

落石の斜め入射より受ける衝撃力の DEM 解析

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○羽柴 寛文
 名古屋工業大学大学院 学生会員 湯浅 知英
 名古屋工業大学 正会員 前田 健一
 (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

1. 背景と目的

我が国の道路における自然災害に着目すると、斜面災害の割合が圧倒的に多い。しかし、既存の落石防護工では斜面の経年劣化に伴う落石規模の変化に対応できず安全余裕度の低下がみられる箇所が確認され始めている。近年、その対応として落石が防護工に衝突する前に落石エネルギーを分散・低減させる工法として、サンドクッションや緩衝材（以後、ロックシェッド上面の敷砂なども含めて「堆積層」と総称する）を設置する工法に注目が集まっている。

そこで本研究では、堆積層の落石エネルギー低減性能に着目し、その性能を個別要素法、DEM(Discrete Element Method)を用いて評価することを目指した。また、特にロックシェッド上面の堆積層に着目し、堆積層を伝播し覆道に到達する衝撃力を DEM 解析で定量的に予測することを目指す。

2. 落石による衝撃力実験の概要

DEM によりモデル化された堆積層（図-2）が、実挙動をどの程度再現しているのか検証する必要がある。そこで今回、実験結果との比較・検証を実施した。

実験は、クレーンで持ち上げた錘を堆積層に鉛直自由落下させるものである（図-1）。この実験から、錘に設置された加速度計の値と錘質量の積で得られる「落石衝撃力」と、緩衝材底面の剛基礎に複数埋め込まれた荷重計から計算された底面全体の「伝播衝撃力」が得られた。その結果を図-3（左）に示す。

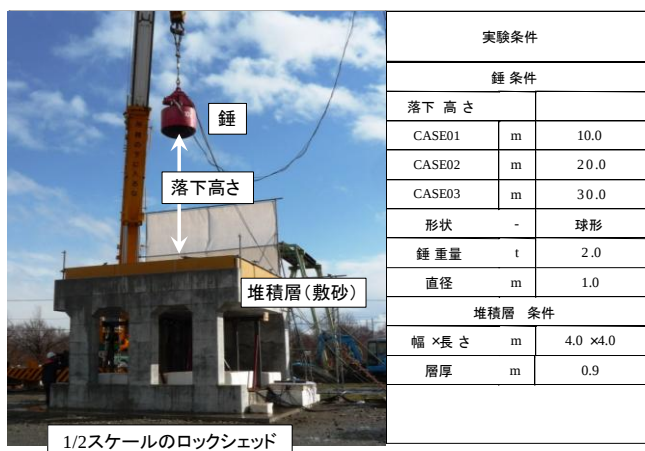


図-1 試験場の全容と実験条件

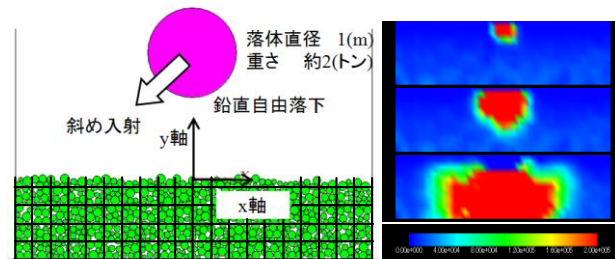


図-2 解析モデルの概要と応力伝播課程

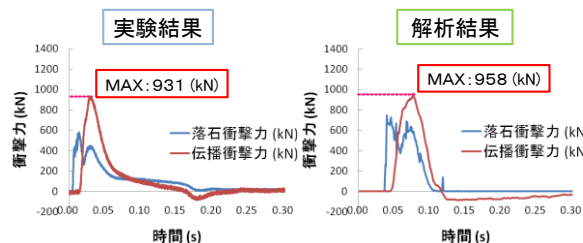


図-3 落石衝撃力の実験（左）と解析結果（右）の比較

3. DEM による伝播衝撃力の推定方法の概要

堆積層に落石が貫入することで底面に到達する衝撃力の合計を「伝播衝撃力」と呼ぶことにする。ここで、面的に伝播していく伝播応力を把握するため、以下の処理が有効であると考えた。地盤を適当な領域（メッシュ領域）で分割し、粒子に作用する接点力をメッシュ内の粒子が占める面積で平均化することで応力を算出した。これにより、粒子単位ではなく地盤内応力を捉えることが可能となった（図-2）。また、2次元の解析結果を3次元としてとらえるために、底面の各メッシュ応力をブーシネスクの理論解に基づき点載荷応力に補正し、ドーナツ状の同心円で作られる領域に各メッシュ応力をあてはめ、3次元空間に展開された応力を合計することで伝播衝撃力を算出した。

以上の処理を施した解析による衝撃力を示した図が図-3（右）であり、実験から得られた衝撃力の図と比べてみると、DEM により実験結果を定量的に予測できたことを確認できた。

4. 落石の斜め入射時の衝撃力特性

実際の落石の挙動というのは実に複雑であり、大抵は斜めに落下してくる。しかし、実験において数トンもある錘を斜めに落下させることは非常に困難かつ危険である。そこで本研究では、堆積層は同一条件で、落体の運動特性 $\mathbf{V}$ (V , θ) のみ変化させて落体を斜め入射させた場合の衝撃力の変化について調査した結果を示す。

キーワード DEM, 落石, 衝撃力, エネルギー

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL: 052-735-5497

ここで、鉛直落下の場合は入射角度 $\theta = 0$ 、水平入射の場合は 90° と定義する。

4.1 入射角度の影響

合成速度一定とし、落体入射時 $V=13.64 \text{ m/s}$ の場合の入射角度 θ の影響を図-4 に示す。入射線が水平になるほど鉛直方向に働く衝撃力は小さくなる。鉛直との角度の開きが小さいうちは伝播衝撃力の値はあまり変化せずグラフはほぼ横ばいとなっているが、角度が大きくなるほど顕著に小さくなる。また、図-4 は $\cos \theta$ 曲線とほぼ同じ軌跡を描いており、落体の入射速度を一定とするならば落石による伝播衝撃力の予測が容易にできることがわかる。

4.2 入射速度の影響

落体入射時の速度の y 成分である V_y を固定するということは、入射角度が大きくなるほど x 成分が大きくなり合成速度 V が大きくなるので、入射速度の違いを表すことになる(図-5)。つまり 4.1 の場合と逆で、入射角度が大きくなるほど入射速度は速くなり、速度が大きければそれだけ持つ運動量も大きくなる。ここで、鉛直成分の運動量は同じであるにもかかわらず、角度がおおよそ $\theta = 40(\text{deg.})$ を超えたあたりから急激に伝播衝撃力が増大していく傾向が確認できた。この解析では 4.1 と違って角度が広がっていくほど水平速度が大きくなってゆく。鉛直速度は一定に保っているの、増大していく衝撃力は全て水平速度の影響によるものと考えてよく、水平方向のせん断力によりダイレタンシーの効果が現れ、膨張した堆積層が底面を圧迫することが伝播衝撃力の増大につながったと考えられる。

4.3 落体のエネルギー残存率

跳ね返った落石に対して落石防護壁が耐えることができるかどうかを検討する必要がある。そこで、落石のエネルギーが跳ね返った時にどれだけ残っているかを調べた。入射速度一定の条件で、落体が落ちてきたときの運動エネルギーと跳ね返り直後の運動エネルギーの比較から跳ね返り後のエネルギー残存率を求め、入射角の影響を図-6 に示す。入射直前の速度が一定であるということは、鉛直と水平の成分に違いはあるものの、落体が持つエネルギーは一定となると考えたが、図のように下に凸の増加傾向を示している。例えば、 45deg. 以下では、残存率は 20% 以下であり高い効果が期待される。また、 45deg. と 80deg. のときとを比べると 3 倍近く残存率が高くなっている。特に、 50deg. を越えたあたりから 2 割を上回り、 60deg. で 3 割、 70deg. で 4 割、 80deg. では半分ものエネルギーを保って防護壁に衝突することがわかる。入射角を想定できれば、防護壁の安全度を正確に評価できることになる。

5. 結論

本研究で、明らかとなった主な点は以下のようなものである。

- 1) DEM により落石衝撃力および、伝播衝撃力を定量的に予測できることを実験結果との比較により示せた。
- 2) 垂直からおおよそ 40 度までの入射角であれば衝撃力の変化は少なく、斜め入射ことを考慮する必要はない。また、運動エネルギーの残存率を 20% 以下に抑えることができる。
- 3) 落体により堆積層に大きなせん断力が働く場合には、

ダイレタンシー効果により膨張した堆積層が底面を圧迫することで衝撃力が増幅されるようである。入射が水平に近づく運動エネルギー残存率は高くなる。

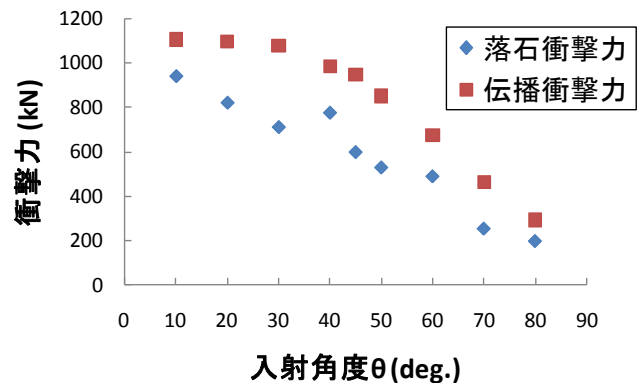


図-4 落体の入射速度一定での衝撃力

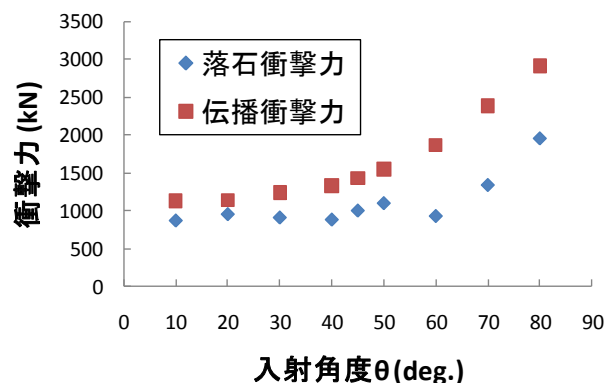


図-5 落体の入射速度（鉛直）一定での衝撃力

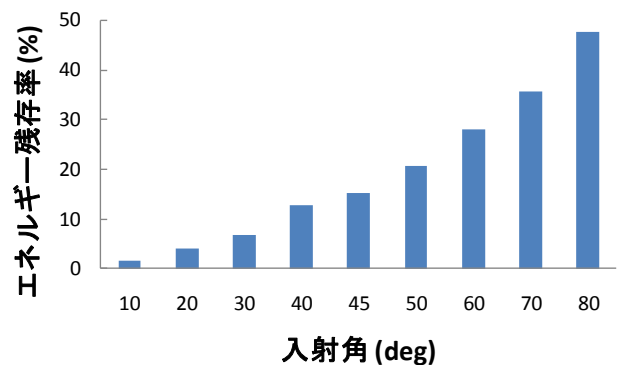


図-6 落体が跳ね返った後のエネルギー残存率

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) Maeda, K. and Yusa, T. : Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009.
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧，2000
- 4) 榎谷 浩，中田 吉彦，梶川 康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察，構造工学論文集，Vol.38A，1992
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 土木学会，応力地盤委員会，離散体の力学小委員会：個別要素法の基礎と応用
- 8) 土木学会，応力地盤委員会，離散体の力学小委員会：第 3 回個別要素法セミナー
- 9) 羽柴寛文ら：堆積層の衝撃伝播を考慮した DEM 落石シミュレーションの高度化，第 45 回地盤工学研究発表会，2010