

厚さの異なる敷砂緩衝材の緩衝特性に関する重錘落下衝撃実験

Impact loading tests on sand cushion with various sand thickness

寒地土木研究所 ○正会員 今野 久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所 正会員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

近年、様々な構造物の設計法が性能照査型設計法に移行してきており、現在、許容応力度法で設計が行われているロックシェッド等の落石防護構造物に対してもより合理的な設計を可能とする性能照査型耐衝撃設計法の確立が望まれている。筆者らもロックシェッド等の耐衝撃用途構造物の性能照査型設計法を確立するための取り組みとして、鉄筋コンクリート (RC) 梁、RC スラブ、ロックシェッド模型等を用いた衝撃載荷実験を実施し終局に至るまでの耐衝撃挙動の把握を行ってきた¹⁾。また、これらの実験を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動を適切にシミュレート可能な数値解析手法について検討を行ってきている。その結果、直接衝撃荷重が作用する場合の RC 構造物の耐衝撃挙動を単一あるいは繰り返し等の載荷条件にかかわらず非常に精度よくシミュレートできることを可能としている²⁾。一方、敷砂等の緩衝材を介して衝撃力が作用する場合については、終局に至るまでの耐衝撃挙動を未だ十分な精度でシミュレートでき

る状況に至っていないのが現状である。数値解析の精度向上のためには敷砂緩衝材の材料構成則モデル構築に関する詳細な検討が必要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデル構築のための基礎資料収集を目的として、敷砂緩衝材の締固め度や敷砂厚、重錘重量等をパラメータとした重錘落下衝撃実験を実施している。本論文では敷砂緩衝材の厚さを変化させた場合の衝撃実験結果について報告する。

2. 実験概要

図-1には、実験装置の概要を示している。本実験装置は、衝撃応力計測用の起歪柱型ロードセル (受圧面の直径 20 mm、容量 7 MPa) (以後、荷重計と記述する。) が設置された鋼製底盤と敷砂緩衝材を設置するための鋼製円筒および鋼製底盤を支持する 9 個の反力計測用の起歪柱型ロードセル (受圧面の直径 87 mm、容量 100 kN) から構成されている。荷重計は、図のように底盤中央部より非対称に 50 mm 間隔で 16 個設置されており、その受圧面は底盤上面と面一となっている。写真-1には重錘落下衝撃実験の状況を示している。衝撃実験は、所定の厚さに成形した敷砂緩衝材に対して、質量 400 kg で先端部の直径が 230 mm の平底鋼製重錘を所定の高さから円筒中央部に落下させることにより行っている。表-1には衝撃実験ケースの一覧を示している。実験では、敷砂厚を重錘直径と同程度の 25 cm とその 1/2 の 12.5 cm の 2 種類とし、落下高さについては $h = 0.25$ m から 0.25 m ピッチで漸増させ荷重計の容量を超過しない範囲で実施している。このため敷砂厚 12.5 cm の場合には最終落下高さが 1.25 m、敷砂厚 25 cm では 1.75 m となっている。表中の実験ケース名は S の後ろに敷砂厚を、ハイフンの後ろに落下高さを付して示している。なお、敷

表-1 実験ケース一覧

実験 ケース名	落下高さ h (m)
S12.5- h	0.25~1.25 (0.25 刻み)
S25- h	0.25~1.75 (0.25 刻み)

表-2 緩衝材砂の物性値

産地	種類	粗粒率	表乾密度 (kg/l)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
知律狩	細目砂	1.32	2.56	3.27	1.09

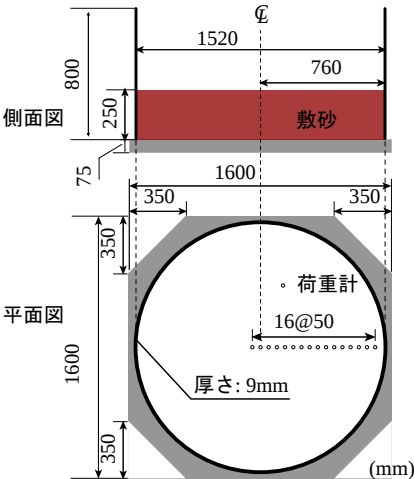


図-1 実験装置



写真-1 実験状況 (S25 - h 0.25)

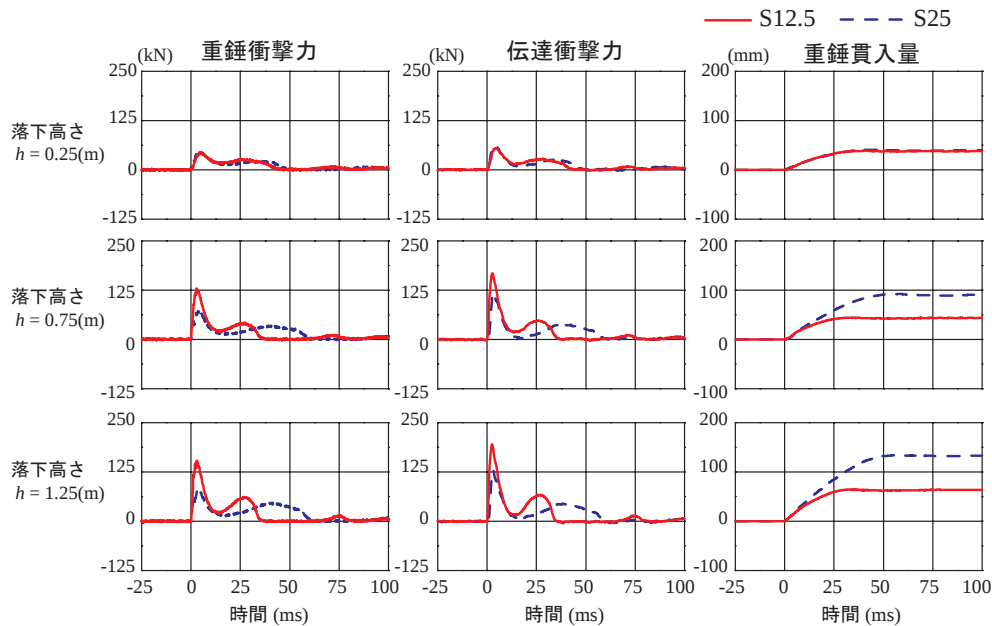


図-3 重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する各時刻歴応答波形

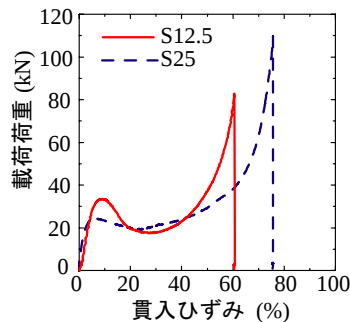


図-2 載荷荷重 - 貫入ひずみ関係

砂緩衝材は、厚さ 12.5 cm 毎に足踏みおよび振動締固め機を使用して締固め、所定の厚さに成形している。また、敷砂緩衝材は実験ケース毎に再成形を行っており、成形後に直径 75 mm の鋼製円筒を貫入させてサンプリングを行い湿潤密度、含水比を計測している。実験時の湿潤密度、含水比は平均で厚さ 12.5 cm の場合が 1.59 g/cm^3 および 8.6 %、厚さ 25 cm の場合が 1.58 g/cm^3 および 8.9 %であった。表-2 には、実験に使用した知律特産（北海道石狩市）細目砂の物性値一覧を示している。衝撃実験における計測項目は、重錘一体型の起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、荷重計による伝達衝撃応力、レーザ式変位計による重錘貫入量である。また、2 種類の敷砂厚に対して静載荷実験を実施している。静載荷実験は、油圧載荷装置の先端に衝撃実験で使用した重錘を取り付けて行った。計測項目は載荷荷重および荷重計による底盤上への作用応力および重錘貫入量である。

3. 静載荷実験結果

図-2 には、静載荷実験における載荷荷重と貫入ひずみ（貫入量／敷砂厚）の関係を示している。実験は、衝撃載荷実験と同様に鋼製底盤に設置した荷重計の計測容量を超過しない範囲で実施している。敷砂厚 12.5 cm の場合には、貫入ひずみ数 %、載荷荷重 30 kN 程度まで弾性的に立ち上がり、ピーク値を示した後、一旦載荷荷重が低下し、その後載荷荷重が徐々に増加し、貫入ひずみ 40 % 程度から 2

次放物線的に急激な増加傾向を示している。一方、敷砂厚 25 cm の場合についてみると、貫入ひずみ数 %、載荷荷重 20 kN 程度まで弾性的挙動を示し、貫入ひずみ 20 % 程度まで徐々に荷重が低下し、その後荷重が再び増加し始め貫入ひずみ 60 % 程度から 2 次放物線的に急激な増加傾向を示している。

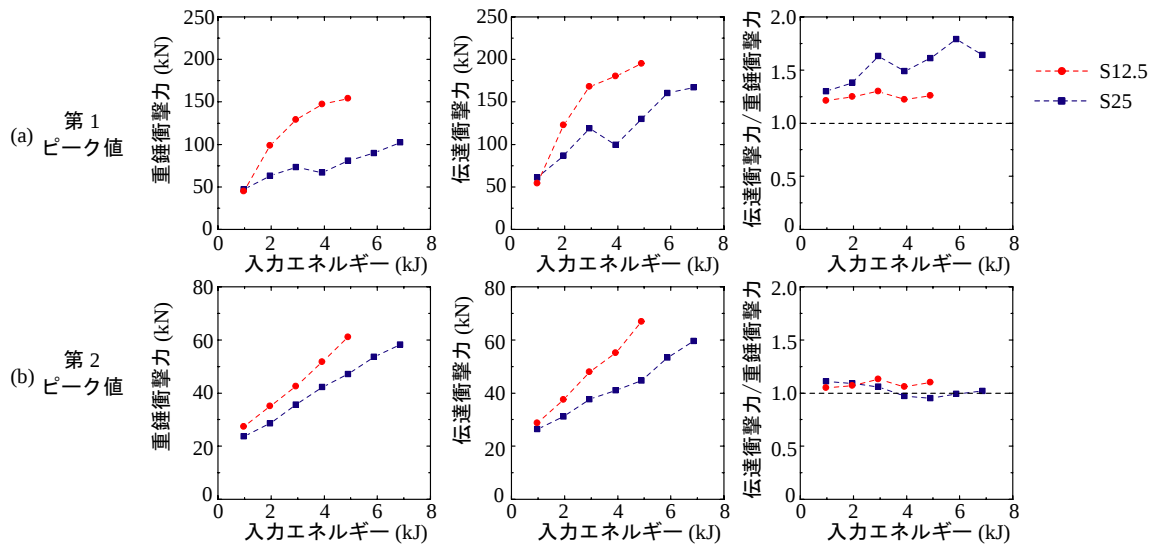
4. 衝撃荷重載荷実験結果

4.1 時刻歴応答波形

図-3 には、重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。ここでは、重錘衝突時の時刻を 0 とし、重錘落下高さ $h = 0.25, 0.75, 1.25 \text{ m}$ の場合について示している。なお、伝達衝撃力は、図-1 に示した各荷重計から得られる伝達衝撃応力が重錘衝突位置に関して軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いて集積評価することにより求めている。図より、重錘衝撃力および伝達衝撃力は、ほぼ類似の波形性状を示していることが分かる。すなわち、重錘衝突初期に急激に立ち上がりピーク値を迎える三角形の第 1 波とその後続くピーク値近傍が滑らかな正弦半波状の第 2 波から構成されている。いずれの実験ケースにおいても、第 1 波および第 2 波のピーク値（以後、それぞれを第 1 ピーク値、第 2 ピーク値と呼ぶ）は、落下高さ h の増加とともに増大している。同一の落下高さにおいて比較すると、敷砂厚の薄い S 12.5 の実験ケースの方が第 1、2 ピーク値とも大きく、波形継続時間は短くなる傾向が示されている。重錘貫入量は、重錘衝突後ほぼ線形に増加し、ピーク値に達した後、若干押し戻されるような傾向を示してから一定値となっている。落下高さ $h = 0.25 \text{ m}$ では両者の重錘貫入量応答波形はほぼ同様な性状を示しているが、落下高さの増加とともに最大貫入量および最大貫入量到達までの時間に差が見られる。

4.2 重錘衝撃力および伝達衝撃力

図-4 には、重錘衝撃力および伝達衝撃力に関する第 1 ピーク値および第 2 ピーク値と入力エネルギーの関係を、また各ピーク値について重錘衝撃力に対する伝達衝撃力の



図－4 各衝撃力波形の第1および第2ピーク値と入力エネルギーとの関係

割合（以後、衝撃力比と呼ぶ）を示している。

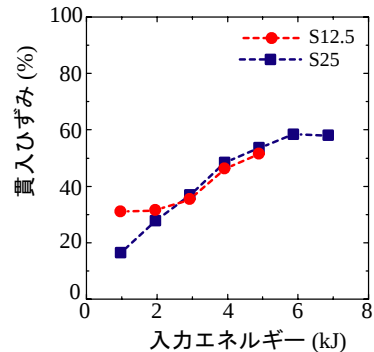
(a) 図より、重錘衝撃力および伝達衝撃力の第1ピーク値は、実験ケース S 25 のデータに多少ばらつきが見られるものの、ともに入力エネルギーの増大に伴って増加する傾向にあることが分かる。また、敷砂厚が薄い S 12.5 の場合、各衝撃力の第1ピーク値は大きい。衝撃力比は、S 25 の場合で1.25～1.75、S 12.5 の場合には1.22～1.26の範囲に分布し、敷砂厚の減少とともに小さくなる傾向が示されている。また、伝達衝撃力はいずれの実験ケースにおいても重錘衝撃力よりも大きな値を示しており、既往の研究結果³⁾と同様の傾向が示されている。これは、第1ピーク値が重錘貫入直後に発生していることから、伝達衝撃力の第1ピーク値には、重錘衝突に伴って伝播する応力波の影響が含まれているためと推察される。

(b) 図より、重錘衝撃力と伝達衝撃力の第2ピーク値は、入力エネルギーの増大に伴ってほぼ線形に増加する傾向が示されている。同一の入力エネルギーに対しては、いずれの衝撃力も S 12.5 の場合が大きくなっている。また、入力エネルギーに対する各衝撃力の増加割合は S 12.5 が大きくなる傾向が示されている。衝撃力比は、敷砂厚によらずほぼ1.0近傍の値を示しており、また第2ピーク値発生時間と重錘の最大貫入時間が近似していることから、第2ピーク値の場合には、第1ピーク値の場合と異なり重錘衝突に伴って伝播する応力波の影響は小さいものと推察される。

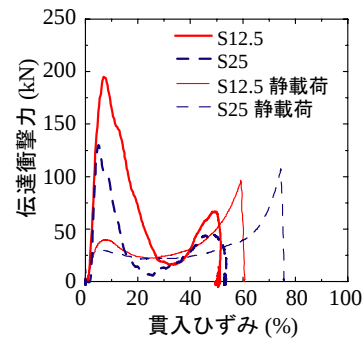
図－5には、重錘の貫入ひずみ（貫入量／敷砂厚）と入力エネルギーの関係を示している。貫入ひずみは、S 12.5 の初回の実験ケースを除き入力エネルギーの増大に対応して増加する傾向を示すとともに、同一の入力エネルギーに対しては敷砂厚によらずほぼ同程度の貫入ひずみを示している。

4.3 伝達衝撃力と重錘貫入ひずみとの関係

図－6には、落下高さ $h = 1.25$ m における伝達衝撃力・重錘貫入ひずみ関係を示している。また、図中には静載荷実験において底盤の荷重計で計測された作用荷重と貫入ひずみの関係を縦軸を作用荷重として示している。図より、伝達衝撃力の第2ピーク値はいずれの敷砂厚においても重錘の最大貫入ひずみ近傍で発生しており、また静載荷実験



図－5 貫入ひずみと入力エネルギーとの関係



図－6 伝達衝撃力・重錘貫入ひずみ関係

における作用荷重・貫入ひずみ関係と類似の性状を示していることから、重錘の貫入に伴って砂が圧密されることによって発生する荷重であるものと推察される。一方、第1ピーク値の伝達衝撃力は重錘衝突初期の貫入ひずみの小さい領域で発生しており、また静載荷時の同一貫入ひずみにおける作用荷重に比較して非常に大きな値となっていることから、重錘衝突に伴って伝播する応力波が大きく影響しているものと推察される。

4.4 各吸収エネルギーと入力エネルギーとの関係

図－7には、各実験ケースに関する敷砂の吸収エネルギーと入力エネルギーとの関係を示している。ここで、吸収エネルギーは、伝達衝撃力・重錘貫入量関係の履歴ループ内の面積として評価し、重錘衝撃力・重錘貫入量関係より求めたものを吸収エネルギー1、伝達衝撃力・重錘貫入量関

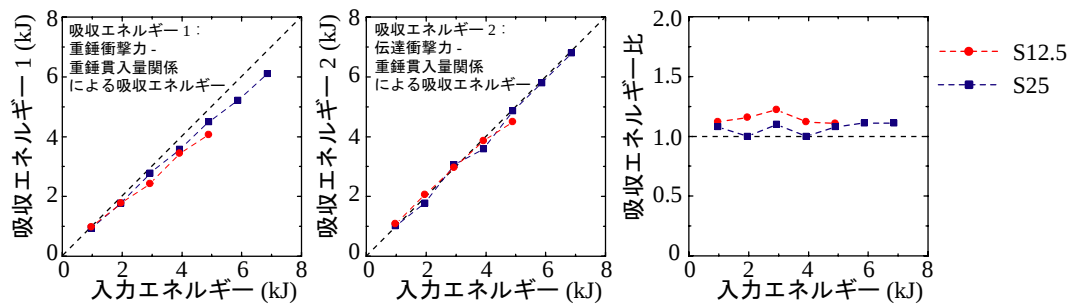


図-7 各衝撃力波形を用いて算出した吸収エネルギーと入力エネルギーとの関係

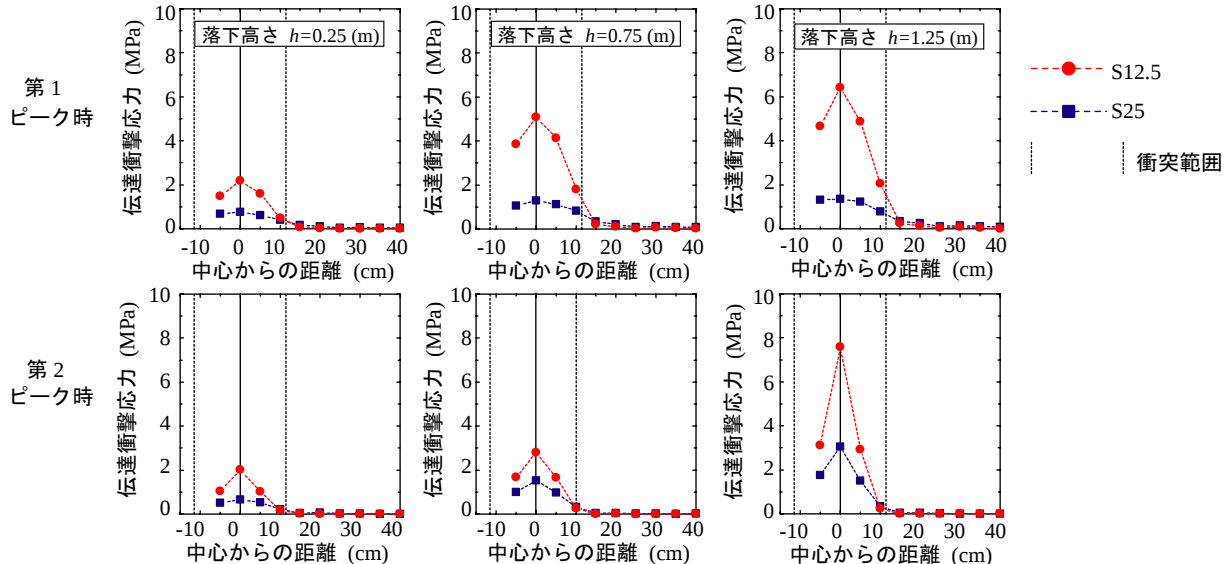


図-8 伝達衝撃力波形の第1、第2ピーク値発生時の伝達衝撃応力分布図

係より求めたものを吸収エネルギー2と呼ぶこととする。なお、吸収エネルギー1に対する吸収エネルギー2の比を吸収エネルギー比と呼ぶこととする。図より、入力エネルギーの増加に伴って、両吸収エネルギーはほぼ線形に増加していることが分かる。敷砂厚の違いによる影響は極めて小さく、また吸収エネルギーおよび入力エネルギーの値は、ほぼ対応している。このことより、敷砂厚によらず、ほぼ全ての入力エネルギーが吸収エネルギーに置換されており、重錘衝突から貫入、停止までの反力として伝達衝撃力が底盤に作用しているものと考えられる。

4.5 伝達衝撃応力の分布性状

図-8には、落下高さ $h = 0.25, 0.75, 1.25$ mの実験ケースに関する鋼製底盤に作用する伝達衝撃応力分布を伝達衝撃力の第1ピーク値および第2ピーク値発生時において示している。伝達衝撃応力は、いずれの実験ケースにおいても第1、2ピーク時ともに重錘落下点直下を最大値とする釣り鐘状の分布性状を示している。また、載荷点直下の伝達衝撃応力値はいずれのケースもS12.5の場合が大きい。さらに、 $h = 1.25$ mでは、S12.5、S25ともに第2ピーク時の伝達衝撃応力が第1ピーク時のそれよりも大きくなっており、伝達衝撃力とは逆の結果を示している。これは、第2ピーク時には重錘が他の実験ケースよりも深く貫入し荷重の分散範囲が狭くなったことによるものと推察される。

5. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材の数値解析用材料構成則モデル構築のための基礎的資料集を目的に敷砂の耐衝撃挙動に及

ぼす敷砂厚の影響に関して、重錘径と同程度の厚さと、その1/2の敷砂厚に対する衝撃荷重載荷実験および静載荷実験を実施した。

- 1) 重錘衝撃力および伝達衝撃力は、ほぼ類似の波形性状を示しており、衝撃荷重載荷初期に急激に立ち上がる三角形の第1波とそれに後続する正弦半波状の第2波から構成される。
- 2) 重錘貫入量は、重錘衝突後ほぼ線形に増加し、ピーク値に達した後、若干押し戻されるような傾向を示した後、一定値となる。
- 3) 伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも大きな値を示し、敷砂厚が薄くなるに従ってその差が小さくなる傾向が示された。これは、伝達衝撃力の第1ピーク値には、重錘衝突に伴って伝播する応力波の影響が含まれているためと推察される。

参考文献

- 1) 山口 悟, 岸 徳光, 今野久志, 西 弘明: 敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェッド模型に関する衝撃載荷実験, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1149-1159, 2010.3
- 2) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: RC梁の繰返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1225-1237, 2009.3
- 3) 土木学会: 構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計, 平成10年11月