

# 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位置の影響

鈴木健太郎<sup>\*1</sup>・牛渡裕二<sup>\*2</sup>・岸 徳光<sup>\*3</sup>・栗橋祐介<sup>\*4</sup>

要旨: 本研究では,ソイルセメントを利用した三層緩衝構造の芯材ジオグリッドの効果的な配置位置を決定するための基礎資料を得ることを目的に,ソイルセメント内部の上端近傍,下端近傍,上下端近傍にジオグリッドを配置した三層緩衝構造に関する重錘落下衝突実験を実施した。検討の結果,1)最大伝達衝撃力は,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ほぼ同程度の値を示し,かつ最大重錘衝撃力の1/2~1/3程度に低減されること,2)緩衝工としての適用性は,ソイルセメント内部の上端にジオグリッドを配置する場合は下端および上下端に配置する場合と比較して入力エネルギーの上限値が小さいこと,等が明らかとなった。  
キーワード: ソイルセメント,三層緩衝構造,ジオグリッド配置位置

## 1. はじめに

北海道の国道は,その約7割が山岳部や海岸線に建設されており,急峻な地形の中を通過している。そのため,道路防災総点検で危険と判断された落石崩壊ランクI,IIの箇所数は1000カ所以上にのぼる。一方,近年よく見られる局地的な豪雨などの異常気象や北海道のような厳寒地特有の凍結融解の繰り返しによる経年劣化の進行に伴い落石規模の大型化も認められ,安全性の向上が強く求められている。特に防災点検箇所の多くで落石防護擁壁工が建設されているものの,写真-1に示すようなせん断破壊に至る事例も多く,これらの耐衝撃性向上が課題となっている。課題解決のためには種々の対策が考えられるが,新設する場合には,既設構造物の撤去も含め,多大な費用と時間を要する事から,既設構造物を有効活用した安価で早期実施が可能な対策工法の開発が急務と考えられる。

以上のことから,著者らの研究グループは,ロックシェット頂版上に設置する三層緩衝構造(敷砂+RC版+EPSブロック)<sup>1)</sup>や落石防護擁壁背面に設置する二層緩衝構造(RC版+EPSブロック)<sup>2)</sup>の緩衝メカニズム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(以後,グリッド)+EPSブロック」から構成される新たな三層緩衝構造を考案している。本研究では,ソイルセメント中に配置するグリッドの効果的な配置位置を決定するための基礎資料を得ることを目的に,大きさが1m四方の緩衝システムに関する静的載荷試験および重錘落下衝突実験を実施した。なお,本論文では,ソイルセメント中にグリッドを埋設することを条件に,それぞれソイルセメントの上端近傍,下端近傍,上下端近傍に配置し,比較検討を行うこととした。



写真 - 1 落石による擁壁の損傷

## 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,伝達衝撃応力用の起歪柱型ロードセル(受圧面の直径20mm,定格容量7MPa)(以後,応力計と記述)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,反力計と記述)から構成されている。なお,反力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,応力計は図に示すように底盤中央部より対称軸に沿って50mm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-2には,重錘落下衝突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400kg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200mmであり,底面には片当たり防止のため2mmのテーパが設けられている。また,静載荷実験は,鋼製フレームに設置された

\*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 次長 (正会員)

\*3 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)

\*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)

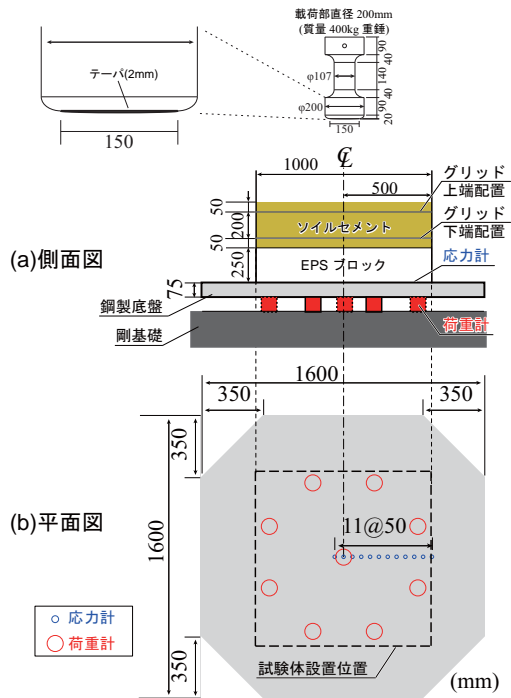


図 - 1 実験装置概要

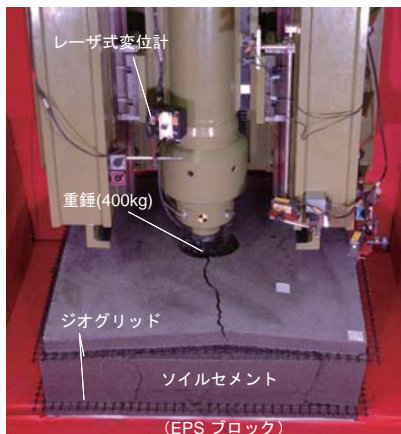


写真 - 2 衝撃実験状況 (W-V9.0)

油圧載荷装置の先端に重錘落下衝突実験で使用した重錘の先端部を取り付けて実施している。

表 - 1 には、実験ケース一覧を示している。実験は落石衝突部を想定した 1m 四方の緩衝システムを対象とした。試験体は、ソイルセメント厚さを 300 mm，EPS ブロック厚さを 250 mm とし、ソイルセメント中に芯材としてのグリッドを配置している。実験ケースは、ソイルセメント下端かぶりのみを 50 mm 取ってグリッドを配置する場合（以後、下端配置）を 7 体、ソイルセメント上端かぶりのみを取ってグリッドを配置する場合（以後、上端配置）を 4 体、上下端かぶりを各 50 mm 取ってグリッドを配置する場合（以後、上下端配置）を 4 体の 3 種類全 15 体とした。最終衝突速度は、後述する実験結果の破壊性状より、上端配置の場合のみ  $V = 6.0 \text{ m/s}$  ( $E = 7.2 \text{ kJ}$ ) までとした。試験体は、EPS ブロック上にソイルセメント打設用

表 - 1 実験ケース一覧

試験体名	グリッド配置位置 (かぶり $c$ (cm))	衝突速度 $V$ (m/s)	入力エネルギー $E$ (kJ)
L-S	下端 (5)	(静的)	-
L-V4.0		4.0	3.2
L-V5.0		5.0	5.0
L-V6.0		6.0	7.2
L-V7.0		7.0	9.8
L-V8.0		8.0	12.8
L-V9.0		9.0	16.2
H-S	上端 (5)	(静的)	-
H-V4.0		4.0	3.2
H-V5.0		5.0	5.0
H-V6.0		6.0	7.2
W-S	上端 (5) + 下端 (5)	(静的)	-
W-V6.0		6.0	7.2
W-V8.0		8.0	12.8
W-V9.0		9.0	16.2

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 ( $\text{g/cm}^3$ )	吸水率 (%)	最適含水比 (%)
登別	中粒砂	2.6	2.79	2.46	16

(b) ジョグリッド

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 ( $\text{kg/m}^3$ )	発泡倍率	製造法
20	50.0	型内発泡法

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  $w = 15\%$  の砂に早強ポルトランドセメント  $100 \text{ kg/m}^3$  を使用して製作した。試験体打設後は実施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。

表 - 2 には、実験に用いられた各材料の物性値一覧を示している。また、試験体打設時にソイルセメントの強度確認を目的とし、製作した円柱供試体の一軸圧縮試験結果および本試験体の EPS ブロックと同形状の EPS ブロックのみの静載荷試験結果を図 - 2 に示す。実験時におけるソイルセメントの一軸圧縮強度は  $0.74 \sim 1.26 \text{ MPa}$  であった。

実験ケース名は、グリッド配置位置（下端配置：L，上端配置：H，上下端配置：W）を示し、静載荷実験は実験ケース名の末尾に S（静載荷）を付し、重錘落下衝突実験は重錘衝突速度を付してハイフンで結んで示している。

測定項目は、静載荷荷重および重錘衝撃力、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組み込ま

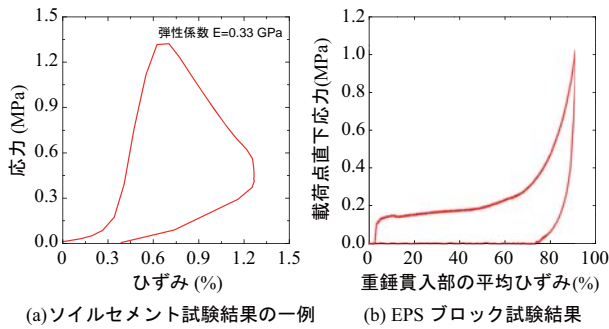


図 - 2 応力-ひずみ曲線

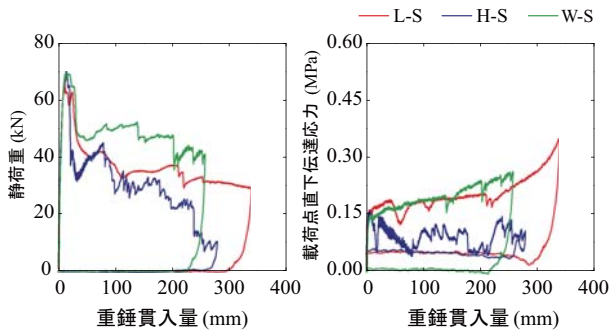


図 - 3 静荷重 - 貫入量関係

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個の反力計、底版上への伝達衝撃応力分布は12個の応力計、重錘貫入量はレーザ式変位計を用いて測定している。

### 3. 静載荷実験結果

#### 3.1 静荷重 - 貫入量関係

図 - 3には、各ケースの静載荷実験時における載荷荷重（以後、静荷重）および載荷点直下の伝達応力と重錘貫入量の関係を示している。静荷重と重錘貫入量の関係より、いずれのケースも最大荷重までの剛性勾配はほぼ同様の性状を示し、最大荷重は66～70 kN程度とほぼ同程度であることが分かる。最大荷重到達後、グリッドを上下端に配置したW-Sが最も大きな荷重を保持した状態で重錘の貫入量が増加している。グリッドを上端のみに配置したH-Sは荷重減少量が他のケースよりも大きく、重錘の貫入に伴い荷重が徐々に減少する。

載荷点直下の伝達応力と重錘貫入量の関係より、載荷初期に0.15 MPa程度まで伝達応力が増加しているが、上端配置であるH-Sは他のケースと比較して伝達応力が増加していないことが分かる。これは、後述の破壊性状から分かるとおり、H-SのEPSブロックがソイルセメントと一体となって、十字に割裂したため、載荷点直下に応力が作用しなかったことによるものと考えられる。

#### 3.2 破壊性状

図 - 4には、静載荷実験後の破壊状況写真およびEPSブロック中央部切断面のひび割れ図を示している。写真は上部ソイルセメントを撤去した状態で、上端配置であるH-Sは上端グリッドの上面、それ以外は下端グリッド

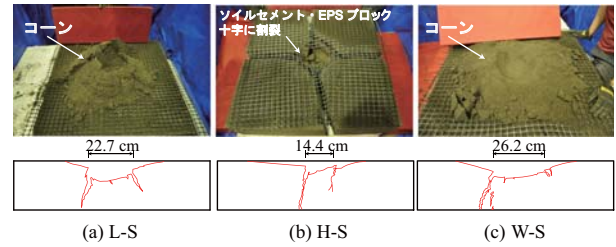


図 - 4 静載荷実験終了後における押抜きせん断コーンおよびEPSブロック断面のひび割れ状況

の上面を撮影している。写真より、下端配置および上下端配置したL-SおよびW-Sの場合には、ソイルセメント内に円錐状のコーンが形成されていることが分かる。一方、上端配置したH-Sの場合には、ソイルセメントおよびEPSブロックが平面的に十字に割裂している。

また、EPSブロックの中央部切断面に着目すると、下端配置であるL-Sおよび上下端配置であるW-Sの場合には、ソイルセメントのみならずEPSブロックにおいても押抜きせん断コーンが形成され、終局に至っていることが分かる。上端配置であるH-Sの場合には、図 - 4(b)の写真およびEPSブロックひび割れ図からも分かるとおり、EPSブロックがソイルセメントと同位置において十字に割裂している。これは、引張力が作用するソイルセメント下端にグリッドが配置されていないことから、ソイルセメント下端が拘束されずソイルセメントが十字に割裂し、更にEPSブロックにおいてもソイルセメントとの付着により十字に割裂したものと推察される。

これより、下端配置であるL-Sおよび上下端配置であるW-Sの場合には、ソイルセメント内に形成された押抜きせん断コーンが下端のグリッドを押し下げ、重錘貫入に抵抗することにより上端配置であるH-Sよりも大きな荷重レベルを保持できたものと考えられる。

### 4. 重錘落下衝撃実験結果

#### 4.1 破壊性状

図 - 5には、衝撃実験終了後における各試験体のソイルセメント部およびEPSブロックの破壊状況を示している。ここでは、実験終了直後（図 - 5(a)）、押抜きせん断コーン周辺のソイルセメント撤去後（図 - 5(b)）、押抜きせん断コーンとグリッド撤去後（図 - 5(c)）、EPSブロック表面（図 - 5(d)）およびEPSブロック中央部切断面（図 - 5(e)）の破壊性状について示している。

図 - 5(a)より、いずれの供試体もソイルセメント上面に放射状のひび割れが発生していることが分かる。ひび割れ密度および幅は、衝突速度の増加に伴って増大する傾向にあり、その傾向は下端配置のみの場合に顕著に現れている。また、重錘貫入量も、衝突速度の増加に伴い大きくなる傾向にあり、下端配置のみの場合で顕著である。これは、重錘衝突面近傍にグリッドを配置した上端および上下端配置の供試体は、グリッドの拘束効果によ

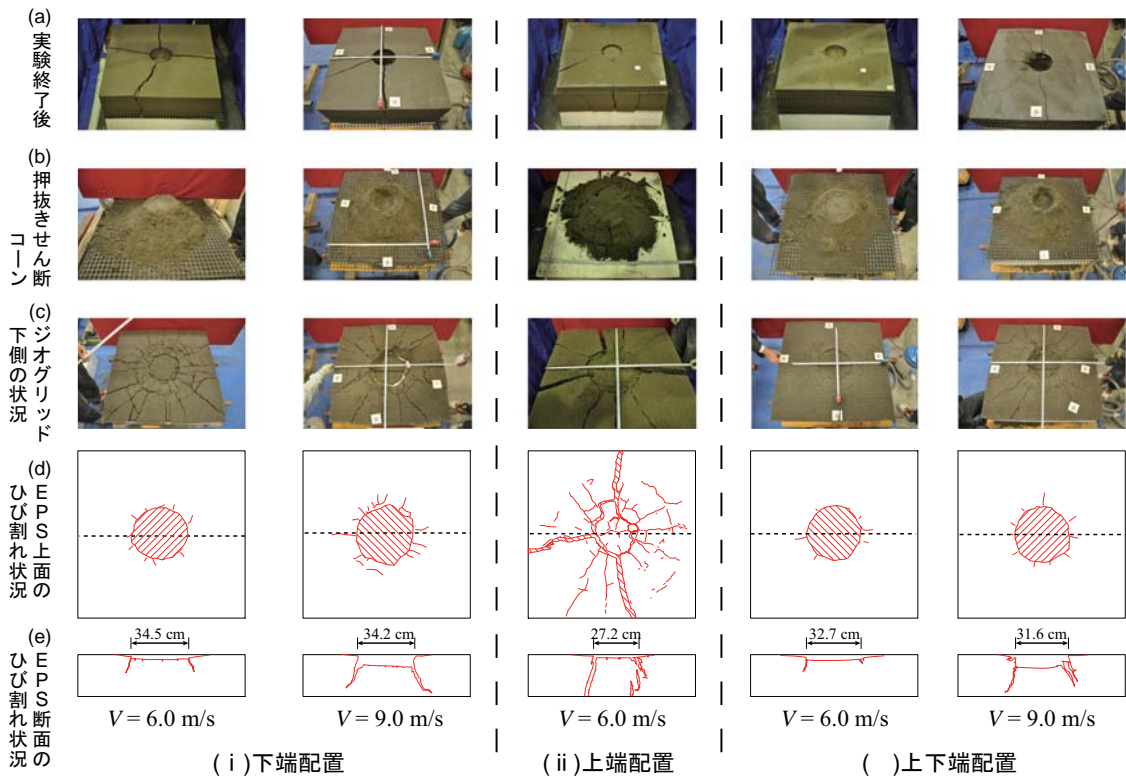


図 - 5 破壊状況（衝撃実験）

— L — H — W

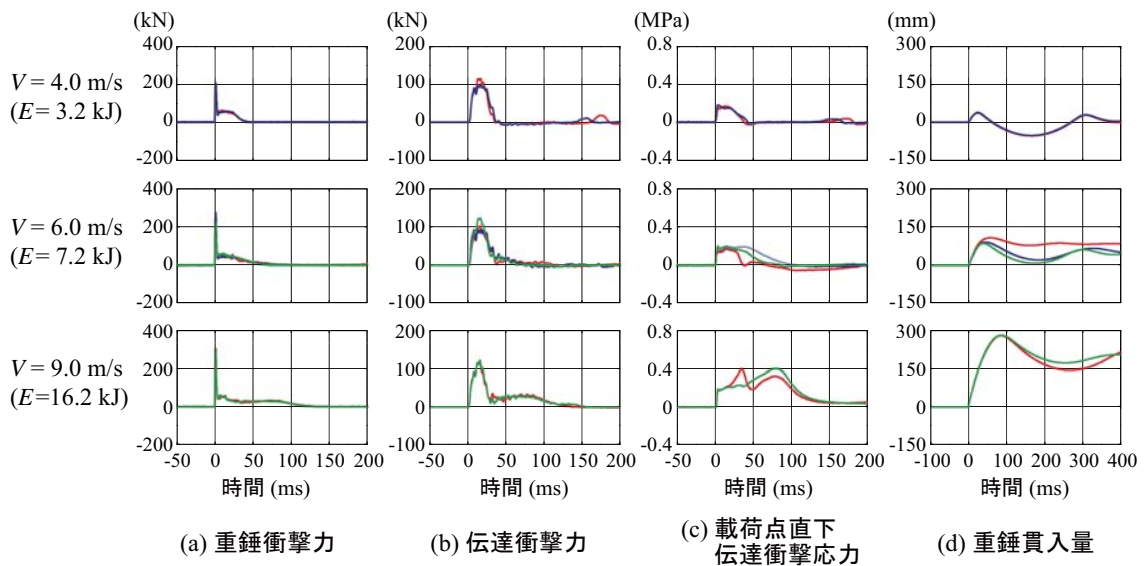


図 - 6 各種応答波形（衝撃実験）

り、ひび割れ密度、幅および重錘貫入量が抑制されたものと推察される。

図 - 5(b)より、いずれの供試体もソイルセメント内部には押抜きせん断コーンが形成されていることが分かる。押抜きせん断コーンの形成範囲に大きな差は認められないが、速度の増加に伴い押抜きせん断コーンが粉碎し、砂状化する傾向にある。このことより提案の緩衝構造は、ソイルセメントが砂状化することによるエネルギー消散も期待できるものと考えられる。

図 - 5(c)より、上端配置の場合以外はソイルセメント上面に生じたひび割れとは異なり、細かい放射状のひび

割れが発生していることが分かる。これは、下端近傍に配置したグリッドの荷重分散効果によって、広く円形状にEPSブロックを押し下げたためと推察される。上端配置の場合は、押抜きせん断コーンの他、静載荷実験と同様に十字に割裂していることが分かる。

図 - 5(d)および(e)より、上端配置の場合を除くすべてのケースで押抜きせん断コーンがEPSブロックに貫入していることが分かる。これは、下端グリッドの拘束効果によりEPSブロックに作用するコーンの荷重面が拡大し、EPSブロックが割裂しないためと推察される。上端配置の場合には、ソイルセメントに押抜きせん断コーンが形

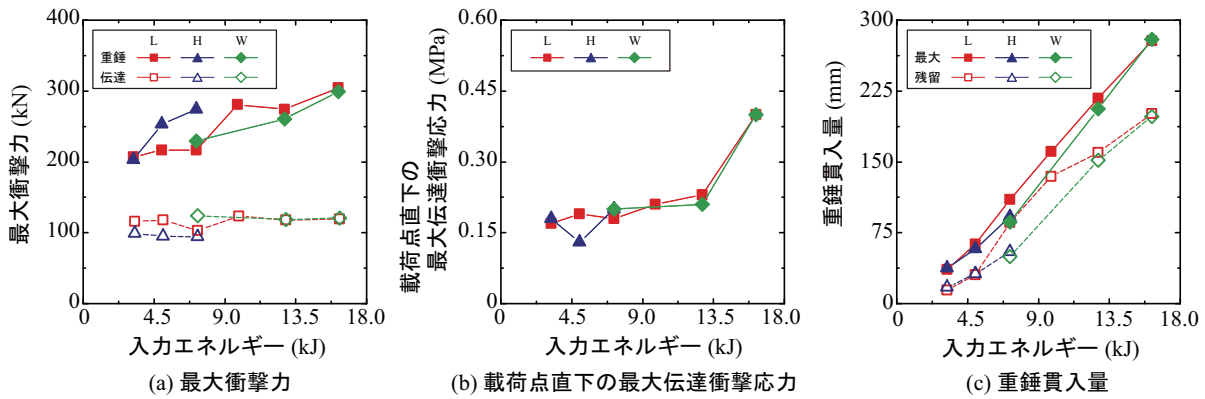


図 - 7 各応答値と入力エネルギーの関係 (衝撃実験)

成され、そのコーン底面によってEPSブロックが押し込まれて陥没する。また、EPSブロックもソイルセメントと同位置で十字に割裂していることから、EPSブロックが摩擦力により、ソイルセメントの挙動に追従し、緩衝効果が十分に発揮できない状況にあるものと推察される。

以上より、上記の緩衝工の破壊メカニズムは、

- i) 重錘がソイルセメントに衝突し、鉛直方向に重錘衝撃力が作用する、
- ii) 重錘がソイルセメント内部に貫入することにより、上端配置の場合には、グリッドによりソイルセメント上端が拘束されているため下端においてひび割れが開き、ソイルセメントを外側に押し出す水平方向の力に変換される。下端および上下端配置の場合には、ソイルセメント下端のひび割れ開口がグリッドにより拘束されているため、水平方向の力はグリッドが負担する、
- iii) 上端配置の場合には、ソイルセメントとEPSブロックの界面に生じる摩擦力によりEPSブロックに水平力が作用し、EPSブロックがソイルセメントと同じ位置で割裂する。下端および上下端配置の場合には、ソイルセメント内部に押抜きせん断コーンが形成され、EPSブロックに円形状に鉛直力が作用し、EPSブロックも押抜きせん断型の破壊性状を示す、であるものと考えられる。

#### 4.2 時刻歴応答波形

図 - 6には、衝突速度  $V = 4.0, 6.0, 9.0$  m/s ( $E = 3.2, 7.2, 16.2$  kJ)における (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および (d) 重錘貫入量の各波形分布を示している。図 - 6(a)より、衝突速度にかかわらず最大応答値は  $t = 2 \sim 3$  ms 程度で生じており、衝突速度の増加に伴い最大応答値も増加する傾向が示されている。最大荷重を示す第1波は荷重継続時間が4ms程度である。その後、荷重継続時間が30~100ms程度の第2波が生じており、重錘衝突速度の増加に対応して継続時間が長く示されている。

図 - 6(b)より、伝達衝撃力波形は30ms程度の正弦半波

状の波形が励起している。その後、衝突速度の増加に対応して2波目の波形が励起している。継続時間は衝突速度の増加に対応して増加の傾向にある。また、最大伝達衝撃力は重錘衝突速度にかかわらず大略類似していることが分かる。なお、重錘衝撃力および伝達衝撃力の応答波形はグリッドの配置位置にかかわらずほぼ等しい分布を示している。

図 - 6(c)より、載荷点直下における伝達衝撃応力の最大応答値は、衝突速度  $V = 9.0$  m/s ( $E = 16.2$  kJ)の場合を除いて  $\sigma = 0.2$  MPa程度に抑制されており、図 - 2(b)から分かるとおりEPSブロックが有する高ひずみ能力による緩衝効果が十分発揮されていることが分かる。 $V = 9.0$  m/s ( $E = 16.2$  kJ)の場合には入力エネルギーが大きいため、L-V9.0の場合には  $t = 40$  ms程度、W-V9.0の場合には  $t = 80$  ms程度で  $\sigma = 0.4$  MPa程度の応力が生じていることが分かる。波動継続時間に関しては、入力エネルギーの増加に対応して増加する傾向にあることが分かる。

図 - 6(d)より、重錘貫入量波形はいずれも正弦半波状の波形性状を示しており、各衝突速度ともに最大応答値および周期が大略同様となっている。

#### 4.3 各種応答値と入力エネルギーの関係

図 - 7には、各種応答値と入力エネルギーの関係を示している。図 - 7(a)より、最大重錘衝撃力は入力エネルギーの増加に対応して増加の傾向を示していることが分かる。一方、最大伝達衝撃力は、入力エネルギーにかかわらずほぼ同程度となっており、かつ最大重錘衝撃力の1/2~1/3程度に低減されていることが分かる。これより、グリッドの配置位置にかかわらず、EPSブロックの緩衝効果が有効的に発揮されるものと推察される。なお、上端配置の場合にはEPSブロックが十字に割裂したため、 $V = 6.0$  m/s ( $E = 7.2$  kJ)を最終衝突速度とした。

図 - 7(b)より、載荷点直下の最大伝達衝撃応力は、下端および上下端配置のケースに着目すると、 $V = 8.0$  m/s ( $E = 12.8$  kJ)までは  $\sigma = 0.20$  MPa程度であり、十分に荷重緩衝効果が発揮されていることが分かる。また、 $V = 9.0$  m/s ( $E = 16.2$  kJ)では  $\sigma = 0.40$  MPa程度まで増加している

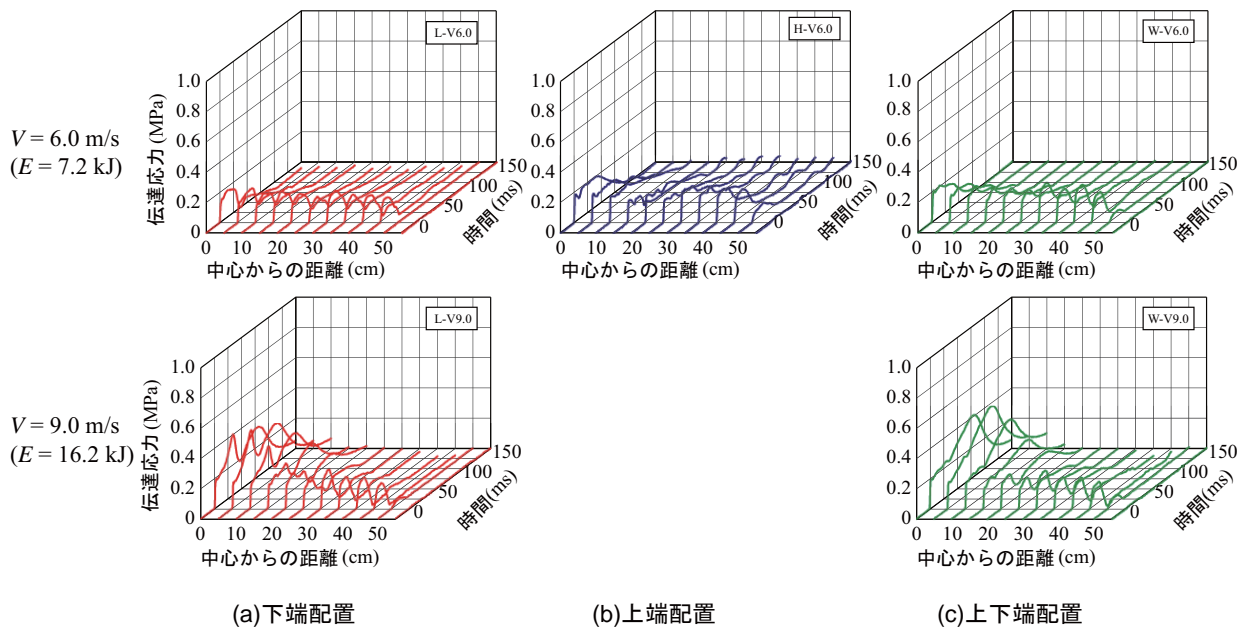


図 - 8 伝達衝撃応力分布波形 (衝撃実験)

ことから、グリッドが破断しかつ重錘がEPSブロックに深く貫入しているものと推察される。従って、本実験の条件下では、下端配置および上下端配置のケースにおいて、 $V = 8.0 \text{ m/s}$  ( $E = 12.8 \text{ kJ}$ ) 程度が適用限界であるものと推察される。

図 - 7(c) 図より、最大貫入量および残留貫入量は全てのケースで入力エネルギーの増加とともにほぼ線形に増加し、大きな差は見受けられない。

#### 4.4 伝達衝撃応力分布

図 - 8 には、 $V = 6.0 \text{ m/s}$  ( $E = 7.2 \text{ kJ}$ ) および  $V = 9.0 \text{ m/s}$  ( $E = 16.2 \text{ kJ}$ ) の場合における伝達衝撃応力分布を比較して示している。 $V = 6.0 \text{ m/s}$  ( $E = 7.2 \text{ kJ}$ ) の場合には、いずれも伝達衝撃応力が  $\sigma = 0.2 \text{ MPa}$  程度であり、EPSブロックに広範囲に応力が分散していることから、三層緩衝構造の効果が発揮されていることが分かる。 $V = 9.0 \text{ m/s}$  ( $E = 16.2 \text{ kJ}$ ) の場合には、下端および上下端配置ともに载荷点近傍の応力が大きな値を示しており、両者共にほぼ同様の伝達衝撃応力分布性状を示すことが明らかとなった。

#### 5. まとめ

本研究では、ジオグリッドの効果的な配置位置を決定するための基礎資料を得ることを目的に、大きさが1m四方の緩衝システムに関する重錘落下衝突実験を実施した。本論文では、ソイルセメントの中にジオグリッドを埋設することを条件に、上端近傍、下端近傍、上下端近傍に配置し、比較検討を行うこととした。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。

静載荷実験より：

- 1) 本実験範囲内において、配置位置にかかわらず、静的耐力はほぼ同程度の値を示すものの、上端配置の

場合は下端および上下端配置の場合と比較して大きな荷重レベルを保持できない。

- 2) 下端および上下端配置の場合には、ソイルセメントおよびEPSブロックに押抜きせん断コーンが形成される。上端配置の場合には、押抜きせん断コーンが形成されずにソイルセメントとEPSブロックが同位置において十字に割裂して終局に至る。

重錘落下衝突実験より：

- 1) 最大伝達衝撃力は、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ほぼ同程度の値を示し、かつ最大重錘衝撃力の1/2～1/3程度に低減される。
- 2) 最大伝達衝撃力は、下端および上下端配置の場合、 $V = 8.0 \text{ m/s}$  ( $E = 12.8 \text{ kJ}$ ) までは  $\sigma = 0.2 \text{ MPa}$  程度となる。また、両者共にほぼ同様な伝達衝撃応力分布性状を示す。
- 3) 本実験範囲内において、上端配置の場合にはソイルセメント下端の拘束効果が小さく、EPSブロックの脆性的な破壊を抑制することはできない。また、緩衝工としての適用性は下端および上下端配置の場合と比較して入力エネルギーの上限値が小さい。

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) (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