不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面 模型の遠心力載荷加振実験(6) 一動的極限平衡法による安定性評価 –

藍檀 オメル^{1*}・渡嘉敷 直彦²・伊東 孝³・村山 有祈⁴

¹琉球大学 名誉教授(〒903-0213沖縄県中頭郡西原町千原1)
 ²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)
 ³琉球大学 工学部(〒903-0213沖縄県中頭郡西原町千原1)
 ⁴琉球大学大学院 建設工学専攻(〒903-0213沖縄県中頭郡西原町千原1)
 *E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

柱状節理に代表される六角形の不連続性岩盤の斜面模型を対象として、振動崩壊実験による応答と、各種 の解析手法が評価する不連続性岩盤の応答を比較し、各種解析手法の特長を整理する試みが行われている. 本研究は、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、提案する動的極限平衡法を用いて不連続性岩盤斜面の破壊開始条件を検討した.遠 心力載荷加振による六角棒積層斜面模型の試験結果について、この動的極限平衡解析が予測する破壊開始 時の加速度応答と比較検討を行い、不連続性岩盤への適用性について検討した.

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 および基礎の耐荷力などが検討課題となっている.

土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学小委員会のWG活動における課題の一つとして、不連続性岩盤の動的挙動 を検討するため、六角金属棒で構成される斜面模型によ る振動載荷実験を行って、各種の解析手法が評価する不 連続性岩盤の応答を比較し、各解析手法の特長を整理す る試み¹⁾が行われている.

本研究では、極限平衡法による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その概要を示し、電力中央研究所における六角金属棒斜面模型の加振実験¹⁾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、本解析手法の適用性と課題について考察した.

なお、本研究は、土木学会岩盤力学委員会 岩盤動力 学小委員会 (第4期)のWG活動(2021年6月-2022年5月) として実施するものである.

2. 極限平衡解析モデルによる斜面の安定性評価

(1) 斜面上の単一柱状ブロックの安定性

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-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-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.

a) 主動型破壊モードの動的平衡つり合い

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動的 平衡釣り合い式は、次のようになる.

$$\sum F_s = S - W \sin \alpha - E(t) \cos(\alpha + \beta) + \frac{W}{g} \frac{d^2 s}{dt^2} = 0 \qquad (1)$$

$$\sum F_n = N - W \cos \alpha + E(t) \sin(\alpha + \beta) = 0 \qquad (2)$$

$$\sum M_{(A)} = S \frac{h}{2} - N \left(\frac{t}{2} - e \right) - I \frac{d^2 \omega}{dt^2} = 0$$
(3)

ここで, E(t):地震力, W:ブロックの自重,

$$\delta = \alpha + \beta, E(t) = \frac{W}{g} \eta(t),$$
$$R = \frac{1}{2} \sqrt{h^2 + t^2}, I = \frac{W}{g} \frac{R^2}{3}.$$

これより、すべり破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる.

$$\frac{S}{N} \le \tan \varphi , \quad \eta(t) \le \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\cos(\varphi - (\alpha + \beta))}$$
(4)

転倒破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる.

$$e \le 0$$
, $\eta(t) \le \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos(\theta - (\alpha + \beta))}$, $\theta \le \tan^{-1}\left(\frac{t}{h}\right)$ (5)



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

b)受動型破壊モードの動的平衡つり合い

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動 的平衡釣り合い式は、次のように表される.

$$\sum F_s = S + W \sin \alpha - E(t) \cos(\beta - \alpha) + \frac{W}{g} \frac{d^2 s}{dt^2} = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_n = N - W \cos \alpha + E(t) \sin(\beta - \alpha) - \frac{W}{g} \frac{d^2 n}{dt^2} = 0 \quad (7)$$

$$\sum M_{(B)} = S \frac{h}{2} - N\left(\frac{t}{2} - e\right) - I \frac{d^2\omega}{dt^2} = 0$$
(8)

$$\Xi \subseteq \overline{C}, \quad \delta = \beta - \alpha, E(t) = \frac{W}{g} \eta(t), R = \frac{1}{2} \sqrt{h^2 + t^2},$$

$$I=\frac{W}{g}\frac{R^2}{3}.$$

これより、すべり破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる.

$$\frac{S}{N} \le \tan \varphi , \quad \eta(t) \le \frac{\sin(\varphi + \alpha)}{\cos(\varphi - (\beta - \alpha))} \tag{9}$$

転倒破壊開始時の加速度 $\eta(t)$ は、次のようになる.

$$e \le 0$$
, $\eta(t) \le \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\cos(\theta - (\beta - \alpha))}$, $\theta \le \tan^{-1}\left(\frac{t}{h}\right)$ (10)

(2) 複数の柱状ブロックで構成される斜面の安定性

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、複数のブロック柱より構成される等価な 斜面モデルを仮定する(図-6).

図-6の等価斜面モデルにおける動的平衡つり合い式は、 次のように表される.

$$F_{s}^{i} + P_{i+1} - P_{i-1} - S_{i} = \frac{W_{i}}{g} a_{x}^{i}$$
(11)

$$F_{N}^{i} + T_{i+1} - T_{i-1} - N_{i} = \frac{W_{i}}{g} a_{y}^{i}$$
(12)

$$F_{s}^{i}\frac{h_{i}}{2} - F_{N}^{i}\frac{t_{i}}{2} + P_{i+1}h_{i} - T_{i+1}t_{i} - P_{i-1}h_{i-1} - N_{i}e_{i} = \frac{W_{i}}{g}\frac{R_{i}^{2}}{3}a_{\theta}^{i}$$
(13)
 $\simeq \simeq k^{2},$

 $F_s^i = W_i \sin \alpha + E_i \cos \alpha$, $F_N^i = W_i \cos \alpha - E_i \sin \alpha$,

 $E_i = \eta W_i, R_i = \sqrt{h_i^2 + t_i^2}$

ブロック柱境界のせん断抵抗は、次のように考える.

$$\frac{S_i}{N_i} = \mu_1 , \quad \frac{T_{i-1}}{P_{i-1}} = \frac{T_{i+1}}{P_{i+1}} = \mu_2^*$$
(14)

 $\mu_2^* = \tan(\varphi_2 + \lambda)$

ここで、λはアスペリティ角である(図-5).

a) すべり破壊に関する安定条件

i番目のブロック柱のすべり破壊(Sliding failure)に対 する安定条件は、単一ブロック柱の安定条件と同様であ り、式(14)のブロック柱境界のせん断抵抗を考慮し、条 件 $e_i \ge 0$; $a_x^i = 0$; $a_y^i = 0$; $a_\theta^i = 0$ のもとで、式(11)、 式(12)のつり合い式より、i-1ブロック柱より受ける垂 直力 P_{i-1} は、次のように与えられる.



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 ブロック柱で構成される等価斜面モデル

$$P_{i-1} = P_{i+1} + \frac{F_s^i - F_N^i \mu_1}{1 - \mu_2 \mu_1}$$
(15)

ブロック柱nにおける境界条件 $P_{n+1}, T_{n+1} = 0$ および 各ブロック柱の条件 $P_0, T_0 = 0$ のもとで式(15)の解を求 めると、滑り破壊に関する安定条件は次のようになる.

$$\tan \alpha \le \mu_1 = \tan \phi_1 \tag{16}$$

ここで, α:不連続面の傾きである.

b)転倒破壊に関する安定条件

i番目のブロック柱の転倒破壊(toppling failure)条件 は、下記の条件のもとで、i番目のブロック柱のつり合 い式(13) より、i-1番目のブロック柱から受ける垂直 カ P_{i-1} は、次のようになる.

$$S_{i} / N_{i} \leq \mu_{1}; \quad e_{i} = 0; \quad a_{x}^{i} = a_{\theta}^{i} h_{i} / 2;$$

$$a_{y}^{i} = -a_{\theta}^{i} t_{i} / 2; \quad a_{\theta}^{i} = 0; \quad T_{i+1} = \mu_{2}^{*} P_{i+1}$$

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1}(h_{i} - t_{i} \mu_{2}) + (F_{s}^{i} h_{i} - F_{s}^{i} t_{i})/2}{h_{i-1}}$$
(17)

自重により不安定となる上のブロック柱より式(17)の 逐次計算を行って,斜面の転倒に対する安定性を調べる. 斜面の転倒に対する安定条件は次のようになる.

$P_0 \leq 0$	安定	
$P_0 = 0$	限界状態	(18)
$P_0 > 0$	不安定(破壊)	

c) 転倒破壊とすべり破壊の組み合わせによる安定条件

図-6に示すように、斜面上の柱状部分が不安定になる 場合、破壊モードは、1)すべりモード、2)転倒モード、 3)すべり・転倒の複合モードとなる.破壊の移行は、次 の二つの可能な移行形態が考えられる.

・ すべりモードからすべり・転倒状態へ

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1}[(1+\mu_1\mu_2)\frac{h_i}{2} - t_i\mu_2] + W_i(\cos\alpha - \eta\sin\alpha)(\frac{h_i}{2}\mu_1 - \frac{t_i}{2})}{h_{i-1} - (1-\mu_1\mu_2)\frac{h_i}{2}}$$

斜面の不安定移行条件:

 $P_0 \le 0$ すべり状態 $P_0 = 0$ すべり状態からすべり・転倒状態 $P_0 > 0$ すべり・転倒状態

(19)

• 転倒モードからすべり・転倒状態へ

$$P_{i-1} = \frac{1}{K} \left[F_s^i (4t_i^2 + h_i^2 - 3h_i t_i \mu_1) - F_N^i (4\mu_1(t_i^2 + h_i^2) - 3h_i t_i) \right] + \frac{1}{K} P_{i+1} \left[(4t_i^2 - 2h_i^2 - 6h_i t_i \mu_1) + \mu_2 (\mu_1(2t_i^2 - 4h_i^2) + 6h_i t_i) \right]$$
(20)

ここで,

$$K = [4(t_i^2 + h_i^2) - 6h_i h_{i-1}) - \mu_1 (6h_{i-1}t_i + 4\mu_2^*(t_i^2 + h_i^2)]$$

斜面の不安定移行条件:

 $P_0 \le 0$ 転倒状態

 $P_0 = 0$ 転倒状態からすべり・転倒状態

 $P_0 > 0$ すべり・転倒状態

d)斜面の受動型破壊様式の考慮

上記で説明した手法を受動型破壊様式にも適用できる. その際に、ブロック柱に作用する力系を、図-7に示すような力学的なモデルを考慮する.

基本的な定式化は同様であるが、大きな違いは柱の重 みが抵抗する方向に働き、柱に採用する外力の成分が下 記のように与えられる.

 $F_{s}^{i} = -W_{i}\sin\alpha + E_{i}\cos\alpha, F_{N}^{i} = W_{i}\cos\alpha + E_{i}\sin\alpha,$

(21) したがって、上記の関係を式(14) —式(20)に関係したと ころに導入すれば、受動型のそれぞれの破壊様式につい て検討が可能である.

3. 複数の六角ブロックで構成される柱の安定性に 対する検討結果

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、村山ら⁵が底面摩擦実験装置を用いて模型実 験と2節(1)で紹介した理論的な検討結果を比較している. この理論はAydanら³⁾が理論的証明に基づいており、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 柱として運動することが確認されている.したがって、 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たものとしてモデル化して も良いと判断できる.



図-7 ブロック柱で構成される等価斜面モデル (受動型)

4. 遠心力載荷加振実験の検討

ここで検討する比較は、遠心載荷装置を用い、高さが 150mmの六角金属棒斜面模型の遠心力加振実験に対する ものである.図-8に模型斜面における不連続面配置およ び計測センサーの設置状況を示す.

岡田・納屋¹,納谷ら⁹は実験結果と実験で利用された ブロックの力学特性,摩擦特性の詳細について報告し ている.利用されたブロックは実験における応力状態 で降伏することがないと思われる.藍檀ら⁹およびAydan et al.⁹が行った実験に基づいて,不連続面の配置パター ンを考慮すると,模型斜面は基本的に固定されている 基盤上の斜面として受動型すべりあるいは受動型転倒

(Toppling) が可能である. せん断試験結果より, せん 断面の剛体的なアスペリティー角30°を除くと, ブロッ ク間の摩擦角は6°であったと判断できる.

利用されたブロックの寸法から代表的な辺長は 3.464mmである.図-9に示した受動型転倒について,複 数の六角ブロックで構成されている代表的な柱のRの値 は173.23972mmである.

(1) 実験結果と震度法に基づいて行った極限平衡解析手法の結果の比較

図-10および図-11は最大振幅が25G(50Hz)と50G(100Hz) である加振時に計測された半径方向の最大加速度で正規 化された水平加速度記録を示す. 図中に震度法に基づい て行った極限平衡解析手法によるトップリングおよびす べりに対する解析結果を示す.



図-8 模型斜面の寸法,不連続面配置および計測センサーの設置状況¹⁰



図-9 模型斜面の可能な破壊様式

計測された破壊時の水平震度の最大値は,25G(50Hz) と50G(100Hz)で、それぞれ1.15と0.67であった。50Gの実 験結果は、震度法による受動型トップリングと受動型滑 りの間に存在している。25G(50Hz)の記録と計測された 変位記録を比較すると、正規化された加速度の値が 0.5773を超えると模型斜面の上部で変位が発生し、降伏 が見られている。したがって、最大振幅が25G(50Hz)と 50G(100Hz)における実験結果はほぼ同様であると判断で きる。また、逆方向の正規化加速度の値が1.315に達し ていることを考慮すると模型斜面内に衝撃的な振動が発 生し、このことは斜面上部でブロックの独立的な運動に つながると判断できる。

(2) 実験結果と動的極限平衡解析手法の結果の比較

最大振幅が25G(50Hz)と50G(100Hz)である加振時に計測 された半径方向の最大加速度で正規化された水平加速度 記録をそのまま利用して,動的極限平衡解析手法 (DLEM)を使用して得られた斜面の受動型転倒破壊に 対する動的応答をそれぞれ図-12および図-13に示す.計 算された変位応答を見ると非線形的な挙動が開始された 水平加速度の値が計算値とほぼ同様であり,計測された 変位応答に類似した結果が得られた.



図-10 計測された正規化加速度と震度法に基づいて行った極 限平衡解析手法の結果の比較(25G)



図-11 計測された正規化加速度と震度法に基づいて行った極 限平衡解析手法の結果の比較(50G)

遠心力載荷加振による六角棒積層斜面模型の試験結果 について、動的極限平衡解析による非線形挙動と破壊開 始時の加速度・変位応答を比較検討したところ、良い結 果が得られた.このことから、斜面の支配的な破壊様式 をしっかり考慮すれば、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 られることが分かった.

5. 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 極限平衡法を提案した.遠心力載荷加振による六角棒積 層斜面模型の試験結果について、この動的極限平衡解析 が予測する破壊開始時の加速度応答と比較検討を行い、 不連続性岩盤へ適用できることを確認できた.また、斜 面の支配的な破壊様式をしっかり考慮すれば、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ことが分かった.



図-12 実測変位と解析結果の比較(25G)



図-13 実測変位と解析結果の比較 (50G)

参考文献

- 岡田哲実,納谷朋広:不連続性岩盤を模擬した金属六角棒 積層斜面模型の遠心力載荷加振実験(2)-模型材料の力学試験, 第48回岩盤力学に関するシンポジウム,土木学会,2022.
- 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.

- 5) 村山有祈, 藍檀 オメル, 渡嘉敷 直彦, 伊東 孝: 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. 第48回岩盤力学に関するシンポジウム, 土木学会, 2022.
- 6) 納谷朋広・岡田哲実・関口陽:不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層斜面模型の遠心力載荷加振実験(3)-遠心力載荷加振実験-,第48回岩盤力学に関するシンポジウム,土 木学会,2022

CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINOUS ROCK MASS (PART 6) – THE APPLICABILITY OF DYNAMIC LIMITING EQUILIBRIUM METHOD –

Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI, Takashi ITO and Yuki MURAYAMA

In this study, the authors investigated the dynamic stability of rock slope consisting of hexagonal blocks through model tests on shaking table performed at the Central Research Institute of Electrical Power Industry (CRIEPI) of Japan and evaluated their stability through dynamic limiting equilibrium method (DLEM). Experiments indicated that toppling or sliding failures, which may be of active or passive modes, may occur. Critical acceleration levels can be estimated from the limit equilibrium method with the consideration of results of frictional properties and geometry of model slopes. Furthermore, the dynamic limiting equilibrium is capable of evaluating the dynamic responses of the model slopes.