

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289152

研究課題名（和文）土を利活用した緩衝層の落石衝撃力の伝達メカニズム解明と落石対策工の長寿命化

研究課題名（英文）Shock absorbing mechanism of soil and countermeasures for expanding the lifespan of rockfall protection works by using soil

研究代表者

前田 健一（Maeda, Kenichi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50271648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,900,000円

研究成果の概要（和文）：土の衝撃力緩衝のメカニズムを粒子レベルからの新たな視点で明らかにした。最近の気象変動と岩盤斜面の劣化によって予想される落石のサイズ、標高などハザードが大きくなっており、構造物に到達する前に運動エネルギーを減衰させる必要がある。従来は運動エネルギーの減衰効果を期待していなかった斜面表面や崖の堆積土に落石対策としての性能を期待できる。また、土と構造物の相互作用（一体化問題）解明にも役立つ。この成果は、落石だけでなく、大規模な土砂災害による構造物への衝撃力算定や効率的対策工の提案にも貢献可能である。

研究成果の概要（英文）：Cushioning materials, such as sand cushion and granular mats placed on rock sheds, can effectively disperse and reduce rock fall energy before rocks collide with protection works. Although the construction costs for sedimentary layers are low, these layers are attracting attention as construction devices that can substantially improve the margin of safety ratio. To elucidate the mechanism that governs the impact force waveform of falling mass, this study examines the loading rate dependency of sand cushion by DEM simulation. In the simulation, particular attention is paid to the velocity of stress waves that propagate in sand cushion. For responding to a wider range of falling rocks impact by absorbing system using soils, we carried out falling-weight impact test against alternating layers absorbing systems. Upper and under layers of alternating layers is composed of sand and middle layer is composed of gravel.

研究分野：地盤工学

キーワード：応力波 密度 緩衝 衝撃力 伝播 マイクロメカニクス マルチスケール 速度以前

1. 研究開始当初の背景

(1) 落石対策施設の長寿命化の必要性

落石の発生によって、人命と財産が奪われ、交通・物流等の社会的機能が損なわれることになる。経年の斜面風化に加え、地震の頻発や豪雨の多発などによって、落石による災害リスクが増加している。一方、社会インフラの大更新時代に差し掛かった我が国では、老朽化する構造物の長寿命化が重要課題の一つであり、我が国の落石対策工も例外ではない。インパクトの大きな落石災害に対する安全余裕度の低下が深刻な問題となっており、落石対策施設の長寿命化は、重要な研究課題といえる。通常、既設構造物の長寿命化には、補修・補強・改善の3つの方法が考えられている。斜面の表土や崖錐堆積物の緩衝層による落石の運動エネルギー減衰を適切に評価し、終端速度の再検討をするなど、想定外力の見直しも、落石対策における改善の一つと考えられる。また、補強は防護工の直接的な損傷を防ぐことであり、ロックシェド用の敷砂緩衝材や落石防護擁壁用のソイルセメントを用いた緩衝システムなど緩衝層の設置が考えられる。これまでの関連研究で、砂や礫を用いた対策は防護工の安全余裕度を著しく向上させることがわかった。しかし、落石が受ける衝撃力(落石衝撃力)よりも、緩衝層を伝播して構造物に作用する伝達衝撃力の方が2倍程度の値になる現象も観測されており、この理由は国内外においても未だ説明されておらず、緩衝メカニズムの解明が切望されている。そこで、本研究では、緩衝層の性能を評価するために衝撃模型実験や数値解析を実施する。

(2) 衝撃の力学と地盤力学・粒状体の力学の相互発展へ

土もしくは改良土を利用した緩衝層内の衝撃力伝播特性は、粒径・粒度分布、粒形、破碎性等の粒子特性、密度、層厚に依存することが申請者らの最近の研究で分かってきた。また、地盤力学の知見を活かし、衝撃問題における個別要素法(以下DEMと記述)のパラメータの設定方法においても、検討を進めてきた。さらに、落体の貫入量に伴う緩衝層内の終局的な変形形状が支持力破壊時の類似することから、研究当初は、落体の受ける力やエネルギー緩衝効果は支持力問題として推定できると考えていた。しかし、落石の落下速度の範囲(数m/s~数十m/s)では、乾燥砂層でも衝撃力と貫入量との関係は複雑な速度依存性を示し、層内の応力は変形量だけでなく載荷速度に強く影響されることが分かってきた。さらに、貫入時の不飽和層内の変形の様子は含水比の変化を大きく受け(エネルギーが大きい場合には落体直下の層内の間隙水が飛散する)、落体下の土は一緒に締め固められるのではなく、薄い層厚で疎密化が生じている可能性がみえてきた。よって、衝撃力の緩衝メカニズム解明には、地盤力学と衝撃の力学の融合が不可欠である。

2. 研究の目的

斜面表面や土を利用した緩衝材による、落石のエネルギー吸収能力や衝撃力伝播特性の評価は重要で興味深い課題である。しかし、緩衝層全体を摩擦係数や跳ね返り係数を設定した剛な板と見なす方法が一般的であり、緩衝層の土の力学特性が密度、応力レベル、含水比に依存することに着目した研究は極めて少ない。

そこで、土の粒子レベル、応力が集中する粒子骨格を意味する応力鎖のレベルや連続体レベルのマルチなスケールの視点で、衝撃力の伝達メカニズムを解明する。大型・実物大模型実験方法や粒子ベースの数値解析方法の開発を行い、応力鎖の発生・消滅、亀裂や塑性波の伝播、密度変化などを可視化する。土一構造物系の衝撃応答を深く理解し、土を積極的に利活用することで落石対策工の長寿命化方法の提案を検討する。

3. 研究の方法

(1) 土の性質を考慮した敷砂の衝撃力緩衝メカニズムの解明

敷砂緩衝材下部の構造体の剛性と応答(図-??~図-??)、すなわち底面境界条件と落石衝突時に生じる衝撃力の関係を把握するため、二次元DEM解析によって異なる底面境界剛性を有する緩衝材中の応力波の伝播挙動について調べた。得られた主な結果は以下のとおりである(図-1~図-3)。

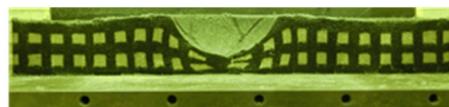


図-1 小型実験による緩衝層の変形の様子



図-2 大型緩衝材実験装置と敷砂緩衝材を設置した実規模ロックシェド模型

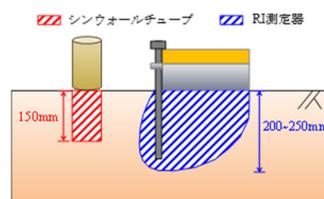


図-3 実規模実験における地盤密度測定

(2) 土の性質を利用した新たな衝撃緩衝システムの提案

地盤材料のみで幅広い落石外力に対応することを目的とした上層の材料が砂、中間層が碎石、下層が砂で構成された互層緩衝構造に関する検討を行った。続いて、互層緩衝構造の緩衝性能をより詳細に把握するため、各層にそれぞれ焦点を当て、各層が互層緩衝構造

の緩衝性能に寄与する影響を検討した（図-4～図-5）。

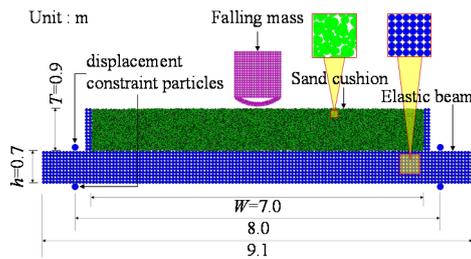
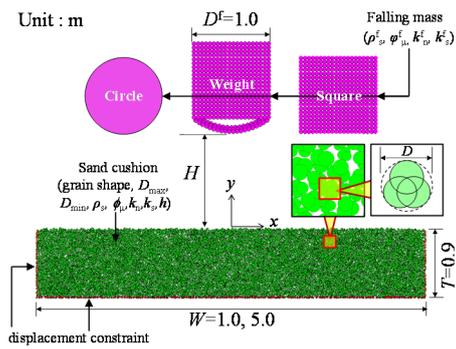


図-4 剛基礎モデル（上）の解析と弾性梁上（下）に緩衝材を設置した解析モデル概要

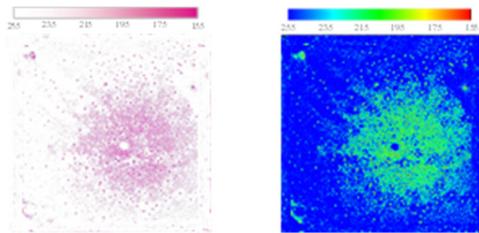


図-5 感圧シートと画像解析を用いた最大伝達衝撃力の可視化

（3）土の性質を再評価した斜面上の落体ハザードの新たな評価方法の提案

転動及びすべり状態で落石と斜面が全く離れないような運動を除いて、落石の運動の大半は跳躍運動であり、跳躍運動の基本は落石と斜面の衝突であると考えられる。落石の斜面への入射角度はその運動形態によって様々であると考えられるため、本研究では幅広い入射角度で落石が斜面へ衝突する実験を実施することとした（図-6）。

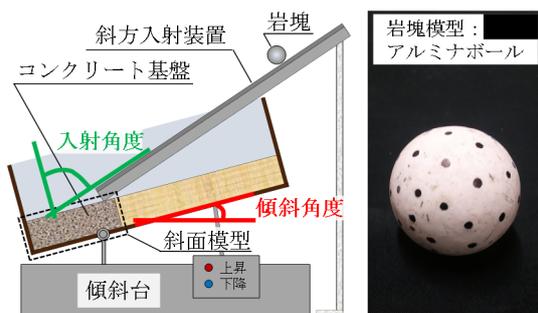


図-6 単一岩塊模型の転動実験

4. 研究成果

（1）土の性質を考慮した敷砂の衝撃力緩衝メカニズムの解明

1) 落体衝撃力波形の形成メカニズムとして、落石の終端速度 28.0m/s までの载荷速度領域において、落体衝撃力は载荷履歴に依らず任意の貫入量における载荷速度のみに依存する可能性を示した。また、落体衝撃力の载荷速度依存性は、底面からの反射波が落体に伝達するまでの貫入（時間）領域で顕著に現れる性質であることを明らかにした。さらに、敷砂緩衝材に作用する落体衝撃力が载荷速度依存性を有する理由として、载荷速度が大きいほど落体貫入による縮み量を受け持つ領域が表層に集中することが考えられる（図-7～図-8）。静的载荷と動的载荷で得られる落体周辺の粒子群の圧縮率と応力の関係は、両载荷方法の結果がほぼ一致していることが分かった。この理由は、動的载荷における落体周辺の粒子群は落体と等速で移動しており、粒子間の相対速度の変化がない領域であるため、応力伝播が無視できるという点で静的载荷状態と類似していることが考えられる。

2) 一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力の算定を試みた結果、異なる落体形状の DEM 解析結果と異なる外力条件の衝撃実験結果との比較により、落体衝撃力波形の主波動である第 1 波目を精度良く推定できる可能性を示した（図-9）。

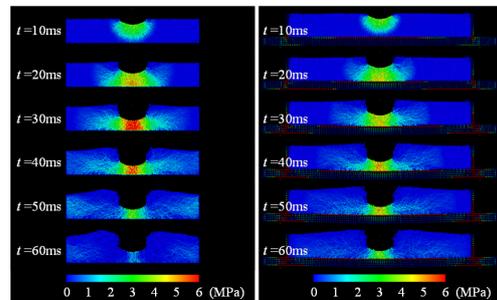


図-7 緩衝材内部の粒子単位の平均主応力伝播挙動：左；剛基礎、右；弾性梁

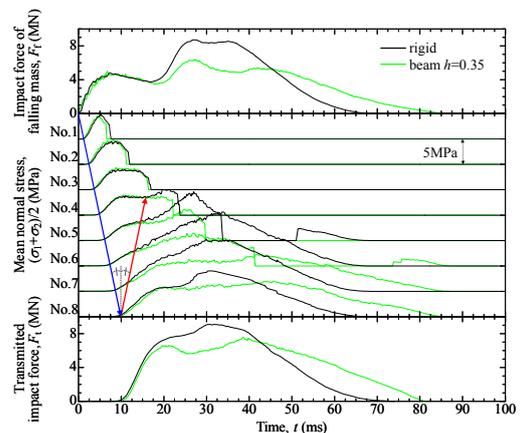


図-8 応答波形

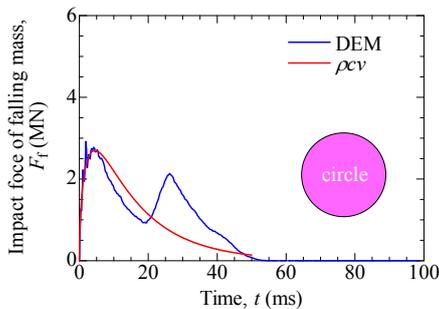


図-9 DEM 解析結果と一次元波動方程式に基づく衝撃応力 $\sigma = \rho cv$ による落体衝撃力算定結果の例

3) 大型重錘落下衝撃実験より、初期相対密度が高い方が、衝撃力の最大値が大きく、衝撃波形の継続時間は短くなり、ラーメの定数の高い材料となることが確認できた。また、地盤密度試験から、落体下では敷砂緩衝材の密度は必ずしも高くなることはなく、落体直下の表層では敷砂緩衝材が硬くなり、敷砂緩衝材内部では緩むケースがあることが明らかになった。敷砂緩衝材内部の局所的な変形挙動は、敷砂緩衝材をメッシュ状にし、敷砂緩衝材内部の変形を可視化することで、緩衝材内部の密度変化を捉えることができた。同様に大型重錘落下衝撃実験における地盤密度試験同様、落体落下後、敷砂緩衝材内部は緩んでいることを確認した。また、落体直下では膨張領域と圧縮領域が混在し、敷砂緩衝材のような薄層の地盤においても密度変化の分布が局所化することを明らかにした (図-10)。

4) 緩衝材底面が剛基礎条件の大型緩衝材実験と構造体条件の実規模 RC 製ロックシェット衝撃実験を比較した結果、構造体条件の方が落体衝撃力の最大値は小さくなり、落体衝撃力継続時間は長くなる。DEM 解析でロックシェット頂版を弾性梁で簡易的にモデル化した場合、最大衝撃力と最大載荷点変位を概ね再現可能であり、緩衝材下部が剛基礎条件に比べて構造体条件の方が落体衝撃力の最大値は小さく、継続時間は長くなるという実験結果を定性的に表せることを確かめた。落体衝撃力の最大値は剛基礎条件よりも構造体条件の方が小さく、構造体の剛性が小さいほど衝撃力は小さくなる。伝達衝撃力の最大値は緩衝材底面が構造体条件の場合でも、その剛性がある程度大きい場合は剛基礎条件と同程度の値となることがわかった (図-11)。

5) 緩衝材を要素分割して伝播する応力波を調べた結果、平均主応力の立ち上がり直後の波形には剛基礎条件と構造体条件の違いは見られない。応力波の底面到達後、緩衝材の各要素を反射応力波が上向きに通過した部分から構造体条件の平均主応力が剛基礎条件に比べて小さくなることがわかった。特に、載荷点直下の底面境界付近の緩衝材に生じる平均主応力は、剛基礎条件に比べて構造体条件の

方が 2 分の 1 程度にまで減少することがわかった。構造体条件では落石の自由落下衝突によって緩衝材底面境界が下向きに変位する分、剛基礎条件に比べて底面境界付近の粒子群が低密度化するため、反射応力波の平均主応力が小さくなり、落体衝撃力及び伝達衝撃力が小さくなることがわかった。

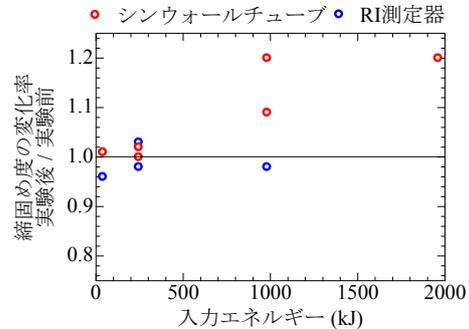


図-10 入力エネルギーに対する縮固め度の変化率

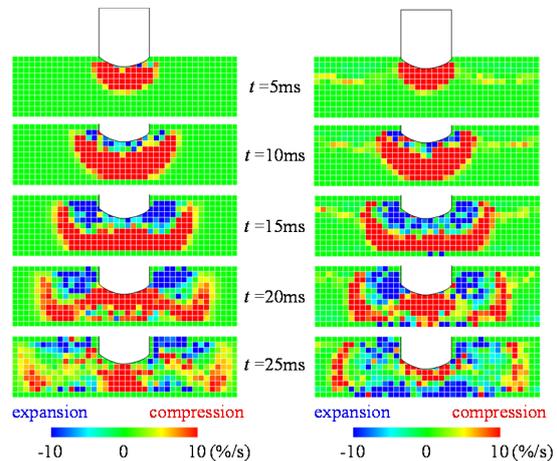


図-11 緩衝材内部におけるメッシュ単位の体積ひずみ速度分布

(2) 土の性質を利用した新たな衝撃緩衝システムの提案

1) 砂の単一層と碎石の単一層、互層緩衝構造の性能を比較する実験より、互層の落体衝撃力は碎石よりも小さく、落体貫入量は砂よりも小さくなった。また底面に伝達した応力は砂と同程度となった。

2) 互層上層の砂層により落体衝撃力を緩衝しており、砂層を厚くするほど落体衝撃力は小さく、落体貫入量は大きくなることがわかった。一方、砂の中層の変位が中心に集中しているのに対して互層中間層の変位が広域化していることがわかった。これより、互層中層の碎石層で応力が広く分散している可能性がある。互層下層の砂層では、底面に伝達した衝撃応力は互層の方が、下層が碎石である場合よりも小さくなった。従って、互層下層の砂層により底面に伝達する衝撃応力が小さくなる可能性が示された。

以上より、地盤材料である砂と碎石のみを用いた互層緩衝構造は、想定内の外力に対しては衝撃力を砂の単一緩衝層と同程度に抑え、超過外力に対しては落石のロックシェッドへの直撃を抑制可能な工法であると考えられる(図-12)。

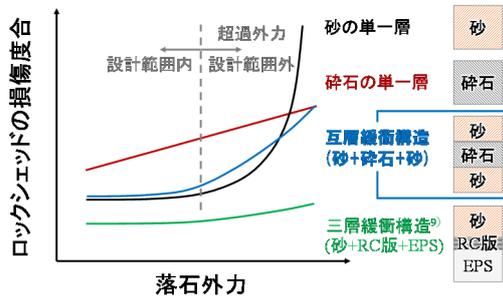


図-12 提案する外力と緩衝構造の概念図

(3) 土の性質を再評価した斜面上の落体ハザードの新たな評価方法の提案

- 1) DEM解析は、コンクリート基盤に落体を鉛直自由落下させた時の反発を再現できるようにパラメータを設定することで、単一岩塊の転動実験で得られた入射角度の減少に伴う運動エネルギー比と速度比が低下する結果や、その際の速度比の法線方向成分と接線方向成分の内訳まで精度良く再現できる。
 - 2) 単一岩塊の速度比は、斜面の傾斜角度や形状が異なる条件においても、岩塊の斜面への入射角度に依存する傾向があると考えられる。斜面上に水平面のような傾斜角度が小さい緩勾配が存在する斜面を単一岩塊が落下する場合、緩勾配部での岩塊の入射角が小さくなって速度が著しく減衰するため、斜面法尻の線速度及び到達距離が小さくなる。
 - 3) 異なる傾斜角度の斜面に単一岩塊を落下させた場合、傾斜角度が大きくなるほど到達距離が大きくなるが、傾斜角度 $\theta=30\sim 50^\circ$ の範囲で最大値をとるような傾向が見られ、それ以上傾斜角度が大きくなると到達距離が小さくなる。これは、傾斜角度の増加に伴って斜面法尻の線速度が増加し入射角が減少するため、ある傾斜角度以上では、斜面法尻の線速度の増加よりも入射角の減少による速度減衰の影響が相対的に強くなり、到達距離が小さくなるものと考えられる。
 - 3) 斜面法尻における線速度は、斜面形状が直線で落下高さ60mの場合、傾斜角度が 50° 以上のケースから28m/sを超える可能性がある。ただし、下に凸な曲線斜面の場合、標高100mを超える落下高さでも斜面法尻の線速度は28m/sに収まる可能性がある。また、直線斜面においてDEM解析で得られた斜面法尻の線速度と落石対策便覧に記載されている算定式を比較したところ、両者の傾斜角度と終端速度の関係は概ね一致する。
- 以上より、異なる傾斜角度の斜面において単一岩塊及び岩塊群が転動・流下する場合、斜面法尻の線速度と入射角度の二つの項目を評価することで到達距離を推定できると考えられる。これは、実際の斜面の岩塊及び岩塊

群の到達距離の推定精度向上に寄与する結果であるだけでなく、今後到達距離に関する実験で留意すべき情報を与えていると言える。

<引用文献>
① 岸徳光、中野修、松岡健一、西弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol. 39A、pp. 1587-1597、1993

5. 主な発表論文等

- [雑誌論文] (計10件)
- ① 内藤直人、前田健一、田中敬太、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：個別要素法を用いた岩塊及び岩塊群の到達距離に関する数値解析的検討、構造工学論文集、Vol. 63A、2017、pp. 1107-1120
 - ② 田中敬太、前田健一、内藤直人、今野久志、牛渡裕二、川瀬良司：地盤材料である砂と碎石を用いた互層緩衝構造の落石衝撃緩衝メカニズム、構造工学論文集、Vol. 63A、2017、pp. 1096-1106
 - ③ 内藤直人、川瀬良司、前田健一、岸徳光：敷砂緩衝材を設置した扁平RC梁のファイバーモデルによる衝撃応答解析、コンクリート工学年次論文集、Vol. 38、2016、pp. 793-798
 - ④ 内藤直人、前田健一、今野久志、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：落石衝撃力に及ぼす敷砂緩衝材の底面境界剛性の影響に関するDEM解析、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol. 72、No. 2、2016、I_429-I_440
 - ⑤ 内藤直人、前田健一、今野久志、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の載荷速度依存性に関するDEM解析、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol. 71、No. 2、2016、I_557-I_566
 - ⑥ 内藤直人、前田健一、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：堆積層を有する斜面における衝突条件が異なる落石の運動挙動、構造工学論文集、Vol. 62A、2016、pp. 1031-1042
 - ⑦ 内藤直人、前田健一、今野久志、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の載荷速度依存性に関するDEM解析、土木学会論文集A2(応用力学)、Vol. 71、No. 2、2015、I_557-I_566
 - ⑧ 内藤直人、前田健一、山口悟、今野久志、牛渡裕二、鈴木健太郎：二次元個別要素法による敷砂緩衝材の衝撃力伝達メカニズム、構造工学論文集、2015、Vol. 61A、2014、pp. 876-886。
 - ⑨ 奥村勇太、内藤直人、前田健一、西弘明、山口悟、川瀬良司：落石衝突による敷砂緩衝材内の変形挙動、構造工学論文集、Vol. 61A、2015、pp. 867-875
 - ⑩ 内藤直人、前田健一、山口悟、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動に

関するDEM解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2, 2014, pp. I_495-I_506

[学会発表] (計 20 件)

- ① 内藤直人, 前田健一, 生渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 堆積層のエネルギー吸収性能に着目した落石の運動挙動に関する個別要素法解析, 計算工学講演会論文集, Vol. 21, C-3-3, 新潟市, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター, 2016
- ② 内藤直人, 前田健一, 田中敬大, 生渡裕二, 川瀬良司: 個別要素法解析を用いた掘削解析による粘着力の設定と落石防護土堤の衝撃解析: 平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会 (土木学会), pp. 989-990, 仙台市, 東北大学川内北キャンパス, 2016
- ③ 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 田中敬大, 中瀬仁: 水平基盤に対する球形落体の反発係数に及ぼす細粒分と表土層厚の影響: 平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会 (土木学会), pp. 135-136, 仙台市, 東北大学川内北キャンパス, 2016
- ④ 田中敬大, 前田健一, 内藤直人: 落石運動に及ぼす斜面形状と入射角の影響に関する二次元個別要素法解析: 平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会 (土木学会), pp. 701-702, 仙台市, 東北大学川内北キャンパス, 2016
- ⑤ 内藤直人, 前田健一, 生渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の底面境界の剛性が落石衝撃力に及ぼす影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 2071-2072, 岡山市, 岡山大学津島キャンパス, 2016
- ⑥ 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 田中敬大, 栗橋祐介, 川瀬良司, 今野久志: 感圧シートによる伝達衝撃応力の測定, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 2073-2074, 岡山市, 岡山大学津島キャンパス, 2016
- ⑦ 田中敬大, 前田健一, 奥村勇太, 内藤直人, 生渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 砂と碎石の変形・応力伝播挙動が互層緩衝構造の緩衝効果に及ぼす影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp. 2077-2078, 岡山市, 岡山大学津島キャンパス, 2016
- ⑧ 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 生渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: DEM 解析を用いた敷砂緩衝材の応力・ひずみに着目した衝撃力伝達挙動, 計算工学講演会論文集, Vol. 20, F-3-4, つくば市, 2015
- ⑨ 内藤直人, 前田健一, 山口悟, 生渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 敷砂緩衝材の載荷速度依存性に着目した衝撃力発生メカニズム, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 2177-2178, 札幌市, 2015
- ⑩ 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 山口悟, 生渡裕二: 砂と礫の混合割合及び表層の礫層厚の違いによる緩衝性能, 第 50 回地盤工学研究発表会, pp. 2179-2180, 札

幌市, 2015

- ⑪ 内藤直人, 前田健一, 奥村勇太: 個別要素法解析による応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の載荷速度依存性: 平成 27 年度全国大会第 70 回年次学術講演会 (土木学会), pp. 561-562, 岡山市, 2015
- ⑫ 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人: 強度特性が異なる落石防護土堤の衝撃変形挙動に関する DEM 解析: 平成 27 年度全国大会第 70 回年次学術講演会 (土木学会), pp. 473-474, 岡山市, 2015
- ⑬ Hitoshi NAKASE, Guoqiang CAO, Kenichi MAEDA and Naoto NAITO: Simulation of Rockfall Experiment by the DEM, COMPSAFE2014, pp. 658-689, Sendai-city, 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:
○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.maeda-lab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 健一 (MAEDA, Kenichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 5 0 2 7 1 6 4 8

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

生渡裕二 (USHIWATARI, Yuji)

山口悟 (YAMAGUCHI, Satoru)

榊原淳一 (SAKAKIBARA, Junichi)

小林剛 (KOBAYASHI, Tsuyoshi)

小池豊 (KOIKE, Yutaka)

David, Muir WOOD