敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動に及ぼす外力条件の影響

Impact force propagation behaviors of rock into sand cushion with different masses and velocities focus on stress-strain

内藤直人*，前田健一**，山口悟***，牛渡裕二****，鈴木健太郎*****，川瀬良司******

Naoto Naito,　Kenichi Maeda,　Satoru Yamaguchi,　Yuji Ushiwatari,　Kentaro Suzuki,　Ryoji Kawase

*工修，名古屋工業大学大学院，社会工学専攻博士後期課程（〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町）

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

***土木研究所寒地土木研究所，寒地構造チーム（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号）

**** 工博，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）

***** 工修，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，常務取締役（〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1）

キーワード：落石，ロックシェッド，敷砂緩衝材，応力波，個別要素法

Key Words:(rock fall, rock-shed, sand cushion, stress wave, discrete element method)

1. はじめに

我が国では，高度経済成長期を中心に整備されてきた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．近年，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．これらの外力特性の変化は，供用期間中に設計荷重が増大する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．

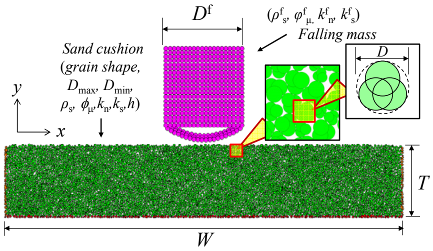
落石防護工の一つであるロックシェッドの屋根部分にあたる頂版上には，落石による構造物の直接的な損傷を抑制する敷砂などの緩衝材が設置される．しかし，落石の敷砂への衝突問題 1)は，数 ms～数十 ms の載荷時間でありながら大変形･飛散を伴う非常に複雑な現象である．

著者らは，敷砂緩衝材の緩衝メカニズム解明のために過去の研究 2),3)を参考にしながら二次元個別要素法 4)（Discrete Element Method，以下 DEM と略す）を用いて数値解析を実施している 5),6)．既往の研究で，貫入量に着目した検討によって落体衝撃力（落体が受ける衝撃力）波形形状の持つ意味について考察を試み 5)，衝撃力の最大値・継続時間・力積を用いて敷砂の緩衝効果に及ぼす落下高さと落体質量の影響ついてマクロ的な挙動を中心に検討した 6)．本論文では，従来検討してきた落体衝撃力と伝達衝撃力（敷砂を介して構造物に入力される衝撃力）だけでなく，敷砂内部の応力・ひずみ挙動に着目して敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動に及ぼす外力条件の影響解明を試みた.

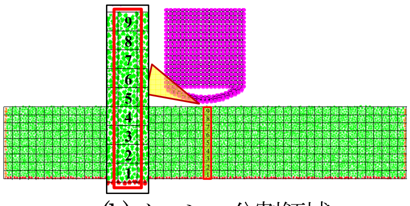
2. DEM による衝撃力解析概要

2.1 解析パラメータ

本論文では，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(a)に解析モデルの概要を示し（x−y 軸は図中に示す），図−1(b)に粒子接触力，速度から応力やひずみ速度



(a) 解析モデルの概要



(b)メッシュ分割領域

図−1　DEM 解析の概要

表－1　敷砂モデルの基本パラメータ

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

を求める場合の単位領域を示す．

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]に従っている．ばねには線形ばね[8]を用いている．敷砂の土粒子モデル[9]は，図－1(a)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とする非円形粒子を採用している．粒度分布は，粒子径は最大粒径 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粒度分布を用いた．本論文で用いた非円形粒子に対して最小密度と最大密度を求めた上で，敷砂モデルの間隙比を中密程度に調節した．

2.2　境界条件

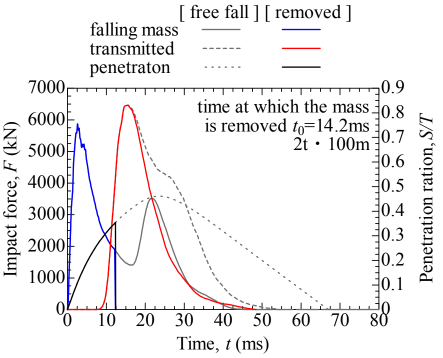
敷砂の底面，両側面の境界には，敷砂モデルと同様の非円形粒子を隙間なく一列に並べて固定することで壁をモデル化している（図－1(a)）．

敷砂幅 W は落体径 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[7]を参考にし，W=5.0m 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，一連の大型衝撃実験[10),11)]に用いられている重錘と同一とした（図－1）．また，落体表面における粒子間摩擦角 ϕ^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[12),13)]．

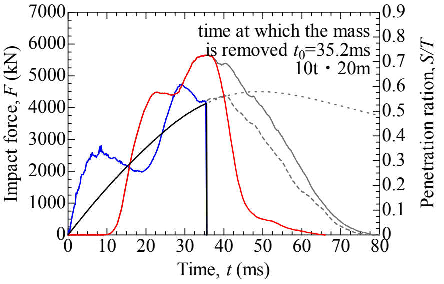
2.3　衝撃力算出方法

本論文における衝撃力は以下のように算出した．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)]．

粒子単位の応力は，粒子個々に作用する接触力を粒子の領域において発散定理を用い体積平均化することで求めることができる．これらの算出によって，力を受け



(a)100m・2t（速い載荷）



(b)20m・10t（重い載荷）

図－2　等入力エネルギー条件で速度と質量が異なるケースの自由落下解析と落体除去解析による衝撃力波形

た粒子が柱状に繋がって見える応力鎖の観察と堆積層底面に作用する応力分布の観察などが可能になる．

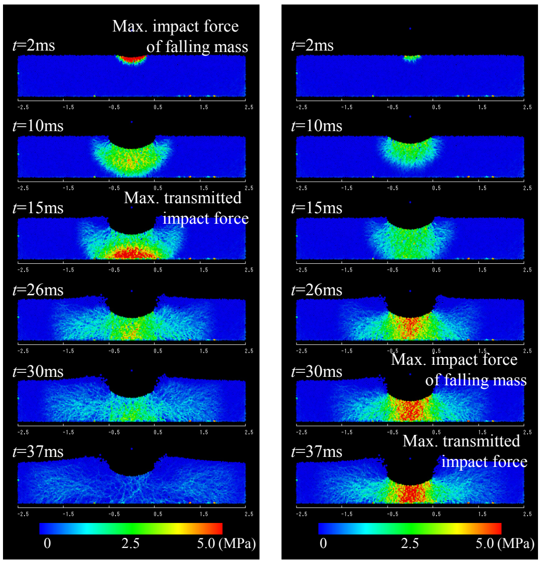
また，設計への応用や力学的考察には応力で観察する方が議論しやすいこともある．そこで，図－1(b)のように，堆積層を適当なメッシュ領域で分割し，粒子単位で求められた応力をメッシュ内で体積平均することでメッシュ内に作用する応力[14),15)]を算出した．メッシュサイズについては，既報[7)]にて決定している．

3.　敷砂の緩衝効果に及ぼす外力条件の影響

3.1　等入力エネルギーでの各種衝撃応答値に及ぼす落下高さと落体質量の影響

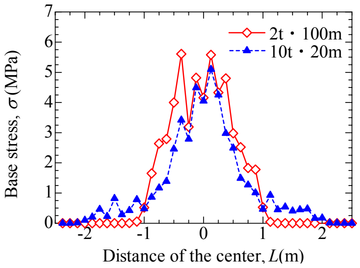
ここでは，等入力エネルギー条件のもとで，落下高さと落体質量が異なる，H=100m，M^f=2t（速い載荷）のケースと H=20m，M^f=10t（重い載荷）のケースの衝撃力解析を実施し比較検討した．図－2 には，自由落下時の落体衝撃力・伝達衝撃力・貫入率 S/T（初期層厚 T を貫入量 S で除した値）を灰色の実線・破線・点線で示している．また，貫入途中に落体を除去[7)]した解析結果を含めて，それぞれ青・赤・黒の実線で示している．

落体を除去[7)]する解析では，落体を自由落下させた後に，任意の時刻 t_0 で落体を消すことで，それ以降，敷砂へ力が伝わらず，緩衝材底面からの応力の反射波が再び落体に反射しないようにする．これによって，どこまで

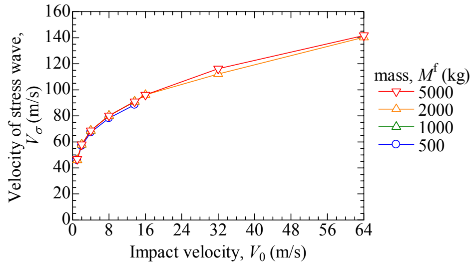


(a)100m・2t（速い載荷）　(b)20m・10t（重い載荷）

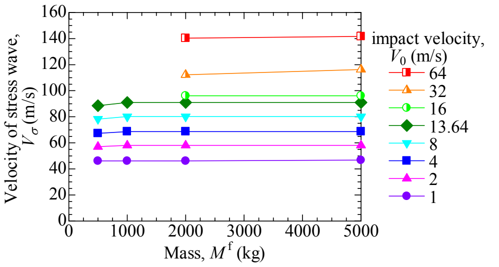
図－3　等入力エネルギー条件で速度と質量が異なるケースの応力伝播状況の比較



図－4　等入力エネルギー条件で速度と質量が異なるケースの底面応力分布



(a)　衝突速度による影響



(b)落体質量による影響

図－5　応力波伝播速度に及ぼす外力特性の影響

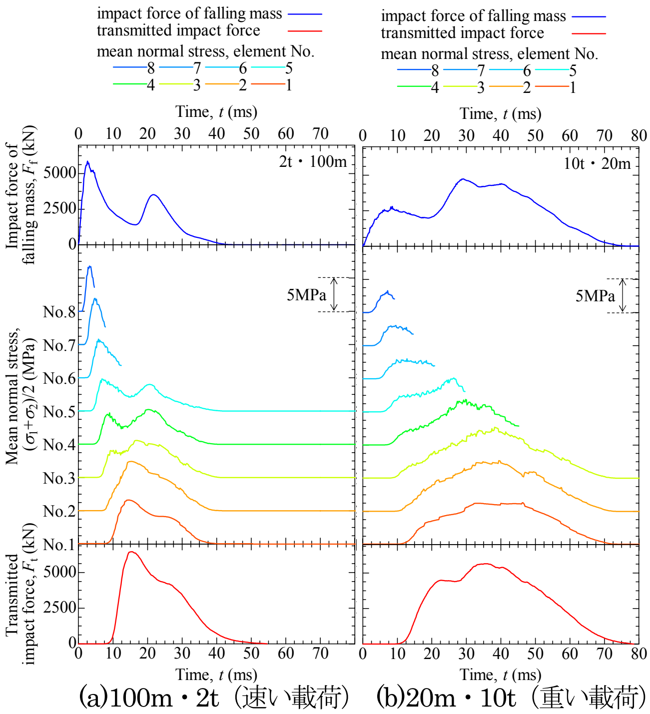
の貫入過程（載荷時間 t_0，貫入率）が伝達衝撃力の最大値の発現にどれだけ影響を与えているのかを確認することができる．事前に予備解析を実施し，伝達衝撃力が最大値になるまでに必要な載荷時間 t_0 を調べた．H=100m・M^f=2t（速い載荷）と H=20m・M^f=10t（重い載荷）は，それぞれ t_0=14.2ms と t_0=35.2ms である．

図－2(a)(b)の自由落下解析結果と入力エネルギーが等しくても，落体衝撃力と伝達衝撃力の最大値はともに速い載荷の方が 1～2 割程度大きい．また，波形及び図－3(a)(b)の応力伝播状況より，衝撃力の継続時間は落体・伝達衝撃力ともに重い載荷の方が長く，グラフ上の衝撃力波形と x 軸で囲まれた面積にあたる力積も重い載荷の方が大きいことが分かる．図－4 は，速い載荷（100m・2t）と重い載荷（20m・10t）の，それぞれ伝達衝撃力が最大時に敷砂底面へ伝達している応力分布である．速い載荷の方が重い載荷に比べて，最大応力は 1 割程度大きい．また，高い応力の分布域は，速い載荷の方が幅広く，落体径と同程度の幅に伝達する．

つぎに，図－2(a)(b)の貫入途中に落体を除去した解析結果を比較する．速い載荷の場合，伝達衝撃力は落体が S/T=0.39（t_0=14.2ms）まで貫入することで最大値を発現する．初期層厚 900mm から S/T=0.39 を差し引くと，残りの層厚は 550mm となる．つまり，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．重い載荷の場合，伝達衝撃力は落体が S/T =0.59（t_0=35.2ms）まで貫入することで最大値を発現するため，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．

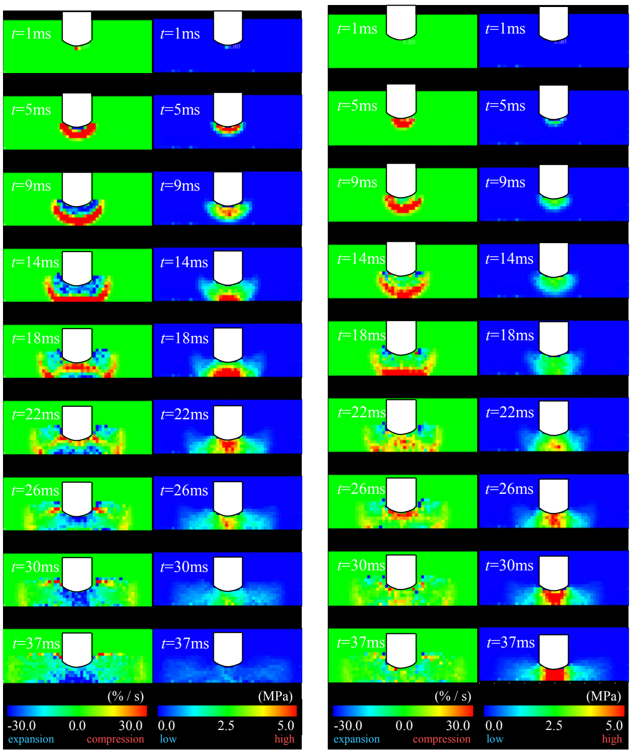
よって，速い載荷では，落体衝撃力の第 1 ピークで生じた強い力が応力波として短時間で伝播したため，図－3 に示すように底面では最大応力付近の高い応力が落体径程度の分布域を有しているが，応力分布全体としては図－4 に示すように落体径の 2 倍程度の狭い領域に分布するものと考えられる．一方で，重い載荷では，応力波が時間をかけて伝播することで応力分布全体としては図－3 に示すように落体径の 4 倍程度の広範囲に分布するが，図－4 に示すように落体による準静的載荷に似た影響も加わって応力球根のような状態になるため載荷点中央が最大値になると考えられる．

さらに，自由落下時において，速い載荷の方が，伝達衝撃力が最大値に達するまでの貫入率が小さい理由を考える．図－5(a)(b)は，D^f=1m，T/D^f=0.7，緩詰め，落下高さ H=10m，落体質量 M^f=2t の条件から，それぞれ落下高さと落体質量のみを変化させた場合の応力伝播速度 V_σ[16),17)]を示している．応力伝播速度は，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を初期層厚で除した値とした（1kN の閾値は，伝達衝撃力の立ち上がりが明確になる値である）．図から，応力波伝播速度 V_σは，落体質量には依存しないが，衝突速度の増加に伴い，対数近似曲線に沿って増加することが分かる．従って，自由落下時の速い載荷の方が応力伝播速度も大きく，小さい貫入率で伝達衝撃力が最大値に達



(a)100m・2t（速い載荷）　(b)20m・10t（重い載荷）

図−6　敷砂内部における平均主応力の時刻歴波形の深度分布と衝撃力波形



(a)100m・2t（速い載荷）　(b)20m・10t（重い載荷）

図−7　敷砂内の体積ひずみ速度分布と平均主応力分布

すると考えられる．なお，予備解析により，応力伝播速度に及ぼす接触面積や接触面形状の影響は衝突速度の影響に比べて小さいことを確認している．

3.2　敷砂内部の平均主応力の深度分布に及ぼす落下高さと落体質量の影響

衝撃力伝達挙動を明らかにするため，落体直下の敷砂にかかる平均主応力 $\sigma_m=(\sigma_1+\sigma_2)/2$（ここで，$\sigma_1$ と σ_2 はそれぞれ，二次元における最大・最小主応力）の時刻歴波形の深度分布を観察する．検討対象は，図−1(b)で示す0.1m×0.1mの正方領域で分割したメッシュの中心の1列（最上段のメッシュを除く）の8要素とし，要素番号は下からか順に No.1〜8 とする．図−6 には，上段に落体衝撃力波形，中段に No.1〜8 の要素で算出する平均主応力波形，下段に伝達衝撃力波形を示しており，落体に生じた力がどのように底面に伝達するかを観察できるようにした．なお，中段の各要素での平均主応力の大きさは，図中に 5MPa 毎（4 目盛分）のスケールを示している．落体接触時 t=0ms における各要素の平均主応力は $(\sigma_1+\sigma_2)/2$=0MPa である．ただし，図中で応力の表示が途切れているのは，落体の貫入が進行し分割要素内を落体が占めたためである．

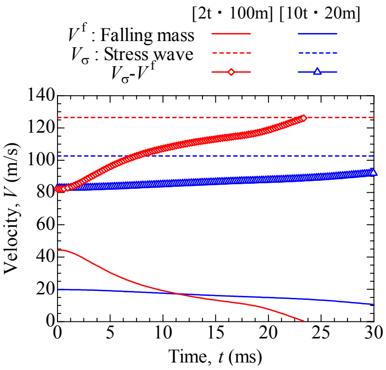
落下高さが高く速い載荷（図(a)）では，落体衝撃力が急激に立ち上がり三角形状の平均主応力波形が底面に向かって伝播する様子が明瞭に確認できる．そして，伝播した応力波は底面で反射し，反射波が落体に向かって三角形状の波形で伝播する．これより，落体衝撃力の第 2 ピーク発現の原因は，緩衝材底面からの反射波であることを明らかにすることができた．

重い載荷（図(b)）では，落体衝撃力が立ち上がった後に応力がほとんど低下することなく底面へ伝播している．No.5 の要素の波形では，t=20ms 付近から平均主応力が再増加する．これは，速い載荷の場合と同様に底面からの反射によるものと考えられるが，速い載荷のように平均主応力波形に 2 つのピークが現れない．この理由として，重い載荷では落体から敷砂へ継続的に載荷し続けるため平均主応力が低下することなく反射波が落体へ伝播し，再び緩衝材底面へ伝播するものと考えられる．そして，反射波が落体に作用することで落体衝撃力は第 2 ピークで最大値を発現し，そこで生じた高い応力が再び緩衝材底面に伝播して伝達衝撃力は最大値を発現している可能性が高い．

3.3　敷砂内部の体積ひずみ速度の深度分布に及ぼす落下高さと落体質量の影響

ここでは，平均主応力の伝播は，体積ひずみ速度（x と y 方向の直ひずみ速度の和；直ひずみは圧縮が正）が正で，高密化する波として伝わっているのか，もしくは負で，低密化する波として伝わっているのかを観察し，速い載荷と重い載荷による影響を調べる．図−7 には，敷砂全体を図−1(b)のように0.1m×0.1mの正方領域に分割した時の体積ひずみ速度の分布（左列）と平均主応力の分布（右列）を示している．

速い載荷（図(a)）では，接触後，高密化する波（赤色）が同心円状に伝播する．そして，高密化する波の後を追うように，低密化する波（青色）が同心円状に伝播する．高密化する波が底面に伝播した後に低密化する波も底



図－8　応力伝播速度と落体速度の速度差に及ぼす落下高さと落体質量の影響

面に伝播し，それぞれ反射波となって落体へ伝播する．

重い載荷（図(b)）では，接触後，速い載荷と同様に高密化する波が同心円状に伝播するが，落体直下において低密化する波の存在は認められない．

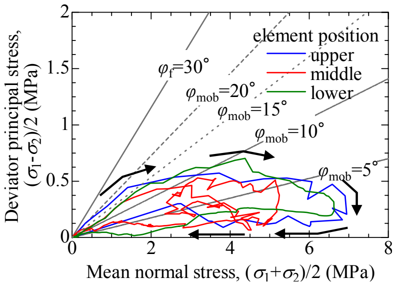
ここで，速い載荷と重い載荷の応力伝播速度 V_σ と落体速度 V^f 及び両者の速度差 V_σ-V^f の経時変化を比較する（図－8）．応力伝播速度 V_σ が一定値であると仮定すると，応力伝播速度と落体速度の速度差 V_σ-V^f が算出できる．図より，速い載荷の方が落体速度 V^f の低下が速くなるため応力伝播速度との速度差 V_σ-V^f は大きくなる．これは，速度差 V_σ-V^f の増加傾向が強い速い載荷の方が応力波の先頭から落体までの距離が開いていくことを意味する．

よって，速い載荷では応力伝播速度と落体速度の速度差 V_σ-V^f が大きくなっていくため高密化する波が伝播した後に低密化する波が伝播しやすいと考えられる．また，重い載荷では V_σ-V^f はあまり変化しないので高密化する波の後に低密化する波が発生しづらいと考えられる．

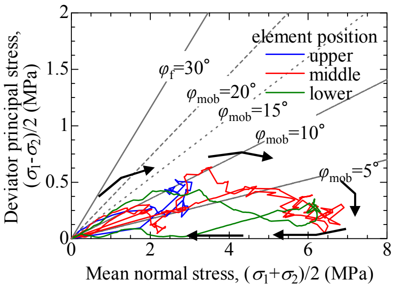
3.4　敷砂の代表深度の応力経路に及ぼす落下高さと落体質量の影響

一般的に，土がすべり破壊する際には，動員される内部摩擦角[18]が破壊時の内部摩擦角に達することが知られている．しかし，数十 m/s ものひずみ速度において動員される内部摩擦角を検討された例は極めて少ない．そこで，3.2 節で検討した要素の内，No.1（下部），No.4（中部），No.7（上部）の 3 要素に着目して，縦軸を偏差応力，横軸を平均主応力とした応力経路について検討する（図－9）．本解析で用いた土粒子モデルの破壊時の内部摩擦角はおよそ ϕ_f=30°である．なお，図中の ϕ_{mob} は，せん断時に動員される内部摩擦角を示している．なお，応力経路の順路は，まず原点付近から始まり，ϕ_{mob}=10～20°の線に沿うように増加した後に，ほぼ横ばいとなって平均主応力方向に経路は進展する．さらに，偏差応力の減少に続いて平均主応力も低下し，最終的に原点に戻るような軌跡を描く．

速い載荷（図(a)）では，平均主応力が$(\sigma_1+\sigma_2)/2$=2MPa までの応力伝播の初期段階において，上部で動員摩擦角



(a)100m・2t（速い載荷）



(b)20m・10t（重い載荷）

図－9　落体直下の代表要素（下部・中部・上部）における応力経路に及ぼす落下高さと落体質量の影響

ϕ_{mob}=20°程度，中部・下部では ϕ_{mob}=15°程度となる．$(\sigma_1+\sigma_2)/2$=4～7MPa の伝播応力が最大値付近になる段階においては，上部・中部・下部で ϕ_{mob}=10°以下となる．

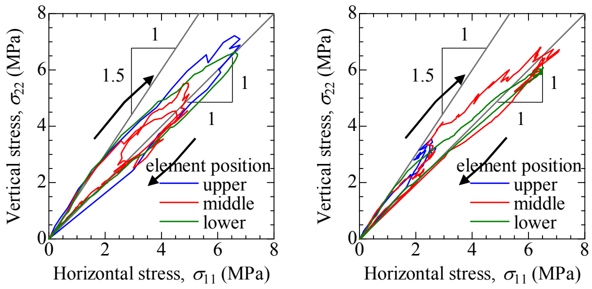
重い載荷（図(b)）では，平均主応力が$(\sigma_1+\sigma_2)/2$=2MPa までの応力伝播の初期段階において，上部・中部・下部で ϕ_{mob}=10°程度となる．$(\sigma_1+\sigma_2)/2$=4～7MPa の伝播応力が最大値付近になる段階においては，中部・下部でおよそ ϕ_{mob}=5°以下となる．

落体衝突のような現象では，速い載荷と重い載荷の両者ともに，落体貫入及び応力伝播の際に動員する内部摩擦角は破壊時の内部摩擦角に達することはない，という土質力学的にも新しい知見を得た．また，速い載荷と重い載荷を比較すると，重い載荷の方が落体貫入及び応力伝播時に動員する内部摩擦角が低くなる．

3.5　敷砂の代表深度の鉛直応力と水平応力の関係に及ぼす落下高さと落体質量の影響

落体直下の敷砂の応力状態を鉛直応力と水平応力という簡潔な指標で検討した．図－10 には，前節で検討した代表 3 要素（敷砂中央の上部，中部．下部）の鉛直応力（縦軸）と水平応力（横軸）を示している．

速い載荷（図(a)）と重い載荷（図(b)）の両者ともに，水平応力 : 鉛直応力の比が 1 : 1.5 の勾配に沿って応力が上昇し，1 : 1 の勾配に沿うように応力が 0 に戻る軌跡となる．これより，落体直下の敷砂は，鉛直方向に 1 の力を受ける時，横からの支えである水平方向に 0.7～1 程度の力を受けることができるため，敷砂緩衝材は，高い衝撃力にも対応できる緩衝性能を有すると考えられる．また，特に，下部要素において，重い載荷の方が等方圧密



(a)100m・2t（速い載荷）　(b)20m・10t（重い載荷）

図－10　落体直下の代表要素（下部・中部・上部）における水平応力と鉛直応力の関係に及ぼす落下高さと落体質量の影響

に近い載荷を受けているため，落体貫入及び応力伝播時における敷砂の応力状態は安定していると言える．

4.　まとめ

本論文では，落石対策工の性能評価・設計を支援する一方法として，DEM 解析による敷砂緩衝材の緩衝メカニズム解明に向けて，応力・ひずみ挙動に着目した敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動を検討した．解析により得られた主な結果は以下の通りである．

1) 落体衝撃力の第1ピークだけでなく第2ピークの発現にも着目し，緩衝材底面からの応力の反射波の影響があることを示した．
2) 等入力エネルギー条件では，載荷速度が速いと明瞭な疎密波が伝播するが，落体が重いと伝播途中では高密化が顕著であった．
3) 落体貫入時に，緩衝材内に動員される内部摩擦角は破壊時の内部摩擦角に比べて小さいという土質力学的にも新しい知見を得た．また，等方的な圧縮応力の発生が支配的であり，載荷速度が遅く落体が重い方がその傾向が顕著となることを明らかにした．

今後は，応力・ひずみ挙動により新たに得た衝撃力伝達挙動の知見をもとに，落体の貫入挙動だけでなく構造物に入力する伝達衝撃力との関係を調べていく予定である．

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する．

参考文献

1) 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.
2) 吉田 博，桝谷 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.
3) 桝谷 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.
4) Cundall, P. A. and O. D. L. Stack.：A Discrete Models for Granular Assemblies，Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
5) 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.
6) 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.
7) 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.
8) 伯野 元彦：破壊のシミュレーション，森北出版, 2004.
9) 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.
10)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.1181-1193，2013,3.
11)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.
12)Wood, D. M. and Maeda, K.: Changing grading of soil: effect on critical states, Acta Geotechnica, Vol.3, pp.3-14, 2008.
13)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
14)S. Nemat-Nasser and M. Hori: Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials, Elsevier,1993.
15)Oda, M. and Iwashita, K.: An Introduction Mechanics of Granular Materials, A.A.BALKEMA, 1999.
16)高橋保，里深好文：慣性土石流の統一モデル，京都大学防災研究所年報，No.42，B-2，1999.
17)内藤直人，前田健一：敷砂緩衝材の応力伝播挙動に関する二次元個別要素法解析，土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会，2014.
18)社団法人土質工学会：土の強さと地盤の破壊入門，1987.