

論文 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

菅原 慶太^{*1}・岸 徳光^{*2}・牛渡 裕二^{*3}・小室 雅人^{*4}

要旨: 本研究では、ソイルセメントとEPS (発泡スチロール) ブロックおよびジオグリッドを組み合わせた三層緩衝構造の緩衝性能や緩衝メカニズムを明らかにすることを目的として、ソイルセメント厚を3種類に変化させた静荷重および衝撃荷重実験を行った。その結果、1) ソイルセメント厚が大きい場合は押抜きせん断コーンの形成範囲が大きくなるため、衝撃力の分散効果が発揮され伝達衝撃応力が低減すること、2) 提案の三層緩衝構造は、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、EPS ブロックの変形による衝撃エネルギーの吸収により発揮されること、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, EPS ブロック, ジオグリッド

1. はじめに

山間部や海岸線に設置されている道路の急崖斜面において、落石災害の発生が懸念される区間には落石防護構造物が建設されている。また、昨今の異常気象や凍結融解等による経年劣化により、北海道地域における落石規模は設計当時よりも大きくなっている場合が少なくない。この種の構造物の耐衝撃性を向上させる方法の一つとして、落石衝突面に緩衝工を設置して緩衝能力を向上させる方法が考えられる。落石覆工頂版部には敷砂緩衝材や、より緩衝効果の高い三層緩衝構造(表層材:砂, 芯材:RC版, 裏層材:発泡スチロール(以後, EPS)ブロックなどが適用されている¹⁾。

一方、落石防護擁壁の場合には、EPSブロックとRC版から構成される二層緩衝構造が開発され実用化されている²⁾。しかしながら、この工法は、RC版の製作・運搬・設置等のコストが高いため、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図-1に示すような新しいタイプの三層緩衝構造を提案した。本緩衝構造は、表層材として自立可能なソイルセメントを用い、芯材に衝撃力分散のためのジオグリッドおよび裏層材に衝撃エネルギー吸収材としてのEPSブロックを用いるものである。この工法の最大の特徴はソイルセメントを用いる点であり、その利点はi) 現地発生土を用いるため安価であること、ii) 自立可能でありかつ緩衝効果が期待できることである。

本研究では、提案の三層緩衝構造の緩衝性能や緩衝メカニズムを明らかにすることを目的として、ソイルセメント厚を3種類に変化させた場合の静荷重および衝撃荷重実験を実施した。

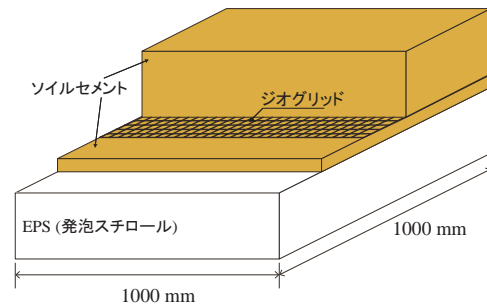


図-1 提案の三層緩衝構造の概要

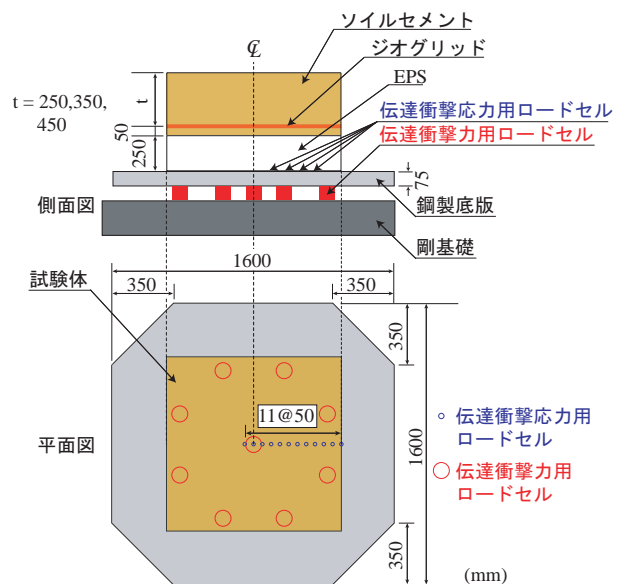


図-2 実験装置および試験体の概要

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (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 次長 (正会員)
 *4 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)

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | ソイルセメント厚 (mm) | EPSブロック厚 (mm) | 衝突速度 (m/s) | 入力エネルギー (kJ) |
|----------|---------------|---------------|------------|--------------|
| S300GE-S | 300 | 250 | 静的 | - |
| S300GE-I | | | 9.0 | 16.2 |
| S400GE-S | 400 | | 静的 | - |
| S400GE-I | | | 9.0 | 16.2 |
| S500GE-S | 500 | | 静的 | - |
| S500GE-I | | | 9.0 | 16.2 |

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 |

2. 実験概要

2.1 試験体概要

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、ソイルセメント厚を3種類(300, 400, 500 mm)に変化させた三層緩衝構造試験体に対して、静荷重および衝撃荷重実験を行った。なお、衝撃荷重実験の場合には、予備実験結果の下にソイルセメント厚によらず衝突速度 $V=9\text{ m/s}$ とした。これは、ソイルセメント厚が300 mmの場合における最大入力エネルギーに相当する衝突速度である。表中、試験体名の第1項目のSに付随する数字はソイルセメント厚(mm)を示している。なお、第1項目末尾のG, Eは、それぞれジオグリッドおよびEPSブロックを併用していることを意味している。第2項目は荷重方法を示しており、S, Iはそれぞれ静荷重および衝撃荷重実験であることを意味している。

図-2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(1.6 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面一となっている。

実験は、本装置を剛基礎上に設置して試験体を装置の中央に配置し、試験体中央部に各種荷重を荷重する形で

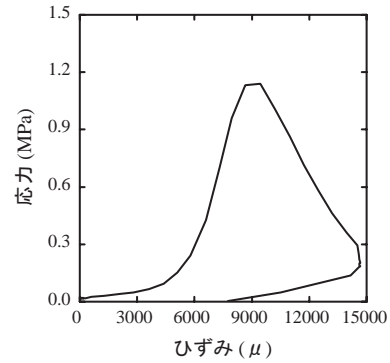


図-3 ソイルセメントの応力-ひずみ曲線の一例

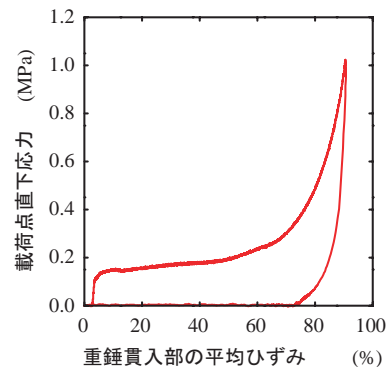


図-4 EPSの応力-ひずみ曲線

実施した。静荷重実験は、最大荷重到達後、変位量の増加に伴う変状が見られなくなった時点で終了することとした。衝撃荷重実験は、鋼製重錘を用い所定の速度で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 $\phi=200\text{ mm}$ であり、そ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。静荷重実験の場合においても、同様の重錘を油圧ジャッキの先端に取り付けて実験を行った。

試験体は、平面寸法1,000 × 1,000 mm, 高さ250 mmのEPSブロックの上に、平面寸法1,000 × 1,000 mm, 高さ300, 400, 500 mmのソイルセメントを設置している。なお、ソイルセメントの下面側から高さ50 mmの位置にジオグリッドを配置している。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/m³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、足踏みにて締固め製作した。その後、型枠は荷重実験の直前に外すこととし、ブルーシートで覆うことにより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、実験を実施した。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-3には、一軸圧縮強度試験により得られたソイルセメントの応力-ひずみ曲線の一例を示している。なお、最大応力到達後においては、ひずみの増加に伴って応力が徐々に低下する傾向にある。実験では、円柱供試体に発生したひび割れが徐々に開口することを確認しており、このような性状は、他の試験体においても同様に確認さ

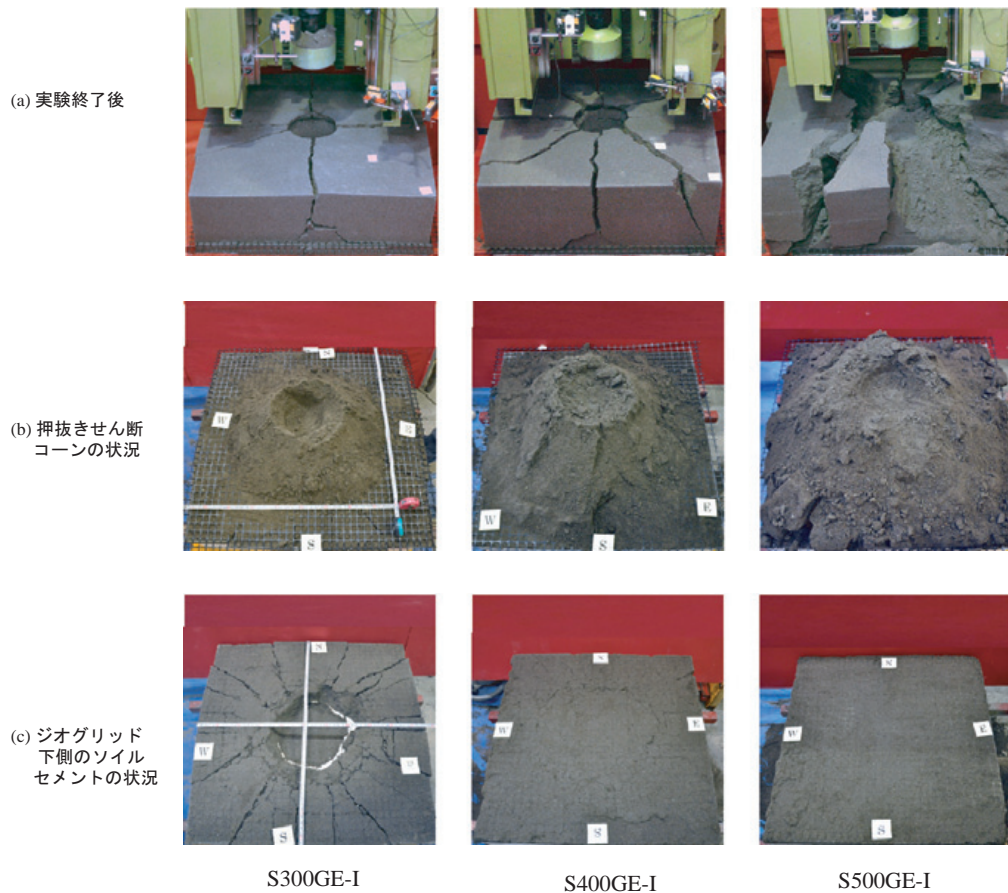


写真-1 衝撃荷重実験終了後における各試験体のソイルセメントの破壊状況

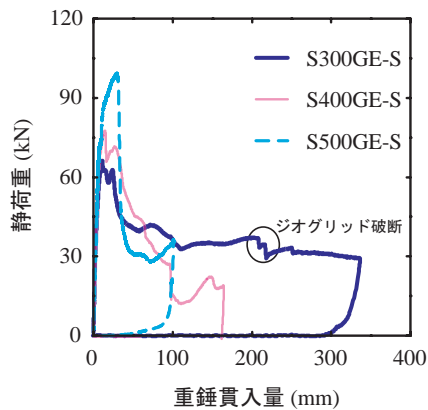


図-5 静荷重 - 重錘貫入量関係

れた。実験時のソイルセメントの圧縮強度は平均 1.1 MPa であった。また、図-4 には、本実験で用いた EPS の応力-ひずみ曲線を示している。

2.2 計測項目

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力、底盤各位置における伝達衝撃応力、および重錘貫入量である。なお、重錘衝撃力は重錘に組み込まれている衝撃荷重測定用ロードセル、伝達衝撃力および伝達衝撃応力はそれぞれ前述の反力計、応力計、重錘貫入量は非接触型レーザ式変位計を用いて測定することとした。

3. 静荷重実験結果

図-5 には、静荷重実験における静荷重と重錘貫入

量との関係を示している。図より、ソイルセメント厚によらず、静荷重は、重錘が 10～30 mm 程度貫入した時点で最大値を示した後急激に低下し、その後重錘貫入量の増加に伴って、徐々に低下する性状を示していることが分かる。また、最大荷重は、ソイルセメント厚が大きい場合ほど大きくなる傾向にある。なお、S300GE-S 試験体において、重錘貫入量 200 mm 程度で載荷荷重が 10 kN 程度低下している。これは、ジオグリッドが破断したことによるものと考えられる。S300GE-S 試験体の場合には、最大荷重到達後、変位量の増加に伴ってジオグリッドの破断が逐次的に進行する傾向にあるのに対し、S400/500GE-S 試験体の場合にはジオグリッドの破断の兆候は見られなかった。これは、S300GE-S 試験体の場合には、ソイルセメント厚が小さく、荷重分散範囲が小さいことによるものと考えられる。

4. 衝撃荷重実験結果

4.1 破壊状況

写真-1 には、衝撃荷重実験終了後における各試験体のソイルセメントの破壊状況を示している。本実験では、ソイルセメント厚に拘わらずソイルセメントが押抜きせん断破壊していることを確認している。ここでは、実験終了後の状況 (写真-1 (a))、押抜きせん断コーン周辺のソイルセメント塊を撤去した後の状況 (写真-1 (b))、

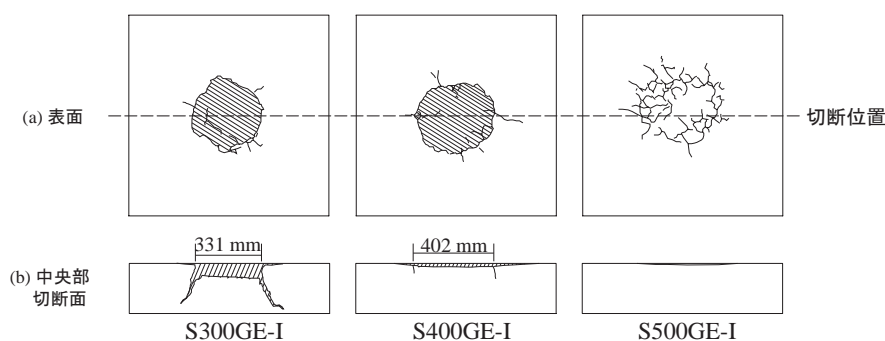


図-6 EPSブロックの衝撃荷重破壊性状

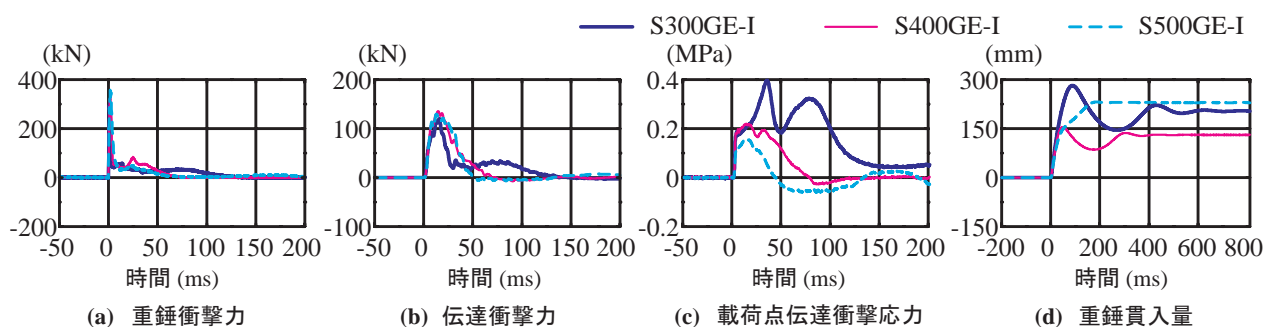


図-7 各種時刻歴応答波形

および押抜きせん断コーンとジオグリッドを撤去した後の状況(写真-1(c))を示している。

写真-1(a)より、いずれの試験体も、ソイルセメント上面に放射状のひび割れが発生し大きく開口していることが分かる。この傾向は、ソイルセメント厚が大きい場合ほど顕著であり、特にS500GE-I試験体の場合にはソイルセメント塊の一部が崩落している。これは、写真-1(b)に示しているように、ソイルセメント厚が大きい場合ほど押抜きせん断コーンの形成範囲が大きくなり、その形成範囲が試験体寸法を上回ったことによるものと考えられる。

また、写真-1(c)より、ジオグリッド下側のソイルセメントは、S300GE-I試験体の場合には試験体中央部が円形状に陥没し、その周辺には放射状にひび割れが発生していることが分かる。一方、S400GE-I試験体の場合には、試験体中央部に円形状のひび割れが発生しているものの陥没は見られず、ほとんど損傷が確認されない。これは、ソイルセメント厚が大きいほど、押抜きせん断コーンの形成範囲が広いことによる衝撃力が分散して作用したことによるものと考えられる。なお、S300GE-I試験体の場合にはジオグリッドが破断していることより、ジオグリッドも緩衝効果の向上に寄与しているものと推察される。

図-6には、EPSブロック表面および中央部切断面の破壊性状を示している。図より、S300/400GE-I試験体の場合には、EPSブロック表面が円形状に陥没しているのに対し、S500GE-I試験体の場合には表面にひび割れが発生する程度であることが分かる。また、中央部切断面を見るとS300GE-I試験体の場合には荷重点近傍が大きく陥没

するとともに、押抜きせん断破壊に至っていることが分かる。これに対して、S400GE-I試験体の場合にはわずかに陥没する程度であり、S500GE-I試験体の場合にはほとんど損傷がみられない。

これらのことより、ソイルセメント厚が大きい場合ほどEPSブロックの損傷が軽微になる傾向にあることが分かる。これは、前述のとおりソイルセメント厚が大きい場合ほど押抜きせん断コーンの形成範囲が広くなるため、衝撃力が分散してEPSブロックに伝達していることによるものと考えられる。なお、押抜きせん断コーンの形成範囲が広い場合には、ジオグリッドによる衝撃荷重分散効果もより効率的に発揮されるものと推察される。

4.2 時刻歴応答波形

図-7には、重錘衝撃力、伝達衝撃力、荷重点直下の伝達衝撃応力(以後、荷重点伝達衝撃応力)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。

図-7(a)より、重錘衝撃力波形は、重錘衝突初期に大きな衝撃力を示し、その後振幅が小さく、継続時間が50~100ms程度の台形状の波形を示していることが分かる。また、ソイルセメント厚の増加とともに重錘衝撃力も増加の傾向を示していることが分かる。

図-7(b)より、伝達衝撃力波形は、S300GE-I試験体の場合には継続時間が30ms程度の正弦半波状の第1波と、振幅が小さく継続時間の長い第2波から構成されていることが分かる。また、S400/500GE-I試験体の場合には、継続時間が60ms程度の正弦半波状の第1波で構成されている。これらのことより、ソイルセメント厚が小さい場合には、押抜きせん断コーンの形成範囲も小さくなるた

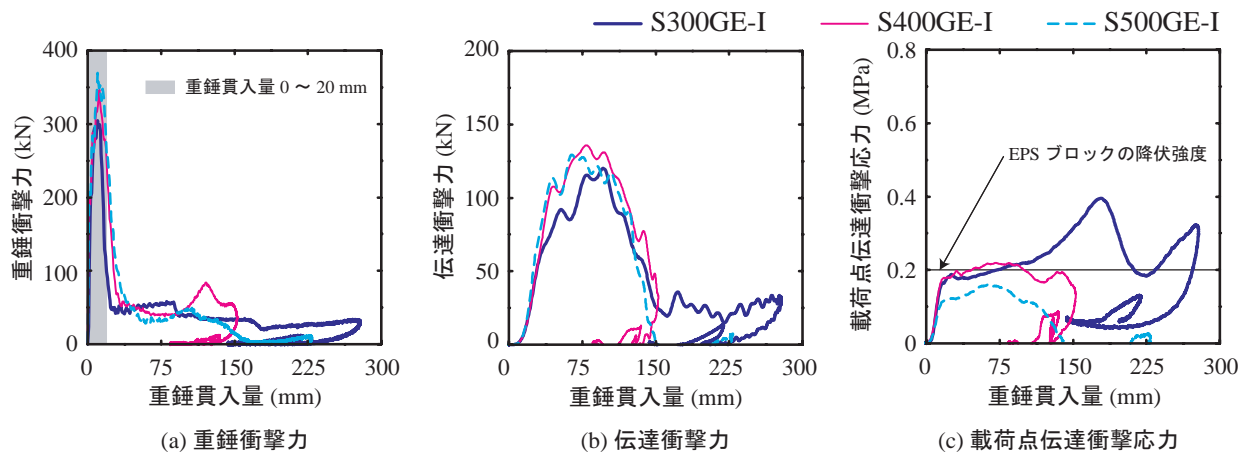


図-8 重錘衝撃力、伝達衝撃力および載荷点伝達衝撃応力 - 重錘貫入量関係

めジオグリッドに作用する衝撃荷重も大きくなり、対応して荷重の分散効果が十分発揮できずに衝撃荷重が集中化してEPSブロックに作用することにより、EPSブロックの変形も大きくなり伝達衝撃力の継続時間が長くなるものと考えられる。

図-7(c)より、載荷点伝達衝撃応力波形は、S400/500GE-I試験体の場合には、最大振幅が0.2 MPa程度までは継続時間が50～80 ms程度の正弦半波状の波形を呈していることが分かる。これに対して、S300GE-I試験体の場合には、最大振幅がS400/500GE-I試験体の場合よりも大きく三角形の第1波が励起した後、継続時間の長い第2波が後続している。これは、EPSブロックの降伏応力が0.2 MPa程度であることより、ソイルセメントの著しい損傷に伴いEPSブロックが大きく変形して底盤に過大な応力が伝達されたことによるものと考えられる。

図-7(d)より、重錘貫入量波形は、S300/400GE-I試験体の場合には重錘衝突とともに正弦半波状の第1波が励起し、その後減衰自由振動状態に至って変位が残留している。これは、ソイルセメントの押抜きせん断破壊に伴って重錘が貫入するとともに、EPSブロックが圧縮変形した後復元したことによるものと考えられる。また、S500GE-I試験体の場合には、重錘貫入量が最大値に到達した後一定値を示している。これは、前述したように押抜きせん断コーンが試験体寸法よりも広範囲に渡って形成されたため、ジオグリッドよりも上側のソイルセメントが壊滅的に崩壊したことによるものである。

4.3 重錘衝撃力、伝達衝撃力および載荷点伝達衝撃応力 - 重錘貫入量関係

図-8には、重錘衝撃力、伝達衝撃力および載荷点伝達衝撃応力と重錘貫入量との関係を示している。

図-8(a)の重錘衝撃力と重錘貫入量との関係より、重錘衝撃力は、重錘が20 mm程度まで貫入する過程において大きな値を示した後一気に除荷状態に至り、その後30～50 kNのほぼ一定の値を保持した状態で貫入量のみが

増大している。これは、重錘が20～50 mm程度貫入した時点でソイルセメントが破壊し、その後EPSブロックの変形により衝撃エネルギーを吸収していることを示しているものと考えられる。

一方、図-8(b)の伝達衝撃力と重錘貫入量の間を見ると、伝達衝撃力は重錘貫入量の増加に伴って緩やかに増大し、最大値に到達後緩やかに低下している。これは、ソイルセメントの破壊に伴い衝撃力がジオグリッドによって分散され、その分散領域でEPSブロックが衝撃エネルギーを徐々に吸収したことによるものと考えられる。また、S300GE-I試験体の場合には、伝達衝撃力が除荷状態に転じた後、再度載荷と除荷の状態を示している。これは、重錘がソイルセメントに形成された押抜きせん断コーンを大きく押し下げることによってジオグリッドが破断し、その後押抜きせん断コーンの圧縮破壊やEPSブロックの押抜きせん断破壊が逐次的に進展したことによるものと考えられる。

図-8(c)の載荷点伝達衝撃応力と重錘貫入量の間を見ると、伝達衝撃応力がEPSブロックの降伏強度である0.2 MPaを超過して0.4 MPa程度に達していることが分かる。このことから、重錘がEPSブロックに深く貫入していることが分かる。

以上のことから、重錘の貫入に伴う三層緩衝構造の応答変状を整理すると、以下のようなものと考えられる。すなわち、

- 1) 重錘が20～50 mm程度貫入する過程でソイルセメントは押抜きせん断破壊に至る。ただし、ジオグリッドの配置により、衝撃荷重は広範囲に分散される。
- 2) ソイルセメントの押抜きせん断コーンの底面が見かけ上の載荷面となりEPSブロックに衝撃力が伝達される。ただし、ジオグリッドの衝撃荷重分散効果により、せん断コーンの底面積は拡大する。
- 3) 重錘貫入量の増大とともに押抜きせん断コーンが押し下げられ、EPSブロックが徐々に変形する。また、

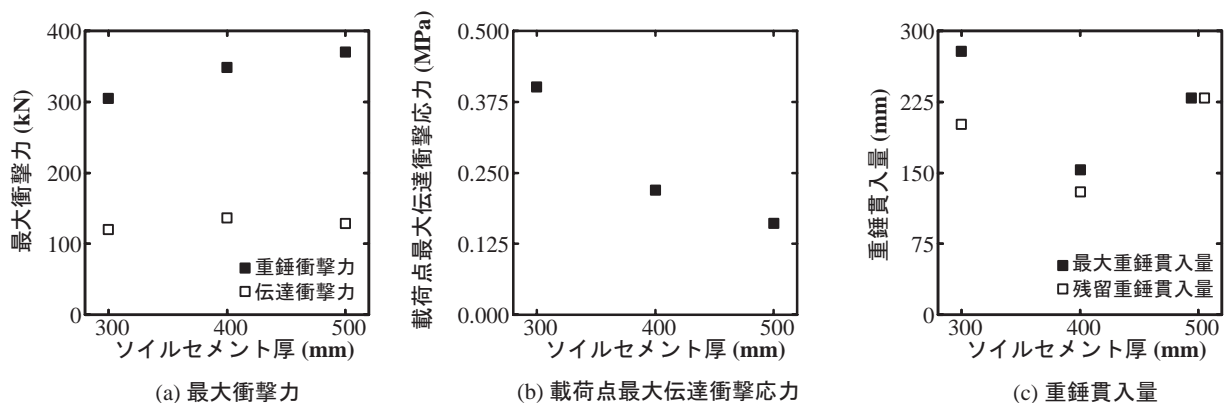


図-9 各種応答値とソイルセメント厚との関係

変形量が過大になるとジオグリッドが破断する可能性がある。

- 4) ジオグリッドが破断に至る場合には、押抜きせん断コーンの圧縮破壊とEPSブロックの押抜きせん断破壊が逐次的に発生する。

である。このことより、提案の三層緩衝構造の緩衝効果は、ソイルセメントの押抜きせん断破壊とジオグリッドによる衝撃荷重の分散効果、およびEPSブロックの変形による衝撃エネルギーの吸収による相乗効果、により発揮されることが明らかになった。

4.4 各種応答値とソイルセメント厚との関係

図-9には、各種応答値とソイルセメント厚との関係を示している。

図-9(a)より、最大重錘衝撃力はソイルセメント厚の増加に伴って増大する傾向を示している。これに対して、伝達衝撃力はソイルセメント厚によらずほぼ同様の値を示している。このことより、ソイルセメントの緩衝効果は、ソイルセメント厚の増加に対応して向上することが分かる。

図-9(b)より、載荷点最大伝達衝撃応力は、ソイルセメント厚が大きい場合ほど小さくなる傾向にある。これは、ソイルセメント厚の増加に伴って、押抜きせん断コーンの形成範囲が広くなるとともに、ジオグリッドの荷重分散効果も発揮され、EPSブロックに伝達される衝撃応力は低減されるためと推察される。

図-9(c)より、最大および残留重錘貫入量は、ソイルセメント厚が400 mmまではソイルセメント厚が大きいほど小さくなる事が分かる。これは、ソイルセメント厚の増加に伴ってソイルセメントの押抜きせん断耐力が向上することによるものと考えられる。なお、ソイルセメント厚500 mmの場合に重錘貫入量が大きく示されているのは、押抜きせん断コーンが試験体寸法よりも広範囲に形成され壊滅的な破壊性状を示したことによるものである。従って、試験体の平面寸法が十分に大きい場合には最大および残留重錘貫入量がさらに小さくなるものと推察される。

5. まとめ

本研究では、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三層緩衝構造の緩衝性能や緩衝メカニズムを明らかにすることを目的に、ソイルセメント厚を3種類に変化させた三層緩衝構造の静荷重および衝撃荷重実験を実施した。

本実験で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) ソイルセメント厚の増加に対応してソイルセメントの押抜きせん断コーンの形成範囲が大きくなる。
- 2) さらに、ジオグリッドの荷重分散効果も相まって衝撃荷重も効果的に分散され、EPSブロックや底盤への伝達衝撃応力が低減される。
- 3) 提案の三層緩衝構造の緩衝効果は、ソイルセメントの押抜きせん断破壊とジオグリッドによる衝撃荷重の分散効果、およびEPSブロックの変形による衝撃エネルギー吸収の相乗効果により発揮される。
- 4) 緩衝性能は、ソイルセメント厚が大きい場合ほど大きいものと考えられる。ただし、ソイルセメント厚500 mmの場合には、押抜きせん断コーンの形成範囲が試験体寸法よりも大きいため、試験体の平面寸法が大きい場合にはより大きな緩衝性能が発揮されるものと推察される。

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) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計，平成10年11月
- 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，2002.3，pp. 1567-1578