

衝突速度を変化させた重錘衝突実験による落石防護土堤の変形・破壊挙動

Deformation and failure behavior of rockfall protective soil embankment by impact test with varying collision velocities

名古屋工業大学	○学生員	磯合凌弥 (Ryoya Isoai)
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	木村 絢 (Aya Kimura)
名古屋工業大学	学生員	近藤慶亮 (Keisuke Kondo)
(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		岡部里音 (Rion Okabe)
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（以下、土堤と示す）は土のみで構成され、道路側方に平坦な余地があり土堤および土堤背面にポケット部を設置できる場合に主に用いられる。土堤は現場条件によっては比較的容易に施工が可能であり、条件次第では現地発生土を土堤材料とすることができるため、経済性にも優れた対策工であるとされている。落石防護土堤の設計は、落石対策便覧¹⁾等を参考に行われているが、エネルギー吸収メカニズムやその効果については定量的な評価がされておらず、土堤の性能設計法は未だ確立されていない。

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衝撃載荷実験を実施した。また、2次元個別要素法(Discrete Element Method、以下、2D-DEMと略す)を用いて土堤内部の挙動について考察を実施した。

2. 実験および数値解析概要

2.1 試験体概要

図-1 に実験場全体図を示す。本実験では重錘をワイヤーロープで門型フレームに吊るし、4.9t 吊クローラークレーンで重錘を釣り上げた後、重錘に取り付けた着脱装置を外すことで振り子運動により模型土堤に衝突させた。振り子運動の回転中心点は衝突面側の土堤模型法肩と一致させており、土堤中心を通過する際に重錘重心が土堤底面から高さ 0.5m となるよう回転半径を設定した。図-2、表-1 に実験に使用した EOTA²⁾型重錘および形状寸法を示す。1 辺あたり 0.5m で土堤本体高さの 1/2 とし、重錘質量は 234.5kg であった。

図-3 に実験概要図を示す。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。土堤寸法について、土堤高さは 1.0m、法勾配は土のみの盛土として安定する最急勾配の 1:1.2、天端幅は 0.2m、土堤延長を 4.6m とした。天端幅については通常は 1m 以上で施工されるが、土堤の変形、破壊性状を検討するために 0.2m と設定した。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

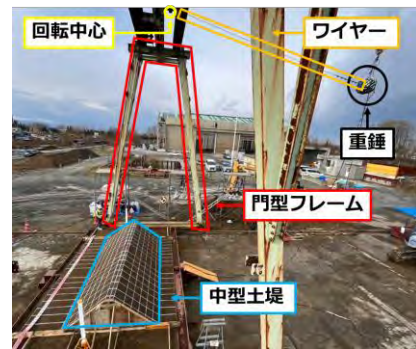


図-1 実験場全体図

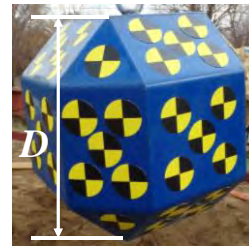


図-2 EOTA 型重錘

表-1 重錘形状寸法

質量 M (kg)	一辺の長さ D (m)
234.5	0.5

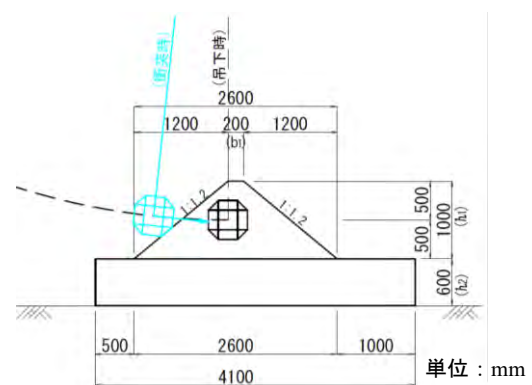


図-3 実験概要図

表-2 実験ケース一覧

ケース名	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	衝突時 水平速度 (m/s)	衝突時 鉛直速度 (m/s)
I-4	234.5	4	9.31	-1.05
I-6		6	11.55	-1.40
I-7		7	12.35	-1.46

厚さ 0.3m 毎に、土堤部は 0.25m 毎に砂を敷き均し、振動締め機を使用して成形した。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。

表-2 に実験ケース一覧を示す。実験は重錘の落下高さを 4m、6m、7m とした計 3 ケース実施した。表中のケース名について、I に付随する数字が落下高さ (m) を表している。表には高速度カメラにより計測した実測衝突時水平速度および鉛直速度も併せて示す。ここで、水平速度は重錘進行方向を、鉛直速度は鉛直上向きを正としている。

2.2 計測項目

本実験における計測項目は重錘挙動、実験後の土堤法面および土堤断面の変状である。重錘挙動は高速度カメラで撮影した画像 (1000fps) から PTV 解析により重錘重心の座標を算出した。実験終了後には加力方向と平行に土堤の断面を掘削し、土堤内部状態を観察した。断面観察を補助するために、土堤構築時に直径 25mm の鋼棒を基層部の深さ 30cm まで貫入することで削孔し、着色砂を充填した。なお、着色砂は土堤中心を基準に加力方向に 250mm 間隔で計 9 本埋設した。

2.3 数値解析概要

図-4 に解析概要図、表-3 に解析パラメーター一覧を示す。なお本解析は、中型土堤に対する衝撃載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。解析パラメーターについては既往研究で用いられてきたモデル³⁾を参考に設定した。また本実験条件を再現するにあたり、既往研究⁴⁾を参考に最大粒径を重錘径 (0.5m) の 1/20 となる 0.0025m とし、最小粒径を最大粒径の 1/2 とした。また、実規模スケールでの土堤実験⁵⁾に用いられていた土堤材料の限界自立高さが 1.82m であったことを踏まえ、本解析パラメーターにおけるボンド強度と水平地盤の限界自立高さの関係 (図-5) を算出し、ボンド強度を 2.0×10^6 (Pa) と設定した。ボンド強度と粘着力との間には線形関係が成り立つことが既往研究⁶⁾より示されており、本解析における粘着力は約 4kPa である。また、解析時の重錘速度は表-2 に示す速度を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘重心の軌跡

図-6 に重錘重心の軌跡図を示す。軌跡図は斜面法尻を原点としており、実線にて土堤形状を、破線にて重錘半径分のオフセットラインを示す。重錘進行方向はグラフ右方向である。重錘は土堤衝突後、土堤法面に貫入しながら法面上を駆け上がる挙動を示した。落下高さが大きくなるほど、重錘の最大到達高さが大きくなる傾向が読み取れる。また、I-7 は天端付近で重錘が跳躍し、土堤法面に再衝突する挙動を示した。

3.2 土堤衝突面、非衝突面の変状

図-7、表-3 に重錘衝突後の衝突面、非衝突面の変状範囲とその寸法を示す。また、図には変状範囲およびクラックを破線にて示す。衝突面側の変形幅は最大 600mm であり、いずれのケースでも同程度となっている。衝突痕長さは落下高さの増加に伴い、大きくなって

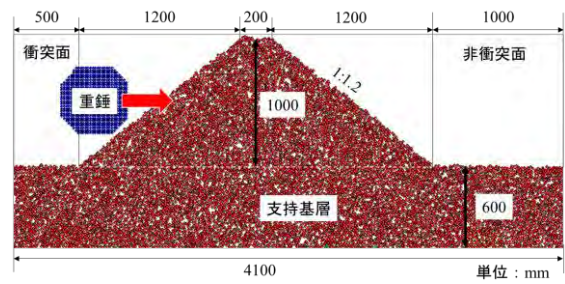


図-4 2D-DEM 解析概要図

表-3 解析パラメーター一覧

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	D(m)	
	最大粒径 Dmax	0.025
	最小粒径 Dmin	0.0125
	平均粒径 D50	0.0375
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	kn(N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	ks(N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	Db(m)	0.0125
ボンド強度	sb (Pa)	2.0×10^6

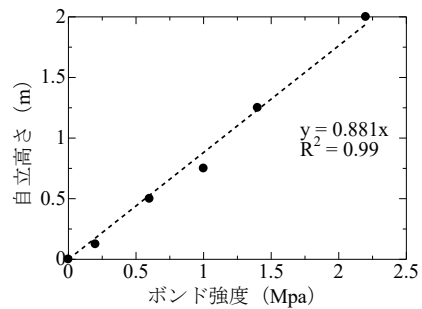


図-5 ボンド強度と自立高さの関係

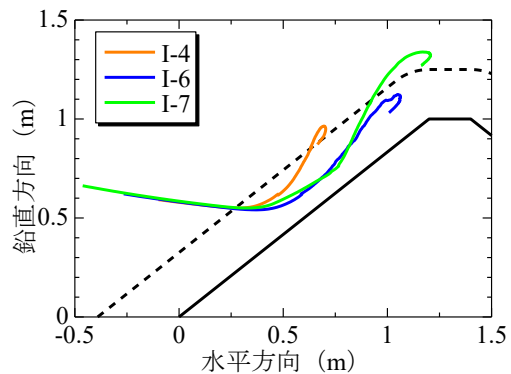


図-6 重錘重心軌跡図

いることがわかる。非衝突面側の変状を見ると土堤天端の変形および法面中腹にクラックが発生している。I-6、I-7 の天端には土塊の盛り上がり見られた。これは I-6、I-7 では重錘が天端付近まで駆け上がったことから、耐力の小さい天端の土塊を押し抜いたためと考えられる。また I-6、I-7 の天端付近の変状範囲は横幅が 986mm、1223mm であり、衝突面側の横幅は約 600mm であることから約 1.5 倍~2 倍大きく、非衝突面に変形が伝わる

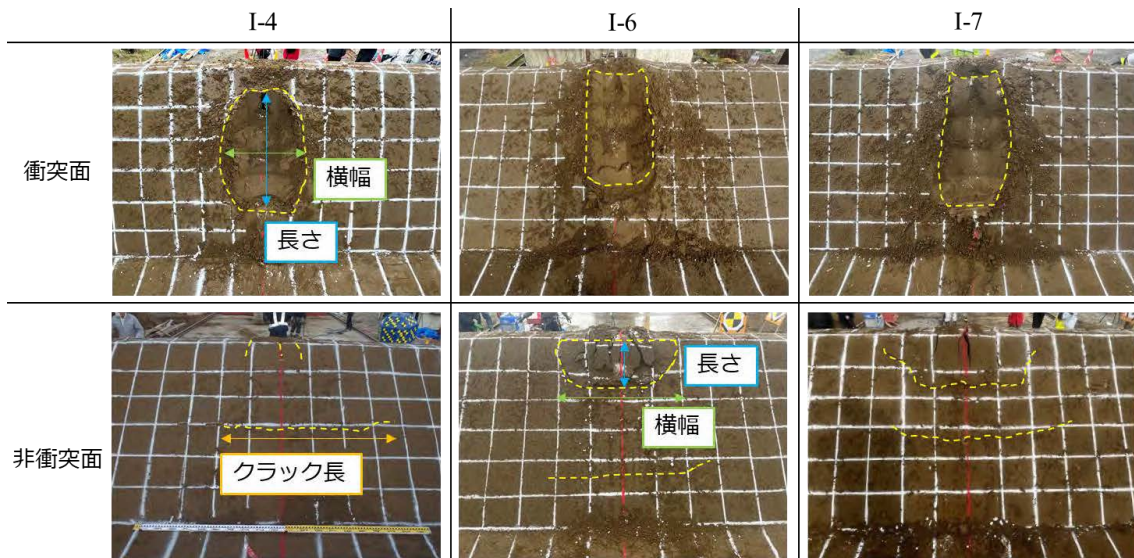


図-7 土堤衝突面、非衝突面の変状

表-3 土堤法面の変状寸法

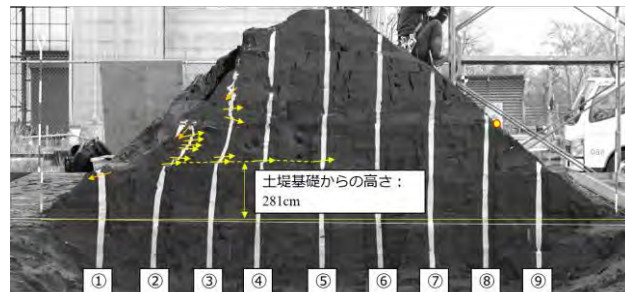
		I-4	I-6	I-7
衝突面 (mm)	横幅	600	550	580
	長さ	870	1000	1260
	深さ	150	130	130
非衝突面 (mm)	横幅	526	986	1223
	長さ	181	465	457
	盛り上がり 高さ	-	120	180
	クラック長	698	1215	1552

過程で土堤延長方向に変形領域が広がっていたと推察される。また、I-4、I-7 はクラックの発生位置およびクラック長さがおおよそ等しいが、I-6はI-4、I-7と比較してクラックの発生位置が鉛直高さにして約 20cm 低く、クラック長さが約 30cm 小さくなっている。この要因として土堤構築時の盛土の境界に沿って荷重が伝播し、クラックの発生位置に差が生じた可能性が挙げられる。

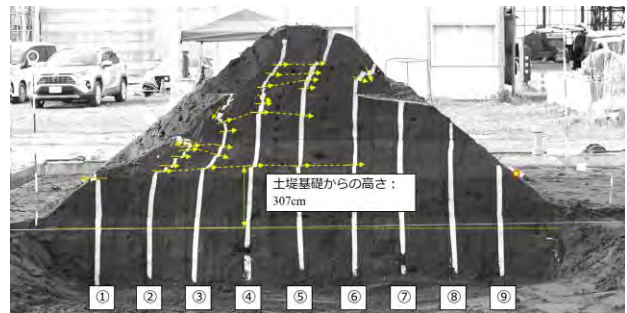
3.3 土堤断面の変状

実験終了後に掘削した土堤断面の状況を図-8 に示す。なお、断面の崩壊を防ぐため、掘削時には 10cm~15cm ごとに段切りを行った。断面画像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。図中に示す矢印はせん断面の発生位置および向きを表している。また、想定されるすべり線を破線で示している。着色砂には図左側から①~⑨の通し番号をつけている。

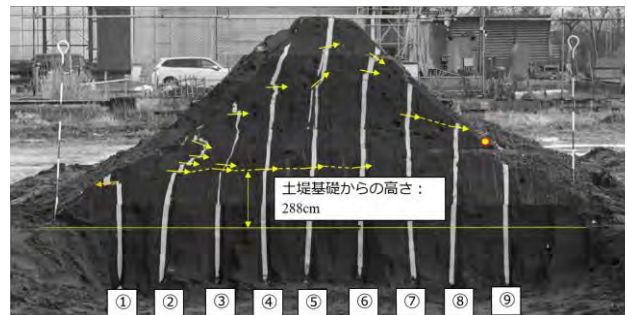
まず、②の着色砂には細かいせん断面が他の着色砂より多く見られた。細かいせん断面の発生要因について、数値解析結果より考察を実施した。図-9、10 に解析結果にてせん断の発生が確認された時刻（重錘の土堤衝突後 20ms）における土堤断面図および応力分布図を示す。土堤断面図には実験時に埋設した着色砂の配置を参考に、格子状に粒子を着色した。応力コンターの値は図中に示す通りである。土堤断面図より、②の位置に複数のせん断箇所が見られた。これは図-8 に示した②の着色砂の変状と類似している。応力分布図を見ると、重錘の衝突



(a) I-4



(b) I-6



(c) I-7

矢印：せん断面、破線：想定すべり線

図-8 土堤断面状況（実験状況）

面から扇状に応力が伝播していることが読み取れる。このことから重錘衝突直後の応力が扇状に拡散しながら伝播することで、直線上に配置された土粒子の移動方向に

ズレが生じ、せん断面が形成されたと考えられる。また②にせん断面が多く見られたのは、重錘衝突部に最も近いことが要因と考えられる。しかし、せん断面の発生には応力だけでなく、ひずみ速度の大きさも関係していると考えられることから、せん断面の発生メカニズムについては継続して検討を実施する。

次に、②～⑥の着色砂まではほぼ水平方向にすべり線が伸びていることが読み取れる。また、各ケースで土堤底面からすべり面までの高さがおおよそ等しくなっている。図-11に示すI-4の重錘衝突直後の画像より、重錘接触面の上端（土堤底面から425mm）と下端（土堤底面から275mm）の間にせん断面からなるすべり線（土堤底面から288mm）が伸びていることがわかる。しかし、図-9の応力分布図を見ると、応力の伝播経路は水平方向のみでないことが分かる。このことから、すべり線の形成は重錘接触面を始点としているが、すべり線の進展方向を決める要因については今後検討が必要である。

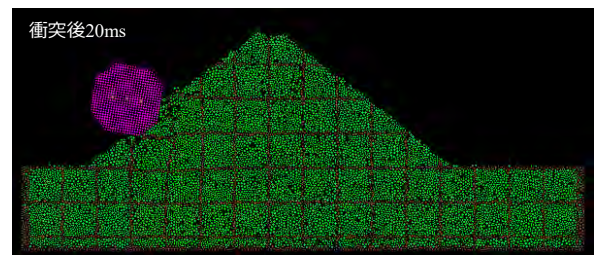
4. まとめ

本研究では、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衝撃载荷実験および2D-DEM解析を実施し、土堤の変形性状に着目し考察を行った。得られた知見は以下の通りである。

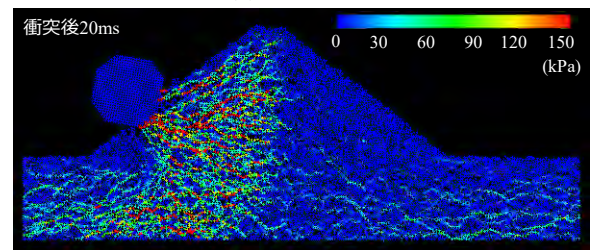
- 1) 非衝突面側の天端付近における変状範囲の横幅は衝突面側の変状範囲の横幅より約1.5倍～2倍大きくなったことから、非衝突面に変形が伝わる過程で横方向に変形領域が広がっていたと推察される。
- 2) 実験終了後の土堤断面より着色砂には細かいせん断面が見られた。せん断面の発生メカニズムとして、重錘衝突直後の応力が扇状に拡散しながら伝播することで、直線上に配置された土粒子の移動方向にズレが生じたことが挙げられる。
- 3) 土堤断面には衝突部から土堤中央付近まで水平方向にすべり線が発生していた。重錘の土堤接触面とすべり線の発生箇所が一致することから、すべり線の形成は重錘接触面を始点としているが、すべり線の進展方向を決める要因については今後更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，pp.243-246, 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，応用力学論文集，

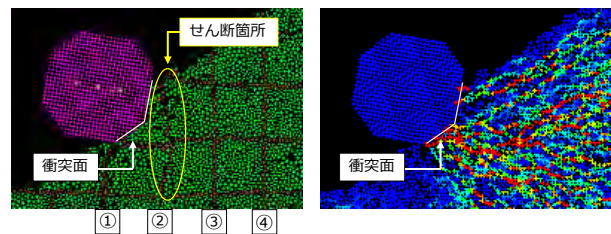


(a) 土堤断面図



(b) 応力分布図

図-9 2D-DEMによる土堤断面状況 (I-4)



(a) 土堤断面図

(b) 応力分布図

図-10 衝突周辺拡大図 (図9より)

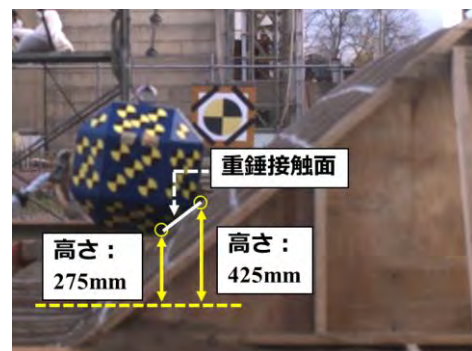


図-11 土堤衝突時の重錘接触面 (I-4)

Vol.14, 2011.

- 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体衝突実験，構造工学論文集，Vol.67,2021.
- 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, 2017.