

緩衝砂に与える衝撃力伝播特性の落体速度依存性

名古屋工業大学大学院
名古屋工業大学
(株)構研エンジニアリング
(株)構研エンジニアリング
(株)構研エンジニアリング

学生会員 ○羽柴 寛文
正会員 前田 健一
正会員 刈田 圭一
正会員 川瀬 良司
正会員 牛渡 裕二

1. 背景と目的

我が国において毎年多くの落石事故が発生しており、気象変動による降雨条件の変化や気温変動の変化、地震の多発も起因して落石発生件数は増加傾向にある。近年では、落石災害を防ぐ対策工は経年劣化に対応できず、安全余裕度が低下している。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緩衝砂に注目が集まっている。緩衝砂は落石の大きなエネルギーにまで対応できる特徴があり、本研究ではこの緩衝砂に着目する。

本研究では、個別要素法 (DEM) を用いた数値解析を行い、落体が緩衝砂に衝突する際の速度の違いが衝撃力に与える影響に着目した。自由落下、静载荷と、落体の落下パターンを変え、また、緩衝砂の層厚を変化させて堆積特性についても、緩衝砂に与える衝撃力の伝播特性の落体速度依存性についての考察を行った。

2. DEM 解析の概要

本研究では、要素間の接触モデルに垂直・接線方向のバネやダッシュポット、接線方向のスライダーといった通常のモデルを使った2次元DEM解析を行った。用いた解析パラメータは、粒子集合体の特性と粒子特性との関係を考慮して決定することとし、各パラメータを変化させることで、粒子特性と衝撃特性との関係について調べている。また、本研究では、円形粒子を重ね合わせた非円形粒子を緩衝砂を構成する粒子に採用することで、より現実の緩衝砂に近い解析モデルをつくりだした。

図-1に、解析領域の概要を示す。本論文では、落体の幅を0.20m、高さを0.64m、質量 $M^f=400\text{kg}$ としており、基本的な落下高さを $H=1.0\text{m}$ としている。また、緩衝砂の基本設定については、層厚 $T=0.25\text{m}$ 、層幅 $W=1.5\text{m}$ としており、これは別に実施された実験に合わせて設定した。本研究では層厚に変化を与えることで体積特性の変化を検証した。

3. 衝撃力に与える影響

3.1 落体速度と衝撃力

図-2には、落下に伴う、落体に作用する落石衝撃力と緩衝砂の底面に伝わった衝撃の合計である伝達衝撃力の、時刻歴と落体の貫入歴との例を示している。本二次元解析結果で落石衝撃力と伝達衝撃力が同程度であるが、三次元の軸対象条件では伝達衝撃力が大きくなると考えられるため、解析結果と実験結果との傾向は一致しているといえる^{3), 4)}。図-2の両グラフの下段を見ると、落体の衝撃力がピークを迎えるタイミングで落体の速度の変化が顕著になっていることが確認できる。また、図-3からも落下速度が衝撃力と密接なかが

わりをもつことは明白である。以上のことから、緩衝砂における衝撃力の伝播メカニズムを明らかにするには、衝撃力のピーク値や伝達速度が堆積条件や粒子特性にどのように影響するのかを明らかにする必要がある。

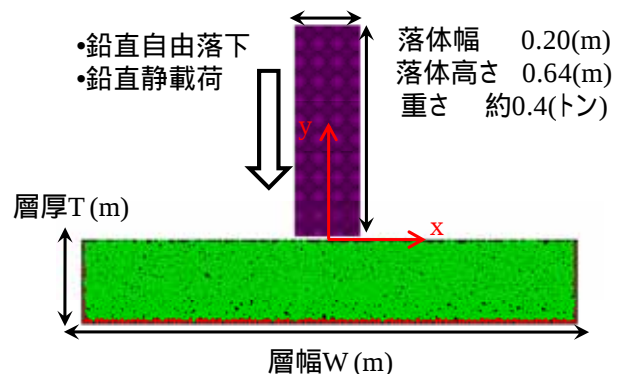
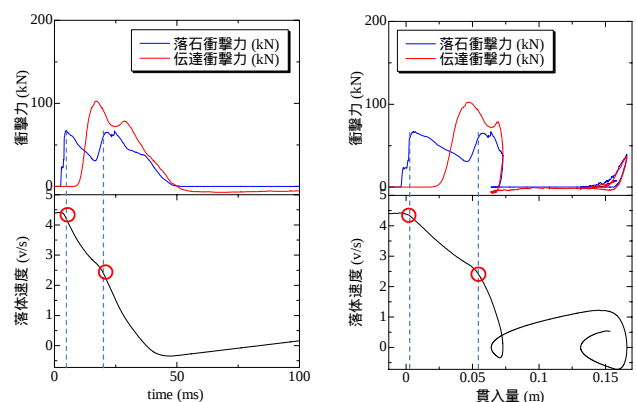


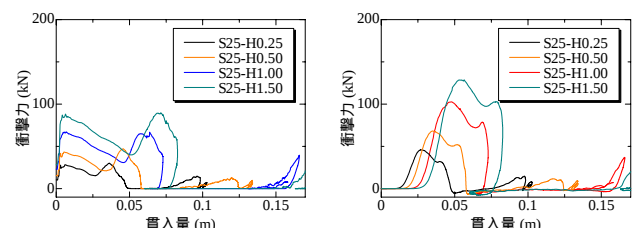
図-1 DEM 解析モデル



(a) 時間の経過毎

(b) 落体の貫入毎

図-2 DEM 解析モデルから得られた典型的な衝撃力の波形と落体速度



(a) 落石衝撃力

(b) 伝達衝撃力

図-3 落下高さ(速度)が衝撃力の伝播に与える影響

キーワード DEM, 落石, 衝撃力, 速度

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

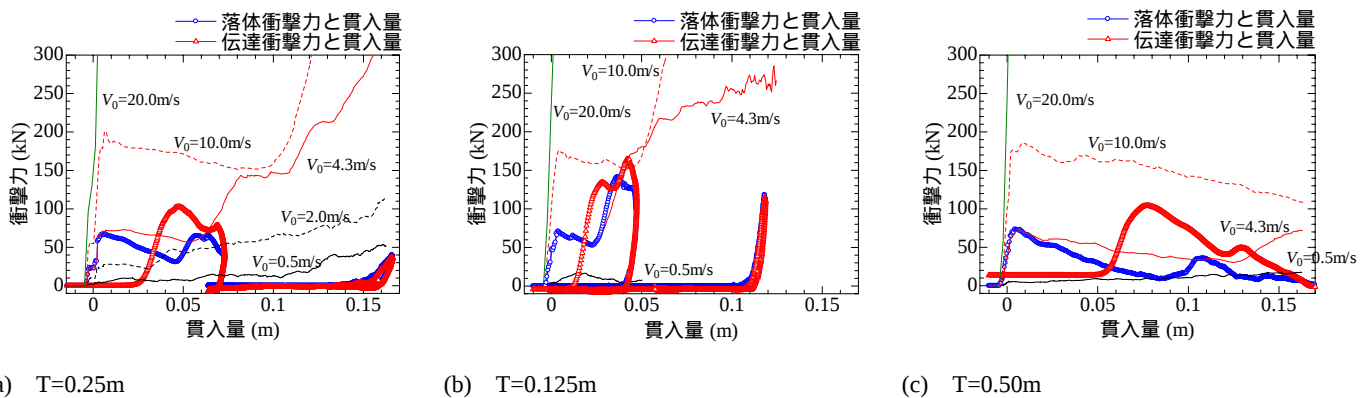


図 - 4 落下挙動の緩衝砂層厚毎の比較 (自由落下と各速度一定条件での落下)

3.2 落体の落下挙動と載荷速度の影響

この項目では、落体の落下挙動と落下速度が衝撃力の伝達特性に与える影響の検討を行った。図 - 4 に示す図はそれぞれ、本研究における基本的な DEM モデルで自由落下させた際の衝撃力と、速度を一定に保って静載荷させた場合の衝撃力を比較したものである。図中でラインマーカーの凡例があるものが自由落下時の落石および伝達衝撃力であり、それ以外が各速度で載荷した際の落石衝撃力の挙動である。なお、ここで設定した速度は、0.5, (2.0), 4.3, 10.0, 20.0(m/s)である。4.3m/s というのは、 $H=1.0\text{m}$ で自由落下をさせた時の緩衝砂との衝突時の速度である。

落下速度を一定にするというのは解析上の設定なので、止めない限り際限なく緩衝砂を押し進むことになるが、初めに降伏点に至って除荷されるまでの挙動は、自由落下時の落石衝撃力の挙動と 4.3m/s に固定して貫入させた際の落石衝撃力の挙動が、どのパターンにおいても一致することから、しっかりと再現できていると考えられる。

ここで、各速度の領域での依存性について図 - 4 より考察をしてみる。載荷速度 0~0.5m/s のようにゆっくり破壊が進む場合は、局所的な破壊が起きにくいこともあり、あまり変化がない。その破壊挙動は塑性的なラインを描くことが確認できる。徐々に速度が上がり、2.0m/s となるころには弾性的な挙動も見え始める。さらに速度を上げていくと、完全に弾塑性的な破壊挙動となり、速度依存も非常に大きくなることを確認できた。落石の衝撃力の問題は、ちょうど緩衝砂の荷重と変位関係の速度依存が大きな速度領域(弾性波よりも遅く、塑性波が伝わる速度と載荷速度が近い場合には速度依存が大きい)のなかで起きていると考えられる。これらの挙動は緩衝砂の破壊モードにも表れており、貫入速度が遅いと緩衝砂を側方に押し広げるようにして貫入していくのに対し、貫入速度が速くなっていくほど落体直下の層のみが局所的に圧縮され、押しぬきのような挙動になる。分散期待された衝撃力が、十分な緩衝砂の厚さがないとその効果を発揮することができないことも、このことから容易に想像できる。

そこで、緩衝砂の底面で受ける衝撃力が底面全体にどのように分布しているかを図 - 5 に示す。x 軸は図 - 1 と同じく、緩衝砂の横幅のラインである。図 - 5 より、落下速度が速いほど狭い範囲に衝撃力が集中していることが確認できる。また、自由落下時と 4.3m/s 時の応力分布がほぼ同じことから、速度一定の載荷条件下でも、応力分布については自由落下時と同じ影響を受ける³⁾と考えられる。

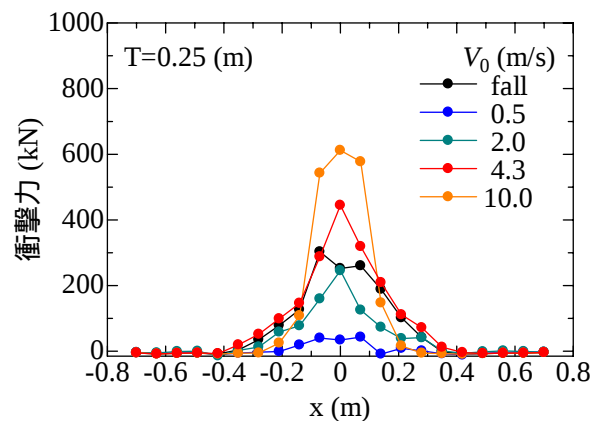


図 - 5 伝達衝撃力の最大時における底面の応力分布

4. まとめ

本研究では、落石の落下挙動や落下速度が衝撃力に及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 自由落下時の落石衝撃力の挙動とそれ相応の速度に固定して貫入させた際の落石衝撃力の挙動が一致しており、落下挙動に関わらず、弾塑性破壊の挙動を確認した。
- 2) 載荷速度 0~0.5m/s のようにゆっくり破壊が進む場合は、その破壊挙動は塑性的なラインを描くことが確認できる。徐々に速度が上がり、2.0m/s となるころには弾性的な挙動も見え始め、さらに速度を上げていくと完全に弾塑性的な破壊挙動となり、速度依存も非常に大きくなる。
- 3) 貫入速度が速くなっていくほど落体直下の層のみが局所的に圧縮され、押しぬきのような挙動になる。分散期待された衝撃力が、十分な緩衝砂の厚さがないとその効果を発揮することができない。

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) 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, pp.1477-1487, 1992.
- 3) 刈田圭一, 前田健一, 羽柴寛文, 牛渡裕二, 山口 悟: 個別要素法を用いた水平堆積層における落石による衝撃力の伝播挙動解析, 第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.195-200, 2010.
- 4) 羽柴寛文, 前田健一, 刈田圭一, 牛渡裕二, 川瀬良司: 粒子特性の異なる堆積層の落石エネルギー緩衝効果特性に関する二次元個別要素法解析, 第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.229-234, 2010.
- 5) 平林大輝, 福岡雅俊, 前田健一: 粒子構造に着目した粒状体の斜面上の流れ, 挙動応用力学論文集, Vol.11, pp.535-546, 2008.