

斜面崩壊における粒状体個別要素法の 実業務への適用検討

STUDY OF APPLICATION OF GRANULAR DISTINCT ELEMENT METHOD IN SIMULATION OF SLOPE FAILURE

中川 光雄¹
Mitsuo NAKAGAWA

¹株式会社 地層科学研究所 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5丁目7-19)

E-mail: nakagawa@geolab.co.jp

Key Words: slope failure, granular distinct element method, laboratory test, contact model, coordination number

1. はじめに

土砂災害が発生した場合の土砂の運動特性や到達範囲を予測し対策を計画することは、人命の危険を回避し交通基盤の安全性を確保する上で重要である。これらを力学的に予測する方法の1つに数値シミュレーションがある。一口に土砂災害と言ってもその発生形態は多岐に渡り、土塊がほぼ原形を留めて運動し移動速度が緩慢な地すべりに対しては、大変形連続体解析の適用事例^(例えば)が見受けられる。一方で、個別の岩塊が原型を留めて崩落する落石や岩盤崩壊に対しては、ブロック体個別要素法解析の適用事例^(例えば)が見受けられる。斜面崩壊は、地層や表土が滑落してほぼを原型を留めない状態となることを指す場合が多く、道路土工³⁾では大規模崩壊と表層崩壊に分類されている。著者は表層崩壊を対象とした粒状体個別要素法の適用を過去に発表⁴⁾している。

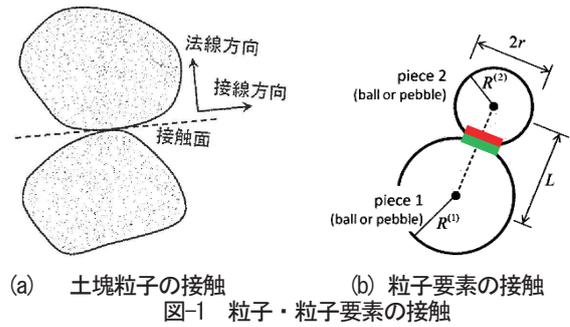
これまでも斜面崩壊を対象とした数値シミュレーションに粒状体個別要素法が適用された事例は幾つか見受けられる。村上ら⁵⁾は、新潟県中越地震での被災斜面を対象として、流れ盤斜面では大規模崩壊、受け盤斜面では表層崩壊が得られるシミュレーションを実施している。今田ら⁶⁾は、2016年熊本地震での被災斜面を対象として、シミュレーションで得られた土塊形状の変化や流速から、事前に仮定した土塊のせん断強度(粘着力, 摩擦係数)の妥当性を考察している。森口ら⁷⁾は、土砂流動実験の再現解析を通して、粒子形状や粒子間接触パラメータの変化を試行の対象として土砂流動の相違を考察している。粒状体個別要素法では、堆積土砂を粒子集合体と考えて、微視的な粒子個々の相互作用を解くことによってその巨視的な崩壊土砂の運動挙動を再現しようとするものである。因って、崩壊後に移動する土砂が原形を留めず、複

数に分岐することもある状況を考えると、挙動を構成則で制御する連続体解析の適用に比べて、このような解析手法の適用には優位性があると思われる。

さて、先に示した報告例は原地盤が対象だが、微視的情報、すなわち、粒子自体の属性や接触パラメータの感度分析などに主眼が置かれおり、パラメータから議論がスタートして試行検討の対象となっている。しかしながら、原地盤がどのような地盤物性(変形係数, ポアソン比, 質量密度, 間隙率, 粘着力, 内部摩擦角, など)を有するのか、それに対してどのような粒子間接触モデルを適用し、どのようにパラメータを決定したのか、については明瞭に示されていない。他の既往検討も同様の傾向を示す現状から、現場を対象とする実業務で粒状体個別要素法を適用することは困難だと推測される。

一般に、対策工設計などの実業務においては、室内試験実施の有無に関わらず、上述した地盤物性は調査設計の段階で用意されることが多い。因って、粒状体個別要素法を少しでも設計業務等で利用するには、原地盤の地盤物性から粒子間接触モデルのパラメータを合理的かつ、比較的簡易に決定できるシステムの構築が必要である。そこで本報では、室内試験の供試体が原位置から採取されることを前提として、粒状体個別要素法による室内試験シミュレーションを事前に実施して崩壊対象となる地層や表土の粘着力や内部摩擦角を表現する粒子間接触パラメータを求め、これを斜面崩壊シミュレーションの解析モデルに適用する方法を取る。さらに、前者の粒子集合体の粒子構造と配置が後者のそれと同等となるよう後者の解析モデルを構築する。本報では、これら2つを必須項目として実施すれば、斜面崩壊シミュレーションに対して原位置地盤の力学特性が反映されると考える。次章以降では、まず、粒状体個別要素法の基本概念と

粒子間接触モデルの概要を述べる。次に、斜面崩壊のうちの表層崩壊を対象として、地質の異なる崩壊土砂（粘性優位、砂質優位）に対して前述の必須項目を実施し、2次元シミュレーションの結果より得られた運動特性の相違を整理した。最後に、崩壊土砂の斜面横断方向への広がり表現できる3次元表層崩壊シミュレーションの事例を示す。解析プログラムはPFC ver 6（米国、Itasca社製）を用いた。



2. 粒状体個別要素法と粒子間接触モデル

(1) 粒状体個別要素法の概要

粒状体個別要素法とは、剛体円盤（2次元）や剛体球（3次元）を粒子要素として、対象材料をこれらの集合体でモデル化し、マイクロな粒子要素間の力学挙動を解くことによりマクロな集合体全体の挙動を得る数値シミュレーションである。ここで粒子要素は図-1(a)に示すように土粒子1つを表すのではなく、ある程度の大きさの塊を表すものとする。粒子要素は並進および回転の運動方程式を差分法で解くことにより時々刻々と移動し、大変形から崩壊やそれに伴う土砂移動の過程を追跡することができる。2つの粒子要素が図-1(b)のように接触したと判定された時には、粒子要素円周上の接触点の位置に図-2に示すような粒子間接触モデルが自動的に発生する。2つの粒子要素が離反して非接触となれば、接触モデルは自動的に消失する。他の高度な接触モデルにおいてもこれらは基本構成要素として用いられる。

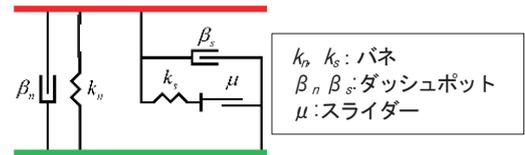


図-2 線形接触モデル（赤線と緑線は図-1(b)に対応）

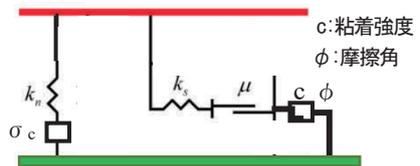


図-3 Soft-Bond 接触モデル（赤線と緑線は図-1(b)に対応）

(2) 粒子間接触モデル

a) バネ剛性分布

地盤の変形特性として一般に、変形係数Eとポアソン比 ν が与えられる。しかしながら、粒状体個別要素法における変形特性は接触点において面積の概念が無い垂直バネとせん断バネで表現される。そこで本報では、図-1(b)に示すように、接触面積 $A=2rt$ ($r=\min(R^{(1)}, R^{(2)})$ ($t=1$)) を定義して、軸方向剛性 AE/L を垂直バネ剛性 k_n 、せん断バネ剛性 $k_s=k_n/\nu$ と定義して、変形係数Eとポアソン比 ν から粒子間パラメータである k_n, k_s を評価する。粒径が分布する粒子集合体において k_n, k_s それぞれに単一の数値を与える既往の方法とは異なり、本報では粒径に応じた垂直バネ剛性とせん断バネ剛性を分布させることができる。

b) 固着強度

堆積土砂の粘着力を表現するには粒子間に固着を導入する必要がある。粘着力を有する土砂や地盤に対する粒子間接触モデルとして、従来からParallel Bondモデル⁹⁾が用いられてきた。このモデルは、粒子間の仮想接触面で応力とモーメントを伝達するため、接触面に粒子間せん

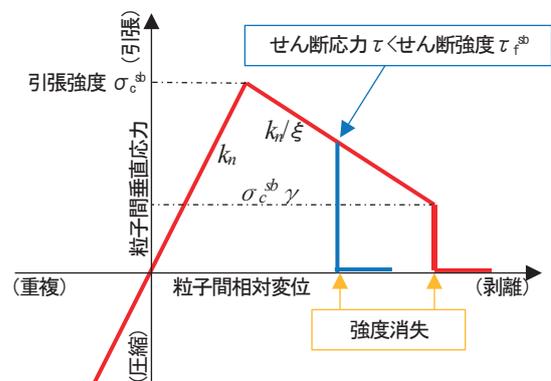
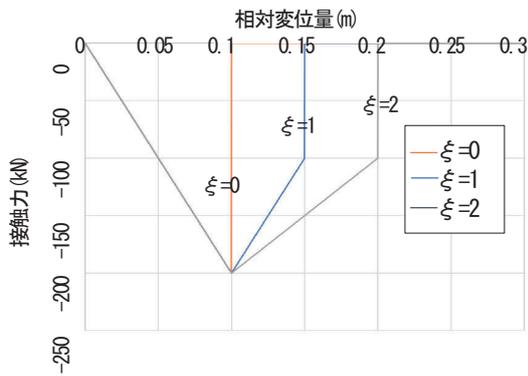
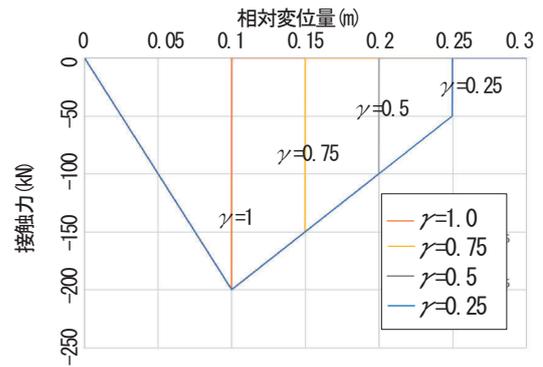


図-4 Soft-Bond 接触モデルの垂直応力-相対垂直変位関係

断強度と粒子間引張強度を与えると、粒子集合体、すなわち、堆積土砂のせん断強度 (c, ϕ) が表現できる。ただし、このモデルは粒子間の接触応力が強度に到達した時点で即時に強度を消失する脆性的な特性を有する。そこで本報では、強度超過後も強度低下を表現できるようにParallel Bondモデルを拡張した図-3に示すSoft-Bond接触モデル⁹⁾を適用する。このモデルは、図-4に示すように、粒子間垂直応力が引張の状態にある時、接触引張強度 (σ_c^{sb}) 超過後の強度低下の程度は、破壊強度 ($\sigma_c^{sb}\gamma$; γ は破壊強度係数) と強度低下勾配 (k_n/ξ ; ξ は強度低下勾配係数) によって決定され、破壊強度 ($\sigma_c^{sb}\gamma$) に到達した時点で固着は消失する。ここで、破壊強度係数 (γ) と強度低下勾配係数 (ξ) のそれぞれを変動させた場合の



(a) ξ の相違 ($\gamma=0.5$ の場合)



(b) γ の相違 ($\xi=2$ の場合)

図-5 主要パラメータ (ξ , γ) の相違による強度低下の相違 (接触力: 引張は負で表示)

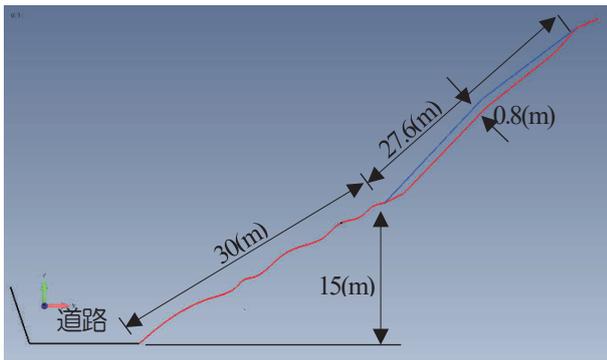


図-6 モデル化対象斜面 (青線: 崩落土砂の表面)

表-1 崩壊土砂 (シルト質砂礫) の物性値

変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	乾燥密度 ρ (kg/m ³)	間隙率 n (%)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)
50	0.30	1900.0	15.0	30	20.0

表-2 検討ケース

ケース	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	地層名
1	30	20.0	未固結 (粘性)
2	15	30.0	未固結 (摩擦性)
3	50	25.0	軟岩

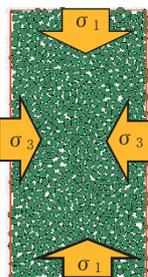
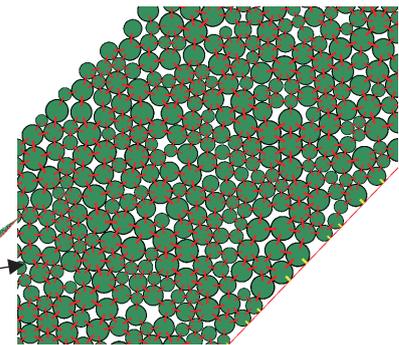


図-7 二軸圧縮試験シミュレーション

表-3 Soft-Bond 接触モデルのパラメータ

ケース	τ_{f}^{sb} (kN/m ²)	σ_c^{sb} (kN/m ²)	強度低下勾配係数 ξ	破壊強度係数 γ
1	100	40	0	1
2	100	20	0	1
3	150	50	3	0.5



(粒子間の赤線分は Soft-Bond 接触モデル)

図-8 表層崩壊シミュレーションの解析モデル

接触力と相対変位の事例を図-5に示す。これより2つのパラメータの組み合わせにより、強度低下の相違をモデル化できることが分かる。ちなみに、 ξ に0、 γ に1を与えた場合は、Parallel Bond接触モデルに該当する。

3. 表層崩壊シミュレーション

佐々木¹⁰⁾は、国内における土砂災害の中で少なからず発生する表層崩壊の定義について、「表層部が原型をとどめず崩落するものをいう。一般に急傾斜地によくみられ、その崩落速度は速い。強風化岩、崩積土に多く、豪雨等によって引き起こされることが多い。」と述べている。堆積の幅や長さが数十m~数百mと広範囲な割には土層深が数十cm~数百cm程度と極めて薄く、上述した崩落

時の運動特性から、これを連続体でモデル化することは極めて困難であると思われる。そこで本報では、粒状体個別要素法を適用し、シミュレーションの結果より堆積土砂が有する粘性 (固着) の相違が崩落時の運動特性に及ぼす影響を整理した。

(1) 対象斜面の概要と検討ケース

対象斜面を図-6に示す。崩壊土砂の土層深は最大80(cm)、長さ27.6(m)に渡る。堆積の下端より15(m)下には供用中の自動車道が存在し、土砂が30(m)下に移動すれば路面に到達する状況にある。崩壊土砂は原位置調査により表-1に示した物性値が得られており、シルト質な砂礫 (未固結) である。本報では、粘性優位と摩擦性優位の場合の崩壊挙動を比較検討するために、変形特性を

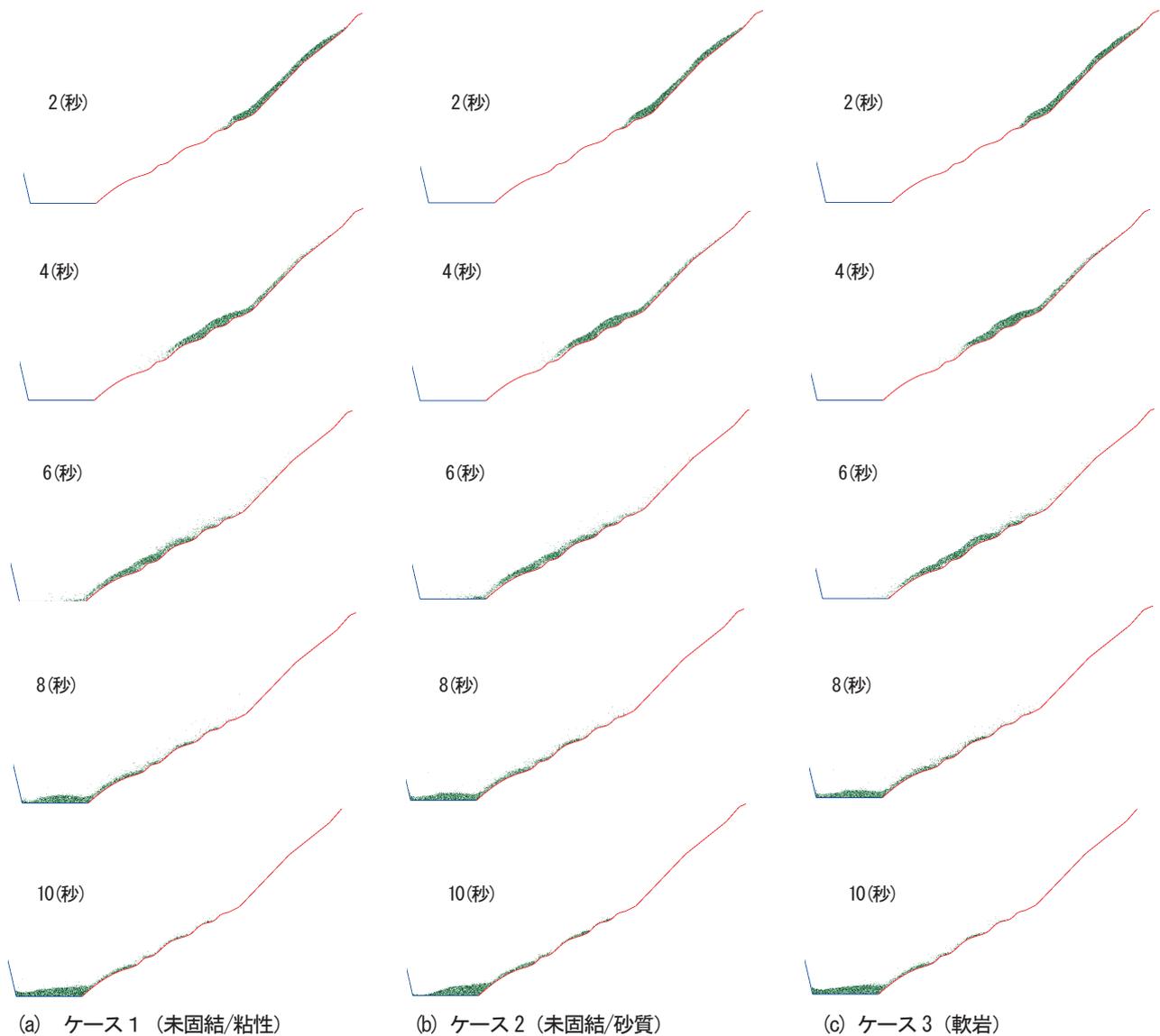


図-9 表層崩壊の過程 (2次元シミュレーション)

一定とした上で、粘着力と摩擦角が異なる表-2に示した全3ケースを実施した。

(2) 二軸圧縮試験シミュレーション

表-2に示した各ケースにおいてSoft-Bond接触モデルのパラメータを決定するために、図-7に示す二軸圧縮試験シミュレーションを実施した。ここで、土層深80(cm)に対して粒子要素が深さ方向に15個～20個程度を配置できれば崩壊土砂の移動が良好に表現できると考えて平均粒径を5(cm)とした。また、間隙率15(%)を実現できる最小粒径に対する最大粒径の比は2.0(最小粒径3.3(cm)～最大粒径6.7(cm))として、粒子要素の重心位置と粒径を乱数で分布させた。各ケースに対して得られたSoft-Bond接触モデルのパラメータを表-3に示す。

(3) 崩壊土砂のモデル化

a) 供試体モデルと崩壊土砂モデルの力学的等価性

図-7に示した供試体領域における粒子集合体と図-6に示した斜面に与える堆積土砂の粒子集合体は、力学特性に等価であることが望まれる。このために、表-3に示したパラメータを堆積土砂の粒子集合体に適用する。さらに、粒径分布や間隙率に基づく粒子の構造・配置を両者間で同等とするため、これらを表す指標である配位数(1つの粒子あたりの接触点数)¹¹⁾に着目し、供試体と堆積土砂の平均配位数が同等となるよう堆積土砂をモデル化する。ここで、供試体の平均配位数は、4.1である。

b) 表層崩壊シミュレーションの解析モデル

表層崩壊シミュレーションの粒状体個別要素法による解析モデルを図-8に示す。作成要領は、まず、図-7に示した供試体領域の粒子集合体を図-6の赤ラインと青ラインで囲まれた堆積領域にコピーする。次に、重力加速度を載荷して静的平衡状態を得る。これを崩壊前の初期状

態とする。平均配位数は4.2となり、重力加速度を載荷したことにより粒子配置が若干変化したものと思われる。しかしながら、変動が2%程度と微小であるため、粒子構造における等価性はほぼ実現されていると考える。尚、崩壊土砂の移動では、強度消失により離反して再接触した粒子要素の固着は再度有効化させた。

(4) 表層崩壊シミュレーションの結果

a) 崩壊土砂の運動特性

シミュレーションは、時間増分 $\Delta t=6.831e-5$ (秒)を繰り返すことにより時間の経過を表現する。表-3 に示した検討ケースにおいて崩壊土砂が移動する 10 秒までの過程を図-9 に示す。堆積長さに対して層厚が薄いためケースごとの相違を検出するのは容易ではないが、2秒から6秒あたりまでの崩壊挙動に着目すると、ケース2はケース1と比較して土砂の堆積膨張や粒子の飛散が大きく、粒子間の固着の程度の相違が運動特性に反映されているものと思われる。また、4秒あたりの挙動に着目すると、3つのケースの中ではケース3が最も原型からの崩れが少ないことから、摩擦角が他ケースの中間の大きさであっても軟岩としての粘着力、すなわち、粒子間固着の効果が反映された結果であることが伺える。下方へ移動する際は、斜面の凹凸に繰り返し衝突するため、どのケースも8秒以降は原型を留めなくなる傾向にある。

b) 崩壊土砂の変位と速度の時刻歴

崩壊土砂の経過時間に伴う合成変位の進展状況を図-10に示す。図中に示した堆積上部の1粒子要素(上部点)と堆積下部の1粒子要素(下部点)を対象として、各ケースを比較した。3秒までは全てのケースにおいて上部点と下部点の変位増加は同程度であるが、3秒以降は異なった傾向が見られる。ケース1とケース2は、下部点に比べて上部点の変位が大きい。これは、上部土砂が最終的には下部土砂に接近したことを示す。ケース3は上部点と下部点の進展が同程度である。これは、上部土砂と下部土砂がほぼ同じ速度で運動したことを示す。これらのことは、速度の進展状況を示す図-11からも確認できる。すなわち、ケース1とケース2は、3秒以降、下部点に比べて上部点の速度が大きい。これに対して、ケース3は上部点と下部点が同程度の速度を示している。これより、他のケースよりも粘着力の大きい軟岩は比較的原型を留めて移動したことが伺える。

c) 道路への堆積土量

道路面に堆積した土量の経時変化を図-12に示す。これより、ケース1とケース2においてはあまり差は見られない。ケース3の堆積の進展は他のケースよりも時間的に遅れが見られる。これは、粘着力の効果によるものと思われる。

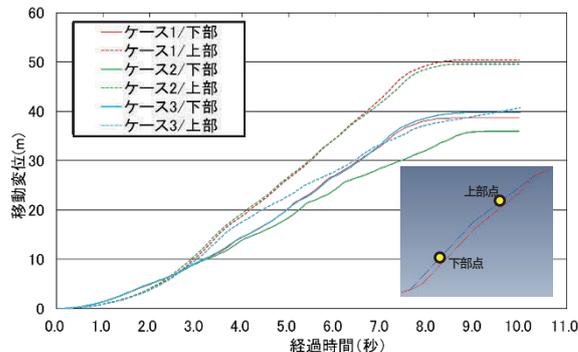


図-10 崩壊土砂/変位の時刻歴

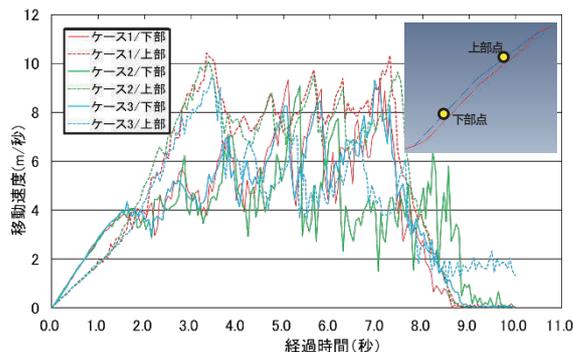


図-11 崩壊土砂/速度の時刻歴

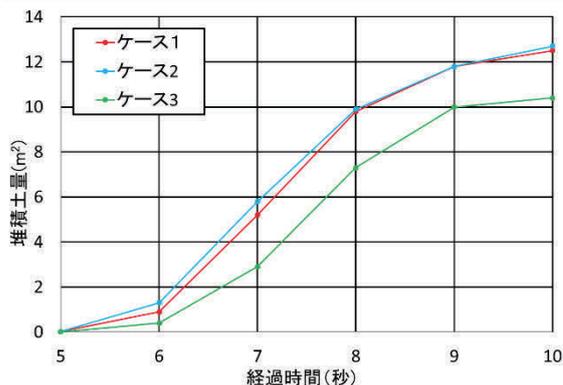


図-12 道路面に堆積した土量の経時変化

4. 3次元表層崩壊シミュレーション

交通基盤等を対象とした対策工設計の視点に立つと、前章で示した2次元シミュレーションでは、崩壊土砂が斜面横断方向にどの程度の広がりをもって保全対象に到達するかを予測することはできない。本章では、表層崩壊シミュレーションを3次元で実施した事例を示す。

(1) 現場と解析モデルの概要

対象斜面の解析モデルを図-13に示す。崩壊土砂の土層深は最大270(cm)である。堆積の下端より50(m)下には供用中の自動車道が存在し、土砂が90(m)移動すれば路面に到達する状況にある。原位置の調査から得られた崩壊土砂の物性値を表-4に示す。図-14に示す三軸圧縮試験シミュレーションでは、平均粒径10(cm)、最小粒径に

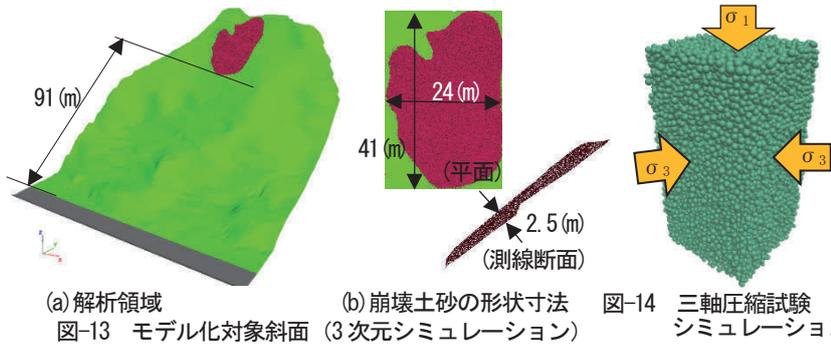
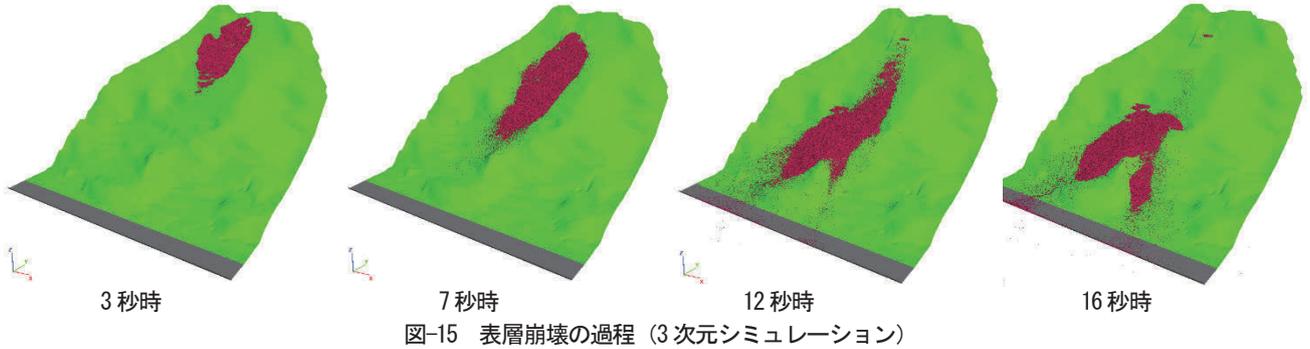


表-4 堆積土砂の物性値

変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	乾燥密度 ρ (kg/m ³)	間隙率 n (%)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (deg)
50	0.30	1900.0	15.0	35	25.0

表-5 Soft-Bond 接触モデルのパラメータ

τ_f^{sb} (kN/m ²)	σ_c^{sb} (kN/m ²)	強度低下勾配係数 ξ	破壊強度係数 γ
155	35	3	0.5



対する最大粒径の比は2.0とした。これより得られた Soft-Bond接触モデルのパラメータを表-5に示す。図-14に示した供試体領域の平均配位数は10.2、図-13に示した崩落前の堆積土砂の平均配位数は9.7である。ここでも、その変動が5%程度と微小であるため、粒子構造における等価性はほぼ実現されていると考える。また、強度消失により離反し再接触した粒子要素の固着は再度有効化させた。

(2) 表層崩壊シミュレーションの結果

堆積土砂が道路に到達する16秒までの過程を図-15に示す。7秒程度までは先端部の乱れを除き土砂は全体として固結を維持した状態で移動している。12秒以降は斜面の凹凸による地形の影響を繰り返し受けて土砂周辺部より粒子要素の多くは強度消失により離反し、二股に分岐して移動する結果が得られた。これより、道路では約100(m)に渡る区間が対策工の対象になるとと思われる。

4. おわりに

本報告は、斜面崩壊による土砂の運動特性や到達範囲を粒状体個別要素法を用いて予測する際、原位置試験や調査から一般的に得られる地盤物性に基づいて粒子間接触モデルのパラメータ、および、粒子構造の配置を合理的に決定する一連のシステムを示した。今後は、実際の被災現場に適用し、本提案の妥当性を検証する。

参考文献

1) 中川光雄・山田正雄：有限差分法・大変位解析による地

- すべりシミュレーションの適用性，地すべり，第44巻，第6号，pp337-384，2008.
- 2) 中川 光雄，山田 正雄，中谷紀行，近重朋晃：合理的な接触判定法に基づく3次元個別要素法による落石・岩盤崩落シミュレーション，地すべり学会誌，Vol.47, No.3, pp.147-154, 2010.
 - 3) 道路土工 のり面・斜面安定工指針，(社)日本道路協会，1999.
 - 4) 中川光雄，池田泰之，山 真典，谷口拓也：斜面表層崩壊の土砂到達予測における粒状体個別要素法解析の適用，土木学会第69回年次学術講演会，pp.555-556, 2014.
 - 5) 村上貴志，村上 章：DEMによる地質構造の斜面崩壊形態への影響検討，第41回地盤工学研究発表会講演集，pp.2105-2106, 2009.
 - 6) 今田耕太郎，赤木寛一，齋藤 亮，桐山貴俊：DEMを用いた熊本地震による南阿蘇村立野地区の斜面崩壊解析，土木学会第73回年次学術講演会，pp.589-590, 2018.
 - 7) 森ら：個別要素法による土砂流動解析の計算条件に関する一考察，土木学会第71回年次学術講演会，pp.127-128, 2016.
 - 8) D. O. Potyondy and P. A. Cundall, 'A bonded-particle model for rock' *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.41, pp1329-1364(2004).
 - 9) Yifei Ma and Haiying Huang, 'DEM analysis of failure mechanisms in the intact Brazilian test', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.102, pp109-119(2018).
 - 10) 佐々木靖人：土層調査による表層崩壊の体系的な調査手順の提案，日本地すべり学会関西支部講演集，pp.1-20, 2012.
 - 11) 前田健一，館井 恵，福岡雅敏：個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒径の浮き上がりマイクロメカニクス，砂防学会誌，Vol.64, pp3-14, 2011.

(2020. 7. 1 受付)