

## 落石防護土堤の破壊挙動に及ぼす落石の载荷速度の影響に関する DEM 解析 DEM analysis of the effect of loading rate of falling rocks on failure behavior of a rockfall protection embankment

Arif Daniel Bin Azmi<sup>1</sup> , 内藤直人<sup>2</sup>, 松田達也<sup>2</sup>, 石原寛也<sup>3</sup>, 前田健一<sup>4</sup>, 牛渡裕二<sup>5</sup>

- 1 豊橋技術科学大学大学院工学研究科・建築・都市システム学専攻
- 2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科・建築・都市システム学系
- 3 土木研究所寒地土木研究所
- 4 名古屋工業大学
- 5 構研エンジニアリング

### 概 要

落石防護土堤は現地発生土のような安価な材料で構築できる落石対策工であり、その性能照査型計法の確立が求められている。土堤の性能を照査するためには適切な破壊モードを予測する必要があるため、落石衝突速度が異なる場合の土堤の破壊挙動を把握しておくことが望ましい。しかし、実規模スケールの土堤に対して落石の载荷速度を制御した実験を実施することは容易ではない。そこで、本研究では、三次元個別要素法を用いて落石防護土堤の破壊挙動に及ぼす落石の载荷速度の影響に関する数値解析的検討を実施した。具体的には、検討手法の妥当性の確認として、実規模スケールの土堤に対する重錘衝突実験の再現解析により解析モデルの妥当性を示した。そのうえで、静的载荷を想定した低速度载荷から落石衝突を想定した数十 m/s の衝撃载荷を実施し、土堤の変形挙動と重錘に作用する荷重の時刻歴波形に及ぼす载荷速度の影響について考察した。

キーワード：落石，落石防護土堤，個別要素法，载荷速度，衝撃

### 1. はじめに

我が国では、豪雨や地震の頻発により巨大落石のリスクが増加している。人命や重要構造物の安全を確保し、交通ネットワークを維持・発展させるためには、大規模落石災害を防止するための合理的な技術を開発することが必要である。落石対策を実施する際には、環境負荷が小さく、低コストで効果的な落石対策工の開発技術の向上の実施が求められている。土のみで構成される落石防護土堤（以下、土堤）は、施工・維持管理が比較的容易な安価な落石対策工であり、注目を集めている。しかし、土堤による落石捕捉メカニズムは十分に明らかとなっておらず、新しい土堤を開発した際には実規模の実証実験により性能が確認されている<sup>例え</sup>ば<sup>り</sup>。そのため土堤の変形メカニズムを解明し、性能照査型設計法を確立することが求められている。

土堤に関する先行研究として、土堤の破壊挙動に関する数値解析的検討<sup>2)</sup>が行われているものの、解析精度は土を用いた緩衝材の衝撃実験との比較によって確認されており、本来は土堤を対象とした実験との比較による妥当性確認が望ましい。土堤の変形挙動を観察するために幾つかの室内模型実験<sup>3)</sup>が実施されているが、非常に小規模である

ため、寸法効果の影響を確認する必要がある。

これらの背景から、近年、土堤の性能照査型設計法を確立するために、土堤材料や法面勾配が異なる土堤実験や2次元個別要素法（以下、DEM）解析によって、系統的な研究が進められている<sup>4)~6)</sup>。一方で、効率的に検討を進めるためには全ての条件を実験的に検討するだけでなく、数値解析的検討を組み合わせることが効果的であると言える。

そこで、本研究では、検討ツールの一つとして3次元DEM解析を用いることとし、解析結果は既往の実験結果<sup>5)</sup>と比較することで妥当性確認することとした。その上で、土堤への一定速度単調载荷解析を行い、土堤の変形挙動と重錘に作用する荷重の時刻歴波形に及ぼす载荷速度の影響を検討した。

### 2. DEM 解析モデル

本章では、DEM 接触モデルの概要を述べる。なお、法線方向成分の計算には Hysteretic linear spring model<sup>7)</sup>を用い、接線方向成分の計算には Linear spring coulomb limit model<sup>8)</sup>を用いた。また、土堤を構成する粒子形状は、計算コスト削減のために球形粒子を用いることとした。

表 1. 実規模落石防護土堤で得られた土堤への落体衝突条件

ケース名	衝突高(m)	衝突高/ 土堤高	衝突角(°)	土堤衝突直前速度				土堤衝突直前エネルギー(kJ)		
				水平速度 (m/s)	鉛直速度 (m/s)	線速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	線速度 エネルギー-Ev	回転 エネルギー-Er	全運動 エネルギー-E
A-M2.5-1	0.59	0.293	21.91	12.46	2.59	12.72	18.61	202.3	65.2	267.5
A-M2.5-2	1.74	0.869	35.52	8.50	0.56	8.86	15.72	98.1	47.4	145.5
B-M1.9-1	1.05	0.523	21.84	9.29	3.01	9.77	14.66	90.7	26.0	116.7
B-M1.9-2	0.93	0.465	20.85	8.18	2.79	8.70	11.96	71.0	18.1	89.1
C-M1.9-1	1.43	0.715	29.31	6.82	1.26	6.94	13.90	60.1	27.6	87.7

## 2.1 回転抵抗モデル

回転抵抗モデルでは、地盤材料の摩擦角に相当するもので、粒子に一定のモーメントを加えている。このモーメントを表す数学式は：

$$M_r = -\mu_r |r| F_n \left( \frac{\omega}{|\omega|} \right) \quad (1)$$

$\mu_r$ は回転抵抗係数であり、この無次元パラメータは、回転抵抗モーメントが粒子に作用する力によって生じるモーメントと相殺されるように定義される。 $F_n$ は粒子間の接触法線力を定義するために使用される。また、 $\omega$ は粒子の角速度であり、回転抵抗モーメントの方向は、この角速度の方向と一致することになる。は粒子の転がり半径で、 $r$ は粒子の重心と接触点を結ぶベクトルである。法線方向接触力と係数 $\mu$ に応じた回転抵抗モデルである。

実験の内部摩擦角は 34.1°であり、簡易な安息角解析を実施した結果、回転抵抗係数が 0.01 のときの安息角は 30°程度であることが分かったため、本解析では 0.01 を用いることとした。

## 2.2 付着モデル

付着モデルは、地盤材料の粘着力に相当するもので、粒子同士が任意の範囲まで近づくと一定の引張力が作用するシンプルな付着モデルである。

$$F_{n,adh} = 0 \quad \text{if } -s_n \geq \delta_{adh} \quad (2)$$

$$F_{n,adh} = f_{adh} g \min(m_1, m_2) \quad \text{if } -s_n < \delta_{adh} \quad (3)$$

$F_{n,adh}$ は法線方向の付着力、 $s_n$ は接触時の法線方向のオーバーラップである。法線方向のオーバーラップは、粒子同士が近づくと正になり、離れる場合は負になると仮定する。 $m$ と $g$ はそれぞれ接触している粒子の質量と重力加速度として定義される。 $\delta_{adh}$ は付着距離であり、2つの粒子間または粒子と境界面との距離が付着距離より小さい場合、付着力は0より大きくなる。さらに、 $f_{adh}$ は付着係数を示している。付着力の値は、粒子重力を $f_{adh}$ 値に乗じた値となる。付着係数が1であれば、付着力は粒子重力に等しい。質量の異なる2つの粒子が接触している場合、重力は最も小さい質量を考慮して計算される。

本解析では、実験時の土堤の限界自立高さとして解析のそれ

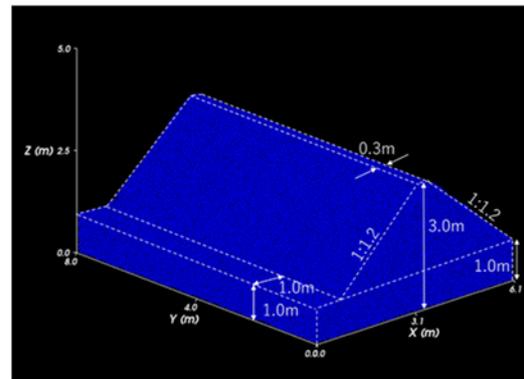


図 1 実規模土堤モデル

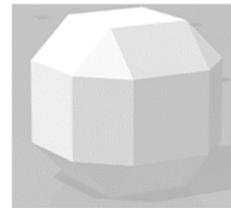


図 2 落石モデル

が一致する付着係数を調べ、付着係数 50 を用いることとした。

## 3. 実規模落石防護土堤実験の再現解析

本研究では、既往の土堤実験<sup>5)</sup>の再現解析を実施した。落体の衝突条件は既報<sup>5)</sup>を参考に表1のように設定している。

### 3.1 再現解析条件（実験ケース）

表1に実験ケース一覧を示す。落体質量 1.9t または 2.5t を土堤中央 ( $y=4.0m$ ) に設置し、表1の衝突条件で解析を実施した。ケース A は質量 2.5t およびケース B, C は質量 1.9t である。

### 3.2 実規模落石防護土堤実験の再現解析の解析モデル

土堤の粒子は球形粒子を用いて、回転抵抗と付着モデルを設定している。解析に使用する球体は、2650kg/m<sup>3</sup>の密度と各サイズ（直径 0.1, 0.0875, 0.075, 0.0625, 0.05m）をそれぞれ同量混合した材料である。土堤の寸法については、図1に示すとおりである。土堤の破壊形状を観察しやすくするため、天端幅は0.3mに設定されている。図2の落体 (EOTA) の STL データを示している。落体の質量と

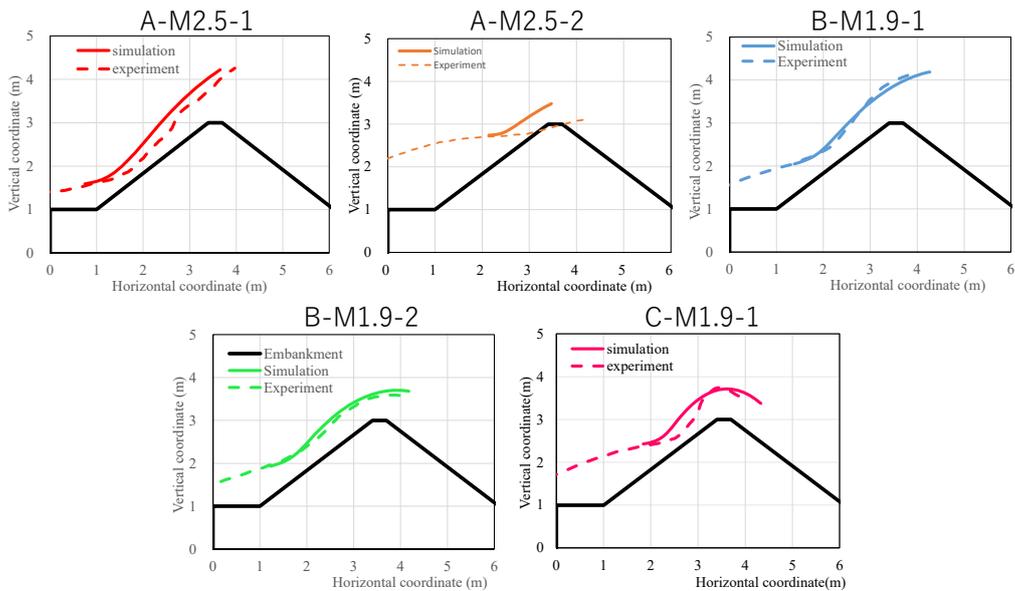


図3 重錘の重心軌跡

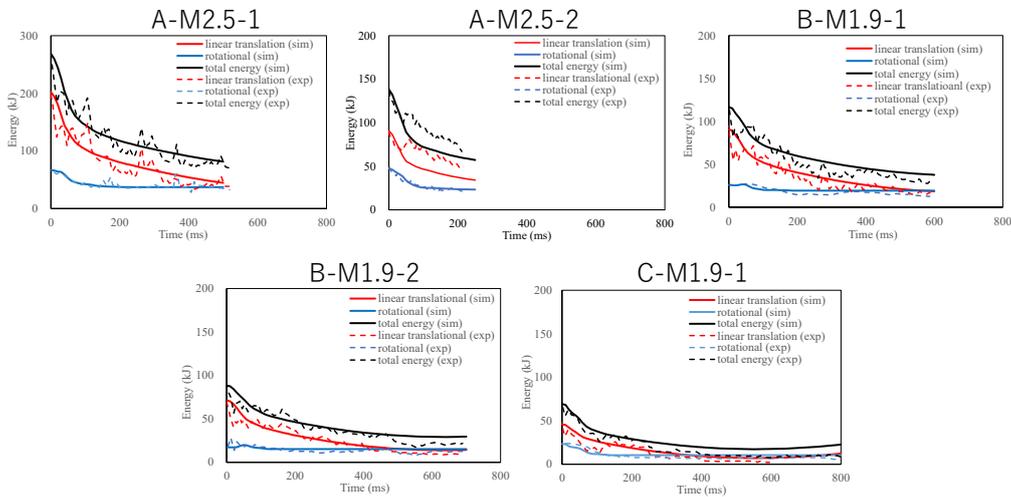


図4 重錘運動エネルギー時刻歴波形

体積は  $1.9t \cdot 0.752m^3$ ,  $2.5t \cdot 0.995m^3$  の 2 種類である。表 2 は本研究における解析パラメータ一覧を示している。

表2 解析パラメータ一覧

パラメータ	単位	設定値
最大粒子直径	m	0.1
最小粒子直径	m	0.05
平均粒子直径	m	0.075
粒子密度	kg/m <sup>3</sup>	2650
ヤング率	N/m <sup>2</sup>	$1.0 \times 10^8$
ポアソン比	-	0.3
摩擦係数	-	0.7
反発係数	-	0.3
回転抵抗係数	-	0.01
付着係数	-	50

### 3.3 再現解析結果

#### 3.3.1 重錘の重心軌跡

図3は重錘重心の軌跡図を示す。重錘の軌跡図による解析結果では、実験と解析の軌跡は概ねに一致していることが分かる。実験結果より概ね再現できていると考えているが、2.5tのケースAの2回目の条件、A-M2.5-2より、実験より解析の方が、土堤の強度が高い可能性が示されている。A-M2.5-2の実験では重錘が通過した結果から土堤天端部分が完全に消滅したが、解析では土堤天端が半分程度残存した。一方、B-M1.9-1、B-M1.9-2は、衝突後は土堤に貫入せず、土堤を乗り越えて通過して、実験を再現することが分かった。ケースCの1回目の条件、C-M1.9-1は、解析の方が土堤への侵入した領域も少なくなったが、2つ目の土堤法尻ラインより乗り越えた後、実験と同じように土堤に再衝突する軌跡となった。また、土堤衝突直前速度が大きくなるほど土堤への重錘貫入量が大きくなった。

#### 3.3.2 重錘運動エネルギーの時刻歴波形

図4は実験と解析の重錘運動エネルギーの時刻歴波形を示しており、実験と解析のエネルギー推移は概ねに一致していることが分かる。A-M2.5-2は、解析の方が土堤に

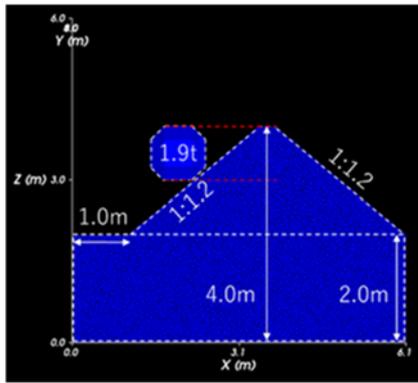


図5 一定速度単調載荷解析の土堤モデル

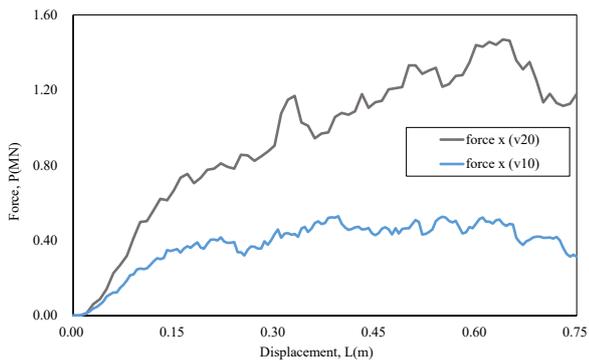
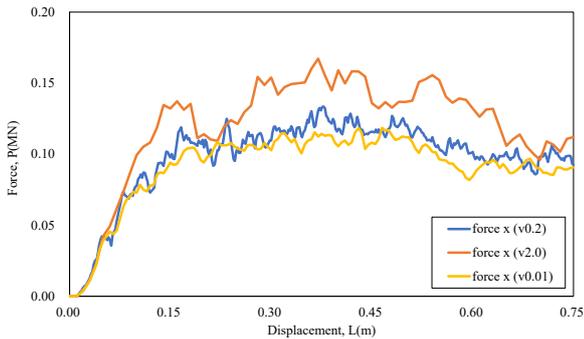


図6 荷重－変位関係図

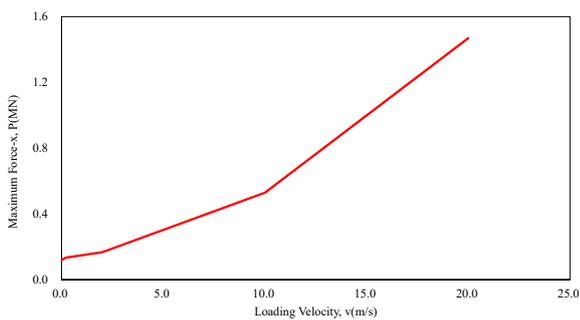


図7 ピーク荷重－載荷速度関係図

跳ね返されるような挙動となっているため、重錘のエネルギーが大きく損失していた。

#### 4. 落石防護土堤への一定速度単調載荷解析

本章では、落石防護土堤の変形挙動を観察するために重錘を一定速度単調載荷させる解析を実施した。解析パラメータは前章と同様である。

##### 4.1 一定速度単調載荷解析モデル

落石防護土堤への一定速度単調載荷解析モデルは図5に示すとおりである。質量1.9tのサイズの重錘を水平方向(x方向)にL=0.75mの変位となるまで一定速度で載荷する解析を実施した。載荷速度は0.01, 0.2, 2.0, 10, 20m/sの5ケースである。載荷位置は、重錘上端と土堤天端の高さが同じとなるように設定している。重錘に作用する荷重の時刻歴波形と土堤の変形挙動を考察する。

##### 4.2 一定速度単調載荷解析結果および考察

###### 4.2.1 荷重－変位関係

図6は荷重－水平変位関係を示している。載荷速度0.01, 0.2m/sのケースは、載荷速度が異なるのに、荷重－変位関係が概ね同じ結果となった。載荷速度2m/sのケースは最大荷重が若干大きくなるが、重錘の水平変位がL=0.075mまでの領域における立ち上がり勾配は、3ケースとも同様の結果となった。

載荷速度が2m/sよりさらに大きい載荷速度10, 20m/sのケースでは、載荷速度に応じて立ち上がり勾配、ピーク荷重ともに大きくなる結果が得られた。また、ピーク荷重となる水平変位も載荷速度とともに増加することが分かる。載荷速度0.01, 0.2, 2.0, 10m/sのケースは、水平変位が0.4m程度の位置で最大荷重となった。しかし、載荷速度が最も大きい20m/sのケースは水平変位L=0.65m程度で最大荷重となった。

###### 4.2.2 ピーク荷重－載荷速度関係

図7は最大荷重－載荷速度の関係を示している。一定速度単調載荷条件では、載荷速度の増加に伴って最大荷重が指数関数的に増加することが明らかとなった。

###### 4.2.3 載荷速度が土堤変形挙動に及ぼす影響

図8は土堤の中央断面および見下げ図の変位分布を表している。水平変位L=0.375mは載荷速度10m/s以下のケースが概ねピーク荷重となるタイミングである。このとき、土堤の見下げ図の変位分布より、変形領域の拡がり角度が概ね同じである。また、載荷速度10, 20m/sのケースでは、土堤の粒子はカラーマップの最大色、赤色(変位量0.09m以上)で示されている領域が載荷速度2m/s以下のケースと比べて小さく、中央断面変位分布による角度は急勾配になる。載荷速度が低い2m/s以下のケースの方が、土粒子の変位量が大きくなっていることが分かる。

平変位L=0.65mでは、載荷速度20m/sのケースがピーク荷重になる変位量である。載荷速度10m/s以上のケースの変形領域は狭くなっていることが分かる。これは、載荷速度が大きいケースでは、同じ水平変位に達するまでの時間が短く、土堤の変形が完了していない可能性があるため、土粒子の変形領域が小さくなっているものと考えている。水平変位L=0.75mでは、中央断面の変形より、載荷速度が大きいケース、特に20m/sでは、変形領域が基盤層にまで及んでいることが分かる。土堤と基盤層の材料が異なる場

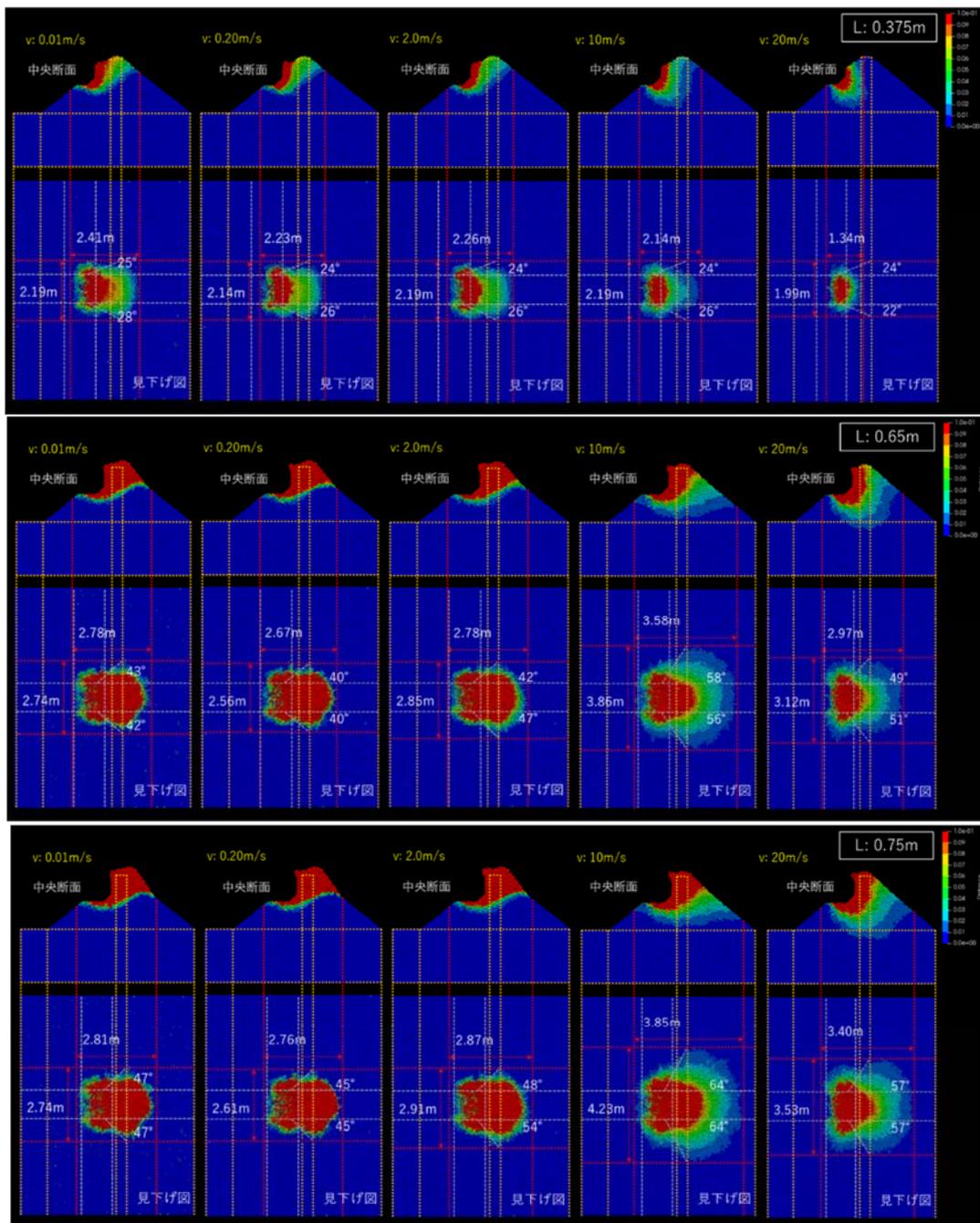


図8 載荷速度が異なる一定速度単調載荷時の土堤の変位分布

合には、より複雑な変形挙動となる可能性がある。載荷速度 0.01, 0.2, 2.0m/s のケースは、載荷速度が異なるものの、中央断面および見下げ図の変位分布は概ね等しくなる。載荷速度 10m/s 以上のケースでは、載荷速度が大きくなるほど変形領域が局所化している。

図9は、載荷速度 20m/s の一定単調載荷解析および初速度 20m/s の自由衝突解析の結果を示している。一定速度単調載荷解析は載荷速度が変わらない極端にシンプルな解析条件であったが、自由衝突条件においても、一定速度単調載荷解析と類似した変形挙動に見える。

図10は、一定速度単調載荷において、重錘の水平変位が  $L=0.75\text{m}$  となった瞬間に載荷速度を  $0\text{m/s}$  に再設定して、その後の土堤の変位挙動を観察した結果を示している。載荷速度が遅い  $2.0\text{m/s}$  のケースでは、重錘静止から  $0.05$  秒

経過しても土堤の変形領域に変化は見られなかった。一方で載荷速度  $10\text{m/s}$  以上のケースでは、重錘静止後も土堤変形は進行し、重錘静止から  $0.05$  秒後の変位領域は載荷速度に比例して大きくなるのが分かる。

以上の土堤の変形挙動をまとめると、重錘の載荷速度  $2\text{m/s}$  以下の比較的低速の条件においては、載荷速度に依らず土堤の変形領域は概ね同等になることが分かった。載荷速度  $10\text{m/s}$  以上の比較的高速の条件においては、重錘にピーク荷重が作用する時刻に着目すると、重錘速度が大きいほど土堤の変形領域が局所化することが分かった。しかし、重錘停止後の土堤の変形挙動を継続的に観察すると、載荷速度が大きいほど最終的な土堤の変形領域も大きくなるのが分かった。

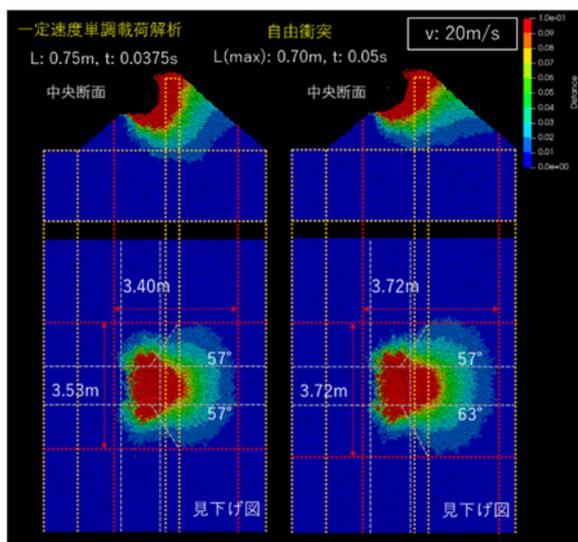


図9 一定速度単調載荷と自由衝突載荷の土堤の変位分布

## 5. 結論

本研究では、土堤の落石捕捉挙動に対する3次元DEM解析の妥当性を調べるため、実規模土堤の重錘衝突実験の再現解析を実施した。DEM接触モデルの回転抵抗係数が地盤の摩擦角を表現し、粒子間付着係数で地盤の粘着力を表現する解析モデルを設定した結果、実規模土堤実験の落石捕捉挙動を概ね再現できることを明らかにした。

上記解析モデルを用いて土堤に対する一定速度単調載荷解析を実施した結果、重錘の載荷速度2m/s以下の比較的低速の条件においては、載荷速度に依らず土堤の変形領域は概ね同等になることが分かった。載荷速度10m/s以上の比較的高速の条件においては、重錘にピーク荷重が作用する時刻に着目すると、重錘速度が大きいほど土堤の変形領域が局所化することが分かった。しかし、重錘停止後の土堤の変形挙動を継続的に観察すると、載荷速度が大きいほど最終的な土堤の変形領域も大きくなることが分かった。

重錘の載荷速度が10m/s以上のケースでは、土堤内部の変形領域が基盤層に達する結果となっており、本解析条件よりも重錘衝突位置が低い場合には基盤層の変形領域がさらに拡大する可能性が高い。

今後は、本解析モデルを用いて重錘載荷位置や天端幅、法勾配の影響などについて検討を進める予定である。また、土堤や重錘の条件が異なる他の実験の再現解析を実施することで、3次元DEM解析による土堤変位分布の予測・評価精度を向上させたいと考えている。

### 参考文献

- 1) Sung, E., Yashima, A., Aminata, D., Sugimori, K., Sawada, K., Inoue, S., Nishida, Y., Numerical assessment of the performance of protecting wall against rockfall. Proceedings of the 5th International Symposium on Earth Reinforcement, Kyushu, Japan, pp. 861-867, 2008.
- 2) Plassiard, J.-P., Donzé, F.-V., Rockfall impact parameters on

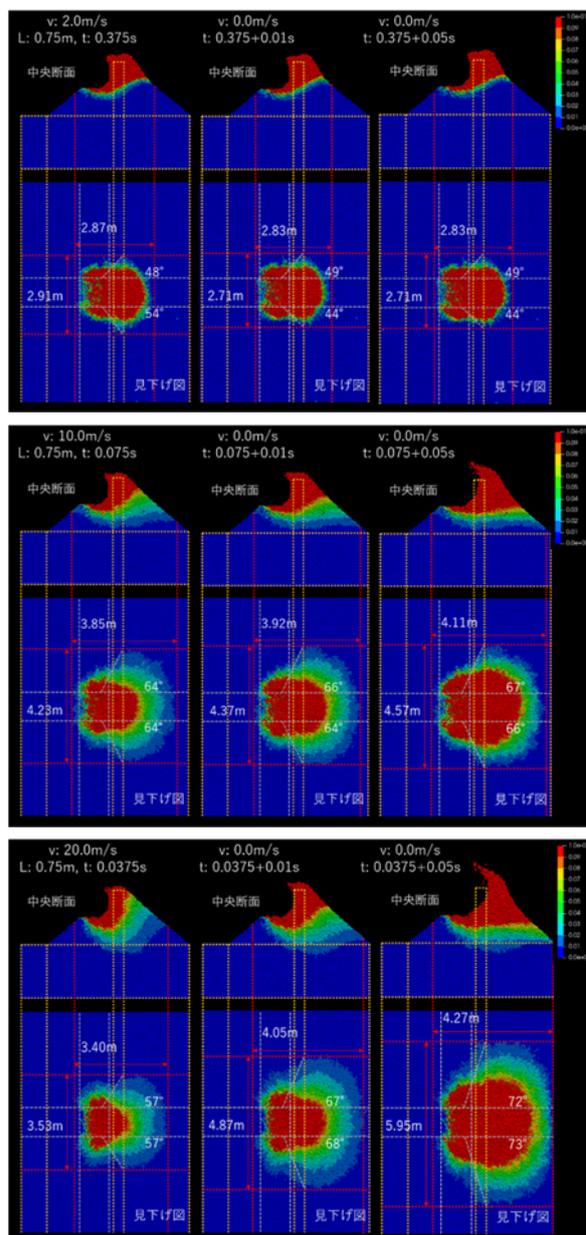


図11 一定速度単調載荷後に0.05秒間土堤変形を進行させた場合の変位分布

embankments: a discrete element method analysis. Structural engineering international 19 (3), pp. 333-341, 2009.

- 3) Kister, B., Horat, P., Berger, T., Quasi-2D-experiments visualization of impacts on embankments. Proceedings of Interdisciplinary workshop on rockfall protection, 2014.
- 4) 松尾和茂, 前田健一, 堀耕輔, 鈴木健太郎, 今野久志: 落石防護土堤の落石捕捉性能把握を目的とした模型実験及び数値解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 75, No. 2(応用力学論文集 Vol. 22), pp. I\_389-I\_400, 2019.
- 5) 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石衝突実験, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 864-877, 2021.
- 6) 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: 土堤材料や重錘質量を変化させた小型落石防護土堤への重錘衝突実験, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp. 985-998, 2022.
- 7) 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.
- 8) 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.