

落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす
表層材ソイルセメント強度の影響

Effects of compressive strength of soil-cement on absorbing performance of TLAS for rockfall-protection walls

室蘭工業大学大学院
(株) 構研エンジニアリング
室蘭工業大学大学院
(株) 構研エンジニアリング
釧路工業高等専門学校

○ 学生会員 菅原 慶太 (Keita Sugawara)
正会員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
正会員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

国土の約 70 % を山岳地帯で占める我が国では落石災害から人命、道路等を守るため、落石防護構造物が数多く建設されている。しかしながら、近年、異常気象や凍結融解等の経年劣化、巨大地震の発生などから想定落石規模が設計当時より大きくなる場合も少なくない。そのため、安全性の向上が喫緊の課題となっている。耐衝撃性を向上させるための手段としては様々な方法が考えられるが、新規に落石防護構造物を建設する場合には莫大な費用を要することから既設の構造物を安価に、また、効率的に補強することが望ましい。

このようなことから、著者らの研究グループでは、既設補強として緩衝工に着目し、自立可能なソイルセメントを表層材として、芯材には衝撃力分散のためのジオグリッドを、裏層材には衝撃エネルギー吸収のための EPS ブロックを用いる新しいタイプの三層緩衝構造を提案し検討を行った^{1)~2)}。その結果、1) 提案の三層緩衝構造は各材料が相乗的に効果を発揮し衝撃エネルギーを分散、吸収する、2) 緩衝性能はソイルセメント厚が大きいほど大きい、3) ジオグリッドの敷設位置を下端にすることで効率的に衝撃エネルギーを分散することができる、ことが明らかになっている。しかしながら、これまでの研究ではソイルセメントの強度の影響については十分に検討されていない。

このような背景より、本研究では、提案の三層緩衝構造に用いるソイルセメントの適切な強度を検討することを目的に、セメント添加量(以降、セメント量)を3種類に変化させた場合に関する重錘落下衝撃実験を実施した。

表-1 試験体一覧

試験体名	セメント量 (kg/m ³)	衝突 速度 (m/s)	入力 エネルギー (kJ)	ソイルセメント 圧縮強度 (MPa)
C50-V5.0	50	5.0	5.0	0.2
C50-V6.0		6.0	7.2	
C50-V8.0		8.0	12.8	
C50-V9.0		9.0	16.2	
C100-V6.0	100	6.0	7.2	0.8
C100-V7.0		7.0	9.8	
C100-V8.0		8.0	12.8	
C100-V9.0		9.0	16.2	
C150-V6.0	150	6.0	7.2	2.1
C150-V7.0		7.0	9.8	
C150-V8.0		8.0	12.8	
C150-V9.0		9.0	16.2	
C150-V10.0		10.0	20.0	

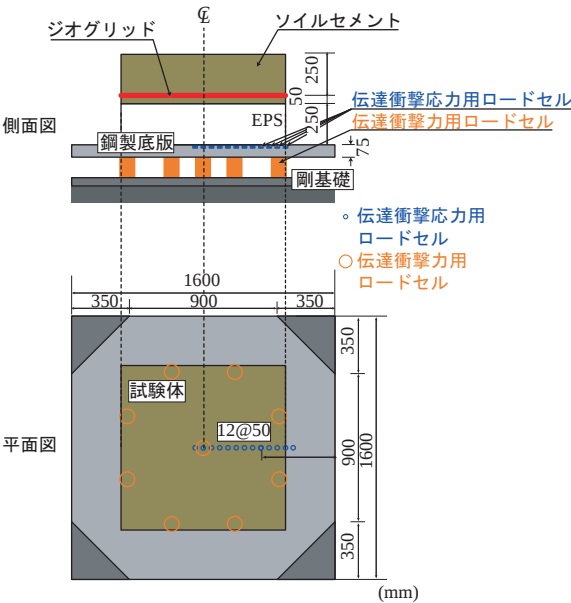


図-1 実験装置および試験体概要

2. 実験概要

表-1 には、試験体一覧を示している。表中、試験体名の第1項目において、Cに付随する数字はソイルセメントのセメント量(kg/m³)であり、第2項目Vに付随する数字は衝突速度(m/s)を示している。本実験は、セメント量を3種類に設定した試験体に対し、衝突速度を変化させた全13ケースである。

図-1 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。本実験装置は、伝達衝撃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個の伝達衝撃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。

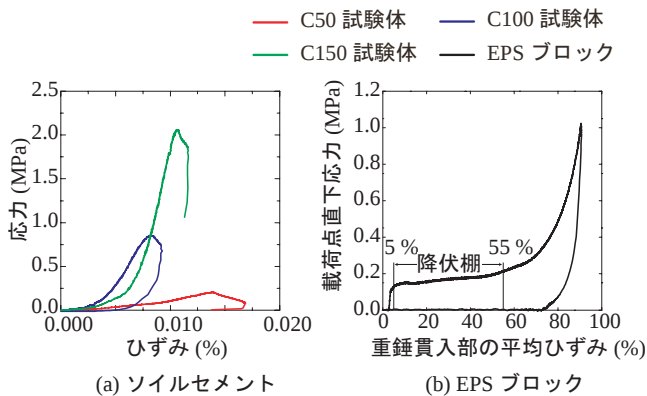
試験体は、平面寸法 1,000 mm × 1,000 mm、高さ 250 mm の EPS ブロックの上に、ジオグリッドを埋め込んだソイルセメントを設置している。試験体の製作は、含水比 15 % の砂に早強ポルトランドセメントを所定量練り混ぜたものを、EPS ブロックの上に敷き詰め、足踏みにて締固め製造した。表-2 には、実験に使用した各材料の物性値を一覧にして示している。図-2 には、実験時のソイル

表－２ 各材料の物性値一覧

(a) 砂				
産地	種類	均等係数	土粒子密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	16

(b) ジオグリッド			
目合 (mm)	品質管理強度 (kN/m)	製品基準強度 (kN/m)	材質
28 × 33	34.0 × 43.0	27.0 × 37.0	ポリプロピレン

(c) EPS		
密度 (kg/m ³)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

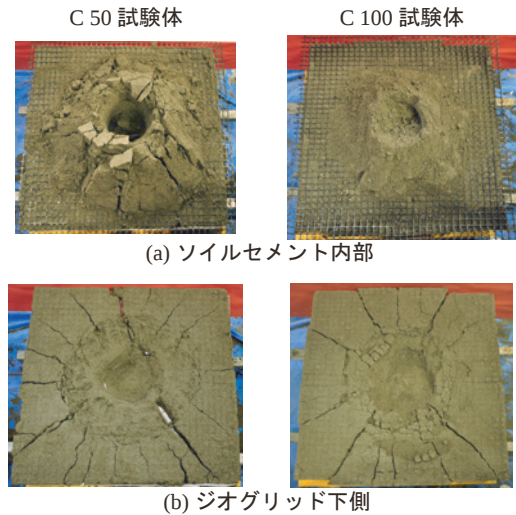
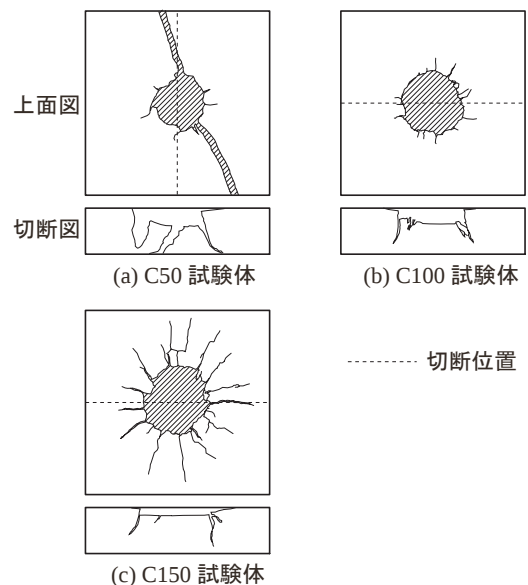


図－２ 圧縮試験結果の例

セメントおよびEPSブロックの応力－ひずみ関係の例を示している。図－２ (a) より、荷重初期にはどの供試体も応力－ひずみ曲線の勾配は緩やかになっている。しかしながら、最終的な勾配はセメント量が多いほど急になる傾向を示している。また、どの供試体においても最大荷重到達後は徐々にひび割れが発生し破壊に至る性状を示したことを確認している。圧縮強度はセメント量 50, 100, 150 kg/m³ でそれぞれ 0.2, 0.8, 2.1 MPa であった。図－２ (b) より、EPS ブロックの降伏応力は 5～55 % ひずみでは 0.2 MPa 程度であることを確認している。ここでは、この 5～55 % ひずみ領域を降伏棚と称することとする。

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、重錘を所定の速度で試験体中央部に落下させる単一衝撃荷重荷にて行った。また、最終衝突速度は伝達衝撃応力が 0.4 MPa に達した速度とし、この時点で EPS ブロックが終局状態であると仮定した。なお、重錘質量は 400 kg、先端部直径は ϕ 200 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り、実験装置の関係によりデータに高周波成分が含まれていたため、過去に実施した同ケースと整合性が取れる範囲内でフィルタ処理を施している。また、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。

図－３ ソイルセメントの破壊性状 ($V = 9.0$ m/s)図－４ EPS ブロックの破壊性状 ($V = 9.0$ m/s)

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図－３ には、ソイルセメント内部およびジオグリッド下側の破壊性状を C50/C100 試験体のうち衝突速度 $V = 9.0$ m/s の場合について示している。図－３ (a) より、両ケースともにソイルセメント内部には押抜きせん断コーンが形成されていることが分かるが、C50 試験体の場合には重錘衝突部が深く陥没していることが分かる。また、陥没部は圧壊、砂状化している。これは、C50 試験体のソイルセメント強度が 0.2 MPa と EPS ブロックの降伏応力とほぼ同程度であることから、直接重錘が衝突するソイルセメント部が圧壊したためと考えられる。これに対し、C100 試験体の重錘衝突部は、C50 試験体に比べて圧壊、砂状化の程度は小さく、その周囲では押抜きせん断コーンが形成されている。図－３ (b) より、ジオグリッド下側のソイルセメントは載荷点近傍が陥没し放射状にひび割れが入っている様子が分かる。セメント量の違いにより比較すると、C50 試験体は陥没部の直径が小さく、損傷範囲が砂状化する傾向にある。一方、C100 試験体の場合には、陥没部の直径が大きくなっている。また、両ケース

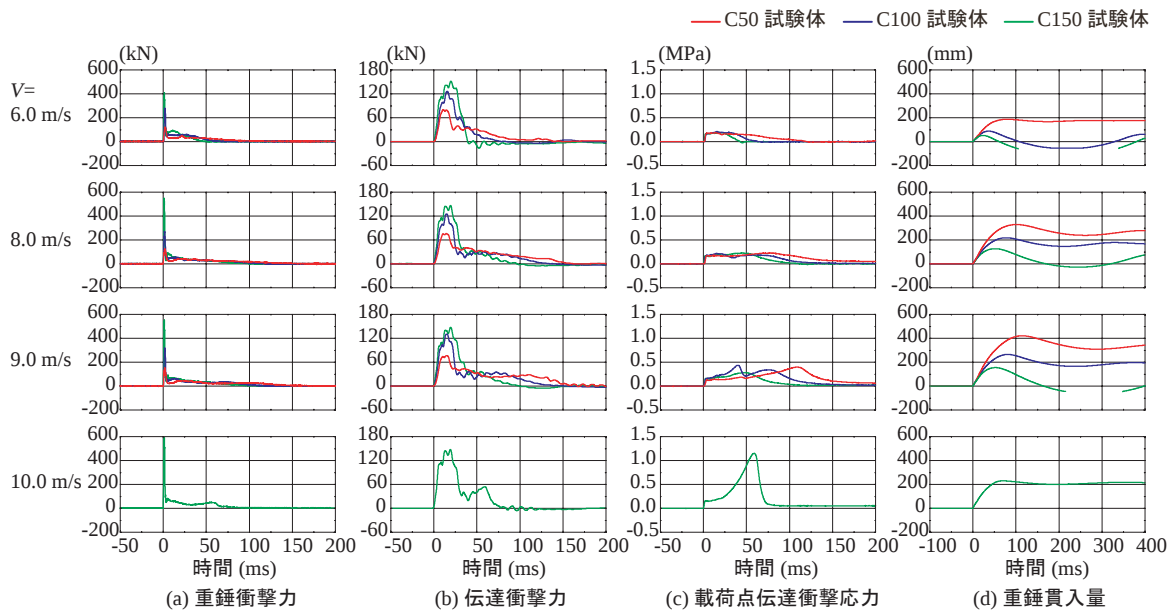


図-5 時刻歴応答波形

ともジオグリッドは破断し、その範囲はセメント量が多いほど広いことを確認している。これらのことから、セメント量が多い場合には重錘貫入量が小さく、陥没部の直径やジオグリッドの破断範囲が大きくなる傾向にあるため、荷重分散範囲も大きくなるものと推察される。

図-4 には、EPS ブロック上面および中央切断面の變形、ひび割れ分布を衝突速度 $V=9.0$ m/s の場合について示している。図より、C50 試験体の場合には表面が円形に陥没するとともにクラックが発生していることが分かる。切断面に着目すると大きく割裂していることが分かる。これは、重錘が深く貫入したことによるものと考えられる。C100 試験体の場合には、表面が円形に陥没し、EPS ブロック内部では押抜きせん断破壊を生じていることが分かる。また、C150 試験体の場合には、陥没部の直径が大きく、かつ放射状のひび割れが発生していることが分かる。切断面を見ると、押抜きせん断破壊しているものの、その貫入量は小さいことが分かる。これらのことから、セメント量が多い場合ほど荷重分散範囲が大きくなる傾向にあるものと推察される。

3.2 時刻歴応答波形

図-5 には、重錘衝撃力、伝達衝撃力、載荷点直下の伝達衝撃応力および重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を衝突速度 $V=6.0, 8.0, 9.0, 10.0$ m/s の場合について示している。

図-5 (a) より、重錘衝撃力波形は、重錘衝突とともに急激に立ち上がり、その後振幅が小さく、継続時間が長い波形が続いていることが分かる。また、衝突速度の増加に伴い第1波の振幅が大きくなり、第2波の継続時間が長くなっている。同一衝突速度で比較するとセメント量が多い場合ほど最大振幅が大きく、継続時間が短くなっている。

図-5 (b) より、伝達衝撃力波形は継続時間が20～40 ms 程度の正弦半波状の第1波と、振幅が小さく継続時間の長い第2波から構成されていることが分かる。また、セメント量が多い場合ほど、第1波の振幅が大きく、第2波

の継続時間が短くなる傾向にある。

図-5 (c) の載荷点直下の伝達衝撃応力波形は、衝突速度が小さくかつ最大振幅が0.2 MPa 程度以下の場合には、継続時間の長い台形状の波形を呈している。これは、図-2 (b) のEPS ブロックの応力-ひずみ関係を参考にとすると、EPS の降伏棚を超過するひずみが発生したことによるものと考えられる。また、最大振幅が0.2 MPa を上回る場合には三角形の波形を示している。波形の継続時間はセメント量が多い場合ほど短くなる傾向を示している。これはEPS ブロックの變形程度が小さくなることによるものと考えられる。

図-5 (d) の重錘貫入量波形は、重錘衝突とともに正弦半波状の第1波が励起している。その後は、600 ms 程度まで減衰自由振動状態にあることを確認している。また、セメント量が多いほど貫入量が小さくなっている。なお、C150 試験体では負の貫入量が生じ、一部では計測可能範囲を超過している。これはソイルセメントの強度が大きいことから重錘が深く貫入せずにEPS が變形するため、その復元力によりリバウンドしたことを示している。

3.3 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-6 には、各種応答値と入力エネルギーとの関係を示している。図-6 (a) より、重錘衝撃力は入力エネルギーの増加に伴って増大する傾向を示していることが分かる。また、セメント量が多いほど大きな値を示している。これに対し、図-6 (b) の伝達衝撃力は、C50 試験体の場合が多少小さいものの、セメント量や入力エネルギーによらず、ほぼ100 kN 程度となっている。

図-6 (c) の重錘貫入量と入力エネルギーとの関係より、重錘貫入量はセメント量にかかわらず、入力エネルギーの増加に伴って増大する傾向にあることが分かる。また、同一入力エネルギーにおける重錘貫入量は、セメント量が多い場合ほど小さくなる傾向にある。なお、EPS ブロックの終局を0.4 MPa と仮定した場合、本実験に用いた緩衝構造の最終入力エネルギーは、セメント量によらずほぼ同様である。このことは、ソイルセメントのセメ

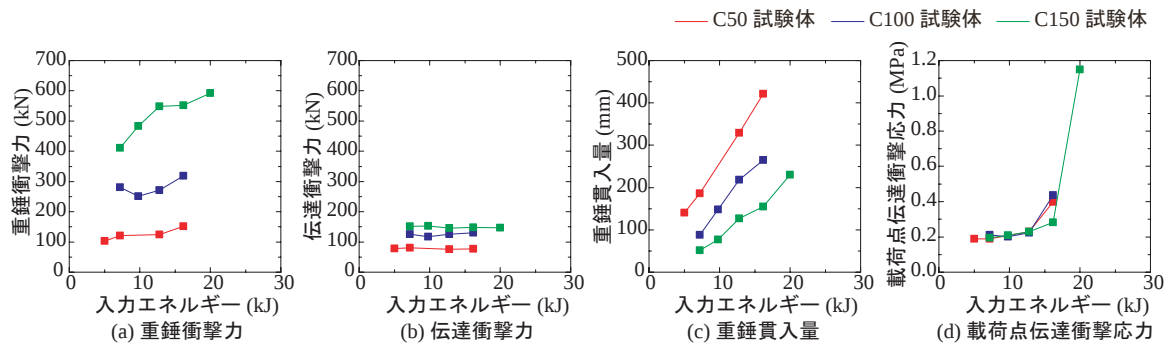
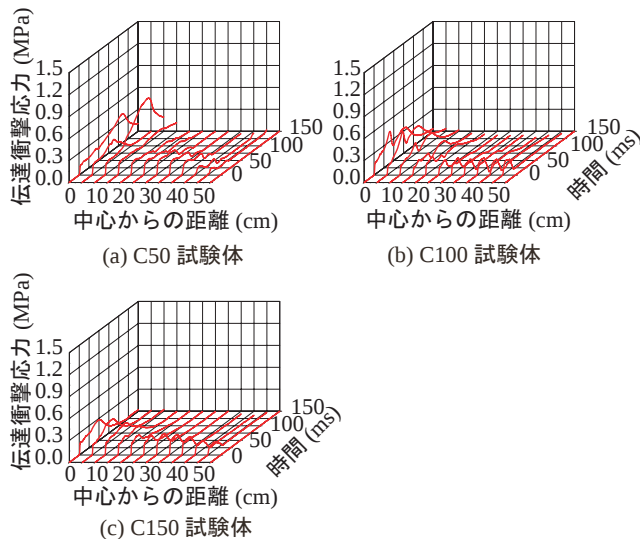


図-6 各種応答値と入力エネルギーの関係

図-7 伝達衝撃応力分布 ($V = 9.0 \text{ m/s}$)

ント量 (圧縮強度) の変化に伴って、エネルギー吸収特性が大きく異なることを示唆するものと考えられる。すなわち、C50 試験体のようにソイルセメントの圧縮強度が 0.2 MPa 程度 (EPS の降伏圧縮強度と同程度) の場合には、EPS の圧縮変形よりもソイルセメントの圧縮破壊が卓越するため、重錘貫入量が大きくなるとともに、伝達衝撃応力が局所化する傾向にある。これに対し、セメント量が大きく圧縮強度が大きい場合には、ソイルセメントの押抜きせん断破壊が卓越するため、重錘貫入量が小さくなるとともに、伝達衝撃応力が広範囲に分散される傾向を示すものと考えられる。

また、図-6 (d) の載荷点伝達衝撃応力と入力エネルギーとの関係を見ると、載荷点伝達衝撃応力は入力エネルギー 13 kJ 程度までは、セメント量にかかわらず 0.2 MPa 程度となっていることが分かる。これは EPS ブロックが変形するものの、そのひずみレベルは未だ EPS の降伏棚の領域内にあることを示している。一方、入力エネルギー 16 kJ 程度の場合には、いずれのセメント量においても載荷点伝達衝撃応力が 0.2 MPa を上回っており、セメント量が大きい場合ほどその値は小さくなる傾向にある。これは、セメント量により伝達衝撃応力分布が異なっていることを示唆するものと考えられる。従って、次節では入力エネルギー 16 kJ 程度の場合における伝達衝撃応力分布を検討する。

3.4 伝達衝撃応力分布

図-7 には、衝突速度 $V = 9.0 \text{ m/s}$ (入力エネルギー 16.2

kJ) 時における各試験体の伝達衝撃応力分布を示している。図には、横方向に試験体中心からの距離、奥行き方向に時間、縦方向に伝達衝撃応力を取って3次元で示している。

図よりいずれの場合も重錘衝突初期には EPS ブロック全域に渡り 0.2 MPa 程度の応力が発生していることが分かる。このことより、セメント量によらず EPS ブロック底面にはほぼ均等に応力が分散して発生しているものと考えられる。しかしながら、セメント量が小さい場合には時間の経過に伴って載荷点近傍の伝達衝撃応力が増大する傾向にあるのに対し、セメント量が大きい場合には局所的な伝達衝撃応力の増加はほとんど見られない。

以上のことから、本実験で設定した入力エネルギーの範囲内では、提案の緩衝構造が有するエネルギー吸収能はセメント量によらずほぼ同様であるものの、セメント量が小さい場合には伝達衝撃応力が局所化する傾向にあることが明らかになった。特に、ソイルセメントの圧縮強度が EPS の降伏圧縮強度 (0.2 MPa 程度) よりも小さい場合には、局所化の傾向が強く現れることから、ソイルセメント強度は少なくとも 0.2 MPa 以上に設定する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、ソイルセメントを用いた落石防護擁壁用の三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼすソイルセメント強度の影響を検討することを目的にセメント添加量を3種類に変化させた三層緩衝構造の衝撃荷重載荷実験を行った。本実験で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 三層緩衝構造が有するエネルギー吸収能はセメント量によらずほぼ同様であるものの、セメント量が小さい場合には伝達衝撃応力が局所化する傾向にある。
- 2) 特に、ソイルセメントの圧縮強度が EPS の降伏圧縮強度 (0.2 MPa 程度) よりも小さい場合には、局所化の傾向が強く現れることから、ソイルセメント強度は少なくとも 0.2 MPa 以上に設定する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木健太郎, 牛渡裕二, 岸 徳光, 栗橋祐介: 落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼすソイルセメント中の芯材ジオグリッド位置の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012, pp.709-714
- 2) 菅原慶太, 岸 徳光, 牛渡裕二, 小室雅人: 表層材ソイルセメント厚を変化させた落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012, pp.715-720