

論文 ソイルセメントと EPS ブロックを組み合わせた緩衝工に関する静荷重および衝撃荷重載荷実験

岡田 伸之^{*1}・岸 徳光^{*2}・牛渡 裕二^{*3}・川瀬 良二^{*4}

要旨: 本研究では、新しい落石防護擁壁用緩衝構造の開発のための基礎データを収集することを目的に、ソイルセメントと EPS ブロックを組み合わせた緩衝工に関する静荷重および衝撃荷重載荷実験を行った。その結果、1) 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いため、衝撃力が分散して EPS ブロックに作用すること、2) ソイルセメント厚を 20 cm から 30 cm にすることにより、緩衝性能が 1.6 倍程度向上すること、などが明らかになった。

キーワード: ソイルセメント, 静載荷実験, 衝撃荷重載荷実験

1. はじめに

急崖斜面に近接する道路の落石災害危険箇所には、落石防護擁壁などの落石防護構造物が多数建設されている。一方、昨今の異常気象や巨大地震の発生および調査方法の高度化などにより、設計落石荷重が設計当初よりも大きく評価されるケースも少なくない。そのため、落石防護構造物の耐衝撃性の向上が強く求められているのが現状である。この種の構造物の耐衝撃性向上策としては、落石衝突面に敷砂緩衝材などの緩衝工を設置する方法がある¹⁾。しかしながら、落石防護擁壁の場合には落石の衝突位置が鉛直面であることから、敷砂の設置には広いスペースが必要となり、設置可能なケースは非常に少ない。以上のことから、省スペースで効率的な緩衝システムの開発に向けた検討が諸研究機関で推進されている。著者らも、過去に発泡スチロール(以後、EPS)ブロックと芯材 RC 版から成る二層緩衝構造を開発している²⁾。ただし、この工法の場合には RC 版の製作・運搬・設置等の過程においてコストが嵩むことから、更なる費用対効果の高い緩衝構造の開発が求められている。

このような背景より、著者らは、さらに緩衝性能に優れた新しい複合緩衝システムとして、表層材としてソイルセメント、芯材としてジオグリッド、裏層材として EPS ブロックを積層する方法を考案した。なお、ジオグリッドは、盛土等の補強に用いられる合成高分子材料製のグリッド状の補強材である。この緩衝システムは、ジオグリッドで補強されたソイルセメントで落石による衝撃力を吸収するとともに広く分散させ、さらに EPS ブロックで衝撃エネルギーを吸収する、という概念の下に提案されたものである。

表-1 実験ケース一覧

試験体名	ソイルセメント厚 (cm)	EPS 厚 (cm)	荷重速度 (m/s)	入力エネルギー (kJ)
S20E-S	20	25	静的	-
S20E-V2.0			2.0	0.80
S20E-V2.5			2.5	1.25
S20E-V3.0			3.0	1.80
S20E-V4.0			4.0	3.20
S20E-V5.0			5.0	5.00
S20E-V5.5			5.5	6.05
S20E-V6.0			6.0	7.20
S30E-S	30	25	静的	-
S30E-V3.0			3.0	1.80
S30E-V4.0			4.0	3.20
S30E-V5.0			5.0	5.00
S30E-V6.0			6.0	7.20
S30E-V7.0			7.0	9.80
S30E-V7.5			7.5	11.25

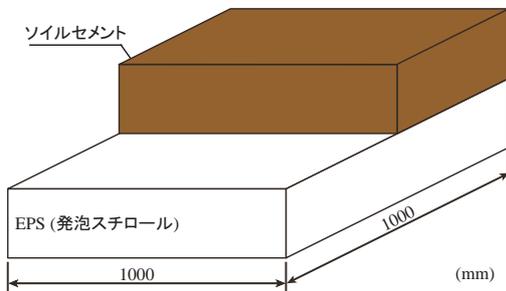


図-1 新しい複合緩衝システム

*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 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)
 *3 (株)構研エンジニアリング 防災施設部 (正会員)
 *4 (株)構研エンジニアリング 常務取締役 博(工) (正会員)

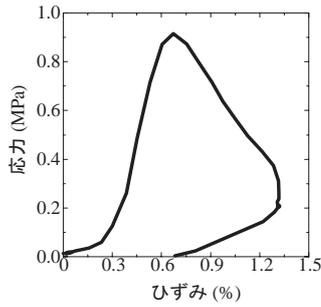


図-2 ソイルセメント応力-ひずみ関係の一例

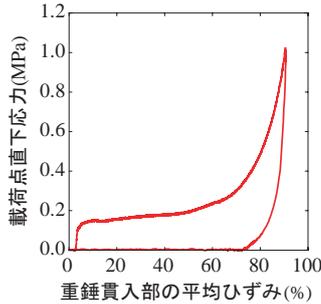


図-3 EPS 応力-ひずみ関係

本研究では、提案の緩衝システムに関する実用化の可能性を段階的に検討するため、図-1に示すジオグリッドを配置しないソイルセメントとEPSブロックを組み合わせた緩衝工の緩衝性能を検討することを目的に、静荷重および衝撃荷重実験を行った。本研究では、ソイルセメント厚さおよび荷重方法、重錘衝突速度をパラメータとして実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1には、本実験ケースの一覧を示している。試験体は平面寸法1m四方のEPSブロックとソイルセメントを積層する形で成形した。EPSブロックの厚さは25cm、ソイルセメントの厚さは20および30cmである。

表中の実験ケース名のうち、第1項目はソイルセメントの厚さ(cm)を示し、第2項目は衝突速度(m/s)を表している。また、表中には入力エネルギーも併せて示している。

ソイルセメントは、比較的粒度分布が広い細骨材と早強ポルトランドセメントを用いて、細骨材の含水比を15%(最適含水比)とし、単位セメント量を 100 kg/m^3 として打設することとした。試験体打設後の養生方法は、実施工と同様に屋外での養生とし、試験体をブルーシートで覆い7日間養生した。

図-2には、ソイルセメント圧縮試験時の応力-ひずみ関係の一例を示している。実験時におけるソイルセメントの圧縮強度は0.9MPaであった。なお、弾性係数は、圧縮応力0.3~0.8MPa程度の範囲で評価すると0.2GPa

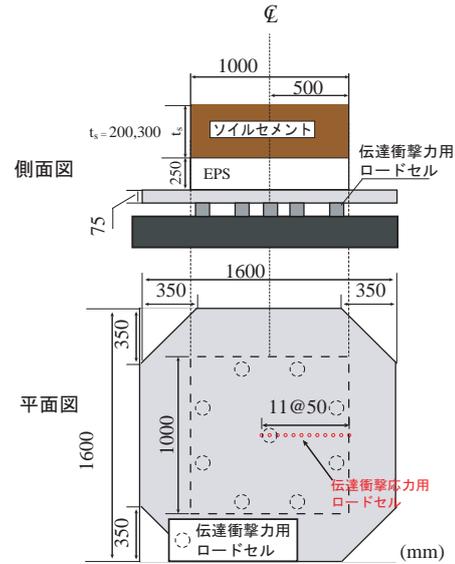


図-4 実験装置

程度となる。これは、圧縮強度30MPaのコンクリートの弾性係数(25GPa)の1/100程度である。

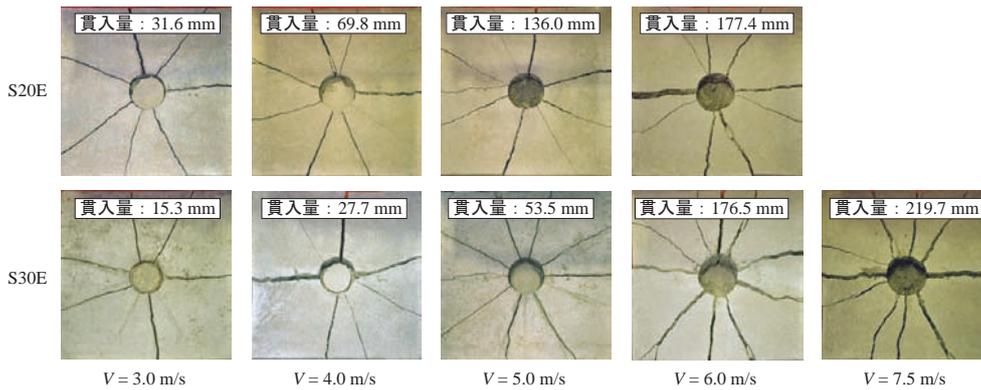
EPSは、密度が 20 kg/m^3 、発泡倍率が50倍の型内発泡法のものを用いている。図-3には、EPSの静的な応力-ひずみ関係を示している。

2.2 実験方法

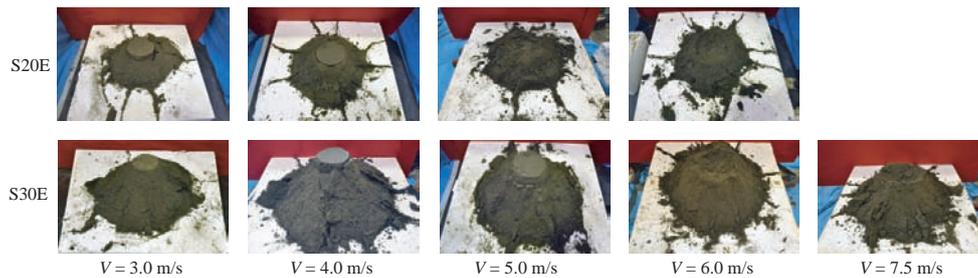
図-4には、実験装置の概要を示している。本実験装置は、伝達衝撃力用ロードセル(以後、応力計)が設置された鋼製底盤(1.6m四方、厚さ75mm)と底盤を支持する9個の反力計測用の起歪柱型ロードセル(以後、反力計)から構成されている。なお、本論文では9個の反力計による合支点反力を伝達衝撃力と定義している。応力計は、底盤中央部および左側50mmの位置に1個ずつ、および中央部から右側端部まで50mm間隔で10個の計12個設置されており、その受圧面は底盤上面と同一平面上に設置されている。

衝撃荷重実験は、本装置を剛基礎上に設置し、EPSブロックとソイルセメントを組み合わせた試験体を装置の中央に配置して、重錘を所定の速度で底盤中央部に一度だけ落下させる形で行った。なお、重錘質量は400kg、先端部直径は $\phi=200 \text{ mm}$ であり、その底面は片当たり防止のために2mmのテーパが設けられている。静荷重実験は、鋼製フレームに設置された油圧ジャッキの先端に衝撃荷重実験で使用した重錘の先端部を取り付けて実施した。なお、本研究では、静荷重実験および衝撃荷重実験ともに、底盤面に設置した応力計による伝達衝撃応力が0.4MPaを超過した時点でEPSが終局に至っているものと判断し、実験を終了している。

測定項目は、重錘に組み込まれている起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力、底盤を支持する反力計による伝



(a) ソイルセメント表面



(b) 押抜きせん断コーン

写真-1 衝撃荷重実験終了後のソイルセメントの破壊性状

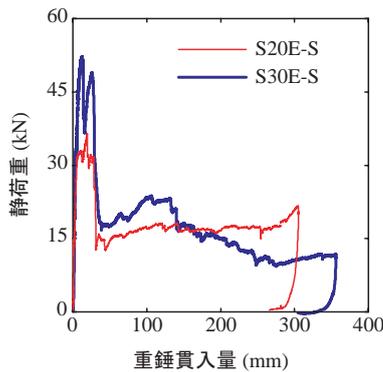


図-5 静荷重-重錘貫入量関係

達衝撃力、底盤面に設置した12個の応力計による伝達衝撃応力分布、および非接触型レーザ式変位計による重錘貫入量(以後、貫入量)である。また、静載荷時の測定項目は、静荷重測定用ロードセルによる載荷荷重の他は、衝撃荷重実験時と同様である。

3. 静載荷実験結果

図-5には、静載荷実験における静荷重-重錘貫入量関係を示している。いずれの試験体も載荷初期に急激に荷重が増加し、貫入量が30mm程度で除荷状態に至っている。載荷初期の剛性勾配はソイルセメント厚に関わらず類似であるものの、最大荷重はソイルセメント厚が大きい場合において大きい。なお、載荷初期の剛性勾配がソイルセメント厚によらずほぼ同様であるのは、ソイルセメントとEPSブロックが一体となって挙動し、ソイル

セメントよりEPSブロックの変形が卓越したことによるものと推察される。

4. 衝撃荷重実験結果

4.1 ソイルセメントおよびEPSブロックの破壊性状

写真-1には、衝撃荷重実験終了後におけるソイルセメントの破壊性状を、衝突速度 $V=3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.5$ m/sの場合について示している。実験時には、いずれのケースにおいても重錘がソイルセメントに貫入し、かつソイルセメントが押抜きせん断破壊に至ることを確認している。ここでは、実験終了後におけるソイルセメント表面の破壊性状(写真-1(a))と押抜きせん断コーン周辺のソイルセメント塊を撤去した状況(写真-1(b))を示している。

写真-1(a)より、ソイルセメント厚によらず、ソイルセメント表面の中央部が重錘形状と同様の円形状に陥没するとともに、その周囲には放射状にひび割れが発生し、開口していることが分かる。また、衝突速度の増加に対応して、重錘貫入量が増大するとともに放射状ひび割れや開口幅が大きくなる傾向にある。特に、S20/30E試験体の場合には、衝突速度がそれぞれ $V=5.0, 6.0$ m/sの場合に貫入量が急激に増大している。

写真-1(b)より、ソイルセメントにおける押抜きせん断コーンの形成範囲は、ソイルセメント厚に対応して拡大する傾向にあることが分かる。また、貫入量が急激に増加する場合(S20/30E試験体で衝突速度が、それぞれ $V=$

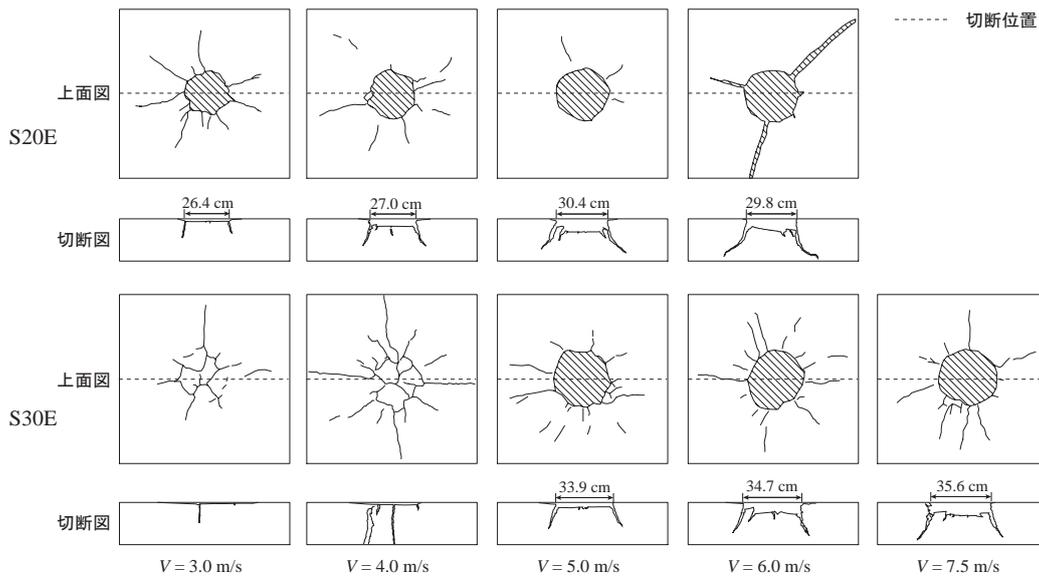


図-6 衝撃荷重実験終了後のEPSブロックの上面図および切断面

5.0, 6.0 m/s)には、押抜きせん断コーンの大部分が圧縮破壊している様子がうかがわれる。なお、実験時においては、押抜きせん断コーンの大部分が粉碎され砂状化していることを確認している。このことより、ソイルセメントは、入力エネルギーが小さい場合には放射状のひび割れや押抜きせん断ひび割れの発生によりエネルギーを吸収し、入力エネルギーが大きい場合にはさらに押抜きせん断コーンが砂状化してエネルギーを吸収するものと推察される。

図-6には、衝撃荷重実験終了後におけるEPSブロック上面および中央断面部の変形およびひび割れ分布を示している。図より、S20E試験体の場合にはいずれの場合もEPSブロック中央部が円形状に陥没していることがわかる。また、衝突速度 $V=6.0$ m/sの場合には、EPSブロックが2つに分離している。一方、S30E試験体の場合には、衝突速度 $V=3.0, 4.0$ m/sの時点ではEPSブロックの陥没はみられず、 $V=5.0$ m/s以降に円形状に陥没していることがわかる。

EPSブロックの中央部切断面の状況を見ると、EPSブロック表面が陥没している場合には、いずれも押抜きせん断破壊に至っていることが分かる。また、ソイルセメント厚によらず衝突速度の増加に伴って陥没量やひび割れ長さが増大している。同一衝突速度における損傷状況を比較すると、ソイルセメント厚が大きい場合には陥没部の直径が大きくかつ陥没量も大きい。従って、ソイルセメント厚が大きい場合には、ソイルセメントの押抜きせん断耐力のみならず衝撃力の分散範囲も拡大するため、衝撃エネルギーもEPSブロックによって効果的に吸収されるものと考えられる。

これらのことより、ソイルセメントとEPSブロックを組み合わせた緩衝工の緩衝性能は以下のように発揮され

ているものと考えられる。すなわち、

- i) ソイルセメントの押抜きせん断破壊により衝撃エネルギーが消費されるとともに、押抜きせん断コーンの底面部から衝撃力が分散してEPSブロックに伝達される、
- ii) さらに、EPSブロックは衝撃力の分散範囲に対応して変形し衝撃エネルギーを吸収する、
- iii) 入力エネルギーが大きい場合には、ソイルセメントに形成された押抜きせん断コーンが粉碎され砂状化することで、さらに衝撃エネルギーを吸収する、である。

4.2 時刻歴応答波形

図-7には、重錘衝撃力、伝達衝撃力、载荷点直下の鋼製底盤における伝達衝撃応力(以下、载荷点伝達衝撃応力)および貫入量に関する時刻歴応答波形を示している。

図-7(a)より、重錘衝撃力波形は、重錘衝突により急激に立ち上がる第1波目と継続時間の長い第2波目から構成されている。また、衝突速度の増加に伴い、第1波目の振幅が増大するとともに、第2波目の継続時間が長くなっていることが分かる。また、S30E試験体の場合がS20E試験体よりも最大振幅が大きく、かつ第2波を含む波形継続時間が短い。これは、S30E試験体の場合がソイルセメント厚が大きく剛性も大きいことによるものと考えられる。

図-7(b)より、伝達衝撃力波形は、衝突速度が小さい場合には正弦半波状の波形が見受けられる。また、衝突速度の増大に対応して継続時間が短くなり、かつ振幅が小さい第2波が励起する傾向にある。なお、第1波目の最大振幅は衝突速度によらずほぼ同様であり、ソイルセメント厚が小さい場合に低減する傾向にある。

図-7(c)より、载荷点伝達衝撃応力は、衝突速度が小さくかつ最大振幅がEPSブロックの降伏応力(0.2 MPa程

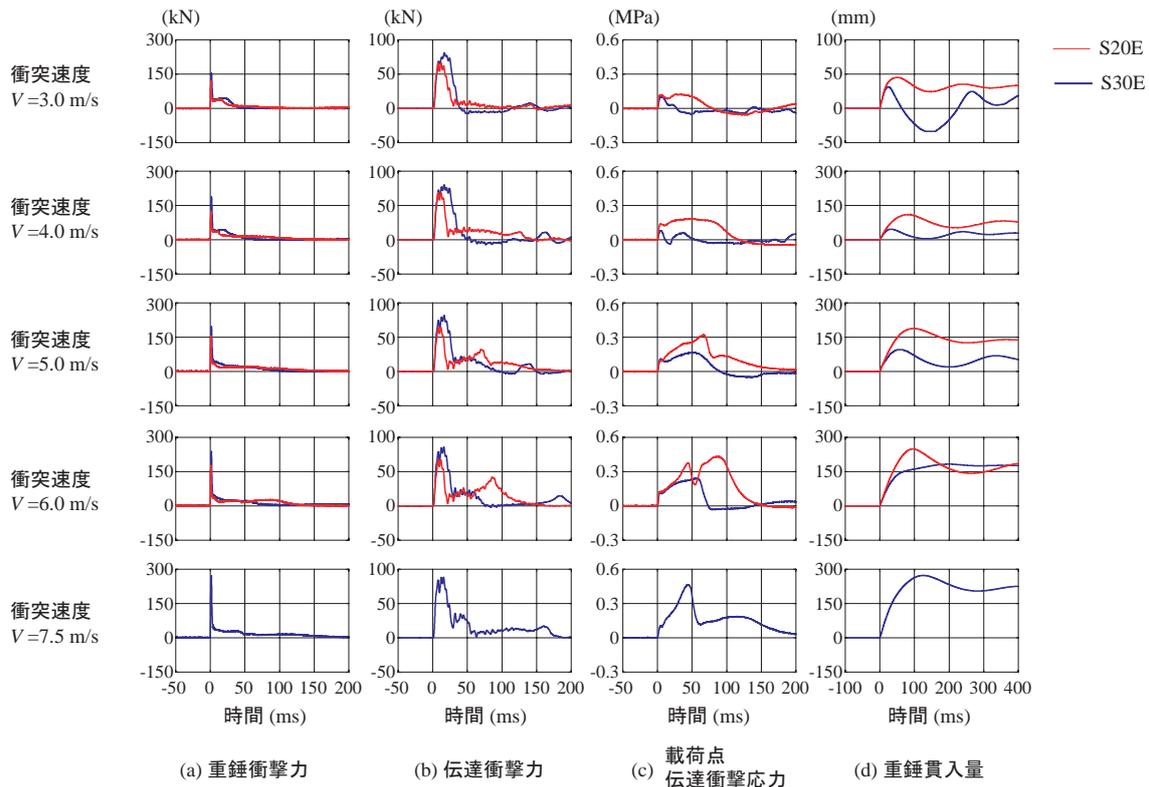


図-7 各種時刻歴応答波形

度)以下の場合には、継続時間の長い波形性状を示している。一方、衝突速度が大きいかつ最大振幅が0.2 MPa 以上の場合には、伝達衝撃応力が急激に増加し最大値に到達した後一気に除荷状態に至る傾向を示している。これは、前述のEPSブロックの損傷状況より、重錘が深く貫入しEPSブロックが押抜きせん断破壊に至ったことによるものと考えられる。また、同一衝突速度における伝達衝撃応力の最大値は、ソイルセメント厚が小さい場合で大きくなる傾向にある。これは、ソイルセメント厚が小さい場合には押抜きせん断コーンの形成範囲が小さく、衝撃荷重の分散効果が小さいことによるものと考えられる。

図-7(d)より、重錘の貫入変位は、S30E-V3.0を除き、いずれのケースにおいても正弦半波状の第1波が励起した後、変位が残留分だけドリフトした状態で減衰自由振動を呈している。また、同一衝突速度における波形性状を比較すると、ソイルセメント厚が小さい場合には最大振幅が大きいかつ第1波の周期が長くなる傾向にある。これは、ソイルセメント厚が小さい場合には、EPSブロックへの荷重の作用面積も小さくなることにより、結果としてEPSブロックが大きく変形することによるものと考えられる。

4.3 重錘衝撃力、伝達衝撃力および伝達衝撃力-重錘貫入量関係

図-8には、重錘衝撃力、伝達衝撃力および载荷点の伝達衝撃力と貫入量との関係を示している。重錘衝撃力-貫入量関係より、重錘衝撃力は衝突速度の増加に対

応して増大の傾向にあることが分かる。また、その分布性状を見ると、重錘衝撃力は重錘貫入初期に急激に増加し、最大値到達後一気に除荷状態に転じている。その後、ほぼ一定の荷重レベルを保ち貫入量のみが増加している。これは、重錘貫入初期にソイルセメントが破壊し、その後EPSブロックが大きく変形していることを暗示している。

一方、伝達衝撃力-貫入量関係を見ると、伝達衝撃力の最大値は重錘衝撃力よりも小さく、かつ衝突速度の大きさに拘わらずほぼ一定の値を示していることが分かる。また、重錘衝撃力と比較すると、伝達衝撃力は貫入量の増加に対応して徐々に上昇し、最大値到達後貫入量の増加を伴いながら小さくなる傾向を示している。これは、ソイルセメントがせん断破壊に至った後、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ものと考えられる。

なお、ソイルセメント厚が小さい場合や衝突速度が大きい場合には、伝達衝撃力除荷後、貫入量の増大に伴って再度载荷状態に至る傾向にある。このような性状は、载荷点伝達衝撃力-貫入量関係において、伝達衝撃力がEPSブロックの降伏応力(0.2 MPa程度)を上回る場合に見られる。これは、EPSブロックの衝撃エネルギー吸収能が限界に達し、EPSブロックの変形のみならずソイルセメントの圧縮破壊が生じたことによるものと考えられる。

4.4 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-9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。図より、重錘衝撃力は、入力エネルギーの

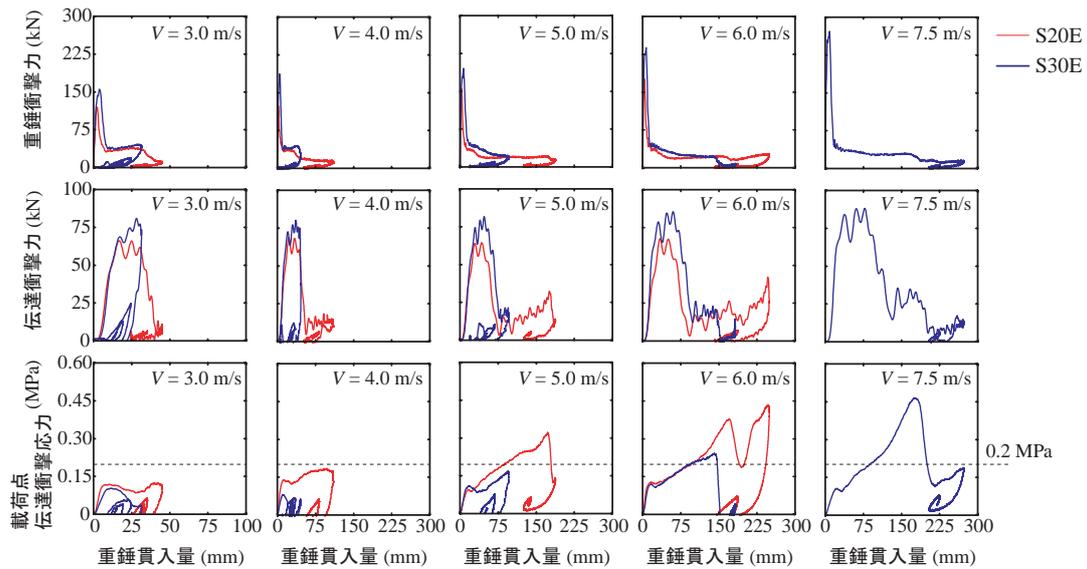


図-8 重錘衝撃力、伝達衝撃力および载荷点伝達衝撃応力-重錘貫入量関係

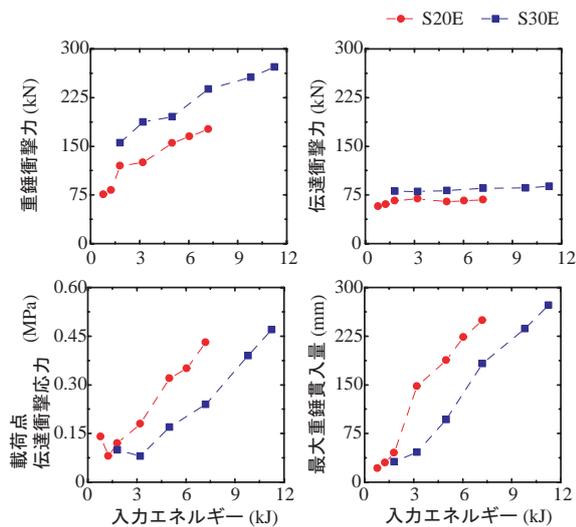


図-9 各種応答値と入力エネルギーとの関係

増加に対応して増加し、かつソイルセメント厚が大きいほど大きくなる傾向にあることがわかる。一方、伝達衝撃力は、重錘衝撃力に比べて小さくかつ衝突速度によらずほぼ一定の値を示している。このことより、本緩衝構造の緩衝効果はEPSブロックが著しく損傷する場合においても十分に保持されているものと判断される。

载荷点における伝達衝撃応力および最大貫入量は、入力エネルギーの増加に伴って増加し、かつソイルセメント厚が大きい場合ほど減少する傾向にある。これより、ソイルセメント厚が大きいほど緩衝性能が向上することが分かる。また、最大入力エネルギーの観点から、本緩衝構造の緩衝性能を評価すると、ソイルセメント厚を20から30 cmに増加させることにより緩衝性能が約1.6倍向上することが分かる。

5. まとめ

本研究では、新しい落石防護擁壁用の緩衝システムを開発するための基礎データの収集を目的に、ソイルセメントとEPSブロックを組み合わせた緩衝構造の静荷重および衝撃荷重実験を行った。また本実験ではソイルセメントの厚さをパラメータとして検討を行った。本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) ソイルセメント厚が大きい場合には、ソイルセメントの押抜きせん断耐力が大きいかつ押抜きせん断コーンの形成範囲が大きいため、衝撃力がより分散してEPSブロックに作用する。
- 2) 入力エネルギーが小さい場合には、放物線状ひび割れや押抜きせん断ひび割れの発生により衝撃エネルギーを吸収するものの、入力エネルギーの増加に伴い、押抜きせん断コーンが粉碎し砂状化して衝撃エネルギーを吸収する傾向を示す。
- 3) ソイルセメント厚を20から30 cmに増加させることにより緩衝性能が約1.6倍向上する。

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) 川瀬良司，岸 徳光，今野久志，鈴木健太郎：二層緩衝構造と杭基礎を併用した壁式落石防護擁壁の開発に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1285-1294，2006.3