

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

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.			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ス」		
		項目名	HDs5, HM10					
③研究経費（単位：千円） ※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと		令和5年度		令和6年度		令和7年度		総 合 計
		2 8 , 7 0 7		2 2 , 3 4 1		2 0 , 1 4 8		7 1 , 1 9 7
④研究者氏名（研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。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（※令和8年3月31日現在）				
西村敦史				（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 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、に加え、⑤土堤の優位性を考慮した性能照査型設計フローの提案を目標とした。								

⑥これまでの研究経過、目標の達成状況

本研究は、当初計画に沿って順調に進捗し、研究期間内に設定した5つの到達目標に対して、実験・解析・維持管理・設計法の各観点から高いレベルで成果を得た。

研究体制は、名古屋工業大学（地盤防災・DEM解析）、寒地土木研究所（実物大衝撃実験・道路防災）、室蘭工業大学（衝撃工学・FEM解析）、豊橋技術科学大学（地盤衝撃・画像解析）を中心とした産官学連携体制で構築した。研究代表者である前田は研究全体の統括、DEM解析、設計思想整理を担当し、各研究機関が専門性を活かして相互補完的に研究を遂行した。

- ・ 目標1「残存耐力評価」では、小型・中型・実規模相当模型を用いた衝撃実験とDEM/FEM解析を実施し、繰返し载荷による損傷進展、内部せん断帯形成、残存耐力発現メカニズムを明らかにした。また、簡易動的コーン貫入試験、土壌硬度試験、UAV・SfM等を用いた点検技術を整理し、表面変状から内部損傷と残存耐力を推定する方法を提案した。
- ・ 目標2「新補強技術」では、法面急勾配化による駆け上がり抑制効果を明らかにするとともに、急勾配化に伴う破壊リスクを低減するため、ソイルセメントを用いた補強技術を開発した。さらに、ソイルセメントが局所破壊しながらエネルギー吸収に寄与することを示し、「強くする」だけでなく「損傷を制御しながらエネルギー吸収する」新しい設計思想を提案した。
- ・ 目標3「数値解析による照査法」では、DEM解析により回転を伴う落石挙動、せん断帯形成、内部損傷進展を再現し、FEM解析による実物大土堤の耐衝撃解析も実施した。特に、模型スケール比と最大荷重・終局荷重との関係について、それぞれ約2.4乗、2.7乗の相似則を見出し、実大実験依存から脱却した合理的な性能照査法の基盤を構築した。
- ・ 目標4「復旧時の技術選定方法」では、維持管理・点検・損傷トリアージ・残存耐力評価・補修・補強・更新まで含めた技術選定フローを整理し、実土堤調査も踏まえた点検・復旧マニュアルの基本方針を提案した。
- ・ さらに、中間評価で指摘された「適用対象現場の把握」「技術基準類への反映」を踏まえ、目標5として、要求性能・限界状態・損傷度・維持管理・ライフサイクルコスト（LCC）を統合した「落石防護土堤の性能照査型設計フロー」を提案した。

なお、物価・施工費高騰の影響はあったものの研究期間中に研究目標・研究方法の本質的な変更は行っていない。「実物大相当」として合理化を図り、得られる成果水準は当初目標と同等以上である。

⑦中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

中間評価では、「既存落石防護工に対する優位性の整理」「残存耐力評価法の標準化」「実務での活用方法の明確化」「技術基準類への反映」「点検・復旧マニュアルへの展開」等について指摘を受けた。

これに対し、本研究では、「建設コスト」、「維持管理」、「復旧性」、「ライフサイクルコスト（LCC）」、「残存耐力」、「点検性」の観点から既存工法との比較整理を行った。特に、100年間供用を想定したライフサイクルコスト評価では、条件によっては他工法の5～10倍程度のコスト差が生じる可能性を示した。また、他工法では衝撃後に全面更新とな

る場合が多い一方、土堤では損傷範囲が局所に限定され、部分補修による迅速復旧が可能であることを明らかにした。

残存耐力評価法については、繰返し衝撃載荷実験およびDEM解析により、損傷進展と残存耐力低下の関係を整理するとともに、簡易動的コーン貫入試験、土壌硬度試験、UAV・SfM等を用いた簡易点検法を整理し、内部損傷や残存耐力を推定可能とした。

さらに、本研究では、「損傷トリアージ」の概念を導入し、

- 継続利用
- 部分補修
- 補強
- 更新

を合理的に判断する維持管理体系を整理した。

また、発注者・道路管理者・設計コンサルタント等との複数回の意見交換を通じて、維持管理を含めた点検・復旧時の技術選定方法や、「受ける構造」から「制御するシステム」への転換を踏まえた性能照査型設計フローを整理した。

さらに、「適用対象現場の把握」「技術基準類への反映」を踏まえ、

- 性能照査型設計フロー
- 点検・復旧マニュアル
- 災害時を想定した残存耐力評価方法

等を整理し、将来的な「落石対策便覧」等への反映可能性を示した。

⑧研究成果

本研究では、落石防護土堤に関する力学メカニズム、性能照査法、維持管理手法、補強技術、設計フローについて体系的な研究開発を実施し、「経験工」として扱われてきた土堤を、「設計可能なレジリエント防災構造物」として再定義した。主な成果は以下である。

(1) 本研究では、落石防護土堤の捕捉性能を、

- ①貫入による局所破壊エネルギー吸収
- ②衝突面の摩擦・回転抵抗による回転エネルギー消散
- ③有効高さによる駆け上がり防止
- ④押抜きせん断破壊耐力

として体系化した（捕捉性能＝①×②×③×④）。さらに、本研究では、「相乗効果と競合関係（トレードオフ構造）の解明」を重要成果として整理した。例えば、

- ・ 法面急勾配化： 駆け上がり抑制・捕捉性能向上する、一方で破壊リスク増大
- ・ ソイルセメント補強： 耐力向上・破壊抑制の一方でエネルギー吸収性能低下の可能性を要確認

・ 土の変形性能： エネルギー吸収性能が向上する、一方で損傷が増大する
など、相乗効果と競合関係（トレードオフ構造）を体系的に整理した。これにより、落石防護土堤は、「強くすればよい構造」ではなく、「エネルギー吸収と破壊制御を最適化する構造」であることを示した。

(2) また、本研究より、「壊れる構造」、「ばらつく材料」、「弱い構造」として扱われがちだった土堤を、「エネルギー吸収構造」、「調整可能な設計材料」、「合理的かつ持続可能な防護工」として「再定義」した。これは、「価値の転換」であり、本研究は、落石防護土堤を、「経験工（経験則中心の設計）」から「設計可能な構造物」へ転換する基盤を構築した。

(3) 小型・中型・実物大相当模型を用いた衝撃実験では、落石の回転運動が駆け上りを誘発する重要因子であることを定量的に示した。従来、落石対策では並進運動中心の検討が主流であったが、本研究では回転エネルギー、回転抵抗、法勾配との関係を体系化し、回転を考慮した性能照査の必要性を示した。

(4) 数値解析・個別要素法（DEM）解析および有限要素法（FEM）解析により、土堤内部のせん断帯形成、局所変形、応力伝播を再現し、ミクロな変形とマクロな耐力発現との関係を明らかにした。特に、土堤内部のせん断帯厚さが粒径に支配されることを示し、最大荷重が模型スケール比の約2.4乗、終局荷重が約2.7乗に比例する「相似則」を提案した。これにより、縮小模型実験から実物大性能を推定する合理的な性能照査法の基盤を構築し、合理的性能照査法による「実大実験依存からの脱却」に貢献した。

(5) 残存耐力評価については、繰返し衝撃載荷実験および数値解析により、損傷進展と残存耐力低下の関係を整理するとともに、簡易動的コーン貫入試験、土壌硬度試験、UA・V・SfM等を用いた簡易点検法を提案した。

(6) さらに、本研究では、「損傷トリアージ（損傷度に応じた維持管理判断）」の概念を導入し、「継続利用」、「部分補修」、「補強」、「更新」を合理的に判断する維持管理体系を提案した。これにより、「損傷＝即更新」ではなく、「点検→損傷トリアージ→残存耐力評価→部分補修→継続利用」という合理的維持管理体系を提案した。

(7) また、建設コストだけでなく維持管理・復旧・更新を含めたLCCの観点から土堤を再評

価した結果、100年間供用を想定した場合、条件によっては他工法の5～10倍程度のコスト差が生じる可能性を示した。特に、他工法では衝撃後に全面更新となる場合が多い一方、土堤では局所補修が可能であり、**維持管理時代に適した「レジリエント構造物」としての優位性**を示した。

- (8) さらに、本研究では、要求性能・限界状態・損傷度・残存耐力・維持管理・LCCを統合した**「落石防護土堤の性能照査型設計フロー」**を提案し、「経験工（経験則中心の設計）」から「設計可能な構造物」への転換を実現した。
- (9) **学術的には**、地盤分野世界トップクラス誌である Soils and Foundations に掲載された英文論文“Deformation, resistance characteristics, and scale effects of rockfall protection in soil embankments under static loading”が、年間約600編の投稿論文のうちトップ2～3編に相当する**地盤工学会論文賞（英文部門）**を受賞した。また、研究期間中に支部長賞、奨励賞等も含む優秀研究発表賞等の受賞が15件にも及び、本研究成果の独創性と社会的価値が高く評価された。

⑨研究成果の発表状況

●【ジャーナル】

- 1) 小栗快之, 前田健一, 中村拓郎, 鈴木健太郎, 内藤直人, 瓦井智貴, 吉廣悠太: 落石の回転運動が落石防護土堤のエネルギー吸収特性および落石捕捉性能に及ぼす影響, 土木学会論文集, Vol. 82, No.2, 25-00221, 2026.
- 2) Yoshiyuki Oguri, Kenichi Maeda, Keisuke Kondo, Takuro Nakamura, Yuji Ushiwatari, Naoto Naito, Masato Komuro: Deformation, resistance characteristics, and scale effects of rockfall protection soil embankments under static loading, Soils and Foundations, 65(4), August 2025.
- 3) 近藤 慶亮, 前田 健一, 牛渡 裕二, 中村 拓郎, 内藤 直人, 瓦井 智貴, 小栗快之: 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, 構造工学論文集 71A 763-774 2025年3月
- 4) 木村 絢, 前田 健一, 牛渡 裕二, 中村 拓郎, 内藤 直人, 近藤 慶亮: 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, 土木学会論文集, Vol. 80, No.3, 23-00253.
- 5) 磯合凌弥, 前田健一, 牛渡裕二, 中村拓郎, 木村絢: ポケット部に緩衝材を有する落石防護土堤への実物大落体衝突実験, 構造工学論文集, Vol. 69A, pp.1082-1094, 2023.04.15-16.

●国際会議: 発表済みおよび発表予定(近日中に発表予定で既に査読, 採択済みのもの)

- ・ 8th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection, ROCEXS, July 7-9, 2026, Grenoble, France (※落石に関して伝統的な国際会議で, 工学だけでなく理学, 農学の他分野交わりで密度の高い議論がある。この会議後, 国際共同研究・共著論文を考えている)
 - 1) Yuta Yoshihiro and Kenichi Maeda: ENERGY ABSORPTION CHARACTERISTICS AND ROCK FALL CAPTURE PERFORMANCE OF ROCKFALL PROTECTION SOIL EMBANKMENTS
 - 2) Naoto Naito, Kenichi Maeda and Shota Tanigawa: 3D-DEM MODELING OF ROCKFALL PROTECTION SOIL EMBANKMENTS FOR IMPACT RESPONSE AND BLOCK TRAJECTORY
- ・ Powders & Grains 2025: 10th International Conference on Micromechanics on Granular Media※粒状体全般に関して伝統的国際会議で, 工学, 理学など学際的である。
 - 3) Naoto Naito and Kenichi Maeda: Energy absorption of sand cushions in rockfall impact: Effect of impact angle
- ・ Naoto Naito, Kenichi Maeda: Stress wave propagation and impact deformation behaviour of soil in slope disasters using DEM simulation, 4th International Workshop on Advances in Computational Mechanics (IWACOM-IV) 2024年9月20日(招待有)

●機関誌・学会誌(査読有)

- 1) 内藤直人, 森口周二: 個別要素法による地盤材料のモデリングとその応用 第6回実問題への適用①～落石・土砂流動～, 地盤工学会誌 73(2) 45-52 2025年1月
- 2) 中村 拓郎, 石原 寛也, 西村 敦史, 前田, 健一, 内藤 直人: 落石防護土堤の中型模型実験, 寒地土研月報 2025年8月
- 3) 中村拓郎, 石原寛也, 畠山乃, 前田健一, 内藤直人: 砂質土で構築した落石防護土堤の中型模型実験, 寒地土木研究所月報 847 2-9 2023年8月

●国内学会発表; 土木学会年次講演会, 地盤工学会, 計算工学会, 応用力学シンポジウム/理論応用力学講演会, 衝撃シンポジウムなど幅広い多様な出席者の研究・技術発表会で【45件】の積極的な発表を行っている。

●受賞

- ・ 論文賞: 1件 (S&F)
- ・ 発表賞: 6件 (2023年度: 地盤全国1、中部シンポ1、土木中部1、5年度: 地盤全国1、中部シンポ1、土木中部1)
- ・ 学内表彰: 5件 (2024年度: 副学長賞1、2025年度: 優秀発表賞1、学長賞2、卒論分野内最優秀発表賞1)
- ・ その他学会受賞: 4件 (2023年度: 支部長賞1、2024年度: 支部賞-研究奨励賞1、支部長賞1、2025年度: 支部長賞1)

⑩研究成果の社会への情報発信

本研究成果については、学会・研究会・公開講演会・大学ホームページ等を通じて積極的な情報発信を行った。

- ✓ 特に、Soils and Foundations掲載論文が地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞したことについて、大学ホームページ、学会誌等を通じて広く公表した。
- ✓ 加えて、15件に及ぶ優秀発表賞等を受賞しており、研究成果の魅力が評価され、広く好印象を伝えることができた。
- ✓ また、地盤工学会、土木学会、日本計算工学会、構造工学論文集等において研究成果を発表し、
 - ・ 回転による駆け上がり
 - ・ 相似則
 - ・ 損傷トリアージ（損傷度に応じた維持管理判断）
 - ・ 性能照査型設計フロー
 - ・ 維持管理・復旧方法

等について情報共有を行った。

- ✓ また、道路管理者、設計コンサルタント、研究機関等との意見交換会を複数回実施し、実務的観点から設計フローや維持管理体系の整理を行った。
- ✓ さらに、土木学会中部支部などの出前講義（依頼機関からの講義依頼に出向く講義）も、8件以上実施し、技術者関連協会（300名近い参加者の講演会も有り）、自治体の集まり、小学校などにおいて実施した。広く強い研究開発の社会還元効果の高い、情報発信の機会であった。

⑪研究の今後の課題・展望等

本研究により、落石防護土堤の性能照査型設計法、残存耐力評価法、維持管理・復旧体系の基盤を構築した。

(1) 今後は、「斜面～ポケット～土堤を一体」として捉えた「落石防護システム設計」へ発展させる必要がある。特に、

- ・ 回転を考慮した落石挙動モデル
- ・ エネルギー分担最適化
- ・ 複数衝突時の残存耐力評価
- ・ 巨大岩塊群・同時多数落石への対応

等が重要課題である。

(2) また、令和6年能登半島地震で見られたような広域岩盤崩壊や多数岩塊群落下、豪雨長期化による連続落石、コアストーン落下などへの対応も今後さらに重要になる。

(3) さらに、相似則について実物大土堤との比較・検証を進めることで、縮小模型による合理的性能照査法として実装することが期待される。

(4) 維持管理分野では、植生、厚層基材、フェンス、ソイルセメント等との複合構造設計や、点検・復旧マニュアルの高度化が必要である。

本研究は「製品」ではなく「設計技術」の研究であり、全国展開・国際展開可能な低コスト・高レジリエンス型道路防災技術への発展が期待される。

⑫研究成果の道路行政への反映

本研究では、落石防護土堤に関する性能照査型設計法、残存耐力評価法、維持管理・復旧技術を体系化し、道路行政における合理的な落石対策技術への展開可能性を示した。

特に、本研究では、落石防護土堤の捕捉性能について、

①【貫入によるエネルギー吸収】×②【回転抵抗】×③【有効高さ（土堤の法勾配×大きさ）】×④【押抜きせん断破壊耐力】

という観点から機能分解し、回転を考慮した性能照査法を整理した。

また、「損傷＝即更新」ではなく、「点検→残存耐力評価→部分補修→継続利用」という合理的維持管理体系を提案した。さらに、建設時だけでなく、維持管理・復旧・更新を含めたLCCの観点から落石防護土堤を再評価し、条件によっては他工法と比較して100年間で5～10倍程度のコスト差が生じる可能性を示した。

加えて、「性能照査型設計フロー」「要求性能・限界状態」「点検・復旧フロー」「技術選定方法」「維持管理マニュアル作成方針」を整理しており、将来的な「落石対策便覧」等への反映が期待される。

さらに、本研究成果は、落石、斜面崩壊、土石流、雪崩、岩盤崩壊などを含めた道路斜面防災技術への展開可能性も有しており、国土強靱化、気候変動適応、持続可能なインフラメンテナンスへの貢献が期待される。

⑬自己評価

本研究は、当初設定した5つの到達目標について、実験・解析・設計・維持管理・実務展開の各観点から高いレベルで達成できたと考えており、総合的に極めて高い成果を得たと自己評価する。

特に、本研究では、

- ・ 回転による駆け上がり
- ・ 捕捉性能メカニズム
- ・ 相似則
- ・ 残存耐力
- ・ 維持管理
- ・ LCC
- ・ 性能照査型設計フロー

を体系化し、土堤を「経験工」から「性能照査型設計・維持管理が可能なレジリエント防災構造物」へ転換する基盤を構築した。

また、Soils and Foundations掲載論文が地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞するなど、世界水準で高く評価された。

さらに、小型・中型・実物大相当実験、DEM/FEM解析、維持管理体系整理、設計フロー提案まで実施しており、研究費規模に対して極めて高い投資価値を有する成果が得られたと考える。