

応力波に着目した敷砂緩衝材の緩衝性能に及ぼす外力条件の影響
External force condition affects shock absorbing performance of sand cushion
with stress wave

内藤直人¹，前田健一²，山口悟³，牛渡裕二⁴，鈴木健太郎⁴，川瀬良司⁴

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・cjl18507@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・都市社会工学科

3 (独)土木研究所寒地土木研究所

4 (株)構研エンジニアリング

概要

我が国では、近年の気象変動による豪雨の増加に伴う落石規模の拡大や構造物自体の劣化によって、落石対策工の安全余裕度の低下が深刻な問題である。また、斜面表層の土砂流出によって落石が併発する事例も報告されており、落石対策工の多様な超過外力に対する性能評価法の確立が急務である。本研究では、ロックシェッド上に設置される高緩衝性能を有する敷砂緩衝材に着目し、個別要素法を用いて敷砂の緩衝メカニズムに関する数値解析を実施した。一般に、落石外力はエネルギーで議論されることが多いが、ここでは、緩衝性能を適切に評価し合理的に維持管理・設計することを目的に、落石の質量と衝突速度のそれぞれが敷砂の緩衝性能に及ぼす影響を調べた。その結果、等エネルギー条件において、質量と速度の内訳の違いが、応力伝播速度や衝撃力継続時間に及ぼす影響を明らかにした。従来は衝撃力の最大値のみで議論されていた敷砂緩衝材の関する衝撃力の問題を、応力の波動性と力の継続時間を考慮して整理した。

キーワード：落石，敷砂緩衝材，衝撃力，応力波

1. はじめに

我が国では、土木構造物を含む社会インフラの多くは老朽化が進み、その長寿命化が重要課題の一つである。これは落石防護工においても例外ではなく、劣化などにより構造物自体の安全性の低下が懸念されている。また、斜面の経年劣化に伴う落石規模の拡大や気象変動による豪雨の増加に伴う斜面表層の土砂流出により落石が併発する事例も報告されている。これらの外力条件の変化は、供用期間中に設計荷重が増大するとことで落石防護工としての安全余裕度を低下させるため大きな問題であり、既存防護工の性能評価とその対策方法の提案が急務となっている。

落石防護工の一つにロックシェッドがある。ロックシェッドの屋根部分である頂版上には、落石が発生した場合に構造物の直接的な損傷を抑制する敷砂などの緩衝材が設置される。敷砂緩衝材は、落石衝撃力の緩衝効果に優れるだけでなく、低コストで設置・維持管理ができ、腐食や劣化が発生し難いため材料としての安定性に優れている。

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¹⁾に準拠して算出される((1)式)。

$$P_{\max} = 2.108 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (1)$$

ここで、 P_{\max} 、 m 、 g 、 λ 、 H はそれぞれ、落石の衝撃力(kN)、落石質量(t)、重力加速度(m/s^2)、被衝突体のラーメの定数(kN/m)、落下高さ(m)である。しかし、既往の研究から、落体質量や落下高さ(衝突速度)の増大に伴って入力エネルギー E が増大すると、たとえ敷砂緩衝材が同一であっても、ラーメ定数 λ を固定した値で衝撃力 P_{\max} を精度良く算定できないことが知られている²⁾。

また、落石の敷砂への衝突問題は、数ms~数十msの載荷時間でありながら大変形・飛散を伴うため非常に複雑な現象である。岸らの研究³⁾で実施された大型衝撃実験より、模擬落石である重錘が受ける衝撃力波形には2つのピークが存在することなど、未解明の問題も少なくない。岸らは、衝撃力波形を敷砂内部の応力伝播挙動と関連付けて理論的解釈がなされているが、内部の応力波を実測した例はなく、現象解明には至っていない。

そこで、本論文では、超過外力に対する敷砂緩衝材の緩衝性能に及ぼす外力条件(落体の質量と落下高さ)の影響について過去の研究⁴⁾⁵⁾を参考に二次元個別要素法⁶⁾(Discrete Element Method, 以下DEMと略す)を用いて数値解析実施し、応力波に着目した検討から敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動の解明を試みた。

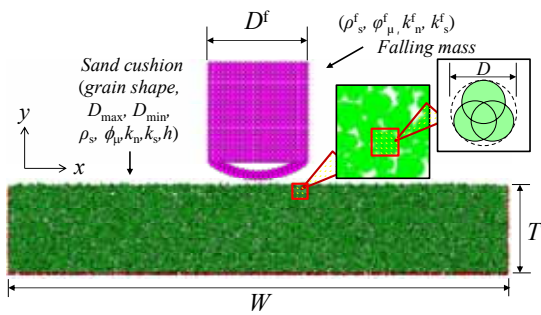


図 - 1 解析モデルの概要

表 - 1 DEM 解析に用いた敷砂モデルの基本的パラメータ

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
	最大粒径 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

2. DEM による衝撃力解析の概要

2.1 解析条件

二次元 DEM を用いて、落体が鉛直下向きに敷砂緩衝材に自由落下する様子を解析した。図 - 1 に解析モデルの概要を示す ($x - y$ 軸は図中に示す)。本論文で用いた敷砂モデルの解析パラメータを、表 - 1 に示す。解析パラメータの決定方法は、既報^{7,8)}に従っている。ばねには線形ばね⁹⁾を用いた。本論文における敷砂の土粒子モデル⁸⁾は、図 - 1 右上の拡大図に示す非円形粒子を採用している。

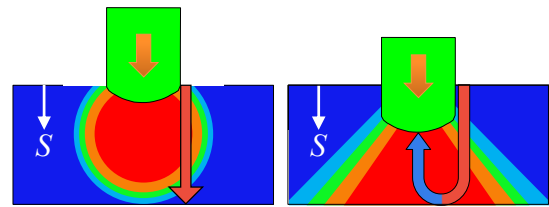
敷砂幅 W は落体径 D^f の 4 倍程度確保すれば側方境界の影響はほぼ無視できるという結果⁷⁾を参考にし、 $W=5.0\text{m}$ を基準幅とした。道路のロックシェッドに作用する落石条件を模擬し、直径 D^f は 1.0m を基本値とした。

落石を模擬した落体モデルの形状は、現在、系統的な検討が行われている実験^{1), 10)}に用いられている重錘と同一形状とした。

2.2 衝撃力算出方法

本論文では、落体に作用する接触力の総和を落体衝撃力とし、底面境界粒子に伝達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 RC 構造物に入力される重要な作用力 (入力衝撃力) である¹¹⁾。

粒子単位の応力には、粒子の領域 (体積もしくは面積) に作用する体積平均応力^{7), 12), 13)}の考え方をを用いた。体積平



(a) 衝突-底面到達 (b) 衝突-底面到達-落体反射

図 - 2 応力伝播の模式図

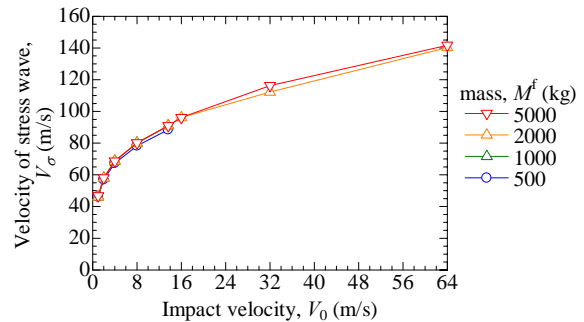


図 - 3 衝突速度と応力波伝播速度の関係

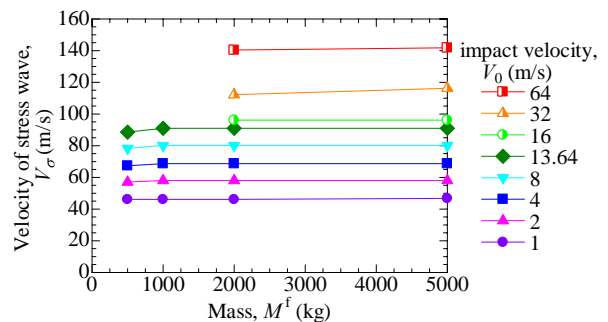


図 - 4 落体質量と応力波伝播速度の関係

均応力とは、ある粒子に作用する接触力をその粒子の領域において発散定理を用いて算出する応力である。これにより、着目する領域 (粒子) 表面に作用する力の情報のみで内部応力の体積平均を算出できる。

3. 敷砂内部の応力伝播メカニズム

3.1 応力伝播速度に及ぼす外力条件の影響

落体直径 $D^f=1.0\text{m}$ 、相対層厚 $T/D^f=0.7$ 、層幅 $W=5.0\text{m}$ の条件で落体質量と衝突速度 (落下高さ) を変化した解析を実施し、応力波伝播速度を算出した。ここで、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 (図 - 2(a))、伝播時間で初期層厚を除いた値を応力波伝播速度と定義する。

衝突速度 $V_0=1 \sim 64\text{m/s}$ の条件でそれぞれ衝突速度を変化させた解析結果より、敷砂内部の応力波伝播速度は、衝突速度の増加に伴い対数的に増加する (図 - 3)。

落体質量 $M^f=500 \sim 5000\text{kg}$ の条件でそれぞれ落体質量を変化させた解析結果より、敷砂内部の応力波伝播速度は、落体質量の変化によらずほぼ一定値となる (図 - 4)。

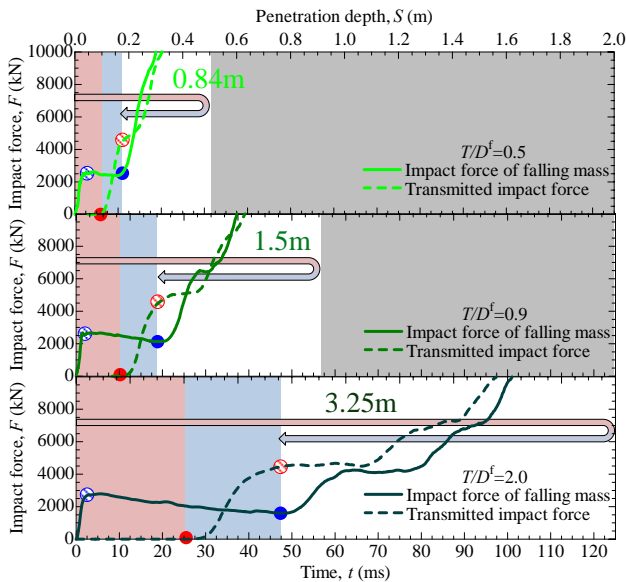


図 - 5 異なる層厚に対する一定速度単調荷

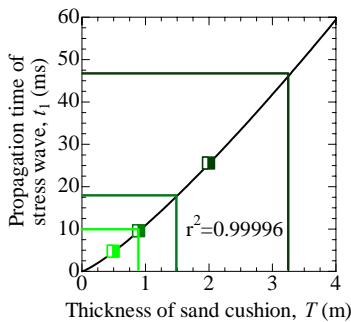


図 - 6 層厚と応力波伝播時間の関係

3.2 一定速度単調荷解析による応力伝播特性の把握

$T/D^f=0.5, 0.9, 2.0$ の 3 種類の層厚に対して $D^f=1.0\text{m}$ の四角形落体による $V_0=16.0\text{m/s}$ の一定速度単調荷解析を実施した。落体が受ける衝撃力 - 貫入量 (時間) 関係を図 - 5 に示す。実線が落体衝撃力、破線が伝達衝撃力である。図中において、赤色で塗りつぶした部分はそれぞれの層厚での応力波伝播時間を示す。層厚が厚くなるに従って応力波伝播時間は指数的に増加しており (図 - 6)、伝播距離が長いほど応力波伝播速度は減少する性質を持つと言える。

図 - 5 より、いずれの層厚においても波形性状は概ね一致している。そこで、 $T/D^f=0.9$ を例に考察する。落体衝撃力は衝突直後に急激に立ち上がり、一定値に落ち着く。その後、 $t=18\text{ms}$ から再び落体衝撃力は急増する。この時刻での貫入量は $S=0.3\text{m}$ である。落体衝撃力再急増の原因が反射波の影響であれば、落体衝突後に底面で跳ね返り再び落体に到達 (図 - 2(b)) するまでの応力の伝播距離は 1.5m となる。ここで、応力が底面から落体に反射するときの伝播速度が、衝突直後から底面に伝達するまでの速度と等しいと仮定すると、図 - 7 より落体に反射波が到達するまでの時間は約 18ms であると概算できる。 $t=18\text{ms}$ とは、落体衝撃力が再び急増する時刻と一致しており、 $T/D^f=0.5, 2.0$

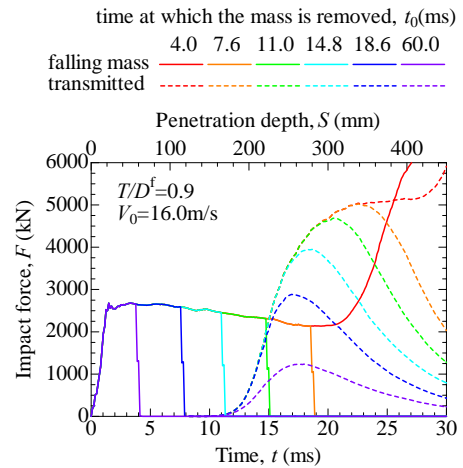


図 - 7 落体衝撃力継続時間と伝達衝撃力の最大値の関係

のケースについても同様の傾向があることから、落体衝撃力の再急増の原因は、底面からの反射波である可能性が極めて高いと言える。

また、 $t=18\text{ms}$ 付近において破線で示す伝達衝撃力が落体衝撃力の 2 倍程度になることが確認できる。

3.3 衝撃力継続時間と伝達衝撃力の関係

前節で、落体衝撃力よりも伝達衝撃力の方が大きくなる例を示した。ここでは、衝撃力継続時間と伝達衝撃力の最大値の関係を明確にするために、貫入途中に落体を除去する解析を実施した。検討対象は、落石径と敷砂層厚の一般的な比率でもある、 $T/D^f=0.9$ 層厚の解析ケースとした。落体が受ける衝撃力 - 貫入量 (時間) 関係を図 - 7 に示す。実線が落体衝撃力、破線が伝達衝撃力を表す。結果より、落体衝撃力の最大値が等しくても、ピーク後の継続時間が短ければ伝達衝撃力は落体衝撃力より最大値が小さくなり、ピーク後の継続時間が長ければ伝達衝撃力は落体衝撃力の 2 倍程度の最大値となり得ることを明らかにした。

4. 衝撃力波形に及ぼす外力条件の影響

4.1 衝撃力波形に及ぼす落体質量の影響

落下高さが $H=40\text{m}[28\text{m/s}]$ のとき、落体の質量を $M^f=0.5, 1, 2, 5, 10\text{t}$ と 5 段階に変化させた解析を実施した。敷砂の緩衝性能にとって落体径が大きくなる意味には、次の二通りが考えられる。一つ目は、敷砂層厚に対して相対的に落体径 (接触面積) が大きくなること。二つ目は、敷砂衝突時の接触面積は落体径の増加に比例しないことに起因する、接触面積当たりの質量 (見かけの密度) の増加がある。この二つの要因が、緩衝性能に及ぼす影響を明らかにすることで、例えばアスペクト比の大きい直方体形状の落石に対する敷砂の性能評価をも可能にすると考えられる。そこで、本論文では、落体径を $D^f=1\text{m}$ で一定にして落体の質量を変化 (落体密度を変化) させたときの最大衝撃力の変化について検討した。敷砂条件は $W/D^f=5, T/D^f=0.9\text{m}$ とした。なお、敷砂衝突時の落体速度 28m/s は、落石対策便覧¹⁾に記載されている終端速度である。

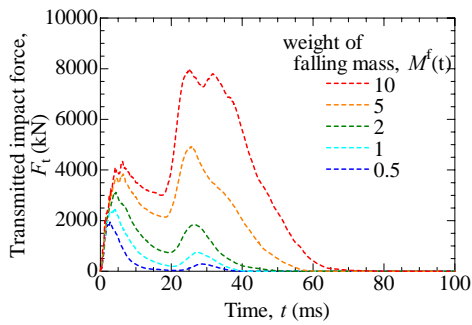


図 - 8 落体衝撃力に及ぼす落体質量の影響

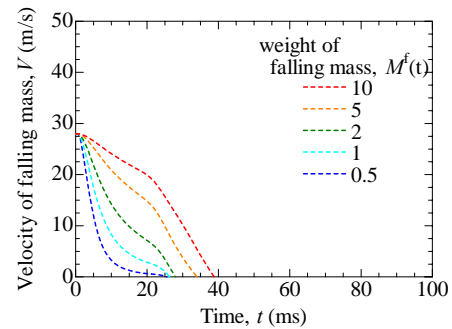


図 - 11 落体の貫入速度に及ぼす落体質量の影響

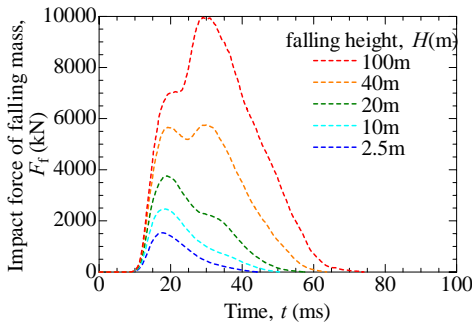


図 - 9 伝達衝撃力に及ぼす落体質量の影響

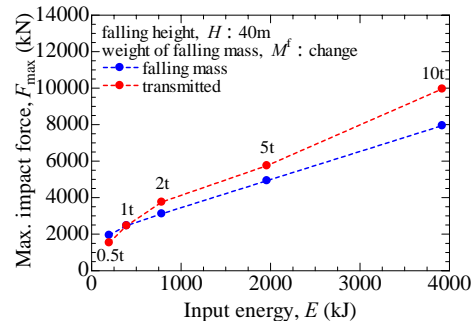


図 - 12 最大衝撃力に及ぼす落体質量の影響

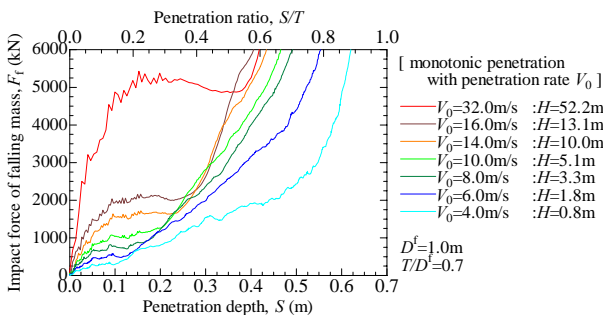


図 - 10 一定速度単調載荷時の落体衝撃力 - 貫入率関係

図 - 8, 9 には、落体衝撃力と伝達衝撃力に及ぼす落体質量の影響を示す。質量増加に伴い落体衝撃力及び伝達衝撃力は増加し、衝撃力継続時間は長くなる。衝突速度が変化しなくても衝撃力が大きくなる理由として落体速度の減少率が関係していると考えられる。図 - 10 は、直径 $D^f=1.0\text{m}$ の重錘形状の落体モデルを $T/D^f=0.7$ の敷砂緩衝材に一定速度単調載荷した結果¹⁴⁾である。これによると、貫入率 S/T が大きい領域では比較的低速度でも大きな落体衝撃力が発生する。図 - 8, 9 に対応する落体速度の経時変化が図 - 11 になる。質量増加に伴い、貫入しても落体の速度が維持されやすく、貫入率が大きくなるため、衝突速度が一定でも落体を受ける衝撃力が大きくなるものと考えられる。

図 - 12 は 最大衝撃力に及ぼす落体質量の影響を示す。落体衝撃力と伝達衝撃力の最大値の大小関係は、 $2t$ 以上の質量では伝達衝撃力の方が大きく、 $1t$ ではほぼ等しく、 $0.5t$ では伝達衝撃力の方が小さい。これは、質量が小さい場合、衝突時の速度をほとんど保つことができないためだと考えられる(図 - 13)。図 - 13 は、 $T/D^f=2.0$ で、 $D^f=1.0\text{m}$ 、

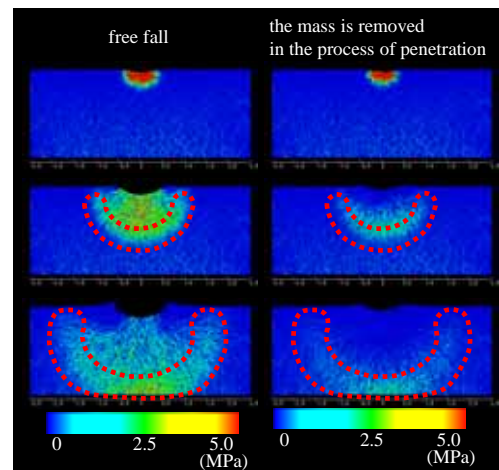


図 - 13 落体衝撃力の後続波が応力伝播に及ぼす影響

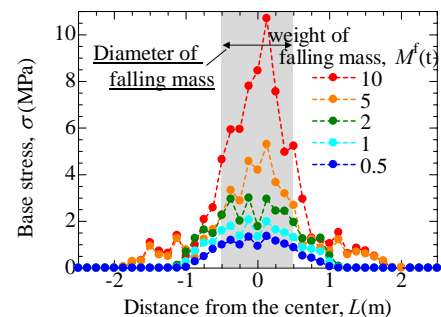


図 - 14 底面応力分布に及ぼす落体質量の影響

$M^f=2.0t$ の重錘形落体を 10m から自由落下させた場合と落体衝撃力の最大値発生後に落体を除去した場合の応力伝播状況である。自由落下の場合は、先端の応力(赤破線内)が衝突初期の応力状態を維持するように伝播する。それに対して、落体除去した場合は、先端の応力が消散しながら

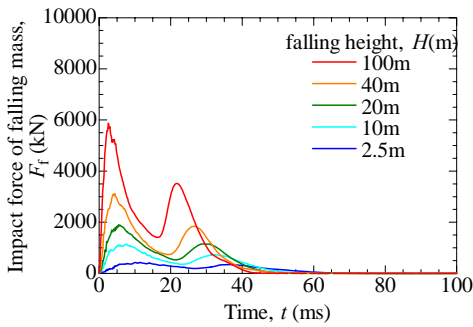


図 - 15 落体衝撃力に及ぼす落下高さの影響

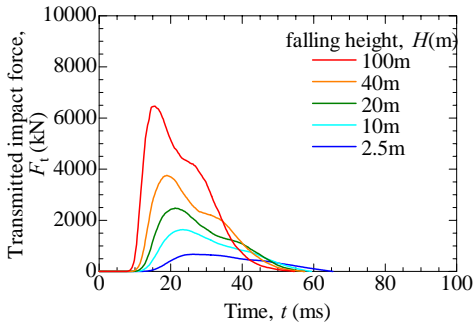


図 - 16 伝達衝撃力に及ぼす落下高さの影響

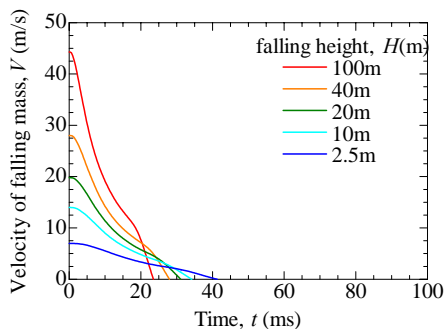


図 - 17 落体の貫入速度に及ぼす落下高さの影響

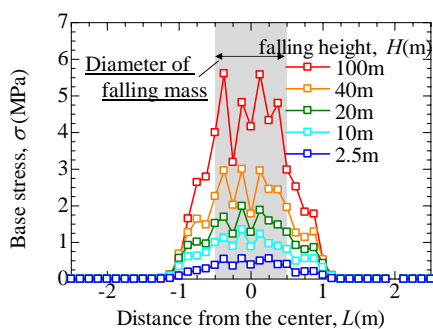


図 - 18 底面応力分布に及ぼす落下高さの影響

伝播する。よって、質量が小さい場合は載荷速度が急激に低下することで敷砂底面まで衝撃力が十分に伝達できなかったことによるものと考えられる。

図 - 14 は、質量を変化させたケースの伝達衝撃力が最大時の底面の応力分布である。落体質量の増加に伴って底面の応力分布は、落体直下では鋭角な三角形形状に近づくとともに、分布幅も広くなる傾向にある。

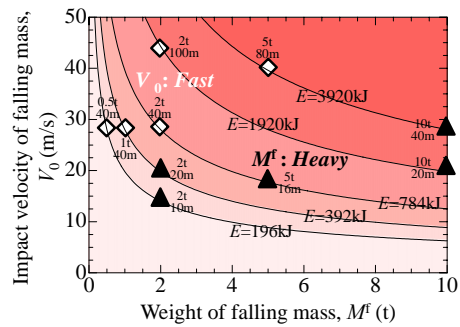


図 - 19 等エネルギー条件下の解析ケース；実線：等エネルギー線， \blacklozenge ：重い載荷， \blacktriangle ：速い載荷

4.2 衝撃力波形に及ぼす衝突速度の影響

落体の落下高さを $H=2.5, 10, 20, 40, 80, 100\text{m}$ と 5 段階変化させた解析結果を示す。落石対策便覧の「資料編 5. 落石防護工の被害の実態」に記載されている落石質量の大半が 2t 未満であることより落体質量は 5 ケースとも $M^f=2\text{t}$ で統一した。

図 - 15, 16 には、落体衝撃力と伝達衝撃力に及ぼす衝突速度の影響を示す。速度増加に伴い衝撃力の継続時間は短くなり、衝撃力の最大値は大きくなる。

図 - 15, 16 に対応する落体速度の経時変化が図 - 17 である。衝突速度増加に伴い、衝突初期と落体静止直前における落体速度の減少勾配が大きくなる。落下高さが 40m の条件では、落体速度が 0 になる直前に再び減少勾配が大きくなる傾向が顕著であり、これは落体衝撃力波形の 2 山目に対応する現象である。敷砂緩衝材のように薄層の地盤では、底面からの反射波の影響も受けることで図 - 15, 16 における衝撃力の継続時間が短くなると考えられる。

図 - 17 には、衝突速度を変化させた場合の最大衝撃力の推移を示す。落体衝撃力と伝達衝撃力の最大値の大小関係は、衝突速度の大きさに関わらず伝達衝撃力の方が大きくなる。

図 - 18 は、衝突速度を変化させたケースの伝達衝撃力が最大時の底面の応力分布である。衝突速度の増加に伴って最大伝達応力は増加する。また、最大伝達応力は、ほぼ落体直径の幅に均等に分布する。

4.3 等入力エネルギー条件下における各種衝撃応答の最大値に及ぼす落体質量と落下高さの影響

落石の衝撃力は、一般的に入力エネルギーの大きさで議論されることが多い。しかし、入力エネルギーには、落体質量と落下高さ（衝突速度）の 2 つの成分があり、前節までで検討したように、質量や衝突速度の変化による衝撃特性の変化に与える影響機構は異なる。そこで、本節では、各種衝撃応答に及ぼす落体質量と衝突速度の影響を調べるため、等入力エネルギー条件のもとで、質量と速度が異なるケースを検討した（図 - 19）。図中の実線で示す等入力エネルギー線上に位置するそれぞれ 2 つの解析ケースを、ひとつは、もう片方に比べて質量が大きく速度が小さいケース（重い載荷： \blacklozenge ）、もうひとつは、速度が大きく

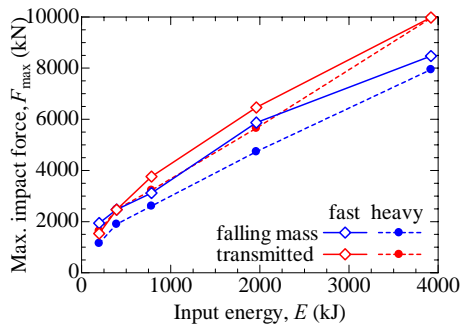


図 - 20 最大衝撃力に及ぼす質量と速度の影響

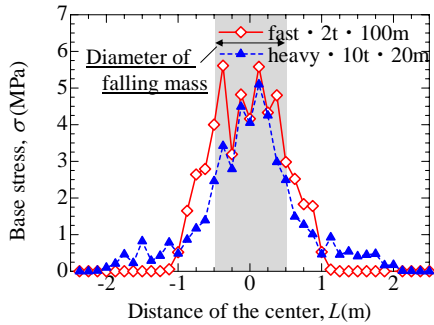


図 - 21 底面応力分布に及ぼす質量と速度の影響

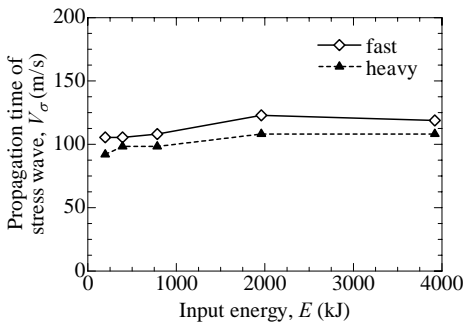


図 - 22 応力波伝播速度に及ぼす質量と速度の影響

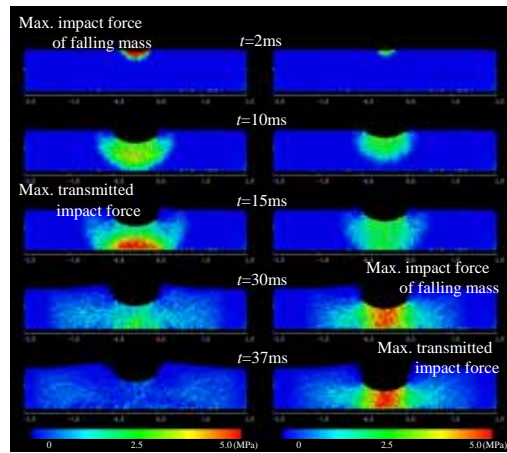
質量が小さいケース（速い载荷：）に分類し、比較検討を行った。

図 - 20 は、落体衝撃力と伝達衝撃力の最大値に及ぼす重い载荷と速い载荷の推移を示す。落体衝撃力と伝達衝撃力の最大値は、速い载荷の方が 1~2 割程度大きい。伝達衝撃力に関して、速い载荷と重い载荷で最大衝撃力が同等となるエネルギーの解析ケースでは、速度差及び質量差が小さいため衝撃力の差に影響が小さいものと推測される。

図 - 21 は、入力エネルギーが 1920kJ の同じ条件で、速い载荷（2t・100m）と重い载荷（10t・20m）の底面応力分布を示す。速い载荷の方が、最大応力は 1 割程度大きく、落体径程度に幅広く伝達する。

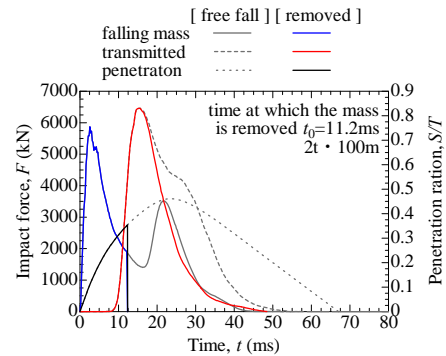
図 - 22 には、等入力エネルギー条件における速い载荷と重い载荷の応力波伝播速度を示す。速い载荷の方が応力伝播速度は大きい。これは、図 - 3 と図 - 4 からわかるように、応力伝播速度は、落体質量ではなく衝突速度に依存するためであると考えられる。

図 - 23(a)(b)には、速い载荷（2t・100m）と重い载荷（10t・20m）の応力伝播状況を示す。両図からも、速い载荷の方が応力波の伝播速度が速い様子が分かる。また、伝達衝撃

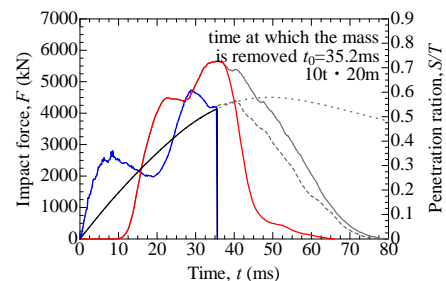


(a) 2t・100m (b) 10t・20m

図 - 23 等入力エネルギー下（E=1920kJ）の質量・速度が異なる場合における応力伝播状況の比較



(a) 2t・100m



(b) 10t・20m

図 - 24 等入力エネルギー下（E=1920kJ）の質量・速度が異なる場合において落体を貫入途中で除去した時の衝撃力波形と貫入量波形

力の最大時には、速い载荷は落体径程度の幅に強い応力が分布しているのに対し、重い载荷は落体径よりさらに狭い範囲に強い応力が集中していることが分かる。

続いて、速い载荷（2t・100m）と重い载荷（10t・20m）の衝撃力伝達挙動の違いを考察する。上記 2 ケースについて、敷砂貫入途中で落体を除去する解析¹⁴⁾を実施することにより、どこまでの貫入過程が伝達衝撃力の最大値に影響しているかを調べた。図 - 24(a)(b)は、横軸に時間、縦軸に衝撃力と貫入量とした。灰色の破線・一点鎖線・点線はそれぞれ自由落下した時の落体衝撃力・伝達衝撃力・貫入

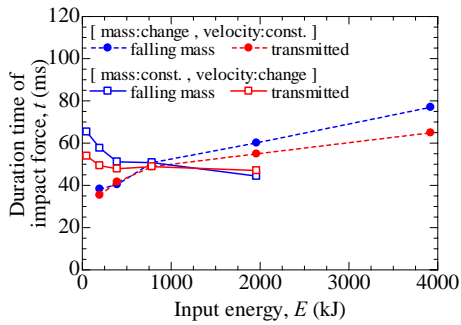


図 - 25 衝撃力継続時間に及ぼす質量と速度の影響

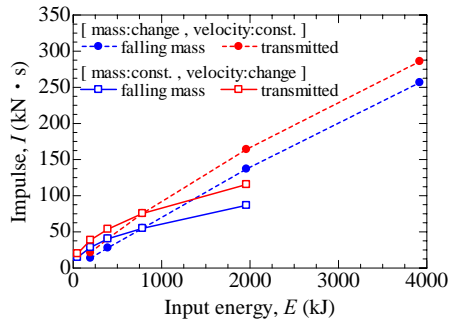


図 - 26 力積に及ぼす質量と速度の影響

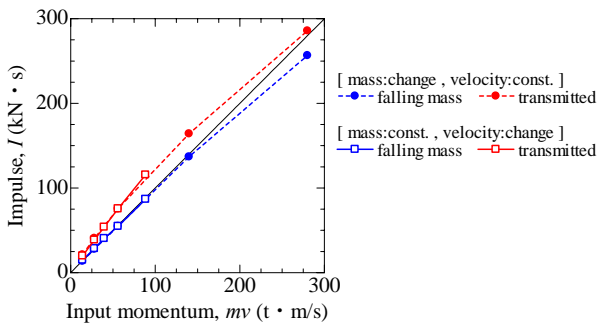


図 - 27 入力運動量と力積の関係に及ぼす質量と速度の影響

量で、青色・赤色・黒色の実線はそれぞれ任意の時刻で落体を除去した時の落体衝撃力・伝達衝撃力・貫入量である。速い载荷の場合、伝達衝撃力は落体が $S=350\text{mm}$ ($t=11.2\text{ms}$) まで貫入することで最大値を発現する。この時、伝達衝撃力の最大時に底面に伝達している応力は、最短でも落体から 550mm の層厚を伝播して底面に到達すると考えられる。重い载荷の場合、伝達衝撃力は落体が $S=530\text{mm}$ ($t=35.2\text{ms}$) まで貫入することで最大値を発現する。この時、伝達衝撃力の最大時に底面に伝達している応力は、最短でも落体から 370mm の層厚を伝播して底面に到達すると考えられる。よって、重い载荷より速い载荷の方が、1.5 倍程度厚い層厚を伝播して最大伝達衝撃力を発現することが明らかになった。そのため、重い载荷より速い载荷の方が、底面に伝達する最大応力付近の高い応力が落体径程度に幅広く伝播するものと考えられる。

4.4 等入力エネルギー条件下における各種衝撃応答の継続時間に及ぼす落体質量と衝突速度の影響

緩衝材の下部構造物に与える影響については時間的な効果も検討する必要がある。そこで本節では、質量と衝突速度が力積に与える影響について再考した。4.1, 4.2 節に示した解析ケースの衝撃力継続時間と力積を比較し考察する。力積は、衝撃力の波形が立ち上がってから、衝撃力が再び 0 になるまでの時間の衝撃力波形の面積に相当するものとした。

図 - 25 は、衝撃力継続時間に及ぼす落体質量と衝突速度の影響を示す。衝突速度を固定し質量のみ増加させると、衝撃力継続時間は長くなる。これは、図 - 11 から読み取れるように、質量増加によって深い貫入量でも大きい速度を維持するため落体が静止するまでに時間を要するものと考えられる。一方で、質量を固定して衝突速度のみ増加させると、衝撃力継続時間は短くなる。これは、図 - 17 から読み取れるように、衝突初期に落体が受ける衝撃力が大きいため落体速度が急減するためと考えられる。

図 - 26 は、横軸入力エネルギーと縦軸力積の関係を示す。衝突速度を固定し質量を増加させると、力積はほぼ線形に増加する。一方で、質量を固定して衝突速度のみを大きくすると、力積は対数的に増加する。また、等入力エネルギー $E=1920\text{kJ}$ の条件では、重い载荷 ($10\text{t} \cdot 20\text{m}$) の方が速い载荷 ($2\text{t} \cdot 100\text{m}$) に比べて、力積が 5 割程度大きな値になる。この理由として、図 - 27 (横軸入力運動量、縦軸力積) に示すように、力積は入力運動量とほぼ線形な関係を持つことが挙げられる。力積には、衝突速度と質量の大きさがほぼ同等に効いているため、等入力エネルギーの条件で考える場合、重い载荷の方が、力積が増加すると言える。

5. まとめ

落石対策工の性能評価・設計を支援する一方法として、個別要素法を用いて、超過外力に対する緩衝性能を応力の波動性と力の継続時間に着目して検討した。

- 1) 応力波伝播速度は、落体質量には依存せず衝突速度の増加に伴い対数的に増加し、応力の伝播距離が長くなると伝播速度は小さくなることが分かった。
- 2) 落体が敷砂緩衝材へ衝突した際に生じる落体・伝達衝撃力波形を理解するには、緩衝材底面境界で生じる反射波挙動と衝撃力の継続時間の重要性を明確にした。
- 3) 落体質量及び衝突速度を増加させると、従来の物理公式通り、衝撃力の最大値が増加する傾向が得られた。落体質量のみを増加させた場合に衝撃力が大きくなる原因は、一定速度単調解析結果の衝撃力 - 貫入量関係より、深い貫入率では低速でも強い衝撃力が生じるためであると考えられる。
- 4) 等入力エネルギー条件において、伝達衝撃力の最大時に底面へ伝達する最大応力の分布域は、重い载荷では落体径より集中することに対し、速い载荷では落体径

程度の幅に広く分布することが分かった。これは、速い载荷の方が、伝達衝撃力が最大値に至るまでに必要な貫入量が小さく、重い载荷に比べて厚い層厚を伝播するためであると考えられる。

- 5) 等入力エネルギー条件において、衝撃力の最大値は速い载荷の方が1~2割程度大きくなるが、力積は重い载荷の方が5割程度大きくなることを示した。緩衝材の下部構造物に与える影響を考える際には、瞬間的な力だけでなく、時間的な作用を考えて力積についても考慮する必要性を示した。

今後は、敷砂内部の応力・ひずみ挙動と緩衝性能の関係についてさらに詳細な検討を進め、粒状体としての敷砂の衝撃緩衝メカニズムを明らかにすることで、DEM解析による敷砂緩衝材の性能評価を目指す。

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す。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.
- 2) 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.967-976，2013．
- 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) 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．
- 5) 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．

- 6) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack.: A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979．
- 7) 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．
- 8) 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．
- 9) 伯野元彦：破壊のシミュレーション，森北出版，2004．
- 10) 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．
- 11) 山口悟，岸徳光，西弘明，今野久志：敷砂および碎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．
- 12) 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．
- 13) Oda, M. and Iwashita, K.: An Introduction Mechanics of Granular Materials, A.A.BALKEMA, 1999．
- 14) 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．