

DEMによる堆積層の落石による衝撃力解析

(株)構研エンジニアリング	正会員	○刈田 圭一
名古屋工業大学大学院	学生会員	湯淺 知英
名古屋工業大学大学院	学生会員	羽柴 寛文
(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	正会員	前田 健一

1. はじめに

我が国において、毎年多くの落石事故が発生しており、また発生数は増加傾向にある。落石災害を防ぐ対策工には、発生源対策（予防工）と、待ち受け対策（防護工）とがある。しかし近年、こうした既存対策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、安全余裕度が低下している箇所が確認され始めている。

最近ではその対応として、落石が防護工に衝突する前に落石エネルギーを分散・低減させる工法である落石防護ネットや堆積層に注目が集まっている。またロックシェッド上面に設置される敷砂などの緩衝材もこれに該当する。堆積層は大きな落石エネルギーまで対応できる特徴があり、本研究ではこの堆積層に着目する。堆積層の効果としては、落石速度を抑えることによる落石エネルギーの低減や落石衝撃力の低減などが挙げられ、比較的 low cost でありながら安全余裕度を効果的に向上させられる可能性がある。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、その性能や落石による衝撃力伝播のメカニズムを、通常の個別要素法(Discrete Element Method: DEM)¹⁾を用いた評価を試みた。

2. 衝撃力測定実験の概要

実験は、クレーンで持ち上げた錘をロックシェッド上面に設置された堆積層に鉛直自由落下させた(図-1)。実験では錘に設置された加速度計の値と錘質量の積で求められる「落石衝撃力」と底面全体に伝達した力の合計である「伝播衝撃力」が得られる。伝播衝撃力は、緩衝材底面の剛基礎に複数埋め込まれた荷重計の値と底面分割線内の面積の積により求められている。

3. DEM解析による衝撃力の計算の概要

図-2のように、DEM粒子による堆積層モデルを作成し、そのうちの底面の境界と接している粒子の鉛直の衝撃力だけを抽出して解析による伝播衝撃力とした。図-3(左)は実験により得られた衝撃波形であり、図-3(右)は同様の諸元を用いた解析で得られた衝撃波形である。解析に用いたDEMパラメータは地盤調査の結果を基に弾性波速度や内部摩擦角等の物性が一致するように決定したものであり、その結果、衝撃力波形の形状、ピーク値、衝撃力継続時間を比較するとおおそ定量的な一致が見られることが分かり、非常に高い再現性を確認できた。

4. 解析パラメータの影響評価

4.1 粒子サイズによる影響

図-4(a,b)は、落体の直径 D と粒子の直径 (R) の比を変化させた場合の解析された衝撃力のピーク値の結果である。ばね係数(接触面法線方向とせん断方向のばね定数を k_n, k_s) を一定としているにも関わらず、落石・伝播衝撃力は粒子サイズが小さくなるに従って低下していき、粒子サイズがある程度低下させると、一定値に収束している。

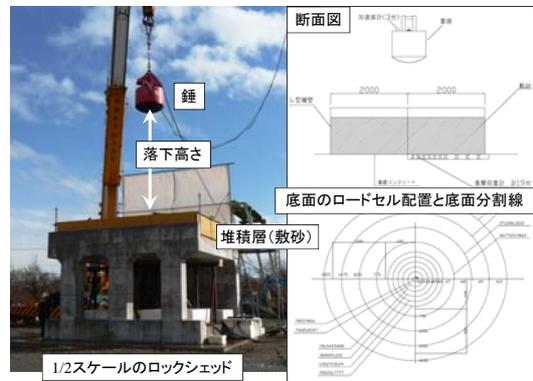


図-1 実験場の全容と堆積層の断面図並びに平面図

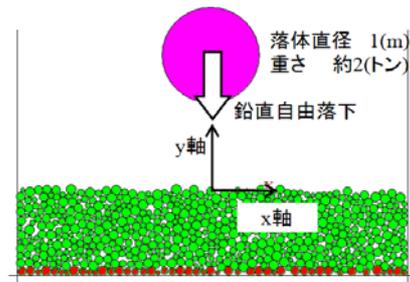


図-2 解析モデルの概要

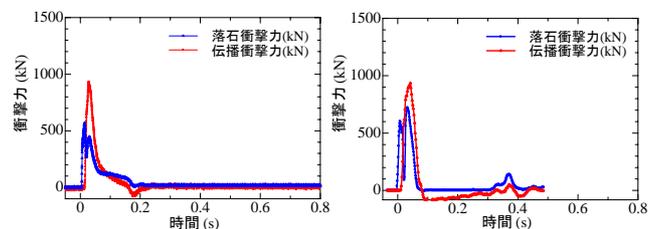


図-3 実験結果と解析結果の比較

粒子サイズを低下させると同一体積中の粒子数が増加し、堆積層全体としての剛性が低下するため衝撃力は低下すると考えられる。また、収束する粒子サイズが、ばね係数により異なることは、これはばね係数が高い地

キーワード DEM, 落石, 衝撃力, パラメータ

連絡先 〒065-8510 北海道札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1 構研エンジニアリング TEL : 011-780-2813

盤では初期剛性が高く、衝撃力が吸収されにくいとされていると考えられる。粒子サイズは堆積層の剛性に影響を与え、衝撃力にも影響を与えるが、一定以下のサイズの粒子を用いればその影響は少ない。またその際の粒子サイズは、ばね係数に依存することが分かった。

4.2 ばね係数による影響

図-4(c,d)より、ばね係数が高い堆積層では落石・伝播衝撃力は上昇することが分かった。衝撃力が上昇するのはばね係数の上昇によって堆積層の剛性が増加するためである。一方、ばね係数がより高い領域では、衝撃力の増加率が低下しほぼ一定の値を示すようである。つまり、堆積層のような比較的やわらかい地盤では 10^9 オーダーよりも高いばね係数を設定する必要はないと考えられる。ちなみに、衝撃力継続時間はばね係数と上昇に伴い減少する結果が得られている。

以上より、堆積層の衝撃力を定量的に予測するには、現地調査や原位置試験を行い、ばね係数を予測することが重要といえる。

4.3 減衰係数・粒子摩擦係数による影響

図-4(e)に示す通り減衰係数の影響はほとんどないといえる。また、粒子摩擦係数は地盤強度に大きな影響を与える要因であるが、図-4(f)から分かるように、衝撃力に関しては影響が小さいことが分かる。これは、衝撃力のピーク荷重の発現は、粒子の移動や層の変形が十分に生じる以前に起きるものであり、むしろ層の密度など初期段階で形成されている粒子骨格構造といった粒子集合体の幾何特性に強く依存しているものと考えられる。

5. 堆積層内の衝撃力の伝播挙動

既往の実験では、落石衝撃力のピーク値(P_r)と伝播衝撃力のピーク値(P_p)を比べた際、 P_p の方が1.5倍から2倍になる等の報告があり、本実験も同様の傾向を示している(図-3)。その一方で、両者はほぼ等しいとする報告もあり、この原因とメカニズムは未だ明らかになっていない。なお、 P_p の方が大きくなる理由としては、伝播応力が堆積層境界で反射し、後続の応力波と重ね合わせが生じるという考えも提案されている。そこで、前節までの結果もふまえて、堆積層内に伝播する衝撃力について考えてみた。

まず反射波が実際に生じているのか検証した。検証にあたり、堆積層をメッシュ状に区切り、落石直下の10個の各メッシュ内応力の経時変化を捉えた(図-5)。比較のためばね係数の異なる2つの解析結果を行った。図-6はその結果であり、底面に到達した応力波が反射する様子が明瞭に確認できた。また、その伝播速度並びに応力波の大きさはばね係数に依存している。さらに、さらに最初の応力波が底面に到達した時刻は、伝播衝撃力のピーク時刻前であり、伝播衝撃力のピーク値は反射波との波の重ね合わせで生じているといえる。なお、ここでの応力波はメッシュの鉛直方向応力であるが、メッシュの平均応力、偏差応力に関しても同様の結果を得ている。

6. おわりに

DEM解析による落石・伝播衝撃力の算出法を示すとともに、各種の解析パラメータの影響を把握した。その結果、ばね係数が他のパラメータとも関連する重要なパ

ラメータであることが明らかになった。地盤調査や現位置試験によってその精度が向上できるものと考えている。また、実験結果との比較を行い、解析結果の整合性を確認できた。また、伝播衝撃力が境界で反射する現象を確認することができた。今後は、3次元での衝撃力の解析への拡張、斜め入射などを含む衝撃力の伝達構造の解明に取り組む予定である。

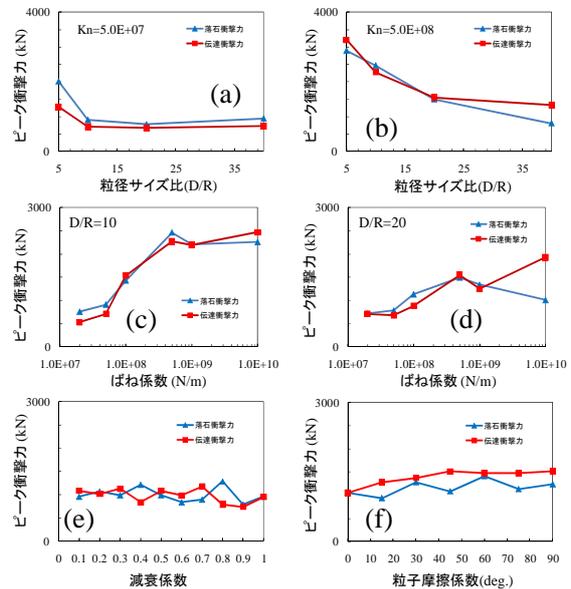


図-4 各パラメータが衝撃力に与える影響:

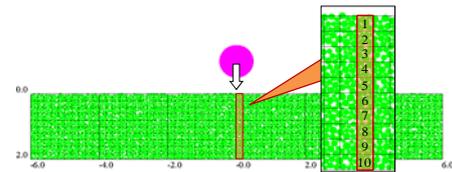


図-5 着目した落下直下10個のメッシュ

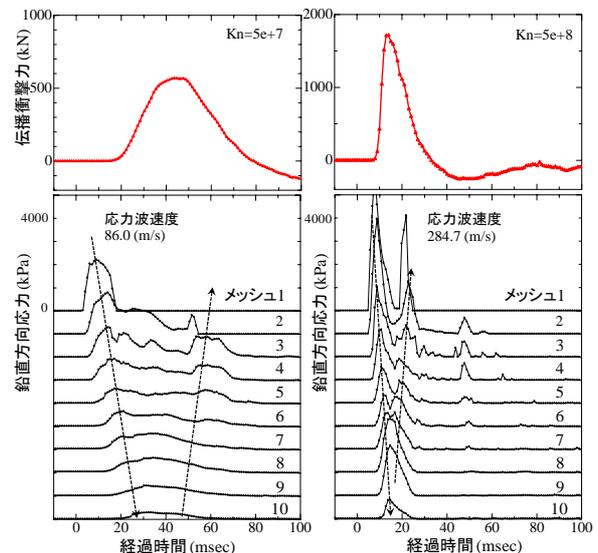


図-6 落下直下のメッシュの応力波形

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) 土木学会 応用力学委員会: 第3回 個別要素法セミナー, 2010 3) 島内哲哉ら: 速度比の基礎的性質に着目した不連続変形法 (DDA) による落石シミュレーション, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.53-65, 2009 4) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2000 5) 湯浅知英, 前田 健一, 刈田 圭一, 牛渡 裕二: 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