

六角形不連続性岩盤斜面の動的安定性に関する実験的および解析的研究

村山 有祈¹・藍檀 オメル^{2*}・渡嘉敷 直彦³・伊東 孝⁴

¹琉球大学大学院 環境建設工学専攻 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

²琉球大学 名誉教授 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

³琉球大学島嶼防災研究センター 研究開発室 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

⁴琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

*E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

Key Words : hexagonal blocks, rock slope models, dynamic stability, limiting equilibrium method, shaking test, seismic coefficient method

1. はじめに

過去の地殻活動によって形成された岩盤内には、種々の不連続面が現れ、柱状節理に代表される六角形状の不連続性岩盤も数多く存在する。近年、世界的にも六角形の不連続面からなる斜面、地下空洞の動的安定性、浸透および基礎の耐力などが検討課題となっている。

藍檀ら^{1,2,3,4}は、近年国内外で着目されている六角形の不連続面で構成される岩盤斜面の基本的な動的安定性について、琉球大学にて斜面モデルによる動的载荷実験を行い、六角ブロックの基本的配置パターンに支配される破壊形態を把握し、実験から得られた知見に基づいて、藍檀ら^{1,3}が提案した柱状ブロックで構成される斜面モデルの動的安定性を極限平衡法により検討²を行ってきた。

本研究では、藍檀ら^{1,3}が提案した震度法に基づく極限平衡解析法と動的極限平衡法を用いて、琉球大学における六角アルミ棒斜面モデルの加振実験を行い、柱状六角ブロックで構成される斜面の動的安定性の評価について解析結果が示す破壊開始時の加速度応答と比較検討を行った。これらの検討を通して、解析手法の適用性と課題について考察した。

六角形の不連続面で構成される斜面全体の動的安定性を評価する基本モデルとして、Aydanら³が理論的に証明したように、図-1に示す複数の六角ブロックを単一のブロック柱としてモデル化し、その基本的な破壊モードを考える。図-2に示すように、斜面上の柱状ブロックの破壊モードは、すべり破壊、転倒破壊および複合破壊であり、柱状ブロックに働く力の状態によって、主動型 (Active mode)、受動型 (Passive mode) になる。

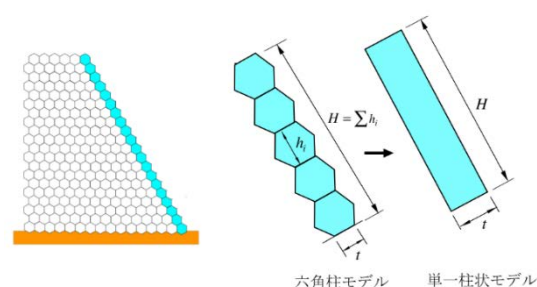


図-1 六角ブロック柱のモデル化

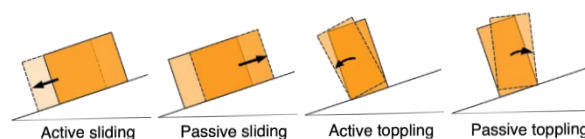


図-2 柱状ブロックの破壊モード

2. 極限平衡解析モデルによる斜面上の単一柱状ブロックの安定性評価

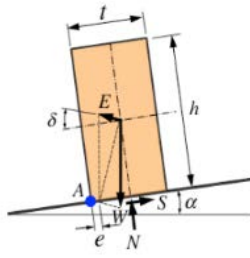


図-3 主動型破壊モードにおける柱状ブロックの力学モデル

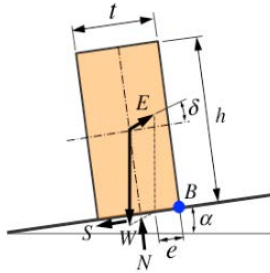


図-4 受動型破壊モードにおける柱状ブロックの力学モデル

(1) 主動型破壊モード

図-3に示す高さ h 、幅 t の柱状ブロックに作用する力によるすべり破壊モードと転倒破壊モードにおける限界加速度 $\eta(t)$ は次のようになる。

$$\frac{S}{N} \leq \tan \varphi, \quad \eta(t) \leq \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\varphi - (\alpha + \beta))} \quad (1)$$

転倒破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる。

$$e \leq 0, \quad \eta(t) \leq \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos(\theta - (\alpha + \beta))}, \quad \theta \leq \tan^{-1} \left(\frac{t}{h} \right) \quad (2)$$

(2) 受動型破壊モード

図-4に、斜面上の柱状ブロックに作用する力学モデルを示す。すべり破壊モードと転倒破壊モードにおける限界加速度 $\eta(t)$ は、次のように得ることができる。

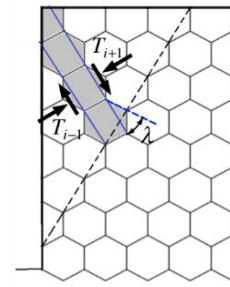
すべり破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる。

$$\frac{S}{N} \leq \tan \varphi, \quad \eta(t) \leq \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\varphi - (\beta - \alpha))} \quad (3)$$

転倒破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる。

$$e \leq 0, \quad \eta(t) \leq \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta - (\beta - \alpha))}, \quad \theta \leq \tan^{-1} \left(\frac{t}{h} \right) \quad (4)$$

3. 極限平衡解析モデルによる複数の柱状ブロックで構成される斜面の安定性評価



λ : アスペリティ角

図-5 モデル化された六角ブロック柱

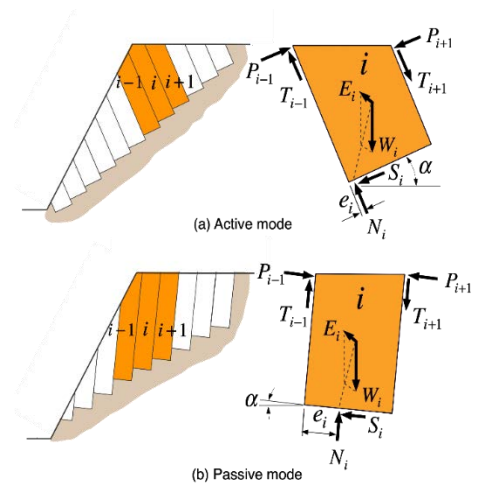
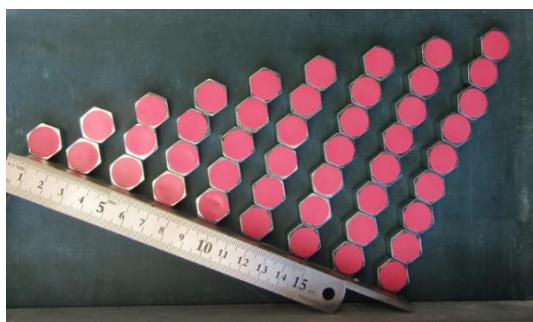


図-6 地震力を受ける不連続性岩盤斜面の安定性を評価するモデル

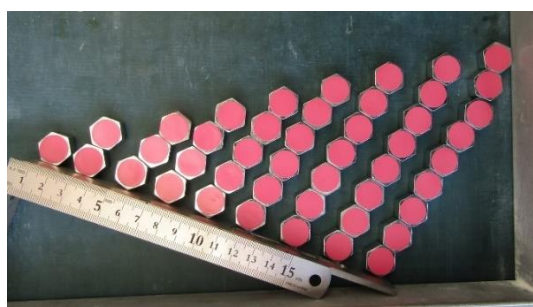
六角形の不連続面で構成される斜面の安定性を評価する基本的な考え方として、図-5に示す六角ブロック柱のモデルを考え、藍檀ら^{1,3)} は、図-6に示すように、岩盤が複数の柱状ブロックで構成されているとしてモデル化できることを示している。岩盤斜面の安定性を評価するいくつかの手法がすでに藍檀らによって検討されており、詳細は、文献³⁾ に示されている。

4. 複数の六角ブロックで構成される柱の安定性に対する底面摩擦模型装置を利用した実験

複数の六角ブロックで構成されている柱の主動型破壊について、底面摩擦実験装置を用いて模型実験を行った。写真-1は、ブロック数が異なる鉄製の六角ブロックの実験前後の様子を示す。Aydanら³⁾ が理論的に証明したように、複数の六角ブロックで構成される柱が運動する際に等価な柱として運動し、多数の六角ブロックで構成される斜面も、適切な破壊様式を考慮して柱状で構成され



(a) 実験前



(b) 実験後

写真-1 六角ブロックで構成される柱の実験前後の様子

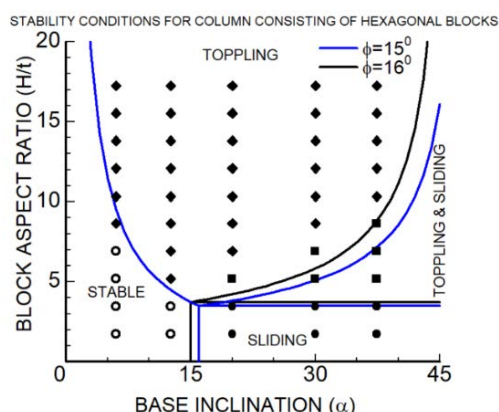


図-7 複数の六角ブロックで構成される柱の受動型破壊様式に対する実験結果と理論値との比較

たものとしてモデル化しても良いと判断できる。

2章a) 節に述べた手法を用いて、柱の主動型破壊様式に対して得られた限界曲線と、写真-1に示したような実験から得られた結果との比較を図-7に示す。図-8から明らかなように、実験結果と解析結果はほぼ一致しており、2章で説明した考え方の妥当性が確認できた。

5. 六角アルミブロックの斜面模型の振動実験

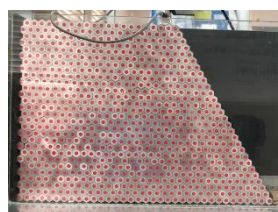
選定された不連続面パターンを持つモデル斜面の振動载荷試験が、琉球大学に設置されている振動台を用いて

実施された^{2,4)}。実験中に、モデル斜面の天端と振動台の加速度、および斜面のり肩の変位を同時に記録した。加速度の計測は、東京測器の加速度センサー（10G）を使用し、変形の計測には、レーザー変位計を用いた。振動計測には、YOKOGAWA SL1000を使用し、10msでサンプリングを行った。さらに、高速度カメラを用いて映像を記録した。選定された各不連続面パターンについて、3回の载荷実験を行った。ここでは、それぞれ1つの実験結果を例に上げ説明する。

斜面模型の片側を拘束する場合、振動中に衝撃荷重がブロックに作用することがある。拘束による衝撃荷重を抑えるため、フレームと斜面模型型枠の間にゴムを挟んでいる。パターンAの斜面模型の支配的な破壊様式は、受動型トップリングであり、パターンBの斜面模型の場合、主動型トップリングである。実験に使用した波形の周波数は、3Hzであった。

(1) 六角ブロックパターンAのモデル実験

モデル斜面の傾斜角は、60°であり、このブロックパターンでは、安定した傾斜角である。写真-2に、モデル斜面の振動载荷前と载荷中の様子を示す。写真より、受動型のトップリングモードによる柱状の変位が確認された。六角ブロックの集合体から成る複数の柱状ブロックが、等価な1つの柱状ブロックとして動く傾向が認められた。図-8に、振動台の入力加速度と、斜面のり肩における加速度応答を示す。柱状ブロックは、720 galsの加速度レベルで破壊が始まり、790 galsでモデル斜面の全体の破壊が生じた。



(a) 実験前の状態



(b) 振動载荷中の挙動

写真-2 六角ブロックパターンAの実験前後の様子

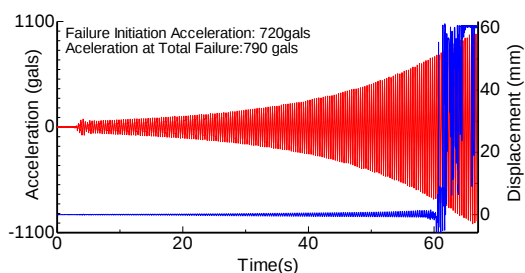
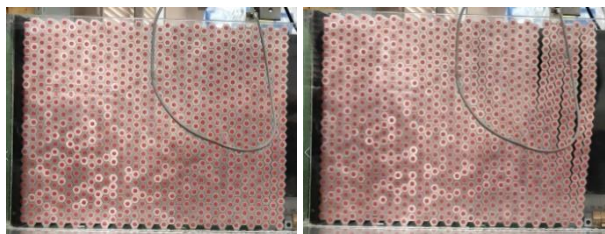
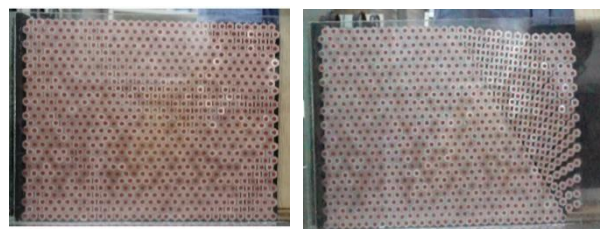


図-8 入力加速度とモデル斜面のり肩の加速度応答



(a) 実験前の状態 (b) 振動载荷中の挙動

写真-3 六角ブロックパターンBの斜面模型の実験前中の様子



(a) 側面拘束の初期状態 (b) 拘束を外し直後の状態

写真-4 六角ブロックパターン A の重力場での破壊の様子

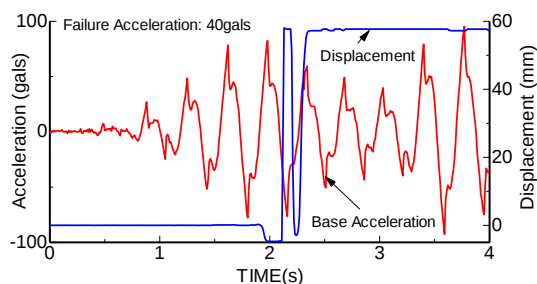


図-9 入力加速度とモデル斜面のり肩の加速度応答

(2) 六角ブロックパターンBのモデル実験

斜面の傾斜角は 90° であり、前節に示した自重場におけるモデル実験と同様に、非常に小さい振動（24 - 40 gals）で、あるいは傾斜実験における微小な傾斜角（ $1.37^\circ \sim 3.17^\circ$ ）で破壊に至った。写真-3に、振動载荷前後のモデルの状況を示す。振動を受けて柱状ブロックが主動型のトップリング状態を示している（写真-3(b)）。図-9に、振動台の入力加速度と、斜面のり肩における加速度応答を示す。柱状ブロックのトップリングは、20galsで生じ、斜面全体の不安定状態は、40galsで生じた。

6. 六角アルミブロックの斜面模型の破壊様式

(1) 自重場におけるモデルの破壊様式

a) 六角ブロックパターンAのモデル実験

パターンAの場合、斜面の傾斜角が 60° よりも大きいと、自重場では斜面が不安定となる。写真-4(a)に、側面を拘束したモデル斜面の初期状態と、写真-4(b)に、側面を外した直後の斜面崩壊の状況を示す。斜面の傾斜角は、 90° である。安定領域より上のブロックが、すべり面上で相対変位とともに柱状の転倒破壊が生じていることが確認された。Aydanら³⁾は、破壊面より上のブロックが、破壊初期の段階で複数のブロックが一体となった柱状の状態を形成することについて、理論的に証明している。

b) 六角ブロックパターンBのモデル実験

不連続面パターンBのモデル斜面の安定性について検討を行った。モデルの傾斜角は、 90° である。写真-5に、斜面の拘束を外した直後の様子を示す。図から明らかに、斜面は安定している。しかしながら、図-9に示したように六角ブロックで構成される柱状ブロックは、非常に小さい振動で、あるいは、傾斜実験における微小な傾斜角で破壊に至った。

(2) 振動時におけるモデルの破壊様式

写真-2に示した振動台実験結果に基づくと、パターンAの斜面の不安定性は、受動型転倒破壊か受動型滑り破壊が可能である。振動の特性、斜面高さとブロック間の摩擦特性によって、これらの破壊様式は受動型転倒、受動型滑りあるいは複合した受動型転倒と滑り破壊として現れる。

(3) 重力場および振動時におけるモデルの破壊様式

図-10に、パターンAの斜面の破壊様式を示す。斜面を三つの領域にわけ、それぞれの領域をI, II, IIIと名付ける。領域Iは、重力場において存在し、その安定性はブロック間のせん断特性と六角ブロックで形成される柱の幾何学形状に依存する。振動が起こった場合、領域Iは、まず最初に主動型滑り、転倒あるいは複合すべり・転倒破壊に従って破壊する。その後、領域IIは、受動型転倒か受動型滑りあるいは複合した形で破壊する。

図-11に、パターンBの斜面の破壊様式を示す。この場合も斜面を三つの領域にわけ、それぞれの領域をI, II, IIIと名付ける。領域Iは、重力場において存在する。

7. 振動実験結果と解析結果の比較

(1) 震度法に基づく極限平衡解析との比較

藍檀ら¹⁾ およびAydanら^{3), 4)} は、六角ブロックで形成された斜面の地震時の安定性評価するため震度法に基づく極限平衡解析手法を提案した。この手法に基づいて、基盤の傾斜を徐々に変化させて、統一的にパターンAおよびパターンBの斜面の破壊に至る限界加速度の値を求め、その結果を図-12に示す。図-12のように、斜面は滑り破壊よりも、転倒モードで破壊する可能性が極めて高いことを示している。また、実験結果と比較すると、実験結果は転倒破壊に対する限界加速度の値より高めである。これは入力波の周波数特性が震度法で考慮されていないためである。しかし、適切な破壊様式を考慮できる震度法に基づく極限平衡解析を用いても安全側の安定性評価が可能であると判断できる。

(2) 波形を考慮した動的極限平衡解析 (DLEM) との比較

次に振動波形を考慮して、3Hzの波形と動的極限平衡解析手法 (DLEM) を使用して行った振動実験に対する斜面の動的応答を図-13および図-14に示す。動的極限平衡解析手法 (DLEM) から得られる解析結果を見ると、斜面の動的応答を評価することが可能であることを示している。また、パターンAおよびパターンBの斜面の破壊に至る限界加速度の値を、周波数も考慮して評価できることが明らかになった。

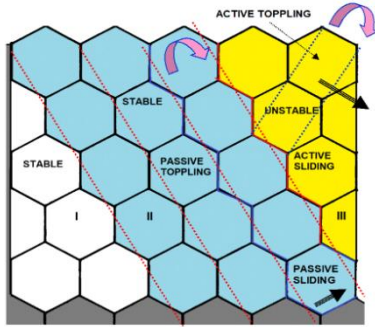


図-10 六角ブロックパターン A の斜面の可能な破壊様式

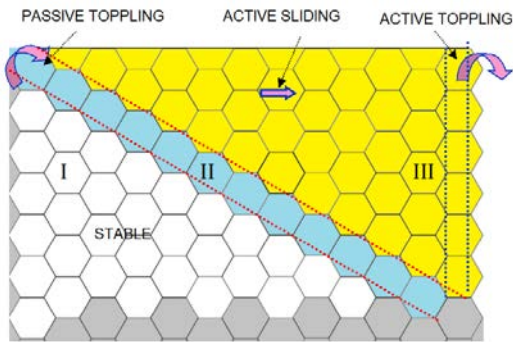


図-11 六角ブロックパターン B の斜面の可能な破壊様式



写真-6 柱の座屈破壊

振動が作用した場合、領域Iはまず最初に、主動転倒破壊する。斜面高さが小さい場合、主動型すべりも可能である。もし領域Iが存在しない場合、領域IIの破壊は受動型転倒か受動型滑り、あるいは複合した形で破壊する。しかし、受動型転倒破壊の可能性が受動型すべりに比べて、極めて高い。

上記で紹介した破壊様式以外に、六角ブロックで形成されている柱の座屈破壊も、実験的に写真-6のように観察された。拘束による衝撃荷重を抑えるため、フレームと斜面模型型枠の間にゴムを挟んでいるため、斜面上部から衝撃波によるブロックの崩壊が観察されなかった。

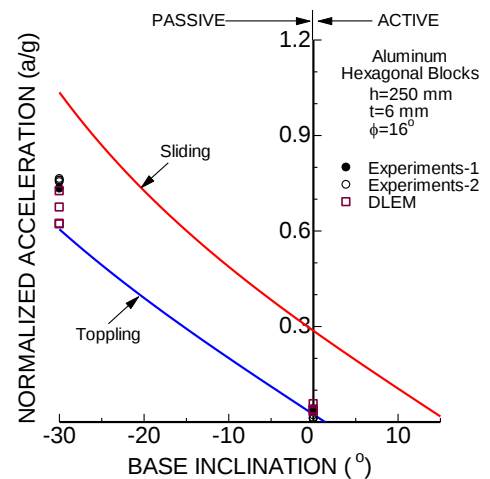


図-12 解析結果と実験結果の比較

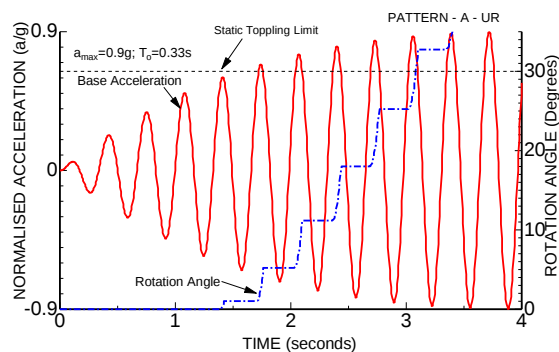


図-13 PATTERN-Aの斜面に対する計算結果

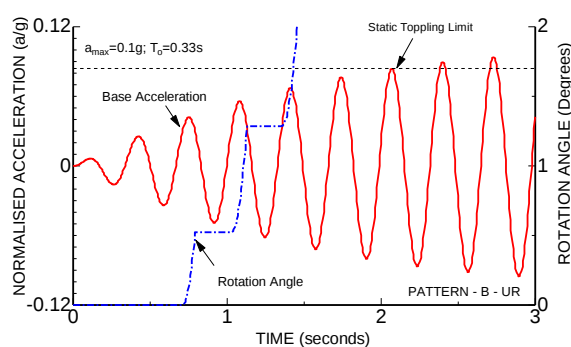


図-14 PATTERN-Bの斜面に対する計算結果

6. 結論

本論文では、六角形の不連続面パターンを有する模型振動実験から得られた知見に基づいて、基本的な破壊形態をモデル化し、震度法に基づく極限平衡解析法と動的極限平衡法を利用して、琉球大学で実施された六角棒積層斜面模型の振動台試験結果と比較を行った。動的極限平衡解析が予測する破壊開始時の加速度応答との比較検討より、不連続性岩盤へ適用できることが確認できた。また、斜面の支配的な破壊様式を適切に考慮すれば、動的極限平衡法および震度法に基づく極限平衡解析手法より、工学的に有意義な結果が得られる。

参考文献

- 1) 藍檀 オメル・渡嘉敷 直彦・伊東 孝・村山有祈：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 48 回岩盤力学国シンポジウム講演集，2022。
- 2) 藍檀 オメル・渡嘉敷 直彦・伊東 孝・村山有祈：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。
- 3) Aydan, Ö., Y. Shimizu, Y. Ichikawa: The Effective Failure Modes and Stability of Slopes in Rock Mass with Two Discontinuity Sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(3), 163–188., 1989.
- 4) Aydan, Ö., Tokashki, N., Ito, T., Murayama, Y.: Dynamic stability of rock slopes with hexagonal discontinuity pattern. *Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS11, Beijing*. M150, 8p, 2021.