

論文 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

牛渡 裕二^{*1}・岸 徳光^{*2}・保木 和弘^{*3}・前田 健一^{*4}

要旨: 本研究では, 新しい落石防護擁壁用緩衝構造として, 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を提案し, その適用性を 1/2 スケール落石防護擁壁模型の水平衝撃荷重載荷実験により検討した。実験はジオグリッドの有無および衝突速度を変化させて実施した。その結果, 提案の三層緩衝構造は, 高い緩衝性能を発揮し, 重錘衝突による入力エネルギーを 85 kJ 程度とする場合においても擁壁の損傷は極めて軽微であること, 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, 水平衝撃荷重載荷実験

1. はじめに

海岸線や山岳部において急崖斜面近傍に建設されている道路には, 落石から道路や人命を守るための落石防護構造物が数多く建設されている。また, 近年の異常気象や大地震等により, 設計落石荷重が設計当初よりも大きく評価される事例が報告されている。そのため, 既設の落石防護擁壁等の構造物の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, 芯材に 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・数値解析的に評価検討し, 合理的な設計手法を確立している^{1),2)}。また, 二層緩衝構造の開発により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, その緩衝効果を緩衝構造模型 (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。その結果, 提案の三層緩衝構造 (図 - 1 参照) は, ソイルセメントの押抜きせん断破壊, ジオグリッド

の荷重分散効果, および EPS ブロックの変形による衝撃エネルギーの吸収の相乗効果により緩衝効果が効率的に発揮されること, などを明らかにしている。しかしながら, これらの研究は, 室内実験レベルの検討であるため, その緩衝効果を実証するためには, 擁壁への落石衝突を模擬した実験を行うことが必須であるものと考えられる。

このような背景より, 本研究では, 著者らが提案した三層緩衝構造の落石防護擁壁への適用性を検討することを目的に, 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の水平衝撃荷重載荷実験を行った。なお, 本実験では, 緩衝性能に関する比較のためジオグリッドを用いない場合についても検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表 - 1 には, 試験体の一覧を示している。試験体名の第 1 項目はジオグリッドの有無 (N: 無, G: 有) を, 第 2 項目は重錘衝突速度 (m/s) を示している。なお, 表には目標および実測衝突速度, 実測入力エネルギーを併せて示している。

図 - 2 には, 実験に用いた擁壁模型および緩衝工の形状

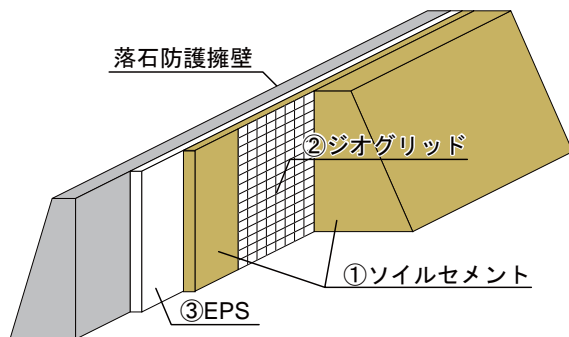


図 - 1 提案工法

表 - 1 実験ケース一覧

試験体名	ジオグリッドの有無	目標衝突速度 (m/s)	実測衝突速度 (m/s)	実測入力エネルギー (kJ)
N-5.0	無	5.0	5.0	12.4
N-7.0		7.0	7.1	25.1
G-9.0	有	9.0	9.1	41.4
G-11.0		11.0	10.8	57.8
G-13.4		13.4	13.0	85.0

*1 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 次長 (正会員)

*2 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 教授 工博 (正会員)

*3 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 (非会員)

*4 名古屋工業大学 都市社会工学科 准教授 博(工)(非会員)

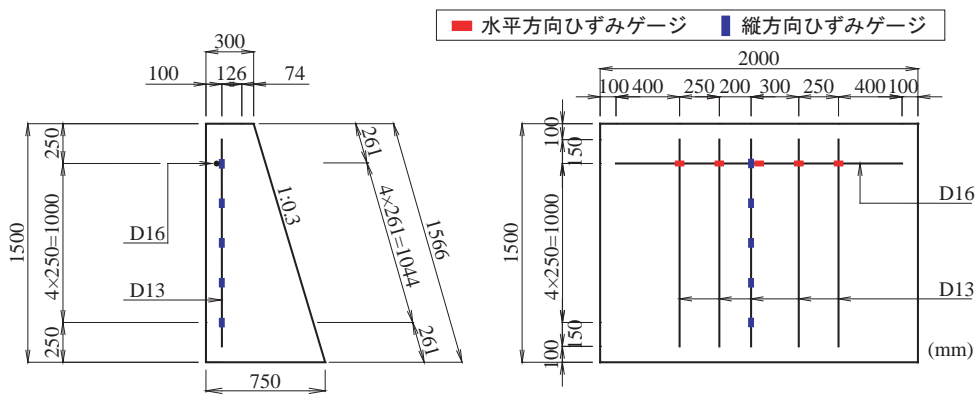
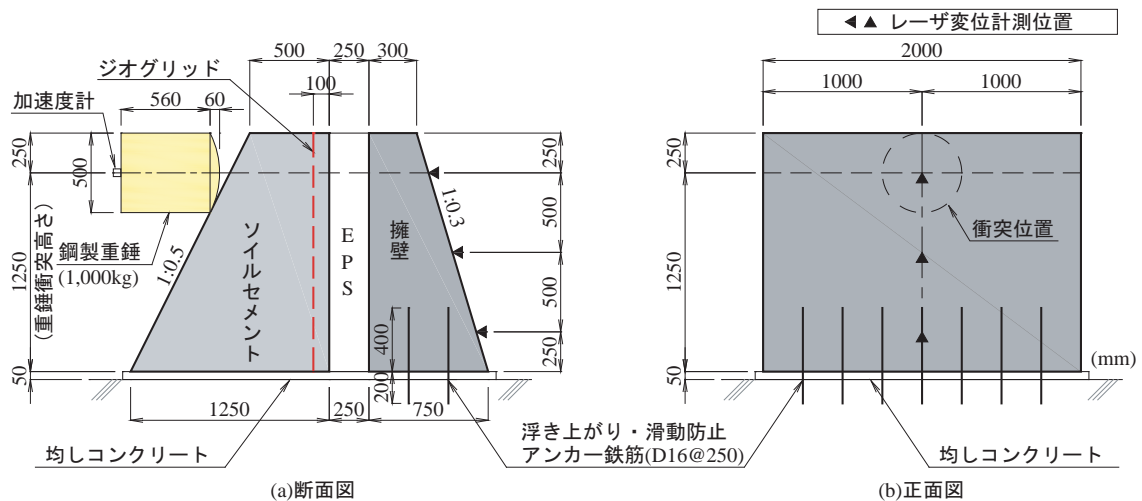


図 - 2 試験体概要

表 - 2 各材料の物性値一覧

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

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

EPS		
密度 (kg/m ³)	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

寸法、計測位置を示している。擁壁の寸法は、実規模の1/2程度とし壁高 $H=1.5\text{ m}$ 、延長 $L=2.0\text{ m}$ 、天端幅 0.3 m であり、擁壁背面（重錘衝突面）は鉛直、擁壁前面は $1:0.3$ の傾斜面となっている。擁壁は、剛基礎上に打設した厚さ $t=50\text{ mm}$ の均しコンクリート上に設置されており、アンカー筋により固定されている。また、擁壁内部の応力状態を検討するため、ひずみ計測用の鉄筋を擁壁内部

に配置している。
 緩衝工の構成は別途実施した室内実験を参考に、EPSブロック厚さを 250 mm 、ソイルセメント天端および下端幅をそれぞれ $500, 1250\text{ mm}$ としている。また、ソイルセメントの重錘衝突面は、実施工時における施工性確保および植生による表面保護など、実状に即して $1:0.5$ の傾斜面としている。G試験体の場合には、ジオグリッドをソイルセメント内に 100 mm のかぶりを取って配置した。緩衝工は、擁壁模型にEPSブロックを設置し、ソイルセメント打設用型枠を取り付け、ソイルセメントを敷き均し、約 $100\sim 200\text{ mm}$ 毎に足踏みにて締め固めながら積層して構築した。G試験体の場合には、ソイルセメント打設時においてジオグリッドにゆがみが生じないように、予めその左右端部を型枠に仮固定した。ソイルセメントは、含水比 $w=15\%$ の砂に早強ポルトランドセメント 100 kg/m^3 を混合して製作した。ソイルセメント打設後は、実験時までブルーシートを用いて養生した。
 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。また、図-3には、ソイルセメントの圧縮強度試験結果における応力-ひずみ関係の一例を示している。実験時におけるソイルセメントおよび擁壁模型コンクリートの平均圧縮強度は、それぞれ $0.9, 37.5\text{ MPa}$ であった。

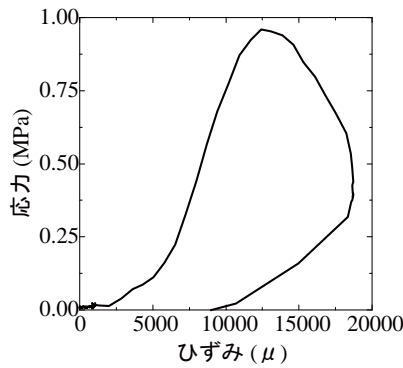


図 - 3 ソイルセメントの応力 - ひずみ関係の一例

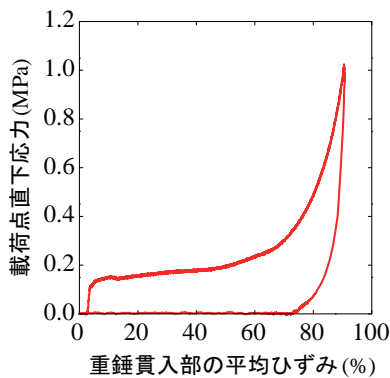


図 - 4 EPS の応力 - ひずみ関係

図 - 4 には、予め実施した EPS ブロックの静載荷実験結果 (応力 - ひずみ関係) を示している。

2.2 実験方法

写真 - 1 には、水平衝撃荷重実験の状況を示している。実験は、門型の鋼製フレームに吊り下げられた鋼製重錘を着脱装置を介してトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、振り子運動によって試験体の所定の位置に水平衝突させることにより行っている。また、吊り上げ高さは、目標衝突速度より算定している。

写真 - 2 には、本実験に使用した重錘を示している。重錘は質量 1,000 kg、直径 0.5 m の円柱状であり、その衝突部は半径 55 cm の球面状となっている。重錘衝突位置は、重錘上面と擁壁天端が同一となるよう、擁壁上面から 0.25 m 下方の位置とし、延長方向の衝突位置は壁体中央としている。

載荷方法は試験体に重錘を一度だけ衝突させる単一載荷とし、重錘衝突速度は別途実施した室内実験における最大入力エネルギーに対応する 5 m/s から、最大吊り上げ高さ時における 13.4 m/s までの範囲で設定した。

実験における測定項目は、図 - 2 に示すとおり、重錘に設置したひずみゲージ型加速度計による重錘加速度、非接触式レーザ変位計による擁壁の水平変位、コンクリート擁壁内部の鉄筋に貼付したひずみゲージによるひずみ、高速度カメラによる重錘速度および重錘最大貫入量である。重錘速度および重錘貫入量は、高速度カメラにより

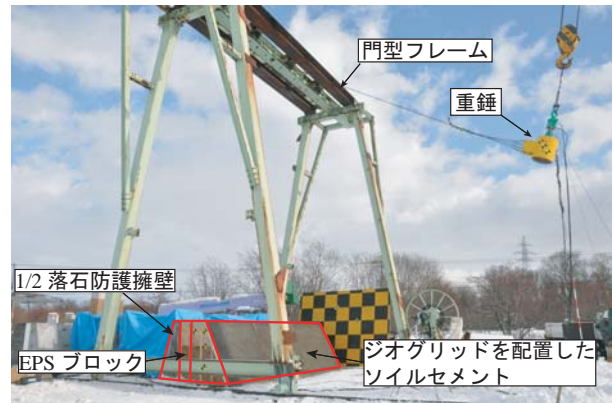


写真 - 1 実験状況

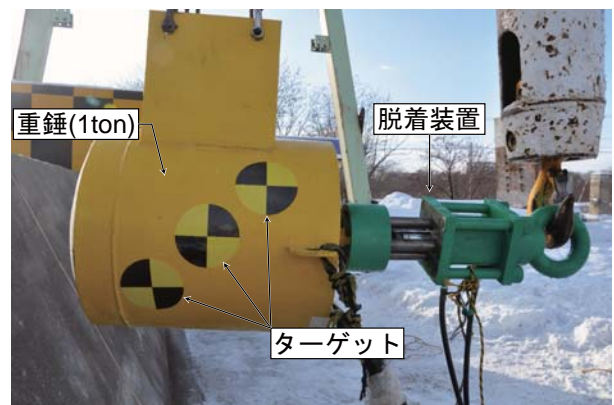


写真 - 2 重錘写真

撮影された画像データを用い、重錘に貼付したターゲットの移動量から算出した。

なお、本実験は、寒地土木研究所角山実験場において実施した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

写真 - 3 には、各試験体の実験終了後におけるソイルセメント表面の破壊状況を示している。なお、写真にはソイルセメント上に確認されたひび割れを白線でトレースして示している。

写真より、N 試験体の場合には、重錘衝突位置が陥没するとともに、その位置から水平方向にひび割れが進展し割裂破壊している。また、この傾向は重錘衝突速度が大きい場合ほど著しい。これに対し、G 試験体の場合には、水平方向の割裂破壊よりも、載荷点近傍からソイルセメント上縁に向かって逆三角形に生じる押抜きせん断破壊が卓越していることが分かる。これは、N 試験体の場合にはジオグリッドが配置されていないため、ソイルセメントが重錘衝突位置下縁を境に上下に分離する傾向にあるのに対し、G 試験体の場合にはジオグリッドが

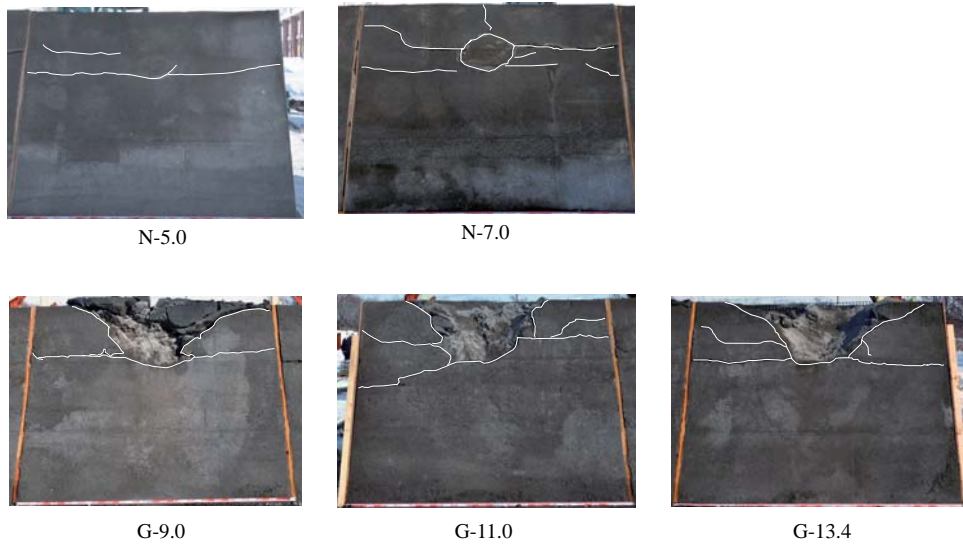


写真 - 3 実験終了後のソイルセメントの破壊性状

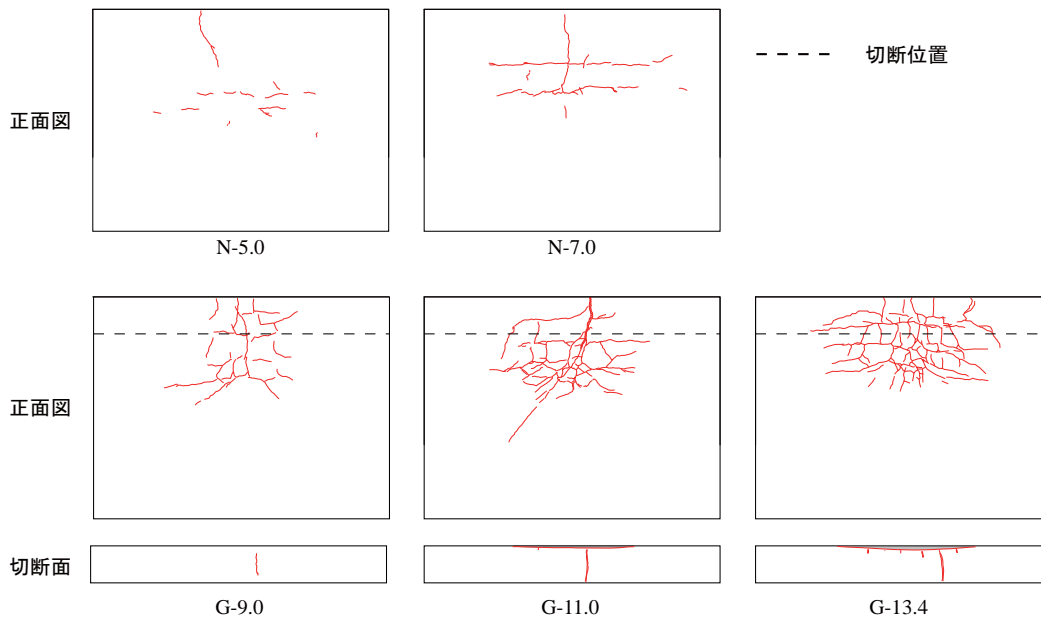


図 - 5 実験終了後のEPSブロックの正面図および切断面

配置されているためソイルセメントの割裂破壊が拘束され、その破壊形式が押抜きせん断破壊に移行したものと推察される。

なお、G試験体の場合には、衝突速度が大きい場合ほど押抜きせん断破壊の範囲が局所化する傾向にある。これは、衝突速度が大きいため、衝突初期に重錘が深く貫入したことによるものと考えられる。また、本実験では同一衝突速度下におけるグリッドの有無の影響は検討されていない。この点については、今後検討する必要があるものと考えられる。

図 - 5には、EPSブロックのひび割れ状況を示している。なお、G試験体の場合にはEPSブロックに残留変形が生じたことより、変状確認のためEPSブロックを載荷点位置で水平方向に切断した。図には、切断面における

ひび割れおよび変形状を示している。

EPSブロック正面のひび割れ分布より、N試験体の場合には衝突速度によらず水平および鉛直方向のひび割れが発生し、衝突速度の増加に伴ってこれらのひび割れが明瞭に現れる傾向にあることが分かる。なお、前述のソイルセメントの破壊性状を考慮すると、EPSブロックに生じたひび割れはソイルセメントの割裂破壊に起因するものであると考えられる。

一方、G試験体の場合には、載荷点を中心とする放射状ひび割れおよび載荷点近傍における亀甲状のひび割れが発生し、衝突速度の増加に伴ってひび割れ本数が増加する傾向にある。これは、前述のソイルセメントの破壊性状を考慮すると、ソイルセメントに生じた押抜きせん断コーンのEPSブロック接地面が見かけ上の載荷面となり、

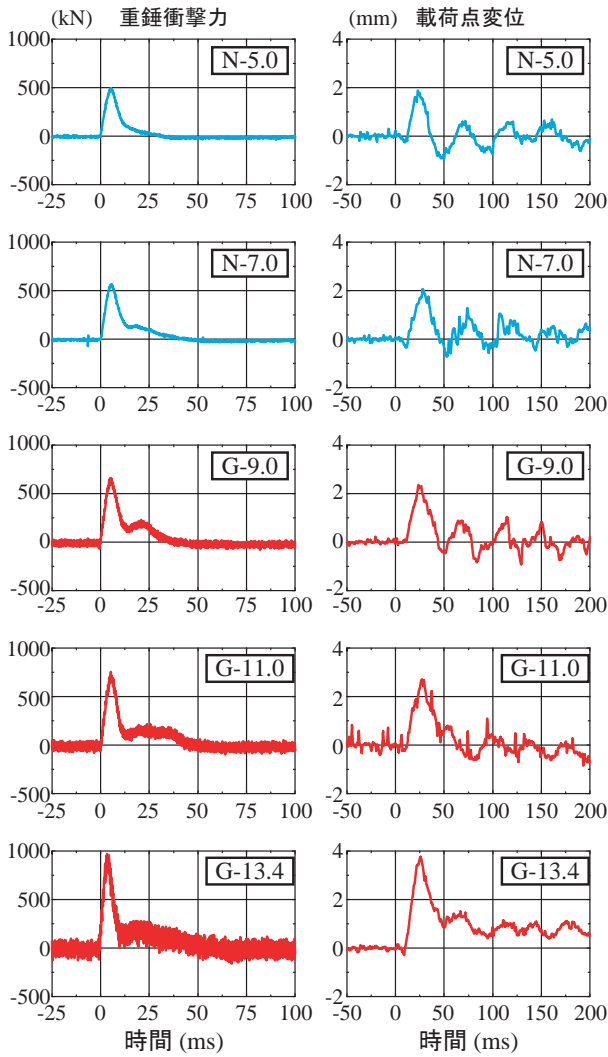
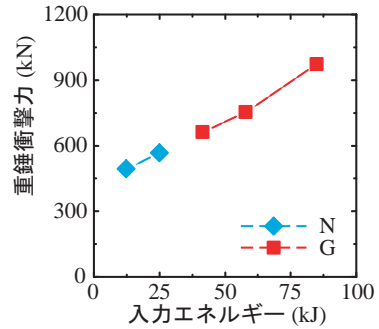


図 - 6 各種応答波形

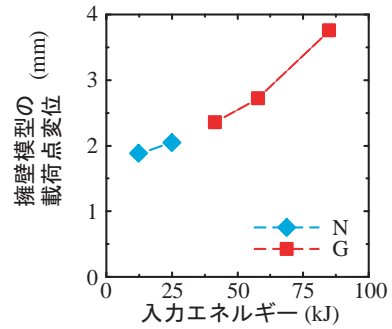
EPS ブロックに衝撃力を伝達しているものと考えられる。

従って、提案の三層緩衝構造は、1) ジオグリッドを配置したソイルセメントが押抜きせん断破壊するとともに、衝撃力を分散して EPS ブロックに伝達し、2) EPS ブロックが変形することにより衝撃エネルギーを吸収する、3) このように各材料の衝撃吸収性能が相乗的かつ効率的に発揮されて、より大きな緩衝性能を発揮する、ものと推察される。なお、このような緩衝メカニズムは、室内実験³⁾において確認されたものと同様である。

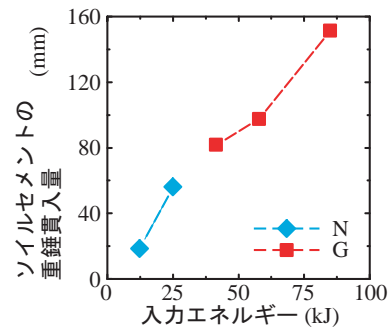
また、本実験では、緩衝構造を設置しない場合に関する実験を実施していないため、提案の三層緩衝構造による緩衝効果を定量評価するに至っていない。ただし、著者らが過去に実施した実規模落石防護擁壁の水平衝撃荷重実験においては、緩衝構造を設置しない場合には 20 kJ 程度で壊滅的な破壊に至っている。これに対し、本実験における最大入力エネルギーは、1/2 スケールモデルを用いているにもかかわらず 85 kJ 程度であり、かつ擁壁模型はひび割れを確認できないことから未だ健全である。



(a) 重錘衝撃力



(b) 載荷点変位



(c) 最大貫入量

図 - 7 各種応答値と入力エネルギーとの関係

従って、提案の三層緩衝構造を設置することにより、入力エネルギーレベルで少なくとも 4 倍以上の耐衝撃性向上効果を期待できるものと考えられる。

3.2 時刻歴応答波形

図 - 6 には、重錘衝撃力および擁壁背面における載荷点変位に関する時刻歴応答波形を示している。図より、重錘衝撃力波形は、ジオグリッドの有無や衝突速度によらず、振幅が大きく周期の短い第一波と、振幅が小さく周期の長い第二波から構成されていることが分かる。これは、第一波目においてソイルセメントが損傷し、第二波目において EPS ブロックが変形していることを示しているものと考えられる。なお、各波形の最大振幅は衝突速度の増加に伴って大きくなる傾向にある。

また、擁壁の載荷点変位波形は、重錘衝突初期に振幅の大きい第 1 波が励起した後、減衰自由振動状態を示している。なお、G-13.4 試験体を除く全試験体において、その振動中心はほぼ零であるが、G-13.4 試験体の場合には振動中心が 0.7 mm 程度正側にシフトしている。従って、

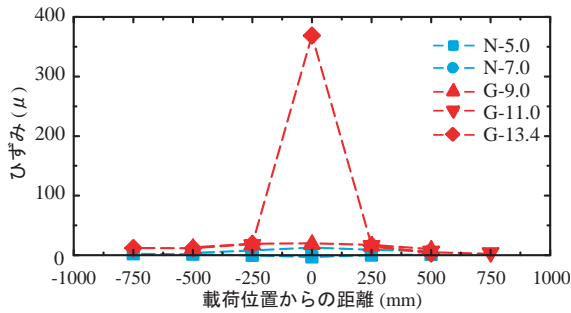


図 - 8 水平鉄筋のひずみ分布

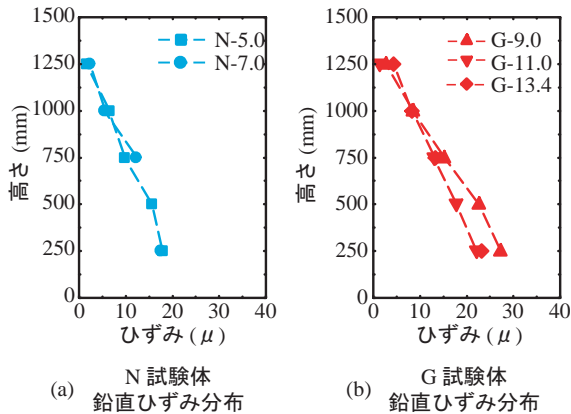


図 - 9 鉛直鉄筋ひずみ分布

G-13.4 試験体の場合には、擁壁模型がわずかに残留変形しているものと考えられる。

3.3 各種応答値

図 - 7 には、重錘衝撃力、載荷点変位および最大貫入量と入力エネルギーとの関係を示している。重錘衝撃力 - 入力エネルギー関係より、重錘衝撃力はジオグリッドの有無によらず、入力エネルギーの増加に伴って、ほぼ線形に増大していることが分かる。従って、ジオグリッドの有無が重錘衝撃力に及ぼす影響は小さいものと考えられる。また、載荷点変位および最大貫入量と入力エネルギーの関係を見ると、いずれも入力エネルギーの増大に伴って概ね線形に増大している。以上より、変形量の急増等の性状が見られないことから、本実験においては擁壁模型は未だ健全であるものと判断される。

3.4 鉛直および水平鉄筋のひずみ分布

図 - 8、図 - 9 には、擁壁の水平および鉛直鉄筋のひずみ分布を示している。なお、水平および鉛直鉄筋のひずみ分布はそれぞれ、載荷点および擁壁下縁近傍のひずみが最大値を示す時刻における分布について示している。

各測定結果より、G-13.4 試験体における載荷点近傍の水平方向ひずみが 400μ 程度を示しているものの、その他のひずみは 30μ 程度以下であることが分かる。

これらの結果より、重錘衝突による擁壁模型の損傷は極めて軽微であるものと判断される。従って、提案の三

層緩衝構造を設置した擁壁を終局に至らしめるために必要な入力エネルギーは、本実験における最大入力エネルギー (85 kJ) よりも大きいものと判断される。

今後は、さらに大きな入力エネルギーによる水平衝撃荷重載荷実験の他、緩衝構造を設置しない場合に関する検討を行い、提案の三層緩衝構造設置による擁壁模型の耐衝撃性向上効果を定量的に評価する必要があるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、新しい落石防護擁壁用緩衝構造として、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を提案し、その適用性を擁壁の水平衝撃荷重載荷実験により検討した。実験はジオグリッドの有無および衝突速度を変化させて実施した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 重錘衝突による入力エネルギーを 85 kJ 程度とする場合においても、擁壁の損傷は極めて軽微である。従って、擁壁が終局に至る入力エネルギーはさらに大きいものと推察される。
- 2) ジオグリッドの配置により、ソイルセメントの割裂破壊の抑制およびひび割れ分散効果が期待できる。
- 3) 提案の三層緩衝構造は、ジオグリッドを配置したソイルセメントが押抜きせん断破壊するとともに、衝撃力を分散して EPS ブロックに伝達し、かつ EPS ブロックが変形して衝撃エネルギーを吸収することにより緩衝効果を発揮する。

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る。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 川瀬良司, 池田憲二, 松岡健一: 二層緩衝構造の緩衝特性に関する重錘落下実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.47A, pp. 1621-1632, 2001.3.
- 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の重錘衝突実験と数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1567-1578, 2002.3
- 3) 菅原慶太, 岸 徳光, 牛渡裕二, 小室雅人, 栗橋祐介: 落石防護擁壁用三層緩衝構造の衝撃吸収性能に及ぼす表層材ソイルセメント厚の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, A-34, CD-ROM, 2012.2