

任意多面体ブロックでモデル化した 個別要素法による岩盤崩落シミュレーション

中川 光雄^{1*}・神原 規也²

¹株式会社 地層科学研究所 防災・環境事業グループ (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-7-19)

²株式会社エイト日本技術開発 ジオ・エンジニアリング事業部 (〒532-0034 大阪市淀川区野中北1-12-39)

*E-mail: nakagawa@geolab.jp

個別要素法により岩盤崩落シミュレーションを行う場合、岩塊を球でモデル化したり、あるいは、数多くの球を接着させて岩塊をモデル化する方法が見受けられる。これに対して、著者らはより実際に近い岩塊のモデル化を実現するには任意多面体ブロックを適用することが有効であると考え、本稿は、任意多面体ブロックを用いる際の要件となる回転運動の合理的な定式化を検討し課題を考察した。そして、これを導入した3次元個別要素法を急崖斜面に適用したところ、現場斜面の状況を良好に再現する運動軌跡が得られたものの、岩塊が斜面と衝突する毎に増加する回転速度も得られた。これは、対策工検討に必要となる崩落岩塊の運動エネルギーの観点からも回転運動の再現の重要性を示唆する結果であると考え、

Key Words : *rock mass failure, 3-dimensional distinct element method, polyhedron block, falling trajectories, kinetic energy*

1. はじめに

落石や岩盤崩落の対策計画を立案する上で自然斜面を流下する岩塊の軌跡や運動エネルギーの履歴を事前に予測し評価することは重要である。これらの予測・評価に数値シミュレーションを用いる場合、横断方向にも勾配が変化する一般的な自然斜面であれば、崩落経路を容易に判断できる場合を除き3次元的に実施することが望まれる。岩塊の大きさや形状をシミュレーションの結果に反映させる場合は非質点系シミュレーション手法が用いられ、その代表的な数値解析法として個別要素法がある。

3次元個別要素法における岩塊のモデル化には、1つの岩塊を1つの球でモデル化する方法や、数多くの球を接着させて岩塊の形状や大きさをモデル化する方法^{例えば1)2)3)}が見受けられる。その一方で、岩塊を多面体ブロックでモデル化する方法も少なからず見受けられる^{例えば4)5)6)7)}。この方法は、岩塊の表面形状を平面で近似するため、視覚的にもモデル化の完成度を把握し易い。しかしながら、既往の研究の多くは、立方体や直方体などの単純な軸対象体の適用に止まっているように見受けられる。これは、形状が任意な多面体ブロックの場合、回転慣性モーメントの評価が容易ではないことに起因しているように思われる。本稿では、より実際に近いモデル化を実現するという観点から岩塊を多面体ブロックでモデ

ル化する後者の立場に立ち、特に、任意多面体ブロック(多数の三角形などの平面で囲まれた立体)としてモデル化することが有効であると考え、ここでは、回転運動の表現において任意多面体ブロックの取り扱いを実現する合理的な定式化を検討し課題を考察する。また、これとは別に、任意多面体ブロックを適用する場合、ブロックどうしの衝突現象やブロックと斜面の衝突現象を適切に再現できる3次元接触判定法が必要となる。これに該当するcommon-plane法と呼ばれる手法はCundallらが開発した3次元個別要素法コード3DEC (Itasca Consulting Group, Inc.)⁸⁾に組み込まれている。本稿では、複雑な状態で斜面と衝突する3次元落石・岩盤崩落シミュレーションにおいて任意多面体ブロックの適用を実現する要件の1つとしてこの概略を述べる。最後に、崩落岩塊が高速で斜面と衝突して発生する回転運動を適切に再現することが求められる比高の高い急峻な現場斜面に3DECコードを適用し、時々刻々の崩落挙動、角速度、さらには、対策工選定に必要な運動軌跡や運動エネルギーがシミュレーションの結果として得られることを示す。

2. 岩盤崩落の運動方程式

ブロックを剛体として扱う場合、運動方程式は並

進成分と回転成分に大別される．単一ブロックの並進運動は，式(1)で示される．

$$\ddot{x}_i + \alpha \dot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i \quad (1)$$

ここで， $\ddot{x}_i$ はブロック重心の加速度， $\dot{x}_i$ はブロック重心の速度， α は粘性減衰係数， F_i はブロックが受ける力の合計， m はブロックの質量， g_i は重力加速度ベクトルである．また，減衰の無い剛体の回転運動はオイラーの運動方程式と呼ばれ，慣性主軸（局所座標系）に対して式(2)のように与えられる．

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 = M_1 \quad (2a)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = M_2 \quad (2b)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 = M_3 \quad (2c)$$

ここで， I_1, I_2, I_3 はブロックの主慣性モーメント， $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3$ は主軸周りの角加速度， $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ は主軸周りの角速度， M_1, M_2, M_3 は主軸周りに載荷される外力の合モーメントを示す．ここで，式(2)は3つの式に対して未知数が6つ存在するため，このままでは解を得ることはできない．立方体や直方体など慣性モーメントが容易に得られる場合は，近似的な慣性モーメント I を与えて減衰係数を加え式(3)のように表現する方法もある．

$$\dot{\omega}_i + \alpha \omega = \frac{M_i}{I} \quad (3)$$

さて，ブロック重心の速度と角速度は，中央差分形式に従うと式(4)のように示される．ここで， Δt は時間刻みを示す．

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{2} \left[\dot{x}_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \dot{x}_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right] \quad (4a)$$

$$\omega_i(t) = \frac{1}{2} \left[\omega_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \omega_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right] \quad (4b)$$

同様に，加速度と角加速度は，中央差分形式に従うと式(5)のように示される．

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[\dot{x}_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] - \dot{x}_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \right] \quad (5a)$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[\omega_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] - \omega_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \right] \quad (5b)$$

式(4)および式(5)を式(1)および式(3)に代入すると，時刻 $\left[t + \frac{\Delta t}{2} \right]$ において式(6)に示す運動方程式が得られる．

$$\dot{x}_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[D_1 \dot{x}_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[\frac{F_i(t)}{m} + g_i \right] \Delta t \right] D_2 \quad (6a)$$

$$\omega_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[D_1 \omega_i \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[\frac{M_i(t)}{m} \Delta t \right] \right] D_2 \quad (6b)$$

$$\text{ここで, } D_1 = 1 - \left(\alpha \frac{\Delta t}{2} \right), \quad D_2 = \frac{1}{1 + \alpha \frac{\Delta t}{2}}$$

ブロック重心での増分変位および増分回転は式(7)のよう示される．

$$\Delta x_i = \dot{x}_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t \quad (7a)$$

$$\Delta \theta_i = \omega_i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t \quad (7b)$$

最後に，ブロック重心の座標は式(8)により，また，ブロック頂点の座標は式(9)により更新される．

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta x_i \quad (8)$$

$$x'_i(t + \Delta t) = x'_i(t) + \Delta x_i + e_{ijk} \Delta \theta_j [x'_k(t + \Delta t / 2) - x_k(t + \Delta t / 2)] \quad (9)$$

3. 任意形状多面体ブロック適用のための検討

崩落岩塊のモデル化において任意形状の多面体ブロックを適用するための要件として，ここでは特に，回転に関する運動方程式，および，主慣性モーメントの評価方法を検討する．また，common-plane接触判定法も重要な要件となるが，ここではその概要のみを述べる．

(1) 回転の運動方程式

式(3)で示した近似的な回転の運動方程式の適用は，軸対称体などの単純な形状のブロックの場合に限定される．そこで，適用範囲を任意多面体に拡張するため，式(4)および式(5)を改めて式(2)に代入すると，式(10)に示す回転の運動方程式が得られる．

$$\omega_1 \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[D_1 \omega_1 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[M_1(t) - (I_3 - I_2) \omega_3 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \omega_2 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \frac{\Delta t}{I_1} \right] D_2 \right] \quad (10a)$$

$$\omega_2 \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[D_1 \omega_2 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[M_2(t) - (I_1 - I_3) \omega_1 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \omega_3 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \frac{\Delta t}{I_2} \right] D_2 \right] \quad (10b)$$

$$\omega_3 \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[D_1 \omega_3 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[M_3(t) - (I_2 - I_1) \omega_2 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \omega_1 \left[t - \frac{\Delta t}{2} \right] \frac{\Delta t}{I_3} \right] D_2 \right] \quad (10c)$$

式(10)を適用するには，任意多面体ブロックの主慣性モーメント I_1, I_2, I_3 を適切に得ることが条件となる．ただし，式(10)は式(2)に見られる角速度の積の項が消失して

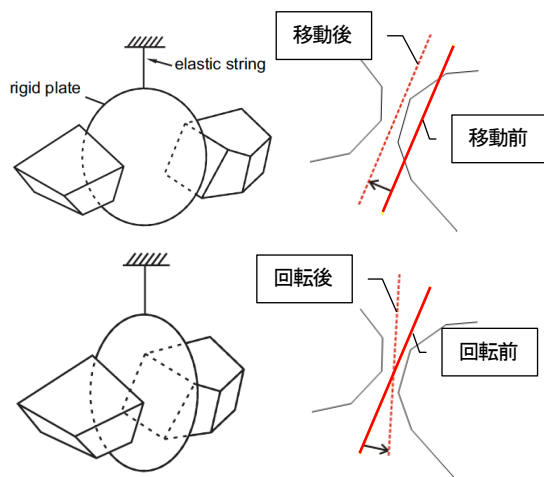


図-1 ブロックの接近に応じたcommon-planeの配置の変化 (一部加筆)[®]

いるため、運動時間が長く多数の計算ステップを要するような問題に対しては、精度にやや問題が発生する可能性が考えられる。

(2) 任意多面体ブロックの主慣性モーメント

式(10)を回転の運動方程式として適用する場合、時々刻々と姿勢が変化する多面体ブロックの主慣性モーメントを求めることが要求される。主慣性モーメントを得る近似的な方法として、岩塊を球体と見なして換算平均径を用いる方法も見受けられる。しかしこの方法では、細長い形状や扁平な形状の岩塊の回転運動を厳密に再現できない可能性がある。そこで本稿では、多面体内部を複数の四面体に分割して、個々の四面体の慣性モーメントを求めてこれらを合計する方法⁹⁾により、任意多面体ブロックの慣性モーメントを得る方法を取る。そして、本稿ではこれを3DECコードに導入した。

(3) common-plane法による接触判定

多面体ブロックの有効な接触判定法の1つcommon-plane法[®]がある。common-planeは、図-1に示すように、接近するブロック間の空間を両断して両者の中間位置に配置される剛体平面と考えればよく、common-planeと最も近接している双方のブロックの頂点とcommon-planeとの距離を合計し、合計距離が最大となる配置を取ると定義される。この定義により、ブロックどうしがどのように接近しようともcommon-planeは必ず得られる。図-1に示すようにブロック位置の時々刻々の相対的な変化に応じて、common-planeも時々刻々と移動・回転する様子が分かる。common-plane法による接触判定は、ブロックどうしの接触を直接調べるのではなく、ブロックの頂点とcommon-planeとの接触を調べる間接的な方法である。common-plane法の開発の背景には、ブロック相互の接触

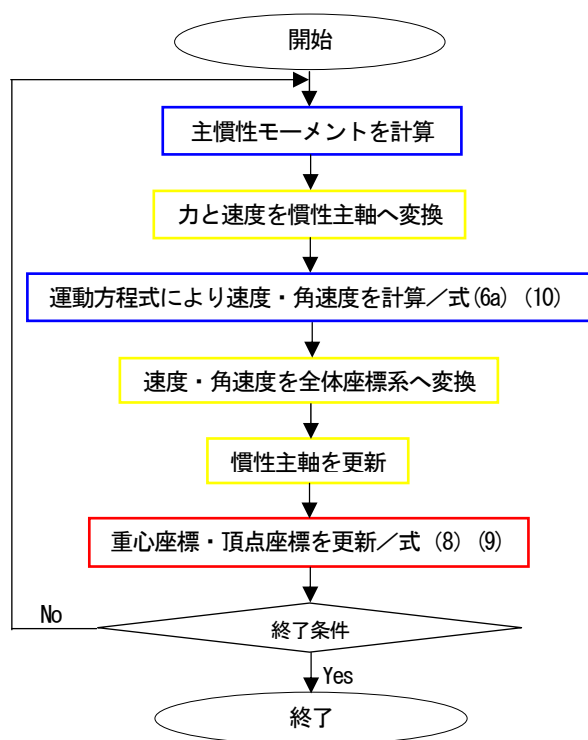


図-2 任意多面体ブロックの運動計算フローチャート

を直接調べる接触判定法の適用性の限界が挙げられる[®]。

(4) 任意多面体ブロックの運動計算フローチャート

任意多面体ブロックを取り扱う前節(1), (2)に基づく計算の流れを図-2に示す。図の中で、青色枠は局所座標系での処理、赤色枠は全体座標系での処理、黄色枠は、座標変換に関する処理を示す。計算手順としては、まず、斜面が配置されている全体座標系で得られた外力、速度、角速度を慣性主軸に変換する。次に、慣性主軸において運動方程式により速度、角速度を得る。最後に、慣性主軸を更新してから、速度、角速度を再び全体座標系に変換し、多面体ブロックの頂点の座標を得る。この操作を時々刻々と繰り返すことで多面体ブロックの3次元空間における並進運動、および、回転運動が得られる。

4. 崩落シミュレーションの急崖斜面への適用

(1) 対象斜面の地形・地質状況

対象斜面は噴出直後の急冷作用により柱状節理の発達した新第三紀の溶結凝灰岩によって構成されている。河川の攻撃斜面に位置し、激しい下刻や側方浸食作用を被り、柱状節理岩塊が林立して座屈崩壊の進行した比高100～150mに達する70°を越える急崖斜面が形成されている。本稿では、道路からの比高約115mに位置し、下端がオーバーハング状に不安定化した写真-1に示す岩



写真-1 崩落シミュレーション対象岩塊群

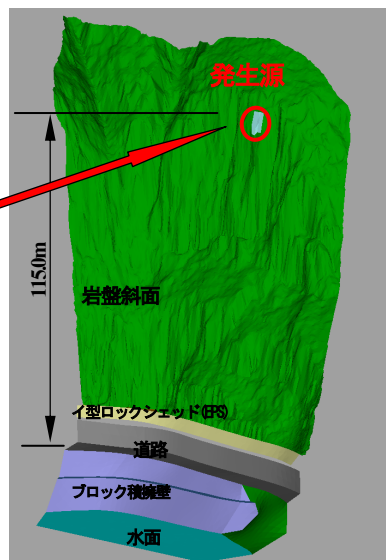
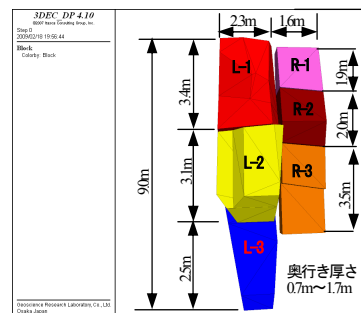


図-3 斜面および崩落岩塊の個別要素法モデル



(b) 崩落岩塊のモデル化

表-1 崩落岩塊ブロックの体積と質量

岩塊記号	岩塊体積(m ³)	質量(t)
L-1	6.980	18.1
L-2	6.990	18.2
L-3	3.588	9.3
R-1	2.703	7.0
R-2	4.301	11.2
R-3	4.534	11.8
平均	4.849	12.609

表-2 物性値

崩落岩塊の接触相手	質量密度(kg)	反発係数e	すべり摩擦角φ(°)
崩落岩塊	2600	0.45	30.0
崩落岩塊の背面		0.45	30.0
岩盤斜面		0.45	30.0
緩衝砂		0.10	35.0
イ型ロックシェッド(EPS)		0.30	30.0
道路(アスファルト)		0.40	30.0
ブロック積み擁壁		0.40	30.0
小段		0.40	30.0
水面		0.10	89.0

塊群(全6岩塊/背面傾斜75°)を崩落シミュレーションの対象とした。

(2) 斜面および崩落岩塊のモデル化

図-3(a)に示す斜面の個別要素法モデルは、航空レーザ計測で得られた点群データを柱状節理によるブロック化が良好に再現されるよう密なメッシュデータ(0.5m間隔)に変換したDEMデータを用いてTinを生成し、Tinで区切られた三角形プレート集合体として作成した。また、イ型ロックシェッド(緩衝材としてEPS設置)、道路、ブロック積み擁壁などの構造物は、設計図書に基づき作成した。シミュレーションの対象岩塊群は急崖斜面上に存在するため、クライミング調査時の写真を参考にこれらに可能な限り忠実に図-3(b)に示す個別要素モデルを作成した⁷⁾。図中では6岩塊に記号(L-1~R-3)を付した。崩落岩塊ブロックの体積と質量を表-1に示す。

(3) 崩落シミュレーションの設定条件

崩落岩塊の跳躍特性は、岩質が類似の斜面¹⁰⁾を参照して表-2に示す反発係数とすべり摩擦角を設定した。ここでは、イ型ロックシェッド上のEPS材に対する跳躍

量は概ね落下高さの1/10と考えて反発係数を0.3とした。崩落シミュレーションは、崩落岩塊の背面が劣化して全6岩塊が同時に崩落を開始すると想定し、全ての岩塊ブロックが完全に停止するまで実施した。

(4) 崩落シミュレーションの結果

a) 岩塊の運動状況

崩落開始より3秒時、5秒時、6秒時の岩塊の運動状況、および、14秒時(最終停止状態)の岩塊の配置状況を図-4に示す。岩塊は、崩落開始直後では滑りによる並進運動を呈するが、イ型ロックシェッドや道路に到達するまでは斜面に数回程度衝突している。このことは、図-5に示す並進速度の断続的な変化からも伺える。また、5秒時には斜面横断方向で左右に分岐して流下している様子が見られ、3次元解析の有効性を示す結果であると言える。多面体でモデル化された岩塊ブロックの角辺、面が並進運動と回転運動により斜面と接触した結果として、運動軌跡や最終停止位置が得られている。

b) 岩塊の回転運動

6つの崩落岩塊のうち比較的大きな角速度が得られたL-2岩塊とR-1岩塊について角速度の時刻歴を図-6に示す。角速度はそれぞれ、全体座標系のx軸周り、y軸周り、z軸周りの成分で示してある。図-6より、岩塊が斜面に接触する毎に回転運動が増加する状況が伺える。また、2つの岩塊ともに最大で25(rad/秒)程度の角速度が得られている。これは、20~25(rad/秒)付近に集中している島内らの現場落石実験の結果¹¹⁾と類似している。島内らの実験では、最大で47(rad/秒)の高回転が計測されている。これは、実験に用いられた岩塊の形状が球体や立方体であり、図-3(b)に示した岩塊形状に比較すれば形状が単純であるため回転が容易であったと考えられる。

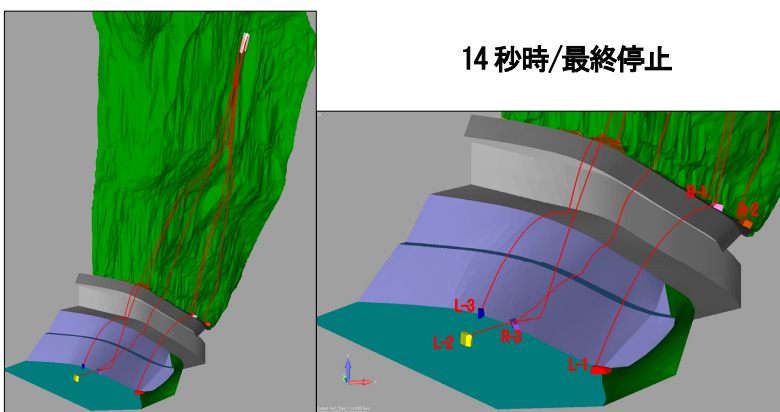
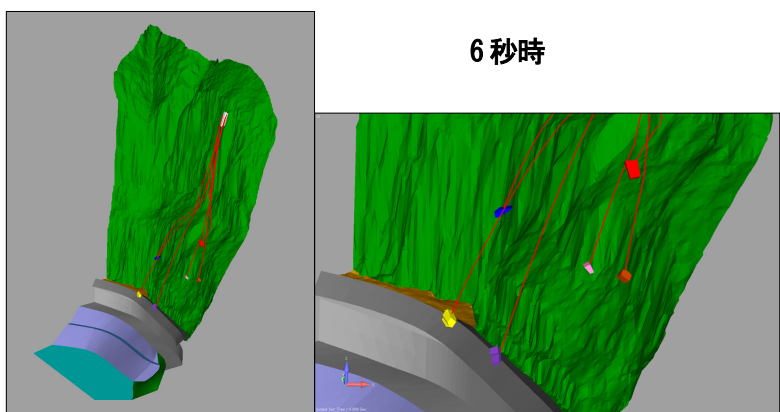
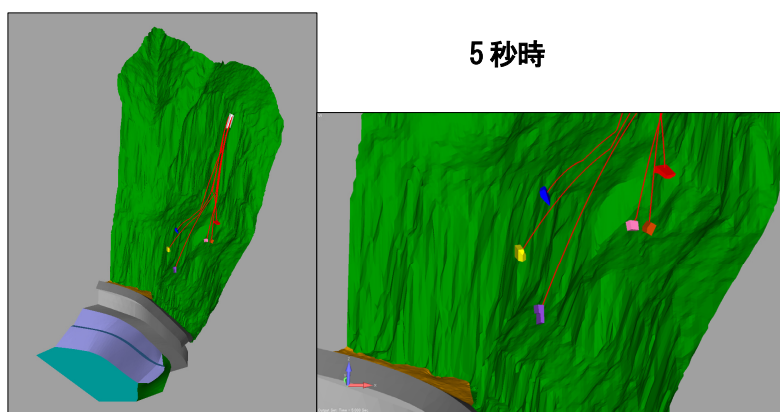
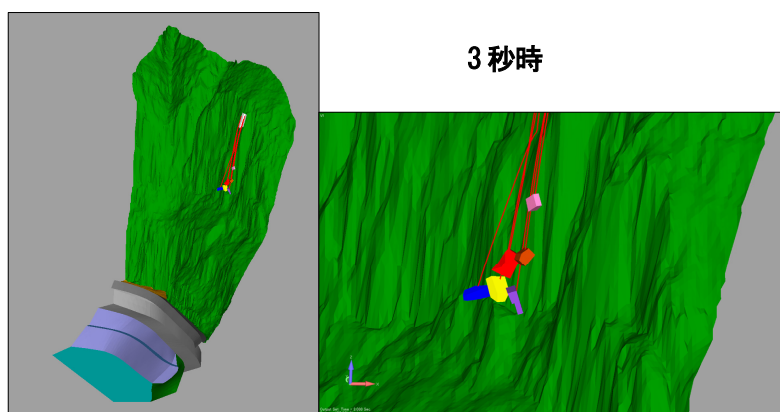


図-4 崩落岩塊の運動状況と軌跡(赤実線は運動軌跡)

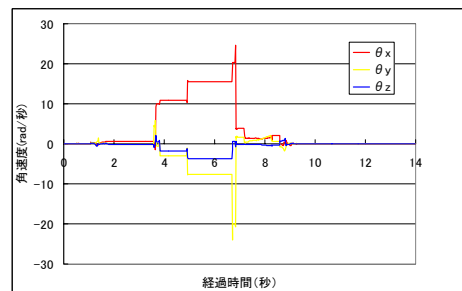
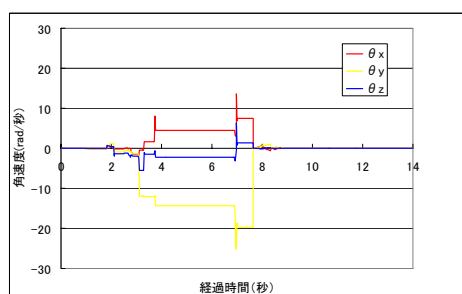
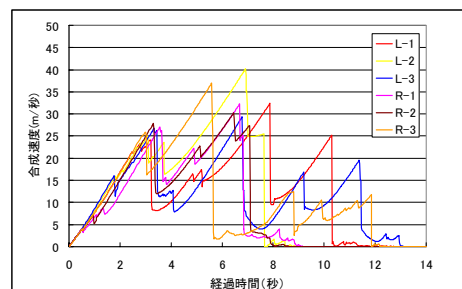


図-6 角速度の時刻歴(単位:rad/秒)

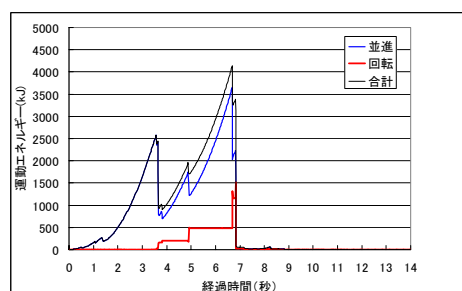
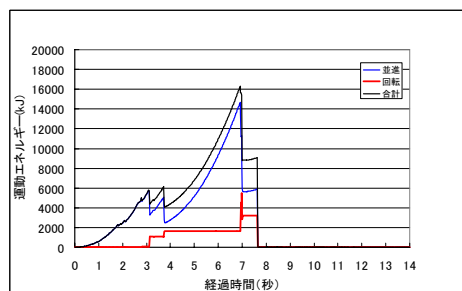


図-7 運動エネルギーの時刻歴(単位:kJ)

c) 運動エネルギー

前項 b) と同様に L-2 岩塊と R-1 岩塊について運動エネルギーの時刻歴を図-7 に示す。L-2 岩塊は、最大で 16000(kJ) の合計エネルギーが得られているが、回転エネルギーが最大となる 6.9 秒時に着目すると、合計エネルギー 14800(kJ) のうち並進エネルギーは 9300(kJ)、回転エネルギーは 5500(kJ) が発生している。これは、合計エネルギーのうち回転エネルギーが 37% を占める。また、並進エネルギー 1 に対する回転エネルギーの比率は 0.59 である。一方、I 型ロックシェッドに衝突した R-1 岩塊では最大で 4000(kJ) の合計エネルギーが得られているが、回転エネルギーが最大となる 6.8 秒時に着目すると、合計エネルギー 3120(kJ) のうち並進エネルギーは 1600(kJ)、回転エネルギーは 1520(kJ) が発生している。これは、合計エネルギーのうち回転エネルギーが 49% を占める。また、並進エネルギー 1 に対する回転エネルギーの比率は 0.95 である。たとえ瞬間的とは言え、落石対策便覧¹²⁾で述べられている並進エネルギー 1 に対して回転エネルギーの比率が 0.1 程度であるとの目安をそのまま踏襲することが困難な事例であることが伺える。

d) 対策工の検討

L-2 以外の岩塊は I 型ロックシェッドに衝突しており、このうち運動エネルギーが最大である L-1 岩塊 (10000(kJ)) より、防護工では不可能であると判断され、ワイヤロープ掛工などの予防工が検討されている。

5. まとめ

本稿では、任意多面体ブロックの取り扱いを可能とする回転運動の合理的な定式化を検討した。そして、これを導入した 3 次元個別要素法を急崖斜面に適用したところ、回転運動の再現の重要性を示唆する結果が得られた。回転の運動方程式において角速度の積の項の消去による精度の課題が残されている。今後は、この課題に対して定式化を改良する予定である。

参考文献

- 1) 市川卓也, ほか: 3 次元個別要素法による落石シミュレーション, 社) 土木学会第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.165-168, 2007.
- 2) 表 真也, ほか: 2 次元および 3 次元 DEM を用いた落石シミュレーションに関する検討, 社) 土木学会第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.135-140, 2008.
- 3) 大槻 敏, 楠見晴重, 松岡俊文: 個別要素法による岩盤斜面の崩壊シミュレーション解析, 社) 土木学会第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.93-96, 2006.
- 4) 氏平増之, 川村洋平: ブロックモデルによる三次元落石シミュレーションの構造, 社) 土木学会第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.255-260, 2005.
- 5) 細谷昭吾, ほか: 落石の三次元数値シミュレーションに関する研究, 社) 応用地質学会, 応用地質, 第 44 巻, 第 1 号, pp.25-35, 2003.
- 6) 山田 正雄, 中川 光雄, 鶴飼 恵三, 江角淳, 近重朋晃: 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, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, pp.480-491, 2009.
- 7) 中川 光雄, 神原 規也: 3 次元個別要素法による岩塊崩落シミュレーションの急崖斜面への適用, 第 64 回年次学術講演会概要集, pp.169-170, 2009.
- 8) Cundall, P. A. : Formulation of a Three-dimensional Distinct Element Model -Part I: A Scheme to Detect and Represent Contacts in a System Composed of Many Polyhedral Blocks, *Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25, pp. 107-116, 1988.
- 9) F. Tonon : Explicit Exact Formulas for the 3-D Tetrahedron Inertia Tensor in Terms of its Vertex Coordinates, *Journal of Mathematics and Statistics* 1 (1): 8-11, 2004 ISSN 1549-3644, 2004.
- 10) 日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考資料ー落石シミュレーション手法の調査研究資料, 2002.
- 11) 島内哲哉, ほか: 落石の衝突現象における回転の影響について, 第 44 回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.1749-1750, 2009.
- 12) 日本道路協会, 落石対策便覧, 2000.

SIMULATION OF ROCK MASS FAILURE BY DISTINCT ELEMENT METHOD BY USING ARBITRARY POLYHEDRON BLOCK

Mitsuo NAKAGAWA and Noriya KAMIHARA

For simulation of rock mass failure to determine a construction area and method of countermeasures against slope failure, a method is required to adequately model topography of a slope, and shape and size of rock mass. In this study, representing the slope and rock mass as polyhedron blocks was considered to be effective for creating a more realistic model. The three-dimensional distinct element method was improved to illustrate the high-speed collision and rotation, and its applicability to simulation of the rock mass failure was subsequently examined. In addition, speed and kinetic energy of the failed rock mass were provided, and the improved method was shown to be useful for the examination of protection works.