

# モデル化した岩盤斜面の安定性解析に対する 粒状要素法の適用

土倉 泰<sup>1</sup>・深澤哲也<sup>2</sup>・村上幸利<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学助手 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田 4-3-11)

<sup>2</sup>正会員 工修 鹿島建設株式会社 (元山梨大学大学院生)

<sup>3</sup>正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科

岩盤斜面における岩塊の剝離すなわち落石の発生危険性を事前に評価することは、防災工学上、重要である。本論文では、浮き石の集合体でモデル化した岩盤斜面の安定性解析に粒状要素法を適用する。浮き石に相当する要素には、落石を想定した簡単な実験結果に基づく考察を踏まえて表面の凹凸を表現できるモデルを採用する。解析結果とモデル実験結果との比較から、解析に関する適用性および有用性が確認され、岩盤斜面における割れ目の発達状況と落石発生危険性との関係を力学的に検討するために、本手法を役立てられる見通しが立った。

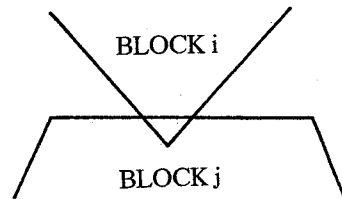
**Key Words :** rockfall, slope stability, distinct element method, granular element method

## 1. ま え が き

山岳地域の道路において、落石による事故を未然に防止するためには、落石の発生が心配される斜面に落石予防工等を施し、安全対策を図っていかなければならない。実務的には、限られた予算を落石災害の予防のための経費として有効に使用するために、道路等に沿って数多く存在する斜面のうち、落石発生危険性の高い斜面から優先的に予算を割り当てていくという施策が求められる。しかし、岩盤斜面での岩塊の剝離によって生じる落石発生危険性を定量的に評価することは極めて難しい。

それぞれの岩盤斜面に対する落石の危険性を評価するための方法として、現地調査データの統計的処理に基づく危険度判別法が模索されている<sup>1),2)</sup>。このような手法を用いる中で、岩盤斜面における落石発生までの力学特性をある程度推定することができる。この特性を実験あるいは解析によって追究し、岩盤斜面の割れ目の入り方や割れ目そのもの特徴等に影響される落石発生までの力学特性を明らかにすることができれば、これを岩盤斜面における落石の危険性評価の精度向上に役立たせることができると考えられる。

そこで、著者らは落石問題への適用性が高いと考えられる粒状要素法<sup>3),4)</sup>を応用し、モデル化した岩盤斜面の安定性解析を試みることにした。まず、解析に先駆けて、市販のモルタル製ブロックの斜面上の安定性に関するモデル実験を行う。この実験結果についての考察を踏まえ



図一 多角形要素間の接触

て、岩塊同士の接触を点接触を基本として表現できる浮き石モデルを採用し、粒状要素解析に応用する。そして、浮き石型落石を想定して浮き石モデルを積み上げた斜面を徐々に傾けていく問題を解析し、本手法の適用性および有用性を検討する。

## 2. モルタル製ブロックを用いた落石のモデル実験

粒状要素法は、個別要素法と同様に剛体要素の集合体の挙動を調べるためのシミュレーション法の1つである。同手法が個別要素法と異なるのは、要素の移動量の算定に剛性行列を用いる点にある。

個別要素法については、既に浮き石型落石の解析に応用されている<sup>5)-7)</sup>。ところが、従来の解析では浮き石は円要素あるいは多角形要素に置き換えられることが多い。円要素では浮き石の形状を表すのに不十分である。また、多角形要素を用いる場合には図一に示すように

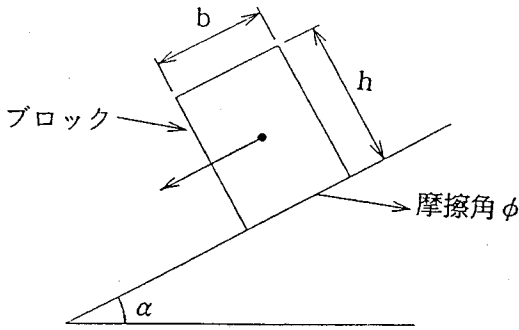


図-2 斜面上の長方形ブロック

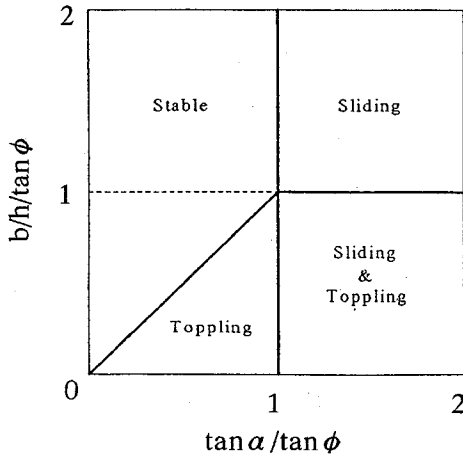


図-3 Bray and Goodman の安定・不安定の条件<sup>8)</sup>

多角形の頂点が辺にくい込んだ点に接触力が働くこと仮定される。このような接触を仮定すると、面同士の接触は2つの頂点のみに接触力が作用する状態とみなされる。これは相当な近似的取り扱いと考えられ、解析定数の決定も不明確にならざるを得ない。

落石現象をシミュレーション解析するためには、差し当たって複雑な形状をもつ岩塊を単純化したモデルが必要である。そのモデル化において、落石現象の本質を失わないように配慮することは重要となる。そこで、改めて浮き石をどのようにモデル化するのが適当であるかを模索するために、簡単なモデル実験を行う。

図-2に示す斜面上に静止した長方形ブロック(幅  $b$ 、高さ  $h$ )の安定性は、例えば Bray & Goodman<sup>8)</sup>が図-3に示す条件(ジョイントに粘着力が働かない場合)で評価しており、落石問題を考える際の基本となっている。 $\phi$ はブロックの内部摩擦角、 $\alpha$ は斜面の傾斜角である。ここでは、市販のモルタル製ブロックを用いて、この図に示される安定状態と不安定状態の境界点を求めることとした。

図-4は傾斜実験の装置で、傾斜板、ワイヤ巻き取り

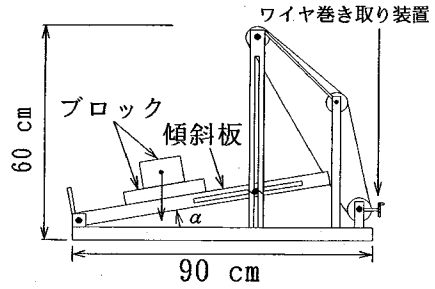


図-4 傾斜実験装置

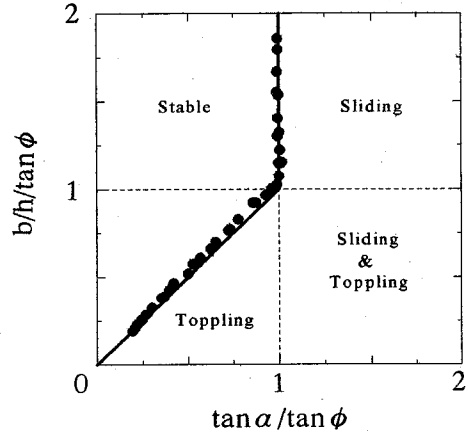
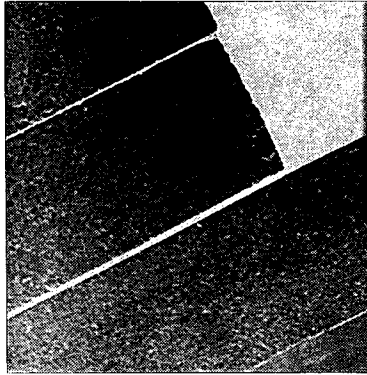


図-5 実験から求めた安定・不安定の臨界条件

装置、その他からなる。傾斜板の傾斜可能な角度の範囲は0度~45度である。ハンドルを回転することにより傾斜板を任意の角度に設定できる。上載する試料によって傾斜板には大きな荷重が加わるが、装置はそれに耐え得る構造となっている。表面を磨いた市販のモルタル製直方体ブロック(20 cm×10 cm×6 cm)を水平にした傾斜板の上に確実に固定する。このブロックの上に、別のブロック一個を静かに載せる。次に傾斜装置を操作し、ブロックに衝撃を与えないように約10度/分の速度で傾斜角を増加させる。ブロックが滑り出したり転倒することにより落下した時点で、傾斜板を固定し傾斜角を測定した。

以上の実験を数回繰り返し、得られた傾斜角を平均した。また、いくつかのブロックを接着させることにより、落下させるブロックの斜面側方から見た幅  $b$  と高さ  $h$  の比を変えて実験を順次繰り返した。ブロックの高さを大きくすると、落下直前にブロックの前端付近が支点となって後方に浮き上がりが生じることがあった。そのため、ブロックの落下直前に傾斜板を止め、その時点でのブロックの浮き上がり量をノギスを用いて測定し、落下時点でのブロックの傾斜角を補正した。

ここで用いたブロックの内部摩擦角  $\phi$  は実験の結果

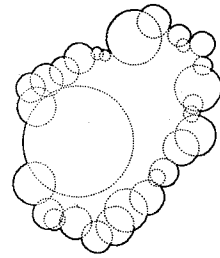


写真—1 転倒落下直前のブロックの浮き上がり

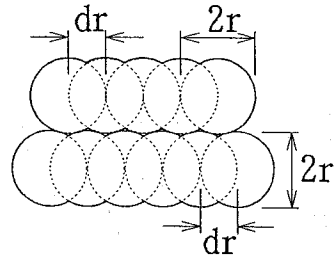
36度であることがわかった。この値を用いて、傾斜実験でブロックが落下する、すなわち不安定状態の現れる臨界条件を図—3と同じ座標軸を使ってプロットすると図—5のようになった。 $\alpha$ は傾斜角である。転倒についての臨界条件が、既往の研究の示す直線から系統的に危険側にずれるという結果が得られた。

この結果は次のように説明できる。既往の研究では、長方形ブロックの表面は完全に平らで、ブロックとブロックは面全体で接触していると仮定される。したがって、ブロックの転倒は長方形の頂点を支点にして生じるものとして扱われる。ところが、市販のブロック表面は完全に平らではなく、面全体で接触しているわけではない。全接触力は3点以上の点接触で支えられている。この中で転倒する直前に残った最後の接触点が転倒の支点といえる。もしブロック間に噛み合いの効果があれば、この点は頂点ではなく辺の上にもずれた点となる可能性がある。実験結果にはこの噛み合いの効果が出ているものと考えられる。支点が辺の上にあるならば頂点にあるときよりも転倒が生じやすくなり、臨界条件を与える傾斜角は既往の研究のそれよりも小さくなる。実際、実験で写真—1のように転倒落下の直前にブロックが浮き上がったまま安定を保った状態が存在しているのは、まさにブロック間が噛み合っていて転倒を支える点が辺の上にあるためであり、上記の解釈が妥当であることを示唆している。

本実験で用いたブロックは概観したところでは表面がほぼ平らであるが、それでも完全に平らなものと考えたとその挙動を厳密に評価できない。実際の岩塊は実験に用いたブロックとは比較にならないほど表面形状が複雑なことを考慮するならば、難解な落石の力学特性を明らかにしていく上で、岩塊の接触はいくつかの点の接触で評価すべきであると考えられる。粒状要素法を岩盤斜面の安定性解析に適用し、落石発生の危険性を力学的に検討するのに役立てるためには、岩塊同士の接触を点接触



図—6 複雑な表面形状のモデル化



図—7 浮き石モデル

を基本として表現し、岩塊の複雑な表面形状や噛み合いの効果を直接的に考慮できる形状の剛体要素を用いた解析を行うべきであろう。

### 3. 浮き石のモデル化

個別要素解析で様々な要素形状を表現するために、円を組み合わせる手法が提案されている<sup>9)</sup>。この手法を応用して岩塊の複雑な表面形状を表すこととした。ただし、ここでは円と円を結ぶ間隙がネは導入しない。円同士は密着させたものとする。

図—6に示すのは浮き石モデルの例である。実線が要素の輪郭を表している。点線で示すいくつかの円は複雑な表面形状をモデル化するために配置されたもので、他の要素との接触の判定はこれらで行う。接触に関する解析定数は、Hertzの理論を適用して材料定数との関わりから明確に定めることができる。なお、輪郭線の内側には物質が均等に存在するものとみなし、要素の質量などは重なり合って局在する円とは無関係と考える。図に示す例のように著しく複雑な形状の要素の場合は、要素の質量などの決定に際し近似的取り扱いも必要となろう。

浮き石モデルの表面形状に関してはかなり自由に設定することができ、実際の岩塊に限りなく近づけることも可能である。しかし、ここでは噛み合いの効果を定量的に評価するために、同じ半径の円を規則的に重ね合わせた剛体要素を考えることとした。円の中心は同一直線上にあるものとし、隣り合う円同士の重なり量をその直線上で測った長さを $dr$ 、円の半径を $r$ とする。図—7に描

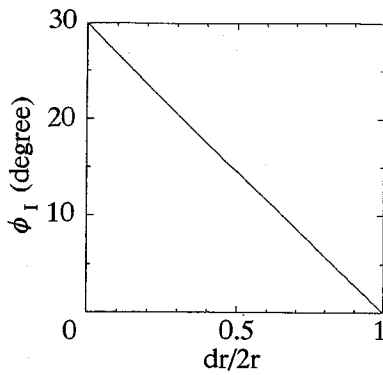


図-8 円の重なり度合いと噛み合いによる摩擦角  $\phi_r$  との関係

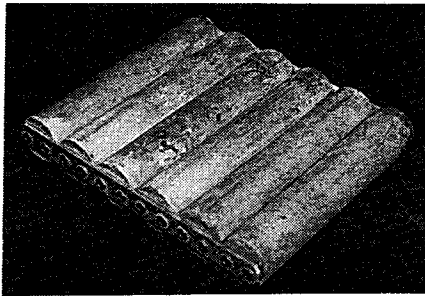


写真-2 モルタル製の供試体

いたのは2つの要素が接触している状態である。接触はいくつかの円同士の間点接触により与えられる。

図-7の要素の場合、要素間の摩擦角は接点の摩擦による摩擦角  $\phi_F$  と噛み合いによる摩擦角  $\phi_I$  という2成分の和で与えられる。 $\phi_I$  は幾何学的関係から決定される。その関係を式に表すと次のようになる。

$$\sin\phi_I = dr/(4r) \quad (1)$$

式(1)をもとにして、 $dr/2r$  と  $\phi_I$  の関係を計算した結果が図-8である。このように、図-7の浮き石モデルを用いると、 $dr/2r$  を変化させて噛み合いによる摩擦角の成分  $\phi_I$  を調整することができる。

#### 4. モデル斜面の安定性に関する粒状要素解析

3. で示した浮き石モデルを積み上げることにより岩盤斜面をモデル化し、その安定性を粒状要素法で解析することを試みる。解析結果の妥当性を実験で検証することは重要であると考えられるので、ここでは実際にモルタル製の供試体を用いた実験も行った。

##### (1) 問題の設定

モルタル製の円柱ブロック(半径2cm, 高さ20cm)をいくつか連結させ、図-7の浮き石モデルにおいて  $dr$

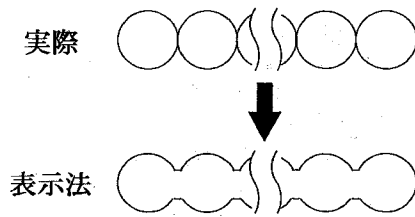
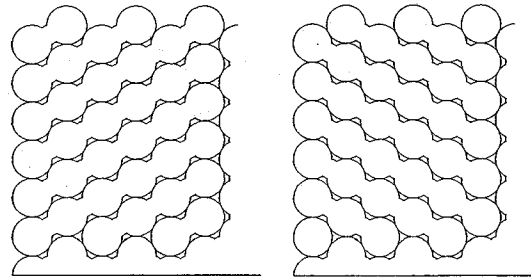


図-9 連結要素の表示



(a)モデル斜面1

(b)モデル斜面2

図-10 落石斜面のモデル化

を0としたものに相当する供試体を作製した。写真-2に示したのは供試体の一つである。これらを積み重ねて岩盤斜面をモデル化し、その安定性を調べる。なお、供試体における円柱の連結部を明確にするために、図-9のような表示法を採用することとした。

現地調査データの多変量解析<sup>1)</sup>で落石発生に影響する重要な因子の1つとして評価された「斜面と割れ目の交角」に着目し、流れ目状の割れ目と差し目状の割れ目をそれぞれ図-10(a), (b)に示すようにモデル化し、モデル斜面1, モデル斜面2と呼ぶことにする。両モデル斜面とも一つ一つの円は最密充填となるように配置されており、要素の連結のされ方だけが異なる。積み重ねられている割れ目方向と水平面のなす角はどちらも30度となっている。浮き石群を支えている周囲の要素は斜面に固定した。これらのモデル斜面を傾けていき、積み上げた浮き石モデルが崩れ始める角度を調べる。

##### (2) 供試体の摩擦角と実験結果について

モルタルの摩擦角は、表面粗度を円柱ブロックと同じにしたモルタル製の直方体ブロックを用いた傾斜実験から24度と求められた。この値は接点の摩擦による摩擦角  $\phi_F$  に当たる。一方、円柱を連結させた供試体を用いて傾斜実験を行ったところ、得られた摩擦角は53.9度であった。したがって、供試体の摩擦角の噛み合いによる成分  $\phi_I$  は全摩擦角53.9度から  $\phi_F$  の分だけ差し引いた29.9度と求められる。図-8では  $dr$  が0のとき  $\phi_I$  が30度となることが示されており、作製したモルタル

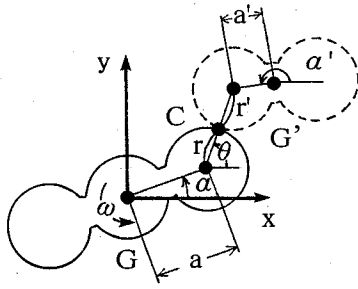


図-11 要素 G と要素 G' の接触

製供試体は想定している浮き石モデルによく対応し、実験に用いるのに適当であることを確認した。

傾斜実験装置を用いて、モデル斜面 1 とモデル斜面 2 が崩壊したときの傾斜板の角度を求めた。なお、先に述べた通り傾斜板の傾斜可能な角度は 45 度までなので、モデル斜面 2 については、予めモデル斜面自体をある程度傾けた状態で図-4 の傾斜板上に設置した。したがって、このときの斜面の傾斜角の初期値は 0 度となっていない。

崩壊時には、ほとんどすべての供試体が一齐に落下し、傾斜板に衝突した供試体に別の供試体が激しく衝突する中で、細長い円柱ブロックは折れてしまうものが多かった。このため同じ供試体を繰り返し実験に用いることができなかつたので、実験はそれぞれのモデル斜面で 1 回ずつ行ったのみである。ただし、実験を行うに当たっては細心の注意を払っている。

流れ目状の割れ目の入ったモデル斜面 1 が崩壊したときの傾斜角は 24.1 度、差し目状の割れ目の入った斜面モデル 2 が崩壊したときの傾斜角は 57.3 度であった。差し目状の割れ目のある斜面の方が流れ目状の割れ目のある斜面より安定であるという結果は、現地調査データの多変量解析の結果と一致した<sup>1), 2)</sup>。

### (3) 解析手法

解析に適用する粒状要素法は、要素集合体の力学的境界値問題を解くために提案された手法であり、浮き石モデルの集合体が崩壊に至るまでの準静的な変形過程を調べるのに適している。ここでは便宜上、奥行き方向に関して力学的挙動の差はないものと仮定し、2次元の問題を扱うこととする。各要素の動きは、要素ごとに求められる剛性行列（後述する  $S_{GG}$  あるいは  $S_{G'G'}$ ）をまとめて全体剛性行列を作成し、式 (2) の方程式を解くことによって求める。

$$[K]\{\Delta u\} = \{F\} \quad (2)$$

ここに、 $[K]$  は全体剛性行列である。 $\{\Delta u\}$  は各要素の現在の状態からの変位増分を表すベクトルを並べたもの、 $\{F\}$  は現在の状態で各要素に作用している合力を

表すベクトルを並べたものである。

いま、図-11 のように、要素 G と要素 G' が C 点で接するものとする。ただし、図中の黒丸印は要素の重心、円の中心あるいは接点を表している。C 点での接触に着目して式 (2) 中の行列とベクトルの内容を示すと次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & S_{GG} & S_{GG'} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & S_{G'G} & S_{G'G'} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_G \\ \Delta u_{G'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_G \\ F_{G'} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta u_G = (\Delta x, \Delta y, \Delta \omega)_G^T$  は要素 G の現在の状態からの変位増分を表すベクトルで、 $\Delta x, \Delta y$  は  $x, y$  方向の変位増分、 $\Delta \omega$  は回転角増分で反時計回りを正とする。 $F_G = (F_x, F_y, M)_G^T$  は現在の状態で要素 G に作用する合力を表すベクトルで、 $F_x, F_y$  は  $x, y$  方向の作用力、 $M$  はモーメントで反時計回りを正とする。また、

$$S_{GG} = \sum_C \begin{bmatrix} k_n \cos^2 \theta + k_t \sin^2 \theta \\ (k_n - k_t) \sin \theta \cos \theta \\ k_n a \sin(\theta - \alpha) \cos \theta - k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \sin \theta \\ (k_n - k_t) \sin \theta \cos \theta \\ k_n \sin^2 \theta + k_t \cos^2 \theta \\ k_n a \sin(\theta - \alpha) \sin \theta + k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \cos \theta \\ k_n a \sin(\theta - \alpha) \cos \theta - k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \sin \theta \\ k_n a \sin(\theta - \alpha) \sin \theta + k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \cos \theta \\ k_n a^2 \sin^2(\theta - \alpha) + k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r)^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

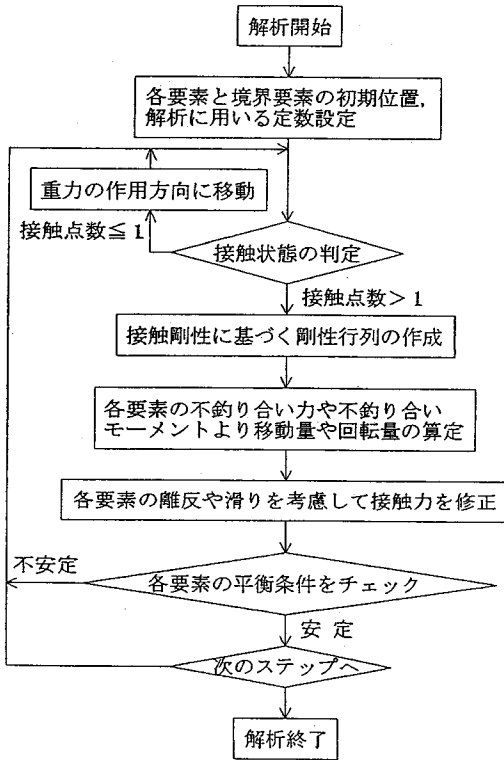
は G の動きにより G に与えられる接触力を評価する 3 行 3 列の剛性行列で、

$$S_{G'G} = \sum_C \begin{bmatrix} -k_n \cos^2 \theta - k_t \sin^2 \theta \\ -(k_n - k_t) \sin \theta \cos \theta \\ -k_n a' \sin(\theta - \alpha') \cos \theta + k_t (a' \cos(\theta - \alpha') - r') \sin \theta \\ -(k_n - k_t) \sin \theta \cos \theta \\ -k_n \sin^2 \theta - k_t \cos^2 \theta \\ -k_n a' \sin(\theta - \alpha') \sin \theta - k_t (a' \cos(\theta - \alpha') - r') \cos \theta \\ -k_n a \sin(\theta - \alpha) \cos \theta + k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \sin \theta \\ -k_n a \sin(\theta - \alpha) \sin \theta - k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) \cos \theta \\ -k_n a a' \sin(\theta - \alpha) \sin(\theta - \alpha') \\ -k_t (a \cos(\theta - \alpha) + r) (a' \cos(\theta - \alpha') - r') \end{bmatrix} \quad (5)$$

は G の動きにより G' に与えられる接触力を評価する 3 行 3 列の剛性行列である。ここに、 $k_n, k_t$  はそれぞれ法線方向、接線方向の接触剛性である。 $\sum_C$  は、動かす側

表一 崩壊時の斜面の角度

	モデル斜面1	モデル斜面2
実験	24.1度	57.3度
解析	24.0度	57.0度



図一12 解析の流れ

の各要素ごとに全接点に関する和を算定すべきことを表している。和を算定するのは、一般に  $G$  は  $G'$  以外の要素とも接する場合が存在し、また  $G$  と  $G'$  は2点以上で接する場合が存在するからである。

解析の流れは図一12に示すとおりである。接触点が1以下の要素は明らかに不安定状態にあるので、全体剛性行列を組む前に接触点が2以上になるまで力の作用方向に移動させる措置をとっている。なお、全体剛性行列の対角項には接触点の剛性と比較して十分小さな値（ここでは1）を加える。これは行列が特異とならないよう配慮したもので、力学的には不安定状態にある要素を力の作用方向に動かすことに相当する効果がある。斜面の傾斜角は重力の作用方向を回転させることによって増加させる。傾斜角は0.1度ずつ増加させ、その都度十分な精度で各要素の力の平衡状態が得られるまで計算を繰り返す。

解析定数はモルタル製ブロックの物性値に対応させることとした。単位体積重量は  $21.56 \text{ N/m}^3$ 、接点の摩擦角は24度で、どちらもモルタル製ブロックの値を採用した。ヤング率  $29.4 \text{ GPa}$ 、ポアソン比0.2は、コンクリートの値がそれぞれこの程度であることを参考にして決定した。法線方向の接触力  $q$  と接触剛性  $k_n$  は Hertz の理論<sup>10)</sup>を適用して算定した。すなわち、 $q$  は接触する

2円柱間の重なり量  $\delta$  をもとに式(6)、(7)より繰り返し計算で求めた。 $b$  は理論から与えられる接触幅である。

$$q = \pi E \delta / \{2(1-\nu^2) [2/3 + \ln(4r_1/b) + \ln(4r_2/b)]\} \quad (6)$$

$$b = [8qr_1r_2(1-\nu^2) / \{\pi E(r_1+r_2)\}]^{1/2} \quad (7)$$

ここに、 $\pi$  は円周率、 $E$  はヤング率、 $\nu$  はポアソン比、 $r_1$ 、 $r_2$  は接触する2円柱の半径である。 $k_n$  は  $q$  を  $\delta$  で微分して求められる次式で算定した。

$$k_n = 1 / \{\delta / q - 2(1-\nu^2) / (\pi E)\} \quad (8)$$

式(8)より、 $k_n$  は接触力の大きさ  $q$  に応じて変化することがわかる。接線方向の接触剛性  $k_t$  は簡単のため  $k_n$  に比例するものと近似した。弾性体の接触問題における Mindlin 解<sup>11)</sup>によれば  $k_n$  と  $k_t$  のオーダーは同一と考えてよい。ただし、この解を導く理論によれば接線方向接触力の増加に伴い接触面内（同理論では円同士の接触を点の接触ではなく面の接触として議論する）に微小ではあるが部分的に滑りが発生する。このため  $k_t$  は減少し、最終的に接線方向接触力が摩擦角で定められる滑りを生じる限界値に達すると接触面全体が滑り出すので  $k_t$  は零となる。そこで、滑りを生じる限界値までは  $k_t/k_n = 0.7$ 、滑りを生じている場合には  $k_t/k_n = 0$  に設定した。

モデル斜面全体が安定状態にあるならば、数回の繰り返し計算から各要素の力の平衡状態を得ることができる。ところが、傾斜角がある値になると、計算を数多く繰り返しても各要素の力の平衡状態を得ることができなくなる。これは斜面が不安定状態となったためであり、このときの傾斜角で斜面は崩壊したとみなし、計算を中止した。

#### (4) 解析結果とその考察

流れ目状の割れ目をモデル化した斜面は23.9度の傾斜までしか安定した状態が得られず、接点の摩擦角24度で崩壊した。これに対し、差し目状の割れ目をモデル化した斜面は安定性が高く、56.9度まで安定した状態を得ることができ、57度で崩壊した。表一に示す通り、実験結果と解析結果はよく一致した。また、先にも述べたように、この結果は現地調査データの多変量解析の結果とよく対応したものとなっている<sup>11,2)</sup>。

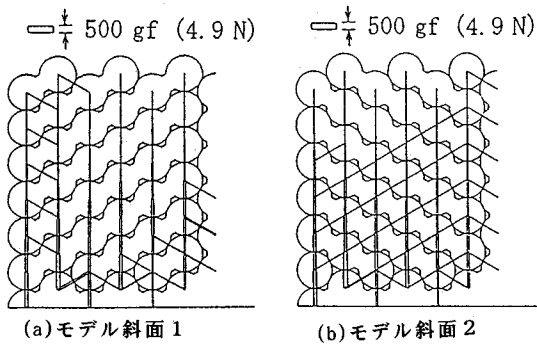


図-13 初期状態の接触状況

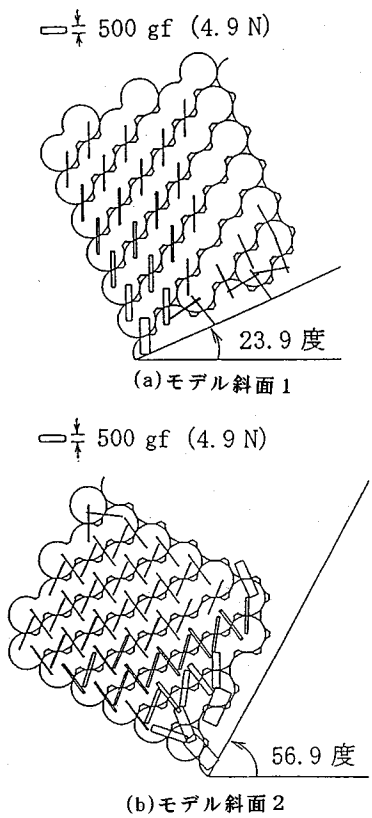


図-14 崩壊直前の接触状況

図-13, 14に図-10に示した2つのモデル斜面の初期状態（モデル斜面を水平に置いた状態）と崩壊直前の状態における接触状況を示す。図示したのはすべて十分な精度で力の釣り合いが満たされた安定状態である。図中に描かれた長方形が要素間に作用する接触力の大きさと向きを表している。長方形は、接する2円の中心を結んだ直線に接触力の大きさと比例した幅を持たせたものである。この幅を持たせた直線を、接点を中心として回転させることにより接触力の向きを表している。

初期状態は、隣接する円がちょうど接するように各要素の座標値を入力し、接点摩擦角が零という条件のもとに各要素が力の釣り合いを満たすよう剛性行列に基づいて要素を動かして求めたものである。力の大きさの分布で若干不自然に感じられるところがあるのは、周囲に配置した要素の動きを完全に固定している点の影響したものである。

流れ目状の割れ目をモデル化したモデル斜面1についてみると、崩壊直前の接点の数は初期状態のその半分ほどに減少しており、要素間の接触力は接触面全体ではなく斜面下方側の点接触だけで支えられている。これは岩塊の浮き上がった状態を表している。それぞれの点に作用する接触力は接触法線に対して傾いていることを含め、浮き石が滑り出す直前の力学的状況がよくとらえられている。

一方、差し目状の割れ目をモデル化したモデル斜面2では、崩壊直前まで多くの点接触が存在し、モデル斜面1でみられたブロック要素の浮き上がりは生じていない。これはこのモデル斜面が安定であることと対応する。なお、崩れる直前は割れ目が差し目状でなくなるほど斜面が傾いており、一見不安定な状態が安定状態として求められている。この理由は、下部の4要素が周囲の固定された要素の間に支えているためである。接触力分布図をみるとこの状況を明確に把握することができる。

なお、2つのモデルの崩壊直前の接触状況を見ると、ブロックの崩壊は上部から発生するように予測される。本解析では準静的な変形過程のみを対象としており、ブロックの崩壊過程は詳しく調べていないが、上部のブロックが動くとその下のブロックもそれに引きずられて動き出すことを確認した。この状況は、実験においてほとんどすべての供試体が一斉に落下した点と対応する。

以上、粒状要素解析によって実験をよくシミュレートできること、現実の岩盤斜面の特徴に適應させた解析ができること、また内部の接触状況などの実験で把握が困難な情報を容易に明らかにできることがわかった。岩盤斜面における割れ目の発達状況を分類整理し、それぞれに対応させてモデル化した岩盤斜面の安定性を本解析手法を用いて比較検討すれば、落石発生までの力学特性を明らかにし、これを実際の落石の危険性評価に役立たせることができると考えられる。

### 5. あとがき

割れ目の発達状況等の異なるいくつかの岩盤斜面を対象として、落石発生の危険性を評価することは工学上重要である。そこで、粒状要素法を適用して、岩盤斜面に存在する割れ目の発達状況等を浮き石の集合体でモデル化し、その安定性を力学的に検討することを試みた。本

研究をまとめると次のようになる。

1) 解析に先駆けて、市販のモルタル製ブロックの斜面上の安定性に関するモデル実験を行い、浮き石同士の接触は点接触を基本としてとらえるのが落石発生機構を解明していく上で重要と判断し、円を組み合わせて表面に凹凸を与えた浮き石モデルを採用した。このモデルを用いれば、岩塊同士の摩擦を、接点摩擦による成分と噛み合いによる成分の2つに分けて与えることができる。

2) 現地調査データの多変量解析で落石発生に影響する重要な因子の1つとして評価された「斜面と割れ目の交角」に着目し、流れ目状の割れ目をもつモデル斜面と差し目状の割れ目をもつモデル斜面の安定性を実験と解析により比較した。モデル斜面の崩壊時の角度は実験と解析でよく一致し、解析結果は妥当であることが検証された。

3) 上記の実験・解析において、差し目状の割れ目のあるモデル斜面の方が流れ目状の割れ目のあるモデル斜面より安定であるという現地調査データの多変量解析結果と一致する結果が得られた。このことから、浮き石モデルを積み重ねて岩盤斜面をモデル化し、その安定性を調べる本解析手法に対して、ある程度の適用性を確認することができた。

4) シミュレーション解析は、実験で明らかにすることができなかった浮き石同士の接触状況の可視化を可能とするので、落石発生機構に関する力学的考察のために有用であることを示すことができた。

以上のように、岩盤斜面における割れ目の発達状況と落石発生の危険性との関係を力学的に検討するために、本解析手法を役立てられる見通しが立った。次の段階として、実際の岩盤斜面にみられる様々な特徴をモデル斜面に取り込んだ解析を進め、それぞれの斜面に対する落石発生までの力学特性の把握に取り組んでいきたい。

謝辞：本研究に対して建設工学研究振興会より助成を賜りました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 村上幸利, 五味貞夫: 切り取り斜面の落石型小規模崩壊に関する素因の分析例, 土と基礎, 第38巻, 第7号, pp.69-74, 1990.
- 2) 村上幸利, 五味貞夫, 土倉 泰: 数値化分析結果に基づいた採点法による剝落型落石斜面の危険度判別, 土木学会論文集, No.444/VI-16, pp.147-152, 1992.
- 3) 岸野佑次: 新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析, 土木学会論文集, No.406/III-11, pp.97-106, 1989.
- 4) 土倉 泰: 任意形状の要素を用いた粒状要素法とその応用, 構造工学論文集, Vol.39 A, pp.399-406, 1993.
- 5) 木山英郎, 藤村 尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第333号, pp.137-146, 1983.
- 6) Cundall, P.A.: A Computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, *Proc. Int. Symp. ISRM*, Nancy, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 7) 石田 毅, 日比野敏, 北原義浩, 伊藤 洋: 個別要素法のプログラム開発とブロックモデルによる実験的検討, 電力中央研究所報告, 研究報告 383014, 1983.
- 8) Bray, J.W. & Goodman, R.E.: The theory of base friction models, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.18, No.6, pp.453-468, 1981.
- 9) Meguro, K., Iwashita, K. and Hakuno, M.: Fracture analyses of media composed of irregularly shaped regions by the extended distinct element method, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.8, No.3, pp.131 s-142 s, 1991.
- 10) Warren C. Young: *Roark's formulas for stress and strain*, McGraw-Hill Book Company, pp.650-651, 1989.
- 11) Mindlin R.D.: Compliance of elastic bodies in contact, *J. Appl. Mech.*, Vol.71, pp.259-268, 1949.

(1994.7.29 受付)

## APPLICATION OF THE GRANULAR ELEMENT METHOD TO THE STABILITY ANALYSIS ON THE MODELS OF ROCK SLOPES

Toru TSUCHIKURA, Tetsuya FUKASAWA  
and Yukitoshi MURAKAMI

From the view-point of disaster prevention, it is of importance to estimate the possibility of rockfall on rock slopes. In this paper, rock slopes are modeled as the aggregation of rock blocks and the granular element method is applied to analyse their stability. By considering the result of an elementary test of rockfalls, a model element which can properly describe the asperity of a rock block is employed. The results of analysis have verified the applicability and availability of the method. This method is considered to contribute to the investigation into the relationship between the possibility of rockfalls and the conditions of cracks developed in rock slopes in mechanical respect.