応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の 載荷速度依存性に関するDEM解析

内藤 直人¹・前田 健一²・今野 久志³・牛渡 裕二⁴・鈴木 健太郎⁵・川瀬 良司⁶

¹学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科 (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: cjl18507@stn.nitech.ac.jp

²正会員 名古屋工業大学教授 都市社会工学科 (〒466-8555名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: maeda.kenichi@nitech.ac.jp

³正会員 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム総括主任研究員 (〒062-8602札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

E-mail: konno@ceri.go.jp

⁴正会員 構研エンジニアリング 防災施設部部長 (〒065-8510札幌市東区北18条東17丁目1-1)

E-mail: ushi@koken-e.co.jp

⁵正会員 構研エンジニアリング 防災施設部 (〒065-8510札幌市東区北18条東17丁目1-1)

E-mail: suzu@koken-e.co.jp

⁶フェロー会員 構研エンジニアリング 常務取締役 (〒065-8510札幌市東区北18条東17丁目1-1)

E-mail: r.kawase@koken-e.co.jp

敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力が載荷速度依存性を有する原因について分析した。また、そこで得られた知見を基に落体衝撃力波形の推定を試みた。得られた主な結果を以下に示す。1)落体衝撃力は載荷履歴に依らず任意の貫入量における載荷速度のみに依存する可能性を示した。2)敷砂緩衝材が載荷速度依存性を有する理由として、載荷速度が大きいほど落体貫入による縮み量を受け持つ領域が表層に集中することで落体衝撃力が大きくなることが考えられる。3)落体周辺の粒子群の圧縮率と応力の関係について、静的載荷と動的載荷の結果がほぼ一致していることが分かった。4)一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ を用いて落体衝撃力波形の推定を試みた結果、実験で得られた落体衝撃力波形の主波動である第1波目を高い精度で推定できる可能性を示した。

Key Words : sand cushion, impact resistant behaviors, loading rate dependency, stress wave, DEM

1. はじめに

我が国では、衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計への移行が進められている¹⁾。落石対策工の一つであるロックシェッドのように頂版上に敷砂緩衝材などの緩衝工を有する防護工は、その緩衝工を含めた対策工全体系としての性能評価・設計が必要となる。そのため、土を用いた緩衝材の緩衝メカニズム解明が求められている。

ロックシェッド頂版に設置される敷砂緩衝材の研究の最終目標は、緩衝メカニズムを明らかにして、落石の衝突により緩衝材を伝播してロックシェッド頂版(緩衝材底面)に作用する伝達衝撃力の波形を予測することである。既往の関連研究²⁾で敷砂緩衝材は高緩衝性能を有することが分かっているが、落石が緩衝材に衝突した時に落石が受ける落石衝撃力よりも緩衝材を介してロックシェッド頂版に作用する伝達衝撃力の最大値の方が大きく

なる^{3,4)}など、未解明の問題も少なくない。

これまでに著者らは過去の研究^{5,6)}を参考にして、敷砂緩衝材に重錘を鉛直落下させた実験を対象に二次元個別要素法⁷⁾(Distinct Element Method, 以下DEMと略す)解析を実施しており、重錘衝撃力及び伝達衝撃力について概ね実験結果を再現可能なことを明らかにしている⁸⁾。

一方、構造物の性能設計を考えれば、緩衝材を介して構造物に作用する力、即ち伝達衝撃力の定量評価が最終目的であるが、緩衝材に衝突した際に落体が受ける落体衝撃力に関しても未解明な点も多い。以上より、本研究では伝達衝撃力を得るための入力荷重となる落体衝撃力に着目し、衝突体の接触面形状や衝突速度との関係を明らかにすることを目的として、最も基本となる重錘形落体の無回転鉛直落下させた場合を対象に解析手に検討を行うこととした。なお、検討に際しては前述したとおり既往研究で再現解析を実施した二次元DEM解析を用い

ることとした。また、落体衝撃力を簡易的に定量化する手法についても検討を試みた。

2. DEMを用いた衝撃力解析の概要

本稿では二次元DEMを用いて、敷砂緩衝材に落体を鉛直自由落下もしくは一定速度単調载荷させる解析を実施した。その際に使用した解析パラメータ、境界条件及び衝撃力算定方法を示す。

(1) 解析パラメータ

図-1に解析モデルの概要を示し、表-1に敷砂モデルの解析パラメータを示す。解析パラメータの決定方法は、既報^{9),10)}に従っている。接触モデルにはフォークトモデルを使用しており、ばねは線形ばね¹¹⁾を用いている。

図-1 解析モデルの概要

表-1 敷砂モデルの解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{max}	0.040
	最小粒径 D_{min}	0.020
	平均粒径 D_{50}	0.030
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
接触面法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接触面接線方向ばね定数	k_s (N/m)	5.0×10^6
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

敷砂の土粒子モデルは、図-1右上の拡大図に示す、同一径の3つの円の中心を正三角形（1辺の長さは円の半径と同等）で結びその外接円を直径 D とし、平均粒径 D_{50} を0.030m（表-1）とする非円形粒子を採用している。角張っている土粒子からなる砂は圧縮性が高く、高い強度を発揮するが、円形粒子は回転抵抗を全く持たないため砂の特徴を再現し難い。一方、非円形粒子では凸凹の引っ

掛かりが生じるため回転抵抗が働くため砂の圧縮性や強度を再現できる。粒度分布の形状によっても衝撃力伝達挙動は異なると考えられるが、現象をできるだけ単純化して衝撃力伝達挙動を観察するため、粒子径は最大粒径 D_{max} と最小粒径 D_{min} の間で様な発生確率で発生させた粒度分布を用いた。間隙比 e は解析で用いた粒子形状及び粒度分布で作製可能な最も緩い状態である $e=0.24$ 程度とした（以下、緩詰め条件）。本解析で用いた土粒子モデルを用いた二軸圧縮試験における破壊時の内部摩擦角はおよそ $\phi_t=30^\circ$ である。計算の時間刻みはCFL条件を十分に満足するよう $\Delta t=2.0 \times 10^{-5}$ sとした。

落体モデルの形状には、円形、一連の大型重錘落下衝撃実験^{2),12)}に用いられている重錘形、四角形の三種類を用いた。重錘形落体の衝突面は、接触面曲率（底部の頂点より高さ0.175mの範囲が半径0.8mの球状）である。落体モデルは、円形粒子を重錘形状に配置し剛結することで常に相対位置が変化しないように設定した。また、落体表面における粒子間摩擦角 ϕ_μ^f は、敷砂粒子の基本設定値と同様とした。なお、落体質量は、指定した質量になるように落体を構成する要素の密度を調整した^{13),14)}。

(2) 境界条件

敷砂の底面及び両側面の境界は境界面の粗度を簡易的に表現するために、敷砂モデルと同様の非円形粒子を隙間なく一列に並べて固定することでモデル化している（図-1、底面境界：赤色、側面境界：橙色）。各境界面で受ける衝撃力は、境界要素として固定した粒子壁にかかる力の総和とした。

敷砂層幅 W は落体直径 D^f の4倍程度確保すれば側面境界の影響はほぼ無視できるという結果⁹⁾を参考にし、 $W=5.0$ mを基本値とした。落体の直径 D^f は道路のロックシェッドに作用する通常規模の落石を模擬して $D^f=1.0$ mを基本値とし、相対層厚 T/D^f （敷砂層厚 T を落体直径で除した値）は現行の設計法の推奨値¹⁵⁾である $T/D^f=0.9$ を基本値とした。

(3) 衝撃力算出方法

本論文における衝撃力は以下のように定義した。落体に作用する接触力の総和を落体衝撃力とし、底面境界粒子に作用する接触力の総和を伝達衝撃力とした。伝達衝撃力はロックシェッドなどの落石防護構造物に入力される重要な作用力¹²⁾（入力衝撃力）である。

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の方が議論しやすいと考える。そこで、粒子単位の応力算定にはある粒子の領域（本解析は二次元であるため各粒子の面積）に作用する体積平均応力^{16),18)}の考え方をを用いた。

(4) 衝撃力波形の概要

DEM解析による衝撃力波形の一例を図-2に示す。落体条件は、直径 $D^f=1.0\text{m}$ の重錘形状で、落体質量 $M^f=2.0\text{t}$ 、落下高さ $H=10.0\text{m}$ である。敷砂条件は層幅 $W=5.0\text{m}$ 、相対層厚 $T/D^f=0.9$ 、緩詰め条件である。図-2より、落体衝撃力は落体が敷砂に衝突すると同時に立ち上がり、 $t=7\text{ms}$ 付近で衝撃力が敷砂底面に伝達する前に最大値に達し、減少し始めるときに衝撃力は敷砂底面に到達する。伝達衝撃力は $t=25\text{ms}$ 付近で最大値に達する。その後、敷砂を伝播する応力波は底面で反射し落体に作用するため、落体衝撃力は $t=25\sim 35\text{ms}$ にかけて再び増加する。

図-2 DEM解析による衝撃力波形の一例

3. 落体衝撃力波形の形成メカニズム解明に向けた敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の载荷速度依存性の検討

本数値解析は敷砂緩衝材を介してロックシェッドに作用する伝達衝撃力の最大値発生の主要因である落体衝撃力波形の形成メカニズムの解明を目的としている。本節では、応力伝播速度に着目して敷砂緩衝材に衝突した際の落体衝撃力の载荷速度依存性について検討した。

(1) 落体衝撃力波形と载荷速度波形の関係

図-3上段には敷砂緩衝材に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-貫入量関係を実線で示している。敷砂層幅は $W=5.0\text{m}$ 、相対層厚は $T/D^f=0.9$ の緩詰め状態で、落体は重錘形状で直径は $D^f=1.0\text{m}$ とした。载荷速度は $V_0=2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0, 19.8\text{m/s}$ の10ケースである。また、図-3下段には落体速度と貫入量の関係を示している。

図-3上段に示す一定速度単調载荷の結果より、落体衝撃力は衝突直後に急激に増加し、その後衝撃力がほぼ一定になる領域が存在することが分かる。衝撃力が増加する $0 \leq S \leq 0.15\text{m}$ の貫入領域は、重錘形状の落体の曲面の高さ 0.175m に相当する。また、任意の貫入量における落

体衝撃力の値は载荷速度が速いほど大きく、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に作用する落体衝撃力は载荷速度依存性を有することが分かる。

図-3 一定速度単調载荷解析結果と任意の载荷速度に制御した载荷解析結果：（上段）落体衝撃力-貫入量関係，（下段）载荷速度-貫入量関係

加えて、図-3には落体の载荷速度を任意の速度に制御した解析の落体衝撃力と貫入量の関係をプロット付き実線で示している。落体の载荷速度は図-3 下段に示すように、任意に速度を増加・減少させるように制御した。

図-3より、速度を増加させた貫入領域においても減少させた貫入領域においても、任意の貫入量における落体衝撃力はそのときの速度の一定速度単調载荷により得られた落体衝撃力にほぼ一致することが分かった。落体衝突により敷砂緩衝材に生じる応力は、本解析で検討した载荷速度の範囲内では、落体衝撃力は载荷履歴に依らず、任意の貫入量における载荷速度にのみ依存する可能性があると言える。また、この結果は落体衝撃力波形の形成メカニズムを解明するためには、敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の载荷速度依存性について検討する必要があることを示しているものと考えられる。

(2) 応力伝播速度に着目した一定速度単調載荷解析時の落体衝撃力-貫入量関係の分析

ここでは、敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力が載荷速度依存性を有する原因について検討するために、前小節に比べて落体条件及び敷砂条件を単純化した条件で一定速度単調載荷解析を実施した結果について考察する。落体条件は、接触面形状が平底の一边が $D^f=1.0\text{m}$ の四角形落体、敷砂条件は、層幅は落体径と等しい $W=1.0\text{m}$ 、相対層厚 $T/D^f=0.9$ 、緩詰め状態とした。層幅を落体径と同一とすることで土粒子の水平方向への移動を拘束して、一次元的な挙動を想定した基礎的検討を行う。落体の載荷速度は $V_0=0.01, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0\text{m/s}$ の9ケースである。この解析で得られた落体衝撃力-貫入量関係をに図-4示す。

図-4より、 $V_0 \geq 1.0\text{m/s}$ のケースでは載荷速度の増加に伴って落体衝撃力が増加しており、図-3に示す一定速度単調載荷の結果と同様の傾向である。ただし、緩衝材の側方変位を拘束する本解析条件（落体直径 D^f と敷砂層幅 W が等しい条件）では、載荷速度が小さい $V_0 \leq 1.0\text{m/s}$ のケースの落体衝撃力-貫入量関係の波形は、貫入量の増加に伴って指数関数的に増加する波形に概ね収束しているように見える。 $V_0 \leq 1.0\text{m/s}$ の速度領域では載荷速度依存性の影響は無視できるものと考えられる。

図-4 一定速度単調載荷解析における落体衝撃力-貫入量関係

載荷速度依存性が生じる載荷速度の大きい $V_0 \geq 1.0\text{m/s}$ のケースにおいても、見かけ上、載荷速度依存性がほとんどない貫入領域がある。図-4において、載荷速度の大きい $V_0 \geq 1.0\text{m/s}$ のケースの波形が載荷速度の小さい $V_0 \leq 1.0\text{m/s}$ のケースの波形と交わった後の貫入領域では、載荷速度の大きいケースの波形が載荷速度の小さいケースの指数関数的に増加する波形に沿っていくような傾向がある。その原因について考えるため、図-4の $V_0=0.01\text{m/s}$ と $V_0=16.0\text{m/s}$ の波形を比べる。両者の交点（図

中の丸プロット）における貫入量は $S=0.26\text{m}$ であり、 $V_0=16.0\text{m/s}$ でその貫入量に達するまでに必要な時間は $t=S/V_0=16.2\text{ms}$ である。また、 $V_0=16.0\text{m/s}$ のときの応力伝播速度¹⁹⁾（応力波伝播時間を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と定義し、応力波伝播時間で初期層厚 T を除いた値を応力伝播速度 V_0 と定義する）は $V_0=94.8\text{m/s}$ であり、落体から伝播した応力波が緩衝材底面で反射して再び落体に作用するまでに必要な時間は $t=(2T-S)/V_0=16.2\text{ms}$ となる。以上より、 $V_0=16.0\text{m/s}$ の落体衝撃力-貫入量関係の波形は、 $V_0 \leq 1.0\text{m/s}$ のそれとの交点である貫入量 $S=0.26\text{m}$ 以降の貫入領域で、緩衝材底面からの反射波が落体に作用し始めていると考えられる。実際に $S=0.325\text{m}$ 付近から落体衝撃力が急増するため、それ以降の波形は載荷速度の小さいときの指数関数的な波形に収束するものと考えられる。敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の載荷速度依存性は、底面からの反射波が落体に伝達するまでの貫入（時間）領域で顕著に現れる性質であることが明らかになった。

(3) 接触モデルのダッシュポットが敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の載荷速度依存性に及ぼす影響

DEM解析の法線方向の接触モデルにはばね、ダッシュポット、ノンテンションディバイダーで構成される通常のフォークトモデルを用いているため、載荷速度依存性はダッシュポットの影響である可能性が考えられる。そこで、図-4と同様の解析条件で、載荷速度 $V_0=1.0, 8.0, 16.0, 32.0\text{m/s}$ の4ケースについて、2種類の減衰定数 $h=0.1, h=1.0$ を比較した結果を図-5に示す。

図-5 一定速度単調載荷解析における落体衝撃力-貫入量関係に及ぼす減衰定数の影響

減衰定数が大きい方が落体衝撃力の立ち上がり勾配は若干大きくなるもの、その後の衝撃力増減の変化がなくなる貫入領域では減衰定数によらずほぼ一定であると言える。本解析の対象とする載荷速度範囲では落体衝撃力

-貫入量関係に及ぼす減衰定数の影響はほとんどないことが分かる。また、一般的に、ばね、質点、スライダーで構成される一次元のスティック・スリップモデルでも载荷速度依存性を有することが知られている。これらのことから、本解析で示す敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の载荷速度依存性は、接触モデルの粘性項にはほとんど依存しない、多数の粒子の集合体である粒状体としての粘性抵抗のような特性であると考えられる。

(4) 応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力が载荷速度依存性を有する原因の検討

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、敷砂緩衝材内の応力伝播挙動を観察した。図-6には、図-4に示した一定速度単調载荷解析の载荷速度が $V_0=8.0, 16.0, 32.0\text{m/s}$ の3ケースについて、落体の貫入量が $S=0.00, 0.05, 0.10\text{m}$ のときの粒子単位応力（小節2(3)を参照）の応力伝播の様子(a)とその深度分布(b)を示している。また、载荷速度 $V_0=8.0, 16.0, 32.0\text{m/s}$ のケースの応力伝播速度 V_s はそれぞれ $V_s=82.0, 94.8, 111.8\text{m/s}$ である。

図-6(a)より、同一の貫入量においては、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2倍に増加しても応力伝播速度は1.2倍程度にしか増加しないためである。载荷速度が大きいほど、落体貫入による緩衝材の縮み量を受け持つ領域が緩衝材の表層に集中するため、落体衝撃力が大きくなるものと考えられる。また、载荷速度が小さいケースの方が応力伝播範囲が深いように見えるが、これは任意の貫入量に達するまでの载荷時間が異なるためであり、任意の载荷時間で比較した場合には、载荷速度が大きいケースの方が応力伝播範囲は深くなる。

図-6(b)には全粒子の粒子単位応力の深度分布（白抜き丸プロット）と、緩衝材表面からの深度 $Z=0.05\text{m}$ 毎の平均粒子単位応力の深度分布（塗り潰丸プロット）を示している。落体の貫入量 $S=0.10\text{m}$ に着目すると、载荷速度 $V_0=8.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=1.1\text{MPa}$ 程度の応力が $Z=0.10\sim0.40\text{m}$ の領域に生じており、 $V_0=16.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=2.3\text{MPa}$ 程度の応力が $Z=0.10\sim0.20\text{m}$ の領域に、 $V_0=32.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=4.5\text{MPa}$ 程度の応力が $Z=0.10\sim0.15\text{m}$ の領域に生じていることが分かる。これは敷砂緩衝材に落体を一定速度単調载荷させた場合には、载荷速度に応じて落体周辺の緩衝材に生じる平均的な粒子単位応力は一義的に決まることを示唆している。また、载荷速度に応じて生じる平均的な粒子単位応力（ $V_0=8.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=1.1\text{MPa}$ 程度、 $V_0=16.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=2.3\text{MPa}$ 程度、 $V_0=32.0\text{m/s}$ では $\sigma_m=4.5\text{MPa}$ 程度の応力）が分布する深度領域は、伝播時間が長いほどより深い領域まで分布することが明らかとなった。

(a) 応力伝播の様子（粒子単位応力）

(b) 粒子単位応力の深度分布

図-6 異なる载荷速度下における敷砂緩衝材内の応力伝播挙動

(5) 敷砂緩衝材を伝播中の応力と静的な応力の比較

敷砂緩衝材を伝播している最中の粒子群のひずみに対する応力と、応力伝播の影響をほとんど受けないほぼ静的な载荷状態のひずみに対する応力とを比較するため、図-4に示した载荷速度の小さい $V_0=0.01\text{m/s}$ （以下、静的载荷とする）と载荷速度の大きい $V_0=16.0\text{m/s}$ （以下、動的载荷とする）の結果を用いて検討する。

図-7 敷砂緩衝材の要素分割のイメージ

動的载荷時のひずみと応力は緩衝材の深度方向に $Z=0.03\text{m}$ 毎の擬似的な要素に分割して、その要素（粒子群）のひずみと平均粒子単位応力で考察することとした。要素分割のイメージを図-7に示す。まず、落体直径と敷砂層幅は等しく一次元的な载荷条件にあるため、鉛直方向の粒子の入れ替わりはほとんどないものと仮定する。载荷前の緩衝材を深度方向に $Z=0.03\text{m}$ 毎に30の粒子群にグループ分けする。このとき予め各グループ内の粒子番号を抽出しておくことで、任意の貫入量における各グループの粒子位置を取得できる。その粒子群から擬似的な要素を考える。具体的には図-7に示すように、粒子群 i の全粒子の平均位置を要素 I の上方境界、粒子群 j の全粒子の平均位置を要素 I の下方境界（及び要素 J の上方境界）とする。要素 I の圧縮率は载荷前の要素境界 I 、 J の距離と任意の貫入量における要素境界 I 、 J の距離から算出し、要素 I の応力は粒子群 i 、 j の全粒子の平均応力とした。なお、ここで検討する各要素内の平均粒子数は40個程度であるが、緩衝材モデルの最大粒径が落体直径の20分の1以下であれば落体衝撃力及び伝達衝撃力の最大値は収束することが分かっているため、本論文では上記の粒子数で検討を進めることとする。

図-8 要素分割した敷砂緩衝材の圧縮率と平均応力の深度分布

図-8に载荷速度 $V_0=16.0\text{m/s}$ の動的载荷時の要素の初期（载荷前）重心位置に対する要素圧縮率(a)と平均応力(b)

を示す。貫入量 S が $S=0.05$ 、 0.10m のときの結果である。図-8(a)中に赤枠で囲んだ要素圧縮率がほぼ等しいときには図-8(b)中の平均応力もほぼ等しくなることが分かった。

図-9 静的载荷と動的载荷の圧縮率と平均応力の関係

図-9に载荷速度 $V_0=0.01\text{m/s}$ の静的载荷時と $V_0=16.0\text{m/s}$ の動的载荷時の要素平均応力-要素圧縮率関係を示す。静的载荷時の圧縮率は敷砂層厚 H に対する貫入量 S とし、応力は緩衝材全粒子の平均応力とした。図-9より、赤枠で囲んだ最大圧縮率（最大応力）付近の圧縮率と応力の関係は、静的载荷と動的载荷の結果がほぼ一致していることが分かった。この理由は、動的载荷における最大圧縮率（最大応力）付近の粒子群は落体と等速で移動しており、粒子間の相対速度の変化がない領域であるため、応力伝播が無視できるという点で静的载荷状態と類似していることが考えられる。また、载荷速度によって粒子群（要素）の最大圧縮率は決まっており、そのため粒子群に発生する応力も载荷速度に依存すると考えられる。

また、任意の载荷速度で落体が貫入し続ける一定速度単調载荷の場合、緩衝材の表層から順に最大圧縮率に達し、最大圧縮率に達した粒子群は落体と同じ速度を有する。既に最大圧縮率に達した粒子群は落体のように未だ最大圧縮率に達していない粒子群を载荷するため、図-6に示すように伝播時間が長いほど大深度領域まで広く応力が分布するものと考えられる。

4. 落体衝撃力波形の推定に向けた要因分析に基づく一次元波動方程式の適用

緩衝材を伝播し躯体に作用する伝達衝撃力の最大値を知るためには、落体衝撃力の最大値だけでなくその時刻歴波形を把握する必要がある。二次元DEMを用いた数値解析的検討では、任意の貫入量（接触面積）における落体衝撃力発生に影響を及ぼす主要因は落体の载荷速度である可能性を示した。そこで、一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho c v$ （ σ ：被衝突体に生じる応力、 ρ ：被衝突体の密度、 c ：被衝突体の波動伝播速度、 v ：衝突体の衝突速度）の考え方を応用した簡易な計算モデルを提

案し、落体衝撃力波形の推定を試みると同時に落体の載荷速度によって敷砂緩衝材に生じる応力が一義的に決まる可能性を検証する。具体的には、接触面形状の異なる二種類の落体を用いた二次元DEM解析結果、入力エネルギーが異なる二つの大型衝撃実験結果と提案する簡易な計算モデルとの比較を行う。

(1) 一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算出方法

まず、一次元の波動方程式から誘導される衝撃応力について、弾性棒の衝突により生じる応力波を例に簡単に説明する¹⁹⁾。図-10に示すように弾性棒の左端に物体が定速の載荷速度 v で衝突して縮み λ が生じた場合を考える。この縮み λ は時間 t の間に微小断面部分が速度 v で動いたことによる変形である。時間 t の間に応力波は速度 c で弾性棒中を伝播し、 ct の領域に圧縮変形が生じる。その圧縮領域に生じる応力は $\sigma = \rho cv$ で表され、一次元の波動方程式から導くことができる。なお、応力伝播速度 c は $c = (E/\rho)^{0.5}$ で表されるものであり、材料の縦弾性係数 E と密度 ρ だけで定まる。

図-10 一次元弾性棒の衝突で生じる応力波¹⁹⁾

本稿では、 ρ は緩衝材の密度 γ_d 、 c は応力伝播速度 V_0 、 v は落体速度 V_f であると仮定して応力を算定する。落体質量と落体速度、貫入量の関数で表される落体の接触面積、落体の接触角度の情報から算定できる。

落体衝撃力の計算フローを図-11示す。計算ステップ間の時間刻みは $\delta t = 0.05\text{ms}$ である。まず、(i)ステップ目では、(i-1)ステップ目の落体の運動量 $I(i-1)$ から落体速度 $v(i)$ を求め、落体速度 $v(i)$ から応力 $\sigma(i)$ と貫入量 $S(i)$ と接触角度を考慮した接触面積 $A(i)$ を求める。そして、応力 $\sigma(i)$ と落体の接触角度を考慮した接触面積 $A(i)$ から落体衝撃力 $F(i)$ を求めることができる。さらに、時間刻み δt と落体衝撃力 $F(i)$ から落体が受ける力積を求めて、落体の運動量 $I(i)$ を更新する。計算回数は2000ステップ($t=100\text{ms}$)で終了させることとした。落体の接触角度とは図-12に示すように、接触面が水平面から θ の角度を有する場合に、接触面の法線方向の力のみが作

用すると仮定し(a)、さらに鉛直上向きの力のみが落体衝撃力であるとする(b)。なお、任意の貫入量における接触面積は単純に幾何学的に求めており、円形落体のように接触面が曲面の場合は微小な線分の集合であると考えて、図-12に倣ってそれぞれの線分の傾斜角度に対応する鉛直上向きの力を算出している。ただし、本解析における四角形落体は半径0.025mの円形粒子を剛結することでモデル化しているため、貫入量 $S=0.025\text{m}$ までは円の曲率に従って接触面積を増加させ、貫入量 $S=0.025\text{m}$ 以降は一定の接触面積としている。

図-11 一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の計算フロー

(a)接線方向の力は考慮しない (b)水平方向の力は考慮しない

図-12 落体の接触角度と落体に作用する力のイメージ

(2) DEM解析結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算定結果の比較

一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力波形とDEM解析結果を比較する。敷砂条件は、層幅は $W=5.0\text{m}$ 、相対層厚は $T/D^f=0.9$ 、緩詰め状態で密度は $\gamma_d=2145\text{kg/m}^3$ 、応力伝播速度は $V_0=98.3\text{m/s}$ である。なお、ここではDEM解析で得られた応力伝播速度を用いている。外力条件は、直径は $D^f=1.0\text{m}$ 、落体質量 $M^f=2.0\text{t}$ 、落下高さ $H=40.0\text{m}$ （衝突速度は落石対策便覧に記載されている終端速度 $V_f=28.0\text{m/s}$ ）とした。検討した落体形状は四角形、円形の2種類である。

(a) 四角形落体

(b) 円形落体

図-13 DEM解析結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算定結果

図-13にDEM解析結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定結果を示す。落体形状により異なる落体衝撃力波形の主波動である第1波目を精度良く推定できていると言える。DEM解析結果の第2波目は緩衝材底面からの反射波の影響で生じる波形であるため、反射波以降の応力派の影響を考慮していない本算定手法では落体衝撃力の第2波目は現れない。ただし、落体衝撃力波形の第2波目に関しては、その発生メカニズムが整理されていないため、今後衝撃実験結果やDEM解析結果を基に検討する必要がある。

(3) 衝撃実験結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による算定結果の比較

衝撃実験結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定結果を比較する。既往の大型緩衝材実験結果²⁰⁾では敷砂緩衝材の初期相対密度 D_r が高いほどラーメの定数 λ が大きくなることが分かっている。そこで、既往の大型緩衝材実験（敷砂緩衝材寸法：5.0m四方×敷砂層厚0.9m）結果を初期相対密度-応力伝播速度関係について整理し、その結果を図-14に示す。さらに、そのデータから得られた決定係数 $r^2=0.884$ の回帰直線を用いて実験時の初期相対密度 D_r から応力伝播速度 V_σ を算定し、 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算定パラメータとした。この落体衝撃力の算定方法では応力伝播

速度を事前に把握する必要があるため、緩衝材に用いる地盤材料の特性と応力伝播速度との関係について今後調査する必要がある。

図-14 敷砂緩衝材の初期相対密度と応力伝播速度の関係

外力条件が異なる2ケースの実験結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定結果の比較を行う。1ケース目は、敷砂条件は、敷砂層幅は $W=5.0m$ 、相対層厚は $T/D^f=0.9$ 、密度は $\gamma_d=1502kg/m^3$ （相対密度 $D_r=59.1\%$ ）、応力伝播速度は $V_\sigma=233m/s$ である。外力条件は、直径は $D^f=1.0m$ 、落体質量 $M^f=5.0t$ 、落下高さ $H=5.0m$ の重錘形である。2ケース目は、敷砂条件は、 $W=5.0m$ 、 $T/D^f=0.9$ 、 $\gamma_d=1488kg/m^3$ （ $D_r=54.7\%$ ）、 $V_\sigma=223m/s$ である。外力条件は、 $D^f=1.25m$ 、 $M^f=10.0t$ 、 $H=10.0m$ の重錘形である。

(a) 落体直径 $D^f=1.0m$ 、質量 $M^f=5.0t$ 、落下高さ $H=5.0m$

(b) 落体直径 $D^f=1.25m$ 、質量 $M^f=10.0t$ 、落下高さ $H=10.0m$

図-15 衝撃実験結果と $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算定結果

図-15に衝撃実験結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定結果を示す。外力条件により異なる落体衝撃力波形(a)(b)の主波動である第1波目を精度良く推定できていると言える。

ただし、図-15における衝撃実験結果との比較から読み取れる本推定手法の課題は2つある。1つ目は図-13と同様に落体衝撃力波形の第2波目が再現できていない点である。2つ目は提案手法により推定される落体衝撃力波形に比べて衝撃実験結果の立ち上がり勾配が小さくなることである。この2つ目の課題の原因として、緩衝材衝突時に落体周辺の砂が飛散することで、緩衝材と落体との接触面積が減少することが考えられる。図-12における二次元DEM解析では、落体貫入に伴う土粒子の移動が二次元方向に制限されるため、実現象に比べて緩衝材が密実な状態で変形していることが考えられる。これにより、二次元DEM解析では落体と緩衝材との間に隙間ができることなく、落体の貫入に伴って接触面積が増加することで衝撃力波形の立ち上がり勾配に差異が生じていないものと推定される。三次元の貫入挙動では奥行き方向への土粒子の移動が許されるため、二次元に比べて落体と緩衝材との間に隙間が生じ易く、衝撃力波形の立ち上がり勾配が緩くなるものと考えられる。

また、既往の大型重錘落下衝撃実験²¹⁾によると、落下条件が同じ場合、敷砂層厚 T が $T=0.7\text{m}$ に比べて $T=0.3\text{m}$ の方が落体衝撃力は2.8倍程度大きくなることが分かっている。この原因には、緩衝材を伝播する応力波の影響と落体貫入に伴う緩衝材の密度増加が考えられる。前者の応力波の影響とは、片端に固定端境界を有する一次元弾性棒のもう一方から任意の速度で載荷し続けた場合に、弾性棒中を応力波が行き来することで固定端反射を繰り返す、弾性棒中の応力が大きくなることである。原因が後者である場合、緩衝材の層厚が薄い場合の応力波の影響について今後検討を進める必要がある。さらに、今回の推定方法では落体貫入に伴う敷砂緩衝材の密度変化を考慮していないため、残りの層厚に応じて密度変化を考慮できるような工夫が今後必要になる。

本論文ではDEM解析により粒子単位の応力から応力の波動伝播までを考える微視的な視点で報告しているが、現象をより深く理解するためにはマルチスケールな視点で現象を捉える必要があると考えられる。たとえば、杭の先端支持力の問題では付加質量の概念を用いて現象を巨視的に捉えている²²⁾。ただし、現時点では巨視的なモデル化をするために必要な分析が不十分であると考えており、今後は微視的な現象と巨視的な現象との関係についても検討していく予定である。

5. まとめ

本稿では、落体衝撃力波形の形成メカニズムを明らかにするために、一定速度単調載荷解析において敷砂緩衝材が載荷速度依存性を有する原因について分析した。また、そこで得られた知見を基に落体衝撃力波形の推定を試みた。得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 落体衝撃力波形の形成メカニズムとして、落石の終端速度 28.0m/s までの載荷速度領域において、落体衝撃力は載荷履歴に依らず任意の貫入量における載荷速度のみに依存する可能性を示した。
- 2) 敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力の載荷速度依存性は、底面からの反射波が落体に伝達するまでの貫入（時間）領域で顕著に現れる性質であることを明らかにした。
- 3) 敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力が載荷速度依存性を有する理由として、載荷速度が大きいほど落体貫入による縮み量を受け持つ領域が表層に集中することで落体衝撃力が大きくなることが考えられる。
- 4) 静的載荷と動的載荷で得られる落体周辺の粒子群の圧縮率と応力の関係は、両載荷方法の結果がほぼ一致していることが分かった。この理由は、動的載荷における落体周辺の粒子群は落体と等速で移動しており、粒子間の相対速度の変化がない領域であるため、応力伝播が無視できるという点で静的載荷状態と類似していることが考えられる。
- 5) 一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定を試みた結果、異なる落体形状のDEM解析結果と異なる外力条件の衝撃実験結果との比較により、落体衝撃力波形の主波動である第1波目を精度良くで推定できる可能性を示した。

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します。

参考文献

- 1) 構造物の性能照査型衝撃設計に関する研究小委員会:防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計,丸善, 2013.
- 2) 山口悟, 西弘明, 今野久志, 岸徳光: 敷砂緩衝材の有無によるRC 製ロックシェッド模型(2/5)の重錘落下衝撃実験, 寒地土木研究所月報, No.696, pp.2-11, 2011.
- 3) 岸徳光, 中野修, 松岡健一, 西弘明: 野外実験による敷砂の緩衝性能, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1587-1597, 1993.
- 4) 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.
- 5) 吉田 博, 榎谷 浩, 今井 和昭: 個別要素法による敷砂上への落石の衝突特性に関する解析, 土木学会論文集, Vol.392/I-9, pp.297-306, 1988.

- 6) 榊谷 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.
- 7) Cundall, P. A. and O. D. L. Stack. : A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 8) 内藤直人, 前田健一, 山口 悟, 今野久志, 牛渡裕二, 鈴木健太郎: 二次元個別要素法解析による敷砂緩衝材の衝撃力伝達メカニズム, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.876-886, 2015.
- 9) 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.
- 10) 羽柴寛文, 前田健一, 内藤直人, 山口 悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.443-454, 2012.
- 11) 伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 2004..
- 12) 山口 悟, 岸徳光, 西弘明, 今野久志: 敷砂および砕石緩衝材を用いた大型 RC スラブの重錘落下実験, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.189-194, 2010.
- 13) Wood, D. M. and Maeda, K.: Changing grading of soil: effect on critical states, Acta Geotechnica, Vol.3, pp.3-14, 2008.
- 14) Maeda, K., Sakai, H., Kondo, A., Yamaguchi, T., Fukuma, M. and Nukudani, E.: Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, Granular Matter, Vol. 12, pp.499-505, 2010.
- 15) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 丸善, 2000.
- 16) S. Nemat-Nasser and M. Hori: Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials, Elsevier, 1993.
- 17) Oda, M. and Iwashita, K.: An Introduction Mechanics of Granular Materials, A.A.BALKEMA, 1999.
- 18) 内藤直人, 前田健一, 山口 悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動に関する DEM 解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.17, I_495-I_506, 2014.
- 19) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, 森北出版, 2008.
- 20) 奥村勇太, 内藤直人, 前田健一, 西弘明, 山口 悟, 川瀬良司: 落石衝突による敷砂緩衝材内の変形挙動, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.867-875, 2015.
- 21) 山口 悟, 今野久志, 西弘明, 小室雅人, 岸徳光: 敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.967-976, 2012.
- 22) Randolph, M. F. and Worth, C. F.: Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. 12, pp. 1465-1488, 1978.

(2015. 6. 23 受付)

THE LOADING RATE DEPENDENCY OF SAND CUSHION FOCUSED ON STRESS WAVE VELOCITY USING DEM

Naoto NAITO, Kenichi MAEDA, Hisashi KONNO, Yuji USHIWATARI,
Kentarō SUZUKI, Ryoji KAWASE

Cushioning materials, such as sand cushion and granular mats placed on rock sheds, can effectively disperse and reduce rock fall energy before rocks collide with protection works. Although the construction costs for sedimentary layers are low, these layers are attracting attention as construction devices that can substantially improve the margin of safety ratio. To elucidate the formation mechanism that governs the impact force waveform of falling mass, this study examines the loading rate dependency of sand cushion by 2D-DEM simulation. In the simulation, particular attention is paid to the velocity of stress waves that propagate in sand cushion. The results are summarized as follows: (1) The impact force of falling mass depends only on loading velocity and penetration depth, not on loading history. (2) The larger the loading velocity, the smaller the area wherein volume strain is borne only by the loaded surface, rather than shared by the penetration of falling mass. This imbalance in support explains the loading rate dependency of sand cushion. (3) The relationships between the compressive strain of a particle group and mean principal stress are determined over dynamic and static loading. These relationships are almost the same between the loadings. (4) Using $\sigma = \rho c v$ to estimate the impact force waveform of falling mass produces large-scale experimental and 2D-DEM simulation results.