

土堤の落石捕捉性能把握を目的とした小型・実規模衝突実験と二次元 DEM 解析  
Small and full-scale rockfall impact model test and 2D-DEM of soil embankment  
for comprehension of rockfall grasping performance

木村 絢<sup>1</sup>, 前田 健一<sup>2</sup>, 磯合 凌弥<sup>3</sup>, 近藤 慶亮<sup>4</sup>, 鈴木 健太郎<sup>5</sup>, 石原 寛也<sup>6</sup>

- 1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム a.kimura.020@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・社会工学系プログラム r.isoai.791@stn.nitech.ac.jp
- 4 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム k.kondo.690@stn.nitech.ac.jp
- 5 構研エンジニアリング suzu@koken-e.co.jp
- 6 寒地土木研究所 ishihara-h@ccri.go.jp

概 要

我が国では大規模な落石災害の発生リスクが高まっており、落石対策の合理化が求められている。落石対策工の1つである落石防護土堤は土のみで構成され、施工性、経済性などに優れた落石対策工法であるが、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未だ定量的評価がなされていない。本研究では小型及び実規模土堤を対象とした落体衝突実験を対象に二次元個別要素法（以下、2D-DEM）による再現解析を実施し、土堤衝突時の落体反発挙動やエネルギーの減衰性状について検討を行った。その結果、実験結果では土堤のエネルギー吸収性状について、落体の土堤への貫入がエネルギー吸収率に大きく影響することが示された。再現解析では落体の土堤への貫入後の挙動に課題が残る結果となった。特に、貫入後の落体の跳躍挙動を粒径幅等の各種パラメータを調整することで再現可能になることが期待される。

キーワード：落石、落石防護土堤、小型土堤実験、実規模土堤実験、数値解析

1. はじめに

我が国では、集中豪雨や大地震及び、高度経済成長期に整備されたインフラの更新時期とも重なり、大規模な落石災害の発生リスクが高まっている。落石災害は人命に直接関わるとともに、道路網の寸断等により地域経済に多大な被害を及ぼす。これらの被害を限られた財源や人材で最小限に抑えるため、適切な落石対策の実施が求められている。落石対策工の1つである落石防護土堤は土のみで構成され、施工性、経済性、環境負荷低減に優れた落石対策工法である。しかしながら、現在、主たる設計マニュアルとして用いられている落石対策便覧には落石防護土堤でのエネルギーの消散メカニズムなどが示されておらず、性能設計法は未だ確立されていない現状にある。そこで、本研究では落石防護土堤の性能設計法確立に向け、高さ 0.5m の土堤を対象とした小型土堤実験、高さ 2m の土堤を対象とした実規模土堤実験を実施し、土堤のエネルギー吸収性能や落体の動的挙動について検討した。加えて個別要素法による数値解析を用いてスケールの異なる際の各種パラメータの設定について検討を行った。

2. 実験概要

本研究では高さ 0.5m の土堤を対象とした小型土堤実験及び高さ 2m の土堤を対象とした実規模土堤実験を実施した。小型土堤実験では土堤材料並びに衝突外力を変化させ、挙動の違いについて検討を行った。また、実規模土堤実験では小型土堤実験で得られた結果との比較、検討を行った。

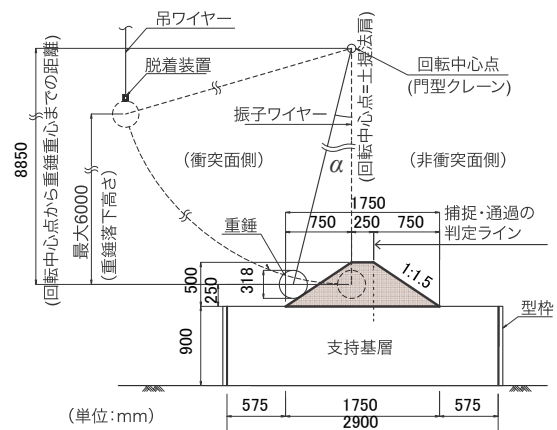


図 1 実験概要図（小型土堤実験）

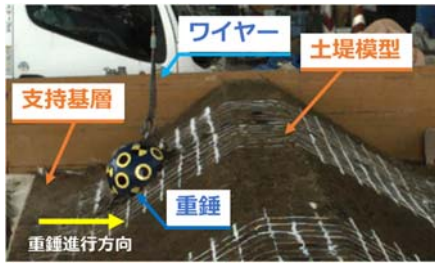


図 2 実験時の様子

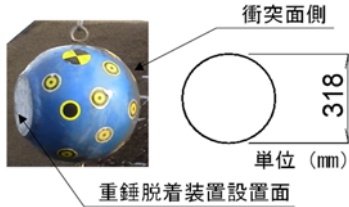


図 3 小型土堤実験用落体

## 2.1 小型土堤実験

図 1 に小型土堤実験の実験概要図を示す。本実験では実スケールの 1/5~1/4 を想定し、高さ 0.5m の土堤を作成した。また、天端幅 0.25m、法勾配 1:1.5 とし土堤は厚さ 0.9m の支持基層上に設置した。土堤本体は厚さ 0.25m ごとに、支持基層は厚さ 0.3m ごとに敷きならし、振動締め機により締め固めながら成形した。また、落体衝突後の土堤内部の変状計測のために 5~6 本の着色砂を土堤断面方向に埋設した。支持基層は土堤本体と同様の土砂材料を用いた。実験は図 2 に示すように落石を模した落体を振り子運動により、水平に土堤へ衝突させた。また、落体重心が土堤高さの半分となる土堤底面から 0.25m の高さに衝突するように調整した。図 3 に実験に使用した落体を示す。落体の質量は 54kg、形状は球形、落体直径は土堤高さの 3/5 程度の 0.318m であり、既製品の鋼製半球キャップにコンクリートを充填させたものである。表 1 に実験ケース一覧、表 2 に土堤材料の物性値を示す。本実験では土堤材料を砂質土、粘性土の 2 種類、落体の落下高さを 2m、6m の 2 種類とした計 4 ケースの実験を行った。なお、落体の重心が非衝突面側の法肩を通過したケースを通過、通過せずに停止したケースを捕捉と定義した。表 1 中の実験ケース名について、一番左側の文字が土堤材料 (S: 砂質土, C: 粘性土) を表しており、H に付随する数字が落下高さ (m) を表している。

## 2.2 実規模土堤実験

図 4 に実規模土堤実験の実験概要図を示す。本実験では実スケールを想定し、ポケット部及び土堤は落石対策便覧に記載されている形状寸法に倣い、斜面法尻から土堤衝突面側の天端までの距離を 5m、ポケット表層からの土堤の高さ 2m とした。土堤寸法について、法勾配は土のみの盛土として安定する最急勾配である 1:1.2、天端幅は土堤の破壊性状を計測するために 0.3m (通常は 1m 以上で施工

表 1 実験ケース一覧 (小型土堤実験)

ケース名	土堤材料	落下高さ (m)	位置エネルギー (kJ)	土堤衝突角 (°)	衝突速度 (m/s)	実験結果
S-H2	砂質土	2	1.06	37.7	7.12	捕捉
S-H6	砂質土	6	3.18	37.7	11.04	通過
C-H2	粘性土	2	1.06	37.7	6.70	捕捉
C-H6	粘性土	6	3.18	37.7	11.29	捕捉

表 2 土堤材料物性値 (小型土堤実験)

項目	単位	試験結果	
		砂質土	粘性土
地盤材料の分類名	-	砂	シルト
土粒子の密度	g/cm <sup>3</sup>	2.58	2.66
均等係数	-	2.15	6.21
最適含水比	%	20.8	29.4
自然含水比	%	10.0	20.4
内部摩擦角	度	36.5	29.8
粘着力	kN/m <sup>2</sup>	0.75	4.60

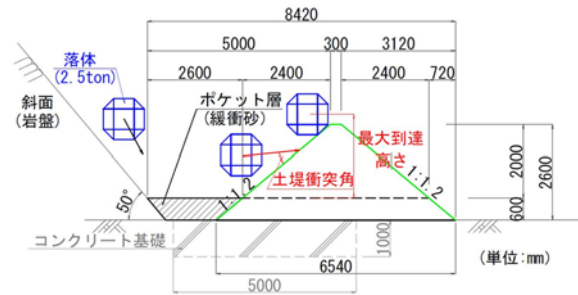


図 4 実験概要図 (実規模土堤実験)

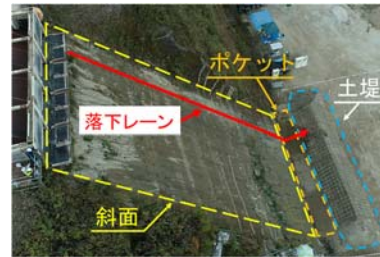


図 5 実験場風景

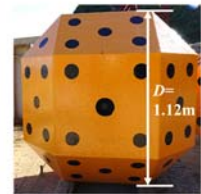


図 6 実規模実験用落体

される), 土堤延長は 16m とした。土堤の施工については、厚さ 0.3m ごとに敷きならしバックホウ及びハンドガイドローラーにより走行転圧を行った。図 5 に実験場風景を示す。図 5 に示す落下レーンから落体を落下させた。本実験で用いた斜面は最大高さ 30m、勾配 50° である。ネットで覆った落体をクレーンで吊り下げ、斜面と接するように配置したのち、ネットを解放させることで落体を落下させた。図 6 に実験で使用した落体を示す。本実験で使用した落体は ETAG<sup>2</sup>) に準拠した質量 2.5ton の多面体落体である。表 3 に実験ケース一覧、表 4 に土堤材料の物性値を示す。なお、土堤基礎の変形による影響を小さくするため基礎部には厚さ 1m のコンクリートブロックを設置した。

表 3 実験ケース一覧 (実規模土堤実験)

ケース名	落下高さ (m)	位置エネルギー (kJ)	土堤衝突角 (°)	衝突速度 (m/s)	実験結果
H15	15	367.5	54.2	9.92	捕捉
H20	20	490.0	4.2	5.33	捕捉
H25	25	612.5	18.8	8.19	捕捉

表 4 土堤材料物性値 (実規模土堤実験)

項目	単位	試験結果	
地盤材料の分類名		細粒分まじり砂質礫	
土粒子の密度	g/cm <sup>3</sup>	2.628	
自然含水比	%	23.9	
粒度	石分 (75mm 以上)	%	0
	礫分 (2~75mm)	%	26.9
	砂分 (0.075~2mm)	%	47.8
	シルト分 (0.005~0.075mm)	%	12.1
	粘土分 (0.005mm 未満)	%	13.2
	均等係数	—	167.14

また、実際の現場施工性を考慮し、ポケット表層の層厚は 0.6m とした。落下高さから換算した落体の位置エネルギーは 367.5kJ~612.5kJ である。なお、表 3 中のケース名について、H に付随する数字が落下高さ (m) を表している。また、本実規模実験では実施したすべてのケースで落体は土堤の法肩を乗り越えず、捕捉された。

### 2.3 計測項目

小型土堤実験、実規模土堤実験共に測定項目は落体衝突時の落体挙動及び実験後の土堤変状である。落体挙動は高速度カメラを用いた画像解析より算出した。高速度カメラによる画像解析では 3 台の高速度カメラ (小型土堤実験 : 1000fps, 実規模土堤実験 : 500fps) を用いて落体の表面に貼り付けた複数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、重心座標を元に落体の軌跡、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及びエネルギーは土堤衝突時に飛散した土粒子や光の反射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、スパイクノイズを取り除くため小型土堤では 3words (3ms) の中央値処理を施した後、5words (5ms) の矩形移動平均処理により、実規模土堤では 7words (14ms) の移動平均処理によりデータをスムージングした。実験後の土堤変状は手動にて計測した。

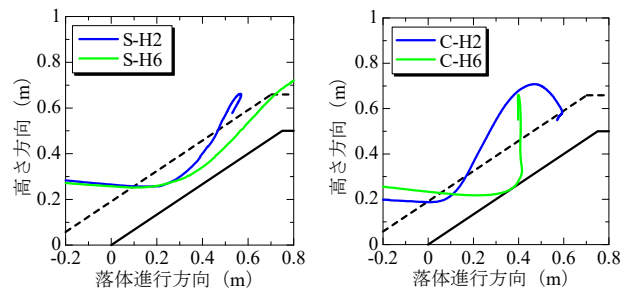
## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 小型土堤実験

小型土堤実験に関しては既往研究<sup>3)</sup>の再整理を行った。

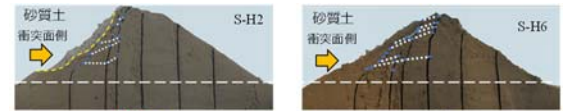
#### (1) 落体軌跡図

図 7 に小型土堤実験の各ケースの落体軌跡図を示す。

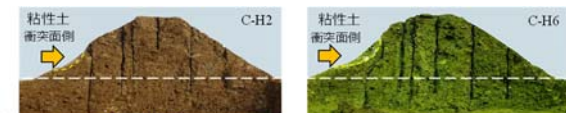


(a) S-H2, S-H6 (b) C-H2, C-H6

図 7 落体軌跡図 (小型土堤実験)



(a) S-H2 (b) S-H6



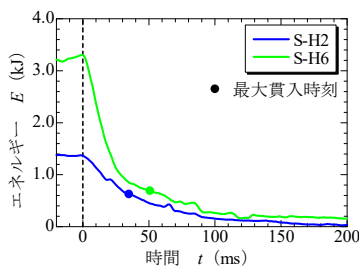
(c) C-H2 (d) C-H6

図 8 実験後の土堤断面図 (小型土堤実験)

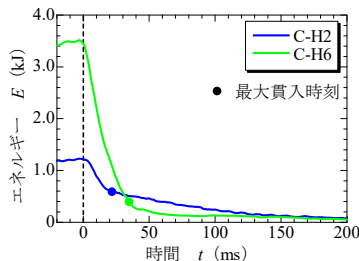
なお、図中の黒実線が土堤の外形線を、黒破線が落体半径分の土堤のオフセットラインを表している。軌跡がオフセットラインと交わったときに落体が土堤に接触したことを意味する。図より、いずれの落下高さ、土堤材料においても落体は土堤に衝突した直後は土堤へ貫入していることがわかる。しかし、貫入後は土堤材料により異なる挙動を示している。貫入後の挙動について、S-H2 は法面をかけた後に跳躍し、捕捉された。S-H6 は S-H2 より大きく土堤に貫入し、法面をかけることで天端を乗り越え、土堤を通過する結果となった。C-H2 は土堤天端方向へ跳ね上がり、C-H6 は鉛直上方へ跳ね上がる挙動となっている。なお、小型土堤実験では S-H6 のみ落体が土堤を通過する結果となった。

#### (2) 土堤の変形状

土堤材料の違いによる落体挙動の違いについて考察するため、図 8 に各ケースの実験終了後の土堤断面図を示す。なお、C-H2 は着色砂設置時の不備で、着色砂下部が欠損している。上段の写真中の黄色破線は落体衝突後に変形が見られた土堤部分の外形線を、白破線は土堤法尻の延長線を示す。加えて、着色砂のせん断変形がみられた箇所を青実線で、着色砂のせん断変形から予測した想定すべり線を白点線で追記している。また、下段には衝突断面の写真から作成した土堤の衝突断面における変形図を示す。



(a) S-H2, S-H6



(b) C-H2, C-H6

図 9 全運動エネルギーの時刻歴波形 (小型土堤実験)

図中の青実線、青破線が落体衝突前の土堤の外形線と着色砂を表し、黒実線と赤実線は落体衝突後の土堤の外形線と着色砂を示す。S-H2, S-H6 では土堤の衝突面側が広範囲にわたり変形しており、複数のすべり線が土堤下方から上方に向かって非衝突面側へ形成されていることがわかる。これは落体の貫入及びかけ上がり時に形成されたと考える。また、既往の研究<sup>3)</sup>から、貫入の初期段階にせん断部が形成され、時間の経過とともに形成されたせん断部が進展したと推察される。このように、土堤材料が砂質土の場合は多くのせん断箇所がみられたことから、せん断による変形が卓越すると考える。C-H2, C-H6 では砂質土よりも土堤の変形範囲が狭く、衝突部に最も近い着色砂のみが変形しており、他の着色砂の変形はみられない。C-H6 では衝突箇所が大きく湾曲している様子が観察されるが、土堤内部にせん断箇所は見られない。このことから、土堤材料が粘性土の場合は圧縮変形が卓越すると考える。

以上より、砂質土と粘性土の土堤材料としての性能を比較すると、砂質土は変形耐力が小さく、せん断による変形が卓越し、粘性土では圧縮変形が卓越することが示された。この特性の違いにより土堤衝突後の落体挙動に差が生じたと考える。

### (3) エネルギー減衰性状

図 9 に各ケースの全運動エネルギーの時刻歴波形を示す。全運動エネルギー $E$ は式(1)に示すように、落体重心の速度から求められる線速度エネルギー $E_v$ と落体の回転エネルギー $E_r$ の和により算出した。

$$E = E_v + E_r \quad (1)$$

ここで、線速度エネルギー $E_v$ 、回転エネルギー $E_r$ はそれぞれ式(2)、式(3)により算出した。

$$E_v = \frac{1}{2} M v^2 \quad (2)$$

$$E_r = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3)$$

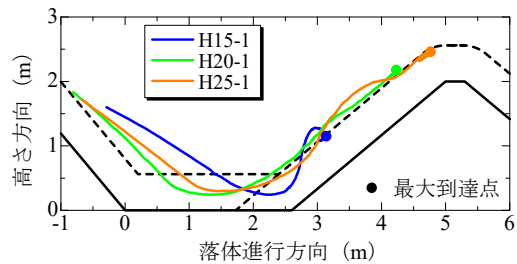


図 10 落体軌跡図 (実規模土堤実験)

ここに、 $m$  : 落体の質量

$v$  : 落体の線速度 ( $x, y, z$  方向の線速度を合成)

$I$  : 落体の慣性モーメント

$\omega$  : 落体の角速度 (rad/s)

小型土堤実験においては全ケースにおいて回転エネルギーの占める割合が全運動エネルギーの 2~6%であったため、全運動エネルギーのみ示した。なお、図は落体が土堤に衝突した時刻を 0ms としており、最大貫入時刻を丸プロットにて示す。図より、いずれの土堤材料・落下高さとも衝突後約 50ms にかけて運動エネルギーが急激に減少し、衝突後約 100ms までには緩やかな減衰または一定な推移に転じていることがわかる。また最大貫入時刻までのエネルギー減衰に着目すると、粘性土のケースの方が急なエネルギー減衰となっており、最大貫入時刻でのエネルギーが小さくなっていることが読み取れる。これは粘性土では落体の衝突により圧縮変形が卓越することに起因すると推察する。以上より、砂質土より粘性土の方が土堤衝突による落体のエネルギー減衰が大きくなることが示唆された。

## 3.2 実規模土堤実験

### (1) 落体軌跡図

図 10 に実規模土堤実験の各ケースの落体軌跡図を示す。なお軌跡図は斜面法尻を原点としており、黒実線が斜面・ポケット部・土堤の外形線を、黒破線が落体半径分のオフセットラインを示している。H15 はポケット部への貫入中に落体が土堤に衝突しており、土堤に貫入した後、土堤法面上を再び跳躍することで土堤から離れ、再度土堤に衝突することで捕捉された。再衝突する際、落体は法面に対してほぼ垂直に衝突しているため、再衝突後に法面をかける挙動は見られなかった。H20, H25 は落体がポケット部に衝突した後、ポケット部から跳躍して緩衝層を脱出する段階で土堤に衝突した。その後、法面をかける挙動となり捕捉された。ここで小型土堤実験の落体軌跡図と比較すると、H15 のみ落体が土堤に貫入した後、鉛直上方向に跳ね上がる挙動を示し、C-H2 と似た挙動をとっていることがわかる。ここで、各ケースの土堤衝突角に着目すると、小型土堤実験の衝突角は  $37.7^\circ$  であり、実規模実験では H15 が  $54.2^\circ$ 、H20 が  $4.2^\circ$ 、H25 が  $18.8^\circ$  となっている。このことから、小型土堤実験の衝突角と最も近くなった H15 では落体挙動が類似したと考える。

### (2) 土堤の変形状

図 11 に落体衝突後の土堤の様子を示す。また、図中にはポケット部及び土堤の変状範囲を示す。ここで衝突痕は

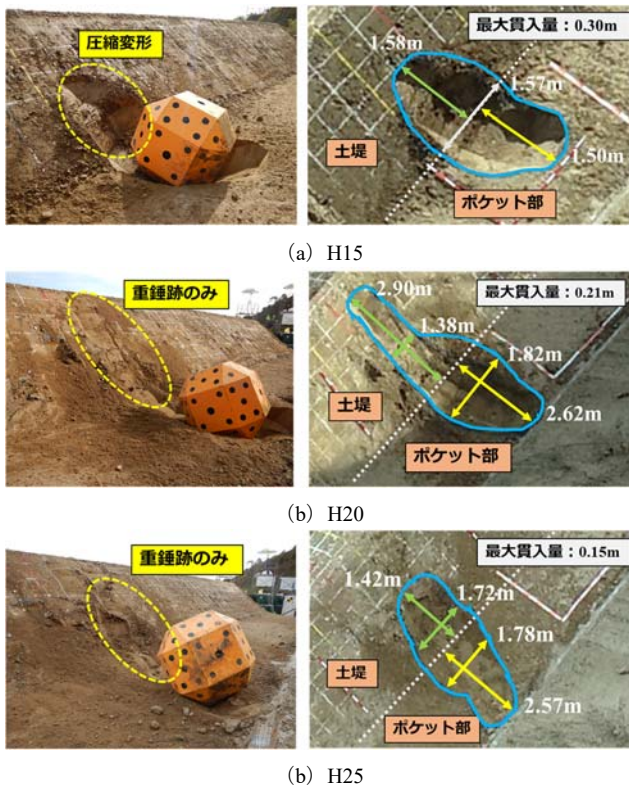


図 11 ポケット部及び土堤の変状 (実規模土堤実験)

ポケット部から土堤本体にかけて連続していたため、ポケット部と土堤部に分けて寸法を記載した。H15では、落体がポケット部と土堤の境界付近に大きく貫入し、土堤法面が圧縮変形していることがわかる。これは貫入中に速度減衰することなく土堤本体に直接衝突したことに起因すると思われる。また、小型土堤の粘性土の変形挙動と比較すると、衝突部に圧縮変形が見られる点については、概ね同等の挙動を示したと判断できる。また、H20、H25ではポケット部に大きな変形が見られるが、土堤本体には落体のかけ上がりによる跡が見られるが、貫入はほとんど生じていないことがわかる。これらのケースでは落体がポケット部に衝突した後にポケット部からの跳ね返り中に土堤に衝突していたことで、土堤衝突時のエネルギーが小さく、かつ土堤への衝突角が浅くなったために、土堤本体の変形が小さくなったと推察される。加えて、実規模実験では回転が作用していることで落体が法面を駆け上がる挙動が卓越したと考える。以上より、落体が土堤に直接衝突する場合など、衝突時の外力及び衝突角が大きい場合には小型土堤実験と同様に圧縮による塑性変形が目立つ結果となったが、衝突時の外力が小さく、衝突角が浅い場合にはかけ上がり挙動に転じやすくなることで土堤の変状が小さくなることが示唆された。

### (3) エネルギー減衰性状

図 12 に各ケースのエネルギーの時刻歴波形を示す。図は落体が土堤に衝突した時刻を 0ms としており、ポケット部衝突及び土堤衝突を破線にて示す。なお、線速度エネルギーを赤線、回転エネルギーを青線、全運動エネルギーを黒線で示している。それぞれのエネルギーの算出方法は

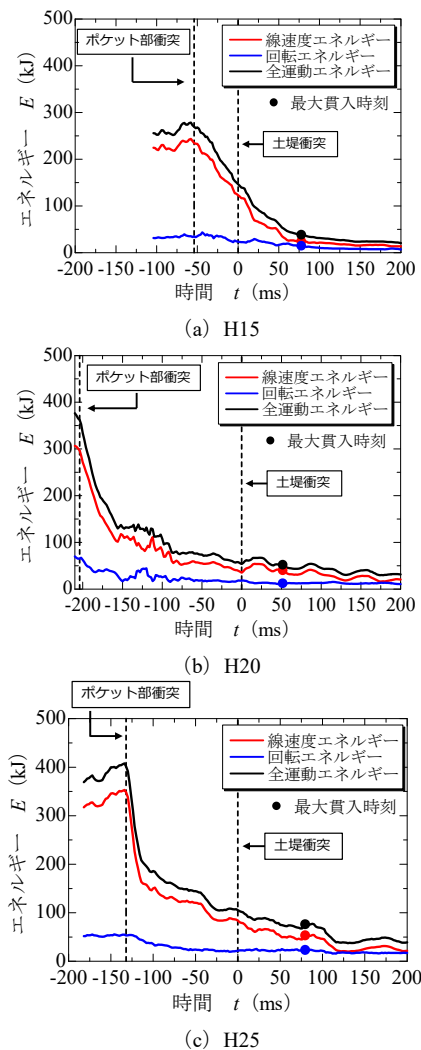


図 12 エネルギーの時刻歴波形 (実規模土堤実験)

3.1(2)中の式 (1) ~ (3) の通りである。また、最大貫入時刻をプロットにて示しており、土堤衝突後のエネルギーの時刻歴波形の拡大図を図 18 に示す。図より、いずれのケースにおいてもポケット部衝突時から急激にエネルギーが減衰していることが読み取れる。また、土堤衝突時 (0ms) のエネルギーに着目すると、位置エネルギーの最も小さい H15 の衝突時エネルギーが最も大きくなっていることがわかる。これは H20、H25 はポケット部に衝突した後に土堤に衝突しているのに対して、H15 ではポケット部と土堤の境界付近に衝突したため、ポケット部でのエネルギー減衰が小さかったことが要因であると考えられる。土堤衝突後のエネルギーの減衰勾配に着目すると、H15 では土堤衝突直後から最大貫入時刻にかけて継続的にエネルギーが減衰し、その後の減衰は緩やかとなっていることがわかる。また、線速度エネルギーの減少よりも回転エネルギーの減少の方が緩やかになっており、時間とともに線速度エネルギーと回転エネルギーが近い値をとるようになることが読み取れる。H20、H25 では土堤衝突以降では緩やかな減衰となっている。これらのケースは土堤衝突時のエネルギーが小さいため、3.2(2)で示したように土堤の変形が小さくなり、緩やかなエネルギー減衰になったと考える。

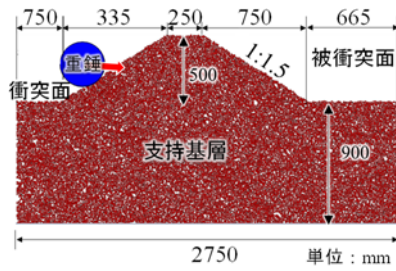


図 13 解析モデル (小型土堤実験)

表 5 解析パラメータ (小型土堤実験)

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値	
		粘性土	砂質土
最大粒径	$D_{max}$ (m)	0.0159	0.0159
最小粒径	$D_{min}$ (m)	0.00795	0.00795
平均粒径	$D_{50}$ (m)	0.0119	0.0119
粒子の密度	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2650	2650
法線方向ばね定数	$k_n$ (N/m)	$1.0 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$
接戦方向ばね定数	$k_s$ (N/m)	$2.5 \times 10^6$	$5.0 \times 10^6$
粒子間摩擦角	$\phi_u$ (deg.)	25	25
減衰定数	$h$	1.0	1.0
ボンド直径	$D_b$ (m)	0.015	0.015
ボンドばね定数	$k_b$ (N/m)	$2.0 \times 10^8$	$2.0 \times 10^8$
ボンド強度	$s_b$ (Pa)	$3.0 \times 10^6$	$0.6 \times 10^6$

## 4. 数値解析及び考察

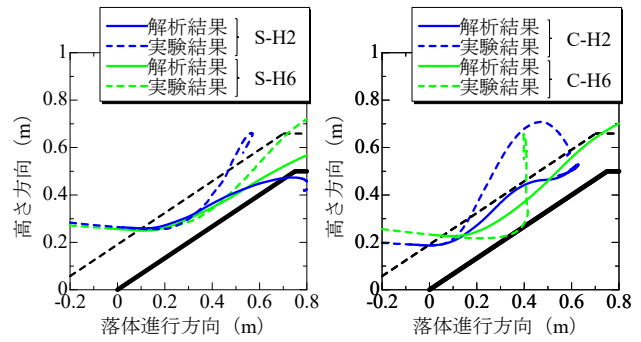
### 4.1 小型土堤実験の再現解析

#### (1) 解析概要

図 13 に 2D-DEM による小型土堤実験の再現解析の解析モデルを示す。2D-DEM による再現解析は既往の研究で用いられてきたモデルと同じであり、落石による粒状性の堆積層内の衝撃力伝達挙動の再現実績のあるモデル<sup>4)</sup>を用いて実施した。土堤の断面形状は実験と同じ条件で、土堤下部には厚さ 0.9m の支持基層を設けている。表 5 に解析パラメータを示す。解析パラメータは砂質土を土堤材料として実施した既往研究<sup>3)</sup>を参考に設定した。既往研究<sup>3)</sup>では粒子直径に関して最大粒径が落体直径の 1/10 として設定していたが、今回は砂質土、粘性土ともに粒径を既往研究の値の 1/2 すなわち最大粒径が落体直径の 1/20 として最大粒径  $D_{max}=0.0159$ 、最小粒径  $D_{min}=0.00795$  に設定した。なお、粒径を小さくすると同一体積中の粒子数が増加し、土堤全体として剛性が低下するために土堤内の局所的な変形・破壊モードの再現性が向上することがわかっている。また、それぞれの土堤材料に対して粘着力を既往の研究で実施した掘削解析<sup>5)</sup>と Culmann の斜面解析<sup>6)</sup>を参考に、砂質土は 3kPa、粘性土は 12kPa と設定した。

#### (2) 落体軌跡図による比較

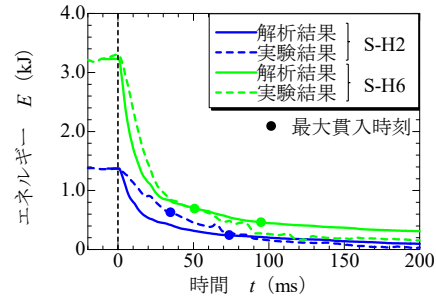
図 14 に各ケースの落体軌跡図を示す。軌跡図は衝突面側の土堤の法尻を原点としている。なお、黒実線と黒破線は実験結果の図と同じ意味を表す。また、破線が実験結果を、実線が 2D-DEM による解析結果を表している。



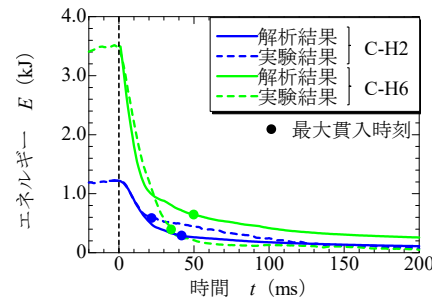
(a) S-H2, S-H6

(b) C-H2, C-H6

図 14 落体軌跡図 (小型土堤実験)



(a) S-H2, S-H6



(b) C-H2, C-H6

図 15 全運動エネルギーの時刻歴波形 (小型土堤実験)

図より、砂質土のケースに着目すると S-H2 では土堤が落体を捕捉しており、S-H6 では落体が土堤を通過する結果となり両ケースとも実験結果と同じ結果となった。貫入後の挙動については実験結果では跳躍挙動を示している一方で、解析結果は跳躍挙動が見られず、落体が土堤を通過する結果となった。粘性土のケースにおいては実験結果では C-H2、C-H6 の両ケースとも土堤が落体を捕捉したが、解析結果では C-H6 において土堤を通過する結果となった。捕捉結果が異なった要因として、実験結果では鉛直方向に跳ね上がり挙動を示している一方で解析結果ではかけ上がり挙動を示したことが挙げられる。以上より、貫入後の挙動の再現性が低いことは今後の課題であり、粘性土のケースの様実験結果において土堤から離れるほど大きく跳ね上がる場合には捕捉結果にも影響を及ぼすことがわかった。この様に解析精度を低下させた要因として、特に土堤の落体衝突時の圧縮変形を本解析モデルでは表現できていないことが挙げられる。土堤の圧縮性能に実現象との差が生じた要因については 4.2(2) で示す。

### (3) エネルギー減衰性状による比較

図 15 に各ケースの全運動エネルギーの時刻歴波形を示す。なお、図は落体が土堤に衝突した時刻を 0ms としており、最大貫入時刻を丸プロットにて示す。また、破線が実験結果を、実線が 2D-DEM による解析結果を表している。図より、解析結果が実験結果よりも法面へのかけ上がり挙動を顕著に示した S-H2, S-H6, C-H2 のケースでは土堤衝突直後の全運動エネルギーの減衰勾配が実験結果よりも大きくなっている。これは実験結果では落体は土堤衝突後に跳躍挙動を示したが、解析では落体が土堤へ貫入した後にかけ上がり挙動を示したことで、落体と土堤法面に生じる摩擦等によりエネルギーが減衰したため、エネルギーの減衰勾配が大きくなったと考える。一方、実験では土堤衝突後に鉛直上方へ跳ね上がる挙動を示したが、解析結果では法面へのかけ上がり挙動を示した C-H6 では、最大貫入時刻以降に実験結果よりも全運動エネルギーが大きな値で横ばいに推移していることが読み取れる。これは、図 14 の軌跡図より貫入量の違いによるものと考えられる。解析結果の貫入量の方が小さいため、全運動エネルギーの減少が小さく、最大貫入時刻以降に一定の値で推移する全運動エネルギーが実験結果より大きくなったと推察される。

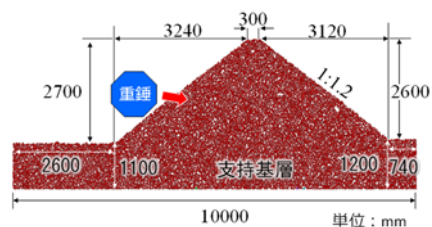


図 16 解析モデル（実規模土堤実験）

表 6 解析パラメータ（実規模土堤実験）

パラメータ	記号（単位）	基本設定値
最大粒径	$D_{max}$ (m)	0.05
最小粒径	$D_{min}$ (m)	0.025
平均粒径	$D_{50}$ (m)	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)	$2.0 \times 10^7$
接戦方向ばね定数	$k_s$ (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)	0.025
ボンドばね定数	$k_b$ (N/m)	$2.0 \times 10^8$
ボンド強度	$s_b$ (Pa)	$8.0 \times 10^5$

## 4.2 実規模土堤実験の再現解析

### (1) 解析概要

図 16 に 2D-DEM による実規模土堤実験の再現解析の解析モデルを示す。2D-DEM による再現解析は 4.1(1)と同じモデルを用いて実施した。土堤の断面形状は実験と同じ条件で、土堤下部には衝突面側には厚さ 1.1m の支持基層を、非衝突面側には厚さ 1.2m の支持基層を設けている。衝突面側と非衝突面側で支持基層の厚さを変更させた理由は、再現解析において落体初期位置を定める際にポケット表層と落体が重複してしまい、解析を正常に実施できなくなる事例が生じたためである。また、表 6 に解析パラメータを示す。粒径の設定値は小型土堤実験と同様に最大粒径が落体直径の 1/20 となる様に最大粒径  $D_{max}=0.05$ 、最小粒径  $D_{min}=0.025$ （小型土堤実験では最大粒径  $D_{max}=0.0159$ 、最小粒径  $D_{min}=0.00795$ ）とした。

### (2) 落体軌跡図

図 17 に各ケースの落体軌跡図を示す。軌跡図は衝突面側の土堤の法尻を原点としている。なお、図中の黒実線が土堤の外形線を、黒破線が落体半径分の土堤のオフセットラインを表しており、軌跡がオフセットラインと交わったときに落体が土堤に接触したことを示す。また、破線が実験結果を、実線が 2D-DEM による解析結果を表している。図より、H25 のケースを除いて解析結果は実験結果に等しく土堤が落体を捕捉する結果となった。落体が土堤を通過する結果となった H25 においては実験結果では法面へのかけ上がり挙動の途中で跳躍している一方で、解析結果は跳躍することなく法面へのかけ上がり挙動を示したことで異なる挙動になったと考える。捕捉時の到達高さに着目すると解析結果は実験結果と概ね一致したことから、一定

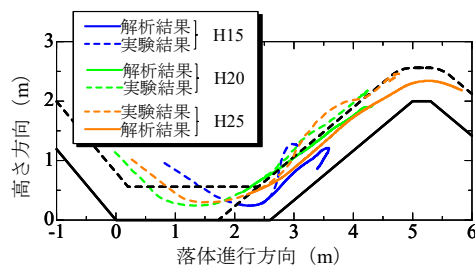


図 17 落体軌跡図（実規模土堤実験）

程度の再現性を示すことができたと考える。

小型土堤実験及び実規模土堤実験のどちらにおいても解析では跳躍挙動が表現されにくい傾向にある。特に、小型土堤実験では天端方向や鉛直方向への跳ね上がり挙動を再現できなかった点において実規模土堤実験よりも課題が残る結果となった。実験において跳躍挙動が見られる要因として、土堤が軟らかく、圧縮性が高いために土堤衝突により作用する力を土堤全体で吸収している可能性がある。これらを解析で表現するために、土堤の吸収力すなわち軟らかさを考慮するために、粒子密度を粒径幅の観点からアプローチすることを考える。実規模土堤実験と小型土堤実験の解析における最大粒径  $D_{max}$  と最小粒径  $D_{min}$  の差（粒径幅）は実規模では 0.025m、小型では 0.00795m であり、前者の粒径幅の方が大きい。すなわち、実規模土堤実験の解析モデルの方が間隙比の変化の自由度、つまり粒子構造の変化のしやすさが高いことになる。したがって、実規模土堤実験の解析における土堤は、粒子間の噛み合わせが発揮されることで圧縮性が高い可能性がある。小型土堤実験においても実規模土堤実験と同様に一定程度の再

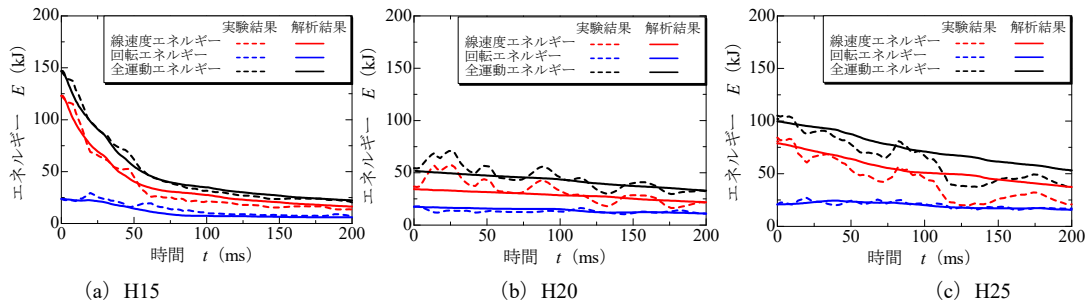


図 18 エネルギーの時刻歴波形 (実規模土堤実験)

現性を示すためには、最大粒径  $D_{max}$  と最小粒径  $D_{min}$  の設定方法を考え直す必要があると考える。ただし粒径を小さくすることで計算コストが増加するため、コストパフォーマンスとのバランスを考慮する必要性も生じる。今後はこの点に留意し、粒径等の最適な設定方法を検討する。

### (3) エネルギー減衰性状

図 18 に各ケースの全運動エネルギーの時刻歴波形を示す。なお、図は落体が土堤に衝突した時刻を 0ms としている。また、破線が実験結果を、実線が 2D-DEM による解析結果を表している。図より、H25 のケースを除いて土堤衝突時のエネルギー及び 200ms 時のエネルギーは概ね一致しており、減少勾配の傾向を概ね再現できたと考える。H25 に関しては 4.2(2) で述べた通り、跳躍挙動を解析結果でも表現することができればエネルギーの時刻歴波形についても再現性が向上すると考える。

## 5. まとめ

本研究では落石防護土堤の性能設計法確立に向け、高さ 0.5m の土堤を対象とした小型土堤実験、高さ 2m の土堤を対象とした実規模土堤実験を実施し、落体の動的挙動や 2D-DEM を用いた再現解析における課題について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 砂質土と粘性土の土堤材料としての性能を比較すると、砂質土は変形耐力が小さく、せん断による変形が卓越し、粘性土では圧縮変形が卓越することが示された。この変形特性の違いにより土堤衝突後の落体挙動に差が生じたと考える。
- 2) 粘性土では落体の衝突により圧縮変形が卓越することで、砂質土より粘性土の方が土堤衝突による落体のエネルギー減衰が大きくなることが示唆された。
- 3) 実規模実験より、落体が土堤に直接衝突する場合など、衝突時の外力及び衝突角が大きい場合には小型土堤実験と同様に圧縮による塑性変形が目立つ結果となった。一方で、衝突時の外力が小さく、衝突角が浅い場合にはかけ上がり挙動に転じやすくなることで土堤の変状が小さくなることが示唆された。
- 4) 2D-DEM により実規模土堤実験を再現した落体の土

堤衝突挙動は軌跡図及び全運動エネルギー波形は概ね再現できたことから、土堤のエネルギー吸収メカニズムを検討するために現行の 2D-DEM を適用することができると考える。

- 5) 小型土堤実験の解析では天端方向や鉛直方向への跳ね上がり挙動を再現できなかった点において実規模土堤実験よりも課題が残る結果となった。実験において跳躍挙動が見られる要因として、土堤が軟らかく、圧縮性が高いために土堤衝突により作用する力を土堤全体で吸収している可能性が考えられる。この特性を解析で表現するために、土堤の吸収力すなわち軟らかさを考慮する必要がある。そのために粒子密度を粒径幅の観点からアプローチをすることで再現性の向上を目指す考えである。

今後は小型土堤実験と実規模土堤実験の比較に向けて、スケール効果に関して実験及び数値解析の両面から検討を実施する予定である。

## 謝辞

本研究に用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)20H02241 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

## 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) European Organization for Technical Approvals (EOTA) : ETAG27, Guideline for european technical approval of falling rock protection kits, p.34, 2008.
- 3) 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, 応用力学論文集 Vol.22, I\_389-I\_400201
- 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応用力学論文集 Vol.67, No.2, pp.355-364, 2011
- 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) Culmann C: Die Graphische Statik Meyer and Zeller, Zur-ich, Switzerland, 1875.