

# 実規模落石防護土堤を対象とした重錘衝突実験

## Weight-Impact Test for Full-Scale Rockfall Protective Soil Embankment

名古屋工業大学	○学生員	松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
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	杉山直優 (Naomasa Sugiyama)
(株)構研エンジニアリング	非会員	杉山裕 (Yutaka Sugiyama)
(株)構研エンジニアリング	正員	牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
寒地土木研究所	正員	今野久志 (Hisashi Konno)

### 1. はじめに

落石対策便覧<sup>1)</sup>に示される落石対策工のうち、落石防護土堤や溝等の土質系落石防護施設（以後、落石防護土堤あるいは単に土堤）は、道路際に比較的平坦なクリアランスがあり、土砂材料の入手が容易である場合等の現場条件によっては最も経済的な対策工となる。

しかしながら、同便覧における落石防護土堤に関する設計の考え方は、落石エネルギーの吸収・消散のメカニズムの概念が文言として記述されているのみであり、定量的には示されていないのが現状である。

そこで本稿では、落石防護土堤に関する落石捕捉性能把握のための基礎資料収集を目的として、実規模落石防護土堤を対象とした重錘衝突実験を実施して、重錘衝突時の動的挙動や運動エネルギー減衰、土堤の変形・破壊性状等について検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験ケースは、重錘質量及び寸法、落下高さを変化させた全5ケースである。表中の実験ケース名については、第一項目は衝突箇所、第二項目は重錘質量をそれぞれ示し、末尾の番号は各実験順序を示している。

図-1は土堤模型概要図を示している。図には、土堤内部の変状状況計測のための着色砂埋設位置及び重錘衝突位置も併せて示している。土堤模型の断面形状は高さ $h=2.0\text{m}$ 、天端幅 $b=0.3\text{m}$ 、法面勾配1:1.2（底面幅5.1m）の左右対称の台形状となっており、斜面法尻から土堤天端までの水平距離を事前の重錘挙動確認実験により6.0mと設定した。土堤模型延長は全長18mであり、斜面形状及び重錘落下箇所を踏まえて着色砂埋設位置を設定している。土堤基礎は $N_d$ 値が3~7程度の盛土地盤となる。土堤の施工については、厚さ0.3m毎に敷き均して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。表-2に土堤の簡易貫入試験結果、表-3に土堤材料に関する物性値一覧を示す。

重錘はいずれもETAG<sup>2)</sup>に準拠した多面体形状であり、土堤高さの1/2程度の大きさである。

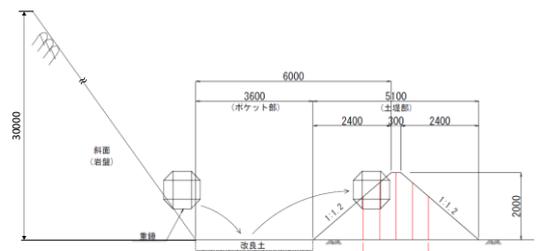
#### 2.2 実験方法及び測定項目

図-2は実験場写真を示している。落下箇所Aはパッ

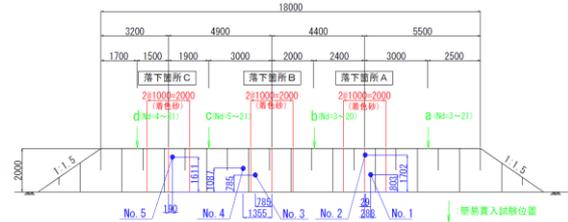
表-1 実験ケース一覧

No.	ケース名	落下箇所	落下高さ	重錘質量	重錘径
1	A-M2.5-1	A	30m	2.5ton	1.120m
2	A-M2.5-2	A	30m	2.5ton	1.120m
3	B-M1.9-1	B	25m	1.9ton	1.020m
4	B-M1.9-2	B	22m	1.9ton	1.020m
5	C-M1.9	C	22m	1.9ton	1.020m

※落下高さはレーザー変位計による読み取り値



(a) 断面図



(b) 側面図

図-1 土堤模型概要図（単位：mm）

表-2 簡易貫入試験結果

No.	計測位置	$N_d$ 値
a	落下箇所A中心(着色砂の中心)から土堤ふち側に3m	3~21
b	落下箇所B中心(着色砂の中心)から落下箇所A側に2m	3~20
c	落下箇所B中心(着色砂の中心)から落下箇所C側に3m	5~21
d	落下箇所C中心(着色砂の中心)から土堤ふち側に1.5m	4~31

表-3 土堤材料の物性値一覧

地盤材料の分類名: 細粒分まじり砂質壤		
項目	単位	試験結果
土粒子の密度	g/cm <sup>3</sup>	2.634
自然含水比	%	12.7
均等係数		352
最適含水比	%	15.3
内部摩擦角	度	34.14
粘着力	kN/m <sup>2</sup>	1.1
衝撃加速度	G	31.7

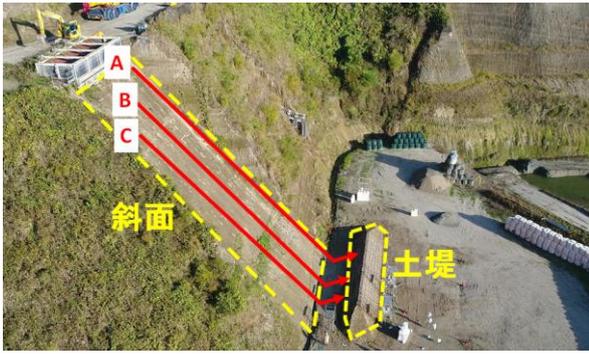


図-2 実験場写真

クハウにて重錘を押し出して、落下箇所 B 及び C はクレーンにて重錘を吊り下げそれぞれ落下させた。

実験での測定項目は重錘衝突時における重錘挙動及び実験後における土堤断面の変状である。重錘挙動については 3 台の高速カメラ (500fps) を用いて重錘の表面に描かれ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、重錘の重心座標を算出し、この重心座標を元に、重錘の軌跡、速度、角速度、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、飛散した土粒子、または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 3word (6ms) の中央値処理を施し、その後、5word (10ms) の短形移動平均処理により、データをスムージングした。

また、画像解析は、重錘が計測範囲外になってしまった時刻において解析終了とした。また、重錘の土堤通過後の第一落下点、最終到達距離を手動で計測した。

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、重錘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で土堤内部の破壊性状を計測した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 重錘挙動

##### (1) 重錘の土堤入射条件

表-4に各ケースにおける重錘の土堤入射条件及び、土堤衝突後の重錘到達距離を示す。ただし、表中の衝突高さは地表面と重錘重心との距離を示し、入射角度は土堤法面と重錘入射方向との角度を示す。また、重錘重心が非衝突面側の法肩を超えた場合を通過、越えなかった場合を捕捉と定義した。なお、C-M1.9 のケースでは重錘は土堤通過後、非衝突面側の法面を転がっていったため、第一落下点の記載はしていない。

重錘の土堤入射条件に着目すると、衝突高さは約 0.8m~1.7m、入射角度は約  $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、衝突速度は約 7m/s~9m/s、衝突角速度は約 12rad/s~18rad/s とケースによってばらつきが大きい。しかしながら、すべてのケースにおいて、重錘は土堤を通過する結果となった。

##### (2) 土堤衝突時の重錘挙動

図-3~5 に高速カメラより得られた重錘の軌跡図、速度、角速度の時刻歴波形を示す。ただし、軌跡図には、黒の実線で土堤位置、黒の破線で土堤から重錘半径分のオフセットラインを併せて記載している。なお、時刻歴

表-4 土堤入射条件及び重錘到達距離

No.	ケース名	土堤入射条件				通過or捕捉	土堤通過後の重錘到達距離(衝突面側の法肩基準)		※入射角度について
		衝突高さ	入射角度	衝突速度	衝突角速度		第一落下点	最終到達距離	
1	A-M2.5-1	0.80m	16.42°	9.14m/s	18.15rad/s	通過	8.9m	18.0m	
2	A-M2.5-2	1.70m	39.33°	6.94m/s	15.72rad/s	通過	9.8m	26.9m	
3	B-M1.9-1	0.79m	0.09°	8.49m/s	14.64rad/s	通過	6.1m	12.7m	
4	B-M1.9-2	1.09m	18.76°	8.43m/s	11.96rad/s	通過	5.5m	16.9m	
5	C-M1.9	1.61m	36.55°	8.81m/s	14.04rad/s	通過		12.1m	

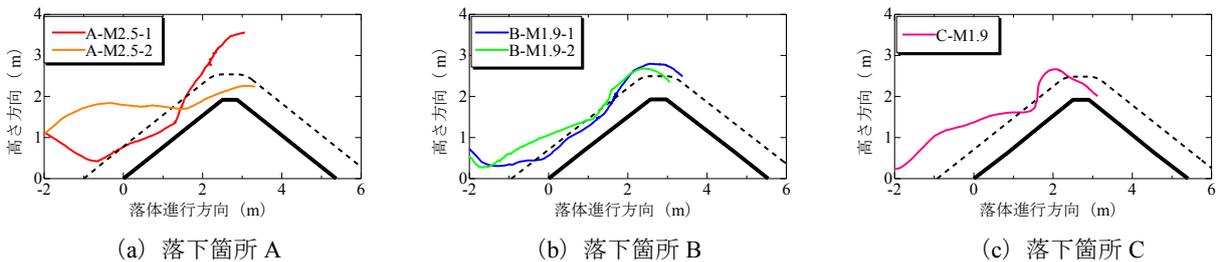


図-3 重錘の軌跡図

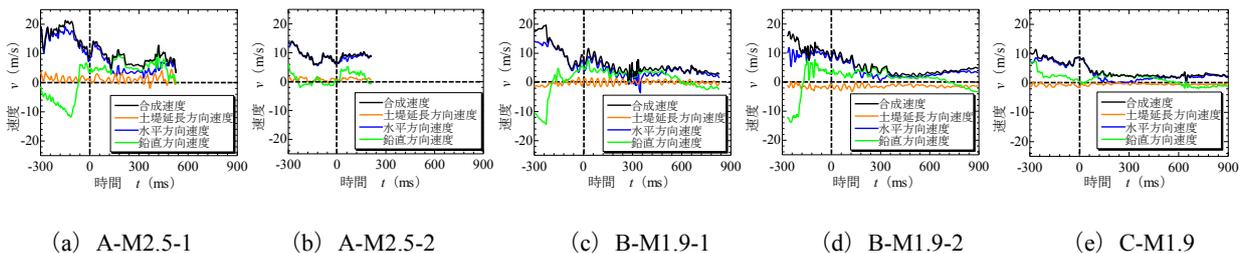


図-4 重錘速度の時刻歴波形

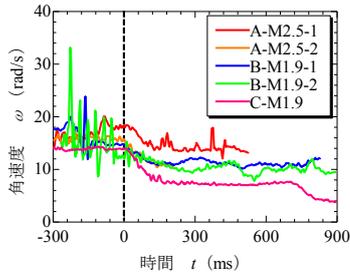


図-5 重錘角速度の時刻歴波形

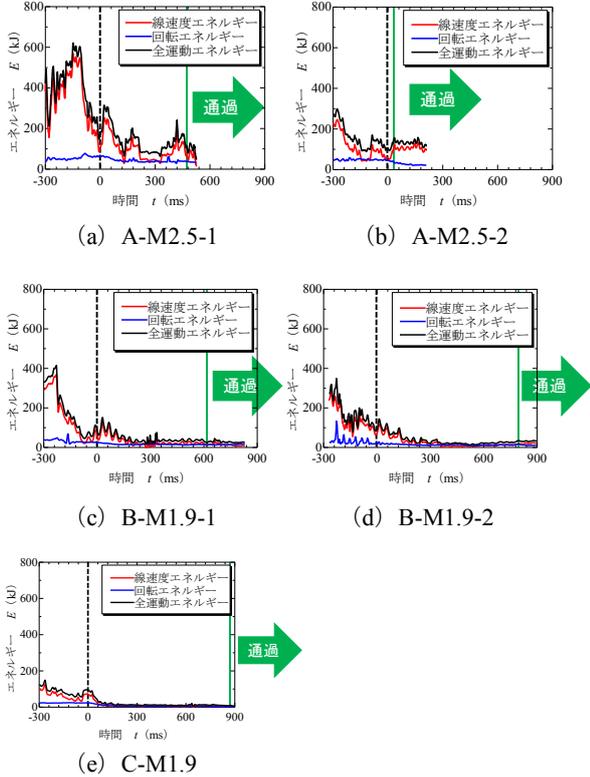


図-6 重錘エネルギーの時刻歴波形

表-5 エネルギー比及びエネルギー吸収率

No.	ケース名	土堤入射時の $E_v$ と $E_r$ の比率	エネルギー吸収率
1	A-M2.5-1	59%	37%
2	A-M2.5-2	81%	0%
3	B-M1.9-1	42%	65%
4	B-M1.9-2	24%	62%
5	C-M1.9	33%	91%

波形を示す図においては衝突時の時刻を0とした。

図-3の軌跡図に着目すると、A-M2.5-1、C-M1.9では、重錘は一定量まで土堤に貫入し、その後上方へ向きを変え、土堤法面を駆け上がることなく通過した。A-M2.5-2では、重錘は土堤天端付近に衝突し、その後貫入し続け、通過した。B-M1.9-1では、重錘はポケットを転がるように入射し、そのまま土堤法面を駆け上がり通過した。B-M1.9-2では、重錘は法面上部に衝突し、その後法面を駆け上がり通過した。

図-4の速度に着目すると、すべてのケースにおいて土堤延長方向速度はほぼ0程度であるため、重錘は平面的に土堤へ垂直に衝突していることが分かる。また、各ケースの合成速度に着目すると、A-M2.5-1、A-M2.5-2では土堤衝突後、合成速度は増加し、B-M1.9-1、B-M1.9-2

では合成速度の値に大きな変化は見られず、C-M1.9では、合成速度は減少していることがわかる。

図-5の角速度に着目すると、すべてのケースで、土堤衝突後に角速度は減少する傾向にある。これは、重錘が土堤に衝突することにより回転エネルギーが線速度エネルギーに移行することや重錘が土堤法面を駆け上がる際に回転エネルギーが位置エネルギーに移行すること、滑りによるエネルギー損失が生じていること等考えられる。

### (3) 土堤の重錘エネルギー吸収性能

図-6に重錘エネルギーの時刻歴波形を示す。なお、土堤衝突時刻(0ms)を黒の破線、重錘が土堤を通過した時刻を緑色の実線で示す。また、線速度エネルギー $E_v$ は式(1)、回転エネルギー $E_r$ は式(2)、全運動エネルギー $E$ は式(3)を用いて算出した。

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

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

$$E = E_v + E_r \quad (3)$$

ただし、 $m$ :質量 (ton)、 $v$ :合成速度 (m/s)、 $I$ :慣性モーメント、 $\omega$ :角速度 (rad/s) である。

各グラフより、重錘衝突後、A-M2.5-2を除き、全運動エネルギーは土堤通過時まで、徐々に減少する傾向にある。既往の小型模型実験<sup>3)</sup>では、重錘(落体)は土堤衝突直後、全運動エネルギーが急激に減少する傾向にあったが、本実験では急激に減少していない。これらについては、今後検証する必要がある。また、A-M2.5-2のみ重錘衝突後から土堤通過時にかけて全運動エネルギーが増加したが、これについても今後検証する必要がある。

表-5に各ケースにおける、土堤入射時の線速度エネルギーに対する回転エネルギーの比率及びエネルギー吸収率をまとめた表を示す。なお、エネルギー吸収率とは、土堤衝突前の重錘の全運動エネルギーが土堤の非衝突面側の法面を通過した地点までどの程度減少したかを表す。

まず、線速度エネルギーと回転エネルギーの比率に着目すると、24%~81%とばらつきが大きい。落石対策便覧<sup>1)</sup>では、大半の落石の回転エネルギーは線速度エネルギーの10%程度であると記載されている。そのため、本実験結果では重錘の並進運動に比べ回転運動の割合が大きいことがわかる。これは、重錘・斜面形状が実際の落石よりも回転しやすくなっていることが原因であると考えられる。さらに、本実験ではすべてのケースにおいて重錘は土堤を通過したが、土堤入射時の回転運動の割合が大きいことも原因の一つであると考えられる。

次に、エネルギー吸収率に着目すると、0%~91%とばらつきが大きい。既往の小型土堤実験<sup>3)</sup>では、重錘エネルギーの90%~100%を土堤が吸収したことから、本実験での土堤の重錘捕捉性能は低いと言える。その原因として、小型土堤実験<sup>3)</sup>回転運動の割合が大きいことや、土堤衝突高さが高いケースもあること、重錘が斜め上に入射しているケースもあること等考えられる。

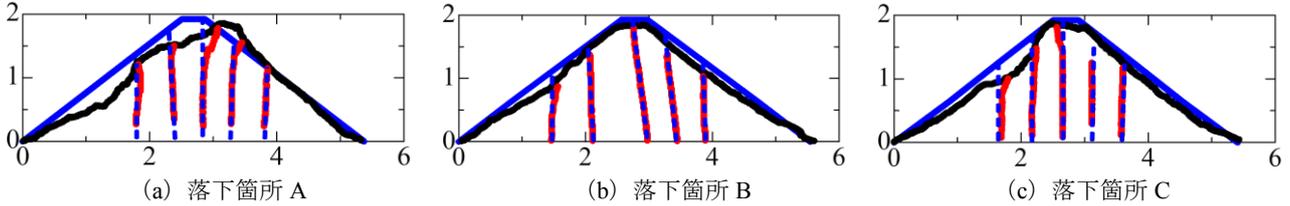
### 3.2 重錘衝突後の土堤変状

図-7に実験終了後の土堤断面の写真、図-8に土堤断面の写真から作成した変形図を示す。なお、図-7では黄色



(a) 落下箇所 A (b) 落下箇所 B (c) 落下箇所 C

図-7 実験終了後の土堤断面の写真



(a) 落下箇所 A (b) 落下箇所 B (c) 落下箇所 C

図-8 土堤断面の変形図

の実線で想定滑り線を示す。また、図-8では青色の実線で衝突前の外形線、青色の破線で衝突前の着色砂の位置、黒色の実線で実験後の外形線、赤色の実線で実験後の着色砂の位置を示す。

まず図-7に着目すると、落下箇所 A の土堤断面のみで滑り線が発生している。この滑り線は、A-M2.5-2 の衝突の際発生したものと考えられる。A-M2.5-2 では、衝突高さ 1.7m と比較的高い位置で土堤に衝突しており、かつ、質量 2.5ton の重錘を使用しているため、他のケースに比べ、土堤の天端付近を破壊しやすい衝突であるといえる。また衝突箇所 B と C では、既往の実験<sup>3)</sup>のような多数の滑り線は発生していなかった。これについても今後検証する必要がある。

次に図-8に着目し、土堤の損傷度合いを定性的に比較すると、衝突箇所 A、衝突箇所 C、衝突箇所 B の順に損傷度合いが大きい。衝突箇所 A の損傷度合いが他の衝突箇所と比べて大きい原因として、使用した重錘の質量が大きいことが考えられる。衝突箇所 C の損傷度合いが衝突箇所 B と比べて大きい原因として、土堤のエネルギー吸収率が大きいことが考えられる。衝突箇所 B に衝突した重錘のエネルギー吸収率は 65%、62%であるが、衝突箇所 C に衝突した重錘のエネルギー吸収率は 91%である。衝突箇所 C ではより多くの重錘エネルギーを吸収したため、損傷度合いも大きくなった可能性がある。

#### 4. まとめ

本稿では、落石防護土堤に関する落石捕捉性能把握のための基礎資料収集を目的として、実規模落石防護土堤を対象とした重錘衝突実験を実施して、重錘衝突時の動的挙動や運動エネルギー減衰、土堤の変形・破壊性状等について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本実験では、重錘の土堤入射条件がケースによって差が大きい、すべてのケースにおいて重錘は土堤を通過する結果となった。これは、本実験で使用した重錘形状が回転しやすいため、全運動エネルギーに占める回転エネルギーの割合が大きくなったためであると考えられる。
- 2) 重錘は土堤衝突直後、速度が増加する場合と減少する場合があるが、角速度はすべてのケースにお

いて減少した。速度の増加は、回転エネルギーが線速度エネルギーへ移行することが原因と考えられる。また、角速度が減少した原因として、線速度エネルギーへの移行以外に、土堤法面を駆け上際の位置エネルギーへの移行や滑りによる損失等が考えられる。

- 3) 土堤入射時の線速度エネルギーと回転エネルギーの比率に着目すると、24%~91%と実際の落石の比率（10%程度）と比較して大きい結果となった。また、エネルギー吸収率に着目すると、0%~91%と既往の実験<sup>3)</sup>（90%~100%）と比較して小さい結果となった。これは、回転運動の割合が大きいことや、土堤衝突高さが大きいこと、重錘が斜め上に入射すること等考えられる。
- 4) 土堤断面の写真より、落下箇所 A のみ滑り線が発生したが、その他の落下箇所では滑り線は発生しなかった。また、既往の実験<sup>3)</sup>で発生した多数の滑り線は発生しなかった。
- 5) 土堤の損傷度合いを定性的に比較すると、衝突箇所 A、衝突箇所 C、衝突箇所 B の順に損傷度合いが大きい。衝突箇所 A が他の衝突箇所と比べて大きい原因として、使用した重錘の質量が大きいことが考えられる。衝突箇所 C の損傷度合いが衝突箇所 B と比べて大きい原因として、土堤のエネルギー吸収率が大きいことが考えられる。

今後はさらなる実規模土堤実験を実施し、最終的には落石防護土堤の設計法確立を試みる。

#### 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 PROTECTIONKITS、p.34、2008。
- 3) 堀耕輔、前田健一、松尾和茂、峯祐貴、牛渡裕二、今野久志：外力を変化させた落石防護土堤の重錘衝突実験、平成 30 年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、A-37、2019。