# 論文 ソイルセメント厚が異なる落石防護擁壁用三層緩衝構造の重錘落下 衝撃実験

藤堂 俊介\*1·牛渡 裕二\*2·栗橋 祐介\*3·岸 徳光\*4

要旨:本研究では,落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能や緩衝メカニズム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として,ソイルセメント厚を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。その結果,1)三層緩衝構造に作用する重錘衝撃力は,振動便覧式を用いラーメ定数 $\lambda$ =3,000 ~ 5,000 kN/m<sup>2</sup>とすることにより大略推定可能である,2)各三層緩衝構造の最大入力エネルギーとソイルセメン ト厚さはほぼ比例関係にある,3)ソイルセメント厚さによらず押抜きせん断角度は概ね45°である,ことな どが明らかになった。

キーワード:三層緩衝構造、ソイルセメント厚、押抜きせん断コーン、押抜きせん断角度

#### 1. はじめに

山岳部や海岸線に建設されている道路には,急崖斜面 からの落石災害を防止するために落石防護構造物が数多 く設置されている。一方,近年の自然災害(大地震,ゲリ ラ豪雨など)や風化・侵食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る事例が増加 している。最近では,既設落石防護擁壁の耐衝撃性向上 のために,表層材にRC版を用いた二層緩衝構造が適用 される場合がある。ただし,この緩衝構造の場合には表 層材 RC版の製作費,運搬費などコストが嵩む傾向にあ る。そのため,既設落石防護擁壁の安価でより効果的な 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、図-1に示したような表層材:ソイルセメン ト、芯材:ジオグリッド、裏層材:EPS ブロックから成る 三層緩衝構造を提案し<sup>1)</sup>、パラメータを種々に変化させた 静的および衝撃荷重載荷実験を行ってきた。その結果、 ジオグリッドを埋設したソイルセメントが押抜きせん断 破壊することによって衝撃力が分散され、さらに EPS ブ



図-1 提案の三層緩衝構造の概要

ロックが塑性変形することによって緩衝効果が効率的に 発揮されることが明らかになっている。

また、ソイルセメント厚を大きくする場合には、衝撃力 の分散効果が効率的に発揮され緩衝効果が向上すること も明らかとなっている<sup>2),3)</sup>。しかしながら、ソイルセメン ト厚と衝撃力分散効果や緩衝性能との関係の定量評価に は至っていないのが現状である。したがって、提案の三 層緩衝構造の合理的な設計手法を確立するためには、ソ イルセメント厚の影響を明確にする必要があるものと考 えられる。

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検討す



図-2 実験装置および試験体の概要

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (正会員)
\*2 (株)構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 (正会員)
\*3 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)
\*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

		PANA L.L.	<del>70</del>	
	ソイル	衝突	入力	圧縮
試験体名	セメント厚	速度	エネルギー	強度
	<i>t</i> (cm)	(m/s)	E (kJ)	(MPa)
S20-V4.0		4.0	3.2	
S20-V5.0	20	5.0	5.0	1.1
S20-V6.0		6.0	7.2	
S30-V6.0		6.0	7.2	
S30-V7.0		7.0	9.8	0.0
S30-V8.0	30	8.0	12.8	0.8
S30-V9.0		9.0	16.2	
S40-V6.0		6.0	7.2	
S40-V9.0	40	9.0	16.2	0.0
S40-V10.0	40	10.0	20.0	0.9
S40-V11.0		11.0	24.2	

表一1 試験体一覧

#### 表-2 各材料の物性値一覧

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

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

(c)EPS				
密度(kg/m3)	発泡倍率	製造法		
20	50.0	型内発泡法		

ることを目的に,既往の実験結果<sup>2),3)</sup>に加えて,ソイルセ メント厚および衝突速度を変化させる場合の衝撃荷重載 荷実験を実施した。

## 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-2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応力計が設置された鋼製底盤(1.6 m四方、厚さ75mm)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。応力計は、底盤中 央部および左側50mmの位置に1個ずつ、中央部から右 側端部まで50mm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。



図-3 EPS の応力 - ひずみ曲線



写真ー1 実験状況

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 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/m<sup>3</sup> 練り混ぜたものを敷き均し 足踏みにて締固め、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。ま た、図-3にはEPSブロックの圧縮試験により得られた 応力-ひずみ曲線を示している。本研究では、載荷点直下 の応力が急激に増加し始める 55% ひずみまでの降伏棚 の値 0.2 MPa を EPS ブロックの降伏応力としている。な お、載荷点直下の伝達衝撃応力が 0.4 MPa に達した時点 で EPS ブロックが終局状態であると仮定し、その衝突速 度で実験を終了することとした。

実験は、**写真-1**のように、重錘を鋼製底盤の中央に 配置した試験体の中央部に、所定の衝突速度で落下させ 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  $\phi$  200 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。重錘衝撃力は重錘に



図-4 各種時刻歴応答波形

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式変位計を用いて測定 している。なお,本論文では9個の反力計の応答値を合 計して伝達衝撃力としている。

#### 3. 衝擊荷重載荷実験結果

## 3.1 時刻歴応答波形

図-4には,(a) 重錘衝撃力,(b) 伝達衝撃力,(c) 重錘貫 入量,(d) 載荷点直下の伝達衝撃応力に関する各時刻歴応 答波形をソイルセメント厚ごとに整理して示している。

図-4(a)より,重錘衝撃力は,ソイルセメント厚にか かわらず振幅が大きく継続時間の短い第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。第1波に示される最大振幅は,ソイルセメント 厚の増加に伴って大きくなる傾向にある。また,第2波 の継続時間は概ね100 ms 程度であるが,S30-V6.0 および S40-V6.0 試験体のみ50 ms 程度と短い。これは,後述の 重錘貫入量に示されているように重錘貫入量が比較的小 さく,重錘が大きくリバウンドしていることによるもの と考えられる。

図-4(b)より,伝達衝撃力は,ソイルセメント厚にか かわらず最大振幅を示す第1波とそれに後続する振幅の 小さい第2波から構成されていることが分かる。ここで, 既往の研究では,第1波はソイルセメントが押抜きせん 断破壊していることを示し,第2波は EPS ブロックが変 形して衝撃力を吸収していることを示していることを明 らかにしている<sup>3)</sup>。

第1波の性状を見ると、ソイルセメント厚が大きい場 合ほど振幅が大きく、かつ継続時間が長い。これは、ソ イルセメント部分の押抜きせん断耐力が大きく、かつ押 抜きせん断破壊に要する時間が長いことを示しているも のと考えられる。また、S30-V6.0 および S40-V6.0 試験体 の場合には、第1波は見られるものの第2波がほとんど 励起していない。これは、ソイルセメントの押抜きせん 断破壊によって衝撃エネルギーの多くが消費されたため、 EPS ブロックがほとんど損傷していないことを意味して いるものと推察される。そのため、後述するように重錘 が大きくリバウンドしたものと考えられる。

図-4(c)より,重錘貫入量は,重錘衝突時に第1波が励起し,その後は損傷度合いに応じた残留変形を伴って減 衰自由振動状態に至っている。また,第1波の振幅や残 留変形は衝突速度が大きい場合ほど大きい。S30-V6.0 お よび S40-V6.0 試験体の場合には,第1波が励起した後重 錘貫入量が負の値を示していることから,重錘が貫入し た後衝突面よりも高い位置までリバウンドしていること が分かる。これは,前述のとおり,EPS ブロックの損傷 が極めて軽微であったことによるものである。

図-4(d)より,載荷点直下の伝達衝撃応力は,S20-V6.0 および S30-V9.0 試験体を除き,最大振幅が EPS ブロック



(a) ソイルセメント内部の押抜きせん断コーン

(b) EPS ブロックの中央部切断面





図-5 伝達衝撃応力分布

の降伏応力である 0.2 MPa 程度の台形状の波形分布を示 している。これは,これらの試験体の緩衝性能に未だ余 裕があることを示すものと考えられる。また,S20-V6.0 および S30-V9.0 試験体の場合には,0.2 MPa を超過する 応力が発生している。これは,EPS ブロックが大きく変 形・損傷し,前述の 図-3 における応力が急増する領域 に至っていることを示している。従って,載荷点周辺に おいては局所的に大きな伝達衝撃力が作用しているもの と考えられる。

# 3.2 破壊状況

写真-2には、実験終了後におけるソイルセメントお よび EPS ブロックの破壊性状を衝突速度 V = 6.0, 9.0 およ び 11.0 m/s の場合について示している。ここでは、(a) ソ イルセメント内部に形成された押抜きせん断コーンと(b) EPS ブロックの切断面について示している。

写真-2(a) より,いずれの試験体においても円錐状の 押抜きせん断コーンが形成されており,その形成範囲は ソイルセメント厚が大きい場合ほど大きいことが分かる。 また,S30-V6.0 および S40-V6.0 試験体を除き,載荷点部 分が大きく陥没し押抜きせん断コーンも一部崩壊してい る。S30-V6.0 および S40-V6.0 試験体の場合には,載荷点 部分の圧壊は見られない。これは,押抜きせん断コーン の形成と EPS ブロックのわずかな変形で衝撃エネルギー が吸収されたため,重錘の押抜きせん断コーンへの貫入 には至らなかったことによるものと推察される。

写真-2(b)より, EPS ブロックは S20-V6.0 および S30-V9.0 試験体において著しく損傷していることが分かる。 これは,押抜きせん断コーンの載荷点部分が大きく圧壊





図-7 緩衝性能の定量的評価

していることと対応している。また,S40-V9.0/11.0 試験 体は,押抜きせん断コーンが圧壊しているにもかかわら ず,EPS ブロックの損傷は比較的軽微である。これは,押 抜きせん断コーンの形成範囲が大きいため,EPS ブロッ クに伝達される衝撃力が広く分散されたことによるもの と考えられる。

これらのことから,ソイルセメント厚が大きい場合に は,押抜きせん断コーンの形成範囲が大きく EPS ブロッ クに伝達される衝撃力が広く分散されるため,吸収可能 エネルギーも大きくなるものと推察される。

# 3.3 伝達衝撃応力分布

図-5には、衝突速度 V=6.0 および 9.0 m/s における伝 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、S30-V9.0 試験体の場合には、衝撃荷重載荷直後において、EPS ブ ロック全域に渡り 0.2 MPa 程度の応力が発生し、その後載 荷点付近の応力が急激に増大していることが分かる。こ れは、前述のとおり EPS ブロックが大きく陥没したこと によるものと考えられる。一方、その他の試験体は、重 錘衝突に伴い伝達衝撃応力が励起するものの、いずれも 0.2 MPa 程度である。このことから、EPS ブロックの損傷 は軽微であることが分かる。

# 3.4 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。また,図-6(a)には振動便覧式<sup>4)</sup>により求 めた衝撃力を示している。

図-6(a) より,重錘衝撃力および伝達衝撃力は,入力 エネルギーの増加に伴って大きくなる傾向にあることが 分かる。また,伝達衝撃力は重錘衝撃力の $1/3 \sim 1/2$ であ ることから,衝撃力の緩衝効果が効率的に発揮されてい ることが分かる。重錘衝撃力は振動便覧式を用いラーメ 定数  $\lambda = 3000 \sim 5000 \text{ kN/m}^2$ で概ね算定可能であることも 分かる。

図-6(b)より,重錘貫入量は,ソイルセメント厚によ らず,入力エネルギーの増加に伴ってほぼ線形に増大し ていることが分かる。ただし,ソイルセメント厚が大き くなるにしたがって,増加の割合は小さくなる傾向を示 す。また,同一入力エネルギー時における重錘貫入量を 比較すると,ソイルセメント厚を大きくすることにより, 重錘貫入量が低減されており,緩衝性能が向上している ことが分かる。

図-6(c)より,載荷点直下の伝達衝撃応力は,ソイル セメント厚によらず概ね0.2 MPa 程度となっているもの の,S20 およびS30 試験体の場合には,最大入力エネル ギー時において0.2 MPa を大幅に上回る値を示している。 一方,S40 試験体の場合には,最大入力エネルギー時に おいても未だ応力は0.2 MPa 程度である。

ここで、本実験における最大入力エネルギーとソイルセ メント厚の関係を整理すると図-7のようになる。図よ り、ソイルセメント厚が大きいほど最大入力エネルギー が指数関数的に増大していることが分かる。なお、本実 験において S40 試験体は、終局に至っていないためその 最大入力エネルギーはさらに大きいものと考えられる。

# 3.5 押抜きせん断コーンの形成範囲と押抜きせん断角度

前節までの検討では,ソイルセメント厚を大きくする ことにより伝達衝撃力の分布範囲が大きくなるため,提



図-8 押抜きせん断コーン底面の直径および平均押抜きせん断角度と入力エネルギーの関係



図-9 押抜きせん断コーン概略図

案の三層緩衝構造の緩衝効果が向上することが明らかに なった。ここでは、伝達衝撃力の分散範囲は押抜きせん 断コーンの形成範囲と密接に関係していることから、ソ イルセメント厚と押抜きせん断コーンの形成範囲(以後、 コーン形成範囲)Dとの関係、およびコーンの形成範囲D から求められる平均押抜きせん断角度 θ との関係につい て検討する。ここで、平均押抜きせん断角度 θ は、下式 (1)のように求めた(図-9参照)。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{D-d}{2H}\right) \tag{1}$$

ここに, *H*: ソイルセメントの有効高さ, *D*: 押抜きせん断コーンの形成範囲, *d*: 重錘直径である。

図-8には、入力エネルギーEと(a) 押抜きせん断コーンの形成範囲Dおよび(b) 平均押抜きせん断角度 θ との関係を示している。図-8(a) より、コーン形成範囲はソイルセメント厚が大きい場合ほど大きくなる傾向にあることや、ソイルセメント厚が同等の場合には入力エネルギーによらずほぼ一定であることが分かる。また、図-8(b)より、コーン形成範囲より求めた平均押抜きせん断角度は、ソイルセメント厚および入力エネルギーによらずほぼ45°程度となることが分かる。

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載荷実験を 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。

- 三層緩衝構造に作用する重錘衝撃力は、振動便覧式 を用いラーメ定数 λ = 3,000 ~ 5,000 kN/m<sup>2</sup> とするこ とにより大略推定可能である。
- 各三層緩衝構造の最大入力エネルギーはソイルセメント厚の増加に伴い指数関数的に増大する。
- ソイルセメント厚によらず押抜きせん断角度は概ね 45°である。

# 謝辞:

本研究は,国土交通省建設技術研究開発助成制度におけ る政策課題解決型技術開発(中小企業タイプ)の援助に より行われたものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:構造工学シリーズ8ロックシェッドの耐 衝撃設計,平成10年11月
- 2)菅原慶太,岸 徳光,牛渡裕二,小室雅人,栗橋祐 介:落石防護擁壁用三層緩衝構造の衝撃吸収性能に 及ぼす表層材ソイルセメント厚の影響,土木学会北 海道支部論文報告集,A-34, CD-ROM, 2012.2
- 3) 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, pp.715-720, CD-ROM, 2012.7
- 4) (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2006.6.