

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 (9) — 複合降伏モデルによる評価 —

岩田 直樹^{1*}・鹿瀬 一希¹・佐々木 猛²

¹中電技術コンサルタント(株) 原子力本部解析ソリューション部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

²サンコーコンサルタント(株) 岩盤工学研究所 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

*E-mail: n.iwata@cecnet.co.jp

これまで、不連続性岩盤の動的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を用いて1G場での加振実験を行い、様々な解析手法を用いてそのシミュレーションを実施してきた。本検討では、同一の斜面模型を用いて、遠心载荷装置により25Gおよび50Gを作用させて加振実験を実施し、その結果についてシミュレーションを行った。本論文では、模型供試体を用いた試験より求まる不連続面の変形特性の拘束応力依存性や非線形性を考慮できる有限要素法による等価連続体解析の一種である複合降伏モデルを用いて解析を行い、得られる変位・加速度応答値やひずみ分布から崩壊モードを実験結果と比較し、解析手法の適用性や課題について考察した。

Key Words : rock slope, discontinuity, Multiple Yield Model, dynamic response analysis, slope failure

1. はじめに

主要道路や原子力発電所などの重要土木構造物に隣接する斜面は、高い耐震安全性が求められるため、動的FEM解析による斜面安定性評価がなされている。一般的に、岩盤斜面の安定性は、岩盤を均質な弾性体と仮定した数値解析により評価されている。しかし、岩盤は本来、不連続で、節理、亀裂などの不連続面を有しており、岩盤の力学的な挙動は、節理群の方向、傾斜角、間隔といった不連続面の幾何学的特性や地質状況の影響を強く受けることが知られていることから、耐震性評価においても不連続面を考慮することが重要と考えられる。

これに対して、土木学会 岩盤力学委員会 岩盤動力学小委員会 (第3期) のWG活動 (2019年6月-2022年3月: <http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage>) では、基本に立ち返り、金属六角棒積層体で模擬した不連続性岩盤斜面の1G場での加振実験を行い、各種の評価手法 (静的解析/動的解析, 慣用法/数値解析, 連続体解析/不連続体解析) を比較することにより、不連続性岩盤の耐震性評価の課題を明らかにするとともに、合理的な評価方法について検討を行ってきた¹⁾。

これまで筆者らは、岩盤不連続面の変形特性の拘束応力依存による载荷—除荷を考慮した非線形モデルを提案

し、これを不連続面の分布、変形特性を考慮できる有限要素法による等価連続体解析の一種である複合降伏モデル (the multiple yield model, MYM) に導入し、一般的な岩盤を弾性体としたモデルでは再現できない挙動を、岩盤不連続面を適切にモデル化することで再現できることを示している²⁾。この手法を用いて、先述の1G場での加振実験の予測解析を実施し、発生するひずみの大きさや、加速応答の変化等から、崩壊箇所や崩壊する加速度振幅を推定した結果、定性的には概ね実験結果を再現することができた³⁾。しかしながら、不連続面の破壊による崩壊モードの評価や、解析パラメータの設定方法の妥当性検証は十分でなく、実大斜面への適用性についても有効であるかは明らかではない。

そこで本論文では、同じ金属六角棒積層斜面模型を用いて新たに実施された遠心力载荷加振実験⁴⁾の再現解析をMYMにより実施した。検討に当たっては、1G場の模型実験の解析で使用したパラメータに加え、新たに、実斜面への適用性を考慮して不連続面の強度・変形特性を再設定したパラメータによる解析を行い、MYMを用いた不連続性岩盤の耐震性評価への適用性や課題を考察した。

2. 解析手法の概要

(1) 複合降伏モデルによる不連続面の構成則

複合降伏モデルは、図-1に示すように岩盤のひずみを母岩のひずみと複数の節理群のひずみの和で表現し、母岩と節理群の応力は等しいと仮定し、有限要素法の剛性マトリックスに弾性コンプライアンスを適用して足し合わせることで岩盤のひずみを算定する。このため、母岩および各方向に分布する不連続面の変形・強度特性を個別に設定でき、逐次変化する応力状態に応じた変形特性や破壊判定を行うことができる。この岩盤の構成則を運動方程式に導入し、時々刻々解くことにより地震応答を算定する。

(2) 不連続面の変形・強度特性

不連続面の変形特性のうち垂直剛性 K_{ni} は、式(1)に示すBandisらの提案式²⁾による拘束圧に依存した非線形性を考慮するとともに、図-2aに示すような除荷時に残留変位が生じるモデルを設定した。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (1)$$

$$V_i = \frac{\sigma_{ni} V_m}{K_{ni} V_m + \sigma_{ni}} \quad (2)$$

$$V_{ei} = \left(1 - \frac{V_i}{V_m} \right)^{mj} V_i \quad (3)$$

ここに、 K_{ni} は初期垂直剛性、 V_m は不連続面の最大閉合量、 σ_n は不連続面の垂直応力、 σ_{ni} 、 V_i は任意点の不連続面の垂直応力と閉合量、 V_{ei} は弾性変形、 mj は除荷時の弾性変形量を定義する係数であり、不連続面の垂直剛性試験等より設定する。 $mj=0$ の場合は全て弾性変形とな

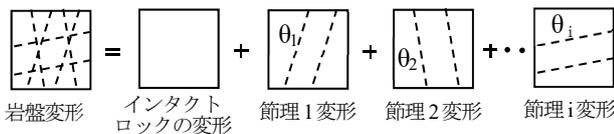


図-1 不連続面を含む岩盤の変形特性

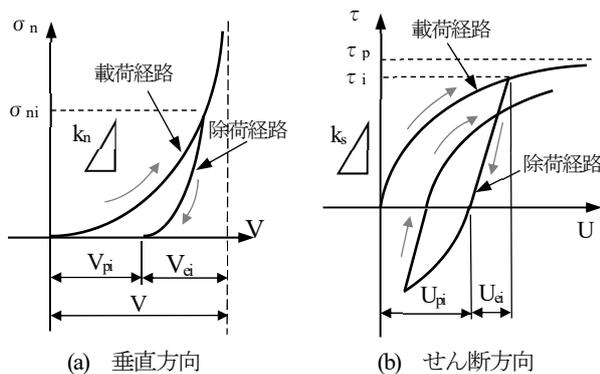


図-2 不連続面の垂直およびせん断方向の変形特性

り、 mj が大きいほど弾性変形量は小さくなる。

また、不連続面のせん断剛性 K_s は式(4)に示すKulhawyの提案式²⁾により拘束圧依存性と、Mohr-Coulombの破壊規準による非線形性を考慮するとともに、図-2bに示すような除荷時に残留変位が生じるモデルを設定した。

$$K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left(1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (4)$$

$$U_{ei} = U_i \left(1 - \frac{\tau_i \cdot R_f}{\tau_p} \right)^{kj} \quad (5)$$

$$K'_s = \tau_i / U_{ei} \quad (6)$$

ここに、 K_{si} は初期せん断剛性、 σ_{ni} は不連続面の垂直応力、 τ_p はMohr-Coulomb破壊規準より計算される不連続面のせん断強度、 τ_i はせん断応力、 nj は剛性係数、 R_f は破壊比であり、不連続面のせん断試験結果より設定される。ヒステリシスは、任意のせん断応力 τ_i における不連続面のせん断変位 U_i における弾性変形 U_{ei} を式(5)に示す破壊接近度 τ_i / τ_p の関数で定義し、除荷時のせん断剛性 K'_s は、せん断応力 τ_i を弾性変形 U_{ei} で除した式(6)を仮定する。なお、係数 kj は不連続面のせん断試験結果より設定される。

不連続面に引張が発生した場合 ($\sigma_n < 0$)、引張が発生した不連続面で k_n 、 $k_n = 0$ として、不連続面に発生した応力を周辺に配分する処理を行うとともに、次ステップにおいて、引張が発生した不連続面で k_n 、 $k_n = 0$ として解析を行う。しかし本ケースでは、応力配分による収束計算回数が増大による計算時間の増大を懸念して、時間刻みを非常に小さくし、破壊した不連続面の応力を周辺に配分せず、次ステップに繰り越す処理を行った。

3. 解析条件

(1) 解析モデル

図-3に解析モデルを示す。解析モデルは、加振実験⁴⁾において金属製の六角棒 (SUS304) を積み重ねて作製した高さ150mmの斜面模型をモデル化した。斜面部、振動台とも平面ひずみ要素でモデル化し、斜面部はMYM、

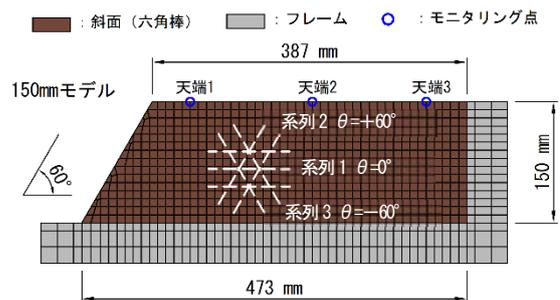


図-3 解析モデル

振動台は弾性体とする。斜面部の不連続面は、六角棒の噛み合わせ方向 ($0^\circ, \pm 60^\circ$ の3系列) を仮定した。また、側方の振動台に接触する斜面の要素に 90° (鉛直) の不連続面を設定することで、振動台と斜面の間に引張応力が発生した場合に $k_n, k_s=0$ となり、剥離の効果を考慮できるようにした。

境界条件は、振動台底面は固定、振動台側面は自重計算時は鉛直ローラー、動的解析時は水平ローラーとした。

(2) 解析用物性値

表-1に解析用物性値一覧表を示す。MYMにおけるインタクトはステンレスの物性値を設定した。不連続面の物性値は前述の通りであり、不連続面の間隔は、六角棒の短辺長6mmとした。振動台は剛体相当とし、減衰は、レーリー減衰の剛性比例型を仮定し、卓越振動数10Hz、減衰定数3%として係数を設定した。

モデルは六角棒を積み重ねて作成されており、不連続面

表-1 解析用物性値

母岩	単位体積重量 γ (g/cm ³)	8.0
	弾性係数 E (kN/m ²)	2.0×10^8
ポアソン比 ν	0.3	
MYMモデル 不連続面	初期垂直剛性 k_n (kN/m ³)	2.20×10^5
	垂直剛性の除荷時係数 m_j	0.7
	初期せん断剛性 k_s (kN/m ³)	1.12×10^5
	剛性係数 n_j , 破壊比 R_f	0.5, 0.7
	せん断剛性の除荷時係数 k_j	1.0
	せん断強度 τ (MPa)	個別物性: 0.0 統一物性: 0.02
	内部摩擦角 ϕ (°)	個別物性: 38.6 統一物性: 16.0
	間隔 S (mm)	6.0
	最大閉合量 V_m (mm)	0.28
	傾斜角 θ (°)	$0^\circ \pm 60^\circ$ (3系列)
振動台	単位体積重量 γ (kN/m ³)	0.0
	弾性係数 E (kN/m ²)	1.0×10^9
	ポアソン比 ν	0.3
	減衰定数 h (%) [レーリー減衰の係数 α, β]	3.0 [$\alpha=0, \beta=0.0009549$]

表-2 解析ケース

遠心力加速度	Step	設定振幅電圧 (V)	入力加速度 (m/s ²)	崩壊の有無
25G	step 7	1	13.2	—
	step 8	2	37.7	—
	step 9	3	99.7	—
	step 10	4	179.2	—
	step 11	5	225.9	—
	step 12	6	311.5	斜面崩壊
50G	step 4	1	13.1	—
	step 5	2	25.5	—
	step 6	3	69.1	—
	step 7	4	94.0	—
	step 8	5	159.9	—
	step 9	6	225.3	—
step 10	7	335.9	—	
step 11	8	349.4	斜面崩壊	

は六角棒の凹凸が噛み合わさった状態であることから、1G場模型実験の予測解析では、組み上がった六角棒により形成される山型の凹凸面の試験であるシリーズD-3の試験結果をもとに不連続面の強度・変形特性を設定した³⁾。垂直方向の変形特性は、図-4に示すシリーズD-3の垂直応力と垂直変位の関係より、拘束圧0.4MPaの載荷、除荷曲線を再現できるようにフィッティングを行った。せん断方向の変形特性は、図-5に示せん断変位-せん断応力の関係の初期せん断剛性を垂直応力のべき乗関数でモデル化し、せん断変位-せん断応力の関係をせん断強度に漸近する非線形な変形特性でフィッティングした。

1G場模型実験の予測解析では、各解析手法で個別にパラメータを設定していたため、統一できていなかったが、今回の検討では、1G場模型実験の予測解析で用いたパラメータを用いたケース (個別物性ケース) と、統一したパラメータを用いたケース (統一物性ケース)⁹⁾ について検討を行った。なお、MYMでは、個別物性ケースと統一物性ケースの違いは、不連続面の強度であり、個別物性ケースでは、山型の凹凸面の試験であるシリーズD-3より設定したのに対し、統一物性ケースでは並んだ供試体面の試験であるシリーズC-2より設置した。

(3) 解析方法および解析ケース

表-2に解析ケースを示す。遠心力載荷加振実験は、25G場で正弦波50Hz、50G場で正弦波100Hzの加振実験を実施しており、振動台の加振力 (設定電圧) を段階的に増加させて斜面を破壊させた。加振実験では、25G場ではstep12で、50G場ではstep11で法肩付近の数本の金属棒

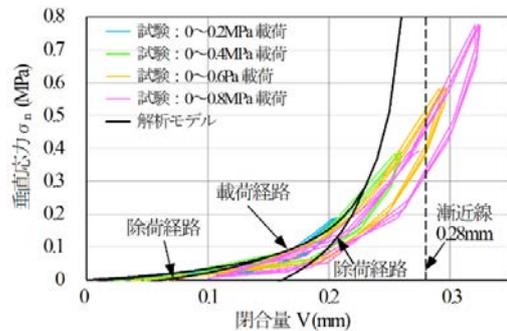


図-4 不連続面の垂直方向の変形特性 ($\sigma_n=0.4\text{MPa}$)

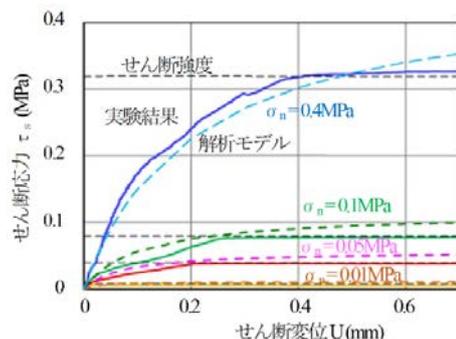


図-5 不連続面のせん断方向の変形特性

が崩落している⁴⁾。本検討では、比較的入力加速応答のノイズが少なく、安定した波形が得られている1Vから斜面破壊までのステップ（25G場：step7～12，50G場：step4～11）の解析を行った。

入力加速度波形は、正弦波10波で、前後に3波のエンベロープ波が付けられた合計16波であり、加振実験において土層底面中央位置で観測された水平波形と鉛直波形を同時に入力した。

解析は、25Gおよび50Gの自重計算による初期応力設定に引き続き、加速度入力による地震応答解析を行う。ただし、実験のように振幅の異なる入力地震動を段階的に連続して作用させるのではなく、自重計算の後に個別に入力地震動を作用させて、加速度、変位、ひずみを算定して、崩壊加速度と崩壊モードを推定した。解析の時間刻み Δt は0.00001秒とした。

4. 解析結果

(1) 固有値解析結果

解析モデルの斜面部のみを取り出し、25G および 50G を作用させた自重計算による応力を用いて固有値解析を行った結果、1次卓越振動数は25G場では6Hz、50G場では7Hzとなった。卓越振動数のモード図は、法肩付近が変形するモードとなる。

等価線形解析における初期剛性を用いた固有値解析結果の1次卓越振動数は25G場では341Hz、50G場では441Hzであり⁶⁾、等価線形解析の破壊ステップにおける卓越振動数は、ひずみ増大による剛性低下により25G場では15Hz付近、50G場では31Hz付近となる。MYMの卓越振動数は、等価線形解析よりもかなり小さくなっているが、これは自重計算において法肩付近の拘束圧、特に水平方向の応力が非常に小さくなるため、 $\pm 60^\circ$ の不連続面の剛性が著しく低下し、法肩付近の等価剛性が大きく低下したことが原因である。

(2) 25G場の個別物性ケース

図-6に25G場における入力水平加速度と個別物性ケースの天端1における水平加速度応答を示す。1G場加振実験の際に示したように³⁾、せん断ひずみが大きい領域が発生しだすと、加速度応答が急激に増加もしくは減少するとともに、応答波形の周期が異なるなどの変化が見られた。step9では0.18～0.25秒付近で入射波に比べてやや応答が増加し、step10では、0.15秒以降に応答が減少するが、応答波形に乱れは生じていない。しかし、step11以降では、減少した応答波形に乱れが生じるようになることから、step11もしくはstep12で破壊に達するものと考えられる。

図-7はstep9およびstep12における法肩の水平変位応答を、図-8は各ステップの残留変位を示す。水平変位応答は、いずれも加振が進むに従って残留変位が増加する傾向であるが、Step12では0.9秒以降に残留変位が急激に発生し、0.2秒以降の振幅も小さくなる。残留変位は、図-8に見られるようにstep8以降に発生し始め、step10以降は同程度の残留ひずみとなる。

図-9は残留ひずみが急増するstep9と、実験で斜面崩壊したstep12の加振終了時の変形図と残留せん断ひずみを示す。step9では法面表面付近に10%を超える領域が発生し、特に法肩では20%近いせん断ひずみが発生している。このことから、法肩付近で崩壊が発生するものと考えられる。実験で斜面崩壊したstep12では、更に法肩のせん断ひずみが増加するとともに領域が拡大し、法尻付近の表面にも15%を超える領域が発生するようになる。

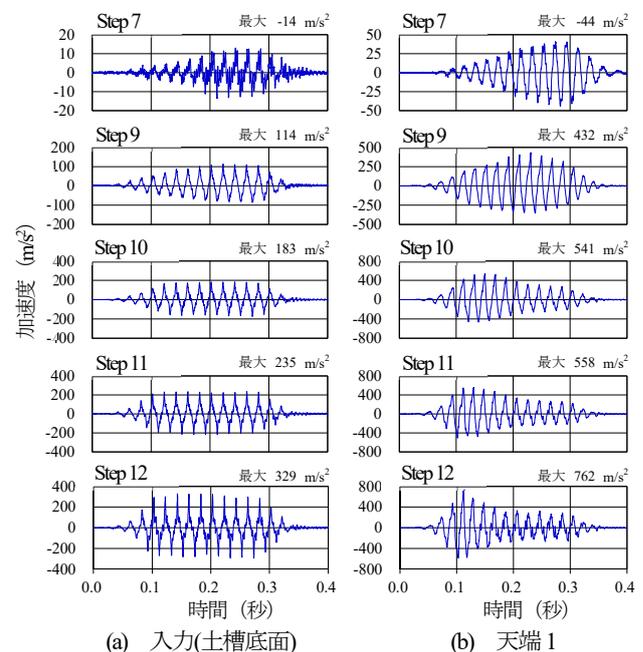


図-6 25G場の個別物性ケースにおける水平加速度応答

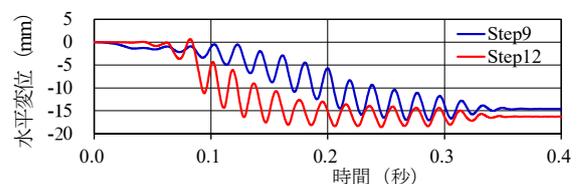


図-7 step9,12における法肩の水平変位応答(25G場, 個別物性)

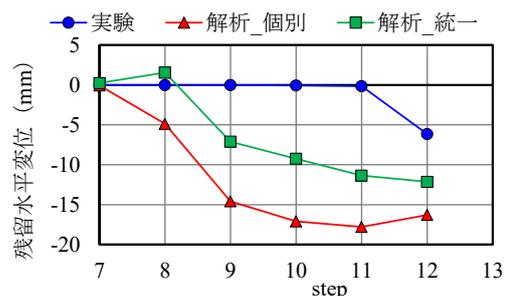


図-8 ステップごとの水平残留変位の比較 (25G場)

(3) 25G場の統一物性ケース

25G場の統一物性ケースの天端1における水平加速度応答は、個別物性の場合と若干振幅は異なるものの、同様の応答を示し、step9の0.2秒付近でやや応答が増加し、Step11では応答が急激に減少する。残留ひずみ量は、図-8に見られるように、個別物性よりも若干小さくなるが、step9以降に残留変位が発生し始め、step10以降は同程度の残留ひずみとなっている。

図-10は残留ひずみが急増するstep9と、実験で斜面崩壊したひとつ前のstep11の加振終了時の変形図と残留せん断ひずみを示す。step9では法肩ではなく法面上段の法面表面付近に15%を超える領域が発生しており、個別物性の異なる箇所でもせん断ひずみが増加している。step11では法肩と法尻付近でせん断ひずみが20%を超える領域が広範囲に発生しており、崩壊モードを見ると、法尻のはらみ出しと法肩のトップリングが見られる。

(4) 50G場の個別物性ケース

図-11に50G場における入力水平加速度と個別ケースの天端1における水平加速度応答を示す。step8の加速度応答を見ると、0.15秒付近でやや応答が増加しているが明瞭ではない。それ以降のステップでも25G場のような加速度応答の急激な低下等は見られない。

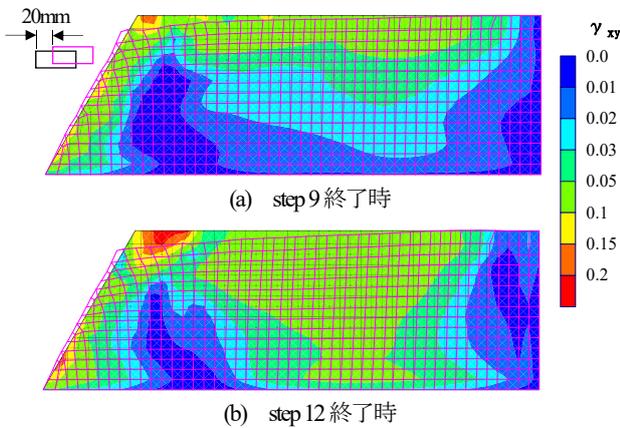


図-9 加振終了時の残留変形とせん断ひずみ(25G場, 個別物性)

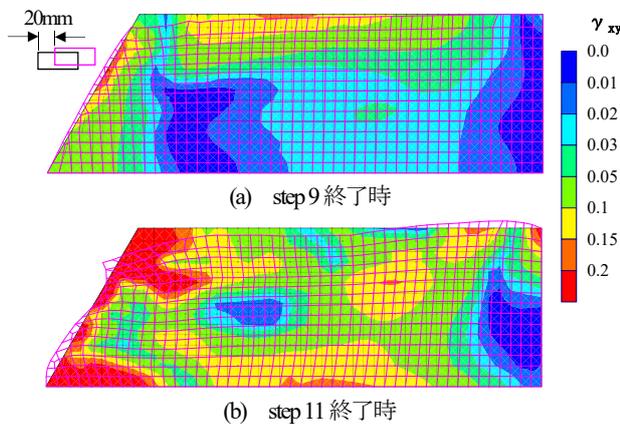


図-10 加振終了時の残留変形とせん断ひずみ(25G場, 統一物性)

図-12は各ステップの残留変位を示す。入力加速度の振幅の増加に伴って残留変位は僅かに増加する程度で、急激な増加は見られない。

図-13は実験で斜面崩壊したstep11の加振終了時の変形図と残留せん断ひずみを示す。step11では法肩と法面奥側のモデル天端の表面付近に10%を超えるせん断ひずみ領域が発生するが範囲は非常に小さい。このように大きなせん断ひずみが発生していないことから、加速度応答の急変や残留ひずみの増加が発生していないものと考えられる。今回、50G場で個別物性を使用した解析では、破壊の挙動を再現することができなかった。ただし、せん断ひずみが増加している箇所は、法肩から背後の天端

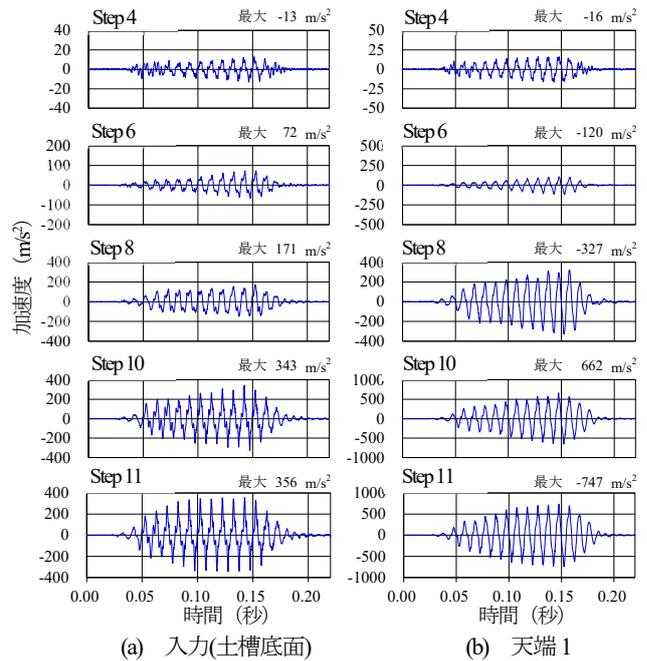


図-11 50G場の個別物性ケースにおける水平加速度応答

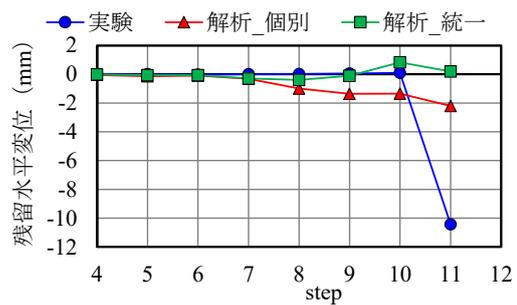


図-12 ステップごとの水平残留変位の比較 (50G場)

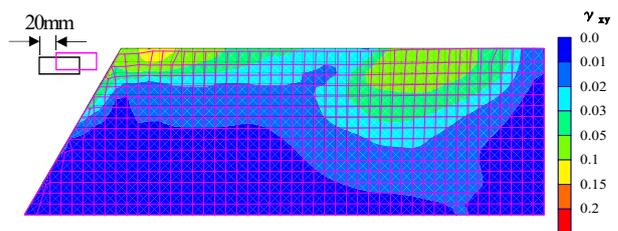


図-13 step11加振終了時の残留変形とせん断ひずみ (50G場, 個別物性)

のごく表層付近であり、破壊するのであればこの部分から破壊が生じることは推察された。

(5) 50G場の統一物性ケース

50G 場の統一物性ケースの水平加速度応答、残留変位、および残留せん断ひずみ分布は、50G 場の個別物性の場合とほぼ同様となり、破壊挙動は見られない。

5. 解析結果の評価と課題

本手法は微小変形理論にもとづく FEM 解析であることから、1G 場の加振実験と同様に崩壊の発生をどのように評価、定義するかが課題である。1G 場の加振実験では、応答加速の急激な変化があったステップと、加振終了後の残留せん断ひずみ分布から崩壊の発生ステップと崩壊場所を推定し、概ね実験結果と整合した結果が得られた。しかし、今回の検討ではせん断ひずみが大きくなり、崩壊するであろう箇所は推測できるものの、崩壊ステップを予測することは困難であった。

不連続面の強度として、供試体の噛み合わせを考慮した強度 ($\tau_0=0\text{MPa}$, $\phi=38.6^\circ$) を用いた個別物性ケースと、噛み合わせを考慮しない強度 ($\tau_0=0.02\text{MPa}$, $\phi=16^\circ$) を用いた統一物性ケースの比較を行ったが、あまり明瞭な違いは確認できなかった。これらのことは、模型斜面の崩壊モードを確認すると、崩壊ブロックが供試体の凹凸面を乗り上げて、トップリング挙動により崩壊が発生しており、すべり主体の崩壊モードでなかったことが原因と考えられる。これらの崩壊モードの確認を行うためにも、せん断ひずみの発生位置だけではなく、不連続面の破壊形態、不連続面の引張発生状況等を分析・評価していくことが必要である。

また、25G場と50G場でせん断ひずみの発生領域や大きさが大きく異なる結果となった原因も十分な分析・検討ができておらず、今後の課題である。

6. おわりに

本研究では、筆者らが提案している不連続面の変形特性の拘束応力依存性や非線形性を考慮できる MYM を用いて、斜面模型の加振実験の予測解析を行った。解析結果を実験結果と比較したところ、定性的に崩壊箇所を推定できる可能性があることが分かった。ただし、不連続面の変形特性の非線形性やヒステリシス、拘束圧依存性など複雑なモデル化が必要であり、個々のパラメータの影響については検討が行えていない。今後は、パラメトリックスタディを行い、どのパラメータが重要な要素であるかを検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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, pp.387-392, 2021.
- 2) 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(地圏工学), Vol.70, No.1, pp.16-32, 2014.
- 3) 岩田直樹, 松井章弘, 佐々木猛, 吉中龍之進: 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(7)―複合降伏モデルによる評価―, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.423-428, 2021.
- 4) 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講演集, 2022 (投稿中) .
- 5) 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講演集, 2022 (投稿中) .
- 6) 清田亮二, 高橋裕徳, 原田雅也: 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(7)―等価線形解析による評価―, 第 48 回岩盤力学に関する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 MASS(PART 9) - PREDICTION BY MULTIPLE YIELD MODEL ANALYSIS -

Naoki IWATA, Kazuki KANOSE and Takeshi SASAKI

The purposes of this research are to clarify problems of seismic assessment of discontinuous rock mass and to search the solution to the problems. Therefore, the vibration tests of slope model piled steel hexagonal bar simulating discontinuous rock mass are performed, and the vibration condition of collapse and the collapse forms are estimated using various analysis methods. In this study, the collapse mode was predicted from the displacement and acceleration response and strain distribution calculated by equivalent continuum finite element method as Multiple Yield Model (MYM) introducing cyclic loading elastic-plastic deformation characteristics of rock joints, and the applicability of the analysis method was discussed.