

縮小模型実験による三層緩衝構造の緩衝性能評価

Evaluation of cushioning capacity of Three Layered Absorbing System by means of scaled model test

室蘭工業大学大学院
(株) JSP
(株) JSP
室蘭工業大学大学院

○ 正員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
非会員 小暮 直親 (Naochika Kogure)
非会員 新田 真一 (Shin-ichi Nitta)
学生員 戸上 卓也 (Takuya Togami)

1. はじめに

ロックシェッドの耐衝撃性向上法の1つとして、頂版上の緩衝材に発泡材を単体で、あるいはRC版やジオグリッドなどと組み合わせて用いる方法がある。発泡材としては、単位体積重量が 0.2 kN/m^3 程度のポリスチレン発泡体を用いられる場合が最も多く、設計法もこの発泡材を用いることを前提に提案されている¹⁾。

一方、近年では発泡材としてポリエチレン、ポリプロピレンの他²⁾、硬質なポリカーボネイトを原料とするものも開発され流通している。これらの発泡材を緩衝構造に用いる場合には、緩衝特性の他、粘性や復元特性も異なることから、既存設計法の適用には、実験や数値解析等による検討が必要となる。

例えば、発泡材とRC版および砂から構成される三層緩衝構造(図-1参照)の場合には、実規模実験に基づいて緩衝構造の設計法が構築されている³⁾。実規模実験は、信頼性が最も高い性能評価法であるものの、時間的、金銭的なコストが大きな負担となる。他方、縮小模型により三層緩衝構造の緩衝性能評価を行った例はほとんどない。

縮小模型による緩衝性能評価が可能になり標準化されると、要求性能に応じた新しい緩衝構造の開発のハードルが下がり、防災技術のさらなる高度化が期待できるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、三層緩衝構造の縮小模型による緩衝性能評価の妥当性検証を目的に、緩衝構造の縮小模型を落石対策便覧¹⁾(以後、便覧)に基づいて設計・製作し、重錘落下衝撃実験によりその性能を評価した。

2. 三層緩衝構造模型の設計

三層緩衝構造模型は、室蘭工業大学の重錘落下装置を用いて検討することを前提に、外力を設定した上で設計した。表-1には、一般的な三層緩衝構造の諸元を本研究で設計

表-1 三層緩衝構造の設計条件と諸元

項目	実規模 ³⁾	縮小模型
重錘質量 (ton)	3 ~ 10	0.4
重錘直径 (m)	1	0.2
落下高さ (m)	10 ~ 40	1.83
敷砂厚 (mm)	500	50
RC版厚 (mm)	200 ~ 300	75
発泡材厚 (m)	0.5 ~ 1.0	0.25
設計上の平面寸法 (m)	4 × 4	1 × 1

した縮小模型と比較して示している。

2.1 外力の設定

設定外力は、重錘落下実験装置の载荷能力を考慮して、落体質量 400 kg 、落下高さ 1.83 m ($V=6 \text{ m/s}$ 相当)とした。

なお、RC版上における敷砂の厚さは、実験装置の能力や実験時における設置作業効率を考慮し、その緩衝効果が得られる最低限の厚さとして 50 mm とした。

2.2 設計用衝撃力 P_a の算定

緩衝構造模型の設計用の衝撃力 P_a は、便覧を参考に下式により求めた。

$$P_a = 44.1 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot H^{3/5} \quad (1)$$

ここに、 m : 落体の質量、 g : 重力加速度、 H : 落下高さ、である。なお、式(1)は、敷砂緩衝材においてラーメ定数 $\lambda=2,000 \text{ kN/m}$ とした場合の衝撃力算定式と同様である。本研究の条件では、 $P_a=158 \text{ kN}$ と算定された。

2.3 RC版厚 h_c の算定

RC版厚 h_c は、便覧を参考にRC版を単鉄筋配置とすることに留意して下式により求めた。

$$h_c = d + c \quad (2)$$

$$d = \frac{P_a}{D(\pi\tau_{cu} + 4p\tau_{su})} \times \gamma \quad (3)$$

ここに、 d : RC版の有効高さ、 c : RC版の下縁かぶり、 D : 落体の直径、 τ_{cu} : コンクリートのせん断強度(圧縮強度の $1/10$)、 p : 主鉄筋比、 τ_{su} : 主鉄筋のせん断強度(引張強度の $1/\sqrt{3}$)、である。なお、コンクリート圧縮強度については設計基準強度 24 MPa を用い、鉄筋引張強度についてはSD295の規格値の最低値 440 MPa を用いた。

本研究の条件では、有効高さ $d=44.3 \text{ mm}$ となった。また、かぶり c は、コンクリート用粗骨材の最大直径 $G_{max}(=25 \text{ mm})$ を考慮して 30 mm とした。上記より、RC版厚は $h_c=75 \text{ mm}$ と算定された。

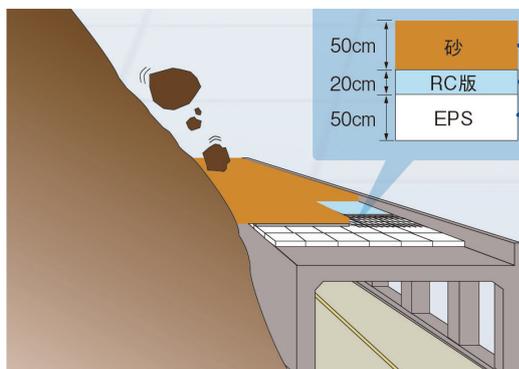


図-1 三層緩衝構造の概要

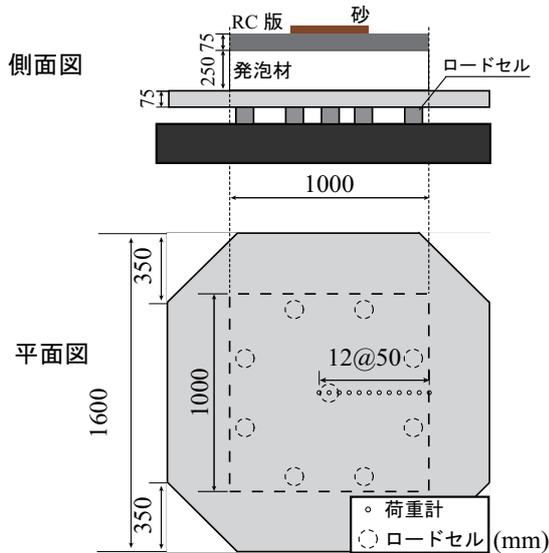


図-2 実験装置および試験体の概要

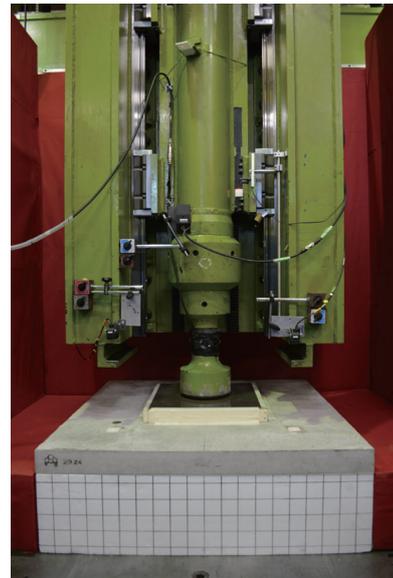


写真-1 実験状況

2.4 発泡材のひずみエネルギー E_w の算定

E_w は、発泡材が吸収する必要があるひずみエネルギーであり、合質点により作用する入力エネルギーと等価である。なお、便覧の算定式は実規模(平面寸法 4×4 m)を対象とした式であることから、土木学会「ロックシェットの耐衝撃設計」³⁾を参考に、平面寸法 1×1 m の縮小模型であることを留意して下式により求めた。

$$E_w = \frac{2gT^2P_a^2}{\pi^2(W_s + W_c + W_w)} \quad (4)$$

ここに、 T : 衝撃力作用時間、 W_s : 砂の重量、 W_c : RC版の重量、 W_w : 落体の重量、である。ここで、砂の単位体積重量は 15.7 kN/m^3 、RC版の単位体積重量は 24.5 kN/m^3 とした。

なお、衝撃力作用時間 T は、実規模の場合は 0.03 秒と仮定されているが、本実験では縮小模型を用いているため低減する必要がある。ここでは、RC版厚 $h_c (= 75 \text{ mm})$ が実規模の場合 ($200 \sim 300 \text{ mm}$) の 0.3 倍程度であることから、重力場における相似則に基づき、 0.03 秒に $0.3^{1/2}$ を乗じて $T = 0.0164$ 秒とした。

これらのことを考慮すると、本研究の条件においては、 $E_w = 2.24 \text{ kJ}$ と算定された。

2.5 発泡材厚 h_e の算定

発泡材厚 h_e は、便覧に基づいて下式により算定した。なお、 h_e はフェールセーフとして、落石がRC版を押し抜いた場合を想定し、発泡材のみでエネルギー吸収可能な厚さとして求められる。

$$h_e > \frac{4E_w}{334(D + 2h_c)} \quad (5)$$

上記より、 $h_e \geq 0.219 \text{ m}$ となったことから、発泡材厚 $h_e = 0.25 \text{ m}$ と設定した。

3. 実験方法

図-2には、本実験で用いた実験装置および試験体の概要を示している。また、写真-1には、実験状況を示して

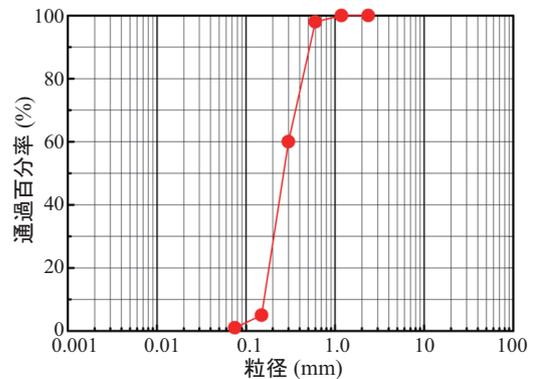


図-3 砂の粒度分布

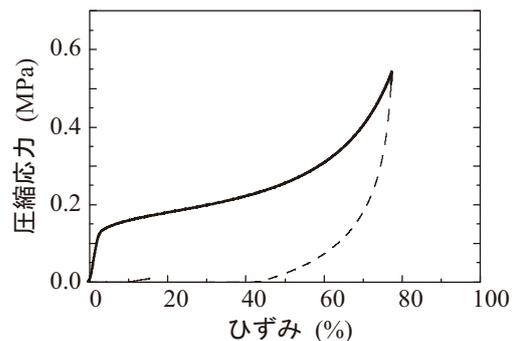


図-4 発泡材の材料試験結果

いる。本実験装置は、伝達応力測定用ロードセル(以降、応力計)が設置された鋼製底盤(1.6 m 四方、厚さ 75 mm)と底盤を支持する 9 個の伝達力測定用ロードセル(以降、反力計)から構成されている。応力計は、底盤中央部および左側 50 mm の位置に 1 個ずつ、および中央部から右側端部まで 50 mm 間隔で 11 個の計 13 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。

試験体は、平面寸法 $1,000 \text{ mm} \times 1,000 \text{ mm}$ 、高さ 250 mm の EPS ブロックの上に、厚さ 75 mm の RC 版を設置し、さらにその上に厚さ 50 mm の砂を設置している。

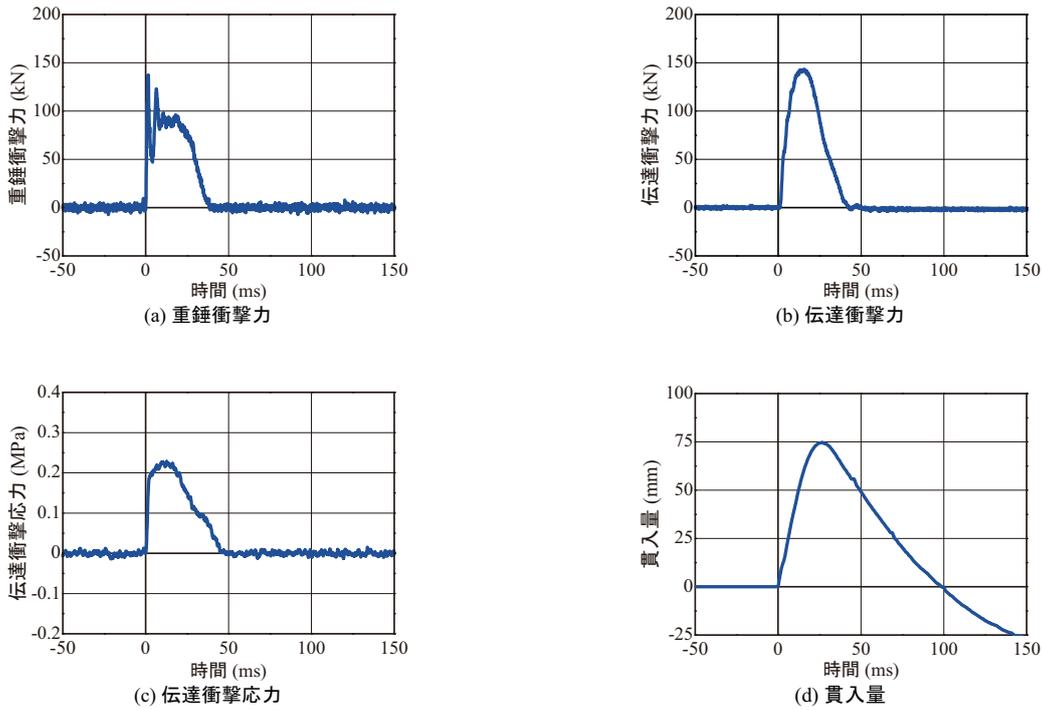


図-5 時刻歴応答波形

ここで、RC版の引張鉄筋比は、落石対策便覧に準拠し1%程度とした。そのため、SD295 D6を70 mm間隔で格子状に配置した。コンクリートの圧縮強度は30.5 MPa、鉄筋の降伏および引張強度はそれぞれ362, 512 MPaであった。

砂は、中央部の400 mm四方の範囲に設置した。砂の産地は北海道石狩市知津狩であり、その粗粒率、最大乾燥密度および最適含水比は、それぞれ1.37, 1.516 g/cm³, 19%となっている。図-3には、砂の粒度分布を示している。

また、砂は足踏みによって締固め、所定の厚さである50 mmに成形した。含水率は8%程度となるように設定した。

発泡材には、落石覆工の緩衝材として最も実績のあるポリスチレン発泡体(発泡倍率50)を用いた。単位体積質量は0.2 kN/m³である。図-4には、発泡材の応力-ひずみ関係に関する材料試験結果を示している。

実験は、本装置を剛基礎上に設置し試験体を装置の中央に配置し、衝撃荷重を試験体中央部に載荷させる形で行った。重錘は質量400 kg、先端部直径φ200 mmであり、その底部には片当たり防止のために2 mmのテーパが設けられている。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、伝達衝撃応力分布、および重錘貫入量である。なお、伝達衝撃力は前述の反力計で測定した9点の反力の合計である。重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセル、伝達衝撃応力分布は前述の応力計、重錘貫入量はレーザ式変位計を用いて測定した。

4. 実験結果

4.1 時刻歴応答波形

図-5には、各時刻歴応答波形を示している。重錘衝撃力は、衝突初期における高周波と、継続時間40 ms程度の主波動から構成された波形を示している。後述の通りRC

版が押し抜けていることから、この波形は、重錘が砂を介してRC版に衝突した後、RC版が押し抜きせん断破壊を生じ、発泡材がエネルギーを吸収している状況を示している。なお、設計による衝撃力は158 kNであることから、実測値は設計値に近い値を示しているといえる。

伝達衝撃力は、重錘衝撃力の場合と異なり、初期の高周波成分は見られないものの、主波動の形状や作用時間は概ね同様である。このような傾向は、過去の実規模実験と同様である。

伝達衝撃応力波形より、最大値が0.2 MPa程度であることから、発泡材の緩衝性能には未だ余裕があるものと考えられる。

重錘移動量は、最大値到達後、大きくリバウンドしている状況が見られる。なお、その最大値は75 mm程度である。実験終了後において固化した砂の厚さが25 mm程度であったことを考慮すると、発泡材の最大ひずみは、20%程度であったものと考えられる。

4.2 破壊性状

写真-2には、実験終了後におけるRC版の上・下面の破壊性状、および発泡材上面と中央部切断面の状況を示している。写真より、RC版上面では中央部において重錘の直径と同じ寸法で陥没していることが分かる。下面の中央部では、広範囲に渡って押しせん断コーンが形成され、その内部ではかぶりコンクリートがいくつもブロック状になっている。また、その周辺には放射状に進展するひび割れが発生している。

発泡材上面には、RC版下面の押し抜きせん断コーンに対応する範囲で残留変位および亀裂等の損傷が見られる。また切断面を見ると、内部にも亀裂が見られる。ただし、これらの損傷は極めて軽微であることから発泡材の緩衝性能は、まだ十分に残されているものと考えられる。

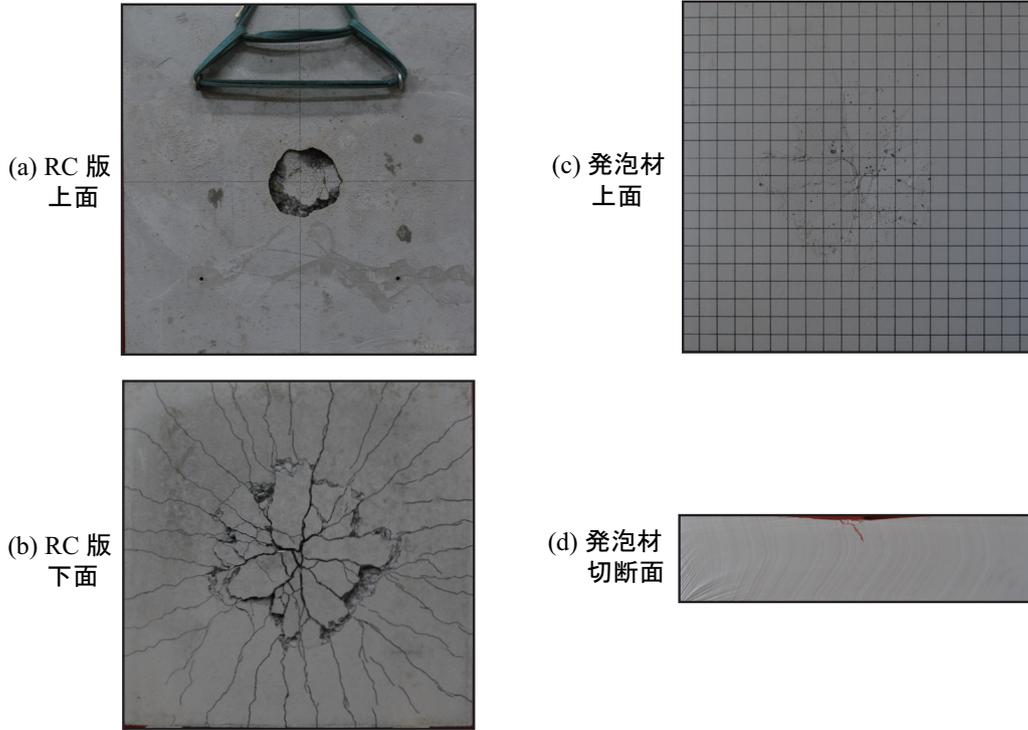


写真-2 RC版および発泡材の破壊性状

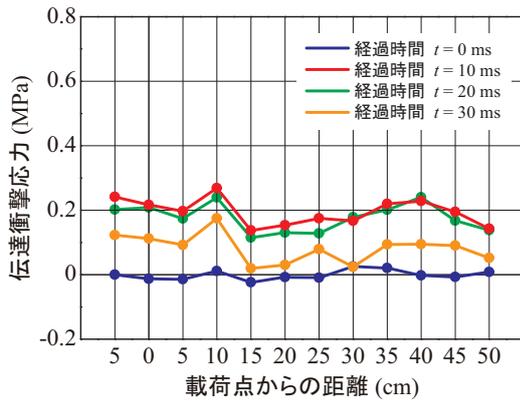


図-6 伝達衝撃応力分布

4.3 伝達応力分布

図-6には、伝達応力分布を示している。図より、ほぼ全域に渡って0.2 MPa程度の伝達衝撃応力が分布していることがわかる。このことから、前述のようにRC版には押し抜きせん断破壊が生じているものの、衝撃応力分散効果が十分に発揮されていることがわかる。

以上のことから、便覧に基づいて設計した三層緩衝構造の縮小モデルは、設定した外力に対して十分な緩衝性能を発揮しており、かつ未だ緩衝性能に余裕が残されていること

が明らかになった。

5. まとめ

本研究では、三層緩衝構造の縮小モデルによる性能評価の妥当性を検証することを目的に、緩衝構造の縮小モデルを落石対策便覧に基づいて設計・製作し、重錘落下衝撃実験により緩衝性能を評価した。その結果、落石対策便覧に準拠して設計した三層緩衝構造の縮小モデルは、設計条件の入力エネルギーに対して十分な緩衝効果を発揮することが明らかになった。このことから、上記の設計式は、緩衝構造の寸法を考慮して修正することで、小さな入力エネルギーに対しても適用可能であるものと推察される。

今後は、入力エネルギーや発泡材の種類が異なる場合を対象に、縮小モデル実験による緩衝性能評価の妥当性に関する検討を推進する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 栗橋祐介，小暮直親，新田真一，小室雅人，戸上卓也：各種発泡材料の緩衝性能評価に関する重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol. 64A, pp.908-919, 2018.3
- 3) 土木学会：ロックシェットの耐衝撃設計，構造工学シリーズ 8, 1998.11