

ソイルセメントの衝撃による応力伝播とひび割れの進展に関する個別要素解析

名古屋工業大学
名古屋工業大学大学院
構研エンジニアリング
構研エンジニアリング
構研エンジニアリング

正会員
学生会員
フェロー会員
正会員
正会員

○前田 健一
内藤 直人
川瀬 良司
牛渡 裕二
保木 和弘

1. はじめに

牛渡らが提案する，落石防護擁壁用の三層緩衝構造（ソイルセメント+ジオグリッド+EPS）の合理的な設計を行うために，その構成材料であるソイルセメントの緩衝効果発揮メカニズムを解明する必要がある．

そこで，本研究では，個別要素法（Discrete Element Method，以下DEMと略す）による衝撃力解析¹⁾を実施した．ソイルセメントの結合は，粒子間付着力を再現するために，ボンド要素を用いた．粒子間ボンドに発生する応力の伝播に着目し，ひび割れの進行のメカニズムとソイルセメント内の応力との関係について検討した．DEMを用いた解析結果の妥当性の確認は，別途実施した重錘落下衝撃実験²⁾結果との比較により行っている．

2. 模型実験およびDEM解析の方法

2.1 重錘落下衝撃模型実験の概要

ソイルセメントの重錘落下衝撃実験に使用した実験装置の概要を図-1に示す．実験では，鋼製底盤に面一で設置されたロードセルで底面での伝達衝撃応力を計測，鋼製底盤を支持する9個のロードセルの合計値を伝達衝撃力とした．重錘は，載荷部直径は200mm，質量400kgで，重錘衝撃力は，重錘先端に組み込まれているロードセルで計測し，レーザー式変位計を用いて重錘貫入量を算出した．ソイルセメントの一軸圧縮強度は0.83～1.11MPaである．

2.2 DEM解析の概要

DEM解析モデルには，曲げ剛性を有するボンド要素を用いた（図-2）．ボンド要素の直径 D_b ，曲げ剛性 I_b ，ばね係数 k_b ，ボンド強度 s_b を設定する（接触面法線・接線方向で同じ）．簡単のため，ボンドのバネは線形とした．ボンド中には，接触面法線方向の接触力 f_n による引張り垂直応力 f_n/D_b と曲げモーメント M_b による最大垂直応力 $(M_b/I_b) D_b/2$ の和であるボンド応力の最大値 σ_{bmax} が引張強度 s_b に達する

と，ボンド要素が破断する．ボンド強度 s_b の設定は，DEMによる一軸圧縮試験を行い，実際の材料の強度と解析強度 q_0 が整合するように決めた．本論文では， $s_b=3.0\times10^8\text{Pa}$ を基本値としている．ボンド要素以外の粒子の解析パラメータは表-1に示す値とした．バネ定数は線形としソイルセメント試験体の弾性係数を参考に決定している．パラメータの決定方法の詳細は既報に詳しい．

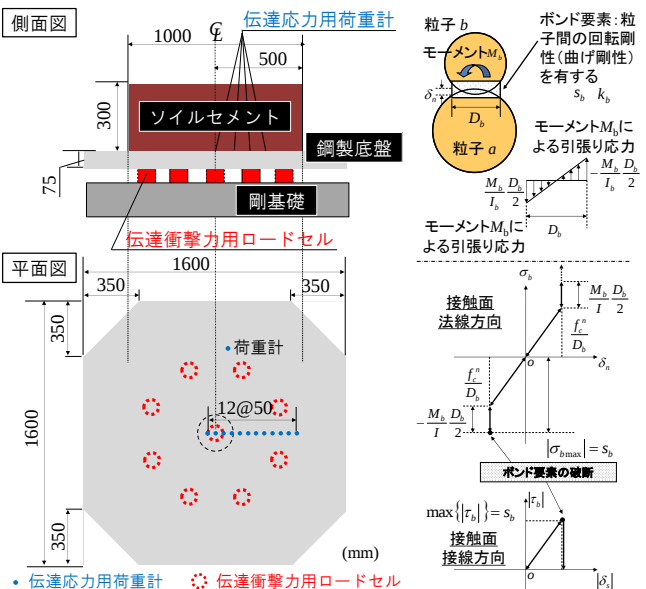


図-1 模型実験の概要

図-2 ボンド要素

表-1 DEM解析に用いた粒子の基本パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	最大粒径 D_{max}	0.0050
	最大粒径 D_{min}	0.0100
	平均粒径 D_{50}	0.0075
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2790
接触面法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接触面接線方向ばね定数	k_s (N/m)	5.0×10^6
接触面法線方向減衰定数	h_n	1.0
接触面接線方向減衰定数	h_s	1.0
粒子間摩擦角	ϕ_u (deg.)	25

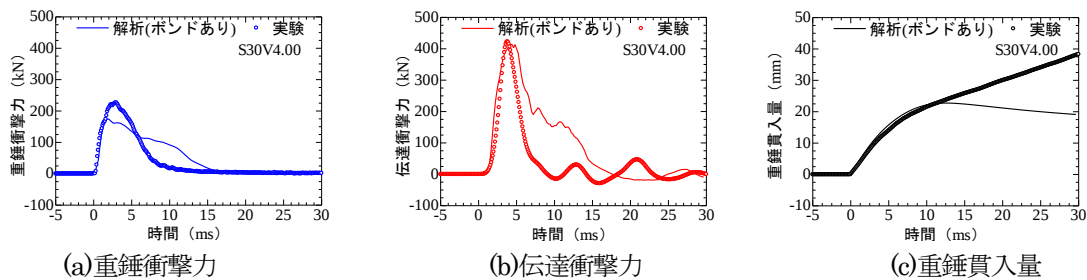


図-3 実験結果と解析結果の各種応答波形

3. 解析結果および考察

3.1 DEM 解析結果と実験結果の比較

衝突速度 4.00m/s におけるソイルセメント試験体 (1m 四方, 厚さ 0.3m) と二次元試験体 (幅 1m, 厚さ 0.3m) の数値解析の結果を図-3 に示す。

図-3(a)から, 重錘衝撃力波形の立ち上がり部分は実験結果と一致している。しかし, 最大値は, 解析値の方が実験値より少し小さくなる。また, 解析結果の方が, 衝撃力が低下するまでに時間を要し, 実験結果の 2 倍程の長さである。また, 図-3(b)から, 伝達衝撃力波形は, 立ち上がり部分が実験結果と概ね一致しており, 最大値も実験値とほぼ等しいことが分かる。しかし, 衝撃力が最大値に達した後, 衝撃力が低下するまでの時間は, 実験結果よりも 2 倍程度長い。第 2, 第 3 の波形が, 実験では見られるものの解析では明瞭には見られない。さらに, 図-3(c)より, 重錘貫入量は, 貫入初期の部分では実験値とほぼ一致しているが, 解析の方が早く最大貫入量に達し, その後, リバウンド傾向に転じていることが分かる。これらの理由には, 本解析が二次元であること, ボンド要素のバネ, 強度モデルが単純化しすぎていることが考えられ, 今後の検討課題とする。

3.2 ソイルセメント内部の応力分布とひび割れの関係

図-4 では, ひび割れの進展とボンド応力の分布の変化を比較する。まず, 重錘衝突直後の $t=1\sim 5\text{ms}$ では, 重錘直下から放射状に伝播する強い圧縮応力 (黒色) が確認され, それに直交するように, 同心円状に強い引張応力 (赤色) が発生することが分かる ($t=2\text{ms}$ では顕著である)。また, この放射状の圧縮応力と同心円状の引張応力から 45° 傾いた方向に最大せん断応力が発生すると考えられる。そのため, 重錘両端では応力が集中し, 鉛直にひび割れが生じるが, $t=5\sim 10\text{ms}$ では, せん断によって重錘直下から逆三角形を作るとようにひび割れが進行する。 $t=10\text{ms}$ 以降も, 逆三角形の延長線上にひび割れが進行し, $\times$ の字のようにひび割れが進展する。また, $t=15\text{ms}$ において試験体底面付近で強い引張力が発生していることが確認された。

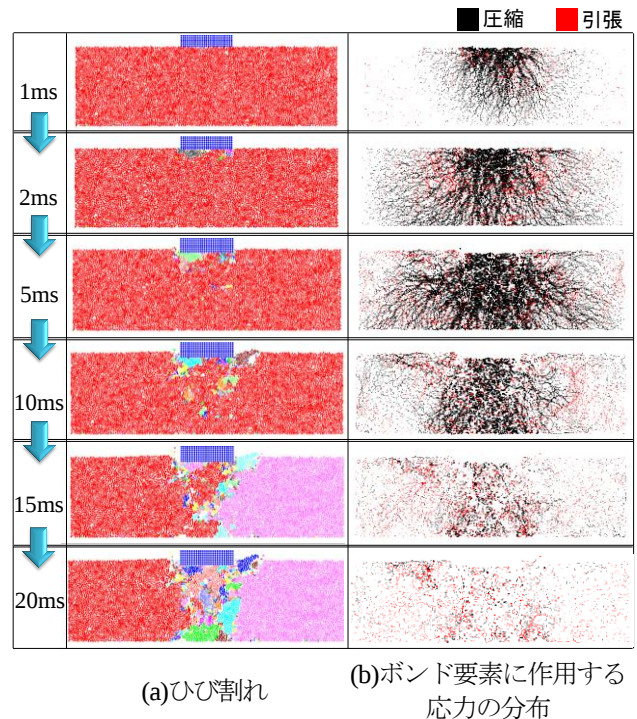


図-4 ソイルセメント試験体の破壊過程とボンドの働き

4. まとめ

ソイルセメントの衝撃力伝達挙動に関する二次元 DEM 解析を実施し, 得られた主な結果は以下の通りである。

- 1) 重錘衝撃力波形, 伝達衝撃力波形, 重錘貫入量波形の立ち上がり部分は, 実験結果とほぼ一致しており, 衝撃力の最大値は実験値を再現することができる。
- 2) ソイルセメントは, 重錘衝突時に重錘直下から放射状の圧縮応力が伝播し, それに直交するように同心円状の引張応力が発生することが分かった。ソイルセメントの耐衝撃性能を向上させるには, 同心円状の引張力に対する補強が効果的であると言える。

参考文献

- 1) 前田健一, 羽柴寛文, 刈田圭一, 牛渡裕二, 川瀬良司: 二次元固相要素法を用いた落石による水平掘削層の衝撃力伝達挙動, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol.67, No.2, pp.355-364, 2011.9.
- 2) 山口悟, 岸徳光, 栗橋佑介, 牛渡裕二: ソイルセメントに関する重錘落下衝撃実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.733-738, 2012.7.