

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
Study on scale effects and similarity laws of rockfall protection soil embankments
under static and impact loading

吉廣悠太¹，前田健一²，小栗快之³，芦田梨沙子⁴，中村拓郎⁵，鈴木健太郎⁶，内藤直人⁷，瓦井智貴⁸

- 1 名古屋工業大学大学院・環境都市プログラム・y.yoshihiro.523@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学大学院教授・高度防災工学センター・maeda.kenichi@nitech.ac.jp
- 3 名古屋工業大学大学院・環境都市プログラム・y.oguri.893@stn.nitech.ac.jp
- 4 名古屋工業大学・社会工学科・環境都市分野・r.ashida.467@stn.nitech.ac.jp
- 5 土木研究所寒地土木研究所・nakamura-t@ceri.go.jp
- 6 構研エンジニアリング・suzu@koken-e.co.jp
- 7 豊橋技術科学大学大学院助教・建築・都市システム学系・naito.naoto.xz@tut.jp
- 8 室蘭工業大学大学院助教・工学研究科・もの創造系領域・kawarai@muroran-it.ac.jp

概 要

近年我が国は自然災害の激甚化による落石被害の拡大が懸念されている。落石対策工の一つである落石防護土堤は、現地発生土で施工できるため、経済性、施工性、維持管理性に非常に優れる。しかし、土堤のスケール効果や相似則が未解明であるため、縮小模型実験による照査法は確立されていない。本研究は、初めにスケール効果に関する基礎的知見を得る目的で、現地発生土を想定した材料で構築された複数スケールの縮小模型を対象に静的載荷実験を実施した。その結果、スケール毎に土堤の変形特性が異なること、模型スケールが小さいほど貫入抵抗は相対的に大きく、変状範囲も大きくなることが分かった。その後、振り子運動による衝撃載荷実験を実施した結果、静的載荷と同様に貫入抵抗の増加が見られ、異なる模型スケールで貫入量に対する仕事量が相対的に同じであれば、同程度の変状が発生することが分かった。

キーワード：落石，落石防護土堤，スケール効果，静的載荷実験，衝撃載荷実験

1. はじめに

我が国では、急崖に近接する海岸線や山岳地帯にも多くの道路や鉄道などの交通網が整備されており、これらの社会インフラは人々の生活や物流の確保に必要不可欠である。しかし近年、集中豪雨や大地震など自然災害の激甚化に伴い、大規模な落石災害の発生リスクが高まっており、社会インフラや人々への被害が懸念されている。これらの被害を最小限に抑えるため、合理的な落石対策の実施が求められている。

落石対策工の一つである落石防護土堤（以下、土堤と示す）は、土のみで構成されるため、経済性や施工性、維持管理性に優れた落石対策工である。我が国において土堤の設計は、落石対策便覧等¹⁾を参考に行われているが、土堤耐力及び落石のかけ上がりや飛び越しに対する捕捉性能等の具体的な照査法は確立されていない。

そこで、土堤の照査方法の一つとして縮小模型を用いた実験による照査法（以下、模型照査法と示す）を挙げる。実規模模型実験は時間と費用がかかるため、より低

コストで実施可能な縮小模型実験を用いることで、スケールアップした土堤の耐力や捕捉性能等の定量的評価が可能となる。模型照査法確立のためには、土堤における相似則を解明し、適切なスケールアップ手法が求められるが、縮小模型を用いる際はスケール効果（寸法効果）を考慮する必要がある。例えば、既往研究²⁾にて砂材料で構築した土堤の静的載荷実験では、模型スケールが小さいほど貫入抵抗が相対的に大きくなるスケール効果が確認されている。

本研究は、現地発生土を想定した土砂材料のスケール効果及び相似則の解明に向け、実規模土堤（土堤高さ2.0m）の1/2，1/4，1/16スケールを想定した中型土堤、小型土堤、超小型土堤の縮小模型を対象に、シンプルな載荷条件である静的載荷実験と、実際の落石現象のような衝撃荷重が作用する載荷条件である振り子式重錘衝突実験（以下、衝撃載荷実験と示す）を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では、実規模土堤の 1/2, 1/4, 1/16 スケールを想定した中型土堤（土堤高さ 1.0m）、小型土堤（土堤高さ 0.5m）、超小型土堤（土堤高さ 0.125m）を対象に、多面体重錘（EOTA³型重錘）による静的・衝撃载荷実験を実施した。表 1 に実験ケース一覧と重錘諸元、表 2 に物性値一覧を示す。表 1 のケース名について、第 1 項目は実規模土堤に対する模型の大きさを示し、M が中型土堤、S が小型土堤、US が超小型土堤を示す。また、第 2 項目は载荷条件を示し、S が静的载荷（Static Loading）、I が衝撃载荷（Impact loading）を示す。なお、衝撃载荷実験の落下高さは模型スケールに応じて幾何学的に相似させたが、小型土堤では重錘質量と落下高さを変えたケースも実施しており、小型土堤のみ第 3 項目として、H（Heavy）と L（Light）を付記した。重錘径は土堤高さの 1/2、重錘密度は落石対策便覧を参考に目標値 2.6t/m³ に設定し、S-I-H は他ケースの重錘密度の 3 倍とした。

中型土堤の土堤形状について、法面勾配は以下をもとに 1:1.2 に設定した。1) 落石対策便覧に記載される一般値 1:1.0~1:1.5 を目安とすること。2) 盛土安定計算においてすべり安全率 1.2 を確保可能な勾配にすることである。天端幅について、実規模土堤では 1.0m 以上確保されている場合が多く、実規模の 1/2 スケールを想定した中型土堤では 0.5m 以上となるが、本実験では载荷に伴う土堤表面の変状や破壊を生じやすくする目的で天端幅を 0.2m に設定した。土堤高さは実規模土堤の 2.0m をもとに 1.0m とし、土堤延長は 4.6m とした。基層部については、コンクリート基礎の上に山留材を配置して土砂を充填し、その上に土堤を構築した。試験体の構築に際して、基層部は厚さ 0.3m 毎に、土堤部は 0.25m 毎に土砂を敷均し、振動締固め機を使用して締固め度 90% 以上を目標に構築した。また、土堤内部の変状を可視化するために、载荷点方向に直径 25mm の鋼棒を基層の深さ 300mm 程度まで差し込んで削孔し、そこへ着色砂を充填した。図-1 の赤線で示す着色砂は、土堤中心を基準に载荷方向へ 250mm 間隔で 9 本埋設した。小型土堤の土堤形状について、土堤断面形状は中型土堤の 1/2 スケールに設定し、土堤延長は 2.0m とした。なお、土堤構築方法は中型土堤と同様であり、着色砂は土堤中心を基準に 250mm 間隔で 5 本埋設した。超小型土堤の土堤形状について、土堤断面形状は中型模型の 1/8 スケールに設定し、土堤延長は 0.5m とした。基層部は壁面がアクリル板で固定された実験装置内に土砂を充填し、その上に土堤を構築した。試験体の構築は、基層部は厚さ 0.025m 毎に、土堤部は 6 層に分けて土砂を敷均し、人力による締固めにより構築した。着色砂は土堤中心を基準に静载荷で 3 本（81mm 間隔）、衝撃载荷で 5 本（40.5mm 間隔）埋設した。

表 1 実験ケース一覧及び重錘諸元

ケース名	土堤高さ (m)	重錘径 (m)	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	载荷速度 (m/s)
M-S	1.0	0.5	234.5	-	0.005
S-S	0.5	0.25	29.4	-	0.005
US-S	0.125	0.0625	0.450	-	0.005
M-I	1.0	0.5	234.5	4.0	8.97
S-I-L	0.5	0.25	29.4	2.0	6.29
S-I-H	0.5	0.25	87.0	3.0	7.39
US-I	0.125	0.0625	0.55	0.5	2.31

表 2 材料物性値

項目	単位	試験結果
地盤材料の分類名	-	細粒分質砂質礫
分類記号	-	GFS
土粒子密度 ρ_s	g/cm ³	2.639
均等係数 U_c	-	49.3
内部摩擦角 ϕ_d	deg	31.0
粘着力 c	kN/m ²	2.8

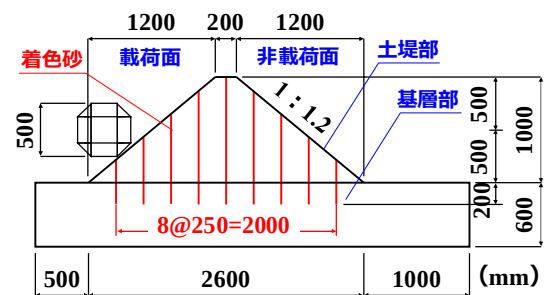


図 1 静的载荷実験の概要図（中型土堤）



図 2 実験風景写真（中型土堤）

2.2 静的载荷実験の概要

図 1 に実験概要図、図 2 に実験風景写真を示す。なお、紙面の都合上、中型土堤のみを示す。実験の実施に際して、重錘重心高さを土堤高さの 1/2 に一致させ M-S、S-S は重錘に接続した油圧ジャッキ、US-S はモーターにより土堤に水平荷重を作用させた。载荷方法について M-S 及び S-S は水平変位 0.25m 毎の漸増繰返し载荷、US-S は単調载荷とした。なお、計測項目はロードセルによる载荷荷重値、水平方向の重錘貫入量、ビデオカメラによる土堤表面変状及び土堤载荷点に埋設した着色砂による土堤断面変状である。

2.3 衝撃載荷実験の概要

図 3 に実験概要図、図 4 に実験風景写真を示す。こちらら紙面の都合上、中型土堤のみを示す。重錘をワイヤロープで吊り上げた後、振り子運動により衝突させた。振り子運動の回転中心点は载荷面側の土堤法肩と一致させており、土堤中心を通過する際に重錘重心が基層から土堤高さ半分の位置となるようワイヤロープの回転半径を設定した。計測項目は重錘の载荷面と反対の面に取り付けた加速度計による重錘加速度と、高速度カメラ画像 (500fps) による PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析から求めた重錘重心の三次元座標、土堤表面及び断面変状、そして、土堤天端の水平変位と非载荷面の変状範囲を推定するためにカメラ画像 (125fps) を用いた PIV (Particle Image Velocimetry) 解析を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 静的載荷実験の結果及び考察

3.1.1 荷重-貫入量関係

図 5 に、横軸に貫入量を重錘径で除した貫入比、縦軸に荷重値を重錘重量で除した無次元化荷重を取った荷重-貫入量関係を示す。ここで、荷重の無次元化に重錘重量を用いる理由として、後述する衝撃載荷実験においては、重錘の加速度と質量の積から衝撃力を算出しており、重錘質量が重要なパラメータとなる一方で、静的載荷実験においては、重錘の載荷速度が 5 mm/s と衝撃載荷実験に比べて 3 オーダーほど小さく、重錘加速度は重力加速度が支配的といえる。したがって、静的・衝撃載荷のいずれにおいても一貫した指標とするため、荷重は重錘重量により無次元化した。図 5 について、M-S を橙色、S-S を青色、US-S を桃色で示し、非载荷面に押抜きせん断ひび割れが発生した時刻を中抜三角、最大荷重時を中塗丸でプロットし、最大荷重時の値を示す。図 5 より、貫入初期のグラフの勾配に着目すると、US-S、S-S、M-S の順で大きく、荷重の最大値は M-S で 11.5、S-S で 20.6、US-S で 61.3 であり、模型スケールが小さいほど貫入抵抗は大きくなるといえる。また、最大荷重時の貫入比を比較すると、M-S で 0.59、S-S で 0.66、US-S で 0.29 であり、US-S は他のケースに比べて貫入比は約 1/2 倍であり、脆性的に破壊したことが分かる。しかし、M-S と S-S の最大荷重時の貫入比は凡そ等しいため、本実験条件では超小型土堤程度の模型スケールになるとスケール効果が顕著に表れ、脆性破壊すると考える。さらに、非载荷面に押抜きせん断ひび割れが発生する時の貫入比は、M-S で 0.79、S-S で 0.90、US-S で 0.43 であり、全ケースで最大荷重時の貫入比の約 1.3 倍となることから、最大荷重時から非载荷面に変状が現れるまでに要する貫入量は相対的に同程度となる傾向が見られる。

ここで、横軸に土堤高さ (m)、縦軸に最大荷重 (kN) の両対数軸を取った図 6 に、各ケースの最大荷重をプロ

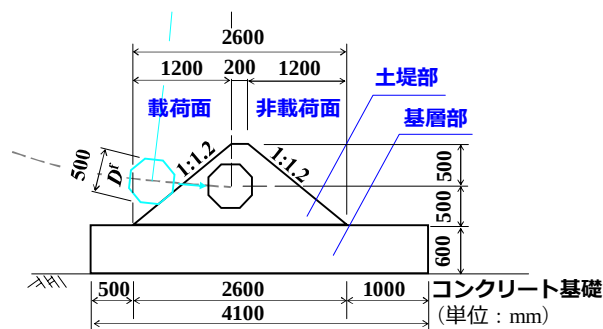


図 3 衝撃載荷実験の概要図 (中型土堤)

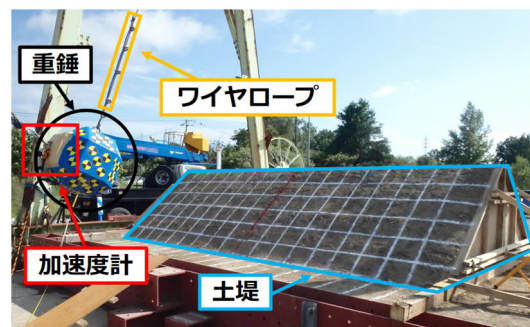


図 4 実験風景写真 (中型土堤)

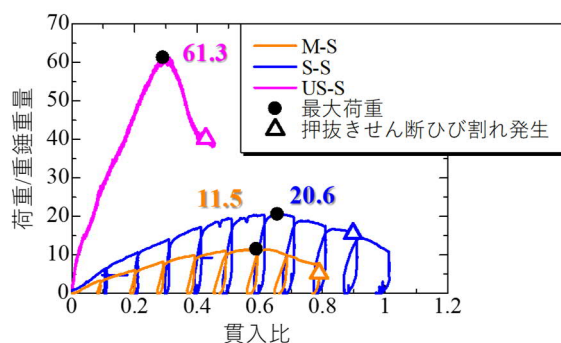


図 5 荷重-貫入量関係 (無次元化)

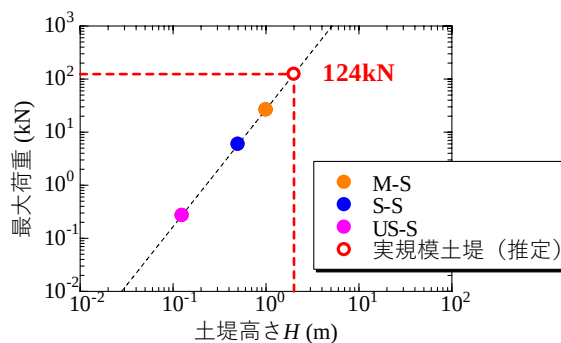


図 6 最大荷重と土堤高さの関係

ットし、近似直線を破線で示す。図 6 より、近似直線の傾きは 2.2 であり、静的載荷時の土堤耐力は土堤高さの比の 2.2 乗に比例する相似則が得られる。これより、実規模土堤 (土堤高さ 2.0m) の耐力は 124kN と推定されるが、これはスケール効果を受けた相似則であるため正

確な土堤耐力とはいえない。よって相似則の緩和が求められる。例えば、超小型土堤にて含水比や相対密度等を変化させて中型土堤に近い荷重貫入量曲線とすることで、実規模土堤の耐力推定値は大きくなり、推定精度は向上すると考える。以上より、本研究で得られた推定耐力値は下限値といえ、実規模土堤は少なくとも 124kN まで貫入抵抗を発揮するものと推察される。

3.1.2 土堤表面変状

図 7 に載荷面及び非載荷面における実験終了時の土堤表面変状の模式図を示す。図 7 について、法長を 1.00 として正規化し、0.20 四方のメッシュを描き、載荷点上のラインを赤線、重錘径分の領域を灰色で示す。まず、図 7(a)より、載荷面の土堤延長方向の変状範囲は、M-S で 1.05、S-S で 1.42、US-S で 1.63 であり、模型スケールが大きいほど変状範囲は大きいことが分かる。また、載荷痕は M-S、S-S は凡そ等しいが、US-S は小さい。次に、図 7(b)より、非載荷面の水平ひび割れの長さは、M-S で 1.87、S-S で 1.19、US-S で 2.00 であり、模型スケールとの相関は見られないが、US-S が最も大きい。加えて、非載荷面の変形・破壊挙動について、全ケースで法長方向に曲げひび割れが発生し、そのひび割れを境に押抜かれつつある土塊が左右に開く挙動が見られた。

3.1.3 土堤断面変状

図 8 に実験終了時の土堤中央断面の変状を重ね合わせた図を示す。図 8 について、土堤内部に発生した着色砂のせん断によるすべり変形や土堤断面の概形、想定すべり線、非載荷面のひび割れ発生位置をそれぞれ示す。また、各ケースのすべり線より推定される重錘貫入に抵抗した土塊部分を塗りつぶして示す。図 8 より、まず、全ケースのすべり線の始点が重錘底面で同程度の高さであることが分かる。また、すべり線の進展方向について、M-S はほぼ水平に進展して非載荷面まで到達するのに対し、S-S は土堤中央部まで俯角方向、US-S は土堤中央部まで仰角方向に進展した後、ほぼ水平に進展して非載荷面に到達している。また、図中の矢印で示す着色砂でのせん断発生位置に着目すると、M-S と US-S は重錘近傍とすべり線に見られるのに対し、S-S は重錘下部から土堤中央部まで多数発生し、最も変状範囲が大きい。ここで、図 7(a)にて US-S の載荷痕が小さい要因として、図 8 より、M-S と US-S は重錘上部に土砂が盛り上がるのに対し、US-S は土砂が盛り上がっていないためと考える。また、図 7(b)より S-S の非載荷面の変状範囲は M-S に比べて小さいが、図 5 より S-S の方が M-S よりも無次元化した最大荷重値が大きい要因として、土堤内部の変状範囲が M-S よりも大きく、重錘の貫入に抵抗する領域が広いことが考えられる。以上より、模型スケールによって土堤内部の変状範囲は変化するが、土堤表面変状と組み合わせると、概ね模型スケールが小さいほど変状範囲は大きくなるといえる。

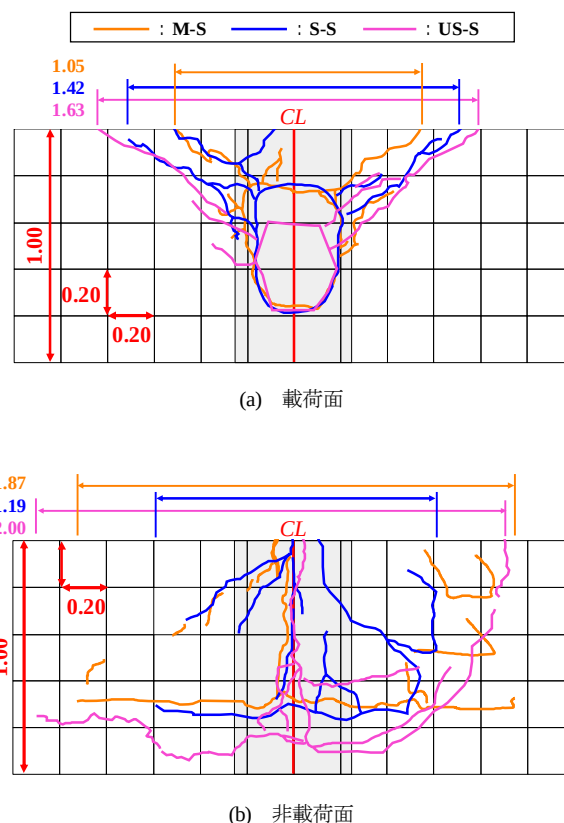


図 7 静的載荷実験終了時の土堤表面変状（正規化）

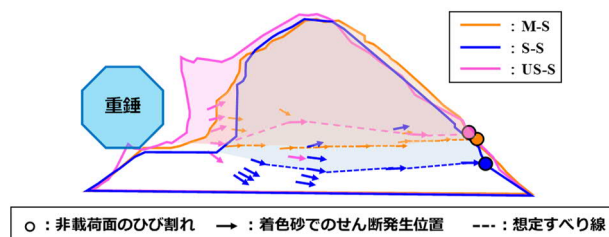


図 8 実験終了時の土堤断面変状（正規化）

3.2 衝撃載荷実験の結果及び考察

3.2.1 重錘重心軌跡図

図 9 に載荷面側法尻を原点とした重錘重心の軌跡を、土堤高さが 1.00 となるようにして重ね合わせた図を示す。図 9 について、土堤概形を実線、最大・最小半径分のオフセットラインを破線で示す。また、M-I を橙色、S-I-L を青色、S-I-H を緑色、US-I を桃色で示し、各ケースの最大貫入時をプロットし、その時の最小オフセットラインから法面法線方向距離の値を示す。なお、US-I は重錘が土堤衝突後に跳躍してフレームアウトしたため、その直前までを示す。土堤衝突後の重錘挙動について、図 9 より、M-I と S-I-H はほぼ鉛直上方向に跳躍するのに対し、S-I-L と US-I は放物軌道を描いて跳躍する。また、各ケースの最大貫入量（土堤高さで正規化）は M-I で 0.18、S-I-L で 0.18、S-I-H で 0.07、US-I で -0.03 である。US-I が負になる要因として、衝突時は高速度カメラ

画像より判断したが、カメラ画像の間隔（2ms）に比べて重錘の移動量が大きく、重錘が土堤と接触する瞬間を捉えることができなかったためと考えられ、画像計測より、実際の貫入量は 5mm 程度と推定される。まず、幾何学的に相似な载荷条件のケースである M-I と S-I-L、US-I について、模型スケールが小さいほど最大貫入量は小さくなる傾向が見られる。次に、後述の通り、実験終了時の変状が同程度の M-I と S-I-H について、両ケースの最大貫入比は凡そ等しいため、模型スケールが異なる場合も重錘の貫入量が相対的に同じであれば土堤の変形・破壊挙動は概ね一致することが予想される。

3.2.2 衝撃力-貫入量関係

図 10 に、土堤衝突時から最大貫入時までの重錘衝撃力-貫入量関係を示す。図 10 について、横軸は最小オフセットラインから法面法線方向の距離（貫入量）を重錘径で除し、縦軸は重錘衝撃力を重錘重量で除して無次元化したものである。ここで、原点を最小オフセットラインとしたが、重錘の衝突姿勢によって衝突時の貫入量が負となる場合があるため、最大オフセットラインを破線で示す。併せて、衝撃力の最大値を中抜丸でプロットして値を示す。図 10 より、M-I と S-I-H は定性的に概ね一致しており、重錘衝撃力の最大値は M-I で 15.9、S-I-H で 15.6 となり、凡そ等しい。一方、S-I-L や US-I は貫入初期の勾配が他 2 ケースに比べて大きく、重錘衝撃力の最大値も約 2 倍大きい。S-I-L と S-I-H の挙動が異なる要因として、S-I-L は後述する土堤天端変位が小さいことから、土堤が弾性変形したのに対して、S-I-H は天端変位が大きい場合、衝突部周辺の圧縮変形や土塊が押抜かれるような塑性変形して重錘を受け止めたためと考える。つまり、重錘質量が軽く、衝突時の重錘エネルギーが小さい場合、土堤は弾性的な反発挙動となるため貫入抵抗は大きくなり、重錘質量が重く、衝突時の重錘エネルギーが大きい場合、土堤は圧縮変形及び重錘貫入によって押抜かれる挙動となるため貫入抵抗は小さくなると考える。一方、US-I に着目すると、US-I は貫入量が小さいため他のスケールとの比較が困難であるが、貫入初期の衝撃力の立ち上がりが他のスケールに比べて大きく、また、静的载荷実験の結果を踏まえると、幾何学的に相似な载荷条件のケースでは模型スケールが小さいほど重錘衝撃力は大きくなると推察される。

3.2.3 土堤表面変状

図 11 に载荷面及び非载荷面における実験終了時の土堤表面変状の模式図を示す。図 7 と同様にして各ケースを重ね合わせた。まず、図 11(a) より、载荷面のひび割れ分布の範囲は、M-I で 1.26、S-I-L で 0.38、S-I-H で 1.75、US-I で 0.29 となり、幾何学的に相似な载荷条件のケースでは模型スケールが小さいほどひび割れ分布は小さくなり、S-I-L と US-I は衝突痕以外に明瞭なひび割れは視認できなかった。次に、図 11(b) より、非载荷面の水

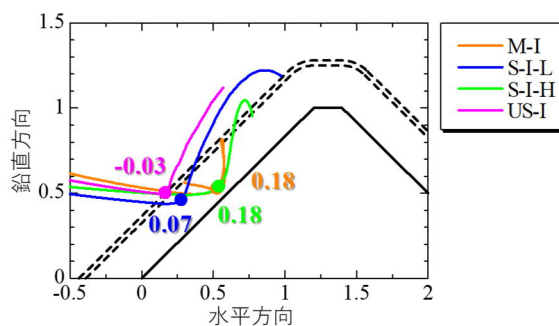


図 9 重錘重心軌跡図（正規化）

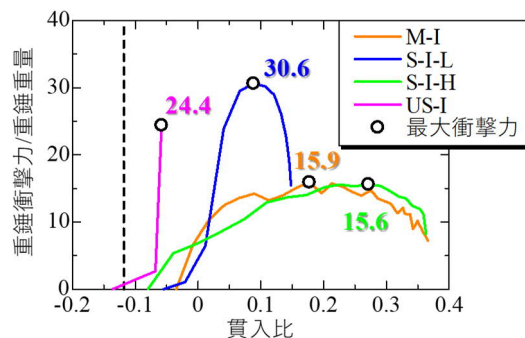
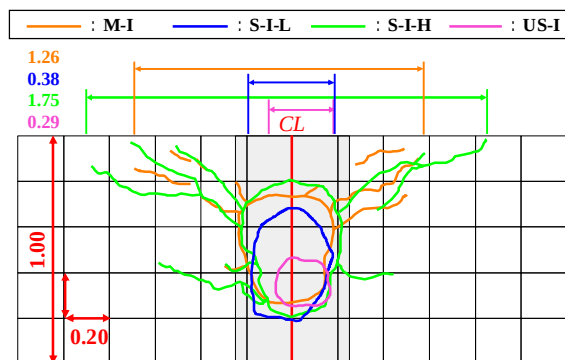
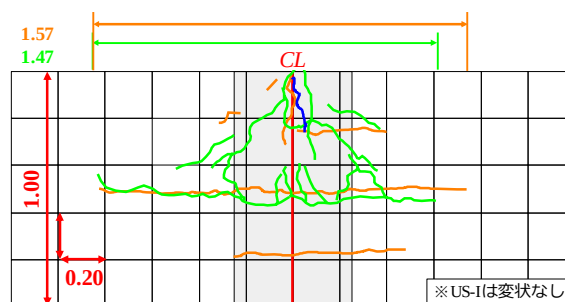


図 10 重錘衝撃力-貫入量関係（無次元化）



(a) 载荷面



(b) 非载荷面

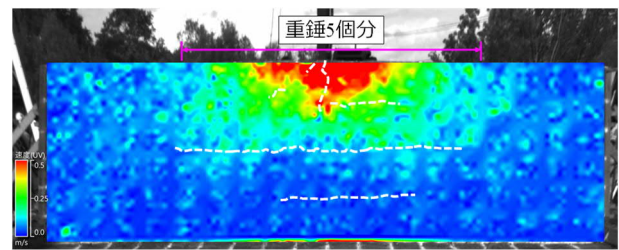
図 11 衝撃载荷実験終了時の土堤表面変状（正規化）

平ひび割れの長さは、M-I で 1.57、S-I-H で 1.47 となり、S-I-L と US-I は水平ひび割れが確認できなかった。M-I と S-I-H について、载荷面及び非载荷面のひび割れ分布が凡そ等しいと判断したが、非载荷面の水平ひび割れは

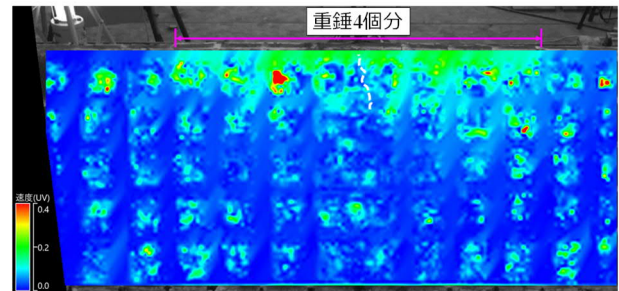
M-I が 3 本確認できるのに対して、S-I-H は中央部に 1 本のみしか確認できなかった。この要因として、図 11 のひび割れ分布は実験終了時の変状であるため、重錘衝突による土堤の影響範囲と一致するわけではない。そこで、図 12 に PIV 解析より各ケースで非載荷面の影響範囲が最も大きいフレームにて、粒子速度の境界が明確になるようカラーコンターで表したものを示す。図 12 について、ひび割れを白点線で示し、影響範囲の横幅を桃色、重錘径を破線で示すとともに、影響範囲の土堤延長方向長さを重錘径の個数分で表す。なお、S-I-H は撮影範囲外まで影響範囲が広がっているため、視認できる範囲までを示す。図 12 より、M-I は水平ひび割れの長さで影響範囲の幅は概ね一致するが、他のケースは水平ひび割れよりも影響範囲が大きい傾向が見られ、影響範囲は定性的に重錘 5~6 個分と推定される。よって、ひび割れから土堤の影響範囲を特定することは困難であることが示唆される。また、粒子速度について S-I-H は土塊が押抜かれているため中心部の速度は低いものの、他のケースでは載荷点延長上の法肩が最も速度が速く、法肩を中心にほぼ同心円状に速度が広がる。したがって、土堤は一樣に変形するのではなく、天端が最もたわみやすく、また、同心円状の領域が重錘の貫入に抵抗するといえる。幾何学的に相似な載荷条件のケースに着目すると、M-I は 5 個分、S-I-L は 4 個分、S-I-H は 6 個分以上、US-I は 6 個分であり、静的載荷実験で見られたスケール効果による変状範囲の拡大は見られないが、少なくとも衝撃載荷における影響範囲は重錘 4 個分以上と推察される。

3.2.4 土堤断面変状

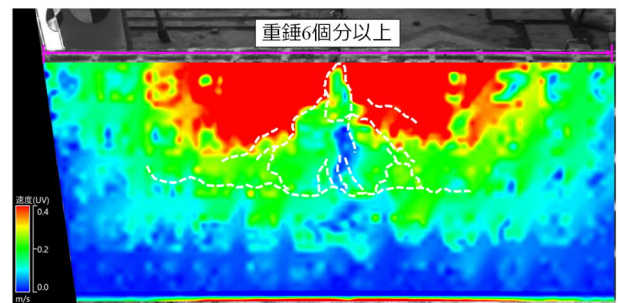
S-I-L と US-I にて土堤断面変状がほぼ見られなかったため、土堤の変状が凡そ等しい M-I と S-I-H の土堤断面変状を図 13 に示す。図中に示す矢印は着色砂のせん断変形によるすべりの発生位置及びその方向を示し、これをもとに想定されるすべり線を破線で示す。また、着色砂には載荷面側を 1 とした通し番号を付けている。図 13 より、両ケースともに土堤高さ半分の位置にすべり線の進展が推測され、非載荷面の水平ひび割れの発生位置に到達している。これより、重錘衝突位置の水平延長線上にすべり線が発生すると考える。しかし、M-I では水平ひび割れが 3 本発生しているにもかかわらず、すべり線は全てに到達していない。これは、衝撃による応力波や土堤の載荷方向へのたわみによる引張り等が考えられ、数値解析を用いた検討を行う予定である。一方、着色砂の形状に着目すると、M-I は着色砂 2~4 の衝突部周辺で弓なりにたわんでいるのに対し、S-I-H は着色砂 2~4 の土堤と基層の境界で着色砂がたわんでいることが分かる。これより、重錘の貫入に伴い M-I は衝突部周辺の領域が圧縮変形する一方で、S-I-H は土堤が基層との境界をすべるように変形したと推測され、土堤の変形・破壊挙動はスケール効果を受けたことが示唆される。



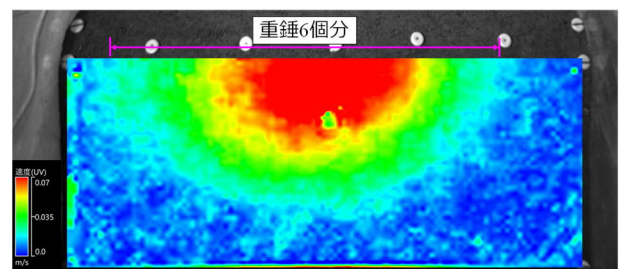
(a) M-I



(b) S-I-L



(c) S-I-H



(d) US-I

図 12 土堤の影響範囲

3.2.5 土堤天端の水平変位

図 14 に重錘の載荷方向に対する土堤天端の水平変位の最大時を示す。図 14 について、横軸に土堤中央からの距離、縦軸に天端の水平変位を取ったグラフの両軸をそれぞれ重錘径で除して正規化し、重ね合わせた。加えて、重錘径分を破線で示す。まず、幾何学的に相似な載荷条件のケースを比較すると、図 14 より、M-I、S-I-L、US-I の順で全体の変位が小さく、土堤中央の最大水平変位量は M-I で 0.06、S-I-L で 0.05、US-I で 0.01 となり、模型スケールが小さいほど天端の水平変位、つまりたわみが小さくなるといえる。また、天端変位が確認できる

範囲に着目すると、M-I は重錘 6 個分以上、S-I-L は重錘 4 個分、US-I は重錘 2.5 個分に相当し、模型スケールが小さいほど天端変位の範囲は小さくなると推察される。次に、実験終了時の土堤変状が同程度のケースを比較すると、S-I-L の土堤中央の最大水平変位量は 0.16 であり、M-I の 2 倍大きい。よって、小型土堤で中型土堤と同じ同程度の変状を発生させるには、土堤の変位量が中型土堤の約 2 倍必要になることが示唆される。

3.2.6 実規模土堤の性能照査に向けた検討

図 15 に模型スケールと衝突時の重錘の運動エネルギーの関係を示す。横軸に土堤高さ (m)、縦軸に重錘エネルギー (kJ) の両対数軸を取り、実験終了時の変状が土堤同程度の M-I と S-I-H をプロットし、得られる近似直線から実規模土堤 (土堤高さ 2.0m) の変状に必要な推定エネルギーを赤丸でプロットした。図 15 より、実規模土堤にて M-I と同程度の変状を発生させるために必要な重錘エネルギーは 37.6kJ であり、これは質量 2.5t の重錘が高さ 1.5m から回転せず、かつエネルギー損失なく衝突する場合に等しい。既往研究⁴⁾より、M-I の損傷具合は軽微であると判断でき、大規模な補修は必要ないといえる。よって、実規模土堤は 2.5t の重錘を高さ 1.5m から衝突させたとしても軽微な損傷であることが示唆される。しかし、既往研究⁵⁾にて、実規模土堤は重錘エネルギー 400kJ 程度の回転衝突ではほとんど損傷が見られなかったことから、载荷条件は異なるものの、本研究の推定値は実規模土堤の性能を過小評価している可能性が考えられるため、実規模土堤で重錘の回転成分を制御した衝突実験を行い、土堤耐力を確認する予定である。

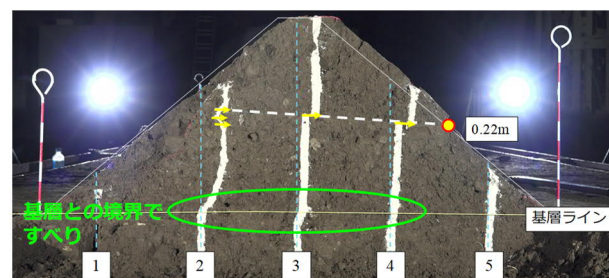
また、中型土堤は落下高さ 6m から繰り返し载荷させても土堤が崩壊する大変形までには至らないこと⁶⁾が報告されており、実規模土堤の吸収可能エネルギーの限界値を推定するためには、小型・超小型土堤のスケールで実験を行うのが効率的といえる。今後は最低限の実規模土堤実験を実施し、スケール効果及び相似則の解明を進めるとともに、小型・超小型土堤の衝撃载荷実験の結果を蓄積し、様々な損傷度レベルと実規模土堤の吸収可能エネルギーを対応させるべく検討を行う予定である。

3.3 静的载荷実験と衝撃载荷実験の比較

図 16 に模型スケールと静的・衝撃载荷時の累積仕事量との関係を示す。仕事量の算出方法について、静的载荷は図 5 の無次元化した荷重-貫入量曲線の横軸とグラフで囲まれる面積を仕事量とした。なお、M-S と S-S は除荷部分を除いた正味の仕事量として算出した。一方、衝撃载荷は無次元化した衝撃力を水平成分と鉛直成分に分解して、静的载荷と比較できるように、水平成分の衝撃力と水平貫入量の積を仕事量と定義し、最大水平貫入時までとした。図 16 について、横軸に最小オフセットラインを原点とした水平貫入量を重錘径で除した水平貫入比、縦軸に無次元化した累積仕事量を取り、衝撃載



(a) M-I



(b) S-I-H

図 13 土堤断面変状

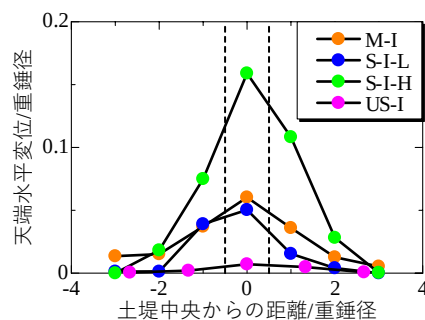


図 14 土堤天端の水平変位 (正規化)

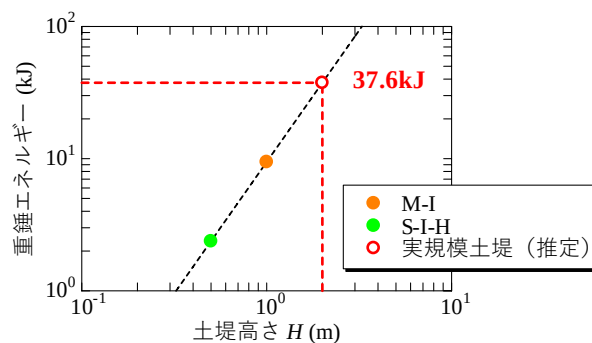


図 15 重錘エネルギーと土堤高さの関係

荷を実線、静的载荷を破線で示し、土堤表面変状のイベント (曲げひび割れ: 四角形, 押抜きせん断ひび割れ: 三角形) をプロットした。ただし、衝撃载荷は最大貫入時までにはイベントが発生しないが、その後発生するケースもあった。図 16 より、まず、衝撃载荷のスケール間

を比較すると、実験終了時の変状が同程度の M-I と S-I-H の水平貫入比に対する仕事量の傾向は概ね一致していることが分かる。曲げひび割れ発生時の水平貫入比は M-I で 0.24, S-I-H で 0.31, その時の仕事量は M-I で 5.73, S-I-H で 7.66 であり、小型土堤の方が変状発生に要する貫入量及び仕事量は中型土堤に比べて大きく、これは先述したスケール効果により小型土堤の方が中型土堤に比べて相対的に貫入抵抗が大きいと考える。M-I と S-I-H の比較より、模型スケールが異なる実験において、無次元化した仕事量と水平貫入比の関係が同じであれば、同程度の変状を発生させることができるといえる。

次に、静的・衝撃载荷を比較すると、静的载荷は重錘を貫入し続けることができるため、累積仕事量の最大値は衝撃载荷に比べて大きい。最大貫入時までは衝撃载荷の方が大きいことが分かる。中型土堤の曲げひび割れ発生時に着目すると、図 16 より、水平貫入比は M-S で 0.29 であり、M-I の方が 0.8 倍小さい。そして、累積仕事量は M-S で 1.32 であり、M-I の方が 4.3 倍大きい。一方、小型土堤の曲げひび割れ発生時に着目すると、水平貫入比は S-S で 0.40 であり、S-I-H の方が 0.8 倍小さい。そして、累積仕事量は S-S で 3.95 であり、S-I-H の方が 1.9 倍大きい。以上より、異なる模型スケールにおいて、相対的な仕事量と貫入量の関係が同じ場合、曲げひび割れの発生に要する水平貫入量の衝撃载荷と静的载荷の比は同程度であることから、重錘の载荷速度が土堤の変形・破壊挙動に与える影響はスケールに依存しないことが推察される。

4. まとめ

本稿では、落石防護土堤のスケール効果及び相似則の解明を目的に、静的・衝撃载荷実験を実施した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 静的载荷実験より、土砂材料で構築した土堤において、模型スケールが小さいほど土堤の貫入抵抗及び変状範囲が大きくなるスケール効果が確認された。また、静的载荷時の土堤耐力は土堤高さの比の 2.2 乗に比例することが分かり、実規模土堤(高さ 2.0m)は最低 124kN の耐力を発揮することが示唆された。
- 2) 衝撃载荷実験より、幾何学的に相似させた载荷条件のケースでは、模型スケールが小さいほど最大貫入量は相対的に小さくなる傾向が見られた。また、実験終了時の変状が同程度の異なる模型スケールの比較より、重錘の貫入量が同じであれば土堤の変形・破壊挙動は概ね一致することが推察される。
- 3) 重錘質量と衝突時のエネルギーが小さい場合、土堤は弾性的な挙動を示すことで貫入抵抗が大きくなり、大きい場合、土堤は塑性的な挙動を示すことで貫入抵抗が小さくなることを示唆された。
- 4) 変状が同程度の場合、中型土堤は衝突部周辺の領域が圧縮変形する一方で、小型土堤は基層との境界を

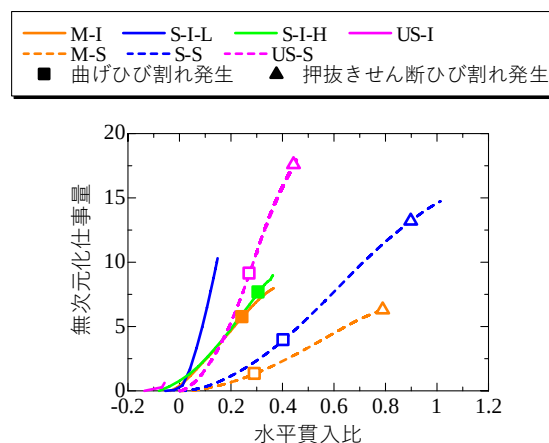


図 16 重錘仕事量と水平貫入量の関係（無次元化）

すべるように変形したことから、スケール効果によって土堤の変形・破壊挙動は変化すると推察される。

- 5) 幾何学的に相似させた载荷条件では、模型スケールが小さいほど土堤天端の水平変位量は相対的に小さくなる傾向が見られた。
- 6) 模型スケールが異なる実験においても、スケール効果はあるものの、無次元化した仕事量と水平貫入比の関係が同じであれば、同程度の変状を発生させることが可能であると推察される。
- 7) 異なる模型スケールにおいて、相対的な仕事量と貫入量の関係が同じ場合、曲げひび割れの発生に要する水平貫入量の衝撃载荷と静的载荷の比は同程度であることから、重錘の载荷速度が土堤の変形・破壊挙動に与える影響はスケールに依存しないことが示唆された。

謝辞

本研究の成果の一部は、国土交通省・2024 年度「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の委託研究、科学研究費（研究課題 23K26195）の援助を受けたものである。末筆ながら深謝の意を示します。

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) 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载荷実験, 第36回中部地盤工学シンポジウム, pp. 70-78, 2024.
- 3) The European Organisation for Technical Assessment (EOTA): Falling Rock Protection Kits, EAD 340059-00-0106, 2018.
- 4) 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年次技術研究発表会, A-4-07, 2024.
- 5) 杉山直優, 前田健一, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 今野久志, 内藤直人：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.
- 6) 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：载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.