

不連続性岩盤斜面の崩壊に関する基礎的研究

村山 有祈^{1*}・伊東 孝²・藍檀 オメル³・渡嘉敷直彦²

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琉球大学名誉教授 (同上)

*E-mail: k208482@eve.u-ryukyu.ac.jp

地震による大規模斜面崩壊は近年問題となっている。大規模斜面崩壊から土木構造物の安全性を守るためには、その崩壊形態を知る必要がある。岩盤斜面の崩壊形態は斜面の内部構造、主に不連続面の影響により異なることがわかっている。そこで本研究では、斜面の内部構造の違いによる斜面の崩壊形態の違いに着目し、模型実験を行った。正方形断面、長方形断面と六角形断面のアルミニウムの棒を用いて斜面模型を作製し、振動台にて加振させ、不連続面角度を変化させた時の崩壊形態の違いを確認する。崩壊しなかったものも含めて不連続面角度0° 以外は千鳥状のほうが崩壊しやすいことがわかった。

Key Words : shaking table, discontinuous, slope failure

1. 序論

地震による大規模斜面崩壊は近年問題となっている。日本国内では2004年新潟県中越地震や2008年岩手・宮城内陸地震での斜面崩壊、海外では1999年台湾の集集地震や2005年パキスタンのKashmir地震での斜面崩壊があげられる¹⁾。岩盤斜面崩壊は高速道路、ダム、原子力発電所といった土木構造物の供用に被害をもたらすことが考えられる²⁾。AydanとShimizu (1993) は斜面崩壊の形態はさまざまであり、岩盤の内部構造と斜面の形状とに関連している³⁾と述べている。そこで本研究では、斜面の内部構造の違いによる斜面の崩壊形態の違いに着目し、模型実験を行った。3種類のアルミニウムの棒を用いて不連続面角度の異なる斜面模型を作製し、振動台にて加振させた時の崩壊形態の違いについて検討する。なお、本論文の一部は2021年1月に行われた岩の力学国内シンポジウムにて発表された内容である⁴⁾。

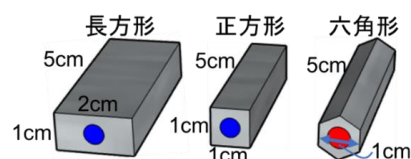


図-1 3種類のアルミニウムの棒

表-1 アルミニウムの摩擦特性

Test No	ϕ_s°	ϕ_d°
①	15.0	14.1
②	15.9	14.54
③	15.7	14.23

類となっている。3種類とも長さが5cmで統一されている。また、本実験で使用したアルミニウムの摩擦係数を表-1に示す⁴⁾。今回は傾斜試験で、ブロックの変位をレーザー変位計で記録し、静的、動的摩擦角の測定を行い摩擦特性を求めた。表から、静的摩擦角の幅は15° から15.9° の間で、動的摩擦角は14.1° から14.54° の間に位置することがわかる。

2. 実験材料

(1) 模型材料

本実験では、先述した通りアルミニウムの棒を用いて実験を行った。図-1は、3種類のアルミニウムの棒の大きさを示している。左から1:2の長方形断面(以下1:2)、1:1の正方形断面(以下1:1)、六角形断面(以下六角形)の3種

(2) 斜面模型

斜面模型は幅100cm×高さ25cm×奥行6.3cmの亚克力製の水槽の中に作成して実験を行った。また、斜面模型に関しては幅36cm×高さ25cmを目安にアルミニウムの棒を敷き詰めて作成した。今回は計測器として加速度計を2つ、レーザー変位計を2つ使用した。加速度計に関しては、振動台上に1つ、斜面上に1つ設置した。斜面模

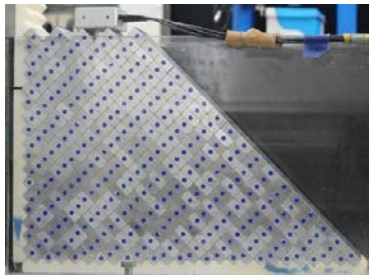


図-2 斜面模型の一例

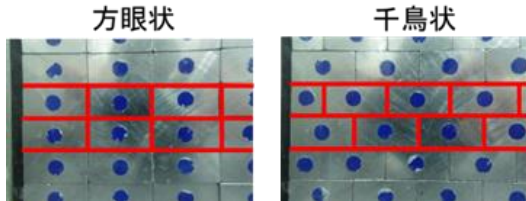


図-3 方眼状と千鳥状の一例

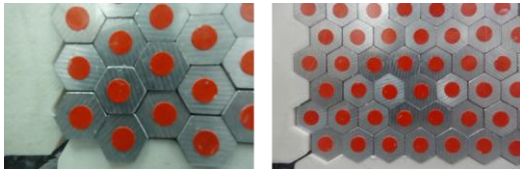


図-4 不連続面角度 30° (左)と 60° (右)

型の一例を図-2に示す。積み方に関しては方眼状と千鳥状の2パターンで実験を行った。図-3に方眼状と千鳥状の積み方の一例を示す。斜面内部の層の角度である不連続面角度に関しては、0°、30°、45°、60°、90°、120°、135°、150°の8パターンで実験を行った。なお、積み方や不連続面角度の違いでパターンごとに斜面模型の大きさが若干異なることがある。また、静的に安定した状態から実験を行ったため、斜面角度は実験ごとに異なっている。模型斜面構成の一例としてあげると、図-2は「1:2の方眼状、不連続面角度60°」となる。また、六角形に関しては、図-4に示す2つの不連続面角度しか作成できないため、2パターンで実験を行った。本実験では、静的時に安定している状態から振動台にて加振を行い、崩壊形態を調べた。

3. 動的实验

各不連続面パターンの模型実験は琉球大学の振動台試験装置を用いて行われた。加速度は東京測器の10G加速度計で記録され、変位はレーザー変位計を用いて計測された。本実験では、静的に安定した領域を対象に振動台を用いた実験を行った。加振条件は、加速度を50galsから1000galsに一分間かけて変化させ加振した。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

表-2 1:1の実験結果

不連続面角度	方眼状	千鳥状
0°(180°)	50gals	210gals
30°	崩壊せず	崩壊せず
45°	崩壊せず	崩壊せず
60°	1000gals	840gals
90°		50gals
120°		450gals
135°		470gals
150°		160gals

表-3 1:2の実験結果

不連続面角度	方眼状	千鳥状
0°(180°)	140gals	250gals
30°	崩壊せず	崩壊せず
45°	崩壊せず	崩壊せず
60°	1000gals	1000gals
90°	50gals	50gals
120°	崩壊せず	440gals
135°	崩壊せず	610gals
150°	750gals	640gals

表-4 六角形の実験結果

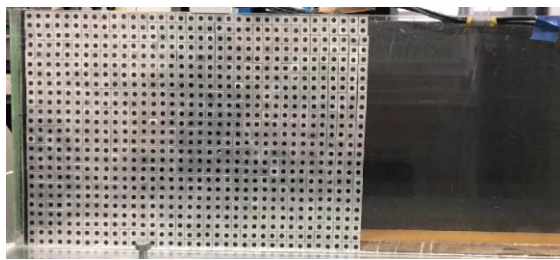
不連続面角度	崩壊時の加速度
30°	520gals
60°	820gals

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。各実験はパターンごとに3回行われた。

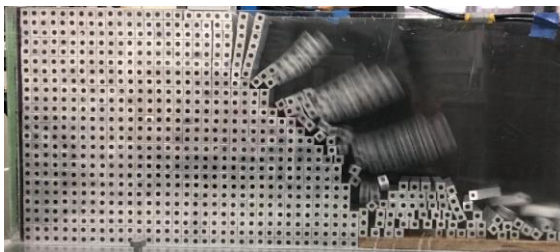
4. 実験結果

(1) 崩壊時の加速度と崩壊形態

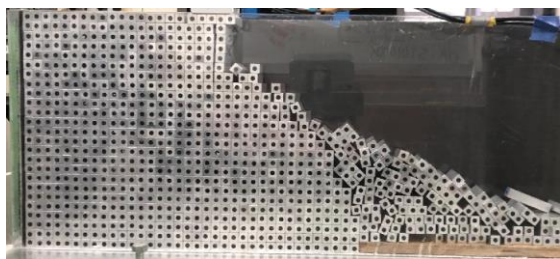
1:1, 1:2, 六角形それぞれの実験結果を表-2 から表-4 に示す。各表は各不連続面パターンで3回の実験を行い、その平均の gals を1の位が0になるように四捨五入してまとめたものである。なお、今回は斜面が少しでも崩壊したのに関して崩壊時の加速度を書いている。1:1 と 1:2 の不連続面角度 30° と 45° に関してはどのパターンも 1000gals になっても崩壊することはなかった。1:2 の千鳥状、不連続面角度 120° と 135° は斜面表面付近が表-4 付近の加速度で崩壊したため、方眼状のものとは比べて加速度の値が大きく異なっている。崩壊しなかったものも含めて考えると、方眼状より千鳥状のほうが加速度の値が小さく崩壊しやすいことがわかった。しかし、0° に関しては方眼状のほうが崩壊しやすいことがわかった。六角形に関しては、不連続面角度 30° のほうが崩壊しやすいことがわかった。以下にいくつか崩壊の様子を示す。



(a)加振前

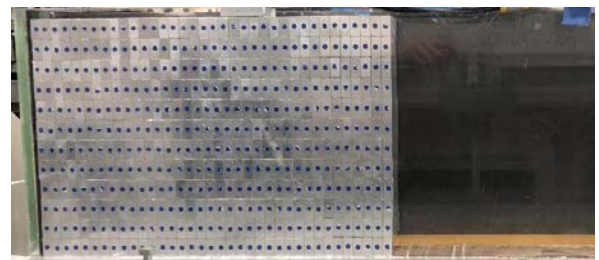


(b)1.5sec

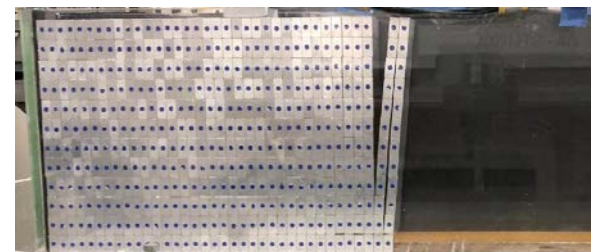


(c)加振後

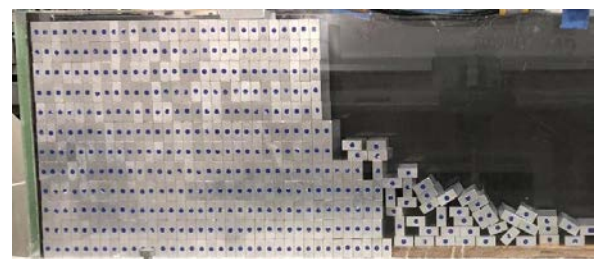
図-5 1:1の方眼状, 不連続面角度0° の崩壊の様子



(a)加振前



(b)5.0sec

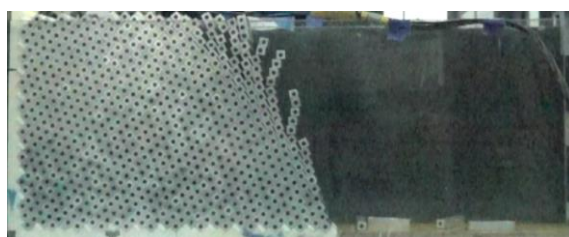


(c)加振後

図-7 1:2の方眼状, 不連続面角度90° の崩壊の様子



(a)加振前



(b)1.7sec

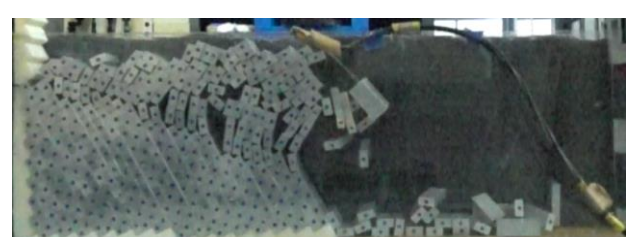


(c)加振後

図-6 1:1の千鳥状, 不連続面角度135° の崩壊の様子



(a)加振前



(b)2.9sec



(c)加振後

図-8 1:2の千鳥状, 不連続面角度60° の崩壊の様子



(a)崩壊開始時

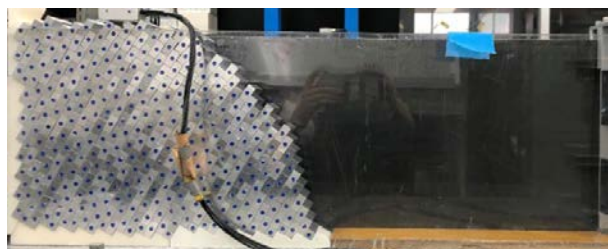


(b)2.0sec



(c)加振後

図-9 1:1の方眼状, 不連続面角度 60° の崩壊の様子



(a)加振前



(b)加振後

図-10 1:2の千鳥状, 不連続面角度 60° の崩壊の様子

a) 1:1の方眼状, 不連続面角度 0° ($90^\circ \cdot 180^\circ$)

図-5に1:1の方眼状, 不連続面角度 0° ($90^\circ \cdot 180^\circ$)の崩壊の様子を示す. 加振後すぐにトップリングの崩壊形態をとった. 斜面表面から中ほどに行くにつれ崩壊領域が狭くなっており, 崩壊後の残った斜面の領域が階段状になっていることが図からわかる. なお, 表-2で1:1の

方眼状の一部が斜線になっていたのは, 図-5のように1つの不連続面角度(0°)で別の不連続面角度(90°)を担っているからである.

b) 1:1の千鳥状, 不連続面角度 135°

図-6に1:1の千鳥状, 不連続面角度 135° の崩壊の様子を示す. 斜面法肩近傍の斜面表面がトップリングに近い崩壊形態で, ボロボロと時間をかけて少しずつ崩壊していった. 画像から, 加振前の斜面角度が約 70° から, 崩壊により崩壊後の斜面角度が約 50° となった.

c) 1:2の方眼状, 不連続面角度 90°

図-7に1:2の方眼状, 不連続面角度 90° の崩壊の様子を示す. 崩壊形態はトップリングであった. 図-5に示した1:1は加振後すぐに崩壊したが, このパターンは加振してから数秒たったのち崩壊を始めた. また, 先ほどの1:1の同じパターンと比べ崩壊の領域が少なくなっていることがわかる.

d) 1:2の千鳥状, 不連続面角度 60°

図-8に1:2の千鳥状, 不連続面角度 60° の崩壊の様子を示す. 加速度が大きくなるにつれて斜面全体が波打つようになり, 一定の加速度を超えたところで崩壊が始まった. その後も加速度の値が大きくなるにつれて崩壊領域が増えた.

e) 六角形, 不連続面角度 60°

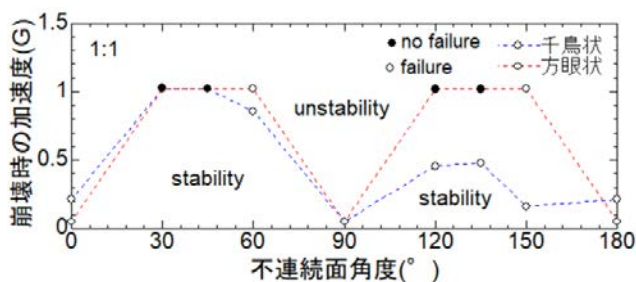
図-9に六角形, 不連続面角度 60° の崩壊の様子を示す. (a)の崩壊開始時点では斜面表面がすべる崩壊形態をとったが, これは写真の白い台座上にないところの領域であったためすべり崩壊の形態をとったと考えられる. その後は(b)のように柱状の中央が座屈しながらトップリングの崩壊形態をとった.

f) 1:2の千鳥状, 不連続面角度 120°

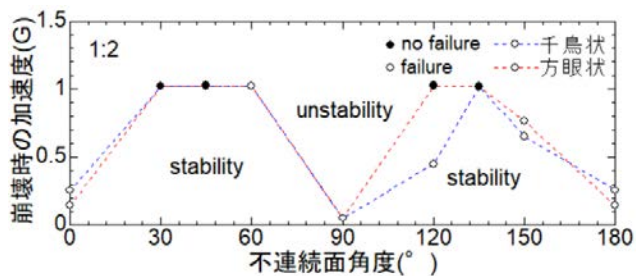
図-10に1:2の千鳥状, 不連続面角度 120° の崩壊の様子を示す. (b)加振後を見ると崩壊しているブロック数が少ないが, これは斜面表面のものが一部だけ崩壊したためである. 表-3において440galで崩壊したというのは, この斜面表面の一部の崩壊のことを示している. そのため, 斜面全体が崩壊するにはより大きな加速度が必要になると考えられる.

(2) 地震時安定性評価

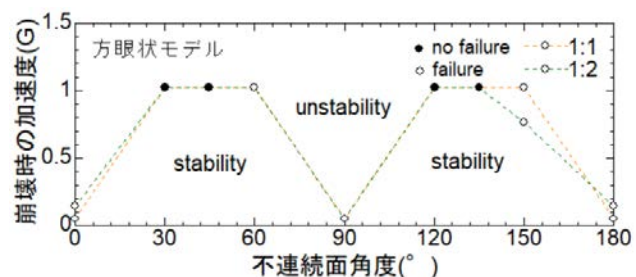
縦軸に崩壊時の加速度 (G), 横軸に不連続面角度 ($^\circ$) をとり, ブロックの大きさや積み方ごとにまとめた地震時安定性評価を図-11に示す. 以下に各パターンの詳細を示す.



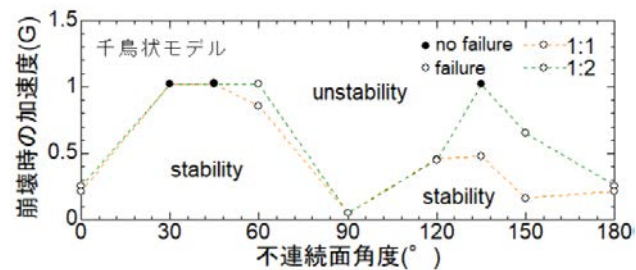
(a)1:1の地震時安定性評価



(b)1:2の地震時安定性評価



(c)方眼状の地震時安定性評価



(d)千鳥状の地震時安定性評価

図-11 各パターンの地震時安定性評価

a) 1:1の地震時安定性評価

0° (180°) 以外、方眼状に比べて千鳥状が崩壊しやすいことがわかる。特に、受け盤の斜面構造となっている120° ~150° が方眼状と比べ小さな加速度で崩壊していることがわかる。これは、千鳥状のほうは斜面角度が90° に近く、また、斜面模型作成時に層がたわんだことにより崩壊しやすくなっていることが考えられる。

b) 1:2の地震時安定性評価

こちらも0° (180°) 以外、方眼状に比べて千鳥状が崩壊しやすいことがわかる。不連続面角度120° は(1)のf)にて前述したとおりである。それ以外だと、先ほどの1:1とくらべると方眼状と千鳥状とで大きな違いがみ

られない結果となった。これは、1:1のほうはより細かい不連続面の影響があったため、小さい加速度で崩壊したためだと考えられる。

c) 方眼状の地震時安定性評価

1:1と1:2とで結果が非常に似ているものとなった。不連続面角度150° のものだけ1:2のほうが崩壊しやすいことがわかった。

d) 千鳥状の地震時安定性評価

1:2よりも1:1のほうが崩壊しやすいことがわかった。特に受け盤の斜面構造のものでその傾向が顕著になっていることがわかる。

(3) 破壊様式の分類

図-5から図-10までの実験結果より振動時に岩盤の不連続面パターンが異なると破壊様式が異なることが明らかになった。また、破壊に至るまでの過程と振動レベルも異なっている。岩盤斜面の破壊様式が不連続面の分布状況によって異なることが過去の研究で明らかになっており¹⁾、地震力が採用する能動型と受動型破壊がすることも明らかになっている¹²⁾。本研究で観察された不連続面に依存する破壊様式を図-12と図-13に示す。さらにブロック座屈現象も発生する。

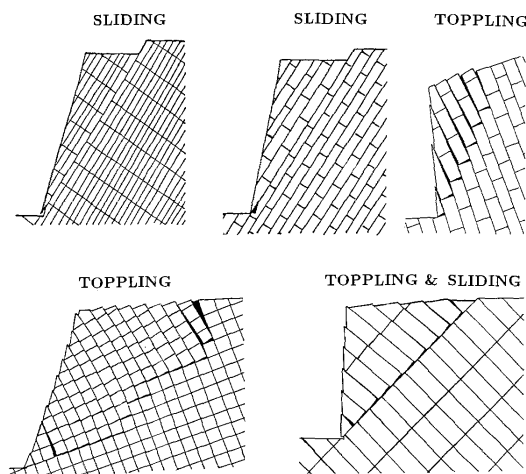


図-12 不連続面に依存する破壊様式⁵⁾

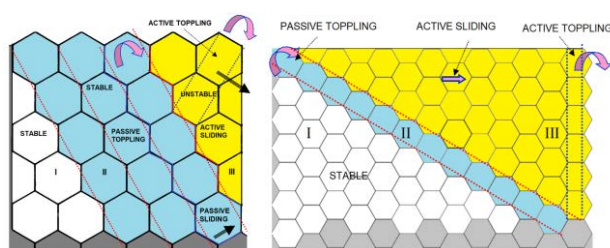


図-13 六角ブロックの岩盤斜面の破壊様式⁷⁾

(4) 破壊時の限界振動レベルの推定と比較

Aydanら⁵⁾が提案した手法を若干改良して、本研究で紹介した破壊様式に対して、破壊時の限界振動レベルを推定することができる¹⁴⁾。この手法の詳細をここで説明ができないが、得られた解析結果を図-14および図-15に示す。図-14および図-15よりわかるように実験で得られた傾向を理論的にも評価が可能であることが明らかになった。

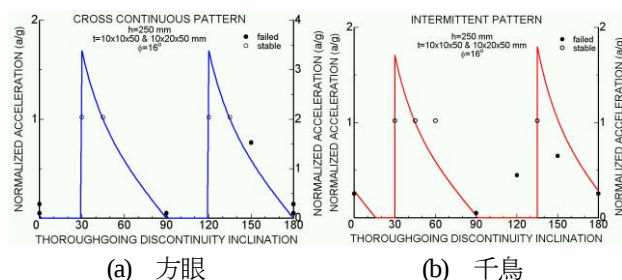


図-14 震度法による限界破壊振動の推定と比較

定も可能であることが明らかになった。今後の課題として、個別有限要素法 (DFEM) による解析を行い、実験と解析から正当性を示したい。

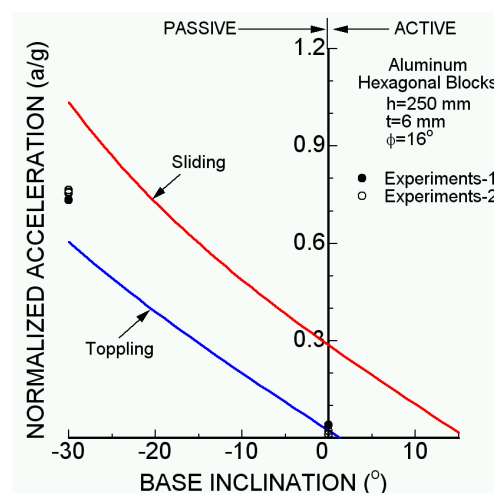


図-15 震度法による限界破壊振動の推定と比較 (6角)

5. まとめ

本研究では、不連続面の影響による斜面崩壊に関して実験的に検討を行い、崩壊の様子なども示した。その結果、崩壊しなかったものも含めて 0° 以外は千鳥状のほうに崩壊しやすいことがわかった。この傾向は特に受け盤の斜面構造で顕著に表れた。これは、千鳥状の受け盤構造の斜面角度が 90° に近いことから、崩壊しやすくなったためであると考えられる。また、不連続面角度 90° のものは基本的にSweepの低い加速度で崩壊した。六角形に関しては、不連続面角度 30° の方が崩壊しやすいことがわかった。ほかにも、1:2と比べ1:1のほうに崩壊しやすいこともわかった。これは、ブロックの間隔が狭い分、細かい不連続面が影響したためであると考えられる。また、振動法に基づいて、破壊時の限界振動レベルの推

参考文献

- 1) Aydan, Ö., Large Rock Slope Failures Induced by Recent Earthquakes, *Rock Mech Rock Eng*, pp.1-22, 2016.
- 2) Aydan, Ö., Ohta, Y., Amiri, M., and Shimizu, Y.: The dynamic response and stability of discontinuous rock slopes, *2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, Okinawa, Japan*, pp. 519-524, 2019.
- 3) Aydan, Ö., Shimizu, Y.: Post-failure motions of rock slopes, *Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering*, 22 (3), pp. 409-415, 1993.
- 4) 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 伊東孝, 村山有祈: 六角形のブロックで構成される岩盤斜面の動的安定性に関する実験及び解析的検討, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演番号 80, 2021.
- 5) Aydan, Ö., Y. Shimizu, Y. Ichikawa (1989). The Effective Failure Modes and Stability of Slopes in Rock Mass with Two Discontinuity Sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(3), 163-188.

A FUNDAMENTAL RESEARCH ON THE FAILURE OF DISCONTINUOUS ROCK SLOPES

Yuki MURAYAMA, Takashi ITO, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

Large-scale slope failures caused by earthquakes have become a problem in recent years. It is known that the failure modes of rock slopes differs depending on the internal structure of the slopes, mainly due to the influence of discontinuous surfaces. In this study, we focused on the difference in the collapse form of the slope due to the difference in the internal structure of the slope, and conducted a model experiment. A slope model is made using three types of aluminum blocks. Furthermore, we attempted to evaluate the seismic intensity at the time of failure of models slopes and compared with experimental results. The comparisons indicated that it was possible to estimate the seismic intensity at failure.