

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厚の影響

Effects of layer thickness of soil-cement on absorbing performance of TLAS for rockfall-protection walls.

室蘭工業大学大学院 ○学生会員 藤堂 俊介 (Shunsuke Todo)
 (株)構研エンジニアリング 正会員 牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学大学院 正会員 栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

山岳部や海岸線において急崖斜面近傍に設置されている道路では、落石による被害が懸念され、落石防護構造物が数多く建設されている。また、近年の異常気象や風化などの経年劣化により落石規模が設計当初想定していたものより大きくなっているという事例も少なくない。そのため、安全性向上のため、二層緩衝構造(表層材:RC版,裏層材:発泡スチロール(以後, EPS)ブロック)などの緩衝工の設置が提案されているが、RC版の製作や運搬,設置にかかるコストが膨大なため,それに代わる安価で効率的な緩衝工の開発が求められている。

そこで著者らは、落石防護構造物に用いる新たな緩衝工として、これまで三層緩衝構造(表層材:ソイルセメント,芯材:ジオグリッド,裏層材:EPSブロック)を提案し¹⁾、静的および衝撃荷重実験を行うことで、その耐衝撃性能や緩衝メカニズムを検討してきた。その結果、1)提案の三層緩衝構造の緩衝効果は、ジオグリッドによる応力の分散効果とソイルセメントの押抜きせん断破壊,およびEPSブロックの変形による衝撃エネルギーの吸収の組み合わせにより発揮されること、2)ソイルセメント厚を大きくすることにより、ソイルセメントの押抜きせん断破壊に伴うエネルギー吸収が大きくなり緩衝効果が増大すること、などを明らかにしている。しかしながら、ソイルセメント厚を大きくした場合については検討が少なく、緩衝効果の詳細な傾向把握には至っていないため、更なるデータの収集が必要であるものと考えられる²⁾。

このような背景より、本研究では、提案の三層緩衝構造のソイルセメント厚が緩衝効果に及ぼす影響をより詳細に検討することを目的に、そのソイルセメント厚を20 cm, 30 cm, 40 cmに変化させた3種類のケースについて衝撃荷重実験を実施した。

2. 実験概要

表-1には、試験体一覧を示している。本実験は、ソイルセメント厚を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11ケースである。表中、試験体名の第1項目Sに付随する数字はソイルセメント厚(cm)を示しており、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。

図-1には、本実験で用いた実験装置の概要および試験体の形状寸法を示している。本実験装置は、伝達衝撃応力を計測するための荷重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個の伝達衝撃力計

測用の反力計から構成されている。荷重計は、底盤中央部および左側50 mmの位置に1個ずつ、中央部から右側端部まで50 mm間隔で11個の計13個が受圧面を底盤上面と揃えて設置されている。

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、高さ200 mm, 300 mm, 400 mmのソイルセメントをそれぞれ設置し、ソイルセメント下面から50 mmの位置にジオグリッドを配置した。試験体の

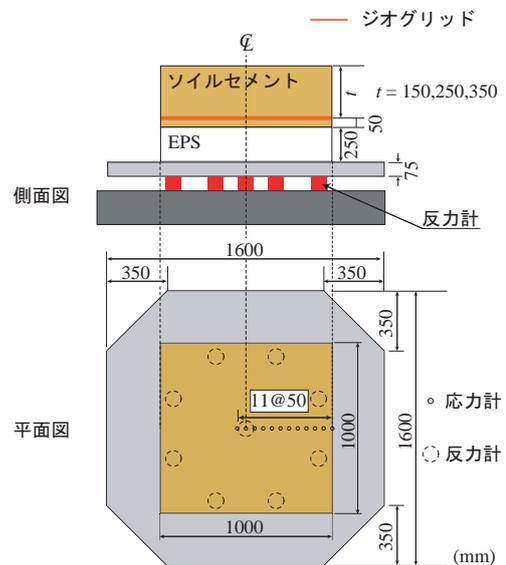


図-1 実験装置概要および試験体の形状寸法

表-1 試験体一覧

試験体名	ソイルセメント厚 t (cm)	衝突速度 (m/s)	入力エネルギー E (kJ)	圧縮強度 (MPa)
S20-V4.0	20	4.0	3.2	1.1
S20-V5.0		5.0	5.0	
S20-V6.0		6.0	7.2	
S30-V6.0	30	6.0	7.2	0.8
S30-V7.0		7.0	9.8	
S30-V8.0		8.0	12.8	
S30-V9.0		9.0	16.2	
S40-V6.0	40	6.0	7.2	0.9
S40-V9.0		9.0	16.2	
S40-V10.0		10.0	20.0	
S40-V11.0		11.0	24.2	

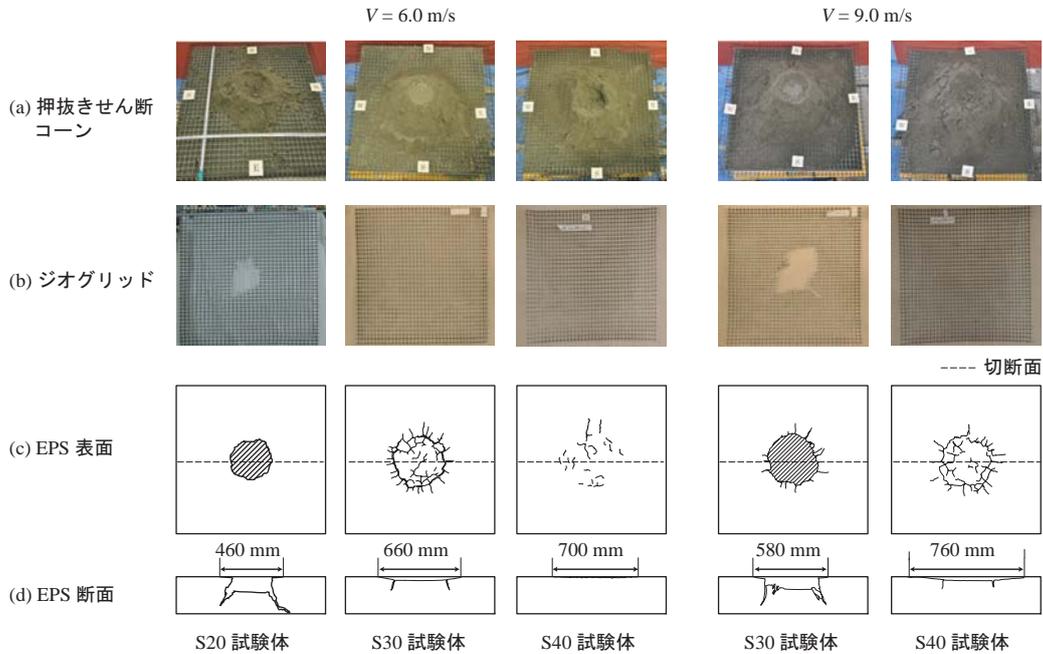


図-3 ソイルセメント、ジオグリッドおよびEPSブロックの破壊性状

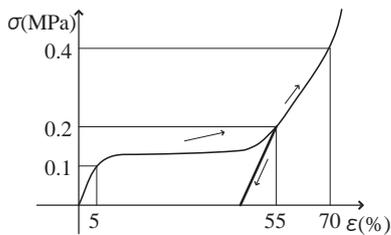


図-2 EPSブロックの応力-ひずみ曲線(概念図)

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

製作は、EPSブロックの上にソイルセメント打設用の型枠を設置し、含水比を15%に調節した砂に早強ポルトランドセメントを100 kg/m³ 練り混ぜたものを敷き均し足踏みにて締め、ソイルセメント下面から50 mmの位置にジオグリッドを敷設することで製作した。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。なお、実験時のソイルセメントの一軸圧縮強度は、表-1に示しているとおり、0.9~1.1 MPaであった。

実験は、試験体を鋼製底盤の中央に配置し、重錘を所定の衝突速度で試験体中央部に落下させることで行った。なお、実験に用いた鋼製重錘の質量は400 kg、先端部直

径はφ200 mmであり、その底面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、伝達衝撃応力および重錘貫入量である。なお、重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセル、伝達衝撃力は底盤を支持している9個の反力計、底盤上への伝達衝撃応力分布は前述の応力計、重錘貫入量はレーザ変位計を用いて測定している。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-3には、ソイルセメント、ジオグリッドおよびEPSブロックの破壊性状を示している。(a)図より、押抜きせん断コーンの直径は、ソイルセメント厚の増大とともに大きくなっていることが確認できる。(b)、(c)、(d)図より、S20-V6.0、S30-V9.0試験体の場合には、ジオグリッドが大きく破断していることが分かる。これに伴い、EPSブロックも非常に大きく陥没し、押抜きせん断破壊に至っている。一方、S30/40-V6.0およびS40-V9.0試験体の場合には、ジオグリッドに目立った破断は確認できない。同様に、EPSブロックにも大きな陥没は見られず、その損傷は放射状のひび割れが入っている程度に抑えられている。

これらのことより、ソイルセメント厚が大きくなると、1)ソイルセメントの押抜きせん断破壊に伴う衝撃エネルギーの吸収性能が向上していること、2)形成された押抜きせん断コーンの底面がEPSブロックに対する見かけ上の載荷面となり、それが拡大することによって、衝撃エネルギーがより広い範囲に分散されること、などが推察される。

3.2 時刻歴応答波形

図-4には、(a)重錘衝撃力、(b)伝達衝撃力、(c)載荷点直下の伝達衝撃応力(以後、伝達衝撃応力)、(d)重錘貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。

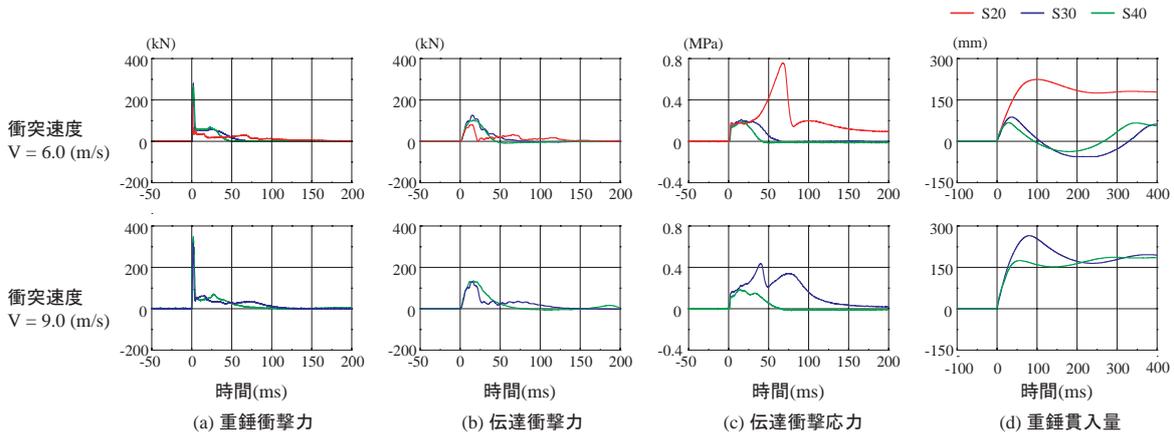


図-4 各種時刻歴応答波形

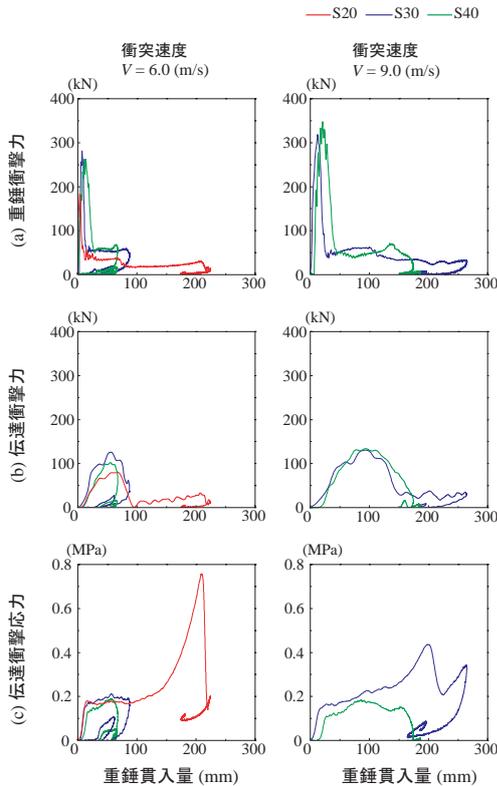


図-5 各種応答値 - 重錘貫入量関係

(a), (b) 図より、重錘衝撃力波形、伝達衝撃力波形ともに、重錘衝突初期に振幅の大きな第1波を励起した後、振幅が小さく周期の長い台形状の第2波が発生している。ソイルセメント厚が小さくなると、振幅が小さく継続時間が長くなる傾向にあることが分かる。

(c) 図より、荷点伝達衝撃応力波形は重錘衝突とともに0.1~0.2 MPaまで励起し、0.2 MPaまで値が上がった後緩やかに増加、減少をする傾向を示している。S30/40-V6.0およびS40-V9.0試験体の場合に、振幅が0.2 MPa程度に抑制されていることが分かる。これは、前述の破壊性状からも見て取れるように、ソイルセメントの押抜きせん断コーンの底面が、見かけ上の荷点面となることで衝撃を分散し、これによって図-2に示すEPSブロックの降伏応力(55%ひずみ)を超えないレベルまで衝撃力が軽減

されたためと考えられる。厚さが大きくなることでその傾向はより顕著に現れ、S40-V9.0試験体では0.2 MPa程度に抑えられている。

(d) 図の重錘貫入量波形より、重錘衝突とともに正弦半波状の第1波が励起し、その後自由振動を呈している。S30/S40-V6.0試験体の場合では、その振幅が負の値に至っている。これは、重錘がEPSの復元力によって押し戻されリバウンドしたためと考えられる。なお、各ケースにおいて残留変位が発生しているのは、ソイルセメントが破壊して重錘が大きく貫入しているためと考えられる。

3.3 各種応答値 - 重錘貫入量関係

図-5には、(a) 重錘衝撃力、(b) 伝達衝撃力および(c) 伝達衝撃応力 - 重錘貫入量関係を示している。

(a) 図より、重錘衝撃力はいずれのケースでも重錘が貫入した直後に第一波を励起し、その後、50~70 kN程度の値を保持したまま貫入量のみが増大している。なお、最大重錘衝撃力はソイルセメント厚が大きい程、貫入量が増大する時点で発生していることが分かる。これは、重錘が貫入しソイルセメントが破壊される過程で第1波が励起したもので、その後EPSブロックの変形により衝撃エネルギーが吸収されていることを示している。

一方、(b) 図より、前述の重錘衝撃力の場合に比べて増加、減少の程度が緩やかであるものの、最大値がほぼ同程度であることやその後同様の値を保持するなど類似する点も見られる。勾配が緩やかな要因としては、ソイルセメント破壊後、EPSブロックの変形とともに衝撃エネルギーが徐々に吸収されているためと考えられる。

また、(c) 図より、伝達衝撃応力波形は0.2 MPaまでほぼ同様に緩やかに増加し、減少するという傾向を示している。しかしながら、S20-V6.0、S30-V9.0試験体の場合には、伝達衝撃応力が0.2 MPaを超過し、それぞれ0.7 MPa、0.4 MPaに達している。これは、EPSブロックが大きく変形したため、緩衝性能が低下したと考えられる。

3.4 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-6には、(a) 最大衝撃力、(b) 荷点直下の最大伝達衝撃力および(c) 重錘貫入量と入力エネルギーとの関係を示している。(a) 図より、最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加に伴って増加する傾向を示している。一方、最大伝達衝撃力は入力エネルギーやソイルセメント厚によ

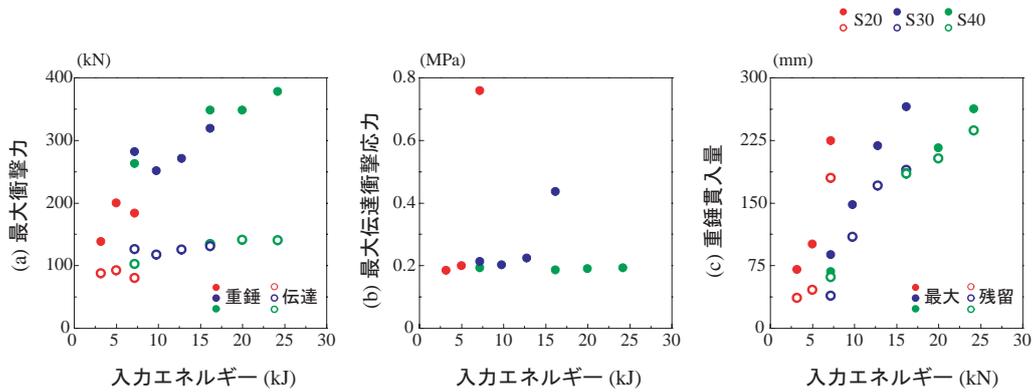


図-6 各種応答値と入力エネルギーの関係

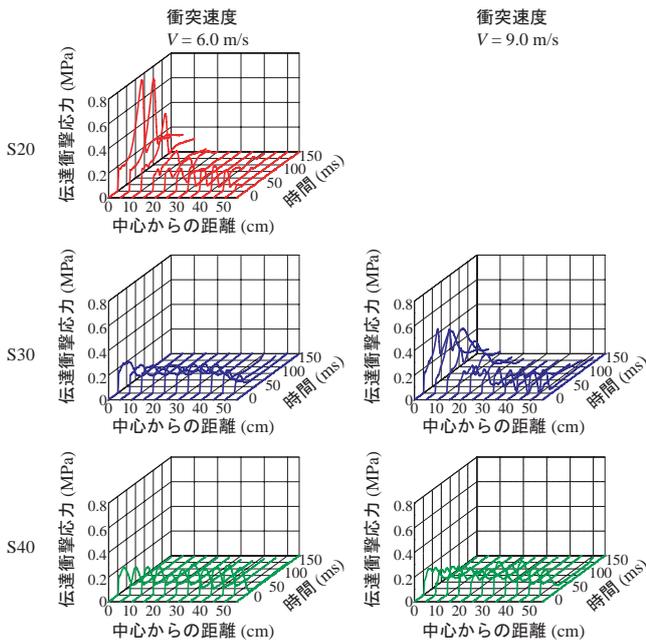


図-7 伝達衝撃応力分布

らず、重錘衝撃力の1/2～1/3程度のほぼ同様の値を示している。これらの結果より、ソイルセメント厚の増大に伴う衝撃エネルギーの吸収性能はより高いものとなっていることが明らかとなった。

(b) 図の载荷点直下伝達衝撃応力と入力エネルギーとの関係では、ソイルセメント厚が200 mm、300 mmの場合、それぞれ入力エネルギー5.0 kJ、13.5 kJまでは、伝達応力が0.2 MPa程度となっている。これより、EPSブロックが変形するものの、そのひずみレベルは残留変形を残すほどの領域にはないことを示している。また、入力エネルギー7.2 kJおよび17.2 kJの場合に伝達衝撃応力が0.2 MPaを大きく超過していることも確認できる。一方、ソイルセメント厚が40 cmで伝達衝撃応力が0.2 MPaを超えていないことから、入力エネルギー17.2 kJでは終局に至っていないと判断できる。以上より、入力エネルギーの観点から緩衝性能を評価した場合、S20/30/40-V6.0試験体を比較すると約4倍程度、S30/40-V6.0試験体を比較すると約2.25倍程度の値の差異があり、ソイルセメント厚を大きくすることにより緩衝性能は向上したと推察できる。

(c) 図の重錘貫入量と入力エネルギーとの関係に着目す

ると、最大、残留ともに入力エネルギーの増加とともに増え、ソイルセメント厚が大きくなることでそれらの値は小さくなっている。これは、ソイルセメント厚の増加に伴って構造の剛性も増加しているためと考えられる。

3.5 伝達衝撃応力分布

図-7には、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S20-V6.0およびS30-V9.0試験体の場合には、衝撃荷重直後において、EPSブロック全域に渡り0.2 MPa程度の応力が発生し、その後载荷点近傍の応力が急激に増大する傾向にあることが分かる。これは前述の破壊性状から、ジオグリッド中心部が大きく破断し、重錘がEPSブロックに深く貫入したためと考えられる。一方、S30/40-V6.0およびS40-9.0試験体の場合には、伝達衝撃応力がEPSブロック全域で0.2 MPa程度となっていることが分かる。これは、ジオグリッドが破断せずに効果を発揮したため、EPSブロック底面にほぼ均等に応力が分散されたと考えられる。

4. まとめ

本研究では、提案の三層緩衝構造の耐衝撃性能に及ぼすソイルセメント厚の影響を検討することを目的に、ソイルセメント厚を3種類に変化させ衝撃荷重実験を実施した。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) ソイルセメント厚を大きくすることで、押抜きせん断破壊に伴う衝撃エネルギーの吸収効率が上がる。
- 2) ソイルセメント厚を大きくすることで押抜きせん断コーンの底面が広がり、ソイルセメントによる衝撃力の分散効果が増大する。

参考文献

- 1) 岸徳光, 川瀬良司, 今野久志, 岡田慎哉: 二層緩衝構造を用いた落石防護擁壁模型の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1567-1578, 2002.3
- 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