

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者		氏名（ふりがな）		所属		役職	
		前田健一 （まえだけんいち）		名古屋工業大学大学院		教授	
②研究 テーマ	名称	衝撃履歴を受ける落石防護土堤の残存耐力評価法と土を利活用した合理的な復旧・補強の技術研究開発					
	道路行政 技術開発 ニーズ	No.	HDs5, HM10		政策 テーマ	「防災・減災が主流となる社会の実現」, 「持続可能なインフラメンテナン	
		項目名	「防災・減災が主流となる社会の実現」, 「持続可能なインフラメンテナン				
③研究経費（単位：万円） ※R5は精算額、R6は受託額、R7は計画額を記入。端数切捨。		令和5年度	令和6年度	令和7年度	総合計		
		2, 871	2, 483	2, 015	7, 369		
④研究者氏名		（研究代表者以外の共同研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏名		所属・役職					
畠山乃		（国研）土木研究所寒地土木研究所・上席研究員					
中村拓郎		（国研）土木研究所寒地土木研究所・主任研究員					
岸徳光		室蘭工業大学大学院・特任教授					
小室雅人		室蘭工業大学大学院・教授					
瓦井智貴		室蘭工業大学大学院・助教					
内藤直人		豊橋技術科学大学・助教					
⑤研究の目的							
<p>堅牢でしなやかな環境調和型の道路斜面防災対策の実現に向けて、低コストで施工性・長期耐久性・復旧性に優れる落石防護土堤に着目し、落石捕捉後の残存耐力評価手法・土を利活用した補強技術・復旧時の技術選定方法に関する技術研究開発を行う。本技術研究開発では、①落石捕捉後の土堤の残存耐力評価方法の提案、②土堤の落石捕捉性能を向上させる地盤材料を用いた新補強技術の開発、③数値解析による効率的な照査の実施方法とその解析結果の解釈の提案、④落石捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案、を目標とした。</p>							

⑥これまでの研究経過、目標の達成状況、研究成果

●研究の進捗や目的・目標の達成状況：(図表については紙面の制約から発表スライドに掲載)

(計画の遂行と成果レベル) 当初の目的、目標に沿って実施し、成果については既に多くの学会発表やジャーナル論文に投稿も行っており、成果の項目や質についても一定レベルの高い成果を得ている(項目⑧や⑩などに記載)。(目的・目標達成概要) 予定の成果を得るために、2種類の土質(砂と土砂)、サイズの異なる(天端高1m, 0.5, 0.125m)土堤模型を作成し、静的載荷、落体が転がらない振り衝撃実験、すべり台型で落体が転がる回転衝撃実験による模型実験を実施した。また、法勾配が急な土堤の補強材料としてソイルセメントの材料特性、補強効果と落石捕捉性能の関係を調べ、施工性も確認した。以上について個別要素法(以下DEM)解析と衝撃有限要素法(以下FEM)解析を行っている。

1) 落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案：①数値実験・模型実験による単発の落石履歴を有する土堤の終局状態・終局外力の検討を行い、繰返し載荷による破壊の進展・蓄積を再現できることが明らかになり、外観で見える変状の順序と土堤内の損傷の進展の関係を見える化できた。②落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法として、既存で簡易な簡易動的コーン貫入試験や土壌硬度試験を用いた方法の提案と実装に見通しを得た。③数値解析による照査法の適用範囲・限界と課題を整理し、鍵となる課題の解決に向けた効率的な実施方法を具体的に提案できた(具体はスライドに記載)。

2) 地盤材料を用いて土堤の落石捕捉性能を向上させる新補強技術の開発：①(a)小型・中型模型を用いた新補強工の性能照査実験を行った結果、法勾配が緩いと転がった落体を捕捉できないが、急勾配化(1割2分～5分まで変化)することで捕捉性能を確実に向上できることを定量的に明らかにした。急勾配化で高まる破壊リスクを軽減するためにソイルセメントを衝突面に設置することで補強できることを確かめた。(b)また、土堤の静的な破壊耐力は土堤サイズの約2.5乗に比例するという相似則が得られた。実験による照査に大いに役立つ。②工夫した粒子間ボンド効果を導入したDEM解析により新補強工の、非衝突面の押し抜きせん断やブロック化などが再現でき、妥当性を模型実験との比較から確認できた。

⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況： 開発する技術が広く活用出来るように発注者や建設コンサルタント等と3回以上意見交換し、指摘事項に関する対応案を検討するとともに実施した。

●DEM解析において落石が非円形であることが全体の流動や変形に与える影響について： 静的載荷において非球形(EOTA型重錘)と球形重錘による比較を行った結果、球形の方が土堤内部のせん断変形が局所化したせん断帯が重錘接触部に放射状に多数みられ、重錘から広範な領域に損傷領域が広がり、粒子間結合の破断の割合が高い。多面を有する非球形の方が、損傷領域が重錘の貫入方向に集中することが分かった。それと連動して、非衝突面法面へと延伸する、せん断層は、球形の方が法面中央に、非球形では法中央だけでなく法尻へも進展し、非球形の方が土堤全体で破壊境耐力が発現されていることが分かった。

●一回の吸収エネルギーEが大きい砂と繰返し利用できる土砂の比較優位性について： 実験・解析結果から、捕捉性能向上のために土堤に必要な機能を整理できた。【土堤に必要な機能】=①【貫入による土堤の局所破壊E吸収】×②【衝突面の摩擦・回転抵抗(衝突後の回転E吸収)】(衝突前回転・衝突後の回転励起抑制)×③【土堤の有効高：{(天端法面位置-衝突法面位置)×法勾配}】(駆け上がり等防止、安定した自立高さ)×④【破壊して貫通させない(非衝突法面の法肩を超えない)】。②③④で土砂の方が砂よりも優位性があり、ライフサイクルコスト、施工コスト、維持管理コストも安価であり優位。

●DEM解析でミクロな変形とマクロな変形の違いがもたらす構造特性への影響について： 粒子集合体の土中の衝撃応力伝播が重要であり、衝突初期は扇状に伝播し、時間経過に伴い粒子間のミクロなすべりや回転によって応力伝播が局所化したり散逸したりし、マクロな変形・耐力に影響することが明らかになってきた。今後、継続して検討することで、土堤の弱点部の抽出、点検・補強を効率化できると考えている。

●標準試験モデル以外での災害時(地震・豪雨・津波など)を想定した残存耐力の評価方法について： 既存の設計計算、数値解析を行い(入手すべきパラメータ取得が容易なため)、その結果も鑑みて次のように考えている。検証のために土堤の被災・非被災事例を収集・分析する。①地震については震度法による法すべりの安全性で評価可能、②豪雨については表面の浸潤による法すべりの安全性で評価可能(特に土砂の場合には強雨強度に依存した浸潤モードの変化はなく計算し易いことを確認)、③耐津波は想定される越流水深～越流時間と盛土の耐侵食性のチャートから評価可能。

●残存耐力評価法に関する検証成果の活用 の明確化について： 土堤の変状プロセスのメカニズムに基づいた変状のフロー図・連鎖図(FT)を作成し、外部から観察可能な変状と内部の損傷との関係からイベント図を用いた点検マニュアルの作成を行うことを検討しており、成果の活用 の明確化を試みている。

⑧研究成果の発表状況

以下のように、計画が予定通りに遂行され、質の高い成果が得られていることから、多くの学会発表、ジャーナル投稿（英文も含む）などを成果の発表・公表を積極的に行っている。R7年度の全国クラスの大会にも8件程度の発表準備を進めている。DEM、粒状体に関わる国際会議の企画にもたずさわった。

●【ジャーナル論文】（R6年度、2024年度） 3編（投稿中を含む）

- ・ 土木学会論文集： 木村ら，“衝撃載荷および静載荷による砂質土を用いた落石防護土堤の破壊挙動”
- ・ 構造工学論文集： 近藤ら，“載荷履歴を有する落石防護土堤の重錘衝突による破壊挙動と損傷度評価”（軽微な修正依頼対応中）
- ・ Soils and Foundations： Oguri et al., Deformation and resistance characteristics and scale effects of rockfall protective soil embankments under static loading（投稿中）

●【学会発表】（R6年度、2024年度分） 10編（投稿中を含む）

- ①第29回計算工学講演会（2024.6）：単発・繰返し衝撃載荷実験及び個別要素法を用いた落石防護土堤の変形破壊挙動の把握、
- ②第59回地盤工学研究発表会（2024.7）：単発・繰返し衝撃載荷実験及び個別要素法を用いた落石防護土堤の変形破壊挙動の把握、
- ③第79回土木学会全国大会（2024.9）：実規模落石防護土堤実験を対象とした質点系落石シミュレーションに関する一検討：DEM解析を用いた重錘衝突による落石防護土堤のエネルギー吸収性状把握：二次元個別要素法による落石防護土堤の静的載荷時の再現解析
- ④学会支部発表会（北海道支部、中部支部）：6編（投稿中を含む）

⑨研究成果の活用方策

現時点で、①土堤の落石捕捉性能、内部損傷、破壊耐力発現メカニズム解明、②数値計算についても性能照査のための精度向上、限界と課題・解決方法の整理、③模型実験についても破壊耐力の相似則が見えてきたことから性能照査方法としての課題・解決方法の実用的整理が進んでいる。また、④土堤の弱部把握と残存耐力の簡易な評価法の整理、強化方法の検討ができた。

本研究期間終了後にも、複数の実物大での性能の把握、試験施工を行い土堤性能のモニタリング、実物実験を現地で行うなど発展させることが重要と考える。また、土堤手前のポケット、地山斜面特性の有効利用方法など土堤システムとしての研究への発展も重要である。この結果、維持管理も含めた捕捉性能の把握、破壊耐力のスケール効果の把握と検証ができる。それらの成果から、土堤システムとして維持管理も含めた土堤復旧時の技術選定方法マニュアルが作成でき、道路政策に貢献できると考えている。

⑩特記事項

●本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項

- ・得られた成果を学会発表し、高評価を得ている。学生などが優秀発表を受賞している。
- ・ジャーナルの査読結果も高評価を得ており、点数が高く、掲載までが短期間であった。マルチスケールなど新たな視点での検討や迫力ある緻密な衝突実験、落石捕捉や土堤破壊挙動の複雑さを分かりやすくメカニズムについて言及している点が高く評価されている。
- ・学内においても学術においても実務においても重要課題に取り組んでいることから、施設使用や設備使用について、特典が与えられるなどの高い評価を受けている。また、研究活動が認められ、学内においても、学生の研究奨励賞の2度受賞、教員評価でももっとも高い評価を得ている。

●研究の目的に沿って研究期間内に目指す目標の達成状況や研究成果の見通し（自己評価も記入）

研究メンバーとその他にも管理者、設計者とも積極的に意見交換する場を設けて対応し、課題の解決や研究計画や成果とりまとめに反映することとした。各業務内容について発注者、コンサルタント設計者等と複数回（3回程度以上）の意見交換を実施し、実務における工法選定等を念頭に本研究成果が広く活用されるよう整理できた意義は大きい。さらに、捕捉性能のメカニズムが見える化できてきたので、落石対策効果とコストの関係を図表にまとめるとともに、残存耐力評価法に関する検証成果の活用の明確化、落石防護土堤と既存の落石防護工の耐荷・耐久性能の分析・比較結果を念頭においた議論ができている。今後はさらに修復性についても考慮して、さらなる落石防護土堤が既存の落石防護工に対する優位性の整理、設計法の原案の作成に到達できることを確信している。今後も、当初の予定通りに研究成果を進捗させる見通しがついた。

