

敷砂緩衝材の材料構成則モデルの適用性に関する数値解析的検討

Numerical study on the applicability of constitutive model for sand cushion

(独)土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 今野久志 (Hisashi Konno)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 正 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
 室蘭工業大学大学院 学生員 武田雅弘 (Masahiro Takeda)
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

落石防護構造物の一つであるロックシェッドは、比較的大きな落石エネルギーに対応できる構造物であり、現在、その設計は許容応力度法によって行われている。今後、これまでに建設された数多くの同施設を維持管理していかなければならず、防災点検等で当初の設計荷重を見直さなければならない事例もあり、より合理的な対応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。このような背景のもと、著者らは、ロックシェッドに対する性能照査型設計法を確立するための研究を継続的に実施してきている。

現在、ロックシェッド上には、標準的に 90cm 厚の敷砂緩衝材が設置されているが、性能照査型設計法への移行を考慮した場合、終局限界状態に対応する落石条件は、許容応力度法で考慮していた落石条件よりも大きくなることが想定される。このことから、標準的な 90cm 程度の敷砂厚に対して落石径が大きい場合、逆に落石径を基準にして言い換えると、落石径に対して敷砂厚が小さい条件下での落石衝撃力の評価が実験的および解析的研究において重要になるものと推察される。

このような観点から、本研究では、落石径に対して敷砂厚が 70%、50%、30%と小さい場合における実規模衝撃実験を実施し、筆者らがこれまで数値解析に用いてきた敷砂緩衝材の材料構成則モデルの適用性について実験結果と数値解析結果との比較により検討した。なお、本数値解析には、有限要素法に基づいた非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA(ver.971)を用いている。

2. 実験概要

2.1 実験装置

写真-1 には、本研究に使用した実験装置の概要を示している。本実験装置は、敷砂緩衝材を設置するための土槽として、平面寸法 5.0×5.0m、厚さ 50 cm の RC 版を 29 個のロードセル（図-1 参照、容量合計 12,550kN）で支持する構造している。RC 版は、十分な剛性を確保するために、底板には厚さ 22mm の鋼板を使用し、RC 版の周辺およびロードセル設置位置に合わせて H 形鋼や溝形鋼を、また、RC 版上面には D32 の鉄筋を 100mm 間隔で格子状に配置し、コンクリートを充填している。また、RC 版上面の中央部には、重錘衝突によるコンクリートの損傷を防止するために 1.0×1.0m、厚さ 22mm の鋼板をコンクリート表面に対して



写真-1 実験装置および重錘

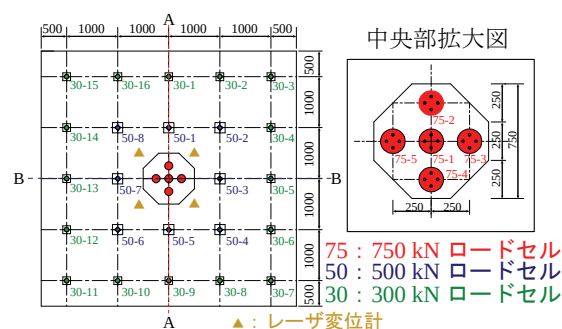


図-1 ロードセル配置図（平面図）

面一となるように設置している。また、各ロードセルは、その上面に設置した鋼板を介して貫通ボルトにより RC 版に固定されており、実験時の RC 版の浮き上がりを防止している。なお、敷砂緩衝材を設置するための砂枠は、RC 版上に等辺山形鋼を用いて溶接して設置しており、敷砂の設置範囲は 4.9×4.9m となっている。

2.2 実験方法および計測項目

実験は、質量 5,000kg の重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、脱着装置により敷砂緩衝材を設置した実験装置中央部に自由落下させることにより行っている。重錘は、直径が 1m、高さ 97cm で底部が半径 80cm の球状である。

計測項目は、重錘に取り付けたひずみゲージ型加速度計による重錘衝撃力、RC 版を支持している 29 個のロードセルによる合支点反力（以後、伝達衝撃力）、高速カメラによる重錘貫入量である。また、確認用に非接触式レーザ変位計により RC 版下面の変位（設置位置は図-1 参照）を計測しているが、各衝撃実験時には RC

表－1 実験ケース一覧

実験 ケース	敷砂厚 (cm)	落下高さ (m)	入力エネルギー (kJ)	含水比 (%)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)
S70-H2.5	70	2.5	122.6	12.1	1.48	1.32
S70-H5.0		5.0	245.2	11.9	1.47	1.31
S70-H7.5		7.5	367.7	12.1	1.49	1.33
S70-H10.0		10.0	490.3	12.5	1.49	1.32
S70-H12.5		12.5	612.9	12.2	1.45	1.29
S70-H15.0		15.0	735.5	12.1	1.44	1.29
S50-H2.5	50	2.5	122.6	12.1	1.52	1.36
S50-H5.0		5.0	245.2	12.3	1.50	1.34
S50-H7.5		7.5	367.7	12.7	1.49	1.32
S50-H10.0		10.0	490.3	12.0	1.45	1.29
S50-H12.5		12.5	612.9	11.9	1.43	1.28
S30-H1.0	30	1.0	49.0	12.1	1.42	1.27
S30-H2.0		2.0	98.1	12.2	1.38	1.23
S30-H3.0		3.0	147.1	11.9	1.34	1.20
S30-H4.0		4.0	196.1	11.7	1.36	1.21
S30-H5.0		5.0	245.2	12.0	1.38	1.24

版に変位が発生していないことを確認している。各センサーからの出力波形は、サンプリングタイム 0.1ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。高速度カメラについては専用のパソコンにサンプリングタイム 1ms で収録しており、加速度計からの出力をパソコンにも同時に収録し、デジタルデータレコーダに収録したデータとの同期が取れるようにしている。

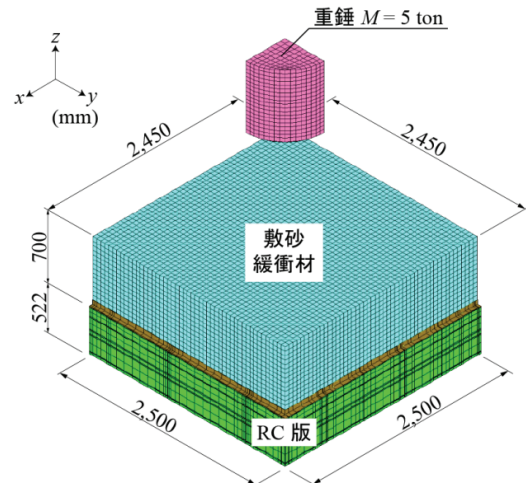
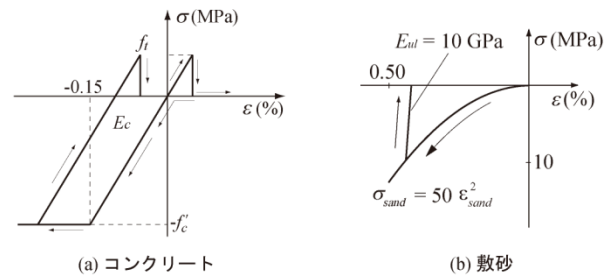
表－1 には、実験ケースの一覧を示している。表中の実験ケース名は、第一項目が敷砂厚（S70：70cm、S50：50cm、S30：30cm）、第二項目が落下高さ（H＋高さ(m)）をハイフンで結び示している。実験は、各敷砂厚に対して 5～6 ケースのデータが取得できること、重錘貫入量やロードセルの計測値が過大とならないように計測データを確認しながら落下高さを設定している。また、表中には、各実験ケースにおいて敷砂緩衝材成形後に 3 か所より採取したサンプルより求めた平均含水比、湿潤密度および乾燥密度を併せて示している。

実験に使用した敷砂は、粗粒率 1.39、最大乾燥密度 1.52g/cm³、最適含水比 22.1%の知律狩産（北海道石狩市）細目砂である。敷砂緩衝材は、1 層の厚さが 20～30cm 程度となるように足踏みによる締固めを行って所定の厚さに成形している。実験終了後は、重錘落下点を中心に 3×3m 以上の範囲の敷砂をバックホウにより取り除き、RC 版の損傷が無いことを確認し、再度敷砂緩衝材を設置して実験を行っている。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

図－2 には、本数値解析に用いた有限要素モデルの要素分割状況を敷砂厚 $t=70\text{cm}$ の場合を例にして示している。本数値解析では、重錘、敷砂を設置する RC 版およびロードセルを詳細にモデル化している。要素のモデル化に関しては、鉄筋には梁要素を、その他すべての要素には 8 節点の三次元個体要素を用いている。敷砂等の要素の積分点に関しては衝撃応答時の大変形にも追従可能とするため 1 点積分を、梁要素に関しては 4 点積分を用いている。なお、数値解析モデルは、構造の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。

図－2 要素分割状況（敷砂厚 $t=70\text{cm}$ ）

図－3 材料物性モデル

表－2 材料物性値一覧

材料	密度 (t/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	1.96	30	20	0.167
鋼材	7.85	307	206	0.3
敷砂	1.60	—	10	0.06

境界条件に関しては、反力測定用ロードセルの底面を完全固定とし、敷砂側面の面外変形を拘束している。また、対称面には対称面条件を導入している。重錘－敷砂間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。敷砂－RC 版間には、従来からの数値解析と同様に面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義する場合と滑りを考慮しない場合の両方について検討を行っている。

減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1%と設定している。

3.2 材料物性モデル

図－3(a)、(b)には、本数値解析で用いたコンクリートおよび敷砂の応力－ひずみ関係を示している。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

(1) コンクリート

図－3(a)に示すように、コンクリート要素に用いた物性モデルは、LS-DYNA コードに組み込まれている弾塑性体モデルである。すなわち、圧縮側に対しては折線近似による応力－ひずみ関係、引張側に対しては破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルである。ここでは、圧縮側に関しては、相当ひずみが 1,500μに達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完

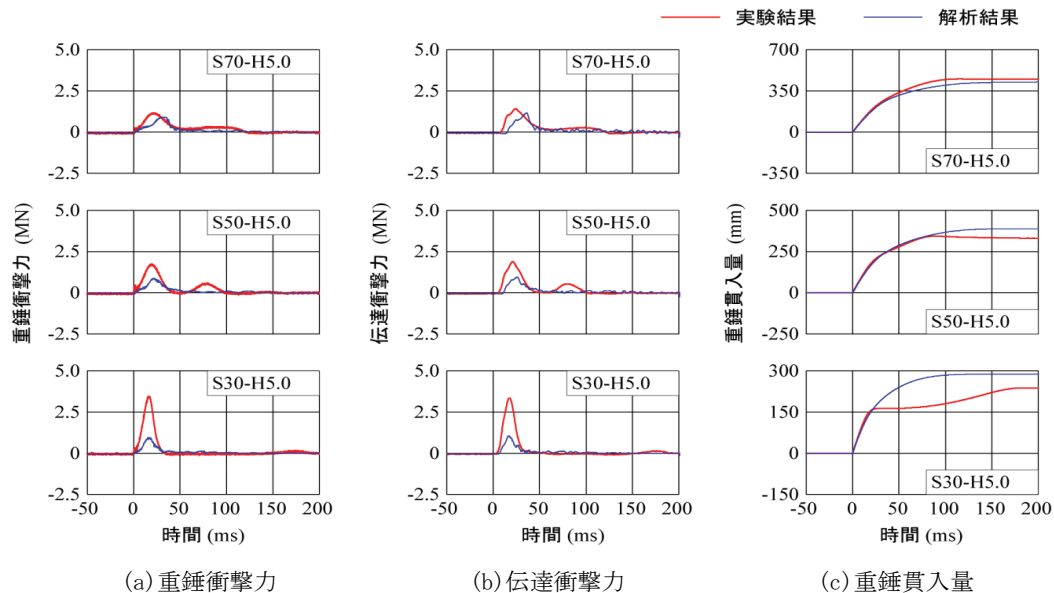


図-4 重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量の時刻歴応答波形（敷砂の滑りを考慮する場合）

全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。圧縮強度は表-2 に示されている値を採用することとし、引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定している。なお、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。

(2) 鋼材、ロードセルおよび重錘

敷砂緩衝材を設置するための RC 版に関しては、衝撃载荷時に RC 版に変位が発生していないことから、内部に配置した H 形鋼、溝形鋼、鉄筋および表面に設置している鋼板は、弾性体モデルを適用している。また反力計測用ロードセルはもちろんのこと、重錘に関しても実験時に塑性変形が確認されていないことより弾性体モデルとした。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s=206\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ と仮定している。また、単位体積質量 ρ_s は、鋼材には公称値である $\rho_s=7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ を仮定し、重錘には重錘質量を重錘モデルの体積で除した値を仮定している。

(3) 敷砂

図-3(b)には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂の材料構成則モデルは、筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃载荷実験結果 ($W=3\text{ton}$ 、 $H=5\sim 30\text{m}$) と数値解析結果を比較することにより、その妥当性を検証したものであり¹⁾、次式のように示される。

$$\sigma_{\text{sand}} = 50 \varepsilon_{\text{sand}}^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_{sand} は相当応力 (MPa)、 $\varepsilon_{\text{sand}}$ は体積ひずみである。除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{GPa}$ と仮定した。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

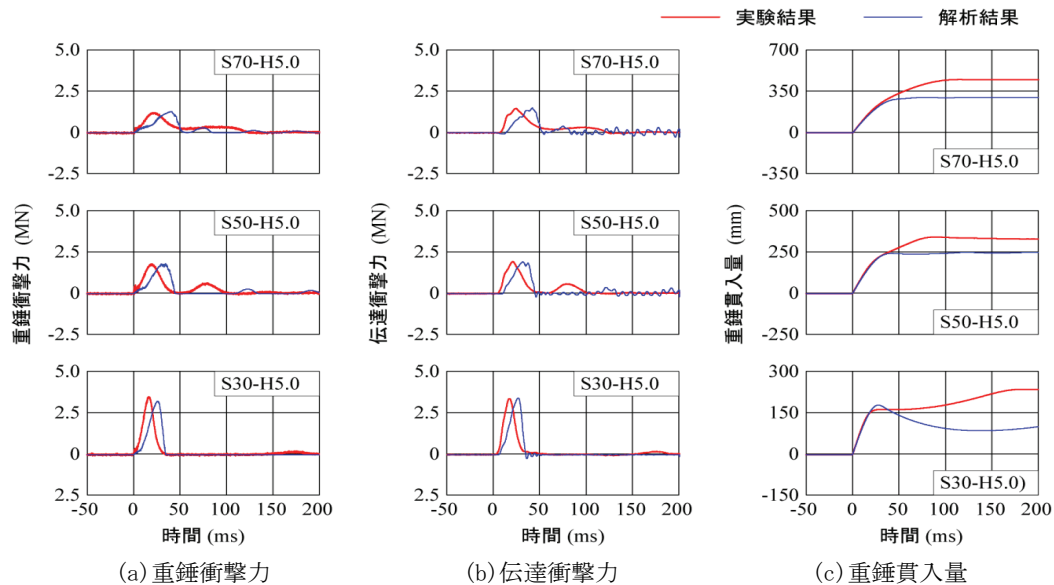
本研究では、先ず初めに敷砂底面と RC 版との境界条件に関して、筆者らが従来より実施してきた数値解析と同様に、敷砂と RC 版との間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。前述の表-1 に示した全実験ケースに対して、数値解析を実施し実験結果との比較を行った。

図-4 には、一例として敷砂厚が $t=70, 50, 30\text{cm}$ 、落下高さ $H=5\text{m}$ の場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量の時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を合わせて示している。なお、伝達衝撃力は各ロードセルの応答波形を単純に足し合わせたものである。図より、敷砂厚の最も大きい $t=70\text{cm}$ の場合には、重錘貫入量に関しては解析結果と実験結果は良く整合しているものの、重錘衝撃力および伝達衝撃力に関しては解析結果が実験結果に対して過小評価となっていることが分かる。敷砂厚がさらに小さい $t=50, 30\text{cm}$ の場合には、敷砂厚が小さくなるに従い重錘貫入量に関しては解析結果が実験結果よりも過大評価となり、それに対応して重錘衝撃力および支点反力の最大値は、解析結果が実験結果に対して非常に小さな値を示し過小評価となることが明らかとなった。この原因として、敷砂厚が小さいほど敷砂-RC 版間の境界条件の影響が大きく、重錘の貫入に伴って RC 版近傍の敷砂要素が側方に滑り、重錘がより深く貫入するためと推察される。

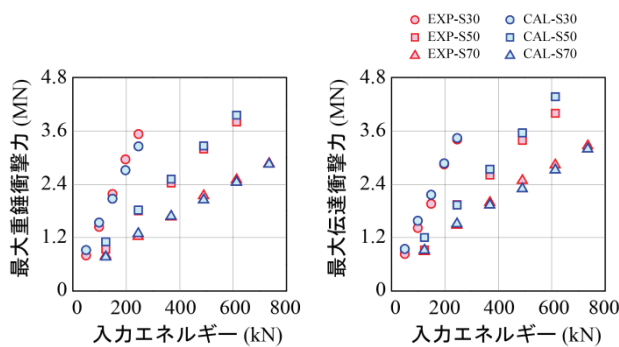
以上の結果より、敷砂底面と RC 版との境界条件として接触面を定義せず、敷砂と RC 版を連続させて敷砂要素の滑りを考慮しない条件下での数値解析を再度全実験ケースに対して実施した。

図-5 には、一例として敷砂厚が $t=70, 50, 30\text{cm}$ 、落下高さ $H=5\text{m}$ の場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量の時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を合わせて示している。重錘貫入量に関しては、敷砂要素の滑りを考慮しないことにより、いずれの敷砂厚に対しても解析結果は実験結果よりも最大貫入量が小さく評価されていることが分かる。一方、重錘衝撃力および伝達衝撃力に関しては、初期の波形の立ち上がりに差異がみられるものの最大値や波形性状に関してみると両者は非常に良く整合している。

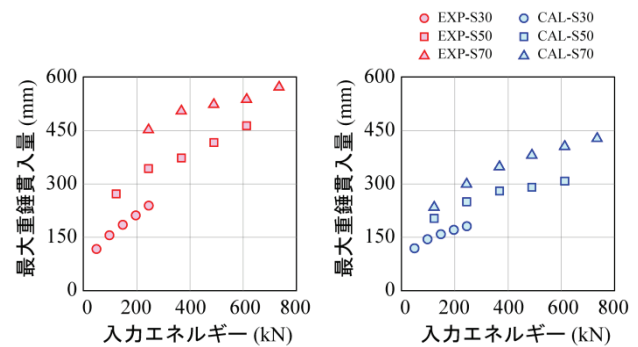
以上の検討結果より、本研究では重錘貫入量よりも衝撃力の評価が重要であると判断し、敷砂底面と RC 版との境界条件として接触面を定義せず、敷砂と RC 版を連



図ー5 重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量の時刻歴応答波形（敷砂の滑りを考慮しない場合）



図ー6 各最大衝撃力と入力エネルギーの関係



図ー7 最大重錘貫入量と入力エネルギーの関係

続させて敷砂要素の滑りを考慮しない条件下での数値解析結果を用いて実験結果との比較を行い、敷砂の材料構成則モデルの適用性を検討した。

図ー6 には、敷砂厚が $t=70$ 、 50 、 30cm とした場合の最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力と入力エネルギーの関係を実験結果と解析結果を合わせて示している。

図より、最大重錘衝撃力および最大伝達衝撃力は、敷砂厚および入力エネルギーに係わらず実験結果と解析結果が非常によく整合していることが分かる。両最大衝撃力は、入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加しており、その勾配は敷砂厚が小さくなるにしたがって大きくなる傾向が示されている。

図ー7 には、実験結果および解析結果の最大重錘貫入量と入力エネルギーの関係をそれぞれ示している。

左図より、実験結果の最大重錘貫入量は、入力エネルギーの増加に対応して増加しているが、その勾配は敷砂厚が小さくなるにしたがって大きくなる傾向が示されている。

右図の解析結果においても、最大重錘貫入量は、入力エネルギーの増加に対応して増加しているが、その勾配は敷砂厚が小さくなるにしたがって小さくなっており、実験結果とは逆の傾向を示している。

5. まとめ

本研究では、敷砂厚が重錘径よりも小さい条件下での敷砂の緩衝特性について筆者らが数値解析に用いている敷砂の材料構成則モデルの適用性を検証するために、実規模重錘落下衝撃実験結果に対する数値解析を実施し実験結果との比較検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 敷砂下面の滑りを考慮しない境界条件とすることにより、筆者らの提案した敷砂の材料構成則モデルを用いた数値解析により、敷砂厚が重錘径よりも小さい場合の重錘衝撃力および伝達衝撃力の最大値を精度よく評価可能である。
- (2) 上記敷砂緩衝材の境界条件による数値解析では、敷砂厚が重錘径よりも小さい場合の重錘貫入量は、実験結果に対して過小評価される。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 岡田慎哉, 今野久志, 池田憲二: 敷砂緩衝材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1323-1332, 2003.3