

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

Effect of water content ratio and relative density on shock-absorbing characteristics of sand absorbing systems

名古屋工業大学 ○学生員 田中 敬大(Takahiro Tanaka)
 名古屋工業大学 学正員 堀 耕輔(Kosuke Hori)
 名古屋工業大学 正 員 前田 健一(Kenichi Maeda)
 名古屋工業大学 学正員 内藤 直人(Naoto Naito)
 構研エンジニアリング フェロー 川瀬 良司(Ryoji Kawase)

1. はじめに

我が国で多発する落石の対策工の一つにロックシェッドがある。ロックシェッドの屋根部分である頂版上には、落石が発生した場合に構造物の直接的な損傷を抑制する敷砂などの土の緩衝層が設置される。

落石対策便覧¹⁾によると、敷砂緩衝材の設置厚は 0.9m 以上もしくは落石直径を標準とするとあるが、緩衝層の含水比や相対密度といった地盤条件に関する詳細な指標は明記されていない。また、一般に地盤材料は含水比や相対密度が変化すると強度や変形特性が大きく異なることが知られている。よって、ロックシェッドを合理的に設計するためには含水比や相対密度が変化した場合における、落石衝撃力の緩衝性能を把握する必要がある。

そこで、本論文では地盤条件として、地盤の含水比と相対密度を変化させ、緩衝層に対する落石衝撃実験を実施する。

2. 実験概要

2.1 実験装置概要

実験試料には図-1 に示す粒度分布の資料を用いた。図-2 の直径 300mm もしくは 400mm、高さ 250mm の鋼製円筒土層に砂の緩衝層を設置した。この緩衝層の地盤条件に関しては後述する。

実験は質量 4kg、直径 100mm の球形落体を高さ 1000mm、もしくは 1500mm から鉛直自由落下させて実施している。

2.2 測定方法

本実験で測定したのは落体衝撃力と落体貫入量、底面に伝達する衝撃応力の分布の 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度カメラで撮影した画像より求めた。緩衝層底面に伝達する衝撃応力の分布は感圧シート²⁾を 200mm 正方に加工し図-2 のように容器底面に設置し測定した。感圧シートは富士フィルム社製プレスケールで圧力の測定範囲が 0.05~0.2MPa のものを使用した。この感圧シートは力が作用すると図-3(a)のように反応して色が付き、力の大小を色の濃さ(明度)で表すものである。155 の値(桃)が最も濃い色素であり、作用した力が最も大きく、255 の値(白)は力が加わっていないことを示している。

さらに、この感圧シートを画像解析し得られた明度をカラ

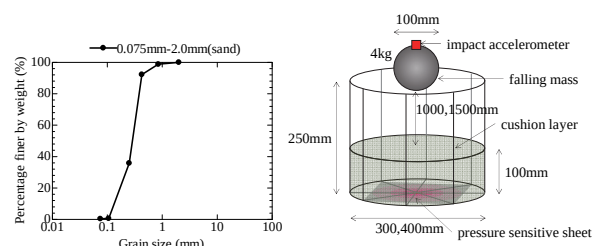


図-1 試料の粒度分布

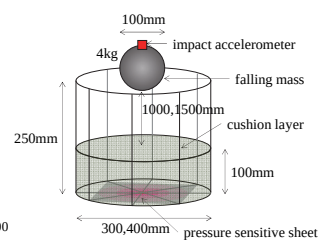
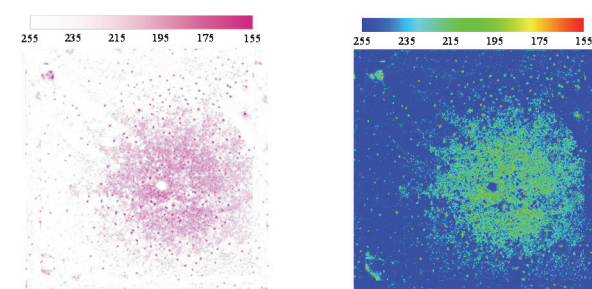


図-2 模型実験装置



(a)実験後の感圧シートの一例

(b)コンター図

図-3 感圧シート

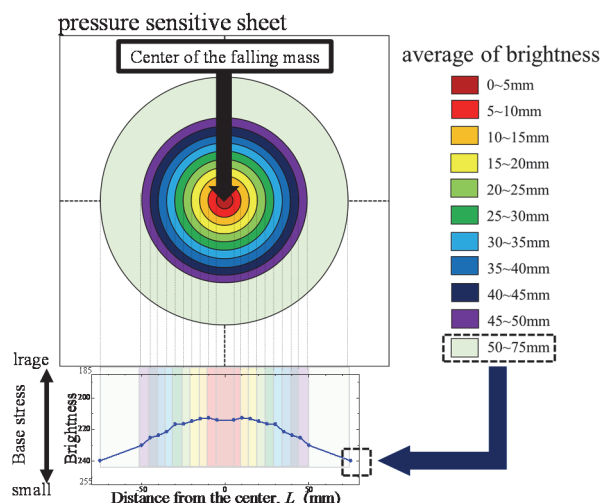


図-4 平均明度の分布図

ースケールに対応させると、図-3(b)のようなコンター図が作成できる。明度 155 は赤色、明度 255 は青で表される。この

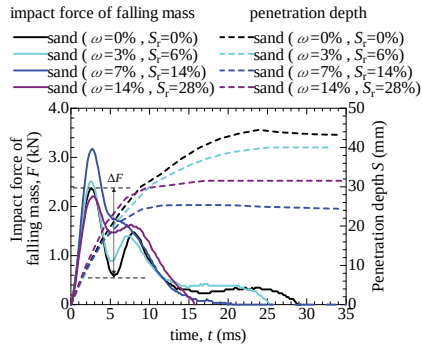


図-5 落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形
(含水比の影響)

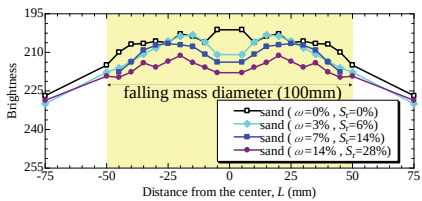


図-6 平均明度の分布図(含水比の影響)

コンター図により、底面に伝達した衝撃応力の程度と分布を視覚的に確認できる。さらに緩衝層底面に伝達する衝撃応力の分布を比較するために、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。縦軸は明度の平均値である。

3. 緩衝層の緩衝性能に及ぼす含水比の影響

3.1 概要

地盤条件として、緩衝層の含水比を変化させた場合における落石衝撃力の緩衝効果を調べるために、緩衝層の含水比 ω がそれぞれ $\omega=0\%$ (飽和度 $S_r=0\%$)、 3% ($S_r=6\%$)、 7% ($S_r=14\%$)、 14% ($S_r=28\%$) となるように作成した。相対密度は全て $D_r=50\%$ である。なお、図-2 のように鋼製円筒土層の直径は 400mm、緩衝層は層厚を 100mm に設定し、3 層に分けて締固めを行った。落下高さは 1500mm とした。

3.2 落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形

図-5 に $t=0\sim 35\text{ms}$ における落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形を示す。

落体衝撃力の最大値は大きい順に $\omega=7\%$ (3.2kN)、 $\omega=3\%$ (2.6kN)、 $\omega=0\%$ (2.4kN)、 $\omega=14\%$ (2.2kN)、となった。これより、含水比を高くすると落体衝撃力が高くなるわけではなく、ある含水比で最大値を迎える可能性が示された。

さらに、同図-5 より、含水比が低いほど 1 波目の最大値発生から 2 波目が立ち上がるまでの衝撃力の落差 ΔF が大きくなるのがわかる。 $\omega=0\%$ では、落差が $\Delta F=1.8\text{kN}$ であり、 $\omega=3\%$ では落差が $\Delta F=1.6\text{kN}$ 、 $\omega=14\%$ では $\Delta F=0.7\text{kN}$ である。さらに $\omega=7\%$ に至っては、2 波目が発生しなかった。

また、落体貫入量の最大値は大きい順に $\omega=0\%$ (44mm)、

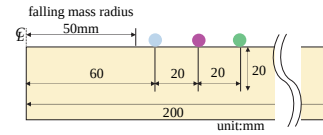


図-7 標点の設置状況

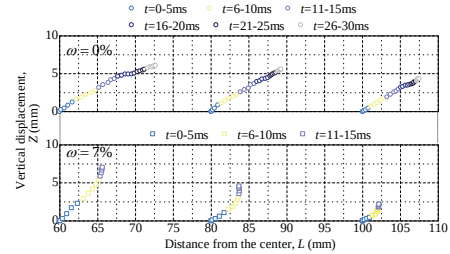


図-8 標点の軌跡

$\omega=14\%$ (32mm)、 $\omega=3\%$ (39mm)、 $\omega=7\%$ (26mm) となった。この順序は、先述した落差 ΔF の大きい順と一致している。貫入量が小さいということは緩衝層が移動しにくいことを示しており、この緩衝層の移動しにくさが落石衝撃力波形の落差 ΔF に関係している可能性がある。

$\omega=14\%$ のように含水比を大きくしても落石衝撃力が大きくならない原因として砂粒子間のサクシンの強度の違いが考えられる。水分特性曲線³⁾によると、飽和度が高いほどサクシンによる強度が小さくなるのがわかっている。飽和度が高い $\omega=14\%$ ($S_r=28\%$) は、 $\omega=7\%$ ($S_r=14\%$) よりも強度が小さく、落体衝撃力が小さくなったものと考えられる。しかし、この $\omega=14\%$ の落体貫入量は 2 番目に小さい。奥村ら²⁾ によると落体衝突により緩衝材表面は緩むことがわかっている。 $\omega=14\%$ において落体貫入当初はサクシンが弱く、貫入が進む。しかし、衝突後 $t=7\text{ms}$ 付近で緩みにより飽和度が低下し、サクシンが強くなったことで緩衝層が動きにくくなり、最終貫入量が低くなったと考えられる。

3.3 底面伝達応力

図-6 にコンター図を用いて作成した平均明度の分布図を示す。これより、底面に伝達した応力は大きい順に $\omega=0\%$ 、 3% 、 7% 、 14% となった。従って、緩衝層は湿っているほうが底面構造物にとって安全であると考えられる。また、底面への伝達応力は、含水状態のように落体の貫入量が小さいと、底面中央部の伝達応力がその周囲近傍より小さくなる一方、乾燥状態のように落体貫入量が大いとき底面中央部の伝達応力が大きくなるのがわかった。

また、 $\omega=0\%$ 、 3% 、 7% においては、図-5 の最大落体衝撃力の大きい順と逆転している。これは、含水比が 0% 、 3% 、 7% と大きくなるにつれて緩衝層が移動しにくく、衝撃力を伝達しにくくなるためだと考えられる。 14% においては、図-5 より最大落体衝撃力が小さく、緩衝層が移動しにくいことが相まって、底面伝達応力が一番小さくなったのだと考えられる。移動しやすい乾燥状態の砂の場合、含水状態に比べて落体貫入量が大きく、底面の感圧シートとの最終残存層厚が最も薄い。さらに、貫入量が 40mm を超えた $t=18\text{ms}$ でもま

だ落体衝撃力波形が続いている。よって、底面伝達応力が一番大きくなったと考えられる。

4. 落体衝撃力と砂の側方移動の関係

4.1 概要

図-5 より、含水比が高くなると、落石衝撃力の1波目の最大値発生から2波目が立ち上がるまでの衝撃力の落差 ΔF が小さくなり、含水比 $\omega=7\%$ に至っては衝撃力の2波目が発生しないなど、波形の違いが見られた。この原因として、緩衝層の移動のしやすさの違いが考えられる。そこで、以下に続く実験により、落石衝突による落石衝撃力波形と緩衝層の移動に関して考察する。

図-2 の直径 400mm、高さ 250mm の鋼製円筒土層に砂の緩衝層を設置した。含水比は比較のため $\omega=0\%$ と7%の2種類とした。さらに、図-7 に示すように、緩衝層中心からそれぞれ 60mm, 80mm, 100mm の位置に先が細い針を深さが20mmとなるように設置した。3章同様、落石を1500mmの高さから鉛直自由落下させ、針を標点として高速度カメラで追跡することで砂の表層の平均的な移動速度を測定した。

4.2 標点の移動軌跡

図-8 に標点の移動軌跡を示す。上段が $\omega=0\%$ 、下段が $\omega=7\%$ に対応し、 $t=5\text{ms}$ ごとにプロットの色を変えている。図-8 より落体中心に近いほど移動距離が大きいくことがわかる。また、 $\omega=0\%$ のほうが $\omega=7\%$ の場合よりも $t=5\text{ms}$ までの移動量が大きく、水平方向への最終移動量も大きいことがわかる。さらに、 $\omega=7\%$ の移動軌跡が $t=15\text{ms}$ で止まっているのに対して、 $\omega=0\%$ の移動軌跡が $t=30\text{ms}$ まで続いていることから $\omega=7\%$ の方が砂が移動しにくいと考えられる。

4.3 落体衝撃力・砂の移動速度・相対速度の時刻歴波形

図-9(a), (b)に含水比 $\omega=0\%$ と7%における砂の落体衝撃力波形、落体の速度 V_1 と砂の移動速度 V_2 、砂から見た落体の相対速度 $V' (=V_1 - V_2)$ の時刻歴波形を示す。砂の移動速度 V_2 とは、図-8におけるx軸方向速度とy軸方向速度から算出した合成速度である。落体の速度 V_1 と比較する上では合成速度が適当であると判断し、合成速度を採用している。落体衝撃力と速度の時刻歴波形を照らし合わせると、いくつかの共通点が見える。ここでは、波形の共通点を元にA~Dの4種類の区間にわけ考察を行う。

はじめに、図-9(a), (b)中の薄い灰色で囲った区間 A のように、砂の移動速度が上昇し、落体衝撃力の立ち上がる区間に着目する。ここでは、落体の速度 V_1 が大きく、落体接触面積の増加率が大きいため、落体衝撃力波形が急に立ち上がると考えられる。

続いて、薄い橙色で囲った区間 B に着目する。この区間では、最大落体衝撃力を迎えた後に、砂の移動速度 V_2 が維持される。しかし落体の速度 V_1 は常に減少しているため、相対速度 V' も減少し、落体衝撃力も減少すると考えられる。

水色で囲んだ区間 C は、 $\omega=0\%$ でのみ生じた。ここでは砂の移動速度 V_2 が減少している。さらに、区間 B とは異なり落体の速度 V_1 が増加することで、相対速度 V' も増加し、落体衝撃力も同様に増加すると考えられる。ここで、区間 C において相対速度 V' は $t=12\text{ms}$ から立ち上がる。これは落体衝

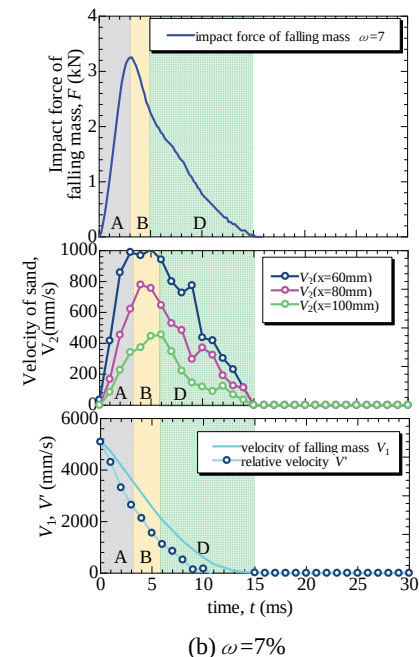
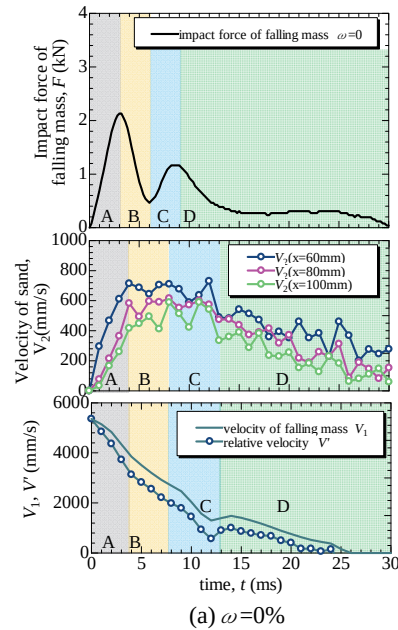
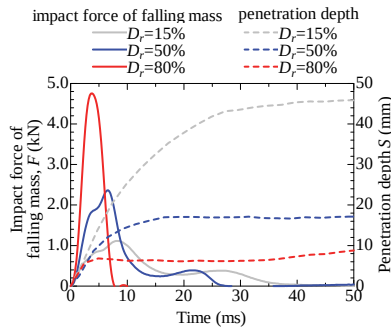


図-9 落体衝撃力・砂の移動速度・相対速度の時刻歴波形

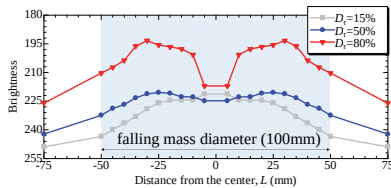
撃力波形の2波目が立ち上がる時刻 $t=6\text{ms}$ より遅いが、原因として衝撃力より速度の方が変化が遅れて現れるためだと考えられる。

最後に、薄い緑色で囲んだ区間 D は $\omega=0\%$ と $\omega=7\%$ 共に存在し、砂の移動速度 V_2 、相対速度 V' 、落石衝撃力の時刻歴波形が共に減少することがわかる。区間 C と異なり、落体の速度 V_1 自体が常に減少するため、相対速度 V' も減少し、落体衝撃力も減少すると考えられる。

このように、砂から見た落体の相対速度 V' の増減と、落体衝撃力の増減に共通点が見られたことから、相対速度 V' の増減により衝撃力波形の形成メカニズムを定性的に説明できる可能性が示された。



図－10 落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形
(相対密度の影響)



図－11 平均明度の分布図(相対密度の影響)

5. 緩衝層の緩衝性能に及ぼす相対密度の影響

5.1 概要

地盤条件として、緩衝層の相対密度を変化させた場合における落石衝撃力の緩衝効果を調べるために、緩衝層の相対密度がそれぞれ $D_r=15\%$ 、 50% 、 80% となるように作成した。含水比 ω は 0% で乾燥状態である。なお、図－2のように、鋼製円筒土層の直径は 300mm 、緩衝層は層厚を 100mm に設定し、3層に分けて締固めを行った。落体の落下高さは 1000mm とした。

5.2 落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形

図－10 に $t=0\sim 50\text{ms}$ における落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形を示す。落体衝撃力の最大値は大きい順に $D_r=80\%$ (4.8kN)、 $D_r=50\%$ (2.4kN)、 $D_r=15\%$ (1.1kN) となり、 $D_r=80\%$ では $D_r=15\%$ の約 4.6 倍となることがわかる。また、相対密度が大きくなるほど波形継続時間が短くなり、最大落体衝撃力の値は大きくなることからわかる。

また、落体貫入量は大きい順に $D_r=15\%$ (46mm)、 $D_r=50\%$ (18mm)、 $D_r=80\%$ (9mm) となった。落体衝撃力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 2 波目が存在する。しかし、相対密度が大きい $D_r=80\%$ では正弦半波状の波形が 1 つのみで構成されている。これは、4 章で述べたように移動速度の増減で説明できると考えられる。

5.3 底面伝達応力

図－11 に相対密度を変えた場合における平均明度の分布図を示す。これより底面への伝達応力は、落体衝撃力と同様に底面伝達応力は大きい順に $D_r=15\%$ 、 $D_r=50\%$ 、 $D_r=80\%$ となり、相対密度が大きくなるにつれて、緩衝層底面に伝達する応力も大きくなることからわかる。また、3 章と同様に $D_r=80\%$ のように落体の貫入量が小さいと、底面中央部の伝達応力がその周囲近傍より小さくなる一方、 $D_r=15\%$ のように落体貫入量が大きいと底面中央部の伝達応力が大きくなることからわかる。

しかし、3 章より含水比を変えた場合では、落石衝撃力が大きいと、必ずしも底面伝達応力が大きくなるわけではなかった。 $\omega=7\%$ と $D_r=80\%$ では、砂が移動しづらく落石衝撃力波形が 1 波のみとなる点は共通しているが、応力伝達挙動と緩衝材内部の変形挙動に違いがある可能性がある。

6. まとめ

緩衝層の含水比と相対密度が変化した場合における、落石衝撃力緩衝性能へ及ぼす影響を知るために、落石衝撃実験を実施した。その結果以下のことがわかった。

- 1) 含水比を増やすと $\omega=7\%$ までは落体衝撃力が増加するものの、それ以上増やすと衝撃力は減少する傾向がある。この原因として飽和度が高いことによるサクシンの低下が考えられる。また、落石衝撃力の 1 波目の最大値発生から 2 波目が立ち上がるまでの衝撃力の落差 ΔF が小さくなるなど波形の違いが見られた。さらに含水状態の方が乾燥状態よりも底面伝達応力の値が小さかったことから、緩衝層は適度に湿っている自然含水比の状態の方が安全であると考えられる。
- 2) 砂から見た落体の相対速度 V' の増減と、落体衝撃力の増減に共通点が見られたことから、相対速度 V' の増減により衝撃力波形の形成メカニズムを定性的に説明できる可能性が示された。
- 3) 緩衝層の相対密度が大きくなるほど落体衝撃力も底面伝達応力も大きくなる。さらに、落石衝撃力波形に着目すると、相対密度が高い $D_r=80\%$ では 1 波のみ、 $D_r=50\%$ 、 $D_r=15\%$ では 2 波生じ、波形性状に違いが見られた。

本論文で実施したのは、相対密度 $D_r=50\%$ のもとで含水比を $\omega=0\%$ 、 3% 、 7% 、 14% と変化させた場合。また、含水比 $\omega=0\%$ のもとで相対密度を $D_r=15\%$ 、 50% 、 80% と変化させた場合である。さらに、落石緩衝材と同様に砂だけで落石を止める土堤は乾燥していると衝撃力が小さいが壊れやすい、含水状態では衝撃力は高く出るが壊れにくいことが考えられ、土が自立する防護工においてはよりいっそう土の濡れ具合も重要な検討項目になると考えられる。よって今後は様々な含水比と相対密度の組み合わせのもとで実験を実施し、緩衝層の落石衝撃力緩衝性能を把握する予定である。

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。末筆ながら、ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.
- 2) 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 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, Vo61A, 2015, 03.
- 3) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和度の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, 2002, 08.