

自然石の形状をモデル化した粒状要素解析

Granular Element Analysis using irregularly shaped elements modeled by natural stones

土倉 泰*

Toru Tsuchikura

*正会員 工博 前橋工科大学助教授 工学部建設工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

Stone-piling structures are considered to match with natural landscape and to be environmentally friendly. However, it is necessary to acquire experience for making safe structure by stones and mechanical background of its safety is not so clear. Therefore, the Granular Element Analysis is thought to be practical use to investigate the safety of stone-piling structures. In this paper, as the first step of the research, irregularly shaped natural stones are modeled by adopting a collection of spheres and three models of natural stones are piled and are investigated on stability by tilting tests. From the comparison between physical tests and numerical simulations, it is found that this analysis is applicable for the investigation.

Key Words: Granular Element Method, stone-piling structure, toppling failure

1. まえがき

道路、堤防、橋梁などあらゆる土木施設に石積みは古くから利用されてきている。田畑の周囲に石垣がみられることも多い。また、明治期には数多くの巨石積み砂防堰堤が作られている。群馬県にも 2004 年 11 月に土木学会より推奨土木遺産に指定された榛名山麓砂防堰堤群が存在する¹⁾。

構造物にも環境、景観への配慮を求める社会的気運のなかで、自然環境と調和する石積み構造物が見直されている。写真-1 に示すのは群馬県が 2004 年に作った空積みの砂防堰堤である。直径 1m 程度の比較的大きな石を積み重ねて作られた巨石積み堰堤である。このような構造物の築造工程は、環境保全技術の一つとして位置づけられている。

ところが、石積みは石の組み合わせ方によってその安定性が大きく異なる。古来、石積み職人は経験的に崩れやす

い積み方と崩れにくい積み方を見極め、堅固な積み方あるいは避けるべき不安定な積み方を今日まで伝えてきた。しかし、それは限られた職人集団内での伝承であり、ナレッジマネジメントとして不十分な状況にある。また、その伝統的な技術には科学的・力学的観点からの裏づけがないため、性能設計に馴染みにくく、このことは石積みを経済保全技術として推進していく上での障害となっている。

そこで、著者は粒状要素法を石の空積み構造物に対する安定性解析に適用したいと考えた。粒状要素法は、剛体の集まりの挙動を扱うという意味で個別要素法の一つである。個別要素法が主に崩壊過程を追跡する動的解析法であるのに対し、粒状要素法は、ある力の条件下における剛体の集まりの安定状態を求める手法である。したがって、安定状態を求める際の収束性がよく、ある条件下の安定・不安定の別を容易に確定できるという特長がある。

本文では、研究の第一段階として、実際の自然石の形状を計測してモデル化し、限られた数ではあるが、それらを積み重ねて傾斜を与え、どの程度の傾斜まで安定性を保つことができるのかをシミュレートした。そして、計測した実物の自然石を積み重ねてシミュレーションに対応する実験を行い、実験結果との比較によって、モデル化の精度について検討した。

2. 球の接触を基本とした定式化

2.1 粒状要素法の概要

粒状要素法²⁾⁴⁾は剛体の集まりに力が作用したときに



写真-1 石積み構造物の例 (砂防堰堤)

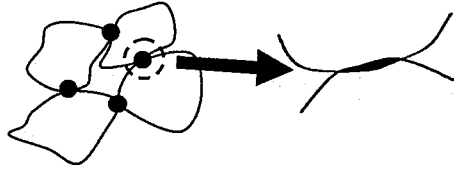


図-1 要素の重なった部分を接触とみなす

個々の剛体がどのような動きをするかをシミュレートできる手法であり、個別要素法の一つといえる。個々の粒子をモデル化した要素は、独立に移動・回転ができる。要素間には図-1のように非常に小さな重なりを許し、その重なり度合いと接触点に仮定した剛性に基づいて接触力を算定する。接触力の算定に Hertz の理論を用いれば、材料の弾性係数を反映させた計算が可能である。

個別要素法と粒状要素法との違いは、要素の移動・回転量の算定式にある。個別要素法においては、作用外力に応じた運動方程式に基づいて要素が動かされる。これに対して粒状要素法では、各要素の接触状況から算出される剛性行列をもとに、力の釣り合い状態に向かう動きが要素に与えられる。粒状要素法では基本的に力の釣り合いを求める計算が行われるので、剛体の集合体の安定状態を求める問題を解析するのに適していると考えられる。

2.2 剛性行列

球の接触を判定するのは計算上容易なので、自然石の複雑な形状をモデル化するために、多数の球を剛接した要素を用いるのが効率的と考えられる。実際、従来の個別要素法解析でこの方法が種々用いられている^{5)~7)}。ここでは、粒状要素法において球を用いた解析を行う場合の剛性行列を示す⁴⁾。なお、一般に球の中心は要素重心とは一致しないものとする。

いま、要素重心を G 、球の重心を O 、接触点を C としてそれぞれの幾何学的関係を図-2のように表す。要素重心 G には x, y, z 軸の座標、接触点 C には n, t_ϕ, t_θ 軸の座標を設ける。これは接触点の剛性を要素ごとにまとめるためである。力の釣り合っている剛体要素の集合体に何らかの力が加わると個々の要素が動く。その動きは、式(1)の関係式より求められる。右辺の左側の行列が剛性行列である。

$$\begin{pmatrix} \Delta F_N \\ \Delta F_M \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_N \\ \Delta U_M \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、

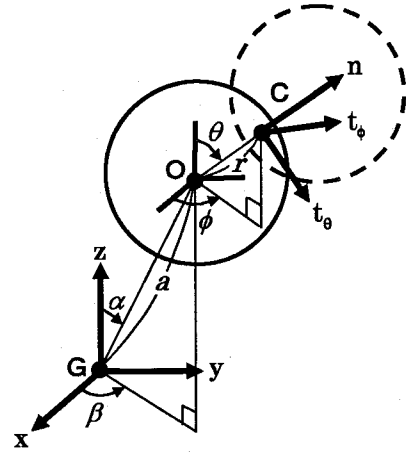


図-2 要素重心 G 、球重心 O 、接触点 C の関係⁴⁾

$$\Delta U_N = (\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z, \Delta \omega_x, \Delta \omega_y, \Delta \omega_z)_N^t \quad (2)$$

は要素 N の重心において x, y, z 軸で表される平行移動・回転を成分とした 6×1 の行列で、 t は行列の転置を表す。この式で、 $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ は x, y, z 軸で表す座標でとらえた変位、 $\Delta \omega_x, \Delta \omega_y, \Delta \omega_z$ はそれぞれ x, y, z 軸で表す座標でとらえた回転である。なお、変位は各軸の正の向きを正とし、回転量は各軸の正の向きにみて右回りを正としている。また、 ΔF_N は全要素の動きにより解消される要素 N に関わる不釣り合い力・不釣り合いモーメントを表す行列であり、

$$\Delta F_N = (\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta f_z, \Delta m_x, \Delta m_y, \Delta m_z)_N^t \quad (3)$$

である。ここに、 $\Delta f_x, \Delta f_y, \Delta f_z$ はそれぞれ x, y, z 軸で表す座標でとらえた力、 $\Delta m_x, \Delta m_y, \Delta m_z$ はそれぞれ x, y, z 軸で表す座標でとらえたモーメントである。なお、力は各軸の正の向きを正とし、モーメントは各軸の正の向きにみて右回りを正とする。さらに、

$$S_{NN} = \sum_C T_{NC}^t S_C T_{NC} \quad (4)$$

は要素 N の動きにより要素 N に生じる力を算定する 6×6 の剛性行列で、

$$S_{NM} = \sum_C T_{NC}^t S_C' T_{MC} \quad (5)$$

は要素 M の動きにより要素 N に生じる力を算定する同じく 6×6 の剛性である。これらの式中の $\sum_C$ は要素のすべての接触点についての和を表す。ここに、

$$T_{NC} = \begin{pmatrix} \sin\theta \cos\phi & \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \\ \cos\theta \cos\phi & \cos\theta \sin\phi & -\sin\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{pmatrix}$$

$$a(\cos\theta \sin\alpha \sin\beta - \sin\theta \sin\phi \cos\alpha) \\ - a(\cos\theta \sin\phi \cos\alpha + \sin\theta \sin\alpha \sin\beta) - r \sin\phi \\ - a \cos\phi \cos\alpha - r \cos\theta \cos\phi$$

$$\left. \begin{aligned} &a(\sin\theta \sin\phi \sin\alpha \cos\beta - \sin\theta \cos\phi \sin\alpha \sin\beta) \\ &a(\cos\theta \sin\phi \sin\alpha \cos\beta - \cos\theta \cos\phi \sin\alpha \sin\beta) \\ &a(\cos\phi \sin\alpha \cos\beta + \sin\phi \sin\alpha \sin\beta) + r\sin\theta \end{aligned} \right\}_{\text{NC}} \quad (6)$$

は x, y, z 軸の座標で表した要素 N の移動・回転量を接触点 C における n, t, f 軸の座標の変位に変換する 3×6 の行列で、記号の定義は図-2 の通りである。そして、

$$\mathbf{S}_C = \begin{pmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{pmatrix}_C \quad (7)$$

は n, t_0, t_0 軸の座標での接触点の剛性からなる行列であり,

$$\mathbf{S}_C' = \begin{pmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & -k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{pmatrix}_C \quad (8)$$

も同様の行列である。 k_n , k_t はそれぞれ接触点における法線, 接線方向の剛性である. 式(8)の行列の成分で, t_0 軸の k_t に負の符号が付くのは, 接触する 2 球 (図-2 の実線の球と破線の球) で, t_0 軸の向きが同一となるためである.

なお、計算を行う中で、ある要素が接触点を持たず空中に浮いた状態となったり、すべりによってある方向への要素の動きに対する拘束がなくなったりすると、式(1)の剛性行列が正則でなくなる。このような状態でも計算を安定に続けるため、剛性行列の対角成分には接触点の剛性と比べて十分小さな値を加えておく。この小さな成分は、不釣り合い力の方向へ要素を若干動かすが、接触による剛性から導かれる要素の動きに大きな影響は与えないと考えられる。

2.3 Hertz の理論に基づく球の剛性

ここでは球の Hertz 式^{8),9)}を著者なりに整理した形で示す。なお、式中の δ は円の重なり量、 p_n は接触力の法線方向成分を表す。 k_n は p_n を δ で微分して求める。

弾性係数が E_1, ν_1 の平板と弾性係数が E_2, ν_2 で半径 r の球との接触力の法線方向成分 p_n は次式で算定される.

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{\frac{9}{16r} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

また、この場合の剛性は、次のようになる.

$$k_n = \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{9}{16r} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} \delta^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

弾性係数が E_1 , v_1 で半径が r_1 の球と, 弾性係数が E_2 , v_2 で半径が r_2 の球が接触する場合の接触力の法線方向成分 p_n は以下の式によって算定できる.

$$p_n = \frac{1}{\sqrt{\frac{9(r_1+r_2)}{16r_1r_2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

また、この場合の剛性は、次のようになる.

$$k_n = \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{\frac{9(r_1+r_2)}{16r_1r_2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^2}} \delta^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

一方、接触平面内の接触力成分 p_t は接触剛性 k_t に接触点の接線方向の相対変位をかけて算定する。接触剛性の接線方向成分 k_t は、Mindlin の導いた次式で算定できる¹⁰⁾。

$$k_t = \frac{1}{\alpha} k_n \times \left(1 - \frac{p_t}{p_n \tan \phi_\mu} \right)^{1/3} \quad (13)$$

ここに、 ϕ_μ は摩擦角である。また、 α は1から15程度の値である。後述の解析では簡単のため α を1としている。

3. 自然石モデルとその積み上げ

3.1 形状の計測とモデル化

本文で用いるモデルは、いくつかの自然石の形状を実際に手作業で計測して作成した。計測した自然石の大きさは20cm 程度である。一例を写真-2 に示す。はじめに計測結果に基づいて一辺 1cm の立方体剛接モデルを作成し、これを接触判定の便宜のため球剛接モデルに置き換える。

まず、自然石を平らな床の上に置く。写真-2 では XY 面が床に相当し、Z 軸がその床に直交する軸である。次に XZ 面と平行に自然石を切断したとき表面に表れる輪郭線を描く。写真-2 ではこれを実線で示す。この線を XZ 断面としてグラフ用紙上に写し取る。さらに XY 面に平行で間隔 1cm の複数の面で自然石を切断する。写真-2 の破線がそのときにできる断面の輪郭線である。破線の輪郭線を、実線との交点 2 点とともに、XY 断面としてグラフ用紙上に写し取る。このとき、実線との交点 2 点の X 値は XZ 断

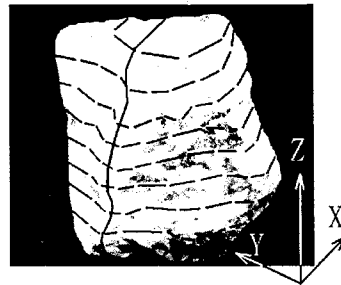


写真-2 自然石の形状測定

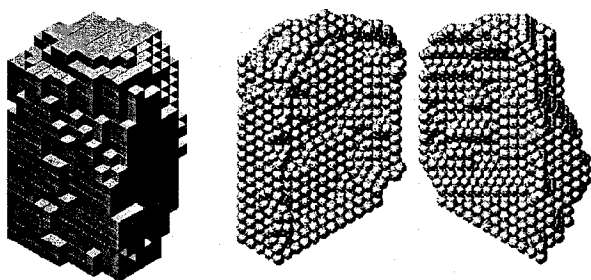


図-3 立方体剛接モデルと球剛接モデル

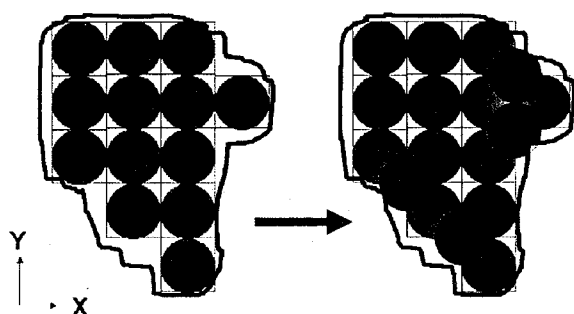


図-4 XY断面の輪郭部設定

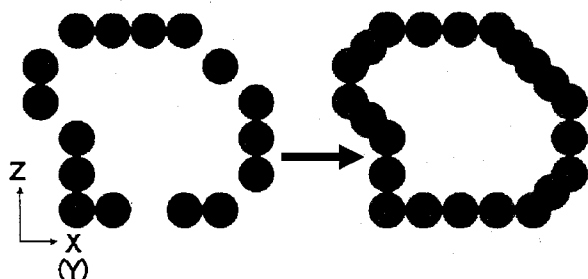


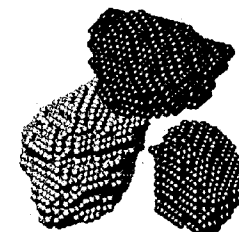
図-5 XZ断面(YZ断面)の輪郭部補正

面での値と合わせる。そして各 XY 断面に、Z 軸方向からみると重なる縦横間隔 1cm の格子枠をあてはめる。格子枠でできる正方形のうち、面積の半分以上が断面に入るものを選び、その正方形の中心に重心を合わせた一辺 1cm の立方体群を剛接し、図-3 左のようなモデルを作成した上で、この立方体剛接モデルを用いて重心を求めておく。

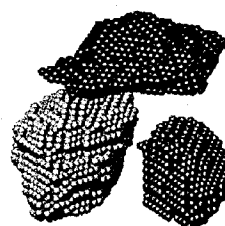
ただし、接触の判定・剛性の設定には球を用いるのが便利である。そこで、立方体剛接モデルを、表面だけに球を配置した球剛接モデルに置き換えて計算に利用する。図-3 右図は、左図のモデル表面を球の集合体に置き換えたもので、内部が空洞であることを示すために二つ割りで描いている。球モデルへの置き換えは次のように行う。まず、図-4 のように XY 断面の輪郭部に位置する立方体に球を内接させる。このとき階段状の段差が角にできる場合があるので、右図のように段差を埋める球を同一平面上に配置する。次に、XZ あるいは YZ 断面と平行でかつ球の重心が存在する面を表示すると、図-5 の左図のように輪郭部に段差があり、また、隙間ができる可能性もある。そこで、図-5 の右図のように段差と隙間に球を配置する。大きさ 20cm 程度の石を 600~1200 個の球で形作ることができた。

3.2 石の配置の決め方

(a) 2 つの石の脇に上載する石を準備した状態



(b) 2 つの石の上に石を平行移動させた状態



(c) 石を回転させた状態

図-6 積み上げるモデルの位置決め

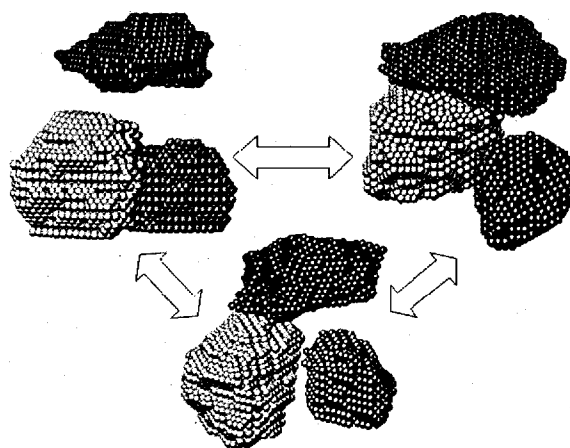


図-7 様々な方向からのモデルの位置関係把握

伝統的な石積み工において、石の組み方はその石積みの安定性を確保するために非常に重要なものと位置づけられている。したがって、現実的な解析を行うためには、自然石モデルの積み方に十分な配慮が求められる。

そこで、本研究では CAD ソフトを援用することとした。図-6 は積み上げる自然石モデルの位置決めの様子を示している。図のように CAD 上で位置を確認しながら、モデルに平行移動・回転を与えて適当な位置を決め、その後に重力を作用させる。なお、位置決めの際、図-7 のように様々な方向から位置関係を把握しつつモデルを動かした。

4. 傾斜実験のシミュレーション

4.1 摩擦角などのパラメータの設定

前章の方法で作成した自然石モデルを粒状要素法に適用することによって、定量的に妥当な解析ができるかどうかを確認するために、形状を計測した自然石を対象とする簡単な実験をシミュレートした。ここでは、自然石3個を積み上げたものに傾斜を与えて崩壊させる。

まず、安定性解析に先立ち、積み上げる自然石の土台になる花崗岩質の石板と自然石との摩擦角および自然石間の摩擦角を測定した。摩擦角の測定は、自然石の比較的平らな面を使って行った。図-8に示すように、自然石の重さとすべりの発生する直前の引張り力とを測定した。

実験の結果を示したのが、図-9および図-10である。石板と自然石との間の摩擦角は 41° ，自然石と自然石と

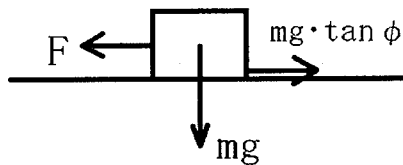


図-8 引張り力 F と重さ mg と摩擦角 ϕ の関係

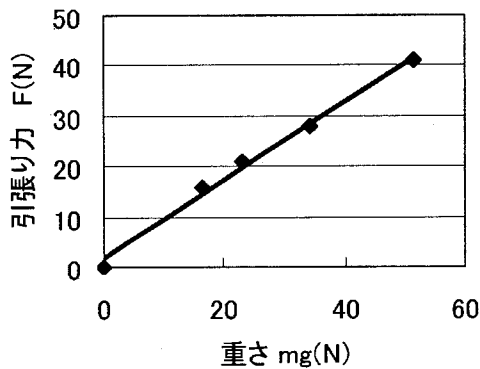


図-9 自然石と石板との間の摩擦実験

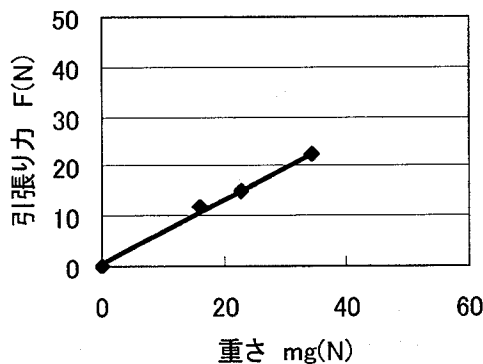


図-10 自然石と自然石との摩擦実験

の間の摩擦角は 36° となった。なお、既往の研究¹¹⁾と比べて摩擦角が大きめなのは、石の間の噛み合いの影響と考えられる。解析では実験で求められた値をそのまま用いた。

接触点の剛性には、2章に示す Hertz 式(9)~(13)を採用し、半径を $r = 0.5\text{cm}$ とした。そして、弾性係数は、一般的な石の値を参考にヤング係数を 60GPa ，ポアソン比を 0.2 とし、石板と自然石で同一とした。また、モデルの重さは形状を計測した自然石の値を用いた。密度は 2.39g/cm^3 である。なお、床となる石板については平面として扱う。

なお、粒状要素法は与えられた条件のもとで力のつりあい状態を求めるものである。ここでは、力の釣り合いの精度を、個々の自然石の重さより3桁小さい 0.01N とした。

4.2 石積みへの傾斜の与え方

傾斜を与えて崩壊させる石積みは2種類とし、石積みAおよび石積みBと称する。それぞれの実験および解析の石の初期配置を図-11、図-12に示す。同じ石積みに対して何通りかの実験・解析を行った。実験では、解析の初期配置の図を参照しながら同様の石積みを作成した。

各石積みに対して4通りの傾斜を与えた。図-13は傾斜を与える際の回転軸を定義したものである。座標の原点およびXY面は石板表面上にある。図中の太い矢印が傾斜



図-11 石積みA

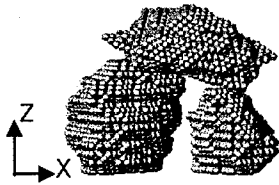


図-12 石積みB

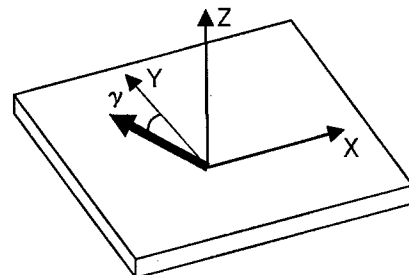
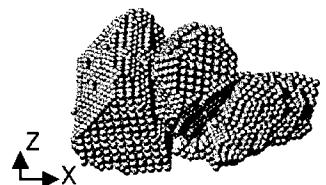


図-13 回転軸の方向 γ の定義

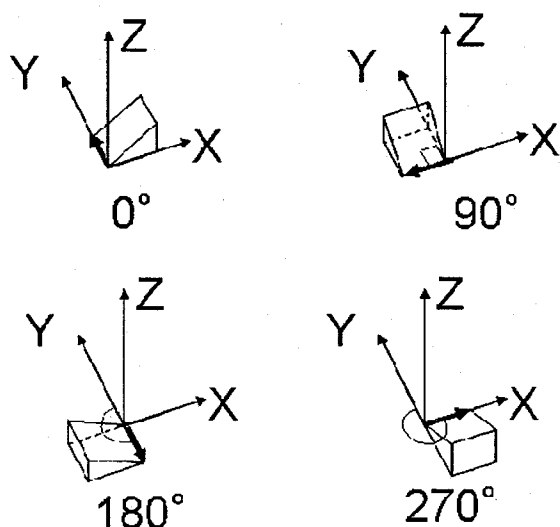


図-14 γ の値と回転でできる傾斜面の関係



写真-3 実験の様子

を与える際の回転軸を表す。回転軸を表す矢印は原点を始点として XY 面上にあり、Z 軸正の向きにみて時計回りに Y 軸からの角度 γ で定義する。ここでは、 γ を 0° 、 90° 、 180° 、 270° の 4 通りに設定した回転を与える。図-14 にそれぞれの γ の値に対応して得られる傾斜面の方向を示す。図中の三角柱の斜面が傾斜面に相当する。自然石を積んだ石板表面を、回転軸を表す矢印の終点に向かって反時計回りに回転させることにより、石積みに傾斜を与える。

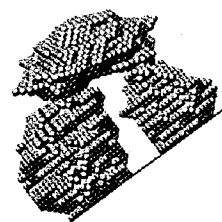
写真-3 は実験の様子を示したものである。実験では、台車に石板を載せ、その上に自然石を積み上げ、台車をゆっくりとジャッキアップして傾斜を与え、石積みが崩壊したときの角度を角度測定器で計測した。

一方、解析では想定した傾斜に対応するように重力の方向を 1° ずつ変化させ、所定の精度で力のつりあい状態を求めた。なお、要素の移動に伴い、新たな接触が生じる際、急に大きな力が生じないように、重なり量が十分小さくなるまで全要素の動きを線形に引き戻す操作を入れている。

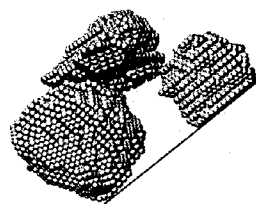
4.3 解析結果についての考察



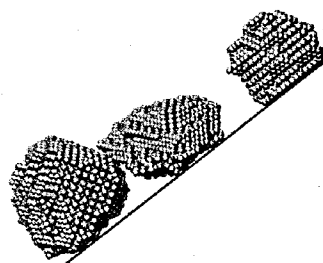
(a) 傾斜角 0°



(b) 傾斜角 36°



(c) 傾斜角 37°



(d) 傾斜角 37°

図-15 石積みの崩壊の過程(石積み A, $\gamma=0^\circ$)

図-11 の石積み A を載せた面および図-12 の石積み B を載せた面のそれぞれに対して、図-14 に示す 4 通りの傾斜を与え、石積みが崩壊する角度を実験と解析で調べた。

図-15 は解析結果の一部である。この図は、石積み A に対して γ を 0° として傾斜を与えたときの結果を示している。傾斜角 36° までは力のつりあい状態を得ることができたが、傾斜角 37° になると、力のつりあい状態がなかなか求まらなくなった。そのまま計算を続けると、図の(c)から(d)に至るような経過をたどった。石積みは作用する力のバランスが崩れたためにトップリング崩壊する。

なお、本解析は動的なものではないので、石積みが崩壊して自然石が分離すると、自然石と石板との間の摩擦により、自然石は石板上に止まった。一方、実験では崩れた石は斜面上に止まらずに落下した。したがって、解析は崩壊過程を再現できていないが、本文の目的は石積みの安定性評価法の確立であり、安定・不安定の境目を明確にできる

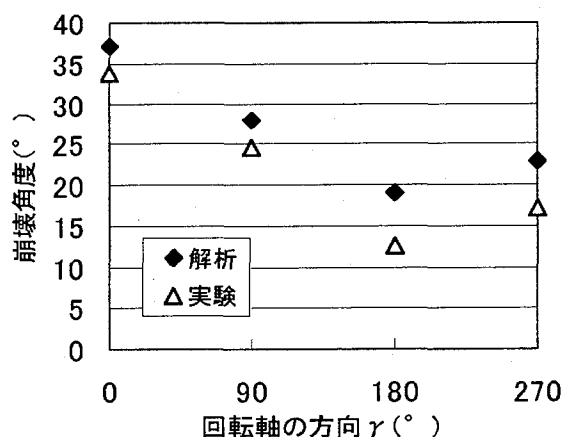


図-16 傾斜実験の結果 (石積み A)

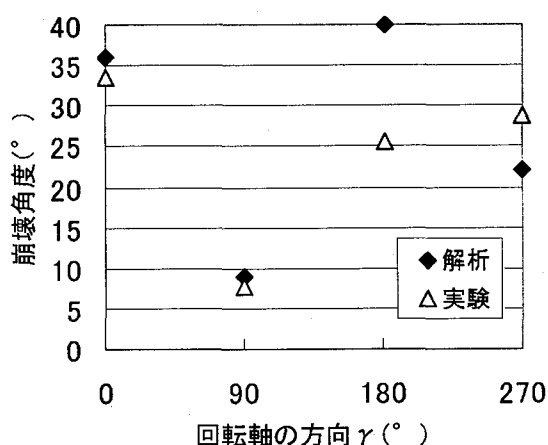


図-17 傾斜実験の結果 (石積み B)

のであれば問題はないと考えている。

図-16は、石積み A に対する実験と解析の結果を比較したものである。横軸は回転軸の方向 γ 、縦軸は石積み崩壊したときの角度を示している。なお、実験の1つのプロットは5回行った実験の平均値を示しており、実験値のばらつきは 5° 以内である。解析での崩壊角度は、回転軸の方向 γ により崩壊角度の変化する実験結果と同様の变化傾向を示した。ただし、すべての解析結果が実験結果を上回る。

これは、本解析で大きめの摩擦角を用いたために生じたものと考えられる。自然石モデルの表面に球を並べると、隣り合った球の間に凹凸ができる。これによって、接触する自然石モデルの間にはある程度の噛み合わせ効果が生じる。ところが、パラメータ設定の箇所ですべたように、今回行った摩擦に関する実験で得られた摩擦角には、噛み合わせの影響が含まれている。この値をそのまま摩擦角に用いたために、石の噛み合わせ効果が二重に解析に取り込まれてしまい、実験よりも解析において崩壊角度が大きくなったのである。

一方、図-17は、石積み B に対する実験と解析の結果を比較したものである。石積み A の場合と同様に、実験の1つのプロットは5回行った実験の平均値を示しており、



図-18 $\gamma=180^\circ$ 、傾斜角 35° (石積み B)



図-19 $\gamma=270^\circ$ 、傾斜角 20° (石積み B)

実験値のばらつきは 5° 以内である。回転軸の方向 γ が 0° と 90° の結果は、若干解析の崩壊角度が大きいものの実験結果をよく再現していると考えられる。ところが、回転軸の方向 γ が 180° 、 270° の場合には、実験と解析の結果に他のプロットとは異なっただけがみられる。

図-17の $\gamma=180^\circ$ 、 270° で生じた実験と解析のずれは、自然石モデル表面の凹凸による引っかかりが原因と考えられる。このことを明確にするために、自然石モデルの接触状況を図-18と図-19に示す。なお、図-19は斜面の下側から見た図である。

両図には黒い円柱を用いて接触力を表している。円柱の直径は力の大きさに比例させ、長さは接触する球の直径の和とし、接触点に円柱の重心を合わせて描いている。床は平面として扱っているため、床との接触箇所にある円柱は短い。また床との接触が多数の線にみえる部分が存在するのは、それだけの数の球が平面と接しているからである。そして円柱の軸方向は力の作用方向と一致させている。

図-18では、中ほどの石と左側の石との間に接触点が存在するのがわかる。実験では存在しないこの接触点における引っかかりのため、中ほどの石は崩落しにくくなり、 $\gamma=180^\circ$ の崩壊角度は実験と比べて大きくなった。

また、図-19では、真中の石の右側に2つの接触点が存在するが、上部の接触点は初期に存在しない。若干の傾斜後この点ができ石の動きを抑制した。一方、図-19と対応する回転軸方向 $\gamma=270^\circ$ の実験では、石板を少し持ち上げた際、上の石が回転して移動し、落下はせずに石積み上にとどまった。したがって、実験と解析では、崩壊直前の石組が異なり、これが原因で解析では実験よりも小さな傾斜で崩壊が生じている。

以上より、接触判定の便宜のために導入した球剛接モデルにおいて、隣り合う球の並び方には十分に留意する必要があることがわかった。すなわち、今回のモデル化におい

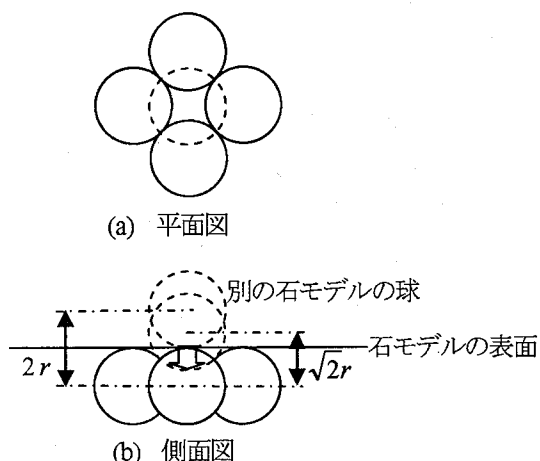


図-20 石モデル表面への球のはまり込み

では、図-20 に示すように、ある石モデルに接触する別の石モデルの球が、石モデルの表面と想定される面から最大で $2r - \sqrt{2}r$ はまり込み、大きく噛み合う可能性がある。定量的により正確な解析を行うため、摩擦角と噛み合わせの評価を整理するとともに、大きな凹凸による引っかかりを回避できる球の並び方を明らかにする必要がある。

5. あとがき

石積み構造物は、石の積み方によって安定性が大きく異なることが知られている。しかし、どのような積み方によってどの程度石積みの安定性を確保でき、どのような積み方を避けなければならないのかについて、従来経験的に知られるのみである。環境・景観上よいと考えられる石積み構造物の築造を推進していくためには、その安定性に対する力学的な裏づけが必要である。

本研究では、石を空積みして造られる構造物の安定性評価に粒状要素法を適用することを目的として、自然石の複雑な形状をモデル化した解析法を提案した。そして、研究の第一段階として簡単な石積みの傾斜崩壊実験を再現してその適用性を調べた。結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 自然石のモデルを作成し、CAD ソフトを援用することによって、石の積み重ねシミュレーションの初期データを作成できることを確認した。
- 2) 自然石モデルに傾斜を与え、崩れる角度を解析と実験で比較したところ、実験で得られる石の組み合わせによる安定性の差を反映した解析結果が得られ、また、解析である程度定量的にも実験を再現できることがわかった。

3) 解析において作用する接触力の様子から、解析と実験の結果に生じた差について検討し、定量的により正確な解析を行うためには要素表面の大きな凹凸を回避すべきであることがわかった。今後は、モデルのわずかな初期位置の違いで結果に大きな差異が生じないか等を検討した上で、実際の石積み構造物を想定した解析への適用を試み、本解析法を設計に活かすことができるようにしたい。

本文で用いたデータや図面の作成に尽力するとともに、種々の議論で研究に協力してくれた前橋工科大学卒業研究生の堀川慶人君、後藤伸旭君、嶋田渉君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 武井上巳：養蚕を支えた榛名山麓砂防堰堤群巨石積堰堤，土木学会誌，第90巻第6号，pp.66-67，2005。
- 2) 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，第406号，III-11，pp.97-106，1989。
- 3) 岸野佑次：土の構造とメカニクス—ミクロからマクロへ—4.数値粒子法による土の微視的挙動の追跡（その1），土と基礎，Vol.50，No.8，pp.35-40，2002。
- 4) 土倉 泰：全体剛性行列を用いた粒状要素解析，応用力学論文集，Vol.8，pp.549-556，2005。
- 5) 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.131s-141s,1991。
- 6) 松島亘志，竿本英貴：複雑な砂粒子形状の個別要素法モデル化手法の提案，第37回地盤工学研究発表会，pp.357-358,2002。
- 7) 山田貴博，関 暢晴，白坂 一，松井和己，塩見忠彦：複雑形状を有する粒状体材料の画像データに基づく個別要素モデリング，応用力学論文集，Vol.8，pp.541-548，2005。
- 8) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier : *Theory of Elasticity Third Edition*, McGraw-Hill Book Company, pp.409-412, 1970。
- 9) Warren C. Young : *Roark's formulas for stress and strain*, McGraw-Hill Book Company, pp.650-651, 1989。
- 10) Mindlin R. D. : Compliance of elastic bodies in contact, *J. Appl. Mech.*, Vol.71, pp.259-268, 1949。
- 11) 最上武雄編：土質力学，技報堂，pp.978-980，1969。

(2006年4月13日 受付)