

ソイルセメントの緩衝性能に関する重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact test for evaluation of absorbing performance of Soil-cement

(株) 構研エンジニアリング
 室蘭工業大学大学院
 室蘭工業大学大学院
 (株) 構研エンジニアリング
 (株) 構研エンジニアリング

○ 正会員 保木和弘 (Kazuhiro Hoki)
 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)
 正会員 牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
 正会員 鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線を通る道路は、急峻な地形を呈していることから、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。一方で、近年の異常気象（ゲリラ豪雨など）や対象斜面の経年変化、調査手法の高度化によって、設計当初には想定され得なかった大規模な落石要因が確認されるなど、落石防護構造物の安全性向上が望まれている。しかしながら、これらを再度新設する場合には既設構造物の撤去も含め、莫大な費用が必要となり、建設コストの縮減が求められている中で、大きな負担となっている。

ここで、本研究の対象である落石防護擁壁においては、通常、落石の持つ運動エネルギーと擁壁基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となるように設計されている。そのため、直接基礎の無筋コンクリート製重力式擁壁が殆どである。しかしながら、実際には落石による衝撃荷重が作用するため、せん断破壊の事例が数多く報告されている。また、たとえ補強鉄筋を配置した場合においてもせん断ひび割れの発生は避けられない。このような既設の無筋コンクリート製落石防護擁壁の耐衝撃挙動を向上させるためには、耐衝撃性能が大きく、安価な緩衝工を背面に設置することが有効と考えられる。

そこで本研究では、これまでに著者らが研究開発してきた三層緩衝構造（ロックシェッド、砂+RC版+EPS）や二層緩衝構造（落石防護擁壁、RC版+EPS）の原理を応用発展させ、落石防護擁壁背面に設置する「ソイルセメント+ジオグリッド+EPS」から構成される新たな三層緩衝構造（図-1）における、その緩衝効果や耐衝撃挙動について検証する。

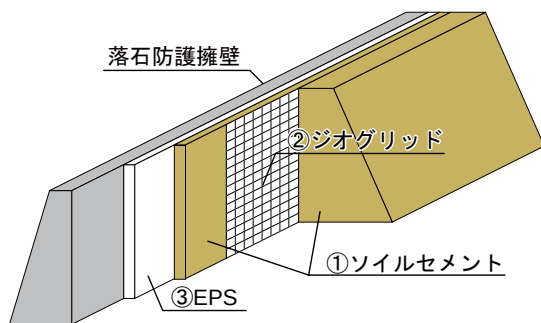


図-1 提案の三層緩衝構造

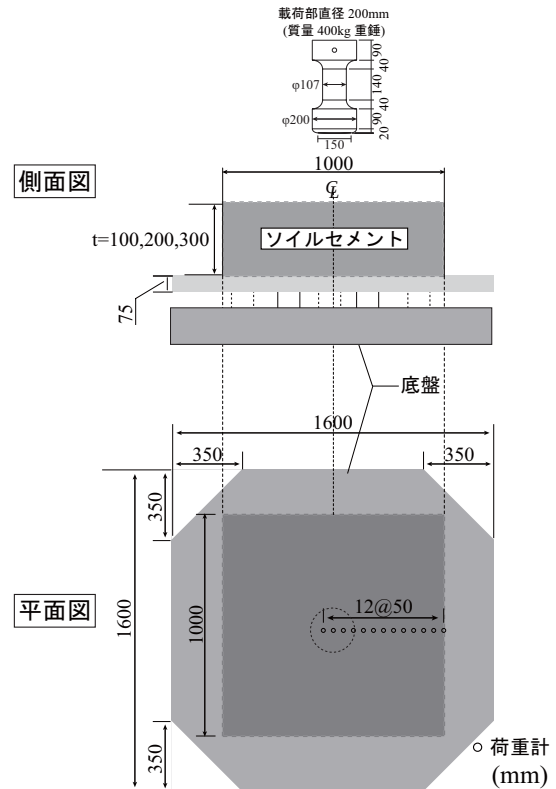


図-2 実験装置概要

本論文では、提案の三層緩衝構造を構成する材料のうちソイルセメント単体に着目し、ソイルセメントの緩衝性能に関する基礎資料を得ることを目的として、層厚、セメント量、衝突速度を変化させた重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

図-2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、伝達衝撃応力計測用の起歪柱型ロードセル（受圧面の直径20mm、容量7MPa）が設置された鋼製底盤（1.6m四方、厚さ75mm）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87mm、容量100kN）から構成されている。なお、反力荷重計は厚板鋼板を介して実験室ピット内の剛基礎上に設置されている。また、応力計は図に示すように底盤中央部より対称軸に沿って50mm間隔で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。

写真-1には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。

表－１ 実験ケース一覧

試験体名	ソイルセメント		衝突速度 $V(\text{m/s})$	入力 エネルギー $E(\text{kJ})$
	セメント量 $C(\text{kg/m}^3)$	厚さ $t(\text{cm})$		
S10-V0.71	100	10	0.71	0.10
S10-V1.00			1.00	0.20
S10-V1.58			1.58	0.50
S20-V1.58		20	1.58	0.50
S20-V2.00			2.00	0.80
S20-V2.55			2.55	1.30
S30-V3.00		30	3.00	1.80
S30-V3.54			3.54	2.50
S30-V4.00			4.00	3.20
S30H-V3.00	150	30	3.00	1.80
S30H-V3.54			3.54	2.50
S30H-V4.00			4.00	3.20

表－２ 緩衝材砂の物性値

産地	種類	均等係数	土粒子 密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	最適 含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	2.46	16

衝撃载荷実験は、所定の厚さに成形したソイルセメントに対して、平底鋼製重錘を所定の高さから供試体中央部に落下させることにより行っている。

衝撃载荷実験に使用した鋼製重錘は質量 400 kg であり、先端部には起歪柱型ロードセルが組み込まれている。直径は 200 mm であり、衝突部での片当たりを防止するため、2 mm のテーパが設けられている。

表－１には、実験ケースの一覧を示している。実験は、ソイルセメントの層厚、セメント量、衝突速度をパラメータとしている。層厚については 10, 20, 30 cm の３種類とした。

ソイルセメントの打設は、表－２に示す砂を使用し、最適含水比とした段階で早強ポルトランドセメントを加えて攪拌した後、1m × 1m の型枠に 5 cm 厚程度毎に足踏みおよび突き固めにより締固めた。ソイルセメントの一軸圧縮強度は $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合で 0.83 ～ 1.11 MPa、 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合で 2.92 ～ 3.02 MPa である。

実験ケース名は、層厚 ($t = 100 \text{ mm}$: S10, $t = 200 \text{ mm}$: S20, $t = 300 \text{ mm}$: S30) に、衝突速度 $V (\text{m/s})$ をハイフンで結び示している。なお、セメント量が 150 kg/m^3 の場合には、層厚 (cm) の後に H を付加している。

3. 実験結果

3.1 時刻歴応答波形

図－３には、衝突速度毎に整理した (a) 重錘衝撃力、(b) 伝達衝撃力、(c) 载荷点直下伝達衝撃応力、(d) 重錘貫入量の波形を示している。なお、本論文では、伝達衝撃力を底盤反力の合計値を用いて評価することとした。(a) 図より、最大応答値は衝突速度にかかわらず $t = 2 \sim 3 \text{ ms}$ 程度で生じており、衝突速度の増加に伴い最大応答値も増加する傾向にあることが分かる。波形性状は、最大応答値を示す第 1 波のみで構成されている。

(b) 図より、第 1 波の発生時間は重錘衝撃力とほぼ同様



写真－１ 実験状況

である。しかしながら、第 1 波励起の後、振幅の小さい高周波成分が $t = 50 \text{ ms}$ 程度続いている。また、最大応答値は重錘衝撃力と同様、衝突速度の増加に対応して増加している。

(c) 図より、载荷点直下の伝達衝撃応力は、波動継続時間が 10 ms 程度の 1 波のみで構成されていることが分かる。最大応答値に着目すると、衝突速度との相関が見られない。これは、衝突初期段階においてソイルセメントにひび割れが生じ、荷重分散に偏りが生じたためと推察される。

(d) 図には、重錘貫入量に関する応答波形を示している。図より、セメント量が $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合に注目すると、衝突速度の小さい $V = 1.58 \text{ m/s}$ までは最大応答値に達した後、変位が戻る傾向を示し、最大応答値に収束する。一方、衝突速度が $V = 2.00 \text{ m/s}$ 以上の場合には、貫入量が最大応答値に達した後、変位が戻らず一定値あるいは増加傾向を示している。これは衝突速度が小さい場合には、衝突直後にソイルセメントにある程度の剛性が残っていたために、リバウンドが生じるのに対して、衝突速度が大きい場合には重錘が貫入して残留するためと推察される。

また、 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ に着目すると、衝突速度が $V = 3.00 \text{ m/s}$ 時において、リバウンドにより負の応答値が発生している。これはソイルセメントの圧縮強度が大きいことによるものと推察される。

3.2 各種応答値と入力エネルギーの関係

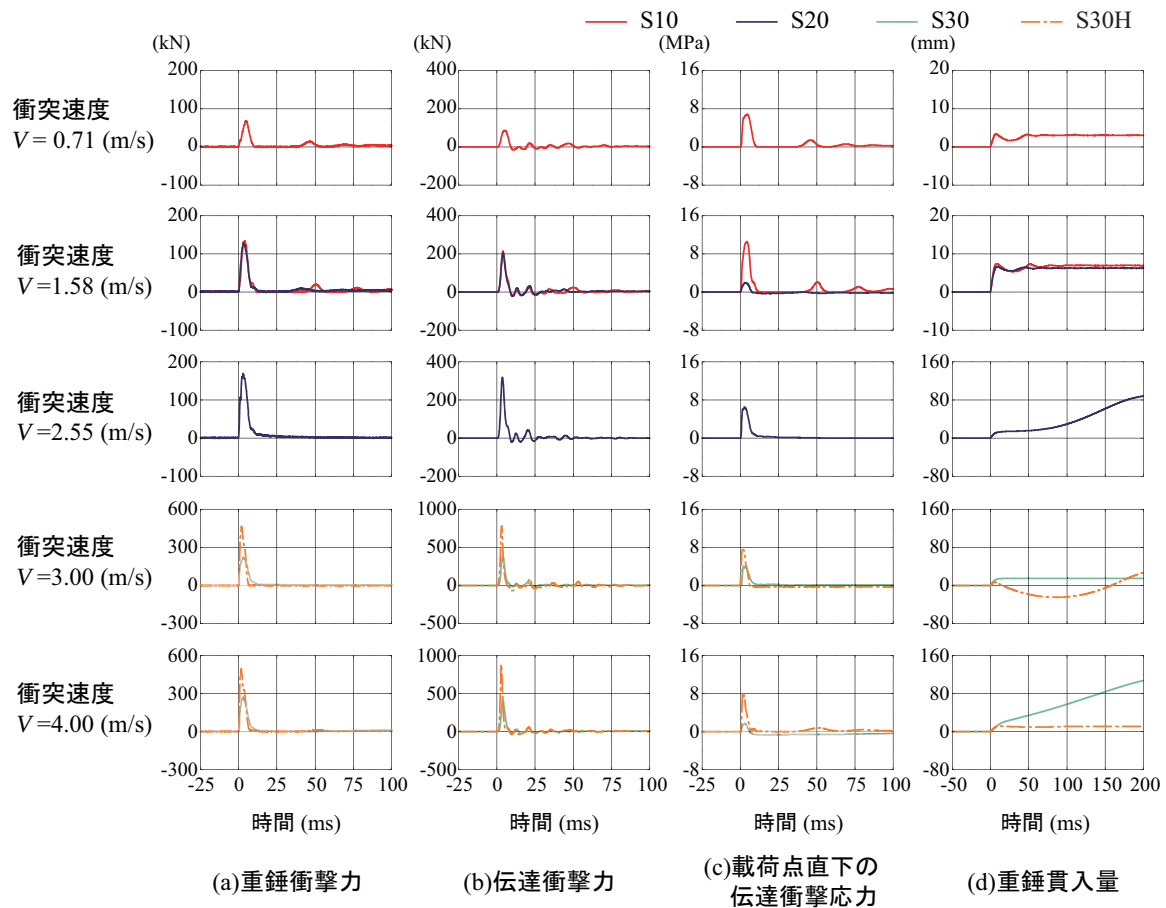
図－４に、入力エネルギーと各種応答値の関係を示す。

(a) 図に示す入力エネルギーと最大重錘衝撃力の関係より、 $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合においては、層厚にかかわらず、ラーメ定数 $\lambda = 100,000 \text{ kN/m}^2$ とした振動便覧式にて推定可能であることが分かる。 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合においては、ラーメ定数 $\lambda = 150,000 \text{ kN/m}^2$ で実験結果を包括する。

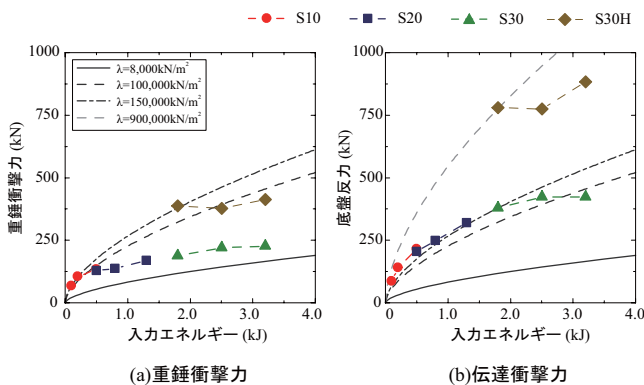
(b) 図より、入力エネルギーと伝達衝撃力の関係に着目すると、前述の最大重錘衝撃力よりも応答値は大きくなる傾向を示しているものの、類似した性状であることが分かる。すなわち、 $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合には、ソイルセメントの層厚にかかわらず、ラーメ定数 $\lambda = 150,000 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式にて推定可能である。 $C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合には、ラーメ定数 $\lambda = 900,000 \text{ kN/m}^2$ で実験結果を包括していることが分かる。

3.3 伝達衝撃応力分布

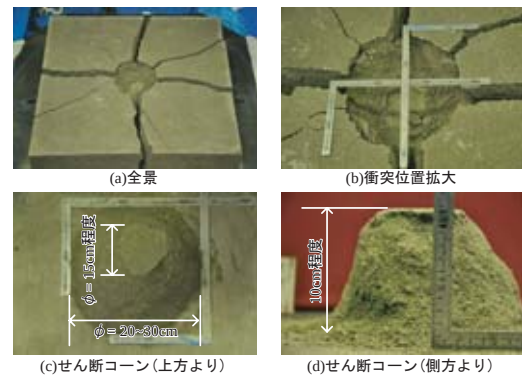
図－５には、底版に設置された荷重計で計測された伝達衝撃応力分布を時系列で示している。図より、 $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合に注目すると、敷砂厚 $t = 10 \text{ cm}$ の場合には、衝突速度にかかわらず、衝突位置直下で最大値を示し、衝突位置



図－3 各種応答波形



図－4 各種応答値と入力エネルギーの関係

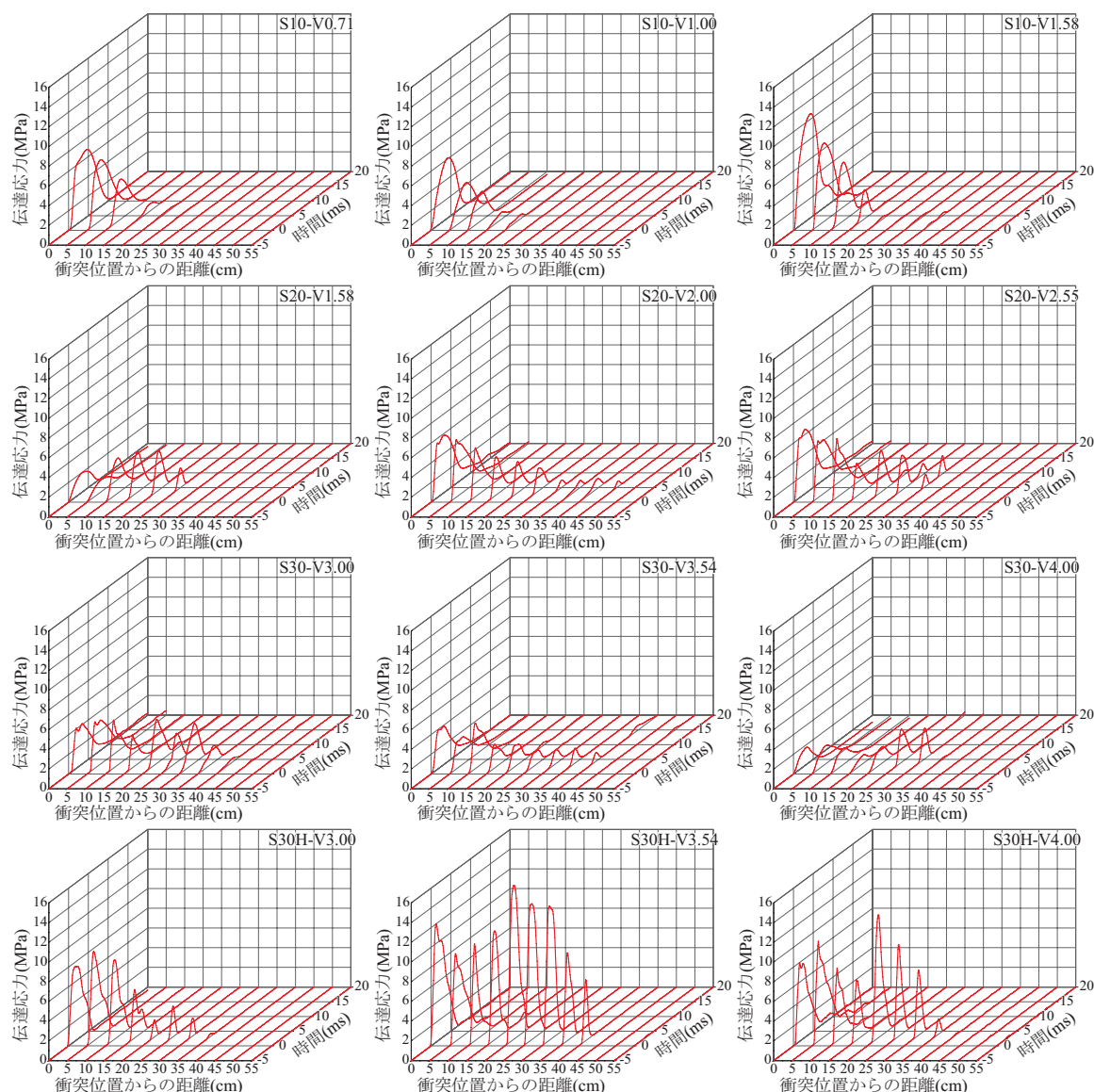


図－6 衝撃実験終了時の破壊状況 (S20-V2.55)

からの距離に対応して応力が減少し、20 cm の位置でほぼ零レベルとなる。敷砂厚 $t = 20$ cm の場合には、衝突位置からの距離が 30 cm 程度まで応力が伝達していることが分かる。敷砂厚 $t = 30$ cm の場合には、衝突速度 $V = 3.00$ m/s および 3.54 m/s において、衝突位置からの距離が 40 cm 程度まで応力が伝達している。一方、 $V = 4.00$ m/s の場合には、衝突位置からの距離が 30 cm まで応力伝達しており、応力分散の領域が減少している。これは、衝突速度が大きくなることにより、ソイルセメントが押し抜きせん断的に破壊する傾向を示したことによるものと推察される。

$C = 150 \text{ kg/m}^3$ の場合に注目すると、衝突速度の小さい

$V = 3.00$ m/s の場合には、応力分散範囲が衝突位置から 30 cm 程度となっている。それに対して、衝突速度の大きい $V = 3.54 \sim 4.00$ m/s の場合には、衝突位置から 40 cm 程度まで応力伝達しており、 $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合と異なる傾向となっている。これは、ソイルセメントの強度が高いことにより、衝突速度が小さい場合には縦波動的な挙動が卓越して、応力が局所化する傾向を示すのに対して、衝突速度が大きい場合には、重錘が貫入するものの、相対的に剛性が大きいことより、応力の分散領域が拡大したものと考えられる。従って、伝達応力値も $C = 100 \text{ kg/m}^3$ の場合に対して大きくなる傾向を示している。



図－5 伝達衝撃応力分布

また、これらの応力伝達範囲から分散角度を推定すると、衝突位置を中心として45～60°程度となる。

以上より、ソイルセメントの層厚が大きいほど、応力分散幅が大きくなる傾向にあり、また、強度が高くなることで伝達衝撃応力も大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

3.4 破壊性状

図－6には、S20-V2.55を一例とし、実験終了時における破壊性状を示している。

図より、実験終了時におけるソイルセメントは、衝突位置である試験体中心において大きく陥没していることが分かる。また、放射状にひび割れが発生し、全ての方向において端部まで達している。さらに、衝突位置直下ではコーン状の破壊面が形成されていることから、主にこのせん断コーン内で応力分散や緩衝効果が発揮されたものと推察される。

コーン底面範囲から推定される応力分散角度は衝突位置を中心として20～45°程度であり、応力伝達範囲からの推定値と異なる。この差異は、衝突初期において、応力が

ある程度広範囲に分散して伝達されるものの、終局限界状態に達したより狭い領域でコーンが形成されることによるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、提案の三層緩衝構造を構成する材料の一つであるソイルセメント単体の緩衝効果および耐衝撃性能の把握を目的として、ソイルセメントの層厚や強度をパラメータとした重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも大きくなる傾向を示す。
- 2) ソイルセメントの層厚が大きいほど、応力分散幅が広がる傾向にある。また、ソイルセメントの強度が高くなることで、伝達衝撃応力は大きく示される。
- 3) 破壊性状は押し抜きせん断破壊型となる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.