

岩塊の接触形態を考慮した 3 次元個別要素法 による岩盤斜面崩落シミュレーション

山田 正雄^{1*}・中川 光雄²・鵜飼 恵三³

¹国土防災技術株式会社 技術本部（〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和2-12-11）

²株式会社地層科学研究所 大阪事務所（〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-7-19）

³群馬大学 工学部建設工学科（〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1）

*E-mail: yamada@jce.co.jp

岩盤斜面崩落における岩塊の運動軌跡を評価する有用な手法の 1 つに、岩塊ブロックの形状や寸法を忠実にモデル化できる個別要素法がある。しかし、実験観察などからも、崩落岩塊が斜面上で跳躍する際の接触形態により跳躍高さが大きく異なる状況が見受けられる。よって、跳躍をモデル化する際に、岩塊の接触形態の頻度分布およびそれに応じた反発係数の与え方が重要となる。本論文では、岩塊の軌跡を支配する主要なパラメータである反発係数に基づいて跳躍を適切に再現するために、岩塊と斜面の接触面積の変化を反発係数に反映させた接触機構の合理的な力学モデルを提案する。そして落石現地模型実験や実際の現場斜面においてこれを適用して良好な再現結果を得ることができた。

Key Words : *three dimensional distinct element method, coefficient of restitution, contact form*

1. はじめに

岩盤崩落の対策計画を立案する上で、自然斜面を落下する崩落岩塊の軌跡を事前に予測し、崩落岩塊のもつエネルギーを評価することが重要である。自然斜面は、平衡斜面のみならず、集水斜面や散水斜面など横断方向に勾配が変化する斜面が一般的であり、横断形状によって、斜面に衝突した岩塊の跳ね返り方向は大きく異なる場合がある。急崖からの剥離による岩塊崩落に対しては崩落方向の平面的な広がり事前に予測することは困難である。このような崩落岩塊の運動軌跡を数値解析により適切に評価する有用な手法の 1 つに、崩落岩盤の形状や大きさを忠実にモデル化でき、しかも運動の形態を区別しない個別要素法^{1,2)}がある。特に、横断方向の地形が一樣でない多くの岩盤斜面を対象とする場合は 3 次元個別要素法解析の実施が望まれる。

岩塊ブロックが斜面上を運動する場合、実験観察などからも、斜面と岩塊ブロックの接触形態（岩塊ブロック面－法面接触、岩塊ブロック辺－法面接触、岩塊ブロック頂点－法面接触）により岩塊の跳躍高さが大きく異なる場合が見受けられる。これを 3 次元個別要素法解析に反映させるには、岩塊ブロックの接触形態の頻度および反発係数の与え方がポイントとなる。

本論文では、岩塊跳躍時の接触箇所によって変化する

接触面積に着目し、軌跡を支配する主要なパラメータである反発係数に基づく合理的な跳躍の再現方法を検討した。まず、岩塊と斜面の接触面積の変化を反発係数に反映させた接触機構の力学モデルを新たに提案する。次に、この力学モデルを導入した個別要素法を用いて、既往の落石現地模型実験で得られている試験体の運動軌跡を再現することを試みた。さらに、3 次元個別要素法解析を実際の現場斜面に適用し、過去の現場の状況を説明する良好な結果を得た。最後に、対策工立案における個別要素法解析の有用性と今後の課題について述べる。

2. 落石現地模型実験

崩落岩塊の運動軌跡を評価するために、島根県出雲農林振興センターが平成 11 年 2 月に出雲市乙立町地内で実施した写真-1 に示す落石現地模型実験³⁾の結果を用いた。実験は、崩落岩塊の軌跡と斜面下部に計画されている防護擁壁の高さの妥当性、落石が防護擁壁に作用する動的衝撃力とその分布状況を把握する目的で、現地の 1/10 の模型比で実施された。図-1 に示す実験装置は、斜面上部が傾斜 60°、斜面長 4m のコンクリート製斜面、斜面下部が傾斜 30°、斜面長 3.5m の現地土砂で締め固めた斜面で構成され、落石が衝突する下部斜面には、露



写真-1 落石現地模型実験の実施状況

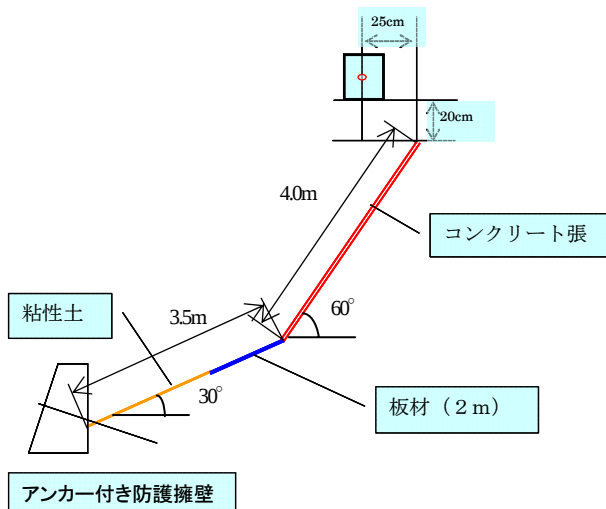


図-1 模型斜面の概要図

岩を想定し板材を設置している。8 ミリビデオカメラにより落石の運動軌跡を撮影し、また防護擁壁に取り付けたロードセルにより落石の動的衝撃力を計測している。実験結果のうち、とくに崩落岩塊の運動軌跡を評価するために、崩落岩塊と斜面の接触形態、崩落岩塊の軌跡、特に、跳躍高さに着目した。

3. 接触形態を考慮した岩塊接触のモデル化

(1) 接触形態に応じた反発係数

個別要素法では、反発係数 e が与えられると、これを実現できる接触時の減衰係数 C をダッシュポットに与えて所要の跳躍を実現する。反発係数 e と減衰係数 C の関係は、大町ら⁴⁾により式(1a)、式(1b)のように与えられる。

$$C = \frac{2|\ln e|\sqrt{Km}}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (1a)$$

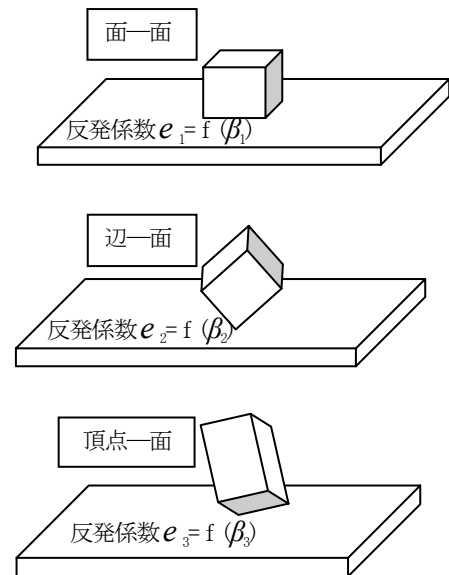


図-2 崩落岩塊ブロックと法面の接触形態

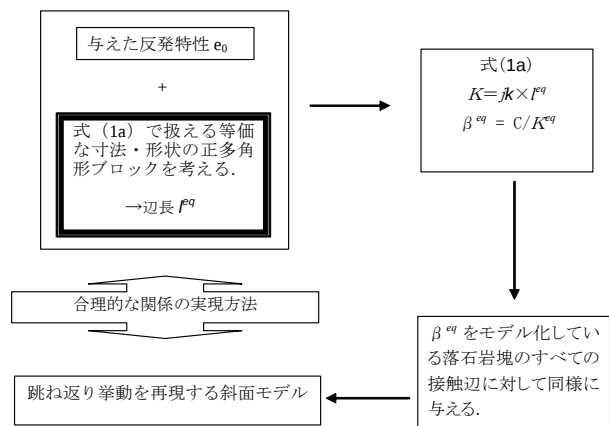


図-3 等価ブロックの考え方

$$C = \beta K \quad (1b)$$

ここで、 β は剛性比例型減衰係数、 m は崩落岩塊ブロック質量、 K は式(1a)、式(1b)とも接点あるいは接触面の接触バネ剛性である。

さて、接触面積と接触バネ剛性の関係を与えるモデルとして、単位接触面積当たりの剛性率を一定として与え、接触面積 A と接触バネ剛性 K が比例関係であると考え、これを式(2)に示す。

$$K = jk \times A \quad (2)$$

ここで、 jk は単位接触面積当たりの剛性率である。

次に、岩塊ブロックが法面と接触する場合、図-2 に示すように接触形態として（面一面接触）、（辺一面接触）、（頂点一面接触）の3つの形態が考えられる。より実際的な崩落挙動を再現することを目的とすれば、これらに対して反発係数 e_i を個別に定義することが考え

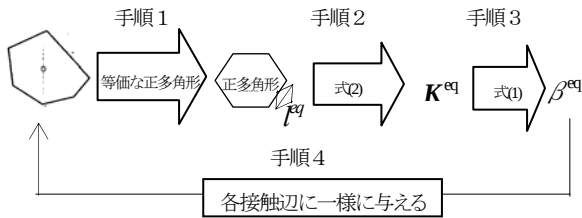


図-4 代表 β^{eq} 決定の手順

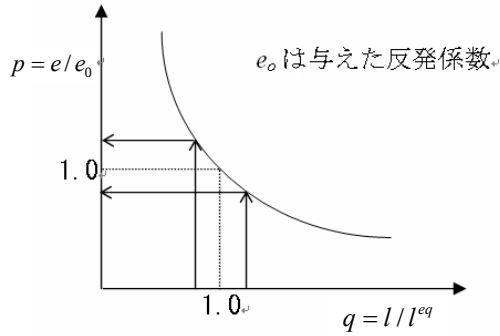


図-5 2次元接触モデルにおける p と q の関係の概念

られる．この中でも特に（面―面接触）を取り挙げると、任意形状の多面体から構成される一般的な岩塊では接触する面が異なれば接触面積は異なることになる．しかしながら、接触が発生する各面ごとに反発係数を個別に与えるのは現実的ではない．そこで、特定の接触面に依存しない平均的、統一的な反発係数 e_0 を定義することを考える．まず、任意の多面体から構成される岩塊を、質量を変化させないで形状を代表するような正多面体に置き換える．そして、正多面体の1つの面の面積 A^q に対して反発係数 e_0 を実現する剛性比例型減衰係数 β^q を評価する． β を全ての接触面に一樣に与えれば、個々の面が接触した際に接触面積の変化に応じた跳躍を得ることになる．ここで提案する方法論の概念図を図-3 に示す．また、具体的な手順を簡単に説明をするため、準備として、対象を図-4 に示す 2 次元接触モデルとすると、式(2)は2次元では式(4)となる．

$$K = jk \times l \quad (4)$$

ここで、 l は接触辺長である．代表正多角形の1辺に対応した β^q の算定は以下の手順による．

- （手順1）対象落石形状の各辺との相違ができるだけ小さい l^q となるように同一面積の正多角形を決定する．
- （手順2） $K^q = jk \times l^q$ より K^q を得る．
- （手順3）式(1a), 式(1b) より、代表 β^q が計算される．
- （手順4）1 辺に関する算定法を解析モデルのブロックのすべての接触辺に対して適用する．

以上に基づいて反発係数 e と接触辺長 l との関係を明確にするため、式(1)に基づいて e と l との関係を導く．

式(1a)を変形して、

$$\ln e = \frac{-\beta K \pi}{\sqrt{4Km - \beta^2 K^2}} = \frac{-\beta \pi}{\sqrt{4m/K - \beta^2}} \quad (5)$$

ここで、等価な辺長 l^{eq} に対する反発係数を e_0 とすると、

$$\ln \frac{e}{e_0} = \frac{\beta^{eq} \pi}{\sqrt{4m/jkl^{eq} - \beta^{eq^2}}} - \frac{\beta^{eq} \pi}{\sqrt{4m/jkl - \beta^{eq^2}}} \quad (6)$$

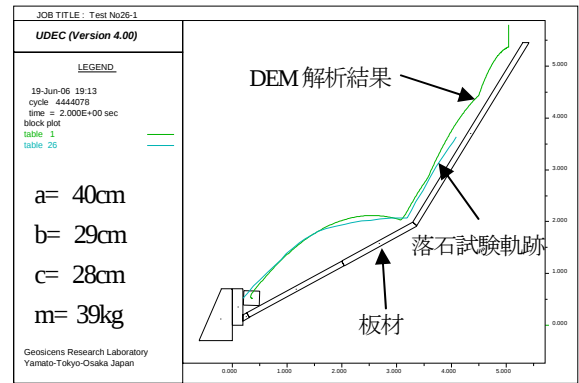
$$p = \frac{e}{e_0} \quad (7)$$

$$q = \frac{l}{l^{eq}} \quad (8)$$

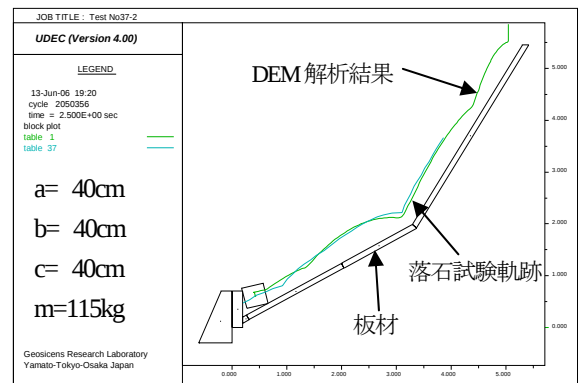
最終的に

$$p = \exp \left\{ \beta^{eq} \pi \left(\frac{1}{\sqrt{4m/jkl^{eq} - \beta^{eq^2}}} - \frac{1}{\sqrt{4m/jkl - \beta^{eq^2}}} \right) \right\} \quad (9)$$

となり、概念的に図-5のような p と q の関係が模式的に得られる．接触辺長 l が大きくなれば反発係数 e が小さくなり、跳躍は小さくなる．なお、（辺―面接触）と（頂点―面接触）に関しては、今後の課題とし、本論文



(a)試験 No.26-1



(b)試験 No.37-2

図-6 落石の運動軌跡と2次元 DEM 解析の結果

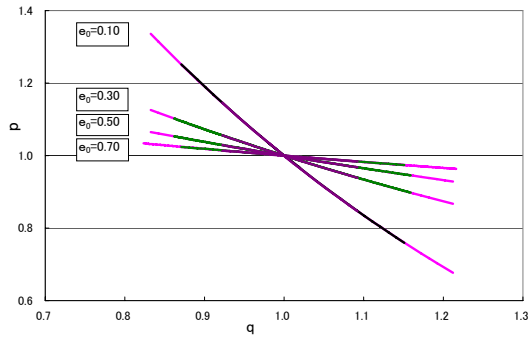


図-7 接触辺長比 q に対する反発係数比 p

では接触面積に依存しないで所要の反発係数を忠実に実現するようにモデル化した。

(2) 2次元個別要素法解析による現地模型実験の再現

落石現地模型実験の結果を2次元個別要素法解析で再現して、落石の接触形態と落石の運動軌跡および反発係数のバラツキについて検討した。ここでは、個別要素法コード (UDEC)¹⁾ に前節で述べた接触モデルを導入した。

図-6 は、現地模型試験における落石の運動軌跡と解析結果を比較したものである。図中の m , a , b , c は、それぞれ図-8 に示す現地模型試験における落石の実測の質量、長径、短径、厚さを示す。試験体の跳躍高さが20～70cm であること、板材における運動軌跡がほぼ合致すること、かつ防護擁壁に対する衝突直前の速度が約6.0 (m/sec) になるという条件で、再現性を検証した結果、落石の運動モデルをおおむね再現することができた。実験では、落石の投下の位置および初速度は人力によるため厳密には一定ではなく、落石形状も同一ではないが、解析では、落石の投下の位置を一定および初速度を零とし、落石形状を長方形と仮定して落石の運動軌跡を再現するようにパラメータを設定している。30 ケースの解析結果では、板材での反発係数のばらつきの範囲が0.1～0.5 と大きかった。これはコンクリート材での跳ね返りの運動軌跡が影響している可能性がある。いずれにしても、板材における運動軌跡を再現することが可能となった。

図-7 は、 $jk=1.0 \times 10^8$ (Pa/m) , $\rho=2700$ (kg/m³) , $e_0=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ としたときの接触辺長比 q (l/l_0) に対する反発係数比 p (e/e_0) を示したものである。これより、 e_0 が与えられれば、崩落岩塊の形状・寸法に依存しないで唯一的な p と q の関係が得られることがわかる。また、与えられる e_0 が大きいほど接触辺長比の変動に対する反発係数 e の変化度合いが小さくなることわかる。

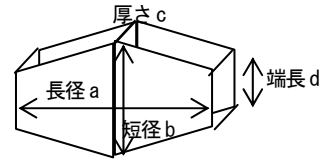


図-8 落石形状モデル (3次元解析)

表-1 斜面材料の物性値 (No.37-2)

	反発係数 e	すべり摩擦角 ϕ (°)
コンクリート	0.43	33
板材	0.43	30
粘性土	0.1	35

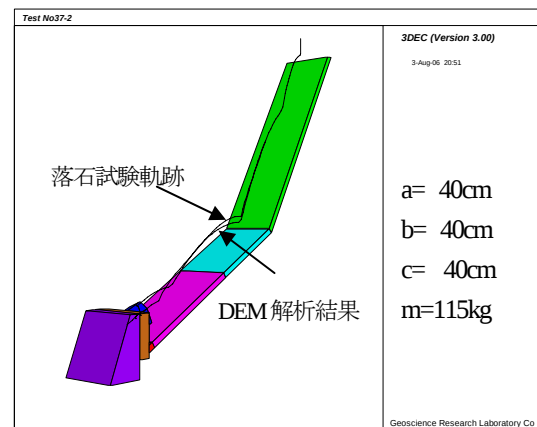


図-9 落石の運動軌跡と3次元DEM解析結果

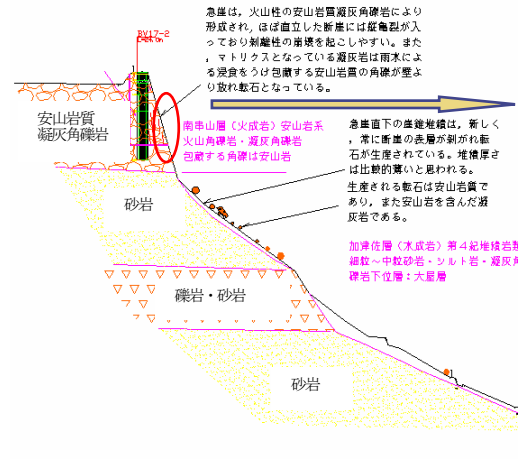
(3) 3次元個別要素法解析による現地模型実験の再現

前節で述べた接触モデルを3次元に拡張する。3次元解析では、試験用落石を代表する形状として、実形状に近いオベリスク (方先柱)²⁾ を適用した。すなわち、図-8 に示すように、落石の密度を2700(kg/m³)、実測の質量 m 、長径 a 、短径 b 、厚さ c を用いて、端長部を正方形として端長 d を求め、2つのオベリスクの底面を結合して一体とした10面体ブロックで試験用落石をモデル化した。ここでは、個別要素法コード (3DEC)⁹⁾ に前節で述べた接触モデルを導入した。

再現計算は、すべり摩擦角 ϕ を30°～35°の範囲で反発係数 e_0 を与えた。2次元解析同様、落石の跳躍高さや運動軌跡および防護擁壁に対する衝突直前の速度を約6.0(m/sec)として再現性を検証した。図-9 は、落石の運動軌跡と3次元個別要素法解析結果の一例 (No.37-2) を示したものである。このときの斜面材料の物性値を表-1 に示す。No.37-2 について図-9 と図-6(b) を鉛直断面で比較すると、ほぼ同様の運動軌跡を示している。このときの落石と板材の接触形態は、頂点一面で、他のケースもこのパターンが最も多かった。また、5 ケースのうち4 ケースが、板材の反発係数が、0.40～0.43 と反発係数のバラツキは小さかった。



写真-2 対象斜面全景



上部斜面の露岩状況
(安山岩, 下層が凝灰角礫岩)

4. 3次元個別要素法解析による岩塊崩落シミュレーション事例

図-10 崩落岩盤斜面断面図 (No.13-14 測線)

(1) 対象斜面の概要

対象斜面は、島原半島南端（長崎県島原半島権田地区）に位置する国道251号線沿いの加津佐道路公園の直上の南向き斜面（写真-2）で、調査地直上の平坦地は公園となっている。図-10に示すように斜面の上部は傾斜が70～80°の安山岩質凝灰角礫岩（南串山層）の岩盤で急崖を形成しており、急崖部に層理節理面に多数の亀裂が存在し、剥離した多数の岩塊が斜面上に散在している。また、斜面の中部から下部にかけて南串山層の下位層にあたる砂岩、シルト岩、凝灰角礫岩からなる加津佐層が位置する。加津佐層は全般に固結度の低い砂礫と泥岩を互層状に挟む均質な砂岩層で、地内の斜面にも軟質の泥岩露頭が一部認められるが、当地層は崖錐堆積物に覆われている。加津佐道路公園の直下の海浜部には、斜面上部の凝灰角礫岩が亀裂線に沿って剥離した後、繰り返し斜面に衝突しながら到達した径φ0.3～0.5mの岩塊が多数みられるが、その一部は斜面上に停留するものも見受けられる。

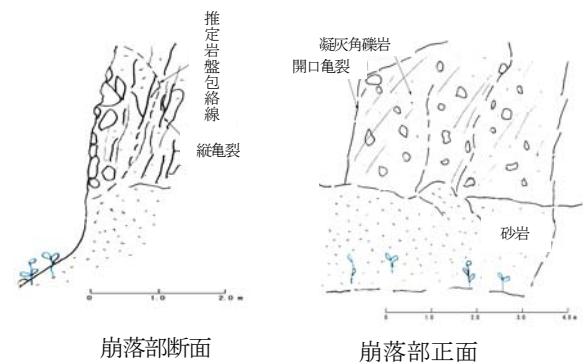


図-11 現地踏査時の観察スケッチ

(2) 岩塊崩落等の想定される運動形態

本斜面における不安定岩塊の予測される運動形態は、傾斜角 70～80°の急崖からの剥離による岩塊崩落である。急崖からの剥離による岩塊崩落は 0.5～1.2m の方形状岩塊として崩落すると考えられるため、大きなエネルギーを有しながら崩落経路が平面的に広がることが容易に推察される。

(3) モデル化の概要

2次元解析で得られた接触形態および反発係数のパラツキの程度を考慮し、3次元岩盤崩落解析を実施する。図-10に示した測線断面付近における崩落岩盤を対象として斜面および崩落岩塊をモデル化した。斜面の地形は

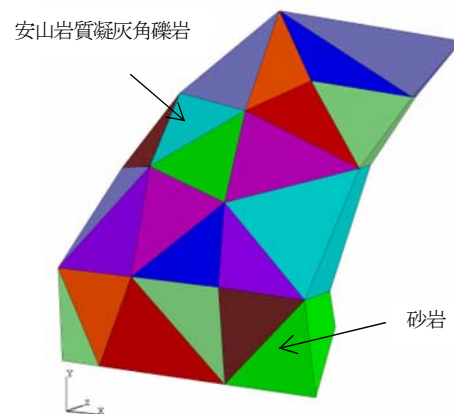


図-12 3次元解析モデルにおける崩落岩塊

レーザースキャナ計測から得られた標高数値データ (1.6m の T_{in}) を利用した。また、崩落岩塊は図-11に示す現地踏査時の観察スケッチに基づいて図-12のようにモデル化した。設定した反発係数を表-2に示す。

(4) 解析結果

図-13は岩塊の崩落軌跡の一例である。これより、微地形の凹凸特性の影響を受けて個々の岩塊が平面的な広

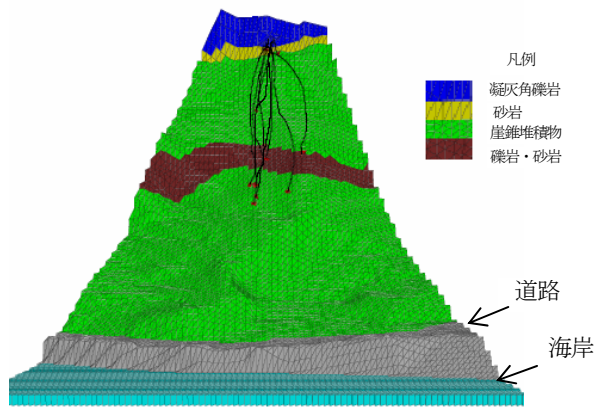


図-13 解析結果（崩落開始8秒後）

がりを呈して崩落していることが分る。過去の現地の岩塊の到達範囲、海浜に散在する落石状況を説明しうるものとなっている。落石エネルギーが 1000kJ 以上と大きなものになることや予測される跳躍高さが 10m 以上になる可能性があるため、本例の場合は通常の落石防護工の適用範囲を越えている。また、発生源対策としては土質の脆弱な部分をアンカー付き法枠工が適していると考えられる。

5. おわりに

岩塊ブロックが法面と接触する場合、その接触形態により岩塊の跳躍高さが大きく異なる現象を説明することを目的として、崩落岩塊と斜面の接触時における接触面積の変化を反発係数に反映させることのできる力学モデルを新たに提案した。これは、与えられた反発係数 e に対して、接触面積の変化に応じた跳躍を実現しようとするものである。そして、これを組み込んだ 2 次元および 3 次元個別要素法解析を用いて現地落石模型実験を再現し、反発係数 e および摩擦係数 ϕ を逆解析的に求めた。また、2 次元解析で得られた接触形態および反発係数のバラツキの程度を考慮し、実現場の斜面に対して 3 次元

表-2 3次元個別要素法解析の物性値

岩種	密度 ρ (kg/m ³)	反発係数 e	摩擦角 ϕ (°)
安山岩質凝灰角礫岩（崩落部）	2600.0	0.45	30.0
砂岩（崩落部）	2600.0	0.45	30.0
崖錐堆積物	—	0.30	30.0
れき岩	—	0.40	30.0
道路	—	0.35	30.0

解析を適用したところ、過去の現地の状況を説明しうる結果が得られた。以上より、岩塊崩落の運動軌跡を予測し評価する上で崩落対象岩盤の形状・規模を忠実にモデル化した個別要素法解析が有用であることを示した。

（辺一面接触）（頂点一面接触）に関する合理的な方法論は次の課題とし、今後はより精度のよい解析を目指して、今回考案したモデルを改良して接触機構の合理的な力学モデルの構築をさらに検討する予定である。

岩盤崩落のエネルギーは、一般に莫大なものがあり、発生源対策が基本となるが、待ち受け対策でも可能な場合もある。いずれにしても現地に存在する崩落岩盤の実態に基づいて崩落岩塊の跳躍高さおよび平面的広がり、範囲および対策施設に作用する衝撃力を精度よく把握することが必要である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A.: Distinct Element Models, of Rock and Soil Structure, *Analytical and Computational Method in Engineering Rock Mechanics*, pp.129-163I, 1987.
- 2) (社) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料—落石シミュレーション手法の調査研究資料，pp.68-80, 2002.
- 3) 島根県出雲農林振興センター：治山事業調査業務委託（立久恵）報告書，1999.
- 4) 大町達夫，荒井靖博：個別要素法で用いる要素定数の決め方について，*構造工学論文集*，Vol.32A，pp.715-723, 1986.
- 5) 森北出版：基礎数学ハンドブック，pp.154-162, 1964.
- 6) Cundall, P.A.: Formulation of a Three-Dimensional Distinct Element Model, *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geo.*, 1988.

COLLAPSE SIMULATION OF ROCK SLOPE BY THREE DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD CONSIDERED CONTACT FORMS

Masao YAMADA, Mitsuo NAKAGAWA and Keizo UGAI

When evaluating trajectory of rock blocks in the event of bedrock slope failure, there is an useful technique called three dimensional distinct element method which models shape and size of rock blocks faithfully. However, jumping height observed in a rock fall model experiment differs considerably depending on how a rock block makes contact with slope surface. This paper covers a rational dynamics model of the contact mechanism taking into account relations between coefficient of restitution and contact area in order to reproduce jumping of a rock block. We applied this idea to the rock fall model experiment and a real field and were able to get a good reproduction result.