土を用いた落石対策インフラの長寿命化に関する個別要素法解析

Extension Life of Rock Fall Protection Works Using Soil Related 2D-DEM

内藤直人[1]，前田健一[2]，山口悟[3]，牛渡裕二[4]，鈴木健太郎[5]，川瀬良司[6]，今瀬達也[7]

1　名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士前期課程・社会工学専攻
2　名古屋工業大学大学院教授・工学研究科・cjk18541@stn.nitech.ac.jp
3　土木研究所・寒地土木研究所・寒地構造チーム
4　構研エンジニアリング・防災施設部技師長
5　構研エンジニアリング・防災施設部
6　構研エンジニアリング常務取締役
7　名古屋工業大学大学院・工学研究科・博士後期課程・社会工学専攻

概　　要

社会インフラの大更新時代に差し掛かった我が国では，老朽化した構造物の長寿命化が重要課題である。我が国で多発する落石の対策工も例外ではない。既設構造物の長寿命化には，補修・補強・改善の 3 つが考えられる。補強には, 防護工の直接的な損傷を防ぐ敷砂やソイルセメントを用いた緩衝システムがある。改善では，斜面にある崖錐堆積物による落石のエネルギー減衰を適切に評価し，終端速度の再検討などが考えられる。しかし，落石対策工の合理的な維持管理を行うためには緩衝効果を適切に把握する必要がある。そこで，本研究では，土を用いた緩衝材の緩衝メカニズムを解明することを目的に二次元 DEM 解析を実施した。緩衝材内部の応力伝播挙動に着目することで，敷砂緩衝材のように第一ピークや第二ピークが生じる複雑な衝撃力波形を詳細に理解することができ，ソイルセメントのように激しく離散化する衝突現象の解釈に役立つことを示した。

キーワード：落石，敷砂緩衝材，ソイルセメント，応力伝播，個別要素法

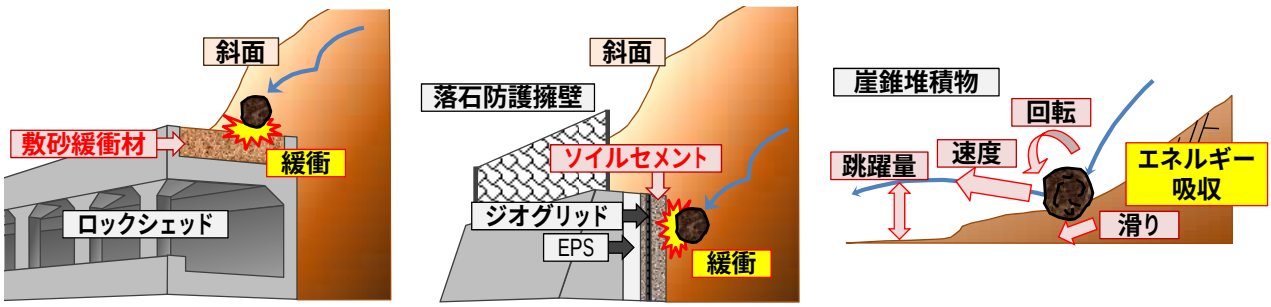
1.　はじめに

我が国において, 高度経済成長期を中心に整備されてきた土木構造物の多くは老朽化が進み, 既設構造物の長寿命化が重要課題の一つである。これは落石防護工においても例外ではなく, 劣化などにより構造物自体の安全性の低下が懸念されるが, 我が国で多発する落石の対策工の場合には，斜面の経年劣化に伴う落石規模の拡大等により，供用期間中に設計荷重が増大するという, 落石防護工としての安全余裕度の低下が大きな問題となっている。このため，戦略的な維持管理方法の提案が急務となっている。

既存の防護工の長寿命化には，補修・補強・改善の 3 つが考えられる。一つ目に，補修では，構造物自体の劣化部分を修復することで要求性能を満たす, 最も基本的な対策方法である。二つ目に，補強では，防護工の直接的な損傷を防ぐ緩衝システムの設置により要求性能を上回るよう管理することが考えられる。例として，ロックシェッドには，屋根である頂版上に設置する敷砂緩衝材[1)]や敷砂・RC 版・EPS という三層緩衝構造が実用化されており，落石防護擁壁には，擁壁背面に設置されるソイルセメント・ジオグリッド・EPS という新たな三層緩衝構造[2)-4)]が提案されている。三つ目に，改善では，今まで設計に考慮されることが少なかった斜面に存在する土塊を防災施設の一部に見込むことで落石外力を見直すこが考えられる。落石発生危険箇所の斜面には崖錐堆積物などが存在している場合が多く, 土による落石エネルギー吸収効果を適切に評価することによって, 防護工到達時の落石速度を精度よく予測して要求性能を設定し直すことができると考えられる。

敷砂緩衝材や崖錐堆積物, ソイルセメントといった落石衝撃力・エネルギーを低減する土を用いた緩衝システムは, いずれも現地の土を緩衝材として用いるため低コストで設置ができ，落石衝撃力の緩衝効果に優れるだけでなく，腐食や劣化などが発生しないことから材料としての安定性に優れている。これらの観点から，土を積極的に防災施設に取り入れることで, 既存の防護工の合理的な長寿命化が図れると考える。

しかし, 現在の落石防護工の設計は許容応力度設計法により行われており, 終局限界を踏まえた性能照査型設計に移行するためには, 敷砂緩衝材やソイルセメントの緩衝効果を適切に評価する必要がある。



(a)敷砂緩衝材　(b)ソイルセメント（三層緩衝構造）　(c)崖錐堆積物

図 1　補強・改善策として考えられる土の防災施設への適用例

本研究では，落石対策工の適切な維持管理の一助となるよう二次元の個別要素法[5]（Discrete Element Method，以下 DEM と略す）を用いて敷砂緩衝材およびソイルセメントの落石衝突に関する数値解析[6),7)]を行った。著者らは，落体の受ける衝撃力（落体衝撃力）と緩衝材を介して構造物に伝達する衝撃力（伝達衝撃力）について，解析結果と大型敷砂緩衝材衝撃実験結果を比較し，二次元 DEM 解析が定量的に衝撃力を表現可能であることを示した[8),9)]。

敷砂緩衝材は，過去の実験的研究から，敷砂厚を厚くすると伝達衝撃力が低減することがわかっている。また，敷砂厚 T と落体径 D^{f} の比（相対層厚 T/D^{f}）が 1 程度では，伝達衝撃力は落体衝撃力の 2 倍程度を示し，相対層厚が小さくなると伝達衝撃力は落体衝撃力との比が 1 倍程度になることが明らかになっている[10)]。しかし，なぜ相対層厚が 1 程度だと両衝撃力の比が 2 倍程度になり，相対層厚が 1 より小さくなると両衝撃力の比が 1 倍程度と小さくなるのか，という問題の解決には至っていない。

ソイルセメントを用いた落石防護擁壁用の三層緩衝構造は，現在，牛渡ら[2)-4)]によって研究開発されているが，落石がソイルセメントに衝突した際のひび割れから破壊に至るまでの緩衝メカニズムは解っておらず，合理的な設計を可能とするためにそのメカニズム解明が求められている。

そこで，本研究では，敷砂層厚及び落体質量を変化させたときの荷重-貫入量関係に着目した衝撃力伝達挙動に関する整理と，伝達衝撃力と落体衝撃力の関係をより明確にするための実験ではできない数値解析的検討を行った。また，ソイルセメントのモデル化を行い，ひび割れから破壊までの挙動を観察することでソイルセメントの緩衝効果発揮メカニズムについて考察した。

2.　敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動

2.1　敷砂緩衝材の数値解析概要

本論文では，二次元 DEM 解析を用いて，落体が鉛直下向きに敷砂緩衝材に落下する様子を解析した。本論文で実施する解析ケース一覧を表 1 に示す。自由落下解析では，相対層厚，落体質量が荷重-貫入量関係に及ぼす影響について考察する。さらに，自由落下後に落体を消滅させる解析では，敷砂貫入途中の任意の時刻で落体を消滅させることで，落石衝撃力波形と伝達衝撃力波形の関係について考察する。

表 1　解析ケース一覧

載荷方法	検討項目	相対層厚	衝突速度	落体質量
自由落下	相対層厚	0.25～1.50	14.0m/s	2.0t
自由落下	落体質量	0.70	14.0m/s	0.05t～5.0t
自由落下後落体消滅	落体質量	0.70	14.0m/s	2.0t, 5.0t

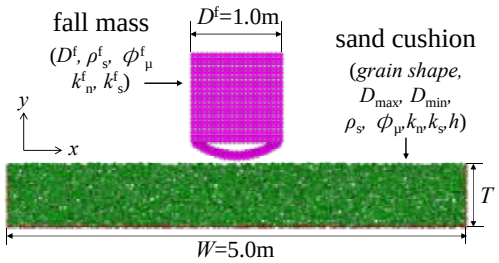


図 2　DEM 解析モデル

表 2　DEM 解析に用いた敷砂の基本的パラメータ

パラメータ	記号（単位）	基本設定値
粒子直径	D (m) 最大粒径 D_{max} 最大粒径 D_{min} 平均粒径 D_{50}	 0.040 0.020 0.030
粒子の密度	ρ_s（kg/m^3）	2650
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

解析パラメータの決定法は，既報[11)]に従っている。用いた敷砂の解析パラメータとして図 2，表 2 に示す値を基本設定値としている。ばねは線形ばね[12)]を用いている。本論文における敷砂の土粒子モデル[13)]は，非円形粒子を採用している。DEM における粒子モデルでは，円形粒子は転がり摩擦のような回転抵抗を全く持たないが，非円形粒子では凸凹の引っ掛かりが生じるため回転抵抗が働く。そのた

め，本研究では，3 つの円形粒子を三角形配置し，それぞれの直径を 50%オーバーラップした状態で剛結して相対変位がゼロとなるように設定した，非円形粒子モデルとしている。粒度は最大粒径 D_{max} と最小粒径 D_{min} の間で一様な発生確率で発生させたものとした。粒度分布の形状によっても衝撃力の伝播特性は異なると考えられるが，簡単のため一様分布とした。

敷砂幅 W は既報より落体径の 4 倍程度確保すれば側方境界の影響はほぼ無視できるという結果 [11]を参考にし，W=5.0m を基準幅とした。また，道路沿いのロックシェッドに作用する落石条件を参考とし，直径 D^f は 1.0m，落体質量は M^f =2.0t，落下高さ H=10.0m を基本値とした。

落体形状は，系統的な検討が行われている実験 [10),16)]と比較しやすいよう重錘形状とした。重錘モデルは，円形粒子を重錘形状に配置し剛結することで常に相対位置が変化しない設定にすることで重錘をモデル化した。重錘表面における粒子間摩擦角 ϕ^f_μは，敷砂粒子の基本設定値と同様とした。落体質量は，指定した質量になるように落体を構成する要素の密度を調整した [14),15)]。また，ばね定数 k^f_n と k^f_s は敷砂の基本設定値を用いた。

図 2 に，解析領域の概要を示す（x 軸，y 軸は図中に示す）。落体に作用する衝撃力を落体衝撃力とし，落体の加速度に質量を乗じることで算出した。底面粒子に伝達する力の和を伝達衝撃力とした。

粒子単位の応力は，粒子個々に作用する接触力を粒子の領域において発散定理を用い体積平均化することで求めることができる。これらの算出によって，力を受けた粒子が柱状に繋がって見える応力鎖の観察と敷砂底面に作用する応力分布の観察などが可能になる。本論文では，直応力 σ_{xx} と σ_{yy} と，その平均値である平均直応力 $\sigma_m=(\sigma_{xx}+\sigma_{yy})/2$ に着目することで，敷砂内部をどのように衝撃力が伝播するのかを観察する。

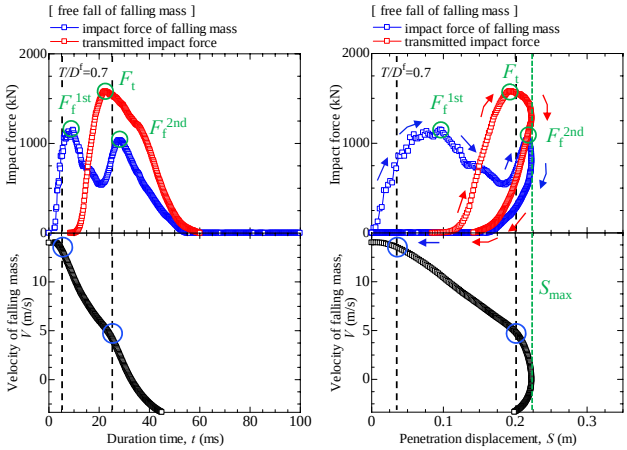
2.2　落体の敷砂衝突時における衝撃力波形の概要

図 3 には，敷砂への落下衝撃解析の典型的結果として，相対層厚（落体径 D^f に対する層厚 T の比）T/D^f=0.7，落体質量 M^f=2.0t，落下高さ H=10.0m の解析結果を示す。落体に作用する落体衝撃力と敷砂底面に伝わった衝撃力の総和である伝達衝撃力の時刻歴と落体の貫入歴の例を示している。

図 3(a)の時刻歴より，落体衝撃力（青色プロット）は落体が敷砂に衝突すると同時（t=0）に立ち上がり，t=8ms 付近で第一ピーク F_f^{1st} をむかえ，落体衝撃力が減少し始める頃に衝撃力は敷砂底面に達し伝達衝撃力（赤色プロット）が発生する。伝達衝撃力は，t=20ms 付近で最大値 F_t に達し，その後，落体衝撃力は t=20ms から再び増加し t=28ms で第二ピーク F_f^{2nd} をむかえる。このとき，応力の伝達波が底面で反射し再び落体に作用することが解析的に明らかになっており，落体衝撃力の第二ピーク F_f^{2nd} は応力の反射波の影響があると考えられる [11)]。

続いて，図 3(b)の貫入歴より，落体衝撃力の第二ピーク F_f^{2nd} は落体の鉛直下向きの速度がなくなる直前の最大貫入量 S_{max} 付近で発生していることがわかる。また，図 3(a)(b)の下段グラフを見ると，落体の衝撃力が第一ピーク F_f^{1st} および第二ピーク F_f^{2nd} をむかえるタイミングで落体の速度変化が顕著になっていることがわかる。

衝撃力波形を理解し整理するためには，応力波が底面で反射し再び落体に作用するといった応力の波動性を考慮しつつ，落体の速度および貫入量と衝撃力波形の関係を整理する必要があると考える。



(a)時間歴　　(b)落体の貫入歴

図 3　典型的な DEM 解析結果：
（上段）衝撃力波形，（下段）落体速度

2.3　敷砂の層厚が衝撃力の発達に及ぼす影響

落石対策便覧 [17)]では，相対層厚 T/D^f が小さいほど衝撃力が上昇する程度を割増し係数で考慮している。ただし，これは落体が受ける衝撃力の最大値に対するもので，衝撃力の発達過程及び伝達衝撃力に関しては明記されていない。そこで，本節では，層厚が敷砂の緩衝効果に及ぼす影響について荷重-貫入量関係のグラフを用いて考察した。

図 4 は，T/D^f =0.25，0.50，0.70，0.90，1.50 の 5 ケースの貫入量の変化に対する衝撃応答波形（色は相対層厚 T/D^f の違い）を示す。T/D^f=0.70 の四角形プロットは，図 3(b)の落体自由落下時のプロットと同様のものである。落体条件は，重錘形の直径 1.0m，質量 2.0t の落体を落下高さ H=10.0m からの自由落下させる条件に統一した。

まず，図 4 上段の落体衝撃力について，T/D^f=0.70, 0.90, 1.50 のケースの落体衝撃力は，S=0.08m 付近の第一ピーク F_f^{1st} で最大値を示し，S=0.08m 以降では，なだらかに低下し，最大貫入量付近で衝撃力が再び増加し第二ピーク F_f^{2nd} に達する。T/D^f =0.50 は，T/D^f=0.70，0.90，1.50 と同様に S=0.08m 付近で第一ピーク F_f^{1st} をむかえる。しかし，T/D^f =0.50 では，落体衝撃力が再び増加した後，第二ピーク F_f^{2nd} が最大値となる。T/D^f=0.25 では，S=0.08m ではピークをむかえず，最大貫入量付近で初めてピーク F_f に達し最大値となる。

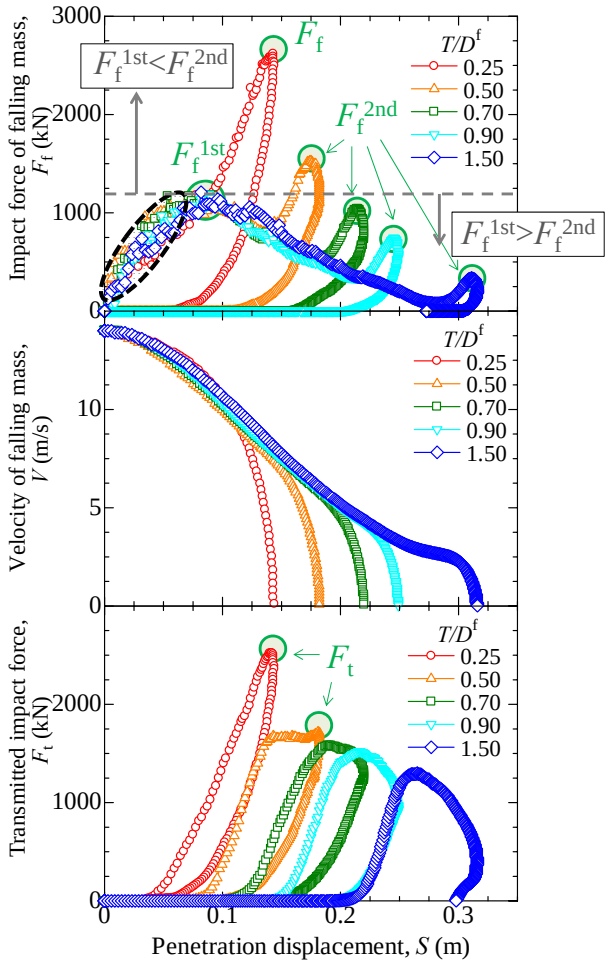


図 4　層厚の違いが貫入量に対する落体衝撃力・落体貫入速度・伝達衝撃力に及ぼす影響

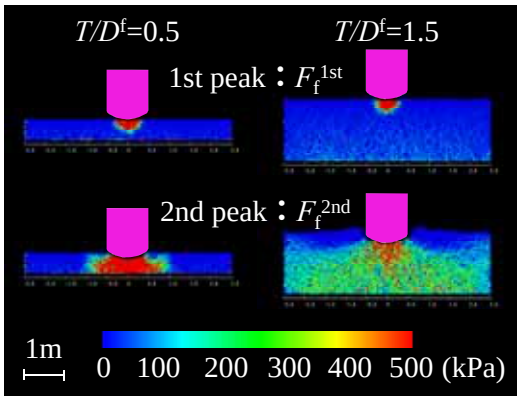


図 5　落体衝撃力がピークの時の敷砂内部の応力状態（σ_m）の比較：（左列）T/D^f=0.5；（右列）T/D^f=1.5

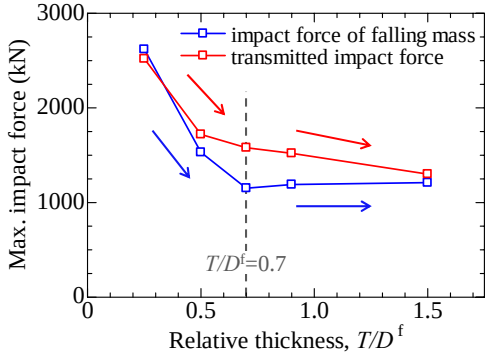


図 6　最大衝撃力に及ぼす相対層厚の影響（落体が受ける最大衝撃力：T/D^f=0.25 のとき F_f，T/D^f=0.5 のとき F_f^{2nd}, T/D^f=0.70 のとき F_f^{1st}, T/D^f=0.90 のとき F_f^{1st}, T/D^f=1.50 のとき F_f^{1st}）

層厚により落体衝撃力波形は異なるが，衝撃力の立ち上がり部分（黒色破線の楕円で囲った領域）は，層厚によらず類似した傾向を示すことが分かった。これは，図 5 に示す，落体衝撃力がピークの時の敷砂内部の応力状態の比較図からも，図 4 上段の落体衝撃力が第一ピークの時の敷砂内部の応力状態は，異なる層厚でも同様の傾向となり，落体は貫入の初期段階では，敷砂底面の境界の影響を受けず，敷砂表層の貫入抵抗に依存するためと考えられる。また，T/D^f =0.50～1.50 のいずれのケースにおいても第二ピークは最大貫入量付近で生じており，層厚が薄くなるにつれて第二ピークが生じるタイミングが早くなることがわかる。

ここで，第一ピーク F_f^{1st} と第二ピーク F_f^{2nd} の関係を整理する。図 4 上段の図中に記した灰色の横線は第一ピークの値を示し，敷砂の緩衝特性を第二ピークとの大小関係で分類すると，T/D^f=0.70，0.90，1.50 のケースは，第一ピークで最大値をとるが（$F_f^{1st}>F_f^{2nd}$），層厚が薄い T/D^f=0.50 では，第二ピークで最大値をむかえる（$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$）。また，T/D^f =0.25 のピーク F_f は，層厚が薄くなったために T/D^f ≧0.50 でいう第二ピークがより早いタイミングで立ち上がったものと推察でき，$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$ であると考えることができる。

また，最大衝撃力をプロットした図 6 より，T/D^f=0.70 以上で落体衝撃力はほぼ収束しており（わずかに増加しているが，この範囲の増加分は 50kN 未満であり，落体直下に少し大きめの粒子が偏ることなどによるばらつきの範囲内であると考える），第一ピークは層厚の影響を受けない敷砂表層の貫入抵抗力であると推察できるため一定値に落ち着くと考えられる。一方で，伝達衝撃力は緩やかに減少し続けていることが確認された。落体衝撃力が第一ピークに至るまでの過程は，先に述べたように層厚によらず同様の現象である。図 5 の第二ピーク時の応力状態から層厚が厚ければ底面までの衝撃力伝達距離が長く，表層で発生した応力が周囲に分散することで応力が低下しながら（赤色から緑色や青色に遷移しながら）底面に伝達する様子が観察できる。これが，T/D^f≧0.7 の層厚で，伝達衝撃力の最大値が低下することに対して落体衝撃力の最大値は収束する理由であると考えられる。

さらに，図 7 に示す底面の伝達応力分布に及ぼす相対層厚の影響より，伝達衝撃力が最大値に達したときの敷砂底面にかかる応力分布を比較すると，T/D^f=0.50 以下のケースで応力集中が確認され，$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$ となる相対層厚が薄い場合には，敷砂底面への伝達応力の分布が広がらず，緩

衝効果が十分に発揮されていないといえる。

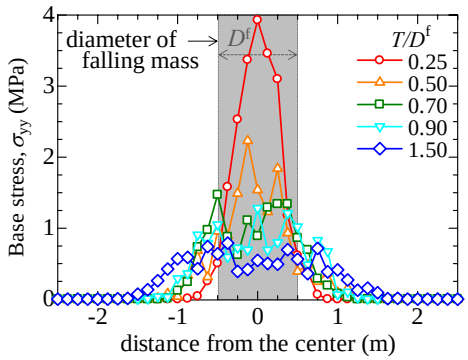


図 7　底面の伝達応力分布に及ぼす相対層厚の影響

以上より，相対層厚が T/D^f=0.25，0.50 の薄いとき，底面へ伝達する伝達衝撃力は，落体直下に集中し，大きな値を示すことが確認された。また，T/D^f=0.25，0.50 の 2 ケースは，どちらも $F_f^{1st}<F_f^{2nd}$ となることから，伝達衝撃力の大きさや底面伝達応力の集中度合いといった衝撃力伝達挙動の違いは，図 4 の落体衝撃力波形として，各種の衝撃力波形に表れているといえる。

2.4　落体の質量が衝撃力の発達に及ぼす影響

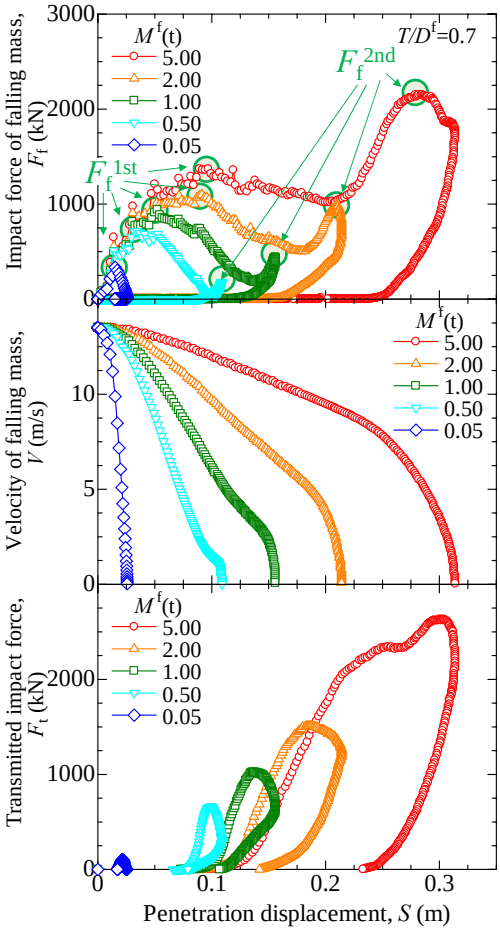


図 8　質量の違いが貫入量に対する落体衝撃力・落体貫入速度・伝達衝撃力に及ぼす影響

図 8 は，落体の質量が M^f=0.05t，0.50t，1.0t，2.0t，5.0t の 5 ケースの各種衝撃応答波形を示す（色は落体質量 M^f の違い）。本解析では，落体の大きさは変化させず，落体の密度を変えることで質量を変化させた。なお，落体の衝突速度は基本条件の V=14.0m/s である。

M^f=2.0t のケース（橙色プロット）を中心に見ると，図 8 中段の落体速度は，質量を軽くすれば衝突後の速度の減少傾向が速くなり，重くすると速度の減少傾向が遅くなる。図 8 上段の落体衝撃力は質量の増加に伴い第一ピーク F_f^{1st} が増加する。質量を重くすることは任意の貫入量における貫入速度が上昇することを意味するので，敷砂の荷重・貫入量関係の載荷速度依存性からも，質量の増加は貫入速度の増加を招き，貫入速度の増加は落体衝撃力の増加につながると考えられる。

続いて，M^f=5.0t のケース（赤色プロット）について見ると，$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$ であることがわかる。M^f=2.0t 以下のケースは，$F_f^{1st}>F_f^{2nd}$ である。質量によって第一ピーク F_f^{1st} と第二ピーク F_f^{2nd} の大小関係が異なる理由は，M^f=5。0t のように重い落体の場合，貫入が進んでも速い速度が維持されるために第二ピーク F_f^{2nd} の値が大きくなるためと考えられる。したがって，落石の想定規模が大きく，非常に重い落石が想定される場合には，敷砂厚に対する相対的な貫入量が大きくなり，最大貫入量付近で落体衝撃力の第二ピークが生じ，最大値となると考えられる。

2.5　敷砂の衝撃緩衝メカニズムと落体衝撃力波形の関係

2.3 節，**2.4** 節では荷重・貫入量関係に着目し，衝撃力発生のメカニズムについて検討しながら敷砂の緩衝効果について考察を行った。**2.3** 節の敷砂層厚と **2.4** 節の落体質量の変化に伴う落体衝撃力の変化は，荷重・貫入量関係の波形性状が変化するため，敷砂への落体の貫入挙動が異なっているといえる。

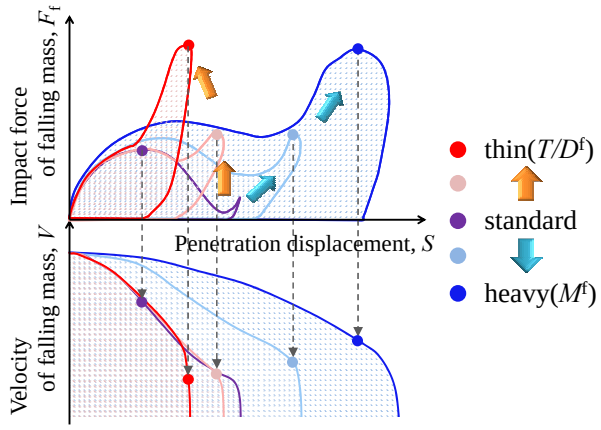


図 9　貫入量に対する落体衝撃力と貫入速度の関係性

そこで，図 9 を用いて敷砂の緩衝効果と落体衝撃力の関係について整理する。図 9 の上段は荷重・貫入量関係，下段は落体貫入速度・貫入量関係の模式図である。なお，以下の考察は紫色の実践による解析ケースを基本条件とす

る。このケースは，$F_f^{1st}>F_f^{2nd}$で，敷砂表層への貫入抵抗力と考えられる第一ピークが最大値となっており，敷砂の緩衝効果が十分に発揮できるケースといえる。

層厚が薄いと桃色実線のケースに近づくように第二ピークの発現が早くなり$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$となる。さらに薄い条件では赤色実線のように第一ピークと第二ピークの境目がなくなり，落体は非常に強い衝撃力を受ける。

また，質量が重いと紫色の実線から水色の実線に近づき，落体速度が減少しづらく$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$関係となる。極端に質量が重くなると青色実線のようになり，第二ピークが第一ピークを大きく上回り，敷砂を薄くした時と同様に落体衝撃力が増加する。

このように落体衝撃力の第一ピークと第二ピークの大小関係を整理することは，なぜ落体衝撃力と伝達衝撃力の比が 1～2 倍程度まで変化し得るのか，といった問題の解決に役立ち，敷砂の緩衝性能の正しく理解するために重要な検討項目であると考える。

2.6　落体衝撃力波形と伝達衝撃力波形の関係

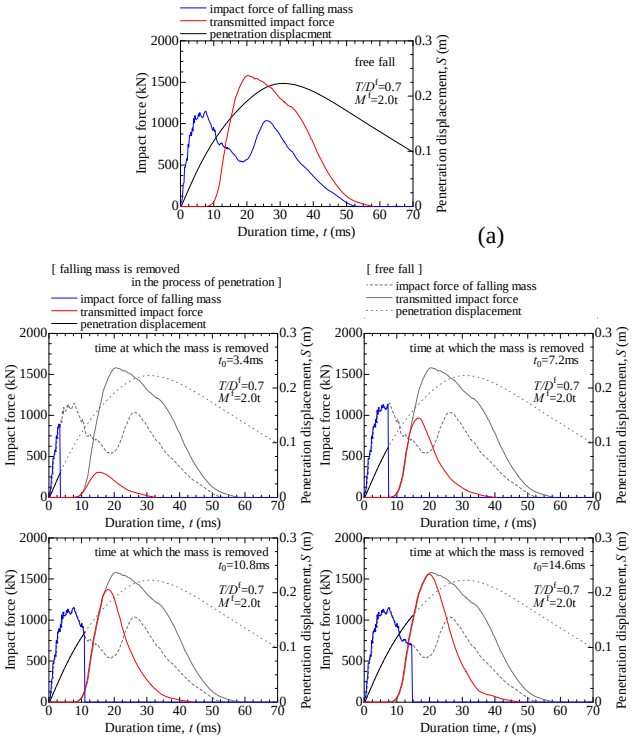


図 10　接触時間と各種衝撃力波形の関係性（M^f=2.0t）：(a)自由落下時の衝撃力波形；(b)落体を貫入途中で消した時の衝撃力波形（t_0=3.4ms, t_0=7.2ms, t_0=10.8ms, t_0=14.6ms）

落体の貫入過程と敷砂底面の伝達衝撃力の発達（応力鎖）の関係について，数値解析の特徴を活かした検討を行う。検討方法は，落体を自由落下させた後に，任意の時刻で落体を消すことで，それ以降，敷砂へ力が伝わらず，底面からの応力の反射波が再び落体に反射しないようにするものである。これにより，落体の接触時と貫入深さにおいて，どこまでの貫入過程が伝達衝撃力の発現にどれだけ影響を与えているのかを確認することができる。解析ケースは，落体衝撃力の第一ピークと第二ピークの大小関係が異なる，落体質量M^f=2。0t（$F_f^{1st}>F_f^{2nd}$）とM^f=5。0t（$F_f^{1st}<F_f^{2nd}$）の 2 ケースについて，落下高さ 10。0m から自由落下させた時の落石衝撃力波形と伝達衝撃力波形の関係について以下，考察する。

図 10 には，落体質量M^f=2。0t のケースの解析結果を接触時間と各種衝撃応答波形の関係について示す。図 10 (a)は，自由落下時の衝撃力波形を示しており，落体衝撃力波形の第一ピークが最大値となるケースである。図 10 (b)には，落体を貫入途中で消した消滅させた時の衝撃力波形を示している。(a)，(b)について，例えば，落体をt_0=3.4ms まで接触させ，その後消滅させた場合には，落体衝撃力は自由落下時の 80%程度まで立ち上がるが，伝達衝撃力は自由落下時の最大値の 20%程度しか発現しない。続いて，落体消滅の時刻を落体衝撃力の最大値となるt_0=7.2ms とした場合でも，伝達衝撃力は 80%にも満たない。落体がt_0=14.6ms まで貫入し続けた場合，伝達衝撃力は最大値の 97%まで達した。伝達衝撃力の最大値は，落体衝撃力が最大値に至るまでの波形だけでなく，第一ピークのポストピーク領域までの貫入過程の影響も大きいと言える。

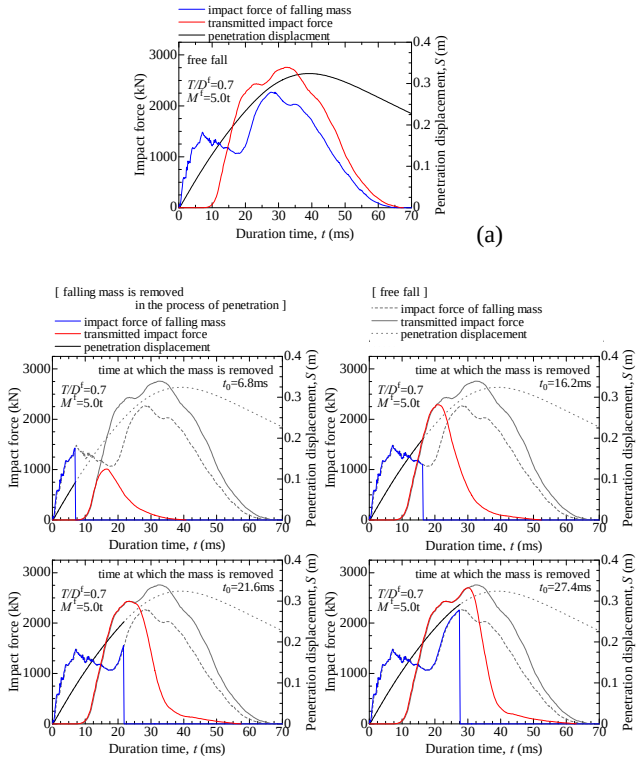


図 11　接触時間と各種衝撃力波形の関係性（M^f=5.0t）：(a)自由落下時の衝撃力波形；(b)落体を貫入途中で消した時の衝撃力波形（t_0=6.8ms, t_0=16.2ms, t_0=21.6ms, t_0=27.4ms)

続いて，落体質量M^f=5.0t のケースの解析結果について，図 11 は図 10 と同様のグラフ構成になっている。(a)，(b)

について，落体衝撃力が第一ピークをむかえる t_0=6.8ms まで載荷させると伝達衝撃力は自由落下時の 40%程度まで発現し，落体衝撃力の低下過程まで載荷させ t_0=16.2ms で消滅させると伝達衝撃力は自由落下時の 80%を超える。これより，伝達衝撃力の波形には落体衝撃力の低下過程の寄与が大きいことが確認できる。その後，t_0=21.6ms で落体を消滅させると 90%程度発現し，落体衝撃力の最大値（第二ピーク）t_0=27.4ms まで接触させ続けると伝達衝撃力は最大値の 99%まで達する結果となった。落体質量が 5.0t と重い場合には，落体衝撃力の第二ピークまでの貫入が伝達衝撃力の最大値の発生に関係することがわかった。

3. ソイルセメント内の応力伝播とひび割れの進展

3.1 ソイルセメントへの重錘落下衝撃模型実験概要

ソイルセメントへの重錘落下衝撃実験に使用した実験装置の概要を図 12 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。

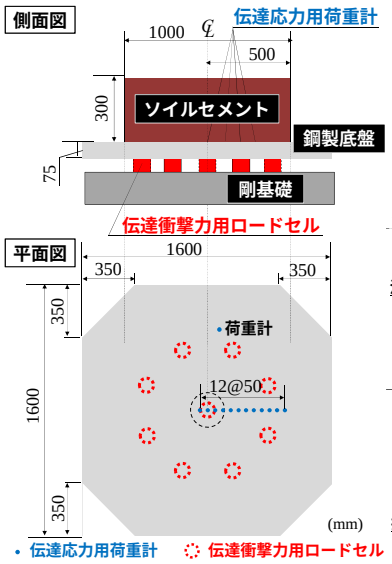


図 12　模型実験の概要

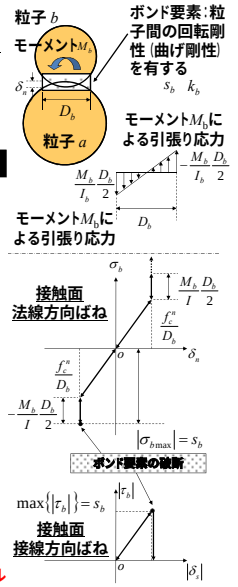


図 13　ボンド要素

3.2 ソイルセメントのモデル化の概要

DEM 解析モデル [18]には，曲げ剛性を有するボンド要素を用いた（図 13）。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，ボンドのばね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。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た。本論文では，s_b=3.0×10^8Pa を基本値としている。粒子直径以外の粒子の解析パラメータは敷砂緩衝材の値と同様で，本解析における粒子径は D_{max}=0.0100m，D_{min}=0.0050m，D_{50}=0.0075m を使用した。パラメータの決定方法の詳細は既報 [11]に詳しい。

3.3 実験結果と解析結果の比較

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** 4 に示す。

図 14 (a)から，落体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。解析結果の衝撃力継続時間は実験結果の 2 倍程の長さである。

図 14 (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，落体衝撃力と同様に，伝達衝撃力の衝撃力継続時間は実験結果よりも 2 倍程度長い。また，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。

図 14 (c)より，重錘貫入量は，貫入初期のプレピーク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。

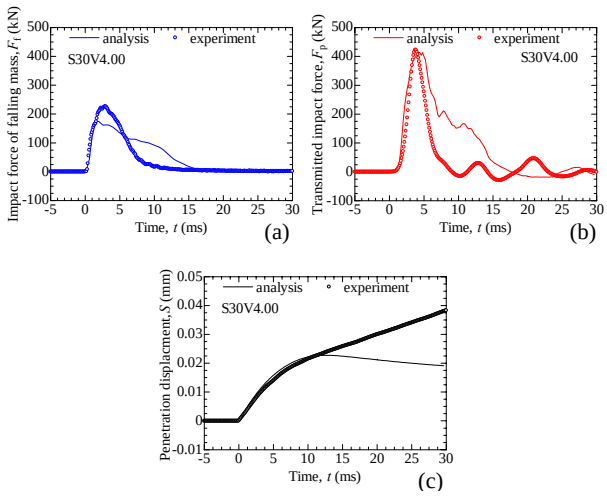
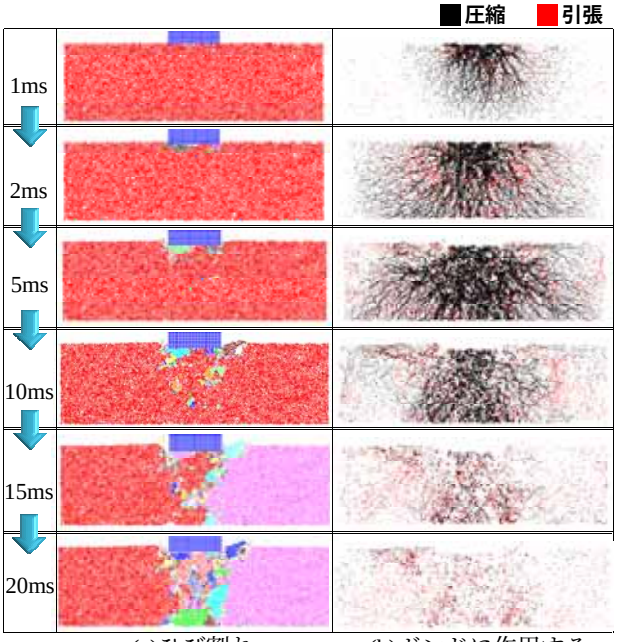


図 14　実験結果と解析結果の各種応答波形：(a)落体衝撃力；(b)伝達衝撃力；(c)落体貫入量

3.4 ソイルセメント内部の応力分布とひび割れの関係

図 15 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=2ms 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=5~10ms 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。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展する。また，t=15ms 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。



(a)ひび割れ　(b)ボンドに作用する応力分布

図 15　ソイルセメントの損傷，破壊過程とボンドの働き

4.　まとめ

本研究では，土を用いた落石対策工の合理的な維持管理を支援する一方法として，二次元 DEM を用いて，落体衝突による緩衝材の応力伝播挙動について考察した。

＜敷砂緩衝材＞

- 相対層厚が薄い，もしくは落体質量が重いことで底面の伝達応力分布が落体直下に集中するようになるケースでは，落体衝撃力の第二ピーク値が第一ピーク値を上回ることがわかった。衝撃力の伝達挙動の違いは落体衝撃力波形に表れていると考えられる。
- 落体の敷砂貫入過程と伝達衝撃力波形の関係について検討した結果，落体の衝撃力がピーク値に達し，その荷重が遅れて底面に伝達することがわかった。
- 荷重の伝達に遅れが発生するため，ポストピーク領域の落体衝撃力も連続的に底面に伝達される。底面に作用する伝達衝撃力の最大値は，落体の衝撃力ピーク値のみに依存するものではないと考えられる。

＜ソイルセメント＞

- 落体衝撃力波形，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，衝撃力の最大値は概ね実験値を再現できることが分かった。
- 落体衝突時に，落体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。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。

以上のように，緩衝材内部の応力伝播挙動を観察することで，敷砂緩衝材のように第一ピークや第二ピークが生じる複雑な衝撃力波形を詳細に理解することができ，ソイルセメントのように激しく離散化する衝突現象の解釈にも役立つことを示した。今後は，より詳細な応力伝播の検討を進めることで緩衝効果の適切な評価が行うでき，落石対策工の合理的な維持管理が可能となると考える。

参　考　文　献

1) 山口悟，西弘明，今野久志：既設落石覆道の現況調査について，国土交通省北海道開発局第 55 回（平成 23 年度）北海道開発技術研究発表会
2) 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.
3) 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.
4) 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.
5) Cundall, P. A. and O. D. L. Strack.：A Discrete Models for Granular Assemblies，Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
6) 桝谷 浩，中田 吉彦，梶川 康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1477-1487, 1992.
7) 吉田 博，桝谷 浩，今井 和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝突特性に関する解析，土木学会論文集，Vol.392/I-9，pp.297-306，1988.
8) 刈田圭一，前田健一，羽柴寛文，牛渡裕二，山口 悟: 個別要素法を用いた水平堆積層における落石による衝撃力の伝播挙動解析，第 10 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.195-200, 2010.
9) 羽柴寛文，前田健一，刈田圭一，牛渡裕二，川瀬良司: 粒子特性の異なる堆積層の落石エネルギー緩衝効果特性に関する二次元個別要素法解析，第 10 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.229-234, 2010.
10) 山口悟，今野久志，西弘明，小室雅人，岸徳光：敷砂緩衝材の緩衝特性に関する大型重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1181-1193，2013,3.
11) 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.
12) 伯野 元彦：破壊のシミュレーション，森北出版, 2004.
13) 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.
14) Wood, D. M. and Maeda, K.: Changing grading of soil: effect on critical states, Acta Geotechnica, Vol.3, pp.3-14, 2008.
15) Maeda, K., Sakai, H., Kondo, A., Yamaguchi, T., Fukuma,M. and Nukudani, E.: Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, Granular Matter, Vol. 12,pp.499-505, 2010.
16) 山口悟，岸徳光，西弘明，今野久志: 敷砂および砕石緩衝材を用いた大型 RC スラブの重錘落下実験，構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.189-194, 2010.
17) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.
18) 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.