

不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層 斜面模型の遠心力载荷加振実験 (8) — 非線形有限要素法による評価 —

川村 稔也^{1*}・鈴木 知晃¹

¹株式会社アーク情報システム 計算技術開発部 (〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2)

*E-mail: kawamura.toshiya@ark-info-sys.co.jp

本研究では、不連続性岩盤の地震時挙動を明らかにするため、不連続性岩盤の模型として、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力载荷加振実験を行うとともに、様々な解析手法を用いて、崩壊する加振条件と崩壊形態を予測する。本論文では、等価連続体解析の一つとして実施した、有限要素法に基づく時刻歴非線形解析手法を用いたシミュレーション結果を示す。微小ひずみから破壊ひずみまでの変形履歴を評価できるよう、せん断剛性と履歴減衰のひずみ依存性、および破壊後の強度低下と応力再配分を考慮できる構成モデルを使用した。得られた応答値から斜面崩壊に至る加振条件や崩壊モードを推測し、実験結果と比較するとともに、解析パラメータの設定法や本手法の適用性について考察した。

Key Words : rock mass, discontinuity, dynamic characteristics, rock slope, centrifuge model test, finite element method, nonlinear time history dynamic analysis

1. はじめに

岩盤構造物の耐震設計を行う場合、岩盤を等価な連続体と見なして評価することを基本としており、原子力発電所等重要施設の基礎地盤および周辺斜面においても同様の評価体系が用いられている。具体的には、等価線形化法による動的解析の応答値を用いて、想定すべり面上の最小すべり安全率を算定し、基準値との照合により地震時安定性が検討される。すべり安全率は瞬間的な力の釣り合いから求められる指標であり、一般的には保守的な評価となる。このことは硬岩においても同様と考えられるが、不連続面を有する硬岩の動的挙動については未解明な点が多く、どの程度保守的な評価になっているかは分かっていない¹⁾。

そこで、本研究では、基本に立ち返り、不連続性岩盤を模擬した斜面模型を対象にして、1G場における加振実験²⁾を実施し、各種の評価手法による予測結果との比較を行った。著者らは有限要素法を用いた時刻歴非線形解析によるシミュレーションを担当し、残留変位や残留ひずみ分布から、定性的ではあるが、斜面崩壊に至る加振条件、崩壊モードを推定できる可能性があることを示した³⁾。しかしながら、解析パラメータや安定性評価ク

かった。

そして今回、評価手法の実斜面への適用性確認のため、同じ斜面模型を対象にして、25G場と50G場における遠心力载荷加振実験⁴⁾が実施された。

本論文では、前回と同様、有限要素法を用いた時刻歴非線形解析による遠心力载荷加振実験のシミュレーション結果を示す。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3期) ⁵⁾ のWG活動 (2019年6月-2022年3月) として実施するものである。

2. 解析手法の概要

(1) 有限要素法による時刻歴非線形解析

時刻歴非線形解析は、逐次積分法とも呼ばれ、小さい時間間隔ごとに時間に関する運動方程式を解く解析手法である。与えられた応力-ひずみ関係を忠実に表現し、破壊進展などによる経時的な物性変化を逐一考慮しながら解析を進めることができる。等価線形化法よりも厳密な手法ともいえ、適用範囲も広い。しかしながら、実現象の再現という点においては、使用する構成モデルやその解析パラメータに大きく依存するため、注意が必要である。

(2) 構成モデル

時刻歴非線形解析の解析コードとしてTDAPIIIを使用し、石丸⁹⁾らが提案する破壊進展を考慮した岩盤の構成モデルを組み込んで、加速度入力による地震応答解析を実施した。本構成モデルの特徴を以下に列挙する。

- ・偏差成分に対する応力-ひずみ関係に多重せん断バネモデルを採用している。
- ・材料の異方性は考慮しない等方モデルである。
- ・応力-ひずみ関係の骨格曲線に、微小ひずみからピーク強度に至るまでの広いひずみ領域で実験値にフィッティング可能な、GHEモデルを採用している。
- ・せん断破壊時は平均応力 σ_m を一定としてモールの応力円を縮め、引張り破壊時は最大主応力 σ_1 を一定として最小主応力 σ_3 を引張り強度まで縮小する。
- ・せん断破壊後のひずみ軟化と余剰応力の再配分を考慮している。

3. 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。金属製の六角棒を積み上げた高さ150mmの斜面模型を等価な連続体に置換し、平面ひずみ要素でモデル化した。要素形状は全て四角形とし、各要素の大きさは、積層構造による強度特性および変形特性に対する寸法効果を考慮して、六角棒1本の断面積と概ね等しくなるようにFEMメッシュを作成した。

境界条件は、底面を固定拘束し、背面は土槽との接触を考慮してジョイント要素を配置した。ジョイント要素は圧縮時に法線方向にのみ作用する剛なバネであり、斜面模型と土槽の間の摩擦は無視（摩擦係数ゼロ）した。

(2) 解析物性値

解析物性値を表-1に示す。解析物性値は、既報³⁾と同一であり、金属材料の一般値または室内試験の結果⁷⁾に基づいて設定したものである。ただし、拘束圧が高くなるため、1G場に比べ初期せん断弾性係数は大きくなる。また、拘束圧として面外方向の直応力 σ_z は無視した。

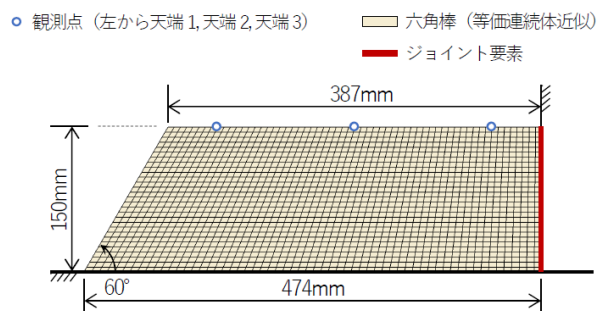


図-1 解析モデル

(3) 構成モデルのパラメータ

構成モデルのパラメータを表-2に示す。破壊前の動的変形特性については、図-2に示すとおり、繰返し三軸圧縮試験（E-2）結果に基づいて設定した。同試験結果から、値にばらつきはあるものの、せん断剛性比のひずみ依存特性（ $G/G_0 \sim \gamma$ 関係）には拘束圧依存性があるものと判断できる。

本検討では、規準ひずみ γ_r に拘束圧依存性を与えることとした。まず、最も拘束圧の低い試験結果（拘束圧 σ_c ：0.01MPa）にフィッティングさせたパラメータとして1G場の設定値（同図一点鎖線）を用いた。次に、このパラメータから規準ひずみのみ変更して、最も拘束圧の高い試験結果（拘束圧 σ_c ：0.40MPa）にフィッティングさせた（同図実線）。これらの結果を用いて、規準ひずみの拘束圧依存式を導出した。ピークせん断強度が直線式で表されることから、初期規準せん断強度も初期拘束圧と線形関係にあるものと考え、拘束圧0.01MPaと0.40MPaの間の規準ひずみを指数関数（指数部：0.27）で補間した。

一方、履歴減衰のひずみ依存特性（ $h \sim \gamma$ 関係）には拘束圧依存性が見られない。そのため履歴減衰に関して、拘束圧によらず、一定のひずみ依存特性が得られるようパラメータ β_1 を調整した。

ポアソン比、質量密度、強度特性は共通パラメータ⁸⁾を用いた。本節で言及していないパラメータについては既報³⁾と同一である。設定根拠は既報を参照されたい。

表-1 解析物性値

項目	設定値
初期せん断弾性係数 G_0 (MPa)	$1399 \sigma_m^{0.73}$
ポアソン比 ν	0.30
質量密度 ρ (g/cm ³)	7.83

σ_m ：常時における各要素の拘束圧（ $= (\sigma_x + \sigma_y)/2$ ）

表-2 構成モデルのパラメータ

項目	設定値
仮想的な非線形ばねの本数	半円で12本
減衰曲線の項数	8
規準ひずみ γ_r	$5.58 \sigma_m^{0.27} \times 10^{-4}$
$C_1(0)$	1.000
$C_1(\infty)$	0.215
$C_2(0)$	0.195
$C_2(\infty)$	1.000
α	1.090
β	2.830
h_{max}	0.190
β_1	$6.04 \sigma_m^{-0.148} \times 10^{-1}$
粘着力 c (MPa)	0.003
内部摩擦角 ϕ (deg.)	36.00
引張り強度 σ_t (MPa)	0.000
破壊後の付加減衰定数 H_f	0.000

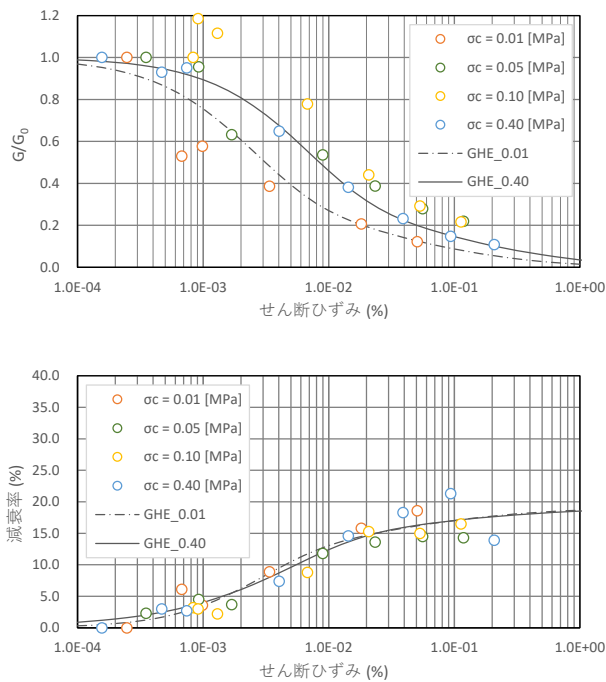


図-2 動的変形特性と GHE モデルによるフィッティング結果

(4) 解析方法

実験では、25G場と50G場において、それぞれ50Hzと100Hzの正弦波を入力し、その振幅を段階的に増加させることで、崩壊に至る加速度レベルと、崩壊モードを観測している⁴⁾。

本検討でも同様の手順を踏む。はじめに自重解析を行い、以降、地震応答解析を加振レベル順に実施する。各ステップ間では、前ステップまでの応力およびひずみ履歴を引き継ぐ設定とした。地震動として、水平方向だけでなく、振動台実験により生じる鉛直加速度も考慮した。

(5) 計算条件

地震応答解析における時間積分法として、Newmark-β法（平均加速度法）を用いた。積分時間間隔 Δt は、観測記録の時間間隔を20分割したもの（ 5.0×10^{-6} 秒）である。

減衰は初期剛性比例型減衰を採用し、表-3に示す減衰定数の異なる2ケースの解析を実施した。一般的な地震応答解析の慣例に倣い、基準振動数は解析モデルの1次固有振動数（表-4）とした。ケース1は、解析を安定させることを意図した最小限の減衰定数を与えたものである。ケース2は、不連続面の繰返し面せん断試験（C-3、D-2）において、三軸圧縮試験（E-1）では減衰の小さな微小ひずみ域で20~30%程度の履歴減衰が得られていることを根拠に設定したものである。他の解析手法との比較のため、Rayleigh減衰（剛性比例減衰）の比例係数を表-5に示す。

また、非線形解析により発生する内力と外力の残差については、当該積分ステップにおいて反復計算で解消さ

せることはせず、次の積分ステップに持ち越した。その他、加振レベルや入力波形は納谷⁴⁾らを参照されたい。

表-3 検討ケース

項目	基準振動数	減衰定数
ケース1	1次固有振動数	0.03
ケース2	1次固有振動数	0.25

表-4 固有振動数

モード	固有振動数(Hz)	
	25G場	50G場
1次	298.26	384.12
2次	379.48	488.72
3次	534.95	688.95

表-5 Rayleigh減衰の比例係数β（剛性比例係数）

項目	25G	50G
ケース1	3.20×10^{-5}	2.49×10^{-5}
ケース2	2.67×10^{-4}	2.07×10^{-4}

※質量比例係数 α はゼロとする。

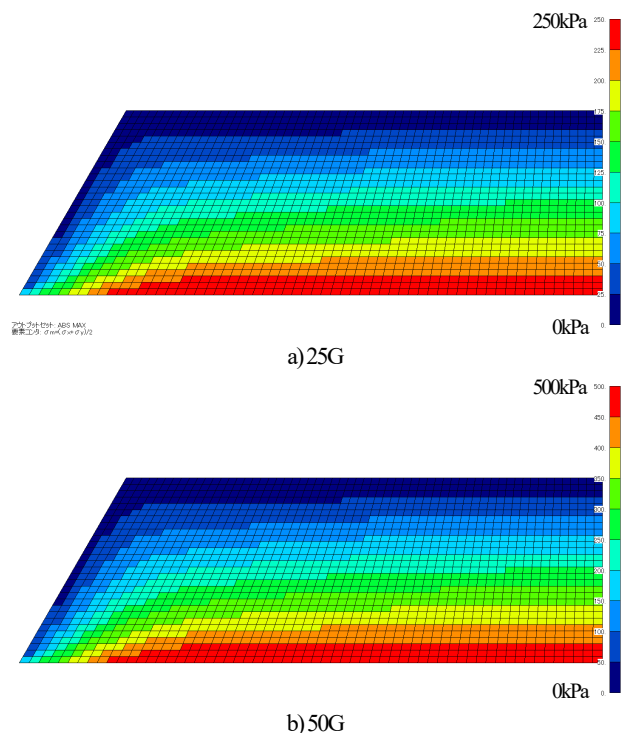


図-3 拘束圧分布（自重解析）

4. 解析結果

(1) 自重解析

自重解析によって得られた拘束圧分布を図-3に示す。25G場では法肩付近に引張り破壊が、50G場では法肩付近に引張り破壊、法尻付近にせん断破壊が見られたが、生じるひずみは微小であり、崩壊には至らないと考

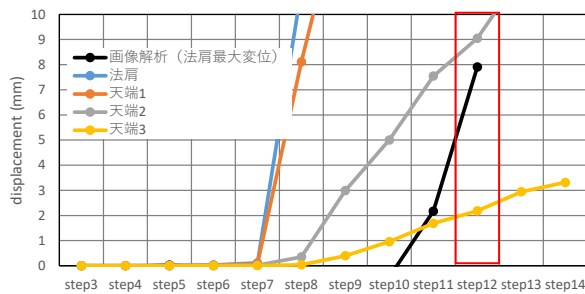


図-4 水平方向残留変位 (25G, ケース1)

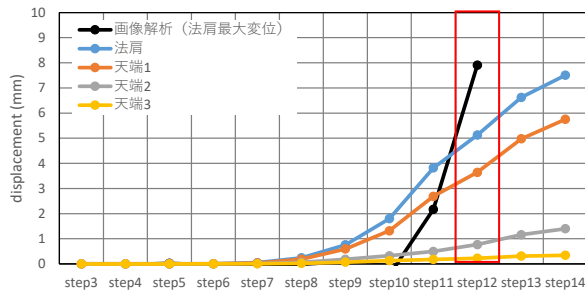


図-5 水平方向残留変位 (25G, ケース2)

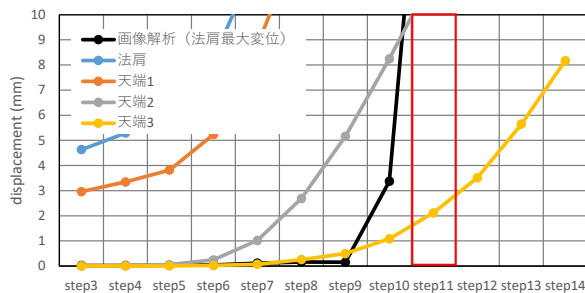


図-6 水平方向残留変位 (50G, ケース1)

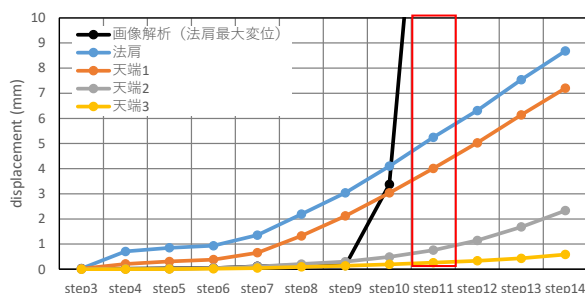


図-7 水平方向残留変位 (50G, ケース2)

られる。

(2) 時刻歴非線形解析

崩壊判定は既報⁴⁾に倣い、残留変位と残留最大せん断ひずみ分布より評価する。等価連続体解析では、実験結果のような変位の急増は捉えにくい。そこで、加振後の残留変位（塑性ひずみ）に着目した判定方法を採用した。

a) 25G

25G場の地震応答解析によって得られた残留変位、および実験の崩壊ステップ（赤枠）を図-4、図-5に示す。参考のため、同図には画像解析⁴⁾で得られた実験の法肩最大変位もプロットしてある。また、図-8、図-9は解析で得られた残留ひずみ分布である。残留変位は斜面がはらみだす方向を正としている。六角棒同士が乗り越えるのに必要な距離は約3mmであり、これを上回る相対変位の発生は斜面崩壊の可能性を示唆しているといえる。

これによるとケース1は、残留変位よりstep8で崩壊する可能性がある。対応する残留ひずみ分布をみると、step7からstep8にかけて10%を超える範囲が一気に広がるため、やはりstep8で崩壊すると予測される。

ケース2についても同様の観点で評価すると、5%超の残留ひずみ分布が現れるstep11で崩壊すると予測される。

b) 50G

50G場の地震応答解析で得られた結果を図-6、図-7、図-10、図-11に示す。25Gの場合と同様の検討方法で、ケース1はstep3に崩壊すると予測される。

ケース2についても同様に、step9に崩壊すると予測される。

5. 解析結果の評価

解析結果の吟味や実験結果との比較により、以下のことが分かった。

・崩壊ステップの差異

実験結果は、25G：step12、50G：step11で崩壊したが、ケース1では、25G：step8、50G：step3、ケース2では、25G：step11、50G：step9となった。ケース1は、剛性比例減衰の減衰定数が小さく、あるステップを境に急激に残留変位、残留ひずみが増加する傾向となった。ケース2については、不連続面の一面せん断試験結果を根拠とする大きな減衰定数を採用したため、崩壊ステップが遅れ、実験結果に近づく予測結果が得られた。これより、減衰条件の設定如何で崩壊ステップが大きく変わる。ケース2の減衰条件は、解析モデルの固有振動数を考えると、1G場の減衰条件と概ね等価となる。具体的に換算すると、1G場では基準振動数10Hz、減衰定数0.03であったため、表-4の1次固有振動数との比率を減衰定数0.03に掛け、表-1の拘束圧依存式より初期剛性が $25^{0.73}$ 、 $50^{0.73}$ 倍となり、その平方根で割ると減衰定数0.276が得られる。また、本論文では省略したが、自重解析により得られる遠心場の常時応力（初期状態）で要素の局所安全係数を算出すると、斜面付近は1.0に近接していることが分かった。初期状態が地震応答解析結果に与える影響は非常に大きいと考えられるため、その妥当性について検討が必要で

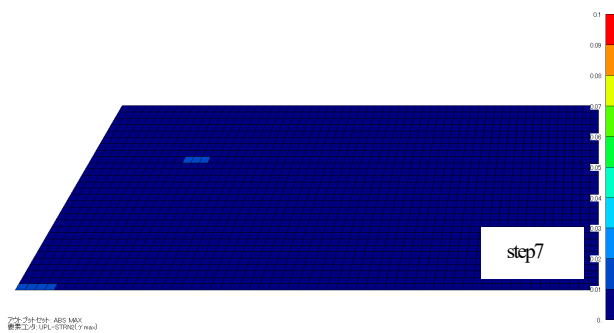


図-8 残留最大せん断ひずみ分布 (25G, ケース1)

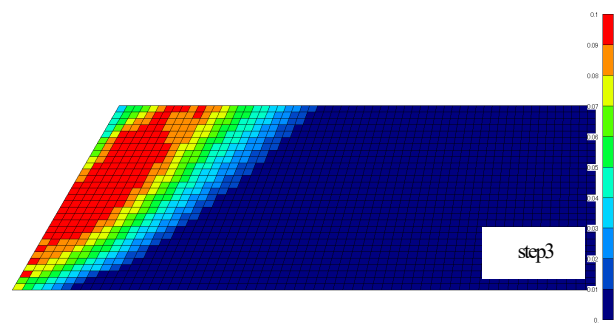


図-10 残留最大せん断ひずみ分布 (50G, ケース1)

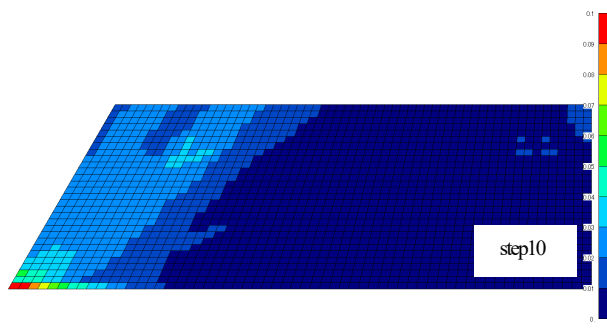
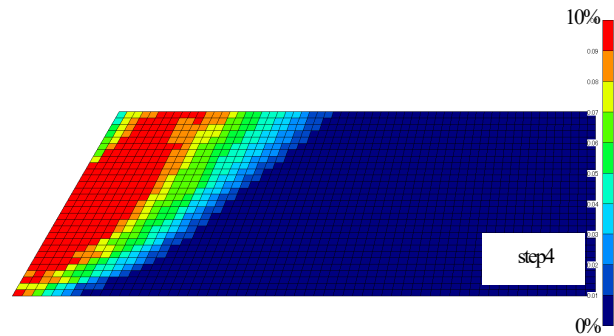
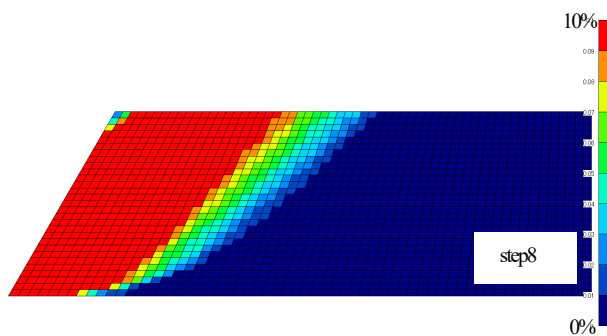


図-9 残留最大せん断ひずみ分布 (25G, ケース2)

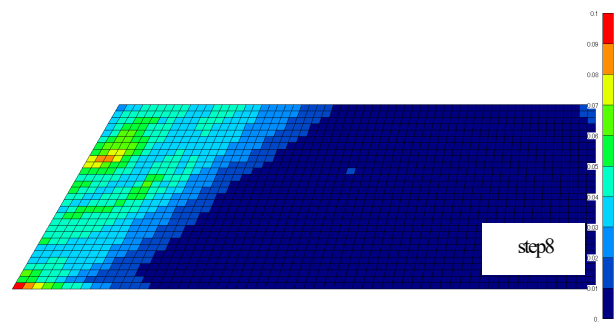


図-11 残留最大せん断ひずみ分布 (50G, ケース2)

ある。検討方法として、実験の再現性が高い不連続体解析の初期状態と比較すると良いかもしれない。

・拘束圧依存性の考慮

1G場の検討解析では、動的変形特性の拘束圧依存性を考慮せず、解析条件に最も近い拘束圧の試験結果（拘束圧 σ_c ：0.01MPa）にフィッティングさせた。予備検討において、25G場および50G場の解析条件に最も近い拘束圧の試験結果（拘束圧 σ_c ：0.40MPa）にフィッティングさせたが、視認できるすべり面は発生しなかった。本

論文では拘束圧依存性を考慮して規準ひずみを設定した。この違いにより、斜面に明確なすべり面が残留ひずみ分布より確認できるようになった。

・崩壊形状の差異

実験結果は、斜面法肩より数本の六角棒が落ちる程度の崩壊状況であったが、解析結果のひずみ分布からは、より広い範囲で円弧すべりが起きると予測される。本論文では斜面を等価連続体としてモデル化しているため、解析を進める過程で円弧状のすべり面が形成され、ひず

みレベルがすべり面上で次第に増加する傾向となった。モデル化の観点より、実験結果のような不連続性の強い挙動は再現が難しいと考えられる。

6. 今後の課題

解析の安定化を目的として設定した初期剛性比例減衰では、破壊の進展が著しく早く、実験結果を再現できなかった。室内試験結果の解釈を見直し、強度定数などを再設定する必要がある。実験結果を見てみると、微小加振であっても六角棒の間に空隙が生じており、等価連続体としてモデル化する際には、この空隙の扱いがポイントになると考えられる。また、振動数特性の把握のため、ホワイトノイズによる加振結果よりモード同定を試みたが、明確な同定結果が得られなかった。時々刻々六角棒のかみ合わせが変化している可能性が高い。

7. まとめ

不連続性岩盤を模擬した斜面模型の遠心力载荷加振実験を対象に予測解析を実施し、有限要素法（等価連続体近似）に基づく時刻歴非線形解析の適用性について検討した。動的変形特性に拘束圧依存性を考慮することで、すべり面が現れるようになった。解析結果からは、減衰の寄与が支配的となり、減衰条件次第で崩壊ステップが大きく異なった。その他として、室内試験⁷⁾では1.0を超えるポアソン比が生じたが、本稿では金属の一般値0.3を用いた。等価連続体解析では、ポアソン比0.5が一般的な最大値であるため、試験結果をそのまま再現するには、この差を埋めるモデル化方法を検討する必要がある。

また、実験では空隙の発生、六角棒同士の衝突等、連続体では表現できない状態があるため、モデル化の工夫、解析のパラメータ設定、結果の妥当性や評価に多くの検討の余地がある。

参考文献

- 1) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 岩盤の不連続性を考慮した大型構造物基礎の地震応答解析—東北地方太平洋沖地震を基本事例として—, 土木学会論文集 C, 70 巻, 1 号, pp.16-32, 2014.
- 2) 納谷朋広, 岡田哲実: 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(2) —斜面模型の加振実験—, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021.
- 3) 鈴木知晃, 川村稔也: 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(6) —非線形有限要素法による評価—, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021.
- 4) 納谷朋広, 岡田哲実: 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载荷加振実験(3) —遠心力载荷加振実験—, 第 48 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2022. (投稿中)
- 5) 土木学会 岩盤力学委員会: 岩盤動力学小委員会 (第3期), <http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage> (最終確認日: 2021年9月17日) .
- 6) 石丸真, 岡田哲実, 中村大史, 河井正, 風間基樹: 軟岩のせん断破壊後の強度変形特性のモデル化と斜面の地震時すべり安定性評価への適用, 土木学会論文集 C, Vol.73, No.1, pp.23-38, 2017.
- 7) 岡田哲実, 納谷朋広, 和仁雅明, 大塚康範: 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(1) —研究の取り組み方法と材料の室内試験—, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021.
- 8) 岡田哲実, 納谷朋広, 和仁雅明, 大塚康範: 不連続性岩盤を模擬した金属六角棒積層の斜面模型の遠心力载荷加振実験(1) —研究の取り組み方法と材料の室内試験—, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2022. (投稿中)

CENTRIFUGE TESTING TO DYNAMIC BEHAVIOR OF SLOPE MODEL PILED UP STEEL HEXAGONAL BAR SIMULATING DISCONTINUOUS ROCK(PART 8) - PREDICTION BY NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS -

Toshiya KAWAMURA and Tomoaki SUZUKI

In order to investigate the seismic assessment of discontinuous rock mass, centrifuge tests of a slope model piled up steel hexagonal bars are performed, and the vibration condition of collapse and the collapse forms are estimated using various analysis methods. In this paper, we show the results of a nonlinear time history analysis using the finite element method applied the constitutive model⁶⁾, which was performed as an equivalent continuum analysis. After that, we estimate the condition of collapse and its forms from the response, compare them with the experimental results, and consider the setting of the analysis parameters and the applicability of this method.