論文　ソイルセメントの衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析

内藤　直人[*1]・前田　健一[*2]・牛渡　裕二[*3]・山口　悟[*4]

要旨：本研究では，ソイルセメントの衝撃力緩衝効果発揮メカニズム把握を目的として，二次元個別要素法解析を実施し，衝突によるひび割れから破壊までの挙動を観察した。その結果，ボンド要素を用いると，衝撃応答波形の立ち上がりから最大衝撃力部分までは模型実験結果と概ね一致することが分かった。また，衝撃力伝播時には重錘直下から放射状に伝播する圧縮応力と，それに直交するように同心円状に伝播する引張応力が発生することが分かり，引張強度を増加することでソイルセメントを補強できることが明らかになった。

キーワード：ソイルセメント，衝撃，個別要素法，ひび割れ，引張

1. はじめに

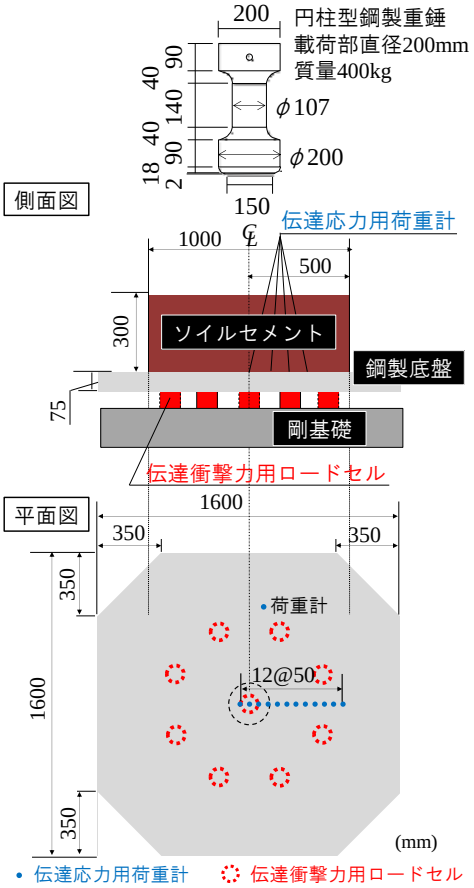
我が国で多発する落石災害への対策工としてロックシェッドや落石防護擁壁などがある。それら落石防護構造物の耐衝撃性能の向上や既存の擁壁の補強などを，建設コストを抑えながらも実施するために，経済的な緩衝工の開発が必要である。牛渡らは，落石防護擁壁用の新たな緩衝システムとして，ソイルセメント＋ジオグリッド＋EPS の三層緩衝構造の研究開発を進めており，系統的に数多くの実験を実施している [1)−3)]。緩衝工の合理的な設計を行うために，緩衝性能発揮メカニズムを解明するための模型実験と数値解析を用いた検討が必要である。

そこで，本研究では，落石防護工の合理的な設計の一助となるように個別要素法（Discrete Element Method，以下 DEM と略す）による衝撃力解析 [4), 5)]を実施した。コンクリート分野で実施されている DEM 解析 [6)−9)]を参考にしながら行った。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。本研究では，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起歪柱型ロードセル（受圧面の直径 20mm，容量 10MPa）で底面での伝達衝撃応力を計測，鋼製底盤を支持する 9 個の起歪柱型ロードセル（受圧面の直径 87mm，容量 100kN）で計測した値を足し合わせることで伝達衝撃力を算出した。なお，伝達衝撃力用ロードセルは，実験室のコンクリート製のピット内に鋼製の杭で固定された厚板鋼板（剛基礎）に設置されている。重錘は，円柱型鋼製重錘で載荷部直径は 200mm，質量 400kg で，衝突部での片当たりを防止するために 2mm のテーパが設けられている。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。



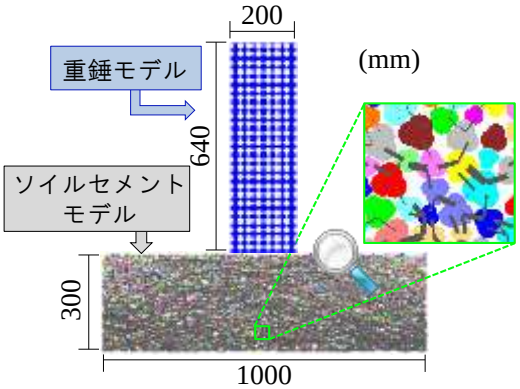
図−1　実験装置概要

*1 名古屋工業大学大学院　工学研究科　社会工学専攻　(学生会員)
*2 名古屋工業大学　工学部　都市社会工学科　教授　工博　(正会員)
*3 （株）　構研エンジニアリング　防災施設部　技師長　(正会員)
*4 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所　寒地構造チーム　研究員　(正会員)

ソイルセメントは，登別産の中粒砂（均等係数 2.6，比重 2.79g/cm^3，吸水率 2.46%，最適含水比 16%）を用い，早強ポルトランドセメントをセメント量 100kg/m^3 で添加し，最適含水比で練り混ぜた。打設方法は，攪拌後，平面寸法 1m×1m の型枠に厚さ 5cm 毎に足踏みと突き固めにより締固め，養生期間は σ7 とした。ソイルセメントの一軸圧縮強度は 0.83～1.11MPa である。

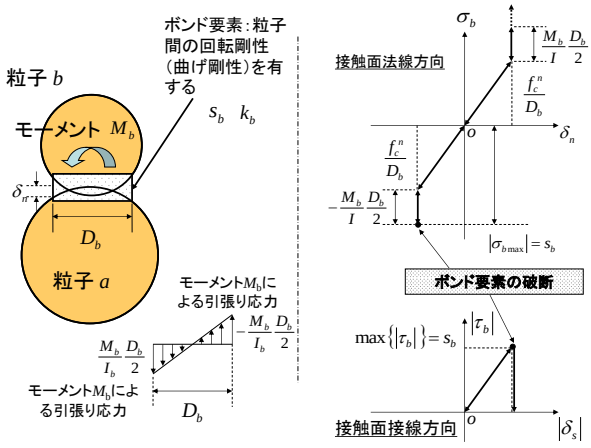
2.2 DEM 解析の概要

DEM は，不連続体の運動を解く際に広く一般に使われており，粒子集合体挙動や破壊現象を直接的に解析できる。実現象とパラメータとの関係の整理については十分とは言えないが，単純化されたモデルで構成されており，最近の研究では，パラメータと材料特性について系統的な整理もされつつある。そこで，本手法を採用した。

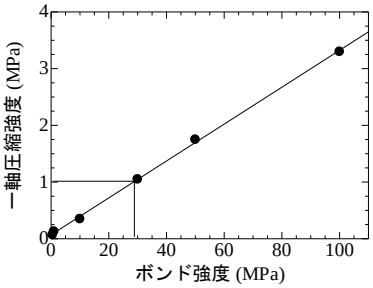


図－2　模型実験の DEM 解析モデル

ソイルセメント試験体は，**図－2** の緑枠内のように等粒径の円形粒子を 3 個剛結した非円形粒子をパッキングし，灰色線のようにボンドで非円形粒子間を結合した。非円形粒子の導入によって幅広い間隙比調整が可能となり，土の強度と圧縮性の両方の性能を再現することができる。重錘モデルは，直径 200mm で衝突面は平面になっており，衝突部の形状は実験条件を再現している。



図－3　曲げ剛性を有するボンド要素モデル



図－4　一軸圧縮試験強度とボンド強度との関係

また，**図－3** に示す，曲げ剛性を有するボンド要素を用いた。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_c^n による引張り垂直応力 f_c^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_u が整合するように決める（**図－4**）。本論文では，**図－4** で q_u=1.0MPa に対応する s_b=3.0×10^{8}Pa を基本値としている。ボンド要素以外の非円形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 [4), 5)] に詳しい。

表－1　DEM 解析に用いた非円形粒子の基本パラメータ

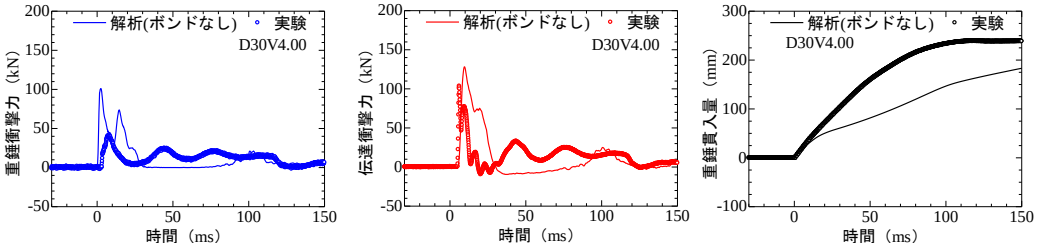
パラメータ	記号（単位）	基本設定値
粒子直径	最大粒径 D_{max} 最大粒径 D_{min} 平均粒径 D_{50}	0.0050 0.0100 0.0075
粒子の密度	ρ_s（kg/m^3）	2790
接触面法線方向ばね定数	k_n（N/m）	2.0×10^7
接触面接線方向ばね定数	k_s（N/m）	5.0×10^6
接触面法線方向減衰定数	h_n	1.0
接触面接線方向減衰定数	h_s	1.0
粒子間摩擦角	ϕ_μ（deg.）	25

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

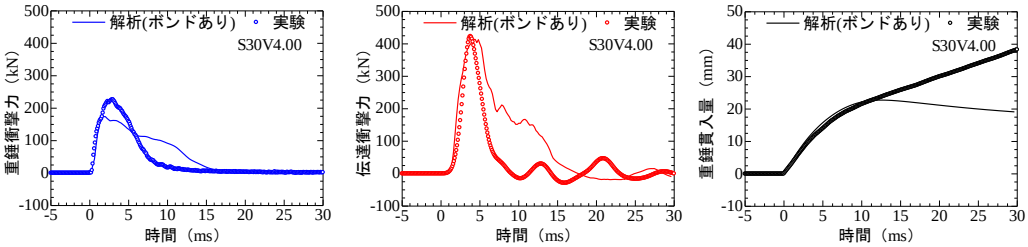
ソイルセメント試験体（1m 四方，厚さ 0.3m）に重量 400kg の重錘，を衝突速度 3.00m/s，3.54m/s，4.00m/s で衝突させた衝撃模型実験と二次元試験体（幅 1m，厚さ 0.3m）の数値解析の結果を中心に示す。**図－5，6** は，重錘衝突速度 V=4.00m/s の場合の衝撃応答波形について，解析結果と実験結果とを比較している。

図－5 は，ボンドなしの解析結果とソイルセメントの模型実験と同様の条件で，厚さ 30cm の敷砂に対する衝撃実験結果との比較である。**図－5（a）** から，重錘衝撃



(a) 重錘衝撃力　(b) 伝達衝撃力　(c) 重錘貫入量

図－5　衝突速度 V = 4.00m/s の実験結果と解析結果（ボンドなし）の各種応答波形



(a) 重錘衝撃力　(b) 伝達衝撃力　(c) 重錘貫入量

図－6　衝突速度 V = 4.00m/s の実験結果と解析結果（ボンドあり）の各種応答波形

力は実験結果よりやや急激に立ち上がり，t=30ms 付近の早い段階で低下する。**図－5**（b）から，伝達衝撃力は，立ち上がり傾向は再現できているが，重錘衝撃力と同様に実験結果より早い段階で低下することが分かる。衝撃力の最大値は，重錘衝撃力は実験値の 2 倍程度を示すが，伝達衝撃力は概ね再現できている。また，**図－5**（c）より，貫入量の波形は実験結果のように上に凸な曲線を描き続けることはなく，砂を押し続ける様子を捉えられていない。ボンド要素を用いない場合，重錘が受ける衝撃力と貫入し続ける様子については再現しきれていないが，伝達衝撃力波形の立ち上がり部分に関しては概ね再現できることが分かった。

図－6 には，ボンドありの場合のソイルセメントの模型実験および解析結果を示す。ボンドなしの場合（**図－5**）と比較して，衝撃力が大きくなっている。**図－6**（a）から，重錘衝撃力波形の立ち上がり部分は実験と解析の結果とはほぼ一致している。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，解析結果の方が実験結果よりも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－6**（b）から，伝達衝撃力波形においても，立ち上がり部分は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，解析の方が実験よりも 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－6**（c）より，重錘貫入量は，貫入初期の部分では解析値と実験値はほぼ一致しているものの，解析結果の方が実験結果よりも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。最大貫入量は，実験結果が 124mm であるのに対し解析結果は 23mm と，あまり貫入できていないことが分かる。これらの理由として，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，これらは今後の検討課題とする。

さらに，重錘が最大貫入量に達した後，弾性的にリバンドを始める 10 数 ms 付近でも重錘には衝撃力が働いている。一方，実験結果では，10 数 ms 付近で貫入速度が低下するものの，直線的に増加している。これは，二次元では三次元に比べてモデル化した砂粒子の間隙比が小さく，粒子の移動の自由度が低いことから，粒子間のずれが拘束され，試験体内の変形は弾性変形が支配的となり，リバウンドが起きやすいと考えられる（この場合，粒子間やボンド要素のバネ係数の影響が顕著になること）。また，設定したボンド要素の破断は，所定の応力に達した瞬間に破断する脆性的なものであり，ボンド破断時に軟化過程を考慮することで実験結果の再現性向上が可能と考えられる。

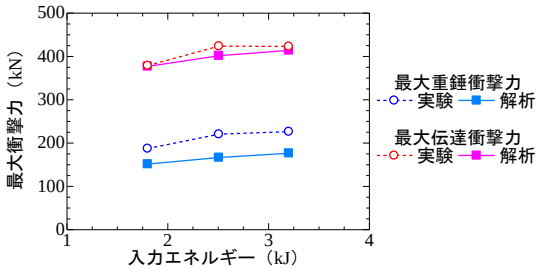


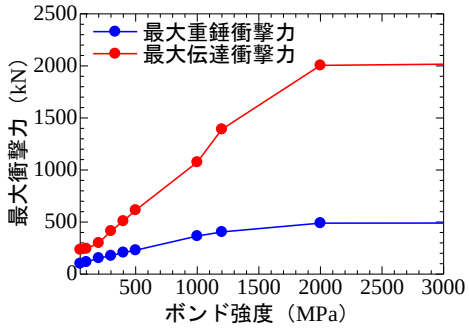
図-7　異なる入力エネルギーにおける実験結果と解析結果の最大衝撃力の比較

図－7 では，入力エネルギーを変えた場合の衝撃力の

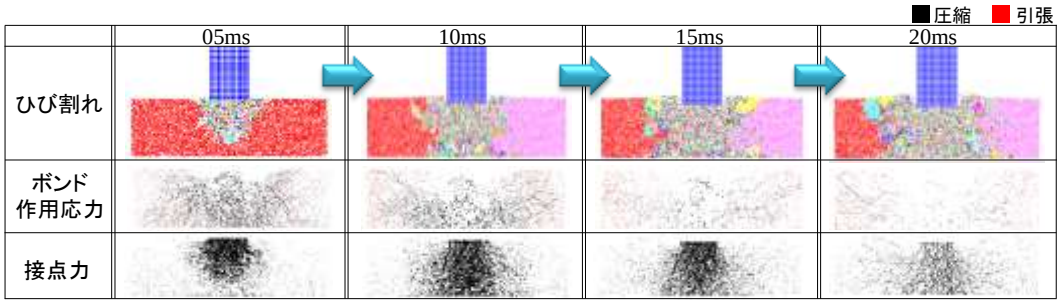
最大値について実験値と解析値を比較しており，入力エネルギーを変えても，実験値とほぼ一致することが確認できた。ここで，実験結果，解析結果ともに伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも大きく，2 倍程度であることについて考える。載荷による応力の伝播過程を考えないゆっくりとした静的載荷条件ではこのような傾向は発揮しない。一方，衝突応力[10]の考え方によると，弾性棒の一端に打撃を加えた場合，棒内に生じる応力は，棒の材料密度に棒中の波動伝播速度（応力波速度）と物体の衝突速度を乗じたものとなる。これは，試験体の応力波速度が速いほど，載荷速度が速いほど，高い応力が発生することを意味する。衝突による載荷速度が大きい本実験及び本解析条件では，応力波が伝播しながら速い載荷が継続していることが，伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも大きくことに寄与していると考えられる。今後は，応力波の伝播に着目した数値解析的検討を行うことで，衝撃力が発達するメカニズムを把握することができると考えられる。

3.2 異なるボンド強度における耐衝撃挙動

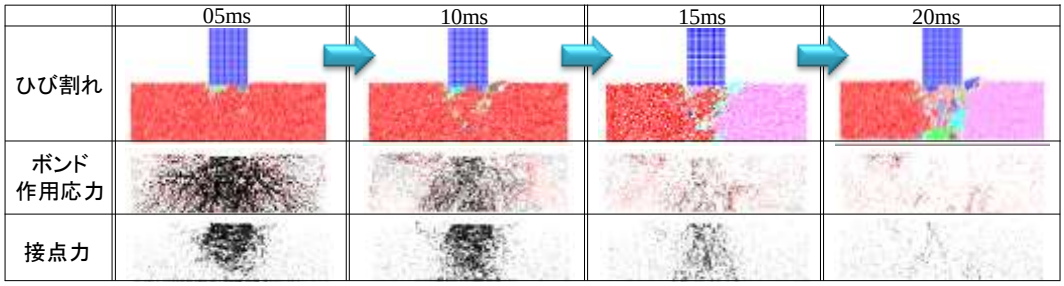
ここでは，ボンド強度 s_b の衝撃特性に及ぼす影響を調べるため，極低強度からひび割れない高い強度まで，s_b=5.0×10^7～3.0×10^{10}Pa の広範な値に対する最大衝撃力について調べた（図－8）。また，図－9(a-c)には，それぞれ，本論文での基本値よりも低い s_b=7.0×10^{7}Pa，基本値 s_b=3.0×10^{8}Pa, 基本値よりも高い s_b=1.0×10^{9}Pa の場合について，ひび割れから破壊に至る様子を示している。図中には，ボンド結合で繋がっている破片（クラスター）が細かくなったとしても区別できるように，時刻毎にクラスター毎に色付けした様子（上段），ボンド要素に発生している力で圧縮を黒，引張りを赤の線（線の太さが力の大きさを表す）で示した様子（中段），粒子要素間の接触による接点力を黒色の線で示している（下段）。



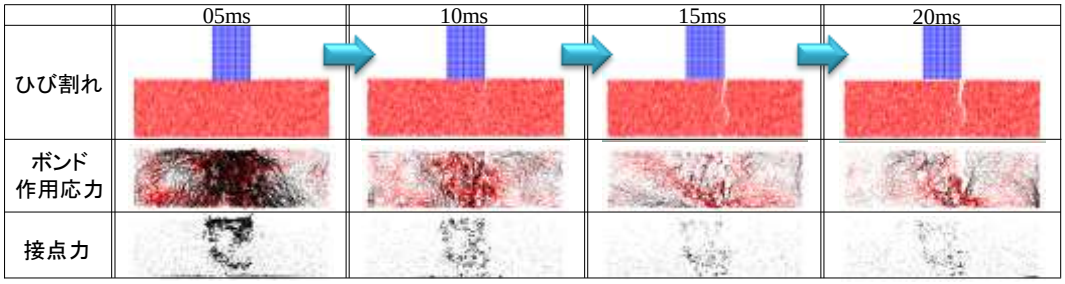
図－8　ボンド強度の違いが最大重錘衝撃力・最大伝達衝撃力に及ぼす影響：衝突速度 V=4.00m/s



（a）ボンド強度 s_b=7.0×10^{7}Pa（弱いボンド強度）



（b）ボンド強度 s_b=3.0×10^{8}Pa（対象とするソイルセメント相当のボンド強度）



（c）ボンド強度 s_b=1.0×10^{9}Pa（強いボンド強度）

図－9　ボンド強度の違いがソイルセメント試験体の損傷，破壊挙動に及ぼす影響：衝突速度 V=4.00m/s

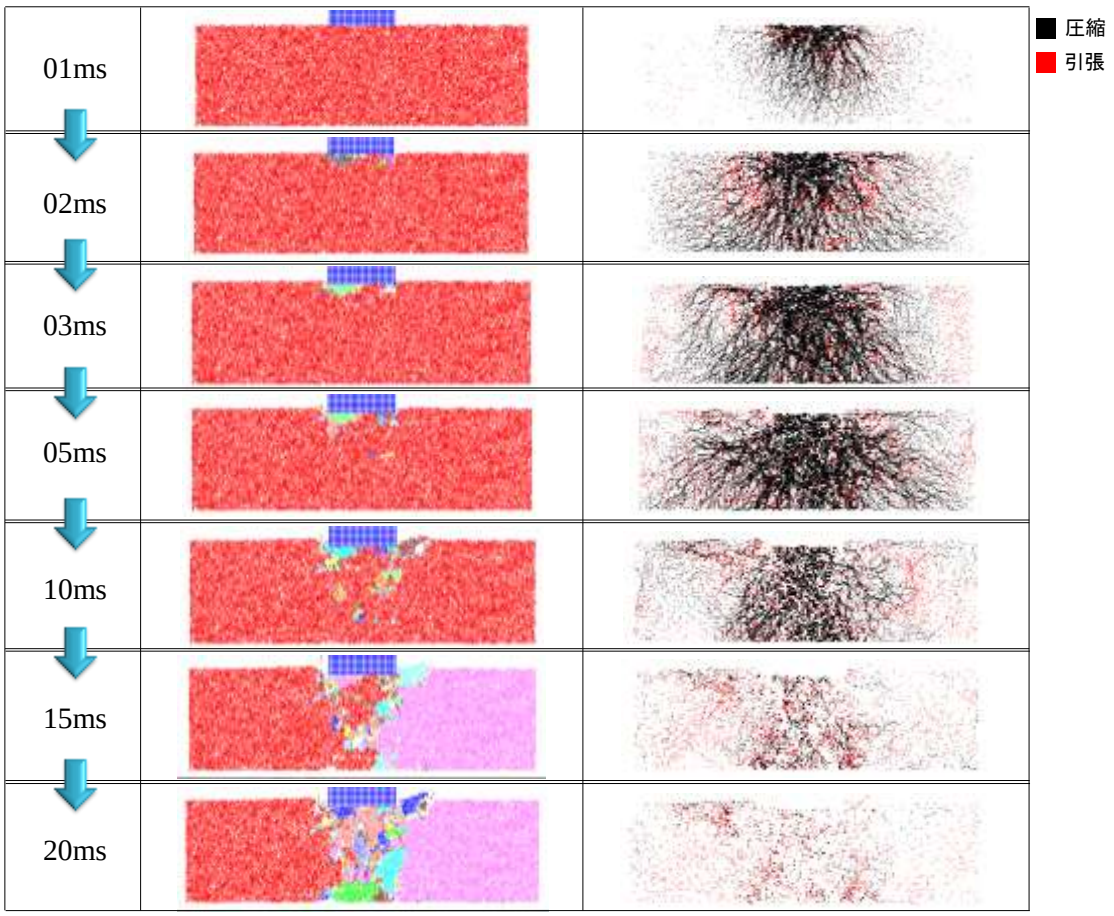
図－8 より，ボンド強度が高いほど重錘・伝達衝撃力の最大値は大きくなる。ただし，ボンド強度を強くしても $s_b > 2.0\times10^9$Pa では衝撃力の値は収束していることが分かる。また，ボンド強度が小さいときは，伝達衝撃力は重錘衝撃力に対する比率は 2 倍程度あるが，ボンド強度が高くなるにつれてその比率は高くなる。$s_b > 2.0\times10^9$Pa のとき，重錘衝突速度 V=4.00m/s において発生する衝撃力ではボンド結合が切れることなく，ひび割れは発生していない。ボンド強度は，粒子間の引張耐力であり，ボンド強度を強くすることはその耐力を増加させる。ボンド要素は粒子同士を結合しているだけなので，ボンド強度が供試体にひび割れが生じない値よりも高い場合には，供試体の剛性などには変化はなく，重錘衝突時の衝撃力伝達挙動は同様となると考えられる。このため，$s_b > 2.0\times10^9$Pa において最大衝撃力の値が収束したと考察できる。また，この時，伝達衝撃力が重錘衝撃力の 4 倍近い値になる理由として，ボンド強度を大きくすると，試験体にひび割れが発生しにくく弾性的に挙動することで，試験体内の応力波速度（波動伝播速度）が速くなり，内部に発生する応力が非常に大きくなるものと考えられる。

ボンド強度が弱い場合（**図－9（a）**）では，ボンド内に発生する応力は小さく，すぐにボンドが破断して重錘直下は砂のような粒状体になり，力の分散効果があると考えられる。この領域では，粒子要素間の滑りや回転が重要で，接触による接点力が増加している（黒線が集中）。

つぎに，本論文の基準値であるソイルセメント試験体相当のボンド強度の場合（**図－9（b）**）では，破片は小さなものから大きなものまであり，ブロック状に壊れることが分かる（上段図）。特に，ひび割れ周辺で細かく砕けた粒子の存在が確認できる。大きな破片塊が維持されており，ボンド要素に発生する応力が増加する（中段図）。

さらに，ボンド強度が強い場合（**図－9（c）**），ボンド要素内応力が高くなり，**図－9（a）（b）**と比べ，ボンドの破断箇所が少なく，大きな引張り応力（中段図の赤線）が広く分布する。また，応力の特異点である重錘の端部付近にのみ，ひび割れが観察される。この場合，粒子要素間の接触による接点力を受け持つことはほとんどなくなり（下段），大半の力をボンドの部分で分担し，ひび割れ後は，力が重錘の真下に伝播しているようである。

よって，ボンド要素の強度に違いによる，ひび割れの発生，ボンドの破断による破片塊の形成過程やその大きさの分布に差が生じることが表現されていると言える。



（a）ひび割れ　　（b）ボンド要素に発生する応力の分布

図－10　ソイルセメント試験体の損傷，破壊過程とボンドの働き：衝突速度 V=4.00m/s，ボンド強度 s_b=3.0×10^{8}Pa

3.3 ソイルセメントの内部応力分布とひび割れの関係

ここでは，特に，ソイルセメント内部のボンド（s_b=3.0×10^{8}Pa）に発生している応力の分布ついて詳しく考察する。**図－10** 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=1～5ms では，重錘直下からソイルセメント底面に向かって強い圧縮応力（黒色）が放射状に広がりながら伝播していることが分かる。このとき，放射状に発生している圧縮応力に直交するように，重錘直下から同心円状に強い引張応力（赤色）が発生，伝播することが確認できた（t=2ms では顕著である）。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。重錘両端では応力が集中し，鉛直にひび割れが生じているが，t=5~10ms くらいでは，せん断によって重錘直下から逆三角形状を作るようにひび割れが進行すると言える。t=10ms 以降も，逆三角形の延長線上にひび割れが進行し，×の字のようにひび割れが進行するのが見てとれる。また，t=15ms においてソイルセメント底面付近で強い引張応力が発生している。

以上のように，ソイルセメントに発生するひび割れの進展には，引張応力の分布と伝播の挙動が強く影響している。したがって，ソイルセメントに発生するひび割れを軽減し衝撃力による耐力を保ちながら，緩衝効果を発揮するには，図中の同心円状の引張応力に対する補強が有効となる。既報 [1)-3)]で牛渡等が提案するような，ソイルセメントにジオグリッドのような耐引張材を入れ，発砲性の EPS と組み合わせた多層の緩衝構造の考え方も有効であると言える。

4. まとめ

本研究では，ソイルセメントの緩衝効果について二次元 DEM 解析を実施し，ひび割れから破壊まで再現することを試みた。本論文で得られた主な結果は以下の通りである。

1) 個別要素法において，粒子要素間にボンド要素を用いてソイルセメントをモデル化した。重錘貫入初期における重錘衝撃力，伝達衝撃力，重錘貫入量の立ち上がり部分の応答波形は実験結果とおおむね一致しており，重錘衝撃力および伝達衝撃力の最大値は実験値を再現することができる。
2) ボンド要素を用いると，ボンドが破断するまでは伝播応力の大半をボンド要素が受け持ち，破断し破片界が細かくなると粒状体のように，粒子要素間の接触による接点力によって力を伝えることがわかった。
3) ソイルセメントの衝撃力伝達挙動には，重錘衝突時に重錘直下から放射状に伝播する圧縮応力と，それに直交するように同心円に広がって伝播する引張応力が発生する。その後，せん断応力による斜め方向の亀裂が発展するが，先行して伝播する引張り力によるボンドの破断の影響が大きい。したがって，ソイルセメントの衝突に対する耐力を増加するには耐引張り材の挿入は効果的であると言える。

参考文献

1) 岡田伸之，岸徳光，牛渡裕二，川瀬良司 : ソイルセメントと EPS ブロックを組み合わせた緩衝工に関する静荷重および衝撃荷重載荷実験, コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.721-726，2012.7
2) 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，Vol.34，No.2，pp.727-732，2012.7
3) 山口悟，岸徳光，栗橋祐介，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
4) 前田健一,羽柴寛文,刈田圭一,牛渡裕二,川瀬良司: 二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積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
5) 羽柴寛文，前田健一，内藤直人，山口 悟，牛渡裕二，鈴木健太郎，川瀬良司 : 落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.68，No.2，pp.443-454，2012.9
6) 平野優，白岩誠史，中島有一，町田篤彦 : 個別要素法による高流動コンクリートの流動性状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.907-912，2000.7
7) 吉國美涼，加藤佳孝，星野公秀，魚本健人 : 個別要素法を用いたコンクリート運搬システムの基礎理論の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1097-1102，2003.7
8) 原木大輔，香月智，藤掛一典 : 個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用, 土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.9，pp.667-678，2006.9
9) 加藤勝秀，国枝稔，上田尚史，中村光 : 3 次元個別要素法による短繊維補強材料の流動解析モデルの構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1228-1233，2012.7
10) 石川信隆，大野友則，藤掛一典，別府万寿博 : 基礎からの衝撃工学，森北出版株式会社，2008