

個別要素法解析による応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の载荷速度依存性

名古屋工業大学 学生会員 ○内藤 直人
名古屋工業大学 正会員 前田 健一
名古屋工業大学 学生会員 奥村 勇太

1. はじめに

本研究では、ロックシェッド頂版上に設置される敷砂などの土を用いた緩衝材に着目し、その適切な緩衝性能の評価を行うために緩衝メカニズム解明を目的としている。

既往の研究¹⁾で、敷砂緩衝材は落体衝撃力(落体が受ける衝撃力)-貫入量関係において载荷速度依存性を有し、これは落体衝撃力波形の形成において重要な要因であることが分かっている。しかし、敷砂緩衝材が载荷速度依存性を有する理由は明らかになっていない。

そこで、本論文では、二次元個別要素法(Discrete Element Method, 以下DEMと略す)を用いて、落体を一定の载荷速度で緩衝材に貫入させ続ける解析を実施し、载荷速度に応じて落体衝撃力が変化するメカニズムの解明を試みた。

2. DEM 解析概要

敷砂緩衝材に落体が衝突する現象を図-1に示すような解析モデルを使用して計算した。パラメータの決定法は既報²⁾を参照されたい。落体は平底の四角形、落体直径 D^f は $D^f=1.0\text{m}$ 、敷砂層幅 W は $W=5.0\text{m}$ 、相対層厚 T/D^f (敷砂層厚 T を落体直径 D^f で除した値)は $T/D^f=0.9$ を基本ケースとした。主に着目する物理量は、落体が受ける衝撃力と敷砂底面(ロックシェッド上面)に伝達する衝撃力である。

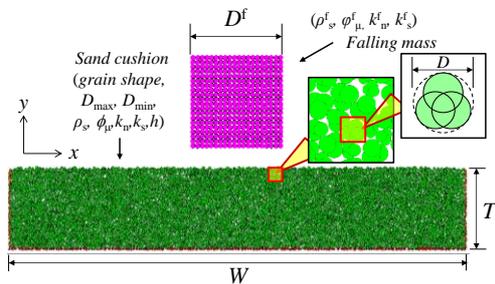
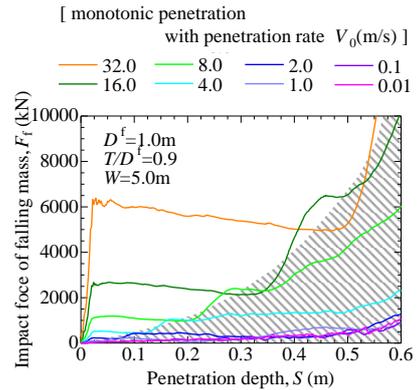
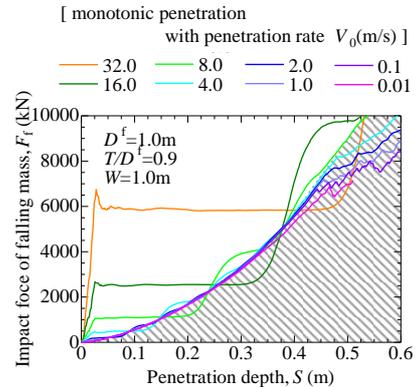


図-1 DEM 解析モデル

敷砂緩衝材は落体衝撃力-貫入量関係において载荷速度依存性を有する¹⁾。図-2には落体を定速度で貫入させ続ける一定速度単調载荷解析による落体衝撃力 F_f と貫入量 S の関係を実線で示している。载荷速度は $V_0=0.01, 0.1, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0\text{m/s}$ の8ケースである。相対層厚は $T/D^f=0.9$ の緩詰め状態で、四角形落体の直径は $D^f=1.0\text{m}$ とした。敷砂層幅は、落体直径に対して十分な層幅を有して敷砂の二次元的な挙動を許す $W=5.0\text{m}$ (図-2(a))のケースと、現象を簡略化した条件として落体直径と等しい層幅の $W=1.0\text{m}$ (図-2(b))の2ケース実施した。



(a) W=5.0m



(b) W=1.0m

図-2 一定速度単調载荷解析の落体衝撃力-貫入量関係

3. DEM 解析結果と考察

3. 1 敷砂緩衝材の载荷速度依存性

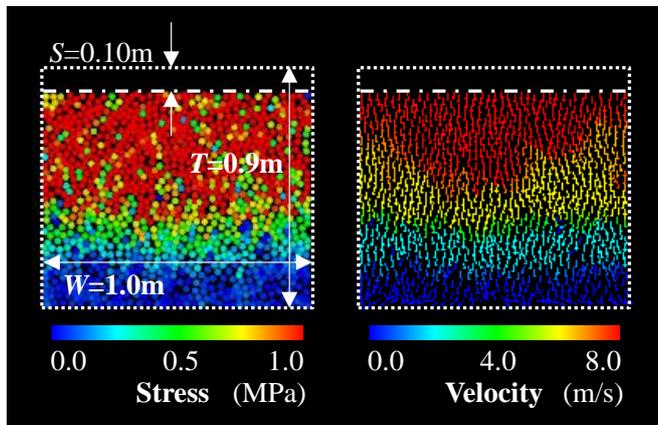
キーワード 落石, 敷砂緩衝材, 衝撃力, 応力伝播, 载荷速度依存性

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町 名古屋工業大学 16号館 227号室 TEL052-735-5497

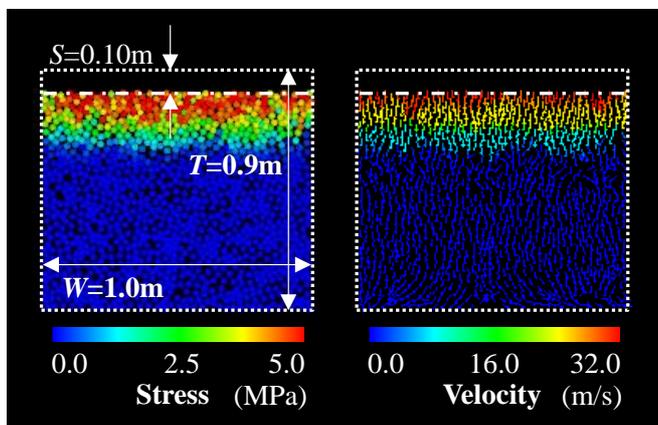
図-2(a)より落体衝撃力は衝突直後に鋭く立ち上がり、その後衝撃力がほぼ一定になる範囲が存在することが分かる。また、図中の斜線領域は底面からの反射波が落体に作用することで落体衝撃力が再び増加する領域であると考えられる。任意の貫入量における落体衝撃力の値は、载荷速度が $V_0 \leq 2.0\text{m/s}$ の範囲ではあまり差がなく、一般的な落石の衝突速度である数十 m/s の速度領域において敷砂緩衝材は強い载荷速度依存性を有することが分かった。

図-2(b)より、緩衝材の側方変位を拘束すると、 $V_0 \leq 2.0\text{m/s}$ の载荷速度が小さいケースの落体衝撃力-貫入量の波形は収束することが分かる。また、その波形は図-3(a)の波形に比べて勾配が大きく、指数関数的に増加している。さらに、 $V_0 \geq 4.0\text{m/s}$ の载荷速度が大きいケースにおいて、底面からの反射波の影響を受けていない領域(斜線領域外)では図-3(a)と(b)の波形はほぼ一致することが分かる。平底落体で衝突速度が数 m/s の場合、緩衝材は一次元的な挙動を示す傾向があると言える。

3. 2 応力伝播速度と载荷速度依存性



(a) $V=8.0\text{m/s}$



(b) $V=32.0\text{m/s}$

図-3 敷砂粒子の応力・速度分布

落体衝撃力が载荷速度に依存する理由について検討するため、敷砂内の応力伝播挙動を観察した。図-3には敷砂層幅 $W=1.0\text{m}$ で载荷速度が $V_0=8.0, 32.0\text{m/s}$ の2ケースについて、落体の貫入量が $S=0.10\text{m}$ のときの粒子単位応力と粒子速度ベクトルを示している。また、载荷速度 $V_0=8.0, 32.0\text{m/s}$ のケースの応力伝播速度 V_s (落体が敷砂に接触した時刻から伝達衝撃力が 1kN 以上になるまでの時間で初期層厚を除いた値) はそれぞれ $V_s=82.0, 111.8\text{m/s}$ である。

図-3より、任意の貫入量において、载荷速度が大きいほど応力の伝播距離が短いことが分かる。これは、载荷速度が4倍に増加しても応力伝播速度は1.4倍程度しか増加しないためである。载荷速度が大きいほど、落体貫入によるひずみを狭い範囲受け持つことになるため、落体衝撃力が大きくなるものと考えられる。

ここで、弾性棒の一端に打撃を加える一次元波動伝播問題の理論解では、圧縮変形が生じている部分に応力は一様に発生する。一方で、粒状体に定速度で载荷させた本解析結果は、応力、速度ともに表層ほど大きく、応力勾配、速度勾配が生じることが分かった。

4. まとめ

敷砂緩衝材は、平底落体で衝突速度が数 m/s の場合、強い载荷速度依存性を有し、一次元的な挙動を示す傾向がある。また、载荷速度の増加分に比べて応力伝播速度の増加分は小さい。载荷速度が大きいほど、落体貫入によるひずみを受け持つ領域が表層に集中するため、落体衝撃力が大きくなると考えられる。

謝辞

本研究に用いた装置の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)26289152 及び特別研究員奨励費(26・7908)の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落体の貫入挙動に着目した敷砂の衝撃緩衝メカニズム, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.16, I_361-I_370, 2013.
- 2) 前田健一, 羽柴寛文, 刈田圭一, 牛渡裕二, 川瀬良司: 二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積層の衝撃力伝達挙動, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 67, No. 2, pp.355-364, 2011.