

単粒度碎石を充填したジオセル緩衝体の衝撃挙動に関する数値的解析手法

Analysis study for absorbing effects of Geocell wall filled with one-size aggregate

東京インキ株式会社
室蘭工業大学
室蘭工業大学
日本サミコン株式会社
室蘭工業大学

○正員
正員
正員
正員
正員

大山 亮貴 (Ryoki Oyama)
小室 雅人 (Masato Komuro)
栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
宮本 大介 (Daisuke Miyamoto)
瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)

1. はじめに

コンクリート製落石防護擁壁の緩衝体として、表層材にRC版、裏層材に発泡スチロールを用いた二層緩衝構造や、表層にソイルセメント、芯材にジオグリッド、裏層材に発泡スチロールを用いた三層緩衝構造¹⁾が提案され、重錘衝撃実験や数値解析の実施により、緩衝効果の実証がされている。筆者らも新たな緩衝構造として施工性に優れたジオセルに着目し、単粒度碎石を充填したジオセル緩衝体の緩衝性能を把握するために重錘衝撃実験²⁾を実施し、緩衝効果があることを実証している。この緩衝構造に関して、実験の妥当性をさらに実証し合理的実用性を確立するためには、緩衝性能を定量的に明らかにするための数値的解析も不可欠である。

このような経緯より、本研究では、ジオセル緩衝体の緩衝効果を適切に再現するための三次元弾塑性衝撃応答解析による数値解析を試み、すでに実施している重錘衝撃実験の結果との比較により妥当性の検討を行った。なお、実験の結果との比較には、重錘衝撃力、重錘貫入量、重錘伝達衝撃応力を用いた。

数値解析に際しては、砂と碎石の構成則を決めたあと、コンクリート剛体壁、ジオセル、砂、碎石、鉄筋、重錘の各材料物性値を入力した。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)³⁾を使用した。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要

写真-1には単粒度碎石を充填したジオセル緩衝体に関する重錘衝撃実験状況²⁾を、表-1にはその実験ケースを示

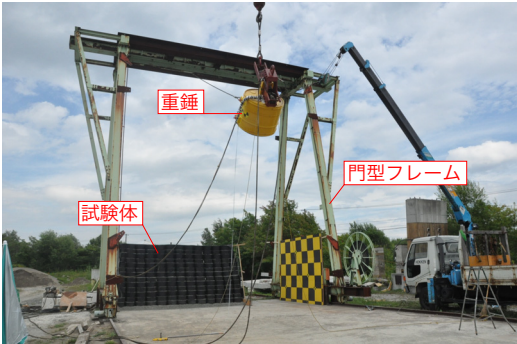


写真-1 実験状況

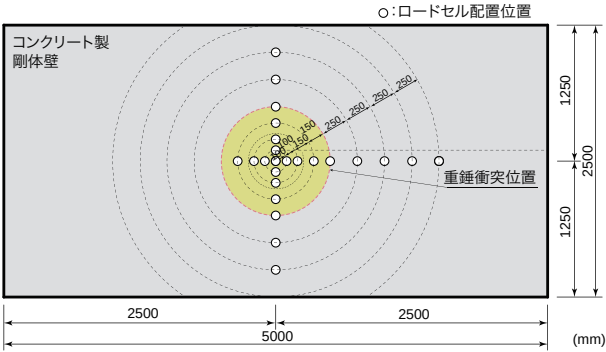


図-1 ロードセル配置図

表-1 実験ケース

試験体名	落下高さ (m)	実測重錘衝突速度 (m/s)	入力エネルギー (kJ)
H2.0	2	6.3	59.0
H3.75	3.75	8.7	114.3
H5.0	5	9.6	138.5
H7.0	7	12.5	233.3
H9.0	9	13.5	273.0
H7.0-R	7	12.1	220.3

している。

実験で使用した試験体は、幅5,000 mm、高さ2,500 mmであり、剛体壁前面を全て覆うようにジオセル緩衝体を施工している。剛体壁には図-1に示すように全24個の重錘伝達衝撃応力測定用ロードセルを規則的に埋設している。緩衝体を使用したジオセルは、展開時の寸法が厚さ800 mm、幅2,000 mm、高さが200 mmと170 mmの部分を持つ階段状となっている。高さ200 mm部と170 mm部を交互に全12段積み上げ、最上段のみ1段で施工することによって高さを2,500 mmとなるように仕上げた。

試験体の中詰材には、入手しやすく排水性能や凍上防止性能のよい単粒度碎石6号を充填し、1層ごとに充填材の砂と合わせて振動プレートで転圧した後、次段のジオセルを積み上げた。また、緩衝体の安定性と施工性を考慮して、重錘の衝突面が1:0.2の勾配(2分勾配)になるように1層につき34 mmと40 mmの交互にセットバックをして施工している。上下方向には、各段ユニットの連結効果を高めるために鉄筋D19(長さL=500 mm)にて

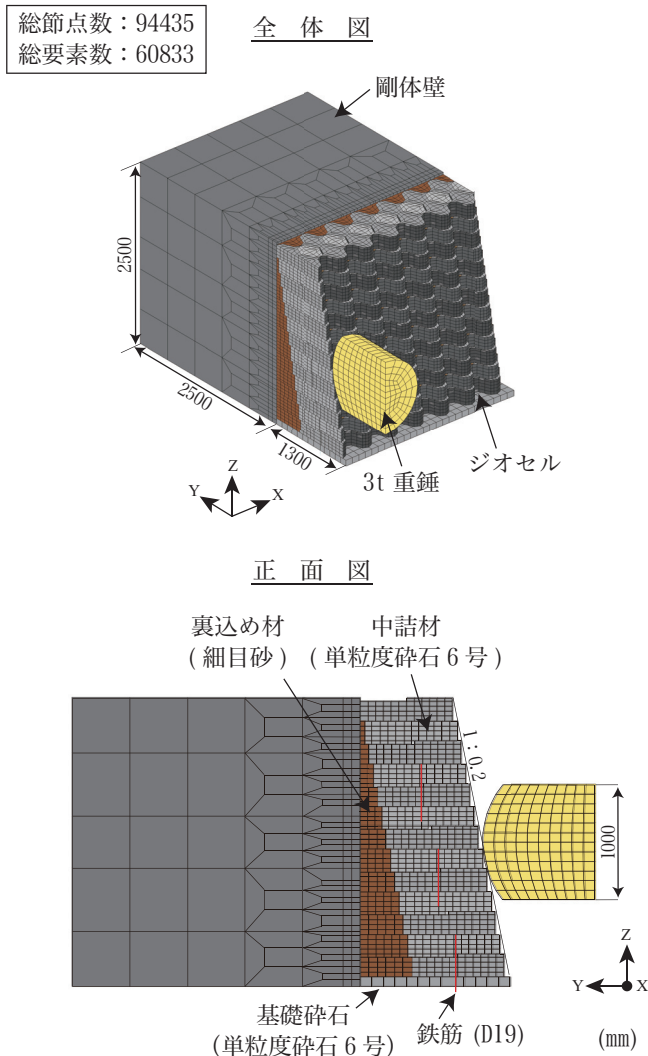


図-2 有限要素モデル

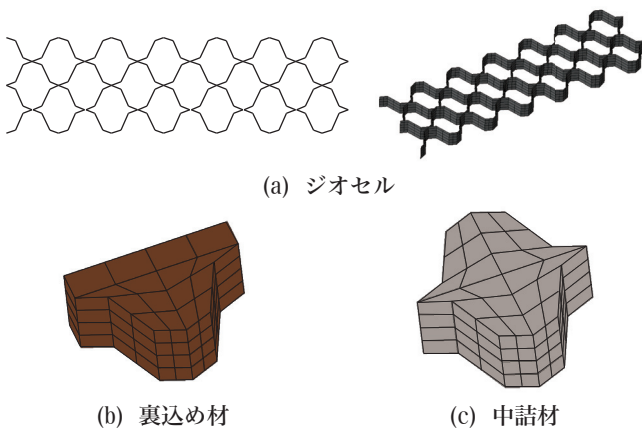


図-3 モデル拡大図

連結している。さらに、ジオセル溶着部の剥離による中詰材のこぼれだしを最小限に抑えるために、幅方向全域にジオネットを2段につき1枚敷設した。表-1に示すように実験ケースは重錘高さ $H = 2.0, 3.75, 5.0, 7.0, 9.0$ mの5ケースと、 $H = 9.0$ mから重錘を落下させたのちに $H = 7.0$ mからの連続載荷を行う1ケースの計6ケースである。なお、実験の詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

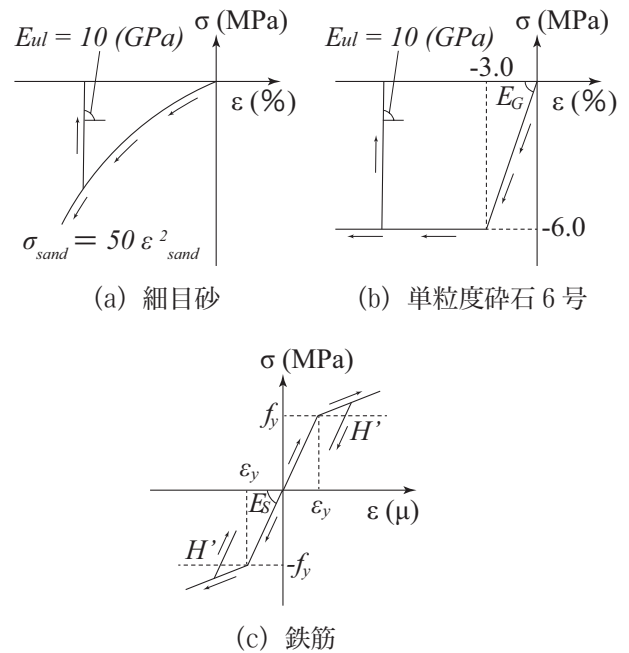


図-4 材料構成則

2.2 有限要素モデルおよび境界条件

図-2には、本数値解析で用いた有限要素モデルの要素分割状況を、図-3には、ジオセル、細目砂、単粒度碎石6号のモデルを拡大して示した。本モデルは1/2スケールで作成し、鉄筋を2節点梁要素、ジオセルを4節点板要素、それ以外は8節点個体要素を用いてモデル化した。要素長は50 mm程度である。なお、ジオネットと地盤はモデル化していない。細目砂や単粒度碎石6号は流体ではなく連続体でモデル化している。また、ジオセルの溶着部や中詰材・基礎碎石の鉄筋埋込部は剛結としている。

境界条件に関しては、両端部をX軸方向固定、下端部を完全固定、地盤に埋め込まれている鉄筋についてはその部分を完全固定とした。衝撃荷重の載荷方法は重錘に各実験ケースの実測重錘衝突速度を初速度として与えることで再現した。摩擦と減衰は考慮していない。

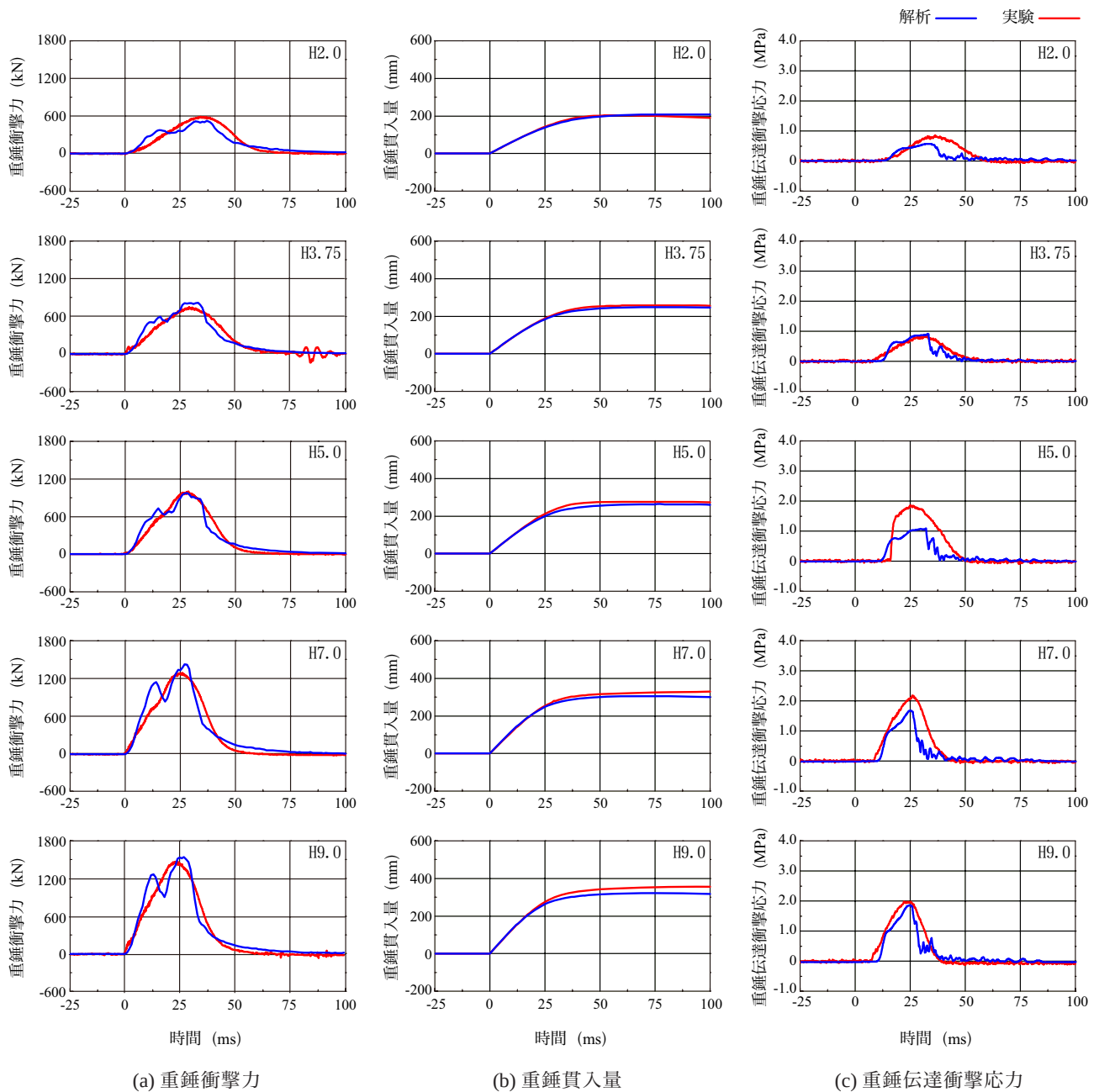
2.3 各材料モデルと物性値、構成則

表-2は本数値解析で使用した各材料モデルと物性値を示している。剛体壁は一般的なコンクリートを想定した値を入力し、弾性体としている。剛体壁に弾性体を用いているのは伝達衝撃応力を出力するためである。ジオセルは高密度ポリエチレン素材であることから、弾性係数 $E = 1$ GPaとし、密度はジオセル1枚の質量をモデルの体積で除した値を入力した。ジオセルの破断は再現していない。

図-4は細目砂、単粒度碎石6号、鉄筋の材料構成則を示している。細目砂と単粒度碎石6号は既往の研究^{4),5)}を参考にそれぞれの値を設定している。細目砂は応力ひずみ曲線に二次式 $\sigma = 50\epsilon^2$ を定義しており、ポアソン比 $\nu = 0.06$ とした。単粒度碎石6号は圧縮強度 $\sigma = 6.0$ MPa、弾性係数 $E_G = 0.2$ GPaとしている。鉄筋についてはSS400を仮定し、降伏応力 245 MPa、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

2.4 数値解析ケース

本数値解析では、ジオセル構造を用いた実規模重錘衝撃実験全6ケースのうち、連続載荷であるH7.0-Rを除く5



図－5 各種時刻歴応答波形

ケースの数値解析を実施した。今後、H7.0-R やジオセルを緩衝体とした 1/2 スケール落石防護擁壁の重錘衝突実験⁶⁾の数値解析も実施する予定である。

3. 数値解析結果および考察

図－5 には、実験結果と数値解析から得られた各種時刻歴応答波形を比較して示している。なお、(c) 図に示す重錘伝達衝撃応力は出力周期を 0.1 ms と定義しており、高周波成分が多く含まれているため、ワード数 11 の移動平均をかけ、平滑化を行った。

(a) 図に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験から得られた重錘衝撃力波形はいずれも正弦半波状の 1 波のみで構成されているのに対し、本解析から得られた重錘衝撃力波形は 2 波で構成されていることが分かる。これは単粒度碎石 6 号と細目砂の物性や流体を連続体でモデル化して

いることに起因していると考えられる。しかしながら、衝撃力作用時間とピーク到達時間、最大重錘衝撃力は実験値と概ね等しい。ピーク到達時間は実験との誤差が 5 ms 程度であり、表－3 より最大重錘衝撃力における実験値と解析値の誤差は大きいものでも 10 % 程度である。

(b) 図に示す重錘貫入量波形に着目すると、実験結果では衝突後から衝撃力が伝達するまで増加し、それ以降は一定となる傾向がみられ、また、数値解析においても実験結果と同様な傾向が見られた。

(c) 図に示す重錘伝達衝撃応力波形に着目すると、実験では H5.0 を除く 4 ケースで正弦半波状の 1 波のみで構成されているのに対し、本解析では 2 波から構成されているような挙動を示しているのがわかる。これは重錘衝撃力波形と同様に、単粒度碎石 6 号と細目砂の物性や流体を連続体でモデル化していることに起因していると考えられる。特

表－2 各物性値一覧

	材質	物性	密度 ρ (t/mm ³)	弾性係数 E (GPa)	降伏応力 σ (N/mm ²)	ポアソン比 ν	除荷勾配 E (GPa)
剛体壁	コンクリート	弾性体	2.35E-09	30	—	0.167	—
ジオセル	ポリエチレン		6.785E-10	1	—	—	—
重錘	鋼材		4.372E-09	206	—	0.3	—
鉄筋		等方弾塑性体	7.85E-09		245		—
中詰材	単粒度	等方 クラッシュブル フォーム	1.49E-09	0.2	—	0.25	10
基礎碎石	碎石 6 号						
裏込め材	細目砂		1.41E-09	—	—	0.06	

表－3 各最大応答値一覧

ケース名	最大重錘衝撃力		実験値との誤差 (%)	最大重錘貫入量		実験値との誤差 (%)	最大重錘伝達衝撃応力		実験値との誤差 (%)
	P_{tmax} (kN)			δ_{max} (mm)			σ_{tmax} (MPa)		
	実験値	解析値		実験値	解析値		実験値	解析値	
H2.0	589.44	520.44	-11.71	203.04	208.65	2.76	0.86	0.58	-32.49
H3.75	749.82	822.06	9.63	257.91	248.36	-3.70	0.86	0.95	9.62
H5.0	1000.77	976.68	-2.41	276.62	263.11	-4.88	1.86	1.27	-31.57
H7.0	1297.77	1434.52	10.54	329.01	305.84	-7.04	2.18	1.72	-21.22
H9.0	1488.16	1559.13	4.77	357.29	322.33	-9.79	1.98	1.88	-5.34

に、剛体壁前面に設置している裏込め材である細目砂の影響を大きく受けていると考えられる。波形の立ち上がりに関しては、実験と同様に、本解析においても重錘衝突時刻から10～15 ms遅れて励起していることが分かる。H2.0においては実験と概ね一致するように励起しており、H5.0においては実験よりも本解析のほうが4.5 ms早く励起している。それ以外の3ケースでは本解析のほうが3 ms遅く励起していることがわかる。最大重錘伝達衝撃応力に関しては、H5.0を除く4ケースでは実験値と概ね等しいが、H5.0においては実験値の6割程度と誤差が大きい。これは実験において単粒度碎石の締め固めが不十分であったことや衝突時の重錘に傾きがあったことなどが原因として挙げられる。

4. まとめ

本研究では、単粒度碎石を充填したジオセル緩衝体の緩衝効果を適切に再現できる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実施した。この研究により得られた結果は以下の通りである。

- 1) 砂のポアソン比 $\nu = 0.06$ ，碎石の圧縮強度 $\sigma = 6.0$ MPa，弾性係数 $E_G = 0.2$ GPaと設定した場合に、重錘衝撃力、重錘貫入量、重錘伝達衝撃応力について実験結果と概ね一致する。
- 2) 重錘衝撃力波形に関して、解析では2波で構成されているが、衝撃力作用時間、ピーク到達時間、最大重錘衝撃力は実験値と解析値が概ね一致している。
- 3) 重錘貫入量と重錘伝達衝撃応力については、波形の形状、最大値とも概ね一致している。

今後は、実験では実施できなかった大きな入力エネルギーに対して、数値解析を行い、緩衝性能を適切に評価できるモデルの構築を目指す予定である。

謝辞

本論文のとりまとめにあたり、日本サミコン株式会社の村田佳久氏、佐竹比呂志氏、和光物産株式会社の渡邊忍氏に多大なるご支援を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 栗橋 祐介, 牛渡 裕二, 中野 雄哉, 小林 清次, 岸 徳光: ソイルセメント・ジオグリッド・EPSから成る三層構造の静的耐荷挙動に関する実験的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.69A, 2013
- 2) 大山 亮貴, 小室 雅人, 栗橋 祐介, 村田 佳久, 渡邊 忍: 単粒度碎石を充填したジオセルの緩衝効果に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.1002-1011, 2015
- 3) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 4) 岸 徳光, 岡田 慎哉, 今野 久志, 池田 憲二: 敷砂緩衝材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1323-1332, 2003
- 5) 平田 健朗, 小室 雅人, 山口 悟, 岸 徳光: 碎石緩衝材を設置した実規模落石覆道の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, pp.601-606, 2015
- 6) 大山 亮貴, 小室 雅人, 栗橋 祐介, 村田 佳久, 渡邊 忍: ジオセルを緩衝体とした1/2スケール落石防護擁壁の重錘衝突実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70-I, pp.531-532, 2015