

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和5年度採択）
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.2023-3	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	名古屋工業大学 教授 前田健一

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、落石捕捉後の土堤の残存耐力評価法、新補強技術、性能照査型設計フロー、維持管理・復旧技術の確立を研究目的として、実験・数値解析・実土堤調査を統合して実施する研究開発。

1. 研究の背景や動機、目的および目標等

近年、豪雨・地震の頻発化や斜面の経年風化により、落石災害リスクが急速に増大している。一方で、社会インフラの老朽化と維持管理費の増大が深刻化しており、落石対策工にも長寿命化、維持管理合理化、レジリエンス向上が求められている。こうした背景のもと、施工性、経済性、復旧性に優れる「落石防護土堤」への期待が高まっている。

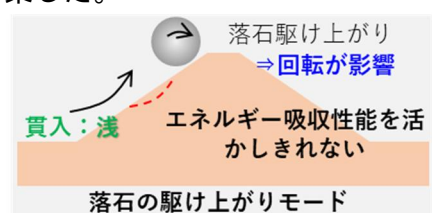
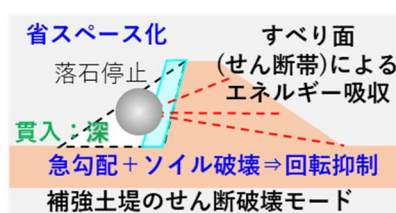
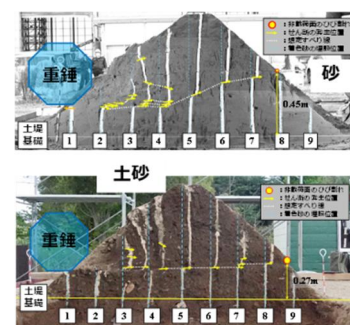
しかし、落石衝突時の変形・破壊メカニズムや残存耐力、回転を伴う落石挙動などは未解明であり、性能照査型設計法や維持管理体系は未確立であった。そこで本研究では、①残存耐力評価法、②新補強技術、③数値解析による合理的性能照査法、④復旧時技術選定方法、⑤性能照査型設計フローの提案を目標として研究開発を実施した。

2. 研究内容（研究の方法・項目等）

本研究では、小型・中型・実規模相当模型を用いた衝撃実験、DEM解析、FEM解析、実土堤調査を統合し、落石防護土堤の性能照査体系を構築した。振り子式・回転落下式重錘衝突実験により、回転を伴う落石挙動、内部せん断帯形成、損傷進展、残存耐力発現メカニズムを把握した。また、色砂、UAV・SfM、3D変位計測、簡易動的コーン貫入試験、土壌硬度試験等を用いて、表面変状と内部損傷を関連付けた。さらに、DEM解析により回転・摩擦・応力伝播を再現し、FEM解析により実規模土堤の耐衝撃解析を実施した。加えて、法面急勾配化とソイルセメント補強を組み合わせた新補強技術を開発し、維持管理・LCC・復旧性を含めた性能照査型設計フローを提案した。

3. 研究成果（図表・写真等を活用し分かりやすく記述）

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。さらに、「トレードオフ構造の解明」により、急勾配化、ソイルセメント補強、土の変形性能などが「相乗効果と競合関係」を持つことを整理し、「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。また、本研究により、土堤を「壊れる構造」から「エネルギー吸収構造」、「弱い構造」から「合理的かつ持続可能な防護工」へ再定義し、「経験工」から「設計可能な構造物」への価値の転換を実現した。さらに、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発見し、実大実験依存から脱却した合理的性能照査法への道筋を示した。加えて、「損傷トリアージ」と「点検→残存耐力評価→部分補修→継続利用」を統合した維持管理体系と性能照査型設計フローを提案した。



左：落石の回転による駆け上がり抑制のための法面の急勾配化と補強
右：押抜きせん断を受ける土堤の内部変状の可視化例（静的載荷）

4. 主な発表論文（研究代表者はゴシック、研究分担者は下線）

※ジャーナル論文（査読付き）の一部を以下に示す。

- 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. **※地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞**
- 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, 2024.

他に, 国際会議 4 件 (内招待講演 1 件), 国内学会発表 45 件。

※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, 研究期間中の支部長賞, 奨励賞等も含む研究発表優秀賞等の受賞が 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。

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

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。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の高度化, エネルギー分担最適化, 複数衝突時の残存耐力評価, 大規模岩塊群・同時多数落石への対応などが重要課題である。

また, 令和 6 年能登半島地震で見られた広域岩盤崩壊や多数岩塊群落下への対応も今後重要になる。

さらに, 相似則について実規模土堤との比較・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。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を目指す。

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

本研究では, 落石防護土堤について, 回転を考慮した捕捉性能メカニズム, 残存耐力評価法, 性能照査型設計フロー, 維持管理・復旧方法を体系化し, 「経験工（経験則中心の設計）」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。特に, 「点検→損傷トリアージ（損傷度に応じた維持管理判断）→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点は, 道路管理の意思決定合理化に大きく寄与する。

また, 最大荷重約 2.4 乗, 終局荷重約 2.7 乗の相似則を提示し, 実大実験依存から脱却した合理的性能照査法への道筋を示した。

さらに, 維持管理・復旧・更新を含めたライフサイクルコスト (LCC) 評価では, 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。

本研究成果は, 将来的な「落石対策便覧」等の技術基準類への反映や, 全国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展開, 次世代型道路斜面防災システムの構築への貢献が期待される。

7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

- ・ 研究室 HP: <https://www.maeda-lab.org/>
- ・ 河合塾・みらいブック: <https://miraibook.jp/researcher/k25961>: 実験画像・研究紹介等
- ・ 地盤工学会論文賞（英文部門）紹介記事: （大学 HP・学会誌掲載予定）