

ジオグリッド埋設 EPS 緩衝工に関する重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact test of geogrid embedded Expanded Polystyrene block

(独) 土木研究所寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院
(株) 三菱樹脂販売
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院

正会員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正会員 加藤貴久 (Takahisa Kato)
正会員 牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
正会員 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線を通過する道路は、急峻な地形に沿って建設されていることから、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。一方で、近年の異常気象（ゲリラ豪雨など）や対象斜面の経年変化、調査手法の高度化によって、設計当初には想定され得なかった大規模な落石要因が確認されるなど、落石防護構造物の安全性向上が望まれている。しかしながら、これらを再度新設する場合には既設構造物の撤去も含め、莫大な費用が必要となり、建設コストの縮減が求められている中で、大きな負担となっている。

落石防護構造物の1つである防護擁壁¹⁾に着目すると、同擁壁は通常落石の持つ運動エネルギーと擁壁基礎地盤の弾性応答エネルギーが等価となるように設計されている。そのため、直接基礎の無筋コンクリート製重力式擁壁が殆どである。しかしながら、実際には落石による衝撃荷重が作用するため、せん断破壊による損傷事例が数多く報告さ

れている。また、たとえ補強鉄筋を配置した場合においてもせん断ひび割れの発生は避けられない。このような既設の無筋コンクリート製落石防護擁壁の耐衝撃挙動を向上させるためには、耐衝撃性能が大きく、安価な緩衝工を擁壁背面に設置することが有効と考えられる。

このような観点から、著者らの研究グループは、ロックシェッド頂版上に設置する三層緩衝構造（敷砂＋RC版＋EPS）¹⁾や落石防護擁壁背面に設置する二層緩衝構造（RC版＋EPS）²⁾の原理を応用発展させた落石防護擁壁背面に設置する「ソイルセメント＋ジオグリッド＋EPS」から構成される新たな三層緩衝構造を考案している。本緩衝システムにおいて、芯材となるジオグリッドはソイルセメント内とEPSブロック内への埋め込みが可能となる。本研究では、最適な緩衝システムを構築することを最終目的に、ジオグリッドをEPSブロック内に埋め込む場合における緩衝性能を把握するための静載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施した。

表-1 実験ケース一覧

試験体名	EPS 厚 T_E (cm)	ジオグリッド種類 (かぶり) c (cm)	衝突 速度 V (m/s)	入力 エネルギー E (kJ)
E25-S	25	無	(静的)	-
E25-V0.5			0.5	0.05
E25-V1.0			1.0	0.20
E25-V1.5			1.5	0.45
E25-V2.0			2.0	0.80
E25-V2.5			2.5	1.25
E25-V3.0			3.0	1.80
E25-V3.5			3.5	2.45
E25B-S	25	2方向 (5)	(静的)	-
E25B-V3.5			3.5	2.45
E25T-S	25	3方向 (5)	(静的)	-
E25T-V3.5			3.5	2.45
E30B-S	30	2方向 (5)	(静的)	-
E30B-V3.0			3.0	1.80
E30B-V3.5			3.5	2.45
E30B-V4.0			4.0	3.20
E30T-S	30	3方向 (5)	(静的)	-
E30T-V3.5			3.5	2.45
E30T-V4.0			4.0	3.20
E30T-V4.5			4.5	4.05

2. 実験概要

図-1には、本研究に使用した実験装置の概要を示している。本実験装置は、伝達衝撃応力計測用の起歪柱型ロードセル（受圧面の直径20mm、容量7MPa）（以後、荷重計と記述）が設置された鋼製底盤（1.6m四方、厚さ75mm）および鋼製底盤を支持する9個の反力計測用の起歪柱型ロードセル（受圧面の直径87mm、容量100kN）（以後、反

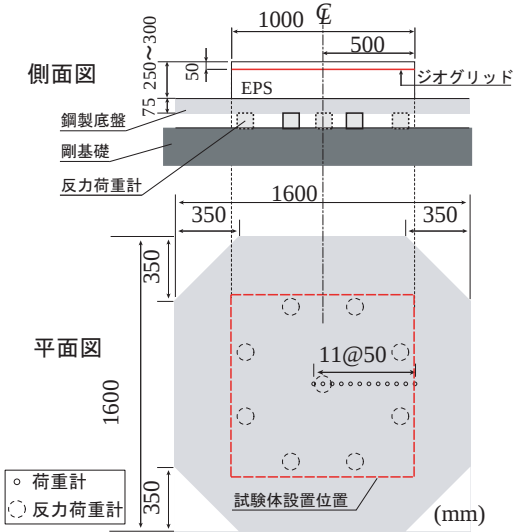


図-1 実験装置概要



写真-1 実験状況 (E30T-V4.5)

表-2 各材料の物性値一覧

(a) ジオグリッド

種類	目合 (mm)	品質管理 強度 (kN/m)	製品基準 強度 (kN/m)	材質
2 方向	28 × 33	34.0 × 43.0	27.0 × 37.0	PP
3 方向	46.2	—	10.0	PP

(b) EPS

密度 (kg/m ³)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

力荷重計と記述) から構成されている。なお、反力荷重計は厚板鋼板を介して実験室ピット内の剛基礎上に設置されている。また、荷重計は図に示すように底盤中央部より対称軸に沿って 50 mm 間隔で 12 個設置されており、その受圧面と底版上面を揃え同一平面となるよう配置している。

写真-1には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、鋼製重錘を所定の高さから試験体中央部に落下させることにより行っている。実験に使用した鋼製重錘は質量が 400 kg 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。先端部の直径は 200 mm でその底面部には片当たり防止のため 2 mm のテープが設けられている。また、静載荷実験は、鋼製フレームに設置された油圧載荷装置の先端に衝撃載荷実験で使用した重錘の先端部を取り付けることにより実施している。

表-1には、実験ケース一覧を示している。試験体は、EPS 厚さを 250 ~ 300 mm とし、EPS 中にジオグリッドを埋設している。実験ケースは、ジオグリッドを用いないケース（以後、無補強）8 体、ジオグリッドを EPS 上面よりかぶり 50 mm の位置に埋設したケース（以後、ジオグリッド補強）12 体の 5 種類全 20 体である。表-2には、実験に使用した各材料の物性値一覧を示している。

実験ケース名は、EPS 厚 (250 mm : E25, 300 mm : E30)、ジオグリッド種類 (2 方向 : B, 3 方向 : T) に、静載荷実験の場合には実験ケース名の末尾に S (静載荷) を、衝撃載荷実験の場合には重錘衝突速度を付して示している。

測定項目は、静載荷荷重、重錘衝撃力、伝達衝撃力、底版上への伝達衝撃応力分布および重錘貫入量である。なお、静載荷荷重および重錘衝撃力は重錘に内蔵されているロードセル、伝達衝撃力は底版を支持している 9 個の反力荷重計、底版上への伝達衝撃応力分布は荷重計、重錘貫入

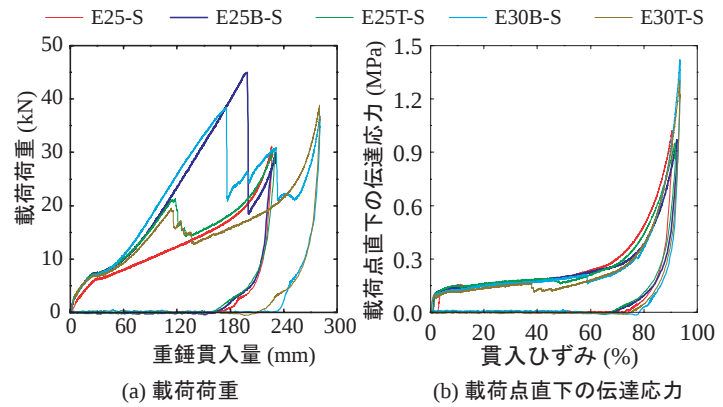


図-2 載荷荷重-貫入量関係

量はレーザ式変位計を用いている。

3. 実験結果

3.1 静載荷実験

図-2には、各ケースの静載荷実験時における載荷荷重と重錘貫入量の関係および載荷点直下の伝達応力と重錘貫入ひずみの関係を示している。(a) 図より、剛性勾配に着目すると、貫入量 50 mm 程度まではいずれの試験体もジオグリッドの種類にかかわらず、同様の性状である。その後、ジオグリッド補強した場合には無補強の場合よりも大きな剛性勾配を示している。また、補強量が小さい 3 方向のジオグリッドを用いた E25/30T-S の場合には、貫入量が 100 mm 程度で荷重が急激に減少する。一方、2 方向のジオグリッドを用いた E25/30B-S は 170 ~ 200 mm 程度まで荷重が増加している。2 方向のジオグリッドを用いる場合には、EPS 厚が 250 mm よりも 300 mm の場合における最大荷重が小さいが、原因は不明である。これらの荷重の急激な減少は、ジオグリッドの破断あるいは付着ぎれ等の破壊現象が生じたためと考えられる。EPS 厚が 250 mm の場合には、いずれも最大貫入量 220 mm 程度まで載荷しているが、その荷重はいずれも 30 kN とほぼ同程度を示している。一方、EPS 厚が 300 mm の場合には最大貫入量 280 mm 程度まで載荷した。この場合も荷重は 40kN 程度と同程度であることが分かる。これより、ジオグリッド補強の場合の最大荷重発生後の挙動は、無補強の場合とほぼ同様の静載荷荷重-重錘貫入量関係を示すことが分かる。

(b) 図より、載荷点直下における伝達応力は、ひずみが 40 ~ 60 % 程度で E30B/T-S に応力減少が見受けられるものの、いずれのケースもほぼ同様な伝達応力-貫入ひずみ関係を示していることから、ジオグリッド補強の有無が載荷点直下の伝達応力に与える影響は小さいものと考えられる。また、(a) および (b) 図より、ジオグリッドを埋設する場合には、載荷点直下の最大伝達応力が増加せずに最大荷重が増加していることが分かる。これは、伝達応力が広く分散することによるものであり、ジオグリッド補強による荷重分散効果を確認できる。

3.2 衝撃実験結果

図-3には、衝突速度毎に整理した (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、(d) 重錘貫入量の各波形分布を示している。(a) および (b) 図より、いずれも全体的な波形性状に大きな差異は見受けられない。ま

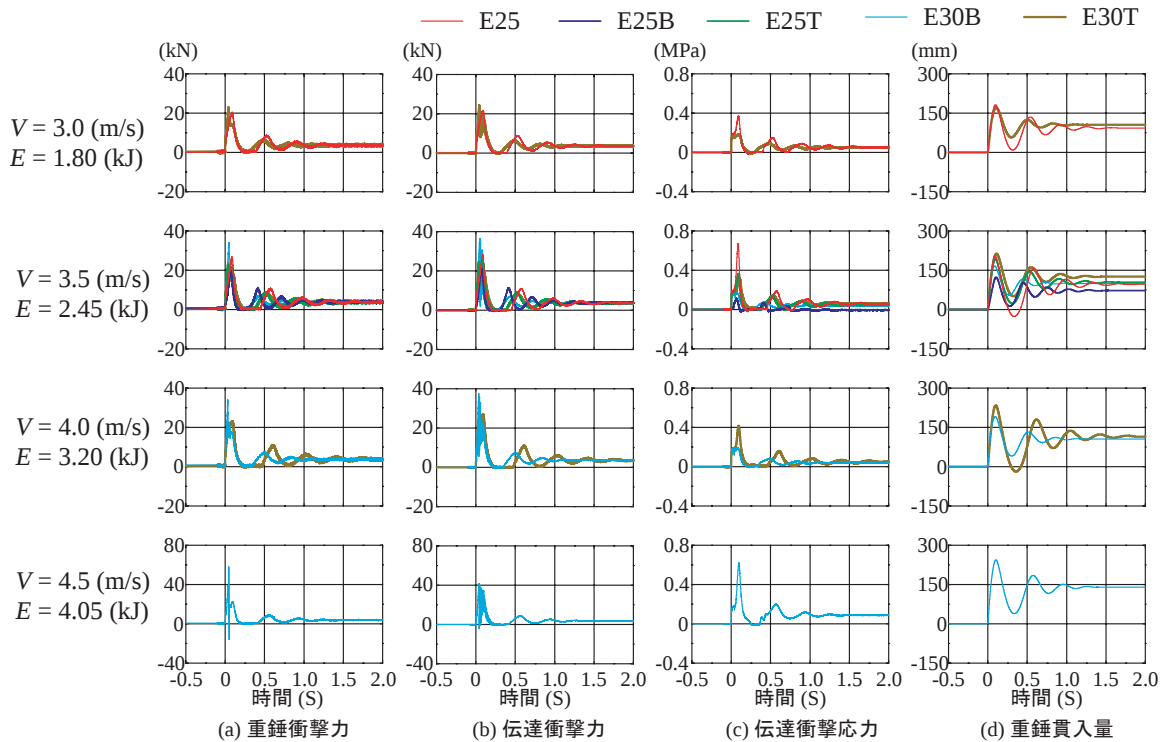


図-3 各種応答波形

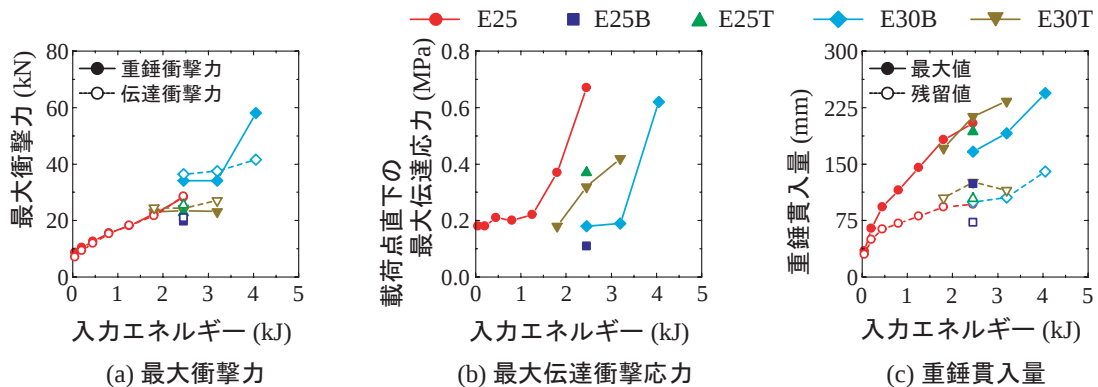


図-4 各応答値と入力エネルギーの関係

た、ジオグリッド補強の場合には最大応答値近傍で高周波成分が含まれている。これは、試験体が軽量であるため衝撃挙動時に浮き上がりが生じること、あるいはジオグリッドの破断および付着ずれ等の要因によるものと考えられる。

(c) 図より、いずれの場合においても、衝突初期に大きな伝達衝撃応力が生じているが、その後は 0.1 MPa 程度の応力に漸近する減衰自由振動状態となっていることが分かる。

(d) 図より、重錘の EPS への貫入後の挙動は、いずれの場合も正弦減衰状の自由振動状態となっていることが分かる。その振動特性は衝突速度によらず類似している。

3.3 各種応答値と入力エネルギーの関係

図-4 には、各種応答値と入力エネルギーの関係を示している。(a) 図より、最大伝達衝撃力は $E = 4.05$ kJ の場合を除き、最大重錘衝撃力とほぼ同程度の値を示していることが分かる。無補強の場合には入力エネルギーの増加に対応して両衝撃力も増加する傾向にあるが、ジオグリッド補強の場合における各伝達衝撃力は入力エネルギーにかかわ

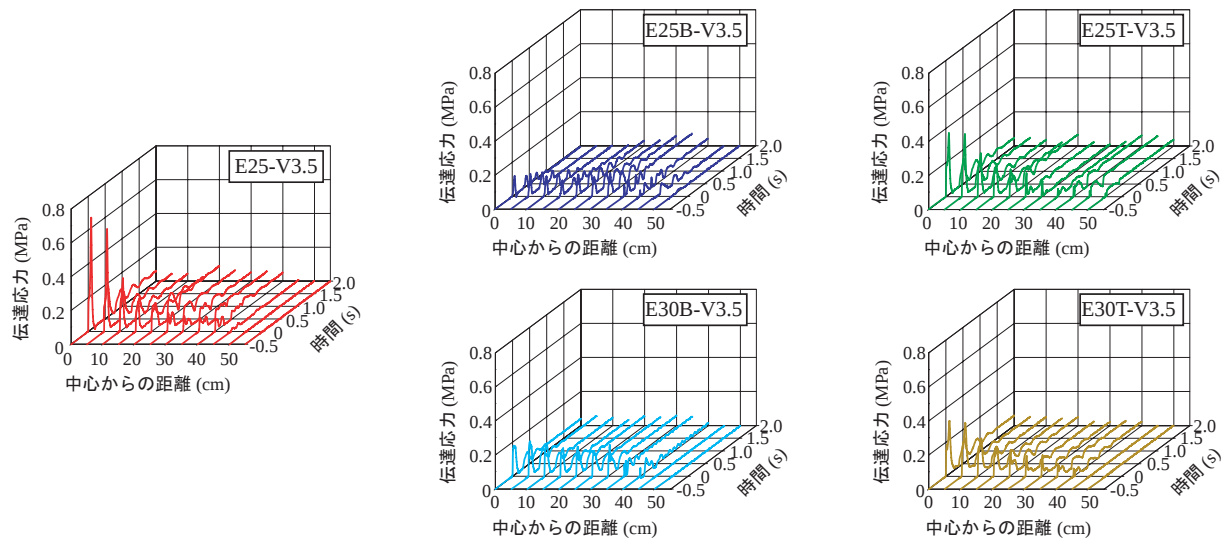
らずほぼ同程度の値を示している。これは、無補強の場合には重錘径の局所的な領域でのみ衝撃力を緩衝するため、応答ひずみも大きくなるが、ジオグリッドで補強する場合は衝撃力が広範囲に分散されるため、応答ひずみも小さく従って伝達衝撃力も類似した値を示すものと考えられる。

(b) 図の最大伝達衝撃力分布図より、 $\sigma = 0.2$ MPa 程度に伝達衝撃応力を抑制可能な入力エネルギーは、無補強の場合には $E = 1.25$ kJ であるのに対して、ジオグリッド補強の場合には $E = 1.80 \sim 3.20$ kJ 程度となっている。これより、ジオグリッド補強を行うことにより伝達衝撃応力を効率良く抑制することが可能であることが分かる。

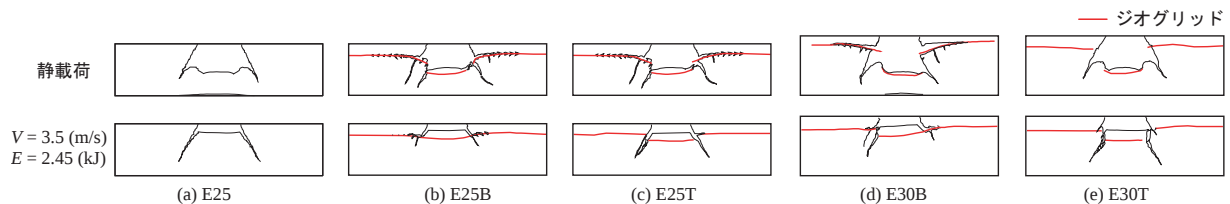
(c) 図より、重錘貫入量の残留値は最大値の 50 % 程度であることが分かる。また、補強量が大きい E25/30B は他のケースよりも最大値および残留値ともに小さく示されていることが分かる。

3.4 伝達衝撃応力分布

図-5 には、 $V = 3.5$ m/s の場合における伝達衝撃応力分



図－5 衝撃载荷実験の伝達衝撃応力分布波形 ($V = 3.5 \text{ m/s}$, $E = 2.45 \text{ kJ}$)



図－6 実験後の EPS 破壊状況

布波形を示している。いずれのケースも载荷点から 400 ～ 500 mm 程度まで $\sigma = 0.1 \text{ MPa}$ 程度の伝達衝撃応力が発生していることから、EPS 全体で荷重を伝達していることが分かる。また、無補強である E25-V3.5 は他のケースと比較し、载荷点直下に $\sigma = 0.7 \text{ MPa}$ 程度大きな伝達衝撃応力が発生している。一方、ジオグリッド補強した場合では、補強量の小さい 3 方向ジオグリッドを用いたケースは载荷点直下に $\sigma = 0.4 \text{ MPa}$ 程度の比較的大きな伝達衝撃応力が生じているものの、補強量の大きい 2 方向のジオグリッドを用いたケースは EPS 全体において $\sigma = 0.2 \text{ MPa}$ 程度以下の伝達衝撃応力に抑制されていることが分かる。

3.5 破壊性状

図－6 には、 $V = 3.5 \text{ m/s}$ の場合における実験後の EPS 破壊性状を示している。図より、いずれの EPS も押し抜きせん断型の破壊性状を示しており、ジオグリッドの補強量が小さい場合には破断する傾向にあることが分かる。衝撃実験結果において、無補強の場合には、EPS 下面近傍までひび割れが到達していることが分かる。一方、ジオグリッド補強を行った場合には、EPS に押し抜きせん断型のひび割れが発生しているが、ひび割れの進展も抑制されており、ジオグリッドによって応力分散の効果が発揮されていることが分かる。

4. まとめ

本研究では、最適な緩衝システムを構築することを最終目的に、ジオグリッドを EPS ブロック内に埋め込む場合における緩衝性能を把握するための静载荷実験および重錘落下衝撃実験を実施した。実験の範囲で得られた知見を整理

すると、以下の通りである。

静载荷実験より：

- 1) ジオグリッド補強を行うことで载荷荷重－重錘貫入量関係の剛性勾配が増加し、最大荷重も増加するが、ジオグリッドの破壊等による荷重減少後は無補強の場合と同様の挙動を示す。
- 2) ジオグリッド補強の有無にかかわらず、いずれのケースもほぼ同様な伝達応力－貫入ひずみ関係を示す。

衝撃载荷実験より：

- 1) ジオグリッド補強の有無にかかわらず、最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力とほぼ同程度の値を示す傾向にある。ジオグリッド補強の場合の各伝達衝撃力は入力エネルギーにかかわらずほぼ同程度の値を示す。
- 2) ジオグリッド補強した場合は、ジオグリッド補強量が大きいほど伝達衝撃応力を抑制することが可能である。
- 3) 载荷方法およびジオグリッド補強の有無にかかわらず、EPS は押し抜きせん断型の破壊性状を示す。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 川瀬良司，岸徳光，西弘明，牛渡裕二，刈田圭一：杭付 RC 落石防護擁壁の数値シミュレーションと簡易設計法の提案，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1213-1224，2011.3