

個別要素法による応力波を考慮した緩衝砂の衝撃力伝達挙動

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

正会員 ○刈田 圭一
正会員 前田 健一
学生会員 羽柴 寛文
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。

そこで本研究では、粒状性の緩衝砂の落石エネルギー低減性能に着目し、緩衝砂の粒子特性、密度、層厚や落体の運動特性の影響について、個別要素法 (DEM) を用いた数値解析を行い、衝撃伝達特性の考察を行った。

2. 解析手法

2.1 DEM 解析の概要

本論文では、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、本論文では、円形粒子のみの結果を示す。

図-1 に、解析領域の概要を示す。本論文では、落体の直径 $D^f=1.0\text{m}$ 、質量 $M^f=2,000\text{kg}$ とし、落下高さ $H=10\text{m}$ を基本としているので、落下時の入力エネルギーは $1,960\text{kJ}$ となる。図-2 には、落下時に落体に作用する落石衝撃力と緩衝砂の底面での伝達衝撃力の時刻歴の例を示している。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)}。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。

2.2 メッシュ分割による応力の算定

DEM によって得られた粒子個々に作用する接点力を、粒子の領域で平均化することで、粒子単位に作用する応力算出した。さらに、図-1(b)のように、緩衝砂を適当な領域 (メッシュ領域) で分割し、粒子単位で求められた応力をメッシュ内で面積平均す

ることでメッシュ内に作用する応力を算出した⁵⁾。本論文では、 $0.1\text{m}\times 0.1\text{m}$ のメッシュとした。図-3 (a) は落下解析で得られた結果について、粒子単位応力、図-3 (b) はメッシュ単位応力の可視化した例である。図-3 中の応力は、垂直応力 σ_{xx} と σ_{yy} との平均直応力 $\sigma_m=(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})/2$ である。この操作によって、DEM でも応力単位の議論が可能である。

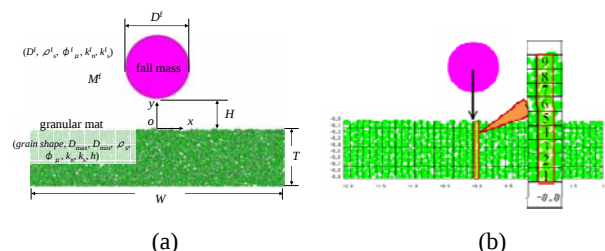


図-1 DEM 解析モデル: (a)解析パラメータ; (b)メッシュを用いた応力・ひずみ増分・間隙比の算定

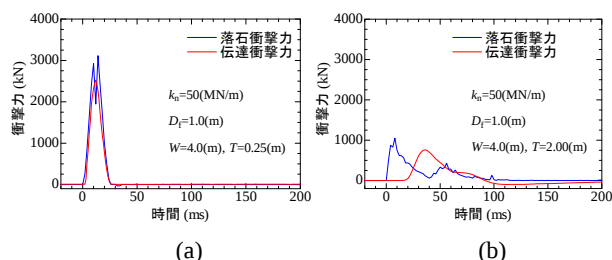


図-2 DEM 解析モデルから得られた典型的な衝撃力の波形: (a)緩衝砂 $T=0.25\text{m}$; (b)緩衝砂 $T=2\text{m}$

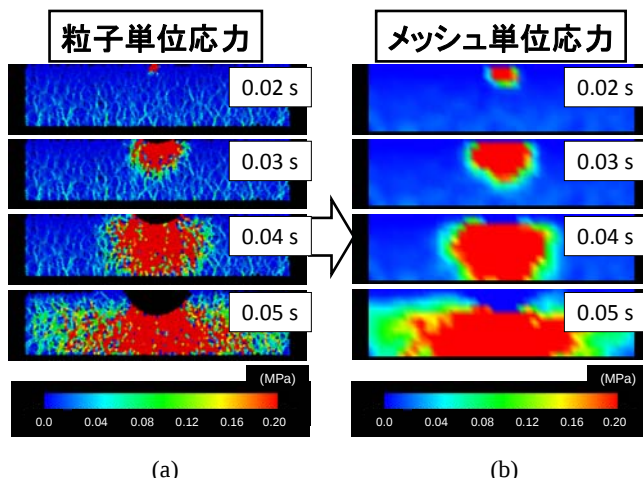


図-3 粒子単位、メッシュ単位で平均化された応力例; (a)粒子単位の平均化応力、(b)メッシュ単位の平均化応力

キーワード DEM, 落石, 衝撃力, 伝播速度

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. 衝撃力の発生と応力の伝播速度

図-1(b)のように落体直下のメッシュ内の応力波形の深さ方向への伝達の様子を図-4に示す。図中には、落石衝撃力と伝達衝撃力を深さ0mと0.9mの箇所に破線で示している。浅い方から順に応力が波のように伝達している様子と、深さ方向にそのピーク値は減少しながら伝達している様子が分かる。緩衝砂が密な方が山一つ、緩くなると同程度のピーク値を持つ山が二つ連なった形状となる。二つ目の山は境界からの反射波と考えることもできる。落石・伝達衝撃力波形を理解するには深さ方向に伝播する応力波と境界からの反射波も検討する必要がある。

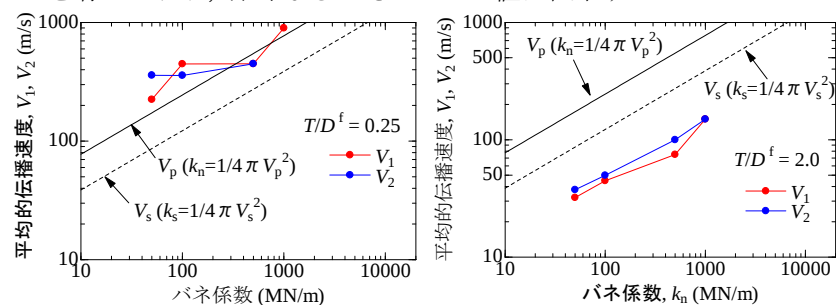
次に、衝撃伝播速度について調べるために図-5のような伝播時間差に着目した。落石衝撃力の第1ピーク値と伝達衝撃力のピーク値の時間差を Δt_1 、落石衝撃力の第1と第2ピーク値の時間差を Δt_2 とした。これらの時間差は力積の作用時間でもある故、時間差が大きくなることで衝撃力の最大値が小さくなる。前者で応力の波が伝達する距離を緩衝砂厚の T 、後者では2倍の $2T$ と考えると、それぞれの平均伝播速度は、 $V_1=T/\Delta t_1$ 、 $V_2=2T/\Delta t_2$ となる。図-6には上記のように求めた伝播速度 V_1 、 V_2 に及ぼすバネ定数の影響について、相対層厚 T/D^f を0.25と2.0の場合について示している。図中には、一次元弾性波動理論を用いて設定したバネ定数に相当する緩衝砂の弾性の縦波速度 V_p とせん断波速度 V_s をそれぞれ実線と破線で示している。層厚が薄く変形が拘束されるほど、硬い層ほど応力が伝播し易いと考えられる。

そこで、層厚の影響を調べるために、図-7に平均的な伝播速度と落体径 D^f に対する相対層厚 T/D^f との関係を示す。図中にはバネ定数 $k_n=50\text{MN/m}$ に対応する一次元弾性波速度を図-6と同様に示している。相対層厚が厚くなるほど、平均的に伝播速度は小さくなるのがわかる。特に、相対層厚が1.0以上においては20m/s程度まで低下し、弾性波速度よりもずいぶん小さくなる。これは、衝撃力の伝播が弾性波でなく、緩衝砂層の塑性変形にしたがい応力が伝播するためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、落石による緩衝砂内の衝撃力伝達挙動について堆積密度や層厚などの堆積特性が衝撃力に及ぼす影響について、以下のことが分かった。

- 1) 落体直下での伝達応力の時刻歴波形は大きな山を有しており、深くなるとそのピーク値は低下す



(a) 相対層厚が薄い場合 ($T/D^f=0.25$) (b) 相対層厚が厚い場合 ($T/D^f=2.0$)

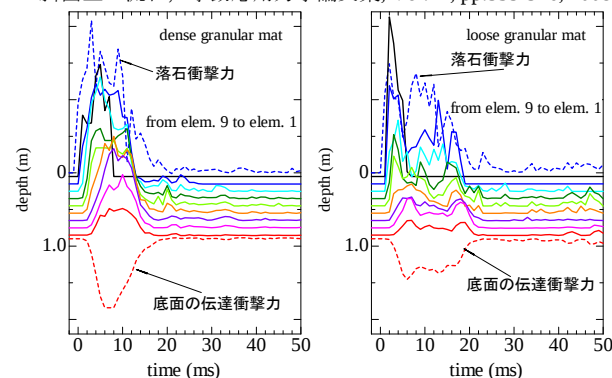
図-6 応力の伝播速度に及ぼすバネ定数の影響

る。密な方が山一つ、緩くなると同程度ピーク値を持つ山が二つ連なった形状となることが分かった。後者の後続のピークの存在が落石・伝達衝撃力波形を支配している。

- 2) 落体の衝撃によって応力が伝播する速度は、層の硬さだけでなく、層厚の影響を受け、厚いほど平均的な伝播速度が遅くなることが分かった。落下の衝撃による層内の支持力破壊的な局所的な塑性変形や変形モードの発現が伝播速度に大きく影響すると考えられる。

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.



(a)密詰め堆積層 (b)緩詰め堆積層
図-4 落体直下の応力波の伝達挙動に及ぼす堆積層の密度の影響

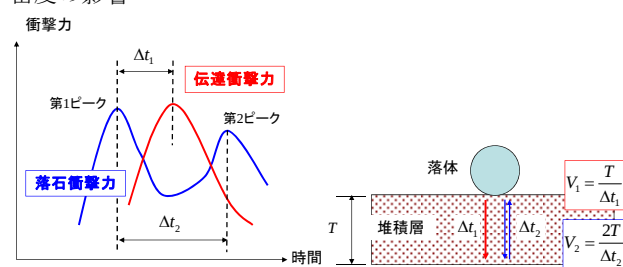


図-5 衝撃力の伝播時間の定義

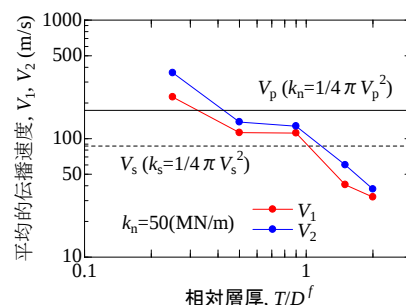


図-7 応力の伝播速度に及ぼす層厚の影響 ($k_n=5 \times 10^7 \text{ N/m}$)