

異なる地盤条件における敷砂緩衝材の衝撃力波形形成メカニズム (Impact Force Waveform Formation Mechanism of Sand Cushion under Different Ground Conditions)

松尾和茂¹, 前田健一², 堀耕輔³, 峯祐貴⁴, 川瀬良司⁵

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address 30415081@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

3 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻

4 名古屋工業大学・都市社会工学科

5 構研エンジニアリング

概 要

落石対策工の一つであるロックシェッドの頂版上には地盤材料を用いた敷砂緩衝材が設置されている。敷砂緩衝材に落石が衝突する現象は非常に複雑であり未だ現象の解明には至っていない。そのため、敷砂緩衝材の衝撃力緩衝メカニズムを解明し、耐衝撃性能を適切に評価可能となれば、ロックシェッドの長寿命化にも繋がる。本稿では、敷砂緩衝材の衝撃力緩衝メカニズムの理解を深めるため、地盤材料や相対密度を変えた模型実験を実施し、落体衝撃力、落体貫入量波形及び緩衝層の内部挙動に着目し考察した。その結果、地盤材料の粒径を大きくすることにより、地盤材料が相対的に硬くなり、落体は貫入した後反発し、衝撃力波形に2波目が生じない場合があることが分かった。また、相対密度が低いケースでは局所的な変形が生じるのに対し、相対密度が高いケースでは全体的な変形が生じ、時間の経過に従って砂の動きが均一化することが分かった。

キーワード：落石、敷砂緩衝材、衝撃力波形

1. はじめに

近年、土木構造物への性能設計への移行が急務とされている。落石対策工の一つであるロックシェッドもその例外ではない。ロックシェッドの頂版上には、落石が衝突した場合の構造物の損傷抑制を目的として高緩衝性能を有する敷砂などの土の緩衝材が設置される。ロックシェッドの性能設計を考える上では、土の緩衝材の設計合理化も考える必要があり、土の緩衝材の衝撃力緩衝メカニズムの解明が必要不可欠である。

しかし、土の緩衝材の衝撃力緩衝性能に関する研究は従来から実施されているが、その内部の変形挙動と衝撃力緩衝効果の関係に着目した研究はあまり行われていない。そのため、衝撃力緩衝メカニズムに関して未解明の点が多い。

そこで本研究では、小型模型実験を実施し、土の緩衝材の内部の変形挙動を計測することで、衝撃力緩衝メカニズムを検討した。一般に敷砂緩衝材内部の変形挙動は、敷砂緩衝材の粒子特性や密度に強く依存すると考えられている。そこで、まず異なる地盤材料を用いて模型実験を実施し、緩衝材内部の砂の移動速度を計測し、衝撃力波形と絡めて考察を行った。次に、砂の相対密度を変化させて実験

を行い、緩衝材内部における、各時刻の砂の動き（速度ベクトル）、体積ひずみ速度を算出し、これらを合わせて考察を行った。

2. 異なる地盤材料が緩衝材内部の挙動及び衝撃力波形に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1) 実験装置概要

本実験では、図1に示す幅800mm、高さ120mmのアクリル製土層に図2に示す粒度分布の砂、碎石を用いて、層厚100mm、相対密度50%の緩衝層を作成した。実験は質量3.42kg、幅100mmの落体を高さ500mmから鉛直自由落下させて実施している。

(2) 測定方法

本実験での測定項目は落体衝撃力、落体貫入量、落体直下の砂の鉛直方向速度の3つである。落体衝撃力は、落体上部に設置した衝撃加速度計から得た測定値と落体質量の積として算出した。落体貫入量は、落体の落下の様子を高速度カメラで撮影した画像より求めた。砂の鉛直方向速度は、緩衝材内部の砂の移動を高速度カメラで撮影し、画

像を PIV 解析より求めた。

2.2 実験結果および考察

(1) 落体衝撃力、落体貫入量波形及びそれらの関係

模型実験より得られた落体衝撃力、貫入量関係を図 3，落体衝撃力及び貫入量波形を図 4 に示す。図 3 に着目すると、砂のケースでは衝撃力が最大値を迎え減少に転じて、落体の貫入が続いていることが分かる。一方、碎石のケースでは、衝撃力が最大値を迎え減少に転じると、経路履歴を戻るように貫入も減少している（落体が押し戻されるような挙動を示す）ことが分かる。落体衝撃力、貫入量関係を応力、ひずみ関係のように捉え、砂の挙動は塑性的、碎石の挙動は弾性的となっている。このことから、砂のケースは碎石のケースよりも塑性変形が進行すると考えられる。

図 4 の衝撃力波形に着目すると、砂のケースでは凡そ 4ms で最大値を迎えた後 7ms 程度まで減少し、その後再び衝撃力が増加している（本稿では、これを 2 波目と称す）。しかし、碎石のケースでは最大値を迎えた後再び衝撃力が増加することはなかった。既往の解析結果⁹⁾では、粒状体に一定単調載荷すると、載荷速度にかかわらず底面からの反射波の影響が衝撃力波形に現れることが分かっている。しかし、本実験での碎石のケースでは反射波の影響である 2 波目は現れなかった。この原因を、それぞれのケースの落体直下の砂の鉛直方向移動速度に着目しながら考察を行う。

(2) 土粒子の鉛直方向速度

落体直下の土粒子の鉛直方向速度を図 5 に示す。なお、この速度は鉛直上向きが正であり、落体の貫入終了時刻をそれぞれの色の破線で示した。また、図中のプロットは鉛直上向きの速度の最大値を示し、本論文ではこの時刻を反射波到達時と定義する。すると、反射波到達時において、砂のケースでは落体の貫入が続いているのに対し、碎石のケースでは貫入が終了していることがわかる。

反射波到達時の落体の貫入挙動をより詳細に把握するため、高速度カメラより撮影された落体の変位を調べた。すると、2 波目が生じなかった碎石のケースでは、落体の緩衝層衝突後、落体が緩衝材から反発していることが分かった。

(3) 土粒子から見た落体の相対速度

反発の程度を定量的に表すため、落体直下の土粒子から見た落体の相対速度 V (=落体の貫入速度 - 土粒子の鉛直方向速度) を求め図 6 に示した。なおこの速度は鉛直下向きを正とする。また、図中に落体の貫入が終了する時刻を破線で示す。土粒子から見た落体の相対速度が正であるとき、落体は緩衝材に貫入するため、落体衝撃力が発生する。一方、相対速度が負であるとき、落体は緩衝材から反発するため、落体衝撃力は発生しない。衝撃力波形に 2 波目が生じた砂のケースに着目すると、落体衝突後、相対速度は徐々に減衰して行き、貫入終了時刻にはほぼ 0 となっている。このことから、落体は最大貫入時以降、反発せず

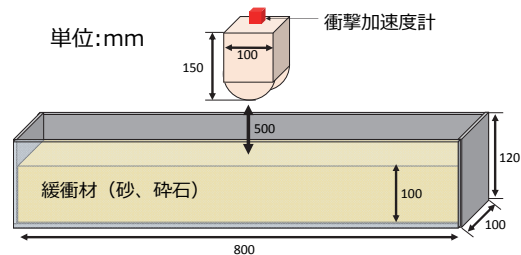


図 1 実験装置概要

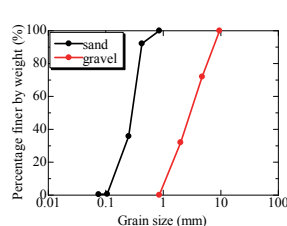


図 2 試料の粒度分布

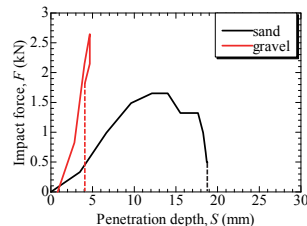


図 3 衝撃力・貫入量関係

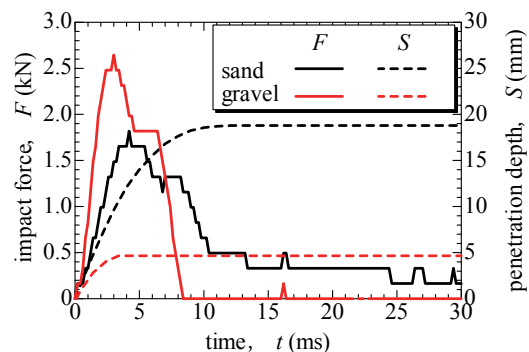


図 4 衝撃力・貫入量波形

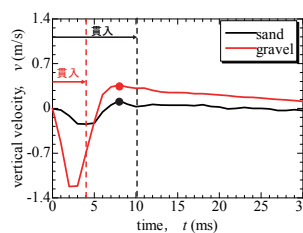


図 5 土粒子の鉛直方向速度

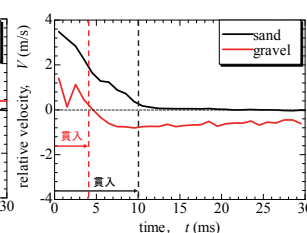


図 6 土粒子から見た落体の相対速度

止しているといえる。また、2 波目が生じなかった碎石のケースに着目すると、貫入終了時刻で相対速度はほぼ 0 となるが、その後、負に転じている。このことから、落体は最大貫入時以降、緩衝層から反発しているといえる。

これらのことから、碎石のケースにおいて衝撃力波形の 2 波目が現れなかった原因として、地盤材料の粒径が大きいことにより、地盤材料が相対的に硬くなり、貫入が早期に終了し、反射波が到達した時刻に落体が緩衝層から反発しており、その影響を受けなかったため、反射波の影響が衝撃力波形に現れなかったためであると考えられる。図 6 に着目すると、衝突直後 (0~2ms) の碎石の相対速度が急

激に低下した後、再び増加している。碎石のケースは貫入量が小さいこと、貫入に要する時間が短いことに加え、この相対速度の急激な低下が衝突瞬間の接触面強度が砂より相対的に硬い事を示していると考えられる。

3. 異なる相対密度が敷砂緩衝材内部の砂の動き、体積ひずみ速度に及ぼす影響

3.1 実験概要

(1) 実験装置概要

本実験では、図2に示す粒度分布の砂を用いて、相対密度が15%、50%、80%の3種類の緩衝層をそれぞれ作成した。なお、用いた土層、落体は第二章のものと同様であり、落下高さは500mmである。

(2) 測定方法

本実験での測定項目は落体衝撃力、落体貫入量、各時刻における砂の動き（速度ベクトル）、各時刻間で生じた砂の体積ひずみ（体積ひずみ速度）の4つである。落体衝撃力、落体貫入量の測定方法は第二章と同様である。各時刻の速度ベクトルは、緩衝材内部の砂の移動を高速度カメラで撮影し、画像をPIV解析より求めた。また、体積ひずみ速度は、図7に示すように各時刻における、隣接する4つのメッシュの速度ベクトルの始点同士を結んでできた長方形の面積と、速度ベクトルの終点同士を結んでできた四角形の面積から算出した。

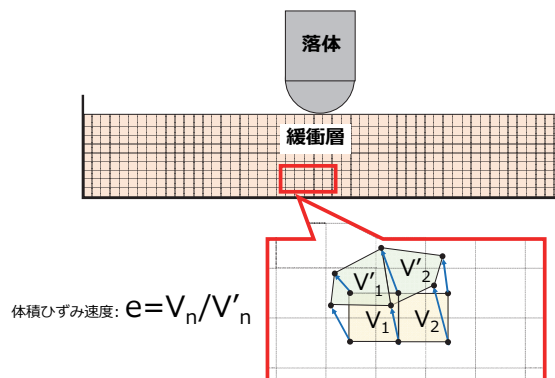


図7 体積ひずみ速度の算出方法

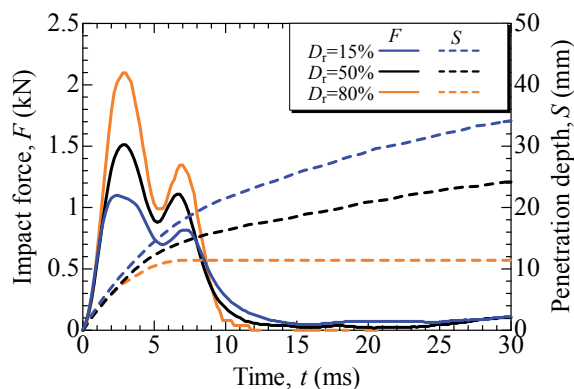


図8 衝撃力・貫入量波形

3.2 実験結果および考察

(1) 落体衝撃力、落体貫入量波形

模型実験より得られた落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形を図8に示す。落体衝撃力の最大値は大きい順に $D_f=80\%$ (2.0kN), $D_f=50\%$ (1.5kN), $D_f=15\%$ (1.1kN) となった。また、落体貫入量は大きい順に $D_f=15\%$ (34mm), $D_f=50\%$ (24mm), $D_f=80\%$ (11mm) となった。相対密度が大きいほど土粒子の移動が拘束されているため、落体の貫入が抑制され、最大落体衝撃力が大きくなったと考えられる。

(2) 緩衝材内部の砂の動き、体積ひずみ速度

図9(a)(b)～図11(a)(b)にそれぞれ相対密度15%、50%、80%の各時刻における速度ベクトル図と体積ひずみ速度図を示す。体積ひずみ速度図の中の赤で示した部分が圧縮、青で示した部分が膨張を表している。各ケースにおける速度ベクトル図に着目すると、相対密度が15%のケースでは局所的な変形が生じているが、相対密度が50%、80%と大きくなるに従ってより全体的な変形が生じていることがわかる。相対密度が低いケースは、変形が段階的に、且つ局所的に起こる局所せん断（支持力問題で主に緩な地盤に適用される）に似た挙動を示すものと考えられる。一方で相対密度が高いケースでは、変形が急速に、且つ全体的に起こる全般せん断（支持力問題で主に密な地盤に適用される）に似た挙動を示すものと考えられる。

体積ひずみ速度に着目すると、いずれのケースにおいても、落体の緩衝材衝突後、まず衝突地点を中心とした、円

状の圧縮波が発生し、遅れて円状の膨張波が発生している。この結果は、既往の解析²⁾における、「軽くて速い载荷」の体積ひずみの挙動と非常によく似ている。また、相対密度15%のケースでは衝突直後から10msにかけてひずみ速度があまり減衰していないのに対し、相対密度が50%、80%と大きくなるに従ってひずみ速度の減衰が著しくなっていることが分かる。特に相対密度80%に着目すると、時刻9～10msでは速度ベクトルがはっきり見られるのにもかかわらず、ひずみ速度はほとんど生じていない。これは、時間の経過に従って各場所間での速度差がなくなり、砂の動きが均一化していることを示している。これは、相対密度が高いケースでは全般せん断に似た挙動となるため、砂が一体となって動いたためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では、土の緩衝材の衝撃力緩衝メカニズムについて調べるため、地盤材料と相対密度を変化させて小型模型実験を実施した。そして、地盤材料を変化させた実験では、緩衝材内部の砂の移動速度を計測し、相対密度を変化させた実験では、砂の速度ベクトル、体積ひずみ速度を算出し考察を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 地盤材料の粒径を大きくすることにより、地盤材料が相対的に硬くなり、貫入が早期に終了する。そして反射波が到達した時刻に落体が緩衝層から反発してお

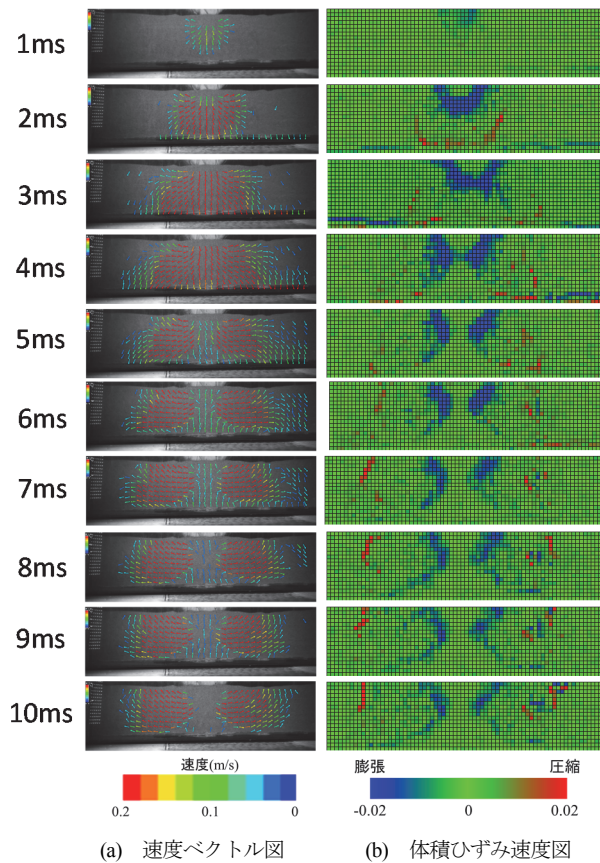


図 9 $D_f=15\%$

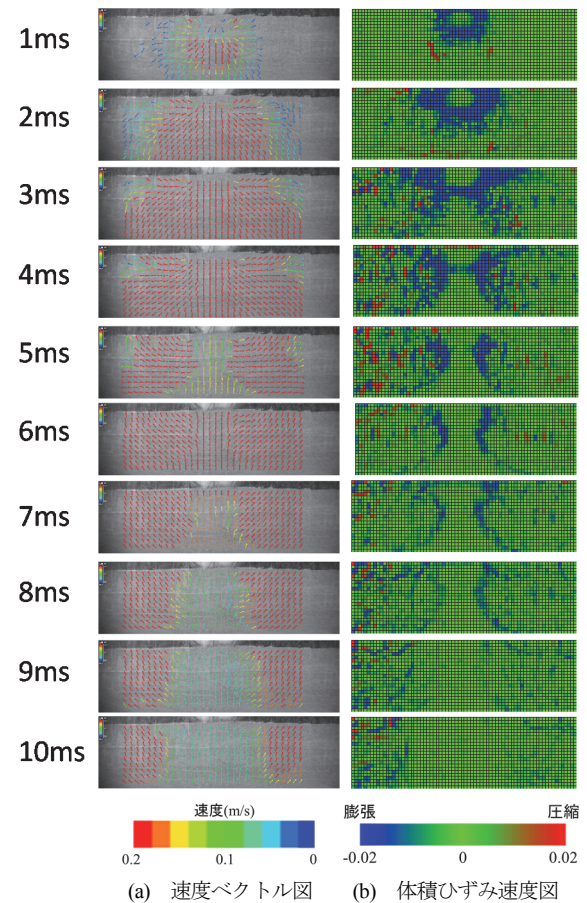


図 11 $D_f=80\%$

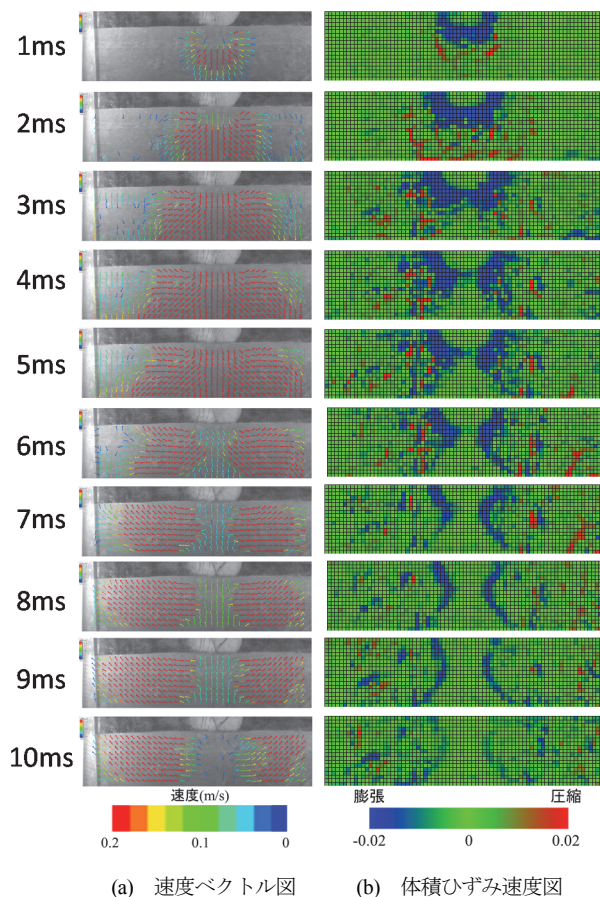


図 10 $D_f=50\%$

り、その影響を受けないため、衝撃力波形に 2 波目が生じない場合がある。

- 2) 相対密度が小さいケースでは局所的な変形が生じるのに対し、相対密度が大きいケースでは、全体的な変形が生じている。これは、相対密度が低いケースでは局所せん断に似た挙動を示すのに対し、相対密度が大きいケースでは全般せん断に似た挙動を示すためだと考えられる。
- 3) 相対密度が大きいケースでは時間の経過に従って砂の動きが均一化している。これは、相対密度が高いケースでは全般せん断に似た挙動となるため、砂が一体となって動いたためであると考えられる。

今後は、緩衝材底面に作用する衝撃力を時刻歴で計測する仕組みを整え、緩衝材内部の変形挙動と合わせて考察することで、敷砂緩衝材の衝撃力緩衝メカニズム解明を目指す。

参考文献

- 1) 内藤直人, 前田健一, 今野久志, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の载荷速度依存性に関する DEM 解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, I_557-I_566, 2015.
- 2) 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動に関する DEM 解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 70, I_495-I_506, 2014.