

個別要素法簡易モデルによる 地震起因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1-7-12 KDX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⁹⁾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り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、解析パラメータが崩壊の程度に及ぼす影響について確かめ、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⁹⁾。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。本稿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。

その中では、崩壊土砂量の推定と言う観点からすれば、到達距離の保守的評価は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係数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している。

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言う。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する。

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⁷⁸⁾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。

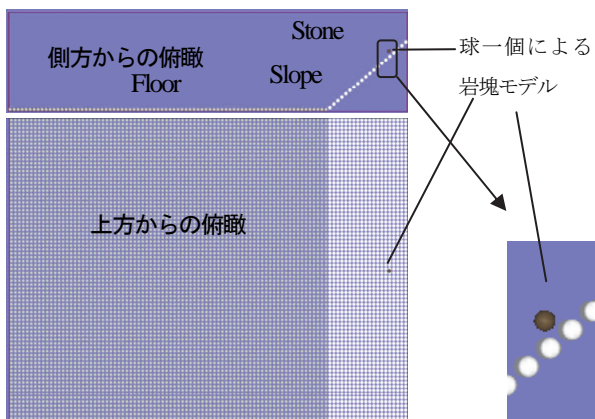


図-1 簡易モデルによるモデル化の例

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-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。実験と個別要素法簡易モデルで、到達位置の分布が対応していることがわかる。

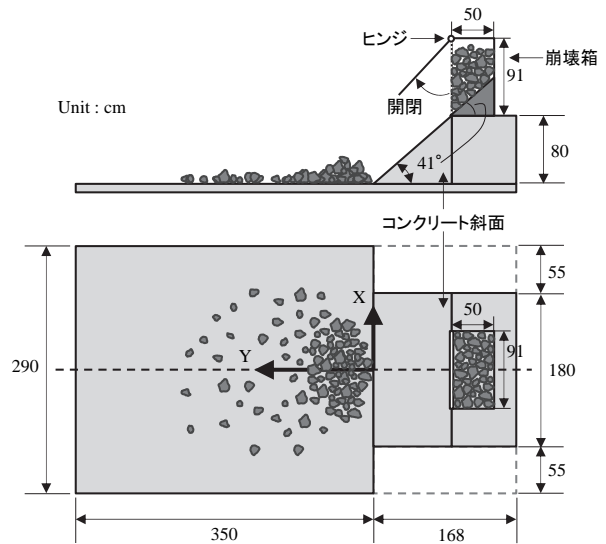


図-2 栃木により実施された落石実験の概要と各種寸法

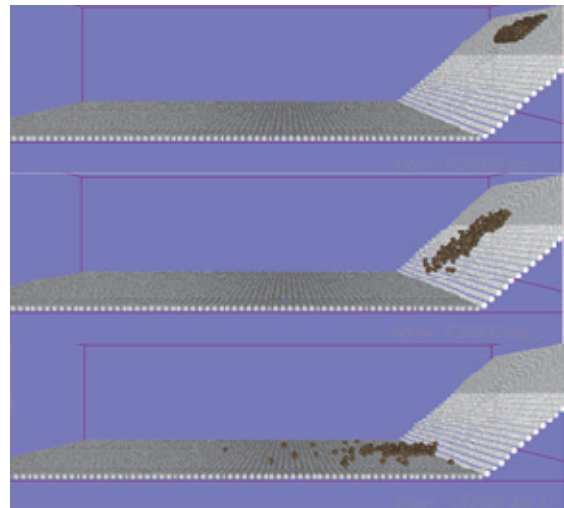


図-3 岩塊群の崩落実験の再現解析の様子

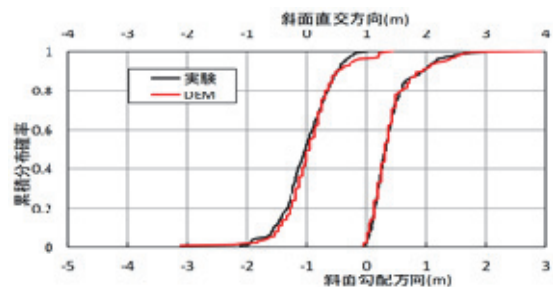


図-4 岩塊の到達位置の累積分布確率の比較

3. シミュレーション対象

2011年東北地方太平洋沖地震時、福島県中通り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)}。周辺の地震観測記録(K=NET)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(黄色矢印)、図-6に被害状況を示す。崩壊は、谷埋め盛土で造成された斜面の一部で発生した。文献10)によれば崩壊発生時の地下水水位は、かなり高く地表付近であった。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。崩壊土砂が丁度国道4号線の上下線を塞ぐ位置まで流出している様子が分かる。



図-5 あさひ台団地の位置, 日本大学中村晋教授提供



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

4. 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、標高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。これは図-3の白色球で示した簡易モデルの斜面および底面のモデル化と同じ方法である。本論文では簡単のため想定すべり面は既知のものとして設定している。斜面に固定した球の内、赤色の球はこの想定すべり面(球面でモデル化)上に位置するものを示し、それらを以下ではすべり面粒子と称する。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、具体的には、中心間を半径の間隔でオーバーラップさせる配置とした。

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-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。つまり本検討では、図-2の実験で用いた試料と同等の反発係数を持つ粒子の集合体により、崩壊土を表すことにした。崩壊土と、地表面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

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/Ns)	1.19×10^6	3.09×10^6
接線方向粘性係数(m/Ns)	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

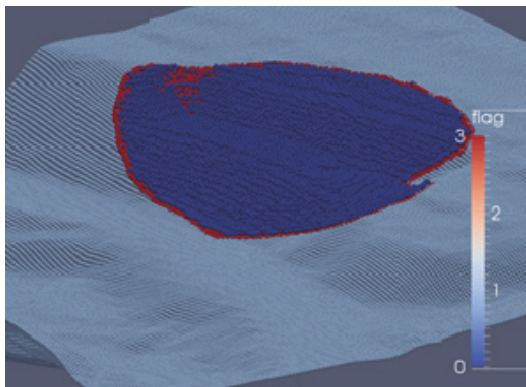


図-8 シミュレーションモデル

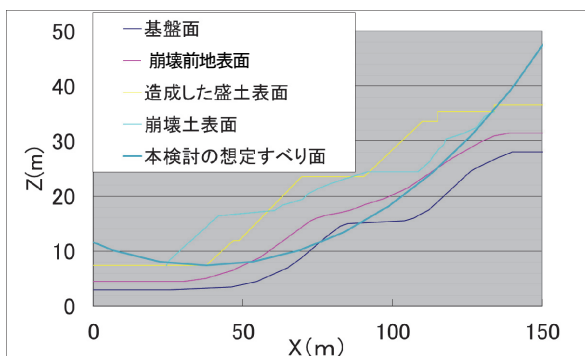


図-9 地盤断面図と想定すべり面の位置

のことを再現するために、既往の知見(文献17)を参照し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よう設定した。

5. シミュレーション結果

シミュレーション結果と、実際の崩壊土表面とを重ねて図-10に比較する。図中青い帯状部分が国道4号線的位置に対応する。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、崩壊度の堆積範囲が倍程度広がっている。しかし、崩壊土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、実用上は満足できる結果であると言える。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ていることにも着目したい。

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言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。

図-10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

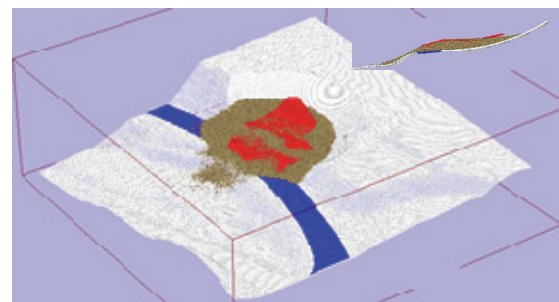


図-10 シミュレーション結果, 赤は実際の崩壊土表面, 右上は断面図, J社製個別要素法プログラム

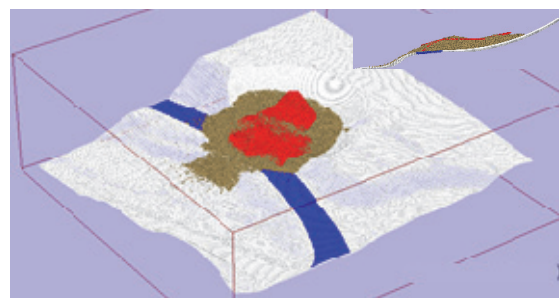


図-11 シミュレーション結果, 赤は実際の崩壊土表面, 右上は断面図, I社製個別要素法プログラム

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、完全に一致しない点については、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、計算テクニック差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ている。

6. パラメトリックスタディ

(1) 転がり摩擦

前章では、崩壊土砂の到達距離を安全側に算定するための簡易手法を用いて検討を実施した。しかし、到達距離の保守的評価は必ずしも安全側になるとは限らない。この章では、堆積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。

Cundallのオリジナルの接触モデル¹²⁾で表現できる粒状体のせん断強度は、要素形状が球である場合内部摩擦角にして高々25度程度であり、これより大きい土のせん断強度は再現できない。これは、実際の土粒子の形状は球ではなく、表面には凹凸があるので、インターロッキングの作用が生じるためである。このことを個別要素法で表現するため、多角形要素を用いる、球同士を連結する¹³⁾、転がり摩擦を用いるといった工夫がなされている。

転がり摩擦とは、転がりに抵抗する摩擦であり、これが0の場合、水平面上を転がる球は永久に転がり続ける。球の転がり摩擦は通常微小であるが、これを仮想的に大きくすることで角張った粒子からなる粒状体のせん断強度を表現することができる。

ここでは、J社製のプログラムに組み込まれている転がり摩擦について説明する。I社製のプログラムについては、文献14),15)を参照されたい。

J社製の転がり摩擦は、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、接点で転がりに抵抗するモーメントを回転ばねを用いずに考慮することができる。

Cundallの接触モデルに転がり摩擦を導入するにあたって下記の方針でそのモデル化を行う。

- ・ 転がり摩擦は転がり抵抗モーメント Mr として与える。
- ・ 転がり抵抗モーメントは、回転しようとする方向の逆に働く。
- ・ 回転しようとする方向は、転がり抵抗無しで見積もられる角速度 ω^* から求める。
- ・ 転がり抵抗モーメントにより逆回転が生じた場合角

速度を0とする。

- ・ 計算簡略化のため、要素同志で転がりモーメントを受け渡しするのではなく、要素間の接点に仮定の固定点を設け、この点から転がり抵抗を受け、エネルギーを消費するものとする。

さて、他の複数の粒子と接触する粒子 i に対する転がり摩擦の作用算定手順について述べる。他の粒子も同様の計算を行う。

a) ω^* の算定

まず、 ω^* を次式で求める。以下すべての式で右辺は既知量である。

$$\omega^* = \omega_0 + (M/I) \times \Delta t \quad (1)$$

ここで、 ω_0 は1ステップ前の回転速度、 M はすべての接点から受ける転がりモーメント、 I は粒子 i の回転慣性、 Δt は計算の時間間隔である。後の計算のため $\omega^*(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ の単位ベクトル $u(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ を、次式で求めておく。

$$u_x = \omega^* x / |\omega^*| \quad (2a)$$

$$u_y = \omega^* y / |\omega^*| \quad (2b)$$

$$u_z = \omega^* z / |\omega^*| \quad (2c)$$

b) 転がり抵抗モーメントの算定

他の粒子との各接点で、転がり抵抗モーメントの絶対値を次式により算定する。

$$|Mr| = F_n \times r \quad (3)$$

ここで、 F_n は、半径方向接点力、 r は円形と仮定した接触面の半径(図-12)である。

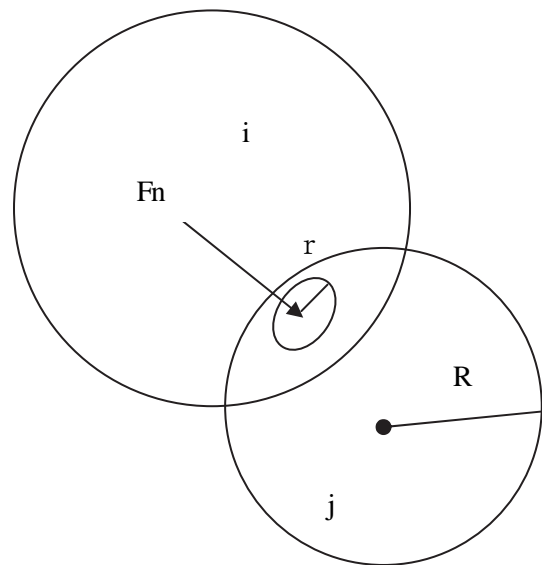


図-12 接触面の概念

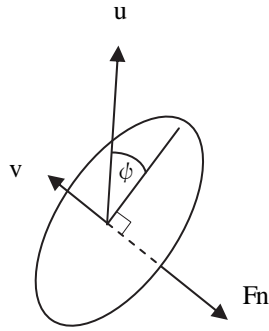


図-13 接触平面と回転軸のなす角

また, r は次式とする.

$$r = R \times \mu_r \quad (4)$$

ここで, R は要素 i の半径, μ_r は転がり摩擦係数である. 次に, 転がり抵抗モーメントを算定する.

$$Mr = -|Mr| \times u \times \cos \varphi \quad (5)$$

φ は接触平面と回転軸のなす角(図-13)でありその余弦は次式で表される.

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - (v \cdot u)^2} \quad (6)$$

ここで, v は, $-Fn$ の単位ベクトルである.

c) 転がり抵抗を考慮した角速度 ω の算定

考慮した粒子 i に作用する最終的な転がりモーメント M^* は, 次式で算定できる.

$$M^* = M + M_{rf} \quad (7)$$

ここで, M_{rf} は, 粒子 i と他の粒子との接点において, 式(5)を用いて計算した転がり抵抗モーメントの合算である. また, ここで失われるエネルギーは, 要素間の接点に設けた仮想の固定点で消費されると考える. つまり, 要素 i は, 接点を共有する他の粒子とはかかわりなく, 独立にこの接点でエネルギーを消費すると仮定する. この操作により計算が非常に安定する.

最後に, 次式により角速度 ω を算定する.

$$\omega = \omega_0 + (M^* / I) \times \Delta t \quad (8)$$

ただし, 式(8)の計算の結果, ω と ω^* の符号が逆転した場合, 転がり摩擦による逆回転を避けるため, 角速度 ω を0とする.

(2) 三軸試験のシミュレーション

検討に用いた転がり摩擦係数を表-3に示す. これらの転がり摩擦をもつ粒状体がどの程度のせん断強度をもつかは, 三軸試験等のせん断強度試験のシミュレーション¹⁶⁾

表-3 転がり摩擦係数

転がり摩擦係数	0, 0.05, 0.1
---------	--------------

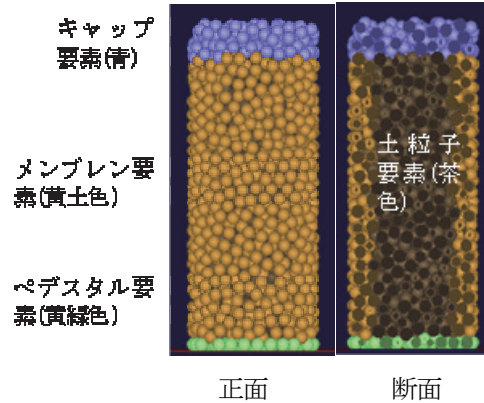
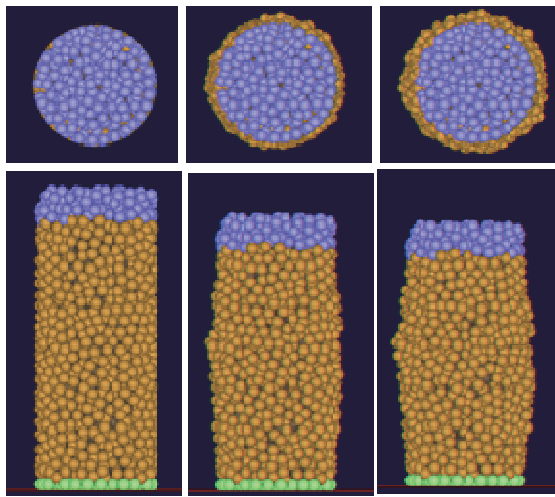


図-14 三軸試験のシミュレーションモデル

を行って調べることができる. ここでは筆者が, J社の転がり摩擦を考慮したプログラムを用いて, 本章で実施するパラメトリックスタディで用いる崩壊土モデルと同じ材料に対して実施した三軸試験のシミュレーションについて説明する.

三軸試験のシミュレーションモデルを図-14に示す. 黄緑色の要素がペDESTAL, 青色の要素がキャップ黄土色の要素がメンブレン, 茶色の粒子が土粒子のモデルである. ペDESTAL要素は完全固定とした. キャップ要素は, 鉛直方向のみに稼働し, 鉛直方向の拘束圧を掛けたり, 強制変位させて軸圧縮したりする. メンブレン要素は, 粒子径の自乗, 中心からの距離の自乗に比例する重みを付けた集中荷重を常に試験体の中心に向かって平行に作用させ, 側方の拘束圧を掛けるために用いる. 初期状態の試験体側面の面積に拘束圧を乗じた値と, 集中荷重の総和が同値となるようセットする. これにより, 土粒子要素が軸圧縮により, 三軸試験の試験体のようにせん断変形することを表現できる. キャップで受ける荷重をモニターし, 軸ひずみ-軸応力関係を出力する. メンブレン要素は, 土粒子要素を兼ねる. 転がり摩擦係数以外の粒子間の接触パラメータは, 表-1の地盤モデル粒子(青色)同士の値を, 粒子情報は, 表-2を用いる. 集中荷重の総和を, 初期試験体の測面積で除いた値が, 所定の拘束圧となることは確認した.

転がり摩擦係数0.05, 拘束圧100kPaの三軸試験のシミュレーションの平面および正面からみた様子を図-15に示す. 初期状態における試験体の直径は, 12.5m, 高さ26.5m(土粒子部分)である. 軸圧縮は, 重力下では試験体の質量に対して拘束圧が低すぎて計測される強度に強く影響するので, この影響を除くため無重力下で行う. ピーク時の軸ひずみは9.7%, 残留状態の軸ひずみは15%



初期状態 ピーク時 残留状態

図-15 三軸試験のシミュレーションの様子

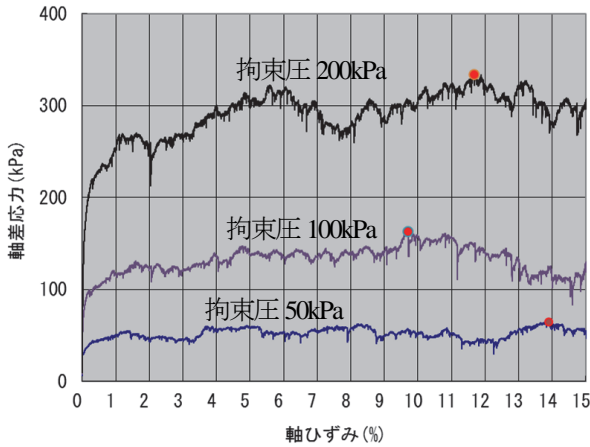


図-16 軸差応力-軸ひずみ関係(転がり摩擦0.05)

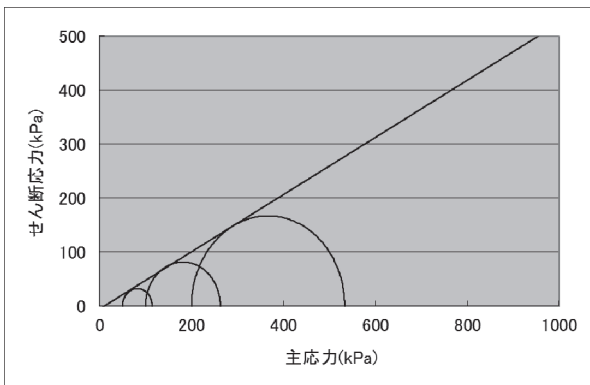


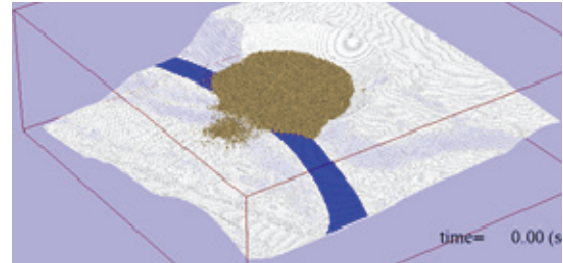
図-17 モールの応力円(転がり摩擦0.05)

であった。転がり摩擦係数0.05の軸差応力-軸ひずみ関係を図-16に、モールの応力円を図-17にそれぞれ示す。転がり摩擦係数と内部摩擦角および粘着力との関係を表-4に整理する。I社製のプログラムでも同様の検討を二次元で行い結果を合わせて示す。

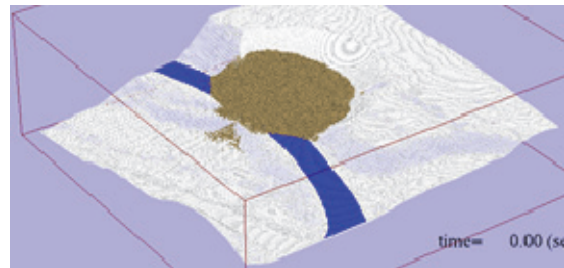
DEMでは、拘束圧が大きくなるほど粒子破碎が増加するといった現象が生じないので、モールの円に接する

表-4 転がり摩擦係数と粘着力 c (kPa),内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)の関係

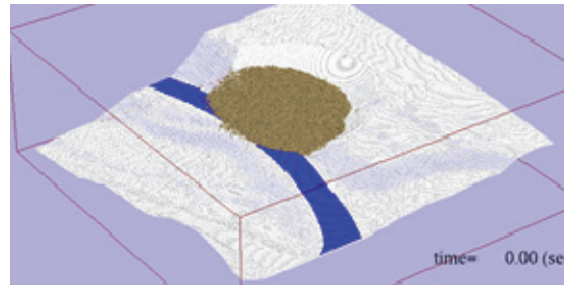
転がり摩擦係数		0	0.05	0.10
J社	c	0	0	0
	ϕ	18.6	27.9	33.1
I社	c	11.7	5.8	0
	ϕ	23.3	27.7	33.3



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-18 シミュレーション結果

直線を最小自乗法で定めると、粘着力が負になるケースがある。この場合0と表記した。

このように、準静的な室内せん断試験では、転がり摩擦係数と内部摩擦角および粘着力との関係は、J社とI社とでおおむね対応する結果となった。

(3) パラメトリックスタディの結果

表-3に示した転がり摩擦を用いた場合の解析結果を図-18に示す。転がり摩擦が大きいくほど流出量が小さくなっている。国道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係数0.1の結果が、国道4号線を越えて

流出する土砂がなかった実被害を最も良好に再現していると観察される。

7. 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-19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-20)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-5に示す。社製プログラムでは、転がり摩擦係数0.05の土量が最大で26,009 m³、I社製プログラムでは、転がり摩擦係数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探る方法が現実的である。

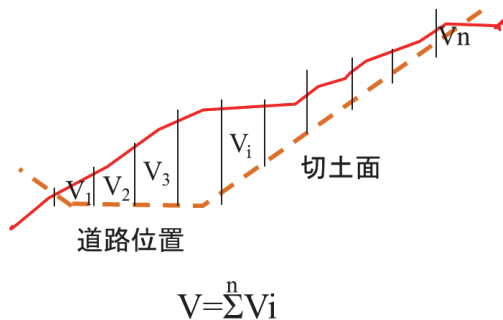
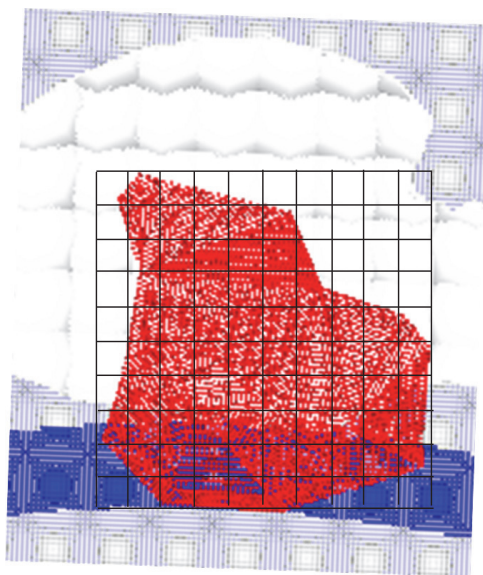
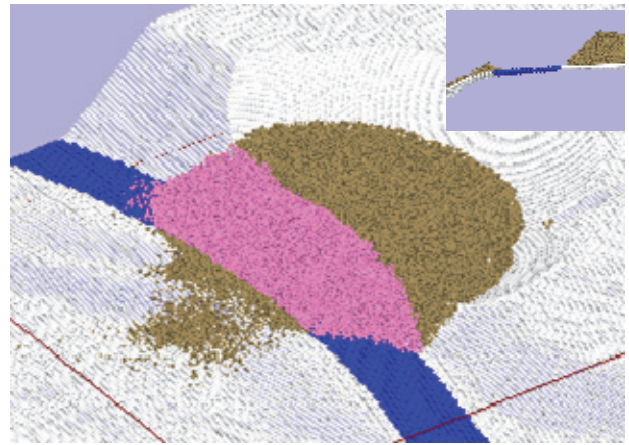
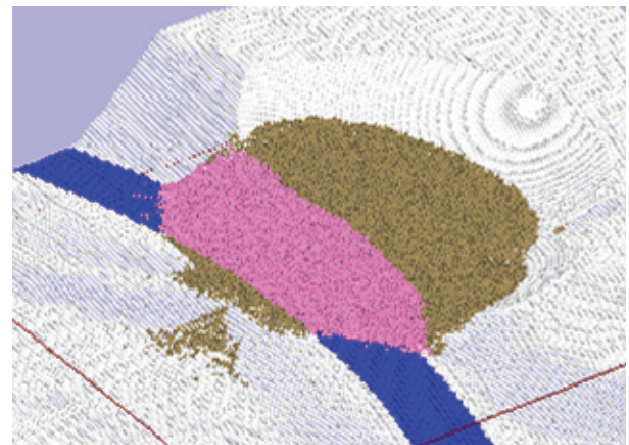


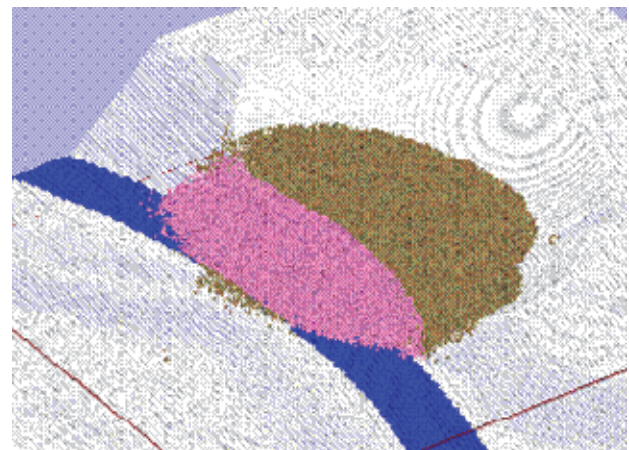
図-19 実被害で道路から排出した土量の推定



転がり摩擦係数0



転がり摩擦係数0.05



転がり摩擦係数0.1

図-20 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)、転がり摩擦係数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

表-5 道路から排出すべき土量(m³)

転がり摩擦係数	0	0.05	0.10
J社	24,048	26,009	22,340
I社	22,114	18,262	14,490

以下に排出する土量の評価手順を示す.

- 1) 地表面を国土地理院の数値標高モデル等, すべり面を地層情報等に基づいて, それぞれ個別要素法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塊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) 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) 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.

8. まとめ

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. また, 上記について, プログラムに依存しないことを確かめた.

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. 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.

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. 本検討は, 土木学会原子力土木委員会地盤安定解析高度化小委員会のワーキング活動の一貫として実施した.

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), pp. 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. and Igarashi, T.: Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo, *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol. 7, pp. 1949-1963, 1993.
- 12) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large scale movement in blocky rock system, *Symp. ISRM, Nancy France, Proc.*, Vol. 2, pp. 129-136, 1971.
- 13) 中瀬仁, 栗田哲史, 安中正, 片平冬樹, 興野俊也: 改良個別要素法による平面ひずみ圧縮試験のシミュレーション, 土木学会第46回年次学術講演会, 第3部, pp. 466-467, 2015.
- 14) Ai, J., Chen, J. F., Rotter, J. M. and Ooi, J. Y.: Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, *Powder Technology*, Vol. 206, pp. 269-282, 2011.
- 15) Wensrich, C. M. and Katterfeld, A.: Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM, *Powder Technology*, Vol. 217, pp. 409-417, 2012.
- 16) 中瀬仁, 安中正, 片平冬樹, 興野俊也: 平面ひずみ圧縮試験に対する個別要素法の適用, 土木学会論文集, No. 454, pp. 55-64, 1992.
- 17) 右城猛, 楠本雅博, 篠原昌二, 木下賢司: 落石の運動機構に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.377-386, 2006.

(2016. 11. 7 受付, 2017. 1. 14 修正, 2017. 2. 18 受理)

REPRODUCTION ANALYSIS OF ACTUAL SLOPE COLLAPSE
AND PARAMETRIC STUDY FOR EVACUATION OF THE DEPOSIT VOLUME
BY A SIMPLE MODEL OF DISTINCT ELEMENT METHOD

Hitoshi NAKASE, Tetsuya IWAMOTO, Guoqiang CAO, Kazuto TABEL,
Hide SAKAGUCHI 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.