

2次元個別要素法を用いた落石防護土堤の小型模型実験における再現解析

2D-DEM Simulations for reproduce Small-Scale Model Experiments of Rockfall Protective Soil Embankment

松尾和茂*, 前田健一**, 峯祐貴*, 鈴木健太郎***, 川瀬良司****, 今野久志*****

Matsuo Kazushige, Maeda Kenichi, Mine Masaki, Suzuki Kentaro, Kawase Ryoji, Konno Hisashi

*名古屋工業大学大学院, 社会工学専攻博士前期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

** 工博, 名古屋工業大学, 社会工学科教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

***工修, 構研エンジニアリング, 防災施設部主幹 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

****工博, 構研エンジニアリング, 専務取締役 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

*****工博, 土木研究所寒地土木研究所, 総括主任研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1 番 34 号)

キーワード: 落石, 落石防護土堤, 模型実験, 2次元個別要素法解析

Key Words:(rockfall, rockfall protective soil embankment, model experiment, 2D-DEM)

1. はじめに

我が国では, 落石対策工の老朽化や気象条件の変化に伴う落石外力の増加, 発生源の増加といった問題があり, 落石対策工の合理的な設計による対応可能エネルギーの拡大が急務となっている。

落石対策便覧¹⁾に記載されている, 落石防護土堤(図-1に写真を示し, 以降土堤と称す)は, 地形・地質等の現場条件を利用して, 落石のエネルギーの吸収・消散を図ろうとする落石防護工の1種である。土堤は, 土のみで構成されるため, 最も安価かつ容易な落石防護工であり, 比較的大きな落石エネルギーを捕捉することが期待されている。しかし, 先行研究が数少なく, 変形・破壊モードまで考慮された性能評価がなされていないため, 設計法が確立していないのが現状である。

そこで, 本研究では落石防護土堤の設計法確立を最終目的とした種々の模型実験及び数値解析を実施してきた。模型実験では土堤の落石捕捉性能の把握及び, 落石衝突時の落体挙動の把握を目的に, 高さ 500mm の土堤模型を対象とした挙動確認実験を実施した。また数値解析では, 2次元個別要素法解析(Discrete Element Method, 以下DEMと称す)を用いて, 実験の再現解析を実施した。

2. 模型実験の概要

2.1 実験概要



図-1 落石防護土堤の写真

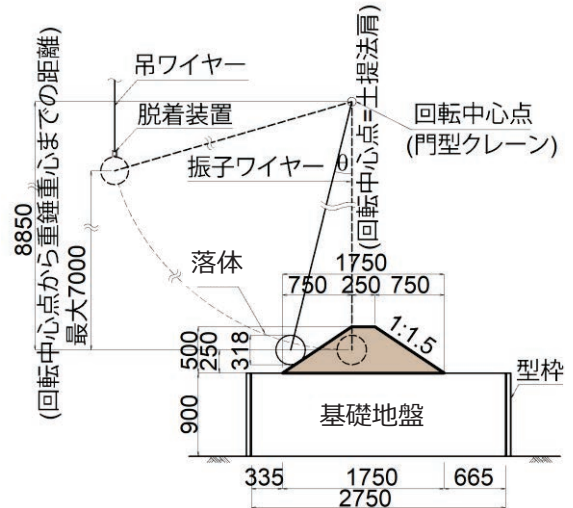
(1) 試験体及び実験実施ケース

図-2に土堤模型の概要図を示す。土堤は高さ 500mm で法勾配は 1:1.5 及び 1:1.0 になるよう作成し, 基礎地盤厚を 900mm 設けた。図-3に使用した落体を示す。なお, 落体の質量はともに 54kg である。実験は, 衝撃載荷と静的載荷の2種類の載荷方法で実施した。衝撃載荷は, 落体を所定の高さから, 振り子運動により土堤に衝突させ, 実験を実施した。振り子運動の回転中心点は土堤の衝突面側の法肩の鉛直上に設定し, 落体の衝突位置が落体重心と土堤底面との距離が 250mm になるよう回転半径を設定した。静的載荷は, 落体に接続した油圧ジャッキにより, 土堤に水平荷重を作用させ, 実験を実施した。載荷速度は 300mm/min で最大ストロークは 300mm である。載荷位置は落体重心と土堤底面との距離が 250mm になる位置に設定した。衝撃載荷実験の状況図と静的載荷実験の状況写真を図-4に示す。

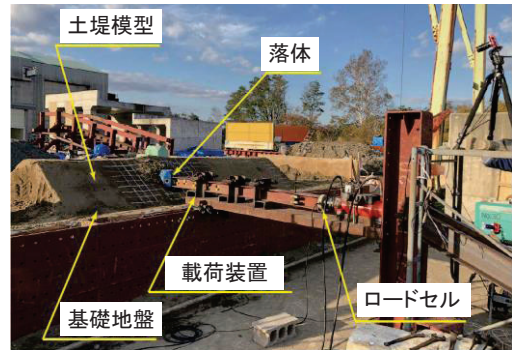
使用した砂の物性値は表-1 の通りである。また、実験ケース一覧を表-2 に示す。なお、衝撃載荷では落体の重心が非衝突面側の法肩よりも奥に移動したケースについては通過、移動していないケースについては捕捉と定義した。

(2) 計測方法

衝撃載荷では、落体挙動と土堤の変状を計測した。落体挙動については、4 台の高速度カメラ (1000fps) を用いて、落体の表面に貼られた複数個のターゲットの挙動を画像解析し、ターゲットの 3 次元挙動を計測した。得られたターゲットの 3 次元挙動から、落体の重心座標を算出し、この重心座標を元に、落体の軌跡、落体速度、角速度、運動エネルギー等を算出した。ただし、画像解析から算出した速度データは、飛散した土粒子によりターゲットが隠れてしまうことが原因で、ノイズが大きくなってしまった。そこで、速度データに関しては、スパイクノイズ (極端に大きい、または小さいデータ) を取り除くため 3word (3ms) の中央値処理を施し、その後、5word (5ms) の短形移動平均処理により、データをスム

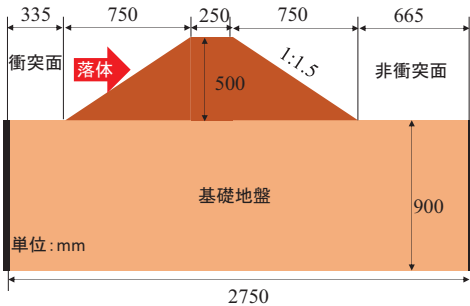


(a) 衝撃載荷実験の様子

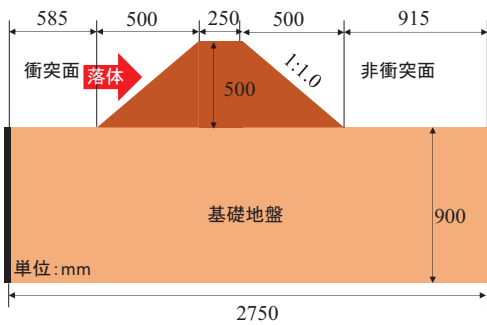


(b) 静的載荷実験の様子

図-4 実験状況

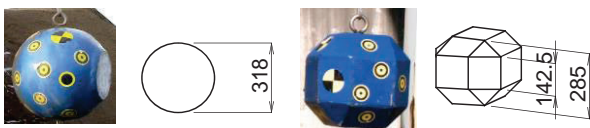


(a) 法勾配 1:1.5 の土堤模型



(b) 法勾配 1:1.0 の土堤模型

図-2 土堤模型の概要図



(a) 球体 (b) 多面体

図-3 実験で使った落体

表-1 実験で使った砂の物性値

項目	単位	試験結果
粗粒率		1.48
表乾密度	(g/cm ³)	2.58
吸水率	(%)	3.24
微粒分量	(%)	2.2
内部摩擦角(φ)	(°)	36.5
粘着力(C)	(kN/m ²)	0.75

表-2 実験ケース一覧

載荷方法	土堤勾配	落体形状	落下高さ	捕捉or通過
衝撃載荷	1:1.5	多面体	1m	捕捉
			2m	捕捉
			3m	通過
		球体	6m	通過
			1m	捕捉
			2m	捕捉
静的載荷	1:1.5	多面体	3m	捕捉
			6m	通過
	1:1.0	球体	3m	通過
			6m	通過

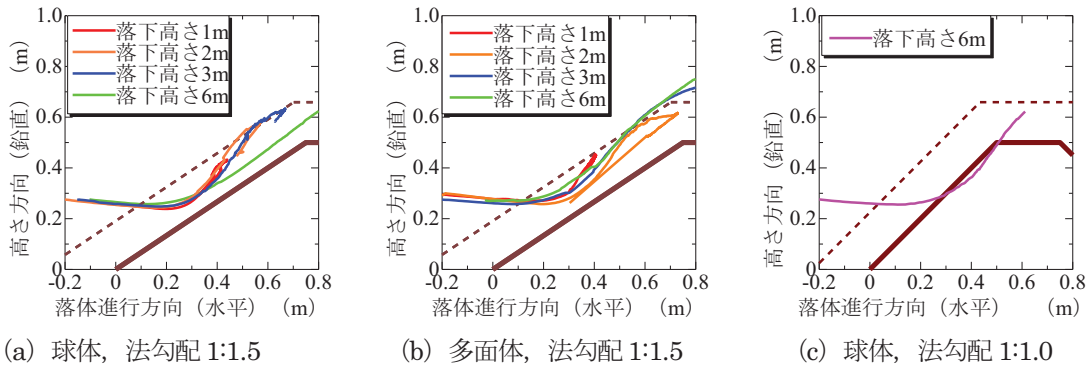


図-5 衝撃载荷実験で得られた落体の軌跡図

ージングした。また、画像解析は、ターゲットが飛散した土粒子の影響で完全に隠れてしまった場合、落体が計測範囲外になってしまった場合、落体が土堤に捕捉された場合のいずれかになった時刻において解析終了とした。土堤の変状については、土堤構築時に土堤内部に着色砂を設置し、落体衝突後に土堤断面を掘削し、掘削断面を画像解析することにより土堤内部の破壊性状を計測した。静的载荷では、ロードセルによる载荷荷重、変位計による水平方向の落体移動量、実験後の土堤写真による土堤の変状の計測を実施した。

2.2 得られた主な知見

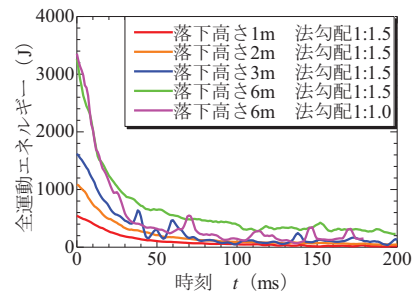
(1) 衝撃载荷実験における落体挙動

衝撃载荷実験で実施した、各ケースにおける落体挙動を図-5に示す。なお、茶色の実線は土堤の位置を示し、茶色の破線は土堤から落体半径分の位置であるオフセットラインを示している。図-5より、落体形状、落下高さ、法勾配に関係なく、落体は土堤に貫入する挙動と土堤法面を駆け上がる挙動が確認された。

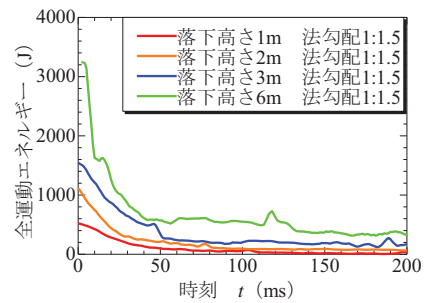
また、図-6に衝撃载荷実験で実施した各ケースにおける落体の全運動エネルギーを示す。なお、グラフ中の一部に全運動エネルギーが一時的に大きくなっている箇所があるが、これは、画像解析のノイズの影響であると考えられる。全運動エネルギーの減少率に着目すると、衝突後約50msにてほとんどのエネルギーが失われていることがわかる。このことから、土堤による落体エネルギーの吸収は、落体衝突直後に発生すると考えられる。この結果は、既往の研究²⁾における数値解析結果と一致する。

(2) 衝撃载荷実験における土堤の変状

図-7に落体衝突後の土堤断面の写真を示す。なお、青線は、色砂のせん断箇所を繋げて作成した、想定すべり線を示す。これらと比較すると、落下高さ(落体衝突時の外力)が大きくなるにつれ、多数のすべり線が発生していることがわかる。また、すべり線は、一方向だけでなく、多数の方向に広がっている場合もあることがわかる。このことについては、3章の再現解析にて、考察をする。



(a) 球体



(b) 多面体

図-6 各ケースにおける全運動エネルギー



(a) 落下高さ 1m



(b) 落下高さ 2m



(c) 落下高さ 3m



(d) 落下高さ 6m

図-7 落体衝突後の土堤断面 (左: 球体, 右: 多面体)

(3) 静的載荷実験における土堤の変状

静的載荷実験では実験後の土堤の変状から、土堤の破壊性状について検討する。

図-8 に静的載荷実験における実験後の土堤写真を示す。なお、非載荷面の写真には黄色の破線で押し抜きせん断クラックを、また、その大きさを黄色実線で記載している (単位 : mm)。

まず、法勾配 1:1.5 の 2 ケースを比較する。載荷面、非載荷面ともに、同様の変形・破壊状況となっているが、載荷面の盛り上がりや非載荷面押し抜き型のひび割れの範囲は多面体の方が球体に比べ小さい。これらの違いは、落体形状の違いによるすべり線の変化によるものと推察している。

次に、落体形状が球体の 2 ケースを比較する。載荷面に着目すると、法勾配 1:1.0, 1:1.5 の両ケースとも同様な変形状況となっているが、法勾配 1:1.0 のケースは法勾配 1:1.5 のケースに比べ亀裂幅が大きい。非載荷面に着目すると、押し抜き型のひび割れの範囲が異なっている。横幅は両ケースとも 1000mm であるが、縦幅は法勾配 1:1.5 のケースは 500mm, 法勾配 1:1.0 のケースは 707mm であった。これらのことから、法勾配を緩勾配にした場合、土堤天端付近にすべり線が発生するため、落体からの力は天端付近に抜ける可能性がある。また、法勾配を急勾配にした場合、落体からの力は土堤上部だけでなく、土堤中央部や底面付近でも作用し、土堤全体に作用する可能性がある。

3. 模型実験の再現解析

本章では、2 次元 DEM 解析を用いて模型実験の再現解析を実施する。検討ケースは、土堤法勾配を 1 : 1.5, 落体形状を円形とした、衝撃載荷実験および静的載荷実験を実施した。

3.1 解析概要

(1) 解析条件

本再現解析には、2 次元 DEM 解析を用いた。既往の研究²⁾では、DEM 解析により、実際に土堤が落石を捕捉した事例を再現することができ、土堤の落石衝突現象に適応可能とされている。

(2) 各種パラメータ

既往の研究をもとに、粒子径³⁾、ばね定数⁴⁾、減衰係数⁵⁾等を設定した。表-3 に設定した代表的なパラメータを示す。

また、地盤の粘着力を再現する試みとしてボンド強度を既往の研究⁶⁾をもとに設定した。既往の研究では図-9 のような関係が成り立つことが分かっている。本解析では地盤に引張クラックが発生する際に粘着力を算定できる下記の式を用いて粘着力を約 3kPa と算定し、この値と図-10 を用いてボンド強度を 0.6MPa と設定した。

$$c = \frac{1}{2} \gamma_t H \quad (1)$$

ただし、 c :粘着力 (kPa), γ_t :湿潤単位体積重量 (kg/m³), H :引張クラックが発生する高さ (m) とする。なお、湿潤単位体積重量を求める際の湿潤密度 ρ_t は実験に用いた土から得た 1510kg/m³ を用いた。また、引張クラックが発生する高さは、実験時の状況より図-10 の写真に示すとおり 40cm と判断した。

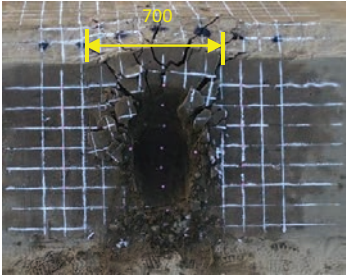

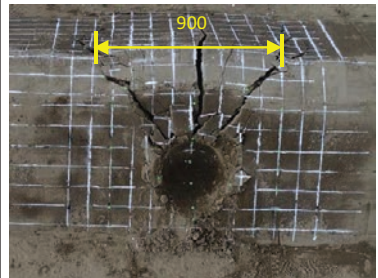
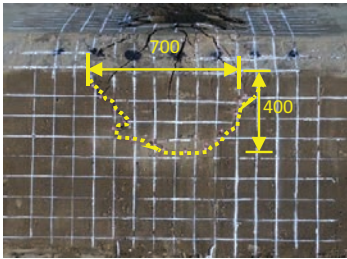
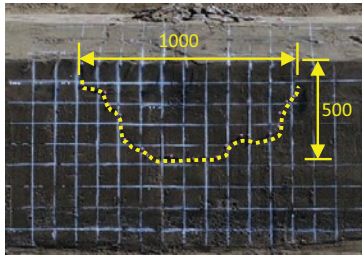
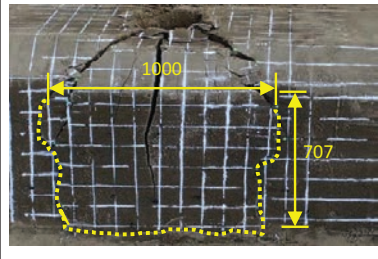
土堤勾配	1:1.5	1:1.5	1:1.0
落体形状	多面体	球体	球体
載荷面			
非載荷面			

図-8 静的載荷実験における実験後の土堤写真 (単位 : mm)

表-3 各種パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{max}	0.0300
	最小粒径 D_{min}	0.0150
	平均粒径 D_{50}	0.0225
粒子の密度	ρ_p (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	k_t (N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_p (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.0150
ボンドばね定数	k_b (N/m)	2.0×10^8
ボンド強度	s_b (Pa)	0.6×10^6

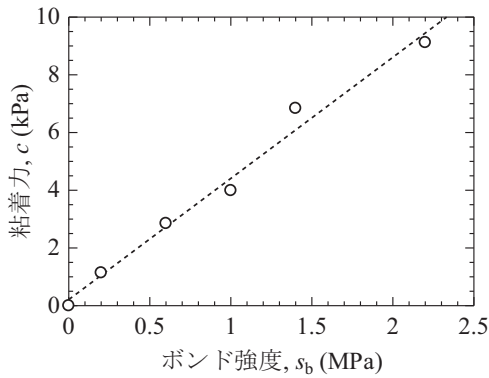


図-9 ボンド強度と粘着力との関係

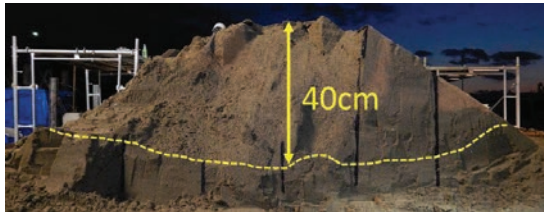


図-10 実験での引張クラック例

3.2 衝撃载荷実験における再現解析

(1) 落体の時刻歴波形の比較

実験結果と解析結果から得られた、落体形状が球体、土堤法勾配 1:1.5 のケースにおける全運動エネルギーの時刻歴波形のグラフを図-11 に示す。グラフより、解析結果は、全運動エネルギーは衝突初期に急激に減少し、その後なだらかな減少傾向を示しており、実験結果の全運動エネルギーの推移状況を概ね再現している。初期運動エネルギーが実験より若干小さくなっているが、これは実験での速度データに 3word の中央値処理及び 5word の短形移動平均処理を施したため速度変化量が若干なだらかになったためである。以上のことから、解析結果は実験結果と概ね一致し、土堤の落体のエネルギー吸収性能については概ね精度よく再現することができたと考えられる。

(2) 土堤の破壊性状の比較

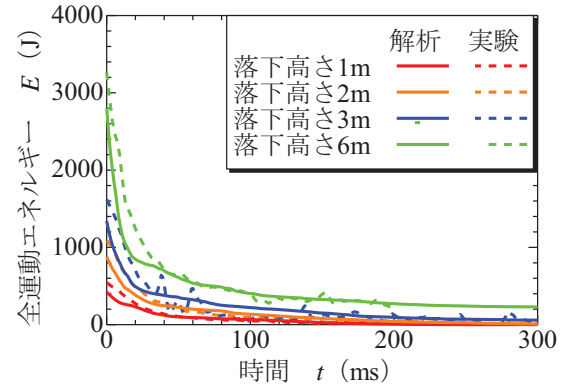


図-11 実験と解析との全運動エネルギーの比較

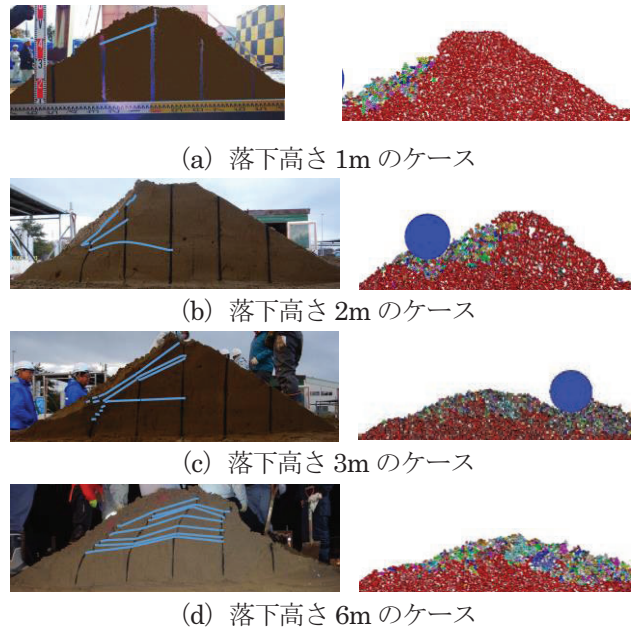


図-12 実験 (左) と解析 (右) との土堤最終形状

図-12 に落体衝突後の土堤断面の実験結果と解析結果を比較した図を示す。なお、各図の左側が衝突面、右側が非衝突面である。また、実験の土堤断面には、青の実線で、土堤構築時にあらかじめ配置した着色砂がせん断されたものをつなげた想定すべり線を記載した。解析の土堤断面には、種々の色で粒子が着色されているが、これはボンド結合でつながっている破片ごとに同じ色で示したものであり、色の種類が多いほどボンド要素がより破断していることを示す。

図-12 より、落下高さが低いケースでは、変状の範囲や程度が概ね一致しているのに対し、落下高さが高いケースでは、解析の方が実験と比較して大きく変状しているのが分かる。これは、落下高さが高いケースの方が変状範囲が大きいため、側面抵抗がない 2 次元の解析と側面抵抗を有する 3 次元の実験で、差が生じてしまったものと考えられる。このことから、土堤の衝突後の破壊性状を精度よく再現するためには、側面抵抗を表現するため

のパラメータを加えることや3次元でのDEM解析を実施する必要があると考えられる。

3.3 静的載荷実験における再現解析

(1) 落体の時刻歴波形の比較

図-13 に落体が受けた荷重と水平変位の時刻歴波形を示す。比較のため、実験における落体が受けた荷重の波形を赤線で示す。図より、解析での荷重は実験に比べ、小さくなっていることが分かる。これは、(2)での考察同様、側面抵抗による影響や、実験に使用した載荷装置の摩擦の影響でロードセルでの計測値が大きくなってしまったことが原因であると考えられる。これらのことから、2次元で再現解析を行う場合、側面抵抗の効果を含んだ各種定数設定（粘着力等）の検討や載荷装置の摩擦の低減が必要となる。なお、実験装置の課題については今後、装置を見直して再実験を行う予定である。

(2) 土堤の破壊性状に着目した検討

図-14 に載荷終了時における土堤の断面を示す。なお、土堤の変状の比較のため、載荷前の土堤の形状を黄色の点線で示す。また、赤の実線は、土堤内部の着色粒子がせん断されたものをつなげた想定すべり線を示す。想定すべり線に着目すると、土堤の非載荷面側の法尻や法面にすべり線が抜けていることが分かる。これは、押し抜きせん断クラックと考えられる。実験では1か所での押し抜きせん断しか確認されておらず、解析のように何本もすべり線が抜けていない。このことから、衝撃載荷実験での再現解析同様、解析の方が土堤を大きく破壊する傾向にあると言える。しかし、上方法面や天端の盛り上がり、非載荷面でのクラック発生（解析上の着色粒子の屈曲・段ずれ）が見られ、実験と一致する。このことから、破壊性状については概ね精度よく再現できていると考えられる。

4. まとめ

本研究では落石防護土堤の設計法確立に向けた落石捕捉性能の把握を目的に模型実験及び再現解析を実施した。本稿で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 衝撃載荷実験の再現解析では、落体の運動エネルギーに関しては概ね精度よく再現できた。しかし、土堤断面の最終形状に関しては、外力が低い条件では土堤の変状を精度よく再現できたものの、外力が高い条件だと実験と比較して土堤が大きく変状してしまう傾向にある。これは、外力が高い条件ほど土堤の変状が大きいため、側面抵抗がない2次元の解析と側面抵抗を有する実現象で、差が生じてしまったものと考えられる。
- 2) 静的載荷実験の再現解析では、落体が受ける荷重については解析結果の方が小さくなってしまった。

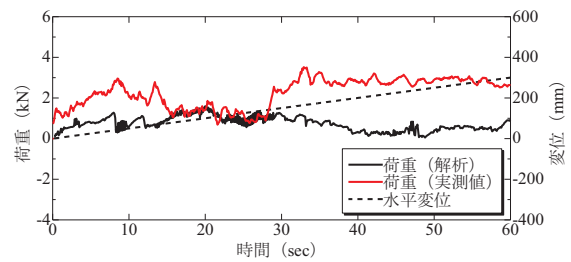


図-13 静的載荷実験と解析（法勾配 1:1.5，球体）

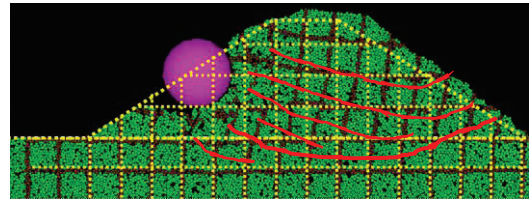


図-14 載荷終了時での土堤断面（ $t=60s$ ，法勾配 1:1.5，球体）

これは、衝撃載荷実験での考察同様の側面抵抗による違いなのか、実験時の載荷装置の摩擦による誤差によるものなのか今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，pp.243-246，2017。
- 2) 田中敬大，前田健一，堀耕輔，牛渡裕二，川瀬良司，鈴木健太郎：二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する数値解析，平成 29 年度構造工学論文集，Vol.64A，2018。
- 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) 内藤直人，前田健一，今野久志，牛渡裕二，鈴木健太郎，川瀬良司：落石衝撃力に及ぼす敷砂緩衝材の底面境界剛性の影響に関する DEM 解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.72，No.2，pp.429-440，2016。
- 5) 羽柴寛文，前田健一，内藤直人，山口 悟，牛渡裕二，鈴木健太郎，川瀬良司：落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.68，No.2，pp.443-454，2012。
- 6) 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.22，2016。