

異なる地盤条件における敷砂緩衝材の 内部変形挙動に着目した衝撃力緩衝メカニズム

Impact force buffering mechanism focusing on internal deformation behavior
of sand cushion materials under different ground conditions

峯祐貴*, 前田健一**, 松尾和茂*, 杉山直優***, 高橋浩司****, 牛渡裕二*****
Masaki Mine, Kenichi Maeda, Kazusige Matsuo, Naomasa Sugiyama, Koji Takahashi, Yuji Ushiwatari

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

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

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

****構研エンジニアリング, 防災施設部技師長 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1 番 1 号)

*****博 (工), 構研エンジニアリング, 防災施設部技師長 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1 番 1 号)

Key Words: rockfall, sand cushion material, internal behavior visualized experiment

キーワード: 落石, 敷砂緩衝材, 内部挙動可視化実験

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落石対策インフラを含む社会基盤施設は大更新期を迎え始めており, その対応が必要とされている。

一方, 近年異常気象や斜面の劣化進行等による落石災害も発生しており, 落石対策工の合理的な設計手法の確立が急務とされている。落石による被害を防ぐための落石防護工の一つであるロックシェッド頂版上には, 落石が衝突した時の構造物の損傷抑制を目的として地盤材料を用いた敷砂緩衝材が設置される¹⁾³⁾。緩衝材に使用される地盤材料の種類は地域によって異なっている。我が国では緩衝材に砂を用いることが一般的に推奨されているが⁴⁾, スイス等の切り立った山岳地帯に位置する国では碎石のような礫質土が用いられている⁵⁾。

このように, 緩衝材は想定される外力や地域の特徴などの状況に合わせて設計・設置されており, 緩衝材を合理的に設計・設置することでより効率的な落石対策を行うことができると考えられる。

緩衝材の設計を合理化するためには, 敷砂緩衝材の衝撃緩衝メカニズムの解明が必要不可欠である。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現象が非常に複雑であるため, 解明されていない点も多い。特に, 落石衝突時の緩衝材内部の変形挙動は実験での計測が難しいため数値解析による考察のみにとどまっている。また, 既往の研究⁶⁾⁸⁾では, 敷砂緩衝材内部の

変形挙動は, 使用する地盤材料の粒径などの粒子特性や敷砂緩衝材の相対密度や層厚, 地盤材料の組み合わせに強く依存すると考えられている⁹⁾⁸⁾。そこで本研究では地盤材料や緩衝層幅, 相対密度を変化させて実験を行い, 緩衝材の内部挙動を計測し, 考察した。まず円筒型土層で実験を行い, 落体衝撃力, 落体貫入量, 底面伝達応力を算出し, 考察した。次に内部の変形を計測できるアクリル土層で実験を行い, 落体衝撃力, 落体貫入量, 緩衝層内部の変形挙動を計測した。そして, 落体衝撃力と落体貫入量の傾向が円筒型土層のケースと一致するかを確認した後に, 緩衝総内部の変形挙動に着目し, 考察を行った。

2. 異なる地盤材料, 相対密度が衝撃力波形に及ぼす影響 (円筒型土層を用いた実験)

2.1 実験概要

(1) 実験装置概要

本実験では, 図-1 に示す直径 400mm, 高さ 250mm の鋼製円筒土層に図-2 に示す粒度分布の試料を用いて, 相対密度を変えて厚さ 100mm の緩衝層を作成した。また, 緩衝層は砂と碎石の 2 種類の地盤材料を使用し, 相対密度を 15%, 50%, 80% と変化させて作成した。

実験は質量 4kg, 直径 100mm の球形落体を高さ 1000mm から鉛直自由落下させて実施した。

(2) 測定方法

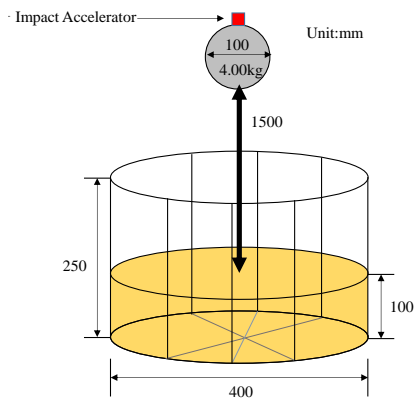


図-1 模型実験装置

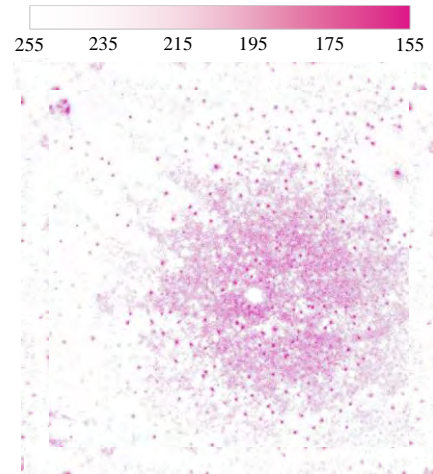


図-3 感圧シート

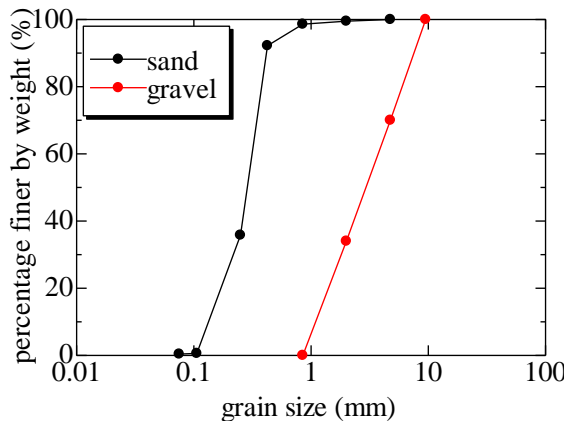


図-2 実験試料の粒度分布

本実験での測定項目は落体衝撃力、落体貫入量、底面応力分布の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。また落体貫入量は、落体の落下の様子を高速カメラで撮影した画像より求めた。底面応力分布は、既往の研究⁹⁾¹⁰⁾でも用いた感圧シートを用いて計測した。この感圧シートは力が作用すると図-3のように反応して色が付き、力の大きさを色の濃さ(明度)で表すものである。桃色(明度155の値)が最も濃い色素であり、作用した力が最も大きいことを示し、白色(明度255の値)は力が加わっていないことを示している。この感圧シートの落下中心から図-4上段に示す同心円状の11個の分割領域における明度の平均値を求め、図-4下段の平均明度の分布図を作成した。この分布図の横軸は落体落下中心からの距離であり、同心円状の分割領域の外側の半径に相当する。縦軸は平均明度である。

2.2 実験結果及び考察

(1) 最大落体衝撃力

表-1に実施したケースの最大落体衝撃力をまとめた表を示す。ただし、表中の最大落体衝撃力の単位はkNである。

各ケースでの結果を比較すると、砂のケースでは、最

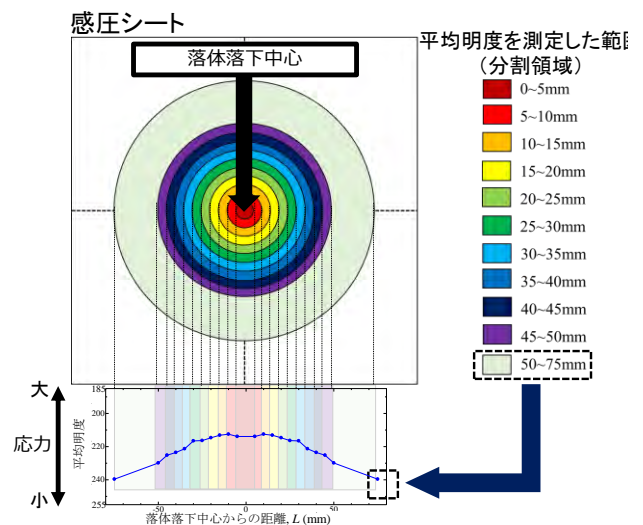


図-4 平均明度の分布図

表-1 各地盤条件での最大落体衝撃力

地盤材料	相対密度 D_r (%)		
	15	50	80
砂	1.7	2.4	4.5
碎石	2.9	2.5	4.8

大落体衝撃力が大きい順に $D_r=80\%$ 、 $D_r=50\%$ 、 $D_r=15\%$ となっている。このことから緩衝材に砂を使用する場合、緩衝層の相対密度が大きくなるほど最大落体衝撃力は大きくなると思われる。碎石のケースでは、最大落体衝撃力が大きい順に $D_r=80\%$ 、 $D_r=15\%$ 、 $D_r=50\%$ となり、砂のように相対密度が大きくなるほど最大落体衝撃力が大きくなる、という傾向とは異なる結果となった。

砂のケースと碎石のケースで最大落体衝撃力を比較すると、すべての相対密度で碎石のケースの方が大きくな

っているが、相対密度が大きいほど最大落体衝撃力の差は小さくなっている。碎石のケースで砂のケースよりも落体衝撃力が大きくなったのは、碎石の粒径が砂に比べて大きいことにより、同じ相対密度で比較した場合、碎石の方がより土粒子の移動が拘束されたためだと考えられる。また、相対密度が大きくなると砂のケースでも土粒子の移動が拘束されるため、最大落体衝撃力の差が小さくなったと考えられる。

(2) 落体衝撃力および落体貫入量の時刻歴波形

図-5 にそれぞれの相対密度における砂のケースと碎石のケースの落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形を示す。

それぞれの相対密度で砂のケースと碎石のケースの比較を行うと、 $D_r=15\%$ のケースでは、砂よりも碎石の方が落体衝撃力波形の立ち上がりが早い。しかし、 $D_r=80\%$ のケースでは砂と碎石の間で落体衝撃力波形の立ち上がりはほぼ同じとなった。また、 $D_r=50\%$ のケースでは、碎石よりも砂の方が落体衝撃力波形の立ち上がりが早くなる結果となった。このことから、相対密度が低いケースでは粒径が大きな地盤材料を使用したほうが落体衝突後により急激に衝撃力が増加すると考えられる。

次に、落体衝撃力がピークを過ぎて一度減少した後再度増加している2波目に着目して考察を行う。

図-5の落体衝撃力波形に着目すると、相対密度に関わらず、砂のケースでは2波目が発生し、碎石のケースでは発生していないこの結果を踏まえて落体衝撃力波形の2波目について考察をするにあたり、過去に2波目の発生原因である反射波の影響について考察した内藤ら^{11)・12)}の解析の事例について紹介する。

内藤らは、敷砂緩衝材に重錘を鉛直自由落下させた実験を対象に二次元個別要素法解析を実施した。緩衝層は、幅1m、層厚0.9mの緩詰め状態とした。そして、幅1mの四角形落体を一定速度単調載荷させ、落体に作用する接触力の総和を落体衝撃力として計測した。その結果、あらゆる速度で一定速度単調載荷させても、ある貫入量までは落体衝撃力は一定値を示したが、ある貫入量を境に落体衝撃力が指数関数的に増加した。内藤らは緩衝材底面からの反射波が落体に作用し始める時刻における貫入量を境に落体衝撃力が増加することから、これは反射波の影響と結論付けている。

一定速度単調載荷で実施した解析では落体径と緩衝層幅が等しい条件でも反射波の影響がみられるのにもかかわらず、模型実験では反射波の影響である2波目が確認されなかった。このことから、2波目の有無は、反射波が落体に到達した時刻における貫入速度の有無に依存している可能性がある。2波目のピークが出る時刻(図-5中の黒矢印、 $D_r=15\% : t=10.2\text{ms}$ 、 $D_r=50\% : t=7.8\text{ms}$ 、 $D_r=80\% : t=6.8\text{ms}$)においてまだ貫入が進んでいるため、2波目が発生するのではないかと考えられる。一方で幅400mm土層の碎石のケースは落体の緩衝層衝突後、多少

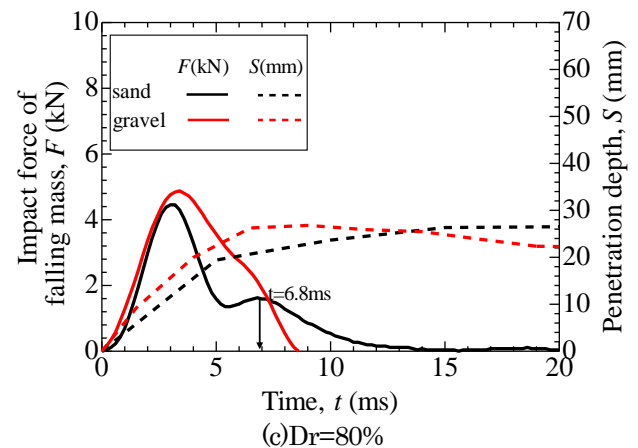
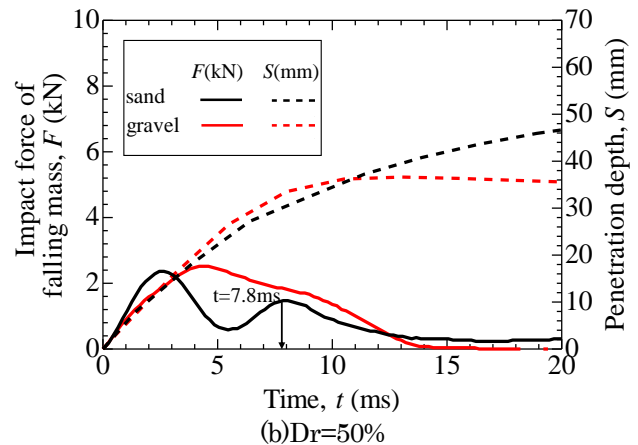
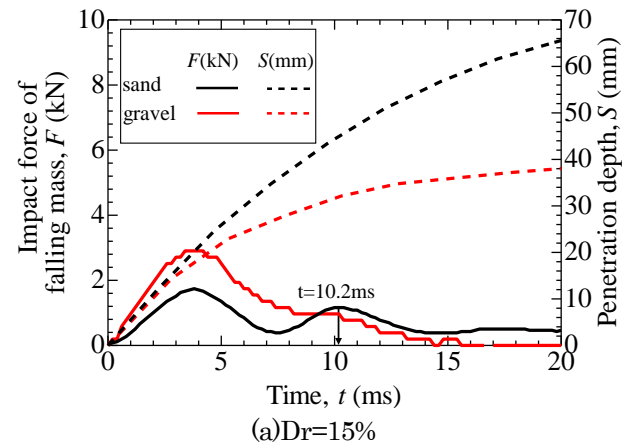


図-5 各ケースにおける落体衝撃力・落体貫入量の時刻歴波形

貫入が進むが、反射波が落体に作用するところには落体は静止状態となるため、2波目が発生しないと考えられる。

(3) 底面応力

図-6に砂の相対密度15%、50%、80%のケースにおける、感圧シートから求めた底面応力分布を示す。なお図-6のx軸は落下中心からの半径である。底面に伝達した応力は、落体衝撃力と同様、相対密度が大きいほど大きくなる結果となった。

底面応力分布の形状に着目すると、相対密度15%のケー

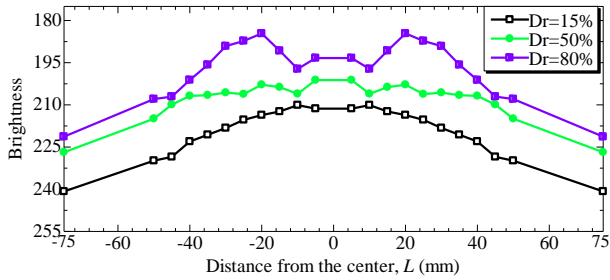


図-6 各ケースにおける底面応力分布

スは全体的に山なりになっているのが分かる。相対密度50%のケースは、落下中心から75mmの場所から40mmの場所までの区間では落下中心に近づくにつれ、作用した応力が大きくなっている。しかし落下中心から40mmの場所よりも中心に近い範囲では、落下中心からの距離に関わらず応力がほぼ一定であることが分かる。相対密度80%のケースでは落下中心から75mmの場所から20mmの場所までの区間では落下中心に近づくにつれ、作用した応力が大きくなっている。しかし落下中心から20mmの場所よりも中心に近い範囲では、落下中心に近づくにしたがって作用した応力が小さくなる結果となった。

3. 異なる地盤材料が衝撃力波形に及ぼす影響 (可視化土槽を用いた実験)

3.1 実験概要

(1) 実験装置概要

本実験では、図-7に示す幅800mm、高さ120mmの亚克力製土層に層厚100mm、相対密度50%の緩衝層を作成し、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験を実施した。粒径の違いと緩衝層幅の違いが衝撃力波形に及ぼす影響を調べるため、図-2に示す粒度分布の砂、碎石を用いて幅100mm、800mmの緩衝層を作成し、実験を実施した。

(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、落体貫入量の測定方法は第二章と同様である。砂の鉛直方向速度は、緩衝材内部の砂の移動を高速カメラで撮影し、得られた画像をPIV解析にかけることにより求めた。

3.2 実験結果及び考察

(1) 落体衝撃力・落体貫入量の関係

模型実験より得られた落体衝撃力・貫入量関係を図-8、落体衝撃力及び貫入量波形を図-9に示す。図-8に着目すると、砂のケースでは緩衝層幅に関わらず、衝撃力が最大値を迎え減少に転じても、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

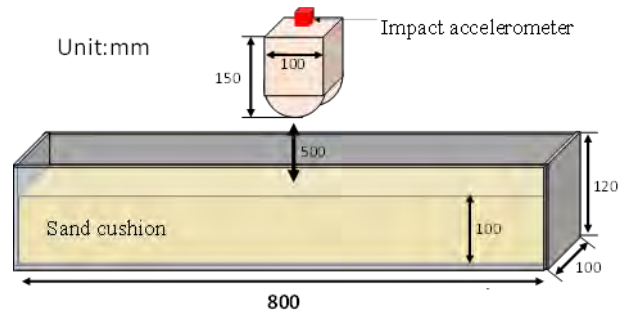


図-7 実験装置概要

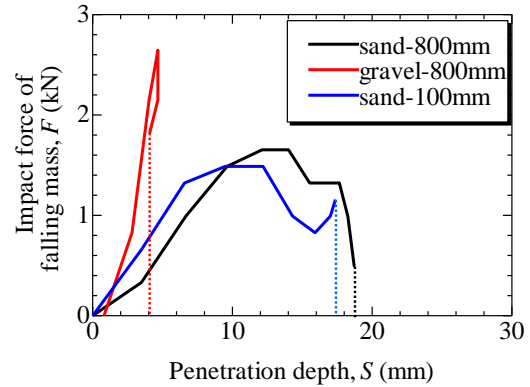


図-8 衝撃力・貫入量関係

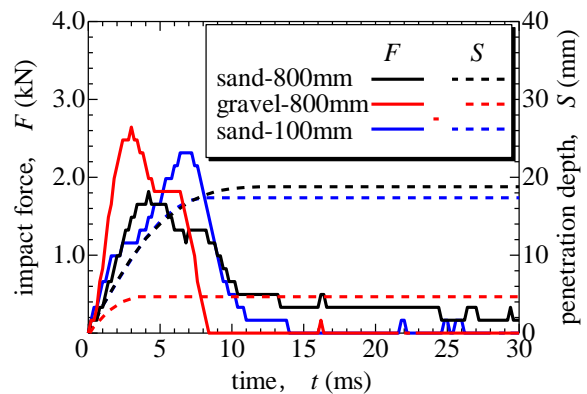


図-9 各ケースにおける落体衝撃力・落体貫入量の時刻歴波形 (可視化土槽)

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ると、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-9の落体衝撃力の時刻歴波形に着目すると、緩衝層幅800mmの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2波目が発生している。しかし、碎石のケースと緩衝層幅100mmの砂のケースでは最大値を迎えた後、2波目が発生することはなかった。著者らは本論文の第二章で2波目の有無は、反射波

が落体に到達した時刻における貫入速度の有無に依存しているという仮説を提唱した。本章では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い、この仮説を検証する。

(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-10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。グラフより、反射波到達時において、緩衝層幅 800mm の砂のケースでは落体の貫入が続いているのに対し、碎石のケースと緩衝層幅 100mm の砂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波目が発生しなかった碎石のケース、緩衝層幅 100mm の砂のケースでは、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) 土粒子と落体の相対速度

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 を求め図-11に示した。ただし、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波目が発生した緩衝層幅 800mm の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、反発せずに停止しているといえる。また、2波目が発生しなかった碎石のケースと緩衝層幅 100mm の砂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波目が発生し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。

落体が消費する力積の時刻歴波形を図-12に示す。まず、砂のケースと碎石のケースを比較すると、碎石の力積は砂の力積に比べて消費速度が早いことが分かる。さらに図-11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、この力積消費速度の早さと相対速度の急

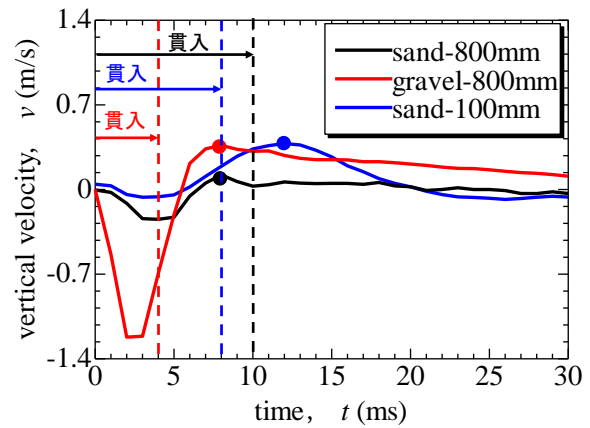


図-10 土粒子の鉛直方向速度

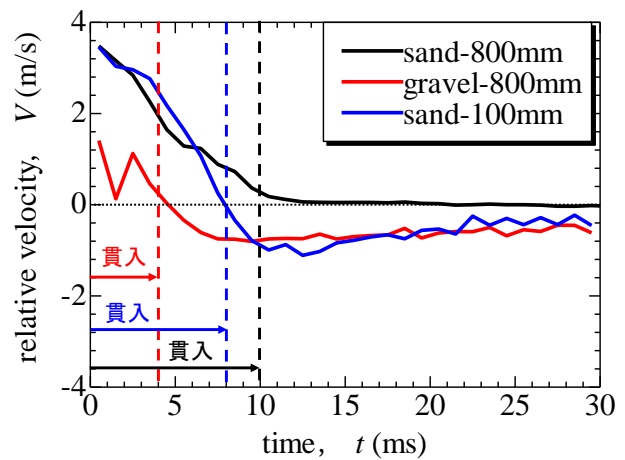


図-11 土粒子から見た落体の相対速度

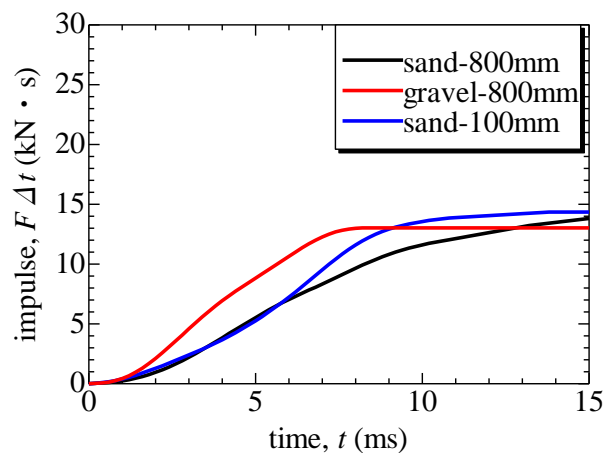


図-12 力積の時刻歴波形

激な低下が衝突した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。次に、緩衝層幅が 100mm, 800mm の砂のケースで比較する。力積の立ち上がりに着目すると、6ms までほとんど同じであるが、それ以降、幅 100mm のケースにおける力積の消費速度が大きくなっている。これは、地盤材料が同じであるため、

衝突直後の貫入挙動は同じであるが、幅 100mm のケースは徐々に緩衝材の変形が拘束されている影響が出始め、相対的に硬くなっていくことを示しているものと考えられる。

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、円筒型土層、準 2 次元の可視化土層を用いて地盤材料、緩衝層幅、相対密度を変化させ小型模型実験を実施した。そして、主に衝撃力波形に着目した考察を行った。さらに地盤材料、緩衝層幅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) 砂のケースでは、相対密度が大きくなるほど最大落体衝撃力は大きくなる。碎石のケースでは、相対密度が 80% のケースで最大衝撃力が最も高く、次いで 15%、50% となる。これは、相対密度が大きくなると緩衝層が密になり相対的に硬くなるのが原因であると考えられる。
- 2) 相対密度が小さいケースでは、砂よりも碎石の方が最大落体衝撃力は大きな値を示し、相対密度が大きいケースでは砂と碎石の間で最大落体衝撃力はほぼ同じ値を示す。これは、粒径が大きな碎石の方が緩衝層が相対的に硬くなっているため、相対密度が低いケースでは碎石の方が最大落体衝撃力が大きくなっているが、相対密度が大きくなると砂でも緩衝層が相対的に硬くなることで、最大落体衝撃力の差が小さくなると考えられる。
- 3) 地盤材料に砂を使用したケースでは、緩衝層幅を狭くすると緩衝層の移動が制限されることで、相対的に硬くなり、落体衝撃力の 2 波目が発生しないと考えられる。
- 4) 地盤材料の粒径を大きくすると、緩衝層が相対的に硬くなり、貫入が早期に終了する。加えて、反射波が到達した時刻に落体が緩衝層から反発する場合がある。その際は、落体が反射波の影響を受けないため、衝撃力波形に 2 波目が生じなかったと考えられる。

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) 佐々木康, 古賀康之: 敷砂上の落石の衝撃力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 340 号, pp.127-137, 1983.
- 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, 第 352 号, pp.461-470, 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) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2018.
- 5) 山口悟, 木幡行弘, 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, pp.983-995, 2014.
- 6) 田中敬太, 前田健一, 内藤直人, 今野久志, 牛渡裕二, 川瀬良司: 地盤材料である砂と碎石を用いた互層緩衝構造の落石衝撃緩衝メカニズム, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1096-1106, 2017.03.
- 7) 田中敬太, 前田健一, 堀耕輔, 内藤直人, 川瀬良司: 異なる含水比と相対密度が敷砂緩衝材の緩衝性能に及ぼす影響, 平成 28 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.73, A-47, 北見市, 北見工業大学, 2017.02.04-05.
- 8) 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: 落石衝撃力に及ぼす敷砂緩衝材の底面境界剛性の影響に関する DEM 解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2, I_429-I_440, 2016.
- 9) 奥村勇太, 内藤直人, 前田健一, 西弘明, 山口悟, 川瀬良司: 落石衝突による敷砂緩衝材内の変形挙動, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.867-875, 2015.
- 10) 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 栗橋祐介, 川瀬良司, 今野久志: 伝達衝撃応力測定のための感圧シートの利用, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.72, A-12, 2016.
- 11) 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.
- 12) 内藤直人, 前田健一, 奥村勇太, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 高速载荷下における土を用いた緩衝材の载荷速度依存性に着目した耐衝撃挙動, 第 27 回中部地盤工学シンポジウム, 第 2 セッション 2-2, 2015.