【様式５】

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成　果　報　告　レ　ポ　ー　ト
Ｎｏ．2023-3

研究テーマ

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

研究代表者：名古屋工業大学教授　　前田　健一
共同研究者：（国研）土木研究所寒地土木研究所・上席研究員　西村敦史
（国研）土木研究所寒地土木研究所・主任研究員　中村拓郎
室蘭工業大学特任教授　岸　　徳光
室蘭工業大学教授　　小室　雅人
室蘭工業大学助教　　瓦井　智貴
名古屋工業大学助教　　内藤　直人（元豊橋技術科学大学）

令 和 ８ 年 ５ 月

新道路技術会議

目　次

研究概要（様式３を挿入）……1
第１章　はじめに……3
　１．１　研究の背景と課題……3
　１．２　研究目的・目標……3
第２章　落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案……5
　２．１　数値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……5
　２．２　落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案に関する検討……6
　２．３　土堤の残存耐力評価手法としての簡易動的コーン貫入試験や土壌硬度試験
　　を用いた実装可能性について……6
　２．４　土堤の残存耐力評価……7
　２．５　まとめ……7
第３章　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……8
　３．１　補強のためのソイルセメントの材料特性と試験施工および実規模実験
　　から得られた施工のポイント……8
　３．２　小型・中型・実規模模型を用いた新補強工の性能照査実験……9
　３．３　新補強工の数値解析技術の開発と妥当性確認……10
　３．４　数値実験による新補強工の有する土堤の終局状態・終局外力の検討……11
　３．５　まとめ……11
第４章　模型実験および数値解析による効率的な照査の実施方法と
　　解析結果の解釈方法の提案……12
　４．１　模型実験による照査方法の提案……12
　４．２　数値実験・個別要素法による照査方法の提案……13
　４．３　数値実験・動的有限要素法による照査方法の提案……14
　４．４　まとめ……15
第５章　落石防護土堤の設計フローの提案……16
　５．１　概要……16
　５．２　落石防護土堤の特徴……16
　５．３　作用の設定……17
　５．４　要求性能・限界状態の設定……18
　５．５　土堤形状の設定……19
　５．６　耐荷性能・対駆け上がり性能を考慮した土堤の重錘捕捉条件
　　と設計フロー（簡易・詳細）……20
　５．７　まとめ……24

第６章　落石捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案 26
６．１　概要 26
６．２　維持管理を含めた復旧時の技術選定方法の提案 26
６．３　実土堤における点検・管理の調査事例 28
６．４　まとめ 32
第７章　採択・中間評価時の課題に対する対応案とりまとめ 34
７．１　維持管理も含めた土堤の点検・復旧時の技術選定方法マニュアルの作成
におけるポイントおよび今後の課題と課題解決に向けて 34
７．２　適用対象現場の把握，技術基準類への反映へのポイント
および今後の課題と課題解決に向けて 35
７．３　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 36
７．４　まとめ 36
第８章　まとめ：　道路政策への反映と将来展望および今後の課題　～「土堤の良さを最大限に引き出す」ために～ 38
８．１　概要 38
８．２　成果概要と道路政策への反映と将来展望 38
８．３　今後の課題抽出と解決のための基本的な考え方 38

研究概要（様式３を挿入）

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。

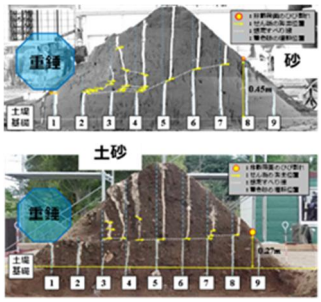
2　研究内容

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・ライフサイクルコスト（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

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，「相乗効果と競合関係（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「維持管理時代に適した合理的防護工」へ再定義し，「経験工」（経験則中心の設計）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（損傷度に応じた維持管理判断）」と「点検→損傷トリアージ→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。

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



押し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

※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

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

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」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→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，縮小模型を用いた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 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

- 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）

第１章　はじめに

1.1　研究の背景と課題

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等によって，落石による災害リスクが極端に増加している。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，老朽化する鋼・コンクリート製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。そこで，安価で施工性・長期耐久性・復旧性に優れる落石防護土堤に代表される土の利用が大きな期待を集めている。

土構造物は施工・形状維持が容易で，更新コストも不要と考えられる。また，鋼・コンクリートと比べて破壊までのひずみレベルが大きく，相対的に延性的な破壊挙動となる（図1.1）。そのため，単発の落石を捕捉した後の残存耐力が比較的高く，超過外力を受けた際の飛散時の二次被害も少ない可能性が考えられる。劣化に伴う維持管理に加えて，落石履歴と復旧性を考慮したライフサイクルコストは極めて小さい（図1.2）。

しかし，土堤への落石衝撃作用は，低拘束圧下の大変形・高密度化・応力伝播・亀裂進展・飛散を伴う不連続性の高い複雑な土の衝撃現象であり，力学的根拠に基づく耐力照査法は確立されていない。また，落石の回転エネルギーが大きい場合には，土堤がせん断耐力を十分に発揮できずに土堤を駆け上がる被災モードが想定される点も見逃せず，落石に対する土堤抵抗モードの制御技術に関する研究開発も求められる。

以上の背景から，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関する技術研究開発を行う。

1.2　研究目的・目標

本技術研究開発では，以下の４つの到達目標を設定した。

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

それらの実現のために，以下の項目を明らかにする。研究チームは，官学連携で，様々な専門分野の融合チームで実施している（名工大：地盤防災、応用力学, 寒地土木研究所：道路防災、コンクリート，室蘭工大：衝撃、構造工学，豊

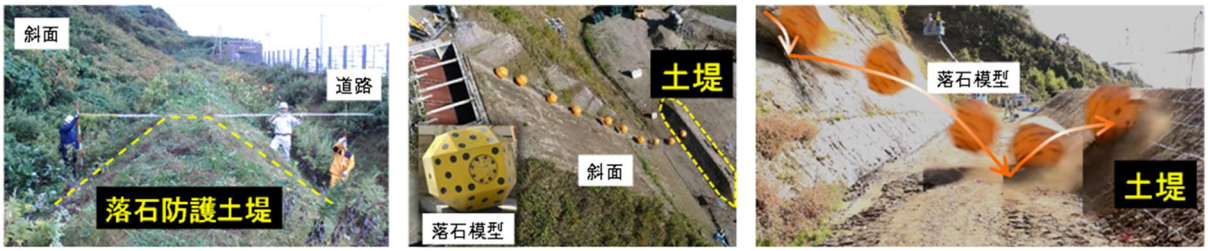


図 1.1　落石防護土堤の例　　実規模実験の例（全景）　　（土堤衝突部）

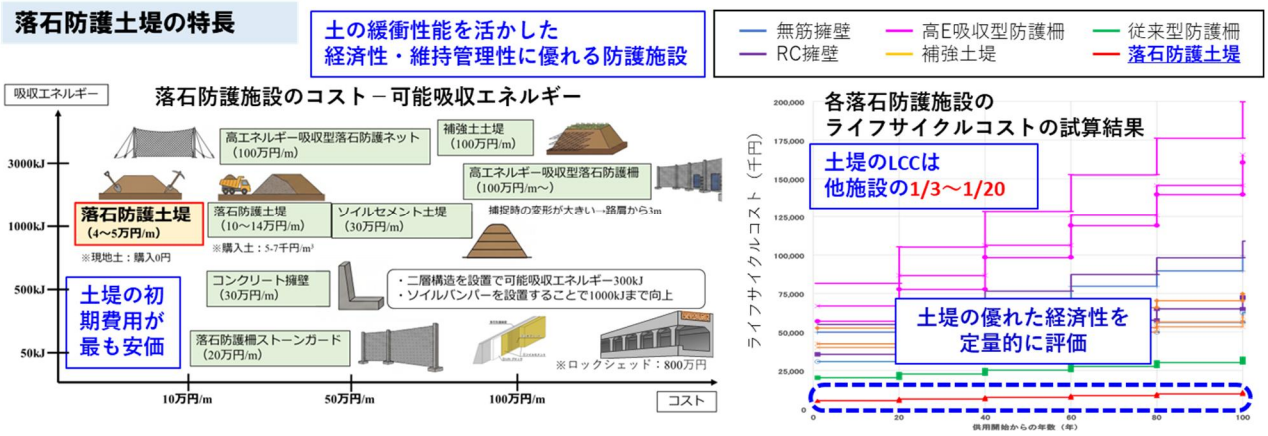


図 1.2　吸収エネルギーとコストからみた落石防護土堤の特徴：ライフサイクルコスト（LCC）からみても土堤は復旧コスト，維持管理コストも安価**（本研究で試算して，整理した結果）**

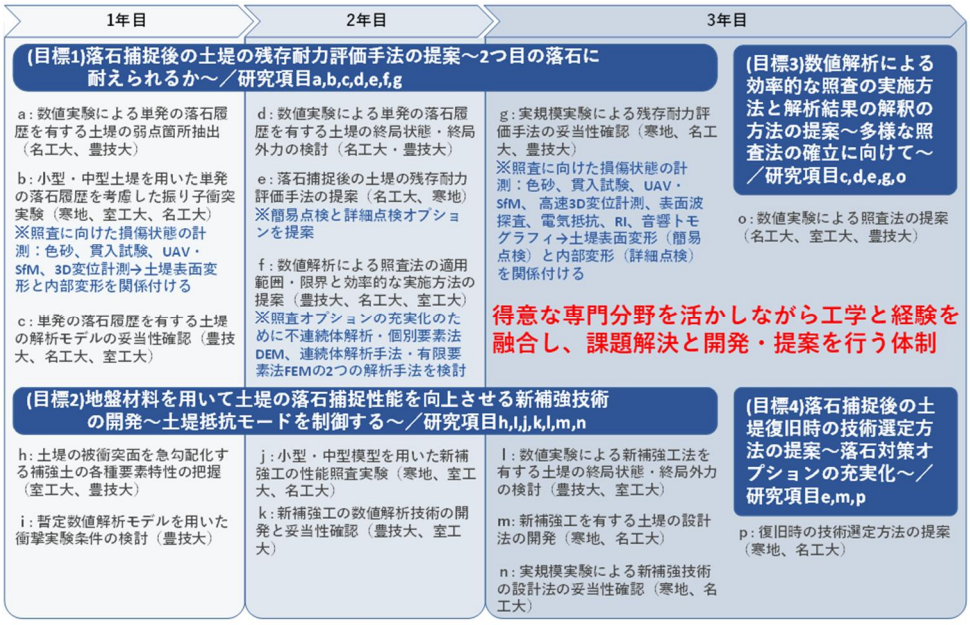


図 1.3　本研究の研究目標・内容とスケジュール

橋技科大：土の衝撃、地盤力学、防災)。

- 落石捕捉後の土堤の残存耐力とその調査に適する物理探査手法
- 落石衝撃に対して土堤がせん断耐力を十分に発揮する“せん断破壊モード”と落石回転運動により土堤が耐力を発揮しきれず落石が通過する“駆け上がりモード”の判別条件
- 地盤材料を用いて土堤の被衝突面を急勾配化することで土堤抵抗モードを“せん断破壊モード”に制御する新規補強工法の終局状態と終局条件
- 数値解析による照査法の適用範囲と適用限界

また，ヒアリング時の意見で，以下についても検討することとしている。

① 維持管理も含めた土堤の点検・復旧時の技術選定方法マニュアルの作成におけるポイントおよび今後の課題と課題解決に向けて

② 適用対象現場の把握，技術基準類への反映へのポイントおよび今後の課題と課題解決に向けて

③ 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

本様式では，頁数も限られているので，実用化のアウトプットを考えて，**「5 章：落石防護土堤の設計フローの提案」，「6 章：落石捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案」**にページ数を割いている。

第２章　落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案

2.1　数値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

(1) 実験概要

本研究では，落石衝撃を受けた土堤の残存耐力評価法を構築するため，まず中型模型土堤に対する重錘衝突実験を実施した（図2.1）。実験では，実規模の1/2スケールを想定した土堤模型を構築し，振り子式重錘を用いて単発載荷および繰返し載荷を与えた。土堤材料には札幌周辺で採取した土砂を混合した材料を用い，法勾配は実務で一般的な1:1.2とした。

重錘の運動は高速度カメラにより計測し，重心軌跡，速度，角速度，運動エネルギーを算出した。また，加速度計による衝撃力計測も行い，落石衝突時の動的応答を詳細に把握した。実験では，落下高さ6.0mのケースにおいても重錘は捕捉され，土堤が高いエネルギー吸収性能を有することが確認された。

(2) 数値解析概要

実験で得られた土堤の変形・破壊挙動を再現するため，2次元個別要素法（DEM）解析を実施した（図2.1）。解析では，非円形粒子モデルとボンド要素を用いることで，土粒子間の摩擦・粘着特性を表現した。解析パラメータは静的載荷実験結果を基に調整し，荷重－貫入量関係を概ね再現できることを確認した。

さらに，掘削試験結果を利用して土堤の限界自立高さを再現し，ボンド強度と粘着力の関係

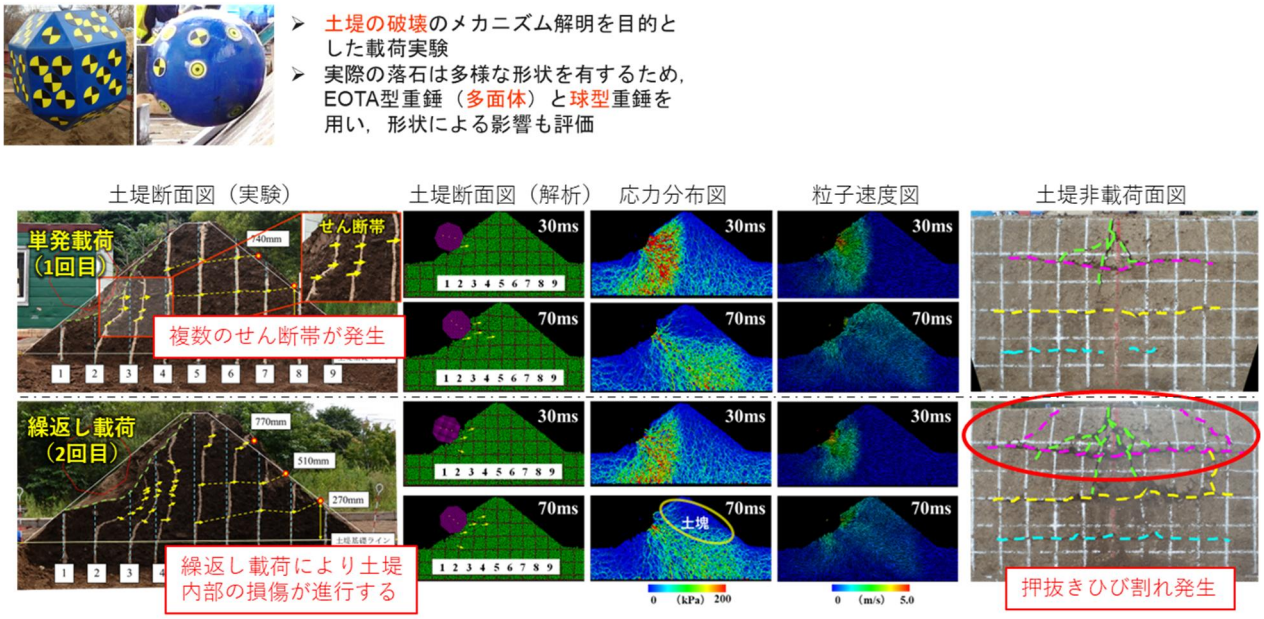


図 2.1　模型実験，数値実験による落石履歴を有する土堤の終局状態・終局外力の検討：同じ落体エネルギー下の繰返し載荷では変状範囲や破壊性状が大きくなるものの，2 回目の載荷においても土堤が落体を捕捉。損傷によるひびわれが生じる順序あり→ひびわれで損傷度合の把握可能→残存耐力把握。

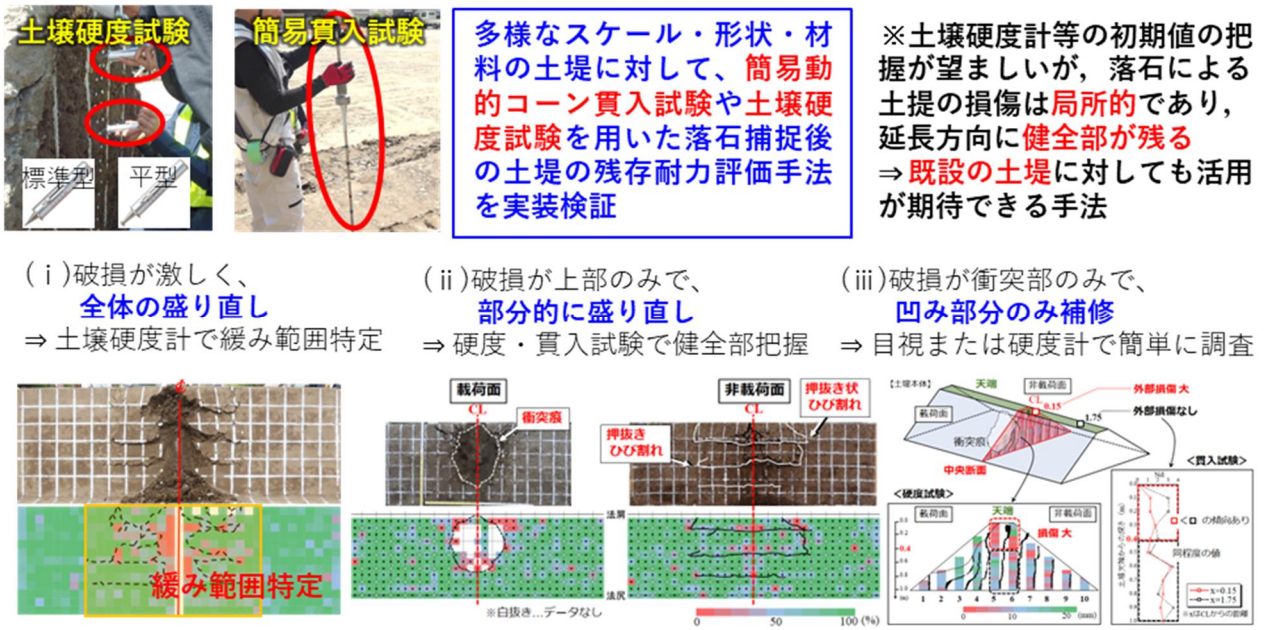


図 2.2　落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法（原位置試験）の提案・検証

を整理した。これにより，実験で観察された土堤内部のせん断帯形成や変形挙動を，DEM解析によって再現可能であることを示した。

(3) 2D-DEM を用いた土堤の変形破壊挙動及び内部挙動の検討

実験終了後に土堤中央断面を掘削した結果，載荷部近傍では複数のせん断帯が形成され，非載荷面側のひび割れへ連続するすべり線が確認された。特に繰返し載荷では，せん断変形がより細かく進行し，損傷が累積することが分かった。

DEM解析では，重錘衝突初期には扇状に応力が伝播し，広範囲の粒子移動が発生した。一方，時間経過とともに土堤上部の土塊が運動エネルギーを分担し，下部土塊が抵抗する構造へ移行することが確認された。さらに，繰返し載荷により，内部せん断やひび割れが進行・蓄積する様子も再現された。

これらの結果から，土堤は局所的なせん断変形と土堤全体の変形によって落石エネルギーを吸収しており，損傷後も一定の耐力を維持するレジリエントな構造であることが示された。

2.2　落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案に関する検討

(1) 実験概要

本節では，被災後土堤の残存耐力評価手法を提案するため，載荷履歴を有する土堤模型への重錘衝突実験を実施した。実験では，単発載荷ケースに加え，損傷を受けた土堤へ再度衝撃を与える繰返し載荷ケースを設定し，損傷進展と耐力低下を検討した。

実験結果から，載荷履歴を有する土堤でも重錘を捕捉可能である一方，損傷度は増大し，特に2回目載荷では押抜き状ひび割れや大きなたわみ変形が発生した。損傷度レベルは単発載荷でレベル2，繰返し載荷2回目でレベル3となり，損傷累積の影響が明確に確認された。

(2) 載荷履歴を有する土砂材料で構築した中型模型への重錘衝突による破壊挙動と損傷度評価

重錘軌跡解析より，落下高さ6.0mでは重錘が法面を駆け上がる挙動を示し，特に繰返し載荷2回目では，既存損傷により天端近傍まで駆け上がる現象が確認された。これは，回転運動と法面形状が捕捉性能に大きく影響することを示している（図2.2）。

また，貫入量は1回目より2回目載荷で約3割増加し，土堤抵抗力が低下していることが分かった。一方で，最大衝撃力自体は大きく低下せず，土堤内部の締固まり効果によって局所的に強度が増加する可能性も示唆された。

2.3　土堤の残存耐力評価手法としての簡易動的コーン貫入試験や土壌硬度試験を用いた実装可能性について

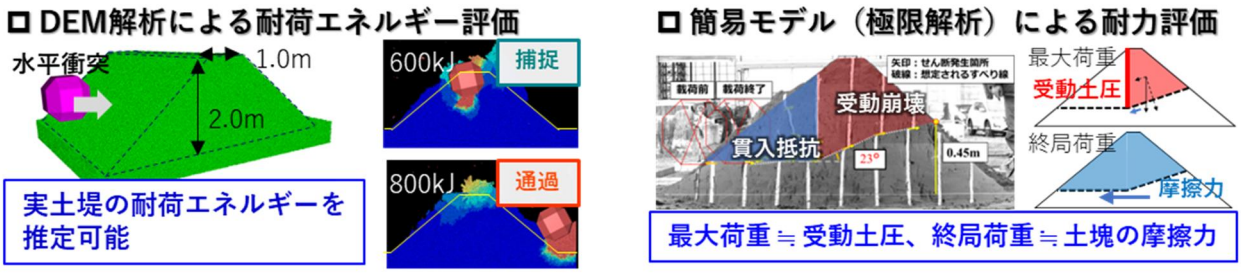


図 2.3　土堤の残存耐力評価：堤の終局状態・終局外力の検討：数値解析による残存耐力評価および捕捉性能評価（左）と静的終局状態の極限解析による残存耐力評価（右）。

(1) 実験概要

本節では，被災後の土堤損傷範囲を簡便に把握するため，土壌硬度試験および簡易動的コーン貫入試験を実施した（図 2.2）。これらは自然斜面や切土斜面で一般的に用いられる簡易調査法であり，本研究では落石被災土堤への適用可能性を検討した。

(2) 土壌硬度試験結果

土壌硬度試験では，載荷痕周辺で硬度低下が確認され，損傷領域を可視化できることが分かった。特に繰返し載荷ケースでは，非載荷面の押抜き状ひび割れ周辺で硬度低下が顕著となり，損傷範囲の把握に有効であった。

一方，載荷直下では土砂が圧縮され硬化する傾向も確認され，損傷と締固まりが同時に存在することが示された。また，せん断帯上部では軟化，下部では比較的硬度が維持されており，内部損傷状態との対応関係も確認された。

(3) 簡易動的コーン貫入試験結果

簡易動的コーン貫入試験では，損傷が大きい箇所ほど Nd 値が低下し，土堤が軟化していることが確認された。特に，載荷近傍では浅部で Nd 値が小さくなり，土壌硬度試験結果とも整合した。

これらより，簡易貫入試験や土壌硬度試験は，被災後土堤の損傷トリアージ（損傷度に応じた維持管理判断）や残存耐力評価に活用可能であり，点検・維持管理手法として実装可能性が高いことが示された。

2.4　土堤の残存耐力評価

(1) 数値解析による残存耐力評価および捕捉性能評価

DEM 解析および実験結果より，土堤は損傷後も内部せん断変形と全体変形によって重錘エネルギーを吸収し，残存耐力を維持することが分かった。特に，載荷履歴を有する場合でも，土堤全体が変形することで捕捉性能を保持していた。

また，回転を伴う落石挙動が駆け上がり現象を支配し，法勾配や有効高さが捕捉性能に大きく影響することが示された。

(2) 静的終局状態の極限解析による残存耐力評価

静的終局状態の解析では，内部せん断帯や押抜き破壊モードを考慮することで，損傷後土堤の残存耐力を評価できる可能性が示された。特に，表面変状と内部損傷を関連付けることで，外観点検から残存耐力を推定する実務的手法への展開可能性が確認された。

2.5　まとめ

本章では，落石衝撃を受けた土堤の残存耐力評価手法について，実験および DEM 解析を用いて検討した。その結果，土堤は局所的なせん断変形と全体変形によってエネルギーを吸収し，損傷後も一定の捕捉性能を維持することが確認された。特に，繰返し載荷により損傷は累積するものの，基層部の健全性が維持される場合には部分補修による復旧が可能であることが示唆された。

また，土壌硬度試験や簡易動的コーン貫入試験により，損傷領域や強度低下範囲を簡易に把握できる可能性が示され，点検・損傷トリアージ・残存耐力評価への適用可能性が確認された。これにより，本研究は，「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構築に向けた基盤を提示した。

第 3 章　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

3.1　補強のためのソイルセメントの材料特性と試験施工および実規模実験から得られた施工のポイント

(1) 中型土堤模型の施工

本研究では，落石防護土堤の対駆け上がり性能および耐荷性能を向上させる新補強工として，ソイルセメントを用いた急勾配法面補強技術を提案した。まず，実規模施工への適用可能性を検証するため，中型（1/2 スケール）模型を対象に施工試験を実施した（図 3.1）。

ソイルセメントには，早強ポルトランドセメント，現地砂，水を用い，配合試験結果に基づいて砂 1m³あたり 150kg のセメントを混合した。施工では，コンクリート基礎上でタイヤショベルを用いて練混ぜを行い，4 層に分けて施工した。中型模型の土堤高さは 1.0m であり，載荷面側法勾配を 1:0.5 とした。施工は 250mm ごとに敷均し・転圧を繰り返し，最終的にバックホウと人力により法面整形を実施した。圧縮強度試験では，材齢 7 日で平均 1.3N/mm²の強度が得られ，施工性および強度発現が確認された。

(2) 実規模土堤模型の施工

次に，現地施工性および実規模性能を検証するため，高さ2.0mの実規模土堤を構築した。ソイルセメントには普通ポルトランドセメントを用い，川砂と陸砂を混合した材料を使用した。施工では，事前にセメント工場でモルタルを製造し，現地で砂と水を加えてダンプトラック上で練混ぜを行った。

土堤本体はバックホウ走行転圧，バケット転圧，ローラー転圧を組み合わせて構築し，締固め度は平均93.8%を確保した。ソイルセメントは急勾配化した1:0.5法面に施工し，バックホウによる敷均し・転圧後，人力で最終仕上げを実

図 3.1　新補強工の材料特性と施工方法の検証

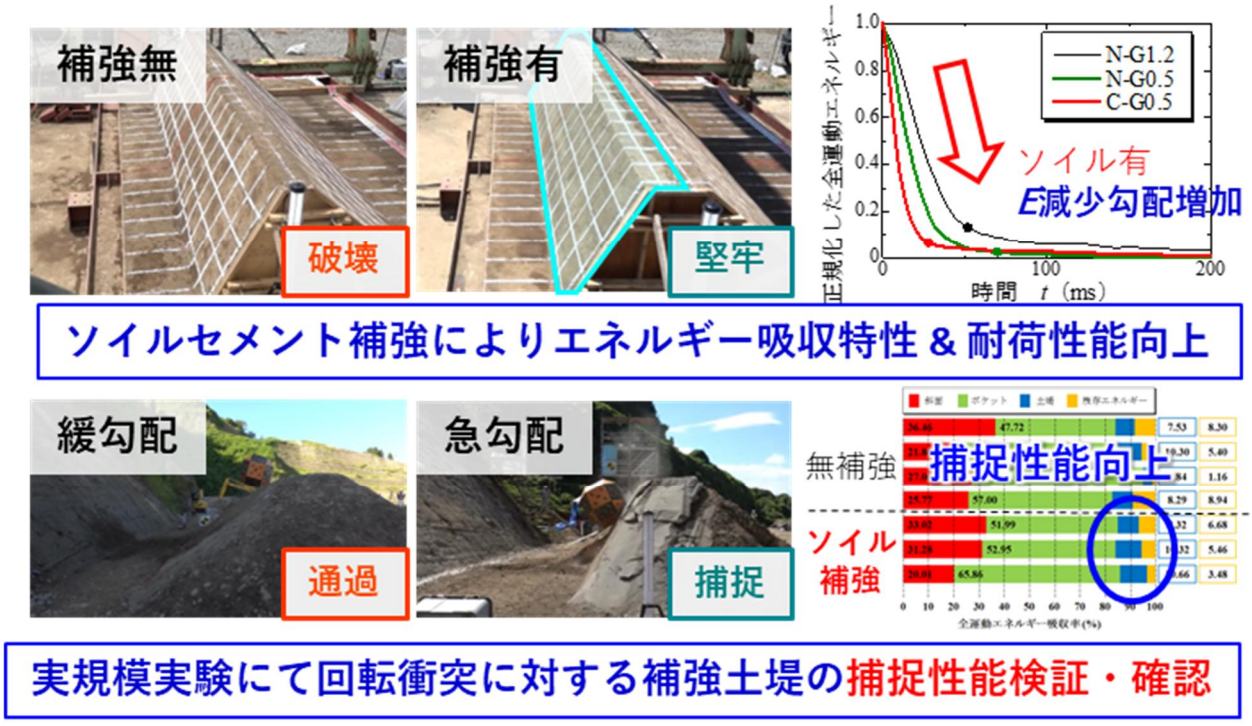


図 3.2　実規模・縮小模型を用いた新補強工の性能照査実験

施した。

圧縮強度試験では，材齢7日および13日で2～4N/mm²程度の強度が得られ，中型模型よりも高い強度発現を示した。これは，施工条件や配合条件の違いによるものと考えられる。

これらの結果より，ソイルセメントによる急勾配法面補強は，施工性・品質管理性ともに良好であり，実規模施工への適用可能性が高いことが確認された。

3.2　小型・中型・実規模模型を用いた新補強工の性能照査実験

(1) 小型模型を用いた回転落下式重錘衝突実験による法面急勾配時の土堤のエネルギー吸収特性

小型模型実験では，載荷面法勾配を 1:1.2 および 1:0.5 とした土堤を対象に，回転運動を伴う重錘衝突実験を実施した。目的は，法面急勾配化が落石の駆け上がり挙動およびエネルギー吸収特性に及ぼす影響を明らかにすることである（図 3.2）。

実験結果より，1:1.2 法面では重錘が法面を駆け上がって通過した一方，1:0.5 法面では重錘を捕捉できた。法面急勾配化により，重錘の水平方向速度減少率および運動エネルギー吸収率が増加し，対駆け上がり性能が向上することが確認された。

また，重錘衝突時のエネルギー吸収過程を詳細に分析した結果，最大貫入時までは衝突部近傍の塑性変形が支配的であり，その後は土堤全体の非載荷面側へのたわみ変形がエネルギー吸収に寄与することが明らかとなった。

さらに，落石の回転運動は駆け上がり挙動を顕著に促進することが確認された。回転運動を有する場合，重錘は法面に沿って上昇しやすく，捕捉が困難となる。このため，土堤設計においては回転エネルギーを考慮する必要があることを示した。

一方，法面急勾配化は対駆け上がり性能を向上させる反面，非載荷面側のたわみ変形や曲げひび割れを増大させることも確認された。つまり，

- 急勾配化
  → 駆け上がり抑制
  → 捕捉性能向上

一方で，

- 急勾配化
  → 最大衝撃力増大
  → 曲げ破壊リスク増加

という競合関係（トレードオフ構造）が存在することを明らかにした。

(2) 中型模型を用いた振り子式重錘衝突実験による新補強工の性能照査

中型模型実験では，ソイルセメント補強を施

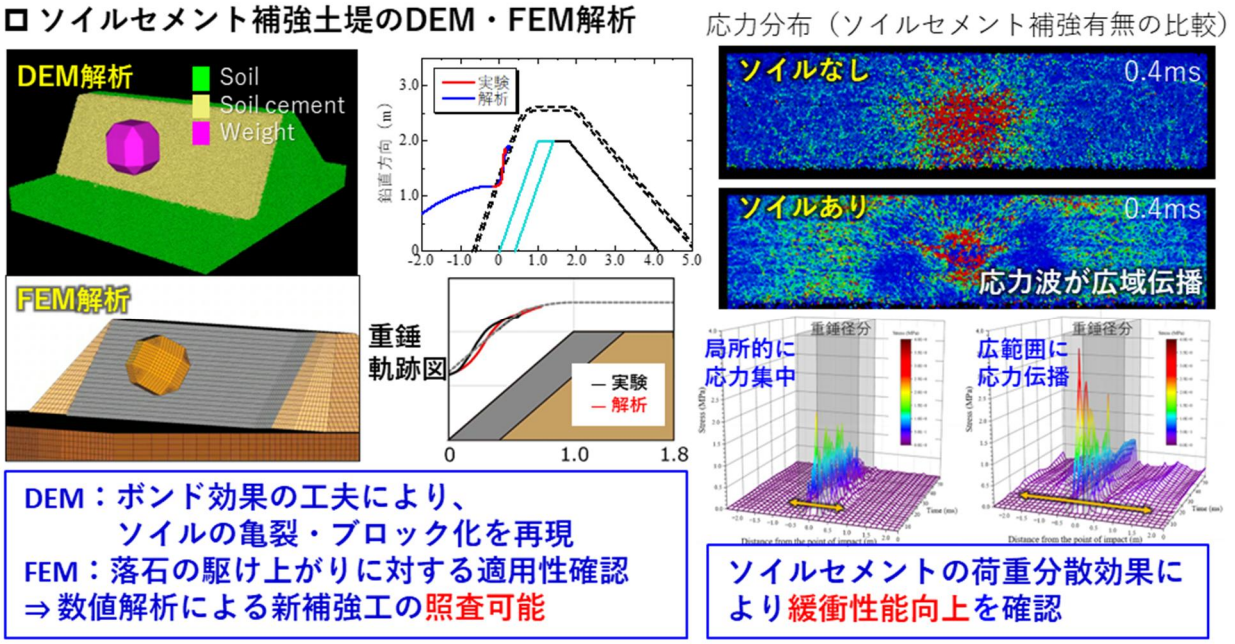


図 3.3　新補強工の数値解析技術の開発と妥当性確認

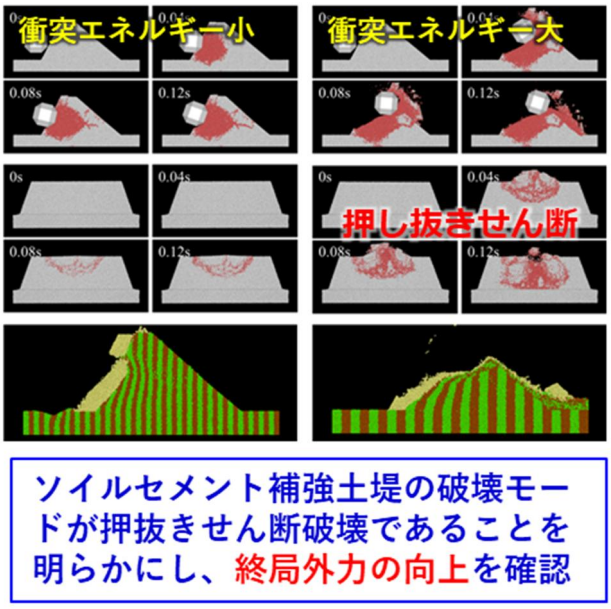


図 3.4　検証数値実験による補強土堤の　　終局状態・終局外力の検討

した急勾配法面土堤に対して振り子式重錘衝突実験を実施した。実験では，ソイルセメント補強により法面安定性が向上し，急勾配化に伴う大変形やひび割れ進展が抑制されることが確認された。

また，ソイルセメントは単に法面を「硬くする」のではなく，局所破壊しながらエネルギーを吸収する役割を果たしていた。これは，「壊れない構造」ではなく，「損傷を制御しながらエネルギーを吸収する構造」であることを意味している。

さらに，補強によって土堤全体の変形モードが安定化し，重錘の回転運動による駆け上がり抑制効果が向上した。

(3) 実規模模型を用いた斜面転落式重錘衝突実験による新補強工の性能照査

実規模実験では，実際の落石に近い斜面転落条件を再現し，補強土堤の性能照査を行った。実験結果より，ソイルセメント補強を施した急勾配法面は，実規模落石に対しても十分な捕捉性能を有することが確認された。

また，実規模条件においても，

- 衝突部近傍の塑性変形
- 土堤全体のたわみ変形
- 非載荷面側への応力伝播

によるエネルギー吸収機構が確認され，小型・中型模型で得られた知見との整合性が示された。

さらに，補強法面では，大規模な押抜き破壊や崩壊は生じず，損傷を局所化できる可能性が示された。

3.3　新補強工の数値解析技術の開発と妥当性確認

(1) 個別要素法

回転落石と土堤内部の変形・破壊挙動を再現するため，個別要素法（DEM）解析を実施した。

解析では，重錘衝突時のせん断帯形成，応力伝播，粒子移動を再現し，実験結果と概ね一致する変形モードを確認した（図 3.3）。

特に，最大貫入時までは衝突部近傍の局所変形が支配的であり，その後に土堤全体のたわみ変形へ移行する挙動が解析的にも確認された。

(2) 有限要素法

有限要素法（FEM）解析では，実規模条件における補強法面の応力状態や変形挙動を検討した。解析結果より，急勾配法面では法面近傍の応力集中が大きくなる一方，ソイルセメント補強によって局所変形を抑制できることが示された（図 3.3）。

また，補強材の強度・厚さ・施工範囲が耐荷性能やエネルギー吸収性能に大きく影響することが確認され，補強設計における重要パラメータが整理された。

3.4 数値実験による新補強工の有する土堤の終局状態・終局外力の検討

数値解析結果より，法面急勾配化は対駆け上がり性能を向上させる一方，曲げ変形や局所応力集中を増大させることが示された（図 3.4）。しかし，ソイルセメント補強を導入することで，これらの弱点を補完し，高い捕捉性能と耐荷性能を両立できる可能性が示された。

また，終局状態では，

- 衝突部近傍の塑性変形
- 非載荷面側へのたわみ変形
- 曲げひび割れ
- 押抜きせん断破壊

が複合的に作用することが明らかとなり，落石防護土堤の性能照査には，単なる強度評価ではなく，エネルギー吸収と損傷制御を統合的に考慮する必要があることを示した。

3.5 まとめ

本章では，地盤材料を用いた新補強技術として，ソイルセメントによる急勾配法面補強工を提案し，小型・中型・実規模模型実験および数値解析により性能照査を行った。

その結果，

- 法面急勾配化により対駆け上がり性能が向上すること
- 回転運動を有する落石では駆け上がり挙動が卓越すること
- 土堤のエネルギー吸収は局所塑性変形と全体たわみ変形により発現すること
- ソイルセメント補強が変形制御とエネルギー吸収に有効であること

を明らかにした。

さらに，本研究により，「強くすればよい構造」ではなく，「損傷を制御しながらエネルギーを吸収する構造」として落石防護土堤を再定義した。これは，従来の経験的設計から，回転運動・エネルギー吸収・損傷制御を考慮した性能照査型設計への転換を示す重要な成果である。

参考文献

1) 国土交通省：令和7年度土木工事数量算出要領・第2章 土工，pp. 1-2-13, 2025.
2) 佐々木康他：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路会議特定課題論文集，pp. 113-115，1981.
3) 国土交通省：令和 7 年度土木工事数量算出要領・第 2 章 土工，pp. 1-2-13, 2025.
4) 田中敬大，前田健一，堀耕輔，牛渡裕二，川瀬良司，鈴木健太郎：二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する数値解析，構造工学論文集，Vol. 64A, pp. 819-832, 2018.
5) ANSYS, Inc.: LS-DYNA User's Manual R15, 2024.
6) Cundall，P.A. and Strack，O.D.L：A discrete numerical model for granular assemblies，Geotechnique，Vol. 29，pp.47-65，1979.
7) N. Jimenez-Herrera, G. K. P. Barrios, L. M. Tavares, Comparison of breakage model in DEM in simulating impact on particle beds, Adv. Powder Technol. 29, pp. 692-706, 2018.

第４章　模型実験および数値解析による効率的な照査の実施方法と解析結果の解釈方法の提案

4.1　模型実験による照査方法の提案

落石防護土堤の性能照査には，大きく数値解析と実験の二つのアプローチがある。前者では，荷重－変形関係に加え，内部および表面の変形・破壊挙動を再現できるベンチマークが必要である。一方，後者では実大実験が困難であるため，縮小模型を用いた照査と相似則の確立が不可欠となる。本研究は，縮小模型実験により得られる破壊挙動と耐力特性を体系化し，数値解析の検証基盤および実務設計への橋渡しとなる枠組みを与える。

図 4.1　終局状態・終局外力の検討：静的載荷模型実験の様子：土堤モデル（一番左）と 2 形状の重錘（EOTA 型と球型の重錘）

多スケール模型による静的載荷実験を実施し（図 4.1），土堤の変形・破壊挙動を体系的に把握した。実際の落石は多様な形状を有するため，多面体形状の EOTA 型重錘（EOTA は欧州技術認証機構）と球型重錘を用い，形状による影響についても評価した。その結果，土堤の破壊が構造力学的な押抜きせん断破壊を支配的破壊モードとして発現することを明らかにしている。

さらに，荷重－貫入量関係と表面・内部変状を関連付けることで，破壊過程を定量的に整理しました（図 4.2）。色砂柱や断面観察により，複数のせん断帯の形成と発達を可視化し，内部損傷領域の把握を可能とした。

加えて，1/2，1/4，1/16 スケールの実験結果から，最大荷重および終局荷重が模型スケール比の約 2.4 乗および 2.7 乗（2 乗と 3 乗の間）に比例する相似則を見出した（図 4.3）。これにより，縮小模型から実規模土堤の耐力を推定できる枠組みを提示した。実大実験に頼らない合理的な実験的性能照査法の提案に繋げた。

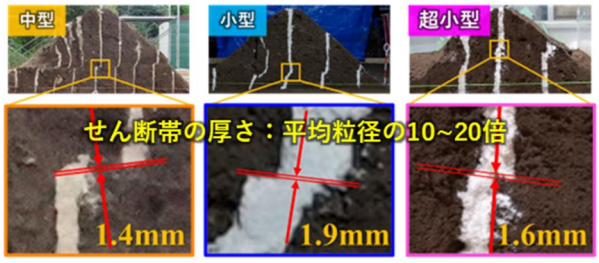


図 4.2　土堤内に発達したせん断帯の可視化と観察

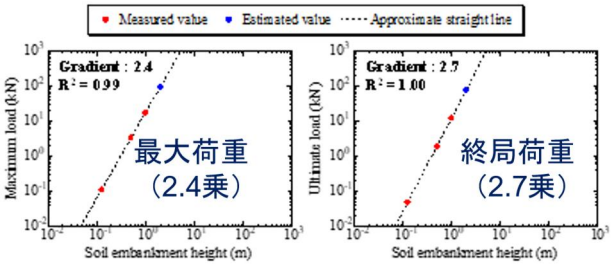


図 4.3　最大・終局時の荷重に関する相似則

丁寧に実施された模型実験結果は，数値解析の検証や新たな仮説構築の基盤となり得るものであり，実規模現象の理解に向けた重要な一歩である。本成果は，そのような模型実験の価値を再認識するとともに，縮小模型と実規模との接続を試みた一例として位置づけられるものとなった。

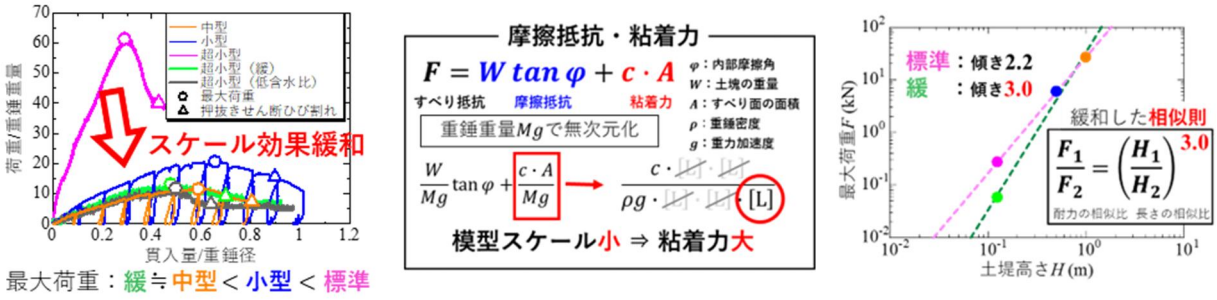


図 4.4　スケール効果を緩和する縮小模型実験法の提案

さらに，せん断帯の発生によるスケール効果を緩和する縮小模型実験手法の提案という工夫も行っている。相対密度・含水比を調整することで、縮小模型から実土堤の性能を推定可能とした（図 4.4）。

4.2　数値実験･個別要素法による照査方法の提案

(1) 二次元 DEM 解析

本研究では，落石防護土堤の耐衝撃挙動を効率的に照査するため，二次元個別要素法（2D-DEM）を用いた数値解析手法の高度化を行った。特に，実験で確認された重錘貫入量や土堤内部変形を適切に再現することを目的として，粒子径およびラップ率が解析精度に及ぼす影響について検討した（図 4.5）。

従来の解析では，重錘貫入量が実験より小さく評価される課題があった。そこで，衝突部周辺の圧縮性向上を目的として，粒径を従来の落体径の 1/(20√2)から 1/40 へ縮小し，粒子数を増加させた解析を実施した。

解析結果より，粒径を小さくすることで，重錘最大貫入量およびエネルギー減少率が実験値に近づくことが確認された。特に，ラップ率 50%，粒径 1/40 の条件では，重錘貫入量，土堤内部のすべり線形成，非載荷面への変形などが実験結果と概ね一致した。

また，解析結果からは，衝突部近傍における局所せん断変形と，土堤全体のたわみ変形の双方が，重錘エネルギー吸収に寄与していることが再確認された。

一方で，粒径を小さくすることで解析時間は大幅に増加し，粒径 1/40 では従来の約 4 倍の解析時間を要することが明らかとなった。したがって，

- 衝突部近傍のせん断挙動や内部損傷を詳細に把握したい場合　→ 粒径 1/40
- 土堤全体の耐衝撃挙動や形状保持性を評価したい場合　→ 粒径 1/(20√2)

とするなど，解析目的に応じて粒径を使い分ける必要があることを示した。

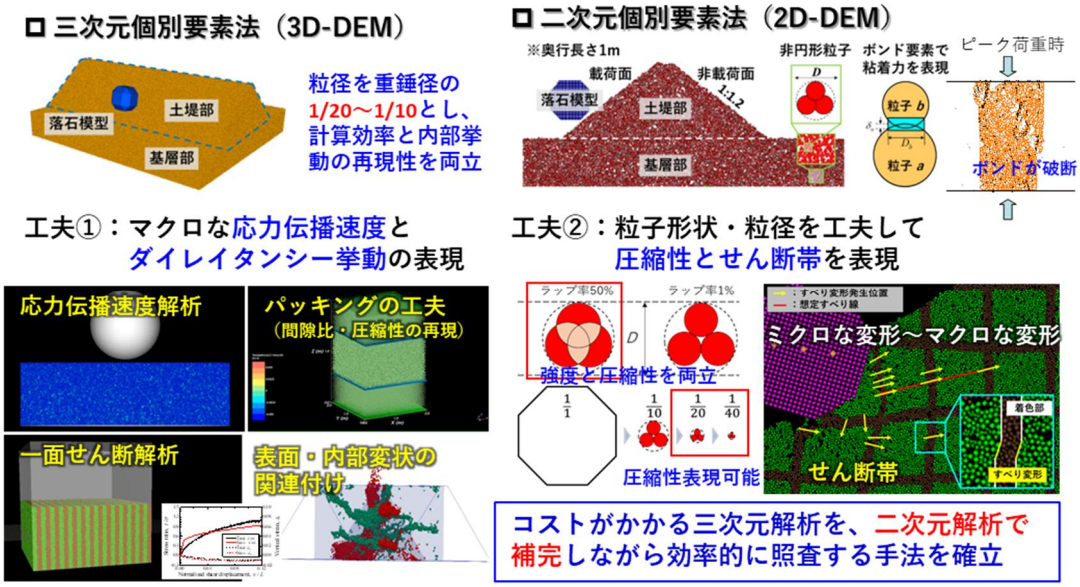


図 4.5　個別要素法（DEM）による効率的な照査法の提案の主な工夫ポイント

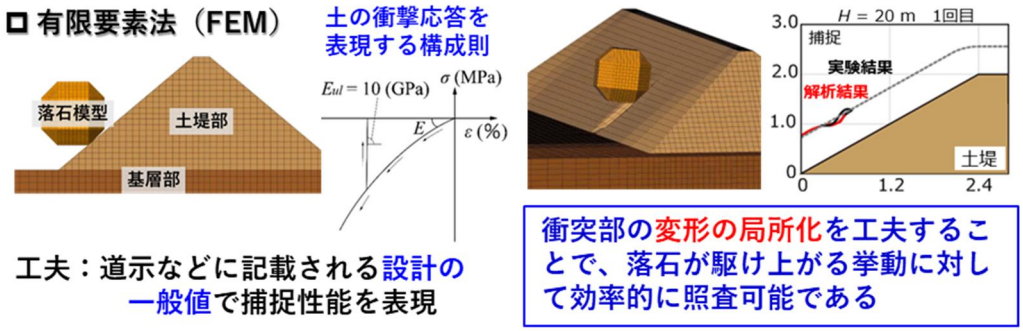


図 4.6　動的有限要素法（FEM）による効率的な照査法の提案の主な工夫ポイント

さらに，本研究では，土堤材料ごとの適切な解析パラメータ設定の必要性についても整理した。特に，現地発生土の力学特性を考慮した接触ばね定数設定や圧縮性評価が重要であり，今後の実務的な解析モデル構築に向けた課題を明確化した。

(2)三次元 DEM 解析

次に，実規模条件に対応可能な三次元 DEM 解析手法を構築した。三次元解析では，GPU 高速計算対応ソフトウェアを用い，球形粒子モデル，回転抵抗モデル，付着モデルを組み合わせることで，土堤の内部摩擦角，粘着力，ダイレイタンシー挙動を再現した（図 4.5）。

まず，一面せん断試験を対象とした再現解析を実施した。その結果，回転抵抗係数によって内部摩擦角を，付着係数によって粘着力を調整できることが確認された。また，拘束圧条件によって正・負のダイレイタンシー挙動を再現できることを示した。

さらに，既往の実規模土堤実験および中型模型実験を対象に再現解析を行った結果，重錘軌跡や土堤内部変形を高精度に再現可能であることが確認された。特に，

- 実規模実験では回転を伴う駆け上がり挙動
- 中型模型実験では繰返し載荷による内部損傷進展

を適切に表現できた。

一方で，実験で確認された明瞭なすべり面については完全には再現できなかった。これは，解析では均一な粒子堆積条件を仮定しているのに対し，実験では転圧施工により層状構造が形成されているためであると考えられる。したがって，今後は転圧面のモデル化など，施工履歴を考慮した解析手法の高度化が必要である。

また，三次元 DEM 解析は計算コストが大きいという課題を有するものの，重錘径の 1/20 程度の粒径でも十分な再現性が得られることから，解析効率と精度を両立できる可能性を示した。

4.3　数値実験・動的有限要素法による照査方法の提案

(1) 実規模落石防護土堤を対象とした重錘衝突実験および再現解析の概要

本節では，有限要素法（FEM）を用いた実規模落石防護土堤の耐衝撃解析手法を構築した。対象としたのは，既往の実規模落石防護土堤実験であり，斜面上から EOTA 型重錘を転落・衝突させたケースである（図 4.6）。

解析には LS-DYNA を用い，土堤および基礎地盤を 8 節点固体要素でモデル化した。土質材料にはクラッシャブルフォームモデルを適用し，土の圧縮性および塑性変形を考慮した。

また，重錘と土堤間には接触・滑り条件を設定し，摩擦係数を 0.3 と仮定した。解析では自重解析後に衝撃応答解析を実施し，実験時の重錘挙動および土堤変形を再現した。

(2) 実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動に関する再現解析の結果

再現解析の結果，解析モデルは，重錘の駆け上がり挙動や軌跡形状を概ね適切に再現できることが確認された。

一方で，実験で見られた土砂飛散現象については，連続体モデルである FEM では再現が困難であった。また，貫入量が大きいケースでは，解析結果は実験より貫入量を小さく評価する傾向が確認された。それでも，

- 重錘の駆け上がり
- 法面上昇挙動
- 捕捉・通過判定
- 運動エネルギー減衰

については，実験結果と整合した傾向を示したことから，FEM 解析は実規模土堤の耐衝撃照査に有効であることが確認された。

(3) 衝突条件を変化させた実規模落石防護土堤のパラメトリック解析の概要

次に，本研究では，実規模土堤を対象としてパラメトリック解析を実施した。解析では，「法勾配」，「入力エネルギー」，「衝突角度」，「回転エネルギー比」を変化させ，計 45 ケースの解析を行った。

法勾配については 1:1.2 および 1:0.5 を設定し，入力エネルギーは 100～300kJ，回転エネルギー比は 0～40%まで変化させた。これにより，落石条件が土堤の捕捉性能や耐衝撃挙動に及ぼす影響を体系的に整理した。

(4) パラメトリック解析の結果

解析結果より，回転エネルギー比が増加すると，重錘の駆け上がり挙動が顕著となり，運動エネルギー減衰量が低下することが確認された。特に，回転エネルギー比 40%では，重錘が法面を駆け上がり通過するケースが多く確認された。

また，衝突角度が大きくなる場合についても，同様に捕捉性能が低下した。これは，法面に沿った運動成分が増加し，重錘が上方へ駆け上がりやすくなるためである。

一方，法面を急勾配化した 1:0.5 勾配では，運動エネルギー減衰量が増加し，重錘を捕捉できるケースが増加した。これは，

・ 急勾配化
→ 衝突時の法線方向成分増加
→ 局所塑性変形増加
→ エネルギー吸収増加

というメカニズムによるものである。これにより，本研究では，

- 回転エネルギー
- 衝突角度
- 法勾配
- 入力エネルギー

が，落石防護土堤の対駆け上がり性能および捕捉性能を支配する重要因子であることを明らかにした。

4.4 まとめ

本章では，落石防護土堤の効率的な性能照査法として，二次元・三次元 DEM 解析および FEM 解析を用いた数値解析手法を構築した。
DEM 解析では，以下を適切に設定することで，土堤内部変形や重錘挙動を高精度に再現できることを示した。

- 粒径
- ラップ率
- 回転抵抗
- 粘着力モデル

特に，三次元 DEM 解析は，実規模実験および繰返し載荷条件に対しても高い再現性を有することが確認された。

また，FEM 解析では，実規模落石防護土堤の耐衝撃挙動を概ね適切に評価可能であり，パラメトリック解析によって，

- 回転エネルギー比増加
- 衝突角度増加
- 入力エネルギー増加

が捕捉性能を低下させることを示した。さらに，法面急勾配化によってエネルギー吸収量が増加し，捕捉性能が向上することを数値解析的に確認した。

以上より，本研究で提案した数値解析手法は，

- 落石防護土堤の性能照査
- 重錘捕捉性能評価
- 損傷進展評価
- 設計条件検討

に適用可能であり，実規模実験に依存しない合理的な照査技術として有効であることを示した。

参考文献

1) 内藤直人，前田健一，山口悟，牛渡裕二，鈴木健太郎: 落体質量と衝突速度の異なる外力条件を受ける敷砂緩衝材の衝撃力伝達挙動に関する数値解析的検討，構造工学論文集,Vol.60A, pp.1019-1031,2014.
2) Furuichi, M., Nishiura, D., Kuwano, O. et al.: Arcuate stress state in accretionary prisms from real-scale numerical sandbox experiments. Sci Rep 8, 8685, 2018. https://doi.org/10.1038/s41598-018-26534-x
3) Sakaguchi, H. and Igarashi, T. : Plugging of the flow of granular materials during the Discharge from soil, International Journal of Modren Physics, B7, pp.1949-1963, 1993.
4) O.R. Walton, R. L. Braun, Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks, J. Rheol. 30, pp. 949-980, 1986.
5) N. Jimenez-Herrera, G. K. P. Barrios, L. M. Tavares, Comparison of breakage model in DEM in simulating impact on particle beds, Adv. Powder Technol. 29, pp. 692-706, 2018.
6) Rowe, P.W., 1962. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. Proc. R. Soc. Lond. A 269, 500–527, 1962.
7) 前田健一，羽柴寛文，刈田圭一，牛渡裕二，川瀬良司: 二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積層の衝撃力伝達挙動，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 67, No. 2, I_355-I_364, 2011.
8) N. Naito, K. Maeda, H. Konno, Y. Ushiwatari, K. Suzuki: Rockfall impacts on sand cushions with different soil mechanical characteristics using discrete element method, Soils and Foundations, 60 (2), pp. 384-397, 2020.

第５章　落石防護土堤の設計フローの提案

5.1　概要

現在の土堤の設計は落石対策便覧（公益社団法人日本道路協会，2017）に記載されているRitchie（1963）によって提案された落石防護溝の寸法表を参考に実施されている（図5.1）。この設計手法では，設計対象斜面の勾配と斜面高さから土堤（溝）の深さを規定するものである。したがって，土堤の破壊耐力や土堤衝突後の落石の回転運動を定量的に評価できていない。実際にこれに基づいて実施した模型実験（杉山ら，2021）では，実施したすべての実験ケースにおいて重錘が土堤を通過する結果となった。一方で，同便覧における落石防護柵の設計では，設計外力に対する構造物の要求性能を照査する性能照査型設計法の概念が記載されている。ここで，落石対策工の計画に際しては，落石の発生形態（岩質・位置・規模・落下経路），運動形態（すべり・回転・飛跳），停止状態を的確に想定することが重要である。つまり，最適な対策方針を取るためには，斜面や山の特徴（固い，軟い，均質，不均質等），落石の形状（転石の不安定度や岩質，風化度）等，現地を踏査した者の判断が重要な要素となる。その後，対策方針に基づいた対策工（落石予防工もしくは落石防護工）を選定し，これを設計する。設計においては一般的に，作用荷重（落石外力）の設定，要求性能および限界状態の設定，対策工の形状の仮決定，照査等の手順を有する。そこで，土堤においても合理的かつ信頼性の高い構造とするためには，力学的な根拠に基づいた性能照査が不可欠であることから，新たな設計フローおよびその諸条件を提案する。次節以降では落石防護土堤を対象とした各項目における設計時の考え方を示す。

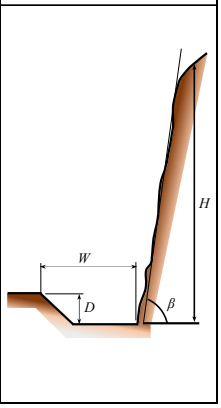
斜面の勾配 β	斜面高 H(m)	溝の幅 W(m)	溝の深さ D(m)	備　考
ほぼ鉛直 90°	5～10	4	1.0	
	10～20	5	1.5	
	20～	6	1.5	
1:0.25～0.3 76°～73°	5～10	4	1.0	
	10～20	5	1.5	
	20～30	6	2.0	
	30～	8	2.0	
1:0.5 63°	5～10	4	1.0	
	10～20	5	2.0	
	20～30	6	2.0	
	30～	8	2.5	
1:0.75 53°	0～10	4	1.0	
	10～20	5	1.5	
	20～	**5**	**2.0**	
1:1.0 45°	0～10	4	1.0	
	10～20	4	1.5	
	20～	5	2.0	

図5.1　落石防護溝の寸法（現行の落石対策便覧）

5.2　落石防護土堤の特徴

落石対策便覧には，落石予防工および落石対策工の適用性について，その効果と耐久性，維持管理，施工の難易，信頼性，経済性の観点から三段階での比較評価が示されている．本節では，特に「維持管理性」と「経済性」の観点から，土堤の優位性と現行の課題について再考する。

(1) 維持管理性の再評価

現行の落石対策便覧において，落石防護土堤工・溝工の維持管理性は「○（やや手がかかる）」と評価されている。これは，土堤がポケット部と併用される構造であり，ポケット部の深さを確保するために定期的な堆積物の除去が必要となることに起因すると推測される。実際に，ポケット部と併せて活用される落石防護擁壁工や落石防護柵工も維持管理性が「○」となっており，設置後の点検頻度が少ないロックシェッド工は「◎（手がかからない）」と評価されて

表5.1　落石防護工のライフサイクルコスト（千円）

工法	0 年	20 年	40 年	60 年	80 年	100 年
落石防護土堤	5180	6290	7400	8510	9620	10730
50kJ_従来型落石防護柵	20220	22695	25170	57645	30120	32595
170kJ_無筋落石防護擁壁	30790	37150	43510	49870	56230	62590
170kJ_RC 落石防護擁壁	35410	42775	50140	57505	64870	72235
170kJ_高 E 吸収型落石防護柵	56970	77685	98400	119115	139830	160545
170kJ_落石防護補強土壁	39880	43225	46570	49915	53260	56605
400kJ_無筋落石防護擁壁	30790	37150	43510	49870	56230	62590
400kJ_RC 落石防護擁壁	35410	42775	50140	57505	64870	72235
400kJ_高 E 吸収型落石防護柵	66900	86610	106320	126030	145740	165450
400kJ_落石防護補強土壁	42320	45875	49430	52985	56540	60095
780kJ_無筋落石防護擁壁	49720	59665	69610	79555	89500	99445
780kJ_RC 落石防護擁壁	54750	65595	76440	87285	98130	106975
780kJ_高 E 吸収型落石防護柵	81560	105230	128900	152570	176240	199910
780kJ_落石防護補強土壁	52410	56850	61290	65730	70170	74610

表5.2　落石防護工の被災範囲を考慮した再設置費（千円）

工法	エネルギー(kJ)				備考
	50	170	400	780	
落石防護土堤	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m
従来型落石防護柵	6m/100m=6%	-	-	-	2 スパン分
無筋落石防護防護擁壁	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m
RC 落石防護擁壁	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m/100m=10%	10m
高 E 吸収型落石防護柵	-	20m/100m=20%	16m/100m=16%	16m/100m=16%	2 スパン分
落石防護補強土壁	-	$21m^3/525m^3$=4%	$27m^3/675m^3$=4%	$26m^3/645m^3$=4%	体積比率

表5.3　ライフサイクルコストの土堤に対する倍率（%）

工法	エネルギー(kJ)			
	50	170	400	780
落石防護土堤	100	100	100	100
従来型落石防護柵	304	-	-	-
無筋落石防護防護擁壁	-	583	583	927
RC 落石防護擁壁	-	673	673	1016
高 E 吸収型落石防護柵	-	1496	1542	1863
落石防護補強土壁	-	528	560	695

いる。ここで，落石被災時における「復旧性」の観点を加味すると，土堤は，現地発生土を用いた補修・再構築が可能であることから，施工性および早期復旧性に優れている。また，後述するように，被災後の土堤は簡易な土質試験によって補修の有無や補修範囲を決定できる利点も有している。したがって，落石対策工の長期的な活用を想定した際の被災時における復旧性を十分に反映できていないと考えられる。落石対策工の選定にあたっては，「被災後の復旧性」を新たな評価項目として追加，あるいは既存の維持管理項目の中で総合的に評価するよう，指標の見直しが望まれる。

(2) 経済性の再評価

次に，経済性について検証する。表5.1に各落石対策工のライフサイクルコスト試算結果を示す。供用開始年数0年時点での費用を初期建設費用（千円）とし，設計供用期間を100年とした延長100m当たりのライフサイクルコスト（千円）を示す。なお，対策工は20年に1度の頻度で被災することとし，表5.2に示す範囲を被災に伴う対策工の撤去および再設置の対象とした。なお，本検討では補修・修繕費として経年による補修費用は考慮していない。表より，土堤の初期設計費用は518万円と最も安価である。また，供用100年時点の土堤のライフサイクルコストは1073万円であり，例えば，従来型落石防護柵の3260万円，無筋落石防護擁壁（780kJ）の9945万円と比較して大幅に小さい結果となった。表5.3に示すライフサイクルコストの土堤に対する倍率からも分かるように，他の対策工に対する土堤の経済的優位性は圧倒的であると言える。一方，落石対策便覧には補強土を用いた「落石防護補強土壁（ジオバンクやジオロックウォールなど）」も「落石防護土堤工」の区分に含まれている。ここで，例えば落石防護補強土壁（170kJ）は初期費用3988万円，供用100年時点のライフサイクルコスト5661万円であり，土のみで構成された土堤に対してそれぞれ7.7倍，5.3倍となることから，経済性が大きく異なる。したがって，土堤の初期建設費やライフサイクルコストは補強材の有無に応じて大きく異なることから，これを細分化して示すべきであると考える。

5.3　作用の設定

本節では，土堤の設計における落石作用の考え方について示す。土堤の設計に用いる落石の諸元（落石径，質量，落下高さ，衝突エネルギー，衝突高さ，衝突方向，発生頻度等）は，現地調査および落石シミュレーションの結果に基づき設定する。本提案では，落石の衝突挙動を以下の2パターンに大別し，それぞれに対して必要な性能（耐荷性能，対駆け上がり性能）を照査することとする（図5.2）。

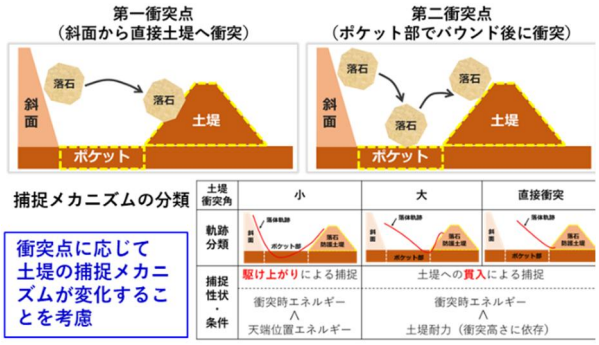


図5.2　作用レベルの設定：第一衝突点，第二衝突点

(1) 土堤が第一衝突点となる場合

まず，土堤が第一衝突点であるとき，これは斜面から転落した落石がポケット部に衝突す

ることなく，直接土堤に衝突する条件と定義される。落石径や落石質量，落下高さは現地調査，衝突高さや発生頻度は落石シミュレーションにより決定される。ここで，落石径や落石質量，落下高さは現地調査，衝突高さや発生頻度は落石シミュレーションにより決定される。落石エネルギーは便覧に示される以下の推定式を用いる。

$$E = (1+\beta)\left(1-\frac{\mu}{\tan\theta}\right)m \cdot g \cdot H \qquad (5.1)$$

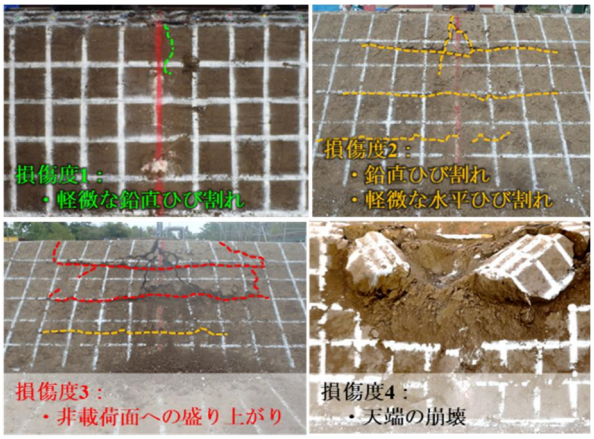
ここに，

$$(1+\beta)\left(1-\frac{\mu}{\tan\theta}\right) \leq 1.0$$

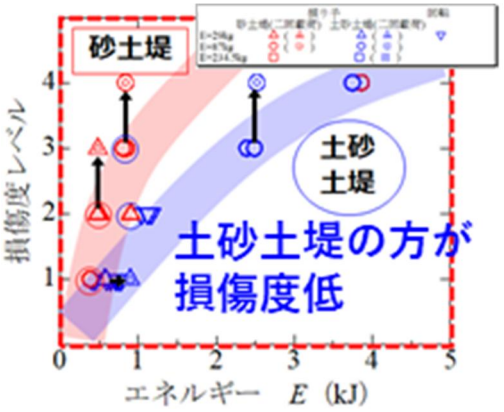
E：落石の全運動エネルギー，β：回転エネルギー係数（0.1としてよい）
μ：等下摩擦係数（落石対策便覧 表1-3参照），
θ：斜面勾配，m：落石の質量
g：重力加速度，H：落石の落下高さ
ここで，落石の土堤に対する衝突方向の設定には注意が必要である。落石がポケットを介さず土堤へ直接衝突する際，幾何学的に想定される最も上向きの衝突角度は水平方向である。したがって，土堤の耐荷性能および対駆け上がり性能を過大評価しない条件として，設計上の衝突角度は「水平」とすることが適切であると考える。

(2) 土堤が第二衝突点となる場合

次に，土堤が第二衝突点であるとき，これは斜面から転落した落石が一度ポケット部に衝突した後，土堤へ衝突する条件である。ポケット部でバウンドした落石は土堤法面の駆け上がりにより土堤を通過する挙動が確認されていることから，「駆け上がり」に対する性能照査が特に重要となる。また，ポケット部を介して土堤に衝突した場合，ポケット部の緩衝効果によって重錘のエネルギーが大幅に低減されることが既往の研究で示されている（磯合ら，2022）。しかし，ポケットの種類や地盤条件による緩衝効果の定量的な評価手法は現時点で確立されていないため，本衝突条件においても土堤の耐荷性能を確認することが望ましい。なお，ポケット部におけるエネルギー吸収効果の定量的評価に向けては今後の研究課題とする。以上より，耐荷性能および対駆け上がり性能を過大評価しない条件として，設計上の衝突角度は「水平」とすることが適切であると考える。なお，ポケット部におけるエネルギー吸収効果の定量的評価に向けては今後の研究課題とする。



損傷度	非載荷面の変状
●損傷度1	無損傷、軽微な鉛直曲げひび割れ
●損傷度2	鉛直曲げひび割れ、軽微な水平せん断ひび割れ
●損傷度3	非載荷面への盛り上がり、押抜きせん断ひび割れ
●損傷度4	天端の崩壊



- ✓ **使用限界状態**：ごく簡単な落石除去作業と軽微な補修で，機能を維持できる状態
- ✓ **修復限界状態**：適当な技術と妥当な経費・期間で補修を行えば，構造物の継続使用が可能で，機能を維持できる状態
- ✓ **終局限界状態**：防護対象の安全性は確保されるが，**後続の落石に対し残存耐力が期待できない**状態

図5.3　土堤損傷度（損傷度１～４）と要求性能・限界状態（損傷度）の設定

5.4　要求性能・限界状態の設定

落石作用に対する土堤の要求性能は防護対象となる道路の管理者等が決定する（図5.3）。本節では，「構造工学シリーズ22　防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計―基準体系の指針―（土木学会，2013）」を参考に，土堤における「使用限界状態」と「修復限界状態」，「終局限界状態」を定義し，模型実験で確認された土堤の表面変状（損傷度）との対応関係を以下に示す。

「使用限界状態」はごく簡単な落石除去作業と軽微な補修で，構造物の設置目的を達成するための機能（可能エネルギー吸収量，捕捉範囲）

を維持できる状態である。「修復限界状態」は，適用可能な技術と妥当な経費・期間の範囲で補修を行えば，構造物の継続使用が可能で，構造物の設置目的を達成するための機能を維持できる状態である。「終局限界状態」は防護対象の安全性は確保されるが，後続の落石に対し残存耐力は期待できない状態である。ここで，図5.3に重錘衝突後の土堤損傷度一覧を示す。これは縮小模型に対する振り子重錘衝突実験にて，重錘衝突後の非載荷面の変状を目安に定義したものである。

損傷度1は非載荷面が無損傷あるいは軽微な鉛直ひび割れに留まるものである。損傷度2は鉛直ひび割れ，軽微な水平ひび割れの発生が確認されるものである。損傷度3は非載荷面の大きな盛り上がりが確認されるものである。損傷度4は天端が崩壊しているものである。既往研究（近藤ら，2025）の結果，非載荷面に大きな盛り上がりが確認される損傷度3に相当する破壊状態では，土堤内部および非載荷面における硬度の大幅な低減が確認されている。従って，この破壊状態は十分な残存耐力が期待できないことから，これが終局限界状態に位置づけられる。また，損傷度2は残存耐力の観点では補修せずとも，同程度の落石エネルギーに十分抵抗できることが確認されている。ただし，曲げひび割れは非載荷面の平面性が失われる程度のものが相当し，ひび割れ開口部からの雨水などの侵入による影響を防ぐために，衝突部およびひび割れ部分の限定的な補修を行う必要があることから，これが修復限界状態であると言える。そして，法面の平面性を保持しているようなひび割れの発生に留まる損傷度1については補修せずに繰り返し使用が可能であると考えられることから，これが使用限界状態に相当すると考える。

5.5　土堤形状の設定

本節では，土堤の基本形状として，法勾配，天端幅，土堤高さ，土堤延長の決定指針を示す。土堤法勾配は土堤に使用する材料に基づいて決定されるため，土堤断面形状決定時に初めに決定する条件である。法勾配，使用する土堤材料を用いたすべり安定計算等の結果に基づいて決定する。本研究の模型実験においては，落石対策便覧に記載される一般値（1:1.0~1:1.5）を目安としつつ，材料試験結果に基づく盛土安定計算にてすべり安全率1.2を確保可能な勾配として1:1.2を採用した。また，法面の急勾配化および表面補強を実施した試験体については，法勾配を1:0.5とした。これは既設土堤を急勾配化する場合に切土による掘削が必要となるが，本研究で用いた土堤材料GFS（細粒分質砂質礫）は土質区分としてレキ質土に分類され，仮設時の掘削面高さが1.0m～5.0mの場合，床掘勾配を1:0.5とすることが一般的なためである（国土交通省，2025）。

また，補強材としてソイルセメントを用いることを想定した場合，ソイルセメントは貧配合コンクリートのため，露出による早期の劣化が懸念されることから植生等の保護工を施す必要がある。この際，ソイルセメントは強アルカリ性のため，一般的な植生工では繁茂しづらく，岩盤用の植生工である厚層基材吹付工を選定する。この厚層基材吹付工は，法長が5m程度以下の場合は勾配1:0.5まで施工可能とされる。以上より，本研究における法面補強土堤は実務上施工可能な最急の法勾配である1:0.5とした。

天端幅について，実務においては盛り土施工時の最小転圧幅の観点から，1.0m以上確保することを原則とする。なお，本研究の模型実験では非載荷面の変状を発生させやすくし，破壊メカニズムを解明する目的で，0.4m（実規模換算）と短く設定した。

土堤高さについて，落石対策便覧によると落石防護擁壁の高さは以下に基づいて決定される。1)想定する落石の飛び越えが生じないこと。2)落石，崩壊土砂の堆積など必要なポケット部の容量を考慮する必要があること。3)想定される落石衝突高に対し，落石半径以上，かつ少なくとも0.5m程度の余裕高を設ける必要があること。しかし，土堤の場合は衝突後の落石が法面をかけ上がるため，余裕高が擁壁よりも意味をなさないことが推測される。また，法勾配が1:1.2の場合，仮に余裕高を0.5m設けると土堤断面を1.2m拡幅しなければならず，道路-斜面間の設置スペースの制約上，土堤を採用できない可能性が考えられる。以上より，土堤高さの決定に落石防護擁壁等で用いられる考え方を適用することは適切ではないと考える。ここで，凹凸が少ない斜面においては，落石跳躍量が2.0m以下となるケースが約8割を占めることが報告されている（佐々木ら，1981）。これを考慮すると，土堤が落石の第一衝突点となる場合，ポケット部を有することに伴う離隔があるため，土堤への衝突高さは比較的低くなることが推測される。次に，土堤が落石の第二衝突点である場合，ポケット部での衝突による鉛直方向のエネルギー吸収がなされることから，土堤への落

石衝突高さは比較的低くなることが推測される。したがって，土堤高さの初期設定としては，Ritchieが提案した落石防護溝の寸法表を目安とした上で，衝突条件に応じた照査により適宜，形状の修正を行うことが望ましい。

土堤延長については，落石対策便覧に記載されている，落石軌跡の平面的な拡がりを考慮した以下の算定式を用いて決定する。

$$L = 2S\tan 22.5° \fallingdotseq 0.8S \qquad (5.51)$$

ここに，L：道路方向における落石対策工の延長，S：落石発生源と落石対策工の水平距離。

5.6 耐荷性能・対駆け上がり性能を考慮した土堤の重錘捕捉条件と設計フロー（簡易・詳細）

落石防護工の最低限の要求性能として，道路空間の安全性を満足することが挙げられる。これを土堤に置き換えると，2つの性能に大別されると考える。一つは落石衝突に対し土堤が大破せず，落石を受け止める性能つまり「耐荷性能」である。もう一つは土堤が法面を有することから，落石が土堤法面を駆け上がり通過させない性能つまり「対駆け上がり性能」である。そこで5.6(1)では，実規模土堤における耐荷性能について，縮小模型実験をもとに推定した。また，5.6(2)では実規模土堤における対駆け上がり性能について，実規模模型実験をもとに推定した。

図5.4に実験概要図，図5.5に使用した重錘諸元，表5.4に実験ケース一覧を示す。図5.6について，本実験はワイヤロープに吊るされた重錘を振り子運動により載荷させる振り子式重錘衝突実験（以下，振り子衝突実験と示す）と傾斜約50度，比高約30mの斜面上から重錘を転落し載荷させる回転式重錘衝突実験（以下，回転衝突実験と示す）を実施した。試験体寸法について，振り子衝突実験では実規模土堤の1/2，1/4スケールを想定した高さ1.0m，0.5mの縮小模型を対象とし，回転衝突実験では高さ2.0mの実規模模型を対象とした。法勾配は載荷面側では1:1.2と1:0.5の2種類，非載荷面側では1:1.2とした。なお，法勾配1:0.5とした実験ケースについては，法面の長期安定性の観点より水平方向の厚さ0.4mのソイルセメントを打設した。図5.5について，重錘は実際の落石密度を想定し，落石対策便覧を参考に2600kg/m³を目標値として作製した。

また，振り子衝突実験では土堤の耐荷性能を把握するため，土堤高さ0.5mについて7900kg/m³の鋼材で作製した重錘も使用した。重錘径は土堤高さの約半分とした。表について，振り子衝突実験の実験ケース名は，第1項目は土堤高さ(m)，第2項目は振り子運動による載荷方法（SI：単発衝撃載荷，CI：繰返し衝撃載荷），第3項目は重錘質量(kg)，第4項目は重錘落下高さ(m)を表し，繰返し載荷のケースは末尾に載荷回を示す。回転衝突実験の実験ケース名について，第1項目は法勾配およびソイルセメント補強の有無（N：補強無し（法勾配1:1.2），C：補強有り（法勾配1:0.5）），第2項目は重錘落下高さ(m)を

表 5.4　実験ケース一覧

実験ケース名	実験結果	載荷方法	土堤高さ (m)	法勾配	重錘落下高さ (m)
1.0-SI-E234.5-H4.0	捕捉	振り子式衝突実験	1.0	1:1.2	4.0
1.0-CI-E234.5-H6.0-1	捕捉				6.0
1.0-CI-E234.5-H6.0-2	捕捉				6.0
0.5-SI-E87.0-H3.0	捕捉		0.5		3.0
0.5-SI-E29.0-H3.0	捕捉				3.0
N-H30-1	通過	回転衝突実験	2.0		30.0
N-H30-2	通過				30.0
N-H25-1	通過				25.0
N-H25-2	通過				25.0
N-H25-3	捕捉				25.0
N-H24-1	捕捉				24.0
N-H20-1	捕捉				20.0
N-H20-2	通過				20.0
N-H20-3	捕捉				20.0
N-H20-4	捕捉				20.0
N-H15-1	捕捉				15.0
C-H26.5-1	通過			1:0.5	26.5
C-H20-1	捕捉				20.0
C-H15-1	捕捉				15.0

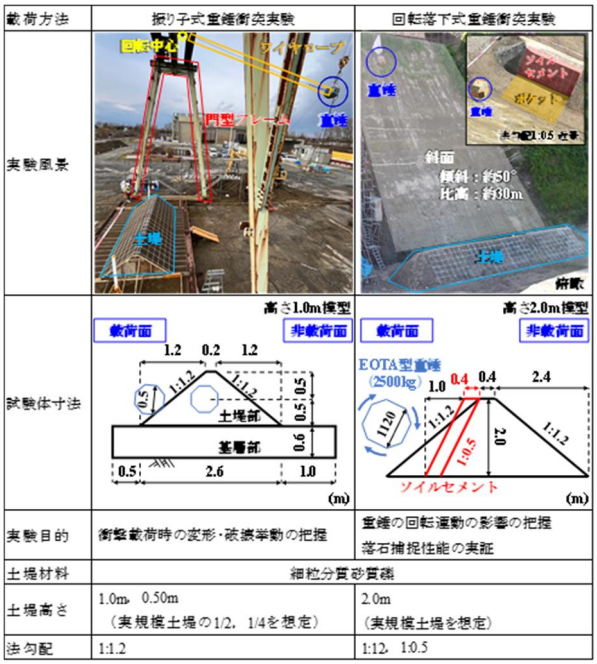


図5.4　実験概要図

載荷方法	振り子衝突実験		回転衝突実験	重錘写真
	土堤高さ 1.0m	土堤高さ 0.5m	土堤高さ 2.0m	
重錘質量 (kg)	234.5	29.0，87.0	2500	
重錘密度 (kg / m³)	2648	2613，7838	2513	
重錘径 D (m)	0.50	0.25	1.12	

図5.5　重錘諸元

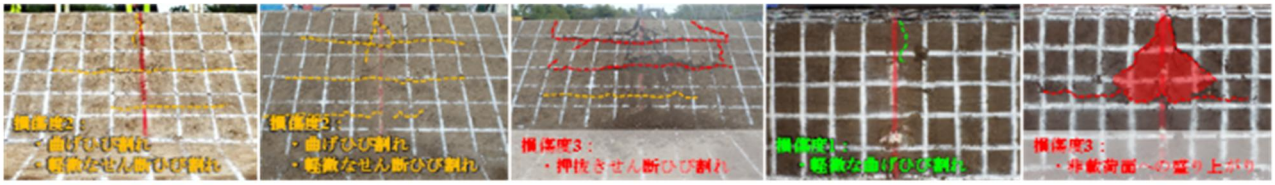


図 5.6　非載荷面の変状

表 5.5　振り子衝突実験における土堤衝突時パラメータ

実験ケース名	衝突高さ/土堤高さ	土堤衝突角（°）	水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	合成速度 (m/s)	線速度エネルギー (kJ)	損傷度
1.0-SI-E234.5-H4.0	0.51	-7.66	8.62	-1.16	8.70	8.87	2
1.0-CI-E234.5-H6.0-1	0.51	-5.80	10.54	-1.07	10.60	13.16	2
1.0-CI-E234.5-H6.0-2	0.51	-5.29	10.81	-1.00	10.86	26.98（累積）	3
0.5-SI-E87.0-H3.0	0.44	-5.54	7.84	-0.76	7.88	0.90	1
0.5-SI-E29.0-H3.0	0.50	-3.39	7.42	-0.44	7.43	2.40	3

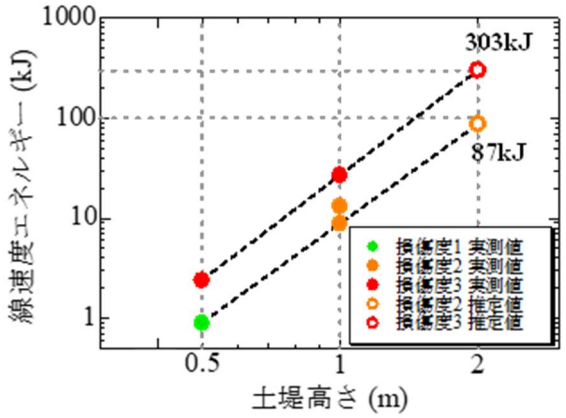


図 5.7　線速度エネルギーと損傷度の関係

表し，実験条件ごとに末尾に通し番号を示す。実験結果について，重錘が土堤に捕捉された場合を「捕捉」，土堤法面を駆け上がり非載荷面の法肩を通過した場合を「通過」とした。なお，本研究の範囲においては，重錘が土堤を貫通した実験ケースは認められなかった。

(1) 損傷度の定義・実規模土堤耐荷性能の推定

表5.5に振り子衝突実験における重錘の土堤衝突条件および重錘衝突に伴う非載荷面の変状から判定した損傷度を示す。ここで、損傷度の定義および各ケースの非載荷面変状を図5.6に示す。損傷度1は0.5-SI-H29.0-H3.0のように、非載荷面が無損傷もしくは軽微な鉛直方向のひび割れの発生に留まるものとした。損傷度2は1.0-SI-E234.5-H4.0や1.0-CI-E234.5-H6.0-1のように、鉛直方向のひび割れ（損傷度1よりひび割れ開口幅が大きく，非載荷面の平面性が保持されないもの）もしくは軽微な水平方向のひび割れが認められたものとした。損傷度3は1.0-CI-E234.5-H6.0-2や0.5-SI-E29.0-H3.0のように、非載荷面側への大きな盛り上がりが認められたものとした。これより、土堤の代表寸法と重錘エネルギーを両対数グラフ上に整理し、その線形関係に基づく回帰直線（べき乗近似）を用いて、実規模土堤における損傷度2および損傷度3に対応する土堤衝突時の重錘エネルギーを推定する。

図5.7に土堤衝突時における重錘の線速度エネルギーと土堤の損傷度の関係を示す。横軸に土堤高さ(m)、縦軸に線速度エネルギー(kJ)を両対数軸で取り、各ケースの損傷度を色分けした。回帰直線より、実規模土堤（高さ2.0m）が損傷度2および損傷度3に到達する線速度エネルギーはそれぞれ87kJ、303kJであることが推定された。なお、土堤高さ0.5mの実験ケースでは損傷度2の結果が得られなかったため、損傷度1である0.5-SI-E29.0-H3.0の線速度エネルギーを用いた。ここで、重錘衝突後の土堤表面変状と土堤残存耐力に関する実験結果（近藤ら，2025）を踏まえると，非載荷面に大きな盛り上がりが確認される損傷度3に相当する破壊状態では，土堤内部および非載荷面における硬度の大幅な低減が確認されている。従って，この破壊状態は十分な残存耐力が期待できないことから，これが終局限界状態に位置づけられる。

また，損傷度2は残存耐力の観点では補修せずとも，同程度の落石エネルギーに十分抵抗できることが確認されている。ただし，曲げひび割れは非載荷面の平面性が失われる程度のものが相当し，ひび割れ開口部からの雨水などの侵入による影響を防ぐため，衝突部およびひび割れ部分の限定的な補修を行う必要があることから，これが修復限界状態であると言える。そして，法面の平面性を保持しているようなひび割れの発生に留まる損傷度1については補修せずに繰り返し使用が可能であると考えられることから，これが使用限界状態に相当すると考える。

以上より，本実験で用いた土堤断面形状においては土堤衝突時の線速度エネルギー300kJが耐荷捕捉限界，100kJが補修の有無を分ける閾値と判断される。

(2) 実規模土堤の対駆け上がり性能の推定

表5.6に回転衝突実験における重錘の土堤衝突時パラメータ一覧を示す。ここで，土堤衝突高さは土堤衝突時における土堤底面から重錘重心までの高さ，土堤衝突角度は水平に対する重錘進行方向（上向きを正）とし，水平速度，鉛直速度，角速度はそれぞれ重錘進行方向，鉛直上向き，重錘の進行方向に対して順回転を正とした。

また，図5.8に重錘の土堤衝突条件と重錘捕捉可否の関係を示す。横軸を水平に対する重錘衝突角度(°)，縦軸に土堤衝突時における線速度エネルギー(kJ)を取り，重錘が土堤を通過した実験ケースを赤，土堤が重錘を捕捉した実験ケースを青で示す。図より，重錘の衝突角度に関わらず線速度エネルギー60kJ程度が境界となり，60kJ以上では重錘が駆け上がり挙動により通過し，60kJ以下では捕捉される傾向が確認された。一方，N-H25-3では線速度エネルギー111.87kJ，衝突角度-12.90°で土堤に衝突したのち，重錘は捕捉された。さらに，二次元個別要素法（図5.9）にて図5.10に示すようにN-H25-1（線速度エネルギー71.56kJ，衝突角度17.75°）を対象に数値解析を実施した。その結果，実験時と同一の衝突条件を与えた場合には，実験結果と同様に駆け上がり挙動により重錘が通過

表 5.6　回転衝突実験における土堤衝突時パラメータ

実験ケース名	土堤衝突高さ (m)	土堤衝突角度 (°)	合成速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	線速度エネルギー (kJ)	回転エネルギー (kJ)	実験結果
N-H30-1	0.59	17.90	12.72	18.61	202.3	65.20	通過
N-H30-2	1.74	4.29	8.86	15.72	98.10	47.40	通過
N-H25-1	1.29	17.75	7.57	11.50	71.56	25.36	通過
N-H25-2	0.95	25.82	7.48	11.69	69.96	26.24	通過
N-H25-3	0.06	-12.90	9.46	11.90	111.87	27.18	捕捉
N-H24-1	0.71	37.10	5.19	9.89	33.61	18.80	捕捉
N-H20-1	0.97	-8.71	3.42	7.16	14.66	9.83	捕捉
N-H20-2	1.3	18.99	7.28	9.75	66.16	18.25	通過
N-H20-3	0.83	38.65	5.15	8.39	33.20	13.51	捕捉
N-H20-4	0.66	-16.43	2.04	6.19	5.21	7.35	捕捉
N-H15-1	0.76	38.63	3.69	5.14	17.02	5.70	捕捉
C-H26.5-1	1.32	20.11	7.44	12.12	69.21	28.18	通過
C-H20-1	1.18	23.18	6.80	10.09	57.76	19.53	捕捉
C-H15-1	1.17	8.57	5.27	9.48	34.70	17.26	捕捉

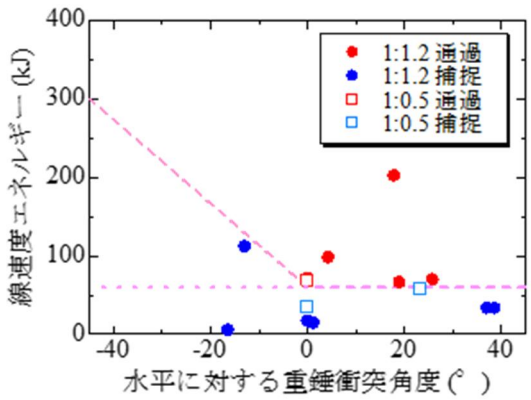


図 5.8　駆け上がりに対する土堤の重錘捕捉限界

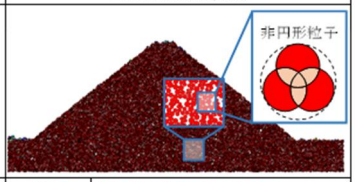
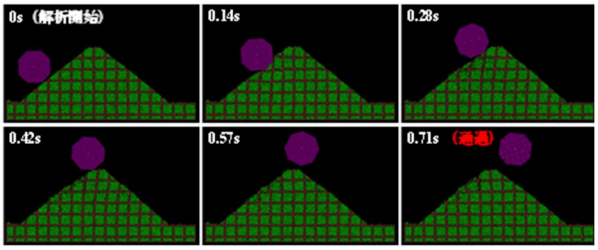
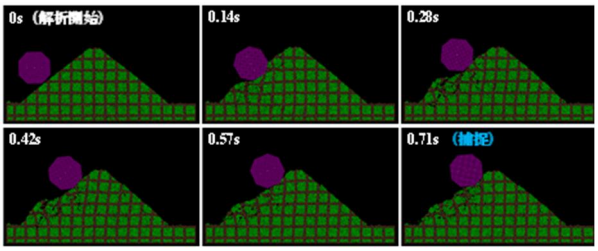
解析方法	二次元個別要素法	
解析概要		
最大粒径 (m)	0.028	重錘径（1.12m）の1/40
最小粒径 (m)	0.014	最大粒径の1/2
法線方向ばね定数 (N/m)	1.0×10^{7}	-
接線方向ばね定数 (N/m)	2.5×10^{6}	法線方向ばね定数の1/4
減衰定数	1.0	-
粒子の密度 (kg/m^3)	2650	-
粒子間摩擦角 (deg.)	25	粒子間摩擦係数0.466
ボンド直径 (m)	0.014	最小粒径と同じ
ボンド強度 (Pa)	2.89×10^{6}	-

図 5.9　土堤の重錘捕捉限界数値解析概要



(a)　N-H25-1 再現解析結果（衝突角度：17.75°）



(b)　N-H25-1 下向き衝突（衝突角度：-17.75°）

図 5.10　二次元個別要素法による数値解析結果

したのに対し，鉛直速度成分を下向きとした衝突条件では，重錘が捕捉される結果となった。

以上より，本試験体および重錘条件では，線速度エネルギー60kJは駆け上がり挙動による重錘捕捉限界の閾値になると考えられるが，重錘が水平下向きに衝突する条件においては，駆け上がり挙動に対して捕捉の余裕が生じる可能性が示唆された。

(3) 設計フローの提案：簡易・詳細

図5.8より，対駆け上がり性能を考慮した土堤の重錘捕捉限界は線速度エネルギー60kJを閾値とし，水平下向きに衝突する条件においては捕捉の余裕が生じる可能性が示された。また，重錘衝突による損傷度の観点では図5.7を参考に，線速度エネルギー約100kJおよび約300kJが閾値であることが推測された。したがって，土堤の重錘捕捉限界および重錘衝突後におけ

表 5.7　土堤の重錘捕捉性能・損傷度の定義

捕捉性能・損傷度	損傷度
A	土堤衝突による重錘の捕捉が可能。 重錘衝突に伴う土堤の損傷も軽微であるため，繰返しの使用が可能。
B	水平下向きの衝突により重錘の捕捉が可能。 重錘衝突に伴う土堤の損傷も軽微であるため，繰返しの使用が可能。
C	水平下向きの衝突により重錘の捕捉が可能。 土質試験により損傷領域を判定し，表面ひび割れを補修。
D	土堤法面の駆け上がり挙動により重錘を捕捉できない可能性がある。 線速度エネルギー100kJ 以上の場合，土質試験により損傷領域を判断し，表面ひび割れを補修。
E	重錘衝突により土堤が大破する可能性がある。 現状復旧・補強・別対策工の検討などを実施。

区分	捕捉可否	補修・維持管理
A	可	不要
B	可（水平下向き衝突）	不要
C	可（水平下向き衝突）	簡便な補修
D	否（かけ上がり捕捉限界）	簡便な補修
E	否（耐荷捕捉限界）	再構築

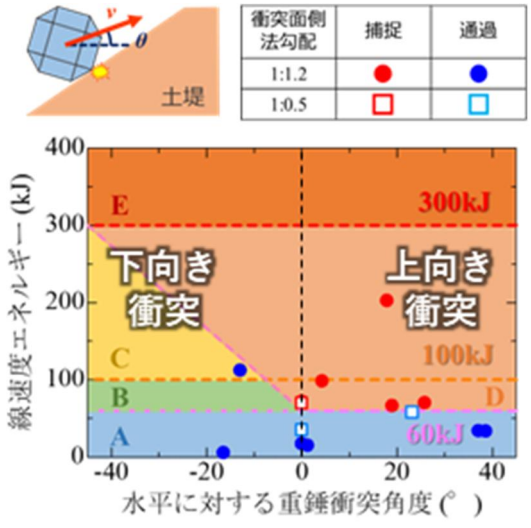


図 5.11　土堤の重錘捕捉条件

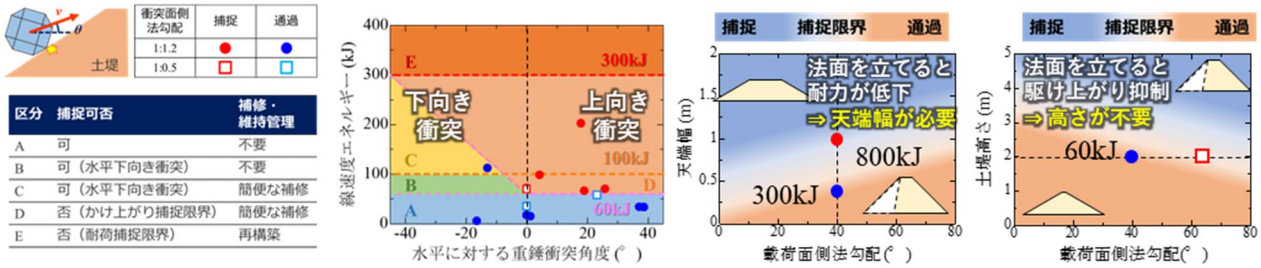
る土堤の補修・維持管理の取り扱いに応じて図5.11のとおり5つの領域に区分され，表5.7に示すように捕捉性能・損傷度A~Eとして定義される。

表5.7より，捕捉性能・損傷度Dで駆け上がり挙動により重錘を捕捉出来ない可能性が考えられる。また，捕捉性能・損傷度C以上になると，一部もしくは基層部を含む土堤の再構築が必要となる場合がある。これは，ある断面形状を有した土堤の落石衝突に対する捕捉可否および補修の必要性を示すといえる。ここで，実際の土堤はそれぞれの断面形状に応じた耐荷・対駆け上がり捕捉限界を有する。例えば，同じ法勾配を有していても天端幅が大きくなれば耐荷性能は大きくなり，同じ土堤高さであれば法面が急勾配化されている方が，対駆け上がり性能が大きくなると考えられる。そこで数値解析を活用し，任意の土堤形状に対する捕捉限界チャートを作成し，設計時の落石エネルギーが断面形状から概算される耐荷・対駆け上がり捕捉限界を下回ることを確認することで，土堤の性能について「簡易照査」が可能となると考える。

図5.12に簡易照査に用いる土堤断面形状に対する落石捕捉限界チャートのイメージ図を示す。耐荷捕捉限界について，天端幅4.0m，載荷面側の法勾配1:1.2の土堤は300kJが耐荷捕捉限界であることが推定された。また，図5.13に三次元個別要素法にて天端幅1.0mにおける耐荷捕捉限界を推定した結果を示す。なお，重錘は土堤高さの1/2位置に水平衝突することとし，解析パラメータは表5.8に示すとおりである。

図から，天端幅が1.0mのとき，900kJにて押抜き土塊の非載荷面側への崩壊が確認されたことから，900kJは終局限界状態を満足していない。したがって，図5.12に示すように天端幅1.0m，法勾配1:1.2の土堤は800kJにて耐荷捕捉限界に到達すると判断した。対駆け上がり捕捉限界は，高さ2.0m，法勾配1:1.2および1:0.5の断面形状を有する土堤は60kJであることが推定された。ただし，3.2.3にて実規模土堤における法面急勾配化に伴う対駆け上がり性能の向上が確認されたことから，今後，実験や解析により追加検討を実施することが望ましい。また，簡易照査によって設計時の落石エネルギーに対して十分な性能を有することが確認された後は，設計時の落石エネルギーを用いた模型実験もしくは数値解析による「詳細照査」を実施し，実際に土堤が大破あるいは駆け上がり通過しないことを確認することが想定される。

以上を踏まえた土堤の性能照査型設計フローを図5.14に示す。なお，簡易照査および詳細照査に当たっては，5.3にて示したように土堤が落石の第一衝突点である場合の落石エネルギーE_{d1}と土堤が落石の第二衝突点である場合の



土堤の重錘捕捉条件　　土堤の捕捉限界

図 5.12　落石捕捉限界チャート（「土堤の重錘捕捉条件」（左）を再掲）

表 5.8　三次元個別要素法の解析パラメータ一覧

項目	単位	設定値
最大粒子直径	m	0.05
最小粒子直径	m	0.025
平均粒子直径	m	0.0375
粒子密度	kg/m^3	3650
重錘密度	kg/m^3	2614.4
ヤング率（粒子）	N/m^2	3.0e8
ヤング率（重錘）	N/m^2	3.0e8
ポアソン比	-	0.3
摩擦係数（粒子間）	-	0.466
摩擦係数（粒子-重錘間）	-	0.466
Tangential Stiffness Ratio（粒子間）	-	0.25
Tangential Stiffness Ratio（粒子-重錘間）	-	0.25
反発係数（粒子間）	-	0.1
反発係数（粒子-重錘間）	-	0.1
回転抵抗係数（粒子）	-	0.065
回転抵抗係数（重錘）	-	0
堆積時の摩擦係数（粒子間）	-	3.0
堆積時の回転抵抗係数	-	0.8

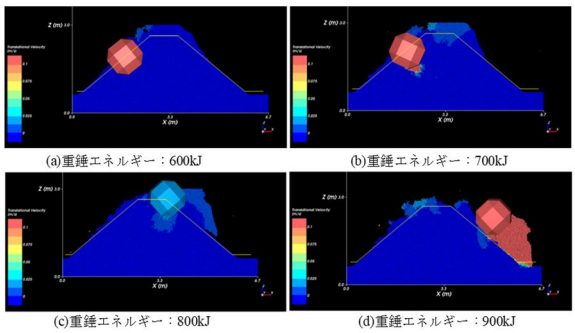


図 5.13　三次元個別要素法による天端幅 1.0m 実規模土堤の耐荷捕捉限界の検討結果例

落石エネルギーE_{d2}それぞれについて照査を実施することとする。

5.7　まとめ

本章で得られた主な成果は以下のとおりである。

(1) 落石防護工の特徴について，土堤はポケット部の定期的な点検が必要となる一方，被災時の早期復旧が容易であることから，被災時の復旧性を考慮した指標の設定が望まれる。また，経済性について，土のみで構成された土堤は初期建設費に加えライフサイクルコストの観点において圧倒的な優位性を有する。ただし，落石対策便覧では補強土を用いた補強土壁も土堤として分類されているため，項目の細分化による土堤の経済性の適切な評価が望まれる。

(2) 落石作用の設定について，土堤が落石の第一衝突点となる場合と第二衝突点となる場合がある。第一衝突点となる場合はポケットでのエネルギー吸収がなされないことから，特に耐荷性能照査を実施する必要がある。第二衝突点となる場合は耐荷性能および対駆け上がり性能の両方を照査する必要がある。なお，ポケット部におけるエネルギー吸収特性については今後の研究が待たれる。

(3) 土堤の要求性能について，落石衝突後の非載荷面の変状度合いに応じて4段階に区別した。ここで，押抜き状の大きな盛り上がりが確認される損傷度3は土質試験の結果，内部・表面について大幅な硬度の低減が確認されたことから，これを終局限界状態と定義した。

(4) 実規模・縮小模型実験の結果，本実験にて用いた断面形状を有する土堤は60kJが対駆け上がり捕捉限界，300kJが耐荷捕捉限界であることが分かった。設計対象の土堤それぞれが異なる耐荷・対駆け上がり捕捉限界を有することから，土堤断面形状と各捕捉限界の関係を示した捕捉限界チャートの作成による簡易照査への活用が期待される。

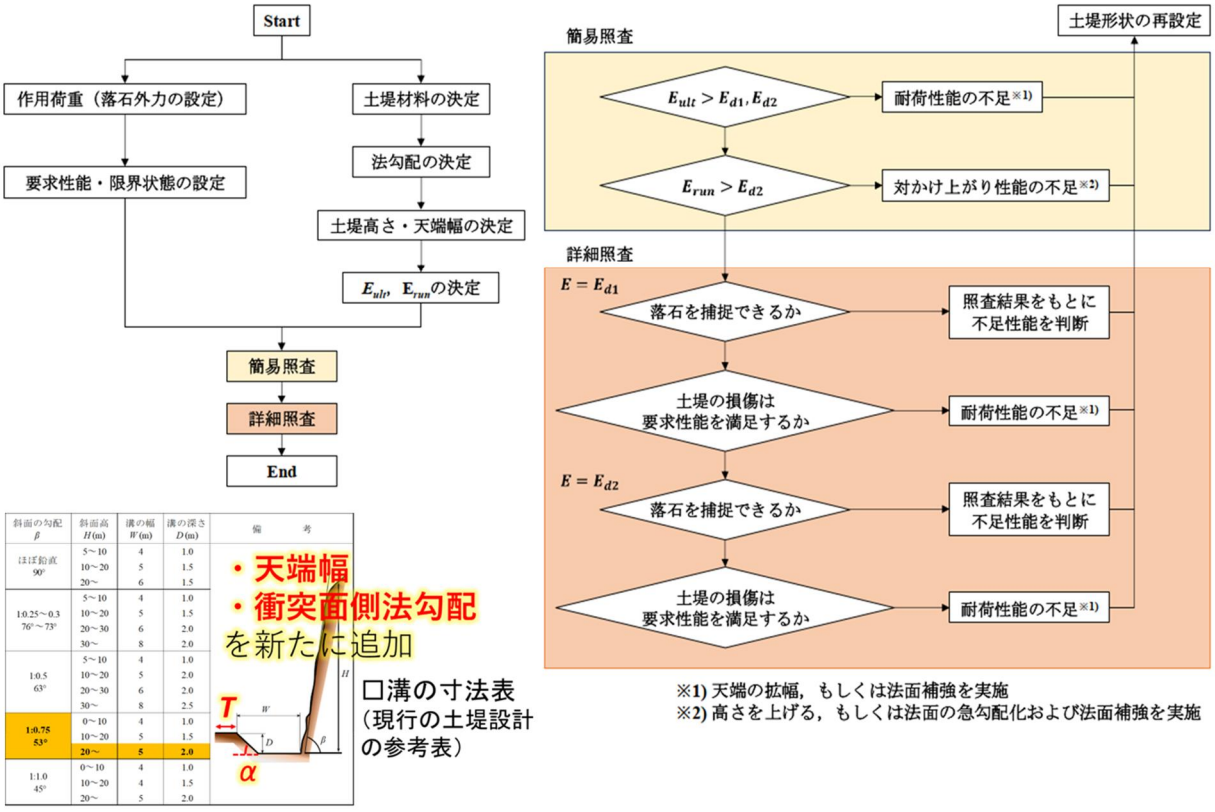


図 5.14　土堤の性能照査型設計フロー

参考文献

1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，pp.243-246，2017.
2) Ritchie, A. M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No. 17, pp. 13-28, 1963.
3) 杉山直優, 前田健一, 鈴木健太郎, 今野久志, 峯祐貴, 磯合凌弥：落石捕捉性能把握に向けた実規模落石防護土堤の落体衝突実験，構造工学論文集，Vol. 67A, pp. 864-877, 2021.
4) 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, pp. 1082-1094, 2023.
5) 土木学会：防災・安全対策技術者のための衝撃作用を受ける土木構造物の性能設計―基準体系の指針―，構造工学シリーズ22，pp. 20，2013.
6) 国土交通省：令和7年度土木工事数量算出要領・第2章 土工，pp. 1-2-13, 2025.
7) 佐々木康他：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路会議特定課題論文集，pp. 113-115，1981.

第６章　落石捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案

6.1　概要

5章では，土堤施工時に土堤を長期的に活用することによるライフサイクルコストの低減ついて耐荷・対駆け上がり性能を考慮した性能設計フローを提案した。一方，土堤の長期的に活用によるライフサイクルコストの低減には，土堤が被災した際における損傷度や補修の方針に関する評価手法が必要である。そこで，本節では土堤被災時におけるトリアージを軸とした点検・復旧マニュアルを提案する。また，実土堤における点検・管理の調査事例を示す。

6.2　土堤の特徴維持管理を含めた復旧時の技術選定方法の提案

図6.1に土堤の点検・復旧マニュアルを示す。図は土堤への落石衝突が認められた場合における点検・復旧マニュアルであり，落石衝突に伴う土堤の損傷度を判定したのち，損傷度毎に復旧の方針を示したものである。そのため，土堤の落石による被災が認められない場合については，落石対策便覧を参考に通常点検を実施することとする。まず，落石の土堤への衝突が認められ，これを捕捉出来ていない場合については，道路へ落石が到達する可能性が考えられることから，落石防護工としての機能が不十分であると言え，補強・別対策工の検討を含めた対応が必要である。また，落石を捕捉していても，天端が崩壊している場合については，損傷度4に分類され，これは次回の落石衝突に対する残存耐力が期待できないことから，同様に補強や別対策工の検討を含めた対応が必要である。なお，損傷度4における天端の崩壊領域は天端幅と同等の土堤延長方向範囲が崩壊するような破壊性状とする。次に，非載荷面にて平面性が失われたような破壊性状が確認された場合は，原位置調査（土壌硬度試験，簡易貫入試験）を実施する。この結果，損傷部周辺の硬度の低下が確認されたものは損傷度3に分類される。損傷度3は単発の落石に対する終局限界状態となるが，道路空間の安全性は保たれているものとされるため，現状復旧や補強，別対策工を含めた対応を実施することとする。一方，原位置試験によって硬度の低下が確認されなかった場合は損傷度2に分類される。また，非載荷面の盛り上がりは確認されなかったものの，水平方向のひび割れが確認されたものも損傷度2に分類される。損傷度2は残存耐力の観点では補修不要であるが，表面ひび割れから降雨等の浸食を防ぐ必要がある。したがって，原位置試験結果（土壌硬度試験）に基づき損傷領域を特定し，衝突痕ならびに表面ひび割れを補修するという簡単な補修工程となる。最後に，水平方向のひび割れも確認されなかった損傷度1については，衝突痕の埋め戻しの対応のみで十分であると判断される。

点検・復旧マニュアルにおいて，落石の土堤通過や損傷度4，損傷度3が確認された場合は，図6.2に示す技術選定マニュアルを参照とすることとする。これは，落石対策便覧（公益社団法人日本道路協会，2017）p102に記載されている落石対策工の選定フローチャートを参考に加筆したものである。落石衝突に伴う土堤の損傷が小さかったものの，落石が通過してしまった場合は，対駆け上がり性能が不足していたと判断される。したがって，法面の急勾配化およびソイルセメント等の補強材を用いた補強による対応が考えられる。なお，既設土堤の法面

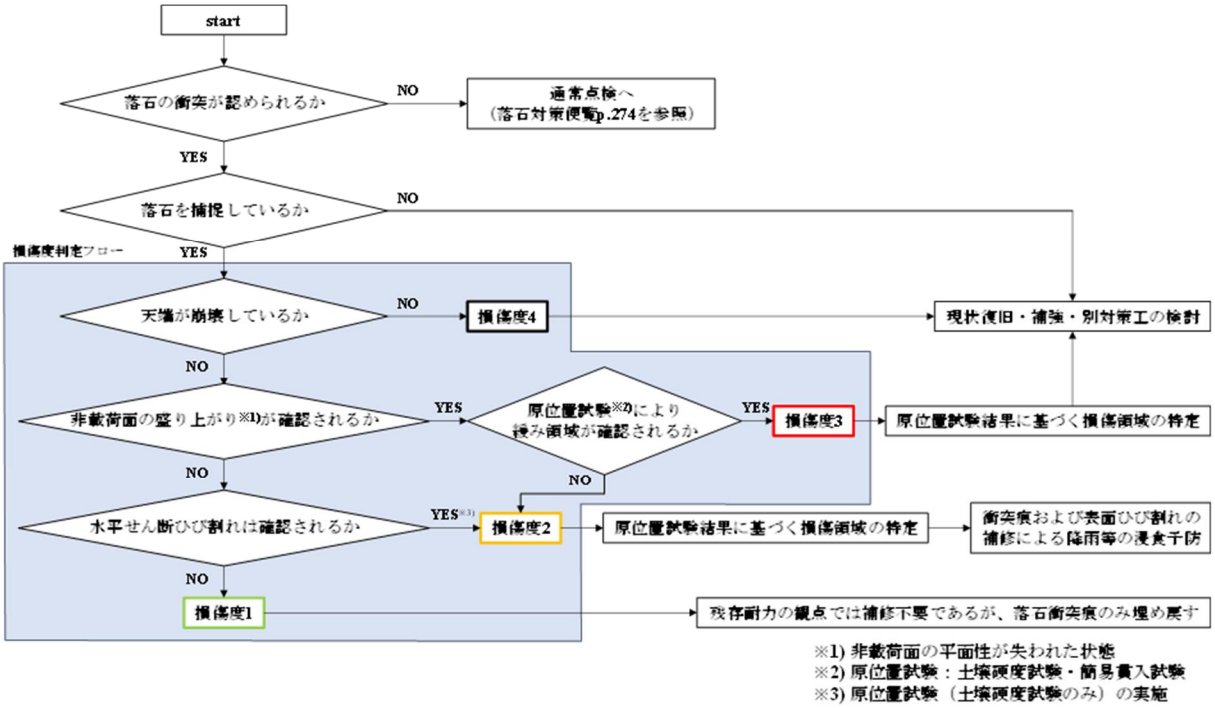


図 6.1　土堤の点検・復旧マニュアル

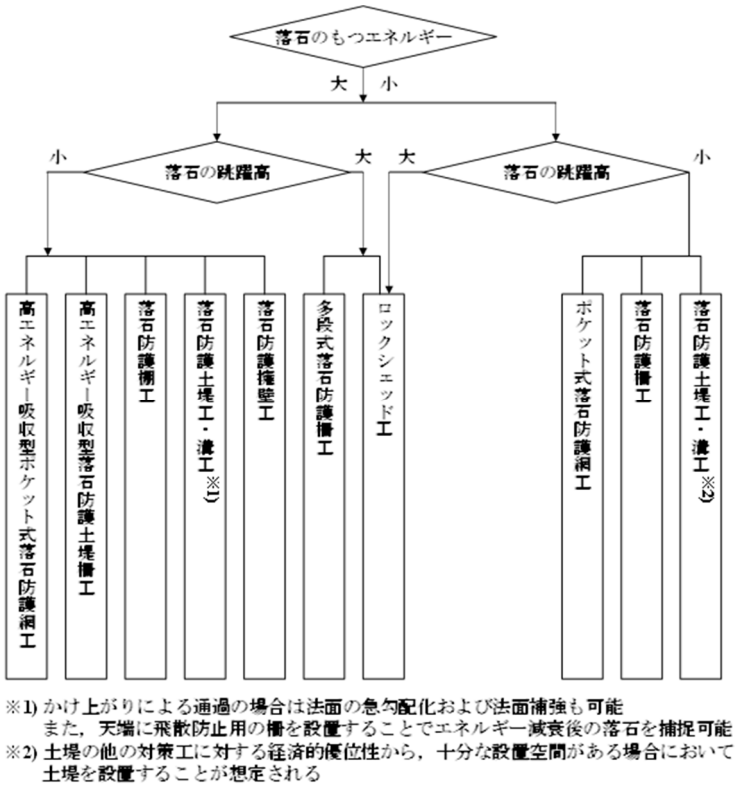


図 6.2　落石対策工の技術選定マニュアル（※1 は土堤の新規分，※2 は土堤の従来からの分）

急勾配化および法面補強は，切土により掘削をしたのちソイルセメントを打設することによって，比較的容易に施工することが可能である。また，対駆け上がり性能の補強については，土堤の天端に飛散防止用の柵を設置することで，落石エネルギーの大半をポケット部および土堤部で吸収したのち，残存したエネルギーによる落石の通過を防ぐことが出来ると考える。

さらに，土堤以外の落石対策工の被災時における技術選定の観点では，斜面-道路間に十分なスペースが確保される場合について，想定される落石のエネルギーが大きい場合に限らず土堤を候補とすることで，経済的な復旧が可能と考えられる。

6.3　実土堤における点検・管理の調査事例

道路の落石対策を計画する場合には，落石防護施設や落石被害の実態に関する調査も重要である。本節では既存の落石防護土堤の耐荷・耐久性能の分析および比較に向けて，現存する土堤の設置状況・性能把握を目的とした北海道函館近辺における実土堤調査および落石による被害の実態調査を実施した。調査結果を示すとともに，土堤の調査法について検討を行った。

(1) 調査対象地点

図6.3に調査を実施した地点の地図を示す。調査対象とした地点は北海道函館近辺に現存する土堤6か所である。水平速度，鉛直速度，角速度はそれぞれ重錘進行方向，鉛直上向き，重錘

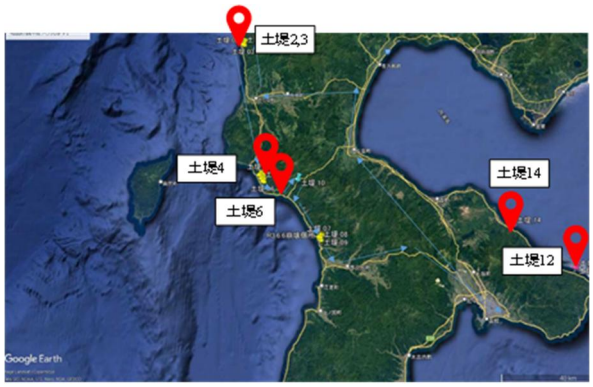


図 6.3　調査地点

の進行方向に対して順回転を正とした。

(2) 調査方法

①　土堤の設置状況および土堤寸法，土壌硬度の計測

土堤の外観の写真撮影および土堤寸法の計測，土壌硬度試験（以下，硬度試験）を実施した。図6.4に土堤寸法計測の様子を示す。土堤寸

図 6.4　土堤寸法計測の様子

(a)硬度計の外観

硬度指数目盛	0～40mm
1目盛	1mm
支持力目盛	0～∞kg/cm²
バネ強度	8kg（対40mm）
コーン寸法	φ18mm×40mm
寸法・重量	φ50×L230mm　650g

(b)硬度計諸元

図 6.5　土壌硬度計（山中式平面型）

法については土堤高さ，天端幅，法面勾配を可能な範囲で測定した。土壌硬度試験は貫入式土壌硬度計を用いて，自然斜面，切土のり面およびトンネル切羽等の露出させた地盤の表面等の土壌硬度を測定する試験である。図6.5に用いた土壌硬度計（以下，硬度計）を示す。硬度は硬度計内部のバネの縮み（mm）と支持強度（kg/cm²）で表す。支持強度はコーンの指示面（1mm）まで圧入するのに対する抵抗値（支持強度）を示し，式（6.1）より算出する。

$$P = \frac{100X}{0.7952\ (40 - X)^{2}} \qquad (6.1)$$

ここに，P：支持強度（kg/cm²），x：ばねの縮長（m）。

②　砲丸試験

土堤法面およびポケット部の反発係数を調査するため，砲丸の衝突試験を実施した。図6.6に使用した砲丸を，表6.1に砲丸諸元を示す。砲丸は直径125.5mm，重量7.260kgの鋳鉄で構成されている。図6.7に試験の実施状況を示す。土堤法面に対する試験は土堤法尻付近に立ち，胸元の高さから砲丸を投げ当てた。ポケット部に対する試験は高さ1.0mから砲丸を鉛直落下させて実施した。試験の様子をビデオカメラ（120fps）で撮影し，衝突痕形状を測定した。また，最大貫入量は図6.8に示す様に，写真から衝突痕幅（$2\times r_2$）を計測し，式（6.2）の通り算出した。

$$h = h_1 - \sqrt{r_1^2 - r_2^2} \qquad (6.2)$$

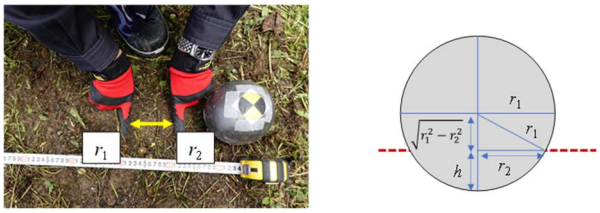
ここに，h：最大貫入量（m），r_1，r_2：衝突痕幅

図 6.6　試験に使用した砲丸

表 6.1　砲丸諸元

項目	単位	値
直径	mm	125.5
品番	-	F251
重量	Kg	7.26
材質	-	鋳鉄

(a)土堤法面,　　(b)ポケット部
図 6.7　砲丸試験の実施状況



(a)衝突痕幅の計測　(b)衝突痕幅からの最大貫入量算出
図 6.8　最大貫入量の算出方法

の端部（m）。

③　試料の採取

土堤本体およびポケット部（現地場）から試料を300~500g程度採取後，土砂粒度試験を実施した。

④　簡易動的コーン貫入試験

簡易動的コーン貫入試験（以下，簡易貫入試験）は土および軟岩への動的貫入抵抗を測定する試験である。図6.9に試験機を，図6.10に試験実施の様子を示す。試験はコーンを測定地に打ち込み，その貫入深さを測定することで貫入抵抗を得る。深さ方向に関して連続的な記録を得ることができ，ハンマーの打撃回数N_dを動的貫入抵抗として，地盤の硬軟および締まり具合の判定に適用することができる。

図 6.9　簡易貫入試験機

図 6.10　簡易試験実施の様子

(3) 調査結果

①　土堤の設置状況および土堤寸法，土壌硬度の計測結果

土堤の外観の写真撮影および土堤寸法の計測，土壌硬度試験（以下，硬度試験）を実施し，図6.11～6.16に調査した土堤の外観を示す。また，図6.17に土堤寸法の定義を，表6.2に土堤寸法と土壌硬度の結果一覧を示す。なお，土堤6は写真撮影のみを実施した。調査した土堤は高さ1.4～3.2m，法面勾配は測定値で34.5～42.0°，土壌硬度は274.4～303.1kPaであった。

土堤12はソイルセメントで構築されており，落石および衝突痕が確認された。土堤14は土堤に落石衝突痕，その近辺に最大径1.25mの落石が見られた。土堤2は幅4.2m，高さ3.2mであり，調査した土堤の中で最も大型であった。土堤3は急崖に構築されたものである。土堤4は調査した土堤の中で唯一ポケットに緩衝砂が設置されており，落石も確認された。

②　砲丸試験結果

図6.18に砲丸試験による最大貫入量の結果を示す。試験は各地点で3~5回実施し，図にはその平均値を示す。ただし，土堤12の全ての計測地点および土堤14の法面の最大貫入量は，衝突痕写真を撮影しておらず砲丸の衝突画像から貫入量を算出しているため，精度が低い可能性が考えられる。図より，砲丸の衝突画像から最大貫入量を算出したデータを除くと，最大貫入量は2.0cm程度で土堤ごとの差は見られない。また，試験位置での最大貫入量の差は小さいものの，土堤天端での貫入量は法面やポケットよりも小さい傾向が見られる。

(a)土堤,

(b) 落石衝突痕と落石

図 6.11　実際の土堤 12（ソイルセメントで構築）

(a)土堤,

(b) 落石衝突痕と落石

図 6.12　実際の土堤 14

(a)土堤,

(b) ドローンからの撮影写真

図 6.13　実際の土堤 2

(a)近景,

(b) ドローンからの撮影写真

図 6.14　実際の土堤 3

(a)近景,

(b) 落石履歴

図 6.15　実際の土堤 4

(a)近景,

(b) ドローンからの撮影写真

図 6.16　実際の土堤 6

図6.19に最大跳躍高さの結果を示す。図より，天端への砲丸試験による最大跳躍高さは法面とポケットと比較して土堤ごとの差が小さいことが分かる。一方，ポケットへの砲丸試験による最大跳躍高さには土堤ごとに差が見られ，最大8.03cm（土堤12），最小0.70cm（土堤4）であり，約11倍の差が見られた。土堤4は緩衝砂が設置されているため，ポケットにおける砲丸試験での最大跳躍高さが最も小さい結果となったと考えられる。この様に，跳躍高さの結果の差異はポケットの土砂材料の違いや締固め具合の違いなどが要因として挙げられる。したがって，実土堤においてもポケットに緩衝砂を用いることで落石による跳躍が抑制され，捕捉性能が向上することが示唆される。

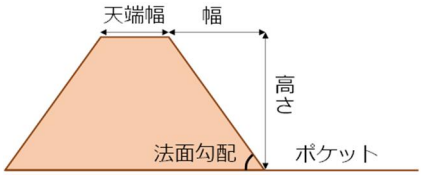


図 6.17　実土堤寸法の定義

表 6.2　実土堤寸法の調査結果

土堤 No.	土堤幅 (m)	土堤高さ (m)	天端幅 (m)	法面勾配 (°)	硬度計 (kPa)	備考
12	2.6	2.0	0.5	35.0	287.5	・土堤はソイルセメントで構築 ・土堤への落石衝突痕および落石あり
14	2.0	1.5	1.0	36.0	274.4	土堤への落石衝突痕および落石あり
2	4.2	3.2	4.0	34.7	312.0	超大型土堤
3（道路側）	1.2	1.4	1.0	42.0	-	急激に構築された土堤
3（斜面側）	2.7	1.8	1.0	34.9	301.2	
4	3.6	2.5	1.0	34.5	303.1	ポケットに敷砂緩衝材あり
6						写真撮影のみ

図6.20に反発係数の結果を示す。最大跳躍高さと同様に，各計測地点における最大値を橙色で，最小値を青色で塗りつぶしている。なお，反発係数eは式（6.3）より算出した。

$$e = -\frac{v_{max}}{v_0} \tag{6.3}$$

ここに，e：反発係数，v_{max}：最大鉛直速度（m/s）
v_0：衝突直前鉛直速度（m/s）。

図より，反発係数の分布は0.1～0.2が大半を占めている。最大跳躍高さと同様に，ポケットにおける反発係数は計測地点ごとの差が大きく，最大0.254（土堤12），最小0.068（土堤4）であり，約4倍の差が見られた。

以上より，砲丸試験により土堤部やポケット部の反発係数が簡便に計測できる可能性が示唆された。今後，土堤の耐荷・耐久性能の分析比較を実施する上では調査データの蓄積および調査方法の確立化が必要である。さらに，土堤の損傷度が評価可能な実験結果との比較も実施していく予定である。

③　粒度試験結果

図6.21に採取した試料の粒度分布を示す。図より，全ての土堤において試料の大部分は粒径

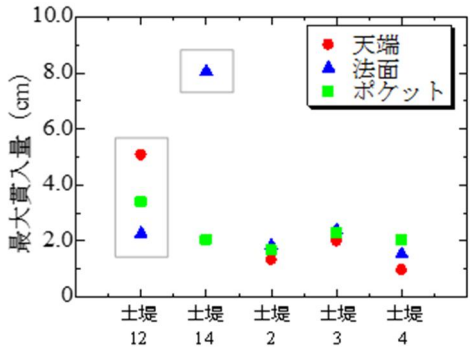


図 6.18　実土堤における最大貫入量（※灰色塗りつぶしは砲丸の衝突画像から貫入量を算出した結果を示す）

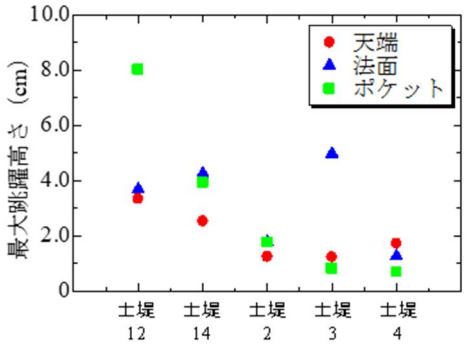


図 6.19　実土堤における最大跳躍高さ

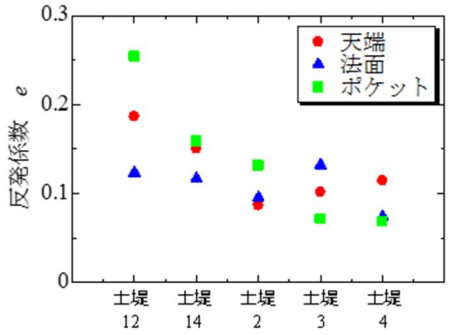
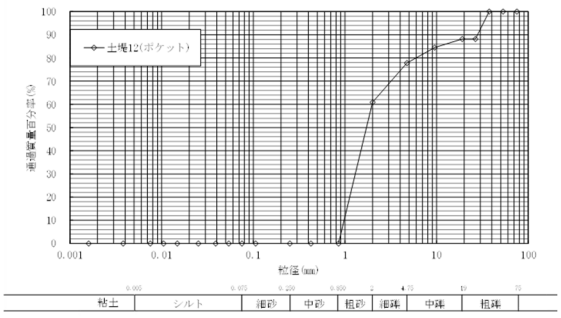


図 6.20　実土堤における反発係数

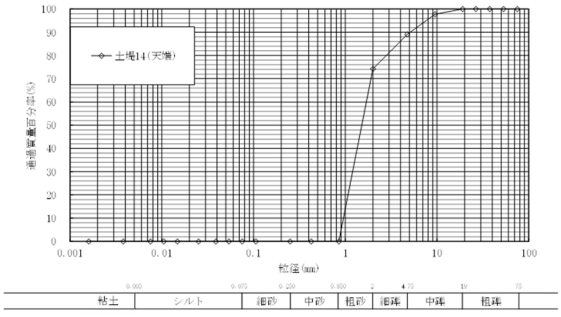
2.0mm以上の礫で構成されていることが分かる。図（c）～（e）より，土堤2，3，4は土堤部よりもポケットの方が粒径が小さい傾向にある。図（c），（e）を比較すると，土堤2のポケットは緩衝砂である土堤4のポケットの粒度分布と類似している。しかし，ポケットの反発係数では2倍程度の差があることから，緩衝砂として設置する場合には粒度だけでなく，締固め具合等が緩衝砂としての性能に影響を及ぼすことが考えられる。

④　簡易貫入試験結果

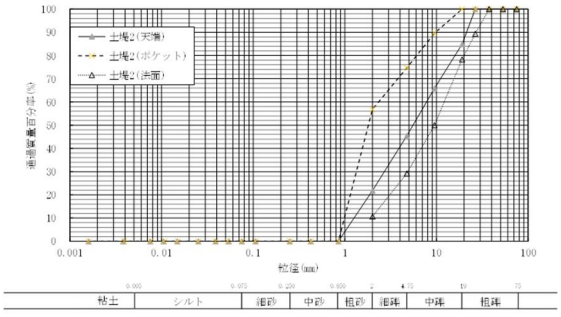
図6.22に簡易貫入試験結果を示す。横軸にN_d値，縦軸に貫入深さ（m）を取り，深さ0.1m毎



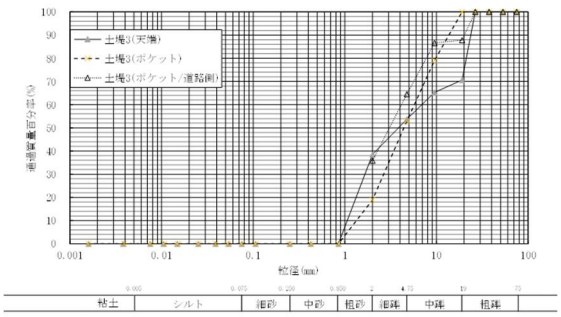
（a）土堤 12



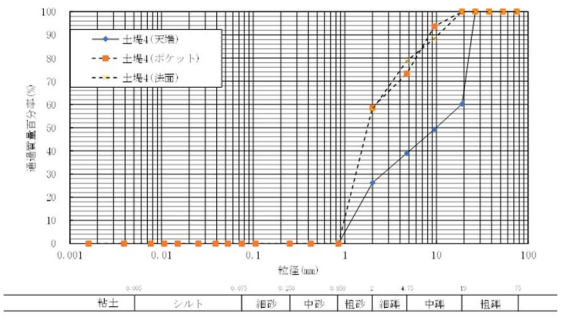
（b）土堤 14



（c）土堤 2



（d）土堤 3



（e）土堤 4

図 6.21　実土堤の粒度分布

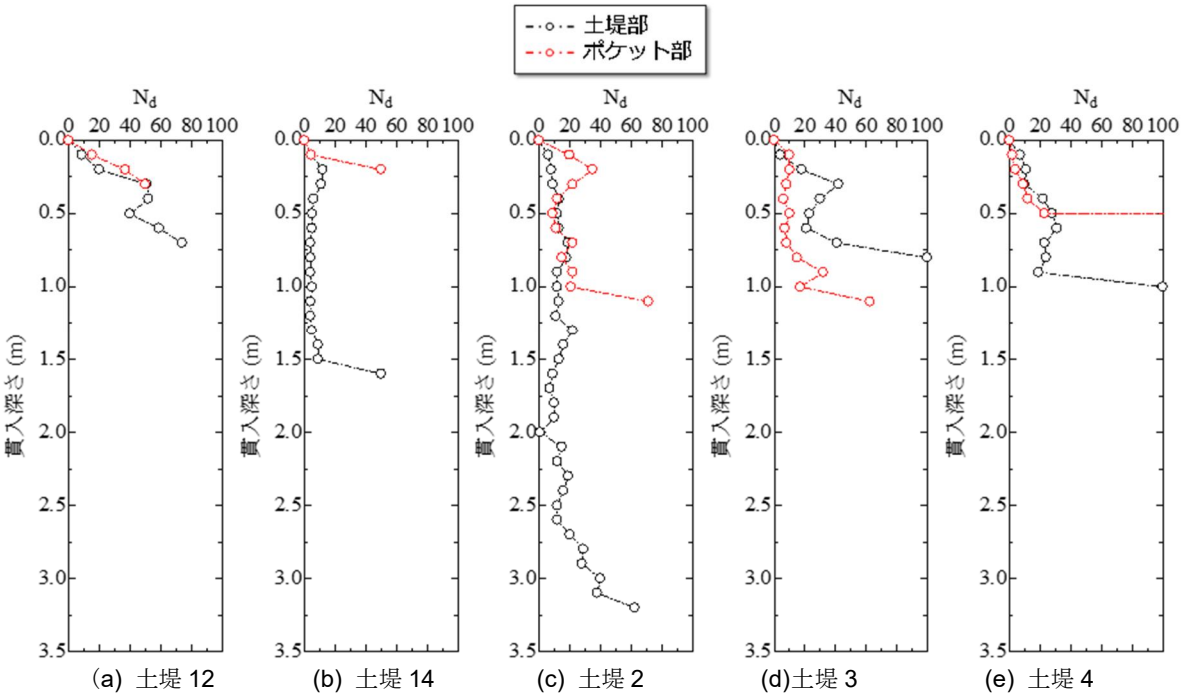


図 6.22　実土堤の簡易貫入試験結果

のN_d値を中抜きの黒丸でプロットし，破線で結んだ。なお，本試験は各土堤の天端とポケット部で実施したが，土堤3のポケット部と土堤4の天端およびポケット部は，一回目の試験時に土堤内部の礫等に衝突してしまい，貫入が妨げられたため，再度試験を実施した。図より，土堤12は他の土堤と比べてN_d値が大きいことが分かる。これは土堤12がソイルセメントで構築されており，他の土堤よりも貫入抵抗が大きいことが要因として考えられる。

また，土堤12以外の土堤は天端，ポケットともにN_d値が概ね一定程度の値で推移しており，貫入抵抗は深度により大きく変化しないことが分かった。なお，土堤4のポケット部は緩衝砂が敷かれているが，他の土堤のポケット部と比較してN_d値に大きな差は見受けられなかった。そのため，簡易貫入試験では外力が大きいためにポケット部の性能を評価するには課題があると言える。ハンマーの自由落下高さを低くする等のより細かく変化が読み取れる条件で試験を実施するなどの工夫が必要であると考えられる。

6.4　まとめ

本章で得られた主な成果は以下のとおりである。

1) 土堤被災時における点検・復旧マニュアルについて，損傷度2もしくは損傷度1と判定された場合は，土堤が十分な残存耐力を有していることが推測されることから，残存耐力の観点では補修は不要である。ただし，土堤表面のひび割れからの降雨等の浸入を防ぐ観点で表面のひび割れの簡単な補修や落石衝突痕の埋め戻しを実施することとする。
2) 土堤被災時における点検・復旧マニュアルについて，損傷度3と判定された場合は土堤が終局限界状態であることから，現状復旧あるいは補強，別対策工の検討などを実施する流れとなる。また，損傷度4や土堤が落石を捕捉できなかった場合については，土堤の性能が不足していると判断されるため，補強や別対策工の検討を実施する必要がある。
3) 落石対策工の技術選定マニュアルについて，土堤は他の対策工と比較して圧倒的な経済的優位性を有することから，設置条件を満足する場合は落石エネルギーが大きい場合に限定せず土堤を活用することでライフサイクルコストを大幅に低減できることが期待される。
4) 落石対策工の技術選定マニュアルについて，土堤の対駆け上がり性能を向上させる手段として，土堤法面の補強や天端部分での落石飛散防止用の柵の設置などが挙げられる。
5) 現存する落石防護土堤においても最大径1.0mの落石を捕捉した結果を確認した。
6) 落石防護土堤の耐荷・耐久性能の分析手法

として，砲丸試験による簡単な土堤部およびポケット部の反発係数の計測を実施した。計測結果として，0.1前後の反発係数を得ており，簡便な試験により土堤の性能を評価できる可能性が示された。また，土壌硬度計および簡易貫入試験によって，土堤の力学特性を簡単に把握することも可能であると考えられる。

7) ポケット部に敷砂緩衝材を設置した土堤は敷砂緩衝材を設置していない土堤と比較して小さな反発係数が得られており，実土堤においてもポケットに緩衝砂を用いることで落石による跳躍が抑制され，捕捉性能が向上することが示唆される。

参考文献

8) 公益社団法人日本道路協会:落石対策便覧, pp.102，2017.

第７章　採択・中間評価時の課題に対する対応案とりまとめ

7.1　維持管理も含めた土堤の点検･復旧時の技術選定方法マニュアルの作成におけるポイントおよび今後の課題と課題解決に向けて

土堤の性能照査型設計フローにおけるポイントおよび今後の課題は以下に示すとおりである。

1) 落石対策工に最低限要求される性能である道路空間の安全性確保の観点から，土堤の要求性能を耐荷性能と対駆け上がりに大別した点である。特に，耐荷性能は他の落石防護工においても考慮されるのに対し，法面を有することを特徴とする土堤固有の性能として，対駆け上がり性能を明示した点は重要である。
2) 落石作用の設定について，土堤が落石の第一衝突点である場合と第二衝突点である場合の双方について照査を行う必要性を明示した点である。これにより，多様な落石の衝突形態を考慮した土堤の落石捕捉性能の評価が可能となる。なお，土堤が落石の第二衝突点である場合には，ポケット部が第一衝突点となり，ここで衝突エネルギーの鉛直成分が大きく吸収されることが推測される。しかし，落石衝突時におけるポケット部の干渉性能については体系的な整理がなされておらず，今後の検討課題である。
3) 照査のステップにおいて，捕捉限界チャートに基づき耐荷性能と対駆け上がり性能に対する性能を簡易的に確認する「簡易照査」と，設計落石エネルギーを対象として数値解析や模型実験により性能を検証する「詳細照査」からなる二段階の照査手順を提案した点である。特に，簡易照査を第一段階に位置付けることで，詳細照査を繰り返し実施する手間を省ける可能性がある。ただし，捕捉限界チャートを幅広い土堤断面形状で活用するためには，実規模土堤における数値解析および模型実験の結果を蓄積し，データの充実を図る必要がある。

土堤被災後の点検・復旧マニュアルにおけるポイントおよび今後の課題は以下に示すとおりである。

1) 落石被災後における非載荷面の損傷度に応じて，土堤の残存耐力の程度を判定した点である。また，判定された損傷度によっては十分な残存耐力を有すると判断されるため，簡便な補修による早期復旧が可能である。
2) 土堤の損傷度は土壌硬度試験および簡易貫入試験といった非常に簡便な土質試験によって分類することができる点である。これにより，落石被災後の土堤の補修方針を迅速に決定することが可能となる。ただし，土堤の表面変状･内部変状と土壌硬度試験･簡易貫入試験による計測結果を更に蓄積するため，実規模土堤を用いた模型実験による追加検討を実施することが望ましい。特に，本研究にて用いた模型は非載荷面に変状が発生しやすい条件として実規模土堤の天端幅を0.4mとした。このため，供用時の天端幅1.0mを有した土堤による性能検証実験および土質試験による土堤の表面・内部の損傷度の計測が必要であると考える。

7.2 適用対象現場の把握，技術基準類への反映へのポイントおよび今後の課題と課題解決に向けて

土堤の適用対象現場の把握および技術基準類への反映へ向けたポイントと今後の課題として，新補強技術と数値解析手法，性能設計フローを活用するにあたっての要点を以下に整理する。

新補強技術の活用に向けたポイントは以下のとおりである。

1) 土堤法面の急勾配化により，道路横断方向における土堤の設置スペースの大幅な削減が可能となる点である。土のみで構成された緩勾配の土堤では，斜面と道路間の設置スペースの制約により，対策工として土堤を選定することが出来なかったケースも考えられる。しかし，急勾配化による設置スペースの削減により，土堤が対策工の選択肢に入りやすくなったと考えられ，これまでよりも多くの現場への適用が可能となることが考えられる。
2) 高さ 1.0m の縮小模型に対する重錘衝突実験の結果，法面補強土堤は重錘の水平方向の運動や駆け上がり挙動を大きく抑制する効果が確認された。一方，本実験条件は土堤の断面積を減少させることによる法面急勾配化であったため，土のみで構成された土堤よりも耐荷性能が低減し，落石衝突に伴う土堤の損傷が増加する可能性が考えられる。そのため，落石対策の計画段階にて実施される現地調査において，設計対象の落石エネルギーが非常に大きくなることが推定される場合には，適用が困難となる，もしくは天端幅を拡幅するなど耐荷性能に十分配慮した設計を実施する必要があることに注意が必要である。

数値解析手法の活用に向けたポイントは以下のとおりである。

1) 二次元個別要素法を用いた場合，落石径に対する最大粒径を 1/40 とすることで，重錘の捕捉可否や貫入挙動を概ね再現することが出来る点である。解析コストが膨大にならない範囲内で粒径を小さくすることにより，落石衝突に伴う土堤内部のすべり線の進展挙動についても高精度の推定が可能となり，設計落石エネルギーを用いた詳細照査の実施に際し，終局限界状態を満足するか否かを適切に判断することが出来ると言える。
2) 三次元個別要素法を用いた場合，粒子間の接触モデルとして adhesive モデルを活用することにより，実験時の重錘貫入挙動を二次元個別要素法よりも精緻に再現出来る点である。ただし，adhesive モデルは粒子間の結合について，重錘衝突により一度結合が破断された後に再度結合することを認める。このため，adhesive モデルは土堤の耐荷性能の照査には不適であり，対駆け上がり性能の照査において活用されることが想定される。
3) 三次元個別要素を用いた性能照査において，耐荷性能の照査には粒子間の再結合を認めないボンドモデルを使用することで照査が可能な点である。二次元個別要素法は土堤延長方向への応力分散がなされないことから，実現象よりも土堤が破壊されやすい傾向にあるものの，三次元個別要素は土堤延長方向を考慮するため，二次元解析よりもボンドモデルにおける土堤の破壊性状を高精度で再現することが可能である。

性能照査型設計フローの活用に向けたポイントは以下のとおりである。

1) 落石対策工に最低限要求される性能である道路空間の安全性確保の観点から，土堤の要求性能を耐荷性能と対駆け上がりに大別した点である。特に，耐荷性能は他の落石防護工においても考慮されるのに対し，法面を有することを特徴とする土堤固有の性能として，対駆け上がり性能を明示した点は重要である。
2) 落石作用の設定について，土堤が落石の第一衝突点である場合と第二衝突点である場合の双方について照査を行う必要性を明示した点である。これにより，多様な落石の衝突形態を考慮した土堤の落石捕捉性能の評価が可能となる。なお，土堤が落石の第二衝突点である場合には，ポケット部が第一衝突点となり，ここで衝突エネルギーの鉛直成分が大きく吸収されることが推測される。しかし，落石衝突時におけるポケット部の干渉性能については体系的な整理がなされておらず，今後の検討課題である。
3) 照査のステップにおいて，捕捉限界チャートに基づき耐荷性能と対駆け上がり性能に対する性能を簡易的に確認する「簡易照査」と，設計落石エネルギーを対象として

数値解析や模型実験により性能を検証する「詳細照査」からなる二段階の照査手順を提案した点である。特に，簡易照査を第一段階に位置付けることで，詳細照査を繰り返し実施する手間を省ける可能性がある。ただし，捕捉限界チャートを幅広い土堤断面形状で活用するためには，実規模土堤における数値解析および模型実験の結果を蓄積し，データの充実を図る必要がある。

4) 詳細照査の実施に際しては，数値解析による照査の他に，模型実験による照査が想定される。ここで，落石対策便覧（公益社団法人日本道路協会，2017）には，落石防護網の模型実験による性能照査は実大模型を用いて照査する旨が記されている。しかし，土堤については実規模模型による照査は時間的・経済的なコストが極めて大きい。そのため，縮小模型を活用した実験による性能照査手法の確立が期待される。これに向けた検討として，砂質土で構築された縮小模型に対する静的載荷実験の結果（Oguri, et al.），実規模土堤の最大耐力は寸法比の約2.5乗に比例する法則を明らかにした。また，現地発生土で構築した縮小模型に対する静的・衝撃載荷実験（吉廣ら，2025）の結果，土堤の寸法効果の支配要因をはじめとした基本的な知見を得た。以上より，縮小模型照査の体系化に向けて，今後は土堤構築条件を変化させ，相似則を緩和した条件における衝撃載荷実験等の実施が必要であると考える。

7.3 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（パラメータ取得が容易）試案の方向性を検討した。今後，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：震度法による法すべりの安全性を評価することを検討。通常のすべり計算を行うため，特に新たにパラメータを入手する必要はない。地下水位が低く土堤高さが2mを大きく超えない場合，地震に対する被災率はさほど高くないと考えている。

② 豪雨：表面の浸潤による法すべりの安全性で評価。特に土砂のように粒度分布が広範な土の場合には強雨強度に依存した浸潤モードの変化はないことを確認している。通常のすべり計算を行うため，特に新たにパラメータを入手する必要はない。「河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント」を参考にする。

③ 津波：想定越流水深～越流時間の耐侵食性のチャートから評価可能と考えている（図 7.1 などの検討が参考になる）。越流前，越流中に土堤への浸透が考えられる場合については，②の方法と同様の方法で，浸透に伴う土堤の安定性を検討することが望ましいと考える。

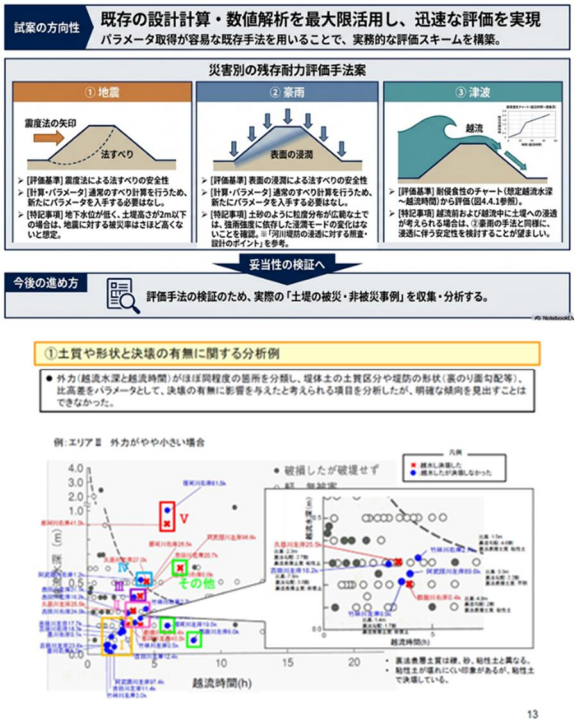


図 7.1 津波による越流時の侵食に対する検討イメージ（国土交通省，河川堤防の強化に関する技術検討会の資料から引用）

7.4 まとめ

本章での検討を簡単にまとめる以下のとおりである。

1) 本研究にて提案した土堤被災時の点検・復旧マニュアルでは，非載荷面の損傷度に応じて土堤の残存耐力の程度を判定したことが重要である。判定された損傷度によっては十分な残存耐力を有すると判断されるため，簡便な補修による早期復旧が可能である。

2) 土堤法面の急勾配化および法面補強は重錘の水平方向の運動および駆け上がり挙動の抑制がなされるだけでなく，道路横断

方向における土堤の設置スペースが大幅に削減される。

3) 二次元個別要素では重錘に対する最大粒径を 1/40 とすることで重錘の貫入挙動に加え，土堤内部挙動を精度よく再現出来た。また，三次元個別要素では重錘衝突後に伴い破断した粒子が再結合する adhesive モデルと再結合しないボンドモデルを併用することで，耐荷性能と対駆け上がり性能それぞれを合理的に照査することが出来る。

4) 土堤の性能照査型設計フローでは，多様な落石の衝突条件に応じ，土堤の性能を適切に評価するよう作用の考え方を規定した。また，簡易照査と詳細照査の二段階での照査により設計時の落石エネルギーを用いた詳細照査を繰り返し実施する手間を省ける可能性がある。

5) 地震は震度法により，豪雨は表面の浸潤により法すべりの安全性で評価し，津波は想定越流水深～越流時間の耐侵食性のチャートから災害時における土堤の安全性を評価する，ことを試案として今後も検討を継続する。

第 8 章　まとめ：　道路政策への反映と将来展望および今後の課題　～「土堤の良さを最大限に引き出す」ために～

8.1　概要

本研究により，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，相似則に基づく合理的性能照査法，維持管理・復旧方法，性能照査型設計フローを体系的に整理することができた。特に，本研究では，土堤を単なる「経験工（経験則中心の設計）」ではなく，「設計可能なレジリエント防災構造物」として再定義した点に大きな意義がある。

本研究成果を社会実装し，道路行政へ広く展開する目的の下，土堤の良さを最大限に引き出すために，今後，取り組む必要がある課題も整理する。

8.2　成果概要と道路政策への反映と将来展望

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，

- 「貫入によるエネルギー吸収」
- 「回転抵抗」
- 「有効高さ」
- 「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→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。

さらに，建設時だけでなく，維持管理・復旧・更新を含めたライフサイクルコスト（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。

また，

- 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。

本研究は，低コストで全国・国際展開可能な次世代型道路斜面防災技術の基盤を構築するものであり，道路政策の質の向上，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。

8.3　今後の課題抽出と解決のための基本的な考え方

「土堤の良さを最大限に引き出す」ため，実験・理論・維持管理を統合し，社会実装を実現

する。特に，本研究は「製品」ではなく，「設計技術」に関する研究開発であることから，メーカー主導ではなく，国・公的機関主導による継続的研究開発と技術基準化が重要である。今後の土堤の研究開発における課題を抽出・整理し，その解決に向けた基本的な考え方を示す。

(1) ■　課題①：落石挙動の制御（落石防護システム設計）

本研究では，落石防護土堤の捕捉性能を，
①貫入によるエネルギー吸収
②回転抵抗
③有効高さ
④押抜きせん断破壊耐力
として整理し，回転による駆け上がり現象を体系化した。

今後は，土堤単体ではなく，「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。

具体的には，
- 斜面～ポケット～土堤間のエネルギー分担最適化
- 回転を考慮した落石挙動モデルの高度化
- 衝突位置・速度・角度制御による駆け上がり抑制
- ポケット形状・材料設計の高度化

等が重要となる。

これにより，落石対策を「受ける構造」から「エネルギーを制御するシステム」へ転換することを目指す。

(2) ■　課題②：相似則の実装（設計技術化）

本研究では，土堤内部のせん断帯形成メカニズムとマクロな耐力発現との関係を明らかにし，
- 最大荷重：約 2.4 乗
- 終局荷重：約 2.7 乗

の相似則を提示した。

これは，縮小模型を用いた合理的性能照査法による実大実験依存から脱却し，縮小模型実験による合理的性能照査法への道筋を示した重要成果である。

今後は，
- 実規模土堤による相似則検証
- 模型照査法の標準化
- 数値解析との連携高度化

を進め，低コストかつ全国展開可能な性能照査体系として実装していく必要がある。

(3) ■　課題③：構造的補強と維持管理の高度化

本研究では，
- 急勾配化による駆け上がり抑制
- ソイルセメント補強による破壊制御
- 残存耐力評価
- 点検・復旧方法

を整理し，「エネルギー吸収」と「破壊制御」のトレードオフ構造を明らかにした。今後は，
- 設計フロー・維持管理マニュアルの高度化
- 土堤×植生（耐浸食性・エネルギー吸収）
- 土堤×ソイルセメント補強（駆け上がり抑制・耐力）
- ソイルセメント×厚層基材（耐力・スリム化）
- 土堤×フェンス等の複合構造

など，相乗効果・競合効果を考慮した最適設計を進める必要がある。

特に，ソイルセメント土堤＋厚層基材については，20 年以上機能している実事例も存在しており，長期供用性能の観点からも重要である。

(4) ■　課題④：巨大・多数落石への対応

近年の地震・豪雨の激甚化，長期化，複合化（マルチハザード化）により，
- 巨大岩塊
- 岩塊群
- 破砕岩塊群
- コアストーン
- 同時多数落石

などへの対応が重要となっている。

特に，令和 6 年能登半島地震では，広域的な岩盤崩壊や多数の岩塊群落下が発生し，従来想定を超える大規模落石災害が顕在化した。また，豪雨の長期化・頻発化による連続落石や，斜面中に埋没していた巨石（コアストーン）の落下なども今後さらに増加する可能性が高い。

今後は，
- 大規模岩塊・破砕岩塊群への対応
- ポケットへの堆積活用
- 複数衝突時の残存耐力評価
- 同時多数落石への性能評価

などを整理し，低頻度巨大災害への対応技術も発展させる必要がある。