

個別要素法簡易モデルによる地震起因性斜面崩落土の堆積範囲評価法の提案

中瀬 仁¹・岩本 哲也²・曹 国強³・田部井 和人⁴・阪口 秀⁵・松島 亘志⁶

¹正会員 東電設計(株) 新領域研究開発推進室 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12KDXグランスクエア 9F)

E-mail: nakase@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計(株) 土木本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12KDXグランスクエア9F)

E-mail: t-iwamoto@tepsco.co.jp

³非会員 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 原子力・エンジニアリング部 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5 霞が関ビル)

E-mail: cao.guo.qiang@ctc-g.co.jp

⁴正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail: tabei@kajima.com

⁵正会員 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173 番25)

E-mail: sakaguchih@jamstec.go.jp

⁶正会員 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: tmatsu@kz.tsukuba.ac.jp

原子力重要施設に対しては想定を超える地震動に対しても、リスクに対する準備をしておくことが求められている。地震時、斜面崩壊土砂によって閉塞されると想定したアクセスルートの復帰計画のため、排出すべき崩壊土砂量を想定しなければならない。筆者らが提案した個別要素法簡易モデル⁶⁾では、到達距離を安全側に評価することを示したが、崩壊土砂量の想定と言う観点からすれば、必ずしも安全側になるとは限らない。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した福島県中通の斜面崩壊の被害を対象に、提案した簡易モデルによる粒子の摩擦に関するパラメトリックスタディを実施し、崩壊の程度をコントロールする効果について確かめ、崩壊土砂の堆積範囲や排出すべきおおよその土砂量を少なくとも保守的に評価する方法について提案する。

Key Words : earthquake-induced rock fall, hazard of collision, numerical simulation, colluvium

1. はじめに

原子力重要施設に対しては想定を超える地震動に対しても、リスクに対する準備をしておくことが求められている^{1),2),3),4),5)}。地震時、斜面崩壊土砂によって閉塞されると想定したアクセスルートの復帰計画のため、排出すべき崩壊土砂量を想定しなければならない。

また、原子力施設のみならず一般の道路に堆積する土砂量、堆積範囲は、重機手配等のための重要な情報であり、事前、あるいは事後いち早く定量的に評価することは、迅速な災害復旧の一助となると考

えられる。

筆者らは、崩壊土砂の到達距離を算定するための簡易手法を提案し、その妥当性を検討した⁶⁾。モデル化に当たっては、検討結果が解析コードやオペレータに依存しないことを念頭においた。そこでは、個々の岩塊の詳細なモデル化を簡略化し、その形状を球でモデル化する代わりに、形状による見かけの反発係数を境界の凹凸で表現した。そして、岩塊の到達位置に関して、個々の岩塊ではなく、その分布に着目してシミュレーション結果を評価した。本検討では、このモデルを利用し、斜面崩壊によって堆積する土砂量、堆積範囲を評価する方法を提案する。

そこでは、到達距離を安全側に評価することが、崩壊土砂量の想定と言う観点からすれば必ずしも安全側になるとは限らないということを念頭に、シミュレーションに用いる摩擦系パラメータをばらつかせることにより、評価の保守性を担保する方法を提案する。

2. 個別要素法簡易モデルの概要

ここでは、筆者らが提案した個別要素法簡易モデルについてレビューする。

簡易モデルでは、岩塊の形状を忠実にモデル化せず、これを一個の球要素で表し、この球要素と同じ直径の球体を、上方から見て図-1 に示すように等間隔に斜面や床に固定配置する。

球でモデル化した落石は、このように固定配置した球体上に鉛直落下した場合、偶然球体の真上に落ちない限り、鉛直以外の方向へ回転を伴いながら反発する。この時、反発直後の速度成分の内、鉛直上向きの成分の反発直前のそれに対する比を、球モデルの見かけの反発係数と言う。また、球体の真上に落ちた時の反発係数を最大反発係数という。岩塊については、球に削り出した試料の平板に対する反発係数を、最大反発係数、岩塊そのものの平板に対する反発係数を見かけの反発係数という。

球モデルの見かけの反発係数は、斜面や底面モデルの固定球の配置間隔によって、その平均値が増減する。つまり固定球の配置間隔によって、見かけの反発係数をコントロールすることができる。文献6) では、最大反発係数を実際のそれと同値としたシミュレーションにおいて、固定球の配置間隔を上方から見て直径の間隔に配置すると、実際の岩塊の見かけの反発係数の再現性が良いことを示した。

簡易モデルを用いて栃木ら^{7,8)}により実施された落石実験(図-2)に対するシミュレーションを行った。

岩塊モデルの粒径は、実験と同等の 6cm、個数は 177 個である。粒子間の最大反発係数は、岩塊のそれと同値の 0.48 とした。

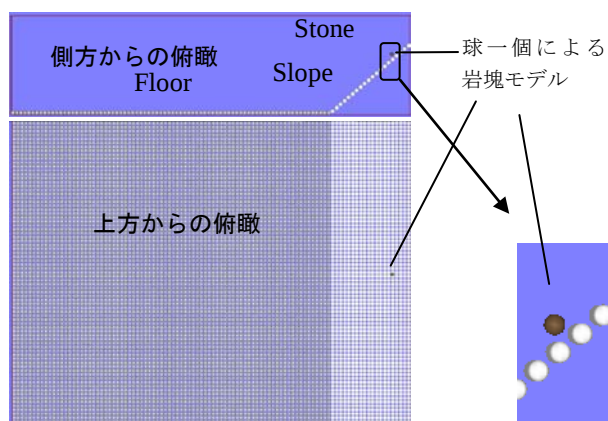


図-1 簡易モデルによるモデル化の例

図-3 に再現解析の様子を示す。初期、試料が存在する面は、粒子を密に配置し、かつ摩擦係数を 0 として、滑動の初動においてはほとんど抵抗しない条件とし、実験と比較すべき斜面および底面については、簡易モデル、すなわち岩塊モデルと同じ粒径の球を上方から見て、直径の間隔に配置している。

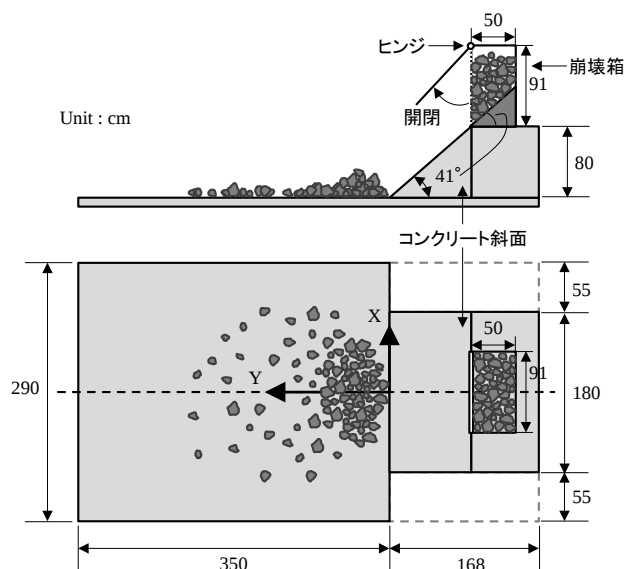


図-2 栃木らにより実施された落石実験の概要と各種寸法

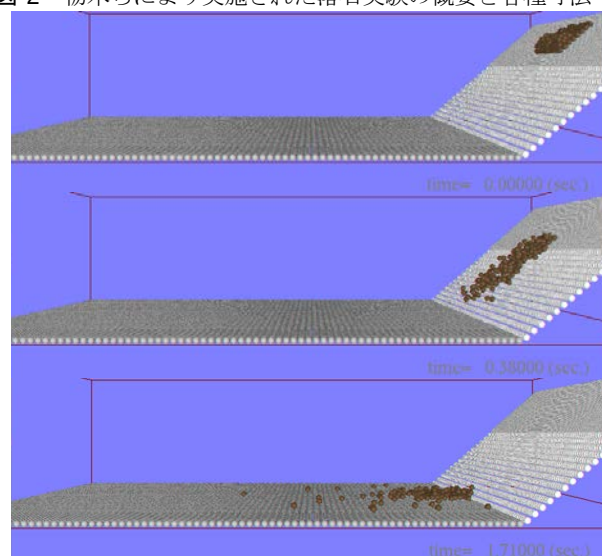


図-3 岩塊群の崩落実験の再現解析の様子

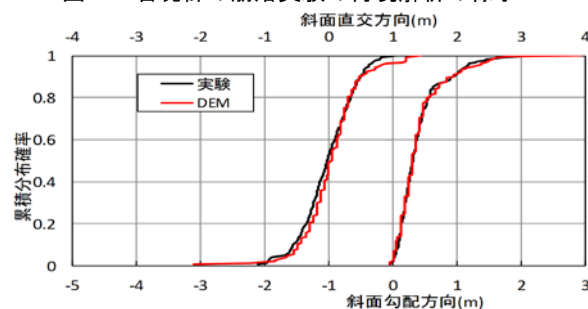


図-4 岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

図-3 に実験と DEM 簡易モデルの岩塊の到達位置の分布の比較を、図-4 に岩塊の到達位置の累積分布確率の比較をそれぞれ示す。実験と DEM 簡易モデルで、到達位置の分布が対応していることがわかる。

4. シミュレーション対象

2011年東北地方太平洋沖地震時、福島県中通地方のあさひ台団地において、大規模な斜面崩壊が発生した^{9),10)}。周辺の加速度記録から、最大加速度300gal程度であったと想定されている。図-5にあさひ台団地の位置、図-6に被害状況を示す。図-7は崩壊状況の平面図で、赤破線は堆積した崩壊土表面の範囲を示す。崩壊土砂が丁度4号線の下り線を塞ぐ位置まで流出している様子が分かる。

5. シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを図-8に示す。崩壊領域以外の地表部分には、XY平面に直径1.25mの間隔で、Z方向には、国土地理院の数値標高モデルに基づいて、球を配置した。白色の球(フィールド粒子)に相当する。赤色の球(すべり面粒子)は想定滑り面のモデルで球面の一部である。自重で土塊が滑動するように表面を滑らかにするため、直径1.25mの球をXY平面に密に(半径の間隔)で配置した。想定崩壊面は、二次元モデルの場合第一近似として円弧に設定される。本検討における三次元モデルでは、球面の一部と仮定した。この仮定については、実態との整合等を今後検証して行く必要がある。青い粒子(地盤モデル粒子)群が崩壊前の地表を含む崩壊領域である。

図-7の崩壊状況の平面図の側線に沿う地盤の断面図を図-9に示す。

想定すべり面の位置については、斜面の安定解析に用いられる円弧滑り法や、FEM解析を用いることも一法であるが、実務的に迅速に決定する状況を想定し、造成した盛土表面の法先と、崩壊土上端(旧表層法肩直上の造成した盛り土表面)を通過するこ

とを条件に、旧表面をできるだけ多く含み基盤面をできるだけ削らないような球面の半径を目視で定めた。実務では、このような地盤断面図が準備できない場合、これをどう定めるかが課題である。



図-6 上から、排土作業中の全景、4号線北側、4号線南側の被害直後の様子、日本大学中村晋教授提供

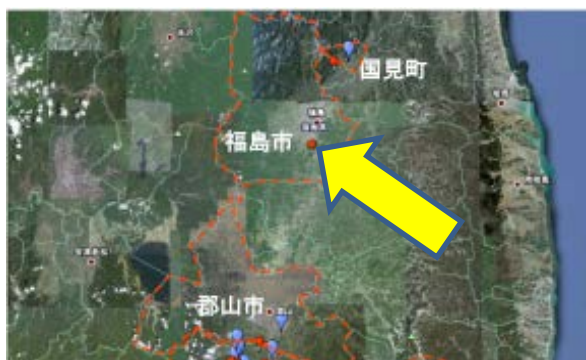


図-5 あさひ台団地の位置、日本大学中村晋教授提供



図-7 崩壊状況の平面図、日本大学中村晋教授提供

基本ケースとなるシミュレーションのために設定した粒子間の接触解析パラメータを表-1に示す。粒子そのものの情報を表-2に示す。これらの値を用いると、地盤モデル粒子(青色)同士かまたは、青色とすべり面粒子(赤色)の間の反発係数は0.48となる。この値は図-3のシミュレーションで用いたものを踏襲した。つまり、図-2の実験で用いた試料と同等の反発係数を持つ粒子を、崩壊土を表す核となすモデルをさしあたっての基本に据えた。崩壊土と、地表や道路等との反発は、非常に小さいと考えられるので、地盤モデル粒子(青色)とフィールド粒子(白色)の間の反発係数は、このことを再現するために0.1となるよう設定した。青色とすべり面粒子(赤色)の間の摩擦角は0とし、自重で崩壊が開始される

表-1 粒子間の接触パラメータ

	地盤モデル 粒子(青色) 同士 or 青色とすべ り面粒子 (赤色)	地盤モデル 粒子(青色) とフィール ド粒子(白 色)
半径方向ばね係数(m/N)	1.96×10^9	1.96×10^9
接線方向ばね係数(m/N)	1.96×10^9	1.96×10^9
半径方向粘性係数(m/N/s)	1.19×10^6	3.09×10^6
接線方向粘性係数(m/N/s)	1.19×10^6	3.09×10^6
摩擦角(°)	30, 0	30

表-2 粒子の情報

粒子半径(m)	0.625
密度(kg/m ³)	3411.4

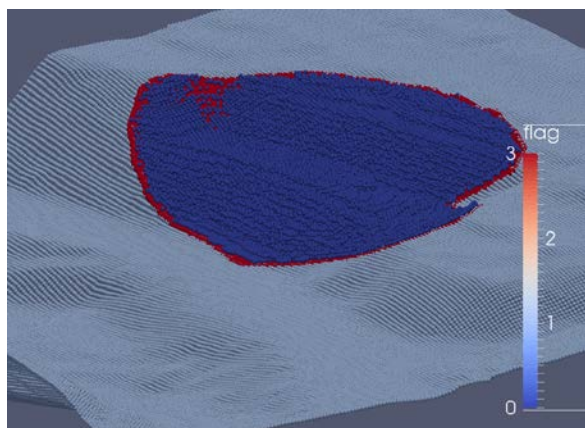


図-8 シミュレーションモデル

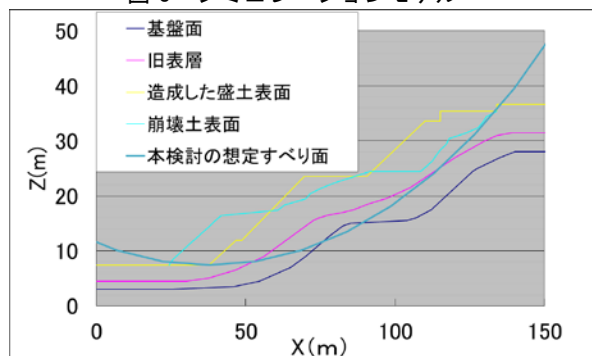


図-9 地盤断面図と想定すべり面の位置

よう設定した。

6. シミュレーション結果

シミュレーション結果を、実際の崩壊土表面とを重ねて図-10に比較する。設定したすべり面の規模が実際のそれより大きいこともあって、崩壊土の堆積範囲が倍程度広がっている。しかし、2次元の地質断面図一枚と国土地理院の数値標高モデルから簡単に解析モデルを構築し、地盤物性については、崩壊土と、流出する斜面との反発係数を0.1に設定するという判断のみで実施したシミュレーション結果としては、大過ない結果であると言える。特に堆積範囲に関して言えば安全側の評価結果を与えるものとなった。

実務では、本検討以上に、対象地点の情報(地層構成、地盤物性、地下水位等)が少ないことが多く、特に崩壊前であれば、すべり面の両先端位置がどこかという極めて重要な情報ですら不確定である。その中で、適切なモデル化手法を構築してゆく必要がある。

この計算は、J社製の個別要素法解析プログラムを用いて実施した結果であり、他の個別要素法解析プログラムを用いて計算した結果とどの程度差異があるか興味がある。図-11にI社製の個別要素法解析プログラムを用いて計算した結果を示す。流出距離が若干大きくなっているものの、ほぼ同様の解析結果となっている。

ただ、解析条件は両者で同じであるにもかかわらず

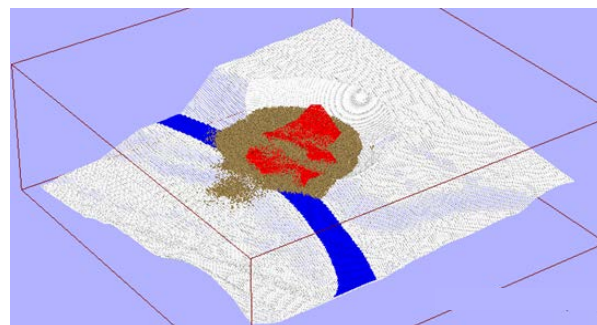


図-10 シミュレーション結果、赤は実際の崩壊土表面、J社製個別要素法プログラム

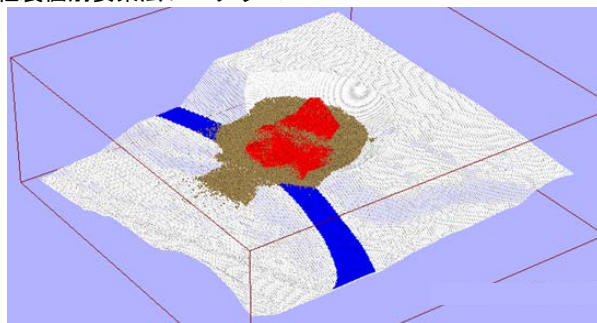


図-11 シミュレーション結果、赤は実際の崩壊土表面、I社製個別要素法プログラム

ず、完全に一致しない点が気になるところである。極めて非線形性が高く、いたるところで分岐点のある問題を扱っているため、時間積分の方法等、細かいテクニックによる微妙な計算結果の差異が、一ステップづつ蓄積して、両者の差異となったものと考えられる。

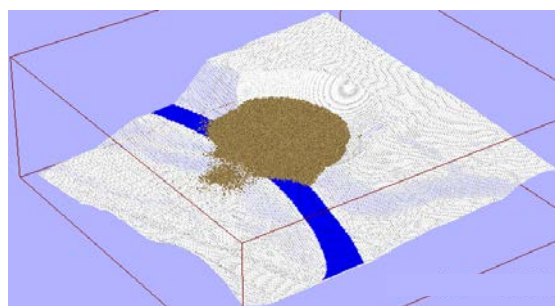
7. パラメトリックスタディ

ここでは、流出量をコントロールするため転がり摩擦¹¹⁾に着目したパラメトリックスタディを実施する。

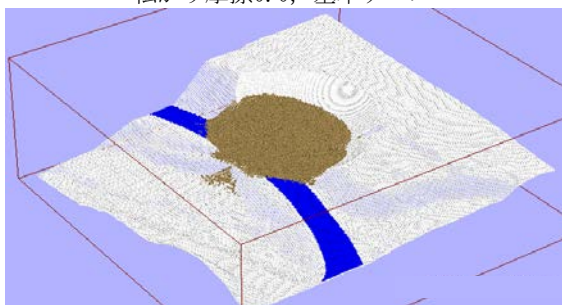
検討に用いた転がり摩擦を表-3に示す。転がり摩擦は、あたかも粒子同士が面接触するかのように解析上取り扱う手法であり、粒状体のせん断強度をコントロールすることができる。詳細は、文献11)を参照されたい。筆者の実績では、J社製プログラムによる転がり摩擦がない場合の粒状体モデルが発揮する内部摩擦角は高々22°程度である。転がり摩擦0.05の場合、0.1の場合の粒状体モデルが発揮す

表-3 粒子の情報

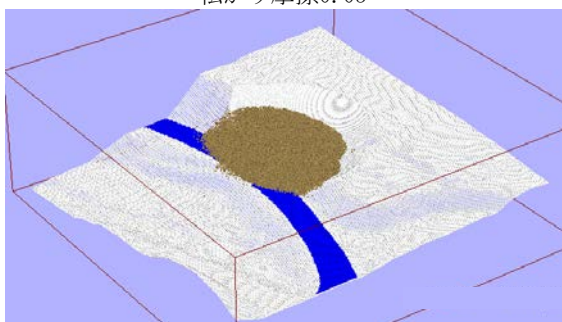
転がり摩擦	0.0, 0.05, 0.1
-------	----------------



転がり摩擦0.0, 基本ケース



転がり摩擦0.05



転がり摩擦0.1

図-12 シミュレーション結果

る内部摩擦角はそれぞれ、35°程度、40°程度となることが分かっている。それぞれの場合の解析結果を図-12に示す。転がり摩擦が大きいほど流出量が小さくなっている。4号線を超えて流出する土砂がほとんどない転がり摩擦0.1の結果が、実被害を最も良好に再現性していると観察される。

8. 排出する土量の評価

実被害で道路から排出した実際の土量が不明なので図-14に示すように、対象領域をメッシュに区切り、メッシュごとに体積を求め総和することで推定した結果、14,225m³と算定された。切土面の仰角は30°と仮定した。同様に図-12のシミュレーション結果(J社)についても、道路から排出すべき土量(図-14)を算定した。さらに、I社製のプログラムでも同様の検討を行った。

算定結果を表-4に示す。J社製プログラムでは、転がり摩擦0.05の土量が最大で、26,009 m³ I社製

表-4 道路から排出すべき土量(m³)

実被害	転がり摩擦	0.0	0.05	0.10
14,225	J社	24,048	26,009	22,340
	I社	22,114	18,262	14,490

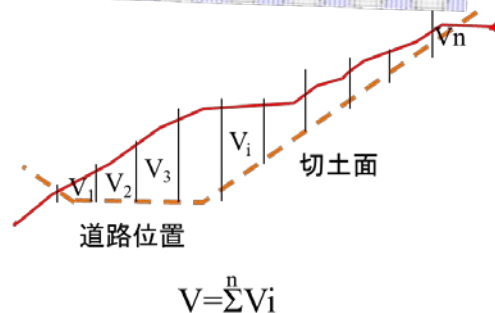
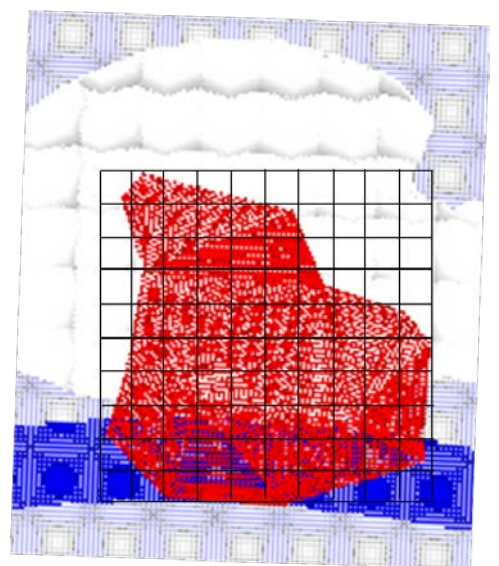
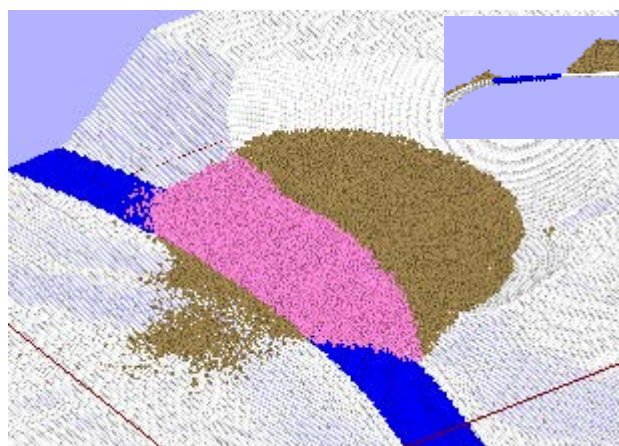
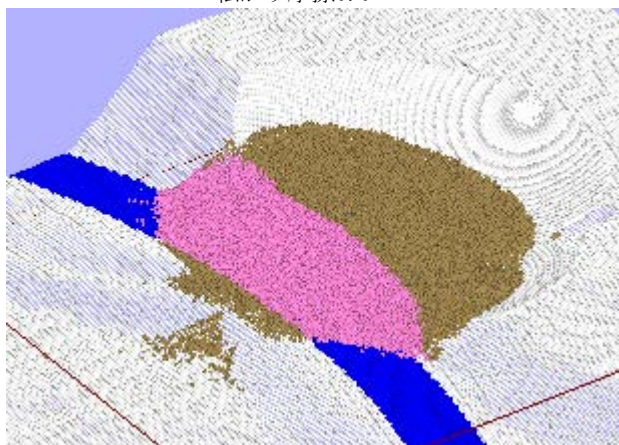


図-13 実被害で道路から排出した土量の推定

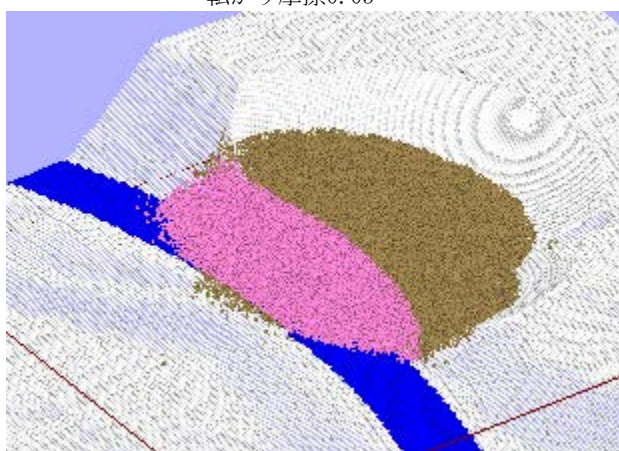
プログラムでは、転がり摩擦0.0の土量が最大で、22,114 m³と算定された。両社で傾向が異なるが、最大土量は、実被害を上回っている。実務では、対象地点の情報（地層構成、地盤物性、地下水位等）が少ないか、または、緊急時入手しにくいことが多いので、適切な範囲でパラメトリックスタディを行い、評価値としては、これらの内最大のものを採る方法が現実的である。両プログラムで転がり摩擦と排出土量の関係の傾向が異なる点については、ころがり



転がり摩擦0.0



転がり摩擦0.05



転がり摩擦0.1

図-14 シミュレーション結果における道路から排出すべき崩壊土（ピンク色）、転がり摩擦0.0の小さい図は、ピンクの領域を排除した状況を側面から眺めたもの

摩擦の内部処理の違いに着目し現在調査中である。

9. まとめ

(1) 評価手順

①地表面を国土地理院の数値標高モデル、すべり面を地層情報等に基づいて、それぞれDEM簡易モデルによりモデル化する。

②すべり面の物性を崩壊土魁が自重で滑動するように滑らかな条件（摩擦0）とし、細粒分が十分多いと認められる場合（岩砕流動とは異なる場合）には、周辺斜面との反発係数を0.1程度の小さな値とする。

③斜面崩壊シミュレーションの転がり摩擦に関するパラメトリックスタディを行う。

④パラメトリックスタディの結果、最大の堆積範囲となる結果を流出しうる堆積の範囲、最大の土量となる結果を排出すべき土量評価値とする。

(2) 結論

- ・簡易手法を用いた評価手順により、地層情報の地盤条件のみを用いて、地震等による斜面崩壊を仮定した時の土砂の流出するおよその範囲を把握したり、排出すべき土量を安全側に算定したりすることができた。

- ・上記について、プログラムに依存しないことを確かめた。

(3) 課題や今後の予定および適用範囲

- ・すべり面の位置

少ない情報から、いかに迅速で適切にこれを定めるかが課題であり、今後検討を進める予定である。

- ・崩壊土塊と周辺斜面の反発係数

崩壊土塊の核となる岩塊の含有率が小さく、斜面が長くて、崩壊土塊が分離することのない場合、反発係数は、極めて小さいと考えられる。本検討では、0.1とした。この値は、ある程度小さければ、解析に与える影響は小さいと考えている。パラメトリックスタディを行ってこのことを検証してゆく予定である。

- ・崩壊土塊とすべり面の反発係数

本検討では0.48に設定した。この値が解析に与える影響は小さいと考えている。パラメトリックスタディを行ってこのことを検証してゆく予定である。

- ・粒子同士の反発係数

本検討では0.48に設定した。この値が解析に与える影響は小さいと考えている。パラメトリックスタディを行ってこのことを検証してゆく予定である。

- ・解析対象および含水比

本検討対象であるあさひ台は、地下水位が高く、崩壊土塊には相当量の含水していたと考えられるが、土石流といえる程の流動には至らない程度であった。降雨時の土石流等、非常に含水比の高い現象に関しては別途検討が必要であると考え、地震時の崩壊解析に本手法を適用することは可能であると考え

る。ただし、ダムの堰堤等、湛水目的の土構造物や、滑動先が水田である等の、移動元あるいは、移動先に大量の水が存在する場合には注意を要する。

この研究は、土木学会原子力土木委員会地盤安定性評価高度化小委員会斜面崩落評価ワーキングの活動の一貫として実施したものである。

謝辞

日本大学工学部中村晋教授には、あさひ台被害に関して貴重な資料を提供頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会，基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド，2013.
- 2) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987，社団法人日本電気協会，電気技術基準調査委員会，1987.
- 3) 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準，日本原子力学会，2007.
- 4) 原子力安全基盤機構：基礎地盤及び斜面の安定性に係わる設計・リスク評価手引き，JNES-RE-2013-2037，2014.
- 5) 土木学会原子力安全土木技術特定テーマ委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言（土木工学からの視点），2013.
- 6) 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(構造・地震工学),Vol.71,No.4(地震工学論文集第 34 巻),I_476-I_492, 2015.
- 7) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発，電力中央研究所報告，N08084, 2009.
- 8) 栃木均：地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響，電力中央研究所報告，N09021, 2010.
- 9) 中村 晋，仙頭紀明，梅村 順，大塚 悟，豊田浩史，2011 年東北地方太平洋沖地震による福島県中通りおよびいわき地域における地盤災害- 造成盛土や自然斜面の崩壊と変状，および液状化 -地盤工学ジャーナル Vol. 7, No. 1, pp. 91-101, 2012. 3
- 10) 仙頭紀明，中村晋，佐々木章夫，長谷川昌彦，熊井直也，福島市伏拝の造成盛土の崩壊と復旧，地盤工学会誌，Vol. 61, No. 4, pp. 18-21, 2013
- 11) Sakaguchi, H., Ozaki, E. & Igarashi, T. : Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo, Int. J. Mod. Phys. B, 7, pp.1949-1963, 1993.

Reproduction Analysis of Actual Slope Collapse and Parametric Study for Evaluation of the Deposit Volume by a Simple Model of Distinct Element Method

Hitoshi NAKASE Tetsuya IWAMOTO Guoqiang CAO Hide SAKAGUCHI
Kazuto Tabei and Takashi MATSUSHIMA

In safety estimation of nuclear facilities, it is required to estimate the risk of earthquakes even stronger than assumed in design. The authors have proposed a simple model by the distinct element method to evaluate the traveling distances of the collapsed rock mass when slope collapse happened. There, reproduction simulation was carried out for a 0.8m height collapsed slope and results of the accumulation distribution of the traveling distances of rock mass were comparable or conservative.

However, for the restoration plan of access routes assumed to be occluded by the collapsed sediment the estimation of collapsed sediment volume is necessary, since only the conservative estimation for the collapsed distances of sediment is not enough. In this study, reproduction simulation is carried out for the ground of Nakadori area of Fukushima Prefecture, damaged by the 2011 Tohoku -Pacific Ocean Earthquake. Based on the proposed simple model its reproducibility is shown and friction effect to both collapsed distance of sediment and volume of deposit is discussed.