

論文 異なる母材を用いたソイルセメントの緩衝性能に関する実験的検討

保木 和弘^{*1}・牛渡 裕二^{*2}・小室 雅人^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本研究では、落石防護擁壁用緩衝構造として著者らが新たに提案している、ジオグリッドを配置したソイルセメントおよびEPSブロックを積層する三層緩衝構造について、ソイルセメントの母材が緩衝性能に与える影響を検討するため、材料特性の異なる2種類の母材(砂, 粘性土)を用いて製作した緩衝システム模型に関する重錘落下衝撃実験を実施した。その結果、母材に粘性土を用いる場合は砂の場合よりもソイルセメントのひび割れや重錘貫入が抑制され、EPSブロックの損傷も軽微となり、三層緩衝構造に用いるソイルセメントとして十分な緩衝性能を有していること、などが明らかになった。

キーワード: 落石防護擁壁, ソイルセメント, 三層緩衝構造, 粘性土

1. はじめに

北海道の山岳部および海岸線は急峻な地形を呈しており、このような地域に建設された道路には、落石から人命や通行車両、道路網を守るための落石防護施設が多数建設されている。これらの施設が受け持つ落石災害の規模は、計画時の現地調査を基に設定されている。一方で、近年の異常気象や自然災害(ゲリラ豪雨・地震など)や対象斜面の経年劣化、調査手法の高度化により、設計当時には想定され得なかった規模の落石要因が確認されるなど、落石防護施設の安全性向上が望まれているのが現状である。しかしながら、これらを改築するためには、多大な国費を投じることとなり、昨今の逼迫した財政下においては大きな負担となる。

落石防護施設の耐衝撃性向上法としては、落石衝突面に緩衝工を設置して緩衝性能を向上させる工法が考えられる。例えば、落石覆工頂版部に関しては敷砂緩衝材やより緩衝効果の高い三層緩衝構造¹⁾(表層材: 砂, 芯材: RC版, 裏層材: 発泡スチロール(以後, EPS)ブロック)、落石防護擁壁の場合には二層緩衝構造(表層材: RC版, 裏層材: EPSブロック)が開発され実用化されている。

しかしながら、これらの工法は、RC版の製作あるいは運搬・設置等のコストが嵩む傾向にあるため、より安価で効率的な緩衝システムの開発が望まれている。このようなことから、著者らの研究グループでは、表層材にソイルセメント、芯材としてジオグリッド、裏層材に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ている²⁾。表層材ソイルセメントに関しては、建設廃材発生の抑制やコスト削減を目的に現地発生土の流用を視野に入れているが、現地発生土には砂質土や粘性土等の種々の材料が想定され、均一性が確保されない場合も考えられる。したがって、提案の三層緩衝構造を現場に適

用する場合には、いずれの土質材料を使用する場合においても所定の緩衝性能を有することが要求される。しかしながら、ソイルセメントの材料特性を変化させた場合の緩衝性能については未だ十分な検討がされていない。

このような背景より、本研究では、提案する三層緩衝構造においてソイルセメントの材料特性が緩衝性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、材料特性が異なる2種類のソイルセメントで製作した緩衝システム模型に関する重錘落下衝撃実験を実施した。

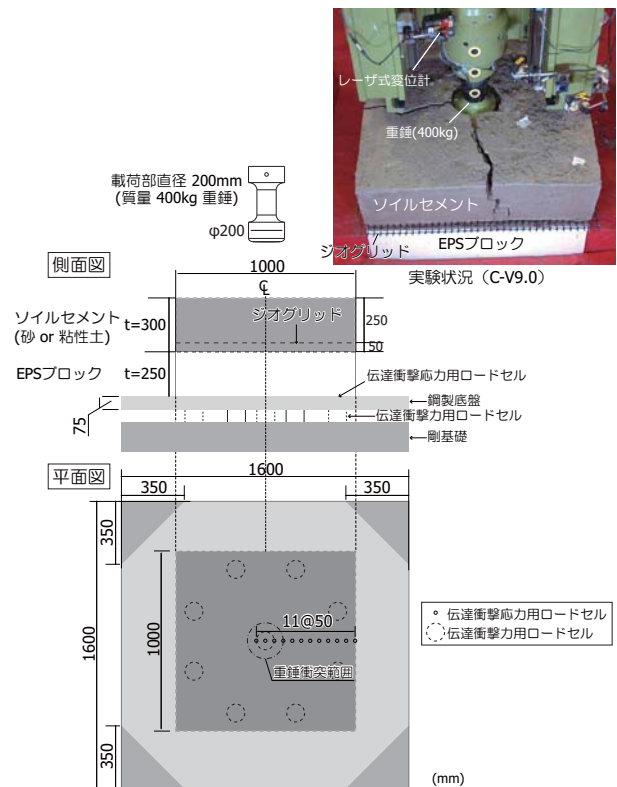


図-1 実験装置および試験体概要

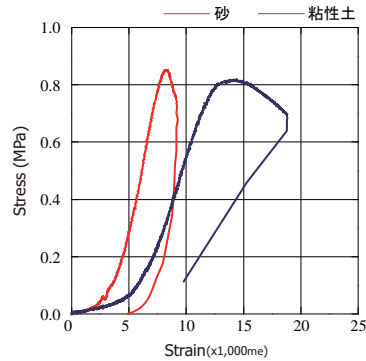
*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (正会員)
 *2 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 技師長 (正会員)
 *3 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)
 *4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

表-1 実験ケース一覧

試験体名	土質材料	結合材	衝突速度 V (m/s)	入力エネルギー E_k (kJ)	ソイルセメント圧縮強度 (MPa)
S-V6.0	砂	早強ポルトランドセメント	6.0	7.2	0.85
S-V7.0			7.0	9.7	
S-V8.0			8.0	12.8	
S-V9.0			9.0	16.2	
C-V6.0	粘性土	一般軟弱土用セメント系固化材	6.0	7.2	0.82
C-V8.0			8.0	12.8	
C-V9.0			9.0	16.2	



(a) 一軸圧縮試験状況 (粘性土)



(b) 応力-ひずみ曲線

図-2 ソイルセメントの一軸圧縮試験

2. 実験概要

表-1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。本研究では全7ケースの実験を実施した。表中、試験体名の第1項目は土質材料(砂:S, 粘性土:C)を、第2項目は重錘衝突速度(m/s)を示している。なお、表には入力エネルギー(kJ)およびソイルセメントの一軸圧縮強度(MPa)を併せて示している。

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のロードセル(以後、応力計)が設置された鋼製底盤(1.6m四方, 厚さ75mm)と鋼製底盤を支持する9個の伝達衝撃力測定用のロードセル(以後、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、および中央部から右側端部まで50mm間隔で10個の計12個が設置されており、その受圧面は底盤上面と面一となっている。

試験体の平面寸法は1,000×1,000mmであり、厚さ250mmのEPSブロックの上に層厚300mmのソイルセメントを設置している。ジオグリッドは、ソイルセメント下面から高さ50mmの位置に配置している。

ここで、本研究において使用するソイルセメントの強度管理方法の考え方について述べる。本研究開発の上では、ソイルセメントは緩衝体の一要素(表層材)として位置付けているが、一般的にソイルセメントが使用される状況として、軟弱地盤上に重構造物を構築する際の軟

表-2 各材料の物性値一覧

(a) 土質材料

試験体	土質材料	均等係数	土粒子密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kN/m ²)
S	砂	2.7	2.828	15.9	$\phi_d = 42$	$C_d = 12$
C	粘性土	114.1	2.716	17.2	$\phi_{cu} = 17$	$C_{cu} = 19$

(b) ジオグリッド

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

(c) EPS ブロック

密度 (kg/m ³)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

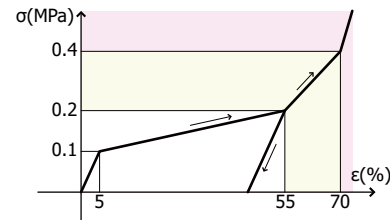


図-3 EPSブロックの応力-ひずみ関係 (概略図)

弱地盤改良(浅層改良)を例に挙げると、現場管理の指標として、(1)平板載荷試験による支持力、(2)コア供試体の一軸圧縮強度試験、もしくは(3)貫入試験による貫入抵抗、による検査が実施³⁾される。本研究で使用されるソイルセメントにおいては、事前の強度確認が必要となることから、室内試験である一軸圧縮強度試験による強度管理を想定し、試験体の目標一軸圧縮強度が1.0MPaになるように、事前に実施した配合試験により各セメント添加量を決定した。

以上より、S試験体の場合には含水比を15%に調整した砂に早強ポルトランドセメント100kg/m³、C試験体の場合には含水比を24%に調整した粘性土に一般軟弱土用セメント系固化材(以降ET-104と呼称)50kg/m³をそれぞれ練り混ぜ、これをEPSブロックの上に配置した型枠に敷き詰めて、足踏みによる締固めあるいは角材による突固めによって製作した。その後、ブルーシートで覆うことにより屋外で7日間養生を行い、所定の強度が発現していることを確認の上、型枠を載荷実験の直前に外し、実験を実施した。ここで、粘性土の結合材としてET-104を用いているが、これは早強ポルトランドセメントを使用すると、強い毒性を持つ六価クロムの溶出基準値を超過する可能性があるため、実現場での採用を視野に入れ決定した。

図-2には、本実験に用いた試験体と同一のソイルセメントを使用して製作した円柱供試体の一軸圧縮試験状況および応力-ひずみ関係の一例を示す。図より、砂を

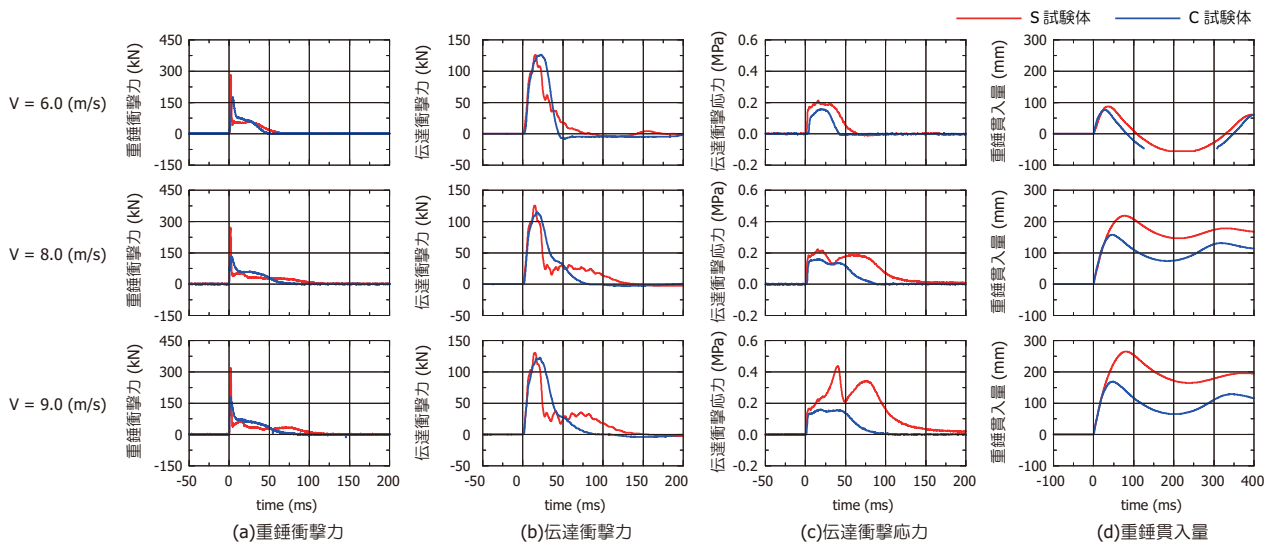


図-4 時刻歴応答波形

用いたソイルセメントの応力-ひずみ関係は、ひずみとともに応力が増大する傾向が見られる。最大値に達した後、急激に応力レベルが低下する。一方、粘性土を用いたソイルセメントは、砂の場合よりも若干小さな増加勾配を示すものの、砂と同程度まで応力レベルが増加し、最大応力到達後、ひずみのみが増加する棚状態を示しながら緩やかに応力が低下する傾向を示している。これは、粘性土が持つ粘着力による粘り強さと考えられる。また、ソイルセメントに発生したひび割れは、砂の場合に比較して徐々に開口する性状を確認している。

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。なお、C試験体に用いた粘性土は、実験時のソイルセメントの均一性を考慮し、粘土粉末とS試験体に使用した砂を質量比率6:4として混合し製作した。粘土には、岡山県笠岡市周辺に分布する新第三系中新統以降に堆積したと推定される暗灰色の泥岩層から採掘した「粘土粉末(笠岡粘土)」を使用している。

実験に使用した重錘は、質量400 kg、先端部直径200 mmの鋼製重錘であり、先端部には起歪柱型ロードセルが組み込まれている。また、底部には片当たり防止のため2 mmのテーパが設けられている。実験は鋼製重錘を所定の高さにセットした後、一度だけ自由落下させる単一衝撃荷重実験により実施した。また、最終衝突速度は伝達衝撃応力が0.4 MPaに達するときの速度としており、この時点でEPSブロックが終局状態(図-3における70%ひずみ)に至ったと仮定した。

本実験における計測項目は、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。前述のように、伝達衝撃力は反力計で測定した9点の反力の合計であり、伝達衝撃応力分布は12個の応力計により計測している。また、重錘貫入量は非接触型レーザ変位計を用いて測定している。なお、実験終了後にはソイルセメン

ト、ジオグリッド、EPSブロックの破壊状況を観察した。

3. 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) 荷点直下の伝達衝撃応力(以後、荷点伝達衝撃応力)および(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(a)より、重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期に振幅が大きく継続時間の短い第1波を示し、その後振幅が小さな台形状の波形分布を示している。C試験体はS試験体の場合に比べて衝突初期の第1波目の最大振幅は小さく、継続時間が長く示されている。一方、第2波目はC試験体はS試験体に比べ振幅は大きく、継続時間が短く示されている。

図-4(b)より、伝達衝撃力波形は、継続時間が30~50 ms程度の正弦半波状の第1波とそれに後続する継続時間の長い第2波から構成されている。C試験体はS試験体の場合に比べて最大振幅は同程度であるものの、重錘衝撃力波形と同様に継続時間は第1波は長く、第2波は短く示されている。

図-4(c)より、荷点伝達衝撃応力波形は、衝突速度が小さい場合には最大振幅0.2 MPa程度の台形状の波形性状を示しているが、S試験体は衝突速度の増大とともに0.2 MPaを超過することが分かる。一方、C試験体はいずれも0.2 MPa程度の応力レベルに抑制されている。

図-4(d)より、重錘貫入量波形は、S試験体は30~80 ms程度まで、C試験体は30~40 ms程度まで単調に増加して最大値を示し、その後両者ともに緩やかに減衰する傾向を示している。最大値は、両者ともに衝突速度の増加に対応して増大する。また、ソイルセメント材料に着目すると、C試験体の場合がS試験体の場合よりも最大値が小さく示されている。なお、V=6 m/sの場合には両者

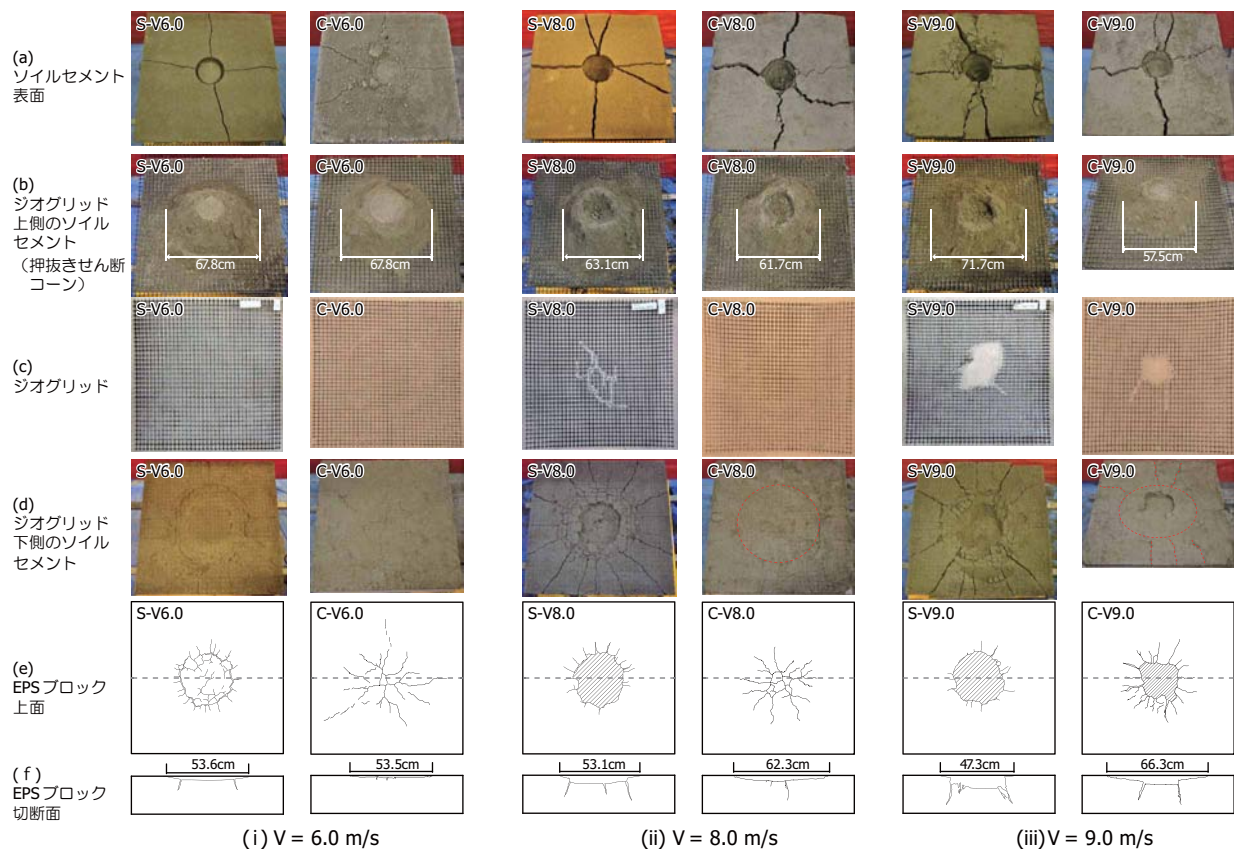


図-5 試験体の破壊性状

ともに貫入量が負側に示されているが、これは貫入量が小さくリバウンド量が大きいためである。C-V6.0はリバウンド時に貫入量の計測可能範囲を超過したため、データの一部が欠損している。

3.2 破壊性状

図-5には、実験終了後における各試験体の(a)ソイルセメント表面、(b)ジオグリッド上側のソイルセメント(押抜きせん断コーン)、(c)ジオグリッド、(d)ジオグリッド下側のソイルセメントおよび(e)EPSブロック上面と(f)中央部切断面の破壊性状を示している。

図-5(a)より、ソイルセメント表面のひび割れ状況に着目すると、いずれのケースも放射状のひび割れが発生していることが分かる。また、V6.0の場合に着目すると、他のケースよりも衝突速度が小さいため、C試験体・S試験体ともに貫入量が小さく、せん断コーン頭部(衝突面)の破壊は認められない。

図-5(b)より、ジオグリッド上側のソイルセメントに着目すると、V6.0の場合にはS試験体、C試験体ともにソイルセメント内部に押抜きせん断コーンが形成されていることが分かる。一方、C試験体はS試験体に比べ押抜きせん断コーン頂部の破壊が抑制され、重錘貫入も小さい傾向にある。なお、コーン底面幅はソイルセメント材料にかかわらず、いずれも60~70cm程度となっている。

図-5(c)より、ジオグリッドの破断状況に着目すると、

S試験体は $V = 8 \text{ m/s}$ 以上、C試験体は 9 m/s でジオグリッドが破断することが分かる。これは、S試験体、C試験体ともに押抜きせん断コーンが形成されるものの、C試験体に使用したソイルセメントは図-2(b)に示されるようにS試験体にはない粘り強さを有するため、押し抜きせん断耐力が大きくなり、ジオグリッド上下にあるソイルセメントが局所的に破壊しにくく、ジオグリッドを含めた試験体全体で広範囲の荷重分散がなされる結果、ジオグリッドの破断が抑制されているものと推察される。

図-5(d)より、ジオグリッド下のソイルセメントのひび割れ状況に着目すると、S試験体は放射状および円形状のひび割れが明瞭に生じていることが分かる。一方、C試験体の場合には $V = 8 \text{ m/s}$ 以上で円形状のひび割れが生じ、 9 m/s においても放射状のひび割れ開口幅が小さく重錘衝突部近傍の陥没もわずかに発生している程度である。これは、C試験体の場合にはS試験体の場合よりもEPSブロックへの荷重作用面積が大きくなることを示唆している。なお、S試験体はC試験体に比べ損傷が大きく、ソイルセメントそのものが砂状化する傾向にある。

図-5(e)より、EPSブロック上面に着目すると、S-V6.0のEPSブロックには円形状のひび割れが生じているが、C-V6.0のひび割れは放射状となっていることが分かる。また、S試験体は $V = 8 \text{ m/s}$ 以上、C試験体は 9 m/s でEPSブロック中央部に押抜きせん断破壊が生じて重錘が貫入

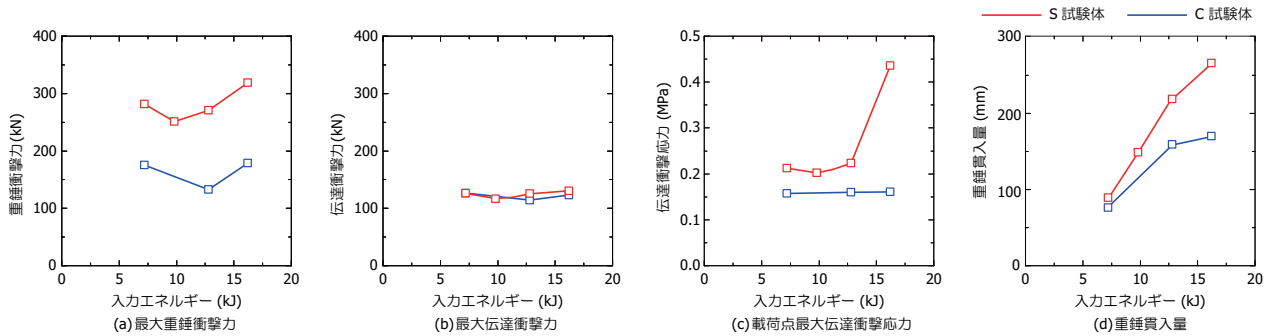


図-6 各応答値と入力エネルギーの関係

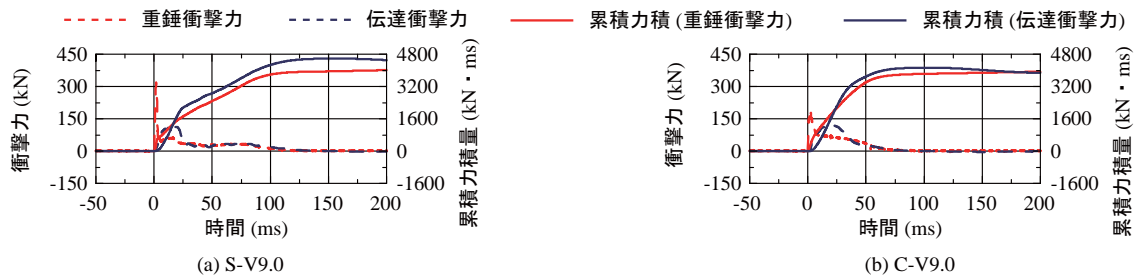


図-7 各衝撃力波形と累積力積の関係

する。これは、(d)図のジオグリッド破断ケースと対応している。図-5(f)より、EPSブロック中央部切断面における陥没範囲に着目すると、S試験体の陥没範囲50cm程度に対し、C試験体は50~70cm程度と大きく示されている。これより、EPSブロック上面および切断面ともにC試験体の場合の損傷がS試験体の場合よりも軽微となっていることから、ソイルセメント材料に粘性土を用いる場合には砂を用いる場合と同等以上の荷重分散性能を有していることが明らかとなった。

以上に示した破壊性状および前述の応答波形より、ソイルセメント材料に砂を用いる場合には、重錘衝突によってソイルセメント内部に押抜きせん断コーンが形成されるものの、重錘貫入とともにその押抜きせん断コーンが破壊する。一方、粘性土を用いる場合には、ソイルセメントそのものが粘り強さを有するため、重錘衝突時の見かけのソイルセメント強度が柔らかく、かつ粘り強くなり、押抜きせん断コーンの破壊や砂状化が抑制される。これにより、C試験体はS試験体よりも最大重錘衝撃力が小さく、各応答値の継続時間も短く示されるものと推察される。

3.3 各応答値と入力エネルギーの関係

図-6には、各試験体の(a)最大重錘衝撃力、(b)最大伝達衝撃力、(c)載荷点最大伝達衝撃力および(d)最大重錘貫入量と入力エネルギーとの関係を示している。

図-6(a)より、最大重錘衝撃力に着目すると、両者ともに $E_k = 7.2 \text{ kJ}$ ($V = 6 \text{ m/s}$) が大きな値を示しているものの、入力エネルギーの増加に伴って若干増加する傾向にある。また、C試験体の最大重錘衝撃力はS試験体の50

%程度となっている。

図-6(b)より、最大伝達衝撃力に着目すると、ソイルセメント材料および入力エネルギー量にかかわらず、ほぼ一定値を示していることが分かる。

図-6(c)より、C試験体の場合における最大伝達衝撃力はS試験体の場合よりも小さいことが分かる。また、S試験体は16.2 kJ (9 m/s) で0.4 MPa以上と大きく示されている。これは、EPSブロックの降伏応力を超過しない程度の入力エネルギー量は、粘性土を用いる場合は砂を用いる場合よりも大きいことを示唆している。

図-6(d)より、ソイルセメント材料にかかわらず、重錘貫入量は入力エネルギー量の増加に対応して増加している。また、ソイルセメント材料に粘性土を用いる場合は、砂を用いる場合よりも最大値および増加勾配が小さく示されている。

3.4 各衝撃力に関する力積

図-7には、重錘衝撃力および伝達衝撃力に関する時刻歴応答波形を時間で積分した累積力積について、 $V = 9 \text{ m/s}$ の場合を例として示している。図中の破線は各衝撃力波形、実線は各累積力積を示している。

図より、累積力積の立ち上がりに着目すると、ソイルセメント材料にかかわらず重錘衝撃力による累積力積は伝達衝撃力による累積力積よりも増加勾配が大きいことが分かる。その後、重錘衝撃力による累積力積は伝達衝撃力のそれよりも勾配が緩やかとなり、20~25 ms程度で交差している。最大値発生時刻は、S試験体の衝撃力継続時間がC試験体よりも大きいことから、S試験体で150 ms程度、C試験体で100 ms程度となっている。最大

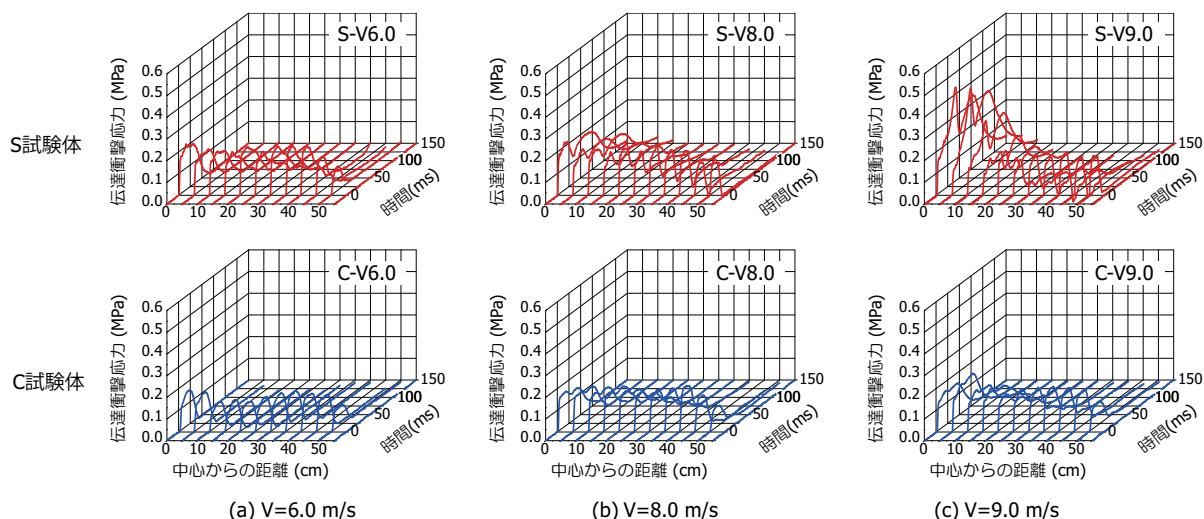


図-8 伝達衝撃応力分布波形

値は、いずれも4,000 kN・ms程度とほぼ同程度の値を示しているものの、S試験体の伝達衝撃力による累積力積は15%程度大きく示されている。

3.5 伝達衝撃応力分布

図-8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次元で分布させて示している。

S試験体に着目すると、 $V=6.0$ m/sの場合には、いずれの測定点においても伝達衝撃応力はEPSブロックの降伏応力である0.2 MPa程度を示している。また、衝突速度の増加に対応して载荷点近傍の伝達衝撃応力が大きく示される傾向にあり、S-V9.0では0.4 MPa以上となる測定点が見られることが分かる。これは、前述の図-5(e)からも分かるように、ソイルセメント材料に砂を用いる場合は粘性土を用いる場合よりもEPSブロック中央部に荷重が集中する傾向にあることから、応力計測に偏りが生じるためと考えられる。

一方、C試験体に着目すると、衝突速度にかかわらず、EPSブロックの降伏応力である0.2 MPa程度を示している。これは、C試験体がS試験体に比較して、EPSブロックの緩衝性能を効果的に発揮させていることを示唆している。

4. まとめ

本研究では、提案の三層緩衝構造においてソイルセメント材料特性が緩衝性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、材料特性が異なった2種類のソイルセメントで製作した緩衝システム模型に関する重錘落下衝撃実験を実施した。

本研究により得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

- 1) ソイルセメントの母材を粘性土とした場合には、砂

を用いる場合に比べて粘着力が大きいことから、押し抜きせん断耐力が大きくなり、重錘の貫入量が抑制され、全体挙動するため、ジオグリッドの破断およびEPSブロックの損傷が軽微となる傾向を示す。

- 2) 最大伝達衝撃力は、ソイルセメント材料および入力エネルギー量にかかわらずほぼ一定値を示す。
- 3) EPSブロックの降伏応力を超過しない程度の入力エネルギー量は、ソイルセメント材料に粘性土を用いた場合は砂を用いた場合よりも大きく、同等以上の緩衝性能を有している。これは、砂を用いた場合を基本として緩衝構造の設計法を確立すれば、安全側の設計が可能となることを示唆している。

5. 今後の課題

本論文においては、砂と粘性土をそれぞれソイルセメントの母材とした場合の緩衝性能として、粘性土を母材とした場合が、砂を母材とした場合と同程度以上の緩衝効果が得られることが分かった。しかしながら、粘性土は砂と比較して水が抜けにくく、凍結融解抵抗性に劣る可能性が大きい。従って、今後は植生や表面塗装などのソイルセメントの表面保護による長期耐久性向上に関する検討を実施する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 牛渡裕二，岸徳光，保木和弘，前田健一：ソイルセメントを有する三層緩衝構造を設置した1/2スケール落石防護擁壁模型に関する重錘衝突実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，2012，pp.727-732
- 3) (社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル（第3版），技報堂出版（株）