

異なる地盤材料を組み合わせた互層緩衝構造の緩衝特性

Grasp of the shock-absorbing characteristics of the alternating layers which is a combination of different ground material

名古屋工業大学 ○学生員 田中 敬大 (Takahiro Tanaka)
 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 奥村 勇太 (Yuta Okumura)
 室蘭工業大学 正員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 室蘭工業大学 正員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
 寒地土木研究所 正員 山澤 文雄 (Fumio Yamasawa)

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材が設置される。

しかし、設計時の想定を上回る落石が発生した場合、砂の緩衝材は貫入量が増大し、ロックシェッドを直撃する可能性がある。想定内の落石に対しては砂の高い衝撃力緩衝効果に期待し、想定外力に対しても直撃を避けることが望ましい。

そこで、本論文では地盤材料を活用した緩衝構造の最適化の提案を行う。本研究では砂の単一層、砕石の単一層、砂-砕石-砂の互層構造の3つの緩衝層において、小型と中型のスケールの異なる2種類の模型実験を実施する。

まず、本提案の目的でもある互層構造は想定外の落石に対応でき、直撃を防ぐという性能を有するか検証するため小型実験を実施する。そこで性能が確認できた後に、中型実験において外力レベルと緩衝材のスケールを大きくし、ロードセルを用いて伝達衝撃力や底面応力分布を計測することで、より詳細に現象を捉える。

2. 小型実験

2.1 小型実験概要

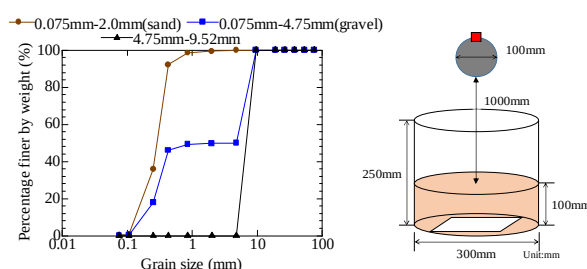
実験試料には図-1(a)に示す粒度分布の材料を用いた。図-1(b)の直径300mm、高さ250mmの鋼製円筒土層に図-2のような砂、礫、互層の3つの緩衝層をそれぞれ設置した。なお、砂と粒径4.75mm-9.52mmの試料を1:1で混合させたものを礫と呼ぶことにする。緩衝層は含水比0%の乾燥状態とし、層厚を100mmに設定し、三層に分けて、相対密度が50%となるように締め固めた。

実験は落体を高さ1000mmから緩衝層に鉛直自由落下させて実施している。落体には球体(直径100mm、質量4.0kg)を用いた。落体上部に衝撃加速度計を設置し、緩衝材底面には縦200mm、横200mmの感圧シート¹⁾を設置することで、落体衝撃力と底面応力分布を測定した。さらに、高速度カメラを用いて落体貫入量を測定した。

2.2 実験結果

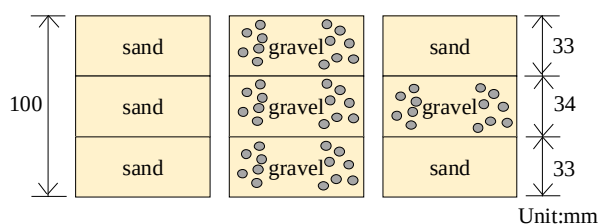
(1) 落体衝撃力と落体貫入量の時刻歴波形

図-3に砂、礫、互層の落体衝撃力波形と落体貫入量波形を示す。落体衝撃力の最大値は大きい順に礫、互層、砂となった。また、落体貫入量の最大値は大きい順に砂、互層、



(a) 実験試料の粒度分布, (b) 実験装置概要

図-1 実験概要



(a) 砂 (b) 礫 (c) 互層

図-2 緩衝材の構造

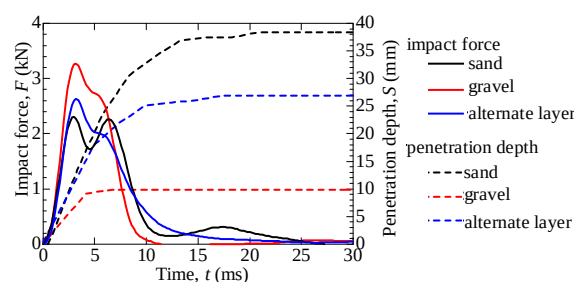


図-3 落体衝撃力と落体貫入量の波形

礫となった。互層の落体衝撃力波形と、落体貫入量波形は落体衝突から最大落体衝撃力発生時刻($t=3\text{ms}$)まで砂と同様の立ち上がり挙動であることがわかる。

これは、落体衝撃力の最大値付近までの貫入の挙動は表層材料の固さに強く依存しており、必ずしも緩衝層全体の影響を受けないことを示唆している。落体衝撃力の最大時刻以降では、中間層の固い材料である礫によって、落体貫入量が抑えられたと考えられる。

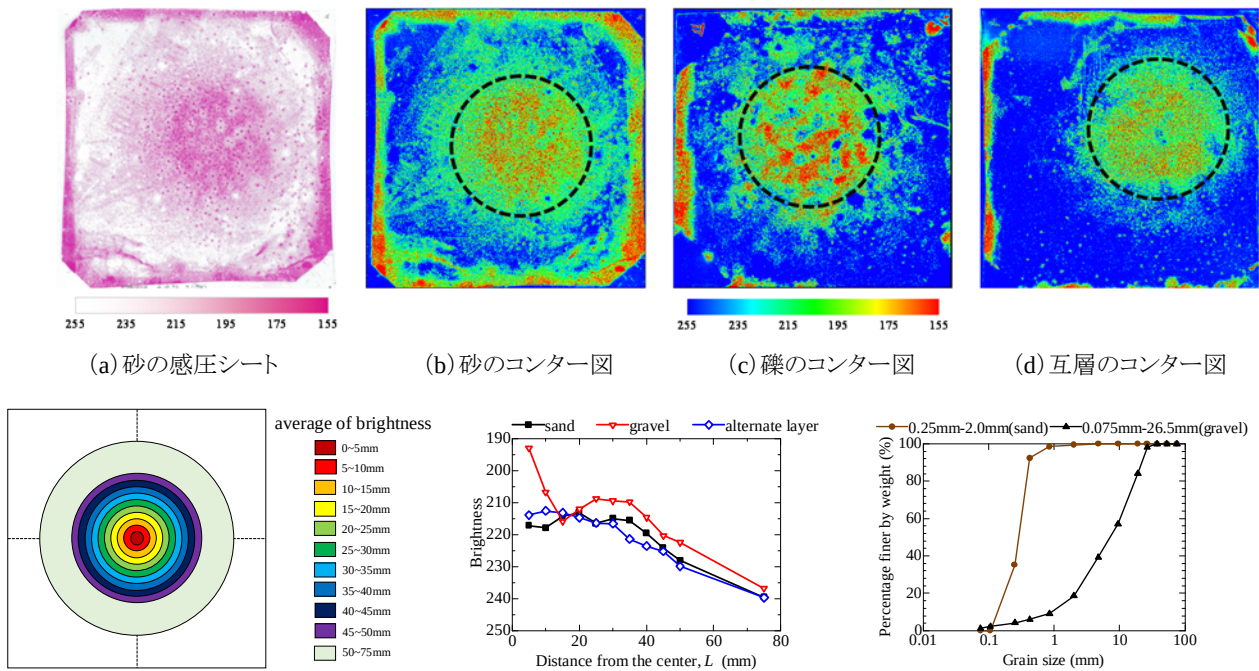


図-5 平均明度算出時の分割領域

図-6 明度分布

図-7 中型実験における試料の粒度分布

(2)底面応力分布

図-4(a)に砂の単一層の底面に設置した感圧シートを示す。感圧シートは力が作用すると反応して色が付き、力の大小を色の濃さ(明度)で表すものである。155 の値(桃・赤色)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・青色)は力が加わっていないことを示している。

図-4(b), (c), (d)には、それぞれ砂、礫、互層の実験で使用した感圧シートから得られたコンター図を示す。落体直径(100mm)を黒色の点線で示す。

礫は砂や互層と比較して、赤色で表される部分が広く分布しており、より大きい力が底面へ伝達したことがわかる。

また、底面伝達応力の分布を、定量的に比較するために、図-5 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る。なお、図-5 における同心円状の中心を落体の落下中心とした。そこで得られた明度(平均値)の分布図を、図-6 に示す。図-6 の横軸は落下中心からの半径(すなわち図-5 における 11 個の領域の外側の半径)、縦軸は図-5 で示した各領域における明度の平均値を表している。

これより、底面への伝達応力は落下中心から外側に向かうにつれて小さくなることを確認できる。さらに、互層は礫に比べて伝達応力が小さくなることがわかった。これは、互層の落体衝撃力が礫の落体衝撃力に比べて小さいことが影響していると考えられる。

小型実験を実施した結果、互層の落体衝撃力は礫よりも小さく、落体貫入量は砂よりも小さくなることがわかった。また、互層の底面伝達応力は、礫よりも小さくなることがわかった。

3. 中型実験

3.1 中型実験概要

本実験では、試料として図-7 のような粒度分布の砂と碎石を用いる。図-8 のような高さ 250mm の砂の単一層、碎石の単一層、互層の 3 つの緩衝層を図-9 の直径 1500mm の土層内

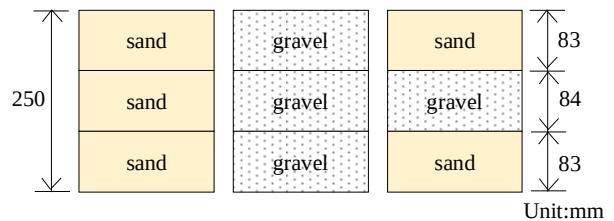


図-8 中型実験における緩衝層の種類

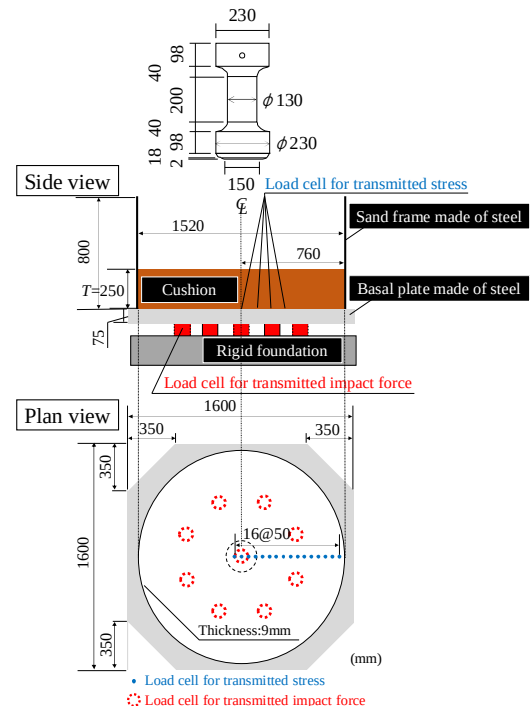


図-9 実験装置概要図

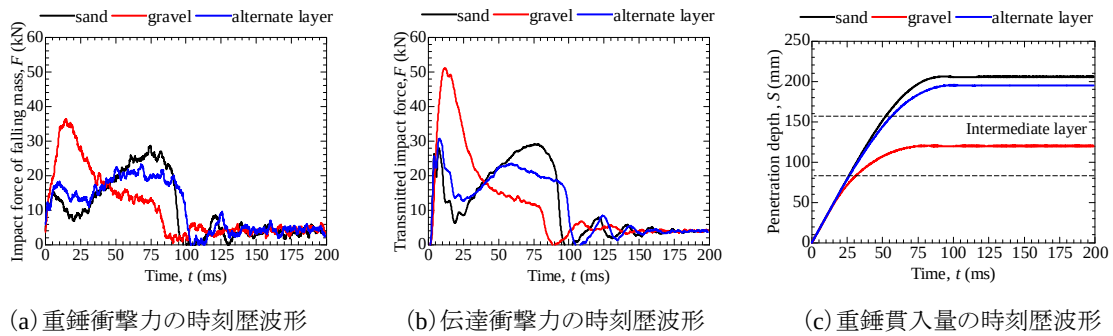


図-10 各種応答波形

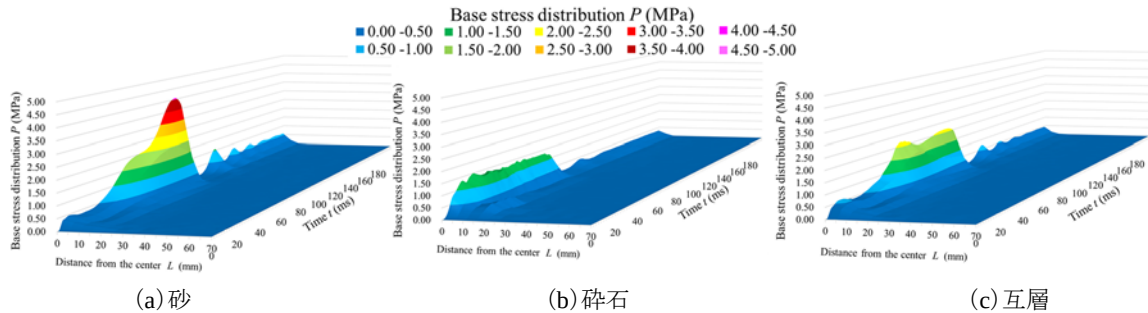


図-11 応力分布の時刻歴波形

部に作製した。緩衝層は、三層にわけて足踏みで緩詰めとなるように締め固めた。そして、これら 3 種類の緩衝層に重錘(载荷部直径 230mm, 質量 400kg)を 750mm より鉛直自由落下させて実施した。

実験では、鋼製底盤に面一設置された起歪柱型ロードセル(受圧面の直径 20mm, 容量 10MPa)で伝達衝撃応力を計測、鋼製底盤を支持する 9 個の起歪柱型ロードセル(受圧面の直径 87mm, 容量 10MPa)で測定した値を合計することで伝達衝撃力を算出した。重錘衝撃力は、重錘先端部に組み込まれているロードセルで計測、さらにレーザ式変位計を用いて重錘貫入量を測定した。さらに、緩衝層の底面に感圧シートを設置することで、底面応力分布を面的に測定した。

3.2 実験結果と考察

(1) 各種応答波形

図-10(a)に重錘衝撃力の時刻歴波形を示す。図-10(a)から、重錘衝撃力の最大値は大きい順に砕石(35.7kN)、砂(28.3kN)、互層(23.2kN)となった。また、波形性状として、砕石は 1 波しか発生しなかったが、砂と互層は 2 波発生し、2 波目に最大値をとっていることがわかる。図-10(b)に伝達衝撃力の時刻歴波形を示す。図-10(b)より伝達衝撃力の最大値は大きい順に砕石(51.1kN)、互層(30.6kN)、砂(29.2kN)となった。礫の伝達衝撃力は、重錘衝撃力同様 1 波しか発生せず、砂と互層は 2 波発生していることがわかる。

図-10(c)に重錘貫入量の時刻歴波形を示す。図-10(c)から、重錘貫入量は大きい順に砂(205.6mm)、互層(195.2mm)、砕石(120.6mm)の順となることがわかった。しかし、砂と互層にあまり大差はない。これは実験を緩詰めで実施したことが影響していると考えられる。砂と互層はともに重錘が中間層を通過し下層にまで到達しているのに対して、砕石は重錘が中間層の位置で止まっていることがわかる。また、砂と互層の貫入量波形のずれが生じるのは、 $t=40$ ms 付近からで

ある。このとき砂も互層も重錘は中間層に到達している。よって、中間層の固い材料である砕石によって、重錘貫入量が抑えられ、重錘貫入量波形がずれたと考えられる。

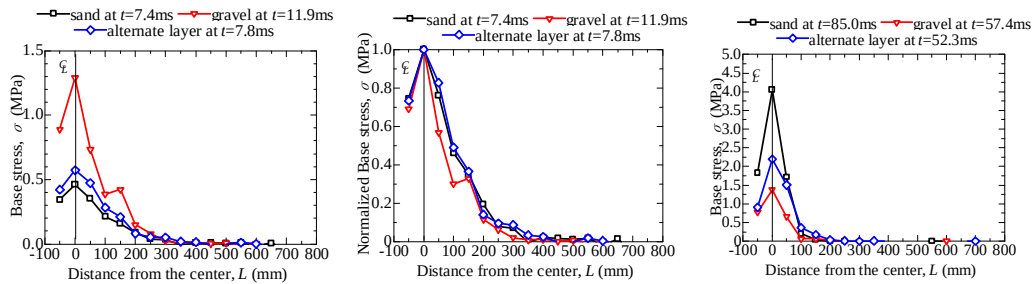
このように試料の種類や構造により、重錘衝撃力、伝達衝撃力及び重錘貫入量の波形が異なる原因として、重錘が受ける力積の違いが考えられる。重錘が受けた力積は、図-10(a)より、 $t=25$ ms までの力積に着目すると、砕石の場合に重錘が受けた力積が最も大きく、次いで互層、砂となった。よって、砕石の方が砂よりも重錘の速度損失がはやく、砂よりも貫入が小さくなったと考えられる。また、図-10(c)において、互層の貫入量が砂よりもわずかに小さいのは、 $t=25$ ms までに重錘が受けた力積が、砂よりも互層の方が大きかったと考えられる。

また、その他の原因として、砂と砕石のせん断抵抗力の違いが挙げられる。砂は砕石よりもせん断抵抗力が小さい。よって、砂は鉛直荷重に耐え切れずに横に逃げてしまうため、砕石よりも重錘貫入量が大きくなったと考えられる。

(2) 底面伝達応力

図-11 に、鋼製底盤に面一で 50mm に設置された起歪柱型ロードセルにより測定した応力分布の時刻歴波形を示す。図-11(a)は砂、(b)は砕石、(c)は互層の応力分布の時刻歴波形である。この分布図は底面伝達応力 P (MPa)、土層中心からの距離 L (mm)、経過時間 t (ms) の 3 つの軸から構成されている。図-11(b)より、砕石の底面応力は土層中心付近に一定の値で分布していることがわかる。図-11(a)より、砂の応力は $t=85$ ms にピークがあり、分布性状に違いがみられる。また、互層は砂ほど急なピークはみられないことがわかる。

続いて、ある時間における、応力分布について考察する。図-12(a)に、砂、砕石、互層それぞれの伝達衝撃力の第 1 ピーク発生時における応力分布を示す。図-12(a)より、応力の最大値は大きい順に砕石、互層、砂となった。さらに、砂、砕



(a) 第1ピーク発生時の応力分布 (b) 第1ピークの応力分布を正規化した図 (c) 最大応力発生時の応力分布
図-12 ある時間における応力分布

石、互層の応力の分布形状を比較するために、図-12(a)の応力を各応力の最大値で除して正規化した分布図を図-12(b)に示す。図-12(b)より砂と互層は礫と比較して、幅広く応力が分布していることがわかる。

図-12(c)に図 12c に中心の応力計が最大応力となる時刻の底面応力分布を示す。図-12(c)より、最大応力は大きい順に砂、互層、碎石となった。図-10(b)において、最大伝達衝撃力は碎石が一番大きいにもかかわらず、最大応力は碎石が一番小さくなっている。その理由として、重錘貫入量と重錘衝撃力の関係が挙げられる。

図-13に重錘貫入量と重錘衝撃力の関係を示す。図-13において、礫が最大重錘衝撃力をとるとき、碎石の残りの層厚は 206.2mm 存在する。これに対して、砂は最大重錘衝撃力をとるとき、残りの層厚は 54.8mm しか存在しない。これは、砂の伝達衝撃力の第 1 ピークに相当する貫入領域において、重錘が受ける力積は碎石より砂の方が小さいため、重錘の貫入が碎石よりも進むためと考えられる。そのため、砂の場合は残りの層厚が小さい条件で最大重錘衝撃力が発生することで、底面に伝達する最大応力が大きくなったと考えられる。また、互層の伝達衝撃力の第 1 ピークに相当する貫入領域において、受ける力積が砂よりも大きいため、砂よりも貫入が抑えられ、砂よりも残りの層厚が大きい状態で最大重錘衝撃力が発生する。そのため、砂よりも底面に伝わる最大応力が小さくなったと考えられる。

図-14に重錘直下に設置した感圧シートから作成したコンター図を示す。図-14(a)は砂、(b)は碎石、(c)は互層の感圧シートのコンター図を示す。なお、小型実験と異なり、図-14に示したコンター図は、明度を応力値に変換した後の図となっている。コンター図から、重錘中心付近において、砂、互層、碎石の順に応力値が大きくなっていることがわかる。また、重錘中心から 70mm の付近より外側に共通して粒子が放射状の跡が見られ、底面粒子が放射状に移動している可能性を示唆している。

4. まとめ

砂の単一層、碎石の単一層、互層構造(砂-碎石-砂)の緩衝層において、小型実験と中型実験の 2 種類の模型実験を実施した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 互層の重錘衝撃力は砂と同程度になり、碎石よりも小さくなった。これは、重錘衝撃力が表層材料に強く依存しているためと考えられる。
- 2) 互層の底面伝達応力は砂よりも小さくなった。これは、中間層の碎石により、重錘の持つ力積が砂よりも速く失われた

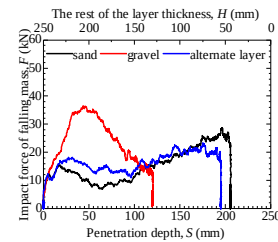


図-13 重錘衝撃力と重錘貫入量の関係

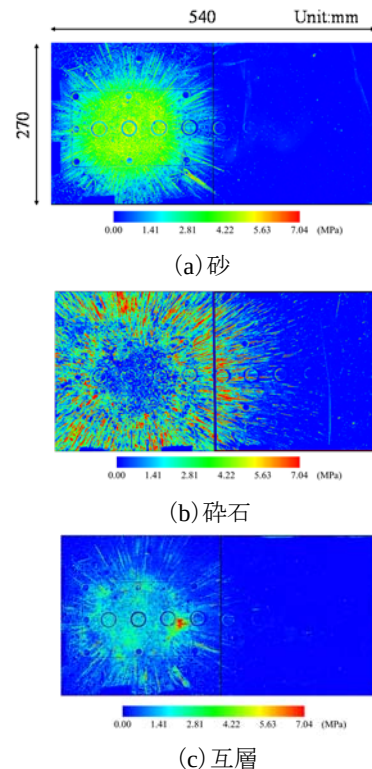


図-14 感圧シートのコンター図

ためだと考えられる。

つまり互層は、想定内の外力に対して衝撃力は小さく、想定外力に対しても貫入量を抑えることで直撃を防ぐことができると考えられる。今後は小型実験、中型実験ともに、緩衝材の一部を着色し、落下前後での緩衝材内部の変形を観察し、更なる衝撃緩衝メカニズム解明を目指す。

参考文献

- 1) 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.