落石防護土堤の性能設計法の確立に向けた重錘衝突実験

Rockfall experiment for establishing performance design of soil embankment

杉山直優1,前田健一2,峯祐貴3,磯合凌弥4,鈴木健太郎5,今野久志6

- 1 名古屋工業大学大学院・社会工学系プログラム n.sugiyama.698@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·社会工学専攻 m.mine.122@stn.nitech.ac.jp
- 4 名古屋工業大学·社会工学科 r.isoai.791@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 konno@ceri.go.jp

概 要

近年の気象条件の変化に伴い落石災害や落石外力は増加しており、落石災害を防ぐための適切な対策工の設置が求められている。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、現行設計マニュアルである落石対策便覧には落石防護土堤の溝の寸法に関する研究例が示されているのみで、性能設計法が確立されていない。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た。その結果、小型土堤実験では重錘の土堤への貫入がエネルギー吸収に大きく影響することが判明した。また、実規模土堤実験では土堤への衝突条件がばらつき、土堤のエネルギー吸収率がばらついた。そのため、落石防護土堤の性能設計確立のためには土堤に衝突する前の運動形態にも着目し、検討する必要があることが分かった。

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

1. はじめに

近年の気象条件の変化に伴い落石災害や落石外力は増加しており、落石災害を防ぐための適切な対策工の設置が求められている。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 りには落石防護土堤の溝の寸法に関する研究例が示されているのみで、性能設計法が確立されていない。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重錘の動的挙動について検討した。

2. 実験概要

本稿では高さ 0.5m の土堤を対象とした小型土堤実験および高さ 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、挙動の違いを検討した。実規模土堤実験では小型土堤実験

で得られた結果と比較し、挙動の違いを検討した。

2.1 小型土堤実験

図 1 に実験概要図を示す。本実験では実スケールの 1/5 $\sim 1/4$ 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 とし土堤は高さ 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、振動締固め機により締め固め

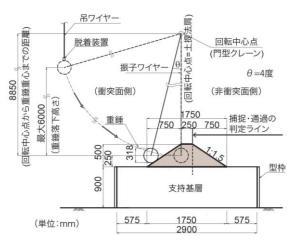


図 1 実験概要図(小型土堤実験)

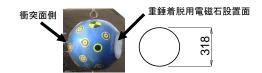


図 2 小型土堤実験に用いた重錘

ながら成形した。また、重錘衝突後の土堤内部の変状計測のために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1に示すように落石を模した重錘を振り子運動により水平に土堤へ衝突させ、重錘重心が土堤高さの半分となる土堤法尻から0.25mの高さに衝突するように調整した。図2に実験に使用した重錘を示す。重錘の質量は54kg、形状は球形、重錘直径は土堤高さの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ートを充填させたものである。

表 1 に実験ケース一覧を,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,砕石の3種類,重錘の落下高さを 2m,6m の2 種類とした計6ケースの実験を行った。なお,重錘の重心が非衝突面側の法肩を通過したケースを通過,通過せずに手前で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,C:粘性土,G:砕石)を表しており,H の隣に書かれた数字が落下高さ(m)を表している。例えば、土堤材料が砂,落下高さが6mのケースの場合は S-H6 と表される。

2.2 実規模土堤実験

図 3 に実験概要図を示す。図には重錘衝突による土堤内部の変状を計測するために埋設した着色砂の埋設位置および重錘衝突位置も併せて示している。本実験では実スケールの土堤を想定し、高さ 2m, 法勾配 1:1.2 の土堤を作成した。また、大規模な土堤の破壊性状を計測するために天端幅を 0.3m とし、事前の重錘挙動確認実験から斜面法尻から土堤天端までの水平距離を 6.0m と設定した。土堤延長は全長 18m であり、斜面形状及び重錘落下箇所を踏まえて着色砂の埋設箇所を決定した。土堤基礎は Nd 値が 3~7 程度の盛土地盤である。土堤の施工については実施工を想定し、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うことで施工した。表 3 に土堤材料に関する物性値一覧を示す。

図 4 に実験場写真を示す。本実験では図に示す A, B, Cの 3 レーンから重錘を落下させた。レーン A からの落下はバックホウで重錘を押し出して、レーン B 及び C からの落下はクレーンで重錘を吊り下げて落下させた。表 4 に実験ケース一覧を示す。本実験では質量 2.5t, 1.9t の重錘を高さ22m~30m の斜面上から落下させた。表中の実験ケースについて、一番左側の文字が落下レーン,M の隣の数字が質量、末尾の数字が実験の順序を表している。なお、A-M2.5-2 はレーン A へ、B-M1.9-2 はレーン B へ再衝突させたケースである。図 5 に重錘の寸法を示す。重錘は ETAG³)に準拠した多面体で、土堤高さの 1/2 程度である。

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)	実験結果
S-H2	Tils	2	捕捉
S-H6	砂	6	通過
C-H2	粘性土	2	捕捉
С-Н6	柏1生工	6	捕捉
G-H2	砕石	2	捕捉
G-H6		6	通過

表 2 土堤材料物性値(小型土堤実験)

77					
項目	単位	砂	粘性土	砕石	
地盤材料の分類名	-	砂	シルト	礫	
土粒子の密度	g/cm ³	2.58	2.66	2.67	
均等係数	-	2.15	6.21	36.3	
最適含水比	%	20.8	29.4	5.80	
自然含水比	%	10.0	20.4	4.70	
内部摩擦角	度	36.5	29.8	38.6	
粘着力	kN/m ²	-	4.60	-	
衝撃加速度 2)	m/s ²	196	186	372	

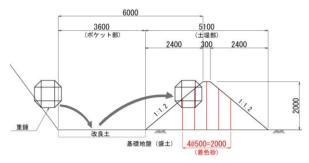


図 3 実験概要図 (実規模土堤実験)

表 3 土堤材料物性値(実規模土堤実験)

地盤材料の分類名:細粒分まじり砂質礫				
項目	単位	試験結果		
土粒子の密度	g/cm ³	2.63		
均等係数	-	352		
最適含水比	%	15.3		
自然含水比	%	12.7		
内部摩擦角	度	34.1		
粘着力	kN/m ²	1.10		
衝撃加速度 2)	m/s ²	311		



図 4 実験場写真(実規模土堤実験)

表 4 実験ケース一覧 (実規模土堤実験)

	,) = () () () () () () () () () () () () ()	
ケース名	落下レーン	落下高さ (m)	実験結果
A-M2.5-1	A	30	通過
A-M2.5-2	А	30	通過
B-M1.9-1	В	25	通過
B-M1.9-2	D	22	通過
C-M1.9-1	С	22	通過

※落下高さはレーザー距離計による計測値

質量	体積	L:一辺の長さ	I:慣性モーメント
(t)	(m^3)	(m)	(t•m ²)
1.9	0.752	1.02	0.242
2.5	0.995	1.12	0.384



図 5 実規模土堤実験に用いた重錘

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重錘衝突 時の重錘挙動及び実験後の土堤断面の変状である。重錘挙 動は高速度カメラを用いた画像解析を行った。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) を用いて重錘の表面に 貼り付け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 次元挙動から重錘の重心座標を算出し, 重心座標を元に重 錘の軌跡,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角速度データは土 堤衝突時に飛散した土粒子や太陽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、速度及び角速度データに関してはスパイク ノイズを取り除くため 3words (小型土堤実験:3ms, 実規 模土堤実験:6ms)の中央値処理を施した後,5words(小型 土堤実験:5ms, 実規模土堤実験:10ms) の矩形移動平均処 理によりデータをスムージングした。

3. 実験結果及び考察

3.1 小型土堤実験

(1) 重錘軌跡図

図 6 に各ケースの重錘軌跡図を示す。なお、図中の赤実線が土堤の外形線を、赤破線が重錘半径分の土堤のオフセットラインを表している。図より、いずれの落下高さ、土堤材料においても重錘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ことがわかる。ここで、表 5 に画像解析から算出した重錘の土堤への貫入量と貫入終了時刻を示す。なお、貫入量は図 7 に示すように土堤法面と垂直な向きに対する最大貫入量を、貫入終了時刻は土堤衝突時刻を 0ms としたときの、最大貫入量に至るまでの時間を表している。表 5 より、各ケースによって貫入量や貫入終了時刻が異なっていることがわかる。このことから、貫入後の挙動の違いが生じる理由として、貫入量や貫入終了時刻

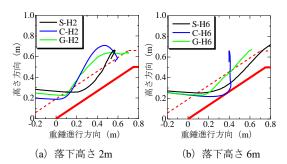


図 6 重錘軌跡図(小型土堤実験)

表 5 貫入量と貫入終了時刻

ケース名	土堤への貫入量 (mm)	貫入終了時刻 (ms)
S-H2	85	36
C-H2	52	23
G-H2	31	14
S-H6	128	53
С-Н6	148	39
G-H6	48	15

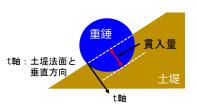


図 7 貫入量の定義

の違いが挙げられる。落下高さ 2m のケースでは貫入量、 貫入終了時刻ともに砂、粘性土、砕石の順に大きくなって いることがわかる。貫入後の挙動について、図 6 から、C-H2 と G-H2 の貫入後の挙動は土堤天端方向へ跳ね上がるよ うな挙動となっている。一方で、貫入量が最も大きい S-H2 の貫入後の挙動は土堤法面を駆け上がる挙動になっており、 C-H2 や G-H2 とは異なる挙動となっている。また、落下高 さ 6m のケースでは貫入量、貫入終了時刻ともに粘性土、 砂、砕石の順に大きく、砕石の貫入量は砂や粘性土に比べ 極めて小さいことがわかる。貫入後の挙動について、図 6 から、最も貫入量の少ない G-H6 では貫入量の少ない C-H2 や G-H2 と同様な挙動となっている。また、S-H6 では一定 程度土堤に貫入したことで貫入後の挙動は S-H2 と同様に なっている。C-H6 では C-H2 とは異なり、土堤へ大きく貫 入したことで鉛直上方へ跳ね上がる挙動となっている。

重錘捕捉性能について、表 1 と図 6 より、落下高さ 6m のケースでは粘性土のみが重錘を捕捉した。このことから、本実験において重錘捕捉性能が最も高い土堤材料は粘性土であるといえる。また、砂と砕石の落下高さ 2m のケースでの重錘の最終位置について、S-H2 では駆け上がり後に土堤を降下し、土堤中腹で停止したが、G-H2 では土堤天端上で停止した。よって、重錘捕捉性能は砂が砕石を上回っていると考えられる。ゆえに、重錘捕捉性能は粘性土、砂、砕石の順に高いことがわかる。このようになった理由については(3)にて考察する。

(2) エネルギー吸収性状

図 8 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、重鍾重心の速度 から求められる線速度エネルギー E_v と重錘の回転エネル ギー E_r の和により算出した。

$$E = E_{\rm v} + E_{\rm r} \tag{1}$$

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。

$$E_{\rm v} = \frac{1}{2}mv^2\tag{2}$$

$$E_{\rm r} = \frac{1}{2}I\omega^2 \tag{3}$$

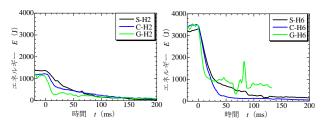
ここに, m: 重錘の質量

v: 重錘の線速度 (x,y,z 方向の線速度を合成)

I: 重錘の慣性モーメント

 ω : 重錘の角速度 (rad/s) なお,図は重錘が土堤に衝突した時刻を 0ms としている。

図より、いずれの土堤材料・落下高さともに衝突後約 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少または一定に転じていることがわか る。ここで、土堤のエネルギー吸収性状について詳細に検 討するために、図9と表6に各ケースのエネルギー吸収 率の時刻歴データを示す。エネルギー吸収率は土場が重錘 の運動エネルギーをどれだけ吸収したかを表す指標で、重 錘の運動エネルギーの減少分を衝突前の運動エネルギーで 除して算出した。なお、ここでは貫入によるエネルギー吸 収とその後のエネルギー吸収の性状の違いについて評価す るために、表 5 中の貫入終了時刻を 0ms としている。すな わち, 0ms において貫入が終了していることを意味してお り, 0ms 以前が貫入によるエネルギー吸収を, 0ms 以降が 貫入終了後のエネルギー吸収を表している。また, エネル ギー吸収率は衝突時の時刻と貫入終了時刻、エネルギー吸 収率の変動がほとんど終了した貫入終了後から 100ms にお ける値をプロットしている。図 9より,いずれの土堤材料・ 落下高さにおいても貫入終了時刻である 0ms までのエネル ギー吸収率の増加勾配が0ms以降の増加勾配よりも急であ り、貫入によりいずれのケースも 50%以上のエネルギーを 吸収していることがわかる。このことから, 土堤への貫入 がエネルギー吸収率に大きく影響を及ぼしていることがわ かる。また、貫入終了後におけるエネルギー吸収率の増加 は貫入後の重錘の駆け上がりや跳躍による位置エネルギー への転換によるものであると考えられる。落下高さ別で比 較すると、表 6より落下高さ2mのケースでは貫入による エネルギー吸収率は砕石が72%と最大で、砂は55%、粘性 土は53%となっている。落下高さ6mのケースでは貫入終 了時刻でのエネルギー吸収率が粘性土,砂,砕石の順に大 きく、それぞれ 89%、79%、67%のエネルギーを貫入によ り吸収する結果となった。以上より、落下高さが高くなる ほど貫入によるエネルギー吸収が顕著になると推察される。 また、貫入終了後からのエネルギー吸収率の増加勾配に着 目すると、図より、特に G-H6 で砂や粘性土よりも緩いこ



(a) 落下高さ 2m (b) 落下高さ 6m

図 8 運動エネルギーの時刻歴波形(小型土堤実験)

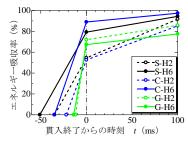


図 9 貫入前後のエネルギー吸収率の推移(小型土堤実験)

表 6 貫入前後のエネルギー吸収率の推移(小型土堤実験)

	エネルギー吸収率(%)		
ケース名	貫入終了からの時刻 (ms)		
	0	100	
S-H2	55	92	
S-H6	79	94	
C-H2	53	85	
С-Н6	89	97	
G-H2	72	86	
G-H6	67	78	

とがわかる。このことから、砕石のように貫入しにくい土 堤材料の場合は貫入終了後からのエネルギー吸収率の増加 は期待できないものと推察される。一方、粘性土では C-H6 において貫入によるエネルギー吸収率が約 90%と、貫入に よるエネルギー吸収が特に顕著になった。これは土堤へ貫入することで多くのエネルギーが吸収されたために砂や砕石よりも捕捉性能が向上したと考えられる。

(3) 土堤破壊性状

図 10 に各ケースの実験終了後の土堤断面写真および変形図を示す。土堤断面には衝突による土堤内部の変状を計測するために着色砂を 5~6 本埋設している。なお, C-H2 は途中で孔が塞がってしまったため, 下方の着色砂の一部が欠損している。また, 砕石の場合では鉛直に削孔することが出来なかったために着色砂が斜めに埋設されている。図には着色砂のせん断がみられた箇所を実線で, 着色砂のせん断から予測した想定すべり線を点線で追記している。

(a) に示す砂のケースでは S-H2, S-H6 ともに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。これは重錘の貫入および駆け上がり時に形成されたと考えられる。また、既往の研究 4から、貫入の

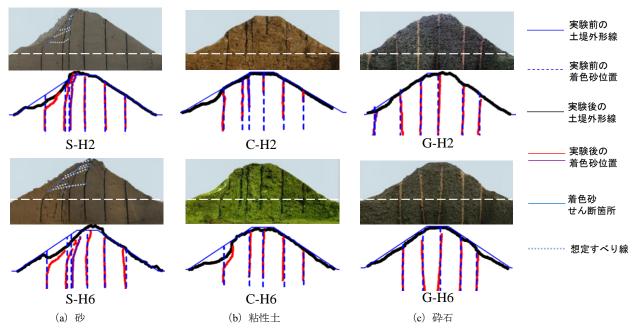


図 10 土堤内部の変状 (小型土堤実験)

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 堤材料が砂の場合は多くのせん断箇所がみられたことから,押し抜きせん断による変形が卓越すると考えられる。

(b)に示す粘性土のケースでは砂よりも土堤の変形範囲が狭く、C-H2、C-H6 ともに衝突部に最も近い左端の着色砂のみが変形しており、その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みられない。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られる。

(c) に示す砕石のケースでは G-H2, G-H6 ともに土堤の 大きな変形はみられず、着色砂も変形していない。土堤材 料が砕石の場合は重錘が貫入しにくいことから土堤が変形 しにくいと考えられる。

以上に示したように土堤が最も変形した土堤材料は砂であり、次いで粘性土、砕石の順に変形していることがわかる。このことから、最も破壊しやすい土堤材料は砂であり、砕石が最も破壊しにくいことがわかった。このことから、(1)にて述べた土堤の重錘捕捉性能について、粘性土の重錘捕捉性能が最も高くなる理由は砂よりも衝突時の土堤の変形が小さく、変形に対する抵抗が大きいことや圧縮変形するために重錘の貫入を許すことが挙げられる。一方、砕石は貫入しにくく、土堤が変形しにくい材料であったためにエネルギー吸収性能が十分に発揮できず、重錘捕捉性能が低くなったと考えられる。

3.2 実規模土堤実験

(1) 土堤への衝突条件

表 7 に実規模土堤実験における重錘の土堤への衝突条件を示す。なお、衝突高は土堤衝突時の地表面から重錘重心までの高さを、衝突高/土堤高は衝突高を土堤高 (2m)

表 7 土堤への衝突条件

ケース名	衝突高 (m)	衝突高/ 土堤高	衝突角度 (°)	衝突速度 (m/s)	衝突角速度 (rad/s)	衝突エネ ルギー (kJ)
A-M2.5-1	0.586	0.293	21.91	14.05	18.61	312.8
A-M2.5-2	1.74	0.869	35.52	8.86	15.72	145.5
B-M1.9-1	1.05	0.523	21.84	9.77	14.66	145.3
B-M1.9-2	0.930	0.465	20.85	8.70	11.96	89.1
C-M1.9-1	1.43	0.715	29.31	6.94	13.90	87.7
小型土堤 実験	0.250	0.500	33.70	-	-	·

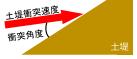


図 11 衝突角度の定義

で除したもの、衝突角度は図 11 に示す土堤衝突時の重錘の速度ベクトルと土堤法面のなす角度を表し、衝突エネルギーは衝突時の重錘の全運動エネルギーを表している。また、比較のために小型土堤実験における衝突条件も示している。表より、衝突高は 0.586m~1.74m、衝突角度は 21.84°~35.52°、衝突速度は 6.94m/s~14.05m/s、衝突角速度は 11.96rad/s~18.61rad/s、衝突エネルギーは 87.7kJ~312.8kJ とケースによって値がばらついた。しかしながら、表 4に示す実験結果から、いずれのケースも重錘は土堤を通過する結果となった。小型土堤実験での衝突条件と比較すると衝突高/土堤高から、A-M2.5-1 は小型土堤実験よりも高い位置で、A-M2.5-2 と C-M1.9-1 は小型土堤実験よりも高い位置で、B-M1.9-1 と B-M1.9-2 は小型土堤実験とほぼ同じ位置でそれぞれ土堤に衝突している。また、衝突角度につい

ては A-M2.5-2 を除き、小型土堤実験よりも小さくなる結果となった。なお、小型土堤実験では重錘は水平に衝突しているが、実規模土堤実験では土堤の法勾配が $\theta = 40^\circ$ (1:1.2) であることに対し、衝突角度は約 $20^\circ \sim 35^\circ$ であることから、重錘は水平面よりやや上向きに衝突している。

(2) 重錘軌跡図

図 12 に各ケースの軌跡図を示す。図中の黒実線が土堤 の外形線を、黒破線が重錘半径分のオフセットラインを表 している。レーン A から落下させた 2 ケースについて, A-M2.5-1 は斜面からの落下後の第一落下点であるポケット へ落下後すぐに土堤に衝突しているために衝突高が全5ヶ ース中最も低くなっている。衝突後は土堤へ貫入した後, 駆け上がりに転じており、そのまま土堤を乗り越えた。一 方, A-M2.5-2 はポケットへ落下した後, 他ケースより大き く反発・跳躍し、最も高い位置で土堤に衝突している。衝 突後は土堤へ貫入し続け、最終的に土堤を貫通した。レー ンBから落下させた2ケースについてはB-M1.9-1, B-M1.9-2 ともに土堤中腹で衝突しており、衝突後は土堤にほとん ど貫入していない。土堤への衝突後、いずれも土堤を駆け 上がって土堤上方を通過していったが、B-M1.9-2 は B-M1.9-1 のように土堤を飛び出すのではなく土堤に沿うよ うな軌跡となった。レーン C から落下させた C-M1.9-1 は A-M2.5-2 と同様に衝突高が高く、衝突角度が大きい。しか しながら A-M2.5-2 とは異なり、土堤を貫通することなく 土堤上を転落しながら通過する軌跡となった。

(3) エネルギー吸収性状

図 13 に各ケースのエネルギーの時刻歴波形を示す。な お, 土堤に衝突した時刻を 0ms とし, 線速度エネルギーを 赤線で、回転エネルギーを青線で、線速度エネルギーと回 転エネルギーの和である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3.1(2)中の式(1) ~ (3) の通りである。図より、いずれの実験ケースとも土 堤衝突後, 線速度エネルギー, 回転エネルギー, 全運動エ ネルギーともに徐々に減少している。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 一が同じような値をとるようになることが読み取れる。こ のことから,回転が作用した状態で土堤に衝突した場合, 土堤は重錘の線速度エネルギーを主に吸収し、回転エネル ギーは線速度エネルギーほど吸収されないことで線速度エ ネルギーと回転エネルギーが同じ値に近づくことが示唆さ れるが、これについては今後の検討課題である。

表 8 に各ケースのエネルギー吸収率を示す。表中のエネルギー吸収率は重錘が土堤衝突した時の運動エネルギーと 重錘が土堤の非衝突面側の法尻を通過したときの運動エネルギーの減少分を衝突前の運動エネルギーで除して算出したものであり、線速度エネルギー、回転エネルギー、全運動エネルギーの吸収率を示している。表から、土堤のエネルギー吸収率は線速度エネルギーが 54~95%。回転エネル

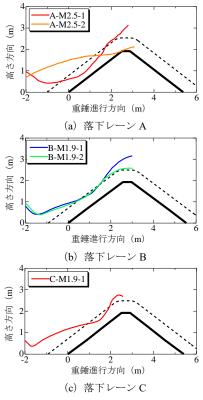


図 12 重錘軌跡図 (実規模土堤実験)

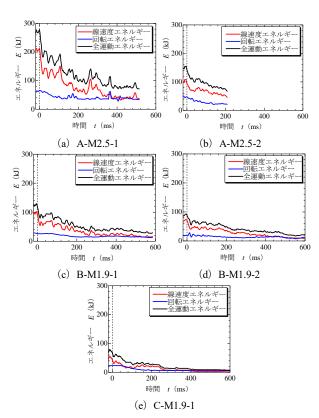


図 13 運動エネルギーの時刻歴波形 (実規模土堤実験)

ギーが 34%~77%, 全運動エネルギーが 54%~89%となっており, ケースによってばらつきが大きい。これは, 土堤への衝突条件がばらつき, ケースによって土堤衝突挙動が異なったためであると考えられる。線速度エネルギーの吸収率をみると, A-M2.5-2 を除いたケースではエネルギー吸

表 8 各エネルギー吸収率 (実規模土堤実験)

	エネルギー吸収率(%)		
ケース名	線速度	回転	全運動
	エネルギー	エネルギー	エネルギー
A-M2.5-1	84	50	77
A-M2.5-2	54	55	54
B-M2.5-1	86	51	80
B-M2.5-2	86	34	76
C-M1.9-1	95	77	89

収率が 84%~95%と多くのエネルギーを吸収しているが、A-M2.5-2 は 54%と他のケースのおよそ半分のエネルギーしか吸収していない。その理由として、A-M2.5-2 は衝突高が高く、土堤の天端付近に衝突した.そのため、すぐに土塊が押し抜かれてしまったことで土堤が十分な耐力を発揮できず、エネルギーを吸収しきれなかったためであると考えられる。回転エネルギーの吸収率をみるとA-M2.5-2 を除いた 4 ケースで線速度エネルギーよりもエネルギー吸収率が小さいことが分かる。このことから、ある程度低い高さで衝突する場合には線速度エネルギーの方が回転エネルギーよりも吸収されやすいと推察される。さらに、質量が1.9tの3 ケースの全運動エネルギーの吸収率と表 7の衝突角度を比較すると、衝突角が大きい順にエネルギー吸収率が大きくなっていることがわかる。このことから、エネルギー吸収率は衝突角度に依存すると推察される。

図 14 と表 9 に各ケースの全運動エネルギー吸収率の時 刻歴データを示す。なお, 小型土堤実験と同様, 貫入によ るエネルギー吸収と貫入後のエネルギー吸収の性状の違い を評価するため、貫入終了時刻を 0ms とした。なお、貫入 終了時刻は小型土堤実験と同様,土堤衝突時刻を 0ms とし たときに最大貫入量に至るまでの時間である。また、図の エネルギー吸収率は衝突時刻と貫入終了時刻、土堤のエネ ルギー吸収率の変動がほとんど終了した貫入終了後から 300ms での値をプロットしている。A-M2.5-2 は土堤を貫通 しており、土堤衝突時は常に土堤に貫入していたため 0ms までのデータとなっている。図より、いずれのケースも貫 入終了までのエネルギー吸収率の増加勾配の方が貫入終了 後のエネルギー吸収率の増加勾配よりも大きく、貫入によ り多くのエネルギーを吸収している。これより、実規模土 堤実験も小型土堤実験と同様、土堤への貫入がエネルギー 吸収率に大きく影響を及ぼすといえる。しかしながら,表 6 の小型土堤実験での貫入によるエネルギー吸収率(貫入 終了から 0ms のエネルギー吸収率) と比較すると小型土堤 実験よりもエネルギー吸収率が小さい傾向にあることがわ かる。その理由として、回転エネルギーが線速度エネルギ ーよりも吸収されにくいため、エネルギー吸収率が小さく なったと考えられる。一方, 貫入終了後のエネルギー吸収 率の増加勾配をみるとケース間のばらつきは少なく, いず れのケースも同じ傾きをとっている。これより、土堤への 衝突条件がばらついても貫入終了後の駆け上がりによるエ ネルギー吸収率はばらつきにくいと推察される。

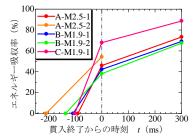


図 14 貫入前後の全運動エネルギー吸収率の推移 (実規模土堤実験)

表 9 貫入前後の全運動エネルギー吸収率の推移

(关/风)英工徒关款/				
全運動エネルギー吸収率 (%)				
ケース名	貫入終了からの時刻 (ms)			
	0	300		
A-M2.5-1	46	73		
A-M2.5-2	54	-		
B-M2.5-1	42	69		
B-M2.5-2	38	67		
C-M2.5-1	68	89		

以上から、斜面から重鍾を転落させることで土堤へ衝突させる実規模土堤実験ではケースにより土堤のエネルギー吸収率がばらつく結果となった。これは衝突高や衝突角度等の土堤への衝突条件が異なったことで挙動にばらつきが生じたことが原因であると考えられる。そのため、落石防護土堤の性能設計確立のためには土堤に衝突する前の運動形態であるポケットの反発・跳躍挙動にも着目し、土堤への衝突位置や衝突角度に及ぼす影響について検討する必要があることが分かった。

(4) 土堤破壊性状

図 15 に各ケースの実験終了後の土堤断面写真および変形図を示す。土堤断面には衝突による土堤内部の変状を計測するために着色砂を5本埋設している。図には、着色砂のせん断がみられた箇所を実線で、着色砂のせん断から予測した想定すべり線を点線で追記している。

図より、落下レーンAの土堤断面にのみすべり線が発生しているが、このすべり線は A-M2.5-2 の衝突の際に発生したものであると考えられる。A-M2.5-2 は衝突高、衝突角ともに全5ケースの中で最も大きかったために、土堤天端を破壊しやすい条件で土堤に衝突し、土堤を貫通した。一方、落下レーンB、Cではすべり線は発生していないことが分かる。落下レーンBについてはB-M1.9-1、B-M1.9-2ともに衝突角がそれぞれ21.84°、20.85°と小さく、土堤へ貫入しなかったために土堤が変形されず、すべり線が発生しなかったと考えられる。また、落下レーンCについては衝突角が29.31°と比較的大きな角度で衝突し、土堤への貫入痕もみられるものの、土堤衝突時の運動エネルギーが小さく、すべり線の発生には至らなかったと考えられる。

土堤の損傷度合いを定性的に比較すると,落下レーン A,

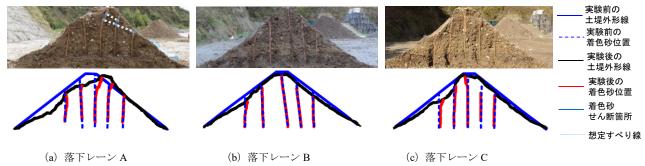


図 15 土堤内部の変状 (実規模土堤実験)

落下レーン C, 落下レーン B の順に損傷度合いが大きいと判断できる。落下レーン A の損傷度合いが最も大きくなった理由として, 重錘質量 2.5t, 落下高さ 30m のため土堤衝突時のエネルギーが他のレーンよりも大きかったことが挙げられる。また, 落下レーン C の損傷度合いが落下レーン B よりも大きい理由として衝突角が大きく, 土堤へ貫入しやすい条件で衝突したためであると考えられる。そのため, 衝突角が大きくなるほど土堤へ貫入しやすくなることで土堤の損傷度合いが大きくなるといえる。

4. 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、土堤のエネルギー吸収性能や重錘の動的挙動について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 小型土堤実験において,重錘は土堤に衝突後,土堤に 貫入し,その後は駆け上がりまたは跳躍挙動を示した。 重錘捕捉性能は土堤材料により異なり,粘性土,砂, 砕石の順に大きい結果となった。
- 2) 小型土堤実験において, 重錘の運動エネルギーは衝突 後約50ms にかけて急激に減少し, その後約100ms ま でには緩やかな減少または一定に転じた。衝突直後の 急激な減少は貫入によるもので, 土堤への貫入がエネ ルギー吸収率に大きく影響を及ぼすことが判明した。
- 3) 小型土堤実験において、粘性土の重錘捕捉性能が最も高くなる理由は砂よりも衝突時の土堤の変形が小さく、変形に対する抵抗が大きいことや圧縮変形するために重錘の貫入を許すことが挙げられる。一方、砕石は貫入しにくく、土堤が変形しにくい材料であったためにエネルギー吸収性能が十分に発揮できず、重錘捕捉性能が低くなるものと考えられる。
- 4) 実規模土堤実験において, 重錘の土堤への衝突条件が ケースによってばらついた。そのため, 衝突時の挙動

がばらつき、土堤のエネルギー吸収率がばらついた。 よって、落石防護土堤の性能設計確立のためには衝突 する前の運動形態であるポケットの反発・跳躍挙動に も着目し、土堤への衝突位置や衝突角度に及ぼす影響 を検討する必要があることが分かった。

- 5) 実規模土堤実験において、小型土堤実験と同様に土堤 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。しかしながら小型土堤実験よりも貫入に よるエネルギー吸収率が小さくなる傾向がみられた。 その理由として、回転エネルギーが線速度エネルギー よりも吸収されにくいことが挙げられる。
- 5) 実規模土堤実験において、土堤の損傷度合いは落下レーン A、落下レーン C、落下レーン B の順に大きい。 落下レーン A の損傷度合いが最も大きい理由として、 土堤衝突時のエネルギーが最も大きいことが挙げられる。 落下レーン C の損傷度合いが落下レーン B よりも大きい理由として、衝突角が大きく、土堤へ貫入しやすい条件で衝突したためであると考えられる。 そのため、衝突角が大きくなるほど土堤へ貫入しやすくなることで土堤の損傷度合いが大きくなるといえる。

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2017.12
- 2) 新技術情報提供システム:

https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/dtlprint?regNo=H K-130011%20

(閲覧日:2020年8月27日)

- 3) European Organization for Technical Approvals (EOTA): ETAG27, GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTIONKITS, p.34, 2008.2.1
- 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,応用力学論文集 Vol.22, I 389-I 400201