

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

電力中央研究所 正会員 ○栃木 均
 電力計算センター 非会員 野村 幸男
 関西電力 土木建築室 正会員 小澤 和弘

1. はじめに

斜面崩壊による岩塊の到達距離の評価においては不確定性を伴うことから、初期配置や入力物性の変動を考慮して多くの解析を実施し確率論的に評価することが望ましい。それには効率的なモデルが条件の一つとなり、そのモデル化や解析方法等についての具体化が求められている。本研究では、奥行き方向に同じ断面形状が続く斜面を対象として、DEMの3次元モデルと2次元モデルによる斜面崩落解析を実施し、双方の到達距離を比較検討した。検討結果に基づき、斜面崩壊を想定した到達距離の確率論的評価を行った例を報告する。

2. 斜面崩落によるリスク評価モデルの検討

(1) 検討方法 岩盤斜面(図-1)の崩壊を想定して、水の影響が小さい岩塊の崩落について検討した。すべり線は仮に震度法により定めた。斜面崩壊の可能性を考慮すると、先ずこのような浅いすべり線が問題となる。2次元および3次元モデルともすべり線内の領域をDEMによる球形の粒子(粒径1m)でモデル化し、乱数によるランダムな初期配置を設定した。3次元モデルでは球面形のすべり面を想定した。図-2に3次元の斜面崩落解析モデルを示す。2次元モデルは同図の中央断面を対象とし粒子1個分の厚さを考慮した。双方のモデルとも既往の検討結果¹⁾を参考に、非破壊の斜面と法先地盤に崩落岩塊と同じ球形の粒子を配置して崩落時のランダムな跳ね返りを考慮した。表-1には、想定した斜面物性と反発および摩擦係数試験によるDEM物性を示す。ばね定数は岩塊の弾性定数を用いて弾性球の理論により定めた。ダッシュポット定数は反発係数により定めた。スライダ一定数は、法先地盤では岩塊の動摩擦係数とし、岩塊同士では斜面の残留強度とした。斜面崩落解析は、すべり線のせん断強度をピーク強度として自重で安定させ、続いて、せん断強度を残留強度として重力により崩落させた。地震動の影響は小さいと考えられるので入力しないものとした。

(2) 検討結果 3次元モデルと2次元モデルによる崩落岩塊の到達状況を図-3、図-4に示す。到達距離として、堆積した岩塊が途切れなく連続して堆積している岩塊群の先端の位置に着目すると、2次元モデルでは、法先から62mであり3次元モデルの55mよりも大きくなっている。これは、3次元モデルではz方向に拡がりながら崩落することや、先に法先付近に到達した岩塊がx方向とz方向の勾配を形成し、後続する岩塊がその勾配の影響を受けて堆積すること

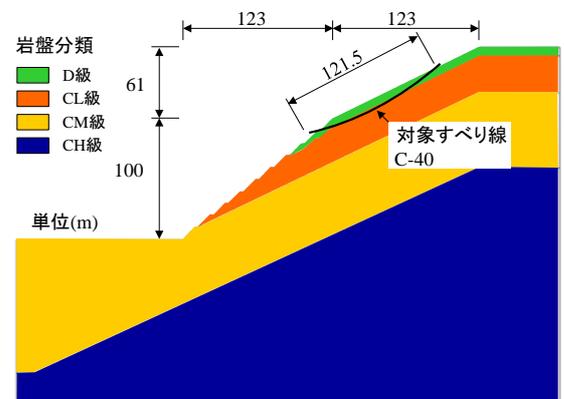


図-1 対象とした硬岩斜面モデル

表-1 DEMの物性

物性	接触分類	岩塊同士		法先地盤上	
		D級	CL級	D級	CL級
ばね定数 (MN/m)	法線	29	730	61	1350
	接線	20	560	43	1070
ダッシュポット定数 (MN·s/m)	法線	0.13	0.66	0.24	1.1
	接線	0	0	0	0
スライダー定数 (-)		0.21	0.30	0.59	0.67
反発係数		0.14	0.19	0.17	0.26
動摩擦係数		-	-	0.59	0.67
密度 (kg/m ³)		1855(D級), 2600(CL級)			
せん断弾性係数 (GPa)		0.051(D級), 3.51(CL級)			
せん断強度 (残留)		tan φ _r =0.21(D級), 同0.30(CL級)			

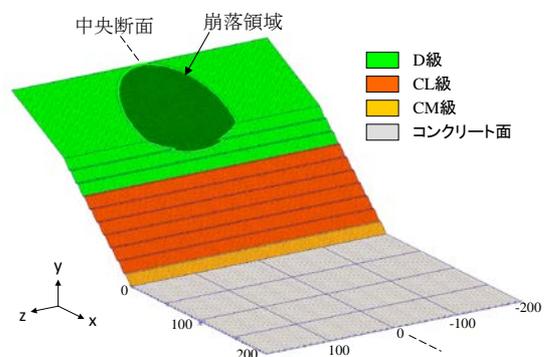


図-2 DEMによる3次元斜面崩落解析モデル

キーワード 斜面崩壊, 到達距離, 個別要素法, リスク評価, 数値解析

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 地震工学領域 TEL 04-7182-1181

などによる。図-5では、幅 Δx に分割した崩落岩塊の質量を崩落量に対する比として整理し、その累積分布を示した。3次元の結果はモデル全体と中央断面について示している。法先地盤上 ($x>0$ の範囲) における2次元モデルの結果は、3次元モデルを幾分上回り前面に出る傾向にあり、2次元モデルでも3次元モデルの到達距離を安全側に表現できている。

3. 斜面崩壊を想定した到達距離の確率的評価

(1)解析方法 上記の検討に基づく2次元モデルにより物性の変動を考慮した斜面崩落解析を行った。物性の変動は、岩塊の密度、ばね定数を定める弾性係数、スライダ一定数および反発係数について考慮した。それらの変動係数を表-2に示す。物性のサンプリングは、ラテン方格法(LHS法)により行い、試行回数は100回とした。解析手順は、前項に記載した通りであり、毎回乱数による初期配置の設定と自重安定解析を行い、重力により崩落させた。

(2)解析結果 斜面崩落解析の結果として、崩落岩塊の先端の位置と最大到達距離を出力した。それらの頻度分布を図-6に示す。物性の変動により、岩塊群の先端はおよそ40~100mの範囲(斜面高さの0.2~0.6倍)に到達し、最大到達距離は60~180mの範囲(同0.3~1.1倍)となった。到達距離の頻度分布は、その累積をとり岩塊の到達確率として示した。同図には、法先から距離 x の位置に岩塊群および岩塊単体が到達する確率が示されている。解析結果には、正規分布と対数正規分布を適用し、 χ^2 乗検定を行った。岩塊群の先端位置は正規分布に適合し、最大到達距離は対数正規分布に適合している。

4. まとめ

原子力発電所における周辺斜面の崩壊を想定して、DEMによる斜面崩落解析手法を具体化し、斜面崩壊により岩塊が到達する可能性を確率として評価した。

なお、本研究は電力9社、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による平成28~29年度原子力リスク研究センター共通研究として実施した。

表-2 DEM物性の変動係数

物性	岩塊同士			法先地盤上		
	D級	CL級	分布形	D級	CL級	分布形
スライダ一定数	1.06	1.01	対数正規	0.18	0.17	正規分布
反発係数	0.26	0.38	正規分布	0.38	0.30	正規分布
動摩擦係数	-	-	-	0.18	0.17	正規分布
密度	0.0234(D級, CL級)			対数正規		
せん断弾性係数	0.182(D級), 0.159(CL級)			対数正規		

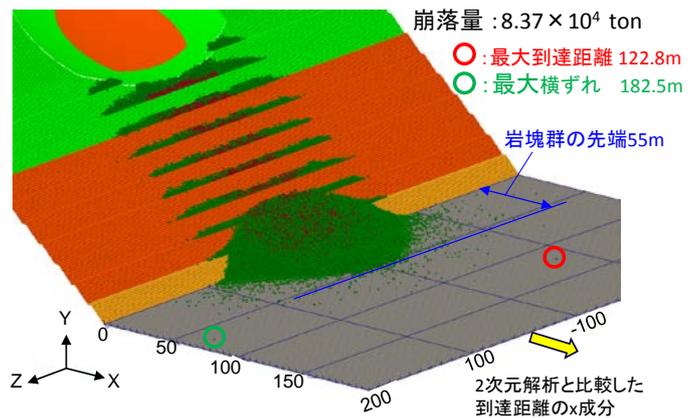


図-3 崩落岩塊の到達状況 - 3次元モデル

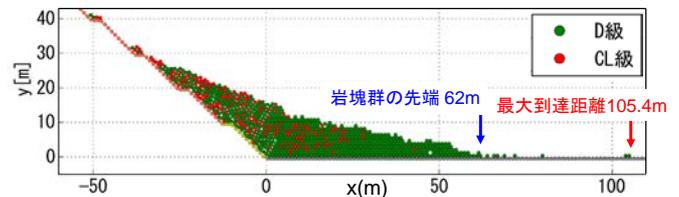


図-4 崩落岩塊の到達状況 - 2次元モデル

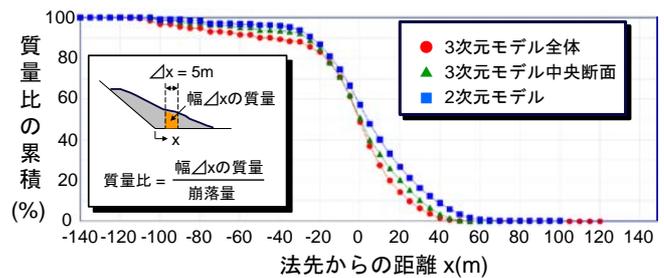


図-5 崩落岩塊の質量比の累積分布の比較

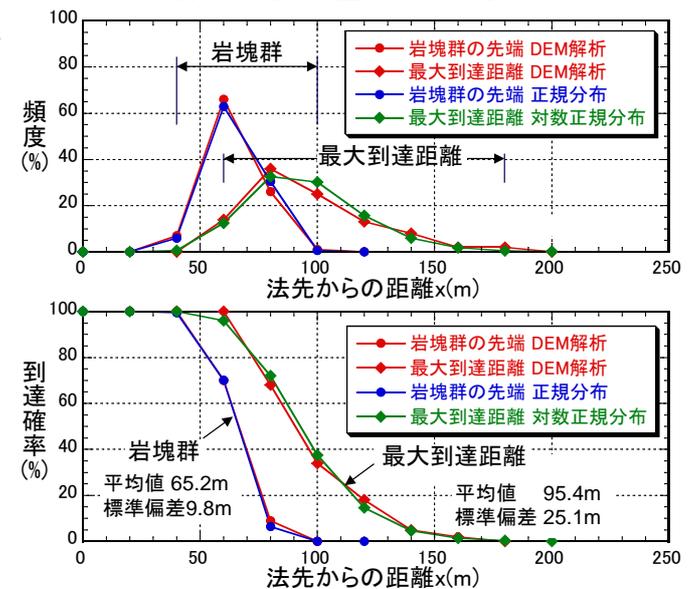


図-6 到達距離の頻度分布と到達確率

参考文献 1)中瀬仁, 曹国強, 田部井和人, 栃木均, 松島亘志: 個別要素法による原子力発電所周辺の地震起因性斜面崩落挙動のモデル化と適用性, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp. I_476-I_492, 2015.