論文　落石防護擁壁用三層緩衝構造のジオグリッド位置が緩衝性能に及ぼす影響に関する実験的検討

牛渡　裕二[*1]・保木　和弘[*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施工性向上策として，ジオグリッドをソイルセメントとEPSブロックの境界に配置することを提案し，その緩衝性能を確認することを目的に重錘落下衝撃実験を行った。その結果，ジオグリッドをソイルセメントとEPSブロックの境界に配置した場合，ソイルセメントとジオグリッドの付着が小さいため，ジオグリッドによるソイルセメントの割裂抑制効果が低減すること，ジオグリッドをソイルセメント中に埋設する場合の方が，より大きなエネルギーに対して緩衝効果を得ることが可能となること，等が明らかとなった。

キーワード：落石防護擁壁用三層緩衝構造，ソイルセメント，ジオグリッド，EPSブロック

1. はじめに

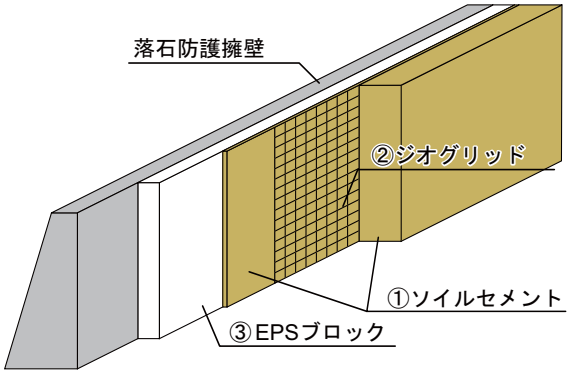
我が国の道路は山間部や海岸線の近傍に建設されている場合が多く，急崖斜面など落石災害の発生が懸念される区間には落石防護擁壁などの落石防護構造物が多数設置されている。また，近年の異常気象や風化などが原因で経年劣化した急崖斜面においては，落石規模が設計当初に想定していたよりも大きくなり，落石防護構造物が変状する事例が報告されている（**写真－1** 参照）。この種の問題に対し，RCロックシェッドにおいては，敷砂緩衝材や緩衝効果の高い三層緩衝構造（表層材:砂，芯材: RC版，裏層材: EPSブロック）といった緩衝工が適用されている[1)]。一方，落石防護擁壁の場合には二層緩衝構造（表層材:RC版，裏層材:EPSブロック）が開発され，実用化されている[2)]ものの，対象とする落石エネルギーが300 kJ程度であり，より大きな吸収エネルギーを有する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，自立可能な新しいタイプの三層緩衝構造 (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) を提案している（**図－1** 参照）。これまでに提案の三層緩衝構造について種々の条件下で数多くの実験を実施した結果，ソイルセメント中の下端にジオグリッドを配置することにより，ソイルセメントの割裂を拘束し，高い緩衝性能を発揮すること等が明らかとなっており[3)]，擁壁工背面に本緩衝工を設置した際の緩衝効果も確認されている[4)]。

しかしながら，既往の1/2スケール擁壁実験用供試体作成時に，ソイルセメント内にジオグリッドを直立した状態で埋設することは，ジオグリッドの仮固定が必要になることやかぶり部のソイルセメントの打設にも工夫が必要であることなど，実用化に向けて更なる施工性向上策の検討が望まれる。

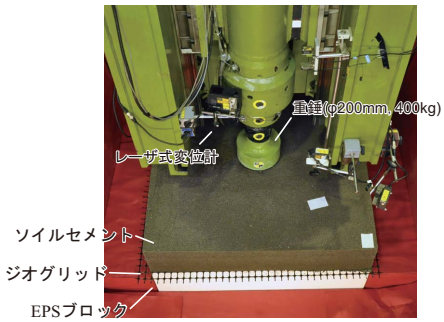
提案の三層緩衝構造を実用化する場合には，ジオグリッドをソイルセメントとEPSブロックの境界に配置することで施工性が飛躍的に向上することが想定される。しかしながら，ソイルセメントとEPSブロックの境界にジオグリッドを配置した場合においても，既往の研究成果と同様な緩衝効果が期待できるか否かについて未確認である。

写真－1　落石防護擁壁の損傷事例

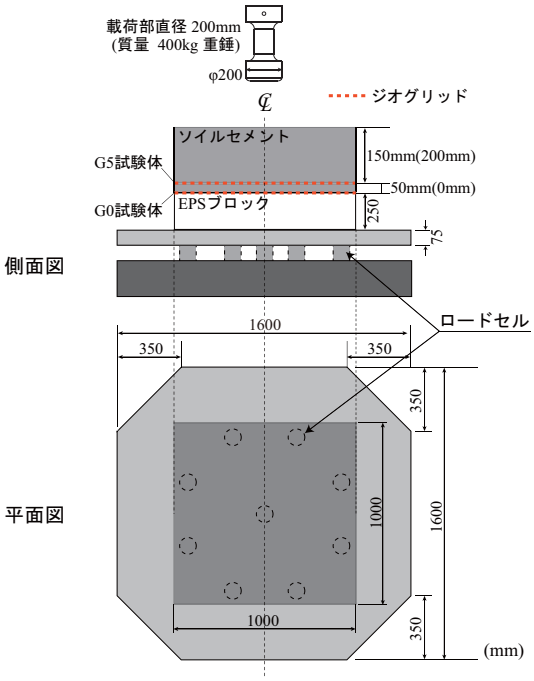


図－1　緩衝システム概略図

*1　(株) 構研エンジニアリング　防災施設部　技師長　(正会員)
*2　(株) 構研エンジニアリング　防災施設部　(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)



写真－２　実験状況



図－２　実験装置概要

表－１　試験体一覧

試験体名	ソイルセメント厚 (cm)	衝突速度 (m/s)	入力エネルギー (kJ)	ジオグリッド位置
G0-*V*6.0	20	6.0	7.2	ソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置
G0-*V*6.5		6.5	8.45	
G0-*V*7.0		7.0	9.8	
G5-*V*6.0		6.0	7.2	ソイルセメントかぶり 5cm の位置に埋設
G5-*V*7.0		7.0	9.8	
G5-*V*8.0		8.0	12.8	
G5-*V*9.0		9.0	16.2	

以上の背景より，本研究ではジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した場合の緩衝性能へ与える影響を把握することを目的として，室内衝撃実験を実施した。（**写真－2** 参照）

表－２　各材料の物性値一覧

(a) 砂

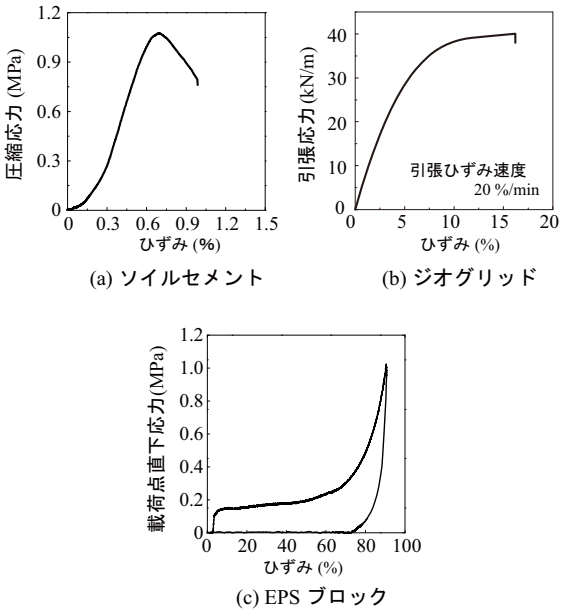
産地	種類	均等係数	土粒子密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	最適含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	2.46	16

(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 ブロック

密度 (kg/m^3)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

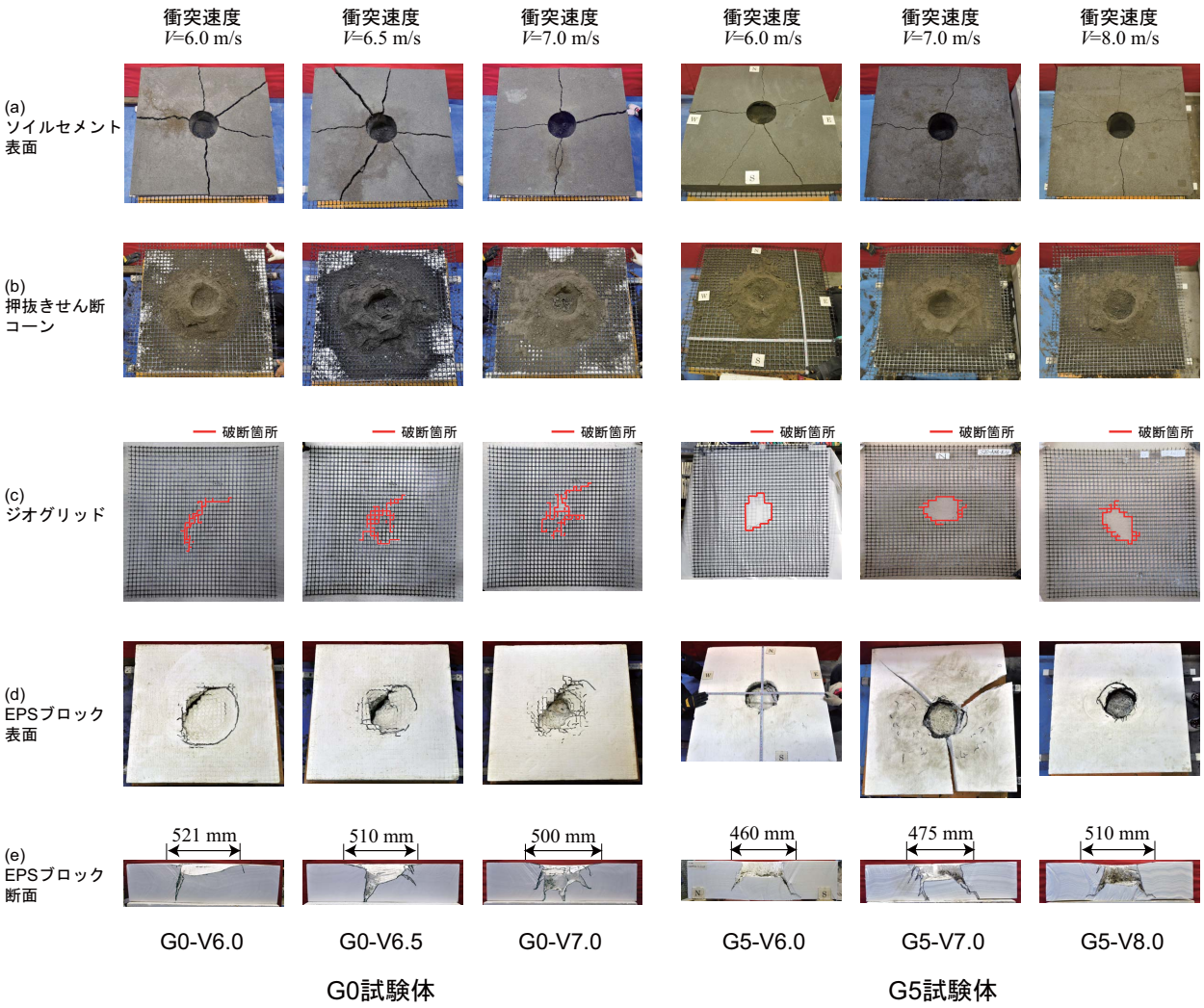


図－３　各材料の応力－ひずみ曲線

2. 実験概要

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，G に付随する数字はジオグリッドのかぶり厚さ (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。ソイルセメントの厚さは全て 20 cm である。実験は，かぶり厚さが 2 種類の試験体に対して，衝突速度を変化させた全 7 ケースを実施した。

試験体は，EPS ブロック上にソイルセメント打設用型枠を設置して，ソイルセメントを敷き均し，約 50 mm 毎に足踏みにて締固め，所定の位置にグリッドを敷設することにより，製作している。ソイルセメントは，含水比 w =15 % の砂 1 m^3 当りに早強ポルトランドセメント 100



図－4　実験後における各種破壊性状

kg を使用して製作した。試験体打設後は実施工と同様に屋外での養生とし，ブルーシート保護のみで 7 日間養生した。

図－2 には，本実験で用いた実験装置の概要を示している。本実験装置は，鋼製底盤（1.6 m 四方，厚さ 75 mm）と底盤を支持する 9 個の伝達衝撃力計測用のロードセルから構成されている。

実験は，剛基礎上に設置した実験装置の中央に，ソイルセメント，EPS ブロック，ジオグリッドを組み合わせた試験体を配置し，重錘を所定の速度で底盤中央部に落下させる形で行った。なお，重錘質量は 400 kg，先端部直径は ϕ 200 mm であり，重錘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。

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。また，**図－3** には，本実験で用いた各材料の応力－ひずみ関係を示している。本実験の測定項目は，重錘衝撃力，伝達衝撃力および重錘貫入量である。なお，重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセル，伝達衝撃力は底盤を支持している 9 個のロードセル，重錘貫入量はレーザ式変位計を用いて測定した。

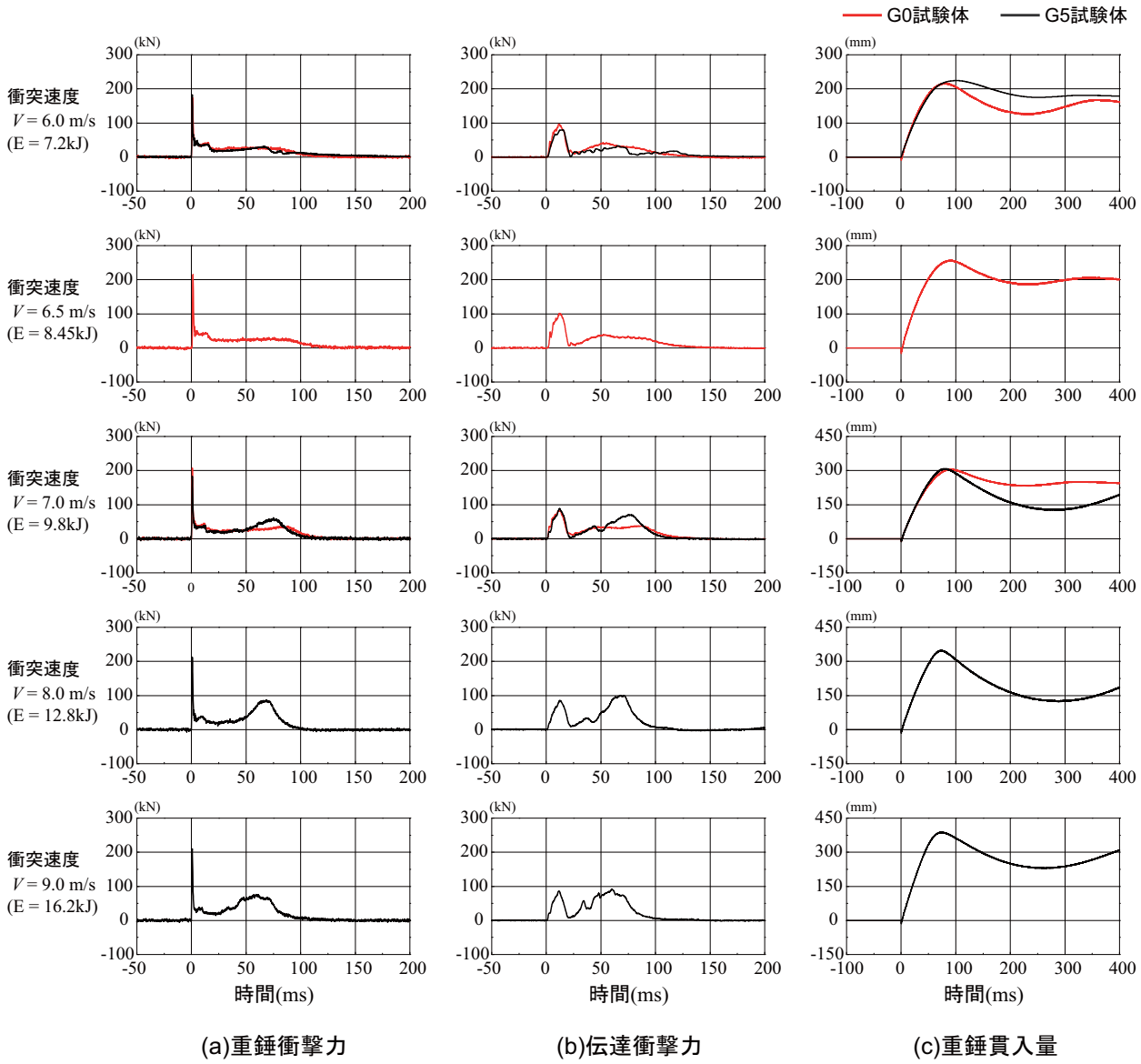
3. 実験結果

3.1 破壊性状

図－4 には，実験後における試験体の破壊性状を比較して示している。

(a) 図より，ソイルセメント表面の破壊性状を見ると，ジオグリッドの配置位置や衝突速度にかかわらず，いずれのケースにおいてもソイルセメント表面に十字型のひび割れが発生していることが分かる。また，その開口幅は G0 試験体の方が若干大きい。これは，ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置していることにより，ソイルセメント－ジオグリッド間の付着が小さく，ジオグリッドによるソイルセメントの割裂抑制効果が低減したためと推察される。なお，いずれのケースにおいてもソイルセメント内部には円錐台状の押抜きせん断コーンが形成されていることが分かる（(b) 図参照）。

(c) 図より，G5 試験体ではいずれもジオグリッドが円状に抜けるように破断しているのに対し，G0 試験体では

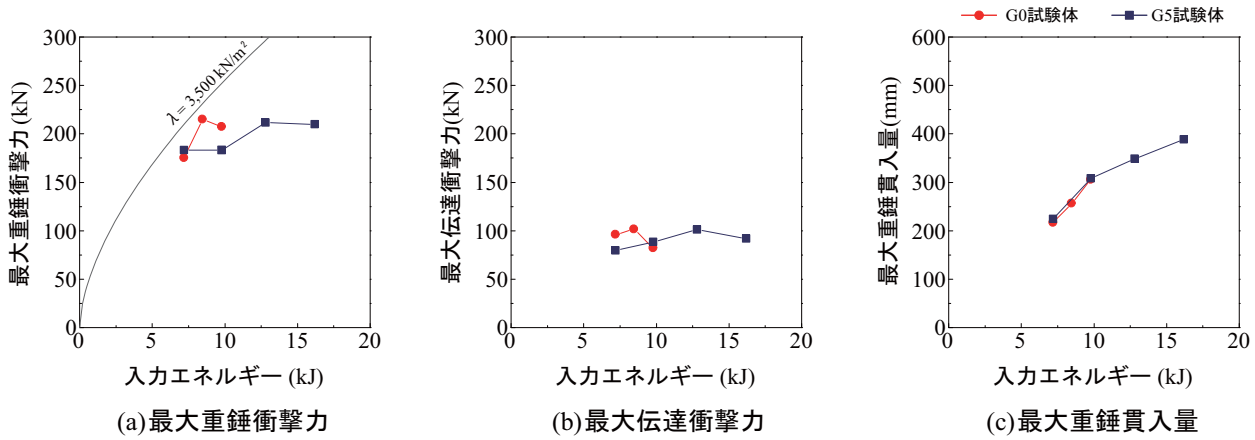


図－5　各種時刻歴応答波形

異なる性状を示している。これは，G5 試験体ではジオグリッドとソイルセメントの付着が十分に確保されているのに対し，G0 試験体ではジオグリッドとソイルセメントとの付着が小さいために，ジオグリッドが円状に破断することなく EPS ブロック上面で滑動したものと推察される。このことは，ジオグリッドをソイルセメント中に埋設することで，緩衝システム構成部材としてのジオグリッドがより有効に機能することを示唆している。

(d) および (e) 図より，G5 試験体では，EPS ブロックが押抜きせん断コーンを形成しているのに対し，G0 試験体では明瞭なせん断コーンが形成されず G5 試験体とは異なる性状を示している。G0-V6.0 試験体では，EPS 表面の円状亀裂の直径が大きく，同一速度の G5-V6.0 試験体に比較して亀裂が片側にのみ発生しており，EPS ブロックの破壊が進んでいないようにも見える。また，G0-V6.5 試験体に着目すると，G0-V6.0 試験体に比較して EPS ブロックの破壊がより進行していることが分かる。さらに G0-V7.0 試験体においては EPS ブロック中央部が局所的な破壊を示していることが分かる。一方，同一速度の G5-V7.0 試験体では，EPS ブロック表面で割裂しているものの載荷部においては EPS ブロックがせん断コーンを形成しており，均一な荷重分散がなされている。

これは，G0-V6.0 試験体では，衝突速度が小さいためにソイルセメント内部のせん断コーン全体で EPS ブロックを押し込んだのに対し，衝突速度が増加する G0-V6.5 あるいは V7.0 試験体では，ソイルセメントとジオグリッドの付着が不均等に切れ，EPS ブロックのせん断コーンを偏って押し込んだことにより，EPS ブロックの局所的な破壊を助長したものと考えられる。一方，G5 試験体ではジオグリッドとソイルセメントが十分に付着し，ソイル



(a)最大重錘衝撃力　(b)最大伝達衝撃力　(c)最大重錘貫入量

図－6　各種応答値と入力エネルギーとの関係

セメントの割裂が抑制されることにより，荷重分散効果が有効に作用したため，EPS ブロックがせん断コーンを形成したものと考えられる。さらに EPS ブロックのコーン全体で荷重を受け持つことが可能となり，緩衝効果が十分に発揮されたものと推察される。

以上より，ジオグリッドをソイルセメント中に埋設した場合に比較して，ソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した場合には，ソイルセメントの割裂抑制効果が低減することが分かった。また，V = 6.0 m/s では，ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した場合においても，有効高さの大きさによってある程度の荷重分散効果を発揮するものの，衝突速度の増加に伴い EPS ブロックが局所的な破壊に至ることが分かった。さらに，ソイルセメント中にジオグリッドを埋設することで，ジオグリッドとソイルセメントが十分に付着し，ソイルセメントの割裂が抑制されることにより，荷重分散効果が有効に作用すること，さらに EPS ブロックの緩衝効果も十分に発揮されることが明らかとなった。

3.2 時刻歴応答波形

図－5 には，重錘衝撃力，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示している。

(a) 図より，重錘衝撃力波形は，ジオグリッドの配置位置や衝突速度にかかわらず，いずれも重錘衝突時に振幅の大きい第一波を示し，その後振幅が小さく，継続時間が 100 ms 程度の台形状の第二波を示している。第二波に着目すると，V = 7.0 m/s における最大振幅が G5 試験体よりも G0 試験体で小さいことが分かる。

(b) 図より，伝達衝撃力波形は，正弦半波状の第一波とそれに続く第二波から構成されていることが分かる。また，同一衝突速度である V = 6.0 m/s および V = 7.0 m/s の場合において，第一波の最大振幅はジオグリッドの配置位置や衝突速度にかかわらず概ね同様の値を示している。第二波に着目すると，V = 7.0 m/s における最大振幅が G5 試験体よりも G0 試験体で小さいことが分かる。また，G5 試験体においては，重錘速度の増加に伴い第二波の振幅が増加傾向を示し，衝突速度 V = 8.0 m/s の時点で第二波の最大振幅が第一波の最大振幅を上回っていることが分かる。

(c) 図の重錘貫入量波形に着目すると，いずれも重錘衝突とともに貫入量が増加し，ピーク値到達後に残留変形を伴う振動状態に至っている。最大重錘貫入量について見ると，ジオグリッド配置位置による明瞭な差異は認められず，衝突速度の増加に伴い大きくなる傾向を示している。

また，各試験体においてはピーク値到達後にいずれもリバウンドの挙動が確認されるものの，その性状は一様でないことが分かる。すなわち，G5 試験体に着目すると，V = 8.0 m/s までは衝突速度の増加に伴い，リバウンド量も増加する傾向を示しており，V = 8.0 m/s 時点で 200 mm 程度のリバウンド量である。しかしながら，V = 9.0 m/s の場合にはリバウンド量が 150 mm 程度と減少する傾向を示している。これは衝突速度が増加し，EPS ブロックが緩衝性能の限界近くまで圧縮されたことにより，EPS ブロックの持つ復元力が低下したためと推察される。

一方，G0 試験体においては V = 6.0 m/s 時点におけるリバウンド量が 90 mm 程度であるが，衝突速度が増加する V = 6.5 m/s および 7.0 m/s の場合におけるリバウンド量は 70 mm 程度と減少している。これは，**図－4** (e) 図に示す EPS ブロック断面で確認されるように，V = 6.5 m/s および 7.0 m/s において EPS ブロックの載荷面に著しい損傷が発生し，EPS ブロックの復元力が低下したためと推察され，緩衝システムとしての限界に近いことを示唆している。

3.3 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。

(a) 図より，最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加に伴って概ね増大する傾向を示していることが推察できる。

また，最大重錘衝撃力は Hertz の接触理論に基づく振動便覧の式より，ラーメ定数 $\lambda = 3{,}500$ kN/m^2 を用いることで安全側に算出可能であることが分かる。

(b) 図より，最大伝達衝撃力は入力エネルギーによらずほぼ重錘衝撃力の 1/3 ～ 1/2 程度の値を示していることが分かる。また，衝突速度の増加に伴い最大伝達衝撃力は増加の傾向を示すものの，最大入力エネルギー時においては，ジオグリッドの配置位置にかかわらず，応答値が減少していることが確認できる。これは緩衝システムの性能に対して限界以上の衝撃力が作用したことで，EPS ブロックの破壊が局所化し，EPS ブロックに著しい損傷が発生するとともに荷重伝達範囲も局所化したことによるものと推察される。また，このことは各試験体における緩衝システムとして効率的な荷重分散効果が期待出来る限界値，すなわち，可能吸収エネルギーの限界を示唆している。

(c) 図より，最大重錘貫入量はジオグリッドの配置位置や入力エネルギーにかかわらず，概ね対数関数的に増加していること分かる。

以上のことより，ジオグリッドをソイルセメント中に埋設することで，より大きな入力エネルギーに対応可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では，自立可能な新しいタイプの三層緩衝構造（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）の施工性向上策として，ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置することを提案した。また，ジオグリッドの配置位置が緩衝性能に与える影響を把握することを目的に，ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した試験体とジオグリッドをソイルセメント中に埋設した試験体に対してそれぞれ重錘落下衝撃実験を行った。

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) ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した場合，ソイルセメントとジオグリッドの付着が小さいため，ジオグリッドによるソイルセメントの割裂抑制効果が低減する。

2) ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置した場合，$V = 6.0$ m/s ($E = 7.2$ kJ) では，有効高さの大きさによって比較的有効な荷重分散効果を発揮するものの，$V = 7.0$ m/s ($E = 9.8$ kJ) においては EPS ブロックが局所的な破壊に至り，緩衝性能を十分に発揮できない。

3) ソイルセメント中にジオグリッドを埋設した場合，ジオグリッドとソイルセメントが十分に付着し，ソイルセメントの割裂が抑制されることにより，荷重分散効果が有効に作用し，さらに EPS ブロックの緩衝効果も十分に発揮される。

4) ジオグリッドをソイルセメントと EPS ブロックの境界に配置する場合よりも，ジオグリッドをソイルセメント中に埋設する場合の方が，より大きなエネルギーに対して緩衝効果を得ることが可能となる。

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。また，本研究を行うにあたり，室蘭工業大学大学院博士前期課程建築社会基盤系専攻構造力学研究室の学生に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.

2) 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, pp. 1567-1578，2002.3

3) 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，pp.709-714，2012

4) 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，pp.727-732，2012