落体の接触面積が敷砂緩衝材の緩衝効果に及ぼす影響

Impact force behaviors of rock fall into sand cushion with different contact area of rock fall

名古屋工業大学	○学生員	内藤直人	(Naoto Naito)
名古屋工業大学	正 員	前田健一	(Kenichi Maeda)
名古屋工業大学	学生員	奥村勇太	(Yuta Okumura)
土木研究所寒地土木研究所	正 員	山口 悟	(Satoru Yamaguchi)
構研エンジニアリング	正 員	牛渡裕二	(Yuji Ushiwatari)
構研エンジニアリング	正 員	鈴木健太郎	(Kentarou Suzuki)

1. はじめに

我が国では、近年の気象変動に伴う降雨の長期化と降 雨強度の増大による斜面浸食の進行、地震の頻発も起因 してがけ崩れ発生件数は増加傾向にある.落石はがけ崩 れに分類されるため落石発生件数も増加傾向にあると考 えられる.このような中、高度経済成長期を中心に建設 された落石防護工は経年劣化により防護工自体の安全余 裕度の低下が問題となっており、合理的な維持管理が求 められている.そのため、防護工の劣化を考慮した実耐 力の把握と作用荷重の適切な評価が重要課題である.

落石防護工の一つであるロックシェッド頂版上には, 落石衝突による直接的な損傷を防ぐために敷砂緩衝材が 設置されており,既往の研究では,敷砂緩衝材の緩衝性 能を評価するため,数多くの衝撃実験が系統的に実施さ れている.実験で使用される模擬落石(重錘など)の接 触面積当たりの質量は落石の密度に近い場合が多い.し かし,構造物に作用する最大衝撃力を適切に評価するた めには,落体形状(本文中,アスペクト比(横縦比)) が及ぼす衝撃力の影響について検討する必要がある.

そこで、本論文では、落体の接触面積が敷砂の緩衝効 果に及ぼす影響について二次元個別要素法(Discrete Element Method,以下 DEM)を用いて検討した.特に、 敷砂中を伝播する応力波に着目し、接触面積を変えたと きの衝撃力波形(落体が受ける落体衝撃力と構造物への 入力荷重となる敷砂底面に伝わる伝達衝撃力の時刻歴波 形)の解釈を試みた.なお、DEM 解析の適応性につい ては実験結果との比較により検証済みである¹⁾.

2. 解析概要

本研究で用いた解析モデルと解析パラメータを図-1 と表-1に示す.パラメータの設定法については既報²⁾を 参照されたい.ばねには線形ばねを用いている.土粒子 モデルは図-1右上の拡大図に示すような非円形粒子と し,落体モデルは円形粒子を規則配置している.粒子間 の結合は相対変位が生じないように剛結してモデル化し た.粒度分布は最大粒径 *D*_{max} と最小粒径 *D*_{min}の間で一 様な発生確率で発生させたものを用いた.敷砂境界は摩 擦を簡易的に表現するため土粒子モデルと同様の粒子を 1列に配置することで表現している.

図-2 には, 落体全 6 ケースの落体アスペクト比の一 覧を示している. 落体形状は, 既往の研究にて球体, 半 球体,錘状,平底などで実験や解析が実施されているが,本論文では最も衝撃力が大きくなる平底形状で比較検討した.アスペクト比が 1:1 の落体(c)を基準にして xy座標における面積が一定になるように接触面である落体直



(b) メッシュ分割の様子図-1 DEM 解析の概要

表-1	動砂モデルの基本パラメータ
1X I	

パラメータ	記号(単位)	基本設定値
	<i>D</i> (m)	
粒子直径	最大粒径D _{max}	0.040
	最小粒径D _{min}	0.020
	平均粒径D50	0.030
粒子密度	$\rho_{\rm s}~({\rm kg/m^3})$	2650
接触面法線方向ばね定数	<i>k</i> _n (N/m)	2.0×10^{7}
接触面接線方向ばね定数	k _s (N/m)	$5.0 imes 10^{6}$
接触面法線方向減衰定数	h _n	1.0
接触面接線方向減衰定数	h _s	1.0
粒子間摩擦角	ϕ_{μ} (deg.)	25



図-2 落体アスペクト比一覧(図中の単位:m)

平成26年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第71号



径 D^{f} (以下,接触面積)を変化させた.なお,落体質 量はいずれも M^{f} =3t となるよう落体モデルの粒子密度 を調節している.落石の比重は一般的に 2.6 とされ³⁾, 火山岩など更に重い種類もあるため,ここでは便宜的に 比重 3.0 とした.層幅 W=5.0m,層厚 T=0.9m の緩詰め の敷砂に対して,図-2 に示す形状の質量 M^{f} =3t の落体 を落下高さ H=20m からの鉛直自由落下させることで解 析を実施した.

DEM によって粒子間の接触力が得られるが,設計への応用や力学的考察には応力で観察する方が議論しやすいと考える.そこで,粒子単位の応力には,ある粒子の領域に作用する体積平均応力の考え方を用いた.また,図-1(b)のように,敷砂を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体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.メッシュのサイズは0.1×0.1mとした.

3. 解析結果及び考察

3.1 落体衝撃力・伝達衝撃力・落体貫入量の時刻歴波形

図-3 は全解析ケースの落体衝撃力,伝達衝撃力,落 体貫入量の時刻歴波形を示している.衝撃力波形と貫入 量波形に共通する点として,接触面積が小さいほどその 継続時間が長くなる傾向にある.

落体衝撃力は、衝突直後に急激に立ち上がる第1波と t=25ms 付近から再び立ち上がる第2波で構成される. 接触面積が小さくなるケースほど第1波に対する第2波 のピーク値が大きくなる傾向にある.

伝達衝撃力は,落体衝撃力より 10ms 程度遅れて立ち 上がり,ピーク後には一定の値を継続し減少する波形性 状となる. D^f=0.25,0.50m のケースでは伝達衝撃力が 台形に近い波形性状となる. 落体貫入量は,接触面積が小さいケースほど最大貫入 量は大きく,リバウンド挙動が弱くなる.D^f=0.25, 0.50mのケースでは最大貫入量に達した後にほぼ静止す る挙動となる.

3.2 最大衝撃力と接触面積の関係

図-4 は全解析ケースの落体衝撃力及び伝達衝撃力の 最大値と接触面積の関係を示している. 落体質量と落下 高さが同一条件の場合,接触面積が大きいほど落体衝撃 力と伝達衝撃力の最大値は増加傾向にある.

ここで、 $D^{f}=0.75m \ge D^{f}=1.50m$ の結果に着目すると、 アスペクト比 2:1 (長辺 1.50m・短辺 0.75m)の結果と して捉えることができる.このとき、短辺衝突に対する 長辺衝突の値は、最大落体衝撃力は2倍大きく、最大伝 達衝撃力は1.5倍大きくなることが分かる.

3.3 衝撃力比と接触面積の関係

図-5 は最大伝達衝撃力を最大落体衝撃力で除した値の衝撃力比と接触面積の関係を示している.接触面積が D^f=1.00m 程度のとき衝撃力比は1付近の値となり,接 触面積が小さくなると衝撃力比は増加し,接触面積が大 きくなると衝撃力比は減少する傾向となる.

衝撃力比が1を超える要因の一つに,接触面積の減少 に伴う最大貫入量と衝撃力継続時間の増大が考えられる. これは応力の波動伝播と関連するため3.5節で考察する.

3.4 解析結果と割増係数の比較

現在,落石防護工を設計する際の衝撃力(最大値)は, 落石対策便覧³⁾に準拠した Hertz の接触理論を基にした 算定式に,相対層厚 T/D^{f} (敷砂層厚 Tを接触面積 D^{f} で 除した値)から決定される割増係数 $\alpha=(D^{f}/T)^{1/2}$ を乗じ て算出する.図-6 では割増係数の曲線(黒色実線)と 本解析結果の最大衝撃力を比較している.相対層厚を $T/D^{f}=0.9$ の一定にし,接触面積を変化させた解析結果 は落体・伝達衝撃力ともに割増係数の曲線に概ね一致す ることが分かる.

図中には接触面積を D^{f} =1.0mの一定とし、敷砂層厚 を変化させた解析結果も示している.落体衝撃力は相対 層厚が T/D^{f} =1.5以上の範囲で一定値に収束する傾向が あり、割増係数の曲線とは一致しないが、伝達衝撃力は 割増係数の曲線に概ね一致することが分かる.

割増係数は落体衝撃力の補正係数であるが,現行の設 計法では落体衝撃力の値を伝達衝撃力の値とすることか ら,本解析結果は現行の設計法による伝達衝撃力を適切 に評価しているものと考えられる.

3.5 各深度の平均主応力の時刻歴波形と応力伝播状況

図-7 は D^f =2.00, 1.00, 0.50m の 3 ケースの平均主応 力の時刻歴波形を示している.平均主応力は,図-1(b)に 示す要素番号 No.2~9 のメッシュから算出した.応力の 計算は,貫入が進行して要素面積の 50%を落体が占め たとき終了させている.なお,図中に示す 1 目盛が 1MPa である.図-8 には粒子単位応力の継時変化を示し ている. 図-7 に示す No.3, No.4 の要素の平均主応力波形について,第1ピーク後の応力低下に着目すると,接触面積が小さいケースほど応力が減少しないことが分かる.また,図-8 より,接触面積が小さいほど,敷砂に赤色の2MPa以上の応力が作用し続けていることが分かる.これより,図-5 に示す衝撃力比が1を超える要因として,接触面積が小さいほど,応力が消散しにくく,高い応力が長時間作用し続けることが考えられる.

応力と衝撃力の関係について、図-4 より、D^f=0.50m のケースに比べて 2.00m のケースの値は最大落体衝撃 力が 3.5 倍、最大伝達衝撃力が 2.3 倍大きくなるが、図-7 より、敷砂中を伝播する最大応力はいずれも 2MPa~ 3MPa の値となることが分かる.また、図-8 より、接触 面積の増大に伴って 2MPa 以上の応力が作用する領域が 広範囲に及ぶことが分かる.これより、載荷速度(落下 高さ),接触面形状、落体質量が同一の条件では、敷砂 中に生じる応力に大きな差はなく、接触面積が広い分だ け落体が受ける衝撃力と伝達する衝撃力が大きくなるも のと考えられる.









 $(a)D^{f}=2.00m$



(b)D^f=1.00m 図-8 粒子単位応力分布の経時変化

t=6ms	0.	50 2.0	0			
1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1						
<i>t</i> =12ms	-0.5			1.5	210	
+2.5 +2.0 +1.5 +1.0 t=18ms	-0.5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	
t=24ms	0.5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	
+2.5 -2.0 -1.5 -1.0 t=30ms	-0.5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	
t=36ms	-0.5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	
+ 2.5 -2.0 -1.5 -1.0 t=42ms	-0.5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	2.
2.5 2.0 1.5 1.0	-0,5	0 0.5	1.0	1.5	2.0	12.

 $(c)D^{f}=0.50m$



3.6 理論解から算定した応力と解析結果の比較

ここでは、本現象に $\sigma = \rho cv$ の公式を適用して理論解応力を算定し、敷砂浅層のNo.2 要素(地表面から 0.1~0.2m のメッシュ)から算出される応力と比較した.ここで、 ρ は密度(kg/m³)、c は波動伝播速度(m/s)、vは載荷速度(m/s)である.図-9(a)(b)(c)には $D^{f}=2.00$, 1.00、0.50mの3ケースの落体貫入量、落体速度、No.2要素の平均主応力の時刻歴波形を示している.

理論解では、弾性棒の一端に打撃を加えた場合を考え、時間 t の間に載荷速度 v が一定で、被衝突面が vt の距離 を動き、圧縮変形する ct の領域に生じる応力を考えて いる.しかし、本現象では、敷砂浅層の No.2 要素に応 力が生じる間に落体速度は減少し、一定の速度を保つこ とができない.そのため、本論文では、載荷速度 v は貫 入量が S = 0.1m に達するまでの落体速度の平均値 V_m と 仮定することとした.

波動伝播速度 c は,落体衝突から伝達衝撃力が立ち上 がるまでの時間で初期層厚を除した値と仮定し,ここで は D^{f} =1.00m のケースの伝播速度 c = 98.3m/s を 3 ケー スの代表値とした.

密度 ρ は、二次元 DEM 解析で用いている単位体積質 量の $\gamma_d = 2145$ kg/m³ (e = 0.235) と衝撃実験¹⁾で用いら れている砂の相対密度 $D_r = 50$ %に相当する単位体積質 量の γ_d ' = 1440kg/m³ (e = 0.869) の2種類の値で検討し た.密度に γ_d を用いたときの応力を σ (理論解1)とし、 γ_d 'を用いたときの応力を σ ' (理論解2) とした.

理論解による応力算定に用いたパラメーター覧と算定 結果を表-2 と図-10 に示す.密度に二次元解析上の値 y d を用いた場合(理論解 1)には,解析結果の 1.5 倍程度 の値となる.また,密度に実際の砂の値 y d'を用いた場 合(理論解 2)には,ほぼ解析結果と一致する値を算定 できることが分かった.

表-2 理論解の応力算定パラメータと算定結果

	D = 2.00	$D^{f}=1.00$	$D^{f}=0.50$
t(ms)	6.8	5.6	5.2
V _m (m/s)	14.6	17.4	18.7
<i>c</i> (m/s)	98.3	98.3	98.3
$\gamma_{\rm d}({\rm kg/m^3})$	2145	2145	2145
$\gamma_{\rm d}$ '(kg/m ³)	1440	1440	1440
$\sigma_{\rm max}({ m MPa})$	2.04	2.56	2.75
$\sigma_{\rm cal}({ m MPa})$	3.08	3.67	3.94
$\sigma_{\rm cal}$ '(MPa)	2.07	2.46	2.65



図-10 理論解による応力の算定結果と解析結果の比較

4. まとめ

本論文では,二次元 DEM 解析により落体の接触面積 が敷砂の緩衝効果に及ぼす影響の検討と理論解による応 力の算定を試みた.得られた主な結果を以下にまとめる.

- アスペクト比 2:1 の落体の場合,短辺衝突に比べて 長辺衝突の値は,最大落体衝撃力は2倍大きく,最 大伝達衝撃力は1.5倍大きくなる.
- 接触面積が D^f=1.00m(アスペクト比 1:1) 程度の とき衝撃力比は1付近の値となり,接触面積が小さ くなると衝撃力比は増加し,接触面積が大きくなる と衝撃力比は減少する傾向がある.
- 3) 衝撃力比が1を超える要因として、接触面積が小さいほど伝播応力は消散しにくく、高い応力が長時間 作用し続けることが要因に考えられる。
- 4) 載荷速度(落下高さ),接触面形状,落体質量が同 一の条件では,敷砂中に生じる応力に大きな差はな く,接触面積に応じて落体衝撃力と伝達衝撃力が変 化するものと考えられる.
- 5) 理論解 $\sigma = \rho cv$ により敷砂層内の浅層部分に生じる 応力を定量的に算定できる可能性がある.

参考文献

- 内藤直人,前田健一,山口悟,牛渡裕二,鈴木健太郎:落体質量と衝突速度の異なる外力条件を受ける 敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動に関する数値解析的検 討,構造工学論文集, Vol.60A, 2014.
- 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.
- 3) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.