論文　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の影響

鈴木 健太郎[*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においてジオグリッドがその緩衝性能に及ぼす影響を把握することを目的として，ソイルセメント内に埋設するジオグリッドを引張強度や強化方向の異なる 5 種類に変化させ，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，1) ジオグリッド強度が大きいほど，ジオグリッドの破断や EPS ブロックの押抜きせん断破壊および重錘貫入が抑制される傾向にあること，2) ジオグリッド強度および入力エネルギー量によらず，最大伝達衝撃力はほぼ一定値を示すこと，などが明らかになった。

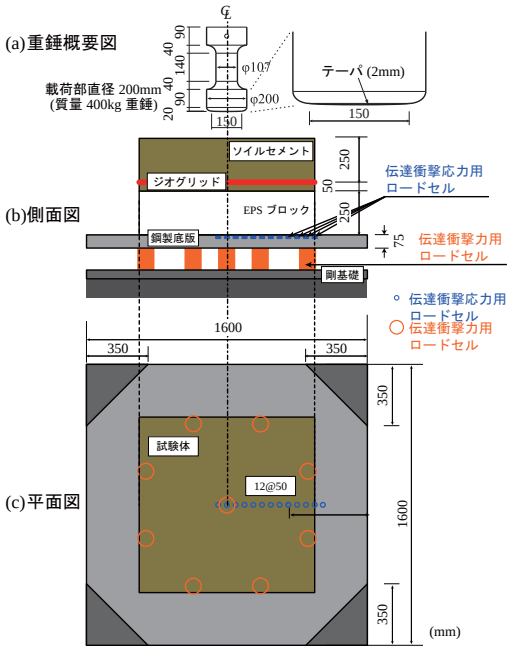
キーワード：三層緩衝構造，ソイルセメント，ジオグリッド，重錘落下衝撃実験

1. はじめに

海岸線や山岳部において，急崖斜面に近接して建設された道路には，落石から人命や道路ネットワークを守るための落石防護構造物が数多く建設されている。一方，それらに作用する落石荷重は，近年の異常気象や大地震の発生等によって，設計当初よりも大きく評価される事例が多数確認されている。そのため，既設落石防護構造物は耐衝撃性能の向上が求められている。

著者らは，これまで落石防護擁壁用緩衝構造として，表層材に RC 版，裏層材に発泡スチロール（以後，EPS）ブロックを用いる二層緩衝構造を提案するとともに，その緩衝効果を実験的・数値解析的に明らかにして，合理的な設計手法を確立している[1)]。また，二層緩衝構造の開発によって得られた知見に基づき，より費用対効果の高い緩衝構造として，表層材にソイルセメント，芯材にジオグリッド，裏層材に EPS ブロックを用いる三層緩衝構造を提案し，その緩衝効果を小型模型（平面寸法 1 m 四方，総厚 45～75 cm 程度）を用いた重錘落下衝撃実験により検討している[2)−3)]。その結果，1) ソイルセメント厚が大きいほど荷重分散効果に優れること，2) ソイルセメント内部におけるジオグリッド配置位置は上端よりも下端に配置する場合が入力エネルギー量の上限値が大きくなること，などを明らかにしている。しかしながら，ジオグリッドの有無，引張強度および強化方向が緩衝性能に及ぼす影響については未だ十分に検討されていない。

このようなことより，本研究では，提案の三層緩衝構造において，ジオグリッド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，大きさが 1 m 四方の緩衝システム模型を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では，ジオグリッドの引張強度や強化方向の異なる 5 種類に設定した試験体に対し，重錘衝突速度を変化させた全 26 ケースの試験体により比較検討を行っている。



図－1　実験装置および試験体概要

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。表中，試験体名の第 1 項目はジオグリッド種類を示し，強化方向が二方向のジオグリッド（以後，単にジオグリッド）を配置する場合は G とし，品質管理強度 34.0 × 43.0 kN/m のジオグリッドを 1 枚配置した場合を基準としたジオグリッドの引張強度比を付して示している。また，ジオグリッドを配置しない場合は N，強化方向が一方

*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　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）

表－1　実験ケース一覧

試験体名	ジオグリッド品質管理強度 (kN/m)（枚数）	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)
N-V3.0	無	3.0	1.8	0.9
N-V4.0		4.0	3.2	
N-V5.0		5.0	5.0	
N-V6.0		6.0	7.2	
N-V7.0		7.0	9.8	
N-V7.5		7.5	11.3	
G0.5-V6.0	12.0 × 22.0（1 枚）	6.0	7.2	0.9
G0.5-V7.0		7.0	9.8	
G0.5-V7.5		7.5	11.3	
G0.5-V8.0		8.0	12.8	
G1.0-V4.0	34.0 × 43.0（1 枚）	4.0	3.2	1.1
G1.0-V5.0		5.0	5.0	
G1.0-V6.0		6.0	7.2	0.8
G1.0-V7.0		7.0	9.8	
G1.0-V7.5		7.5	11.3	1.1
G1.0-V8.0		8.0	12.8	0.8
G1.0-V9.0		9.0	16.2	
G2.0-V6.0	34.0 × 43.0（2 枚）(64.0 × 86.0)	6.0	7.2	0.9
G2.0-V8.0		8.0	12.8	
G2.0-V9.0		9.0	16.2	
G2.0-V10.0		10.0	20.0	
G2.0-V11.0		11.0	24.2	
S-V6.0	200（1 枚）	6.0	7.2	0.9
S-V8.0		8.0	12.8	
S-V9.0		9.0	16.2	
S-V10.0		10.0	20.0	

向のジオグリッド（以後，単に一方向ジオグリッド）を配置する場合は S としている。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衝撃実験時における一軸圧縮強度 (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ロードセル（以後，応力計）が設置された鋼製底盤（1.6 m 四方，厚さ 75 mm）と鋼製底盤を支持する 9 個の伝達衝撃力測定用ロードセル（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 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 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同一となっている。

試験体の平面寸法は 1,000 × 1,000 mm であり，高さ 250 mm の EPS ブロックの上に高さ 300 mm のソイルセメントを設置している。**写真－1** には本実験に用いたジオグリッドを示しており，一方向ジオグリッドは (b) 図に示すように節を有している。ジオグリッドは，既往の研究 [2] を参考にソイルセメント下面から高さ 50 mm の位置，すなわち下端配置とした。ジオグリッドは，**図－1** に示す

表－2　各材料の物性値一覧

(a) 砂

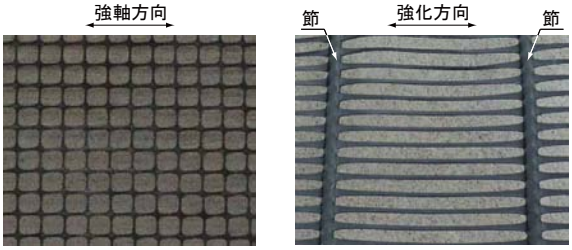
産地	種類	均等係数	土粒子密度 (g/cm^3)	最適含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	16

(b) ジオグリッド

種類	品質管理強度 (kN/m)	製品基準強度 (kN/m)	目合 (mm)	材質
G0.5	12.0 × 22.0	10.0 × 20.0	28 × 40	ポリプロピレン
G1.0 / 2.0	34.0 × 43.0	27.0 × 37.0	28 × 33	
S	200	160	2 2 (節間隔 265)	高密度ポリエチレン

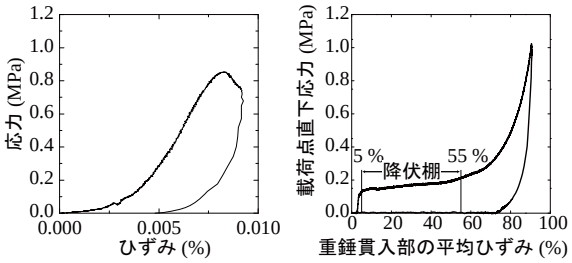
(c) EPS ブロック

密度 (kg/m^3)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法



(a) G1.0 試験体　(b) S 試験体

写真－1　ジオグリッド



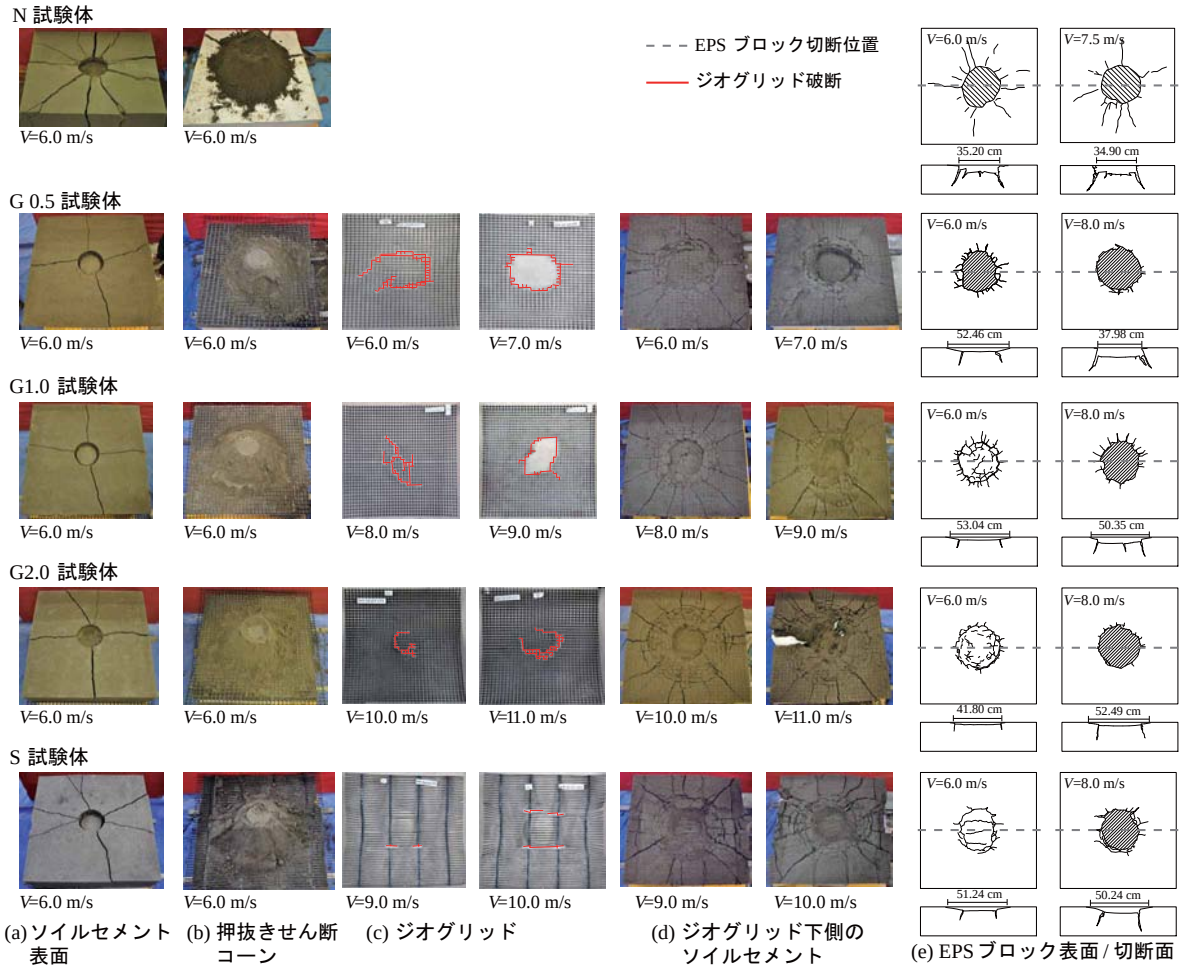
(a) ソイルセメント　(b) EPS ブロック

図－2　応力－ひずみ関係

応力計設置方向に強軸 / 強化方向を一致させて配置している。なお，G2.0 試験体については基準となるジオグリッドを 2 枚重ねて配置し，S 試験体はジオグリッド節間中心を重錘衝突位置としている。試験体は含水比を 15 % に調整した砂に早強ポルトランドセメント 100 kg/m^3 を練り混ぜ，これを EPS ブロックの上に配置した型枠に敷き詰め，約 50 mm 毎に足踏みにて締固め製作した。

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。**図－2** には，ソイルセメントの一軸圧縮強度試験結果例および本実験に用いた EPS ブロック単体の静載荷実験における応力－ひずみ関係を示している。

図－1 に示すように，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。



図－3　実験終了後の試験体状況

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載荷実験により実施した。

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。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る。また，伝達衝撃応力分布は，前述の 12 個の応力計で，重錘貫入量は非接触型レーザ式変位計で測定した。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ている。

3. 実験結果

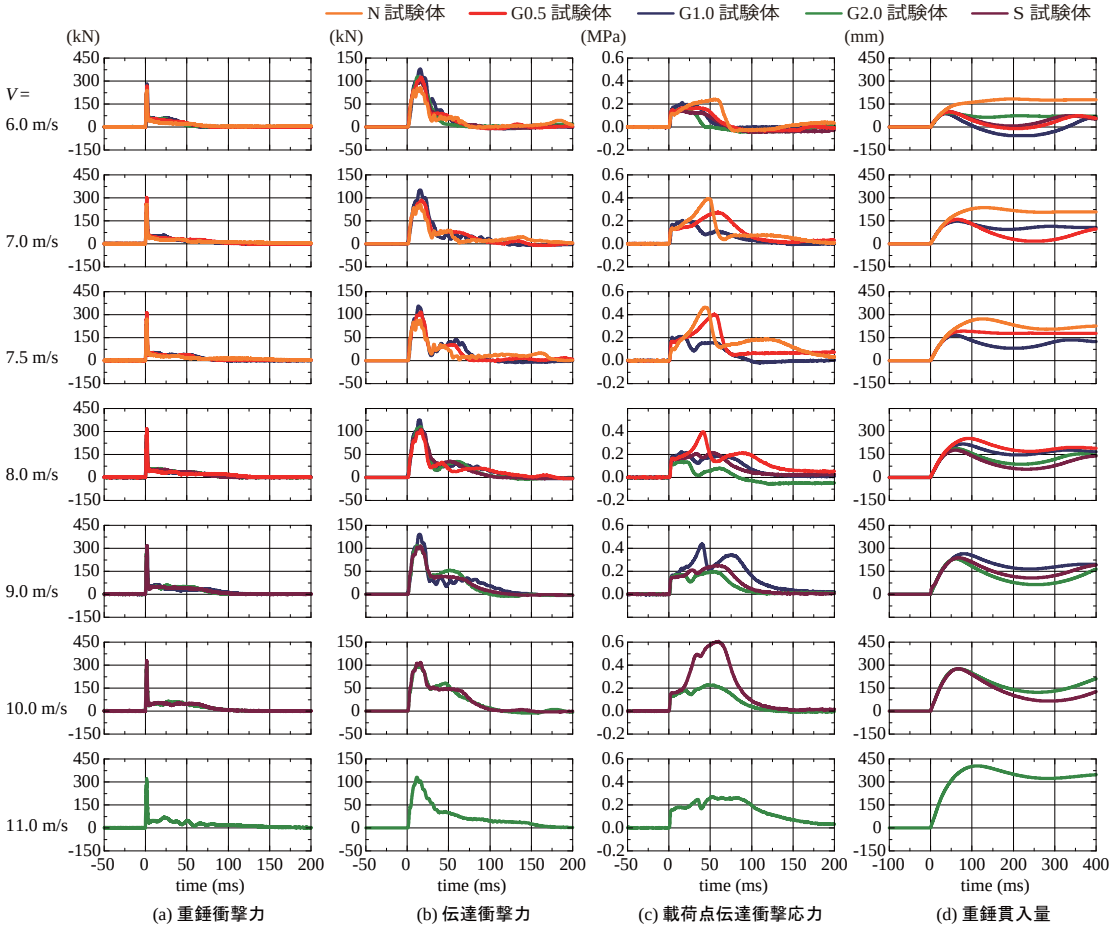
3.1 破壊性状

図－3 には，(a) 実験終了後における各試験体のソイルセメント表面，(b) 押抜きせん断コーン（コーン周辺のソイルセメント撤去後），(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 ブロック表面と中央部切断面の破壊性状を示している。なお，(c) 図にはジオグリッド破断箇所を赤線で示し，中央の分離したジオグリッドは取り除いて撮影している。

図－3 (a) より，いずれもソイルセメント表面中央部が重錘形状と同様の円形状に陥没し，その周辺には放射状のひび割れが発生し開口している。ジオグリッドを配置しない N 試験体はジオグリッドを配置する場合よりもひび割れ本数およびひび割れ幅が増大し，割裂破壊が生じている。**図－3** (b) より，いずれも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。これらソイルセメント表面の変形状況および押抜きせん断コーンの形成状況は他の衝突速度においても同様に確認されている。

図－3 (c) より，ジオグリッドが一部あるいはリング状に破断する衝突速度は，G0.5 試験体の場合でそれぞれ V = 6.0 m/s, 7.0 m/s, G1.0 試験体の場合で 8.0 m/s, 9.0 m/s となっている。S 試験体の場合は 8.0 m/s 以上でジオグリッドの節が破断したことを確認している。一方，G2.0 試験体の場合には 11.0 m/s においても未だリング状の破断は生じていない。これより，ジオグリッド強度が大きいほどジオグリッドの破断が抑制されることが明らかとなった。また，一方向ジオグリッドを用いる場合は節で破断することから，ジオグリッドにおける各方向の強度差が大きい場合には弱軸方向にてジオグリッドが破断し，強軸方向の強度が十分に発揮されない可能性があることが窺われる。

図－3 (d) より，ジオグリッド下側のソイルセメントには，重錘衝突位置を中心に円形状のひび割れが発生し，かつ，その周りには放射状のひび割れが発生していること



図－4　時刻歴応答波形

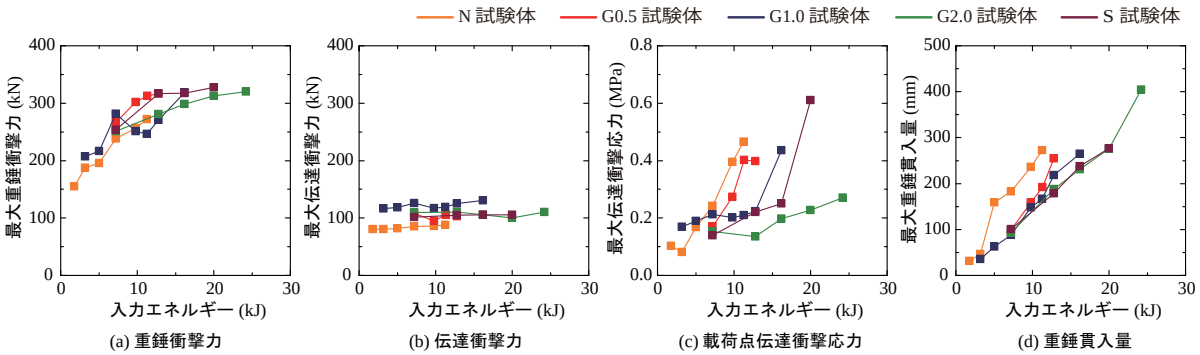
が分かる。また，(c) 図との対比により，ジオグリッドがリング状にあるいは節が破断した場合には，載荷点近傍のジオグリッドより下側のソイルセメントに陥没が生じることが分かる。S 試験体の場合は，円形状のひび割れはジオグリッド強化方向を長軸とした楕円形状に，放射状のひび割れはジオグリッド強化方向に卓越する傾向を示している。

図－3 (e) より，EPS ブロック表面には円形状のひび割れが発生し，ジオグリッド強度が小さいほどおよび衝突速度が大きいほど，EPS ブロックが押抜きせん断破壊して貫入量が増加する傾向を示している。これは，ジオグリッド強度が大きいほど押抜き変形が抑制され，衝撃荷重が分散して EPS ブロックに伝達されるためと考えられる。一方，ジオグリッドを配置しない N 試験体は，ジオグリッドを配置する試験体とは異なり EPS ブロック表面に放射状のひび割れが生じている。これは，押抜きせん断コーンによる下方への押し込みによって生じたのではなく，ジオグリッドが配置されていないために生じるソイルセメントの割裂破壊によって発生したものと推察される。また，一方向ジオグリッドを配置した S 試験体の場合には，V = 6.0 m/s の場合は EPS ブロックが弱軸方向へ裂けて強化方向にひび割れが発生するものの，衝突速度が大きい場合には他と同様に EPS ブロックが押抜きせん断破壊することが分かる。ここで，S 試験体は G2.0 試験体よりも大きな引張強度を有しているものの，同じ衝突速度で比較すると S 試験体のほうが貫入量が大きい。これより，重錘貫入抑制効果を効率よく発揮させるためには二方向に強化されたジオグリッドを用いる必要があることが明らかとなった。

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，載荷点伝達衝撃応力）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，その後振幅が小さく継続時間が 70 ～ 150 ms 程度の第 2 波が続いていることが分かる。また，衝突速度の増加に伴って最大振幅が大きくなる傾向にあるが，第 2 波目の最大振幅は衝突速度にかかわらずほぼ同程度で継続時間が大きくなる傾向を示す。このような性状はジオグリッドの有無およびジオグリッド強度によらずほぼ同様である。**図－4** (b) より，伝達衝撃力波形は，継続時間が 30 ～ 40 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。最大振幅は衝突速度およびジオグリッド強度によらずほぼ同等であり，いずれも **図－4**(d) に示す最大重錘貫入時前に最大振幅を示している。



図－5　各最大応答値と入力エネルギーの関係

図－4 (c) より，載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，衝突速度の増大と共に 0.2 MPa 程度の応力レベルを示す上辺部の継続時間が延びる傾向を示している。衝突速度 V = 6.0 m/s の場合には，ジオグリッドを配置しない N 試験体が継続時間が最も長く，ジオグリッド強度が小さいほど継続時間が長く示されている。一方向ジオグリッド を配置した S 試験体の場合は G1.0 試験体と G2.0 試験体の中間の挙動を示している。また，S 試験体を除き，ジオグリッド強度が大きい場合ほど，伝達衝撃応力が EPS ブロックの降伏応力である 0.2 MPa 程度に抑制される場合の重錘衝突速度が増加する傾向にあることが分かる。これは，**図－3** (c) からも明らかなとおり，ジオグリッド強度が大きいほどジオグリッドがリング状に破断せずに荷重分散効果を発揮するためと推察される。なお，S 試験体の場合は G2.0 試験体よりも小さい重錘衝突速度で 0.2 MPa を大きく超過している。

図－4 (d) より，重錘貫入量波形は，重錘衝撃力が零レベルに達する時刻程度まで単調に増加して最大値を示す。ジオグリッドを配置する場合はその後緩やかに減衰する傾向を示すことが分かる。ジオグリッドを配置しない N 試験体はジオグリッドを配置する場合よりもリバウンドが小さく示されている。最大変位は衝突速度の増加に伴って増大し，ジオグリッド強度が大きいほど最大変位が小さい。これらの現象と前述 **図－3** (e) に示した EPS ブロックの変形状況を踏まえると，ジオグリッドを配置することによって EPS ブロックの変形を抑制できることが分かる。なお，G2.0-V6.0 および G1.0-V7.0 のリバウンドが小さい理由は不明である。

以上のことから，ジオグリッド破断時の三層緩衝構造の荷重伝達機構は，以下のようであるものと推察される。

i) 重錘衝突後，ソイルセメント内部に押抜きせん断コーンが形成され，最大伝達衝撃力が発生する。

ii) 重錘が貫入するとともにコーンを押し下げ，ジオグリッドが破断する。なお，ジオグリッド強度が小さいほど，小さい衝突速度で破断する傾向にある。

iii) ジオグリッドが破断することにより，ジオグリッドによる荷重分散効果が低減する。ジオグリッドにリング状の破断が生じる場合には，押抜きせん断コーンが EPS ブロック内部に貫入し，載荷点近傍部の EPS ブロック中央部に荷重が集中する。

iv) EPS ブロック内部への貫入量が増加すると，伝達衝撃応力の継続時間および最大値が増加する。

3.3 各種最大応答値と入力エネルギーの関係

図－5 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応力および (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－5 (a) より，最大重錘衝撃力はいずれも入力エネルギーの増加に伴って，単調に増大していることが分かる。これに対して，**図－5** (b) の最大伝達衝撃力は，いずれもほぼ一定値を示している。これは，入力エネルギー量によらず，重錘衝撃力が EPS ブロックの降伏応力に対応する伝達衝撃力に低減されたことによるものと考えられる。

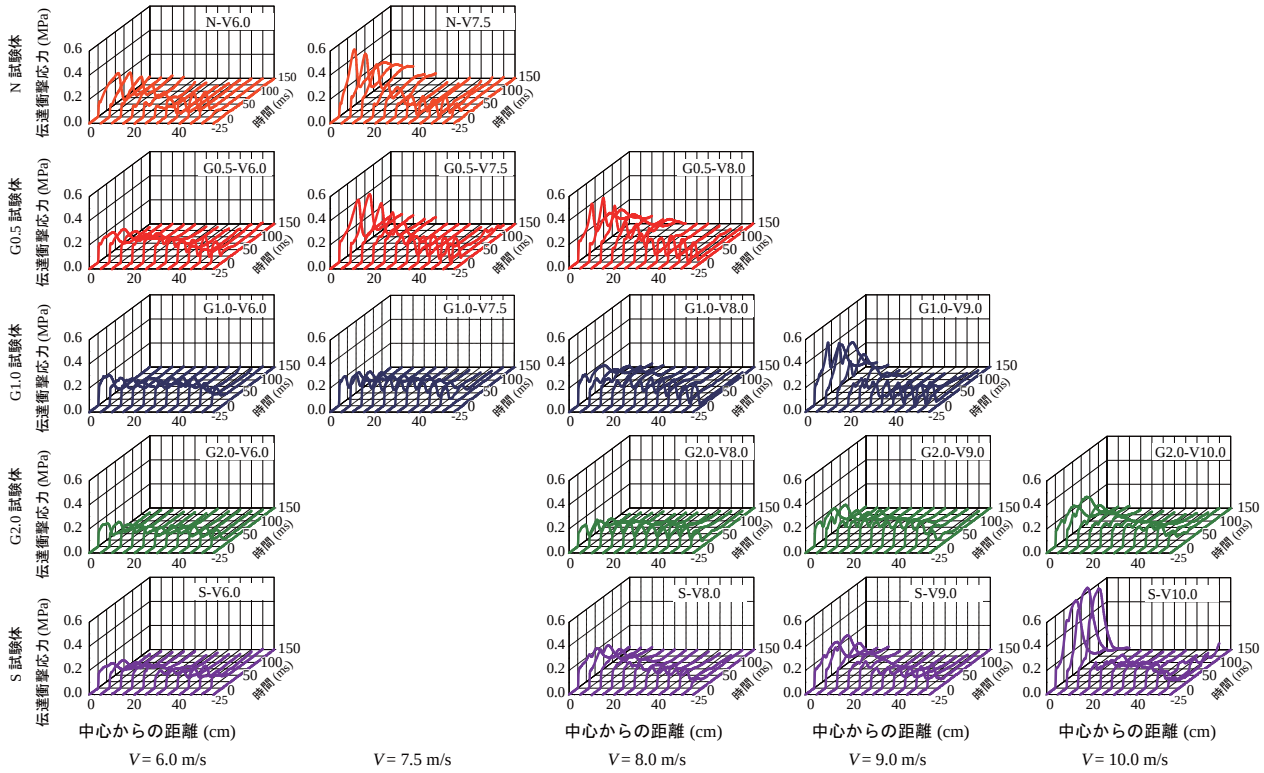
図－5 (c) より，ジオグリッド強度が大きいほど最大伝達衝撃応力が小さいことが分かる。また，EPS ブロックの降伏応力を超過しない程度の入力エネルギー量は，ジオグリッド強度が大きいほど大きいことが分かる。一方，一方向ジオグリッドを配置した S 試験体は，G2.0 試験体よりも小さい入力エネルギーで 0.2 MPa を大きく超過する傾向にある。

図－5 (d) より，ジオグリッド強度にかかわらず，重錘貫入量は入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加していることが分かる。また，ジオグリッドを配置する場合およびジオグリッド強度が大きい場合ほどその増加勾配が小さい。

3.4 伝達衝撃応力分布

図－6 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 次元で分布を示している。

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 程度を示しているものの，N 試験体は載荷点近傍に比較的大きな値が発生し，かつその周辺では小さく示され，応力



図－6　伝達衝撃応力分布波形

分布に規則性がないことが分かる。また，衝突速度の増加に伴い載荷点近傍の伝達衝撃応力が大きく示される傾向にあり，7.5 m/s では N / G0.5 試験体は 0.4 MPa 程度となっている。また，紙面の都合により G2.0-V11.0 の結果を省略しているが，それぞれの最終衝突速度では最大で 0.4 MPa 以上となっている。これは，前述の **図－3** (e) からも分かるように，EPS ブロックがせん断破壊するとともにせん断コーンが大きく変形したことによるものと推察される。なお，S 試験体は G2.0 試験体に比較して載荷点近傍に大きな応力が生じる傾向にある。これより，ジオグリッド強度が大きいほど，伝達衝撃応力は EPS ブロックの降伏応力程度以下に抑制されること，ジオグリッドの強化方向が一方向の場合には載荷点近傍に荷重が集中する傾向にあることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では，提案の三層緩衝構造においてジオグリッド強度がその緩衝性能に及ぼす影響を把握することを目的に，ジオグリッドの引張強度や強化方向を変化させた 5 種類の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) ジオグリッドによるソイルセメントの割裂破壊抑制効果は，ソイルセメント内にジオグリッドを配置することで発揮される。

2) ジオグリッドの破断，EPS ブロックの押抜きせん断破壊および重錘の貫入は，ジオグリッド強度が大きいほど抑制される傾向にある。ただし，ジオグリッド強化方向が一方向の場合には重錘貫入抑制効果が効率的に発揮されない可能性がある。

3) 最大伝達衝撃力は，ジオグリッド強度および入力エネルギー量によらずほぼ一定値を示す。また，重錘貫入量が最大に達する前に最大伝達衝撃力が発生する。

4) 伝達衝撃応力は，以下に示す条件により抑制される。
・ジオグリッドを配置する。
・ジオグリッド強化方向を二方向とする。
・ジオグリッド強度を大きくするほど，抑制効果は増大し，EPS ブロックの降伏応力以下に抑制される入力エネルギーの上限値が大きくなる。

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，土木学会，Vol. 48A, 2002.3, pp. 1567-1578

2) 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.34，2012，pp.709-714

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.34，2012，pp.715-720