

## 衝撃緩衝メカニズム解明のための敷砂緩衝材内の変形挙動

Deformation mechanism of sand cushion for shock and buffer mechanism identification

奥村勇太\*, 前田健一\*\*, 内藤直人\*\*\*, 西弘明\*\*\*\*, 山口悟\*\*\*\*\*, 川瀬良司\*\*\*\*\*  
Yuta Okumura, Kenichi Maeda, Naoto Naito, Hiroaki Nishi, Satoru Yamaguchi, Ryoji Kawase

- \* 名古屋工業大学大学院, 社会工学専攻博士前期課程 (〒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)  
\*\*\*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, 土木研究所寒地土木研究所, 上席研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)  
\*\*\*\*\* 土木研究所寒地土木研究所, 研究員 (〒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, 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, 密度変化, 応力分布, 可視化

Key Words: (rock fall, density variation, stress distribution, visualization)

### 1. はじめに

我が国では, 近年の気象変動による降雨条件の変化や地震の多発に起因して落石発生件数は増加傾向にある。また, 斜面の経年劣化に伴う落石規模の拡大により, 既存の落石防護工の安全余裕度が低下することが大きな問題となっている。そのため, 落石対策工の合理的な維持管理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上面には敷砂緩衝材<sup>1)</sup>が設置されており, 敷砂は落石衝突により生じる衝撃力の緩衝効果に優れている。しかし, 敷砂緩衝材の緩衝性能に関する研究は昔から実施されているが, その緩衝メカニズムに着目した研究が少なく, 緩衝メカニズムに関して, 未解明の点が数多く残されている。

そこで, 本論文では, 最大衝撃力だけでなく敷砂緩衝材の変形挙動に着目した実験を行い, 衝撃緩衝メカニズムを検討した(図-1)。大型衝撃模型実験<sup>2)</sup>では, 図-1 (a)の大型敷砂緩衝材実験装置を用いて重錘落下衝撃実験を実施し, 落体が受ける衝撃力「落体衝撃力」と敷砂底面全体が受ける衝撃力「伝達衝撃力」を計測するとともに, 実験前後の敷砂密度を測定した。また, 大型緩衝材実験と実規模 RC 製ロックシェッド実験(図-1 (b))では, 伝達衝撃力挙動や重錘下の密度変化が複雑であったことから, 敷砂内部の変形挙動を詳細に観察することにした。本論文では, これらを簡単に可視化する方法を試みた 2 種類の室内小型模型実験結果を紹介する。1 つ目は大型実験と同様の試料を用いた感圧シートによる

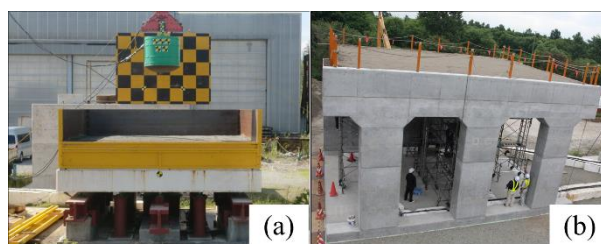


図-1 衝撃実験装置; (a) 大型緩衝材実験装置, (b) 実規模 RC 製ロックシェッド

敷砂底面部分に伝達する応力分布の計測, 2 つ目は着色砂の格子による緩衝層の局所変形・密度変化の計測である(試料は, 着色しやすい豊浦砂を試用した)。

### 2. 大型実験

#### 2.1 大型緩衝材実験概要

大型緩衝材実験装置(幅 5.0m×奥行 5.0m×高さ 0.9m)に敷砂緩衝材を設置し, 重錘落下衝撃実験を実施した。試料は土粒子密度  $\rho_s=2.665(\text{g}/\text{cm}^3)$ , 最大間隙比  $e_{\max}=1.056$ , 最小間隙比  $e_{\min}=0.682$  である北海道石狩市の知津狩産砂を用いた。図-2 に粒度分布を示す。落体に設置した加速度計の測定値と落体質量の積で得られる「落体衝撃力」と緩衝材底面の剛基礎底面に複数設置された荷重計から算出した底面全体が受ける「伝達衝撃力(構造物への入力衝撃力)」を観察した。実験条件を表-1 に示す。このとき, 相対密度は乾燥密度から算出した間隙比から求めている。

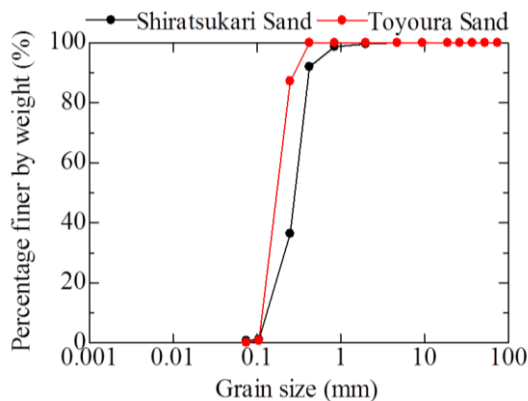


図-2 実験試料の粒度分布

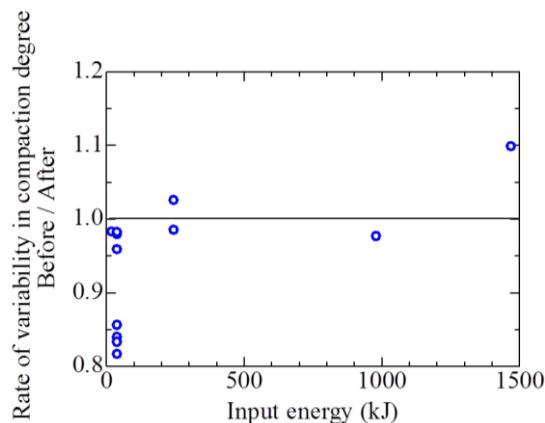


図-4 入力エネルギーに対する締固め度の変化率

表-1 大型緩衝材実験条件および結果

実験 No.	落体質量 (t)	落下高さ (m)	含水比 (%)	相対密度 (%)	締固め度 (実験前) (%)	最大落体衝撃力 (kN)	ラーメの定数 (kN/m <sup>2</sup> )
1	2.0	2.0	8.60	27.5	89.1	301.9	523.0
2	5.0	5.0	9.10	2.5	85.8	630.5	181.0
3	5.0	5.0	8.30	74.0	95.8	1657.9	2029.7
4	10.0	10.0	8.90	21.1	88.2	2644.9	525.7
5	10.0	10.0	8.30	68.5	94.9	5051.0	2649.7
6	10.0	20.0	8.15	21.1	88.2	5062.1	941.9

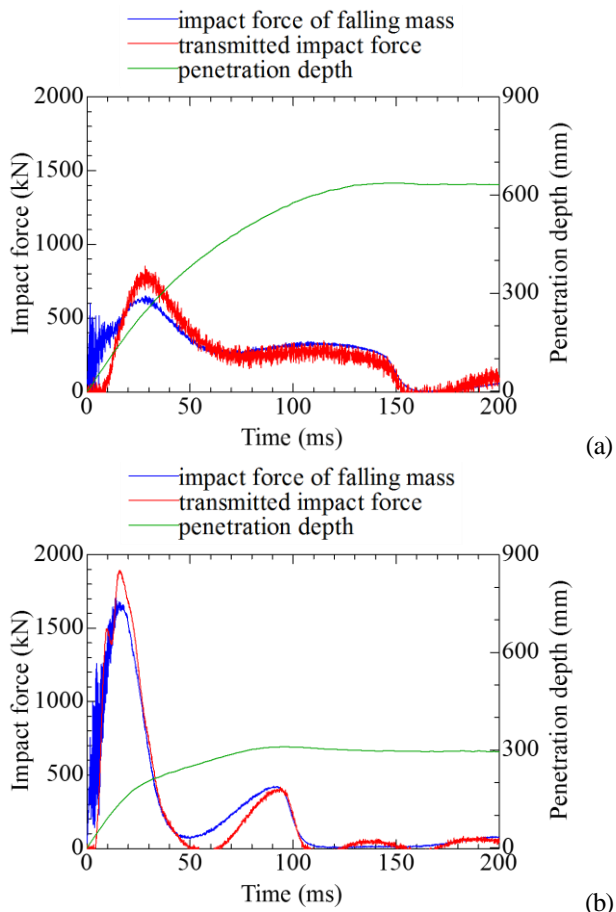


図-3 落体衝撃力と伝達衝撃力の時刻歴波形；  
(a) 緩 ( $D_r=2.5\%$ ), (b) 密 ( $D_r=74.0\%$ )

本論文では、質量 5t、直径 1.0m の円柱底面に曲率半径 0.8m の丸みを持つ落体、落下高さ 5m の条件で、敷砂の相対密度が異なる緩 ( $D_r=2.5\%$ )、密 ( $D_r=74.0\%$ ) の場合

について比較し考察する。

## 2.2 大型実験結果と考察

### (1) 異なる初期相対密度が衝撃力波形に及ぼす影響

図-3 に初期相対密度  $D_r$  がそれぞれ緩、密の条件における、落体衝撃力及び伝達衝撃力の時刻歴波形を示す。最大衝撃力に着目すると、密な層の方が約 2.6 倍程度大きな値となることが分かる。最大伝達衝撃力の発生時刻は、緩では  $t=28.2\text{ms}$  であるのに対し、密では  $t=16.1\text{ms}$  である。緩い層と密な層では、衝撃力の波形形状は大きく異なるため、衝撃力伝達挙動にも敷砂の初期密度とそれに依存した変形の影響が大きいと考えられる。緩い層の場合では、最大衝撃力が小さくなり緩衝効果は高いが、貫入量が大きくなるため、落石外力が設計外力を大きく超える場合には落石自体がロックシェッドに直撃する危険性も考えられる。このことから、落体直下の敷砂の変形を詳細に把握する必要があると考えられる。

### (2) 衝撃载荷が敷砂緩衝材の密度変化に及ぼす影響

衝撃実験前後の敷砂緩衝材に対して地盤密度試験を行った。対象とした実験は大型緩衝材衝撃実験と実規模 RC 製ロックシェッド (図-1 (b)) を用いた衝撃実験である。このとき、密度は放射線を利用した RI 測定器で測定した。RI 測定器は、短時間で精度よく RI 測定器直下 (表層から 200~300mm の深度) の平均密度を測定することができる。密度測定の結果、衝撃力を受けたにもかかわらず、8 割以上の実験ケースで落体直下の敷砂が緩むことが明らかになった (図-4)。特に、入力エネルギーが小さい場合は、実験前に比べて実験後の密度が小さくなっている。本試験は、埋立地等の液化化対策で用いられる重錘落下締固め工法に似ているが、本実験結果からは、落下衝撃による密度変化は、層厚及び落下条件に強く依存すると考える。よって、変形の観察を行うこととした。

### (3) 初期相対密度がラーメの定数に及ぼす影響

大型緩衝材実験では表-1 に示すような落体質量及び

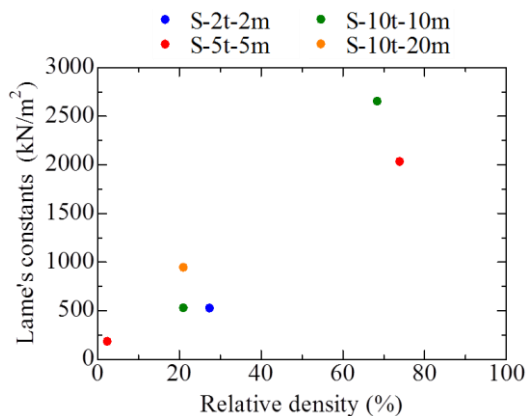


図-5 初期相対密度とラーメの定数

落下高さを変えた計6ケースを実施した。ここでは、実験で得られたラーメの定数と初期相対密度の関係を調査する。このラーメの定数は落石対策便覧<sup>8)</sup>に記載されている最大衝撃力を算出する推定式より逆算できる。推定式は次式で表される。各パラメータは  $P_{max}$  : 最大衝撃力,  $m$  : 落体質量,  $g$  : 重力加速度,  $\lambda$  : ラーメの定数,  $H$  : 落下高さ,  $\alpha$  : 砂層厚と落体径から決定される割増し定数である。

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

敷砂緩衝材の初期相対密度と算出したラーメの定数の関係を図-5に示す。落石対策便覧によると一般的に、ロックシェッドに用いられる敷砂緩衝材はラーメの定数  $\lambda = 1000 \text{ kN/m}^2$  程度と考えられている。しかし、図-5より相対密度とラーメの定数には比例関係があり、材料固有の値とはなっていない。これより衝撃力を算出する上で敷砂緩衝材の相対密度を考慮する必要性が示唆された。

### 3. 緩衝材底面の応力分布に着目した模型実験

前章では、大型実験結果より、敷砂緩衝材の初期相対密度により衝撃力が2倍以上異なることと衝撃実験後には落体直下の敷砂が緩むことが分かった。そこで、敷砂の衝撃変形挙動を理解するために、感圧シートを用いて敷砂底面に伝達する応力分布の面的な測定を試みた。

#### 3.1 実験概要

直径 300mm, 高さ 250mm の鋼製円筒土槽を用いた敷砂模型に落体を鉛直自由落下させる実験を実施した。試料には大型実験と同様の知津産砂を用い、敷砂は含水比 0% の乾燥状態とした。層厚は 100mm とし、落体には球体 (直径 100mm, 質量 4.0kg) を用いた。落体上面部分に加速度計を設置し、敷砂底面には縦 200mm, 横 200mm の感圧シートを設置し (図-6), 「落体衝撃力」と「底面伝達応力」を測定した。敷砂の相対密度が  $D_r = 15, 50, 80\%$  と異なる3ケースの実験を行った。感圧シートは落体落下後に敷砂底面より取り出し、感圧シートに作

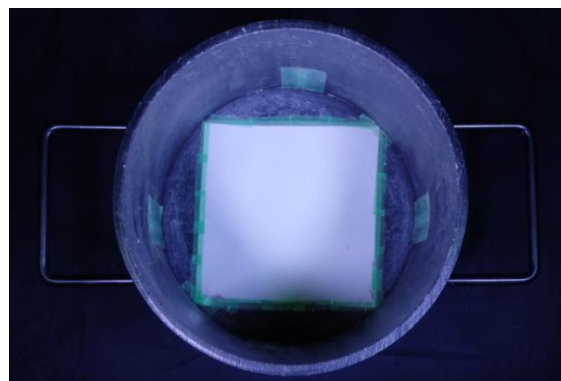


図-6 実験装置及び感圧シートの設置状況

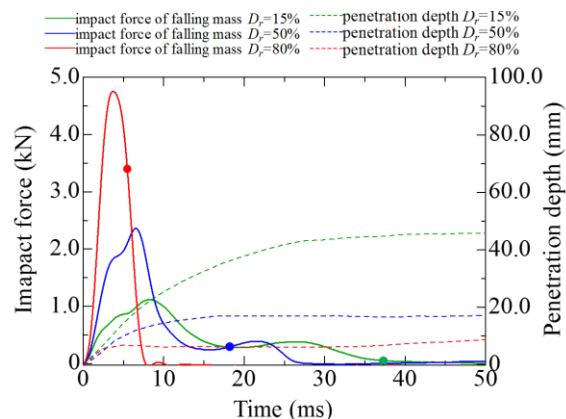


図-7 異なる相対密度の落体衝撃力の比較

用した力の強さに応じて反応する色の濃さ (明度) を描画した。

#### 3.2 実験結果及び考察

##### (1) 落体衝撃力波形に及ぼす相対密度の影響

図-7に敷砂の相対密度の異なる ( $D_r = 15, 50, 80\%$ ) 条件における、落体衝撃力の経時変化を示す。最大落体衝撃力に着目すると、 $D_r = 15\%$  が  $1.0 \text{ kN}$  程度であるのに対して、 $D_r = 50\%$  では約 2.3 倍、 $D_r = 80\%$  では約 4.6 倍となることが分かる。最大落体衝撃力の発生時刻は、 $D_r = 15\%$  では  $t = 8.0 \text{ ms}$  であるのに対し、 $D_r = 50\%$  では  $t = 6.6 \text{ ms}$  であり、 $D_r = 80\%$  では  $t = 3.8 \text{ ms}$  である。相対密度が大きくなるほど載荷時間が短くなり、最大衝撃力の値は大きくなる。最大衝撃力と継続時間の変化は、前章で示した大型実験結果と同様の傾向が得られたと言える。

波形性状については、相対密度が小さい  $D_r = 15, 50\%$  では正弦半波状の波形の後になだらかな 2 山目が存在する。しかし、相対密度が大きい  $D_r = 80\%$  では正弦半波状の波形一つのみで構成されている。図-7における丸プロットは入力運動量  $mv$  に相当する力積を落体が受けた時刻を表している。相対密度が大きい  $D_r = 80\%$  では、敷砂が非常に硬く、落体の貫入量が小さい。また、一波目の途中に  $mv$  に達して落体もほぼ静止しているため、二波目が生じないと考えられる。それに対して、 $D_r = 15\%$  及び  $D_r = 50\%$  では、敷砂が軟らかく一波目が終了した時点では落体が受ける力積が  $mv$  に達しないため、落体は貫入し

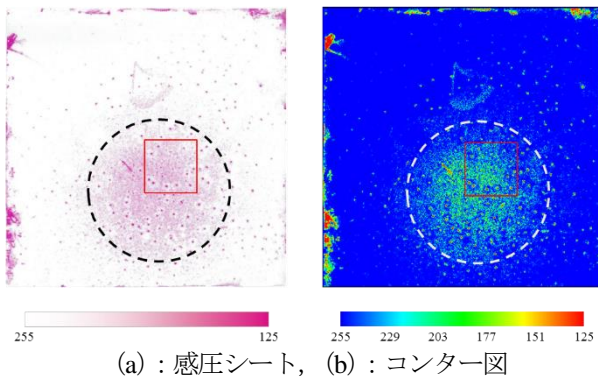


図-8  $D_r=15\%$ における底面にかかる応力分布

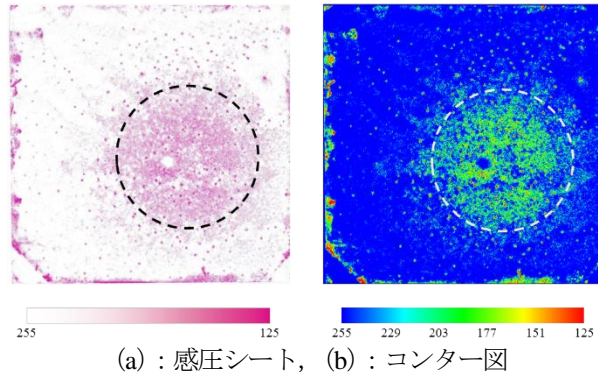


図-9  $D_r=50\%$ における底面にかかる応力分布

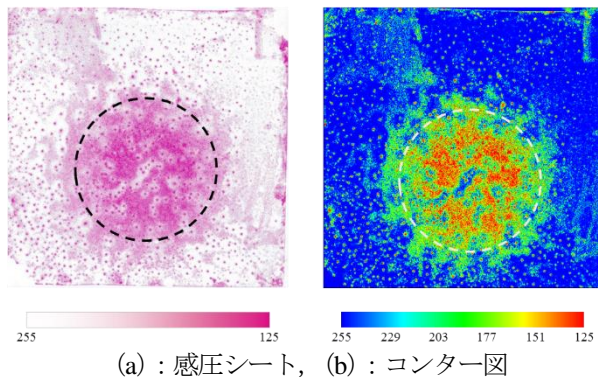


図-10  $D_r=80\%$ における底面にかかる応力分布

続けて二波目が生じると考えられる。

## (2) 伝達応力分布に及ぼす相対密度の影響

敷砂の相対密度が  $D_r=15, 50, 80\%$ における、敷砂緩衝材底面に設置された感圧シート及びその感圧シートの明度情報を抽出したコンター図をそれぞれ図-8~10に示す。なお、コンター図は感圧シートの縦横約195mmの領域から作成している。感圧シートは強い力が作用すると反応し、色が濃くなる。感圧シートの端部数カ所に赤くなっている部分が見られるが、これらは感圧シート設置時に力が加わったためである。感圧シート・コンター図(図-8~10)は色の明るさ(明度)で表しており、120の値は最も明るい色素である。255の値は図中では白または青で表されており、力が全くかかっていない部分である。

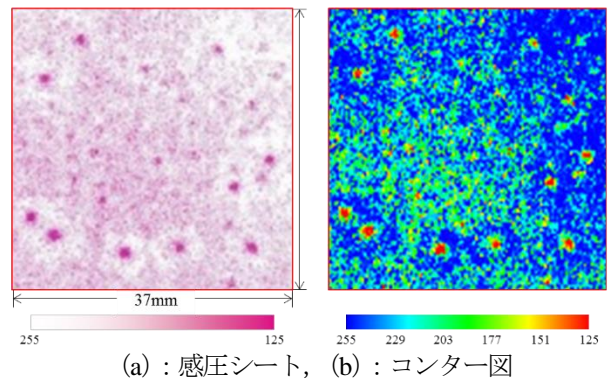


図-11  $D_r=15\%$ における底面にかかる応力分布拡大図(図-8中の赤囲み線)

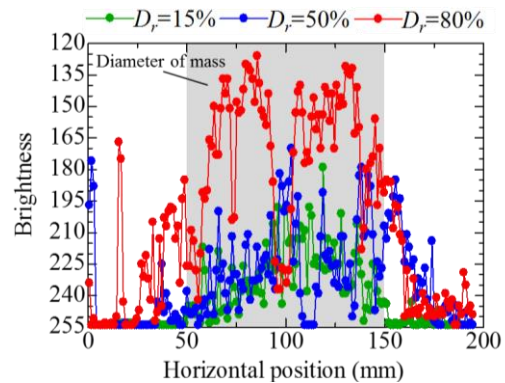


図-12 異なる相対密度の底面応力分布(明度)の比較

図-8~10 (b) のコンター図から、相対密度  $D_r=15\%$  では落体の直径分(100mm)程度の領域に黄緑色の弱い力が分布していることが分かる。相対密度  $D_r=50\%$  では濃い黄緑色の部分が多くなり、相対密度  $D_r=15\%$  よりも落体直下の直径分(100mm)において、力が加わっている。また、相対密度  $D_r=80\%$  では、黄色・赤色の部分が多くなり、さらに大きな力が加わっており、落体直下の直径分(100mm)よりも広い領域に黄緑色の部分が広がっている。

初期相対密度が高いほど落体衝撃力の最大値が大きくなるため、緩衝材底面に伝達する応力の最大値は増加し、高い応力が伝達する領域は広域化すると考えられる。また、感圧シートにより面的に応力分布を測定することにより、ある特定の粒子に赤色の強い応力がかかるとその周辺には青色の力がかかっていない領域が存在していることが分かった(図-11)。これは粒状体力学分野で言われる、強い応力を受けた粒子が鎖形状に繋がる応力鎖<sup>9)</sup>のように力が底面へ伝達しているものと考えられる。今後、数値解析<sup>10)~12)</sup>も併せて実施し、粒状材料の衝撃力伝達メカニズムの解明に役立てたい。

## (3) 代表1断面に着目した伝達応力分布の比較

それぞれの相対密度について、落下位置の中心における1断面の値に着目し、グラフ化したものを図-12に示す。灰色の領域は落体直下の直径分(100mm)を示している。相対密度  $D_r=15\%$  では60~150mm程度の位置に底面応

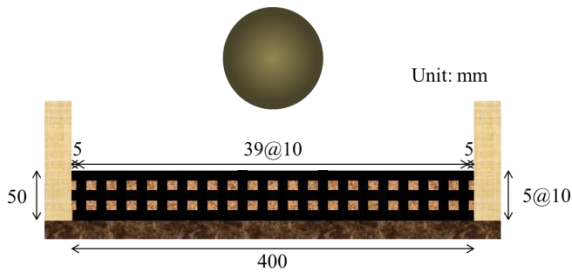


図-13 実験装置 (中央断面図)

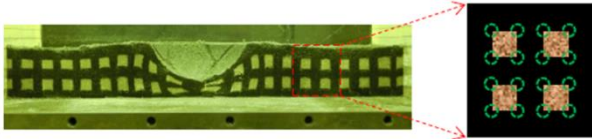


図-14 変位ベクトル及び体積ひずみの算出方法

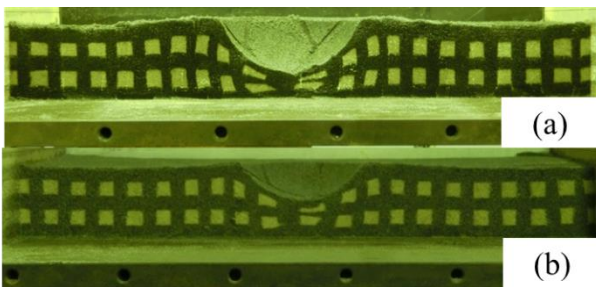


図-15 堆積層の変形の様子 (中央断面図)  
(a) 緩  $D_r=15\%$ , (b) 密  $D_r=50\%$

力分布が留まっているのに対し、相対密度  $D_r=50\%$  では 50~180mm 程度、 $D_r=80\%$  では 25~190mm 程度の位置まで値が広がっているのが分かる。縦軸の色の濃い (明度の値が低い) 部分に着目すると、相対密度  $D_r=15\%$  と  $D_r=50\%$  では 240~180 程度ではほぼ差異がないと言えるが、 $D_r=80\%$  では 150~125 までの値が多く分布しており、高い応力が分布していることが分かる。この高い応力は 70~165mm の領域に分布しており、落体直下の直径分 (100mm) により集中して高い応力がかかっていることが分かる。

#### 4. 緩衝材内部の変形挙動に着目した実験

##### 4.1 実験概要

敷砂模型に落体を鉛直自由落下させる実験を実施した。幅 400mm、奥行 300mm、高さ 50、100mm の砂層を用いた。試料には、豊浦砂と黒色に着色した豊浦砂を互層にした敷砂模型を作製した。各層の厚さを 10mm とし、落体直下位置 (中央断面) には鉛直方向に黒色の豊浦砂 (直径 10mm の円柱状砂層) を 20 か所敷き詰め、敷砂内部の変形挙動を可視化できるようにメッシュ状の敷砂模型を作製し (図-13)、変形の分布を算出できるようにした。このとき、豊浦砂の含水比は 7% とした。

落下高さ  $h=400\text{mm}$ 、相対層厚  $T/D=0.5$ 、落体形状が球体 (直径 100mm、質量 4.0kg) としている。ここでは、

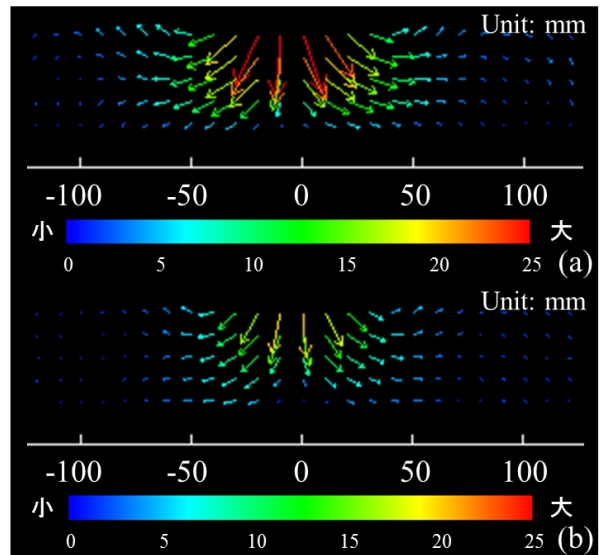


図-16 堆積層の変位ベクトル分布  
(a) 緩  $D_r=15\%$ , (b) 密  $D_r=50\%$

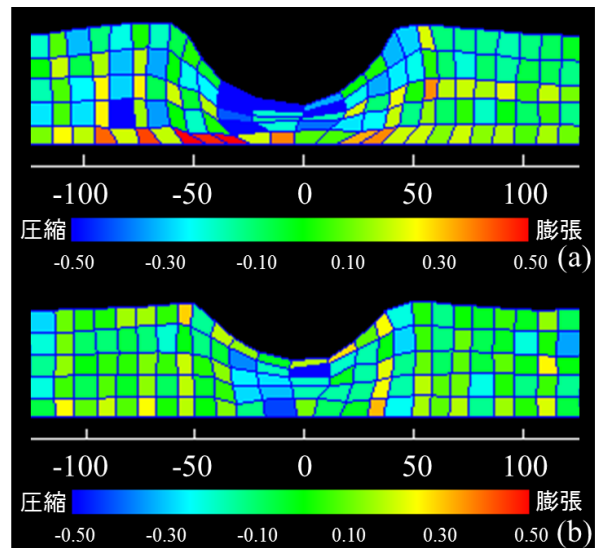


図-17 堆積層の体積ひずみ分布  
(a) 緩  $D_r=15\%$ , (b) 密  $D_r=50\%$

相対密度を変えた  $D_r=15$  と  $D_r=50\%$  の 2 ケースについて考察する。

##### 4.2 変位ベクトル及び体積ひずみの算出方法

落体落下後、落体を取り除き、敷砂の中央断面部分におけるメッシュの変形を見る。変形を読み取る際、敷砂作製時における初期状態が図-13 のようなメッシュ状であると仮定する。実験後の敷砂状態 (中央断面部分) の画像から、無着色の豊浦砂と黒色に着色した豊浦砂の格子の重心座標の位置から砂の移動量 (変位ベクトル) を算出する。また、格子の頂点部分 (図-14 の緑色破線の丸印) からそれぞれ座標を取得し、初期状態と落体落下後における格子の密度 (体積) から密度変化 (体積ひずみ) を算出する。体積ひずみは初期状態に比べ、膨張した領域は正となり、圧縮した領域は負となる。

### 4.3 実験結果及び考察

異なる相対密度 ( $D_r=15, 50\%$ ) における, 落体落下後の中央断面図, 変位ベクトル分布, 体積ひずみ分布をそれぞれ図-15~17 に示す. ここで, 変位ベクトル及び体積ひずみは初期状態と落体落下後のメッシュの移動量, 変形量から算出している. 落体の貫入量は緩い層では 33mm, 密な層では 24mm となる.

図-16 より, 密な層よりも緩い層の方が鉛直・水平方向ともに変位量が大きいことが分かる. 敷砂緩衝材の初期相対密度は貫入量だけでなく内部の変位量にも影響を及ぼすことを示した.

また, 図-17 体積ひずみより, 大型実験と同様に, 落体直下の表層部分では青色の膨張領域が存在することを明らかにした. 落体直下が緩む原因に, 低拘束圧下では緩い砂でも密な砂としての挙動を示すことが挙げられる. 密な砂は, せん断力を受けるとダイレイタンスを生じて緩むため, 落体直下の表層付近では膨張領域が形成されたものと考えられる. 一方, 緩い層では底面境界付近に赤色の圧縮領域が形成されることが分かる. これは, 緩い層の方が貫入量は大きく, 底面境界付近の砂は底面摩擦の影響で移動が拘束されやすいため, 圧縮領域が形成されたものと考えられる.

### 5. 結論

本論文では, 実験装置, 実験試料などがそれぞれ異なるが, 模型実験によって, 敷砂緩衝材の密度変化, 応力分布, ひずみ分布を測定し, 敷砂緩衝材の変形挙動について検討した. 得られた主な結果は以下の通りである.

- 1) 大型実験より, 初期相対密度が高い方が, 衝撃力の最大値が大きく, 衝撃力の継続時間は短くなり, ラーメの定数の高い材料となることが確かめられた. 一方, 地盤密度試験から, 重錘落下後の敷砂緩衝材が緩むケースがあることが明らかになった.
- 2) 緩衝材底面の応力分布は, 感圧シートを用いることで可視化でき, 画像解析を併用することで簡単に数値化することができた. 今後, 土圧計とのキャリブレーションによって定量化する. 初期相対密度の増大とともに応力の最大値は大きくなり, 応力の伝達範囲が広域化することが分かった.
- 3) 緩衝材内部の変形挙動に着目した実験では, 敷砂をメッシュ状にし敷砂内部の変形を可視化することで, 落体直下では膨張領域と圧縮領域が混在し, 敷砂のような薄層の地盤においても密度変化の分布が局所化することを明らかにした.

今後は, 荷重計と上述した測定方法との併用, 実験と数値解析の相互補完により敷砂全体の挙動を関連付けることで敷砂の衝撃変形メカニズム解明に貢献したい.

### 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.

### 参考文献

- 1) 古賀泰之, 佐々木康: 敷砂上の落石の衝突現象に関する考察, 土木学会論文集, Vol.346/III-1, pp.27-35, 1984.
- 2) 吉田 博, 榎谷 浩, 鈴木哲次: 敷砂上の落石の衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.352/III-2, pp.61-70, 1984.
- 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) 河原荘一郎, 室達朗, 菊田裕樹, 尾崎康隆: 重錘落下による豊浦差の衝撃応答に及ぼす密度の影響, 第 52 回土木学会中国支部研究発表会概要集, pp.391-392, 2000.
- 5) 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.
- 6) 山口悟, 木幡行宏, 小室雅人, 内藤直人, 岸徳光: 敷砂あるいは碎石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.60A, 2014.
- 7) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 西弘明, 栗橋祐介: 重錘衝突を受ける敷砂・碎石緩衝材の密度変化, 平成 25 年土木学会北海道支部論文報告集, Vol.70, A-26, 2014.
- 8) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- 9) 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, No.5, pp.499-505, 2010.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.