# 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(11) -二次元多角形個別要素法による評価-

河路 薫<sup>1\*</sup>•曹 国強<sup>2</sup>

<sup>1</sup>伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 原子力・エンジニアリング第2部(〒105-6950東京都港区虎ノ 門四丁目1-1 神谷町トラストタワー)

<sup>2</sup>伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 建設ビジネス推進部(〒105-6950東京都港区虎ノ門四丁目1-1 神谷町トラストタワー)

\*E-mail: kaoru.kawaji@ctc-g.co.jp

本研究では、不連続性岩盤の耐震性評価の課題を抽出し、その解決策を模索するため、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載荷加振実験を行うとともに、様々な解析手法を 用いて、破壊する加振条件と破壊形態の予測を実施する.本論文では、不連続性岩盤の動的挙動を明らか にするため二次元多角形DEMを用いて模型実験の再現解析を実施する.解析に用いる各種パラメータにつ いては、1G場における加振実験を再現するために室内試験の結果から決定した値を用いた.この1G場に おけるパラメータを用いて金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心力載荷加振実験の再現解析を実施し、 実験の結果と比較することで手法の有効性や問題点等を整理した.

# *Key Words :* distinct element code, jointed and blocky material, rock mass, discontinuity, mechanical property, dynamic characteristics, centrifugal loading test

# 1. はじめに

不連続面を有する硬岩については、現実的な動的挙動 について未解明な点が多い<sup>10</sup>. だだし、実務では、岩盤 の応力--ひずみ関係の非線形性は考慮せず、弾性波速度 に基づく剛性を用いて、動的解析を行い、得られた応力 から安全率等で応力照査を行うため、保守的な評価とな っている可能性が高い. しかしながら、どの程度保守的 な評価となっているのかはよくわからない.

そこで、基本に立ち返り、不連続性岩盤の模型を対象 にして、1G場における加振実験<sup>3</sup>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.本研究では、1G場 における加振実験と同様の模型に対して遠心力載荷模型 実験装置を使用して25Gと50G場における加振実験<sup>3</sup>を行 い、同様に各種評価手法の結果を比較することで不連続 性岩盤の耐震性評価方法について検討する.本論文では、 多角形個別要素法を用いた数値シミュレーションを実施 する.不連続面の力学特性については,1G場における 加振実験再現解析サと同一のパラメータとした.設定し たパラメータを用いて実施した解析結果と実験結果を比 較することで解析手法の特徴や有効性について議論する. なお,本研究は,土木学会 岩盤力学委員会 岩盤動力学 に関する研究小委員会(第3期)のWG活動(2019年6月-2022年3月:http://rock-jsce.org/index.php?FrontPage)として 実施するものである.

# 2. 解析手法の概要

多角形個別要素法<sup>9</sup>では、岩盤は離散ブロックの集合 として表され、各ブロックのインターフェースにあるジ ョイントによって不連続性を境界条件として扱うもので ある.解析コードの内部では、力が作用したことによる ブロック境界面での接触力と変位の関係、またその作用 した力によって動いたブロック挙動が発生させる力の伝 播を計算しており、各ブロック同士の接触における力 -変位関係とNewtonの第2法則の適用を交互に行う、力 - 変位関係は、ブロックの変位から接触力を見つけるため に使用され、Newtonの第2法則はブロックに作用する力 から生じるブロックの動きを示すのに使われている.ブ ロック自体の変形も解析可能であり、その場合ブロック 内部を三角形要素で分割し内部の応力と変位の計算を実 施する.

# 3. 解析パラメータ

解析に設定が必要なパラメータについては基本的に 1G場における加振実験再現解析4と同様とした. 設定し た物性値を表-1に示す. 解析においてブロック自体を変 形体として扱えるが、1G場の再現解析と同様に剛体と して扱うこととする. また、ジョイントの非線形特性に ついても1G場の再現解析と同様に破壊構成則はC-Yモデ ル(Continuously-Yielding Modelの)とし、表-2に示すパラメー タを設定する、C-Yモデルは、バイリニアのMohr-Coulomb則より連続的降伏曲線を表現することができ, 応力-ひずみの非線形挙動を精度よく表現することがで きる構成則である. せん断強度を連続的に低下させ、 塑 性解析におけるせん断剛性のひずみ依存性を考慮するこ とが出来るため、強度ピークと残留挙動まで評価出来る という特徴を有する. 表-2のうち、ジョイントのinitial friction angleが初期強度, intrinsic friction angleが低下後の強 度を示すパラメータとなっている.

なお,共通パラメータについてはC-Yモデルを用いて 一面せん断試験の結果を再現することのできるパラメー タを設定できなかったため実施していない.

<b>双</b> 亚海八角禅···》神川而17月11回				
材料密度	8000 [kg/m <sup>3</sup> ]			
弾性係数	2.0×10 <sup>11</sup> [Pa]			
ポアソン比	0.3			

表-2 非線形特性のパラメータ

joint normal stiffness [Pa/m]	8.69×10 <sup>11</sup>
joint shear stiffness [Pa/m]	$1.0 \times 10^{10}$
joint normal stiffness exponent [Pa/m]	0.0
joint shear stiffness exponent [Pa/m]	0.0
joint intrinsic friction angle [ $^{\circ}$ ]	6.7
joint initial friction angle [ $^{\circ}$ ]	10.05
joint roughness parameter	$0.2 \times 10^{-4}$

### 4. 遠心力載荷加振実験の再現解析

#### (1) 解析条件

六角棒模擬岩盤斜面の加振実験の斜面模型および加速 度計と変位計の設置位置を図-1に示す.斜面模型は,斜 面高さ150mm相当であり,図-1に示すように六角棒が積 み上げられている.これを基に作成した解析モデルを図 -2に示す.

次に、加振実験と解析で実施したケース一覧を表-3に 示す.実験では各ステップで前後エンベロープ3波,正 弦波10波で加振している.実験装置の仕様上、与える加 速度は指定できず電圧での加振入力設定となるため、架 台下の土槽基盤中央に設置した加速度計にて計測された 水平と鉛直の加速度波形を解析モデルの架台に入力波と して設定する.また、本論文で使用する多角形個別要素 法コードに設定する入力波形は速度波形である必要があ るため、得られた加速度波形を速度波形に変換して入力 する、この際、積分した波形のドリフトが大きかったた め、フィルターにてドリフト補正を施した後に入力加速 度レベルを維持できるように振幅調整を行った.表-3に 示す入力加速度は土槽基盤中央の加速度の+側と-側の 最大値の平均値,入力速度は入力波形の+側と-側の最 大値の平均値を示している.入力波形として設定した速 度波形を図-3に示す.実験ではstep1, step2としてホワイ トノイズによる加振を実施しているが、六角棒の変形に は影響がないと判断して解析ではそれらは省略してstep3 から開始している. なお、減衰については他手法との共



#### 図-2 加振実験再現解析のモデル図

表-3 実施ケース一覧

重力	周波数	加振	u振 振幅電圧 入力	入力加速度	モデル入力速度 <sup>[m/s]</sup>	
加速度 [	[IIZ]	ステッノ	[V]		水平	鉛直
25G	50	step3	0.01	0.9	0.000	0.001
		step4	0.05	1	0.000	0.001
		step5	0.1	0.9	0.000	0.001
		step6	0.5	2.6	0.003	0.001
		step7	1	13.2	0.023	0.004
		step8	2	37.7	0.137	0.016
		step9	3	99.7	0.350	0.038
		step10	4	179.2	0.536	0.083
		step11	5	225.9	0.716	0.113
		step12	6	311.5	0.967	0.135
		step13	7	385.8	1.188	0.160
		step14	8	428.7	1.350	0.187
50G	100	step3	0.5	4.5	0.003	0.001
		step4	1	13.1	0.014	0.003
		step5	2	25.5	0.032	0.006
		step6	3	69.1	0.081	0.012
		step7	4	94	0.134	0.020
		step8	5	159.9	0.251	0.027
		step9	6	225.3	0.347	0.031
		step10	7	335.9	0.496	0.038
		step11	8	349.4	0.581	0.085
		step12	9	367.5	0.584	0.085
		step13	10	428.6	0.684	0.092
		step14	11	519.7	0.818	0.105

通パラメータに合わせるため考慮しないこととし、レー リー減衰ゼロと設定した.

### (2) 解析結果

解析結果を加振実験の結果と比較することで手法の有 効性や問題点を整理する.加振実験再現解析の結果一覧 を表-4に示す.破壊の判定は実験と同様の方法とし,目 視により斜面形状を構成する六角棒の状態を確認して六 角棒の落下がなければ非破壊とし,六角棒が落下した場 合は斜面崩壊と判断した.実験結果は25G場の加振にお いてはstep12の6.0V,50G場の加振においてはstep11の8.0V で破壊している.これに対して解析結果では,25G場の 加振においてはstep11の5.0V,50G場の加振においては step10の7.0Vで斜面崩壊した.25G場,50G場における結 果は,両者ともにある程度の加速度レベルにおいて斜面 崩壊が発生する現象については再現できている.しかし ながら,どちらも解析結果が実験結果に対して小さい加 速度レベルで破壊する傾向となった.

つぎに、斜面崩壊直後と崩壊stepの加振終了時における斜面形状を実験結果と解析結果で比較した図を図-5~ 図-6に示す.実験結果、解析結果ともに法肩部分の六角 棒が剥落して斜面崩壊となっており、崩壊開始形態については解析結果は実験結果を良く再現できている.解析 結果は崩壊後も加振を続けていくと斜面が滑り破壊を起 こし、崩壊stepにおける加振終了後の斜面形状について は破壊する範囲が実験結果に比べて圧倒的に広い.解析



表-4 解析結果一覧

重力	加振	加振後の状態		
加速度	ステップ	実験結果	解析結果	
	step3	非破壊	非破壊	
	step4	非破壊	非破壊	
	step5	非破壊	非破壊	
	step6	非破壊	非破壊	
25G	step7	非破壊	非破壊	
	step8	非破壊	非破壊	
	step9	非破壊	非破壊	
	step10	非破壊	非破壊	
	step11	非破壊	斜面崩壊	
	step12	斜面崩壊	-	
	step13	-	-	
	step14	-	-	
	step3	非破壊	非破壊	
	step4	非破壊	非破壊	
	step5	非破壊	非破壊	
	step6	非破壊	非破壊	
	step7	非破壊	非破壊	
50G	step8	非破壊	非破壊	
50G	step9	非破壊	非破壊	
	step10	非破壊	斜面崩壊	
	step11	斜面崩壊	-	
	step12	-	-	
	step13	-	-	
	step14	-	-	

ではさらに加振を続けると法面から遠い天端部でも六角 棒が崩壊し、図-7に示すように最後にはモデル全体が滑 り破壊を起こしている.これは1G場における加振波 10Hz,50Hzの再現解析の場合と同様の傾向となってお り、2つの原因が考えられる.1つ目は減衰の効果がない こと、2つ目はモデル右端の土槽を六角棒と同じ剛性の 剛体としてモデル化していることによって接触条件が違 い衝突が発生してしまうことがこの差異を生じさせてい ると考えられる.また、実験結果では図-5の左上図に見 られるような斜面表層側の六角棒が剥離するような現象 が加振する加速度レベルが大きくなると崩壊stepよりも 前から見られるが、解析結果ではこの現象が見られなか った.一方、50G場の解析については解析結果も実験結 果も法肩部分の六角棒が数本崩落しただけの崩壊形態と







(解析step10 破壞開始時)

(実験step12\_加振終了時)(解析step11\_加振終了時)図-5 25G場加振における破壊stepの崩壊形状比較



(実験step11\_破壊開始時)



(実験step11\_加振終了時)(解析step10\_加振終了時)図-6 50G場加振における破壊stepの崩壊形状比較

なっている.崩壊stepにおける加振終了後の斜面形状を 見ると、元の斜面形状を維持したままとなっており解析 結果は実験結果を良く再現できている.ただし、崩壊 step後も加振を続けると25G場の結果と同様にモデル全 体が滑り破壊を起こしてしまい、実験結果とは差異が生 じる結果となった.

天端で観測された加速度波形と法肩で観測された変位 波形を実験と解析で比較したものを図-8に示す.加速度 波形の比較図では、いずれの図を見てもstep10 (25G場で は2.8~3.2s, 50G場では1.54~1.76s)以降において実験結 果が解析結果よりも大きい加速度を計測しているのが分 かる.実験における加速度センサーの計測範囲は ±5000m/s<sup>2</sup>であるため、それを超える加速度値については 再現性の精度を議論することは難しいが、解析結果にお いても崩壊開始するstepになり六角棒に剥離や回転とい った挙動が発生し始めると加速度値が実験結果と近い値 を示すようになる. このことから実験では崩壊するstep よりも前のstepから六角棒の剥離・回転といった挙動が 発生していると推測される.法肩における水平変位を見 ても実験結果は崩壊 stepよりも前のstepから大きく振動 している現象が見られる. 解析結果では振動による剥離, 回転といった六角棒の挙動は発生しておらず、棒同士が 衝突・回転する際に発生するスパイク的な加速度が少な いことが解析結果と実験結果の差異を生じさせている要 因の一つとして考えられる.

# 5. おわりに

本研究では、金属六角棒を積み上げた斜面模型の遠心 力載荷加振実験の再現解析を実施した. その結果,25G





(実験step14) 25G場

(解析step14)





(実験step14) 50G場 (解析step14)図-7 step14加振終了時の崩壊形状比較



図-8 各観測点における時刻歴波形の比較(モデル右側が正)

場の再現解析ではstepl1の5.0V,50G場の再現解析では stepl0の7.0Vで斜面崩壊した. どちらの重力場において も、再現解析の結果はある程度の加速度レベルの振動に よって斜面崩壊が発生する現象は再現することが出来て いる.しかし、実験結果より1段階早い加振stepで崩壊す る結果となり、解析結果と実験結果に差異が見られた.

破壊形態については,まず法肩部分が剥落するといっ た破壊開始時の崩壊形態については解析結果は実験結果 を良く再現できている.崩壊stepの加振終了時の状態は, 50G場では実験結果を良く再現できているが,25G場で は破壊する範囲が実験結果に比べて圧倒的に広い.その 後さらに加振を続けると、モデル全体が滑り破壊を起こ してしまい、実験結果とは差異がある現象となった.

つぎに、天端における加速度波形と法肩の水平変位については、加振step9までは解析結果は実験結果と概ね整合している.しかし、加振step10以降は解析結果は実験

結果に比べて小さい加速度となった.斜面表層付近やモ デル上部の六角棒の挙動に違いがあり、これが解析結果 と実験結果に差異が出る要因の一つであると考えられる. 実験結果と解析結果の差異の要因を検討するため、解析 と実験におけるモデルの相違点や減衰の影響を確認する とともに、不連続面の非線形特性の適用性などを検討す ることが今後の課題である.

## 参考文献

- 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, pp.393-398,2021.

- 3) 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載荷加振実験(2)-斜面模型 の遠心力載荷加振実験-,第48回岩盤力学国内シン ポジウム講演集,2022. (投稿中)
- 4) 河路薫,曹国強: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(10)-2次元多角形 DEMによる評価-,第15回岩の力学国内シンポジウ ム講演集,pp.435-440,2021.
- 5) Cundall, P.A. : "A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems", in Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics, (Nancy, France, 1971), Vol. 1, Paper No. II-8, 1971.
- Cundall, P.A., and R. D. Hart : "Analysis of Block Test No. 1 Inelastic Rock Mass Behavior: Phase 2 – A Characterization of Joint Behavior (Final Report).", *Itasca Consulting Group Report*, Rockwell Hanford Operations, Subcontract SA-957, 1984.

# DYNAMIC BEHAVIOR ON CENTRIFUGAL LOADING TEST OF SLOPE MODEL STACKED BY STEEL HEXAGONAL RODS FOR SIMULATING DISCONTINUOUS ROCK MASS (PART11) - EVALUATION BY TWO-DIMENSIONAL BLOCK TYPE DISTINCT ELEMENT METHOD -

# Kaoru KAWAJI and Guo Qiang CAO

In order to identify the issues subjected to seismic resistance evaluation of discontinuous rock mass and study a suitable method, we conducted a centrifugal load shaking table experiment of slope model with metal hexagonal rods stacked as a model of discontinuous rock mass.

In this paper, in order to clarify the dynamic behavior of discontinuous rock mass, we perform a reproduction analysis of the experimental model using DEM. By using the parameters determined from the results of the laboratory test, the reproduction analysis is carried out, and the effectiveness and problems of the method are studied by comparing with the results obtained from the shaking experiment.