

重錘落下時におけるソイルセメントを用いた三層緩衝構造の緩衝性に関する数値シミュレーション

Numerical simulation on absorbing behavior of TLAS using soil-cement under weight falling

平田健朗*, 小室雅人**, 牛渡裕二***, 川瀬良司****, 岸 徳光*****

Takero Hirata, Masato Komuro, Yuji Ushiwatari, Ryoji Kawase, and Norimitsu Kishi

*室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

**博(工) 室蘭工業大学大学院准教授 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博(工) (株) 構研エンジニアリング 防災施設部 部長 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

****博(工) (株) 構研エンジニアリング 常務取締役 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

*****工博 釧路工業高等専門学校 校長 (〒084-0916 釧路市大楽毛西 2 丁目 32 番 1 号)

Key Words : soil-cement, geogrid, EPS, finite element analysis

キーワード：ソイルセメント，ジオグリッド，EPS，有限要素解析

1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が大部分を占め、急峻な地形を呈していることから、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている場合が多い。このような地理条件の下に整備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、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、既往の研究において、落石防護擁壁用緩衝構造として、二層緩衝構造（表層材に RC 版，裏層材に発泡スチロール（以後，EPS ブロック））を提案し、大型衝撃実験や数値解析を実施して、その緩衝効果を検証するとともに合理的な設計法を確立し^{1),2)}、現在、実用化されている。その後、より費用対効果に優れた新しい緩衝構造として、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 ブロックを用いた三層緩衝構造（図-1 参照）を提案し、その緩衝性能を検証するために実験的検討を行っている^{3)~5)}。その結果、提案の緩衝構造は、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および EPS ブロックの変形によるエネルギー吸収の相乗効果により、緩衝効果が効率的に発揮され、優れた性能を有することを明らかにしている。今後、この緩衝システムに関して合理的な設計法を確立し、効率よく実用化を図るためには、実験的研究は勿論のこと、パラメータを種々変化させた場合に対する検討を行うための数値解析的研究も併用して、効率的に検討を行う必要があると判断される。

このような背景より、本研究ではソイルセメントにジオ

グリッドを埋設し、かつ EPS ブロックと併用した場合の緩衝効果を適切に再現可能な解析モデルの構築を目的として、三次元弾塑性有限要素解析を試みた。数値解析結果の妥当性に関しては、別途実施した重錘落下衝撃実験結果³⁾との比較により行っている。ここでは、重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量に着目して比較を行うこととした。なお、本数値解析には有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (Ver.971)⁶⁾を使用した。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要

図-2 には、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 個の反力測定用ロードセルから構成されている。

実験は、本装置を剛基礎上に設置し、ソイルセメントにジオグリッドを埋設し、かつその下方に EPS ブロックを設置した試験体（以後、三層緩衝構造）について、重錘を所定の高さより自由落下させることにより実施し

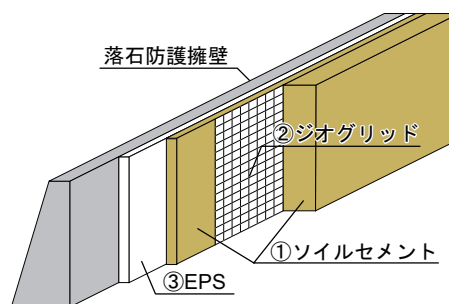


図-1 提案の三層緩衝構造

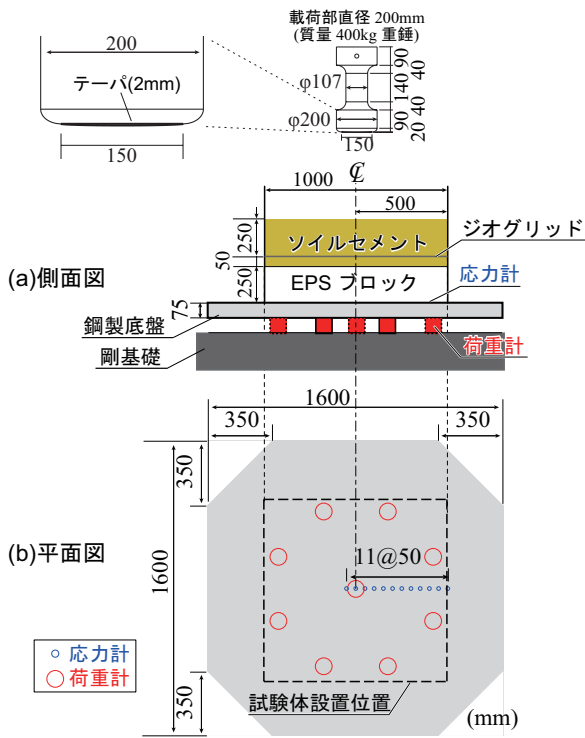


図-2 実験装置概要

表-1 ジオグリッドの材料物性値

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

ている。なお、重錘質量は 400 kg、先端部直径は $\phi 200$ mm であり、その底面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。

ソイルセメントは、比較的粒度分布が広い細骨材と早強ポルトランドセメントを用いて、細骨材の含水比を 15 % (最適含水比) とし、単位セメント量を 100 kg/m^3 として打設した。試験体打設後の養生方法は、実施工と同様に屋外での養生とし、試験体をブルーシートで覆い 7 日間養生した。図-3 (a) には、ソイルセメントの静的圧縮試験結果から得られた応力-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の平均圧縮強度は 1.1 MPa であった。

EPS ブロックには密度が 20 kg/m^3 、発泡倍率が 50 倍の型内発泡法のものを用いた。図-3 (b) には別途実施した EPS ブロックの静載荷実験結果を示している。

表-1 には、本実験で使用したジオグリッドの材料物性値を示している。また、図-3 (c) には別途実施した静載荷実験結果を示している。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃反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、伝達衝撃反力は底盤を支持している 9 個のロードセル、および重錘貫入量はレーザ式変位計を用いて測定することとした。

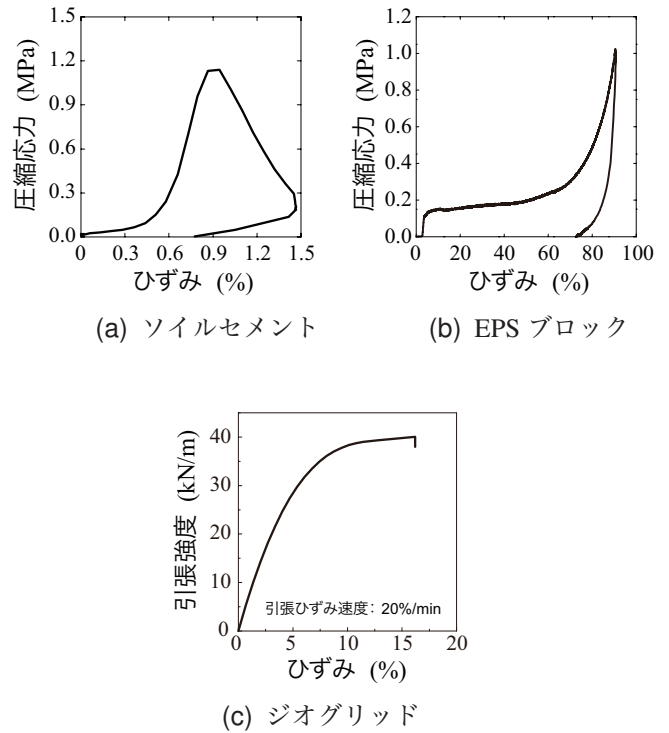


図-3 応力-ひずみ関係 (静載荷実験結果)

本数値解析では、重錘衝突速度が $V = 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 7.5, 8.0 \text{ m/s}$ とした場合の実験条件を対象に数値解析を実施し、実験結果との比較によって適切な材料モデルの構築を行った。

2.2 有限要素モデル

図-4 には、本研究で対象とした数値解析モデルの要素分割状況を示している。なお、この数値解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。総要素数および総節点数は、それぞれ約 130,000 および約 120,000 である。使用した要素は、ソイルセメント、EPS ブロック、重錘および底盤に関しては 8 節点固体要素を、またソイルセメントに埋設するジオグリッドに関しては 4 節点シェル要素を使用した。なお、実際のジオグリッドはメッシュ状であるが、本数値解析ではその軸剛性が等価となるようにシェル要素でモデル化している。また、ソイルセメントについては、押し抜きせん断破壊等の破壊を再現するために要素削除 (エロージョン) 法を適用することとし、数多くの予備解析結果を踏まえて、要素長 10 mm の立方体と設定した。

さらに、実際の実験と同じ状況を再現するために、(1) 重錘とソイルセメント間、(2) EPS ブロックと底盤間には、面と面の接触・剥離を伴うすべりを考慮した接触面を導入している。また、(1) ソイルセメントとジオグリッド間、および (2) かぶりソイルセメントと EPS ブロック間に関しては、接触面の条件として両者を剛結とする場合 (タイド条件) として解析を実施している。

解析における減衰定数は、質量比例分のみを考慮するもの

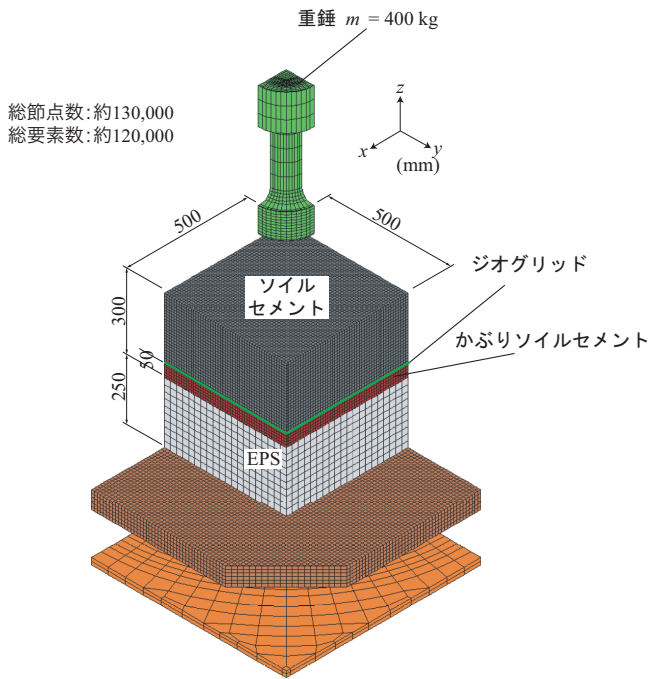


図-4 有限要素モデル

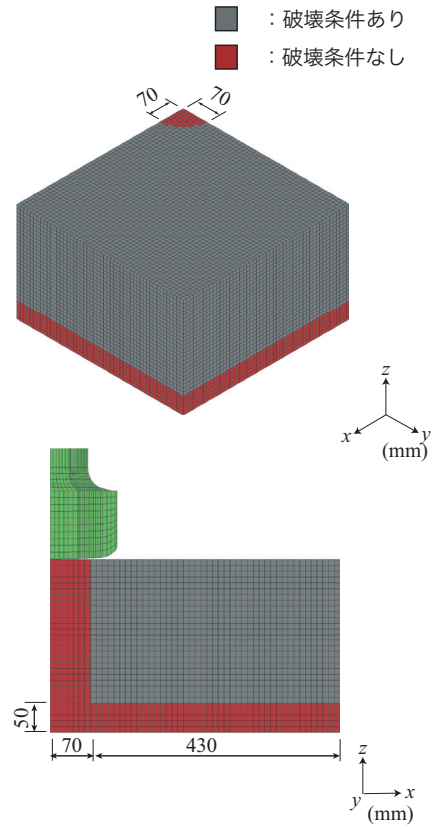


図-6 破壊条件の適用状況

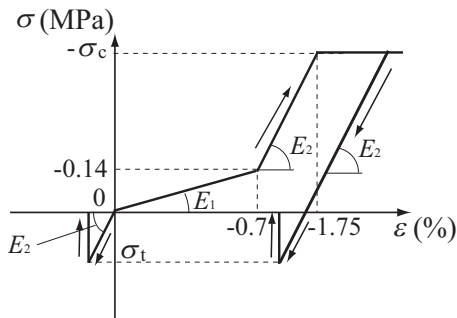


図-5 ソイルセメントの応力-ひずみ関係

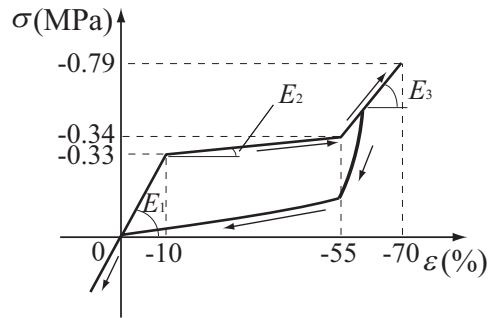


図-7 EPS ブロックの応力-ひずみ関係

とし、鉛直方向最低次固有振動数に対して1%と設定した。

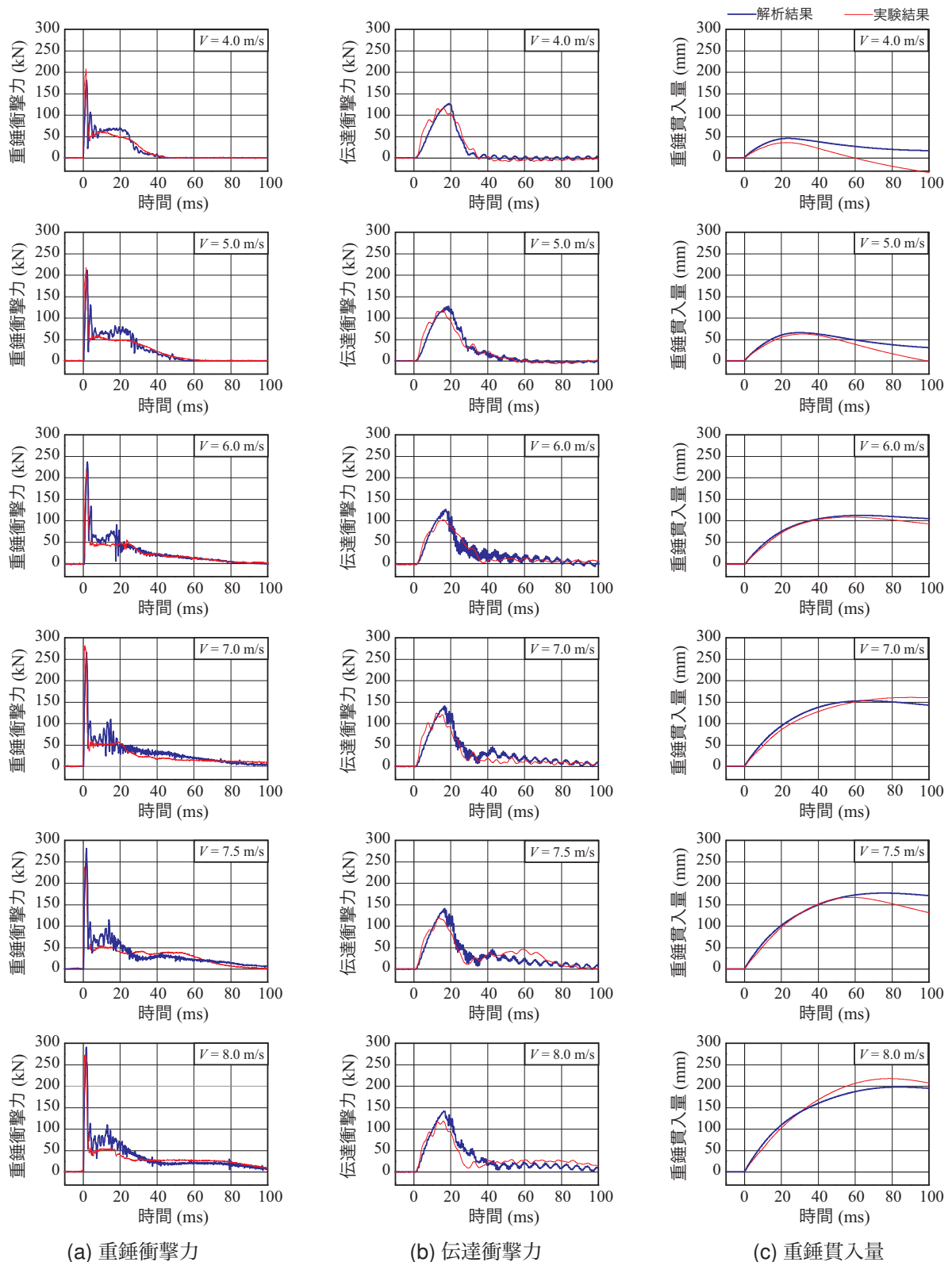
2.3 材料構成則

図-5には、ソイルセメントの応力-ひずみ関係を示している。ソイルセメントの応力-ひずみ関係は、配合や重錘衝突速度等に大きく影響を受ける。本数値解析では、圧縮強度や弾性係数を変化させた数多くの予備解析結果を踏まえて図に示すような弾塑性体モデルを適用した。なお、各物性値は、一次弾性係数 $E_1 = 20$ MPa、二次弾性係数 $E_2 = 750$ MPa、圧縮強度 $\sigma_c = 8.0$ MPa、引張強度 $\sigma_t = 0.15$ MPa、ポアソン比 $\nu_s = 0$ である。また、重錘によるソイルセメントのせん断破壊を再現するために、予備解析結果を踏まえ、図-6に示すように、かぶり部および載荷点直下の半径約70 mm以外の範囲には、最大主ひずみが $50,000 \mu$ に達した段階で要素が削除される破壊条件を付加している。

図-7には、EPSブロックの応力-ひずみ関係を示している。EPSブロックの応力-ひずみ関係は、重錘衝突速度等に大きく影響を受けるものと考えられる。本数値解析で

は、静的な応力-ひずみ関係を基本として、弾性係数等を変化させた予備解析結果を踏まえて図に示すような除荷時のエネルギー消失を考慮した非線形弾塑性体モデルを適用した。なお、各物性値は、一次弾性係数 $E_1 = 3$ MPa、二次弾性係数 $E_2 = 0.03$ MPa、 $E_3 = 3$ MPa、ポアソン比 $\nu_e = 0$ である。また、除荷に関しては、単位体積当たりのひずみエネルギーに比例して挙動するように設定した。

ジオグリッドに関しては、明確な弾性係数やポアソン比が不明であることより、別途実施した引張試験結果をもとに材料物性値を決定した。なお、ジオグリッドは弾塑性体と仮定しており、密度 ρ_g 、厚さ t_g 、弾性係数 E_g およびポアソン比 ν_g は、それぞれ 0.289 ton/m^3 、 2 mm 、 0.4 GPa および 0 と設定した。



(a) 重錘衝撃力

(b) 伝達衝撃力

(c) 重錘貫入量

図-8 各種応答波形

3. 数値解析結果および考察

3.1 各種応答波形

図-8には、数値解析から得られた重錘衝撃力、伝達衝撃力および重錘貫入量の時刻歴波形について、実験結

果と比較して示している。

まず、(a)図に示す重錘衝撃力波形の実験結果に着目すると、衝突初期に振幅が大きく周期の短い第1波と振幅が小さく周期の長い第2波から構成されていることが分かる。また、衝突速度 V が大きくなるにしたがい、第

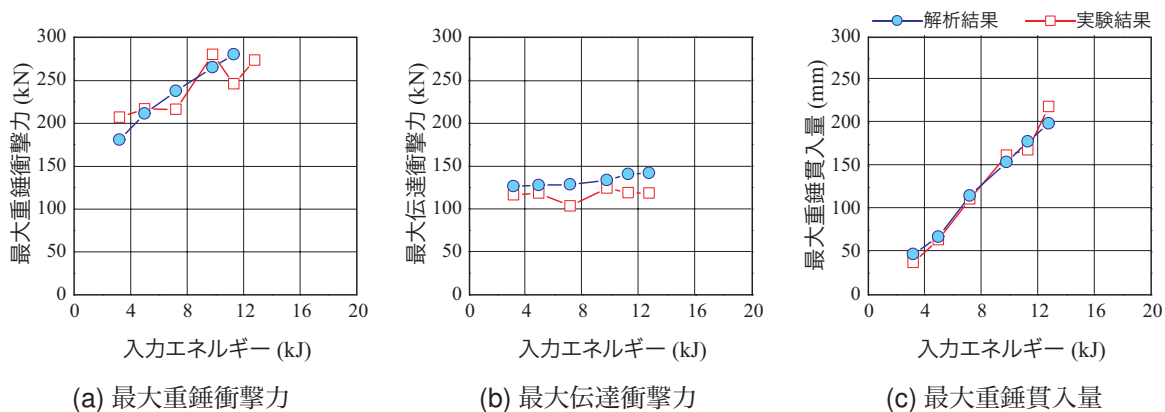


図-9 最大応答値と入力エネルギーの関係

2波の継続時間が長くなる傾向にあることが分かる。一方、数値解析結果では、いずれの衝突速度 V においても、実験結果と同様に載荷初期に急激に衝撃力が励起されている。また、第2波目の最大値に着目すると、数値解析結果は実験結果より若干大きく評価しているものの、継続時間に関してはほぼ再現できていることが分かる。

次に、(b) 図に示す伝達衝撃力波形の実験結果に着目すると、いずれの衝突速度 V においても、最大値が 120 kN、継続時間が 40 ms 程度の正弦半波状の波から構成されていることが分かる。一方、数値解析結果では、いずれの衝突速度 V においても、除荷時に高周波成分が励起されており、最大値においては若干大きく評価しているものの、数値解析結果は実験結果と類似の傾向を示している。これより、三層緩衝構造の緩衝性能をほぼ適切に評価できていると推察される。

(c) 図に示す重錘貫入量波形に着目すると、実験結果の最大重錘貫入量は、衝突速度 V の増加に伴い増加する傾向が見られる。また、数値解析結果においても実験結果と同様な傾向が見られる。特に、伝達衝撃力の継続時間である 40 ms までに着目すると、いずれの衝突速度 V においても、実験結果を精度よく再現できている。

図-9には、最大重錘衝撃力、伝達衝撃力および最大重錘貫入量について、実験結果と解析結果を比較して示している。(a) 図より、最大重錘衝撃力に関しては、実験結果は若干ばらついているものの、入力エネルギーが増加するに伴い最大重錘衝撃力も大きくなる傾向にあることが分かる。また、その傾向は数値解析結果でも確認できる。(b) 図に示す最大伝達衝撃力を見ると、入力エネルギーの増加にかかわらずほぼ一定値を示している。解析結果は、実験結果よりも最大値を若干大きく評価しているものの、入力エネルギーにかかわらずほぼ一定値を示しており、実験結果の傾向と対応している。(c) 図に示す最大重錘貫入量を見ると、入力エネルギーの増加にしたがい最大重錘貫入量も大きくなる傾向にあり、また、解析結果は実験結果と非常によく一致していることが分かる。

これより、本解析手法は三層緩衝構造の機能を適切に

評価できているものと判断される。

3.2 破壊性状

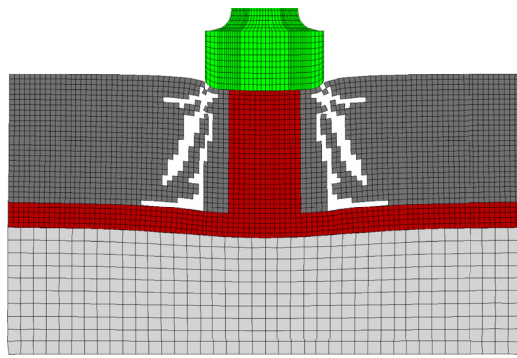
図-10には、 $V = 8.0$ m/sにおける三層緩衝構造の破壊過程を時系列で示している。図より、 $t = 5.0$ msでは、重錘が衝突し、破壊判定によりソイルセメントの要素の一部が消去され、ソイルセメント内部に重錘から放射状に破壊が発生していることが分かる。次に、 $t = 15.0$ msでは、重錘がソイルセメントを押し抜くように貫入が進んでいるものの、ジオグリッドがかぶり部を拘束することによる効果により、EPSの広い範囲に衝撃力が作用していることが分かる。さらに、 $t = 30.0$ msでは、EPSの変形は大きく変化しないものの、重錘直下の破壊条件を付加していないソイルセメントが大きく変形し、重錘のエネルギーを吸収しながら、重錘の貫入が進んでいることが分かる。

図-11には、 $V = 8.0$ m/sにおける解析終了時 ($t = 100$ ms) および実験終了後における三層緩衝構造の破壊状況を示している。図より、両者の破壊状況を比較すると、数値解析では重錘直下に放射状の破壊が生じており、その形状は実験結果をほぼ再現しているものと考えられる。これより、本解析で仮定した破壊条件は、ほぼ適切に設定されているものと判断される。しかしながら、ジオグリッド近傍において、重錘直下のソイルセメントの変形が進んでいない。これより、ソイルセメントとジオグリッドの接触条件等に関して更なる検討を行う必要がある。

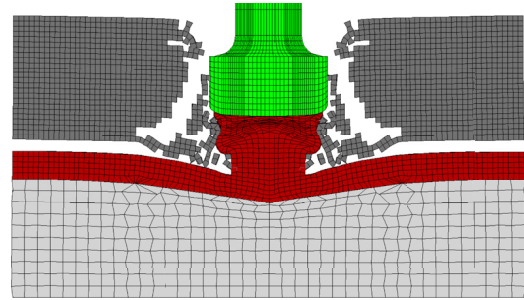
4. まとめ

本研究では、ソイルセメントにジオグリッドを埋設しかつEPSブロックと併用した三層緩衝構造の緩衝効果を適切に再現可能な解析モデルの構築を目的として、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下ようになる。

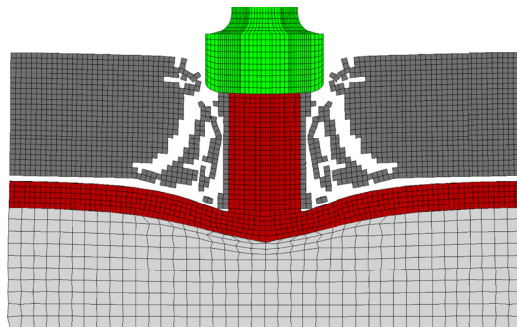
- 1) 提案の構成則モデルを用いることにより、実験結果の重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘貫入量をほぼ適切に再現可能である。また、本解析で仮定した破壊条



$t = 5.0 \text{ ms}$



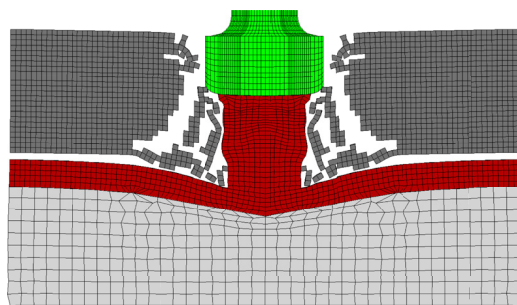
(a) 数値解析結果 ($t = 100\text{ms}$)



$t = 15.0 \text{ ms}$



(b) 実験結果



$t = 30.0 \text{ ms}$

図－10 試験体の破壊過程 ($V = 8.0 \text{ m/s}$)

図－11 試験体の破壊状況 ($V = 8.0 \text{ m/s}$)

件は、ほぼ適切に設定されているものと判断される。

- 2) しかしながら、ジオグリッド近傍において、重錘直下のソイルセメントの変形が進んでいないことが確認されることより、ソイルセメントとジオグリッドの接触条件等に関して更なる検討を行う必要がある。

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。

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.
- 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) 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, pp.709-714, 2012.
- 4) 菅原慶太, 岸 徳光, 牛渡裕二, 小室雅人: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.715-720, 2012.
- 5) 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, pp.727-732, 2012.
- 6) トウラシットタウン, 岸 徳光, 小室雅人, 牛渡裕二: ソイルセメントの衝撃挙動に関する数値解析手法の妥当性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp.739-744, 2012.
- 7) 小室雅人, 牛渡裕二, 岸 徳光, トウラシットタウン: ソイルセメントを有する三層緩衝構造を付設した落石防護擁壁模型の耐衝撃挙動に関する弾塑性衝撃応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.745-750, 2013.
- 8) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.