

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

研究の概要

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。

研究の目標・目的と実施体制

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）、豊橋技科大（土の衝撃、地盤力学、防災）

- 目標1：落石捕捉後の土堤の残存耐力評価方法の提案
- 目標2：性能を向上させる地盤材料を用いた新補強技術の開発
- 目標3：効率的な照査の実施方法とその解析結果の解釈の提案
- 目標4：捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案。

1年目

2年目

3年目

(目標1)落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案～2つ目の落石に耐えられるか～／研究項目a,b,c,d,e,f,g

a: 数値実験による単発の落石履歴を有する土堤の弱点箇所抽出（名工大、豊技大）

b: 小型・中型土堤を用いた単発の落石履歴を考慮した振り子衝突実験（寒地、室工大、名工大）
※照査に向けた損傷状態の計測：色砂、貫入試験、UAV・SfM、3D変位計測→土堤表面変形と内部変形を関係付ける

c: 単発の落石履歴を有する土堤の解析モデルの妥当性確認（豊技大、名工大、室工大）

d: 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（名工大・豊技大）

e: 落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案（名工大、寒地）
※簡易点検と詳細点検オプションを提案

f: 数値解析による照査法の適用範囲・限界と効率的な実施方法の提案（豊技大、名工大、室工大）
※照査オプションの充実化のために不連続体解析・個別要素法DEM、連続体解析手法・有限要素法FEMの2つの解析手法を検討

g: 実規模実験による残存耐力評価手法の妥当性確認（寒地、名工大、豊技大）
※照査に向けた損傷状態の計測：色砂、貫入試験、UAV・SfM、高速3D変位計測、表面波探査、電気抵抗、RI、音響トモグラフィ→土堤表面変形（簡易点検）と内部変形（詳細点検）を関係付ける

得意な専門分野を活かしながら工学と経験を融合し、課題解決と開発・提案を行う体制

(目標3)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の方法の提案～多様な照査法の確立に向けて～／研究項目c,d,e,g,o

o: 数値実験による照査法の提案（名工大、室工大、豊技大）

(目標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～土堤抵抗モードを制御する～／研究項目h,i,j,k,l,m,n

h: 土堤の被衝突面を急勾配化する補強土の各種要素特性の把握（室工大、豊技大）

i: 暫定数値解析モデルを用いた衝撃実験条件の検討（豊技大）

j: 小型・中型模型を用いた新補強工の性能照査実験（寒地、室工大、名工大）

k: 新補強工の数値解析技術の開発と妥当性確認（豊技大、室工大）

l: 数値実験による新補強工を有する土堤の終局状態・終局外力の検討（豊技大、室工大）

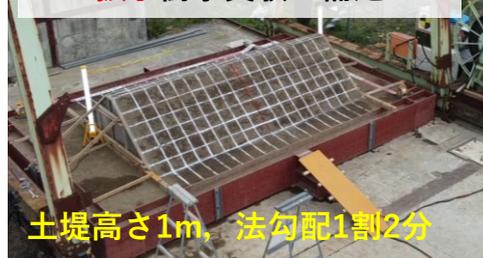
m: 新補強工を有する土堤の設計法の開発（寒地、名工大）

n: 実規模実験による新補強技術の設計法の妥当性確認（寒地、名工大）

(目標4)落石捕捉後の土堤復旧時の技術選定方法の提案～落石対策オプションの充実化～／研究項目e,m,p

p: 復旧時の技術選定方法の提案（寒地、名工大）

振り子衝撃実験：補足



土堤高さ1m、法勾配1割2分

振り子衝撃実験：破壊・通過



土堤高さ0.5m、ソイルセメント版設置法勾配8割

回転衝撃実験

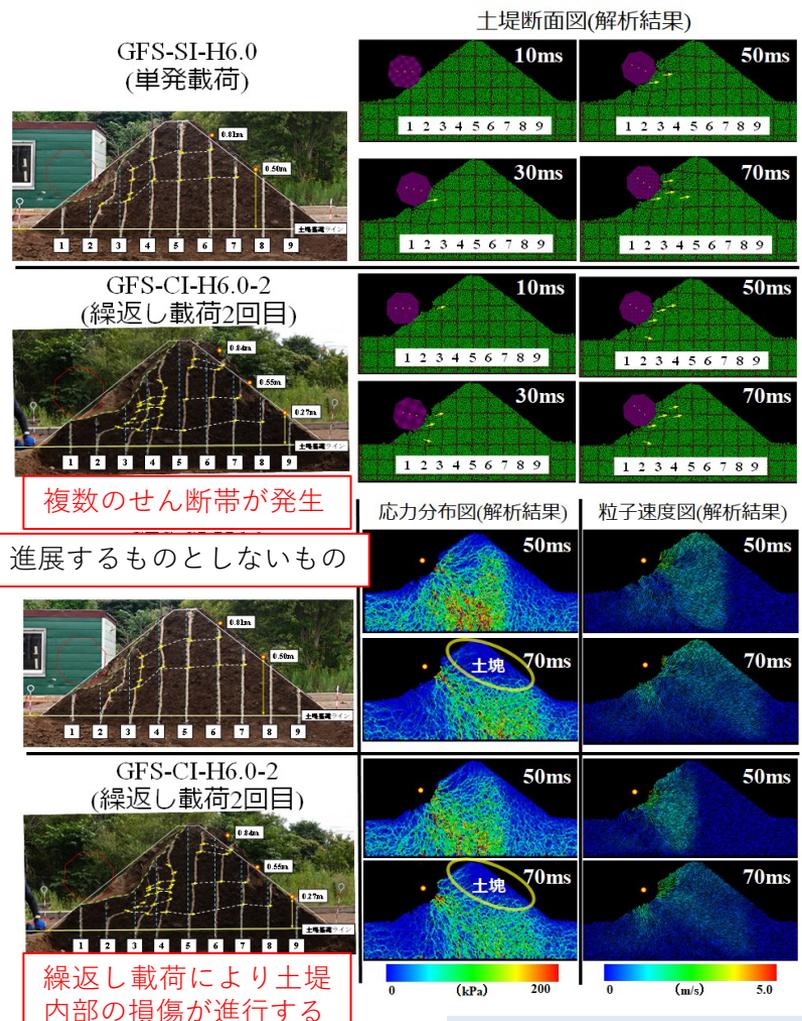


回転衝撃実験：補足

急勾配

1) 落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案

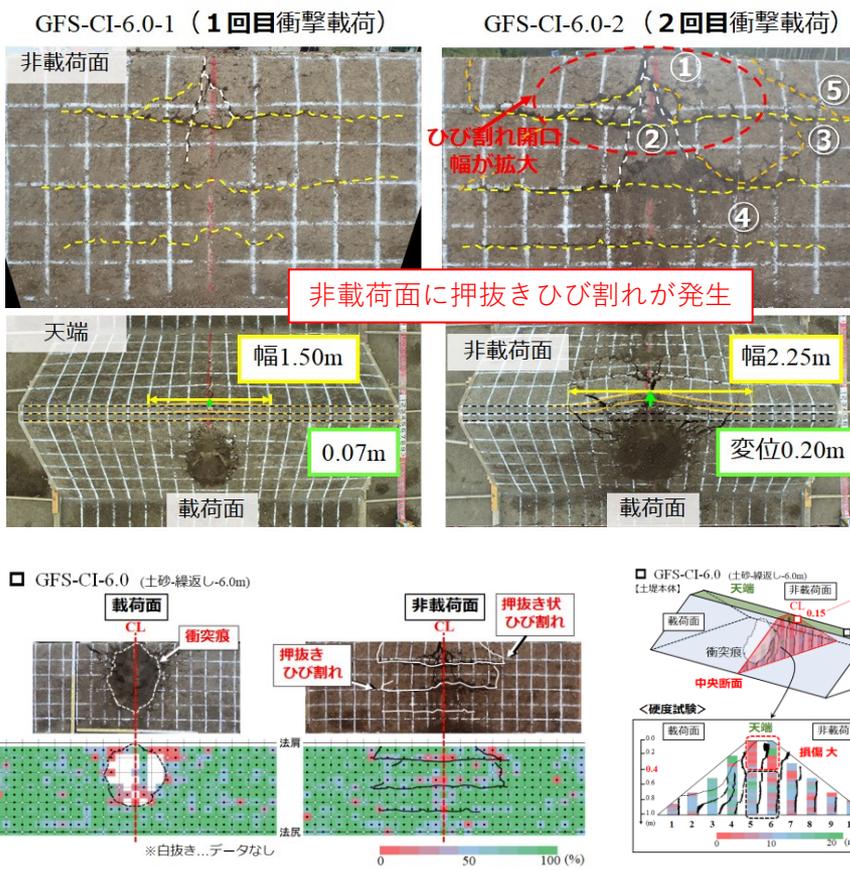
① 数値実験による単発の落石履歴を有する土堤の終局状態・終局外力の検討



繰返し载荷による破壊の進展・蓄積が再現できること明らかになり、外部から観察でき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

③ 数値解析による照査法の適用範囲・限界と効率的な実施方法の提案

② 落石捕捉後の土堤の残存耐力評価手法の提案



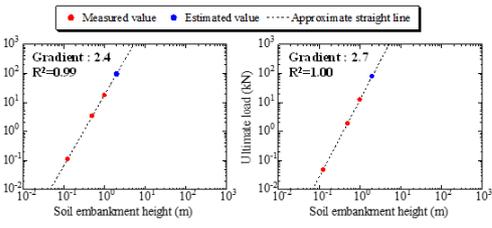
同じ落体エネルギー下の繰返し载荷では変状範囲や破壊性状が大きくなるものの、2回目の载荷においても土堤が落体を捕捉
 損傷によるひびわれが生じる順序あり→ひびわれで損傷度合の把握可能→残存耐力把握

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

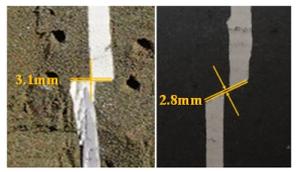
- DEM：課題の整理と解決
 - 静的パラメータと動的（衝撃）パラメータとの相互関係の明確化の検討 → 敷砂の応答については速度依存性の特別な考慮の必要なし解析の妥当性が示された
 - 粒子径をどれくらい粗くしても良いかについて理論付けを検討した
 - 変形が局所化したせん断帯（粒子20個分）の挙動の取扱と計算コストとのトレードオフ必要→粒子間すべりもモデルの改良を検討した
 - 粘性土のようなより柔らかいねばり強い土の表現の工夫を実施中現在の剛結粒子でなく接合部の回転を許すモデル（従来の拡張）

- FEM：
 - 土の構成モデルどのように選択するか、変形の局所化を伴う破壊要素の取り扱い方法はエロジョンなどの手法の適用で工夫を施すことで改善

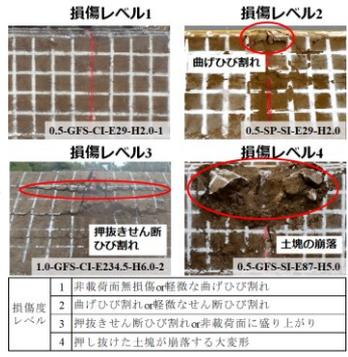
① 小型・中型模型を用いた新補強工の性能照査実験



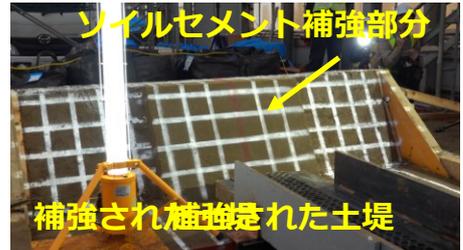
土堤破壊の本質：【相似則】を得た：超小型～大型の破壊耐力は土堤サイズの約2.5乗に比例



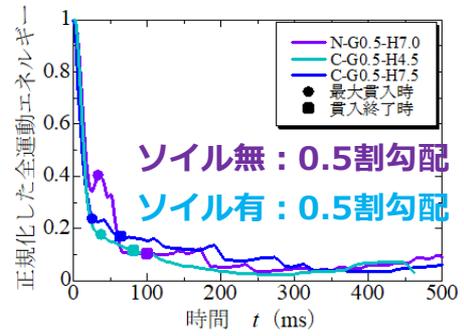
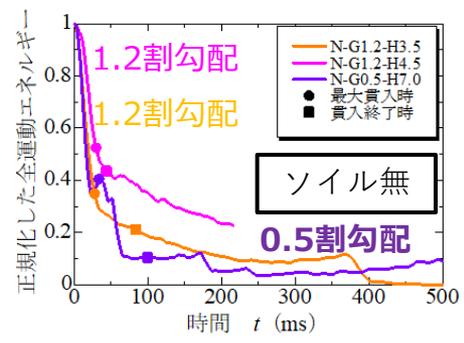
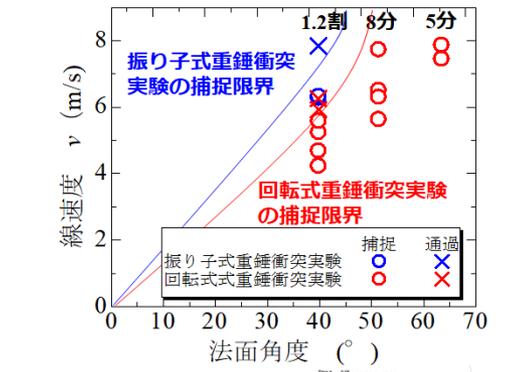
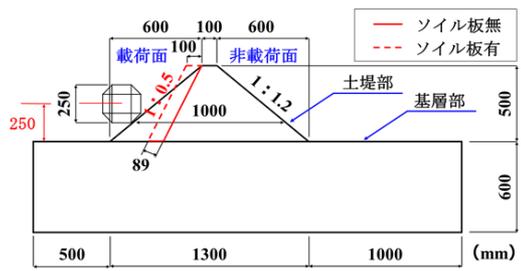
観察されたせん断帯幅は材料固有の特性長 → 相似則に影響



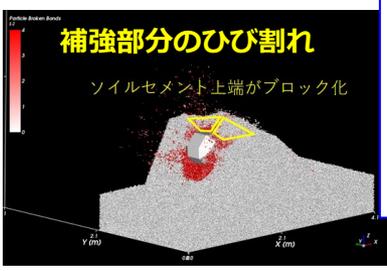
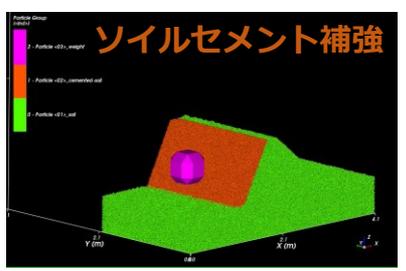
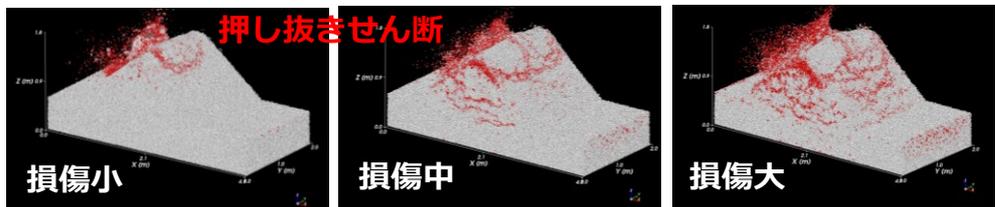
損傷度レベル	説明
1	非載荷面無損傷or軽微な曲げひび割れ
2	曲げひび割れor軽微なせん断ひび割れ
3	押し抜きせん断ひび割れor非載荷面に盛り上がり
4	押し抜けた土塊が崩落する大変形



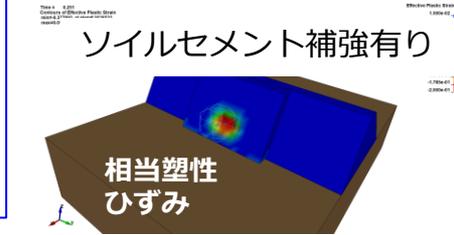
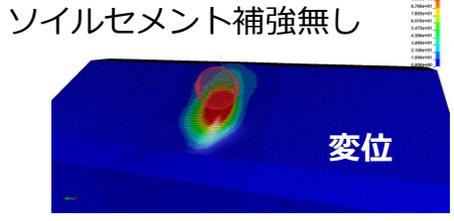
【回転による駆け上がりを抑制】 ⇒
【法を急勾配化】 ⇒ 【破壊耐力の補強】



② 新補強工の数値解析技術の開発と妥当性確認



粒子特性やボンド効果の工夫 ⇒ 非衝突面の押し抜きせん断やソイルセメント部のひび割れによるブロック化の表現可, 実験結果を再現可



ソイルセメント設置した土堤のDEM解析結果

衝突面側を補強された土堤は硬さ・強度が異なる複合構造

FEM解析結果

ソイルセメント補強の施工試験, 強度試験を実施し, 課題整理

3) 課題・中間評価で指摘を受けた事項に対する対応

① DEM解析において落石が非円形(非球形)であることが全体の流動や変形に与える影響について

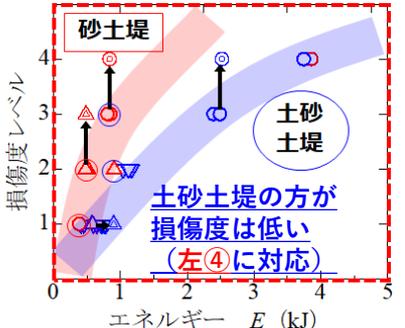
非球形(EOTA型重錘)と球形重錘による比較:

- 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。
- 上記と連動して、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堤耐力が発現されていることが分かった。

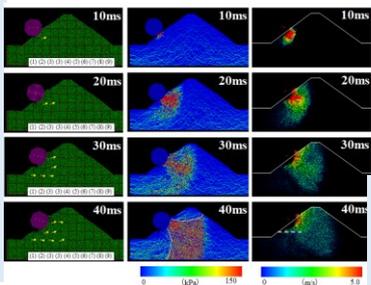
②一回の吸収エネルギーEが大きい砂と繰り返し利用できる土砂の比較優位性について

- 【捕捉性能向上のために土堤に必要な機能】=
- 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(非衝突側法肩を超えない)】

②③④で土砂の方が砂よりも優位性あり



③DEM解析でマイクロな変形とマクロな変形の違いをもたらす構造特性への影響について

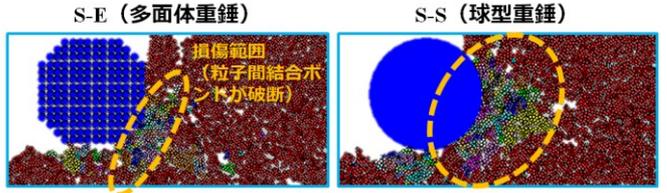


粒子集合体の土中の衝撃応力伝播が重要であり、衝突初期は扇状に伝播し、時間経過に伴い粒子間のマイクロなすべりや回転によって応力伝播経路が局所化したり散逸したりし、マクロな変形・耐力に影響することが明らかになってきた。今後、継続して検討することで、土堤の弱点部の抽出、点検・補強を効率化できると考えている。

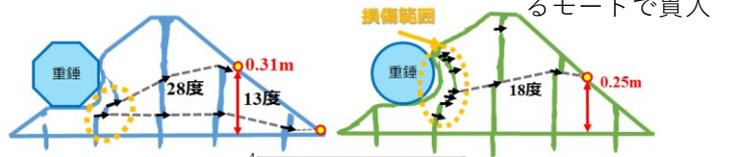
④標準試験モデル以外での災害時(地震・豪雨・津波など)を想定した残存耐力の評価方法について

⑤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

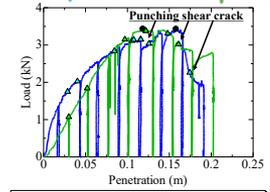
■ 落体衝突部の内部のマイクロな破壊



■ 土堤全体の内部のマクロな破壊



静的載荷の応答に及ぼす落体形状の影響



←変状モードとマクロな荷重～貫入量の応答が対応する

吸収エネルギー



- 土砂を活用: 現地発生土, 残土
- 二次被害の可能性は低い
- 落石衝突後に安価で速やかに復旧
- 盛り直しでも安価で速やかに復旧

土のみの土堤形状を高さ2.5m, 上幅(天端幅)1m, 下幅7m=10m²で検討

ロックシェド 800万円

既存の設計計算, 数値解析を行い(パラメータ取得が容易)試算: 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で評価可能, ②豪雨: 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いことを確認), ③耐津波: 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。

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検討: 成果活用明確化