

堆積層の落石エネルギー吸収効果に関する DEM 解析

Energy absorbing effect of granular mat against rockfall using DEM

(株)構研エンジニアリング 正 会 員 ○刈田 圭一 (Keiichi Karita)

(株)構研エンジニアリング 正 会 員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)

(株)構研エンジニアリング 正 会 員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)

名古屋工業大学大学院 学生会員 湯浅 知英 (Tomohide Yuasa)

名古屋工業大学 正 会 員 前田 健一 (Kenichi Maeda)

1. はじめに

我が国の道路における自然災害に注目すると、斜面災害の割合が圧倒的に高く、その中でも落石災害は全体の16%を占めている。落石対策工には待ち受け対策（落石防護工）や発生源対策（落石予防工）があるが、既存の落石防護工では斜面の経年劣化に伴う落石規模等の変化に対応できず、安全余裕度の低下がみられる箇所も確認され始めている。最近では、その対応として落石の衝撃力を対策工衝突前にあらかじめ分散・緩衝させる工法、例えば、落石防護擁壁・柵背後の空き空間（ポケット）にサンドクッションや緩衝材を設置し、落石のエネルギー低減を図る工法が注目されている。

本研究では、これら近年注目されている工法のうち堆積層の落石エネルギーの低減効果に着目する。砂や石ころの集まりである堆積層は、入手が容易かつ安価であるため、落石エネルギーを効果的に低減できるのであれば、既存対策工の安全余裕度を高めるためにも積極的に活用すべきである。しかし、そのためには低減効果の性能評価が不可欠である。そこで本研究では、個別要素法、DEM(Discrete Element Method)という数値シミュレーション¹⁾を活用し、堆積層の落石エネルギー低減効果の性能評価を目指す。

また堆積層のエネルギー低減性能評価とともに、DEM解析で必要なモデル化について分かりやすい整理を試みている²⁾。

2. 堆積層の落石対策としての性能評価

堆積層の落石エネルギー低減性能を把握するにあたり、まずは低減性能 E を式-1 のように表現³⁾してみる。

$$E = \{ \text{堆積層の落石エネルギー低減性能} \} = f_E(R; G) \quad (1)$$

$$\text{ただし, } R = \{ \text{落体特性} \} = f_R(V; Pr) \quad (2)$$

$$G = \{ \text{堆積層特性} \} = f_G(P; C; A) \quad (3)$$

式-1 に示す通り、堆積層のエネルギー低減性能 E は、堆積層に入射する落体特性 R と、堆積層の地盤的特性 G の両者により説明できる。例えば、落石の堆積層入射角度が浅い場合と深い場合では落体のエネルギー低減量に大きな違いが生じることが予想される。また逆に、入射角度等の落体特性 R が同じであっても、堆積層の傾斜度合といった幾何学的特性や堆積層の密度などの力学的特性の違いによって低減効果はやはり大きく異なることが

予想される。よって、個々の落石サイトに存在する堆積層の E を評価するためには、 R 、 G 両者を把握する必要があると分かる。

R についてももう少し詳しくみてみる。 R は、式-4、式-5 で示すように落体入射時の速度と入射角度からなる運動特性 V と質量や形状などの落体の種類 Pr の 2 つからなる。また、このうち V は、過去の現場落石実験等⁴⁾ から明らかなように、結果に大きなばらつきを有しているため、ばらつきを有する変数とみる必要があるようである。なお V と Pr はどちらも斜面形状などが異なる個々の落石サイトに固有の情報から決まるという特徴を持つ。

$$V = \{ \text{堆積層入射時の運動特性} \} = f_V(V_x, V_y, V_w, \theta) \quad (4)$$

ここで、 V_x は落石の堆積層入射時の水平速度、 V_y は鉛直速度、 V_w は角速度、 θ は入射角度を示している。

$$Pr = \{ \text{落体の種類} \} = f_{Pr}(\text{質量, 比重, 形状}) \quad (5)$$

次に、 G についてであるが、これは堆積層の種類、状態、条件の 3 つからなる。

$$P = \{ \text{堆積層の種類} \} = f_P(\text{比重, 粗度, 粒度, 粒径}) \quad (6)$$

$$C = \{ \text{堆積層の状態} \} = f_C(K; S) \quad (7)$$

$$K : \text{堆積層の状態} \{ \text{密度(間隙比), 含水比, 骨格構造} \} \quad (8)$$

$$S : \text{堆積層の応力状態} \{ \text{応力} \} \quad (9)$$

$$A = \{ \text{堆積層の条件} \} = f_A(\text{層厚, 傾斜角, 形}) \quad (10)$$

最終的に E を評価・把握するには、 $R = \{ \text{落体特性} \}$ と $G = \{ \text{堆積層特性} \}$ に含まれる各特性が E にどのような影響を与えるのかについて検討すれば良いことが分かる。

本論文では、 R の影響について 5 章で、 G の影響については 6 章で扱い、3 章ではそれらの検証に必要な DEM 解析のモデル化について述べる。

3. DEM 解析

3.1 DEM によるモデル化の概要

DEM (Cundall & Strack, 1979) は、落石、斜面崩壊、土石流などの不連続体の運動を解く際に、広く一般に使われている解析手法である。各粒子接点には図-1 に示すようなフォークトモデルが用いられており、ばね係数(k_n , k_s)、粘性係数(c_n , c_s)、そして水平方向には摩擦係数(μ)の 3 つのシンプルな要素とパラメータのみで構成されている。しかし、注意しなければいけないのは、この主パラメータだけでは、モデル化された供試体の特性は説明

できない。例えば、パラメータが全く同一であっても、モデル中の粒子サイズや粒度、形状のほか、供試体作成方法に起因する密度などによってもその特性は大きく異なる。

大まかにみると、モデル化粒子の種類をつかさどる種類パラメータ **Pm** と状態パラメータ **Km** の2つに分類できる。

$$\mathbf{Pm} = f_{\mathbf{Pm}}\{D_{\max}/D_{\min}, D_{\min}, \rho_s, \mu, \text{粒子形状}\} \quad (11)$$

$$\mathbf{Km} = f_{\mathbf{Km}}\{k_n/k_s, k_n, h, k_b, s_b, r_b, \text{供試体密度}\} \quad (12)$$

ここで、 $D_{\max}$ は最大粒子半径、 $D_{\min}$ は最少粒子半径、 ρ_s は粒子密度、 μ は粒子間摩擦係数、 k_n は法線方向のばね係数、 k_s は接線方向のばね係数、 h は減衰係数、 k_b , s_b , r_b はボンドに必要な各種パラメータを示している。

3.2 状態パラメータ設定における課題

DEM のパラメータ設定について考えてみる。今、**Pm**, **Km** のモデル化にあたって、**Pm** を **P** と全く同一にモデル化できたと仮定すれば、あとは状態パラメータ **Km** と **K** との対応のみを考えればよいことになる。しかし、例えば、砂の二軸供試体を実粒子サイズでモデル化しようとしても、必要な粒子数が膨大となり計算時間の問題から現実的ではない。そして、この問題への一般的な対処として、モデル化が不完全な **Pm** の影響を **Km** で調整することが少なくない。しかし、実はこれが DEM パラメータの意味を曖昧にする一つの要因であり、このことは、結果的に DEM の実務問題への適応を阻む原因にもなりえてしまう。そのため、実務への適応を進めるためにも、後述するような各種のパラメータの現実的かつ一般的な決定方法の確立と並び、解析スペック等に左右される **Pm** と **Km** の補完関係を明らかにする必要がある。

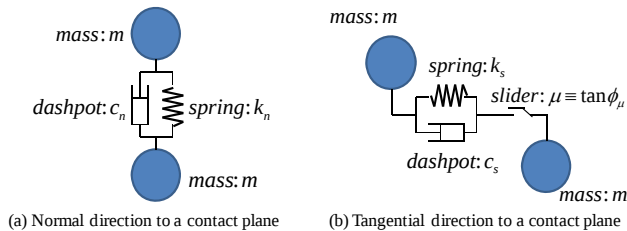


図-1 DEM の粒子間モデル (フォークトモデル)

3.3 状態パラメータの設定法⁶⁻⁷⁾

(1) ばね係数

地盤の動的性質を示す P 波、S 波速度（弾性波動伝搬速度）から、平面ひずみ状態での線形ばね係数を試算する方法が、伯野⁵⁾により式-13 のように提案されており、今回はこれを用いた。

$$k_n = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2, \quad k_s = \frac{1}{4} \pi \rho V_s^2 \quad (13)$$

ここで、 ρ は粒状体全体の密度、 V_p は P 波速度、 V_s は S 波速度である。なお、岩石のように $V_p=1,000(\text{m/s})$ を超えるような地盤では k_n を 10^{10} などと大きなオーダーで設定する必要がある。しかし一方で k_n が大きくなると DEM の計算刻み(dt)を小さくせざるを得ないため、結果的に計算時間を増大させる原因となる。そこで、 10^8 以上のオーダーでは落石挙動に大きな違いが生じないという過去

の経験的事実から、硬い岩盤であっても、 k_n を 10^8 程度で計算を行う場合がある。ただし、上式はあくまでも試算値で、供試体作成後、実挙動に合うようばね係数を再設定する必要がある。

(2) 減衰係数

粒子間には、前述のばねが設定されているが、ばねだけでは伝達された力が永久に減衰せず、粒子間で振動が繰り返されることになってしまう。そのため、ばねを設定した際には必ず粘性力（今回は速度に比例して発生する粘性力）を発揮するダッシュポットを設定しなければならない。

図-2 は円形の落体を鉛直自由落下させた場合に得られる跳ね返り係数 e と減衰係数 h の関係である²⁾。過去に行われた実験によれば、落石をきれいな球形に成形して落とした場合、跳ねかえり係数が 0.7 程度の高い値を示すことが確認されている。一方で、自然の落石は複雑な形状であり、また衝突時の破砕などの影響で低い跳ね返り係数しか示さない。解析では完全な円形や球形が用いるため、解析上でも高い跳ね返り係数を示すが、形状をそのままに上述の低い跳ね返り係数を再現するため、 h を高く設定することで調整している。なお、一般には臨界減衰である $h=1$ を使うことが多い。

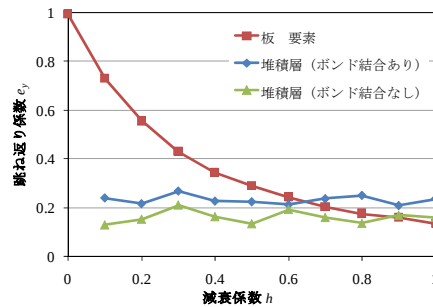


図-2 減衰係数と跳ね返り係数の関係

(3) 摩擦係数

図-3 は、二軸圧縮試験の解析結果より得られた内部摩擦角 ϕ_i と初期に設定する粒子間摩擦角 ϕ_μ との関係を示したものであり⁶⁾、この関係から $\mu (= \tan \phi_\mu)$ を決定することができる。また図から、いくら μ を大きく設定しても、非円形粒を導入しなければ高い ϕ_i が発揮されないことも分かる。なお今回は、 $\phi_i=25(\text{deg})$ 程度で十分なため、粒子形状は円形で $\mu=0.466$ として解析を行っている。

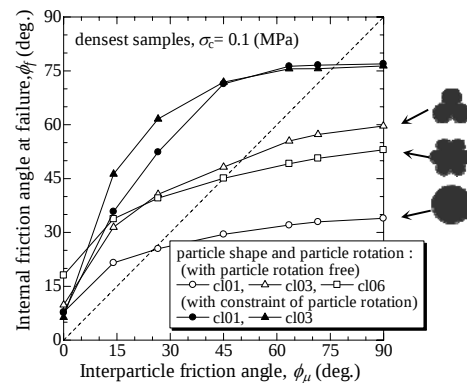


図-3 供試体が示す内部摩擦角と粒子間摩擦角

4. 堆積層特性とその調査法

DEM のパラメータ設定には現地調査や室内試験（以下、調査）が必要である。しかし、これら調査結果とパラメータの関係を明確に示したものは少ない。ここでは堆積層において実施可能な調査とパラメータの対応について整理した結果を表-1 に示しておく。

表-1 調査とパラメータの関係

調査試験名	得られる指標等	DEM パラメータ
現地踏査，目視検査	堆積層厚や 粒子形状等	堆積層の境界条件，粒子形状
粒度試験	最大・最小粒径	$D_{\max}$, $D_{\min}$
土粒子密度，含水比試験	土粒子密度， 含水比	ρ_s
スウェーデン式貫入試験，コーン貫入試験	換算 N 値 (ϕ , V_s , D_r)	k_n , k_s , μ , (密度)
表面波探査試験	V_s (V_p , G , E)	k_n , k_s

5. 落体特性 R が落石エネルギー低減性能に及ぼす影響

V が堆積層のエネルギー低減にどのような影響を与えるのか、堆積層スケール（図-4 右）で調査した結果を述べる。今、Pm, Km 一定条件で、V, θ , V_0 のみ変化させて落体を斜め入射させた。落体の入射前に対する入射後の運動エネルギーの比（エネルギー残存率と呼ぶ）とその分担割合の結果を図-4～6 に示す。

図-4 は $\theta=45(\text{deg})$ 一定で、V のみ変化させた時のエネルギー残存率の変化である。V によらずほとんど一定値を示すことから、今回の速度の範囲では速度依存性は発現せず、V の影響はないと考えることができる。この結果から、以下 V 一定で解析を行った結果である。

図-5 は入射角度 θ を変化させた際の結果である。この結果から、 θ が小さくなるにつれて、エネルギー残存率が低下していくことが分かる。また、入射後の運動エネルギーの内訳を見ると、 θ が $45(\text{deg})$ 周辺では回転エネルギーと水平方向運動エネルギーの二者が支配的であり、割合もほぼ一定である。よって、跳ね返り係数も一定程度になることも予測できる。ただし鉛直落下に近い $0(\text{deg})$ 周辺では、鉛直方向運動エネルギーへの分担が支配的となり、逆に θ が極めて浅い $80(\text{deg})$ 周辺では水平方向エネルギーへの分担が支配的となる。

図-6 は $\theta=45(\text{deg})$ 一定で、 V_0 を変化させた時の結果である。エネルギー残存率は V_0 とその向きによって大きく変化する。正回転では残存率が高いが、負回転になればなるほど残存率は低下していくことが分かる。エネルギーの内訳に着目すると、 V_0 が負に向かうに従って水平方向運動エネルギーの分担が減少していき、さらに進むと、回転も阻止され鉛直方向運動エネルギーへの分担が支配的となることが分かる。

以上の結果より、堆積層のエネルギー低減効果は、 θ と V_0 に大きく影響を受けることが明らかとなった。堆積層のエネルギー低減性能の観点から見ると、 θ が小さければ小さい程危険であり、また、 V_0 が正回転かつ大きければ大きい程危険であることが分かった。また、後述する堆積層特性 G によって残存率の絶対値は変化するが、その基本的傾向は変わらないことも確認できた。

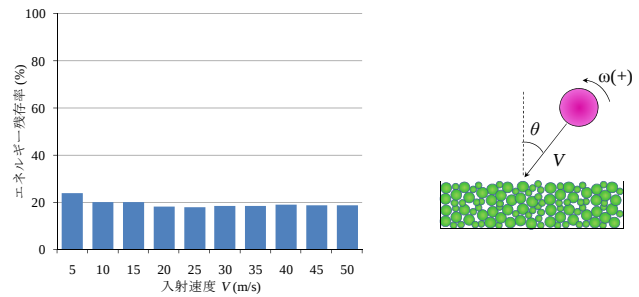
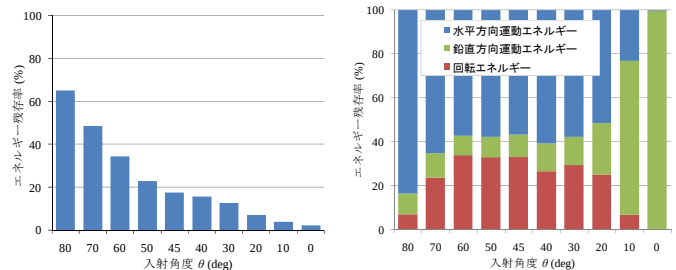
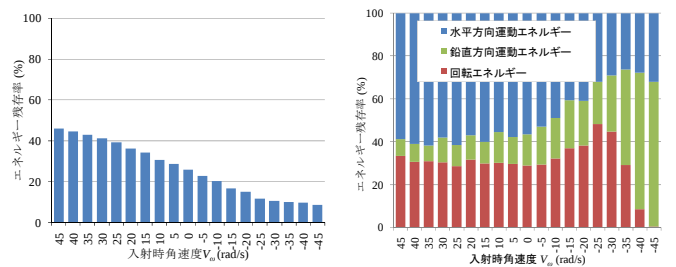


図-4 合成速度 V (m/s) とエネルギー残存率%の関係

図-5 入射角度 θ (deg) とエネルギー残存率%の関係図-6 入射時角速度 V_0 (rad/s) とエネルギー残存率%の関係

6. 堆積層特性が落石エネルギー低減性能に及ぼす影響

落体のエネルギー低減性能は、R のみならず堆積層特性 G によっても大きく異なることが知られている。ここでは、DEM によりその基礎的な検討を行うため、Pm, Km を変えてモデル化した様々な特性をもつ堆積層に、落体を鉛直自由落下あるいは斜め入射させて得られた結果について紹介する。堆積層に入射した落体は、鉛直自由落下では堆積層へ貫入して静止し、斜め入射では図-7 に示すようにエネルギーを大きく失って反射する。そこで、各種の堆積層特性による影響を評価するため、鉛直自由落下の場合は落体の貫入率または貫入量、そして斜め入射の場合には、落石に残存する運動エネルギーの比であるエネルギー残存率の 2 つの指標によりその影響を整理することとした。

6.1 粒子サイズ（粒子半径 $D_{\min}$, $D_{\max}$ ）の影響

DEM 解析では粒子数が計算時間に影響するため、粒子サイズを検討することは解析面からも重要である。今回は $(D_{\min}, D_{\max}) = (0.0125, 0.025)$, $(0.05, 0.1)$, $(0.025, 0.05)$ の 3 ケースで比較した。なお、粒度の指標となる粒径の比 $R_d (=D_{\max}/D_{\min})=2$ で一定となるように設定している。その結果、貫入率は粒子サイズが小さいほど大きくなるが、後述の非円形粒子の導入によりある程度に打ち止めになるようである。一方で、エネルギー残存率は粒子サイズによらず一定程度であり、今後はその点についてより詳細に検討する必要がある。

6.2 粒子形状の影響

DEM 解析では凹凸を含んだ粒子形状を表現する方法として、複数の同径円形粒子による結合、またはそれら

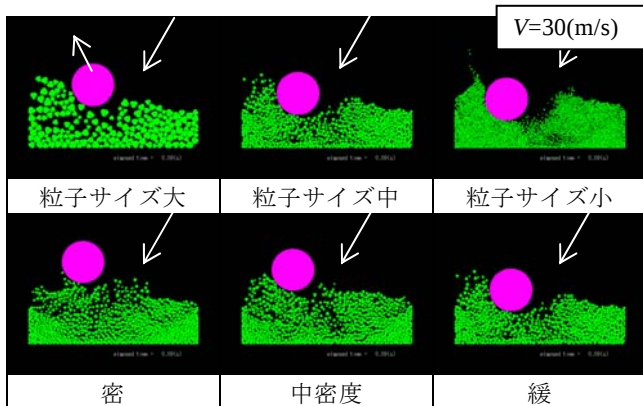


図-7 斜め入射時の落体の様子（粒子サイズと密度別）

のオーバーラップにより表現する（図-8）。ここでは、円形粒子(c101)と、3つの粒子で構成されオーバーラップ量が50%(c103₅₀)の粒子と0%(c103)の粒子の3ケースで比較した。その結果、非円形性が大きくなる程、エネルギー残存率が大きくエネルギー低減効果が抑えられることが分かった。非円形性が高いほど高強度の地盤がモデル化できるが、高強度地盤は緩衝効果が小さいと考えられ、このことに起因するものだと考えられる。

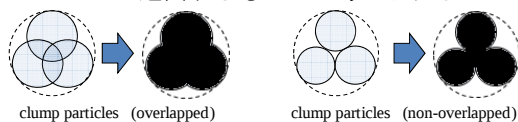


図-8 非円形粒子のモデル化

6.3 粒子間摩擦（ μ ）の影響

堆積層の粒子間摩擦係数 μ を $\phi=15, 45, 80(\text{deg})$ となるよう3ケース設定して比較を行った。基本的な傾向が6.2の場合と同様なのは、図-3で示したように μ も強度を司るパラメータであるためだと考えられる。また μ が大きい2ケースで大きな差が見られないのは、 μ をいくら上げてもある強度以上を発揮しないためだと考えられる。

6.4 密度（間隙率）による影響

堆積層の密度を表す間隙率を約10%, 14%, 40%でモデル化し、それぞれ密、中密度、緩と名付けた3ケースの比較を行った。密度による影響は非常に大きく、特に貫入率への影響が大きい。例えばロックシュッド上面に設置する敷砂⁸⁾などでは、経年変化によって密度変化することが予測されるが、今回のこうした結果から、緩衝効果の変化を予測できる可能性があることが分かった。

6.5 層厚による影響

堆積層厚を0.5, 0.9, 1.5(m)の3ケースで、落石挙動を比較した。なお、図-9の結果は縦軸が貫入率ではなく、貫入量になっている点に注意して頂きたい。貫入量は層厚の上昇とともに小さくなるが、90(cm)以上ではエネルギー低減効果にそれ程大きな違いがない結果となった。これは落石対策便覧で示された砂層厚を落石直径以上に

すれば緩衝効果にさほど違いがないとする結果とも整合しており、DEMでもその傾向が確認できた。

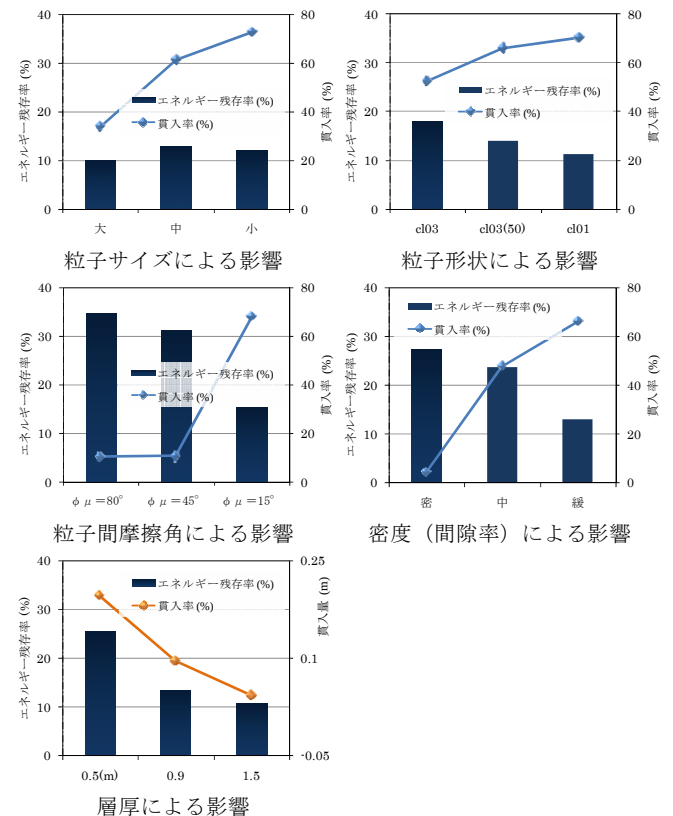


図-9 各特性によるエネルギー残存率と貫入率%の変化

7. まとめ

堆積層のエネルギー低減性能 E は、ばらつきを有する落体特性 R と堆積層の幾何学的あるいは力学的特性 G の相互関係により決まる。そして、 G の特性把握に必要なのが調査であり、調査に基づき如何にDEMのモデル化を実施すべきか、マクロ視点から少なからず整理できた。また G 特性と貫入率やエネルギー残存率との基礎的關係について理解できた。今後は、鉛直自由落下などの比較的簡易な実験結果の挙動をもとに堆積層のパラメータ決定する方法を検討するとともに、実現象で観測されるような回転を伴う斜め入射時などのエネルギー残存率などを精度よく予測することを目指している。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. and O.D.L. Strack: A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979
- 2) 湯浅 知英ら：落石挙動のばらつきを考慮した堆積層の衝撃吸収効果，第21回中部地盤工学シンポジウム, 2009
- 3) 三笠 正人：土の強度と安定計算法，基礎のための土質工学，37年度講習会テキスト，1963
- 4) 伯野 元彦：破壊のシミュレーション，森北出版，2004
- 5) Maeda, K. and Yuasa, T.: Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009
- 6) 地盤工学会：「実務利用を目指すマイクロジオメカニクス」に関するシンポジウム，2008
- 7) Maeda, K. and Hirabayashi, H.: Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, Journal of Applied Mechanics, JSCE, pp.623-630, 2006
- 8) 吉田 博，榎谷 浩，今井 和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝突特性に関する解析，土木学会論文集，Vol.392/I-9, 1988