

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

堀内 浩貴^{1*}・藍檀 オメル²・渡嘉敷 直彦³

¹琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

²琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

³琉球大学島嶼防災研究センター研究開発室 (〒901-2213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

*E-mail: e145317@eve.u-ryukyu.ac.jp

海食崖は海波の繰り返し作用に伴い、岩盤の劣化などによって浸食される。その限界浸食深さや崖高さは岩盤の強度（引張あるいはせん断）に依存し、それを超えると破壊に至る。また近年、海外や日本で発生した地震で数多くの海食崖の崩壊事例が確認されており、その時の崩壊メカニズム解明のため、振動時も崖の挙動を調べる必要があると思われる。本研究では、海食崖の静的および動的安定性に関して、底面摩擦模型実験や振動実験などを実施し、その静的および動的安定性の検証を行った。海食崖を構成する岩盤モデルとして、連続体、層状体およびブロック体形状の岩盤を模擬して実験を行った。本論文でこれらの模型実験結果を報告し、得られた知見について論じる。

Key Words : failure mechanism, model test, static, dynamic, toe erosion, shaking table

1. はじめに

世界的に海岸沿いには岩盤劣化の著しい海食崖が多数存在し、その近辺には歴史的建造物や道路、観光施設、灯台などが存在するため、安定性評価に関する検討が求められている（図-1、図-2）。海食崖の安定性評価に関する研究はいくつか報告されている^{1)・2)・3)}。報告されているものは事例調査、現場計測により得られた結果と数値解析による評価であり、室内実験による評価はほとんど検討されていない。また、各地で地殻変動とそれに伴う褶曲構造や断層運動も確認されている。例えば、沖縄本島周辺に着目すると、図-4に示すように、琉球諸島の南東側には、フィリピン海プレートの潜り込みが存在している一方で、大陸側には沖縄トラフと呼ばれる谷状の海底地形が存在している。そのため、地震による海食崖の崩壊も予想される。実際に、日本国内外で発生した地震による崩壊が数多く確認されている（図-3）。しかし、海食崖の崩壊に伴い、現場計測および数値解析がこれまでに行われてきてはいるが、室内実験による検討が少ない。本研究で、静的模型実験および動的模型実験を行うことで、不連続面に依存した崩壊メカニズムや振動実験による模型の挙動を確認し、評価することが可能であると考えため、今回さらに実験的な検討が必要であると

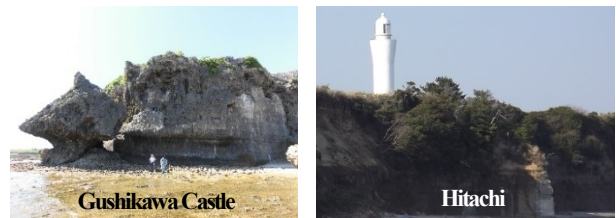


図-1 海岸沿いにある重要構造物への対策の必要性
(社会的ニーズ)

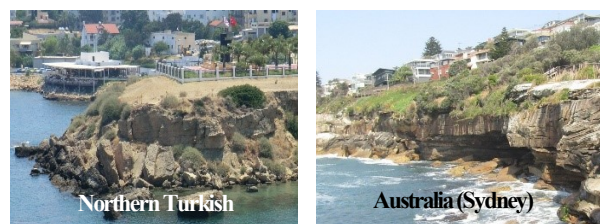


図-2 風化および津波等で崩壊した海食崖（自然現象）

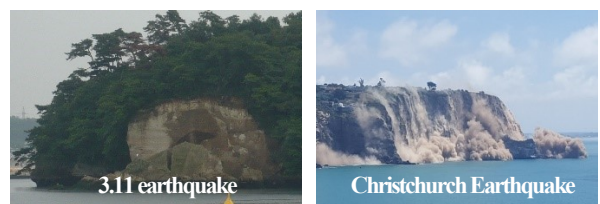


図-3 地震動によって崩壊した海食崖（自然災害）

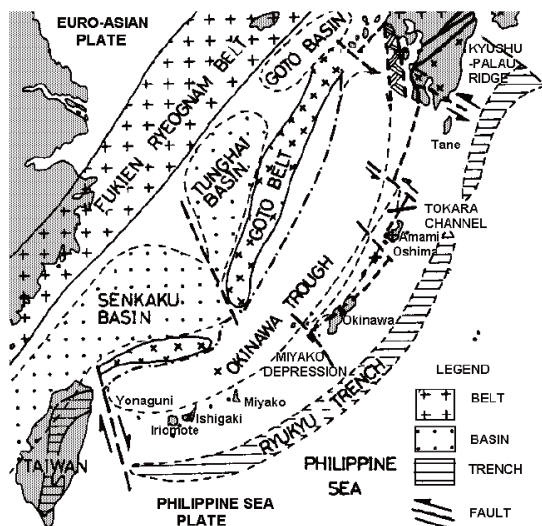


図-4 琉球諸島の地殻構造 (木崎ら⁴⁾)

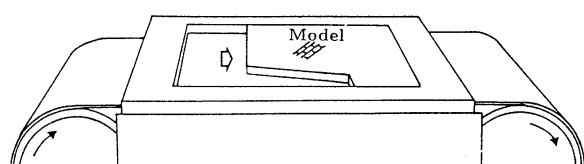


図-5 底面摩擦模型実験装置と模型モデル

思われる。

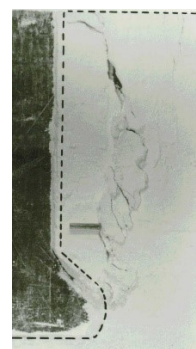
本研究では、岩盤特有の不連続面に考慮して、連続体（不連続面群：0）、層状体（不連続面群：1）及びブロック体（不連続面群：2）の3種類の形状について静的、および動的について室内模型実験を実施し、海食崖の安定性評価を行った。

2. 模型実験による海食崖の静的安定性評価（実験1）

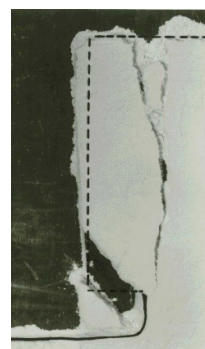
(1) 実験概要

本実験に用いる底面摩擦模型実験のモデルを図-5に示す。この装置の原理は、一方向に一定速度で作動するプラスチックのベルト上に模型を置き、定枠で模型の動きを止めることで模型とベルトとの間に摩擦力を発生させ、この摩擦力によって生じた模型内の応力分布が重力場における応力状態と相似になるように実験するものである。詳しい原理は、既往の研究を参照していただきたい。

また、本実験では、底面摩擦模型実験装置のベルト上で固定枠に接して斜面を成形し、海食崖の法尻部を高さ25mmで浸食深さを増加させ、それぞれの破壊線が斜面上部に達して全体破壊が生ずるまで実験を行った。今回は岩盤不連続面を想定すべく、主に3種類の形状について実験を行った。実験のケースは、連続体モデル及び、海食崖の初期斜面角度を70°と90°とし、成層角度を15°か

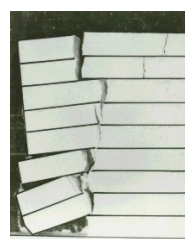


(a) せん断破壊



(b) たわみ性トップリング破壊

図-6 連続体モデル（不連続面群：0組）

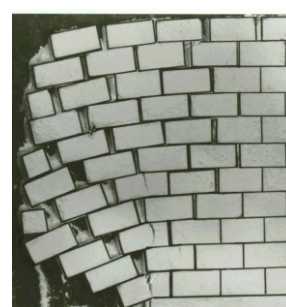


(a) たわみ性トップリング破壊



(b) 滑り破壊

図-7 層状体モデル（不連続面群：1組）



たわみ性およびブロックトップリング破壊

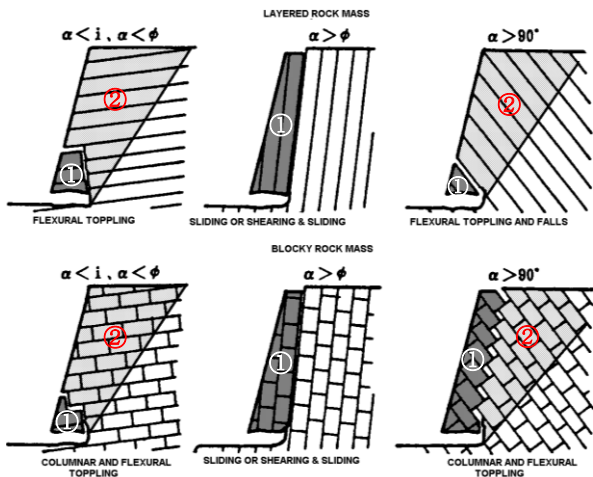
図-8 ブロック体モデル（不連続面群：2組）

ら165°の間で8種類における成層状態を想定した層状とブロック状の3種類について行った。また、進展する海食崖モデルの破壊形状を記録するため、一定時間間隔で写真撮影を行った。ここで、実験をするにあたり、模型の特性について以下に条件を示す。

- ① 自重場にした際に、浸食をさせる前で、模型自体が崩壊せず、安定していること。
- ② 模型材料が、自重場ではない他の要因で壊れるような面外破壊を起こさないようにすること。

(2) 模型材料

本実験で使用した模型材料は、硫酸バリウム（ BaSO_4 ）、酸化亜鉛（ ZnO ）、白色ワセリンを70：21：9の重量比で配合したもので、強度が単位重量体積に大きく依存しているため、締め固めの程度により模型の強度を比較的簡単に变化させることができる。静的模型実験の場合、



①：局所的破壊 ②：全体破壊
図-9 不連続面の角度の違いによる海食崖の破壊様式

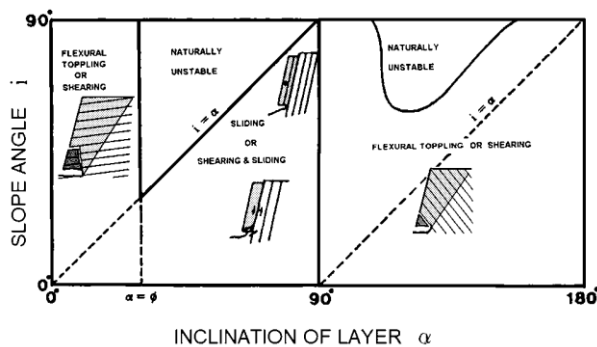


図-10 層状体による海食崖崩壊様式の領域分類

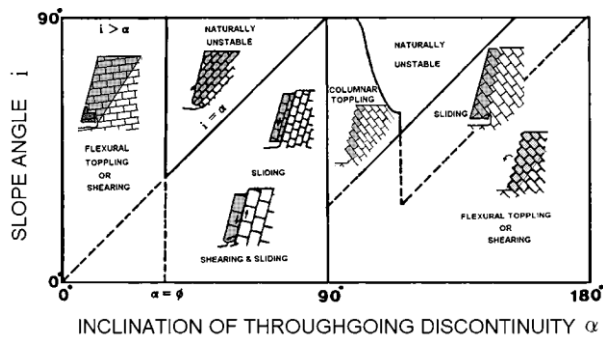


図-11 ブロック体による海食崖崩壊様式の領域分類

連続体、層状体およびブロック体についてそれぞれの破壊形態を観察するため、実験中に模型材料自身が壊れないような強度に締め固めた。また、実験後に模型をもとの粉末状に戻すことが容易であり、模型材料は水分を吸収することなく化学反応を起こすこともないため、再利用に適した材料である。

(3) 実験結果

連続体、層状体およびブロック体についての海食崖モデルの崩壊形状の例を図-6、図-7、図-8に示す。これらの図から明らかなように、不連続面の数や、不連続面の

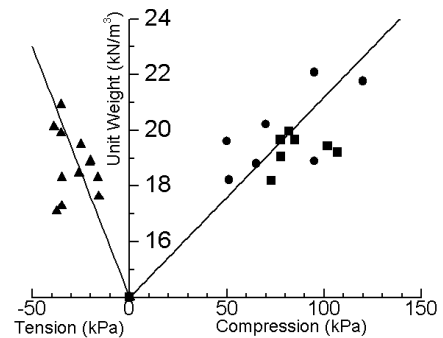


図-12 単位体積重量と圧縮強度および引張強度の関係

方向により、崩壊形態が異なることが確認できた。

図-9に波や岩盤劣化で生ずる海食崖の破壊様式の分類を示す。この図に関して、層状とブロック状の海食崖の破壊様式は成層角度 α と内部摩擦角 ϕ で区別している。なお、清水らの研究結果⁹⁾では、第一段階までの崩壊形態のみの表示であったが、今回そこから、さらに実験を続けていくと、初期の崩壊形態に加えて、新たに崩壊していく様子が確認できたため、その崩壊形態を付け加えて示す。図に示す①が初期に崩壊した局所的破壊、②が実験を開始してしばらくしてから崩壊した全体破壊である。実験結果より、 $\alpha > \phi$ の時は、時間が経っても初期に崩壊した崩壊から新たな崩壊は発生しないことが分かった。その他の場合では、不連続面の角度に依存して、崩壊形態が異なったことが確認できた。また、図-10、図-11に清水らの実験結果⁹⁾と今回の実験結果について模型実験による海食崖の破壊様式の領域を層状体及びブロック体についてそれぞれ整理してまとめたものを示す。この図は、横軸に成層角度 α 、縦軸に初期斜面角度 i を取り、破壊様式及び安定領域と不安定領域を示した。また、模型の強度によっても崩壊形態が異なり、岩盤斜面崩壊は、地質構造や幾何学的形状によって異なった破壊形状を示すことが知られているが、法尻付近が浸食される海食崖のような不安定な自然構造物にも同様に、岩盤斜面の各種の破壊様式に分類できるものと考えられる。

3. 模型実験による海食崖の動的安定性評価 (実験2)

海食崖の実験的検討に関して、今までに動的模型実験による検討がほとんどなく、地震時による海食崖の評価に関して、不明な点が多かったと思われる。本実験では、それらを解明するため、一方向のみの加振を再現できる振動台を用いて載荷実験を行い、安定性評価を行う。なお、本研究では、岩盤不連続面の有無を考慮した海食崖の動的応答と破壊機構を明らかにすることを目的とする。



図-13 海食崖の動的模型実験の様子

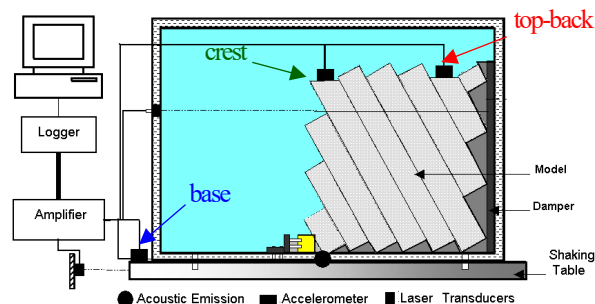
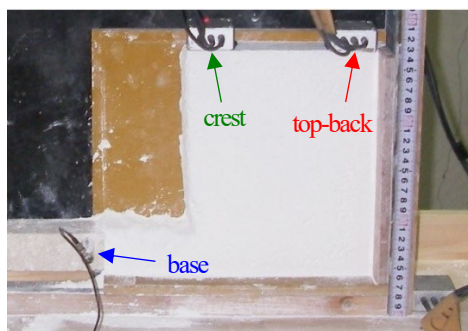
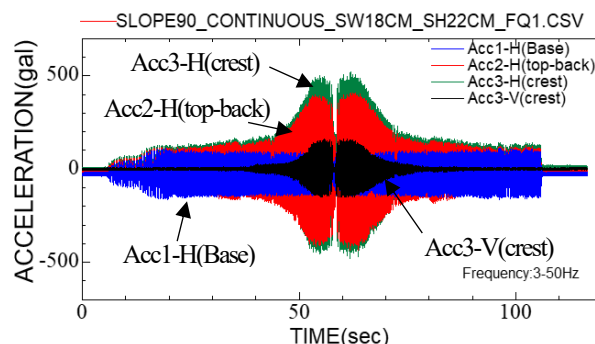


図-14 模型実験における計測器の設置状況とデータ取得方法

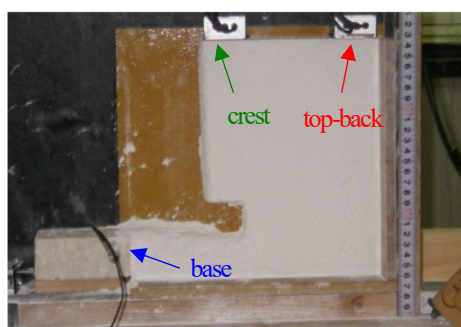


(a) 模型モデル（浸食なし）

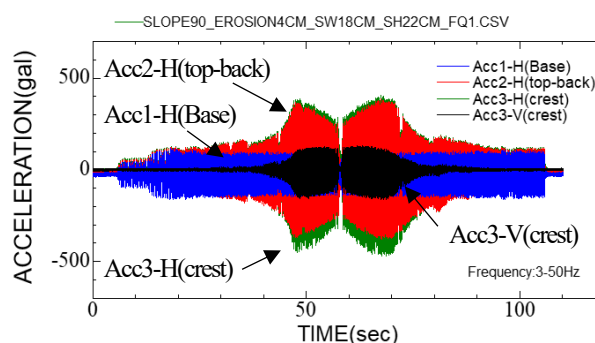


(b) 法尻付近に浸食がない場合における加速度値

図-15 法尻付近に浸食がない場合における模型モデルと各測定位置における加速度



(a) 模型モデル（浸食あり）



(b) 法尻付近に浸食がある場合における加速度値

図-16 法尻付近に浸食がある場合における模型モデルと各測定位置における加速度

(1) 模型材料

今回実験に用いたブロックは、地震時の海食崖の破壊機構を再現するため、地震動及び強制変形に伴い、模型ブロック自体が破壊するブロックを用いる。模型ブロックは、静的模型実験のものと同様、硫酸バリウム（BaSO₄）、酸化亜鉛（ZnO）、白色ワセリンを70：21：9の重量比で配合したもので、強度が単位重量体積に大きく依存しているため、圧縮試験機による締め固めの程度により模型の強度を比較的簡単に変化させることが可能である（図-12）。また、使用後も元の粉末状に戻すことが容易である。

(2) 実験方法

今回行う実験は、固有周期特性実験及び破壊特性実験である。なお、地震動を受ける海食崖の安定性評価に関する模型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ことができるものであり、最大変位量は、100mm、振動台の面積は1.0×10m²である。ここで、実験の様子を図-13に示す。今回は、海食崖の高さ200mm、海食崖の幅は200mm、浸食深さ50mmと100mmの連続体、層状体およびブロック体についてそれぞれ一定圧力で締め固めた模型ブロックをおよびアルミ製の型枠の中に積み上げ模型岩盤を作成した。計測項目は加速度、変位およびAEとした。振動特性を求める際に振動台と海食崖の斜面上部の加速度応答を計測した。具体的な実験方法として周波数3-50Hzで変化させ、それ

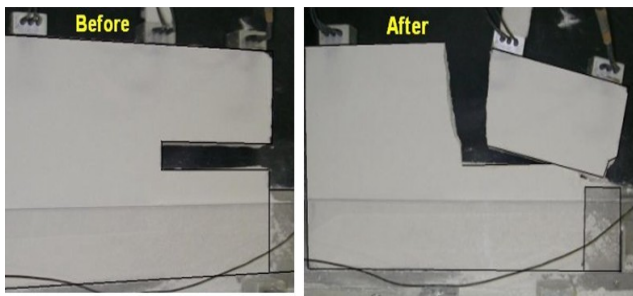


図-17 連続体岩盤モデル崩壊前後の様子（浸食量100mm）

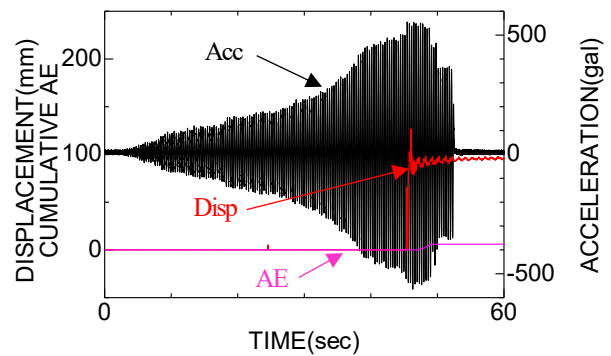


図-18 連続体モデルにおける加速度・変位・AE応答

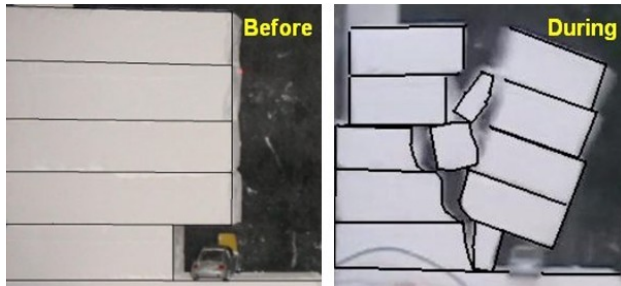


図-19 層状体岩盤モデル崩壊前後の様子（浸食量50mm）

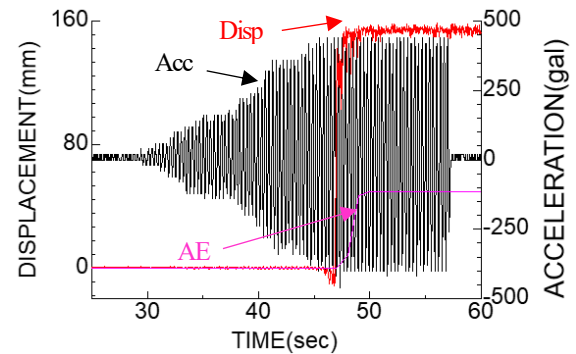


図-20 層状岩盤モデルにおける加速度・変位・AE応答

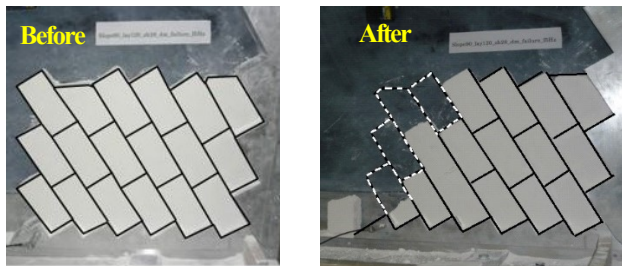


図-21 ブロック体岩盤モデル崩壊前後の様子

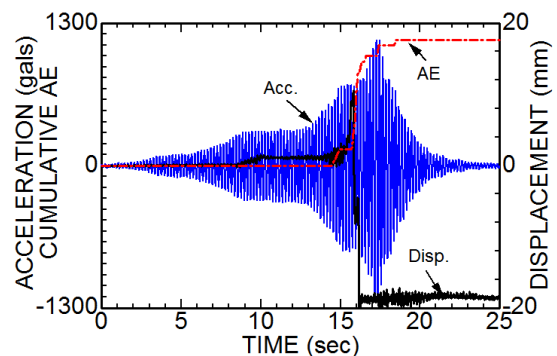


図-22 ブロック状岩盤モデルにおける加速度・変位

それぞれの形状での海食崖の周波数特性を調べた。ここで、図-14に模型実験における計測器の設置状況とデータの取得方法を示す。また、破壊特性実験の場合、振動台の加速度、レーザー変位計を用いて、海食崖の斜面表面の変位を2箇所と亀裂発生時および進展状況を把握するため斜面法尻付近のAE応答を計測することとし、周波数を5Hz一定として加速度を破壊に至るまで増加させた。

(3) 実験結果

a) 固有周期特性実験

今回、固有周期特性実験の結果の一例として図-15と図-16に浸食の有無における固有周期特性実験の結果を示す。この図は、入力加速度、海食崖モデル上端前方の加速度応答および海食崖上端後方の加速度応答をまとめたものである。図-15(b)と図-16(b)を比較すると、海食崖の上端部の加速度応答が浸食がある場合の方が、

長い時間応答していることがわかる。入力加速度と海食崖のモデル上端の加速度応答を比較すると、法尻付近に浸食がない場合は、加速度応答が4-5倍に増幅している。一方で、法尻付近に浸食がある場合は、加速度応答が約4倍となっている。その上、海食崖上端の加速度応答を比較すると、海食崖モデル上端後方に比べて、先端において大きな振幅が計測されている。

b) 破壊特性実験

今回の破壊特性実験の一例として、図-17、図-18、図-19、図-20、図-21、図-22に連続体、層状体およびブロック体についての破壊特性実験の結果として加速度、レーザー距離計による変位とAEによる結果を示す。

図-17および図-18において、連続体岩盤モデルの入力加速度およびレーザー距離計による変位について、入力加速度500gal付近で模型が大きく変位した。また、入力加速度500gal付近での加速度応答を比較すると、約1.5倍

増幅していることがわかり、その結果崩壊したことがわかる。破壊後の模型の様子は、浸食している箇所曲げ破壊を起こしていることが観察できた。

図-19および図-20において、層状体岩盤モデルの入力加速度およびレーザー距離計による変位について、入力加速度450galで海食崖の模型が大きく変位した。また、入力加速度450gal付近での加速度応答を比較すると、約1.3倍増幅していることがわかり、その結果崩壊したことがわかる。さらに、破壊後の模型の様子を観察すると、海食崖の突出部が曲げ破壊もしくは岩塊が回転運動を起こしていることからトップリング破壊^{7,8)}を起こしていることが観察できた。

図-21および図-22において、ブロック体岩盤モデルの応答加速度および、レーザー距離計による変位について、25-26sの時、50mm変位し、26s付近で-100mmに変位したのち、27.5sで応答加速度1200galを記録した。その結果、崩壊したことがわかる。また、破壊の様子を観察するとブロック単体での崩壊であり、ブロックトップリング破壊⁹⁾を起こしていることが観察できた。

4. 結論

本論文で、海食崖の不連続面群の数および岩盤不連続面の方向に着目し、静的および動的模型実験を行い、その安定性を検討した。

本実験より得られた知見を以下に示す。

- 1) 法尻付近が浸食される海食崖のような不安定な自然構造物の崩壊様式は、各種の岩盤斜面と同様の崩壊様式に分類することができる。
- 2) 不連続面の成層角度により、海食崖モデルの崩壊形態が異なり、初期の崩壊後にしばらく実験を続行していくと、新たな崩壊が発生した（実験1）。
- 3) 海食崖の不連続面群の数および岩盤不連続面の方向の違いにより、加速度応答および模型の変形挙動が大きく異なる（実験2）。

謝辞：本研究で報告した実験の一部に関して協力および助言をいただいた元名城大学理工学部の清水泰弘先生、イランのテヘラン大学鉱山学科のM.Amini博士、原子力規制庁（元東海大学理工学研究科）太田良巳博士に謝意を表す。

参考文献

- 1) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass.土木学会論文集 C 部門, Vol.66, No.2, pp.397-406,2010.
- 2) Aydan, Ö.: The effects of earthquakes on rock slopes. ARMA,13-378,pp.1-10,2013.
- 3) 小林昭男, 宇多高明, 黒澤裕司, 遠藤将利, 遠藤威：東北地方太平洋沖地震による海食崖の崩壊とその後の変形, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) ,pp.I204-I209,2012.
- 4) 木崎甲子郎：琉球弧の地質誌, pp.93-114,沖縄タイムス社, 1985.
- 5) 川本眇万, 尾原祐三, 市川康明：底面摩擦模型実験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（第1報）—, 第36回年次学術講演会, 土木学会, pp.1-6, 1982.
- 6) 清水泰弘, 藍檀オメル, 京谷孝史, 市川康明, 川本眇万：岩盤斜面の法尻付近による不安定現象に関する実験的研究, 第25回土質研究発表会（岡山）, pp.1121-1124,1990.
- 7) Aydan, Ö.and Kawamoto, T.: The Stability and Underground Openings Against Flexural Toppling and Their Stabilisation. Rock Mechanics and Rock Engineering 25, pp.143-165,1992.
- 8) 藍檀オメル, 川本眇万：不連続性岩盤斜面のトップリング破壊とその安定化について, 日本鉱業会誌, pp.763-770,1987.
- 9) Aydan, Ö. Shimizu, Y. and Ichikawa, Y.: The effective failure modes and stability of slopes in rock mass with two discontinuity sets. Rock Mechanics and Rock Engineering22, pp.163-188,1989.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE STABILITY OF MODEL ROCK SLOPES UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADING CONDITIONS

Kouki HORIUCHI, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

Rock cliffs may become unstable due to toe erosion resulting from the physical and chemical degradation and/or seismic loading. Particularly erosion induces high tensile stresses in rock cliffs. Furthermore, it is known that overhanging rock slopes subjected to failed during recent earthquakes such as 2008 Wenchuan, 2009 L'Aquila and 2011 Great East Japan Earthquake. This experimental study was undertaken to investigate the stability of model rock cliffs under static and dynamic loading conditions in order to clarify the governing factors associated with their failure. The rock mass was modelled as continuum, layered and block media. The outcomes of this experimental studies are presented and discussed.