

応力波を考慮した落石による緩衝砂の衝撃伝達特性のDEM解析

DEM analysis of impact transmission characteristic from rockfall of granular mat with stress wave

羽柴寛文¹, 前田健一², 刈田圭一³, 牛渡裕二³, 川瀬良司³

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・22418559@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学・都市社会工学科

3 構研エンジニアリング 防災施設部

概要

我が国において毎年多くの落石事故が発生しており、地震の多発も起因して落石発生件数は増加傾向にある。最近ではその対応として、落石エネルギーを分散・低減させる緩衝砂に注目が集まっている。そこで本研究では、緩衝砂のような粒状性の堆積層の落石エネルギー低減性能に着目し、堆積層の粒子特性、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。落石による落体の受ける衝撃力と底面に伝播する衝撃力について、解析結果と模型実験結果を比較しDEM解析が定量的に衝撃力特性を表現可能であることを示した上で、落体が衝突したときの堆積層内の応力・ひずみ分布やエネルギー消散との関係について調べた。また、堆積層内を衝撃力が伝播するメカニズムを考察するにあたり、衝撃の伝達速度が深く関与していると考え、伝達速度が堆積層の密度や層厚に左右されることを確認した。

キーワード：緩衝砂，個別要素法（DEM），落石，緩衝効果，応力波

1. はじめに

我が国において、気象変動による降雨条件の変化や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。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敷砂堆積層に注目が集まっている。

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, 以下DEMと略す）^{1)~3)}を用いて調べた。著者らは、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、DEMの有用性を確認した^{4),5)}。

以上を踏まえ、本論文では最大衝撃力に及ぼす影響についてDEM解析による数値実験を行い検討することとした。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。落石は本来、堆積層に回転を伴う斜めに入射することが一般的であると考えられるが、本論文では大きな衝撃力を伝達すると考えられる鉛直落下の結果のみを記述する。

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^{6)~9)}を考慮して決定することとした。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、粒子はそれぞれ、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。

表-1 DEM解析に用いた基本的な接触モデルパラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	D (m)	0.050
	最大粒径 D_{max}	0.025
	最大粒径 D_{min}	0.0375
	平均粒径 D_{50}	
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2700
接触面法線方向バネ定数	k_n (N/m)	5.0×10^7
接触面接線方向バネ定数	k_s (N/m)	1.25×10^7
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

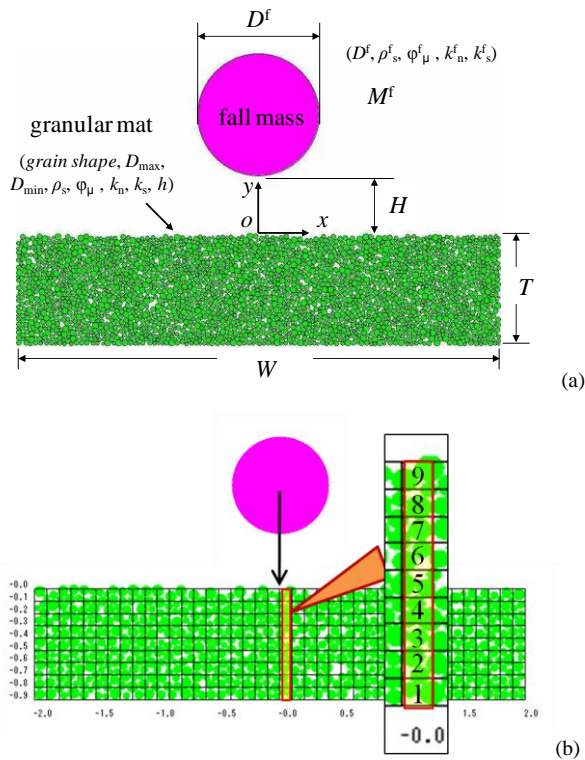


図-1 DEM 解析モデル: (a)解析パラメータ; (b)メッシュを用いた応力・ひずみ増分・間隙比の算定

図-1に、解析領域の概要を示す (x 軸, y 軸は図中に示す)。本論文では、底面と側面の境界の粒子位置は固定とした。落体形状も円形とした。落体に作用する衝撃力を落石衝撃力、底面粒子が底面境界に伝達する力の和を伝達衝撃力と呼ぶことにする。また、落体の直径 $D^f=1.0\text{m}$ 、質量 $M^f=2000\text{kg}$ としている。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 1960kJ となる。

図-2には、落下に伴う、落石衝撃力と堆積層の底面での伝達衝撃力の時刻歴の例を示している。図の場合には伝達衝撃力のピーク値は落石衝撃力のピーク値の 8 割程度にも達しているが、落下模型実験など三次元条件下では、実験条件によっては伝達衝撃力のピーク値は落石衝撃力の 2 倍程度に達することも報告されている^{4), 5), 10)}。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場合、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^{4), 5)}。また、堆積層厚が薄い場合 ($T=0.25\text{m}$ 、図-2(a))には、落石衝撃力は大きな山形の波形が一波で、伝達衝撃力のピーク発現と落石衝撃力のピーク発現とほとんど時間差は 10ms 以下である。一方、堆積層厚が十分厚い場合 ($T=2.00\text{m}$ 、図-2(b))には、落石衝撃力の波形は二つの山を示し、二つ目の山は伝達衝撃力のピーク発現後に現れている。これらの傾向は実験によっても観察されている¹⁰⁾。以上のことから、堆積層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。

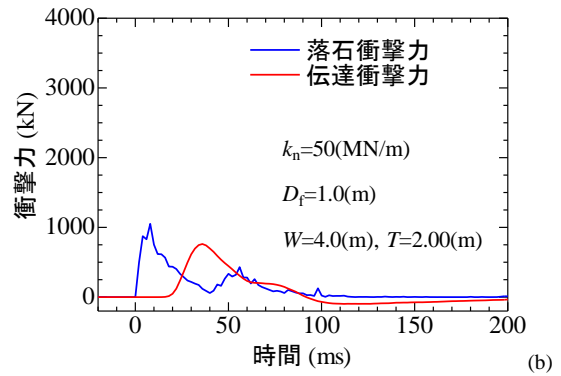
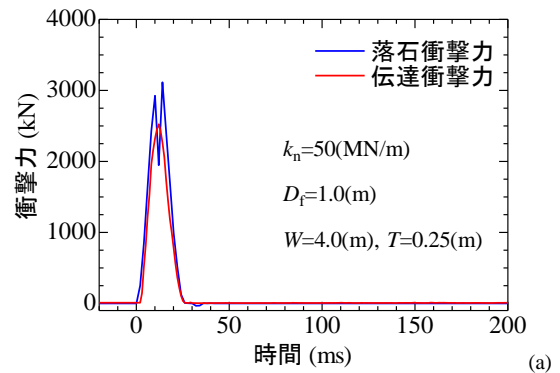


図-2 DEM 解析モデルから得られた典型的な衝撃力の波形: (a) 堆積層が薄い場合 ($T=0.25\text{m}$); (b)堆積層が厚い場合 ($T=2\text{m}$)

2.2 メッシュ分割による応力の算定

DEM によって粒子間の接点力が得られるが、応力で観察の方が議論しやすい。そこで、図-1(b)のように、堆積層を適当なメッシュ領域 ($0.1\text{m}\times 0.1\text{m}$) で分割し、粒子単位で求められた応力を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¹¹⁾⁻¹²⁾。

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。図から分かるように、落体が十分に貫入した際には落体直下の堆積層だけでなく、側方や上方に粒子が押しされ、支持力問題の全般破壊的な挙動を示している。

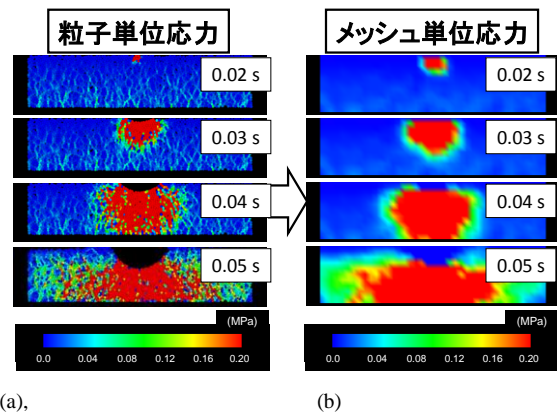


図-3 粒子単位で平均化された応力とメッシュ単位で平均化された応力の算定例; (a)粒子単位, (b)メッシュ単位

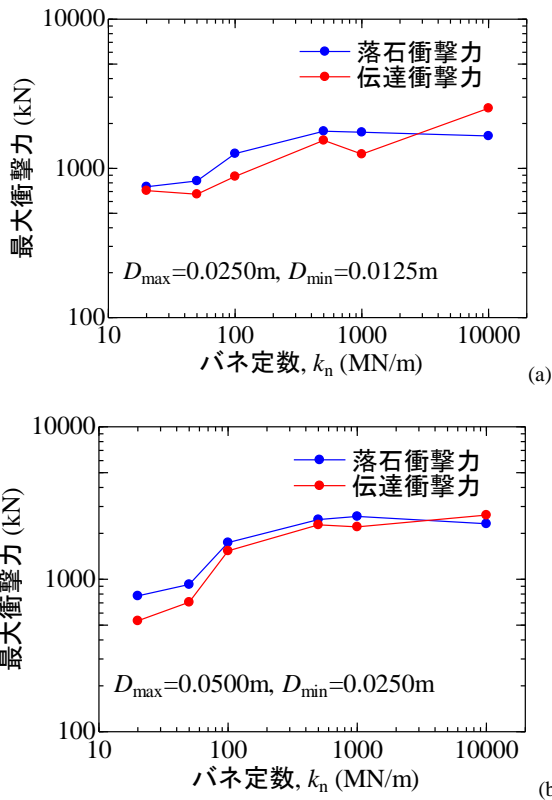


図-4 最大衝撃力に及ぼすばね係数の影響

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

本論文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。また、落石衝撃力の第1波目のピーク値と伝達衝撃力のピーク値について着目する。

粒子間の衝撃力を調節するバネ係数は、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、バネ係数 k_n を $2.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^4$ (MN/m) の広範な値の6ケース用意した。また、堆積層の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。

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。バネ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のが分かる。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が、バネ定数が大きい場合には、伝達衝撃力の方が落石衝撃力よりも若干大きい場合が見受けられる。さらに、バネ係数 k_n が 5×10^8 (N/m) 程度より大きくなると、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。上記の結果から、パラメータ算定時にバネ定数 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。衝撃継続時間については別途検討を要する。

3.2 堆積層の層厚、層幅の影響

堆積層厚は、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が、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、 $T/D^f=0.25 \sim 2.0$, $W/D^f=2.0 \sim 12$ (W は堆積層の幅) といった堆積層の幾何特性が、最大衝撃力に及ぼす影響を図-5に示す。図から、 W/D^f による差は、図-5(a)の $W/D^f=2$ のケースを除き、衝撃力は T/D^f が小さい程、衝撃力が大きくなることが確認された。特に $T/D^f > 0.5$ の領域では、層厚が厚くなることによる衝撃力の低下が明瞭である。また、バネ定数の大きな図-6(b)の方が、 W/D による衝撃力の大きさの違いは少ない。バネ定数が大きく、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。

つぎに、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(鉛直垂直成分)分布状況を調べた(図-6)。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、落体の横端を通る鉛直線と落体の横端から応力分布の端を結ぶ直線とがなす角である分散角度は 27 度程度である。また $T/D^f=0.9$ と 1.5 では分布形はあまり変わらない。よって、 $T/D^f < 0.9$ では、大応力値がより大きくなる可能性があると言える。

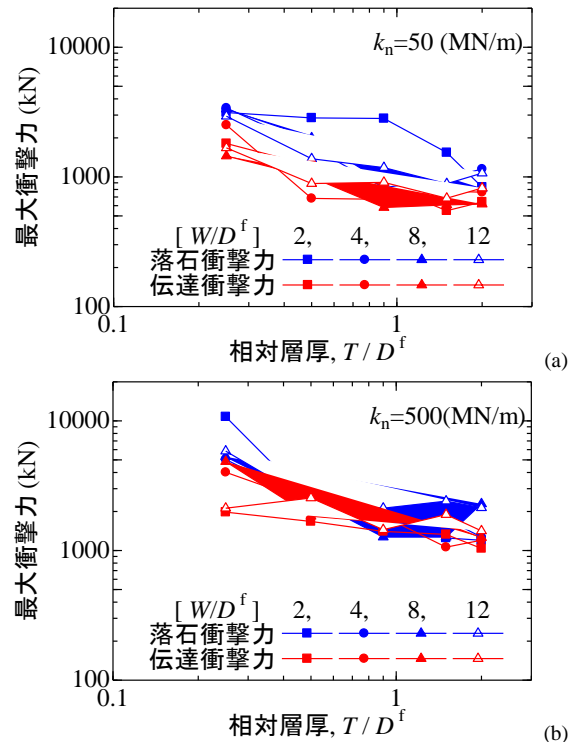


図-5 最大衝撃力に及ぼす層厚比 T/D^f と層幅比の影響 ; (a) $k_n=50\text{MN/m}$, (b) $k_n=500\text{MN/m}$

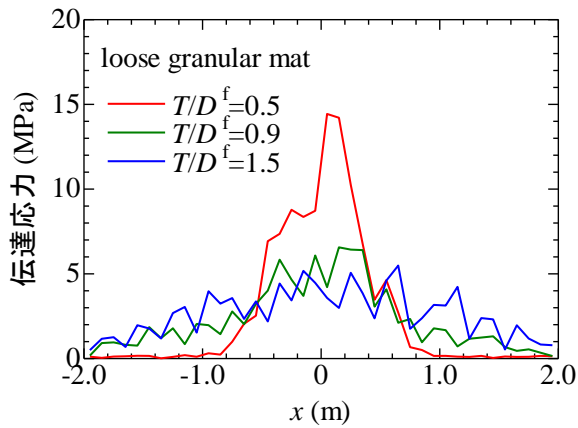
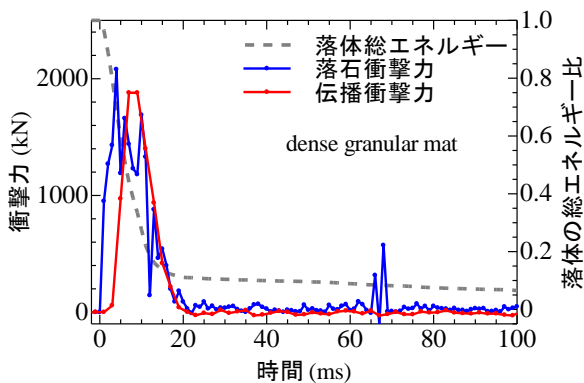


図-6 底面伝達応力分布（鉛直垂直成分）に及ぼす堆積層の層厚の影響： $k_n=50\text{MN/m}$ ， $W/D^f=4$

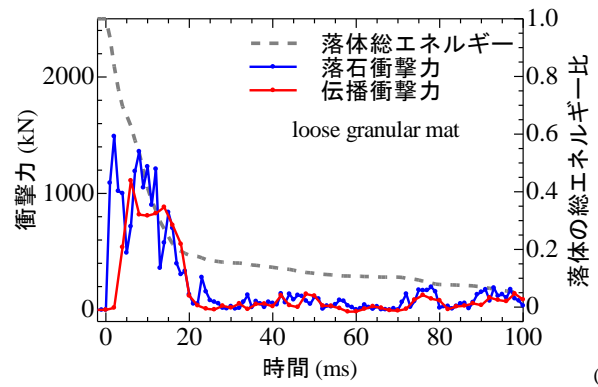
3.3 堆積層の密度の影響

図-7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、最大落体衝撃力が示される時にはエネルギーは初期の70%、最大伝達衝撃力の時にはエネルギーは初期の30%まで低下している。一方、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。

さらに、底面境界での伝達鉛直応力（鉛直垂直成分）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-8に示す。図は密詰めと緩詰めのそれぞれの場合について、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（図-6）に比べると程度は小さいが、緩詰めの方が落体直下に集中している様子が分かる。基礎の静的な载荷においても、緩い地盤の方が基礎直下に局所的な変形・破壊が生じることと対応しているのではないかと推察される。

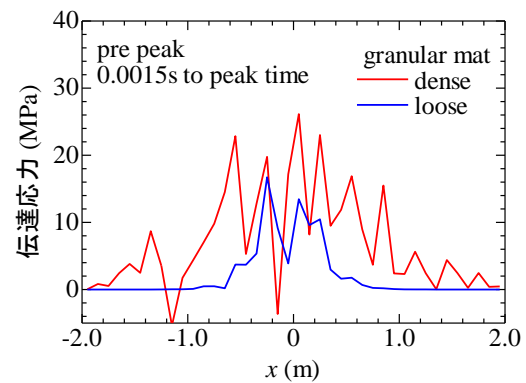


(a)

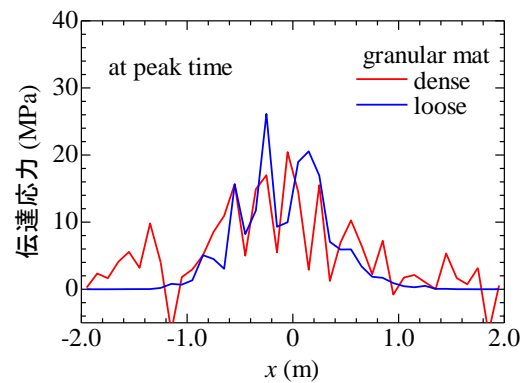


(b)

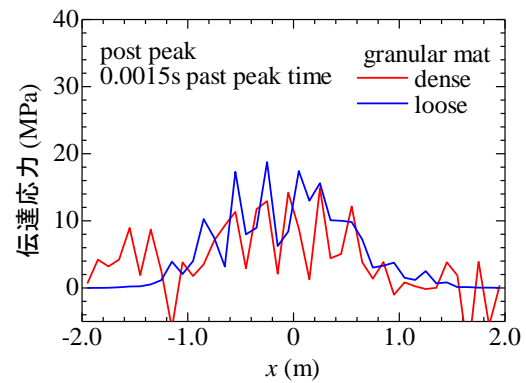
図-7 最大衝撃力に及ぼす堆積層の密度の影響；(a)密詰め，(b)緩詰め



(a)



(b)



(c)

図-8 底面の伝達応力分布（鉛直垂直成分）に及ぼす堆積層の密度の影響：(a) 伝達衝撃力のピーク前，(b) ピーク時，(c) ピーク後

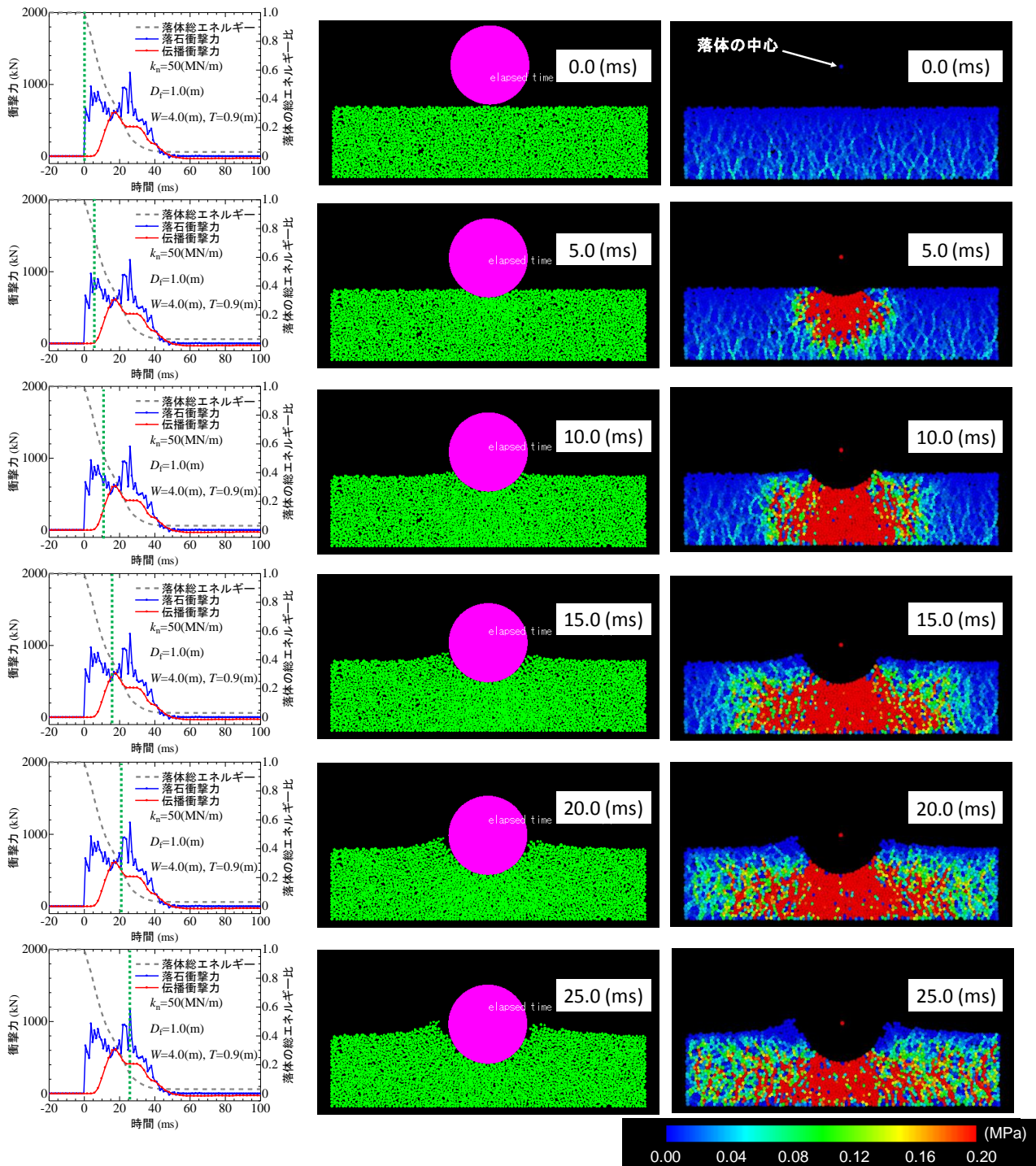


図-9 衝撃力、落体のエネルギー消散と堆積層の変状および応力伝達の経時変化

4. 衝撃力伝播挙動に及ぼす粒子特性や堆積特性の影響

4.1 衝撃力の発生と堆積層の変状

衝撃力の発現と堆積層内の変形の様子を比較した例を図-9に示す(図-7(b)の緩詰めケース)。図は上から順に落体が時間ごとに貫入していく様子を表し、左の列のグラフは落石衝撃力、伝達衝撃力、落体の総エネルギー比の推移をそれぞれ描いたものである。経過時間の部分を緑色の点線で示している。中央列の図は、落体と堆積層の様子を

粒子レベルで示し、右列の図は粒子単位の応力(赤色ほど平均主応力が高い粒子)を表し、応力鎖を見ることができる。

落体が堆積層に衝突してから、落石衝撃力がピークに達するまでの時間は短く(左列の図)、落体径の数パーセントが貫入する間である(中央の列の図)。この時点で、落体の総エネルギー比は80%で、落体のエネルギー消散は20%程度である。応力の高い粒子の繋がりがである応力鎖は落体底面の堆積層の表面から底面に向かって伸びていくことが分かる(一番右列の図)。最も高い応力を持つ応力

鎖(図中の赤色の応力鎖)が堆積層底面に完全に到達する前に落石衝撃力のピークが発生していることが確認される。中央の列の図から、落体の下に位置する堆積層の部分では、間隙が小さくなり堆積層の密度が高くなっていることも分かる。

その後、応力鎖が斜め下方に拡がり始め、落石衝撃力の第二回目のピーク、伝達衝撃力のピークが発現している。貫入量は落体径の約1/4程度である。落体の総エネルギー比は約20%程度なり、エネルギー消散は約80%に達する。

さらに、貫入量が落体径の1/2程度になり、堆積層の粒子も側方に移動、落体周りでは堆積層表面の盛り上がりもみられる。高い応力を受け持つ応力鎖は広範囲に拡がっている。堆積層内に伝達した衝撃力はほとんど拡散し、落体のエネルギーも消散している。

一方、堆積層内の粒子の動きは、地盤の支持力破壊¹⁴⁾の様子と類似している。落石と堆積層との間のエネルギー消散特性が、地盤の支持力問題における全般せん断破壊や局所破壊の破壊モードにおけるエネルギー消散と関連するのではないかと、ということが伺える。3.1小節、3.2小節で議論したような、落体径と堆積層との幾何学条件(粒子径、幅、層厚)が衝撃力特性に及ぼす影響についても、上記のような破壊モードや破壊領域の大きさなどを基に議論可能であると言える。全般破壊では、破壊領域の深さは基礎幅と同等、側方への影響範囲は基礎幅の4-5倍程度とされている(落石の場合、直径 D^f が基礎幅に相当すると考えられる)。しかし、落石衝撃力の二つのピーク値の発生、伝達衝撃力が落石衝撃力に比べて比較的大きいこと、などを理解するには、単なる静的な支持力問題との類似(せん断破壊現象)からだけでは解決しないと考えられる。

上記までの考察から、堆積層の衝撃力伝達やエネルギー吸収のメカニズム解明には、落体下の堆積層内の塑性変形、せん断破壊、応力波の伝播からの視点が必要と考えられる。

4.2 衝撃力の発生と応力の伝播速度

図-1(b)のように落体の鉛直下に位置するメッシュ内(メッシュ番号が地表面から9から1)の応力波形の深さ方向への伝達の様子を図-10に示す(メッシュの高さは0.1mである)。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0.95m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がわかる。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、深さ方向にそのピーク値は減少しながら伝達している。堆積層が密な方(図-10(a))が山一つの形状(ピーク付近では凹凸がある)となっており、緩くなると(図-10(b))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・伝達衝撃力波形を特徴付け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考慮して検討する必要がある。

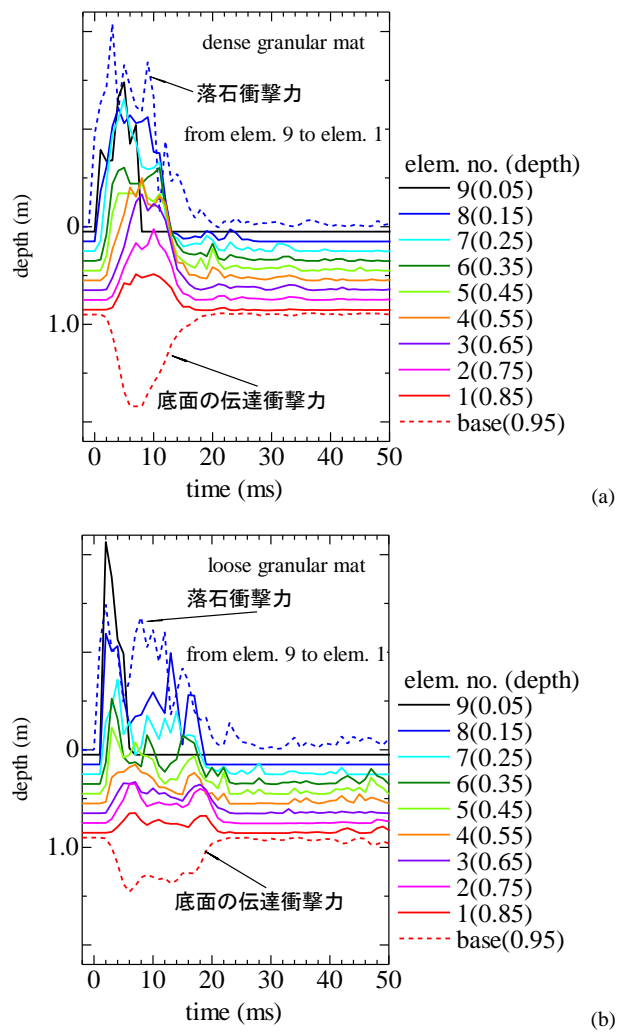


図-10 落体直下の応力波の伝達挙動に及ぼす堆積層の密度の影響:(a)密詰め堆積層;(b)緩詰め堆積層

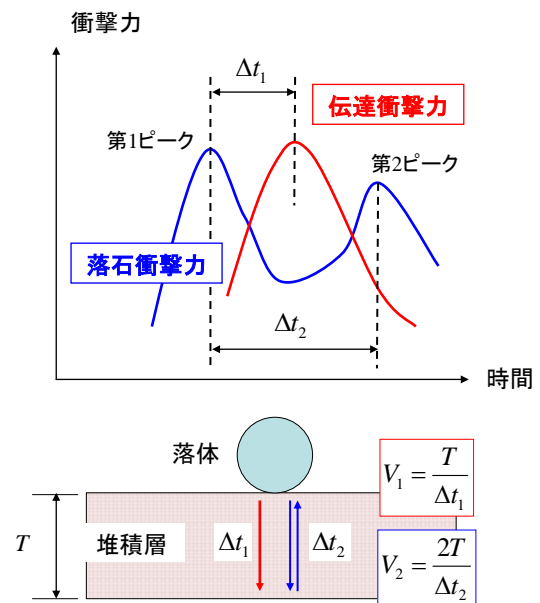


図-11 衝撃力の伝播時間の定義

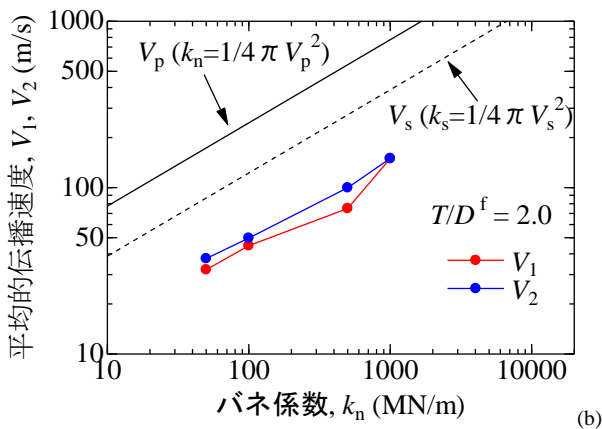
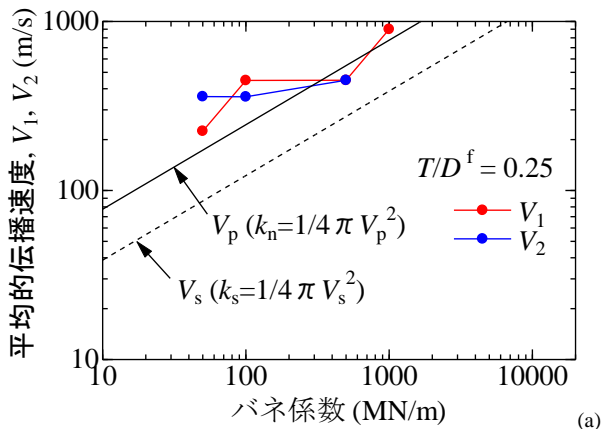


図-12 応力の伝播速度に及ぼすバネ定数の影響: (a)相対層厚が薄い場合 ($T/D^f=0.25$) ;(b)相対層厚が厚い場合 ($T/D^f=2.0$)

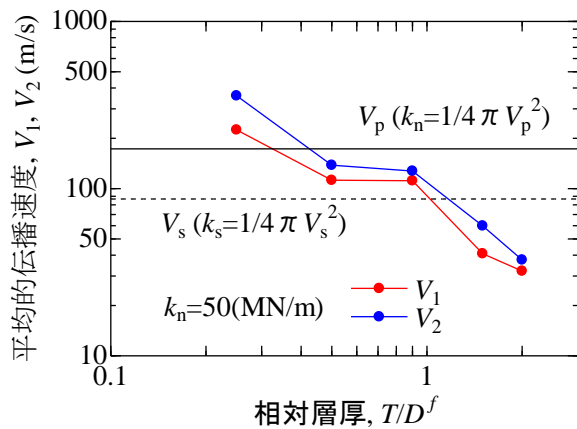


図-13 応力の伝播速度に及ぼす層厚の影響 ($k_n=5 \times 10^8$ N/m)

4.3 応力の伝播速度と弾塑性波

衝撃力の伝播の速さについて調べるために図-11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が現れる時間差 Δt_1 と落石衝撃力の第1ピーク値と第2ピーク値が現れる時間差 Δt_2 とに着目した。これらの時間差は力積の作用時間でもあることから、初期に有する位置エネルギーが等しいので、時間差が大きくなることは衝撃力の最大値が小さくなることを意味する。さらに、前者については応力の波が伝達する距離を堆積層厚の T 、後者については層厚の2倍の $2T$ と考えると、

それぞれの平均的な伝播速度は、 $V_1=T/\Delta t_1$ と $V_2=2T/\Delta t_2$ となる。ただし、図-2(a)のように落体衝撃力の第2ピーク値が明確でないときには $V_2=2T/\Delta t_2$ は考えないものとした。

図-12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。これらの伝播速度は前節までの考察から塑性を含む弾塑性波によるものと考えられる。図中には、あくまでも参考のために、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堆積層の弾性の縦波速度 V_p とせん断波速度 V_s をそれぞれ黒の実線と破線で示している。両速度の値には大きい相違はないが、 V_2 の方が若干大きい。また、バネ定数が大きい場合ほど伝播速度が大きくなる。ただし、 T/D^f が0.25と2.0では、層厚が薄い方の速度が厚い方の速度より4倍ほど大きい。層厚の薄い場合($T/D^f=0.25$)では弾性波と同等もしくはそれより大きな伝播速度を示し、厚い場合($T/D^f=2.05$)にはせん断弾性波速度の1/2程度である。層厚が薄い場合には、堆積層内の局所的な変形が拘束され、落体の下では堆積層が圧縮し密になることで局所的な塑性変形やせん断破壊が起きにくくなると考えられる。その結果、層厚が薄い場合、堆積層内に応力が速く伝播すると考えられる。

さらに、層厚の影響を詳細に調べるために、図-13に平均的な伝播速度と相対層厚 T/D^f との関係を示す。図中には、図-12と同様に、参考のためにバネ定数 $k_n=50$ MN/mに対応する次元弾性波速度を示している。相対層厚が大きくなるほど、伝播速度が低下する。特に、 $T/D^f < 0.5$ と $T/D^f > 0.9$ では顕著である。つまり、平均的な応力の伝播速度が小さくなり衝撃継続時間が長くなることで、最大衝撃力が低下したと捉えることもできる。また、 T/D^f が1.0より大きい場合には20 m/s程度まで低下している。これは、弾性波速度よりもずいぶん小さい。衝撃力の伝播が弾性波でなく、4.1小節で観察したような塑性変形に従い応力が伝播するためと考えられる。伝播速度が低くなるとともに、衝撃力の最大値は小さくなる。現行の設計において堆積層のエネルギー吸収効果が期待できる条件は経験的に $T/D^f > 0.9$ とされている。限られた条件下ではあるが、上記の計算結果は現行の経験を支持するものとなっている。

4.4 落体の落下挙動と载荷速度の影響

この項目では、落体の落下挙動と落下速度が衝撃力の伝達特性に与える影響の検討を行った。図-14に示す図は本研究における基本的なDEMモデルで自由落下させた際の衝撃力と、速度を一定に保って静载荷させた際の衝撃力を比較したものである。図中で凡例があるものが自由落下時の落石および伝達衝撃力であり、それ以外が各速度で载荷した際の落石衝撃力の挙動である。なお、ここで設定した速度は、5.0、13.6、20、50(m/s)である。13.6 m/sというのは、 $H=10$ mで自由落下をさせた時の緩衝砂との衝突時の速度である。

落下速度を一定にするというのは解析上の設定なので、止めない限り際限なく緩衝砂を押し進むことになるが、初

めに降伏点に至って除荷されるまでの挙動は、図-14より自由落下時の落石衝撃力の挙動と13.6m/sに固定して貫入させた際の落石衝撃力の挙動が、どのパターンにおいても一致することから、再現できていると考えられる。

ここで、各速度の領域での依存性について図-14より考察をしてみる。載荷速度0~5.0m/sのようにゆっくり破壊が進む場合は、局所的な破壊が起きにくいこともあり、あまり変化がない。その破壊挙動は塑性的なラインを描くことが確認できる。速度が上がり、13.6m/sとなるころには完全に弾塑性的な破壊挙動となり、速度依存も非常に大きくなることが確認できた。落石の衝撃力の問題は、4.3小節にもある通り、ちょうど緩衝砂の荷重と変位関係の速度依存が大きな速度領域（弾性波よりも遅く、塑性波が伝わる速度と載荷速度が近い場合には速度依存が大きい）のなかで起きていると考えられる。これらの挙動は緩衝砂の破壊モードにも表れており、貫入速度が遅いと緩衝砂を側方に押し広げるようにして貫入していくのに対し、貫入速度が速くなっていくほど落体直下の層のみが局所的に圧縮され、押しぬきのような挙動になる。分散期待された衝撃力が、十分な緩衝砂の厚さがないとその効果を発揮することができないことも、このことから容易に想像できる。以上より、落体の落下速度の条件は粒子の条件と同様に、衝撃力の増減や破壊モードを特定するにあたって非常に重要な条件である。

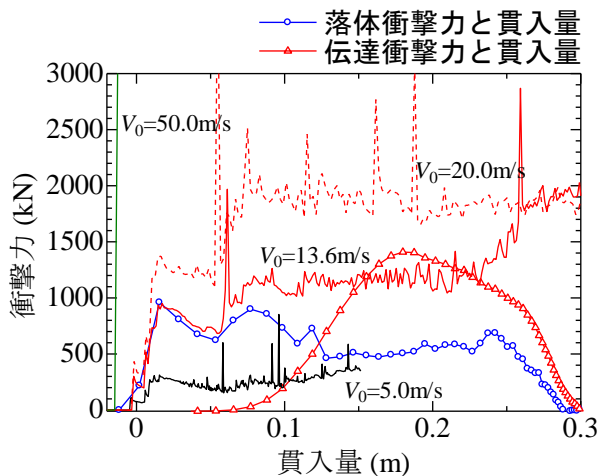


図-14 落下速度を固定した場合の衝撃挙動

5. 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。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最大衝撃力は増加するが、堆積層の離散性の影響が強くと $5 \times 10^8 \text{ N/m}$ 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。つまり、堆積層の衝撃力の大きさに関しては、 $5 \times 10^8 \text{ N/m}$ を超

えるようなばね係数も用いる必要がない。

- 2) 落体の径に対する堆積層厚の比、相対層厚が大きくなると、伝達衝撃力の最大値はなだらかに増加する。底面における応力分布状況は、層厚が落体径以下の場合には、落石対策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。今後、衝撃荷重分布は、粒子特性と密度をパラメータに見直していく必要がある。
- 3) 堆積層が緩い程、衝撃力は低下し、伝達衝撃力の方が密度に影響されやすい。落体の下の堆積層内では伝達応力の時刻歴波形は最大値を有しており、伝達に伴いその値は小さくなる。密な方はピーク値が一つ現れ、緩い方では同程度ピーク値が二つ連なった形状を示す。後者の後続のピークの発現メカニズムを応力波伝播特性を基に詳細に分析する必要がある。
- 4) 落体の衝撃による応力の伝達は弾塑性波であり、その伝播速度は、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。落下の衝撃による層内の局所的な塑性変形や支持力破壊的なせん断破壊の発現が伝播速度に大きく影響すると考えられる。

6. 謝辞

この研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 21360222 の助成を受けており、ここに感謝の意を表します。

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) 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 伯野 元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 2004.
- 8) 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.
- 9) Maeda, K. et al.: Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, Granular Matter, Vol. 12, pp.499-505, 2010.
- 10) 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.
- 11) 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.