

重錘落下衝撃を受ける敷砂緩衝材の緩衝性能に関する 数値シミュレーション

Numerical simulation of shock absorbing performance of sand cushion under weight falling impact

室蘭工業大学大学院 ○学生員 田土 大輔 (Daisuke Tashi)
室蘭工業大学大学院 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
寒地土木研究所 正 員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
寒地土木研究所 正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)
釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

著者らの研究グループでは、ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法を確立するために必要とされる実構造物の耐衝撃挙動データを取得することを目的として、実規模のRC製ロックシェッドを製作し種々の重錘落下衝撃実験を実施した。実験は、緩衝材として我が国で一般的に採用されている敷砂および三層緩衝構造とスイス連邦で一般的に採用されている碎石を用い、載荷位置や入力エネルギーを変化させて弾性から塑性状態に至る領域まで実施している^{1),2)}。

一方、実験結果の妥当性検証や性能照査型耐衝撃設計法を効率よく確立するためには、数値解析的な検討は不可欠である。著者らは既往の研究において2/5および1/2 RC製ロックシェッド等を対象に有限要素法による三次元弾塑性衝撃応答解析^{3),4)}を実施し、提案の手法を用いることによって、実験結果を大略適切に評価可能であることを明らかにしている。

実規模RC製ロックシェッドの耐衝撃挙動を精度よく解析するためには、ロックシェッド頂版に敷設されている緩衝材の適切なモデル化は非常に重要となる。そのため、別途剛基礎上に敷砂緩衝材を敷設した大型重錘衝撃落下衝撃実験⁵⁾を実施し、その緩衝性能について検討を行っている。しかしながら、既往の研究において敷砂緩衝材の構成則として、実験結果を基本としたモデルが提案⁶⁾されているものの、本実験条件に対して同モデルを適用した場合には、重錘衝撃力や合支点反力を過大に評価することが確認された。

このような背景より、本論文では重錘落下を受ける実

規模RC製ロックシェッドの耐衝撃挙動を有限要素解析によって適切に評価するために、ロックシェッド頂版に敷設される敷砂緩衝材の緩衝性能に関する数値シミュレーションを行った。ここでは、敷砂を敷設した大型重錘衝撃落下実験結果を基本⁴⁾として、重錘衝撃力、合支点反力および重錘貫入量に関して着目し、実規模RC製ロックシェッドの衝撃応答解析のための敷砂緩衝材の構成則モデルの構築を試みた。なお、本数値解析にはLS-DYNA⁷⁾を使用している。

2. 大型重錘落下衝撃実験の概要

2.1 実験装置の概要

図1には、大型緩衝材用実験装置の側面図を示している。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5.0×5.0 m、厚さ52.2 cmの鉄骨コンクリート版（以後、SRC版）をロードセルで支持する構造としている。なお、敷砂緩衝材を設置するための砂枠は、SRC版上に等辺山形鋼を用いて溶接して設置しており、そのため敷砂の設置範囲は4.9×4.9 mとなっている。

図2には、ロードセルの配置状況を示している。中央部には容量750 kNのロードセルを5台組み合わせた一組のロードセル体を配置し、その周囲には容量500 kNのロードセルを8台、最外周には容量300 kNのロードセルを16台配置した。

2.2 実験方法

実験は、図3に示すように鋼製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。

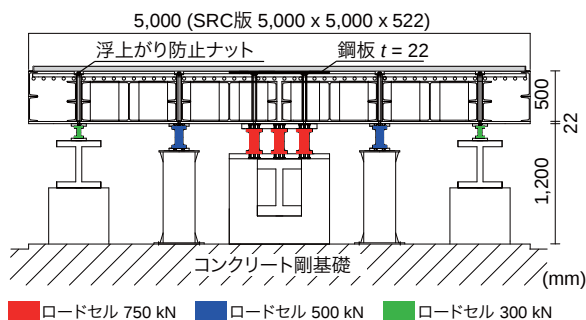


図1 実験装置概要（側面図）

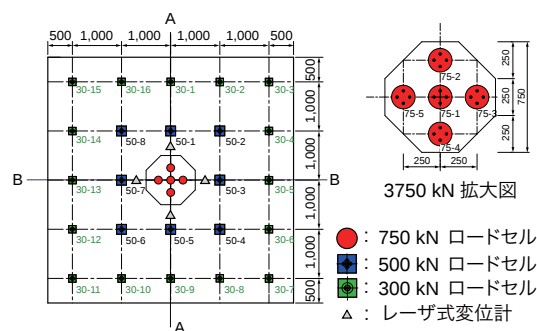


図2 伝達衝撃力測定用ロードセル配置図（平面図）



図 3 実験状況

表 1 実験ケース一覧

実験 ケース	重錘質量 m (t)	落下高さ H (m)	入力 エネルギー (kJ)
m2-H2	2	2.0	39.2
m5-H5	5	5.0	245.2
m10-H10	10	10.0	980.0
m10-H20	10	20.0	1960.0

落下させる重錘は、質量 $m = 2, 5, 10$ ton の 3 種類である。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、SRC版を支持している29台のロードセルによる合支点反力、高速度カメラによる重錘貫入量である。

表 1 には、実験ケースの一覧を示している。実験ケースは計4ケースであり、表中の実験ケース名は、第一項目に“m”と重錘質量 (t)、第二項目に“H”と重錘落下高さ (m) をハイフンで結び示している。また、敷砂厚 t はいずれのケースにおいても $t = 90$ cm である。

3. 数値シミュレーションの概要

3.1 解析モデル

図 4 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示している。本数値解析では、重錘、敷砂を設置するSRC版およびロードセルを詳細にモデル化している。特に、SRC版に関しては内部に配置したH形鋼や溝形鋼、鉄筋、鋼板、ロードセルを版に固定するための貫通ボルトに至るまで忠実にモデル化している。また、敷砂の要素分割に関しては、1辺の長さが5 cm の立方体要素とした。各要素のモデル化に関しては、鉄筋には梁要素を、その他の要素には全て8節点の三次元個体要素を用いている。固体要素の積分点数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に1点積分を、梁要素に関しては 2×2 ガウス積分を用いている。

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、対称面には鏡面对称境界を導入している。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（摩擦係数：0）を定義している。また、敷砂－SRC版間は完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘モデルの全節点に落下高さから換算した衝突速度を初速度として付加することにより作用させることとした。

また、全部材に対して重力を考慮しており、減衰定数

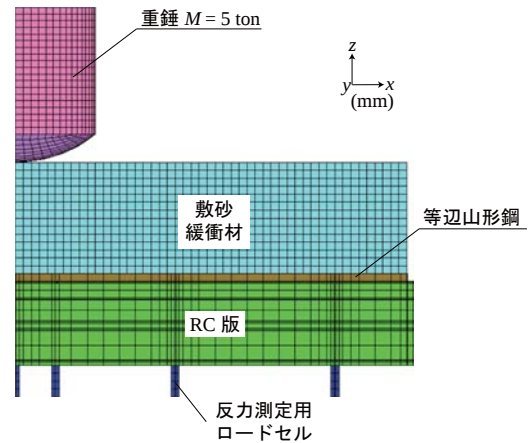


図 4 要素分割状況

は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析を実施して鉛直方向最低次固有振動数に対して1%と設定している。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。

3.2 構成則モデル

図 5(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。

(1) コンクリート

図 5(a) には、コンクリートの応力－ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが0.15%に達した段階でコンクリートが降伏するものとし、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。また、引張側に関しては引張強度に達した段階で応力を完全に解放するものとしている。引張強度は圧縮強度の1/10と仮定している。ここでは、圧縮強度 $f'_c = 30$ MPa、弾性係数 $E_c = 20$ GPa、ポアソン比 $\nu_c = 0.167$ 、単位体積質量 $\rho_c = 2.35 \times 10^3$ kg/m³ とした。降伏の判定には、コンクリートの内部摩擦角を 30° とし、Drucker-Pragerの条件式を採用している。なお、SRC版のコンクリートは弾性状態であることを確認している。

(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SRC版に関しては、衝撃载荷時に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には、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_s には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s = 206$ GPa、 $\nu_s = 0.3$ 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 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$ kg/m³ 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 5 (b) には、既往の研究⁵⁾で提案された敷砂の応力－ひずみ関係を示している。この構成則モデルは、著者らが過去に実施した敷砂緩衝材に関する衝撃実験結果（重錘質量 $m = 3$ ton、落下高さ $H = 5 \sim 30$ m）を対象に数値解析を実施し、その妥当性を検証したものであり次式で与えられる。また、本論文ではこのモデルを従来モ

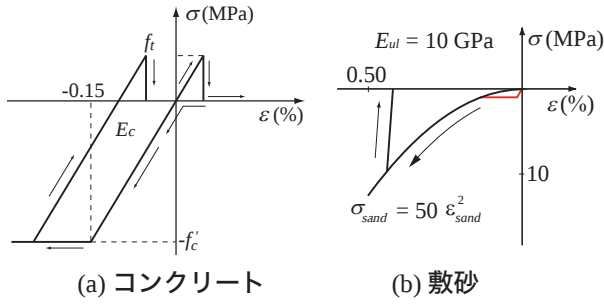


図 5 材料物性モデル

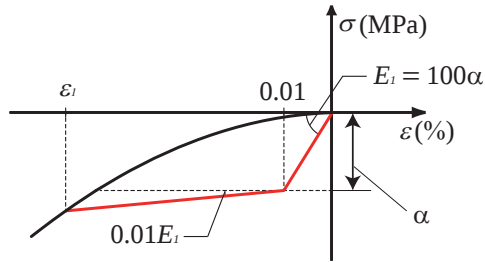


図 6 提案の敷砂緩衝材モデル

デルと呼ぶ。

$$\sigma = 50 \varepsilon^2 \quad (1)$$

ここで、 σ は相当応力 (MPa)、 ε は体積ひずみである。なお、除荷勾配 E_{ul} は $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ である。

前述のように従来モデルを本実験条件に適用した場合には、後述の図 8 のように実験結果を適切に再現できないことが確認されている。従って、従来モデルを実規模 RC 製ロックシェッドの敷砂緩衝材に適用することは適切ではなく、より実験結果を再現可能な新しい構成則モデルの構築が必要となる。

このような観点より、本論文では図 6 の赤線で示すように従来モデルに $E_l = 100\alpha$ の初期勾配を付加し、さらに体積ひずみが 0.01 から緩やかな直線勾配 $E_2 = 0.01E_l (= \alpha)$ で従来モデルにすりつくような以下のモデルを考案した。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= 100 \alpha \varepsilon & \varepsilon < 0.01 \\ &= (0.99 + \varepsilon) \alpha & 0.01 < \varepsilon < \varepsilon_1 \\ &= 50 \varepsilon^2 & \varepsilon_1 < \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 α は降伏応力 (MPa)、 ε_1 は従来モデルと交差する体積ひずみである。本数値解析では、重錘質量に応じて降伏応力 α の大きさを 3 種類に設定した。すなわち、重錘質量 m が $m = 2 \text{ ton}$ の場合には $\alpha = 0.25$ 、 $m = 5 \text{ ton}$ の場合には $\alpha = 0.6$ 、 $m = 10 \text{ ton}$ の場合には $\alpha = 1.5$ とした。

また、重錘が敷砂緩衝材に衝突する際の貫入挙動より、図 7 に示すように敷砂緩衝材を 3 つの領域 (衝突域、中間域、非衝突域) に分けることとし、それらの領域には以下に示すように式 (2) に係数を乗じて応力-ひずみ関係を低減している。

$$\left. \begin{aligned} \text{(a) 衝突域} & \quad \sigma_a = \sigma_0 \\ \text{(b) 中間域} & \quad \sigma_b = \frac{1}{5} \sigma_0 \\ \text{(c) 非衝突域} & \quad \sigma_c = \frac{1}{10} \sigma_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

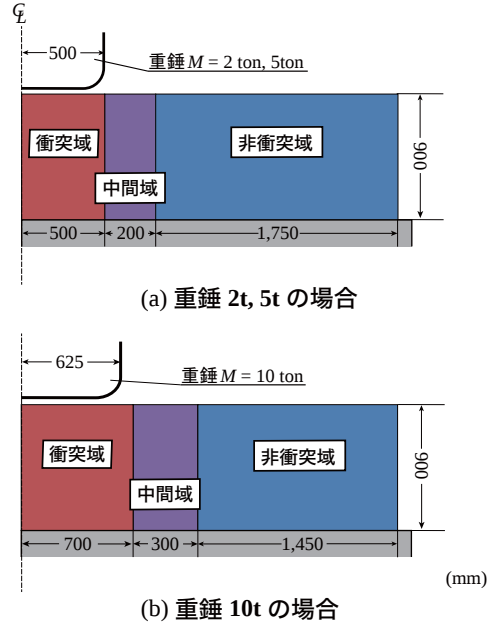


図 7 敷砂の要素領域図

なお、単位体積質量 $\rho = 1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ と仮定した。

4. 実験結果との比較および考察

図 8 には、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、合支点反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。

実験結果の重錘衝撃力波形は、いずれのケースも重錘衝突初期に急激に立ち上がる正弦半波状の第 1 波とその後続く第 2 波から構成されている。次に、伝達衝撃力に関しては、第 1 ピーク近傍の性状が若干異なるものの全体的な波形性状についてはほぼ重錘衝撃力に対応している。重錘貫入量の応答波形については、滑らかな曲線となっており、重錘衝突後急激に立ち上がり、勾配が緩やかになった後に最大貫入量に達している。

従来モデルの解析結果における重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期に実験結果よりも緩やかな勾配で立ち上がり、その後実験結果と同様の勾配で急激に立ち上がって最大値を迎えている。実験結果と比較すると、第 1 ピーク値発生時刻が遅れていることや、最大値を過大に評価していることが分かる。伝達衝撃力波形については、実験結果の伝達衝撃力波形よりもさらに遅れて励起しており、載荷初期付近の緩やかな勾配のピーク値近傍の性状が重錘衝撃力波形とは若干異なっているものの、全体的にはほぼ重錘衝撃力と同様の波形性状を示している。重錘貫入量の応答波形は、m2-H2 を除いて、最大重錘貫入量が実験結果よりも小さくなっており、重錘質量と落下高さに比例して実験結果との差異も増大する傾向にある。

提案モデルの解析結果に着目すると、重錘衝撃力は最も入力エネルギーの大きい m10-H20 を除いて実験結果の波形性状を良く再現していることが分かる。また、伝達衝撃力に関しても、重錘衝撃力の場合と同様に m10-H20 を除き、数値解析結果は最大応答値に至るまでの実験結

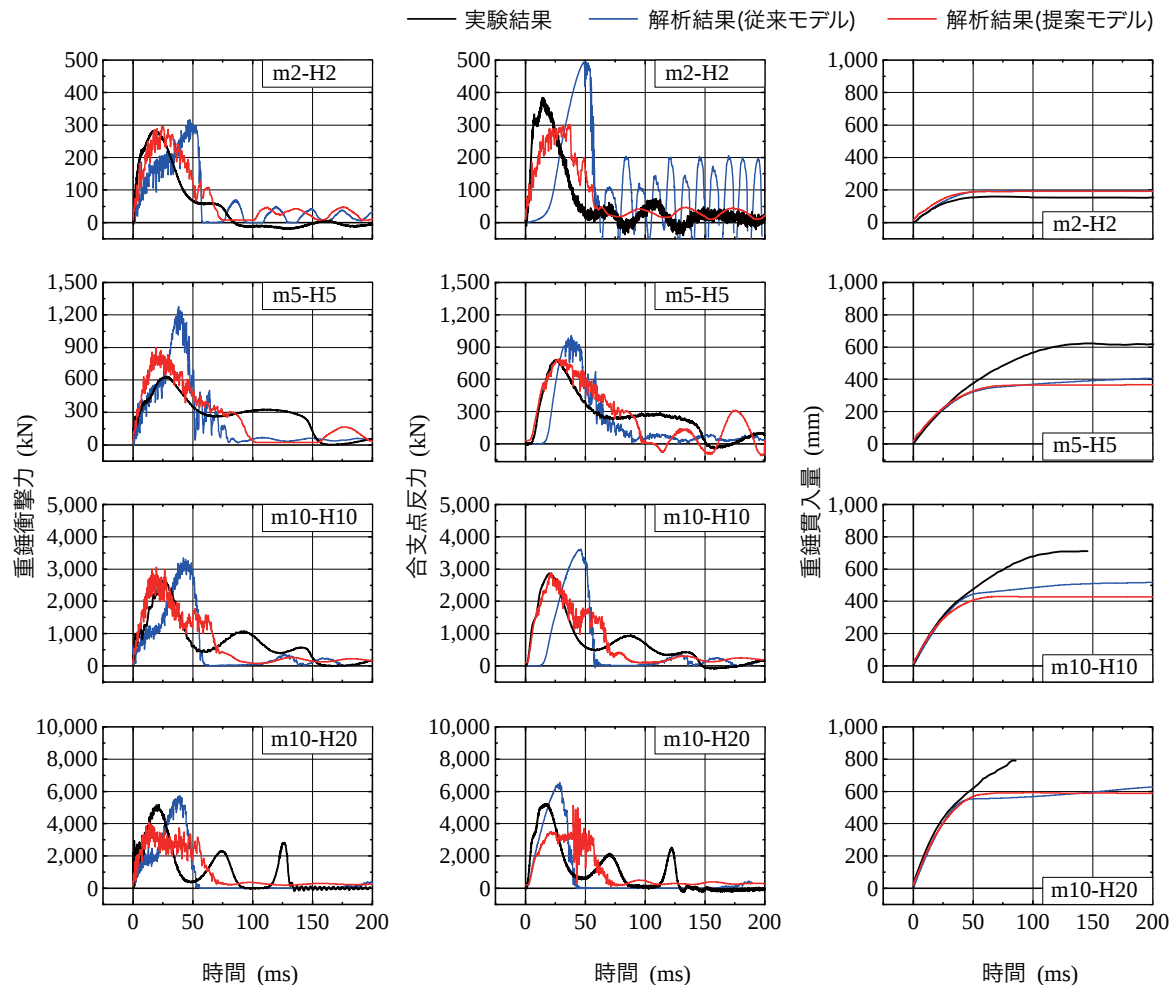


図8 重錘衝撃力、合支点反力、重錘貫入量の時刻歴応答波形

果を精度よく再現できている。一方、重錘貫入量に関しては、従来モデルとほぼ同様な傾向を示し、いずれの場合においても数値解析結果は実験結果より低く評価されている。なお、m10-H20の場合における最大重錘貫入量は80 cmであり、敷砂厚90cmに対して非常に大きく貫入している。このように、重錘が大きく貫入する場合には提案の構成則モデルの適用は難しいものと考えられる。

5. まとめ

- 1) 提案の構成則モデルを用いることで、ロックシェッド頂版に敷設される敷砂緩衝材の重錘衝撃力、伝達衝撃力を適切に評価可能であることが明らかになった。
- 2) 一方で、重錘貫入量は実験結果に対して過小評価される傾向にある。

今後は、提案した構成則モデルを用いて、実規模RC製ロックシェッドに対する弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較を行う予定である。

参考文献

- 1) 今野久志, 西 弘明, 山口 悟, 栗橋祐介, 岸 徳光: 三層緩衝構造を設置した実RCロックシェッド

の重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第70号, 2014.

- 2) 佐伯侑亮, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光: 緩衝材として碎石を設置した実RCロックシェッドの重錘落下衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第70号, 2014.
- 3) 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 山口 悟, 川瀬良司: 重錘落下衝撃荷重を受ける1/2スケールRC製ロックシェッド模型に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1029-1040, 2012.
- 4) 今野久志, 岸 徳光, 山口 悟, 牛渡裕二: 載荷位置を変化させた1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.2, pp.673-678, 2012.
- 5) 山口 悟, 木幡行宏, 小室雅人, 今野久志, 岸 徳光: 落石防護工用緩衝砂と碎石の緩衝特性に関する実験的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第70号, 2014.
- 6) 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
- 7) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2012.