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(10) -2次元円形 DEM による評価-

吉田 泰基1*

1一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 地質・地下環境研究部門 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646) *E-mail: taiki@criepi.denken.or.jp

原子力発電所周辺の岩盤斜面の耐震設計では、動的解析により得られた応力状態から、すべり安全率評価が行われている.動的解析では、不連続性岩盤の挙動については未だ不明な点が多い.そこで、本研究では、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の遠心力載荷加振実験を行って、2次元円形DEMを用いてその数値解析を実施することにした.今までDEMを用いた検証事例はあるが、粒子サイズ・初期配置の実現象との対応関係が不明瞭であることが多い.今回は粒子サイズ、初期配置が固定され、現実との解析モデルの対応関係が明確であり、他の解析パラメータの妥当性検証が可能となるため、それらの妥当性に着目して考察を行った.

Key Words : centrifuge model test, rock slope, distinct element method, analytical parameter

1. はじめに

現在原子力発電所周辺の岩盤斜面の耐震設計では,動 的解析により得られた応力状態から,すべり安全率評価 が行われている.

2011年の東北地方太平洋沖地震以降,設計用地震動の 増大に伴い,今後は岩盤斜面の安定性のみならず,斜面 崩壊後の崩落岩塊が原子力発電所建屋外壁に与える影響 の確率論的リスク評価が求められる.

斜面崩壊後の崩落岩塊の挙動評価には,個別要素法 (Distinct Element Method,以下DEM)が用いられること が多い.DEMには解析結果に影響を与える因子が多く それぞれの影響を整理する必要がある.特に初期粒子配 置は実際の斜面を基に決定することが現状では難しいた め、まずは初期粒子配置の影響をパラメトリックスタデ ィにより検討してきた^{1) 2)}. 今後は,その他のパラメー タの影響も検討する必要があるが,その際は初期粒子配 置は現実との対応関係が不明瞭ではなくて,一意的に決 定できるものであることが望ましい.

そこで、本研究では、六角棒が規則的に配置された不 連続性岩盤の模型を対象にして、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する。解析モデルにおい て六角棒1本を1要素に対応させることで、粒子の配置パ ターンは一意的に決定できる.そして、その他のパラメ ータの影響に関する考察が可能となる.

これまで、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)として、金属六角棒積層斜面模型を用いた重力 場における加振実験が実施された.さらに、六角棒を用 いた室内試験を実施して、物性を把握して、連続体解析 から不連続体解析まで各種の動的解析法を用いて評価が 行われた.そこで著者は、その六角棒を2次元円形DEM によりモデル化して評価を実施した³.本研究では、六 角棒1本を円形DEM粒子でモデル化して、多角形に基づ く転がりにくさを円形DEM粒子の回転を拘束すること で六角棒の挙動を予測することをねらいとする.

本論文では、不連続面がかみ合った岩盤を想定した金 属製の六角棒の集合で作製される斜面モデルの遠心力載 荷実験を対象に、斜面モデルが崩壊する加振条件、破壊 形態、崩壊領域を予測した.遠心力載荷加振実験では、 遠心加速度25Gと50Gの2ケースが実施された.予測した 結果と実験結果から、今回用いた解析パラメータの妥当 性に着目して考察した.

2. 遠心力載荷実験

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) 一遠心力載荷加振実験-³では, 遠心力載荷実験の詳細が示されている.本論文において 評価対象とする実験条件を表-1 に示す.

数値解析との比較検討結果については、4章で検討する.

3. 数值解析

(1) 円形個別要素法

本研究では、粒子間の法線・接線方向のばねに関して 非線形ばねを用いている.この時のばね定数 k_{pp} , k_p は式 (1), (2)の通りである.

$$k_{np} = \frac{\sqrt{2r^*}E_s}{3(1-v_s^2)}$$
(1)

ただし、 r^* は等価半径、粒子のヤング率 E_r 、粒子の ポアソン比 ν_s である、等価半径とは、2つの球の接触を 1つの物体と平面の接触に置き換えた際の半径である。

$$k_{tp} = \frac{\sqrt{2r^*}G_s}{2(1 - v_s)}$$
(2)

ただし, Gは粒子のせん断剛性である. 粒子間の法線方向の粘性減衰係数cmは式(3)で表される.

$$c_{np} = \alpha_{np} \sqrt{k_{np} m \delta_n^{\frac{1}{4}}} \tag{3}$$

ただし、 a_m は係数、 mは粒子の質量、 δ_n は粒子間の 法線方向の変位量である.

加速度	ステップ	電圧	加速度	ステップ	電圧
	数	(V)		数	(V)
	1	0.1		1	0.1
	2	0.1		2	0.1
	3	0.01		3	0.5
	4	0.05		4	1
	5	0.1		5	2
	6	0.5		6	3
25G	7	1	50G	7	4
	8	2		8	5
	9	3		9	6
	10	4		10	7
	11	5		11	8
	12	6		12	9
	13	7		13	10
	14	8		14	11
	15	0.1		15	0.1

表-1 実験条件

接線方向の粘性減衰係数cpは法線方向と同一とする. 粒子と壁の接触力の計算に関しても、考え方は同一とした.

さらに実験の六角棒には、転がりにくさがある. それ は、数値解析では転がり抵抗式(4)でモデル化した.

$$M_d = -\beta |M| sign(\omega) \tag{4}$$

*M*_aは転がり抵抗モーメント,βは転がり抵抗係数,*M* は粒子に働く作用力によりそれに発生するモーメント, ωは粒子の角速度を表している.

(2) パラメーターの決定方法

用いるパラメータ(表-2)の決定方法を下記に示す. 密度 ρ ,粒子のヤング率 E_s ,粒子のポアソン比 ν_s ,壁の ヤング率 E_w ,壁のポアソン比 ν_x はステンレス材料 (SUS304)の物性から決定した.粒子の半径rは六角形 の内接円として求めた.係数 a_{np} ,粒子間接線方向粘性 減衰係数 c_p ,係数 a_{nw} ,粒子一壁接線方向減衰定数 c_w は六 角棒の転がり実験により過減衰とならないように決定し た.粒子間摩擦係数 μ_p ,粒子一壁間摩擦係数 μ_w は0.118で 試験C-3の繰返し載荷の一面せん断試験により決定した. 転がり抵抗係数 β は六角棒の転がり実験で決定した³.

表-2 DEMで用いられたパラメータ

パラメータ	数値	備考
密度ρ	$8.0(g/cm^3)$	
粒子のヤング率	200(GPa)	ステンレス
E_s		材 料
粒子のポアソン	0.3(-)	(SUS304)
比 ν_s		の物性より
壁のヤング率Ew	200(GPa)	決定した.
壁のポアソン比	0.3(-)	
${\cal V}_{\scriptscriptstyle W}$		
粒子の半径r	3(mm)	六角形の
		内接円
係数amp	1.0	
粒子間の接線方	法線方向と	六角棒の転
向の粘性減衰	同一	がり試験に
係数 <i>c</i> _p		より過減衰
係数anw	1.0	にならない
粒子一壁の接線	法線方向と	により決定
方向の減衰定数	司一	
Ctw		
粒子間の摩擦	0.118	試験C-3
係数μρ		
粒子――壁間の		
摩擦係数 μ "		
転がり抵抗係数	2.0×10^{4}	六角棒の転
β		がり実験よ
		り算定

(3) 加振方法

自重解析,ホワイトノイズ加振を除いたステップ3から斜面に破壊が生じるステップまで解析を実施した.解析モデルの1段目の粒子群に計測された水平・鉛直加速度波形を入力した.

4. 解析結果

(1) 崩壊する加振ステップ

数値解析により得られた崩壊ステップと実験における 崩壊ステップを表-3にまとめた.

表-3より25Gの条件について,実験ではステップ12で 崩壊した.一方解析では,ステップ8で崩壊した.50G の条件について,実験ではステップ11で崩壊した.一方 解析では,ステップ8で崩壊した.

(2) 崩壊領域·破壊形態

図-1に25Gの実験に関する解析の崩壊の概要を示す. 法肩から,法尻近傍まで,天端後方に向かっておよそ3 列分が崩壊した.破壊形態としては,図-1(b)にある様 に,法尻近傍から円形DEM粒子がはらみ出して崩壊が 開始した.図-2に50Gの実験に関する解析の崩壊の概要 を示す.法肩から,法尻近傍まで,天端後方に向かって およそ2列分が崩壊した.破壊形態としては,図-2(b)に ある様に,法尻近傍から円形DEM粒子がはらみ出して 崩壊が開始した.

図-1, 図-2ともに解析結果の崩壊領域は,実験は法肩 近傍のみであったので,実験結果よりも大きい崩壊領域 となった. さらには,実験は,法肩から崩壊が開始して いるので,破壊形態も実験と解析では異なった.

(3) 法肩変位

図−3に25Gの実験,解析の法肩の変位を示す.25Gの 実験では、0.25秒時点で破壊が始まり、崩落に至った. 図−4に50Gの実験,解析の法肩の変位を示す.50Gの実 験では、0.05秒時点で破壊が始まり、崩落に至った.

遠心加速度25G, 50Gともに, 数値解析の変位量が実 験よりも大きくなった.

(4) 天端加速度

図-5に25Gの実験の天端1の加速度を示す.加速度振幅は実験結果よりも小さくなっている. **図-6**に50Gの実験の天端1の加速度を示す.これも加速度振幅は実験結果よりも小さくなっている.

両者ともに一部,スパイクが入っているけれども,粒 子間の衝突,回転に基づくものであると考えられる.

5. 考察

(1) 崩壊する加振ステップ

表-3より,解析結果は,実験結果よりも早く壊れた. これに関して一つは転がり抵抗係数が定数になっており, 拘束圧依存性が考慮されていない点が原因である可能性 がある.もう一つは,ばね定数の設定に課題があった可 能性がある.図-7に繰返し垂直載荷試験(垂直応力 0.4MPa)の数値解析結果を示す.解析結果において,実 験の垂直応力と垂直変位の非線形関係は表れているもの の,垂直応力は実験より大きくなっている.よって今回 の金属六角棒を用いた実験について,再現するためには 式(1),(2)に基づくばね定数の値を室内試験結果に合わ せて,キャリブレーションする必要がある可能性がある.

(2) 崩壊領域·破壊形態

表-4に、実験と解析の破壊形態の特徴を示す.崩壊領 域に関して、25Gの解析の場合、法肩から法尻にかけて 3列分が崩壊する結果となった.50Gの解析の場合は、 法肩から法尻にかけて2列分が崩壊する結果となった. 一方、実験では、法肩から数個の六角棒が崩落する結果 となった.

破壊形態に関して,25Gの解析の場合,法尻近傍から 六角棒がはらみ出して,斜面が崩壊した.50Gの解析の 場合,法尻近傍から六角棒がはらみ出して,斜面が崩壊 した.一方,実験では,法肩から数個の六角棒が崩落す る結果となった.

以上より,解析の崩壊領域,破壊形態は実験と異なった.これもまた,今回転がり抵抗係数が定数になっているが,拘束圧依存性が入っていないことが原因である可能性がある.法尻に近い斜面下部の粒子ほど,拘束圧により転がりにくい性質がモデル化されれば,実験の様に斜面上部から不安定化が始まる可能性がある.

表-3 実験と解析の崩壊ステップ

	実 験	解 析	実 験	解 析
	(25G)	(25G)	(50G)	(50G)
崩壊ス	ステップ	ステップ	ステップ	ステップ
テップ	12	8	11	8

表-4 実験と解析の崩壊形態

実験条件	実験	解析		
25G	破壊領域は法肩	破壊領域は法尻部に		
50G	部に集中	集中. 次第に, 法肩		
		にかけて広がった.		







6. まとめ

本論文では、六角棒積層構造の斜面模型に対する遠心 力載荷加振実験の2次元円形 DEM 解析を実施した.崩 壊する加振条件に関しては、実験結果より早い加振ステ ップで崩壊した.破壊形態に関しては、実験結果では法 肩から崩落するものの、解析では、法尻近傍から崩壊す る結果となった.これは、前報³で指摘した粘性減衰定 数はさることながら、転がり抵抗係数、ばね定数の設定 に課題があったことによる可能性がある.ただし、円形 の DEM を用いることのメリットとして円の半径と粒子 間距離の2つの値で接触判定計算できるため、計算コス トが小さい点があげられる.そして確率論的評価など多数の解析を求められる場合には,その様な特徴を有する本手法は非常に有効である.よって今後の斜面の安定性評価の際には,転がり抵抗係数,ばね定数等の値について,拘束圧を考慮した室内試験結果との再現性も確認しながら決定して,2次元円形 DEM による検討を進める必要がある.

参考文献

- 1)Yoshida, T., Nakajima, M., Tochigi, H.: Studying parameters for changing the initial particle arrangements of distinct element analysis in earthquake response based on slope analysis, *Proceedings of the* 14th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM14), 2018.
- 2) Yoshida, T., and Tochigi, H. : INFLUENCE ON THE UNCERTAINTY OF EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS RESULTS BY INITIAL PARTICLE ARRANGEMENTS AND COHESION PARAMETERS IN EXTENDED DISTINCT ELEMENT METHOD, Proceedings of the 6th International Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2019), 2019.
- 3) 吉田泰基: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(8)-2 次元円形 DEM による評 価-,第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集,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).

DYNAMIC BEHAVIOR OF SIOPE MODEL SIMULATING DISCONTINOUS ROCK MASS IN CENTRIFUGE MODEL TEST (PART10) - EVALUATION BY TWO-DIMENSIONAL ROUND SHAPE DISTINCT ELEMENT METHOD -

Taiki YOSHIDA

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 centrifuge model 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 paper, we report the contents of numerical simulation for the model tests by round shape DEM. From a result of numerical simulation, consideration for the validation of DEM parameters such as spring stiffness coefficient was made.