斜面上における巨大岩塊の地震時の安定性に関する基礎的研究

村山 有祈[1*]・伊東 孝[2]・Nazli Tunar ÖZCAN[3]

[1]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）
[2]琉球大学　工学部工学科社会基盤デザインコース（同上）
[3]Hacettepe University, Department of Geological Engineering, Ankara, Turkey
*E-mail: k208482@eve.u-ryukyu.ac.jp

Key Words : *shaking table, rock fall, Miyagi-Island, rock mass, earthquake*

1. はじめに

宮城島は沖縄県うるま市に属する，沖縄本島の東側に位置する有人島である（**図-1**）．沖縄県宮城島には数多くの落石跡が存在している．地質は琉球石灰岩，砂岩や泥岩などの堆積岩層の順で構成されている．琉球石灰岩層は約10°の傾きで西に傾斜しており，過去の正断層運動によって宮城島集落方面に1200m以上の崖を構成している．これが，過去の落石の主要な原因となっており、一部の巨大岩塊は海まで到達している．落石した巨大岩塊の大きさは一般に10-20mであり，主に過去の地震に関連したものとなっている．崖の頂上付近には亀裂幅100cm以上開いた非常に大きな岩塊が存在する．また，今後巨大地震が生じた際には落石の可能性がある地域となっている．宮城島では2019年6月24日に雨による落石が生じているが，仮に地震が生じた場合，地震だけでなく落石による住民や構造物への被害も考えられる（**図-2**）．宮城島の落石問題として，到達距離の推定に関しては既往の研究を参照にされたい[1,2]．そこで本研究では，基盤は知念層で構成されている斜面法肩近傍の琉球石灰岩の岩塊の安定性について、振動台を使用して振動の影響について基礎的な実験を行った．さらにその安定性を解析的に検討した．

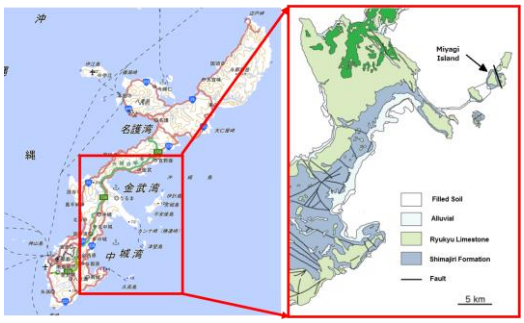

図-1　沖縄県うるま市宮城島

図-2　宮城島内の崩落する可能性の高い巨大岩塊

2. 模型材料

(1) 斜面模型

斜面模型は，先述したように知念層を用いて作製した．斜面高さは約7.5cm，斜面角度は約10°となっている．

本実験では，斜面上部水平面を斜面角度0°(以下α0)，斜面傾斜部を斜面角度10°(以下α10)として各パターンで実験を行った．

⑵ 岩塊ブロック

本実験では，斜面の法肩近傍の岩塊として直方体の琉球石灰岩のブロック（B）を用いた．また他に球状のもの（SM）と自然の岩に近いもの（AB）でも同様に実験を行った．**図-3**に実験で用いた全岩塊ブロックを，**表-1**に各岩塊ブロックの寸法と重さを示す．

別で，実験で用いた岩塊ブロックと知念層との静摩擦係数を傾斜実験により求めた．**図-4**に傾斜実験の様子を**表-2**に実験結果を示す．琉球石灰岩のブロックに関しては代表してB3でのみ実験を行った．

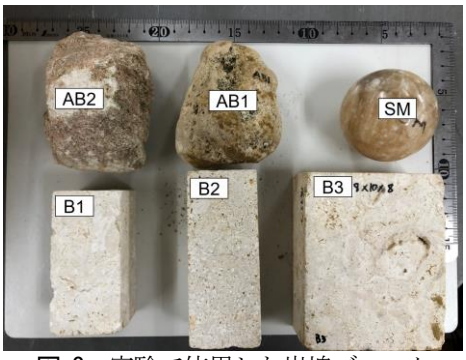

図-3　実験で使用した岩塊ブロック

表-1　岩塊ブロックの寸法と重さ

岩塊	寸法(幅×奥行×高さcm)	重さ(g)
AB1	6.3×5.3×8.1	267.22
AB2	6.0×5.8×8.5	367.43
SM	直径5.5	243.58
B1	4.0×4.0×8.0	290.98
B2	4.0×4.0×10.0	385.19
B3	8.0×4.0×10.0	717.15

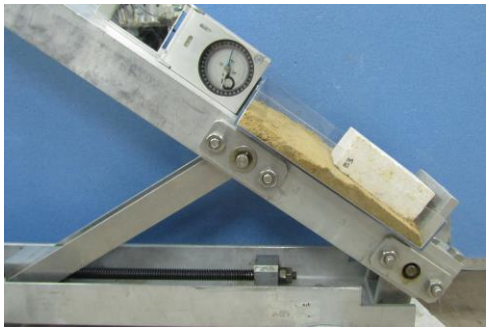

図-4　傾斜実験の一例

表-2　岩塊ブロックの静摩擦係数

岩塊ブロック	平均静摩擦角度（°）
AB1	36.12
AB2	31.27
SM	6.58
RLS（B3）	32.08

表-3　岩塊ブロックの静摩擦係数

岩石	揺れ始め(gals)	崩壊時(gals)
AB1(α0)	407.25	487.87
AB1(α10)	299.50	345.63
AB2(α0)	111.08	226.62
AB2(α10)	113.00	131.38

表-4　岩塊ブロックの静摩擦係数

岩石	揺れ始め(gals)	崩壊時(gals)
SM(α0)	89.67	462.75
SM(α10)	50.00	70.21

表-5　岩塊ブロックの静摩擦係数

岩石	揺れ始め(gals)	崩壊時(gals)
B1(α0)	117.92	280.50
B1(α10)	122.67	198.25
B2(α0)	152.79	260.87
B2(α10)	80.67	123.00
B3(α0)	130.25	552.75
B3(α10)	339.87	545.62

3. 動的実験

本実験は，琉球大学の振動台試験装置を用いて行われた．今回は計測器として加速度計を1つ，レーザー変位計を2つ使用した．加速度計は振動台上に設置し，振動台の応答加速度を計測した．レーザー変位計は，高さの異なる2か所から岩塊ブロックに焦点を合わせ，崩壊時の岩塊ブロックの変位を計測した．加速度は東京測器の10G加速度計で記録された．加振条件は，加速度を50galsから600galsに1分間かけて変化させ加振した．また，周波数はおよそ2.8Hzから2.9Hzまで変化させ，およそ3Hzで一定となるよう設定した．本実験はAKASHI:OA-STD1000Xの振動台を用いて模型実験を行った．また振動計測には，YOKOGAWA SL1000を使用し，10msでサンプリングを行った．実験は，岩石を静的に安定した状態から振動台にて加振させた．各岩石ごとに斜面角度0°，斜面角度10°で各3回行った．

4. 実験結果

各ブロックごとの揺れはじめ時と崩壊時の加速度を**表-3**から**表-5**に示す．実験結果は3回の実験の平均値をまとめたものである．全体的に崩壊時の加速度に注目すると，α0よりα10のほうが加速度が小さく，崩壊しやすいことがわかった．以下に各ブロックに関して詳細を述べる．

⑴ 岩塊ブロックAB

表-3および**図-5**から**図-8**の比較よりAB1に関しては，揺れ始めも崩壊時もα0のほうが加速度が大きく揺れにくいことがわかった．

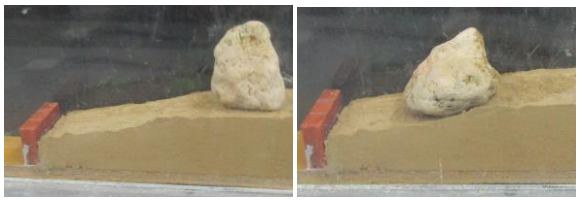

図-5　ブロックAB1のα0の場合、破壊前後の様子

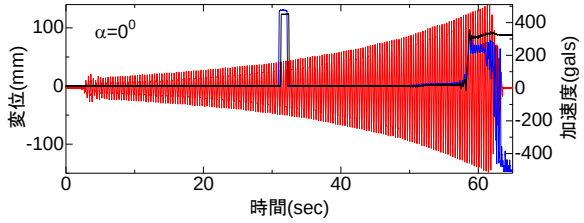

図-6　ブロックAB1のα0の場合、入力加速度と変位応答

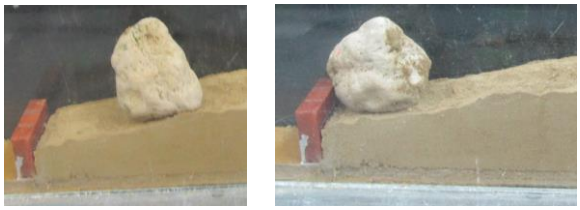

図-7　ブロックAB1のα10の場合、破壊前後の様子

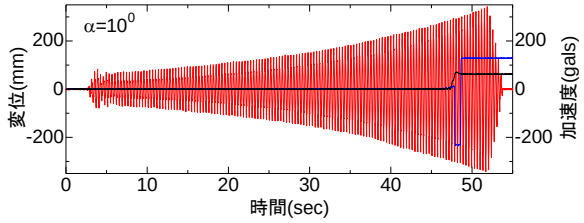

図-8　ブロックAB1のα10の場合、入力加速度と変位応答

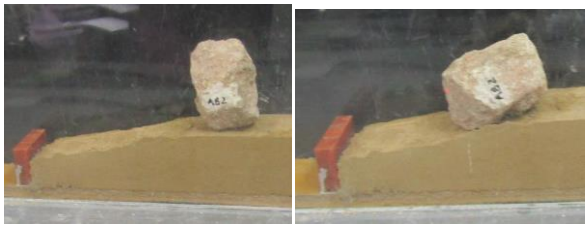

図-9　ブロックAB2のα0の場合、破壊前後の様子

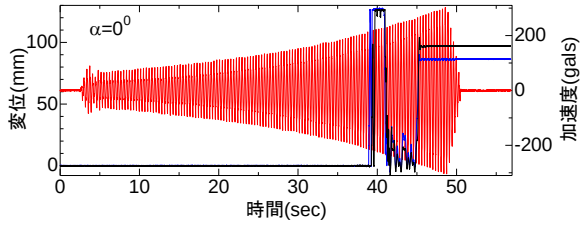

図-10　ブロックAB2のα0の場合、入力加速度と変位応答

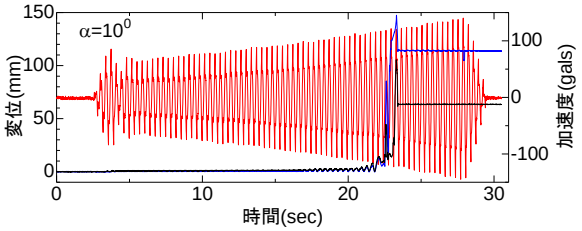

図-11　ブロックAB2のα10の場合、入力加速度と変位応答

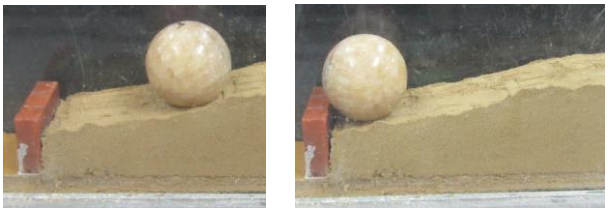

図-12　球状のブロックSMのα10の場合、破壊前後の様子

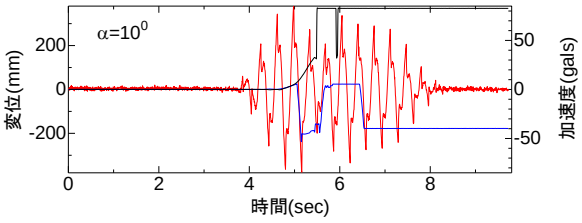

図-13　球状のブロックSMのα10の場合、入力加速度と変位応答

AB2に関してはどちらも揺れ始めの加速度はほぼ同じだったが，崩壊したときの加速度が大きく異なる結果となった．表-3および図-9から図-11の比較よりわかるように，斜面上の岩塊の破壊が斜面の傾斜が大きくなると，破壊時の入力加速度の値が小さくなる．ブロックAB1とAB2の破壊様式は転倒破壊であった．

(2) 岩塊ブロックSM

球状のブロックSMは，どちらも揺れ始めの加速度が小さい値となった（表-4，図-12，図-13）．α0に関しては崩壊時の加速度が大きい値となった．これは崩壊を斜面水平部から斜面部に転がった時を記録しており，それまでの間斜面水平部を転がり続けていたからである．

(3) 岩塊ブロックB

a) 岩塊ブロックB1

α0，α10ともにトップリングの崩壊形態をとった．表-5からα0，α10ともに揺れ始めの加速度がほぼ同じとなったが，α10の方が崩壊しやすいことがわかった．図-14はα10の時のブロックB1の破壊前後の様子を示す．また図-15は入力加速度とブロックB1の変位応答を示す．ブロックの破壊モードは転倒破壊であった．

b) 岩塊ブロックB2

α0，α10ともにトップリングの崩壊形態をとった．先

図-14　ブロックB1のα10の場合、破壊前後の様子

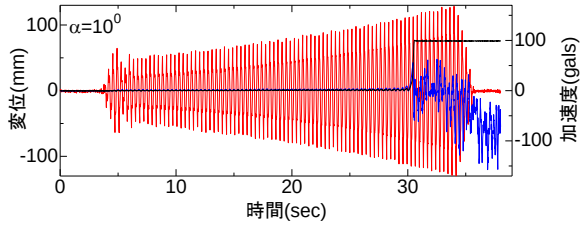

図-15　ブロックB1のα10の場合、入力加速度と変位応答

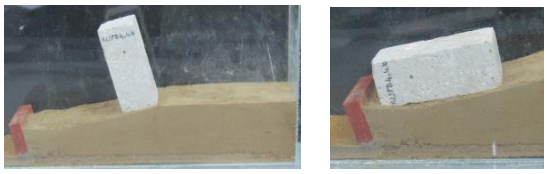

図-16　ブロックB2のα10の場合、破壊前後の様子

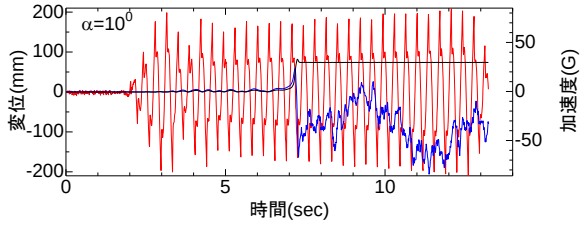

図-17　ブロックB2のα10の場合、入力加速度と変位応答

図-18　ブロックB3のα10の場合、破壊前後の様子

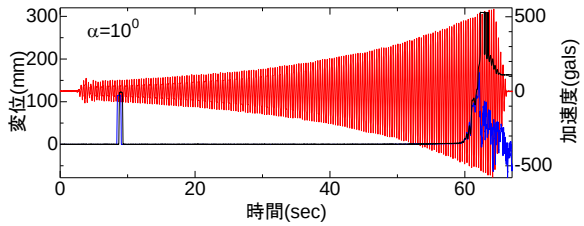

図-19　ブロックB3のα10の場合、入力加速度と変位応答

ほどのB1と比べて明らかにα10のほうが崩壊しやすいことがわかった（表-5，図-16，図-17）．これはB1よりB2のほうが高さがあることからトップリングしやすいからであると考える．

c) 岩塊ブロックB3

α0，α10ともにトップリングの崩壊形態をとった（表-5，図-18，図-19）．揺れ始めの加速度が異なっているが，崩壊時の加速度は同じぐらいになった．また，体積，重さが使用したブロックの中で一番大きいこともあり，崩壊時の加速度が大きな値をとった．

5. 安定性の検討

ここでは任意の形状の単一ブロックの安定性条件について検討する．清水ら[3]は単一ブロックの破壊モードは図-20に示すように主動型と能動型に分けられるとしている．ここで図-21のような単一ブロックの安定性について考える．水平方向，鉛直方向，点Aのモーメント，点Bモーメントの安定条件を考えると，式(1)～(4)で表すことができる．

$$\sum F_s = W\sin\alpha - S = \frac{W}{g}a_s \tag{1}$$

$$\sum F_n = W\cos\alpha - N = \frac{W}{g}a_n \tag{2}$$

$$\sum M_{(A)} = W\sin\alpha e_s - W\cos\alpha e_c^A - Ne_n^A = \frac{\overline{W}}{g}I_A a_\theta \tag{3}$$

$$\sum M_{(B)} = W\sin\alpha e_s + W\cos\alpha e_c^B - Ne_n^B = \frac{\overline{W}}{g}I_B a_\theta \tag{4}$$

各崩壊形態の条件を以下に示す．

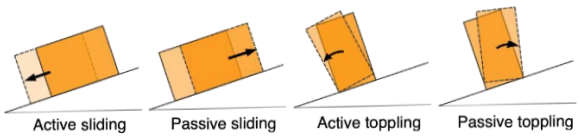

図-20　単一ブロックの破壊モード

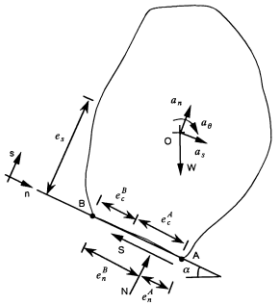

図-21　単一ブロックモデル

(1) 安定

$$\frac{S}{N} < \tan\phi, \quad e_n^A > 0 \quad and \quad e_n^B > 0 \tag{5}$$

(2) すべりのみ

$$\frac{S}{N} = \tan\phi, \quad e_n^A > 0 \quad and \quad e_n^B > 0 \tag{6}$$

(3) トップリングのみ

a) 主動型

$$e_n^A = 0 \quad and \quad e_n^B > 0 \quad and \quad \frac{S}{N} < \tan\phi \tag{7}$$

b) 受動型

$$e_n^A > 0 \quad and \quad e_n^B = 0 \quad and \quad \frac{S}{N} < \tan\phi \tag{8}$$

(4) すべりとトップリングの複合崩壊

a) 主動型

$$e_n^A = 0 \quad and \quad e_n^B > 0 \quad and \quad \frac{S}{N} = \tan\phi \tag{9}$$

b) 受動型

$$e_n^A > 0 \quad and \quad e_n^B = 0 \quad and \quad \frac{S}{N} = \tan\phi \tag{10}$$

上記の式に置いて地震力の影響が含まれてないが，震度法などに基づいて，簡易に考量できる．

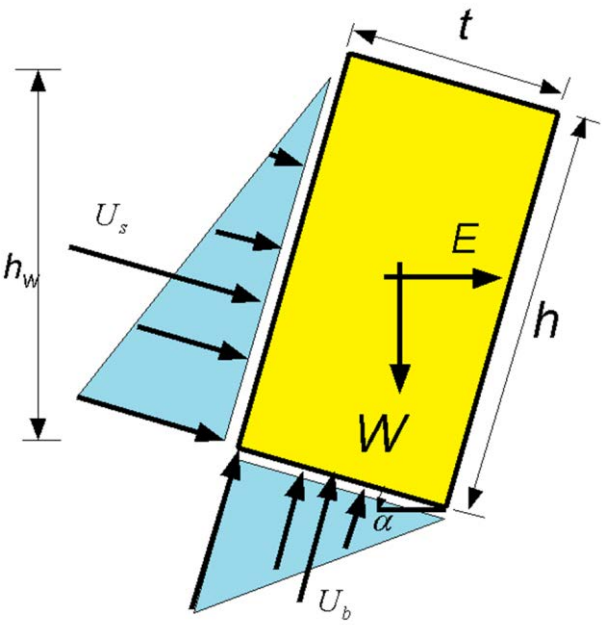

図-22　傾斜面上の単独のブロックの力学モデル

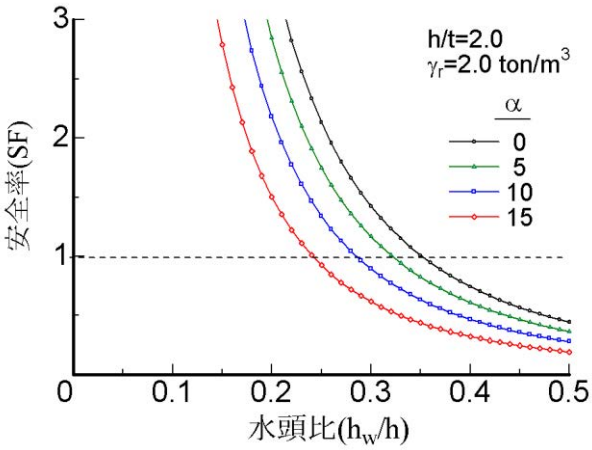

図-23　水の影響による安定性

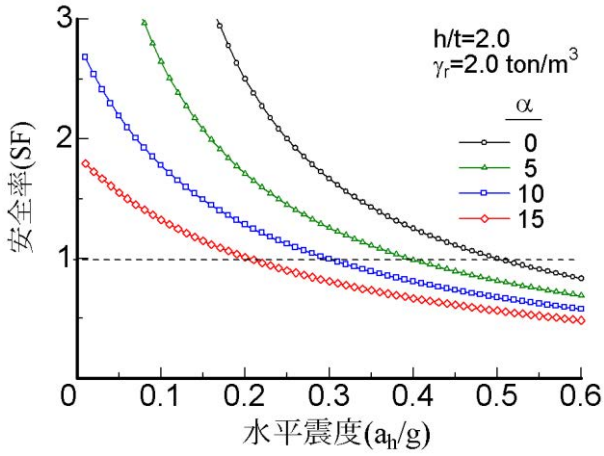

図-24　地震の影響による安定性

6. 安定性の解析

雨などの水が影響するときの安定性と地震時の安定性の評価を行った（図-22）．図-23と図-24にそれぞれの解析結果を示す．図から斜面角度が大きくなると崩壊しやすくなっていることがわかる．これは今回の実験でも同様の傾向が見られた．また，斜面傾斜部では雨や地震時の影響を受けやすいことから，安定性についてより検討しなければならないこともわかる．

第4節で紹介した岩塊B1について動的極限解析手法を用いて動的応答について解析を行い，傾斜角0°および10°に関して得られた解析結果を図-25と図-26に示す．解析結果と実験データを比較すると大変類似した結果が得られた．

岩塊の落石問題に対して，もう一つの課題は到達距離の推定である．宮城島の集落を対象に落石解析も実施した．その結果を図-27に示す．解析結果から落石が発生した場合，集落が存在するところまで到達することが明らかになった．今後，落石防止と斜面上の岩塊の移動に関して対策が必要であると判断できる．

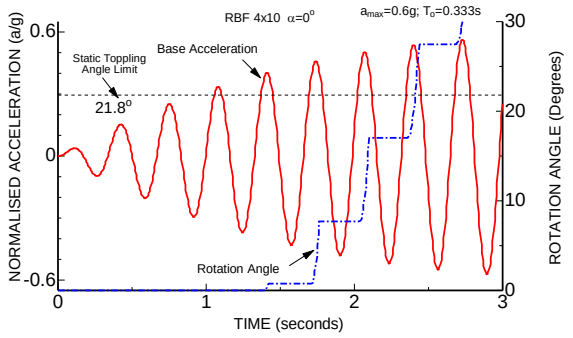

図-25　ブロックB1のα10の場合解析結果

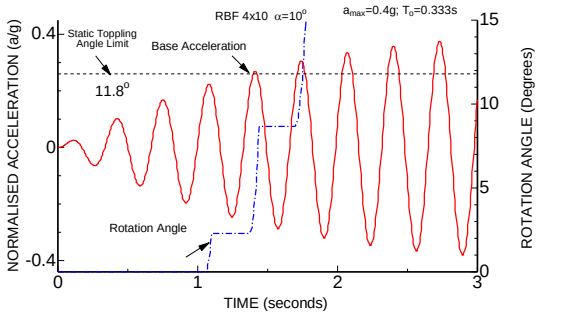

図-26　ブロックB1のα10の場合の解析結果

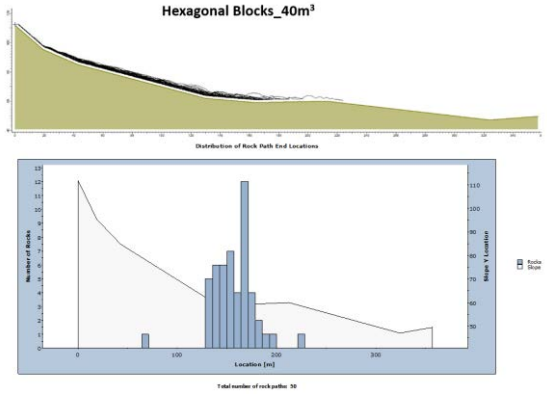

図-27　落石解析より到達距離の推定結果

7. 結論

本研究では，沖縄県うるま市に属する宮城島をモデルに，斜面法肩近傍の琉球石灰岩の岩塊の安定性について，振動台を用いた基礎的な実験とその安定性を解析的に検討した．その結果斜面傾斜部の岩塊ブロックが斜面水平部にあるものと比べて地震時の影響を受けやすいことがわかった．

参考文献

1) Nazli Tunar Özcan, Ömer Aydan, Yuuki Murayama, Kouki Horiuchi, Reşat Ulusay : A study on model experiments and numerical simulations on rockfalls and its utilization to assess the rockfall hazards in Miyagi Island（Japan）and Cappadocia（Turkey）, IACMAG, 2020

2) Nazli Tunar Özcan, Ömer Aydan, Yuuki Murayama, Kouki Horiuchi, : A Model Experimental and Numerical Study on Rockfalls and Its Applications to the Rockfall Hazard in Miyagi Island, 第 29 回沖縄地盤工学研究発表会梗概集，pp. 70-73, 2020

3) 清水泰弘，Ömer AYDAN，市川康明，川本眺万：不連続性岩盤斜面の地震時における安定性 と崩壊形状，土木学会論文集，No.400/Ⅲ-10，189-198，1988.

4) 藍檀 オメル・渡嘉敷 直彦・伊東 孝・村山祈：不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面模型の動的挙動評価(4)：模型実験と極限平衡法による安定性評価．第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集，岩の力学連合会，2021.