

論文 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

小室 雅人^{*1}・牛渡 裕二^{*2}・岸 徳光^{*3}・トゥラシット トウン^{*4}

要旨：本研究では，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の耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として，1/2 スケール擁壁模型の水平衝撃荷重載荷実験を対象に弾塑性応答解析を実施した。その結果，1) 提案の解析手法を適用することにより，実験結果の重錘衝撃力波形やソイルセメントのひび割れ分布性状を大略再現可能であること，2) 一方，重錘貫入量や鉄筋ひずみに関しては，実験結果を適切に再現するまでには至っておらず，材料構成則や境界条件に関して更なる検討が必要であること，などが明らかになった。

キーワード：落石防護擁壁模型，衝撃応答解析，耐衝撃挙動，衝撃荷重載荷実験

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てきた^{1), 2)}。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)~6)}。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。

一方，提案の緩衝構造を含めた落石防護擁壁の設計法を確立するためには，種々の条件下での検討が不可欠である。しかしながら，それらの検討を全て実験研究によって行うことは非常に困難であることより，数値解析の手法を併用して効果的に遂行するべきであるものと判断される。

このような背景より，本研究では，提案の三層緩衝構

造を設置した落石防護擁壁の耐衝撃挙動を適切に評価可能な解析手法の確立を目的として，別途実施した 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⁶⁾を対象に弾塑性応答解析を実施し，実験結果と比較することによって解析手法の適用性に関する検討を行った。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)⁷⁾を使用した。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要

図 - 2 には，実験に用いた擁壁模型および緩衝工の形状寸法，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，擁壁背面（重錘衝突面）は鉛直，擁壁前面は 1 : 0.3 の勾配をなしている。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，アンカー鉄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，ひずみ測定用の鉄筋（D13）を擁壁背面から 100 mm の位置に配置している。

緩衝工の構成は別途実施した緩衝構造模型³⁾と同様とし，EPS ブロック厚さ 250 mm，ソイルセメント厚さ 300 mm，ソイルセメント内の擁壁側かぶり 50 mm の位置に

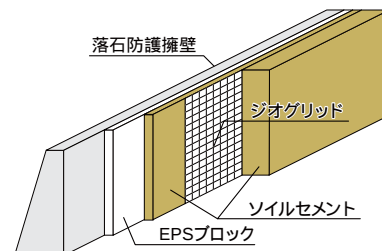


図 - 1 提案の三層緩衝構造

*1 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博（工）（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）

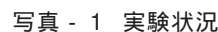
*3 釧路工業高等専門学校 学長（正会員）

*4 室蘭工業大学大学院 博士前期課程 建築社会基盤系専攻（正会員）



(a) 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
(b) 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
(c) EPS ブロック					
密度 (kg/m ³)		発泡倍率		製造法	
20		50.0		型内発泡法	

表 - 2 には、解析ケースを示しており、ケース名の末尾には重錘衝突速度 V を示している。なお、表には目標および実測衝突速度を併せて示している。



ケース名	目標 衝突速度 (m/s)	実測 衝突速度 (m/s)	試験体側面の 拘束条件	
			左側	右側
G-V5	5.0	5.1	拘束	非拘束
G-V7	7.0	7.1	拘束	非拘束
G-V9	9.0	9.0	非拘束	拘束
G-V11	11.0	11.1	拘束	拘束
G-V12	13.0	12.2	拘束	拘束

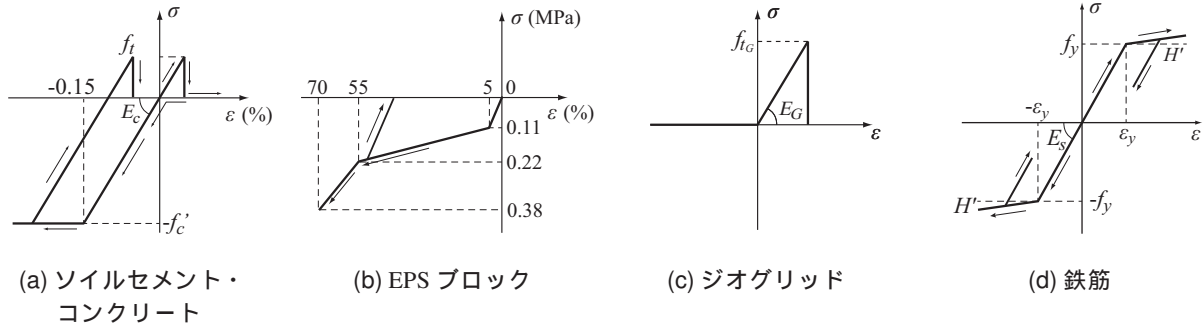


図 - 4 数値解析に用いた応力 - ひずみ関係

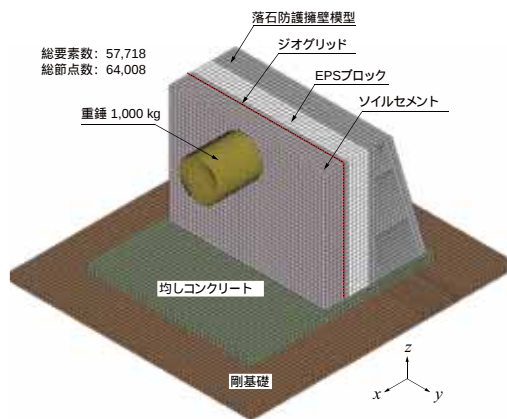


図 - 3 要素分割状況

素でモデル化した場合との結果を比較しているが、両者に有意な差がないことを確認している。

また、実験状況を再現するために、(1) 重錘とソイルセメントの間、(2) ソイルセメントと EPS ブロックの間、および (3) EPS ブロックと擁壁模型の間には、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。これは、重錘のリバウンド現象やソイルセメントのひび割れによる側方移動を適切に考慮するためのものであり、圧縮（接触）時のみ応力を伝達し、引張（剥離）時には応力を伝達しない。なお、摩擦係数は便宜的に零とした。

境界条件に関しては、剛基礎底面を完全固定とし、かつ実験時において均しコンクリートと剛基礎間に滑動などの変位が確認されなかったことより、両者を連続体としている。なお、均しコンクリートと擁壁の境界に関しては、滑りや剥離が可能な接触面を導入している。また、実験における試験体は、写真 - 1 に示すように 3 体並んで設置されており、各試験体側面の拘束条件が異なっている。本解析では、実験条件と等しくなるように拘束側の側面においては、その側方移動（図 - 3 に示す y 方向変位のみ）を拘束する境界条件を与えている。なお、各試験体における側面の拘束条件は表 - 2 に示すとおりである。また、解析は、表 - 2 に示す実測速度を重錘の各節点に与えることで実験状況を再現している。

表 - 3 物性値一覧

材料	弾性係数 E (GPa)	圧縮 / 降伏 強度 f'_c / f_y (MPa)	引張 強度 f_t (MPa)	ポアソン比 ν
ソイルセメント	2	3.0*	0.005*	0.0
コンクリート	25	37.5	3.75	0.167
ジオグリッド	0.4	—	16	0.4
鉄筋 (D13/D16)	206	245	—	0.3

* 既往の数値解析⁹⁾より設定

減衰に関しては、質量比例型減衰を採用し、試験体の水平方向最低次固有振動数に対して 10 % とした。なお、減衰定数は 10 % 程度と比較的大きな値を用いているが、これは重錘の衝突速度が大きい場合においてソイルセメント要素に生じるネガティブボリューム（負の体積）を避けるためである。

2.3 材料構成則

図 - 4 には、本解析で使用した各種材料の応力 - ひずみ関係を示している。ソイルセメント・コンクリート、鉄筋および EPS ブロックについては、既往の数値解析^{8), 9)}で使用したモデルを用いることとした。コンクリートの物性値は、別途実施した材料試験結果に基づいて設定し、鉄筋の物性値に関しては公称値を使用した。ジオグリッドは、引張側のみを考慮し別途実施した引張試験結果から得られた破断強度 $f_t = 16$ MPa（実験で使用したジオグリッドにおける 2 方向の製品基準強度を平均化した値）に達した段階でカットオフするように設定している。なお、各材料のひずみ速度効果については、既往の RC 擁壁を対象とした数値解析結果⁸⁾を参考にコンクリート、鉄筋、EPS ブロックおよびジオグリッドに関しては考慮していない。一方、ソイルセメントに関しては、既往の研究成果⁹⁾を参考に、圧縮強度を静的強度の 3 倍程度とすることによって、擬似的にひずみ速度効果の影響を考慮している。

表 - 3 には、各材料構成則モデルに用いた物性値を一覧にして示している。なお、本解析ではジオグリッド厚を実際の 10 倍としていることより、弾性係数 E_G および引

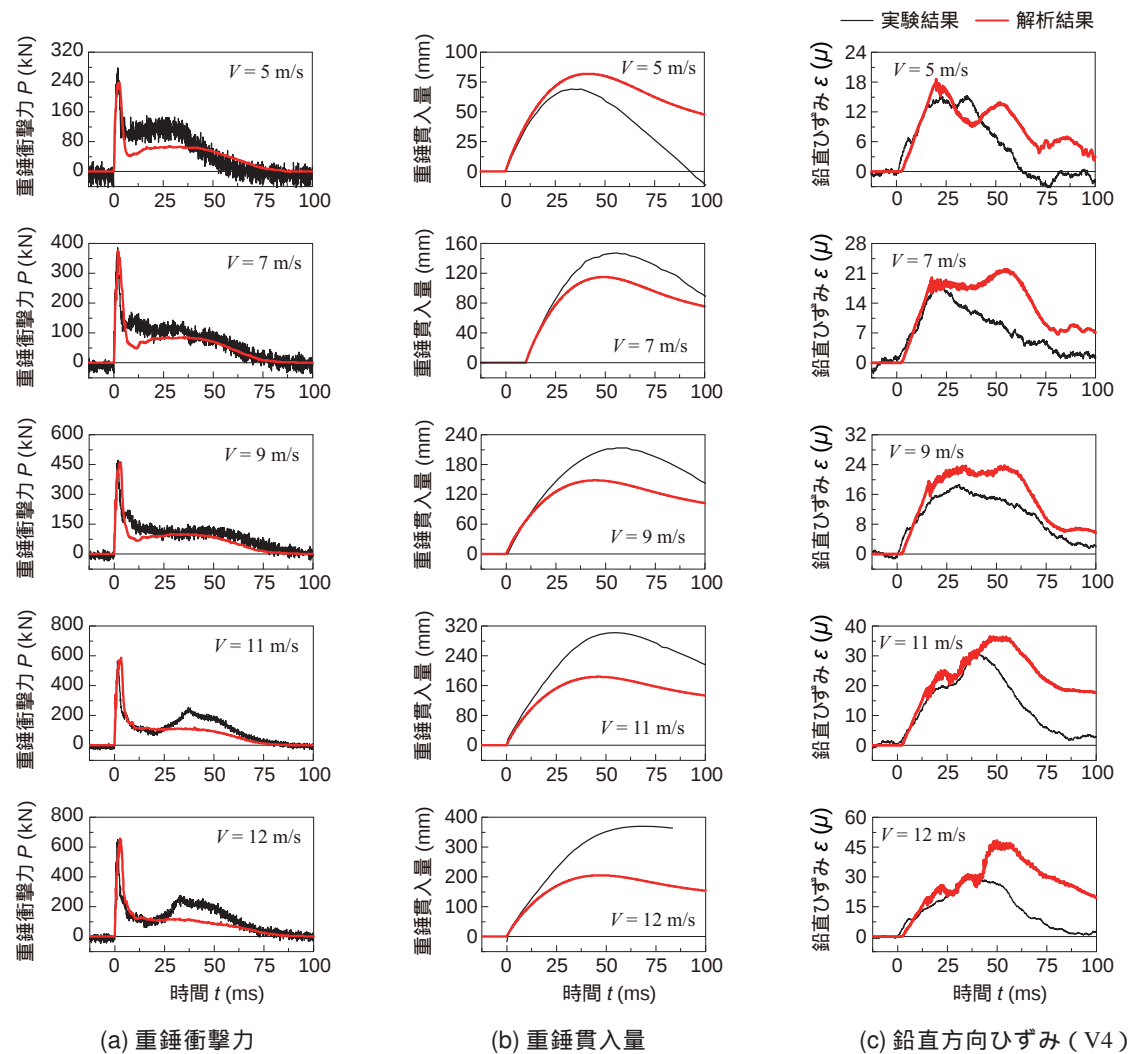


図 - 5 各種応答波形

張強度は f_{tG} は表 - 3 に示す物性値の 1/10 としている。

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

図 - 5 には、数値解析から得られた重錘衝撃力、重錘貫入量および擁壁内部に埋設された鉛直方向ひずみ (V4、図 - 2 参照) 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について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、衝突速度が $V = 11$ m/s 以上の場合には、25 ms 以降に衝撃力が再び増加する傾向が見られる。一方、数値解析結果では、 $V = 11$ m/s 以上に見られる 25 ms 以降の衝撃力の増加現象は再現できないものの、衝突初期の波形の立ち上がり勾配や第 2 波目の振幅および衝撃力作用時間に関しては、概ね実験結果を再現していることが分かる。なお、実験結果に見られる第 2 波目の衝撃力の増加現象は、重錘が深く貫入することによって EPS ブロックに大きなひずみが発生していることによ

るものと考えられる⁶⁾。

次に、(b) 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。しかしながら、解析結果と実験結果を比較すると、衝突速度 $V = 5$ m/s の場合における解析結果は、実験結果よりも若干過大に評価しているのに対し、衝突速度が $V = 7$ m/s 以上の場合には、反対に実験結果よりも小さくなり、その差は衝突速度 V が大きくなるほど顕著となっている。これは、実験では衝突速度が $V = 9$ m/s 以上の場合において、ジオグリッドの破断が確認されているのに対し、数値解析モデルではジオグリッドに発生するひずみが破断ひずみまで到達せず、結果としてジオグリッドの破断現象を適切に再現できていないことや、実験では衝突速度が増加するほど、ソイルセメントが激しく飛び散るような損傷（後述、図 - 8 参照）をしているのに対し、数値解析ではこのような現象を再現できないこと等が原因と考えられる。なお、数値解析結果を見ると、実験結果における変位の立ち上がり勾

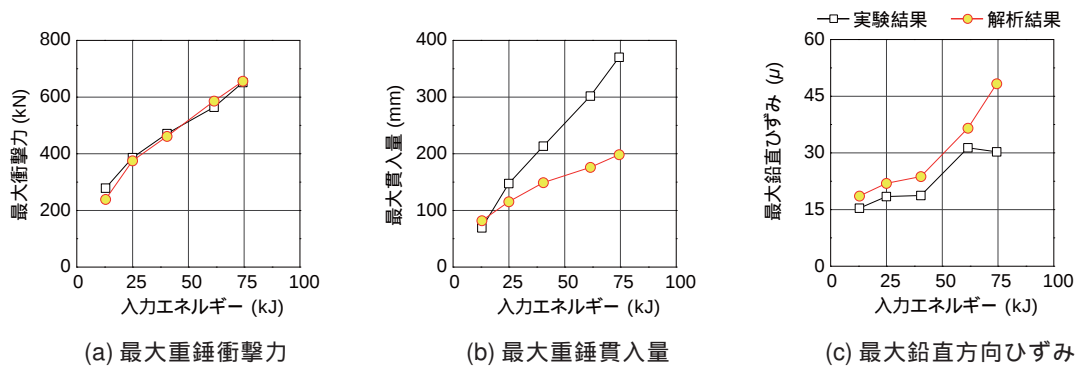


図 - 6 最大応答値と入力エネルギーの関係

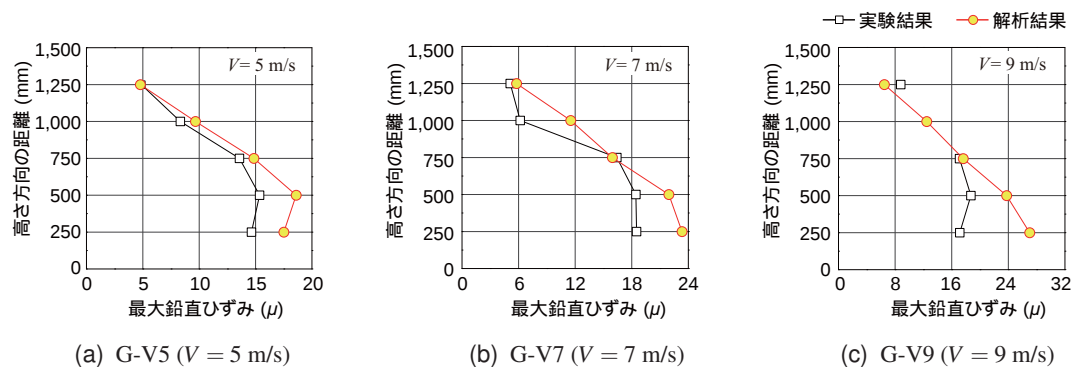


図 - 7 高さ方向ひずみ分布（最大ひずみの包絡線）の比較

配や、重錘のリバウンド（貫入量が最大値に達した後に減少する）現象に関しては、再現できていることが分かる。

(c) 図に示す鉛直方向鉄筋ひずみについて解析結果と実験結果を比較すると、両者の波形性状や最大値は必ずしも一致していないものの、波形の立ち上がりから実験結果の最大値に至るまでは、概ね一致していることが分かる。

図 - 6 には、最大重錘衝撃力、最大貫入量および最大鉛直方向ひずみについて、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、実験結果と解析結果は非常によく一致していることが分かる。また、最大重錘衝撃力は、入力エネルギーに対してほぼ線形に増加する傾向が確認できる。一方、(b) 図に示す最大貫入量を見ると、実験結果および解析結果はともに入力エネルギーに比例して増大する傾向がみられる。しかしながら、解析結果と実験結果を比較すると、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合を除いて、解析結果は実験結果を過小に評価しており、その傾向は衝突速度 V の増大とともに顕著になっている。(c) 図に示す鉛直方向ひずみに関しては、解析結果が実験結果よりも過大に評価する傾向が見られるものの、その分布性状は衝突速度 $V = 12 \text{ m/s}$ を除いて、両者概ね一致していることが分かる。

図 - 7 には、擁壁内部に埋設された全 5 点の鉛直方向ひずみに関して、それらの時系列波形における最大ひずみ値について実験結果と数値解析結果を比較して示している。ここでは、衝突速度が $V = 5, 7, 9 \text{ m/s}$ における結果を

示している。

図より、実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は重錘衝突位置から下方に向かってほぼ直線的にひずみが増加する傾向や、擁壁の底面付近におけるひずみの減少傾向など、実験結果を定性的に再現していることが分かる。なお、実験結果と解析結果を詳細に比較すると、解析結果は底面付近のひずみを若干過大に評価する傾向が見られる。これは擁壁の底面と均しコンクリート間の境界条件を数値解析では適切にモデル化できていないことによるものと考えられる。

3.2 破壊性状

図 - 8 には、最大重錘貫入時刻におけるソイルセメント衝突面のひび割れ分布を実験結果から評価されるひび割れ分布と比較して示している。ここでは、衝突速度 V が $V = 5, 9, 12 \text{ m/s}$ の結果を示している。なお、図中の赤色で示された領域（ソイルセメントの最大主応力が $-0.001 \sim 0.001 \text{ MPa}$ の範囲）は、ひび割れが発生して除荷状態に至っているか、もしくは単に発生応力が小さい要素であることを示している。

(a) 図より、 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合における実験結果を見ると、ひび割れは衝突位置周辺および非拘束側（右側）に多く発生していることが分かる。数値解析においても実験結果と同様に衝突位置周辺に円形状のひび割れが確認されること、また非拘束側に多くのひび割れが発生していることより、解析結果は実験結果のひび割れ分布を大略再現で

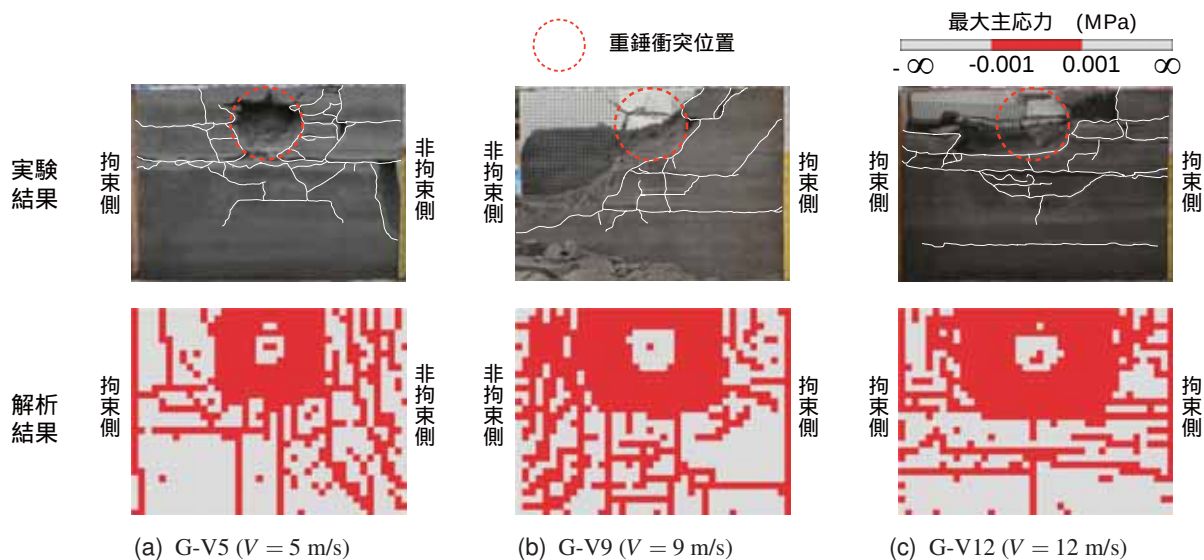


図 - 8 ソイルセメント破壊状況

きているものと考えられる。 $V = 9 \text{ m/s}$ の場合 (b 図参照) には、実験結果ではソイルセメントの損傷が大きくなり、非拘束側 (左側) に偏心してソイルセメントが破壊していることが分かる。解析結果に関しても非拘束側にひび割れが多く発生しており、実験結果に近い傾向がみられる。

(c) 図に示す $V = 12 \text{ m/s}$ の場合には、ソイルセメントの両側が拘束されていることにより、ソイルセメントが衝突位置を中心にほぼ対称的な破壊性状となっている。また、衝突位置の下方には水平方向の曲げひび割れも発生している。解析結果に関しても、衝突位置に円形状なひび割れが発生するとともに、周辺には水平方向のひび割れが確認でき、解析結果は実験結果をほぼ再現できるものと考えられる。

4. まとめ

- 1) 提案の解析手法を適用することにより、実験結果の重錘衝撃力波形やソイルセメントのひび割れ分布性状を大略再現可能である。
- 2) 一方、重錘貫入量や鉄筋ひずみなどに関しては、実験結果を適切に再現するまでには至っていない。これは、実験結果ではジオグリッドの破断が確認されているのに対し、本解析結果ではその状況を再現できないことが一つの要因と考えられる。
- 3) これより、今後はソイルセメントやジオグリッドの材料構成則や境界条件などについて更なる検討を行い、緩衝性能を適切に可能な数値解析モデルの構築を行う必要がある。

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, 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, 48A, pp.1567-1578, 2002.3.
- 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, 34, pp.709-714, 2012.7.
- 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, 34, pp.715-720, 2012.7.
- 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, 34, pp.727-732, 2012.7.
- 6) 牛渡裕二, 栗橋祐介, 前田健一, 鈴木健太郎, 岸 徳光: ソイルセメントを用いた三層緩衝構造を設置した落石防護擁壁模型に関する重錘衝突実験, 構造工学論文集, 59A, pp.997-1007, 2013.3.
- 7) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 8) 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, 57A, pp.1213-1224, 2011.3.
- 9) 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, 34, pp.739-744, 2012.7.