

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

Experimental study of shock absorbing performance of sand and Gravel cushion

(独)土木研究所寒地土木研究所 ○正 員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
 室蘭工業大学大学院社会基盤ユニット 正 員 木幡行宏 (Yukihiro Kohata)
 室蘭工業大学大学院社会基盤ユニット 正 員 小室雅人 (Masato Komuro)
 (独)土木研究所寒地土木研究所 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

北海道の道路は急峻な地形や海岸線等に築造されている場合も少なくなく、大規模な岩盤崩壊や落石を始めとする道路災害(写真-1)が発生している。このため、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。その落石防護構造物の一つに、RC製ロックシェッド(以後、ロックシェッド)が挙げられる。

これらのロックシェッドは、主に「落石対策便覧」¹⁾に基づき、許容応力度法に基づいて設計が行われている。しかしながら、近年、様々な土木構造物の設計法が許容応力度設計法から性能照査型設計法に移行してきており、ロックシェッドにおいても、より合理的な設計を可能とする性能照査型設計法の確立が望まれている。

この様な状況下において、筆者らは、ロックシェッドに対する性能照査型設計法確立のための基礎的な取り組みとして、RC梁やRC版等の部材、さらにはロックシェッド模型に対する重錘落下衝撃実験を実施し、終局に至るまでの耐衝撃挙動の把握を行ってきた。その結果、許容応力度法により設計された構造物は終局と定義される入力エネルギーでは30~40倍程度の安全余裕度を有していることを確認している²⁾。また、これら実験結果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評価可能な数値解析手法の開発に関する検討を行っている。

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、性能照査型設計法の確立に向けて終局時近傍までの耐衝撃挙動を数値解析的に検討するためには、より厳しい落石条件下に対しても精度の高い解析結果を与える敷砂の材料構成則モデルの構築が必要である。また、建設年度の古い既設のロックシェッド頂版上の緩衝材は、現地発生土の礫質土であることが原位置調査から明らかとなっている³⁾。

このような観点から、本研究では、各種条件下における敷砂緩衝材と碎石緩衝材の数値解析用材料構成則モデルの設定手法を構築するための基礎的研究として、室内実験に続いて、大型緩衝材衝撃実験装置を用いて重錘落下衝撃実験を実施した。本論文では、敷砂緩衝材と碎石緩衝材の入力エネルギーを変化させ、重錘衝撃力および伝達衝撃力、重錘貫入量の耐衝撃挙動データを精度よく計測した。また、敷砂緩衝材については緩衝材の締め固めをルーズな状態と密実な状態に変化させ、衝撃実験を実施したので併せて報告する。



写真-1 北海道の落石による道路災害例(2008)

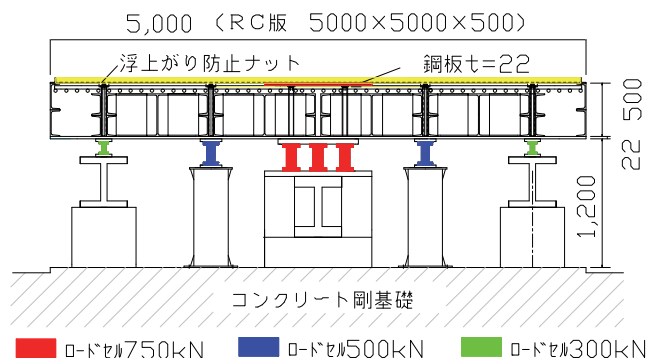


図-1 実験装置概要(側面図)

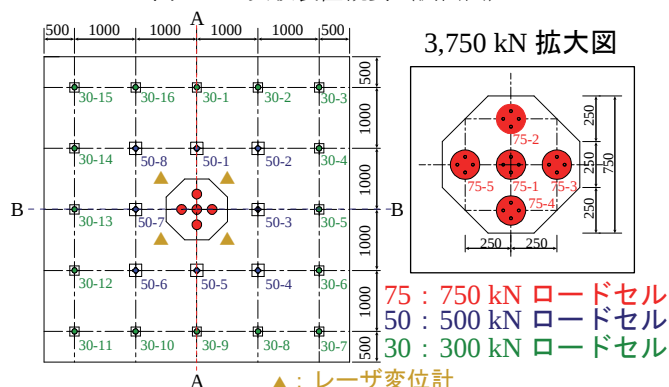


図-2 伝達衝撃力計測用ロードセル配置図(平面図)

2. 実験概要

2.1 実験装置の概要

本研究では、緩衝材を介して RC 部材や構造物に入力

される衝撃力（伝達衝撃力）を精度よく計測するために、図－ 1 に示すような鋼・コンクリートから成る SRC 版を製作し、かつその下方に図－ 2 に示す衝撃用ロードセルを設置している。

敷砂緩衝材の緩衝特性に関する研究において、伝達衝撃力は一般的に緩衝材下面で計測された伝達衝撃応力が重錘衝突位置に対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することにより評価している。しかしながら、伝達衝撃応力の分布性状によっては計測誤差等も集積されることにより精度の高い伝達衝撃力が得られない可能性もある。このことから、本研究では緩衝材を設置した SRC 版全体をロードセルで支持し、緩衝材を介して基礎部に伝達される反力を計測することとした。

SRC 版は各辺 5 m の正方形で、版厚 0.5 m である。緩衝材の砂枠は、4.9 m × 4.9 m の平面形状となっている。

2.2 衝撃実験概要

写真－ 2 には、衝撃载荷実験状況を示している。実験は、敷砂、砕石ともロックシェッド頂版上と同じ 90 cm の厚さで緩衝材を設置し、質量 2, 5, 10 ton の鋼製重錘をトラッククレーンにより 2.0 ～ 31.25 m の高さまで吊り上げ、脱着装置により緩衝材の設置されている SRC 版中央部に自由落下させることにより行っている。

使用した鋼製重錘は、2, 5 ton 重錘は直径が 1.0 m、高さが 97 cm で底部より高さ 17.5 cm の範囲が半径 80 cm の球状となっており、10 ton 重錘は直径が 1.25 m、高さが 95 cm で底部より高さ 30 cm の範囲が半径 1 m の球状となっている。また、重錘は鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して所定の質量に調整している。

実験に使用した緩衝材料はこれまでの実験と同一産地とし、砂は石狩市厚田の知津産の細砂を使用し、砕石は小樽市見晴産の切込砕石（0 ～ 30 mm 級）とした。本実験に用いた緩衝材の物性値を表－ 1 に示す。

表－ 2 には、実験ケースの一覧を示している。実験ケース名は緩衝材の種別として敷砂、砕石を示す S、G と重錘質量（ton）を示す m、落下高さ（m）を示す H とその高さを付し、ハイフンで結び示している。

緩衝材の締め固めはこれまでの敷砂、砕石緩衝材実験と同様に、緩衝材厚 90 cm の場合には、30 cm 毎の 3 層として設置を行った。砕石緩衝材については既設ロックシェッドの礫質土緩衝材が非常に強固に締め固まっていたことから、実験においても同様の状態を再現するため、密実に締め固めることを目的として、タンピングランマーにて 2 往復以上を目安として締め固めを行った。

敷砂緩衝材は当初、実験ケース名の最後にハイフンで S を付した 2 ケースについて、これまでの敷砂緩衝材実験と同様に、30 cm 1 層毎にそれぞれ足踏み式により実験を行った。しかし、計測された重錘衝撃力の値が小さく、重錘の貫入量が大いことから、砕石緩衝材と同様にタンピングランマー（以後、機械）にて密実に締め固めて行うことを標準として、以後の実験を実施した。

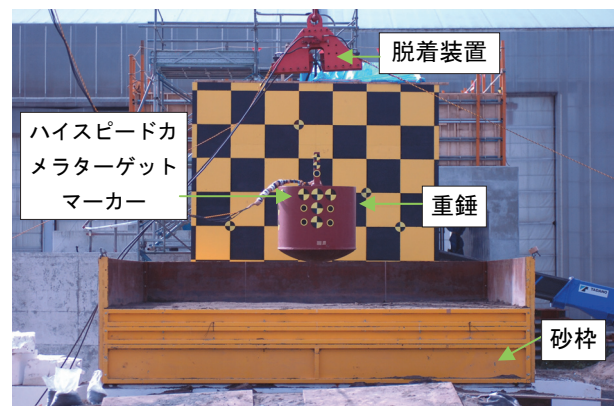
実験ケースの選定にあたり、緩衝材の緩衝特性を明確にすることを目的として、重錘が自由落下した際の緩衝

材との接触時の理論衝撃力を同一として、質量を変えた場合の比較ケースを選定した。また、実験ケース名 G-m 2-H 31.25 については、1回目の実験で重錘が脱着した際に重錘が斜めに自由落下したことから、再度、同一ケースにて実験を行ったものである。

各実験の前には、緩衝材の締め固め状況の確認として、土質試験を実施し、密度測定を行った。また、各実験の終了後には重錘落下中心部の 3 m × 3 m 以上の範囲の緩衝材をバックホウにより取り除き、SRC 版の損傷が無いことを確認し、敷砂緩衝材を再設置した。

2.3 デジタルハイスピードカメラによる計測方法

緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験では、緩衝材への重錘貫入量の計測が重要である。このため、詳細な現象の解明のため、デジタルハイスピードカメラを使用した。



写真－ 2 実験装置と重錘（実験状況）

表－ 1 緩衝材の物性値

緩衝材	産地	分類	粗粒率	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
敷砂	知津狩	細砂	1.37	1.516	18.8
砕石	見晴	切込砕石	5.43	2.175	6.1

表－ 2 実験ケース一覧

実験ケース	緩衝材	落下高さ H (m)	入力エネルギー E _k (KJ)	理論衝撃力 mv (kNs)
S-m 2-H 2	敷砂	2.0	39.2	12.5
S-m 5-H 5-S		5.0	245.2	49.5
S-m 5-H 5		5.0	245.2	49.5
S-m 10-H 10-S		10.0	980.7	140
S-m 10-H 10		10.0	980.7	140
S-m 10-H 20		20.0	1,961.3	198
G-m 2-H 2	砕石	2.0	39.2	12.5
G-m 2-H 20		20.0	392.3	39.6
G-m 2-H 31.25		31.25	613.0	49.5
G-m 2-H 31.25		31.25	613.0	49.5
G-m 5-H 5		5.0	245.2	49.5
G-m 10-H 10		10.0	980.7	140

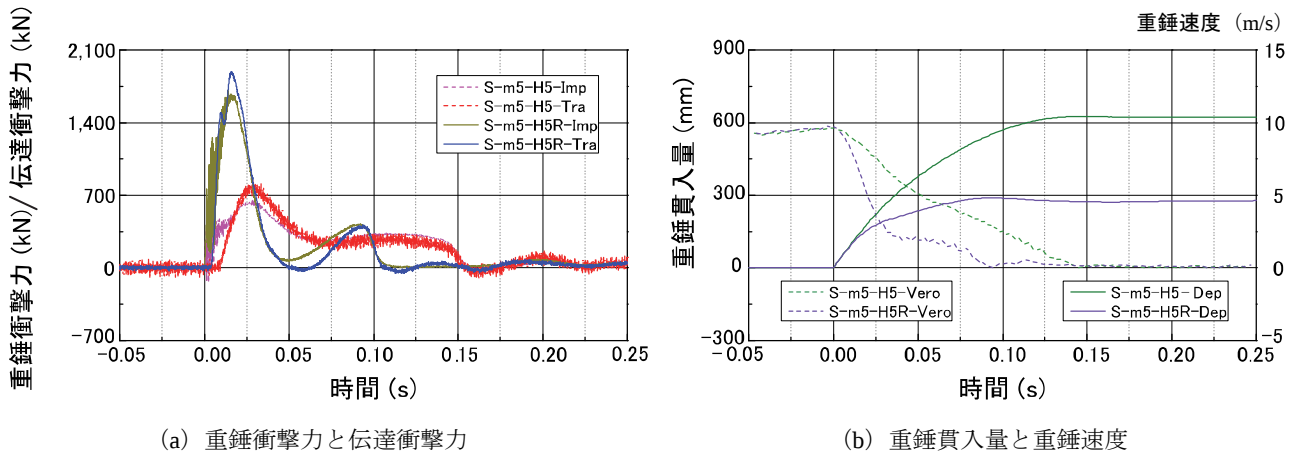


図-3 各種応答波形 (S-m 5-H 5)

撮影は 1/1,000 sec (1,000 コマ/秒) で、有効画素数: カラー 1,120 × 1,120 にて収録を行った。また、解析ソフト (View Point: Glenallan Technology 社製) を使用し、不動点と重錘に設置したターゲットマーカーから重錘貫入量を計測した。

使用したデジタルハイスピードカメラは、重錘落下時の安全対策と大型重機による緩衝材の設置撤去場の確保が可能であることとして、撮影距離 20 m 以上で、ms の分解能を有し、微小な変位を計測できる機種 (IDT社製) を選定した。

2.4 計測機器による計測方法

本実験における計測機器による計測項目は、1) 重錘の頂部表面に設置したひずみゲージ式高応答小型加速度計 (容量 200、500、1,000 G、応答周波数 DC ~ 5 kHz: 共和電業社製) による重錘衝撃力、2) SRC 版下面に設置した図-2 に示す 29 個の衝撃用ロードセル (定格容量: 750 KN 5 個、500 KN 8 個、300 KN 16 個) の合計値である伝達衝撃力、3) レーザ式変位計 (LB: KEYENCs 社製、応答周波数約 1 kHz) による SRC 版の変位である。

衝撃実験時の各種応答波形は、いずれもサンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。

各実験に際して敷砂緩衝材の締め固め密度の確認として、RI計器 (JGS:1614 ラジオアイソトープ (放射線同位元素) を用いた機器で、土の密度及び含水比を求める試験方法) や衝撃加速度試験装置 (国土交通省北海道開発局道路河川工事仕様書、盛土の締め固め施工管理方法) を用いて締め固めの密度管理を行っている。また、シンウォールサンプリングチューブを用いて、実験前には 3 箇所を試料の採取 ($\phi 7.5$ cm、 $H = 15$ cm) を実施し、実験後には重錘直下の中心の 1 箇所を試料の採取 ($\phi 7.5$ cm、 $H = 5$ cm) を行っている。

3. 実験結果

3.1 各時刻歴応答波形

ハイスピードカメラから出力されたトリガー (0.1 ms) と重錘加速度計の反応時間との同期結果より、両者の間には 1 ms 以内の誤差しか生じておらず、ハイスピードカメラの画像が ms 毎の収録であることから、両者はほぼ同定されたことを確

認した。この同定された画像より、画像解析を行い、時刻歴の重錘の貫入量と重錘速度を求めた。

図-3 (a), (b) には、人力による締め固めと機械による締め固めの違いとして、敷砂緩衝材の落下高さ $H = 5$ m (入力エネルギー $E = 245.2$ kJ) の場合の重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量と重錘の速度に関する時刻歴応答波形について、重錘衝突時刻を 0 として示している。なお、伝達衝撃力は前述したとおり図-2 に示した 29 個の衝撃用ロードセルからの応答波形を単純に足し合わせたものである。また、重錘速度については、該当するデータ値の前後 1 個の数値を加味して、相加平均を行って表記している。図の凡例は、Rと表記しているものが、機械 (Rammer) による締め固めを行った実験結果を示しており、重錘衝撃力は Imp (Impact force)、伝達衝撃力は Tra (Transmitted impact force)、重錘貫入量は Dep (Penetration depth)、重錘速度は Velo (Weight mass velocity) としている。

(a) 図より、人力により締め固めた敷砂緩衝材の重錘衝撃力波形、伝達衝撃力波形は共に、正弦半端とそれに続く周期が長く振幅の小さい半端が合成された波形性状を示している。これに対して機械により締め固めた敷砂緩衝材の重錘衝撃力波形、伝達衝撃力波形は共に、重錘衝突初期の正弦半端と周期が同程度で、第 1 波のピーク値に対してピーク値が 1/5 程度の正弦半端状の第 2 波からなる波形性状を示している。

伝達衝撃力波形に着目すると、ピーク値は共に重錘衝撃力よりも大きな値となっていることが分かる。また、伝達衝撃力の励起は、機械による締め固めに比べ、人力による締め固めた敷砂の場合の方が遅れて励起していることが分かる。

(b) 図より、重錘貫入量による比較では、敷砂厚 $t = 900$ mm に対して、人力と機械により締め固めた敷砂緩衝材はそれぞれ敷砂厚の 70% と 32% の貫入量となった。

重錘の自由落下時の重錘速度 ($v = \sqrt{2gh}$) は、 $v = 9.9$ m/s となり、重錘衝突直前の重錘速度と一致する。その後重錘は敷砂緩衝材と接触し、重錘速度が減速し、停止するまで敷砂緩衝材内へ貫入する。

時刻歴の重錘速度と重錘貫入量は重錘の速度変化点で貫入量も変曲点となり、時刻歴の重錘貫入量の曲線勾配に変化が生じ

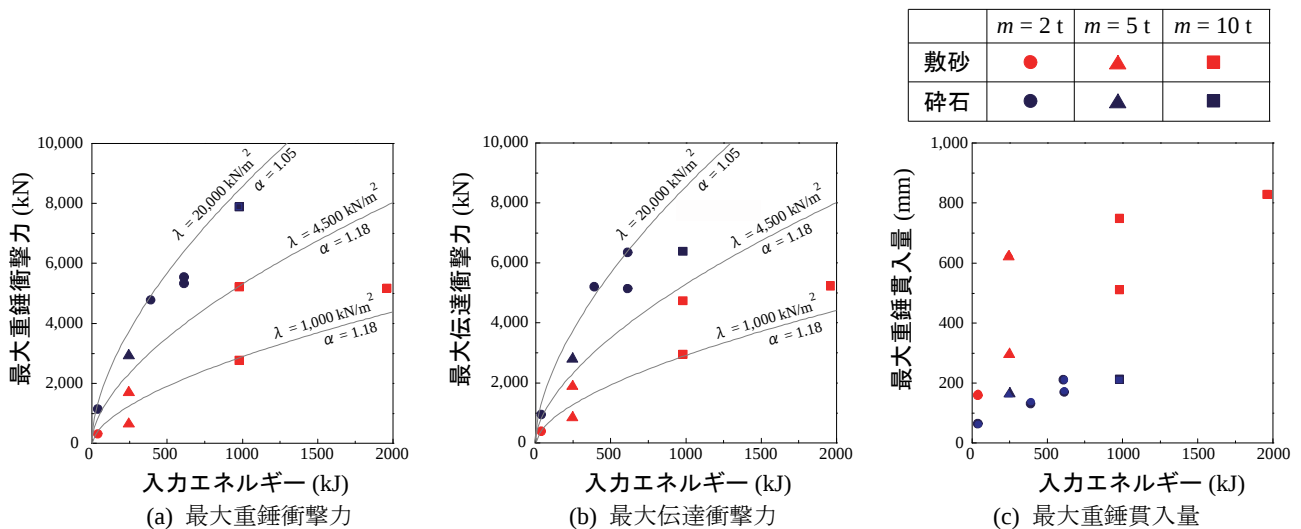


図-4 各種最大値と入力エネルギーの関係

ていることが分かる。また、重錘速度と(a)図の波形性状のピーク値の比較により、機械による締め固めた場合には、 $t = 25 \text{ ms}$ 程度で重錘速度の変曲点があるのに対して、衝撃力波形の最大ピーク値は $t = 18 \text{ ms}$ 程度で発生しており、重錘速度が低下する以前にピーク値が発生していることから、従来から著者らの考察（推察）してきた、緩衝材内を伝播する波動により重錘が最大貫入時以前よりも、もっと前の重錘の速度が変化する以前にピーク値が発生することが特定できた。この傾向は、人力により締め固めた場合においても同様の結果を示している。

以上より、ハイスピードカメラデータとの同期により、最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力の発生時刻と重錘の貫入や重錘速度との関係を特定することができた。また、同一入力エネルギーの敷砂緩衝材の落下高さ $H = 5 \text{ m}$ （入力エネルギー $E = 245.2 \text{ kJ}$ ）の実験結果から、人力と機械（タンピングランマー）による締め固め度の違いが、重錘衝撃力波形や伝達衝撃力波形、重錘貫入量に大きく影響することが分かった。また、今後はそれぞれの波形性状より、力積で検討を行う予定である。

3.2 各種最大衝撃力と入力エネルギーの関係

図-4には、各種最大値と入力エネルギーの関係を示している。図中の曲線は敷砂緩衝材を用いた場合における Hertz の接触理論に基づく振動便覧式⁴⁾に基づき、緩衝材厚と落石直径の比から決定される割り増し係数を考慮して算出した衝撃力（ラーメ定数： $\lambda = 1,000 \sim 20,000 \text{ kN/m}^2$ 、割り増し係数： $\alpha = (D/T)^{1/2} = 1.05 \sim 1.18$ 、 D ：重錘径 $1.00 \sim 1.25 \text{ m}$ 、 T ：敷砂厚 90 cm ）を示している。

(a)図より、敷砂、砕石緩衝材とも入力エネルギーの増加に伴い、各重錘衝撃力の最大値も増加している。またラーメ定数では、敷砂厚 90 cm の場合には、 $\alpha = 1.18$ を用いた $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ の曲線と入力エネルギーの大きな敷砂緩衝材の最大重錘衝撃力の値は、ほぼ同様な値となっており、これまでの実験結果と同様な値を示している。S-m 10-H 10 の機械により締め固めた敷砂の最大重錘衝撃力は、 $\lambda = 4,500 \text{ kN/m}^2$ の曲線と同じ

値であり、非常に強固に締め固まっており、大きな衝撃力が発生していることが分かる。また、砕石緩衝材の場合には、衝撃力算定のためのラーメ定数 $\lambda = 20,000 \text{ kN/m}^2$ として計算した曲線と計測された最大重錘衝撃力や(b)図の伝達衝撃力が同じ値となっている。

(c)図より、最大重錘貫入量は敷砂の方が大きい。

以上より、砕石緩衝材を用いた衝撃力算出の場合には、衝撃力算定のためのラーメ定数： $\lambda = 20,000 \text{ kN/m}^2$ として、安全側に考える必要がある。

4. まとめ

本研究では、敷砂と砕石緩衝材の数値解析に用いる材料構成構則モデルの設定手法を構築するための基礎的研究として、敷砂緩衝材と砕石緩衝材の入力エネルギーを変化させ、緩衝特性の把握を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ハイスピードカメラデータとの同期により、最大重錘衝撃力や最大伝達衝撃力の発生時刻と重錘の貫入量や重錘速度の関係を特定することができた。
- 2) 衝撃力を緩衝する敷砂緩衝材においては、締め固め度の違いが、重錘衝撃力や伝達衝撃力、重錘貫入量に大きく影響を及ぼす。
- 3) 砕石緩衝材を用いた衝撃力算出の場合には、衝撃力算定のためのラーメ定数： $\lambda = 20,000 \text{ kN/m}^2$ として、安全側に考える必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧、2000.6.
- 2) 牛渡裕二、川瀬良司、今野久志、岸 徳光：RC 製ロックシェッド模型の重錘落下挙動に関する二次元骨組解析法の妥当性検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.33, No.2, pp.61-66, 2011.7
- 3) 山口 悟、木幡行宏、今野久志、西 弘明、小室雅人、岸 徳光：既設落石防護覆道上の緩衝材の実態調査について、第 48 回地盤工学研究発表会、pp.2055-2056, 2013.7
- 4) 土木学会：土木技術者のための振動便覧、1985.