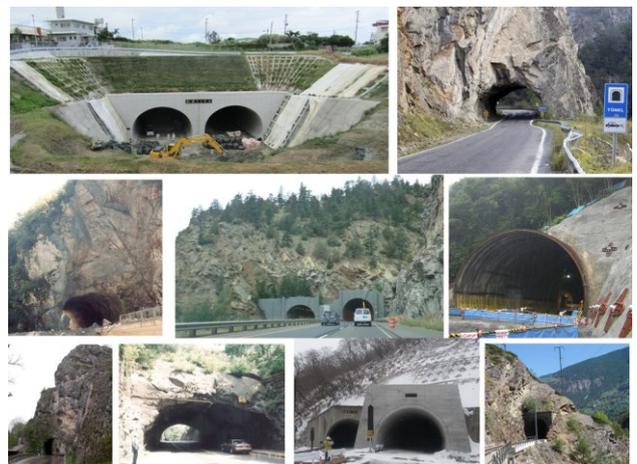


写真-1 斜面に近接した浅いトンネルの例

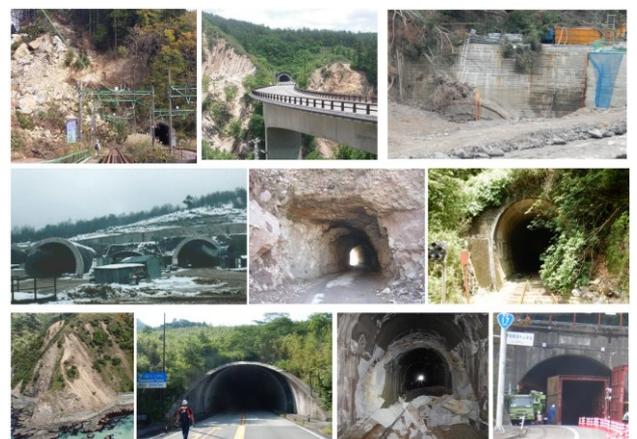


写真-2 地震で被害を受けた斜面に近接した浅いトンネルの例

単に変化させることができる。また、使用後に元の粉末状に戻すことがミキサー等を用いると容易であり、化学反応を起こすこともない再利用に適した材料である。本実験においては800kPa程度で締め固めた。図-1に模型ブロック自体が壊れる材料の単位体積重量および圧縮強度・締め固め圧力の関係<sup>9)</sup>を示す。締め固めた模型ブロックは50×50×250 (mm) であり、斜面模型や千鳥状態に応じて分解した。本実験で作成した模型ブロックは図-2に示すように静摩擦角は38-44°である。

## (2) 振動実験

振動実験で用いた振動台<sup>4)</sup>は最大100kgの物体に約600galまでの加速度を与えるものであり、最大変位量は100mmで、振動台の面積は1×1 (m<sup>2</sup>) である。振動条件は、入力加速度を1分間に50galから700galまで上昇させた。周波数は約3Hzで一定となるように設定した。計測項目は加速度、変位である。加速度は東京測器の加速度センサーを使用し、レーザー変位計を用いて斜面表面の変位を2箇所計測することとした。なお、振動実験の際に模型が型枠から飛び出さないようアクリル板を2枚用いた。

## (3) 試験方法

模型実験は表面が水平な地盤と斜面上の地盤を作成した。岩盤斜面模型は層状態および千鳥状態の2パターンを斜面とする。不連続面の傾斜角を0° (180°), 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150°の計16パターンで実験を行った。次に、斜面模型のみの動的試験を行い、安定した斜面模型 (傾斜角45°, 60°, 120°, 135°, 150°の計10パターン) を対象に近接トンネルを作成した。斜面付近に先進坑トンネルを作成し、後進坑トンネルは進坑完了した状態から作成した。作成したトンネルは幅約60mm、トンネル高さ約60mmとし、両トンネル間の離隔距離を15mmから25mm程度とした。写真-3に実験模型の一例を示す。

## 3. 層状岩盤模型および直行不連続面を有する岩盤模型における近接トンネルの振動実験と結果

写真-4から写真-9に振動実験の結果を示す。それぞれトンネル上部のブロックが空洞内部に滑り込みがみられた。しかし、斜面から離れているトンネル上部が安定していた。言い換えれば、斜面に最も近接したトンネルの上部が不安定になった。写真-6に示す傾斜角120°の千鳥状態では後進坑トンネル上部のブロックが空洞内部に滑り込み、斜面全体のトップリング崩壊につながっている。また、両トンネルが同時に崩壊する場合は写真-8のように斜面全体が空洞内部にすべり込む際にみられた。図-3に幾つかの実験で得られた応答を示す。図における変位応答からみられるように全体破壊の前からブロック落下

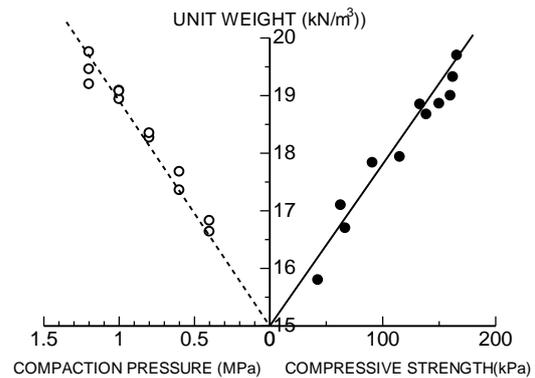


図-1 単位体積重量および圧縮強度・締め固め圧力の関係<sup>9)</sup>

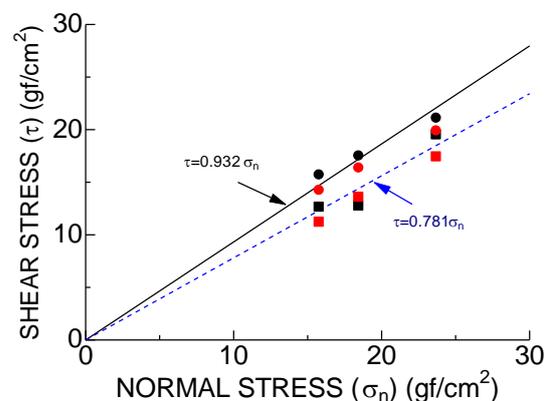


図-2 ブロック境界面の摩擦特性<sup>9)</sup>

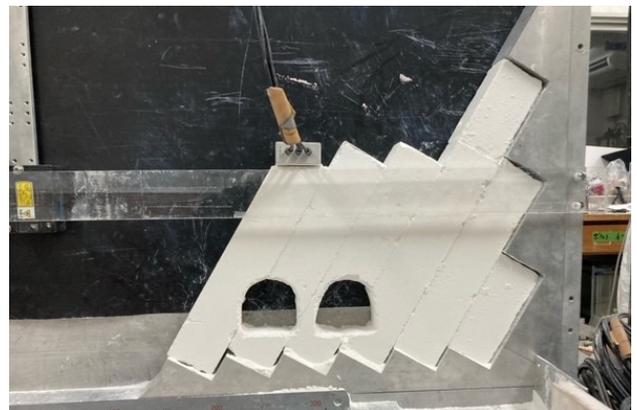


写真-3 斜面模型の一例

やすべりが発生しており、破壊に至る際に変位が大きくなるような応答が得られている。そして、崩壊時の加速度を表-1に示す。層状態より千鳥状態のほうが加速度の値が小さく崩壊しやすいと示唆される。なお、本実験で安定した斜面模型は4パターン (傾斜角45°, 千鳥状態の135°および150°) みられた。

表-1 模型ブロックの実験結果

傾斜角	層状態	千鳥状態
45°	崩壊せず	崩壊せず
60°	約680gal	約300gal
120°	約650gal	約440gal
135°	約700gal	崩壊せず
150°	約690gal	崩壊せず

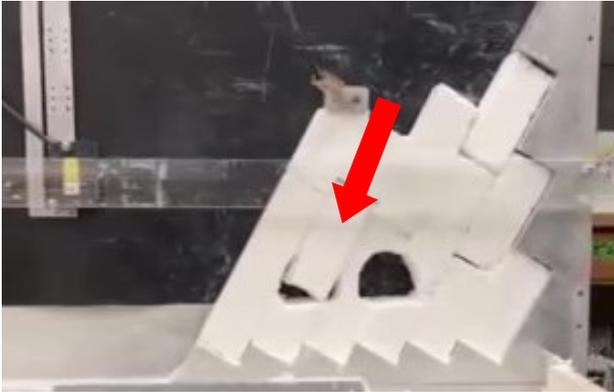


写真-4 傾斜角60°千鳥状態の場合 振動実験の崩壊の様子

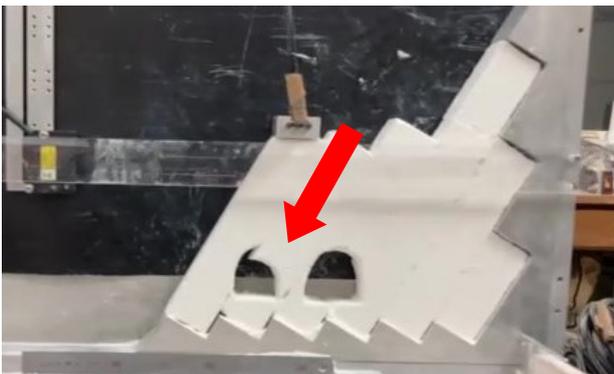


写真-5 傾斜角60°層状態の場合 振動実験の崩壊の様子

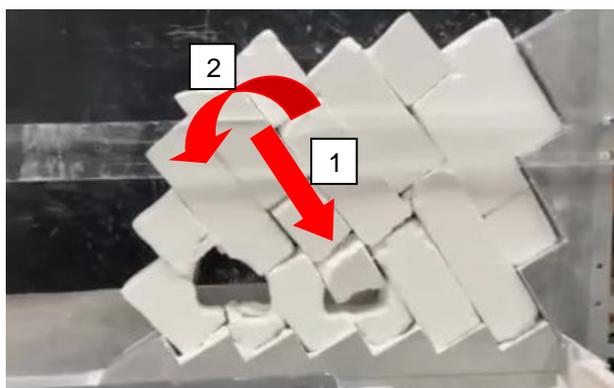


写真-6 傾斜角120°千鳥状態の場合 振動実験の崩壊の様子

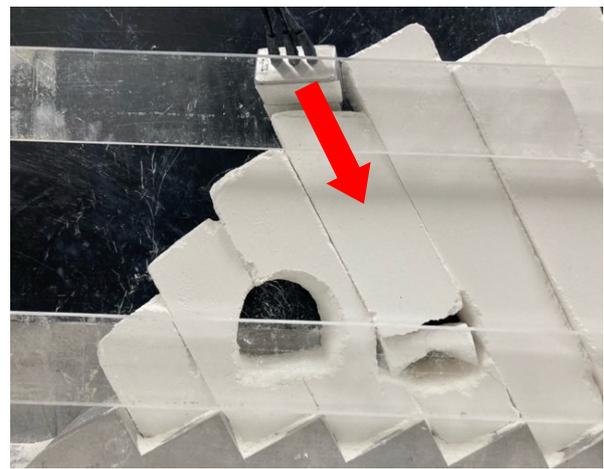


写真-7 傾斜角120°層状態の場合 振動実験の崩壊の様子



写真-8 傾斜角135°層状態の場合 振動実験の崩壊の様子

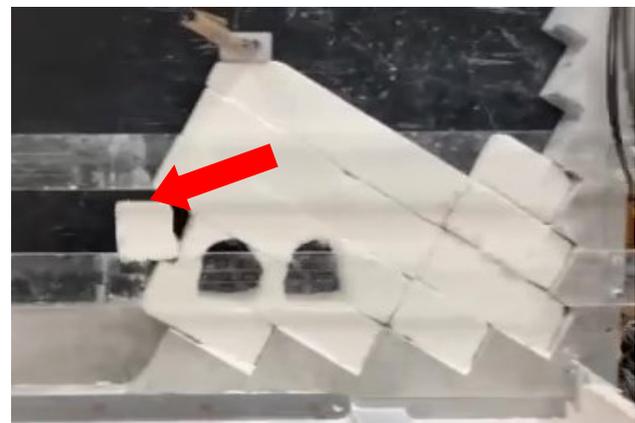


写真-9 傾斜角150°層状態の場合 振動実験の崩壊の様子

#### 4. 破壊様式の分類および一本のトンネルとの比較

今回実施した実験と比較するため、太田と藍檀(2011)<sup>4)</sup>は岩盤斜面に近接する土被りが浅い一本のトンネルの安定性について行っている。表-2に崩壊時の加速度<sup>10)</sup>を、実験結果の一部を写真-10から写真-12にそれぞれ示す。トンネルが一本の場合、層理面が流れ盤の際

に破壊様式はほとんど同じである。しかし、近接トンネルの場合、層界面は受け盤の際に空洞内部への滑り込みから発生後、斜面全体がたわみ性あるいは柱状トップリング破壊を示す。なお、本実験で安定した斜面模型は加速度1000gal程度増加すると崩壊することが示唆される。

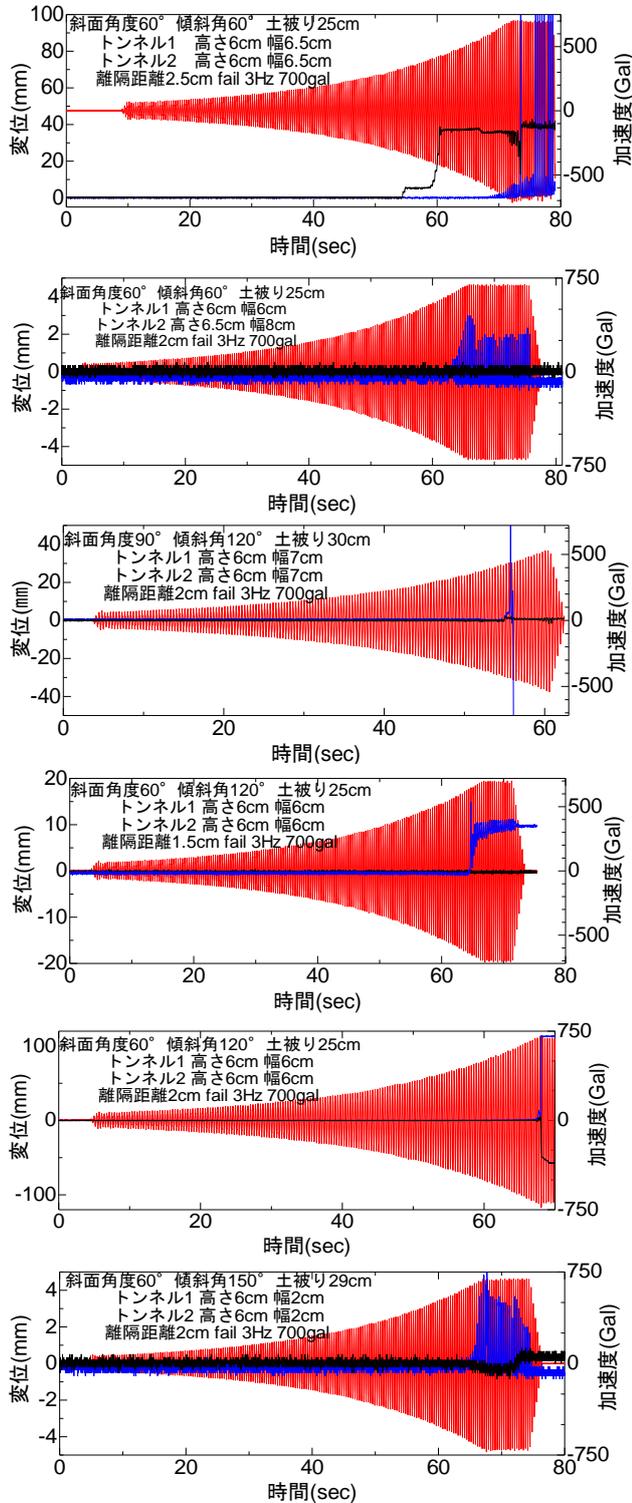


図-3 各実験で得られた加速度・変位応答

表-2 模型ブロックの実験結果<sup>10)</sup>

傾斜角	千鳥状態
0°(180°)	約400gal
45°	約1000gal
60°	約800gal
90°	約300gal
120°	約400gal
135°	約800gal

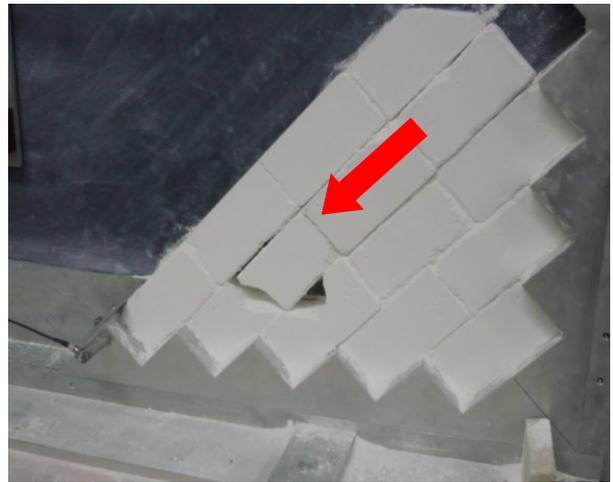


写真-10 傾斜角45°千鳥状態の場合 振動実験の崩壊の様子<sup>10)</sup>



写真-11 傾斜角120°千鳥状態の場合 振動実験の崩壊の様子<sup>10)</sup>

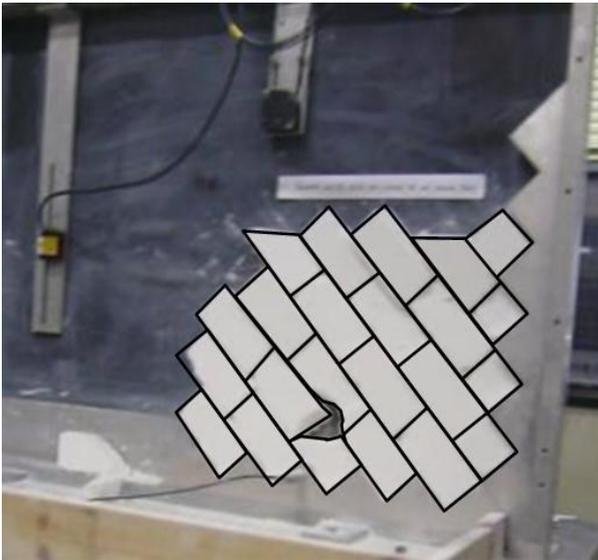


写真-12 傾斜角120°千鳥状態の場合 振動実験の崩壊の様子<sup>10)</sup>

## 5. まとめと今後の課題

本研究で岩盤斜面に隣接する土被りが浅い近接トンネルの地震時挙動に注目し、地震に伴う破壊現象を実験的に検討した。実験結果から、層理面が流れ盤の際に破壊様式は土被りが浅い1本のトンネルとほとんど同じである。また、層理面が受け盤の際に空洞内部へのすべり込みが発生後、斜面全体がたわみ性あるいは柱状トッピング破壊を示した。今後は、Aydan<sup>11)</sup>らおよび太田<sup>10)</sup>の提案した解析手法などを利用し崩壊状態の判定精度を高めることが課題として挙げられた。

## 参考文献

- 1) 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第18巻, pp.15-21, 2008.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編], pp.149-151, 2016.
- 3) 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チーム: 山岳トンネルの地震時挙動と耐震対策に関する研究報告書, ISSN 0386-5878, 土木研究所資料, 第4358号, 2017.
- 4) 太田良巳, 藍檀オメル: 地震動に伴う岩盤斜面に近接する浅所トンネルの破壊形態と安定性の評価, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム, 講演番号9, pp.44-49, 2011.
- 5) 山本拓治, 福原茂, 松尾仙彦, 中原和彦, 亀山好秀, 井上祐一郎: 熊本地震で被災したトンネルの被災状況と復旧対策, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム, 講演番号31, pp.179-184, 2017.
- 6) 川本眺万, 尾原裕三, 市川康明: 底面摩擦模型装置および模型材料の力学特性, 不連続面を有する岩盤構造物の力学特性, 不連続面を有する岩盤構造物力学特性に関する基礎的研究, 日本鉱業会誌, vol.99, No.1139, 1-6, 1983.
- 7) 太田良巳, アイダンオメル, 杉浦乾郎, 坂本昭夫, 山田紀利: 地震動による亜炭廃坑の崩壊形態とその安定性の評価, 第35回岩盤力学に関するシンポジウム, 講演番号11, pp.57-62, 2006.
- 8) 堀内浩貴, 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦: 海食崖の静的および動的安定性に関する模型実験による検討, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム, 講演番号6, pp.31-36, 2018.
- 9) Ömer Aydan and Mehdi Amini: An experimental study on rock slopes against flexural toppling failure under dynamic loading and some theoretical considerations for its stability assessment, 東海大学紀要海洋学部「海-自然と文化」第7巻第2号 pp.25-40, 2009.
- 10) 太田良巳: 地震断層近傍における地震動および地盤の変形挙動による土木構造物への影響に関する基礎的研究, 東海大学博士論文, pp.93-131, 2011.
- 11) Aydan, Ö., Y. Shimizu, M. Karaca: The dynamic and static stability of shallow underground openings in jointed rock masses. The 3rd Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, Istanbul, October, 851-858, 1994.