

# 静载荷実験および二次元 DEM 解析による落石防護土堤の静的破壊挙動

Static failure behavior of rockfall protective soil embankment by static loading tests and 2D-DEM analysis

名古屋工業大学	○学生員	近藤慶亮 (Kondo Keisuke)
名古屋工業大学	正員	前田健一 (Kenichi Maeda)
名古屋工業大学	学生員	磯合凌弥 (Ryoya Isoai)
名古屋工業大学	学生員	木村絢 (Aya Kimura)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正員	中村拓郎 (Takuro Nakamura)
(株) 構研エンジニアリング	正員	鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
豊橋技術科学大学	正員	内藤直人 (Naoto Naito)

## 1. はじめに

落石対策工の主な設計マニュアルに位置付けされている落石対策便覧<sup>1)</sup>に示される落石防護土堤(以下、単に土堤と示す)は土のみで構成され、施工方法が比較的容易かつ経済面で優れている。しかし、土堤の落石エネルギーの吸収・消散のメカニズムについて概要が文言として記述されているのみで、定量的には示されていないのが現状である。そこで、本研究では土堤の耐荷性能および破壊性状の把握のため、実規模の1/2スケールの土堤を対象とした静的载荷試験を実施した。また、2次元個別要素法(Discrete Element Method, 以下、2D-DEMと略す)を用いて静的载荷試験の数値解析を実施した。

## 2. 実験・解析概要

### 2.1 試験体概要

実験概要図を図-1に、実験風景写真を図-2に示す。実験は重錘に接続した油圧ジャッキにより、土堤に水平に载荷させた。なお、試験体となる土堤は、砂を用いて断面形状が高さ1.0m、天端幅0.20m、法面勾配1:1.2になるように作成し、土堤下部には同一材料で厚さ0.60mの基礎地盤を設けた。重錘は表-1の寸法で、図-3に示すEOTA型重錘<sup>2)</sup>を使用した。

### 2.2 施工方法及び計測方法

試験体構築にあたり、土堤は厚さ0.25m毎に、基礎地盤は0.3m毎に敷き均し、振動締固め機を使用して締め固めて構築している。実験における計測項目は、ロードセルによる载荷荷重、ワイヤ式変位変換器による水平方向の重錘変位量、ビデオカメラによる土堤変状計測および土堤载荷点内部に埋設した着色砂による土堤断面の変状である。

### 2.3 数値解析概要(2D-DEM)

本解析は、中型土堤に対する静的载荷実験の計画を立てる際の事前解析の位置づけで実施したものである。図-4に2D-DEMによる数値解析の解析モデルを示す。2D-DEMによる数値解析は既往の研究<sup>3)</sup>で用いたモデルを参考に解析パラメータを設定し実施した。土堤の断面形状は実験と同じ条件である。表-2に解析パラメータを示す。粒子直径は、最大粒径が重錘直径の1/10以下が望ましいとした既往研究<sup>4)</sup>を参考に、最大粒径は重錘径の1/20、最小粒径は最大粒径の半分とした。

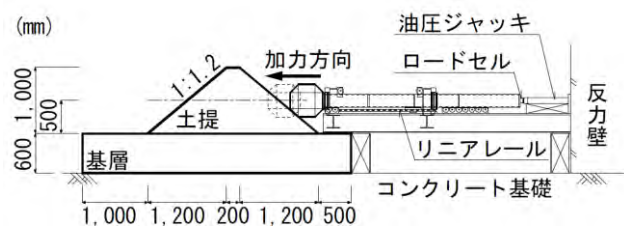


図-1 実験概要図

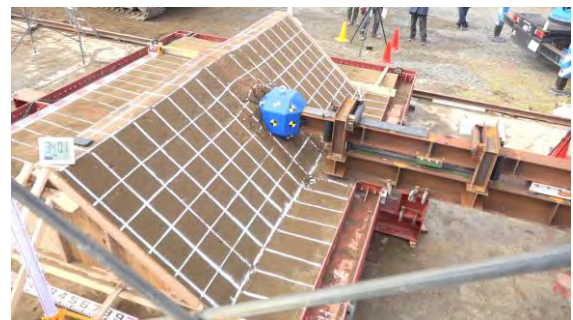


図-2 実験風景写真

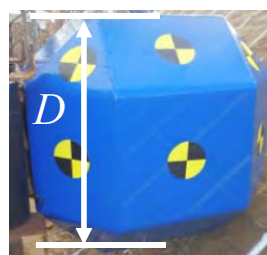


図-3 EOTA型重錘

表-1 重錘形状寸法

質量 M (kg)	一辺の長さ D (m)
234.5	0.5

また、ボンド強度について、表-2に示す解析パラメータで掘削解析<sup>5)</sup>を実施し、自立高さとの関係より算出した。これに、既報<sup>6)</sup>における実規模土堤の限界自立高さが1.82mであったことを踏まえ、ボンド強度を設定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 土堤の破壊形状

#### (1) 土堤法面の変状

表-2 解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	$D$ (m)	
	最大粒径 $D_{max}$	0.025
	最小粒径 $D_{min}$	0.0125
	平均粒径 $D_{50}$	0.0375
粒子の密度	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2650
法線方向ばね定数	$k_n$ (N/m)	$2.0 \times 10^7$
接線方向ばね定数	$k_s$ (N/m)	$5.0 \times 10^6$
粒子間摩擦角	$\phi_u$ (deg.)	25
減衰定数	$h$	1.0
ボンド直径	$D_b$ (m)	0.0125
ボンド強度	$s_b$ (Pa)	$2.0 \times 10^6$

図-5 に荷重終了時の土堤法面の様子を示す。図-5より、荷重痕は横幅0.47m、縦幅0.6m、深さ0.22mであり、非荷重面では横幅1.62m、法面0.89mの範囲に押抜き破壊による変形が発生していた。

(2) 土堤断面変状

図-6 に荷重終了時の土堤断面を示す。土堤内部に埋設させた着色砂を荷重面側から①から⑨としている。また、せん断していた着色砂の箇所と方向を黄色矢印で示し、せん断から予想したすべり線を黄色破線で示す。なお、赤線で荷重前と荷重終了後の重錘を示す。図-7 には、数値解析における貫入量0.1mと0.25mにおける土堤断面に作用する応力分布を示す。応力コンターの値は図中に示す通りである。また、図中の白破線にあたる辺をそれぞれ辺(a)、(b)とする。

図-6 に示す断面内の着色砂に着目すると、非荷重面のクラックにつながる想定すべり線は、荷重面から④まで概ね水平方向に発生しているが、その後は天端方向に延びていき非荷重面のクラックで抜けたと考えられる。これは、図-7 から時間の経過とともに赤枠で示す土堤上部に働く応力が大きくなっていることより推察される。辺(a)で示す面のみが接触している貫入量0.1m時点では概ね一定の高さで水平方向に応力が伝播していくが、辺(b)で示す面が接触する貫入量0.25m時点では土堤上部に働く応力が大きくなるため、着色砂④までは水平方向のすべり線が、着色砂⑤以降では天端方向にすべり線が進展したと考えられる。

3.2 実験結果と数値解析結果の比較

(1) 土堤断面変状の比較

図-8 に、実験終了時における重錘の貫入量(0.34m)となった時刻における土堤断面を示す。図中の茶色に着色した粒子は実験時に埋設した着色砂と同様の配置としている。天端中央から左右に合計9本の格子は実験における着色砂と同位置である。

まず図-6 より、荷重面から非荷重面方向のせん断を正方向とすると、実験における着色砂①以外のせん断面は正方向にずれているのに対して、着色砂①のみ負方向にずれている。しかし図-8 において着色砂①にあたる格子は正方向にずれていることから、実験において荷重

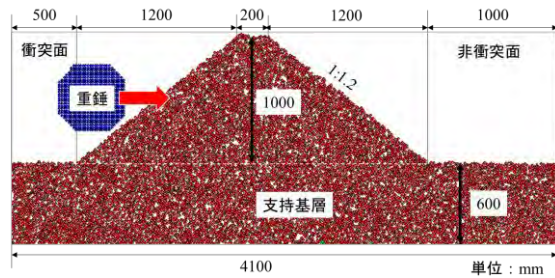
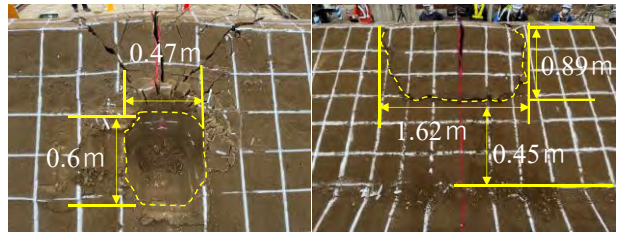


図-4 2D-DEMの解析モデル



(a) 荷重面状況 (b) 非荷重面状況

図-5 荷重終了時の土堤法面の様子

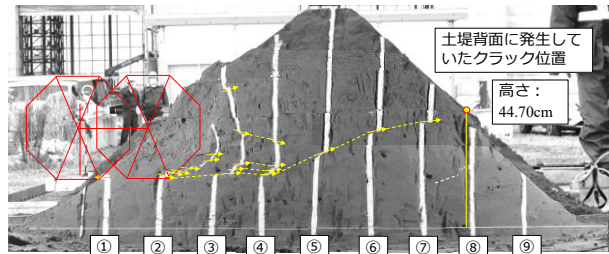
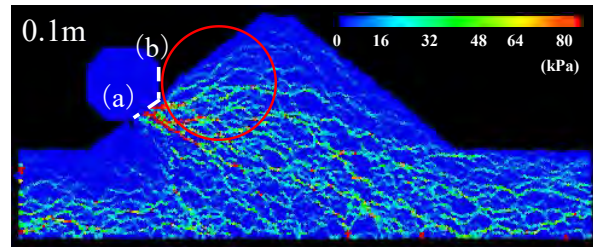
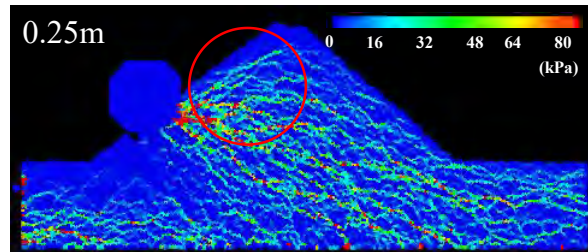


図-6 荷重終了時における土堤断面



(a) 貫入量 0.1m



(b) 貫入量 0.25m

図-7 土堤変形挙動 (単位: N/m<sup>2</sup>)

終了後重錘を引き抜いた際にこの負方向のすべりが生じた可能性が考えられ今後の課題である。

また、数値解析で設定している粒径(平均粒径:

37.5mm) が実験で使用した土砂材 (平均粒径: 0.3mm) と比較して大きいことからせん断の発生を的確に観察することは困難であった。今後はせん断の発生を観察するため計算コストを考慮した上での最適な粒径を検討する。

次に、基礎地盤に着目すると、解析結果では基礎地盤の格子が斜めに变形しているのに対し、実験においては基礎地盤における着色砂の变形は見られなかった。これは、数値解析上での粘着力が実験での粘着力より大きくなったことから、粒子間で引張り力が大きく作用し、重錘周辺の粒子の変位に基礎地盤の粒子が引っ張られたことが原因と考えられる。また、数値解析上での粘着力が実験での粘着力より大きくなった点に関しては 3.2 (2) 項で詳しく述べる。

#### (2) 荷重変位曲線の比較

図-9 に数値解析と実験における荷重貫入量曲線を示す。横軸に貫入量 (m)、縦軸に載荷荷重 (kN) をとり、青線が数値解析結果、赤線が実験結果を示す。また、非載荷面にクラックが発生した時刻を黄色プロット、最大荷重となった時刻を黒色プロットで示す。表-3 に図-9 でプロットした時刻における貫入量と荷重を示す。

表-3 から、実験よりも数値解析の方が最大荷重は約 1.5 倍、貫入量は約 1.8 倍であった。このことから今回数値解析で用いたボンド強度が大きく粘着力が実験よりも大きく作用していたと考えられる。しかし、非載荷面にクラックが発生した際の荷重は同程度の値であることがわかる。ここで、ピーク荷重を迎えるまでは土堤は粘着力と摩擦力をもって重錘の貫入に抵抗している。しかし、ピーク荷重を越え非載荷面にクラックが生じ、荷重が非載荷面に抜けると粘着力が著しく低下し摩擦力が支配的になると考えられる。したがって、粘着力を制御するパラメータであるボンド強度については、今後検討が必要と考えられる。一方で、摩擦力を制御するパラメータである内部摩擦角や粒子形状については実験結果を再現するにあたり概ね精度よく設定できていると考える。この時粘着力を除いた内部摩擦角などのパラメータは、クラック発生時における荷重が実験と解析で同じになったことから、概ね精度よく再現できていると考える。

また、図-9 で最大荷重を示す貫入量以前に着目すると概ね傾きが同程度であり、上述の考察と合わせて、図-9 における赤枠で示す部分に関しては精度よく解析が行えており、今後はボンド強度について検討することで青枠の実験と数値解析のギャップを解消できると考える。

#### 4.まとめ

本研究では、落石防護土堤の基本的な破壊性状の把握と解析パラメータの向上を目的に中型土堤を用いて実験と二次元 DEM 解析で静的載荷実験を実施した。本稿により得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 静的載荷実験において土堤内部のすべり線は、重錘載荷点から水平方向に進展し、重錘の接触面が上方に切り替わることで天端方向に進展していくと推察される。
- 2) 粘着力を制御するパラメータであるボンド強度については、今後検討が必要と考えられるが、摩擦

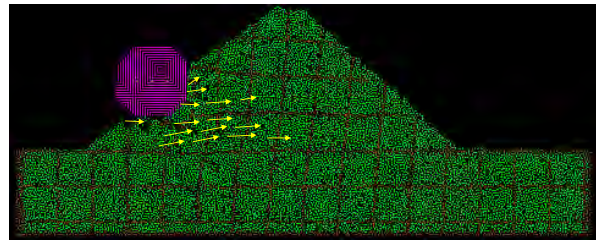


図-8 実験と同貫入量 (0.34m) での載荷断面図

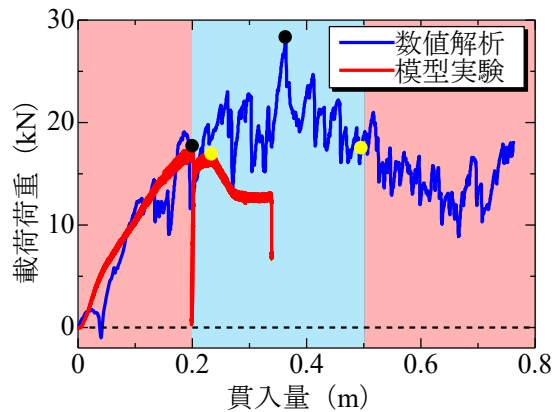


図-9 荷重貫入量曲線

表-3 荷重及び貫入量の比較

	最大荷重時		非載荷面にクラック発生時	
	荷重 (kN)	貫入量 (m)	荷重 (kN)	貫入量 (m)
模型実験	17.7	0.2	16.9	0.234
数値解析	28.3	0.364	17.5	0.496

力を制御するパラメータである内部摩擦角や粒子形状については実験結果を再現するにあたり概ね精度よく設定できていると考える。

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.
- 2) European Organization for Technical Approvals (EOTA): ETAG27, Guideline for european technical approval of falling rock protection kits, p.34, 2013.
- 3) 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, pp.355-364, 2011.
- 4) 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, 2011 年応用力学論文集, Vol.14
- 5) 内藤直人, 前田健一, 田中敬大, 堀耕輔, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石防護土堤の耐衝撃性能に及ぼす粘着力の影響に関する個別要素法解析, 計算工学講演会論文集, Vol.22, 2017.
- 6) 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.67, 2021