

# 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

太田 良巳<sup>1\*</sup>・藍檀 オメル<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東海大学大学院 総合理工学研究科 (〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

<sup>2</sup>正会員 東海大学 海洋学部 海洋建設工学科 (〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

\*E-mail: 8atad003@mail.tokai-u.jp

岩盤斜面の崩壊の様式は岩盤内に存在する様々な地質学的分離面（層理面、流理面、片理面、断層等）の不連続面によって異なる。岩盤斜面に掘削された浅所トンネルの安定性は岩盤の性質に大きく左右される。そのため、岩盤の不連続性を考慮した安定性を評価すべきである。近年、国内外で多くの大地震が発生し自然岩盤斜面の崩壊および斜面に近接した浅い地下構造物への被害が報告されている。したがって、地震時の岩盤斜面に近接する浅所トンネルの安定性に関する検討が大変重要な課題となってきた。

本論文では岩盤斜面に近接する浅所トンネルの地震時の安定性について、2種類の模型材料を用いて実験的に検討する。また、解析的にも検討し、実験結果との比較を行う。

**Key Words :** earthquake, tunnel, shallow, model tests, discontinuous rock, rock slope

## 1. はじめに

岩盤斜面の崩壊の発生する要因としては、地形的な条件や断層や層理、節理などの不連続面などがあげられる。地震時には、その危険性は高まるものであると考えられる。近年、国内外において発生した多くの大地震のなかで、岩盤斜面の崩壊が報告されている地震として、国内においては2004年新潟県中越地震、2007年岩手・宮城内陸地震、国外においては1999年台湾・集集地震、2005年パキスタン・カシミール地震、2008年中国・四川省地震などがあげられる。地震動に伴う岩盤斜面の崩壊は、斜面自体の被害だけでなく、斜面崩壊に伴う岩盤斜面に近接した浅い地下構造物への被害報告がなされている<sup>1-7)</sup>。

図-1,図-2および図-3に地震によって被害を受けたトンネルの被害例を示す。一般的にトンネルのような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である(図-1)。しかし、土かぶりが浅くなると地震動による被害も多く発生する<sup>8-12)</sup>。

本論文では、岩盤斜面に近接する浅所地下構造物の地震時の挙動に注目し、模型ブロック自体が壊れる模型および琉球石灰岩を用いて、地震に伴う浅所地下構造物の破壊現象を実験的に検討する。また、地震時の浅所トンネルの安定性について解析的な検討を行った。



図-1 2008年中国・四川省地震によるJiujiayaトンネルにおける被害の様子<sup>5-7)</sup>



図-2 1999 Düzce地震によるBoluトンネルの地表面に見られる陥没<sup>3-7)</sup>



図-3 1939 Erzincan地震による道路トンネルの被害<sup>7, 9)</sup>

## 2. 実験概要

本論文では3種類の模型材料を用いて実験を行った。模型材料は琉球石灰岩ブロックおよび模型ブロック自体が壊れる材料の二種類の材料を用いた(表-1)。

本実験で使用した模型ブロック自体が壊れる材料は、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粉末状のものである<sup>13)</sup>。締め固め圧力の程度により模型材料の強度を簡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。本論文においては480 kPaで締め固めた。図-4に模型ブロック自体が壊れる材料の単位体積重量と締め固め圧力および一軸圧縮強度の関係を示す。

琉球石灰岩ブロック、模型ブロック自体が壊れる材料を用いて岩盤斜面模型を製作し斜面の一部に空洞を製作する。実験条件を表-2に示す。岩盤斜面模型は千鳥状態の斜面とする。実験に用いた岩盤斜面模型の略図を図-5に示す。製作した岩盤斜面模型を振動台に設置し、斜面に近接した空洞が崩壊するまで加速度を増幅させた。実験において図-5に示した $W_1$ (空洞上部のブロックを支えるブロック)の重さを変化させた。

振動実験で用いた振動台は最大100kgの物体に約600galまでの加速度を与えるものであり、変位量は

100mmで、振動台の面積は $1 \times 1 \text{ (m}^2\text{)}$ である。

表-1 模型材料の材料定数

| 特性     | 琉球石灰岩ブロック | 模型ブロック |
|--------|-----------|--------|
| 単位体積重量 | 23-24     | 17-22  |
| 静摩擦角*  | 28~32°    | 38~44° |

\*動摩擦角は静摩擦角より3-5°小さい。

表-2 実験条件

|          | 琉球石灰岩ブロック        | 模型ブロック                          |
|----------|------------------|---------------------------------|
| 模型タイプ    | 千鳥・方眼図-5: a), b) | 千鳥図-5: c)                       |
| 不連続面の傾斜角 | 30°              | 0°, 45°, 60°<br>90°, 120°, 135° |

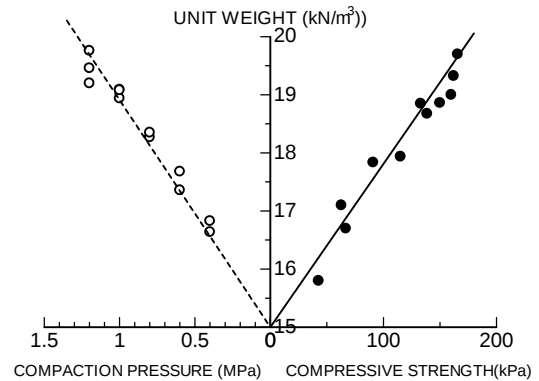


図-4 単位体積重量と圧縮強度・締め固め圧力の関係

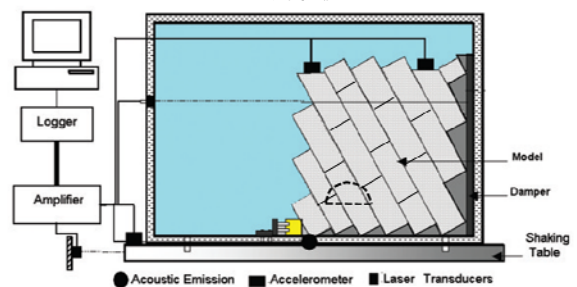
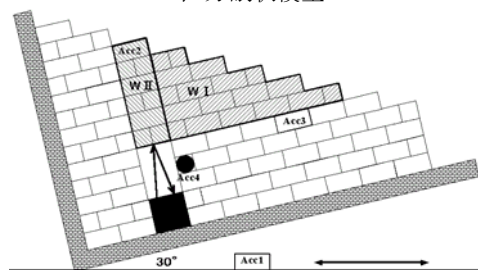
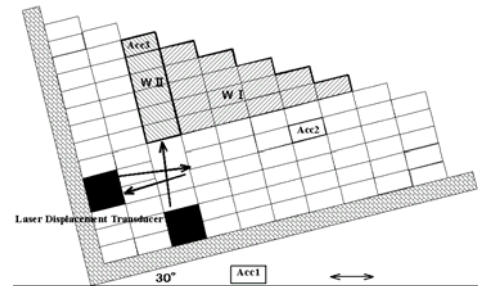
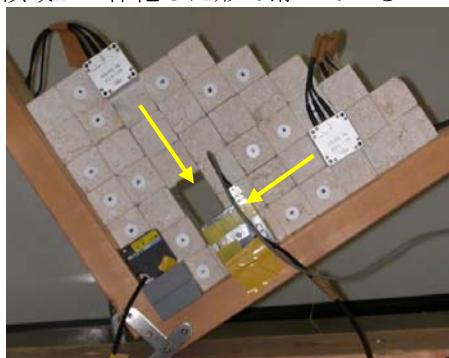


図-5 岩盤斜面実験略図

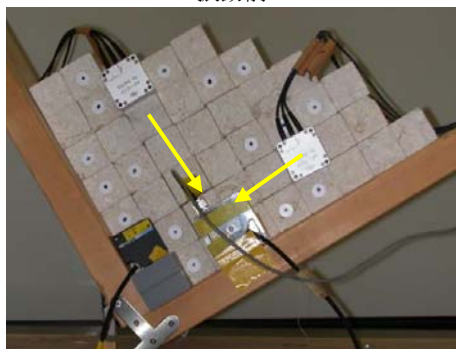
### 3. 実験結果

#### (1) 琉球石灰岩

この節で報告する琉球石灰岩ブロックを用いての実験についてGenis and Aydan<sup>10)</sup>で行っている。図-6に琉球石灰岩を用いた方眼状模型における振動実験結果の状況を示す。振動台の加速度がある値に達した時点で空洞上部のブロックと空洞側面のブロックが空洞内にすべりはじめる。入力加速度応答と上部ブロックの変位応答を図-7に示す。加速度約600galで上部ブロックが移動し始めている。加速度が増加するとせん断力が増加し、垂直力が減少するためブロックが移動するものと考えられる。崩壊する部分は傾斜角60°の不連続面にそって発生し、崩壊領域は他の不連続面を含んでいても、一体化した形で空洞に落ち込んでいく。図-8および図-9に琉球石灰岩を用いた千鳥状模型における振動実験結果を示す。入力加速度が約900galで上部ブロックが移動し始めている。千鳥状態の模型の場合、崩壊は傾斜角30°にそって発生している。したがって、すべりに対する限界加速度の値が増加している。この場合も、破壊する領域が一体化した形で滑っている。



振動前



振動後

図-6 琉球石灰岩傾斜角30°(方眼状態)

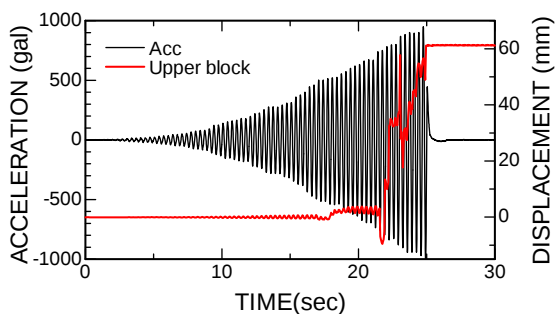


図-7 琉球石灰岩における入力加速度と変位の関係 (方眼状模型)

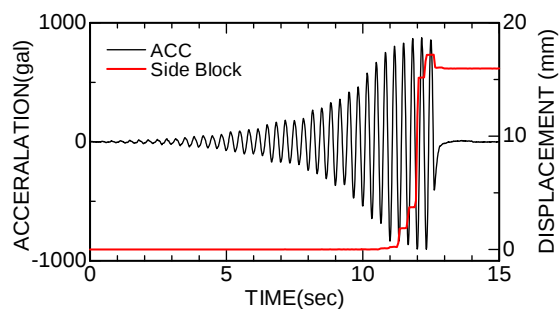


図-8 琉球石灰岩における入力加速度と変位の関係 (千鳥状模型)

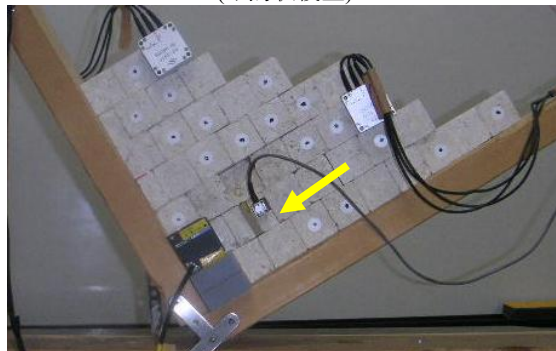


図-9 琉球石灰岩傾斜角30°(千鳥状態1)

#### (2) ブロック自体が壊れる模型材料

図-10から図-13にブロック自体が崩壊する模型材料を用いた場合の振動実験の結果を示す。

図-10に傾斜角0°の場合の岩盤斜面の崩壊の様子を示す。振動台の加速度がある値に達したらトンネル上部の斜面ブロックがすべりはじめる。入力加速度が約400galでブロックのすべりはじまる。上部のブロックがすべることにより、トンネル周辺のブロックがすべりだす。それに伴いトンネルを形成するブロックがトンネル内に落ち込み斜面の崩壊につながっていく。図-11に傾斜角45°の場合の岩盤斜面の崩壊の様子を示す。入力加速度が約1000galで空洞上部のブロックのすべりはじまる。振動により斜面を形成する岩盤ブロック内に隙間ができ、最終的にはトンネル上部のブロックがトンネル内に落ち込む様子が見て取れる。傾斜角60°の場合の岩盤斜面の崩壊の形態は入力加速度が約800galで空洞上部のブロックが空洞内部に落ち込む。傾斜角90°で側圧が小さい場合、一般的に空洞のブロックが自立しない。傾斜角90°の実験の場合、不安定な領域両側の細い残柱で支持させている。図-12に傾斜角90°の場合の岩盤斜面の崩壊の様子を示す。入力加速度約100galで斜面全体の変形が計測されている。斜面の傾斜角が90°の場合には、非常に揺れやすくなるため、岩盤ブロックが柱状のように揺れ、その後、斜面全体の崩壊につながっていく。図-13に傾斜角120°の場合の岩盤斜面の崩壊の様子を示す。入力加速度が約500galで空洞上部のブロックが空洞内に落ち込む。振動により斜面を形成する岩盤ブロック内に隙間ができ、最終的にはトンネル上部のブロック

がトンネル内に落ち込む様子が見て取れる。この場合、斜面のたわみ性トップリングする可能性があり、このような破壊は斜面が自立する場合に限る。

図-14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わかるように全体破壊の前、すべりが開始しており、破壊にいたる際に変位が大きくなるような応答が得られている。

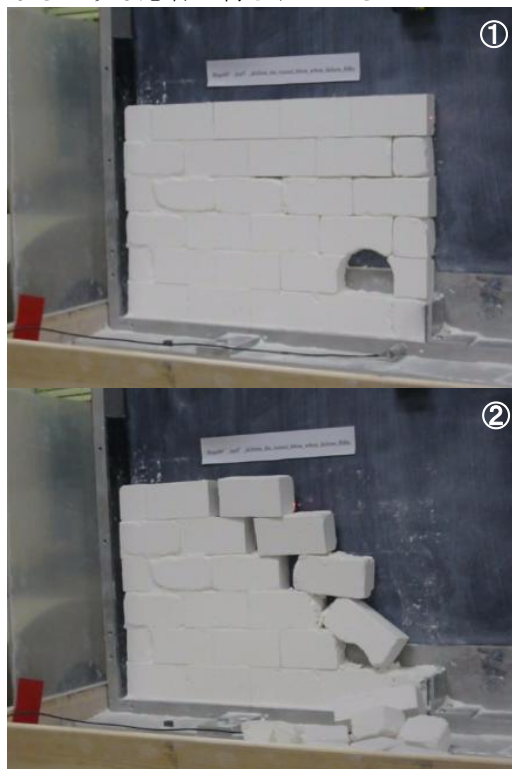


図-10 傾斜角0°の場合の斜面の振動に伴う崩壊の様子

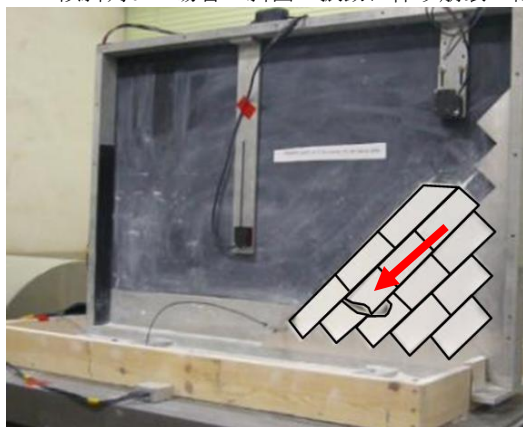


図-11 傾斜角45°の場合の斜面の振動に伴う崩壊の様子



図-12 傾斜角90°の場合の斜面の振動に伴う崩壊の様子

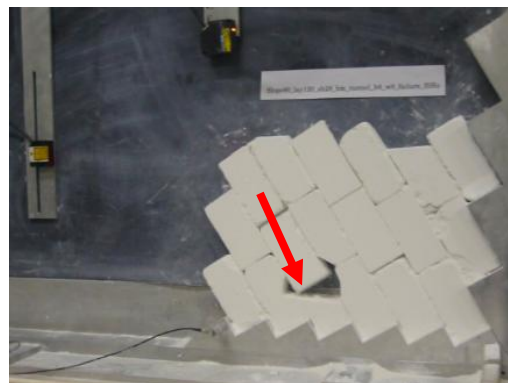


図-13 傾斜角120°の場合の斜面の振動に伴う崩壊の様子

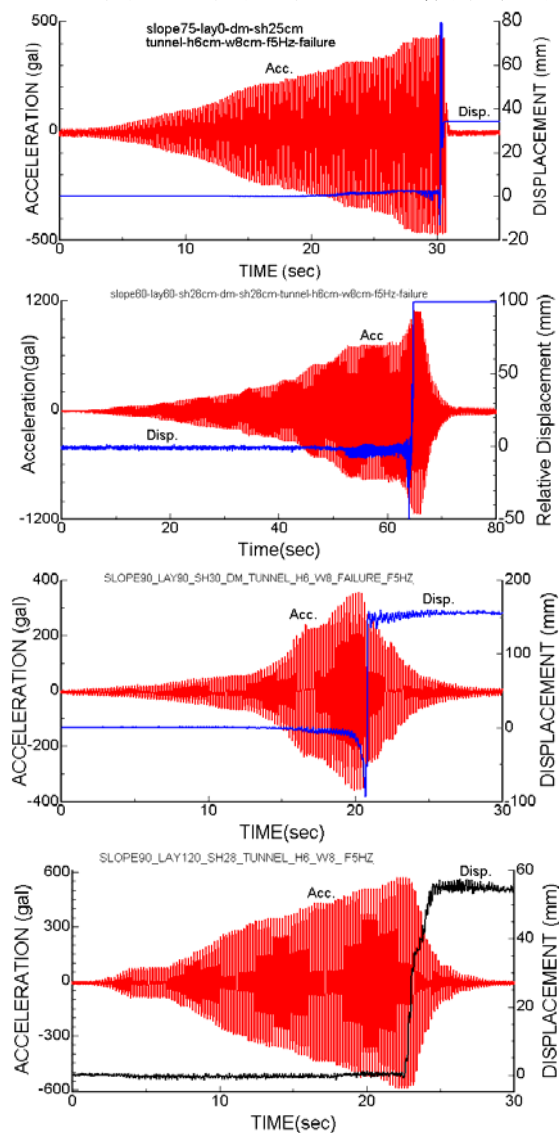


図-14 各実験で得られた加速度・変位応答

#### 4. 安定性の評価

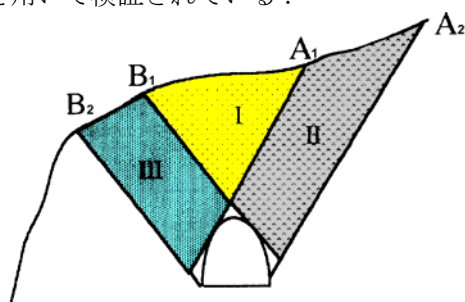
Aydan(1986)は底面摩擦実験を利用して、不連続性岩盤における浅所トンネルの破壊形態と安定性について検討を行っている。前節で紹介したように空洞に現れている連続な不連続面にそって不安定な領域のすべりが発生している(図-15)。この破壊形態を考慮して安定性を評価できる手法をAydan<sup>8)</sup>が提案した。1994年にAydanら<sup>9)</sup>はこの手法を地震力が

考慮できるように振動法を用いて発展させた。

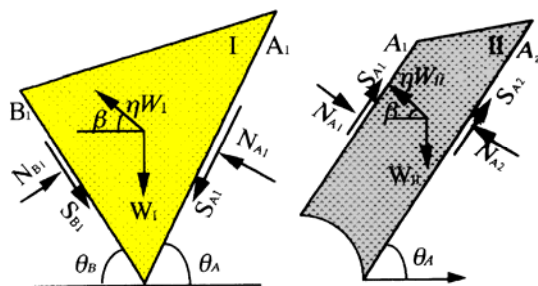
図-15に示す不安定領域IIについてAydanら<sup>9)</sup>が誘導した限界振動係数は式(1)のように与えられる。

$$\eta > \frac{\sin(\theta_B + \phi_B) \sin 2\phi_A - \frac{W_{II}}{W_I} \sin(\theta_A - \phi_A) \sin \theta^*}{\cos(\theta_B + \phi_B - \beta) \sin 2\phi_A + \frac{W_{II}}{W_I} \cos(\theta_A + \beta - \phi_A) \sin \theta^*} \quad (1)$$

ここに、 $W_I, W_{II}, \theta_A, \theta_B, \phi_A, \phi_B, \beta$  および  $\theta^* = \theta_A + \theta_B + \phi_A + \phi_B$  は領域IとIIの重さ、不連続面AとBの摩擦角と傾斜であり、作用する地震力の水平となす角度である。領域IIIの安定性についても同様な考え方を適用して、安定性に対する限界振動係数を求めることができる。この手法の妥当性を実験結果を用いて検証されている。



(a) 浅所空洞周辺の不安定領域



(b) 不安定領域に対する力学モデル

図-15 浅所空洞の安定性評価モデル<sup>7,9)</sup>

## 5. 実験結果の比較と考察

この章では第4章で紹介した手法を用いて実験結果を評価し、解析結果と比較する。各実験における幾何学条件がことなるため、限定した重さ比 ( $W_I/W_{II}$ ) あるいは傾斜角に対して比較を行う。

### (1) 琉球石灰岩

図-16は図-9に示した  $W_I/W_{II}=1.14$  の琉球石灰岩の模型空洞に対して行った解析から得られた限界振動係数と不連続面傾斜角の関係を示す。図中に振動前後の実験結果もしめしている。実験結果にばらつきが認められるが解析結果は大変類似している。実験結果のばらつきは前節で述べたことと同様である。

### (2) ブロック自身が壊れる模型材料

図-17は前節で紹介した実験結果を対象に  $W_I/W_{II}=1.8$  の模型空洞について行った解析から得られた限界振動係数と不連続面傾斜角の関係を示す。図中に傾斜角  $45^\circ \cdot 60^\circ$  の実験結果も示している。この場合も実験結果にばらつきが認められるが解析結果は大変類似している。実験結果のばらつきは前節で述べた理由によるものである。

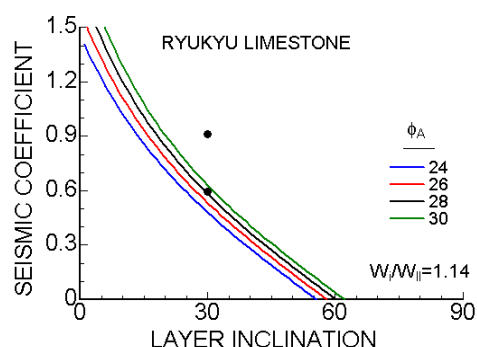


図-16 解析結果と実験結果の比較(琉球石灰岩)

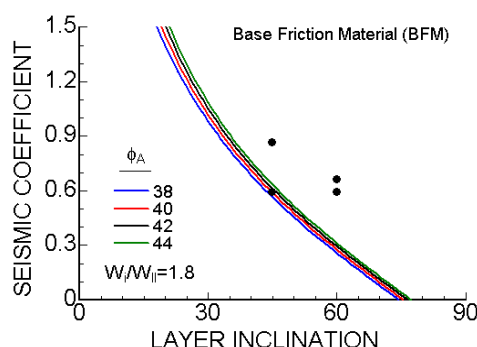


図-17 解析結果と実験結果の比較(模型ブロック)

## (3) 崩壊時の変位応答の推定

実験で計測された崩壊領域の変位応答の推定について一例を紹介する。変位応答を求めるために使用する手法はAydan & Kumsar<sup>14)</sup>が岩盤斜面のくさび破壊時の変位応答に対して提案した手法に基づいている。図-9に示した琉球石灰ブロックを用いた模型実験に適用する。解析では摩擦角を  $30^\circ$  とし、加速度は実験で作用させた記録を使用した。与えた加速度記録と得られた変位応答を図-18に示す。また、同図に計測された変位記録も示した。図からわかるように不安定な領域の動き出す時点は計算結果とほぼ同じである。ある時点を越えると計算された変位の値は実測値より大きいが全体的な傾向は同じである。今回の比較から使用した変位応答に対する解析手法の妥当性をある程度確認できた。

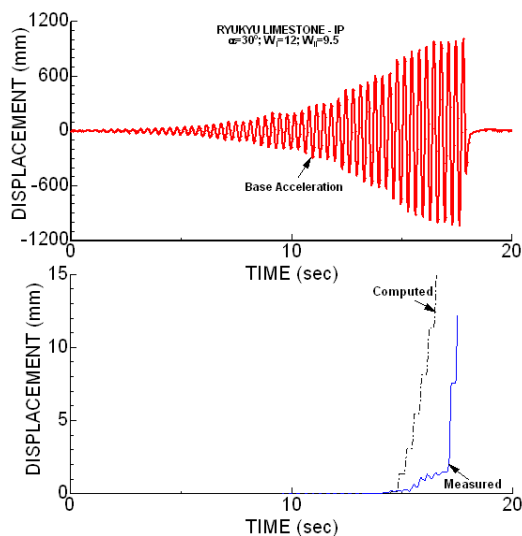


図-18 変位に対する実測値と解析値の比較

## 6. まとめ

本論文で岩盤斜面に近接する浅所地下構造物の地震時の挙動に注目し、地震に伴う浅所地下構造物の破壊現象を実験的および解析的に検討した。

振動実験においては以下のことが分かった。不連続面の傾斜角が大きくなり、拘束応力が作用しない場合には、地震力に対する空洞の抵抗力が小さい。空洞に接するような二つの連続する不連続面に囲まれた領域が不安定になる場合には、剛的に空洞内に滑り込む。琉球石灰岩を用いた方眼状模型の実験では不連続面の傾斜角が $30^\circ$ であったため空洞上部と空洞側面のブロックが空洞内にすべりこむ。千鳥状模型の場合には空洞側面のブロックが空洞内にすべりこむ。模型材料を用いた実験では以下のところが分かった。 $0^\circ(180^\circ)$ および $90^\circ$ においては斜面が非常に揺れやすいため、岩盤ブロックのすべりから斜面の崩壊につながる。 $45^\circ \cdot 60^\circ \cdot 120^\circ \cdot 135^\circ$ の斜面は比較的安定している。破壊の形態としてはトンネル上部の岩盤ブロックがトンネル内に落ち込む。

Aydanら<sup>9)</sup>の提案した解析手法で浅所地下構造物の安定性を評価することができる。その解析手法と振動実験結果と比較し、その妥当性を検証した。振動実験で不安定な領域の破壊時の変位応答について Aydan & Kumsar<sup>14)</sup>が提案している手法を今回の問題に改良して使用し、その変位応答を求めた。空洞の不安定になる振動レベルと別にその発生時点と時間領域での応答を求めることが可能である。

## 参考文献

- 1) Asakura T, Sato Y, : Mountain Tunnels Damage in the 1995 in Hyogo-ken Nanbu Earthquake. 39(1) p. 9-16, Railway Technical Research Institute (RTRI),1998.
- 2) Wang WL, Wang TT, Su JJ, Lin CH, Seng CR, Huang TH : Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake, Tunneling and Underground Space Technology, 16:133-150,2001.
- 3) Aydan, Ö., Ulusay, R, Kumsar. H., Tuncay, E. : Site investigation and engineering evaluation of the Düzce-Bolu Earthquake of November 12., 1999. Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 09-51, p.220,2000.
- 4) Aydan, Ö., Y. Ohta, Hamada, M. : Geotechnical evaluation of slope and ground failures during the 8 October 2005 Muzaffarabad earthquake in Pakistan. Journal Seismology, Vol.13, No.3, 399-413,2009.
- 5) Aydan, Ö., Y. Ohta, M. Hamada, J. Ito, K. Ohkubo: The characteristics of the 2008 Wenchuan Earthquake disaster with a special emphasis on rock slope failures, quake lakes and damage to tunnels. Journal of the School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol.7, No.2, pp.1-23,2009.
- 6) Aydan, Ö., Hamada, M., Itoh, J, Ohkubo, K.: Damage to Civil Engineering Structures with an Emphasis on Rock Slope Failures and Tunnel Damage Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake. Journal of Disaster Research, Vol.4, No.2, 153-164,2009.
- 7) Aydan, Ö., Ohta, Y., Genis, M., Tokashiki, N. and Ohkubo, K. : Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes. Rock Mechancis and Rock Engineering,, 2010.
- 8) Aydan, Ö. : Stability of slope and shallow underground openings in discontinuous rock mass. Nagoya University, Dept. of Geotechnical Engineering, Interim Report, 16pages (unpublished),1986.
- 9) 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.
- 10) Geniş, M., Ö. Aydan : Evaluation of dynamic response and stability of shallow underground openings in discontinuous rock masses using model tests. Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, Seoul, Korea, July, 787-794,2002.
- 11) Aydan Ö, Kumsar H, Toprak S, Barla G. : Characteristics of 2009 l'Aquila earthquake with an emphasis on earthquake prediction and geotechnical damage. Journal Marine Science and Technology, Tokai University 9(3): 23-51,2009.
- 12) 太田 良巳, アイダン オメル : 地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究. 「海-自然」東海大学紀要海洋学部, 第2巻第3号, 1-12, 2004.
- 13) 川本 眺万, 尾原 祐三, 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に関する基礎的研究, 日本鉱業会誌, vol.99, No.1139, 1-6, 1983.
- 14) Aydan, Ö., Kumsar, H. : An Experimental and Theoretical Approach on the Modeling of Sliding Response of Rock Wedges under Dynamic Loading. Rock mechanics and Rock Engineering, DOI:10.1007/s00603-009-0043-3 Springer, 2009.

## FAILURE MODES OF SHALLOW TUNNELS INDUCED BY EARTHQUAKES AND THE EVALUATION OF THEIR STABILITY

Yoshimi OHTA and Ömer AYDAN

Underground structures are generally known as aseismic structures. The recent earthquakes, however, showed that underground structures are also vulnerable to seismic damage. In this study, we investigated the stability of shallow underground openings in discontinuous rock mass with shallow overburden and adjacent to slopes through model experiments and the method of Aydan<sup>8,9)</sup> to evaluate their stability and compared the experimental results with theoretical predictions. The displacement response of the unstable body during motion is evaluated using the approach proposed by Aydan and Kumsar<sup>14)</sup> and it was found that the method can model the displacement responses of the failing bodies in time-domain also.