有限要素法に基づいたソイルセメントの衝撃挙動解析に関する一検討

A consideration on impact response analysis of soil-cement by means of FE analysis method

室蘭工業大学大学院	○学生員	トゥラシット	トゥン (Toung Thoulasith)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学大学院	正 員	牛渡 裕二	(Yuji Ushiwatari)

1. はじめに

近年,落石防護擁壁用の新しい緩衝工として「ソイル セメント+ジオグリッド+EPS」から構成される三層緩 衝構造が考案されている.

現在,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, 精力的に実験が実施されている.しかしながら,今後,こ の新しい緩衝システムに関して合理的な設計法を確立し 効率よく実用化するためには,実験的検討は勿論のこと, 緩衝性能を定量的に明らかにするための数値解析による 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埋設しかつ発泡ス チロールブロック(以後,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、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. 数值解析概要

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、荷重計が設置された鋼製底盤(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.荷重計は、底盤中央部および左側50 mm の位置に1個ずつ、および中央部から右側端部まで50 mm 間隔で11個の計13 個設置されており、その受圧面は底盤上面と面一となっている.

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トを埋設しかつ 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 φ 200 mm であり、 その底面には片当たり防止のために 2 mm のテーパーが設 けられている.

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



図-1 実験装置概要

適切な材料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-2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 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,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)ソイルセメントと EPS 間, (3) ソイルセメントあるいは EPS 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.解析における減衰定数は,質量比例分のみを考慮す





(b) ジオグリッド埋設ソイルセメントと EPS の場合

図ー2 有限要素モデル

表-1 パラメーター覧

σ (MPa)				
f_t				
-0.15				
$\mathcal{E}(\%)$				



 σ (MPa) 70 55 5 0 0.11 ε (%) 0.22 0.38



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.

2.3 材料構成則

図-3(a)にはソイルセメントと EPS 材 に関する応力-ひずみ関係を示している。本研究では、ソイルセメントの 材料構成則として、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-ひずみ関係を用いること

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

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.なお,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-1**には, 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 材に関しては,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-3(b)には,その応力-ひずみ関係を示している.EPS 材は約5%のひずみから 55%までの勾配が緩やかである.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、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 性体と仮定しており、密度、弾性係数およびポアソン比 は、それぞれ 0.289 ton/m³, 0.4 GPa および 0.4 と設定した.

平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号



図-4 各種応答波形 (V = 3 m/s)

3. 数值解析結果

3.1 ソイルセメント単体の場合

図-4には、重錘衝突速度がV = 3 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応 答波形を実験結果と比較する形で示している.

まず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向にあることが分か る.なお, 伝達衝撃力および全反力に関してもソイルセ メントの強度が大きいほど,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力の作用時間とほぼ等しい.

一方,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.しかしながら,重 錘貫入量は若干小さく評価されるものの,圧縮強度を3 MPaとする場合が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-4 (b)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.

図-5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実験終了 後のひび割れ状況と比較して示している.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、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、載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.一方,数値解析結果 を見ると,引張強度が圧縮強度の 1/10 ~ 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. また、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.実験結果と 数値解析結果を比較すると、引張強度は圧縮強度の 1/60 程度が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、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3 MPa,引張強度を $f'_c/60$ ($f_t = 0.05$ MPa) として、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-6には、V=4m/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-4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、重錘衝撃力お よび伝達衝撃力に関する数値解析結果は実験結果の波形 性状と必ずしも一致していないものの,波形の立ち上が りや最大値は両者概ね一致していることが分かる.一方, 数値解析における全反力に関しては,実験結果の1/4 程度 と非常に小さい.また,重錘貫入量に関しても,実験結 果では衝突初期から約 22 ms で最大値を示しているのに 対し,数値解析結果では 50 ms 以降も変位が増大してい る.これより,ジオグリッドを埋設したソイルセメント

平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号



衝撃載荷実験の状況 図-5 引張強度の変化によるひび割れ分布の比較



図-6 各種応答波形 (V = 4 m/s)

と EPS を併用する場合の緩衝効果を適切に評価するため には、ジオグリットや EPS の材料構成則の見直し等を行 うなど、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,以下のようになる.

- 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^t_c を 3 MPa, 引張強度を f^t_c/60 (f_t = 0.05 MPa) と 設定する場合に,数値解析結果は実験結果を適切に 再現可能である.
- 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最大値は両者概ね一致している。
- 3) しかしながら、重錘貫入量や反力などは実験結果を適切に再現できていない.これより、今後ジオグリットや EPSの材料構成則の見直し等を行い、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。

参考文献

- 1) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 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
- 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