

# 論文 表層材ソイルセメント強度を変化させた落石防護擁壁用三層緩衝構造の緩衝性能

菅原 慶太<sup>\*1</sup>・牛渡 裕二<sup>\*2</sup>・小室 雅人<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、ソイルセメントと発泡スチロール(以降, EPS) ブロックおよびジオグリッドを組み合わせた三層緩衝構造の適切な強度を検討することを目的として、セメント添加量を3種類に変化させた静荷重および衝撃荷重実験を行った。その結果、1) ソイルセメント強度によらず、エネルギー吸収能はほぼ同程度であること、2) しかしながら、強度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ため、少なくとも EPS ブロックの降伏応力である 0.2 MPa 程度より大きい強度が必要であること、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, EPS ブロック, ジオグリッド, ソイルセメント強度

## 1. はじめに

我が国の道路網は国土の約 70% が山岳地帯であるため、海岸線や山岳部に建設する割合が多い。そのため、落石災害から人命や道路を守るための落石防護構造物も数多く建設されている。一方、近年の異常気象や凍結融解等の経年劣化によって、想定される落石規模が設計当時より大きく評価されることも少なくない。このため落石防護構造物の安全性向上が求められている。安全性を向上させるための手段の一つとして落石衝突面に緩衝工を設置する方法が考えられる。著者らの研究グループでは、安価で効率的に安全性を向上させるための方法として、既設構造物を有効活用できる緩衝工の開発について種々の検討を行った。その結果、自立可能なソイルセメント(表層材)、衝撃力分散のためのジオグリッド(芯材)、衝撃

エネルギー吸収のための EPS ブロック(裏層材)からなる新しいタイプの三層緩衝構造を提案し実験的検討を行った<sup>1)~2)</sup>。実験の結果、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、など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の静荷重および衝撃荷重実験を実施した。

## 2. 実験概要

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高さ 30 cm のソイルセメントを設置している。試験体の製作は、含水比を 15% に調整した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。

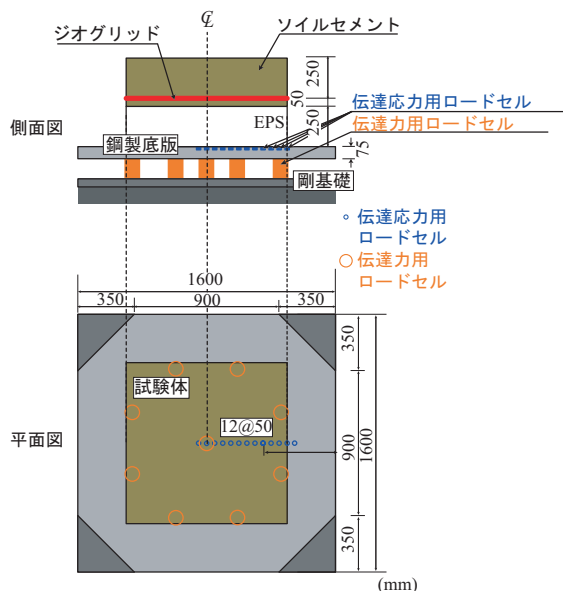


図-1 実験装置および試験体概要

\*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (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 暮らし環境系領域 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)

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/m<sup>3</sup>)である。第2項目は荷重方法を示しておりSは静荷重荷重実験、Vと付随する数字は衝撃荷重荷重実験を意味し、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(50, 100, 150 kg/m<sup>3</sup>)に設定した試験体に対し、荷重方法を変化させた全16ケースである。

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/m<sup>3</sup>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、静荷重および衝撃荷重を試験体中央部に荷重させる形で行った。なお、衝撃荷重荷重実験は重錘を所定の速度で一度だけ落下させる単一衝撃荷重荷重にて

表-1 試験体一覧

試験体名	セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	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-S	50	静的	-	0.2
C50-V5.0		5.0	5.0	
C50-V6.0		6.0	7.2	
C50-V8.0		8.0	12.8	
C50-V9.0		9.0	16.2	
C100-S	100	静的	-	0.8
C100-V6.0		6.0	7.2	
C100-V7.0		7.0	9.8	
C100-V8.0		8.0	12.8	
C100-V9.0		9.0	16.2	
C150-S	150	静的	-	2.1
C150-V6.0		6.0	7.2	
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	

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 <sup>3</sup> )	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 <sup>3</sup> )	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

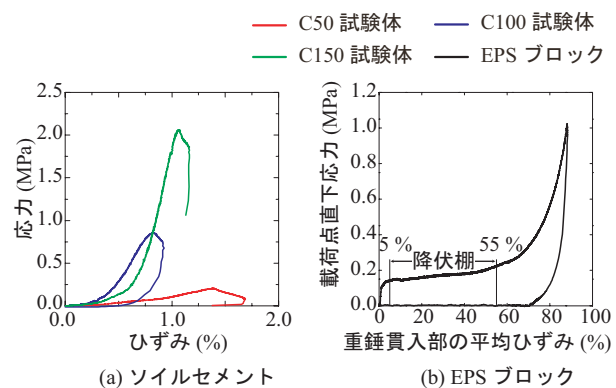


図-2 圧縮試験結果の例

行った。重錘は質量400 kg、先端部直径φ200 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。静荷重荷重実験の場合においても、同様の重錘を油圧ジャッキの先端に取り付けて実験を行った。各種荷重は荷重点直下の伝達応力が0.4 MPaに到達もしくは超過した衝突速度で終了することとし、この時点でEPSブロックが終局状態であると仮定した。

本実験の測定項目は、静荷重、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、衝撃荷重荷重実験では、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、静荷重は油圧ジャッキに取り付けたロードセル、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。

### 3. 静荷重荷重実験結果

図-3には、静荷重荷重実験における静荷重と重錘貫入量との関係を示している。図-3(a)より、いずれの試験体においても貫入量が10~40 mm程度で最大値を示した

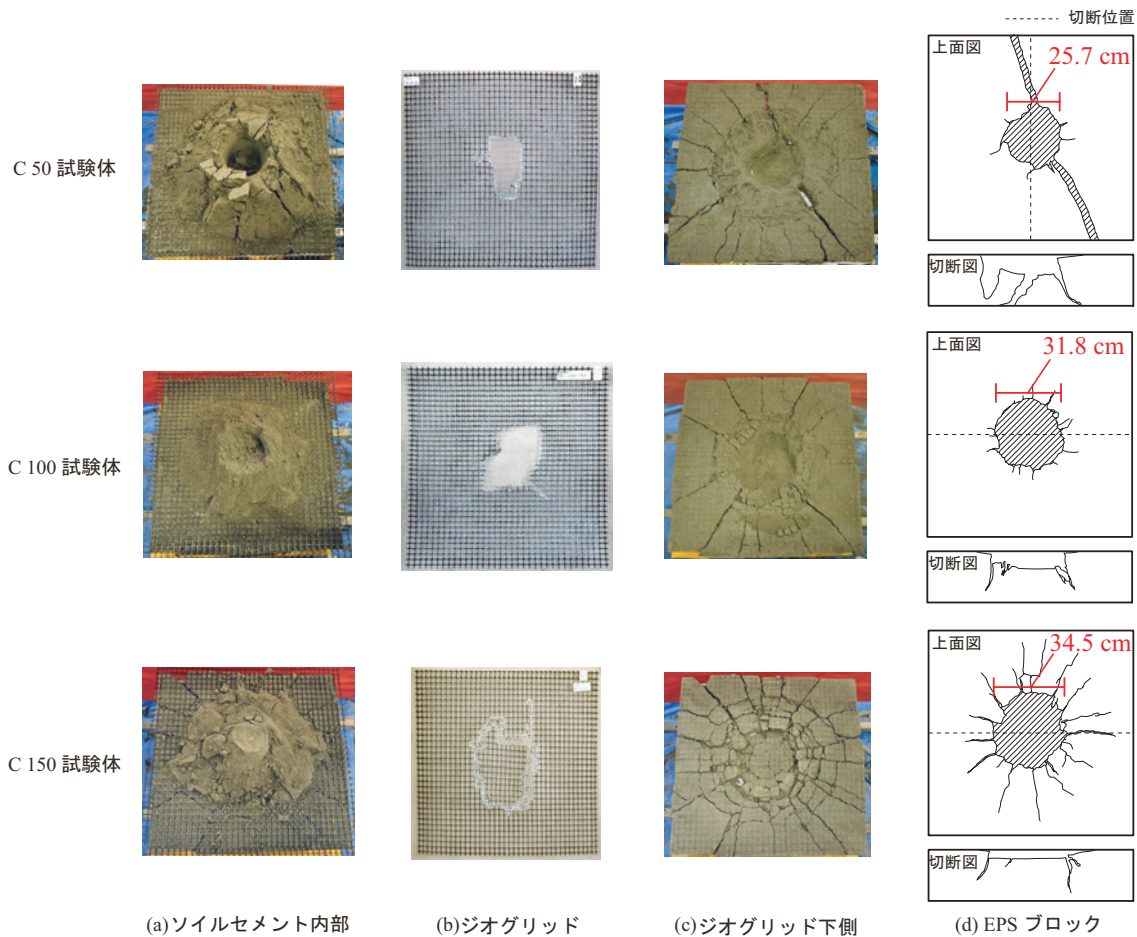


図-4 ソイルセメントの破壊性状 ( $V = 9.0 \text{ m/s}$ )

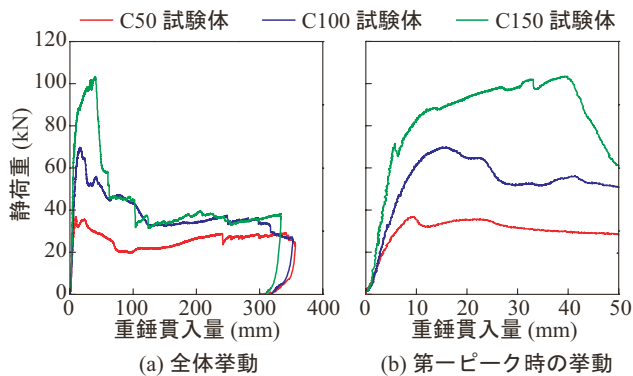


図-3 静荷重-重錘貫入量関係

後、急激に荷重が低下し 20～40 kN 程度の値を保持したまま貫入量だけが増加する性状を示すことが分かる。また、最大荷重は、セメント量が多い場合ほど大きくなる傾向にある。図-3 (b) より、第一ピーク時の挙動を見ると、貫入初期の勾配は一致していることが分かる。セメント量が多い試験体は荷重が最大値付近まで上昇した後、緩やかに荷重が増加しながら貫入量も増えている。また、荷重が低下する時点の貫入量もセメント量が多いほど大きい。

#### 4. 衝撃荷重実験結果

##### 4.1 破壊性状

図-4 には、ソイルセメント内部およびジオグリッド、ジオグリッド下側、EPS ブロックの破壊性状を衝突速度  $V = 9.0 \text{ m/s}$  の場合について示している。図-4 (a) より、いずれの試験体においても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。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。さらに、C150 試験体では圧壊、砂状化の傾向がほとんど見られず、押抜きせん断コーンが形成されている。図-4 (b) より、ジオグリッドは荷点近傍が破断していることが分かる。セメント量が多くなると破断範囲が広がる。C150 試験体では中央部のジオグリッドが破断はしているものの押抜けていない。

図-4 (c) より、ジオグリッド下側のソイルセメントは

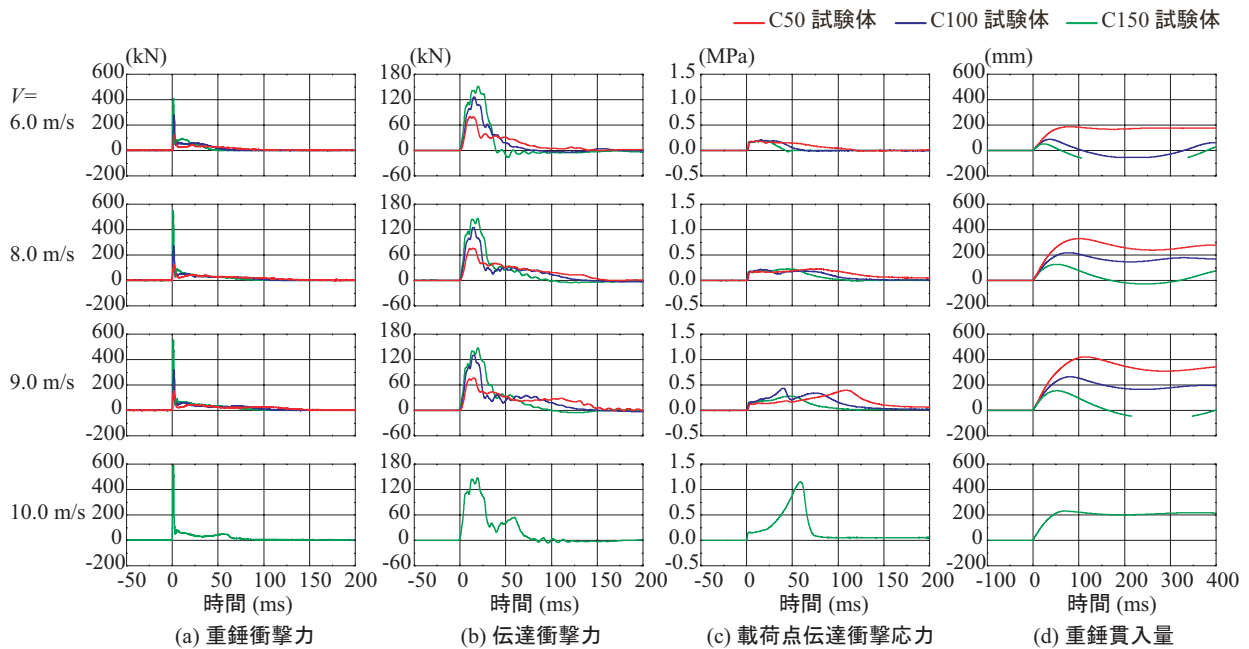


図-5 時刻歴応答波形

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り、C150 試験体では陥没部の直径が更に大きくなるとともに、載荷点近傍に同心円状のひび割れが広範囲に複数発生し、かつ放射状のひび割れが上記のひび割れに交差する形で発生しているため、ソイルセメントが細かくブロック化している。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 (d) より、C50 試験体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。

#### 4.2 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。また、最大振幅が0.2 MPaを上回る場合には三角形状の波形を示している。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。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。これは後述の重錘貫入量がセメント量が多くなるほど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

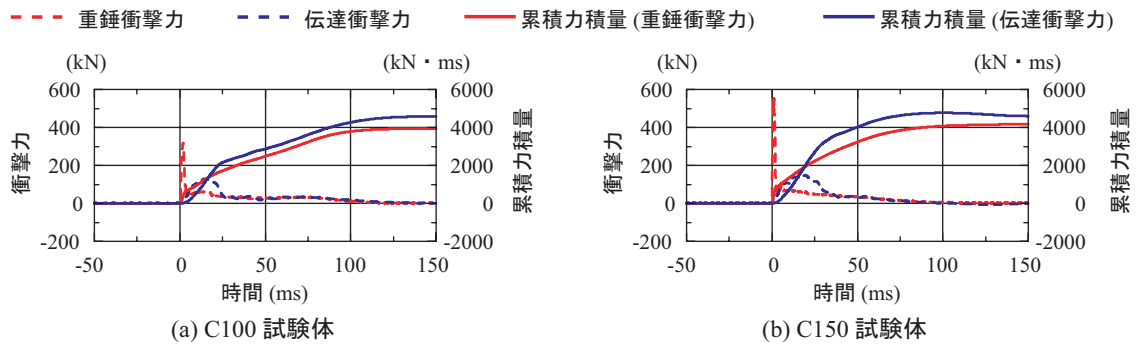


図-6 衝撃力波形と力積挙動 ( $V = 9.0 \text{ m/s}$ )

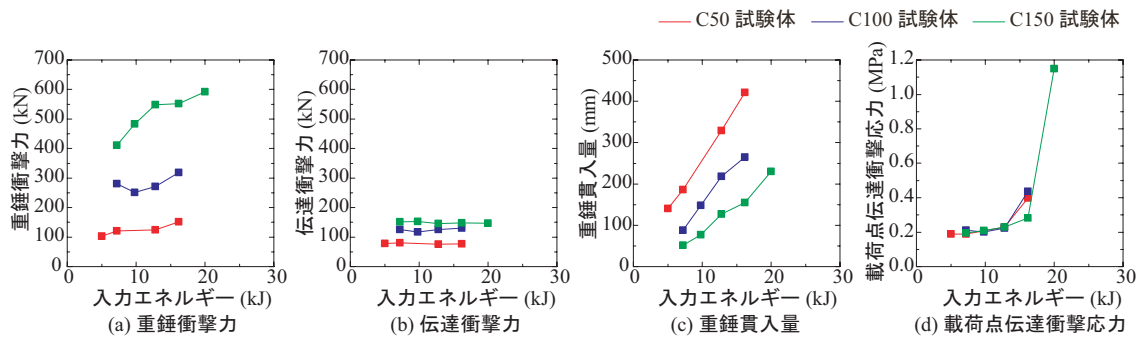


図-7 各種応答値と入力エネルギーの関係

いことから重錘が深く貫入せずに EPS が変形するため、その復元力によりリバウンドしたことを示している。

図-6 には、衝突速度  $V = 9.0 \text{ m/s}$  の場合の C100/150 試験体について、重錘衝撃力、伝達衝撃力に関する時刻歴応答波形と、それぞれの衝撃力と経過時間による力積を累積した累積力積量を示している。図より、いずれの場合においても、重錘衝撃力の最大値が伝達衝撃力の最大値より大きいことが分かる。一方、累積力積量に着目すると、重錘衝撃力および伝達衝撃力から算出される最大累積力積量は  $4,000 \sim 4,500 \text{ kN} \cdot \text{ms}$  程度とほぼ同様の値となっている。しかしながら、初期勾配は伝達衝撃力よりも重錘衝撃力から求めた累積力積量の場合に大きいことが分かる。これらのことから、底盤に作用する衝撃力は緩衝構造を伝わる過程で作用時間が長くなりピーク値が低減されるものと考えられる。

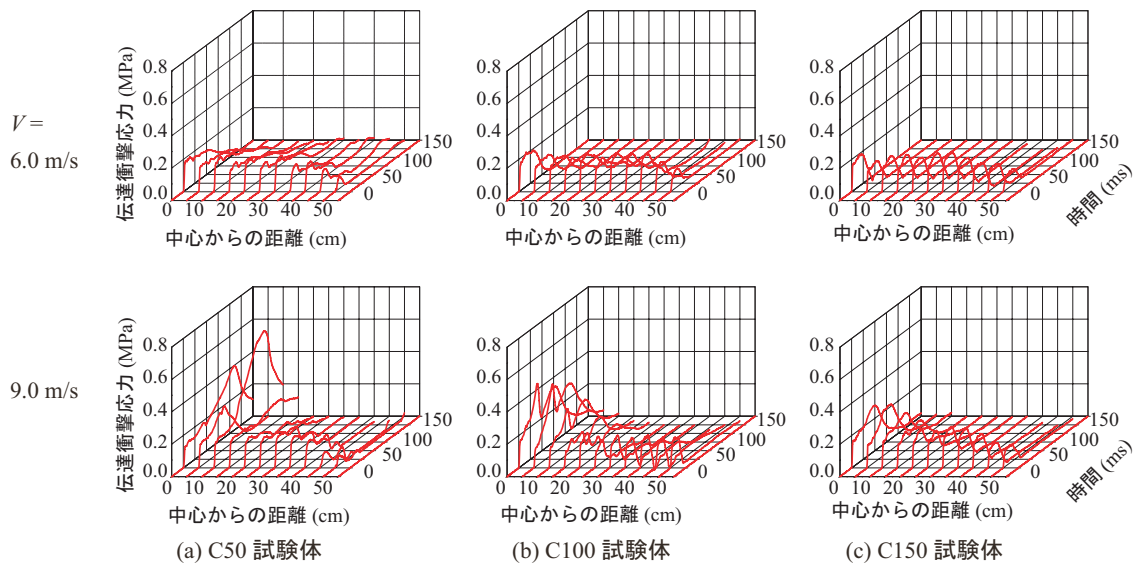
#### 4.3 各種応答値と入力エネルギーとの関係

図-7 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-7 (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、静的な場合と同様に、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-7 (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  $100 \text{ kN}$  程度となっている。

図-7 (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。一方、同一入力エネルギーにおける載荷点伝達衝撃応力は重錘貫入量ほど大きな差がない。このことから、重錘最大貫入時における EPS ブロックの変形量はセメント量によらず同程度であることが考えられる。これは、緩衝構造としての破壊形式は異なるということを示唆している。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  $0.2 \text{ MPa}$  程度 (EPS の降伏圧縮強度と同程度) の場合には、EPS ブロック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。そのため、ソイルセメントの変形が大きい。これに対し、セメント量が多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し、押抜きせん断コーン自体が硬いためコーン底面が EPS ブロックを押し下げることで EPS ブロックの変形が大きいと考えられる。

図-7 (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  $13 \text{ kJ}$  ( $V = 8.0 \text{ m/s}$ ) 程度までは、セメント量にかかわらず  $0.2 \text{ MPa}$  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 の降伏域の領域内にあることを示している。一方、入力エネルギー  $16 \text{ kJ}$  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  $0.2 \text{ MPa}$  を上回っており、セメント量が多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



図－8 伝達衝撃応力分布

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 7 kJ ( $V = 6.0 \text{ m/s}$ ), 16 kJ ( $V = 9.0 \text{ m/s}$ ) 程度の場合における伝達衝撃応力分布を検討する。

#### 4.4 伝達衝撃応力分布

図－8には、衝突速度  $V = 6.0, 9.0 \text{ m/s}$  (入力エネルギー 7.2, 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、衝突速度  $V = 6.0 \text{ m/s}$  の場合にはいずれの試験体も EPS ブロック全域で 0.2 MPa 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。衝突速度  $V = 9.0 \text{ m/s}$  の場合には、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。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载荷点近傍の伝達衝撃応力が增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。これは、前述の破壊形式の違いから、C150 試験体の場合には押抜きせん断コーン底面の直径が作用面積となるが、C50 試験体の場合には重錘径程度の作用面積となるため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によるものと考えられる。

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なることから、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。

#### 5. 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なることから、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。

#### 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。

#### 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