DEM を用いた堆積層の落石エネルギー吸収効果に関する研究

(株)構研エンジニアリング　正会員　○　刈田　圭一
(株)構研エンジニアリング　正会員　　川瀬　良司
(株)構研エンジニアリング　正会員　　牛渡　裕二
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　正会員　　前田　健一

1. はじめに

現在，我が国の落石災害検討においては，過去の被災履歴や各種実験等の研究成果を基に作成されている落石対策便覧(以下，マニュアル)を用いるのが一般的となっている．しかし、斜面高が 60m を超えたり，落石荷重が 10t を超えるような高エネルギーを保有した落石の場合，マニュアルでは適応範囲外として扱われ，対策工を適切に検討できない場合も少なくない．既報 [1)]では，こうした高エネルギーの落石に対して，ポケット(斜面と対策工との空き空間)に自然堆積した崖錐や，ロックシェッド上面に設置される敷砂などの「堆積層」が，落石エネルギーの低減に有効な効果を発揮することを指摘した．また，こうした低減効果を定量的に評価するには，個別要素法(DEM：Discrete Element Method)を含む数値解析シミュレーションが有効であることが分かった．

本研究では，こうしたマニュアルの適応範囲外の高エネルギーを保有する落石に対し，有効性が期待できる堆積層の効果に着目し，落石衝突時に堆積層に伝播する応力等をより詳細に検討をおこなうものである．そして最終的には，堆積層の効果を適切に反映した効率的かつ効果的な落石対策の実現を目指すものである．

2. 堆積層のモデル化

従来，堆積層(崖錐)は円形粒子の集合体でモデル化をおこなっていたが，堆積層の支持力は低く，落体の堆積層への貫入量が実験に比べて大きくなりすぎる欠点があった．しかし，本研究では**図 1** のような非円形粒子の導入することで，粒子間でのロッキング効果が再現され，落体の貫入量も実際の実験結果とよく整合する結果を得ることができた．なお，非円形粒子は，**図 1** に示すように，複数の同径円形粒子をオーバーラップし結合(clumped)させることでモデル化している．

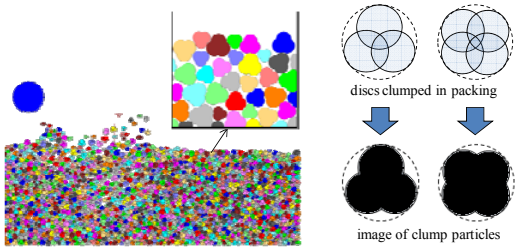

図 1　非円形粒子のモデル化の概要

3. 堆積層効果の検討

3.1 回転効果，摩擦係数による影響の検討

堆積層に衝突する落体は，一般的に斜め方向から回転を伴って入射する．そこで，非円形粒子でモデル化した崖錐に斜め 45 度から様々な回転速度ωを与えて衝突させ，衝突前後でエネルギー変化を調べた．**図 2** は，衝突前の x 方向運動エネルギーと回転エネルギーの和を 1 とし，衝突後のエネルギーを初期回転速度ω別に示したものである．その結果，落体入射時の回転速度により，エネルギー低減率は大きく変化し，負回転であればある程，低減効果も大きくなっていくことが分かった．

一方で，**図 3** は同条件で回転速度 0(rad/s)とし，落体の摩擦係数のみ変化させた場合の結果である．この結果，衝突によるエネルギー低減には摩擦の影響が大きいように思われるが，摩擦係数の影響は非常に限定的であり，回転速度の方が，堆積層のエネルギー低減効果により大きな影響を与えていると言える．

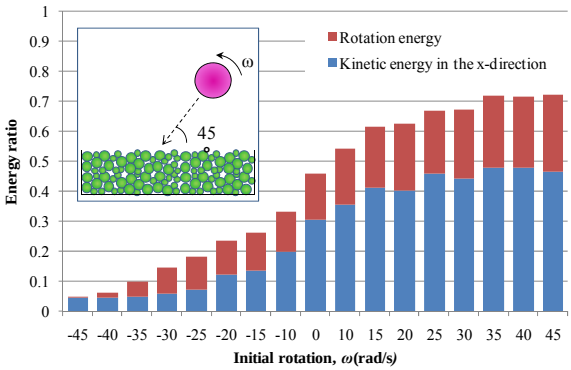

図 2　回転速度別の衝突後水平方向運動エネルギーと回転エネルギー

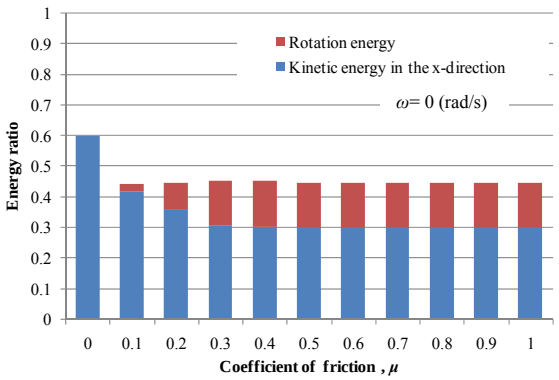

図 3　摩擦係数別の衝突後水平方向運動エネルギーと回転エネルギー

キーワード：　落石　崖錐　回転　DEM
連絡先：　〒065-8510　札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1 番 1 号　(株)構研エンジニアリング　TEL 011-780-2813

3.2 堆積層内の応力伝播

堆積層は水平方向運動エネルギーの低減効果だけでなく，鉛直方向運動エネルギー低減も期待されている．その代表的な例が，「ロックシェッド上面に設置される敷砂緩衝材」である．マニュアルでも敷砂の効果は反映させているものの，敷砂のスペックとも言える地盤の締め固め度や水平スパン長，材質等が，応力伝播にどのような違いが生じるか明確ではなく，伝播する衝撃力に関しては推定式が用いられているのが現状である．

そこで，非円形粒子でモデル化した敷砂に，落体を自由落下させ，応力がどのように伝播するのか解析した．**図 4** は，緩い敷砂と密な敷砂に落体を自由落下させて，その際の応力伝播を比較したものである．その結果，緩い場合には応力消散が早く，伝わる応力は小さい．一方，密な場合には，水平方向への応力の伝播が制約されると同時に，大きな応力が鉛直方向に早く伝達することが分かった．これは，密な程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．なお，図は赤色ほど伝わる応力が大きいことを示す．

図 5 は，実際の落石の衝突を想定し，斜めに堆積した崖錐に対して，斜め後方から落石が衝突させた場合である．応力は時間の経過とともに落石の進行方向に対して前方方向に発達していくことが分かる．

崖錐内を伝わる衝撃力を推定することは，敷砂等の最適なスペック設定のために重要な役割を果たすと考えられる．衝撃力は，落体の入射エネルギーや姿勢だけでなく，敷砂のような受け手の材質や状態によっても変化し予測は困難である．しかし，DEM を用いることで応力伝達をある適度の精度で予測できる可能性を示すことができた．

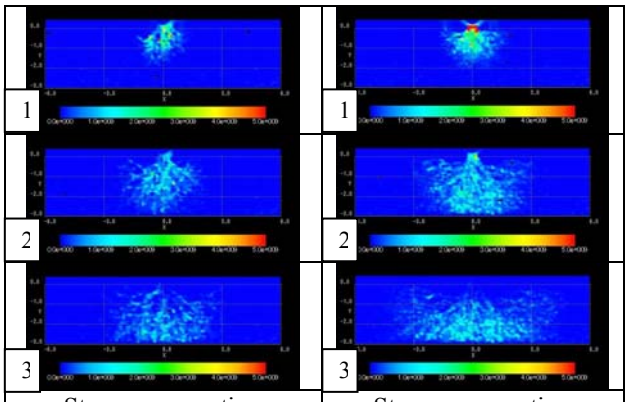

図 4 締め固め度による応力伝播の違い

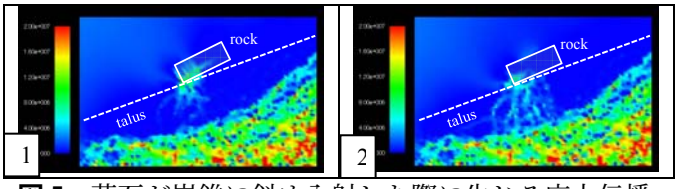

図 5 落石が崖錐に斜め入射した際に生じる応力伝播

4 実断面でのポケット効果の検証

実断面を用いて，崖錐が堆積しているポケットに着目し，ポケットの存在が落石のマクロな運動挙動にどの程度の影響を与えるのかについて検証した結果を示す．**図 6** は，崖錐部分に地山と同じパラメータを導入した「ポケット効果なし」の場合と，「ポケット効果あり」の場合で，落石軌跡と衝突後の水平方向運動エネルギーの変化を示したものである．解析の結果，ポケット効果なしの場合には，衝突後のエネルギー低減率は 70%程度であったのに対して，効果ありでは 83%とより大きな低減を確認することができた．また，ポケット効果ありでは，擁壁を飛び越える可能性も低下することが分かった．

また，崖錐厚の違いによる低減効果の違いを確認するため，崖錐厚を 0(cm)，30(cm)，90(cm)，150(cm)と変化させ，同様にエネルギー低減率を検討した．しかし，今回の解析では，効果に大きな変化は見られない結果となった．ただし現状では，解析精度に問題がある可能性もある．今後は，ポケット効果に関してより詳細な検証を行っていく予定である．

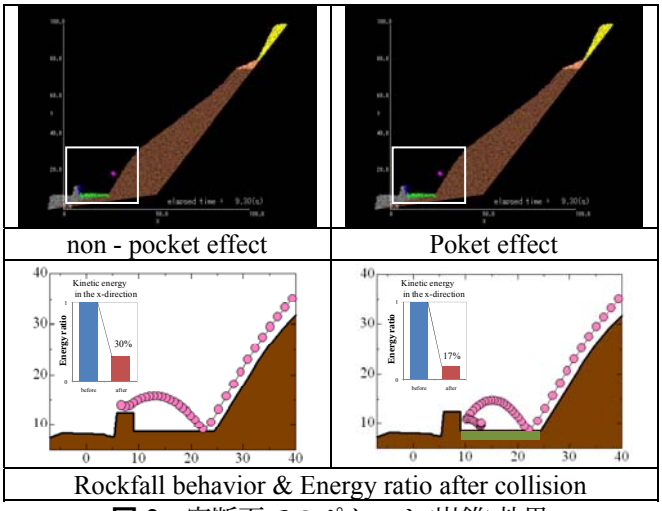

図 6 実断面でのポケット(崖錐)効果

5. まとめ

今回，堆積層の落石エネルギー吸収効果に関して DEM で検討を行った．その結果，落体の運動挙動に関しては，例えば摩擦係数といった崖錐スペック側の影響よりも，落石の初期回転速度に大きく影響されることが分かった．また堆積層内部を伝わる応力は，崖錐の締め固め度等によって変化し，これを DEM によって検証できる可能性について述べた．さらに，エネルギーの低減効果をふまえ，高エネルギーを保有した落石対策に向けた検討や、既存の落石防護擁壁背面に堆積層で整備したポケットを構築することで，斜面の経年劣化とともに生じる落石規模の変化に追随可能になると共に、既存対策工の安全余裕度を現在より高めることができる可能性を明らかにした．

参考文献： 1) 湯淺知英,前田健一：崖錐の落石エネルギー吸収効果に関する DEM 解析，第 44 回地盤工学研究発表会概要集，2009 2) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，1999 3) 馬貴臣ら：落石シミュレーションのための解析手法の研究，土木学会論文集，Vol.63, No.3, 913-922, 2007 4) 右城猛ら：落石の運動機構に関する実験的研究，Vol.62, No.2, 377-386, 2006 5) 日本道路協会：落石対策便覧, 2000