

落石防護土堤・溝の性能設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令 4～令 7

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：畠山乃、西村敦史、仁平陽一郎、
三浦之裕、中村拓郎、山澤文雄、
蛭子恭好、石原寛也

落石防護土堤・溝は土のみで構成されるため、比較的容易に施工でき、現地発生土を土堤材料とすることも可能なため、擁壁や落石防護柵など他の落石対策工と比較して経済性にも優れている。一方、土堤の設計は落石対策便覧等を参考に行われており、土堤のエネルギー吸収メカニズムについて、落石をポケット部や法面で反復バウンドさせることで落石の運動エネルギーを吸収・消散させるという考え方を示しているが、土堤の破壊に関する定量的な評価はなされていない。また、土堤の形状は落石の衝撃荷重に対する耐力及び落石のかけ上がり、飛越しに対する安全性等に対して検討を行う必要があるとされているが、研究例としての Ritchie の落石防護溝の寸法表の掲載と、斜面高が高い場合は質点系の落石シミュレーション等で検証するのがよい旨の記述に留まっており、その具体的な照査方法は明示されていない。

本研究では、落石防護土堤・溝の性能設計のための照査手法の提案を目的に、縮小模型および実規模大の試験体を用いた重錘衝突実験による実験的検討と、個別要素法による数値解析的検討を併用し、落体衝突による土堤の損傷と土堤衝突後の落体挙動を検証した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

実験的検討として、静的載荷試験および衝撃載荷試験を実施した。静的載荷実験により、ひび割れの発生状況や荷重と貫入量の間関係を整理することで、砂および土砂で構成された土堤の基本的な変形性状を把握した（文献 b-1）。また、衝撃載荷実験により、重錘の衝突速度と捕捉の可否や土堤の損傷程度について整理し、土堤の性能照査には重錘のかけ上がりや土堤の破壊という異なるモードの照査が必要であることを明らかにした（文献 a-2 ほか）。これらの実験結果に対し、数値解析的検討として個別要素法を用いた再現解析を実施した。小型模型実験と中型模型実験から個別要素法のパラメータについて検討を行い、土堤に重錘が衝突する際の土堤および重錘の挙動を再現する解析手法を確立した（文献 c-14 ほか）。この数値解析手法は、実規模実験によって、その妥当性について検証している。また、簡易貫入試験等の原位置試験による簡便な現地調査手法（文献 a-3）や個別要素法を用いた数値解析による定量的な性能照査に基づく設計法を提案した。

キーワード：落石防護土堤・溝、落石、重錘衝突実験、個別要素法

Study on Performance-Based Design Methods for Rockfall Protection Soil Embankments and Ditches Systems

Research Period: FY2022-2025

Research Team: Structures Research Team,

Cold-Region Construction Engineering Research Group

Author: HATAKEYAMA Osamu, NISHIMURA Atsushi,

NIHIRA Yoichiro, MIURA Yukihiro,

NAKAMURA Takuro, YAMASAWA Fumio,

Ebiko Yasuyoshi, ISIHARA Hiroya

Abstract: Rockfall protection soil embankments and ditches are constructed primarily of soil, making them relatively easy to build. Furthermore, since soil excavated from these sites can be utilized as fill material, these embankments offer superior cost-effectiveness compared to other measures, such as retaining walls and rockfall fences. The design of these embankments is largely based on the Handbooks for rockfall countermeasures. This handbook describes the concept of kinetic energy from falling rocks being dissipated by the rocks' repeated bouncing within ditches or on the embankment slope; however, quantitative evaluations of embankment failure remain insufficient. While it is recognized that embankment geometry must be evaluated for resistance to impact loads and safety against 'climbing' or overtopping, the literature is often limited to Ritchie's dimension tables. Specific performance verification methods, particularly for tall slopes where particle-based simulations are suggested, are not explicitly defined.

This study aims to propose a method for verifying the performance of rockfall protection soil embankments and ditches. We integrated experimental investigations that used drop-weight impact tests on small-scale and full-scale models with numerical analyses that use the discrete element method (DEM). This approach was used to evaluate embankment damage and the post-impact behavior of falling objects. The key findings are summarized below.

First, static and impact loading tests were conducted as part of the experimental investigation. The static tests elucidated the fundamental deformation characteristic of soil embankment by analyzing crack formation and the relationship between load and penetration. Impact tests further clarified the relationship between impact velocity, weight-capture capacity, and the extent of damage. These results revealed that performance verification must account for two distinct modes: the weight climbing the slope and the structural failure of the embankment. Second, to validate these findings, DEM simulations were performed. The numerical model's validity was confirmed by comparing its results with those of separate full-scale experiments. By optimizing the DEM parameters, we established an analytical method that accurately reproduces a falling weight's interaction with an embankment. Based on these results, we propose a practical survey method and a performance verification framework for soil embankments that uses DEM-based numerical analysis.

Keywords: Rockfall protection soil embankments and ditches, Rockfall, Impact tests, Discrete element method (DEM)

論文リスト

● 学術誌等による成果普及

査読付論文・国内（計 4 本）

- a-1) 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規模落体衝突実験、構造工学論文集、Vol. 69A、2023.3.
- a-2) 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、2024.3
- a-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、Vol. 71A、pp. 763-774、2025.4
- a-4) 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

査読付論文・海外（計 1 本）

- b-1) Yoshiyuki Oguri, Kenichi Maeda, Keisuke Kondo, Takuro Nakamura, Yuji Ushiwatari, Naoto Naito, Masato Komuro: Deformation and resistance characteristics and scale effects of rockfall protective soil embankments under static loading, Soils and Foundations, Volume 65, Issue 4, 2025.6 【令和 7 年度地盤工学会賞【研究・論文賞部門】論文賞（英文部門）受賞】

査読無し論文・国内（計 25 本）

- c-1) 中村拓郎、石原寛也、磯合凌弥、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の静的載荷実験、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1.
- c-2) 磯合凌弥、菅原正則、海部友和、菊池優希、前田健一、内藤直人、中村拓郎：落石防護土堤の荷重作用による強度特性変化に関する実験的検討、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1.
- c-3) 木村絢、前田健一、磯合凌弥、近藤慶亮、中村拓郎、牛渡裕二、Arif Daniel Bin Azumi：中型土堤の重錘衝突実験による重錘衝突時の速度・エネルギーの遷移挙動、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1
- c-4) 磯合凌弥、前田健一、木村絢、近藤慶亮、中村拓郎、岡部里音、内藤直人：衝突速度を変化させた重錘衝突実験による落石防護土堤の変形・破壊挙動、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1.
- c-5) 近藤慶亮、前田健一、磯合凌弥、木村絢、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人：静載荷実験および二次元 DEM 解析による落石防護土堤の静的破壊挙動、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1.
- c-6) Arif Daniel Bin Azumi、内藤直人、中村拓郎、牛渡裕二、鈴木健太郎、前田健一：異なる土質の落石防護土堤の静的破壊挙動に関する三次元 DEM 解析、令和 4 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、2023.1.
- c-7) 木村絢、前田健一、磯合凌弥、中村拓郎、菅原正則、内藤直人：重錘衝突実験・DEM 解析による落石防護土堤の変形破壊挙動および内部挙動の把握、第 28 回計算工学講演会論文集、2023.5.
- c-8) 奥河優斗、内藤直人、中村拓郎、鈴木健太郎、前田健一：土堤の落石捕捉性能に及ぼす落体回転の影響に関する解析的検討、第 14 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2024.1.
- c-9) 木村絢、前田健一、中村拓郎、岡部里音、内藤直人、近藤慶亮：落石防護土堤の破壊性状把握のための重錘衝突実験および DEM 解析、第 14 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2024.1.
- c-10) 澤村直毅、木村絢、近藤慶亮、小栗快之、前田健一、中村拓郎、内藤直人、益子優太：重錘衝突実験による落石防護土堤の内部および表面変状と貫入抵抗、令和 5 年度土木学会北海道支部論文報告集、2024.2.
- c-11) 木村絢、近藤慶亮、小栗快之、前田健一、中村拓郎、牛渡裕二、奥河優斗：単発および繰返し衝撃載荷実験による落石防護土堤の変形破壊挙動への影響、令和 5 年度土木学会北海道支部論文報告集、2024.2.
- c-12) 小栗快之、木村絢、近藤慶亮、前田健一、中村拓郎、鈴木健太郎、高坂晏志、瓦井智貴：材料・スケールの異なる落石防護土堤の破壊性状の把握、令和 5 年度土木学会北海道支部論文報告集、2024.2.

- c-13) 近藤慶亮、木村絢、小栗快之、前田健一、中村拓郎、海部友和、内藤直人：材料の異なる落石防護土堤に対する重錘衝突時の速度・エネルギーの遷移挙動、令和 5 年度土木学会北海道支部論文報告集、2024.2.
- c-14) 近藤慶亮、木村絢、小栗快之、前田健一、中村拓郎、牛渡裕二、内藤 直人：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、計算工学講演会論文集、2024.6
- c-15) 小栗快之、前田健一、近藤慶亮、森悠太、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、小室雅人：衝撃・静的載荷時における落石防護土堤の破壊性状と重錘挙動、令和 6 年度土木学会北海道支部論文報告集、2025.1
- c-16) 近藤慶亮、小栗快之、森悠太、前田健一、中村拓郎、菊池優希、内藤直人、瓦井智貴：落石防護土堤の衝撃耐力評価と重錘捕捉性能向上に関する実験的検討、令和 6 年度土木学会北海道支部論文報告集、2025.1
- c-17) 森悠太、近藤慶亮、小栗快之、前田健一、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、岸徳光：法勾配とソイルセメントの有無が落石防護土堤の重錘捕捉性能に及ぼす影響、令和 6 年度土木学会北海道支部論文報告集、2025.1
- c-18) 小栗快之、前田健一、近藤慶亮、吉廣悠太、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、瓦井智貴：法面を急勾配化した落石防護土堤に対する重錘衝突実験及び個別要素法を用いた内部挙動の把握、計算工学講演会論文集、Vol. 30、E-05-05、2025.6
- c-19) 石原寛也、中村拓郎、西村敦史、前田健一、内藤直人：落石防護土堤・溝の形状と質点系落石シミュレーションにおける通過率の関係、第 15 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2025.11
- c-20) 吉廣悠太、前田健一、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、小室雅人、小栗快之：落石防護土堤のエネルギー吸収特性及び落石捕捉性能に関する一考察、第 15 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2025.11
- c-21) 石原寛也、中村拓郎、西村敦史、前田健一、小栗快之、内藤直人、岸徳光：法面を急勾配化した落石防護土堤の中型模型の静載荷実験、令和 7 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 論文報告集（第 82 号）、2026.1
- c-22) 柴田蓮、瓦井智貴、小室雅人、岸徳光、前田健一、内藤直人、中村拓郎、鈴木健太郎：FEM を用いた小型落石防護土堤の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討、令和 7 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 論文報告集（第 82 号）、2026.1
- c-23) 小栗快之、前田健一、吉廣悠太、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、瓦井智貴：実斜面・振り子運動を用いた衝撃実験による落石防護土堤の落石捕捉条件、令和 7 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 論文報告集（第 82 号）、2026.1
- c-24) 吉廣悠太、前田健一、小栗快之、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、瓦井智貴：実斜面を用いた重錘衝突実験による法面補強した落石防護土堤の性能検証、令和 7 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 論文報告集（第 82 号）、2026.1
- c-25) 吉廣悠太、前田健一、小栗快之、中村拓郎、鈴木健太郎、竹原歩、小室雅人：振り子式重錘衝突実験による急勾配・表面補強した落石防護土堤の性能把握、令和 7 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会 論文報告集（第 82 号）、2026.1

学会発表等その他（計 22 本）

- e-1) 磯合凌弥、前田健一、杉山直優、木村絢、菅原正則、石原寛也：実規模鉛直落下実験による土砂盛土の緩衝効果の評価、第 58 回地盤工学研究発表会、2022.7.
- e-2) 木村絢、前田健一、磯合凌弥、近藤慶亮、石原寛也、鈴木健太郎：土堤の落石捕捉性能把握を目的とした小型・実規模衝突実験と二次元 DEM 解析、第 34 回中部地盤工学シンポジウム、2022.8.
- e-3) 磯合凌弥、前田健一、杉山直優、木村絢、鈴木健太郎、中村拓郎：落石防護土堤への実規模衝突実験による落体挙動及び落石捕捉性能の検討、第 77 回年次学術講演会講演概要集、2022.9.
- e-4) 近藤慶亮、前田健一、磯合凌弥、木村絢、中村拓郎、菅原正則、内藤直人：落石防護土堤の静的破壊挙動の把握に向けた模型実験及び二次元 DEM 解析、令和 4 年度土木学会中部支部研究発表会、2023.3.
- e-5) 近藤慶亮、前田健一、磯合凌弥、木村絢、菊池優希、中村拓郎：静的載荷作用に対する落石防護土堤のスケール効果、第 58 回地盤工学研究発表会、2023.7.
- e-6) 近藤慶亮、前田健一、木村絢、小栗快之、中村拓郎、海部友和、内藤直人：落石防護土堤の破壊メカニズム解明に向けた小型・中型静的実験と二次元 DEM 解析、第 35 回中部地盤工学シンポジウム、2023.8.
- e-7) 内藤直人、菅原正則、岡部里音、海部友和、前田健一、中村拓郎：土壌硬度試験による落石防護土堤の損傷度評価に関する実験的検討、令和 5 年度全国大会第 78 回年次学術講演会、2023.9.
- e-8) 近藤慶亮、前田健一、磯合凌弥、木村絢、牛渡裕二、中村拓郎：受働土圧や土塊の摩擦力による落石防護土堤の耐力評価に関する検討、令和 5 年度全国大会第 78 回年次学術講演会、2023.9.
- e-9) 木村絢、前田健一、磯合凌弥、近藤慶亮、中村拓郎、菊池優希、内藤直人：振り子衝撃載荷実験による土堤衝突後の転がりに着目した重錘の運動機構、令和 5 年度全国大会第 78 回年次学術講演会、2023.9.
- e-10) 小栗快之、前田健一、木村絢、近藤慶亮、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、小室雅人：異なる材料で構築された落石防護土堤の静的載荷における破壊性状、令和 5 年度土木学会中部支部研究発表会、2024.3
- e-11) 近藤慶亮、木村絢、小栗快之、前田健一、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、小室雅人：衝撃載荷時における材料の異なる落石防護土堤の変形挙動及び耐衝撃性能の把握、第 59 回地盤工学研究発表会、2024.7
- e-12) 小栗快之、前田健一、近藤慶亮、森悠太、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、小室雅人：落石防護土堤のスケール効果及び基本的な破壊メカニズム解明に向けた静的載荷実験、中部地盤工学シンポジウム、2024.8
- e-13) 石原寛也、中村拓郎、畠山乃、前田健一：実規模落石防護土堤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、令和 6 年度全国大会 第 79 回年次学術講演概要集、2024.9
- e-14) 小栗快之、前田健一、木村絢、近藤慶亮、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、小室雅人：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、令和 6 年度全国大会 第 79 回年次学術講演概要集、2024.9
- e-15) 近藤慶亮、木村絢、小栗快之、前田健一、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、岸徳光：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、令和 6 年度全国大会 第 79 回年次学術講演概要集、2024.9
- e-16) 小栗快之、近藤慶亮、吉廣悠太、前田健一、中村拓郎、牛渡裕二、竹原歩、瓦井智貴：法面を急勾配化した落石防護土堤の重錘衝突実験におけるエネルギー吸収特性、第 60 回地盤工学研究発表会講演集、2025.7
- e-17) 吉廣悠太、近藤慶亮、小栗快之、前田健一、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、小室雅人：衝撃載荷時における落石防護土堤のスケール効果・相似則と土堤材料の関係、第 60 回地盤工学研究発表会講演集、2025.7
- e-18) 吉廣悠太、前田健一、小栗快之、芦田梨沙子、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、瓦井智貴：静的・衝撃載荷時における落石防護土堤の耐力のスケール効果及び相似則に関する検討、第 37 回中部地盤工学シンポジウム、2025.8
- e-19) 小栗快之、前田健一、近藤慶亮、吉廣悠太、中村拓郎、鈴木健太郎、内藤直人、小室雅人：落石防護土堤の延長方向における破壊領域への影響要因に関する実験的検討、第 80 回年次学術講演会講演概要集、2025.9
- e-20) 吉廣悠太、前田健一、近藤慶亮、小栗快之、中村拓郎、牛渡裕二、内藤直人、岸徳光：二次元個別要素法における粒子サイズが落石防護土堤の性能に及ぼす影響、第 80 回年次学術講演会講演概要集、2025.9
- e-21) 石原寛也、中村拓郎、畠山乃、前田健一、内藤直人：質点系落石シミュレーションを用いた落石防護土堤・溝の形状に関する検討、第 80 回年次学術講演会講演概要集、2025.9

- e-22) 竹原歩、内藤直人、松田達也、前田健一、中村拓郎、鈴木健太郎、瓦井智貴：三次元個別要素法を用いた衝撃載荷を受ける落石防護土堤の再現解析、第 80 回年次学術講演会講演概要集、2025.9

土研刊行物（計 3 本）

- f-1) 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、第 847 号、2023.8
- f-2) 石原寛也、中村拓郎、西村敦史：質点系落石シミュレーションを用いた落石防護土堤・溝の通過率に関する検討、寒地土木研究所月報、第 871 号、pp. 20-24、2025.7
- f-3) 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、寒地土木研究所月報、第 872 号、pp. 2-9、2025.8