

# 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

Static loading tests of medium-scale rockfall protective soil embankment constructed with sandy soil

(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正 員	中村拓郎 (Takuro Nakamura)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	○正 員	石原寛也 (Hiroya Ishihara)
名古屋工業大学大学院	学生員	磯合凌弥 (Ryoya Isoai)
名古屋工業大学大学院	正 員	前田健一 (Kenichi Maeda)
豊橋技術科学大学	正 員	内藤直人 (Naoto Naito)

## 1. はじめに

落石防護土堤は、エネルギーが大きい跳躍高は小さいと想定される落石への対策工のひとつである。構成材料として現場発生土が利用可能であり、施工も容易なことから、写真-1 に示すように道路と斜面に十分な空間がある場合など、現場条件によっては擁壁や防護柵等の他の対策工に比べて経済的な対策となる場合もある。

落石防護土堤の設計は、落石対策便覧<sup>1)</sup>や道路土工指針<sup>2)</sup>等を参考に行われており、落石対策便覧では、落石防護土堤の形状は、落石の衝撃荷重に対する耐力および落石のかけ上り、飛越しに対する安全性に対して検討を行うとともに、土堤としての安定性や、必要に応じてのり面浸食等に対して検討を行う必要があるとされている。しかしながら、これらの具体的な照査手法は明示されておらず、現在の設計は、研究例として掲載されているRitchieの落石防止溝の寸法表<sup>3)</sup>を参考に形状が決定される場合と、質点系の落石シミュレーションによって落石が土堤を飛び越えないことを検証する場合に大別される。落石の運動エネルギーを吸収・消散させるという設計の考え方は示されつつも、それらを具体的に照査する性能設計には至っていないのが現状である。

現場発生土等の土質材料を使用した落石防護土堤は、その汎用性や経済的貢献も期待されることから、性能比較等も行えるように、早急に性能設計を確立することが望ましい。そのためには、実験等によって基本的な性能検証を行うとともに、その性能を照査する技術を確立する必要がある。本研究では、落石防護土堤の性能設計の確立に向けた実験的検証の一環として、落石防護土堤の耐荷性能や破壊性状を確認することを目的に、砂質土で構築された実規模の1/2スケールを想定した中型模型を対象に静的載荷実験を実施した。



写真-1 落石防護土堤の一例

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

載荷実験の全景を写真-2 に、実験概要図を図-1 に示す。試験体は、基層部と実規模の1/2スケールを想定した土堤部で構成される縮小模型とした。基層部は、高さ600mm、幅4,100mmの断面で、延長6,600mmとした。土堤部の断面は、1:1.2の法面勾配となるように、高さ1,000mm、天端幅200mm、底面幅2,600mmの台形状とし、延長は4,600mmとした。構成材料には、基層部、土堤部ともに埋砂・路盤用の砂を用いた。骨材試験成績一覧表に示される粗粒率は1.01、表乾密度は2.53g/cm<sup>3</sup>、絶乾密度は2.44g/cm<sup>3</sup>、吸水率は3.91%であった。

基層部はコンクリート基礎の上に山留材を配置して砂を充填し、土堤部はその上に構築した。試験体の構築に際して、基層部は厚さ300mm毎に、土堤部は250mm毎に砂を敷き均し、振動締め固め機を使用して成形した。



写真-2 載荷実験全景

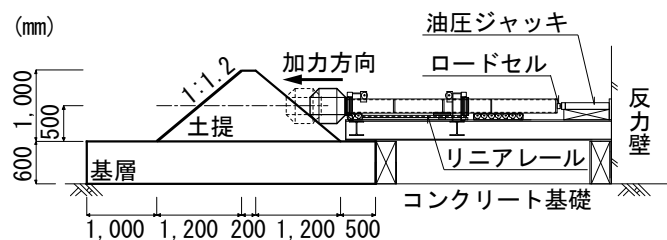
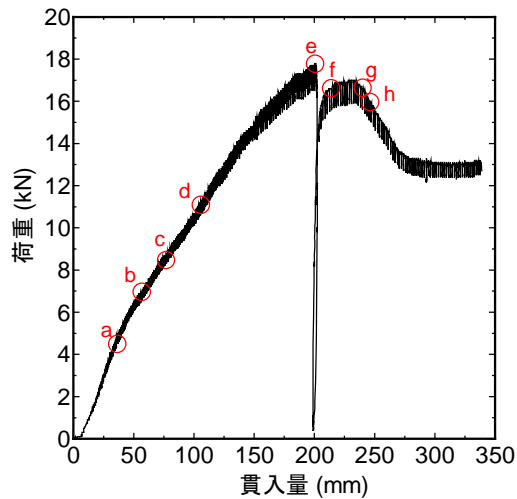


図-1 実験概要図



注) 図中の記号は写真-3の各写真に対応

図-2 荷重-貫入量関係

## 2. 2 荷重方法と計測項目

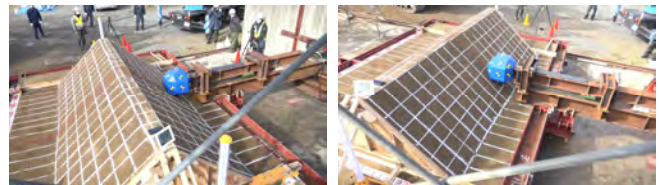
荷重は、容量 200kN、ストローク 500mm の油圧ジャッキで荷重治具を押し出す水平荷重とした。荷重点は、土堤高さの 1/2 に相当する基層部上面から 500mm の位置とした。荷重治具は、先端に重錘を取り付けた H 形鋼であり、荷重中の水平方向の摩擦を低減させるためにリニアウェイレール架台に設置した。重錘は 1 辺が 500mm の多面体の EOTA 型<sup>4)</sup>であり、厚さ 9mm の鋼板で外枠を製作し、その内部にはモルタル等が充填されている。

計測項目は、ロードセルによる荷重と、ワイヤ式変位変換器による重錘の貫入量とした。荷重中は、ビデオカメラ等で試験体の変状を記録した。荷重実験終了後には、加力方向と平行に土堤部の断面を土堤部天端から徐々に掘削し、土堤内部の砂の状態を観察した。断面観察を補助するために、土堤構築時には、直径 25mm の鋼棒を高さ方向に基層部の中間程度まで貫入することで削孔し、着色砂を充填した。なお、着色砂は、加力方向に 250mm 間隔で埋設している。

## 3. 実験結果

### 3. 1 荷重-貫入量関係

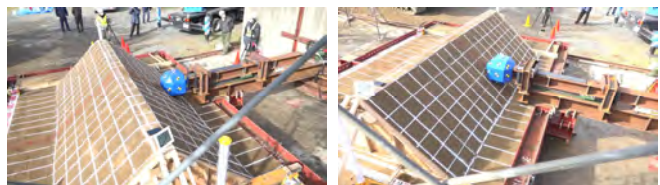
荷重と重錘の貫入量の関係を図-2 に、荷重中の土堤部の背面と荷重面の状況を写真-3 に示す。荷重初期には荷重は貫入量に応じて直線的に増加し、4.5kN で荷重点近傍にひび割れが発生するとともに剛性に変化が認められた。その後、荷重は再び直線的に増加し、7.0kN で荷重点近傍に 2 つめのひび割れが、8.5kN で荷重点の上方に剥離が、11.0kN で荷重点から延長方向に水平なひび割れが観察された。17.8kN まで加力を続けた後、カメラのバッテリー交換のために荷重を一時中断した。再加力後には、荷重は除荷直前の 17.8kN には到達せず、16.6kN で土堤部の天端に斜め方向のひび割れが発生し、土堤背面にも水平方向のひび割れが観察された。その後、16.0kN まで荷重が低下した際に、押抜き破壊を確認した。加力を継続したところ、約 13kN に荷重が収束する傾向を示したことから貫入量 340mm で実験を終了した。



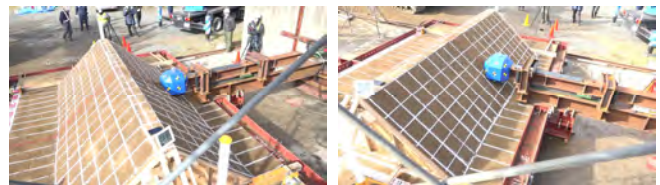
(a) 荷重点近傍にひび割れ発生



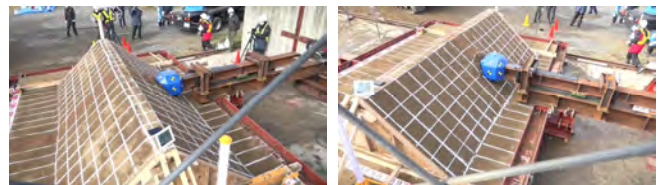
(b) 荷重点近傍に 2 つめのひび割れ発生



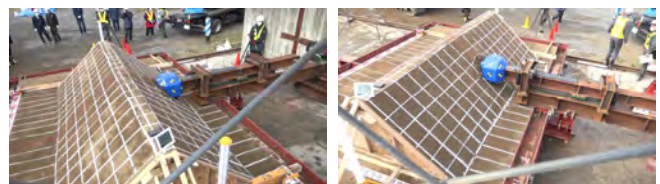
(c) 荷重点の上方にはく離が発生



(d) 荷重点から延長方向に向けたひび割れが重錘背面側に発生



(e) 荷重の一時中断 (最大荷重時)



(f) 天端に 45° のひび割れ発生

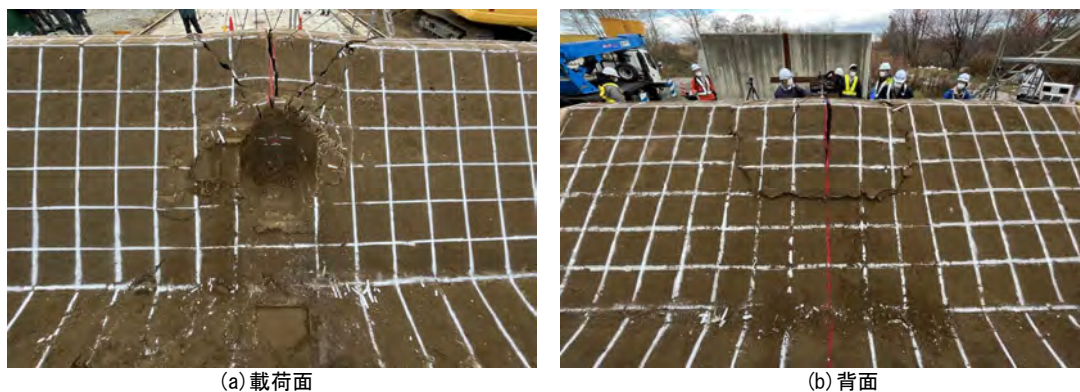


(g) 背面に水平方向のひび割れ発生



(h) 押抜き破壊

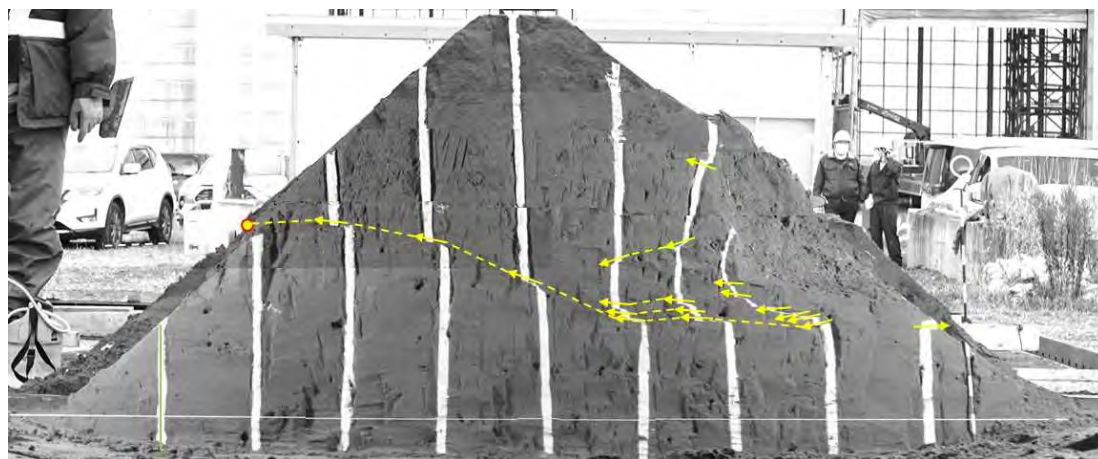
写真-3 荷重中の土堤部の背面・荷重面の状況



(a) 載荷面

(b) 背面

写真-4 実験終了後の載荷面および背面の状況



注) 矢印: せん断面, 破線: 想定されるすべり面

図-3 実験終了後の土堤部の断面の状況

本実験における最大荷重は 17.8kN であり, その際の重錘貫入量は 200mm であった. なお, 最大荷重点では, 土堤部の背面にはひび割れ等の変状は観察されていない.

実験後の載荷面および背面の状況を写真-4 に示す. 載荷面では, 重錘上部から斜め 45° 上方にひび割れが進展しており, 土塊の中央部には縦方向のひび割れも観察された. 背面では, 載荷点である土堤高さの 1/2 の位置付近より上方で土塊の形成が認められ, 土塊の幅は土堤部の延長方向に 1621mm 程度であった.

次に, 実験終了後に掘削した断面の状況を図-3 に示す. なお, 断面の崩壊を防ぐために, 掘削は天端より徐々に行っており, 写真は, 掘削中に定点カメラで撮影した画像を重ね合わせたものである. 載荷中の重錘は, 写真右側の 3 本目の着色砂近傍まで貫入しており, 重錘の貫入に応じた着色砂の移動が認められた. 重錘下面近傍では, 土堤の中央付近まで複数のせん断面が生じており, このせん断面の最下段から土堤背面の土堤高さ 447mm の点を結ぶようなすべり面が観察された. なお, すべり面より下側および基層部では, 着色砂の明確な変形は認められなかった.

#### 4. おわりに

本研究では, 落石防護土堤の性能設計の確立に向けた実験的検証の一環として, 砂質土で構築された中型模型を対象にした静的載荷実験を実施した. 本研究における限られた範囲ではあるものの, 落石防護土堤の耐荷性能やその破壊性状を確認することができた. 今後は, より小さな縮尺模型や実規模大の試験体の耐荷性能や破壊挙動, 衝撃荷重が作用した際の破壊挙動等との比較を行うとともに, 個別要素法等による実験結果の再現解析を行うことで, 落石防護土堤が有する落石エネルギーを吸収・消散機構に関する検討を継続する予定である.

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会: 落石対策便覧、2017.12
- 2) 公益社団法人 日本道路協会: 道路土工一切土工・斜面安定工指針, 2009.6
- 3) Ritchie, A. M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No. 17, pp.13-28, 1963.
- 4) European Organisation for Technical Approvals: Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits, 2013.