

中型土堤の重錘衝突実験による重錘衝突時の速度・エネルギーの遷移挙動

Transition behavior of velocity and energy during impact with a falling body by weight impact test on a medium-scale rockfall protective soil embankment

名古屋工業大学	○学生員	木村 絢 (Aya Kimura)
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	磯合 凌弥 (Ryoya Isoai)
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	正 員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
豊橋技術科学大学	学生員	Arif Daniel Bin Azumi

1. はじめに

近年、集中豪雨や大地震など自然災害の激甚化に加え高度経済成長期に整備されてきたインフラの更新時期も重なり、大規模な落石災害の発生リスクが高まっている。落石防護土堤（以下、土堤と示す）は土のみで構成され、経済性、施工性および維持管理性に優れた対策工であるとされている。しかし、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、落石防護土堤へ重錘が衝突した際の基本的挙動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振り子運動による衝撃載荷実験を実施した。

2. 実験概要

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 に実験に使用した重錘（EOTA²⁾型重錘）および形状寸法を、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、基層部は厚さ 0.3m 毎に、土堤部は 0.25m 毎に砂を敷き均し、振動締め固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。

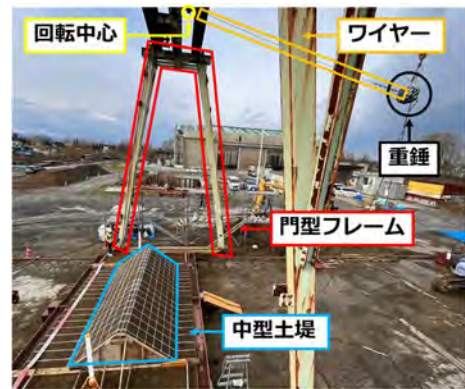


図-1 実験場全体図

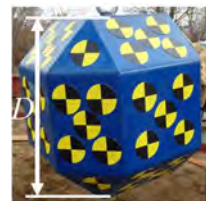


図-2 EOTA 型重錘

表-1 重錘形状寸法

質量 M (kg)	一辺の長さ D (m)	慣性 モーメント I ($t \cdot m^2$)
234.5	0.5	0.00717

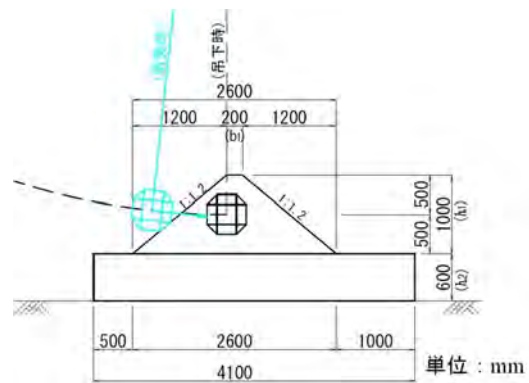


図-3 実験概要図

表-2 実験ケース一覧

ケース名	落下高さ (m)	土堤衝突時合成速度 (m/s)	換算落下高さ (m)
I-4	4	9.37	4.48
I-6	6	11.64	6.91

表-3 実験結果一覧

(a)土堤衝突時

土堤衝突時									
ケース名	時刻 (ms)	水平方向速度 (m/s)	鉛直方向速度 (m/s)	合成速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	衝撃力 (kN)	線速度エネルギー E_v (kJ)	回転エネルギー E_r (kJ)	全運動エネルギー E (kJ)
I-4	0	9.31	-1.05	9.37	-0.56	0.56	10.29	0.0011	10.30
I-6	0	11.55	-1.40	11.64	-1.23	2.01	15.88	0.0054	15.89

(b)最大貫入時

最大貫入時									
ケース名	時刻 (ms)	水平方向速度 (m/s)	鉛直方向速度 (m/s)	合成速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	衝撃力 (kN)	線速度エネルギー E_v (kJ)	回転エネルギー E_r (kJ)	全運動エネルギー E (kJ)
I-4	65	2.45	2.05	3.12	6.36	24.04	1.14	0.1449	1.29
I-6	53	3.68	2.93	4.71	7.59	9.76	2.60	0.2063	2.80

(c)衝撃力最大時

ケース名	時刻 (ms)	最大衝撃力 (kN)
I-4	18.5	52.16
I-6	17.5	64.22

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 とした計 2 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より計測した合成速度および換算落下高さも併せて示す。換算落下高さとは、計測した土堤衝突時の合成速度より自由落下時の速度算出式から逆算した落下高さであり、式(1)より算出した。

$$H = \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、 H ：換算落下高さ (m)

V ：土堤衝突時合成速度 (m/s)

g ：重力加速度 (m/s²)

2.2 計測項目

本実験における計測項目は重錘挙動および重錘加速度である。重錘挙動は高速度カメラ画像 (1000fps) から PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析により重錘重心の座標を算出した。そして重錘の重心座標から重錘の軌跡、速度、角速度、運動エネルギーを導出した。ただし、画像解析から算出したデータは土堤に衝突した際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、速度から算出するデータに関しては 3word (3ms) の中央値処理および 5word (5ms) の矩形移動平均処理を施している。加速度計は重錘の非衝突面側に取り付け、加速度計の計測上限値は 1200m/s² である。

3. 実験結果

3.1 重錘重心の軌跡

図-4 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、実線で土堤形状を、破線で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。また、プロットにて最大貫入時の座標を示す。I-4 では土堤に衝突し、最大貫入後に法面上を駆け上がり、土堤から離れる方向へ跳躍した後に天端付近で停止し、法面を転がり下りる挙動となった。一方で I-6 は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。その後は天端付近で重錘が跳躍し、土堤法面に再

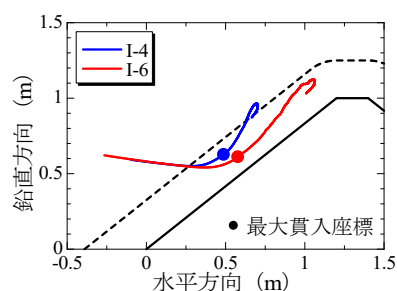


図-4 重錘重心の軌跡図

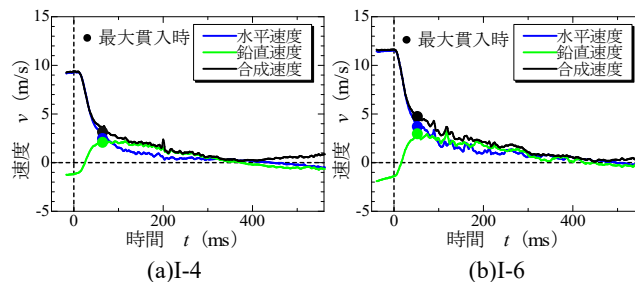


図-5 重錘並進速度の時刻歴波形

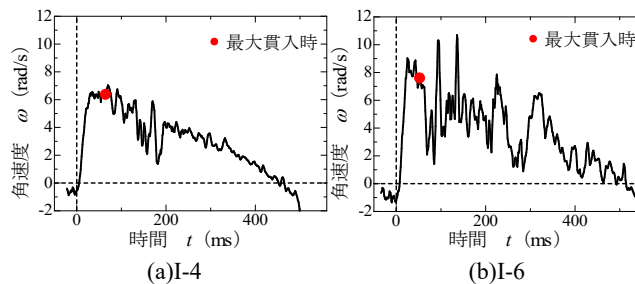


図-6 重錘角速度の時刻歴波形

度衝突してから法面を転がり下りる挙動を示した。

3.2 速度、エネルギー、加速度の時刻歴波形

表-3 に土堤衝突時の実験結果一覧を示す。水平方向速度、鉛直方向速度は重錘重心の速度であり、水平方向速度は重錘進行方向を、鉛直方向速度は鉛直上向きを正としている。合成速度は水平、鉛直方向速度の合成値を

表す。角速度は重錘重心周りの角速度であり、重錘の進行方向に対して順回転を正としている。図-5、6、7に重錘並進速度、重錘角速度、重錘衝撃力の時刻歴波形を示す。重錘衝撃力は加速度計より得られた加速度に重錘質量(234.5kg)を乗じて算出した。なお、いずれの時刻歴波形も土堤衝突時刻を0sとしており、最大貫入時をプロットで示している。加えて、図-7のみ最大衝撃力を計測した時刻を赤プロットで示している。

表-3、図-5より土堤衝突時の重錘の合成速度はI-4で9.37m/s、I-6で11.64m/sであった。2ケースとも土堤衝突直後から最大貫入時までは水平方向速度が急激に減少し、代わりに鉛直方向上向き速度が急激に増加していることが分かる。その後、100ms付近で水平方向および鉛直方向速度は同程度となり、以降は緩やかに減少する傾向を示した。図-6より重錘角速度はノイズが大きいいため波形形状の考察が困難であるが、2ケースとも土堤衝突時刻以降は50ms付近まで単調増加した後に緩やかな減少傾向を示し、450ms程度で0rad/s程度となっている。また、最大貫入時前後における波形の変化は見られない。図-7より重錘衝撃力は2ケースとも土堤衝突直後に急激に増加し、20ms付近で最大衝撃力となった。最大衝撃力はI-4で52.16kN、I-6で64.22kNであった。最大衝撃力を迎えた後は最大貫入時を境に緩やかな減少に転じていることが分かる。また、2ケースとも波形継続時間は200ms程度であった。

図-8に運動エネルギーの時刻歴波形を示す。また、線速度エネルギー E_v 、回転エネルギー E_r 、全運動エネルギー E はそれぞれ式(2)~(4)の通りに算出した。

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

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

$$E = E_v + E_r \quad (4)$$

ここに、 M : 重錘質量 (t)

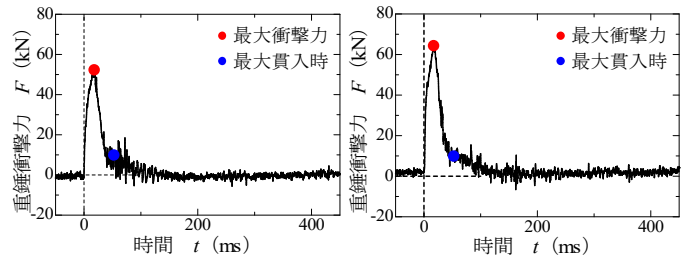
v : 重錘の合成速度 (m/s)

I : 重錘の慣性モーメント (t・m²)

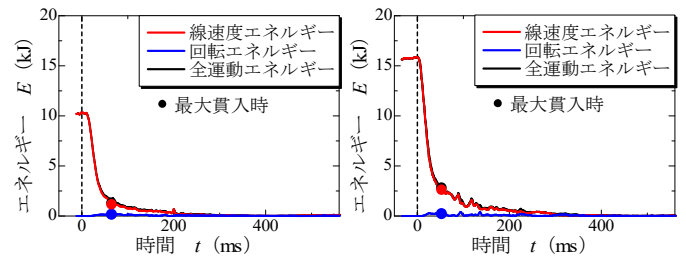
ω : 重錘の角速度 (rad/s)

なお、土堤衝突時刻を0sとしており、また、最大貫入時をプロットで示している。図-8より土堤衝突後から線速度エネルギーおよび全運動エネルギーが急激に減衰している。その後、最大貫入時付近を境に緩やかな減少に変化し、200ms付近で運動エネルギーは0kJとなった。このことより、土堤衝突によるエネルギー減衰は土堤貫入によるものが大きく、その後のエネルギー減衰はかけあがりによるものと考えられる。

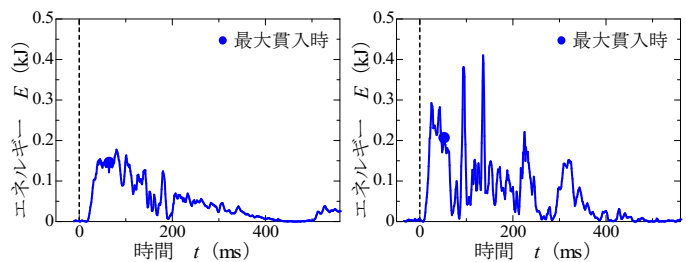
一方で、回転エネルギーは運動エネルギーの1/10以下で推移しているため図-8では比較が困難である。そこで図-9に回転エネルギーのみの時刻歴波形を示す。図-9より回転エネルギーは50ms程度までは急激に増加した後に緩やかな減少傾向を示している。線速度エネルギーと異なり、回転エネルギーが土堤衝突後に増加するのは土堤に衝突することで並進運動が回転運動へと転じたためと考えられる。



(a)I-4 (b)I-6
図-7 重錘衝撃力の時刻歴波形



(a)I-4 (b)I-6
図-8 運動エネルギーの時刻歴波形



(a)I-4 (b)I-6
図-9 回転エネルギーの時刻歴波形

4. まとめ

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、実規模の1/2スケールを想定した中型模型を対象に振り子運動による衝撃载荷実験を実施した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 並進速度、線速度エネルギーは土堤衝突後から最大貫入時まで急激な減衰を示し、その後は緩やかな減少に転じた。
- 2) 角速度、回転エネルギーは土堤衝突後に増加することが示された。これは土堤に衝突することで並進運動が回転運動へと転じたためと考えられる。
- 3) 土堤衝突によるエネルギー減衰は貫入によるものが大きく、その後のエネルギー減衰はかけあがりによるものだと考えられる。

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: Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits, 2013.