

法面勾配を変化させた落石防護土堤の重錘衝突実験

Weight-impact test of rockfall protective soil embankment with varying slope

(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
名古屋工業大学
名古屋工業大学
土木研究所寒地土木研究所

○ 正会員 鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
正会員 高橋浩司 (Koji Takahashi)
正会員 山内翼 (Tsubasa Yamauchi)
学生会員 堀耕輔 (Kosuke Hori)
正会員 前田健一 (Kenichi Maeda)
正会員 今野久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

落石災害は、人命に直接関わりとともに、道路網寸断等、地域生活に大きな影響を与える現象である。落石は、豪雨、強風、地震および凍結融解等を誘因として発生しており、道路管理上の大きな問題になっていることから、落石災害を防止するための適切な対策工の実施が求められている。落石対策便覧¹⁾に示される落石対策工のうち、落石防護工に位置づけられる落石防護土堤や溝等の土質系落石防護施設（以後、土堤）は、比較的規模の大きな落石条件に対応可能であり、クリアランスや土砂材料等の現場条件によっては経済的な対策工となり得る。しかしながら、同便覧では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。

このような背景より、本研究では落石防護土堤および溝に関する落石防護性能の把握のための基礎資料収集を目的として、高さ 0.5 m の土堤模型を対象とした挙動確認実験を実施している。本論文では、土堤法面勾配を変化させた重錘衝突実験の結果について報告する。

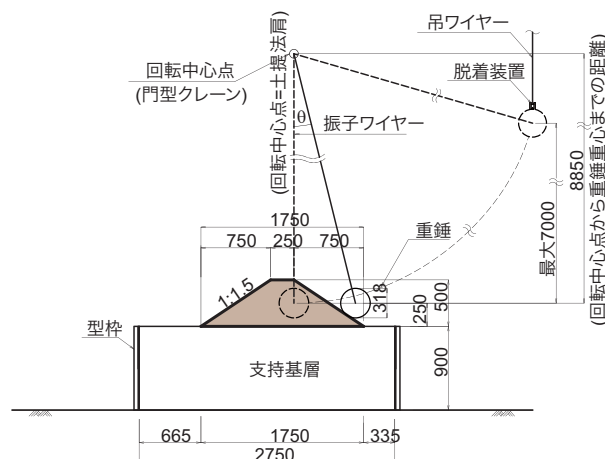
2. 実験概要

2.1 試験体概要

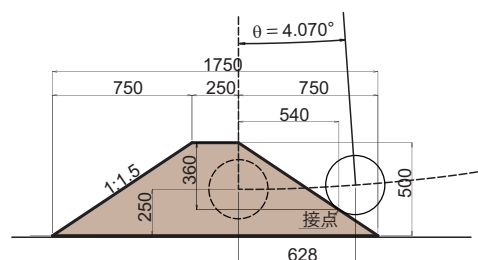
写真-1 および図-1 には、実験状況写真および実験概要図を示している。土堤模型の断面形状は高さ 0.5 m、天端幅 0.25 m、底面幅 1.75 m および 1.25 m（法面勾配 1:1.5 および 1:1.0）の左右対称の台形状となっている。土堤模型延長は全 12 m であり、1つの実験に対して影響範囲が延長 3 m 程度と仮定し、3 m 毎に荷重を作用させている。土堤下面には厚さ 0.9 m の支持基層を設けている。重錘は直径 318

mm、質量 54 kg の球体で、表層に板厚 9 mm の鋼板を使用し、内部にコンクリートを充填して製作した。

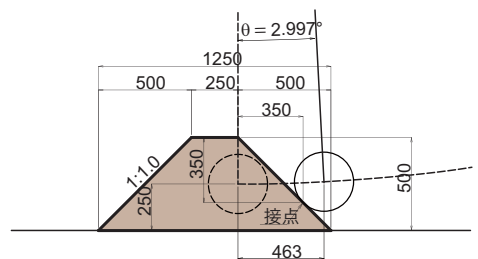
表-1 には実験ケース一覧を示している。表中の実験ケース名については、I の後ろに土堤法面勾配を示している。実験は、重錘を振り子運動により土堤に衝突させて実施した。振り子運動の回転中心点は土堤模型法肩部の衝突面側と一



(a) 土堤概要



(b) I1.5



(c) I1.0

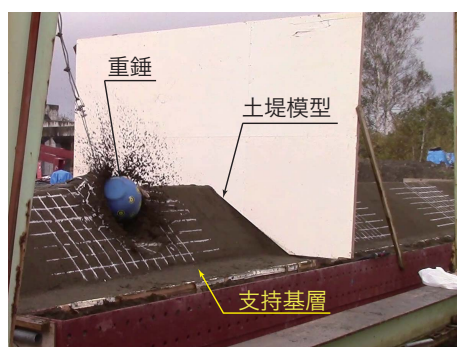


写真-1 実験状況写真

図-1 実験概要図

表－１ 実験ケース一覧

ケース名	载荷方法	土堤勾配	落下高さ
I1.5	衝撃 (単一)	1:1.5	6 m
I1.0		1:1.0	6 m

表－２ 材料試験結果一覧

項目	単位	試験結果
粗粒率	-	1.48
表乾密度	(g/m^3)	2.58
吸水率	(%)	3.24
微粒分量	(%)	2.2
内部摩擦角(ϕ)	($^{\circ}$)	36.50
粘着力(C)	(kN/m^2)	0.75

致させており、重錘吊り下げ時に重錘重心を土堤底面から 0.25 m の高さとなるよう回転中心から重錘重心までの半径を 8.85 m とした。衝突時の重錘と回転中心点との角度は 3 ～ 4 度程度となる。

2.2 施工方法および計測方法

土堤の施工については、土堤模型本体は厚さ 0.25 m 毎に、支持基層は 0.3 m 毎に敷均して振動締固め機を使用して締固めて成形している。成形後に直径 75 mm の鋼製円筒を貫入させてサンプリングを行い、湿潤密度、含水比を計測した結果、実験時の平均湿潤密度および平均含水比はそれぞれ $1.5 g/cm^3$ 、9 % 程度であった。表－２には、実験に使用した石狩市生振産の砂の物性値一覧を示している。

衝撃実験における計測項目は、高速度カメラによる重錘移動量および土堤構築時に予め配置した着色砂による実験後の土堤内部の砂移動量である。高速度カメラのフレームレートは 1,000 fps であり、重錘移動量は重錘に貼り付けたターゲットの 3 次元方向それぞれの座標値を PTV 解析により求め、移動距離を微分することで速度を算出している。しかしながら、実験時に飛散した土粒子によりノイズが含まれてしまうことから、速度データは 3 ms の中央値処理および 5 ms の矩形移動平均処理を施している。

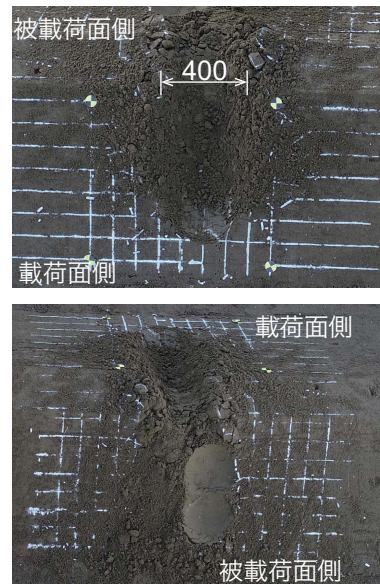
3. 実験結果

3.1 破壊性状

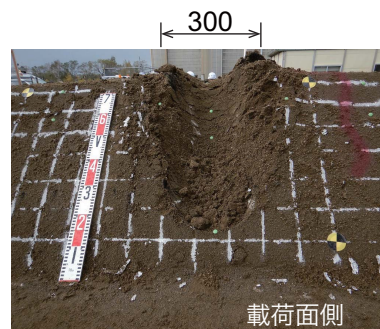
写真－２には実験後における载荷面および被载荷面の写真を、図－２には衝突断面に関する変形図および変形写真を示している。実験では、両者ともに重錘が土堤へ貫入して周辺の法面が盛り上がり、法面上方から天端にかけて土粒子が大きく飛散した。その後、重錘は土堤天端上方を通過して被衝突面側に落下した。

写真－２より、载荷面側は両者ともに衝突箇所付近に貫入痕が生じ、衝突箇所周辺の法面は幅 0.3 ～ 0.4 m 程度の範囲で盛り上がっているのが分かる。被载荷面側は土堤通過後の 2 回目の衝突により法面表層が乱れてしまっているが、1:1.5 勾配の I1.5 はひび割れ等は見受けられない。一方、1:1.0 勾配の I1.0 は押抜き型のひび割れが発生していることが分かる。これらより、土堤法面を急勾配とした場合には押抜き型の破壊性状を示す傾向にあることが分かった。

図－２(a) の変形図より、土堤外形線に着目すると、1:1.5



(a) I1.5

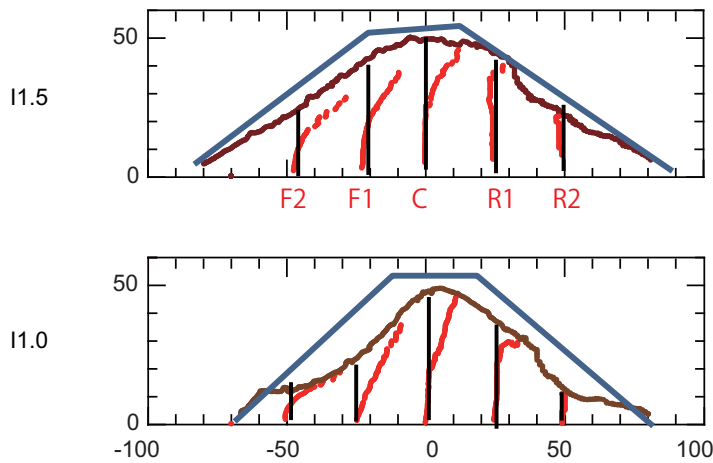


(b) I1.0

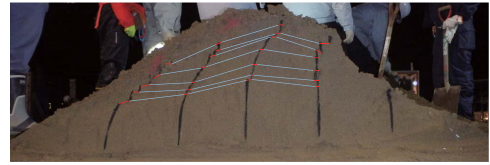
写真－２ 実験後の土堤状況

勾配の場合よりも 1:1.0 勾配の場合における変形が大きいことが分かる。また、1:1.5 勾配の場合の衝突面は緩やかに変形しているものの、1:1.0 勾配の場合は急激に変形している。なお、被衝突面側の法面の変形は、土堤通過後の 2 回目の衝突により生じたものである。内部の砂移動量に着目すると、着色砂 F2 の変形は 1:1.5 勾配の場合よりも 1:1.0 勾配の場合のほうが大きい。着色砂 F1/C については、1:1.5 勾配の場合は下方の変形が小さく上方の変形が大きいのに対し、1:1.0 勾配の場合は下方から徐々に変形していることが分かる。

(b) の変形写真には着色砂のせん断箇所を連結させた想定すべり線も併せて示している。写真より、1:1.5 勾配の場合は重錘から土堤天端へ抜けるすべり線が 7 本程度発生す

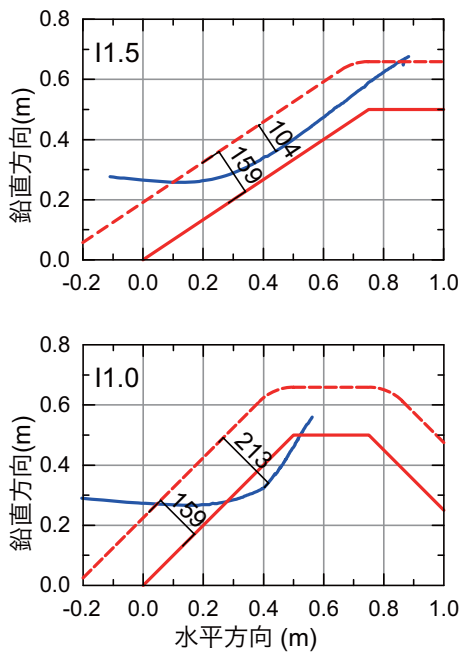


(a) 変形図



(b) 変形写真

図－２ 衝突断面に関する変形図および中央断面写真



図－３ 重錘軌跡図

るほか、土堤中央部の３本の着色砂 F1/C/R1 にもすべり線が発生していることが分かる。1:1.0 勾配の場合は重錘から土堤天端へ抜けるすべり線が６本程度発生し、高さ中央付近には１～２本程度、底面付近に１本程度の被載荷面側に抜けるすべり線が発生している。この中央付近のすべり線（図中、オレンジ線）が被載荷面の押抜き土塊のひび割れに進展したものと考えられる。これらより、緩勾配の場合には土堤天端付近にすべり線が集中して底面付近にはすべり線は発生しないのに対し、急勾配の場合には土堤高さ中央から底面付近にもすべり線が発生する傾向にあることが分かった。

3.2 重錘軌跡図

図－３には高速度カメラから算出した重錘の軌跡図を示している。図には土堤から重錘半径分のオフセットラインも赤破線にて併せて示している。

図より、重錘は両者ともに土堤へ貫入し、その後上方へ

駆け上がる挙動を示すことが分かる。なお、重錘が天端付近に到達する時刻付近にて計測範囲外となってしまうため、途中で計測を中止している。また、1:1.5 勾配の場合は衝突後に法面勾配と平行に重錘が駆け上がる挙動を示すが、1:1.0 勾配の貫入量は 1:1.5 勾配の場合の２倍程度と大きく、法面勾配よりも急勾配で駆け上がる挙動を示す。これは、土堤勾配を急勾配とした場合には水平方向の運動を鉛直方向上向きへ変換する効果が大きいことによるものと考えられる。

3.3 時刻歴応答波形

図－４には、高速度カメラにて計測した (a) 重錘衝撃力、(b) 重錘並進速度、(c) 重錘角速度、(d) 重錘移動量および (e) エネルギーに関する時刻歴応答波形についてをそれぞれ示している。なお、重錘並進速度は単位時間における重錘移動量から、重錘衝撃力は単位時間における重錘並進速度変化量に重錘質量を乗じて、重錘角速度は重錘に貼り付けたターゲット２点の移動量よりそれぞれ算出した。

(a) 図より、重錘衝撃力は両者ともにノイズが含まれているため波形形状の考察が難しいものの、波動継続時間は 40 ms 程度、最大重錘衝撃力は 10～20 kN 程度と推察される。これら衝撃力より、実測衝突速度から換算した落下高さおよび重錘質量を用いてラメの定数¹⁾を逆算すると $\lambda = 10 \sim 50 \text{ kN/m}^2$ 程度となる。落石対策便覧では、 $1,000 \text{ kN/m}^2$ 程度を「非常に軟らかいもの」と示していることから、本土堤は落石防護施設の緩衝材と比べて極めて軟らかい評価となる。

(b) 図より、衝突直前の重錘並進速度は理論衝突速度を若干上回っていることが分かる。両者ともに衝突直後から 20 ms 程度までに水平方向速度が急激に減少し、代わりに鉛直方向上向きの速度が増加していることが分かる。また、40 ms 以降からの水平方向速度の減少勾配は 1:1.5 勾配の場合よりも 1:1.0 勾配の場合が大きいことが分かる。その後、60 ms 程度で水平方向および鉛直方向の速度はほぼ同程度となり、その後はいずれも緩やかに減少する傾向を示す。

(c) 図より、重錘角速度についてもノイズが大きいため波形形状の考察が困難であるが、平均角速度は 100 ms 程度と推察される。

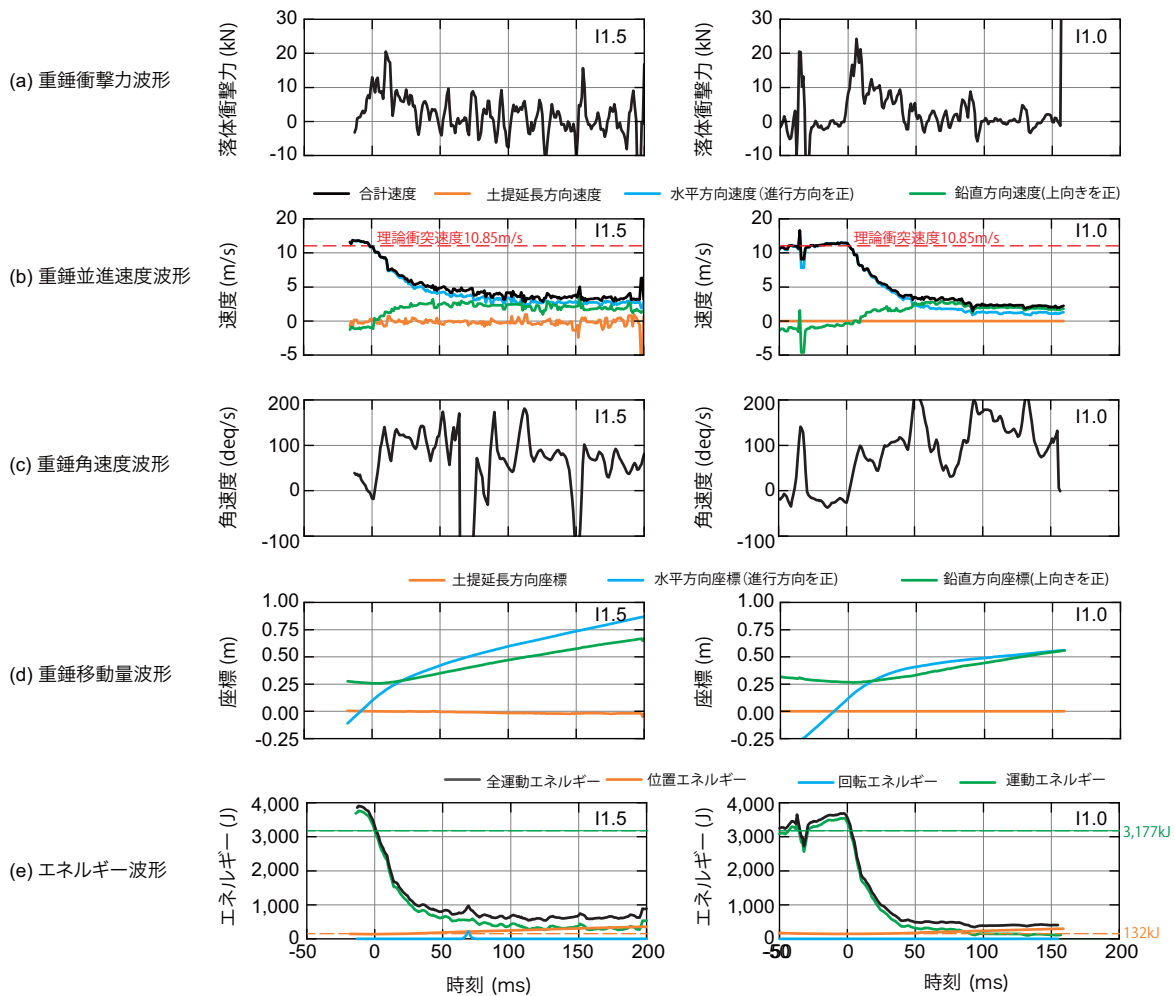


図-4 重錘応答値に関する時刻歴分布図

(d) 図より、重錘移動量は両者ともに衝突直後から 20 ms 程度までに水平方向移動量が急増することが分かる。鉛直方向は衝突予定高さ 0.25 m から緩やかに増加する。その後 40 ms 以降からの水平方向の速度増加勾配は 1:1.5 勾配の場合が 1:1.0 勾配の場合よりも大きく示されている。また、1:1.5 勾配の場合では鉛直方向よりも水平方向の増加勾配が大きいのにに対し、1:1.0 勾配では水平方向よりも鉛直方向の増加勾配が大きい示されている。これは、図-3 でも示されたとおり、土堤勾配を急勾配とした場合には水平方向の運動を鉛直方向上向きへ変換する効果が大きいことによるものと考えられる。

(e) 図は、重錘並進速度、重錘角速度および高さ方向の重錘移動量からそれぞれ算出した運動エネルギー、回転エネルギーおよび位置エネルギーに関する時刻歴応答波形についてそれぞれ示している。図には、運動エネルギーおよび位置エネルギーに関する計算値も併せて破線で示している。図より、両者ともに運動エネルギーに比べて位置エネルギーと回転エネルギーは小さく、全エネルギーの大部分を運動エネルギーが占めていることが分かる。運動エネルギーは 20 ms 程度までに 1/2 以下へ急激に減少するが、40 ms 以降は 1:1.5 勾配よりも 1:1.0 勾配の場合が小さくなっている。これは、土堤勾配を急勾配とした場合は緩勾配の場合よりもエネルギー吸収量が大きいことによるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では落石防護土堤の落石防護性能の把握のための基礎資料収集を目的として、高さ 0.5 m の土堤模型を対象として土堤法面勾配を変化させた重錘衝突実験を実施した。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 本土堤の重錘衝突実験では、重錘が土堤へ貫入して周辺の法面が盛り上がり、法面上方から天端にかけて土粒子が大きく飛散する。
- 2) 土堤勾配が緩勾配の場合には土堤天端付近にすべり線が集中するのにに対し、急勾配の場合には土堤高さ中央から底面付近にもすべり線が発生し、押抜き型の破壊性状を示す傾向にある。
- 3) 本土堤のラーメの定数は $\lambda = 50 \text{ kN/m}^2$ 程度で落石防護施設の緩衝材と比べて極めて軟らかい評価となる。
- 4) 重錘の運動エネルギーは土堤への貫入直後に 1/2 以下に減少する。また、土堤勾配を急勾配とした場合は緩勾配の場合よりもエネルギー吸収量が大きい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12