

論文 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

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

要旨: 本研究では、ソイルセメント単体およびソイルセメントにジオグリッドを埋設しかつEPS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、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、衝撃実験結果との比較を行った。その結果、1)ソイルセメント単体の材料構成則モデルとして圧縮強度 f_c' を 3 MPa, 引張強度を $f_c'/60$ と設定する場合に実験結果を適切に再現可能であること、2)ジオグリッド埋設ソイルセメントとEPSを組み合わせた場合には、重錘衝撃力および伝達衝撃反力は共に実験結果の波形性状と必ずしも一致していないものの、波形の立ち上がりや荷重継続時間は概ね一致すること、が明らかになった。

キーワード: ソイルセメント, ジオグリッド, 有限要素法, 材料構成則, EPS, 重錘落下衝撃実験

1. はじめに

落石防護擁壁用の新しい緩衝工として、ソイルセメントの形状保持性と緩衝性能およびジオグリッドの応力分散性を考慮することにより、従来の二層緩衝構造(RC版+発泡スチロール(以下、EPS)ブロック)よりも安価な三層緩衝システムが考案されている。これは、ソイルセメント+ジオグリッド+EPSブロックから構成されるものである。現在、著者らはこの新しい緩衝システムに関する緩衝性能を把握するために、種々の組み合わせによる試験体を製作し、精力的に実験を実施している。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、実験の検討は勿論のこと、緩衝性能を定量的に明らかにするための数値解析的検討も必要不可欠である。

このような背景より、本研究では、ソイルセメント単体およびソイルセメントにジオグリッドを埋設しかつEPSと併用した場合の緩衝効果を適切に再現可能な数値解析モデルの構築を目的として、三次元弾塑性衝撃応答解析を試みた。提案の数値解析手法の妥当性は、別途実施した重錘落下衝撃実験結果との比較により行っている。ここでは、重錘衝撃力、伝達衝撃反力、重錘貫入量に着目して比較を行うこととする。

本研究では、はじめにソイルセメント単体の材料構成則モデルを構築し、その後、ソイルセメント、ジオグリッド、EPSを併用した場合について検討を行っている。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)¹⁾を使用した。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要

図-1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、ソイルセメント単体および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を設置した2種類について、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ている。なお、重錘質量は400 kg, 先端部直径はφ200 mmであり、その底面には片当たり防止のために2 mmのテーパーが設けられている。

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/m³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-2(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

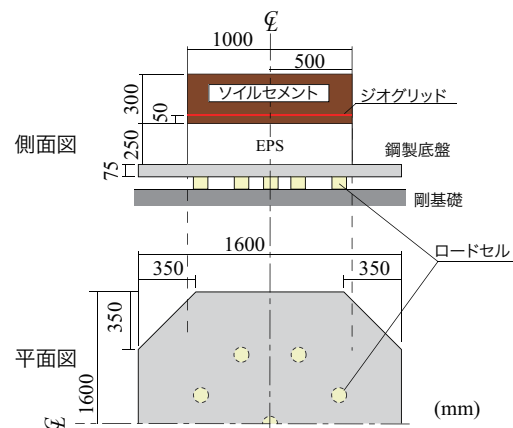


図-1 実験装置概要

*1 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)

*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 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)

*4 (株)構研エンジニアリング 防災施設部次長 (正会員)

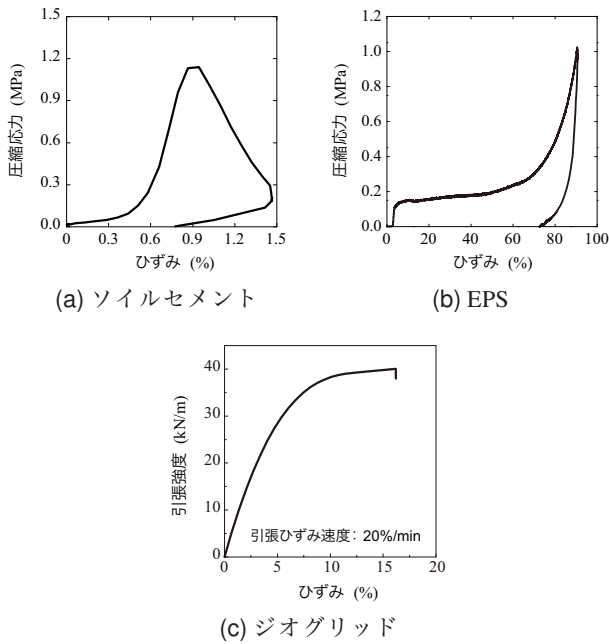


図-2 応力-ひずみ関係(静载荷実験結果)

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

MPa であった。

EPS 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-2 (b) には別途実施した EPS ブロックの静载荷実験結果を示している。

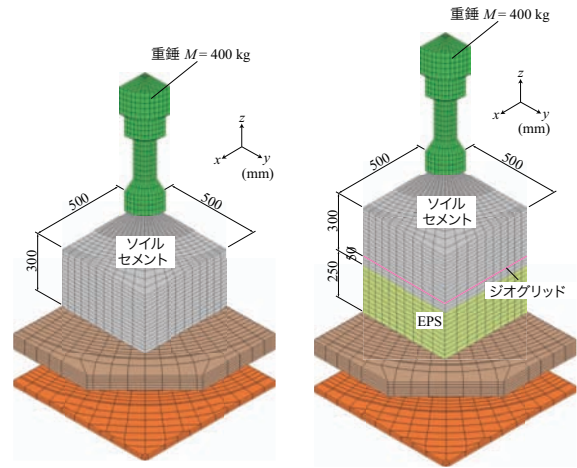
表-1 には、本実験で使用したジオグリッドの材料物性値を示している。また、図-2 (c) には別途実施した静载荷実験結果を示している。

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。

本数値解析では、はじめに重錘衝突速度が 3.0 m/s におけるソイルセメント単体 (1 m 四方、厚さ 300 mm) の試験体を対象に数値解析を行い、実験結果との比較によって適切な材料構成則モデルの構築を行うこととする。その後、同定されたパラメータを用いて、ソイルセメントにジオグリッドが埋設され、かつその下方に EPS を設置した場合について数値解析を行い、実験結果との比較を行った。

2.2 有限要素モデル

図-3 には、本研究で対象としたソイルセメント単体およびソイルセメントにジオグリッドを埋設し、その下に EPS を設置した場合の要素分割状況を示している。なお、解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して



(a) ソイルセメント単体の場合 (b) ジオグリッド埋設ソイルセメントと EPS の場合

図-3 有限要素モデル

1/4 モデルとした。総要素数および総節点数は、ソイルセメント単体の場合でそれぞれ約 26,000 および約 32,000 であり、ジオグリッドを埋設した場合にはそれぞれ約 28,000 および約 33,000 である。使用した要素は、ソイルセメント、EPS、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になっているが、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、実際の実験状況を再現するために、(1) 重錘とソイルセメント間、および (2) ソイルセメントと底盤間には、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。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。一方、(1) EPS と底盤間、および (2) ソイルセメントと EPS 間に関しては、事前解析の結果を踏まえ、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。なお、ソイルセメントおよび EPS の側面における境界条件は、実験条件と同じく自由としている。

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とし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.0 % と設定した。

本数値解析における測定項目は実験と同様であり、重錘衝撃力は重錘とソイルセメント間の接触面反力、伝達衝撃反力は 9 個のロードセルの断面力および重錘貫入量は重錘の鉛直方向の変位を用いて測定することとした。

2.3 材料構成則

図-4 (a) には、ソイルセメントと EPS に関する応力-

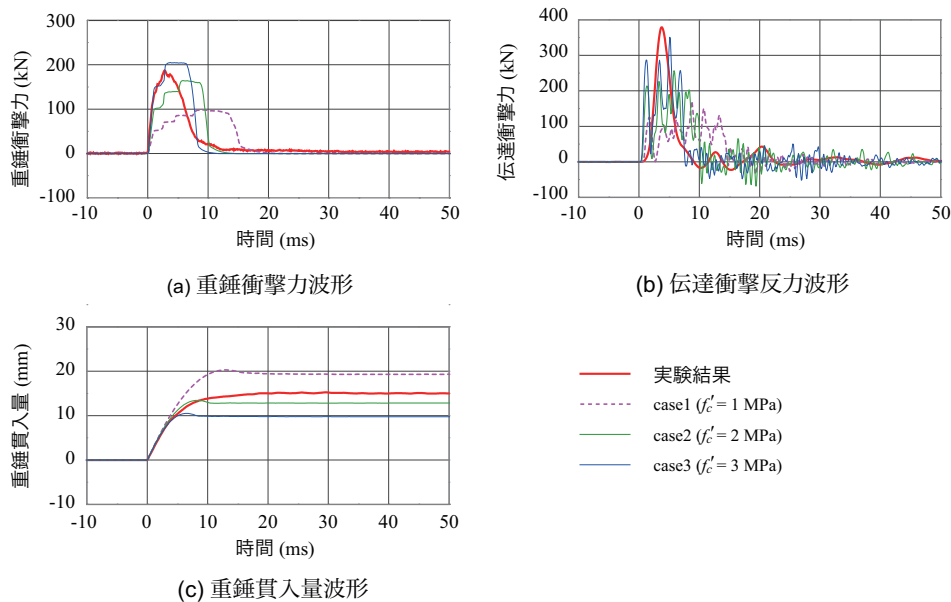


図-5 圧縮強度を変化させた場合の各種応答波形 ($V = 3 \text{ m/s}$)

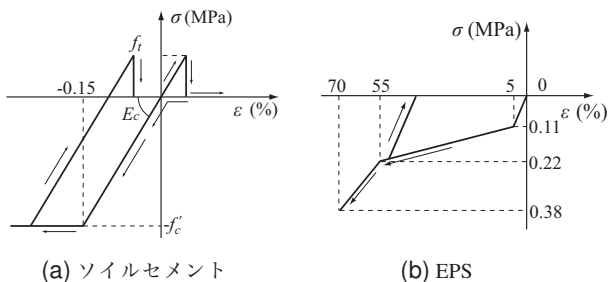


図-4 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 ソイルセメントに関するパラメーター一覧

解析ケース	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	ポアソン比 ν
case1	1	$0.1f'_c$	0
case2	2		
case3	3		
case4	3	0.15	
case5		0.10	
case6		0.05	

ひずみ関係を示している。ソイルセメントの応力-ひずみ関係に関しては、配合や養生条件および載荷速度等に大きく影響を受けるものと考えられるが、ここでは簡易にソイルセメントの材料構成則をモデル化するために、既往の研究²⁾でコンクリートに適用されているバイリニア型の応力-ひずみ関係(弾性係数 E_c)を適用することとした。圧縮側に関しては、コンクリートモデルの場合と同様にひずみが0.15%に達した時点で降伏するものと仮定し、完全バイリニア型にモデル化した。また、引張側に関しては、引張強度に達した時点で応力を完全に解放す

るモデルを使用している。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を適用し、内部摩擦角は 30° とした。

本研究では、ソイルセメント単体の緩衝性能を明らかにするために、ソイルセメントの圧縮強度およびソイルセメントの引張強度をパラメータとし、実験結果との比較によって適切な材料物性値の検討を行うこととした。

表-2には、前述の静的圧縮強度試験結果を基本に、本解析で考慮したパラメータを一覧にして示している。

EPSに関しては、著者らの既往の研究^{3),4)}で使用したモデルを用いることとした。図-4(b)には、その応力-ひずみ関係を示している。EPSは約5%のひずみから55%までの勾配が緩やかな特徴を有しており、既往の研究では、この部分を効果的に使用して緩衝性能を向上させている。

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、図-2(c)を参考に材料物性値を決定した。なお、ジオグリッドは、本研究では入力エネルギーが小さい段階について検討することより弾性体と仮定し、密度、弾性係数およびポアソン比を、それぞれ 0.289 t/m^3 , 0.4 GPa および 0.4 と設定した。

3. 数値解析結果

3.1 ソイルセメント単体の場合

図-5には、重錘衝突速度 $V = 3 \text{ m/s}$ におけるソイルセメントの圧縮強度 f'_c をパラメータに取った場合の各種応答波形を実験結果と比較する形で示している。

まず、図-5(a)に示す重錘衝撃力波形を見ると、圧縮強度を 1 MPa とする場合には実験結果の $1/2$ 程度の値を示していることが分かる。また、ソイルセメントの圧縮強度を増加させるほど実験結果の最大衝撃力に近づく傾

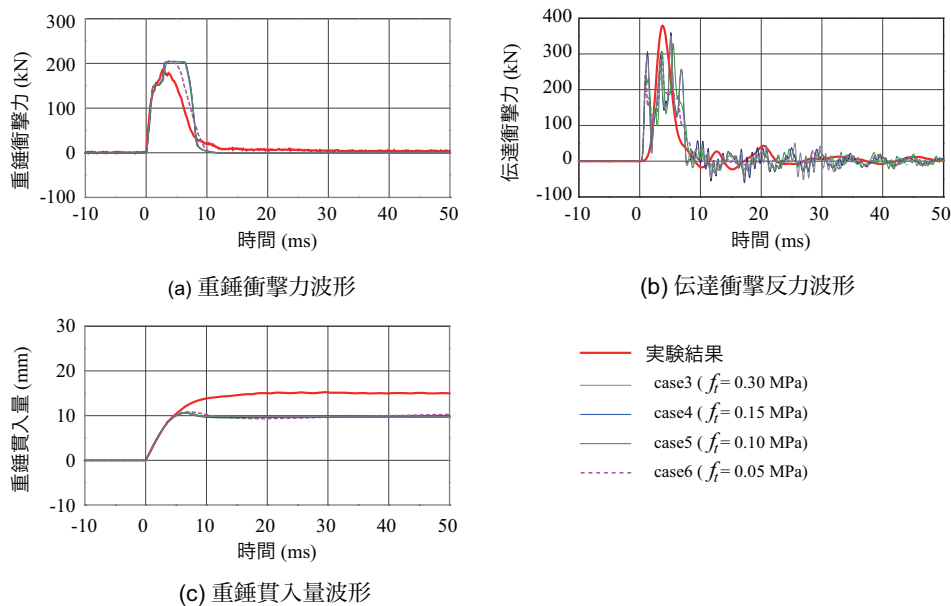


図-6 引張強度を変化させた場合の各種応答波形 ($V = 3 \text{ m/s}$)

向にあることが分かる。なお、図-5 (b) に示す伝達衝撃反力についてもソイルセメントの圧縮強度が大きいほど、実験結果に近づく傾向が見られる。特に圧縮強度を 3 MPa とする場合には、実験結果における伝達衝撃反力の作用時間とほぼ等しい。

一方、図-5 (c) の重錘貫入量波形を見ると、実験結果は重錘が約 15 mm 程度貫入量を示して静止している。圧縮強度が 1 MPa の場合には、最大変位が 20 mm 程度と実験結果よりも大きい。また、圧縮強度が 3 MPa の場合には、最大変位は 10 mm 程度と実験結果よりも小さく評価されている。

以上より、圧縮強度を 3 MPa とする場合には、重錘貫入量は若干小さく評価されるものの、重錘衝撃力および伝達衝撃反力に関しては、実験結果を比較的よく再現しているものと考えられる。

次に、引張強度 f_t の影響について検討を行う。図-6 には圧縮強度を 3 MPa と固定し、引張強度 f_t を変化させた場合の数値解析結果を実験結果と比較して示している。図より、重錘衝撃力、伝達衝撃反力および重錘貫入量におよぼす引張強度 f_t の影響は極めて小さいことが分かる。このことは、ソイルセメントの圧縮強度がこれらの応答に対して支配的であることを示唆している。

図-7 には、引張強度 f_t を変化させた場合のソイルセメント衝突面および断面方向のひび割れ分布を示している。なお、図の赤色領域は数値解析におけるひび割れ発生箇所を意味する。図より、(1) 引張強度 f_t が圧縮強度の $1/10 \sim 1/20$ の場合 (0.3 MPa, 0.15 MPa) には、明確なひび割れが発生していないこと、また、(2) 引張強度 f_t が小さくなるほどソイルセメントにひび割れが発生する傾向に

あること、が分かる。

写真-1 には、実験終了後のひび割れ分布を示している。写真より、実験結果ではソイルセメント表面に重錘が貫入した跡が確認されるとともに、载荷点から放射状に複数のひび割れが発生していることが分かる。

写真-1 に示す実験結果と図-7 の数値解析結果によるひび割れ状況を比較すると、引張強度を圧縮強度の $1/60$ 程度とする場合が、最も実験結果のひび割れ状況に近いものと考えられる。したがって、本研究では、ソイルセメント単体の材料構成則モデルにおいて、圧縮強度 f'_c を 3 MPa、引張強度を $f'_c/60$ ($f_t = 0.05 \text{ MPa}$) と設定して、以後の解析を実施することとした。

3.2 ジオグリッド埋設ソイルセメントと EPS を組み合わせた場合

ここでは、前項で同定したソイルセメントの材料モデルを用いて、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 を組み合わせた場合について、数値解析的に検討を行う。

図-8 には、重錘衝突速度 $V = 4 \text{ m/s}$ における実験結果と解析結果を比較して示している。図より、実験結果の重錘衝撃力波形は、図-5 および図-6 に示すソイルセメント単体の場合と異なり、振幅の大きな第 1 波の後に、緩やかな正弦半波状の波形が存在している。この正弦半波状の波形は EPS の変形に伴うエネルギー吸収効果が発揮されていることを意味している。

数値解析結果と実験結果を比較すると、重錘衝撃力に関する数値解析結果 (図-8 a 参照) は実験結果の最大値や波形性状と必ずしも一致していないものの、波形の立ち上がりや荷重の継続時間は両者概ね一致していること

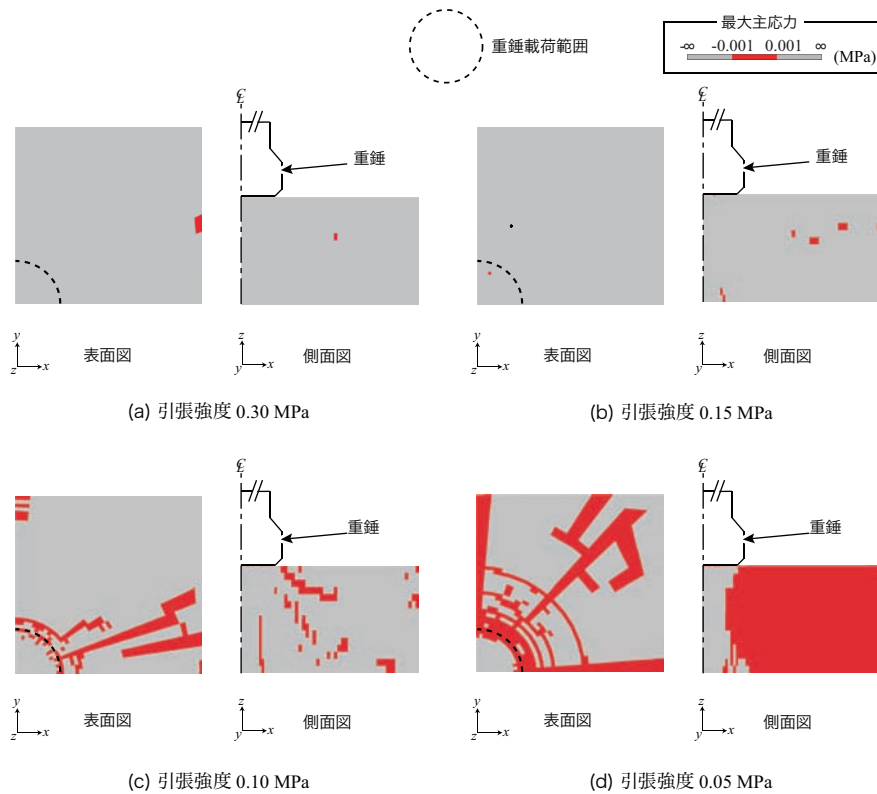


図-7 引張強度の変化によるひび割れ分布の比較(最大重錘貫入量発生時刻)

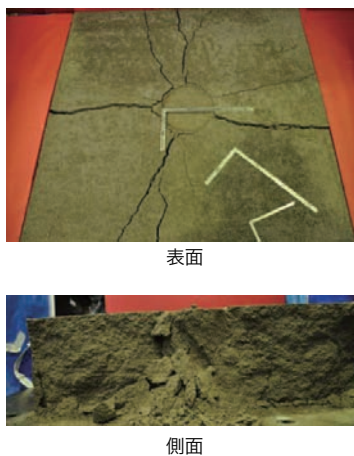


写真-1 実験終了後のひび割れ状況

が分かる。一方、伝達衝撃反力に関しては、数値解析結果(図-8b 参照)が実験結果の1/2程度と小さいものの、荷重の継続時間は概ね一致している。

(c) 図に示す重錘貫入量に着目すると、数値解析結果は実験結果よりも若干変位が大きく評価されているものの、実験結果では衝突初期から約22ms、数値解析結果では28ms程度で最大値を示した後、いずれの場合においても変位が減少しており、数値解析によって重錘のリバウンドを再現できていることが分かる。

写真-2には、実験終了後のひび割れ分布を示している。写真より、実験結果ではソイルセメント表面に重錘

が貫入した跡が確認されるとともに、载荷点からほぼ直線に近いひび割れが4箇所発生していることが分かる。一方、図-9には、数値解析結果において最大重錘貫入量が発生した時刻におけるひび割れ分布を示している。図より、载荷位置に円形状のひび割れと载荷点から伸びる直線的なひび割れが発生していることが分かる。実験結果と数値解析結果のひび割れ状況を比較すると、最大重錘衝撃力が発生した時点におけるひび割れは実験終了後のひび割れ状況に近いものと考えられる。

これより、ジオグリッドを埋設したソイルセメントとEPSを併用する場合の緩衝効果をより適切に評価するためには、ジオグリッドやEPSの材料構成則の見直しを行う等、さらなる検討が必要であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、ソイルセメント単体、およびソイルセメントにジオグリッドを埋設かつEPS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、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。本論文で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) ソイルセメントの静的圧縮強度が1.1MPa程度の場合には、ソイルセメント単体の材料構成則モデルとしては、圧縮強度 f'_c を3MPa、引張強度を $f'_c/60$ ($f_t = 0.05$ MPa)と設定する場合に、実験結果を適切に再現可能である。

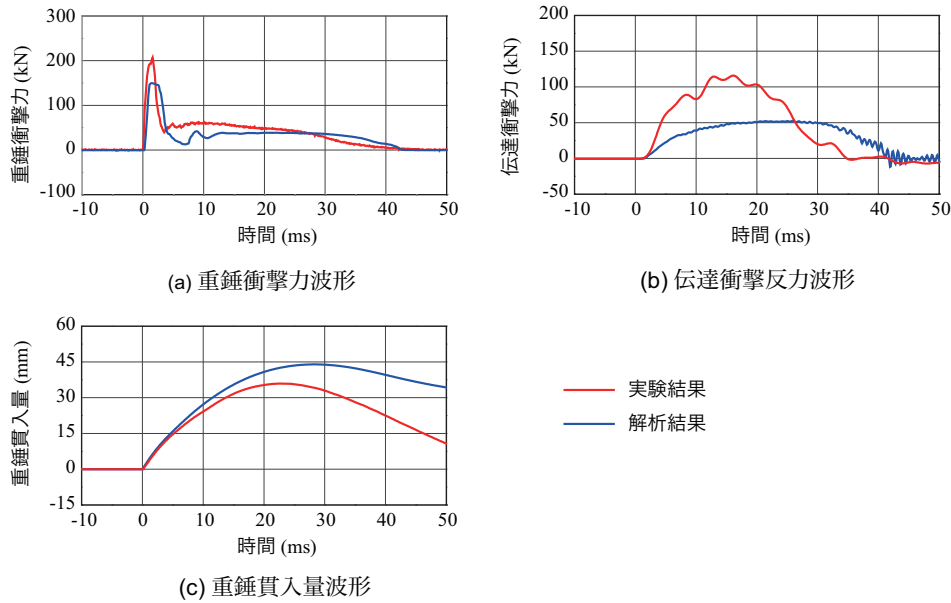


図-8 各種応答波形 ($V = 4 \text{ m/s}$)

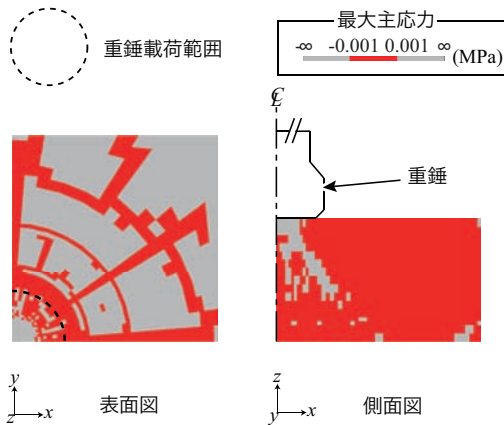


図-9 最大重錘貫入量発生時刻におけるひび割れ分布

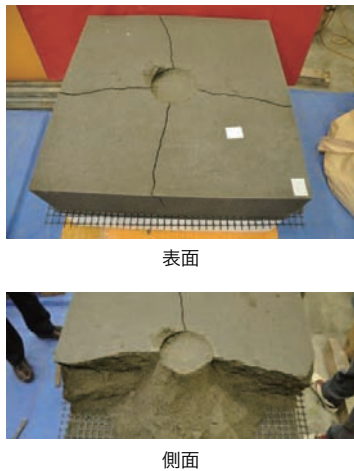


写真-2 実験終了後のひび割れ状況

- 2) ジオグリッド埋設ソイルセメントとEPSを組み合わせた場合には、重錘衝撃力および伝達衝撃反力の解析結果は、ともに実験結果の最大値や波形性状と必ずしも一致していないものの、波形の立ち上がりや荷重継続時間は両者概ね一致している。
- 3) また、重錘貫入量に関しては、数値解析結果が実験結果よりも若干過大に評価するものの、実験結果のリバウンド現象に関しては再現可能である。

今後は、異なる条件下において数値解析を実施し、実験結果との比較を行うとともに、ジオグリッドやEPSの材料構成則を見直し、緩衝性能を適切に評価可能な数値解析モデルの構築を図る予定である。

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) Hallquist, J. O. : *LS-DYNA Version 971 User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 2) 岸 徳光, 今野 久志, 三上 浩 : RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1225-1237, 2009.3
- 3) 構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計, 土木学会, 1998.11
- 4) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志 : 二層緩衝構造を設置した落石防護擁壁の転倒安定性評価法に関する一検討, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1327-1336, 2004.3