重要構造物周辺斜面の大規模地震を想定した 岩盤斜面崩壊の確率論的評価

吉田 泰基1・栃木 均2

¹非会員 電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646) E-mail: taiki@criepi.denken.or.jp

²正会員 電力中央研究所 地球工学研究所地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646) E-mail: tochigi@criepi.denken.or.jp

個別要素法は主に重要構造物周辺斜面の地震時崩落挙動評価への適用性の検討がこれまで進められてきた. 拡張個別要素法は,個別要素法を拡張して,連続体が不連続体になるまでを追跡できる可能性のある 解析手法である.確率論的リスク評価において,拡張個別要素法を適用する際,解析結果を規定するパラ メータを漏れなく抽出して、それらのばらつきを考慮する必要がある.

よって,拡張個別要素法のパラメータ群を 50 ケース準備して,斜面模型の振動台実験への適用性の検 討とともに,解析結果のばらつきを調査した.その結果,崩壊のタイミングおよび崩壊領域の大きさは対 数正規分布状にばらついた.今後は,ばらつきのモデル化の高度化を図るとともに,拡張個別要素法を衝 撃力の計算に適用して,衝撃力の確率分布の検討を行う必要がある.

Key Words: uncertainty, slope failure, extended distinct element method, probabilistic risk assessment

1. はじめに

東日本大震災以降,設計用地震動が増大するとともに, 重要構造物の基礎地盤や周辺斜面の地震時安定性評価の 高度化が求められている.さらに,実用発電用原子炉に 係る新規制基準(平成25年7月施行)およびその適合 性審査では,確率論的リスク評価¹²⁰(Probabilistic Risk Assessment,以下 PRA と記載)により設計を超えた地震動に よる評価が求められている.

中島ら³によって、岩盤斜面の地震リスク評価フロー が、提案されている。その地震リスク評価フローには、 2つのステップが含まれる。ただし、確率論的地震ハザ ード評価は別途実施されており、年超過確率に対応した ハザード適合地震動群および地震ハザード曲線は所与の ものとする。第1ステップとして、地震動によって、斜 面が損傷される確率を評価する。第2ステップとして、 重要構造物が崩落した岩塊により、影響を受ける場合、 たとえ損傷頻度が低かったとしても、その影響を定量的 に評価する。

第1ステップでは、斜面の地震時安定性評価が必要に なる.斜面の地震時安定性評価には、これまで、等価線 形解析を用いたすべり安全率評価が用いられてきた.す べり安全率とは、地震によって誘起される駆動力に対す る岩盤の強度によって発現される抵抗力の比として定義 される.しかしながら、すべり安全率が1を下回ったと しても、必ずしも岩盤が崩壊するわけではないというこ とが指摘されている⁴.さらには等価線形解析による評 価は、保守的になることが指摘されている.そこで、地 震後の残留変位や大変形が起こったときの崩壊領域を評 価することを目的とした時刻歴非線形解析に関する研究 も進められている⁵.

第2ステップでは、斜面が崩壊した後、崩落岩塊の移動量評価や構造物・施設への影響評価が必要になる.これまで崩落岩塊の移動量評価には、個別要素法(Distinct Element Method,以下 DEM と記載)が頻繁に用いられてきた.DEM は不連続体解析手法の1つである有限要素法(Finite Element Method,以下 FEM と記載)とは異なり、大変形や破壊現象の評価に適した手法である.栃木らは震度法により規定されたすべり線を基に崩壊領域を DEM 粒子群でモデル化して、自重により崩落させて、斜面崩壊を想定した DEM 粒子群の到達距離に関する確率論的評価を行っている^の.

しかしながら、2つのステップに分けて、複数の手法 を用いたアプローチでは、過度な保守性が含まれ



図-1 岩盤斜面の地震リスク評価フロー3

ることになる. 例えば, DEM を用いた斜面の崩落解析 において, 粒子群の初期速度等の初期状態に関して, FEM による斜面の地震時安定性に関する解析結果から は,分からない内容が存在する. そこで, DEM を用い た崩落解析では,評価結果を保守的にするために,摩擦 をゼロにすることや,強度を残留強度にすること等の処 置がとられる. その場合,過度に保守的になり,合理的 な評価が得られない場合が出てくる. 故に,斜面の連続 体から不連続体への遷移過程も含めたシームレスな評価 手法を構築できれば,斜面の地震応答解析のみならず, 地震リスク評価をより合理的にすることができる.

そのようなシームレスな解析手法の1つとして,拡張 個別要素法(Extended Distinct Element Method,以下 EDEM と記載)が挙げられる[¬]. EDEM においては,間隙ばね が土粒子間の間隙物質の影響をモデル化するものとして, 粒子間に作用している.引張強度やせん断強度を設定し て,もしばねなどにより計算される粒子間力がそれらの 強度を越えた時に,ばねを切断すれば,斜面の進行性破 壊現象がモデル化できる可能性がある.

個別要素法には、解析結果に影響を与え得る複数の不 確実なパラメータが存在している.それらは、大きく分 けて、強度変形特性と幾何学的特性の2つに分類できる と考えられる.例えば前者は、ばね定数、減衰係数およ び摩擦係数などが挙げられる.後者は、粒度分布や平均 配位数等の粒状体の構造的特徴量である.それは、解析 モデルの初期粒子配置によって主に規定される.そして、 両者の一番の違いは、数値として簡易に定義できるか否 かの違いである.例えば、ばね定数等とは異なり、初期 粒子配置は数値として一意的に表現することは難しい. ただし一方で、初期粒子配置は解析結果に影響を与える ことが指摘されている[®].そこで吉田ら⁹¹⁰は、EDEM における初期粒子配置の違いが解析結果に与える影響に ついて、静的傾斜実験、振動台実験への適用性の検討と ともに、調べている.その結果、振動台実験を対象とし た数値解析結果の崩壊タイミングについては、正規分布、 崩壊領域を規定するすべり線の上端の位置は対数正規分 布にばらついたことを報告している¹⁰.

今後 PRA の中の岩盤斜面の地震リスク評価フローで EDEM を適用していく際には、解析結果を規定する要素 を漏れなく抽出して、ばらつきを与える必要がある.そ して、特に、個別要素法を用いてあまり適用されること のない斜面の地震時安定性評価(特に崩壊タイミング, 崩壊領域)について、解析結果のばらつきを明らかにす る必要がある.崩落挙動評価については、研究事例が蓄 積されているため、安定性評価への適用性が分かれば、 シームレスに解析できる可能性があるからである.

そこで、本研究では、ばね定数等の強度変形特性およ び初期粒子配置をばらつかせた 50 種類の斜面モデルを 用意して、斜面模型の振動台実験への適用性について検 討するとともに、それらによる解析結果のばらつきにつ いて調査した.

2. 斜面模型の振動台実験

(1) 斜面模型の材料

斜面模型を作製する際,地盤材料はステンレス粒子 (材質は SUS304 であり,形状は直径および高さ 2mm 程度の円柱形),蹉跌,水を 40:30:1の重量比でミキ サーにて混ぜ合わせたものを使用した.それらの物性値 は,平面ひずみ圧縮試験,繰返し三軸試験および一軸引 張試験により求めた.物性値の一覧は表-1のようにな る.ただし,σは拘束圧 (kPa) とする.

斜面模型の寸法に関して,全長 900mm,高さ 260mm, 法面勾配 1:0.5 とした.詳細は,図-2 に示す.

図-2 の寸法の斜面模型を、16 ステップに分けて、加 振ステップ毎に入力波の最大加速度を大きくしながら加 振した.入力加振波は、一定加速度振幅の正弦波であり、 主要動部が 20 波で構成されており、20Hz のものである. 図-3 に小型土槽の底面に設置した加速度計により計測 された加速度波形を示す.

3. 拡張個別要素法を用いた数値解析

(1) 拡張個別要素法の概要

PFC3D (Itasca 社)を用いて、面外方向への移動を拘 束して、斜面模型の振動台実験を対象とした2次元数値 解析を実施した. 粒子間力を計算するのに、接触力を表 すばね、エネルギの散逸を表すダッシュポット、引張力 を無視するディバイダー、さらには動摩擦力を表すスラ イダーがある. 粒状体の間隙物質の作用はパラレルボン ドモデルでモデル化されている. 個々の粒子の支配方程式は、式(la)、(lb)のように表される. (la)

$$\frac{dP}{dt} = \sum F$$

$$\frac{dL}{dt} = \sum N$$
(1b)

ただし,**P**は運動量,**F** は作用力,**L**は角運動量,**N** はトルクを表す.

表-1 地盤材料の物性値

物性	値
湿潤密度[kg/m³]	4.20×10^{3}
ポアソン比[-]	9.00×10^{-2}
静弹性係数[MPa]	1.36 • σ ^{1.08}
初期せん断弾性係数[MPa]	1.36 • σ ^{1.08}
引張強度[kPa]	0.5
ピークせん断強度[kPa]	$7.0 + \sigma \cdot \tan 40.9^{\circ}$
残留せん断強度[kPa]	1.36 • σ ^{1.08}



図-2 斜面模型の寸法



図-3 土槽底面で計測された加速度波形

(2) 解析条件

拘束圧による物性区分に関して、鉛直方向にそって、 3 層に分けた.拘束圧は、土圧による上載荷重として、 図-4 の赤、青、緑の粒状体で表される領域(以後、順 に 1 層、2 層、3 層と記載)を、それぞれ、1.78kPa、 5.35kPa、8.92kPa とした.

境界条件については、前面と背面は固定境界であり、 底面は図-4 で紫の色が付いている粒子を固定している. 粒状体を構成する粒子群の粒径分布は、一様に 15mm

とした.

ばらつきを与える際には、ラテン超方格法(Latin Hypercube Sampling,以後,LHSと記載)を用いた.



図-4 数値解析に用いた斜面モデル

分布形はすべての強度変形特性で、対数正規分布を仮

層番号	1	2	3
密度(kg/m³)	4.20×10 ³		
法線方向ばね定数(N/m)	4.25×107	5.51×10 ⁷	6.51×10 ⁷
接線方向ばね定数(N/m)	1.92×10 ⁷	2.48×10 ⁶	2.93×10 ⁷
間隙法線方向ばね定数(N/m)	1.28×10 ⁵	1.65×10 ⁷	1.95×10 ⁷
間隙接線方向ばね定数(Nm)	5.76×10 ⁴	7.44×10 ⁴	8.79×10 ⁴
法線方向減衰定数(%)	3		
接線方向減衰定数(%)	3		
粒子間摩擦角(°)	34		

表-2 数値解析で用いた物性(密度)および中央値¹⁰

定して、変動係数は一律 0.1 とした.中央値は、これま で基本的に同じ斜面モデルで初期粒子配置のばらつきが 解析結果のばらつきに与える影響を調査した際、同定し た強度変形特性を参考にして、**表-2** に示したものを用 いた¹⁰⁾.**表-3**に、また、LHS で発生させた乱数値を示す. 表中の赤と青の濃淡で表現されているのは、乱数値の大 きさの程度である.図-5 に LHS でサンプリングした入 力物性の度数分布図を示す.

表-3 LHS で発生させた乱数値の全セット一覧



図-5 LHS でサンプリングした入力物性の度数分布図

入力水平加速度波形は、2章で述べた斜面模型の振動 台実験において、小型土槽の底面に設置した加速度計に より計測された水平加速度波形を用いた.最初の2ステ ップは、ホワイトノイズ加振であることから、3ステッ プ以降のデータを入力データとして利用している.

4. 実験結果と解析結果

実験では、斜面模型は 11 ステップで破壊した. その後、崩壊岩塊を取り除いた後すべり面を調べたところ、 すべり線の上端部(図-6)の斜面法肩からの距離は、 およそ 0.08m であった.

数値解析結果に関する度数分布図を図-7,図-8に示す.

図-7 は崩壊タイミング,図-8 はすべり線の上端部の 斜面法肩からの距離に関する度数分布図である.これら は、DEM 粒子の崩落判定について移動量の閾値を設け ることで、崩壊領域を定義している.具体的な手順を以 下に示す.

1) 斜面モデルを構成する粒子のうち、初期配置から、 しきい値(粒径と同じ 15mm と設定)以上移動した粒 子を崩落したと見なして除外する.

2) 斜面モデルの法尻より左の除外されていない粒子の うち,最も右上に位置するものを検出して,すべり線の 下端とする.

3) 斜面モデルの法肩より右の除外されていない粒子の うち,最も左上に位置するものを検出して、すべり線の 上端とする. ただし,モデルが大きく崩落して,すべり 線がモデル上面を通らない場合は,モデル右端付近で y 座標の最も大きい粒子を抽出して,すべり線の上端とす る.

4) すべり線の下端と上端を結ぶ垂直二等分線周辺の除 外されていない粒子の中で、モデル表面に位置するもの を検出して、すべり線の中点とする.

5) すべり線の上端, 中点, 下端の3点を通る円弧をす べり線とする.

以上より定義されるすべり線の分布図を図-9 に示す. また、3 点(上端,中点,下端)の平均値を算出して, 円弧で結ぶことで,平均的なすべり線を定義した.この すべり線は,実験結果よりも,深くなっていた.

さらに,図-7,図-8の度数分布図を理論確率分布でモ デル化出来るかどうか検討するために,統計的仮説検定 (χ2乗検定)を実施した.その結果,図-7,図-8はとも に,対数正規分布でモデル化できることが分かった.



図-6 すべり線の分析に用いた概念



図-7 数値解析における崩壊タイミングの度数分布図



図-8 すべり線の上端部の位置の度数分布図



図-9 数値解析におけるすべり線の分布図

5. 考察

4章の結果から、斜面の地震時安定性を評価する2つ の指標である崩壊タイミングと崩壊領域の解析結果のば らつきについて、実験結果より安全側に最頻値を持つ対 数正規分布分布となった. 図-10, 図-11 に以前基本的に 同じ斜面モデルで初期粒子配置のばらつきによる解析結 果(崩壊タイミング、崩壊領域)のばらつきの影響を検 討した結果を示す 10 . この時, 図-10, 図-11 はそれぞ れ正規分布,対数正規分布で表現することができた¹⁰. 今回変わった点は、崩壊タイミングが対数正規分布にな っていることである.これは、前回との解析条件の違い を考えると、強度変形特性を対数正規分布でモデル化し たことによるものであると考えられる. また, 図-12の ように、初期粒子配置のばらつきのみを考えると、平均 的なすべり線は実験におけるすべり線と概ね同じ位置に 発生していた.そして、今回は、図-9で示したように、 実験結果に対して、より深く(安全側に)なっているこ とが分かる.これも同様に、強度変形特性について、対 数正規分布によりばらつきをモデル化することで、安全 側の解析結果となったからであると考えられる.ただし, 初期粒子配置のばらつきの影響を調べたときの斜面モデ ルは、粒径 3mm と 15mm の混合粒径であり、今回の一 様な15mmの粒子群でなかったことには、注意する必要 がある.よって今後は、強度変形特性のばらつきが解析 結果のばらつきに与える影響と初期粒子配置のばらつき が解析結果に与える影響を分離して考えて、それぞれの 不確実性の合理的な設定方法を検討するべく、さらなる EDEM によるパラメトリックスタディを実施する必要が ある.

以上より, EDEMは、岩盤斜面の地震リスク評価において、合理的な手法として位置づけられる可能性がある と考えられる. なぜならば、斜面崩壊前の安定性評価から実施されるため、崩壊する瞬間の崩壊領域に関するより詳細な情報を取得することができるからである. 例えば、崩壊する瞬間の斜面モデルを構成する粒子群の速度である. これは、1章で述べた2ステップに分けて評価する手法における、DEM 粒子群の初期粒子速度の情報 が得られることになる. よって、これまでの方法論をより高度化することにもつながると考えられる.





図-13 斜面の地震時損傷から構造物・施設損傷までの イベントツリー³



図-12 数値解析におけるすべり線の分布図10

さらに、以下では、斜面の地震時損傷から構造物・施 設損傷までのイベントツリー(図-13)から今後の課題 について以下に述べる.

もし、低頻度ではあっても、崩落岩塊が周辺の重要構造物・施設に大きな影響を与える場合は、式(2)で一連の事故シーケンス(図-13)における確率を計算する必要がある.

$$P_{f_{-}ijkl} = P_{0i} \times P_{1j} \times P_{2k} \times P_{3l} \tag{2}$$

ただし、 P_{0i} は地震動強さ(例えば地動最大加速度)iの超過確率、 P_{1j} は斜面崩壊のシナリオjの発生(生起)確率、 P_{2k} は崩落岩塊がある距離を超えて構造物・施設に到達する確率、 P_{3l} は構造物・施設の損傷確率を表す.

4章における結果から、 P_{1j} , P_{2k} は EDEM の適用に より、より合理的に評価できる可能性が高いことが分か った.

よって、今後の課題は、P31の構造物・施設の損傷確

率の算出に係る評価である.最初に、衝撃力の評価を今回の EDEM による斜面地震時安定性評価を活かしてできるのか検討する必要がある.確率分布を構築することができれば、それと実験結果との比較のため、衝撃力実験のデータを取得する必要があるだろう.

6. まとめ

本論文は PRA の中で,岩盤斜面の地震リスク評価フ ローへ EDEM を適用することを目的として, EDEM に 関連する要素にばらつきをあたえて 50 ケースの斜面モ デルを準備して,斜面模型の振動台実験への適用性の検 討とともに,斜面の地震時安定性に関する解析結果(崩 壊タイミング,崩壊領域)について,ばらつきの調査を おこなった.

その結果,崩壊タイミングおよび崩壊領域に関する度 数分布図は対数正規分布でモデル化できることが分かっ た.さらに,その最頻値は実験結果よりも安全側になる ことが分かった.これは,以前の初期粒子配置のばらつ きによる影響を調査した場合¹⁰と比較すると,強度変形 特性に関するパラメータの理論確率分布を対数正規分布 に仮定したため,崩壊タイミングの解析結果も対数正規 分布になったことが考えられる.

今後の課題は、主に2つある.

1 つ目は、図-1 における崩落岩塊による構造物・施設の地震時年損傷確率の計算に関する検討である。そのために、EDEM を用いた衝撃力の確率分布を算出するとともに、衝撃力測定に関する実験を実施して、実験結果のばらつきとの対応関係を考察するべきであると考えられ

る.

2 つ目は、ばらつきの設定方法の高度化である.今回 は、理論確率分布および変動係数は一律で対数正規分布 および 0.1 と仮定して、計算を実施した。今後は、強度 変形特性のばらつきと初期粒子配置のばらつきが解析結 果のばらつきに与える影響を分離して、分析的に考察を 実施して、不確実性の合理的な設定方法を構築していく ことが必要になる.

謝辞:本論文の作成にあたり,島村真介氏,西田瞬氏 (株式会社電力計算センター)にご協力を頂いた.ここ に記し,深く感謝いたします.

参考文献

- 1) EPRI : Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide, TR3002000709, 2013.
- 日本原子力学会:日本原子力学会標準 原子力発電 所に対する確率論的リスク評価に関する実施基準: 2015.
- 3) 中島正人,栃木均,小澤和弘,野村幸男:岩盤斜面の地震リスク評価フローの構築,土木学会第73回 年次学術講演会,2018.
- 4) 河井正,石丸真:地震時のすべり安全率と斜面の滑 落の関係に着目した岩盤斜面の耐震安定性評価フロ

ーの提案, 電力中央研究所 研究報告, No.N09030, 2010.

- 5) 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(地圏工学), Vol73, No.1, pp.23-38, 2017.
- 栃木均,野村幸男,小澤和弘:原子力発電所周辺斜 面の地震時崩壊を想定した到達距離の DEM 解析, 土木学会第73回年次学術講演会,2018.
- 伯野元彦:破壊のシミュレーション 拡張個別要素 法で破壊を追う,森北出版, 1997.
- Catherine OSullivan: Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective, CRC Press, 2011. (鈴木輝一 (訳):粒子個別要素法,森北出版株式会社,2014.)
- 吉田泰基. 拡張個別要素法による静的傾斜実験の数値シ ミュレーション, 第 52 回地盤工学研究発表会, E-14, 0861, 2017.
- 10) 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, (submitted to Proceedings of 14th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management(PSAM14)), 2018.

(?)

PROBABILISTIC ASSESMENT OF ROCK SLOPE NEAR CRITICAL FACILITIES FAILURE GIVING THAT LARGE SCALE EARTHQUAKE OCCURRED

Taiki YOSHIDA, Hitoshi TOCHIGI

The Distinct Element Method (DEM) has been applied to analyze failures of slopes surrounding a nuclear power plant. The Extended DEM (EDEM) can enable us to analyze earthquake response of slope including the transition from continuums to dis-continuum of slope seamlessly. It is needed to pick up parameters which can affect analysis results and model uncertainty of such parameters in Probabilistic Risk Assessment (PRA). So the stusy was conducted to investigate the applicability of EDEM to a shaking table model test and study the statistical patterns of results from 50 kinds of slope models. The probability distribution of failure timing and regions showed log-normal distribution in the numerical analysis. The next step would be to not only enhance modelling uncertainty but also study the probability distribution of impact force needed to create a highly developed PRA using the EDEM.