落石挙動のばらつきを考慮した堆積層の衝撃吸収効果

名古屋工業大学大学院　学生会員　湯淺　知英
名古屋工業大学　国際会員　前田　健一
(株)構研エンジニアリング　刈田　圭一
(株)構研エンジニアリング　牛渡　裕二

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）のほかロープやネットを用いた中間的な対策があるが，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定量化を目指す．

また近年は，性能ベースの評価に関する関心も高い．落石対策の分野では設計施工の際，落石対策便覧 [2] 等（以下，マニュアル）が用いられその実績から信頼性も高い．しかし一方で，DEM をはじめとする落石数値シミュレーション技術等も向上しており，こうした解析結果を設計や意思決定時にうまく取り入れるべき段階にきたと考えられる．そこで，こうしたマニュアルとの両立を図るためにも，本論文では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. 堆積層の落石対策としての性能評価

2.1 堆積層のエネルギー低減性能を決定づける特性

堆積層の落体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] してみることにする．

$$\mathbf{E} = \{\text{堆積層の落石エネルギー低減性能}\} = f_{\mathrm{E}}\{\mathbf{R};\mathbf{G}\} \tag{1}$$

ただし，

$$\mathbf{R} = \{\text{落体特性}\} = f_{\mathrm{R}}\{\mathbf{V};\mathbf{Pr}\} \tag{2}$$

$$\mathbf{G} = \{\text{堆積層特性}\} = f_{\mathrm{G}}\{\mathbf{P};\mathbf{C};\mathbf{A}\} \tag{3}$$

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．

さて，まず **R** について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] からも明らかなように，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りそうである．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．

$$\mathbf{V} = \{\text{堆積層入射時の運動特性}\} = f_{\mathrm{V}}\{V_x, V_y, V_\omega, \theta\} \tag{4}$$

$$\mathbf{Pr} = \{\text{落体の種類}\} = f_{\mathrm{Pr}}\{\text{質量, 比重, 形状}\} \tag{5}$$

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_ω は角速度，θ は入射角度を示している．

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．ここで，種類とは外部環境によらず不変のもので，状態とは外部環境に左右されるものを示す．例えば，土を水中に長時間放置すると，土の強度は維持されず変化するが，土の比重や粗度は変化しない．よってこの場合，比重や粗度は種類に分類でき，強度は状態に分類できる．また，条件とは，目視で確認できるマクロな幾何学的特性を示す．なお，これら 3 つの特性は，さらに以下に示す幾つかの要素に細分化できる．

$$\mathbf{P} = \{\text{堆積層の種類}\} = f_{\mathrm{P}}\{\text{比重, 粗度, 粒度, 粒径}, LL, PL, PI\} \tag{6}$$

$$\mathbf{C} = \{\text{堆積層の状態}\} = f_{\mathrm{C}}\{\mathbf{K};\mathbf{S}\} \tag{7}$$

$$\mathbf{A} = \{\text{堆積層の条件}\} = f_{\mathrm{A}}\{\text{層厚, 傾斜角, 形}\} \tag{8}$$

ここで堆積層の状態 **C** は式-7 に示すように，構造状態 **K** と応力状態 **S** により表される．

Energy absorbing effect of granular mat against rockfall behaviors

Tomohide YUASA, Kenichi MAEDA (maeda.kenichi@nitech.ac.jp) (Nagoya Institute of Technology)
Kei-ichi KARITA, Yuji USHIWATARI (Koken Engineering Co.,LTD.)

$$\mathbf{K} = \{\text{堆積層の構造状態}\} = f_{\mathrm{K}}\{\text{密度(間隙比), 含水比, 骨格構造}\} \quad (9)$$

$$\mathbf{S} = \{\text{堆積層の応力状態}\} = f_{\mathrm{S}}\{\text{応力}\} \quad (10)$$

ここで，三笠[3]によれば，応力状態 **S** は，**P**，**K** により決定できるとして，式-11 のように表せると指摘している．

$$\mathbf{S} = f_{\mathrm{S}}\{\mathbf{P};\mathbf{K}\} \quad (11)$$

これを考慮すれば，最終的に **G** は式-12 のように表せる．

$$\mathbf{G} = f_{\mathrm{G}}\{\mathbf{P}; f_{\mathrm{C}}(\mathbf{K};\mathbf{S}); \mathbf{A}\} = f_{\mathrm{G}}\{\mathbf{P}; f_{\mathrm{C}}(\mathbf{K}, f_{\mathrm{S}}(\mathbf{P};\mathbf{K})); \mathbf{A}\} = f_{\mathrm{G}}(\mathbf{P};\mathbf{K};\mathbf{A}) \quad (12)$$

以上より，堆積層特性 **G** は，独立した **P**，**K**，**A** の 3 つの特性からなることが分かる．なお，**G** は **R** と異なり室内実験でも確認できる特徴がある．また，堆積層に落石などの高速な物体が衝突する変形破壊現象予測は，地盤以外でも注目されている研究テーマである[5]．さて，最終的に **E** を評価・把握するには，$\mathbf{R} = f_{\mathrm{R}}\{\mathbf{V};\mathbf{Pr}\}$ と $\mathbf{G} = f_{\mathrm{G}}\{\mathbf{P};\mathbf{K};\mathbf{A}\}$ 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 4 章で，**G** の影響については 5 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．

2.2 V 特性に含まれるばらつきの考慮

落石のような自然現象の評価にあたっては，結果に含まれるばらつきを適切に評価に取り入れる必要がある．ここでは，上記の各特性のうち，不確定性原理に示されるような除去できない本質的なばらつきに着目する．具体的には，**V** に含まれるばらつきに着目し，4 章でその評価法について詳しく扱うこととする．

2.3 堆積層特性とその調査法

堆積層特性 **G** は別の観点から分類することもできる．例えば，**G** のうち，**P**，**C** のような力学的特性は，剛度と強度特性に分類され，剛度は主に V_{p}，V_{s}（弾性波動伝播速度）構造に起因して決定されるものであり，強度は主にせん断強度に起因するものである．V_{p}，V_{s} 構造は密度等に依存する．また，せん断強度も直接的には ϕ や σ に依存するが，ϕ 自身は密度や粒度などから決まる．

現地調査，あるいは室内試験は，土の点的情報を得るものと，面的な情報を得るものとに分類されるが，どの方法も直接的，間接的かは別として，土の種類と状態を特定するために行われることに違いはない．ここでは，主な試験法とそれによって得られる堆積層の特性の関係を表-1 に示しておく．

表-1　調査により得られる堆積層の特性

試験名	得られる指標等	得られる特性
現地踏査，目視検査	層厚，傾斜角	幾何学的特性
粒度試験，密度試験等	形状指標	力学的特性，拘束圧依存性など
標準貫入試験（SPT）	N 値	$\phi, V_{\mathrm{s}}, D_{\mathrm{r}}$
スウェーデン式貫入試験（SS 試験）		ϕ
表面波探査試験	Vs 構造	G, E

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，DEM のモデル化とは，ただこの 3 つのパラメータ（主パラメータと呼ぶ）をどう設定するかを意味しないことである．言い換えれば，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が異なれば，供試体の特性は大きく異なる．また供試体作成方法や粒子形状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．

そこで今回，DEM によるモデル化の概念を整理するため，2.1 と同様な方法で，各パラメータを式-13，式-14 のようにまとめてみた．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．

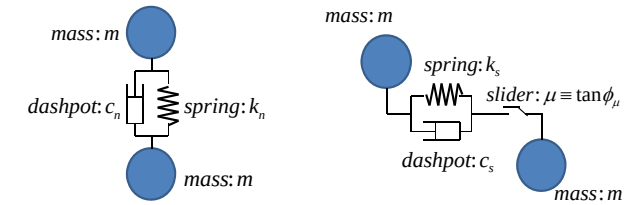
$$\mathbf{Pm} = f_{\mathrm{Pm}}\{D_{\max} / D_{\min}, D_{\min}, \rho_{\mathrm{s}}, \mu, \text{粒子形状}\} \quad (13)$$

$$\mathbf{Km} = f_{\mathrm{Km}}\{k_{\mathrm{n}} / k_{\mathrm{s}}, k_{\mathrm{n}}, h, k_{\mathrm{b}}, s_{\mathrm{b}}, r_{\mathrm{b}}, \text{供試体作成方法}\} \quad (14)$$

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，実際には **Pm** の完全なモデル化は極めて困難である．例えば，豊浦砂の供試体を同程度の粒径でモデル化しようとしても，必要な粒子数が多くなり，計算時間の制約により実現は困難である．また，粒子表面の凹凸を正確にモデル化しようとしても，それに伴って計算時間も増大するため，実際には単純に円形あるいは球形でモデル化されることも多い．つまり，実際のモデル化では，モデル化が不完全な **Pm** の影響を **Km** に含めて処理されていることが少なくない．よって，例えばある応力状態における二軸圧縮試験の挙動が再現されるようフィッティングされた DEM 解析のパラメータ **Km** は，当然 **Pm** が同じでなければ等価ではない．すなわち，**Pm** の不完全性を曖昧なまま議論すれば，パラメータの一般性は担保されず，パラメータの意味が薄れてしまう．このことは，結局は DEM の実務問題への適応を阻む原因にもなりえてしまう．この点をどう整理・評価するかが，DEM 解析に残されている最も重大な課題であると考えられ，本研究室でもこの検討を始めたところである．



(a) Normal direction to a contact plane　(b) Tangential direction to a contact plane

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

前述のような課題を認識したうえで，本研究で用いた DEM のパラメータ設定法[6-9]を以下に示す．ただし，ここでは状態パラメータ **Km** の設定法に関して詳しく述べ，種類パラメータ **Pm** については**表-2** に簡単にまとめるにとどめた．なお，ここで示した設定を基準とするが，必要に応じて値を変化させた場合もある．また，斜面全体解析スケール並びに堆積層スケールについては，4.1 で述べる．

表-2　今回の解析で用いた Pm 設定

パラメータ	全体解析スケール	堆積層スケール	
	4 章	4 章 3 節	5 章
D_{min} (m)	0.10	0.05	0.025
D_{max} (m)	0.25	0.10	0.050
ρ_s(kg/m^3)	2594	2650	2650
μ	0.477	0.466	0.466

(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[10]により**式-15** のように提案されており，今回はこれを用いた．

$$k_n = \frac{1}{4}\pi\rho V_p^{\,2}, \quad k_s = \frac{1}{4}\pi\rho V_s^{\,2} \tag{15}$$

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(m/s)を超えるような地盤では k_n を 10^9 などと大きなオーダーで設定する必要があるが，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，10^6 以下のオーダーでは供試体の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，岩石のように硬い岩盤では，k_n を 10^8 程度にまで下げて計算を行っている．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．なぜなら，実地盤同様，DEM 供試体が示す V_p，V_s も **Km** だけでなく **Pm** に依存するからであり，それは**式-16** のような表現で明確となる．

$$\mathbf{Km} = f^{-1}\{\mathbf{P};\mathbf{K}\} = f^{-1}\{\rho, V_p, V_s\} \tag{16}$$

(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いけない．さて，上記のような事情から粘性力はばね係数との相対的な関係で決めるべきであり，一般に粘性力 c は，臨界減衰時の粘性力 c_{cr}（**式-17**）との比 h（**式-18**）によって間接的に設定される．また無論，h=1 の時，臨界減衰を示す．

$$c_{cr} = 2\sqrt{mk} \tag{17}$$

$$h = \frac{c}{c_{cr}} \tag{18}$$

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．板要素では h の定義に従った理論通りの跳ね返り挙動がみられる．しかし，堆積層に落下させた場合には，h による影響はほとんどないことが分かる．これは，落体衝突エネルギーが主に堆積層の変形に伴って逸散することによるところも大きいが，堆積層の場合では，粒子間の力のやり取りが非常に短期的な接触中でしか生じず，その効果が十分に発揮されるより前に接触が解放されてしまうためだと考えられる．そのため今回は，一般的に使われている臨界減衰 h=1 を用いた．

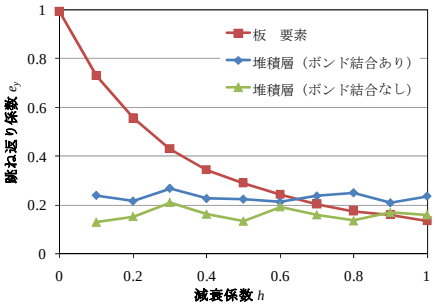


図-2　減衰係数と跳ね返り係数の関係

(3) 摩擦係数

図-3 は，2 軸供試体が示す内部摩擦角 ϕ_f と粒子間摩擦角 ϕ_μ との関係を示したものであり，この関係から μ（=tanϕ_μ）を決定することができる．ただし，図から粒子形状をクランプと呼ばれる非円形粒子に変化させると，ϕ_f が大きくなることが分かる．

実際の ϕ_f は **P**, **K** 両者がその決定をつかさどるが，前述の通り **P** の完全なモデル化は難しい．そのため，一般的には μ を大きくすることでこれに対応させる．しかし，μ をいくら高く設定しても，ある程度までの ϕ_f は表現できるがそれには限界があり，さらに高い ϕ_f の表現には，形状のモデル化が不可欠になることが分かる．このことから，**Pm** の不完全性を，**Km** の一部である μ の変化で補完するには限界があることが分かる．ただし今回は，ϕ_f=25(deg)程度で十分なため，粒子形状は円形で μ=0.466 として解析を行っている．

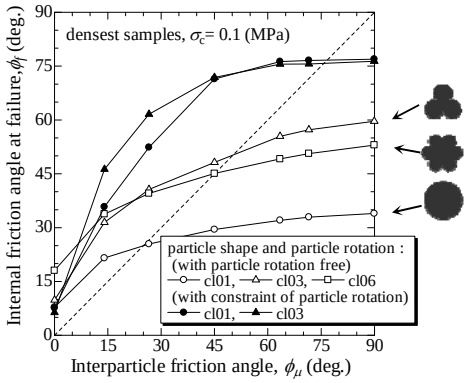


図-3　供試体が示す内部摩擦角と粒子間摩擦角

(4) ボンドのパラメータ

ボンドに関してはここまで述べてこなかったが，前述した主パラメータに続いて重要な状態パラメータである．岩盤や落石などの地盤材料を表現する際には，複数の粒子を剛結してモデル化する必要があるため，粒子間にボンドを設定し剛結する．なお，ここでは曲げ剛性（曲げへの抵抗性）を持つパラレルボンドを用いた．パラレルボンドの設定に必要なパラメータは，ボンドを付ける材料幅 r_b，ボンドのばね係数 k_b，引張強度 s_b の 3 つである（図-4）．ここで，ボンド強度 s_b については，DEM による一軸圧縮試験を行い，そこで得られる強度（図-5）と整合するよう設定している．なお，ブラジリアン試験（図-6）によっても設定が可能である．また，例えば，斜面を構成する岩盤強度は，供試体サイズが 1(m)以下のような小さな供試体試験で得られる強度の 3 割程度まで低減することが報告されており，この寸法効果を考慮して最終的に s_b を決定する必要がある（図-7）．

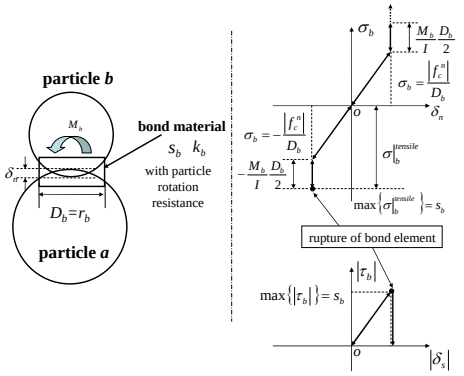


図-4　曲げ剛性を持つボンド（パラレルボンド）の設定

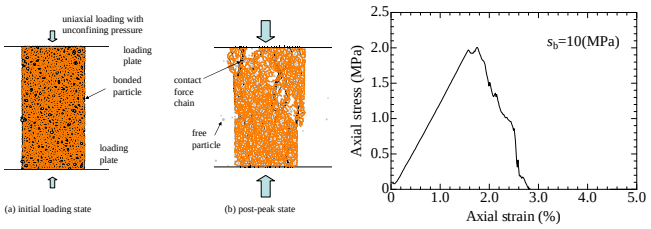


図-5　DEM による一軸圧縮試験とその結果

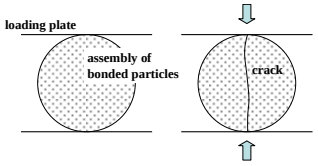


図-6　ブラジリアン試験による引張強度の測定

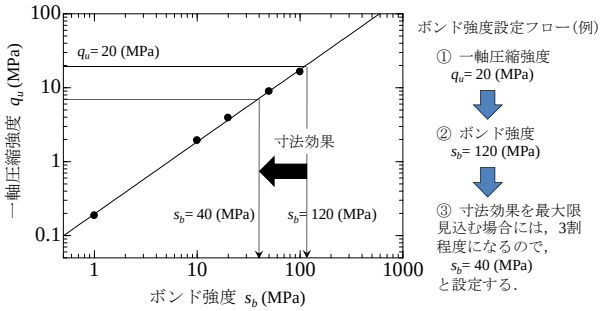


図-7　一軸圧縮試験で得られる強度とボンド強度との関係

4.　落体特性 R が落石エネルギー低減性能に及ぼす影響

4.1　解析スケールの分割

ここからは実斜面を対象に行った 2 次元 DEM 解析の結果について述べる．ただしその前に，今回実施した解析スケールの分割について簡単に説明しておきたい．本研究で対象とする落石サイトは斜面高さが 100(m)を超えるような巨大サイトであり，斜面地盤をモデル化する際に必要な粒子数は大量で，計算時間の制約から粒子数を減らす，すなわち粒子サイズを大きくして計算を行わざるを得ない．**Pm** が現実的なモデルから大きく外れれば，結果の再現性が低下することは，3.3(3)の摩擦係数の例からも予想できる．そのため，可能な範囲で **Pm** をより現実に近い形でモデル化する工夫が必要である．

そこで，今回は落石サイトにおける斜面全体の解析と，堆積層部に着目した解析とに分割することにした．落体が堆積層へ入射するまでは，全体スケールで解析を行い（これを「全体解析スケール」と呼ぶ），堆積層入射時は，堆積層だけをモデル化したスケール（「堆積層スケール」と呼ぶ）での解析に移行することにする（図-8）．これにより，堆積層をより多くの粒子でモデル化できるため，堆積層に入射する落体の挙動をより精度よく再現できる．

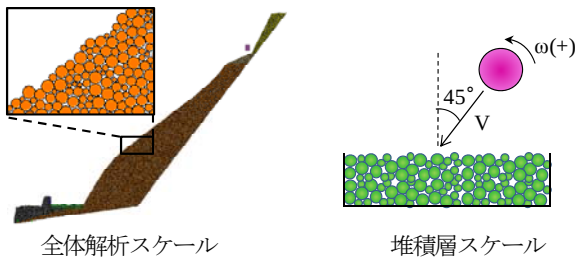


図-8　解析スケールの分割

4.2　落石軌跡のばらつき評価（V に含まれるばらつきの評価）

以下は，全体解析スケールでの解析である．前述した通り，**R** のうち速度特性 **V** は一定値ではなく，除去できないばらつきを保有するため，落石サイトごとに **V** 並びにそのばらつきを評価しておく必要がある [11]．こうしたばらつきが生じる原因は，斜面表面の凹凸といった自然斜面の不均一性に起因すると考えられるが，同時に，落石の初期位置，初期姿勢，落体形状（この 3 つを落体の「初期条件」と呼ぶことにする）の不均一性による影響だと考えられる．事実，落石発生地点周辺の環境は絶えず変化するため，初期条件には除去できないばらつきが存在する．そして，この初期条件のわずかな差が，落下途中で前者の不均一性によってさらに拡大され，落石軌跡の大きなばらつきとなって表れるものだと考えられる．そこで今回は，初期条件と斜面表面の凹凸の両者に着目して，ばらつきを含めた **V** の評価を試みる．なお，本来 3 次元の斜面を 2 次元で表現しているため，z 軸方向のばらつきを評価できない点はあらかじめ断わっておきたい．

(1) ばらつきを考慮した解析結果

まずは落石の初期条件の違いに着目して解析を行った．ただし落石形状は既知の条件（長方形でモデル化した）とし検討から除外している．図-9 は，初期条件のうち落体の初期位置の違いに着目し，

落石発生の水平方向位置を 25(cm)ずつずらした 9 ケースの落石軌跡を示している．また図-10 は，水平方向位置は固定したうえで，落石の初期姿勢（角度）を 10(deg)ごと変化させて解析した 18 ケースの落石軌跡である．初期条件としてはわずかな違いであるが，斜面を落下するにつれて軌跡のばらつきが拡大していく様子が読み取れる．

また，斜面表面の凹凸による影響を確認したのが図-11 である．ここでは，落石の初期条件を一定に保ったまま，斜面の凹凸度合であるラフネスを変化させて解析を行った．なお，ここでいうラフネスは図-12 あるいは式-19 に示す hr で定義するものである．hr が大きいほど斜面表面の凹凸が大きいことを意味している．

なお，本来は初期条件並びにラフネスによる影響を同時に組み合わせて評価する必要があるが，ここでは簡単のため別々に結果をまとめることとする．

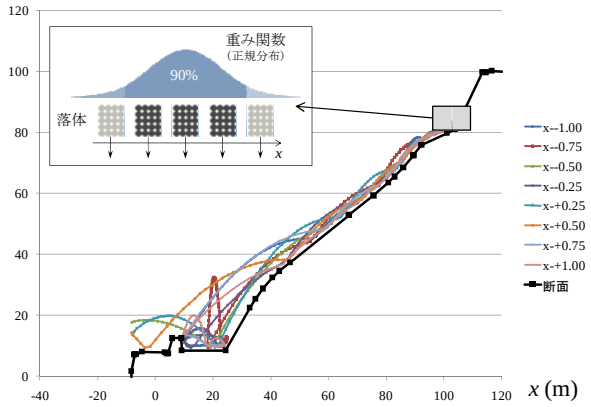


図-9　初期位置を変化させた時の落石軌跡(DEM)

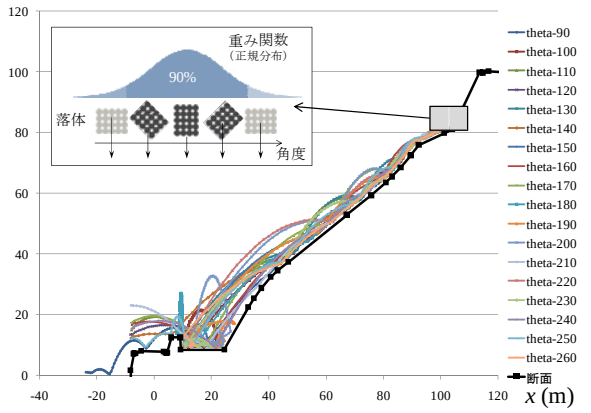


図-10　初期姿勢（角度）を変化させた時の落石軌跡(DEM)

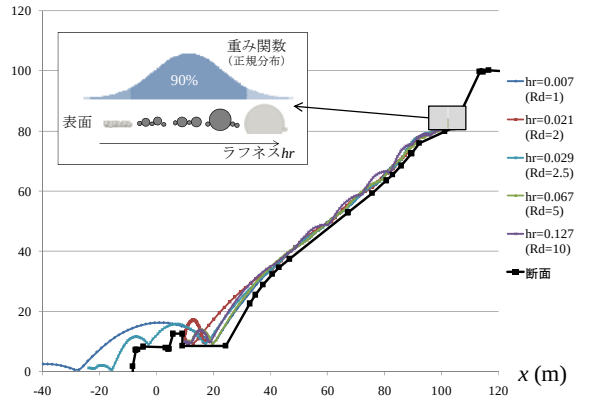


図-11　表面のラフネスを変化させた時の落石軌跡(DEM)

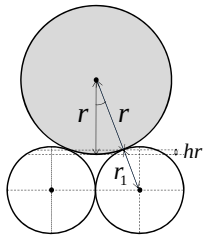


図-12　ラフネス hr の定義

$$hr = r\left[1-\cos\left\{\arcsin\left(\frac{r_1}{r+r_1}\right)\right\}\right] \tag{19}$$

ここで，r は落石の半径，r_1 は地盤を構成する最大粒子半径である．

(2) ばらつきを持つ解析結果の整理方法

解析結果から，斜面高さごとの落石の運動特性（V_x，V_y，V，V_ω）を示したのが図-13 である．なお，ここでは初期位置を変化させた際の結果のみ示している．さて，最終的にはここから堆積層入射時の運動特性を知りたいわけだが，今回のようにそれぞれの結果が同じ重み（信頼）を持たない場合には，結果の整理に注意が必要である．例えば，予測される落石発生場所の直上に落石を発生させた場合と，そこからある程度離れた場所に発生させた場合では，前者の解析結果の方が大きな重みを持つはずである．

そこで，重み関数を導入した（図-9～図-11）．落石発生予測地点を重み関数の平均（最も重みが大きい場所）とし，そこから正規分布に従って重みが小さくなっていくと仮定した．また発生端部位置の重みは，重み関数の累積確率密度が 5%あるいは 95%になるように設定した．

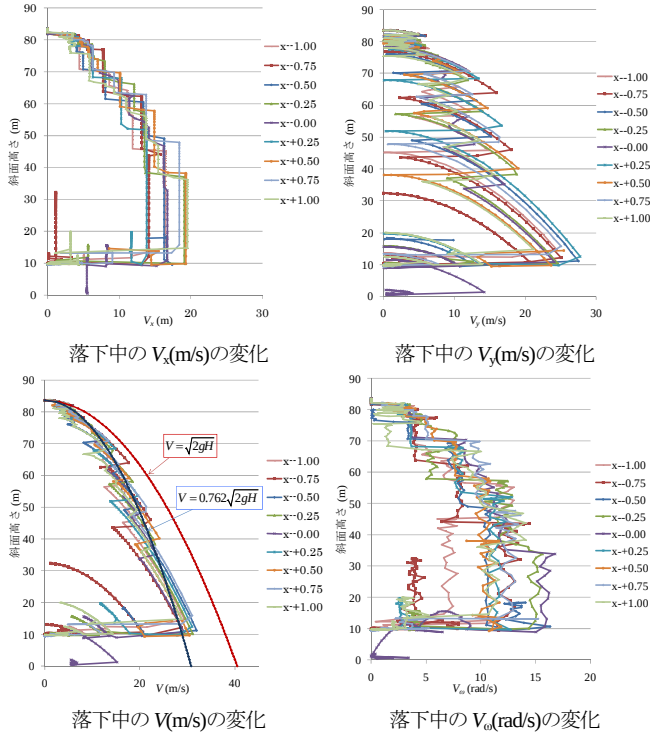
こうした処理ののち得られる堆積層入射時の運動特性とその重みを図-14 に示す．なお 4. 3 で後述するように，**E** に影響を与える特性として，V_x，V_y から求められる合成速度 V（$=\sqrt{V_x^2+V_y^2}$）と θ，V_ω の 3 特性が重要であるので，図はそれら 3 特性について整理したものである．今回のケースでは，V，θ，V_ω は広く一様な範囲に分布し，どこか値に偏るといった傾向はみられなかった．また，こうして算出された V，θ，V_ω の結果を数値でまとめたのが表-3～表-5 である．ここでは，重み付けされた結果を整理するため，平均の代わりに加重平均（式-20），標準偏差の代わりに重み付き標準偏差を用いた．なお，重み付き標準偏差とは式-21 に示すような指標 s で，重み付き結果のばらつき度合を定量的に示すことができるものである．その結果，加重平均や重み付き標準偏差は 3 つの条件によらず同程度の値を示していることが分かった．よって最低限 1 つの条件に着目して解析することも有意義である．また，合成速度 V はマニュアルでは式-22[2)]のように表わされるが，今回のケースでは α=0.762 となり，α に一定のばらつきがあると考えることもできそうである．

$$\bar{x}_i = \sum_i^n \frac{w_i \cdot x_i}{w_i} \tag{20}$$

$$s^2 = \sum_i^n \frac{w_i \cdot (\bar{x}_i - x_i)^2}{w} \tag{21}$$

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \tag{22}$$

ここで w_i は i 番目の標本 x_i の重み，$\bar{x}_i$ は加重平均，s は重み付け標準偏差（s^2 はその分散），α は残存係数，H は斜面高さを示す．



落下中の V_x(m/s)の変化　落下中の V_y(m/s)の変化

落下中の V(m/s)の変化　落下中の V_ω(rad/s)の変化

図-13　初期姿勢を変化させた際の落石高さと各種速度の関係

（なお，初期姿勢，ラフネスを変化させた場合の結果は省略）

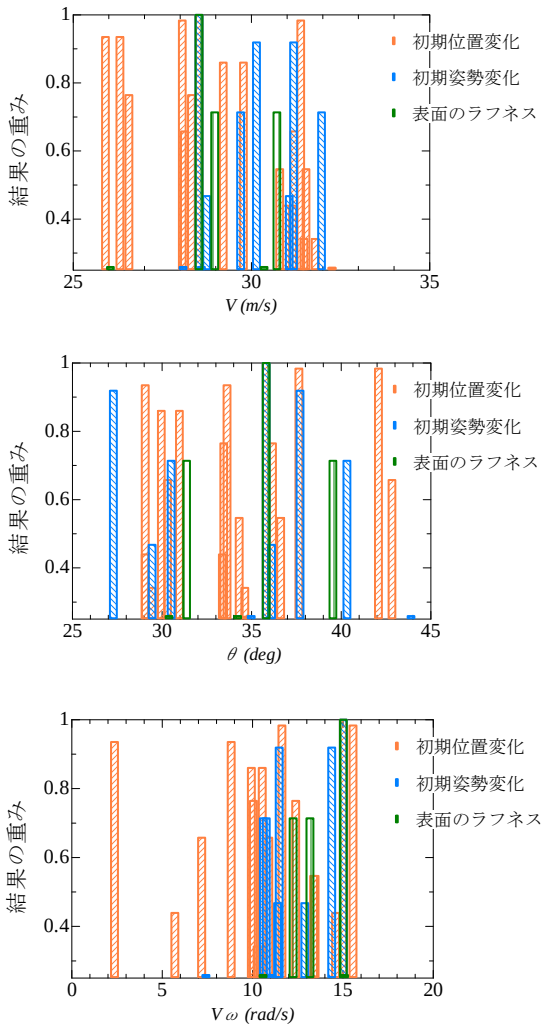


図-14　堆積層入射時の V，θ，V_ωの重み結果

表-3　条件別の合成速度 V (m/s) 結果

条件	加重平均	重み付き標準偏差
初期位置変化	29.212	3.996
初期姿勢変化	30.008	1.651
表面のラフネス変化	29.119	1.705

表-4　条件別の入射角度 θ (deg) 結果

条件	加重平均	重み付き標準偏差
初期位置変化	34.429	16.679
初期姿勢変化	34.501	23.932
表面のラフネス変化	35.044	10.324

表-5　条件別の入射時回転速度 Vω (rad/s) 結果

条件	加重平均	重み付き標準偏差
初期位置変化	10.870	12.020
初期姿勢変化	12.290	4.198
表面のラフネス変化	13.541	10.324

4.3　速度特性 V とエネルギー低減性能との関係

ここまで主に**R**のうち特に**V**について考えてきた．ここからは，**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，供試体スケールで調査した結果を述べる．今，**Pm**，**Km** 一定条件で，V，θ，V_ω のみ変化させ落体を斜め入射させた（**図-8 右**）．その時の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 15～17** に示す．

図-15 は θ=45(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，今考えた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．なお，この結果から，以下 V 一定で解析を行った結果である．

図-16 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(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 2 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が分かる．ただし鉛直落下に近い 0(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(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-17 は θ=45(deg)一定で，V_ω を変化させた時の結果である．エネルギー残存率は V_ω とその向きによって大きく変化する．正回転では残存率は高いが，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_ω 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，V_ω に大きく影響を受けることが分かった．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_ω 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．もちろん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．従って，ある落石サイトにおける **V**

特性は，**表-3～表-5** で得られる V，θ，V_ω の加重平均並びに重み付き標準偏差と今回得られた低減特性を考慮し，例えば，安全側，平均，危険側の 3 つの値によって定量的に評価できると考えられる．

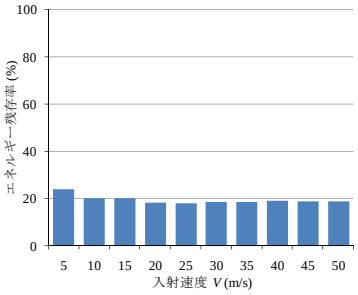


図-15　合成速度 V(m/s) とエネルギー残存率%の関係

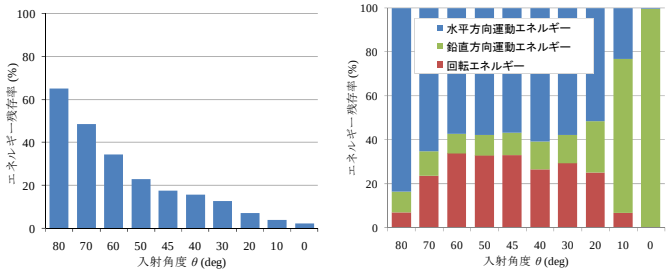


図-16　入射角度 θ (deg) とエネルギー残存率%の関係

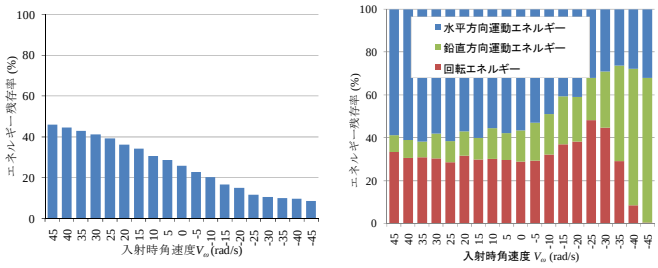


図-17　入射時角速度 Vω (rad/s) とエネルギー残存率%の関係

5.　堆積層特性 G が落石エネルギー低減性能に及ぼす影響

5.1　堆積層特性の影響評価

落体のエネルギー低減性能が堆積層特性 **G** によって大きく異なる [12]ことは今まで述べてきた通りである．ここでは，その基礎的な検討を行うため，堆積層スケールにおいて，**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**図-18** に示すように堆積層へ貫入して静止し，斜め入射では**図-19** 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（**式-23**）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．その結果の一覧を**表-20** に示す．なお，斜め入射時の V，θ は**表-3**，**表-4** を参考に V=30(m/s)，θ=35(deg)また V_ω=0(rad/s)と設定し，堆積層の基本的なパラメータは**表-2** に示す通りとした．

(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，斜め入射時のエネルギー残存率は一定程度だが，鉛直自由落下時の貫入率は堆積層特性により大きく異なることが分かった．また，貫入率とエネルギー残存率に相関関係がないのはこの場合の結果だけであり，実際の堆積層のようにより小さい粒子でこの傾向が得られるかどうか確認する必要がありそうである．

(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，またはそれらのオーバーラップにより表現する（**図-21**）．ここでは，円形粒子(cl01)と，3 つの粒子で構成されオーバーラップ量が 50%(cl03$_{50}$)の粒子と 0%(cl03)の粒子の 3 ケースで比較した．その結果，凹凸が大きくなる程，エネルギー残存率が大きく，エネルギー低減が抑えられることが分かった．

(3) 粒子間摩擦（μ）の影響

堆積層の粒子間摩擦係数 μ を ϕ_i=15, 45, 80(deg)となるよう 3 ケース設定して比較を行った．μ が小さい時には，大きな貫入率かつ低エネルギー残存率となるが，逆に μ が大きい場合には，貫入率も小さくエネルギー残存率も高い．また μ が大きい 2 ケースで大きな差が見られないのは，**図-3** で示した μ が一定程度高い範囲では供試体特性に及ぼす影響が小さいことに関係していると考えられる．

(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．なお今回は粒子形状による密度変化の影響を考慮していないが，相対密度などによる影響も考える必要がありそうである．

(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-20** 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．これはマニュアルで示された砂層厚を 90(cm)以上にすべきとする結果とも整合している．

以上，結果について簡単に述べたが，全体を通して，鉛直自由落下時の貫入率が大きくなるほど，斜め入射時のエネルギー残存率も低減する共通の特徴がある．またその影響性は特性によって違いがあることが分かった．今後は，堆積層特性からエネルギー低減効果の限界値を知るため，地盤力学的アプローチの検討も必要であると考えられる．また，エネルギー残存率の平均値とその取りうる範囲によって低減効果を簡易に評価する方法を検討すべきである．

$$\text{貫入率}(\%) = \frac{\text{貫入量}(m)}{\text{堆積層厚}(m)} \times 100 \qquad (23)$$

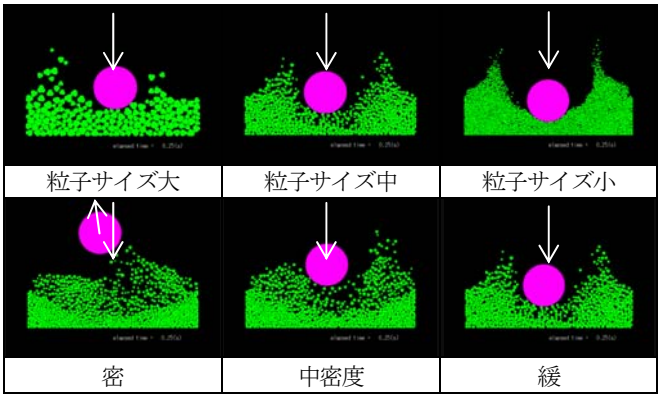


図-18　鉛直自由落下時の落体の様子（粒子サイズと密度別）

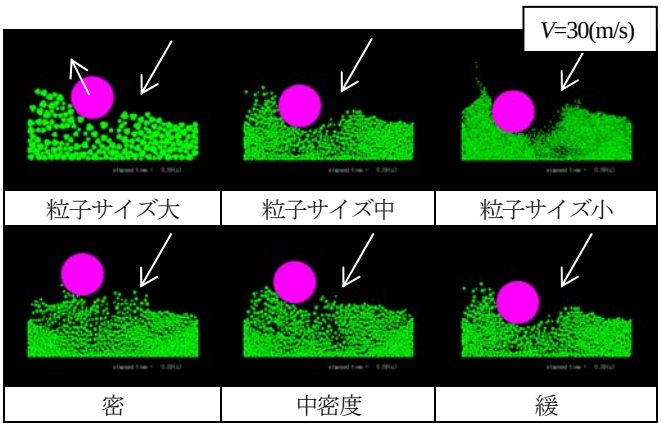


図-19　斜め入射時の落体の様子（粒子サイズと密度別）

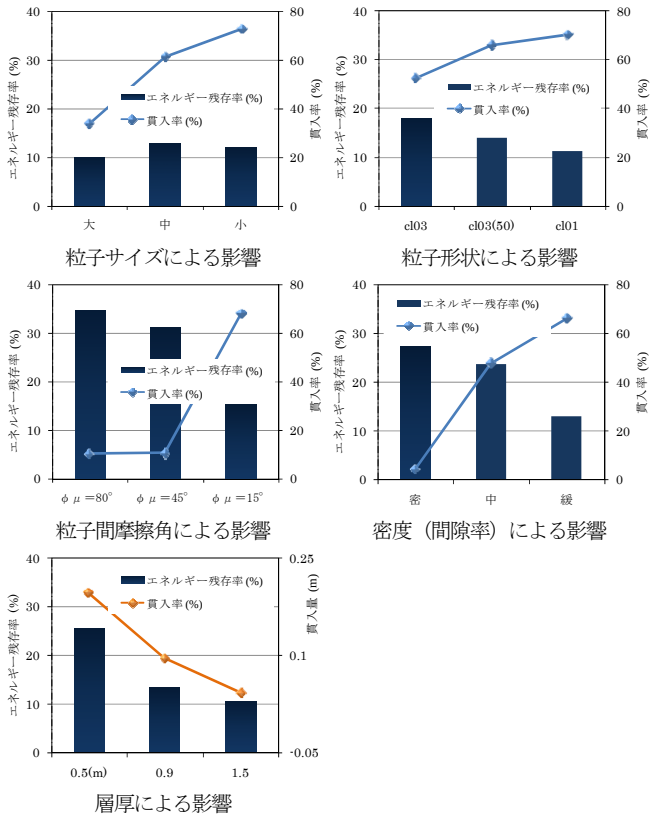


図-20　各特性によるエネルギー残存率%と貫入率%の変化

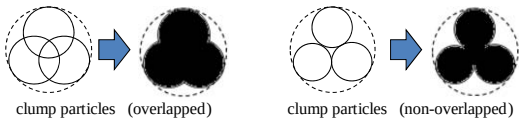


図-21　非円形粒子のモデル化

5.2　応力伝播に関する考察

堆積層特性による落体のエネルギー低減性能とともに，堆積層自体の応答を予測することも今後の重要な課題である．**図-22** は緩い堆積層と密な堆積層で落石衝突時の応力の消散する過程を可視化したものである．上部から伝わった応力が時間とともに堆積層内を伝播していく様子が分かる．この結果，緩い堆積層の方が応力消散の速度が速く，伝播する応力が弱い．一方，密な地盤では水平方向への応力伝播が制約されると同時に，強い応力が鉛直方向にすばやく伝播することが分かった．これは，密な地盤ほど圧縮変形が起きやすくその周辺にせん断が生じ，伝播が限定的な範囲に抑えられるためだと考えられる．

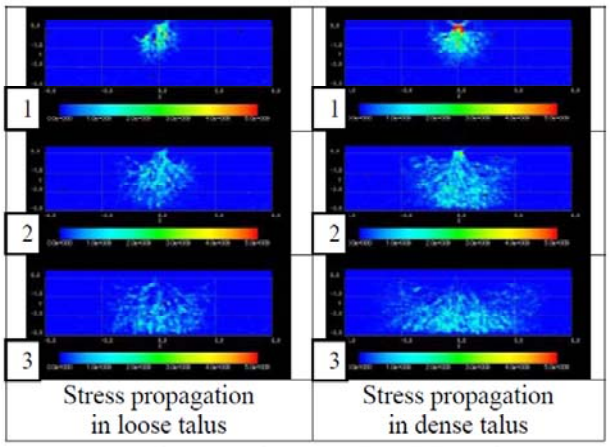


図-22　密度による応力伝播の違い

6.　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，これらの特性把握に必要なのが調査であり，調査結果に基づき如何に 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つもりである．今後は，堆積層特性の影響，また衝撃力伝播についてより詳細な検討を進めていく予定である．

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) 日本道路協会：落石対策便覧, 2000
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) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料, 2001
5) 西田 政弘ら：二次元配列された球状粒子集合体への球状飛しょう体の斜め衝突, 日本機械学会論文集(A 編), 2003
6) 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
7) 地盤工学会：「実務利用を目指すマイクロジオメカニックス」に関するシンポジウム, 2008
8) 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
9) 吉田 博, 桝谷 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
10) 伯野 元彦：破壊のシミュレーション, 森北出版, 2004
11) Yuasa,T., Maeda,K. and Waku,A. : A risk evaluation method of countermeasure for slope failure and rockfall with account of initial investment, Geotechnical risk and safety, IS-GIFU, pp.221-228, 2009
12) 吉田 博, 桝谷 浩, 鈴木 哲次： 埋砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.352/III-2, 1984