

(37) 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達挙動解析

Propagation analysis of impact force of rockfall into granular mat using DEM

刈田圭一*, 前田健一**, 羽柴寛文***, 牛渡裕二****, 川瀬良司*****

Keiichi Karita, Kenichi Maeda, Hirofumi Hashiba, Yuji Ushiwatari, Ryoji Kawase

*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)

**工博, 名古屋工業大学, 都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

***名古屋工業大学大学院, 博士前期課程, 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

****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)

*****工博, 構研エンジニアリング, 取締役 (〒065-8510 札幌市東区北18条東17丁目1-1)

Key Words: (granular mat, rock impact, propagated impact, Discrete Element Method, stress wave, particle ability)

キーワード: 堆積層, 落石衝撃力, 伝達衝撃力, 個別要素法 (DEM), 応力伝達, 粒子特性

1. はじめに

我が国において、毎年多くの落石事故が発生しており、また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堆積層に注目が集まっている。また、ロックシェッド上面に設置される敷砂などの緩衝材もこれに該当する。堆積層は落石の大きなエネルギーにまで対応できる特徴があり、本研究ではこの堆積層に着目する。

堆積層の効果は、落石速度を抑えることによる落石エネルギーの低減や衝撃力の低減などが挙げられ、比較的 low cost でありながら安全余裕度を効果的に向上させられる可能性がある。そこで本研究では、堆積層の落石エネルギー低減性能に着目し、落石による粒状性の堆積層内の衝撃力伝達挙動について個別要素法 (Discrete Element Method: DEM)¹⁾を用いて調べた。落石による落体の受ける衝撃力 (落石衝撃力) と底面に伝達する衝撃力 (伝達衝撃力) について、解析結果と 1/2 スケールの模型実験結果を比較し、DEM 解析が定量的に衝撃力を表現可能であることを示した上で、粒子硬度、粒径、粒子形状といった粒子特性、堆積密度や層厚といった堆積層特性がピーク衝撃力に及ぼす影響について調べた。さらに、層厚や密度が異なる堆積層に伝達する衝撃力の時刻歴と堆積層内の応力・ひずみ分布やエネルギー消散との関係について調べた。落体特性については、鉛直落下の場合のみに報告する。

2. 衝撃力に関する模型実験と DEM 解析結果の比較

2.1 模型実験および DEM 解析の概要

図-1 に示すように、実験はクレーンで持ち上げた錘を 1/2 スケールのロックシェッド上面に設置された堆積層に鉛直自由落下させるものである。実験では錘に設置された加速度計の値と錘質量の積で求められる「落石衝撃力」と底面全体に伝達した力の合計である「伝達衝撃力」が得られる。ここでは、鉛直方向の力についてのみ検討する。伝達衝撃力は、緩衝材底面の剛基礎に複数埋め込まれた荷重計 (ロードセル) の値とドーナツ状の底面分割線内の面積の積により求められている。また事前に堆積層で実施された地盤調査結果を表に示す。錘重さや落下高さ等の実験条件はここでは表-1 の 3 ケースの結果のみを参照した。

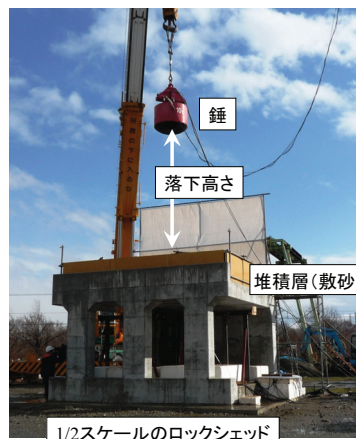


図-1 衝撃模型実験の様子

2.2 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²⁾⁸⁾を考慮して決定できるようにマニュアル化し⁹⁾、表-1 に示す地盤調査結果などを基に決定した。基本的な解析モデルとパラメータを図-2(a)に示す。底面と側面の境界の粒子位置は固定とした。ここで、接触面垂直方向と接線方向のそれぞれのばね定数 k_n と k_s の比は $k_n/k_s=4$ とし、減衰定数は臨界減衰 $h=1.0$ た。また、本論文では、円形粒子のみの結果を示す。

表-1 模型実験に関する地盤調査結果と実験条件

地盤調査結果		実験条件		
N 値	-	1.0	錘条件	
一般	土粒子の密度 g/cm^3	2.68	落下高さ	
	自然含水比 %	13.2	CASE01	m 10.0
	均等係数	2.1	CASE02	m 20.0
分類	地盤材料の分類	分級された砂	CASE03	m 30.0
	分類記号	(SP)	形状	- 球形
締めめ	最大乾燥密度 g/cm^3	1.48	錘重量	t 2.0
	最適含水比 %	19.9	直径	m 1.0
最小密度・最大密度	最大間隙比	1.14	堆積層条件	
	最小間隙比	0.70	幅×長さ	m 4.0×4.0
砂置換法による密度試験	含水比 %	12.4	層厚	m 0.9
	湿潤密度 g/cm^3	1.53		
	乾燥密度 g/cm^3	1.36		

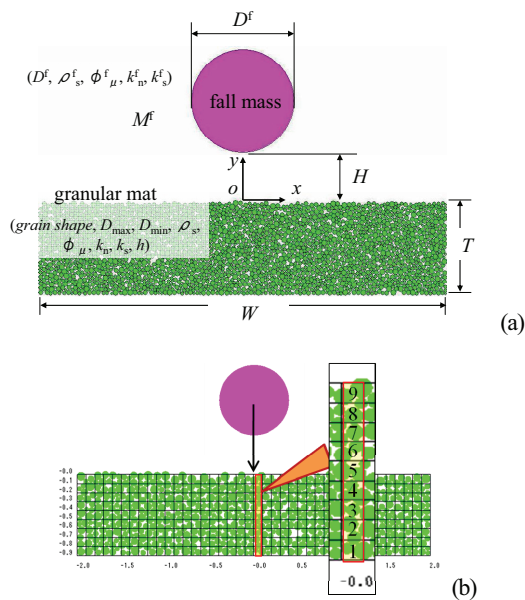


図-2 DEM 解析モデル：(a)解析パラメータ；(b)メッシュを用いた応力・ひずみ増分・間隙比の算定

さらに、地盤を適当な領域(メッシュ領域;)で分割し、粒子に作用する接点力をメッシュ内の粒子が占める面積で平均化することで応力を算出した(図-2(b))。本論文では、 $0.1m \times 0.1m$ のメッシュとした。伝達衝撃力は、

上記メッシュ応力の算出後、底面における伝達鉛直応力成分の和と考えることができる。2次元 DEM で得られる底面の伝達鉛直応力は、奥行き方向に半無限の堆積層に落石荷重が線荷重で加えられた際の鉛直応力と考えることができる。そのため、実験(3次元)で行われた伝達衝撃力と定量的な比較ができない。そこで、まず、ブシネスク解の点荷重と線荷重時の底面の位置で得られる鉛直応力解を比較し、DEM 解析で得られた底面の伝達鉛直応力を点荷重作用時に得られるであろう応力に修正する。次に、伝達鉛直応力は鉛直軸 y 軸中心に同心円状に様に分布するとみなし、 y 軸中心に回転させたメッシュに対応する底面面積に作用させたときの伝達力の和を求め、これを補正した伝達衝撃力とした。本章では、実験結果との比較のために補正した伝達衝撃力を用いる。次章以降は、計算の簡略化のため、底面粒子が底面境界に伝達する力の和を伝達衝撃力(2次元計算のままの値)としている。

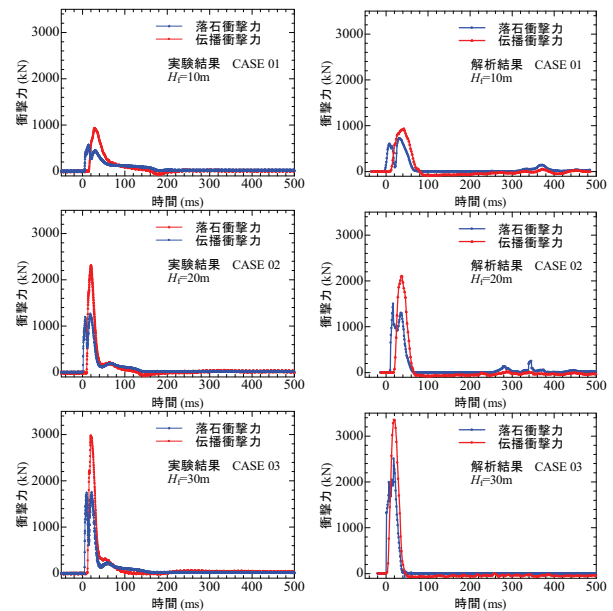


図-3 衝撃力に関する実験結果と解析結果の比較

2.2 実験結果と解析結果の比較

図-3(左)はCASE01からCASE03の実験により得られた衝撃波形であり、図-3(右)は2次元 DEM 解析結果の落石衝撃力と補正した伝達衝撃力である。堆積層の解析パラメータは、最大粒径 $D_{max}=0.0250m$ 、最小粒径 $D_{min}=0.0125m$ 、土粒子の密度 $\rho_s=2.68$ 、 $k_n=2 \times 10^7$ (N/m) $=4k_s$ 、粒子間摩擦係数 $\tan \phi_\mu=0.466$ である。衝撃力波形の形状、ピーク値、衝撃力継続時間を比較するとおおそ定量的な一致が見られ、DEM 解析によって得られた衝撃力がある程度妥当なものであるといえる。

いずれの CASE においても、落石衝撃力よりも堆積層底面まで伝達した伝達衝撃力の方が大きくなっているとともに(実験 1.6~1.8 倍、解析 1.4~1.7 倍)、落石衝撃

力では2回ピーク値が生じている。また、落下高さが高くなりエネルギーが多くなると衝撃力は大きくなり衝撃力の継続時間は短くなっていることが分かる。次章では、衝撃力特性に及ぼす粒子特性、堆積特性の影響について検討する。

3. 衝撃力に及ぼす粒子特性や堆積特性の影響

3.1 ばね係数の影響

本章では特に断りがない場合には、堆積層は $W=4.0\text{m}$, $T=0.9\text{m}$ で緩詰め ($e=0.245$), 落体特性 $D^f=1.0\text{m}$, 落下条件として $H=10\text{m}$ としている。

粒子間の衝撃力を調節するばね係数は、衝撃の伝達においてきわめて重要な役割を担っていると考え、ばね係数 k_n を $2.0 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^{10}$ (N/m) の広範囲の6ケース用意した。また、堆積層を特性は構成する粒子のサイズにも依存するので、最大粒径 $D_{\max}=0.0250\text{m}$, 最小粒径 $D_{\min}=0.0125\text{m}$ と $D_{\max}=0.0500\text{m}$, $D_{\min}=0.0250\text{m}$ の2ケースを設定した。粒子はそれぞれ、最大粒径と最小粒径の間で一様な発生確率で発生させた。

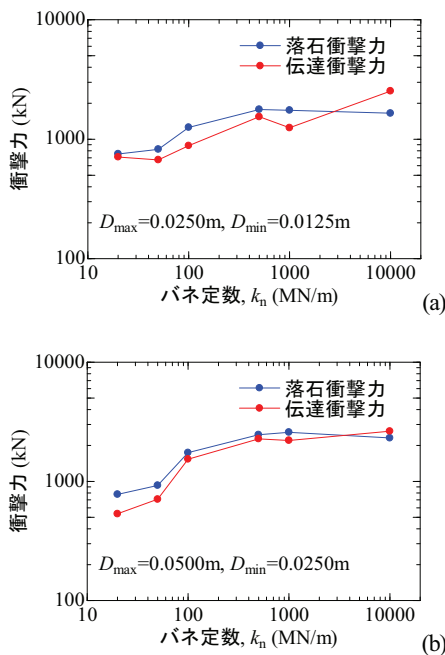


図-4 最大衝撃力に及ぼすばね係数の影響

図-4 は最大衝撃力に及ぼすばね係数の影響を示している。ばね定数が高く堆積層の剛性が高いほど落石・伝達衝撃力ともに大きくなる事が分かる。粒子サイズに関わらず同様の傾向を示しているが、粒径が大きい方が衝撃力は大きい。また、2次元解析では、伝達衝撃力と落石衝撃力はほぼ同等であり、高いばね定数では若干大きい、さらに、ばね係数 k_n が 5×10^8 (N/m) 程度よりも大きくなると、衝撃力の値がほぼ収束していることが分かる。衝撃力に影響を与えると考えられる堆積層の変形・破壊特性は、粒子の弾性と粒子の相対運動およびそ

の抵抗によって決定される。上記の結果は、ある程度の粒子の硬さがあれば粒子の相対運動特性やその抵抗の影響が主体となることを意味している。言い換えると、パラメータ算定時にばね定数 k_n が 5×10^8 (N/m) 以上の値となった場合でも、最大衝撃力に着目するのであれば、 k_n を 5×10^8 (N/m) 程度として、計算負荷をさけることも可能といえる。衝撃時間については別途検討を要する。

3.2 粒子サイズの影響

図-5 は、落体の直径 D^f の堆積層の平均径 D_{50} に対する比を相対落石径 D^f/D_{50} とし、衝撃力に及ぼす影響について示している。また、ばね係数 k_n を変えて傾向の違いについても調べている。それぞれのばね係数において、落石・伝達衝撃力は堆積層の粒子サイズが小さくなる(相対落石径 D^f/D_{50} が大きくなる)に従って低下していることが分かる。さらに粒子をある程度小さくすると、一定値に近づくことが分かる。これは、粒子サイズを低下させると同一体積中の粒子数が増加し、堆積層全体としての剛性が低下するため衝撃力は低下するためと考えられる。また、堆積層の粒子サイズが大きい場合には、落体により堆積層内の局所的な変形・破壊モードが拘束され、十分な緩衝効果が期待されず衝撃力が高くなると考えられる。

図より衝撃力一定値に収束し始める粒子サイズが、ばね係数が低い場合では $D^f/D_{50}=10$, 高い場合で $D^f/D_{50}=20$ 程度ある。粒径は衝撃力にも影響を与えるが、一定以下のサイズの粒子を用いればその影響は少ない。堆積層の粒径は落体径の $1/10$ よりも小さい値が望ましいと言える。できるだけ小さい粒径で解析をすることが望ましいのだが、粒子数が増加し、解析効率が著しく下がってしまうので、粒径と粒径以外のパラメータとの相互関係を把握し、調節する必要がある。

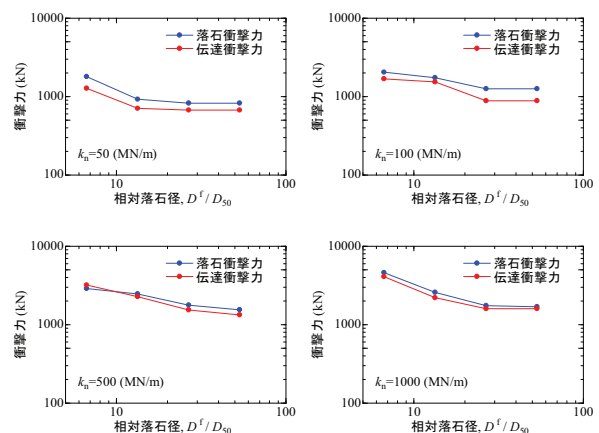


図-5 最大衝撃力に及ぼす相対落石径の影響

3.3 堆積層の層厚、層幅の影響

堆積層の層さは、ロックシェッドなど下部構造物において設計上重要な検討項目である。落石対策便覧では、

層厚 T に対する落体径 D^f の比 (T/D^f) が小さい程、衝撃力が上昇する程度を割増し係数で考慮している。ただし、これは落石衝撃力に対するもので伝達衝撃力に関しては明記されていない。

これらを鑑み、 $T/D^f = 0.25 \sim 2.0$, $W/D = 2.0 \sim 12$ の堆積層の幾何特性が、最大衝撃力について整理した結果を図-6に示す。図から、 W/D による差は $T/D > 0.5$ ではほとんどないが、 $T/D < 0.5$ ではばらついているようである。一方、落石衝撃力は T/D が小さい程、衝撃力は大きくなることが確認された。一方、伝達衝撃力は $T/D > 0.5$ では伝達衝撃力はほとんど変化していないが、 $T/D < 0.5$ よりも薄くなると急激な上昇がみられる。この傾向はばね係数が変わっても変わらないが、ばね係数が大きく、堆積層の力学挙動が粒子配列およびその変化に起因する割合が高くなるほど、離散体としての特徴が支配的になると言える。そこで、堆積層内の力の分散特性に着目し、伝達衝撃力最大時の底面における伝達応力分布状況を調べた (図-7)。その結果、分布形状は $T/D^f = 0.5$ では載荷直下を中心に極めて局所化する傾向が明らかとなった (分散幅 1.5m とすると分散幅分散角度は 27 度程度である)。深くなると分散幅は落体径 (1m) の 4 倍にも達している (分散角度は 45 度)。また $T/D^f > 1$ では分布形はあまり大きく変化しない。

以上より、伝達衝撃力のピーク値は層厚によりほとんど変化しないが、 $T/D^f < 1$ では応力分布形が中心に局所化し始める。よって、 $T/D^f < 1$ では現行の便覧が示す土圧分布幅よりも狭い分布になること並びに局所化し大きな応力となることの両者に配慮が必要になることが明らかになった。

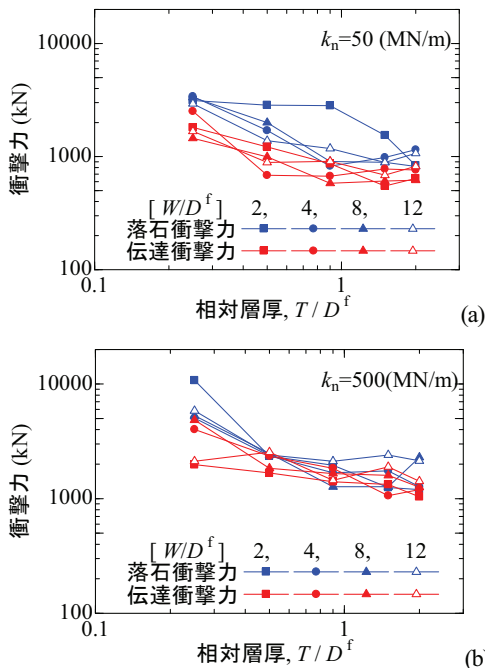


図-6 最大衝撃力に及ぼす層厚比と層幅比の影響

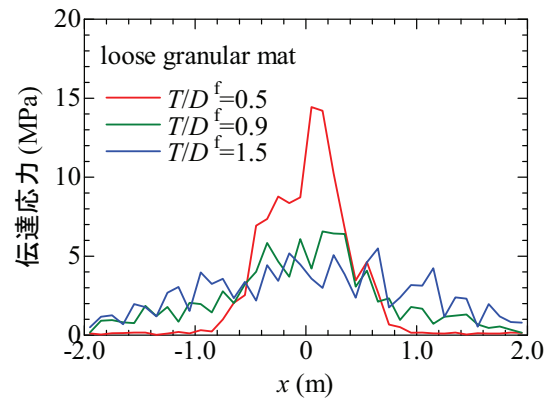


図-7 底面伝達応力分布に及ぼす堆積層の層厚の影響

3.4 減衰係数の影響

図-8に示す通り、減衰係数の増加によって衝撃力の若干の低下傾向がみられるが影響はほとんどないことがわかる。ダッシュポッドは粒子単体同士が衝突する場合には跳ね返り係数には直接的に影響するが、堆積層については粒子集合体である離散体としての特徴が重要と考えられる。したがって、 $h=1.0$ とし計算上の安定を優先することが可能である。

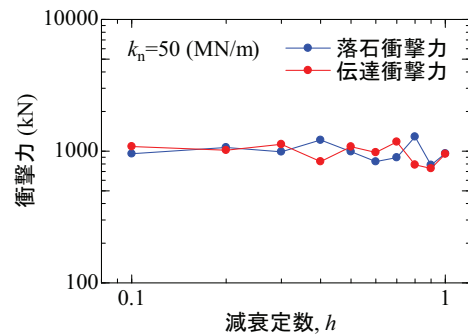


図-8 最大衝撃力に及ぼす減衰係数の影響

3.5 粒子摩擦角の影響

図-9は粒子摩擦角 ϕ_μ を変化させた場合の結果の一例である。粒子間摩擦角が大きくなると若干、衝撃力が大きくなっているようであるが他のパラメータの影響から比べるとかなり小さい。次のような理由が考えられる。粒子間摩擦角の増加に伴い粒子集合体の剛性や強度は大きくなるものの、円形粒子の場合には、 $\phi_\mu > 30^\circ$ ではほぼ一定値に収束してしまう⁴⁾。したがって、堆積層自体の力学特性も粒子間摩擦係数の影響は小さいため、特に ϕ_μ の大きな範囲では粒子間摩擦の影響は小さくなると考えられる。また、落体の貫入によって堆積層は支持力の局所破壊や全般破壊的な様子^{10), 11)}を見せるものの、着目した衝撃力の最大値が発揮される時点では落体直下の衝撃伝播挙動が主体であり、層としての破壊にまで至っておらず粒子間摩擦係数の影響は小さいと考えられる。

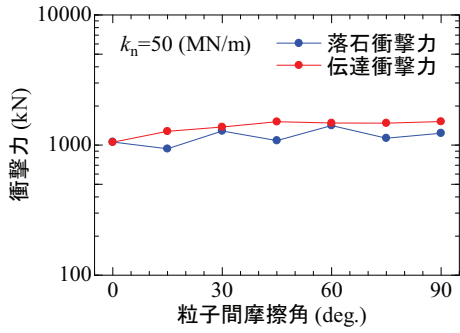


図-9 最大衝撃力に及ぼす粒子摩擦角の影響

3.6 堆積層の密度の影響

図-10 は衝撃力波形に及ぼす堆積層の密度の影響を示している。密詰め（間隙比 $e=0.214$ ）と緩詰め（間隙比 $e=0.245$ ）の結果を比較すると、緩詰めの方が衝撃力の継続時間も長く、最大衝撃力の値は小さくなり、伝達衝撃力の方が低下の程度は顕著である。通常の緩衝材と同様に剛性が低い緩い堆積層の方が、緩衝効果が高いと理解できる。また、図には落体が持つ総エネルギー（位置エネルギーと並進運動エネルギーの和）を初期総エネルギーで正規化したエネルギー比の時刻歴も示している。密詰めの場合、最大落体衝撃力時にはエネルギーは初期の70%、最大伝達衝撃力時のエネルギーは初期の30%まで低下しているのに対して、緩詰めの場合にはそれぞれ80%と60%程度となっている。最大衝撃力時のエネルギー緩衝度は密詰めの場合の方が高くなっている。

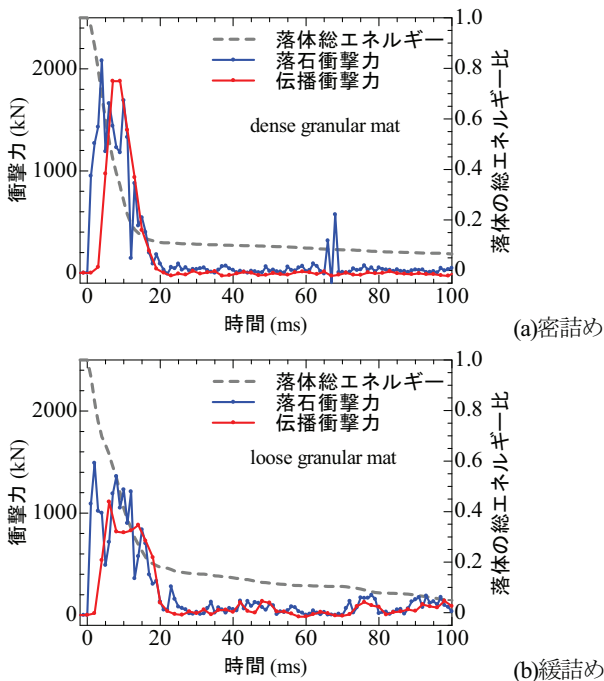


図-10 最大衝撃力に及ぼす堆積層の密度の影響

つぎに、図-2(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-11に示す。図中には、比較しやすいように、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波が伝達している様子がわかる。

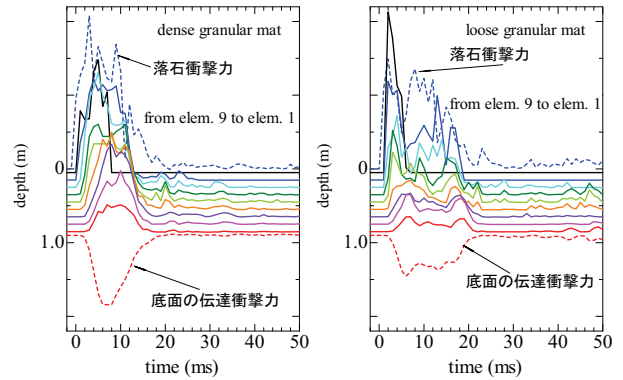


図-11 落体直下の応力波の伝達挙動に及ぼす堆積層の密度の影響

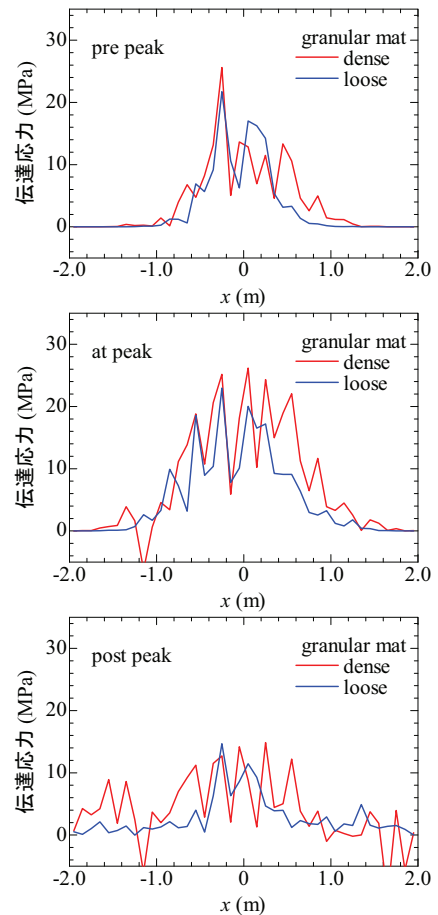


図-12 底面の伝達応力分布に及ぼす堆積層の密度の影響： 伝達衝撃力のピーク前、ピーク時、ピーク後

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、深さ方向にそのピーク値は減少しながら伝達している。密な方が山一つの形状（ただし、ピーク付近

では凹凸が有る) となっており、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ことが分かる。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と考えることができる。二つ目の山は境界からの反射波である可能性もある。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考慮して検討する必要がある。

さらに、底面境界での伝達鉛直応力の水平方向への分布特性に及ぼす堆積層の密度の影響を図-12に示す。図は底面の伝達衝撃力のピーク前、ピーク時、ピーク後の分布である。層厚の影響に比べると程度は小さいが、緩詰めの方が落体直下に応力は集中している様子が分かる。したがって、密度の違いによる堆積層内の局所的な変形・破壊を詳細に観察する必要がある。

4. まとめ

本研究では、落石による粒状性の堆積層内の衝撃力伝達挙動について、2次元個別要素法 (DEM) を用いて調べた。落石衝撃力と伝達衝撃力について、補正した解析結果と 1/2 スケール模型実験結果を比較し、DEM 解析が定性的・定量的に衝撃力特性を概ね表現可能であることを示した。より詳細な検討のために、今後3次元解析も行うこととする。

また、粒子硬度、粒径、粒子形状などの粒子特性、堆積密度や層厚などの堆積特性がピーク衝撃力に及ぼす影響について調べた。その結果、以下のことが分かった。

- 1) ばね定数の増加に伴いピーク衝撃力は増加するが、堆積層の離散性の影響が強く 5×10^8 よりも大きくなるあたりから衝撃力の上昇が見られなくなる。堆積層の場合、衝撃力の大きさに関しては、計算を負荷を避けるために 5×10^8 を超えるようなばね係数を用いる必要がないことを意味している。
- 2) 落石・伝達衝撃力は粒子サイズが小さくなるに従って低下する。堆積層の粒径が落体径の 1/10 程度以下であれば、ほぼ一定値に収束することが分かった。
- 3) 衝撃力に層幅の影響はほとんどないことが分かった。層厚に関しては、落石衝撃力は T/D が小さい程より大きな衝撃力となり、伝達衝撃力は T/D が小さくなくても伝達衝撃力のピーク値はほとんど変化しない。伝達衝撃力最大時刻での底面における応力分布状況は、 $T/D < 1$ では現行の便覧が示す土圧分布形状よりも幅が狭く尖った形状となる。落石直下の範囲に局所化し大きな応力が発生する。
- 4) 堆積層自体の力学特性が粒子の幾何学的配置である密度や異方性、粒子回転に主に支配されるため、衝撃特性も、粒子間摩擦係数や減衰定数の影響はない。したがって、今後は、より砂らしい挙動を示す非円形粒子による解析結果の検討を進める。
- 5) 堆積層が緩い程、落石・伝達衝撃力は低下し、伝達

衝撃力の方が低下割合は高い。底面応力分布も緩い場合の方が落下直下に集中しており、密な方が広範に分布している。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る。密な方が、山一つの形状 (ただし、ピーク付近では大きな凹凸)、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。

謝辞

この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)21360222 によるものであり、深謝の意を表します。

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) 三笠 正人: 土の強度と安定計算法, 基礎のための土質工学, 37 年度講習会テキスト, 1963
- 3) 伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 2004
- 4) Maeda, K. and Hirabayashi, H. : Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, Journal of Applied Mechanics, JSCE, pp.623-630, 2006.
- 5) Maeda, K. et al.: Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, Granular Matter, Vol. 12, pp.499-505, 2010.
- 6) Maeda, K. and Yuasa, T. : Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009.
- 7) Yuasa, T., Maeda, K. and Waku, A. : A risk evaluation method of countermeasure for slope failure and rockfall with account of initial investment, Geotechnical risk and safety, IS-GIFU, pp.221-228, 2009.
- 8) 前田 健一ら: 講座「粒子特性の評価と工学的意義 7. 粒子集合体としての評価と力学挙動」, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.55, No.9, pp.31-39, 2007.
- 9) 湯浅 知英: 名古屋工業大学大学院, 修士論文, 2010
- 10) 刈田圭一他: DEM による堆積層の落石による衝撃力解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, III -397, pp.793-794, 2010.
- 11) 刈田圭一他: 落石の斜め入射より受ける衝撃力の DEM 解析, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, III-398, pp.795-796, 2010.