土堤材料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 soil materials

(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

1. はじめに

落石災害は、人命に直接関わるとともに、道路網の寸断 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、凍結融解や斜面の劣化(風化)進行等 さまざまな誘因・要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.落石対策便覧¹⁾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.

我々研究グループでは,落石防護土堤および溝に関する 基礎資料収集を目的として,砂質土で構築した1/5~1/4 縮 尺の小型土堤模型を対象とした重錘衝突実験を実施してい る.その結果,重錘が土堤に衝突する際の挙動には,貫入 挙動および駆け上がり挙動で構成されること,衝突エネル ギーは重錘貫入完了時刻までに60%以上が吸収されるこ と,土堤内部には複数のすべり線が生じること等を明らか にしている.一方,これらは土堤材料を砂質土とした場合 の結果であること,実現場では粘性土や砕石を使用する場 合もあることから,砂質土以外の土堤材料を用いた場合に おける耐衝撃挙動の把握も必要となる.

このような背景より、本研究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、砂 質土、粘性土および砕石で構築した 1/5~1/4 縮尺の小型土 堤模型を対象とした重錘衝突実験を実施して、重錘衝突時 の動的挙動および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。



写真-1 実験状況写真(C-H6)

○ 正会員	鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
	海部友和 (Tomokazu Kaifu)
	菊池優希 (Yuki Kikuchi)
学生員	松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
正会員	前田健一 (Kenichi Maeda)
正会員	今野久志 (Hisashi Konno)

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 *h* = 0.5 m, 天端幅 *b* = 0.25 m,法面勾配 1:1.5 (底面幅 1.75 m)の左右 対称の台形状となっている.土堤模型延長は全長9 m であ り,1つの実験に対して影響範囲を延長3m程度と仮定し, 3m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.

重錘は質量m = 54 kg の球体形状で,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. 重錘直径は $\phi = 0.318$ m,重錘の単位体積質量は 3.21 ton/m³, 土堤高さの 3/5 程度の大きさとなっている.

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験ケースは、土堤材料および重錘落下高さを変化させた全6ケー



ケース 名	土堤 材料	落下 高 (m)	計算 速度 (m/s)	実測 速度 (m/s)	実験 結果
S-H2	Бф	2	6.26	7.12	捕捉
S-H6	11.9	6	10.85	10.35	通過
C-H2	粘性土	2	6.26	(4.74)	捕捉
C-H6	개니 프 그	6	10.85	10.41	捕捉
G-H2	励石	2	6.26	6.26	捕捉
G-H6	11-11	6	10.85	11.24	通過

表-1 実験ケース一覧(全6ケース)

表-2 材料試験結果一覧

項目	単位	砂	粘性土	砕石
地盤材料の分類名	-	砂	シルト	礫
分類記号	-	S	ML	G
土粒子の密度	g/cm^3	2.58	2.66	2.67
60%粒径 D ₆₀	mm	0.37	0.03	13.05
均等係数 Uc	-	2.15	6.21	36.25
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm^3	1.59	1.37	2.18
最適含水比 wopt	%	20.8	29.4	5.8
平均湿潤密度	g/cm ³	1.56	1.87	1.82
平均含水比	%	10.01	20.44	4.69
コーン試験 ²⁾ N _d	回	0~7	1 ~ 5	5 ~ 22
衝擊加速度3)	G	18.4 ~ 22.8	$16.8\sim21.5$	$27.9\sim 50.8$

スである.表中の実験ケース名については,第一項目は土 堤材料(S:砂,C:粘性土,G:砕石)を示し,第二項目 のHに付随する数値は重錘の設定落下高さ(m)を示してい る.表には各設定落下高さにおける計算衝突速度のほか, 高速度カメラにより計測した実測衝突速度も併せて示して いる.また,表の実験結果欄には重錘が捕捉出来たか否か を示しており,重錘重心が非衝突面側の法肩を越えない場 合を捕捉,越える場合を通過とした.なお,C-H2の実測速 度については,高速度カメラ計測の一部に不具合が生じた ため,参考値として括弧表記としている.

2.2 実験方法および測定項目

実験は、図-1に示すように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衝突 面側の土堤模型法肩部と一致させており、重錘吊り下げ時 に重錘重心高さが土堤底面から 0.25 m 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 θ=4 度程度となる.

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 毎に敷き均して振動締固め機を使用 して締め固めて成形している。支持基層は、土堤本体と同 様の土砂材料を用いた. **表-2**には、実験に使用した土堤 材料の物性値一覧のほか、実験時における湿潤密度、含水 比、簡易動的コーン貫入試験²⁾および衝撃加速度試験³⁾の 各結果も併せて示している。

本実験の測定項目は、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 内部変形状況である.なお、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複数 のターゲットの 3 次元方向それぞれの座標値を PTV 解析に より求め、得られた座標値から重錘重心の移動量を算出し



(a) 砂



(b) 粘性土



(c) 砕石

写真-2 実験後の土堤外観状況

た.また,それら各方向の重錘移動量から,重錘の並進速 度および角速度も併せて算出している.しかしながら,重 錘衝突時に飛散した土粒子が重錘のターゲットを覆うこと により追跡が乱れノイズが生じてしまったことから,各速 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 実験後の土堤外観状況

写真-2には実験後の土堤衝突面側における外観状況を示している.なお,S-H2以外のケースは重錘を撤去した後となっている.

写真より,砂の場合には重錘衝突箇所から天端付近にか けて衝突痕が生じ,周辺の法面は盛土材料が大きく盛り上 がっていることが分かる.粘性土の場合には衝突箇所のみ に衝突痕が生じ,周辺は若干の盛り上がりが生じている. 一方,砕石の場合には明瞭な衝突痕が残らず,衝突箇所周 辺に盛土材料の乱れが生じているのみであることが分かる. なお,非衝突面側にはいずれのケースにおいても変状は確 認されていない.

3.2 重錘軌跡図

図-2には高速度カメラから算出した重錘の重心軌跡図 を示している.図には土堤に対して重錘半径分のオフセッ トラインおよび重錘貫入完了時刻も併せて示している.ま た,重錘が非衝突面側の法肩を通過したケースについては, 重錘が高速度カメラの計測範囲外に達したため,途中まで のデータとなっている.なお,C-H2の軌跡図は計測の不具 合が生じたため,参考として計画した衝突位置に平行移動 させている.



図より,いずれのケースも高さ250mm程度の位置で重 錘が土堤に衝突するものの,各材料によって貫入からの軌 跡が異なることが分かる.砂の場合には,土堤内に重錘が 貫入しながら法肩上方へ駆け上がる挙動を示すが,S-H2は 法肩手前で重錘が停止し,S-H6は駆け上がって法肩を通過 した.粘性土の場合には,両ケースとも他の材料の場合よ りも貫入量が大きく示されているが,駆け上がらずに鉛直 方向に跳ね上がり,重錘が停止した.

砕石の G-H2 はほとんど貫入せずに法肩上方へ跳ね上が り、天端付近で重錘が停止した.また、G-H6 は S-H6 とほ ぼ同様の軌跡を描いているが、跳ね上がりながら法肩を通 過していることが分かる.重錘貫入はいずれも *t* = 50 ms 程 度以内で完了しており、砕石の場合には他の材料と比べて 早期に貫入が完了する傾向にある.

3.3 エネルギー減衰性状

図-3には、重錘の全方向における並進移動速度から算 出した運動エネルギーに関する時刻歴応答波形を示してい る.図より、重錘の運動エネルギーは衝突直後から急激に 減少していることが分かる.砂の場合は100 ms まで徐々に 減少しているものの、粘性土および砕石の場合には25 ms 程度までに急激に減少している.

図-4には25,50,100 msの各時刻における運動エネル ギー減少分を衝突時の運動エネルギーで除したエネルギー 吸収率を示している.図より,エネルギー吸収率はいずれ のケースにおいても50 msまでに60%以上となることか ら,図-2で示すとおり重錘の運動エネルギーの大部分が 土堤衝突直後における重錘貫入挙動により吸収されると考 えられる.砂の場合には,25 ms時点の吸収率が小さいこ とから時間の経過とともに吸収率が増加する傾向を示して いるが,砕石は砂よりも増加勾配が小さく,G-H6において



図-3 運動エネルギーに関する時刻歴応答波形



は 25 ms と 100 ms でほとんど吸収率に変化がないことが分 かる.また,粘性土については 50 ms 時点で 90 % 以上の高 い吸収率を示しており,その後は衝突後に鉛直方向に跳ね 上がっていることによる吸収率の変動が確認できる.

これより,粘性土および砕石は衝突直後の25 ms までに おけるエネルギー吸収率が大きいこと,粘性土は50 ms に おいて90%以上が吸収されることが明らかとなった.ま た,砕石のように重錘が土堤内部に貫入しにくい場合には, 重錘貫入完了時刻以降における吸収率の増加が期待できな いものと推察される.

3.4 衝突断面における破壊性状

図-5には、実験後における衝突断面の写真および変形 図を示している。衝突断面には土堤内部の変形状況を計測 するために、実験前に削孔して5~6本の着色した砂を埋 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 合には鉛直に削孔することが出来ず、斜めに着色砂が埋設 されている.



図-5 衝突断面の破壊状況

(a) 図の砂のケースでは,両ケースともに衝突部が大きく 変形し,内部の着色砂も下方から上方に向かって徐々に非 衝突面側へ変形していることが分かる.この着色砂の変形 部には既往の研究⁴⁾と同様に複数のせん断箇所も見受けら れることから,重錘の貫入および駆け上がりに伴ってすべ り線が発生したものと考えられる.また,S-H6は土堤中央 部の着色砂の変形も確認できることから,落下高さの増加 に伴い変形も大きくなる傾向にある.

(b) 図の粘性土のケースでは,砂の場合よりも変形が小さ く,C-H2 では着色砂の変形は生じていない.一方,C-H6 では衝突部付近および着色砂が非衝突面側に大きく変形し ているが,砂の場合と異なり衝突部が大きく湾曲するだけ で,着色砂にせん断は生じていない.このため,粘性土の 場合にはすべり線が発生せずに,圧縮変形が卓越すること が分かった.

(c) 図の砕石のケースでは,両ケースともに衝突部およ び着色砂に明瞭な変形は生じていない.このことから,写 真-2および 図-2でも示されるように,重錘が貫入しに くいことから土堤の変形によるエネルギー吸収効果が効率 的に発揮されないものと考えられる.

4. まとめ

本研究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,砂質土,粘性土および砕 石で構築した小型土堤模型を対象とし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) 実験後の外観写真および重錘軌跡図より,砂の場合に

は重錘が土堤内に貫入し,法肩上方へ駆け上がる挙動 を示す.粘性土の場合は砂および砕石よりも重錘貫入 量が大きく,鉛直方向へ跳ね上がる挙動を示す.砕石 の場合には砂および粘性土よりも重錘貫入量が小さく, 法肩上方へ跳ね上がる挙動を示す.

- (2) エネルギー吸収率より,粘性土および砕石は重錘貫入完 了時刻までのエネルギー吸収率が大きい.また,粘性 土は時刻までに90%以上が吸収され,砕石は重錘貫入 完了時刻以降における吸収率の増加は期待できない.
- (3) 破壊性状より、砂の場合には衝突部および内部の変形が他の材料よりも大きく、すべり線が生じる傾向にある。粘性土の場合は砂よりも変形が小さく、すべり線が発生せずに圧縮変形が生じる傾向にある。砕石の場合には他の材料よりも変形が小さい傾向にある。

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2017.12
- 2) 公益社団法人地盤工学会:地盤調査の方法と解説, 2013
- 3) 新技術情報提供システム: http://www.netis.mlit.go.jp//NetisRev//Search// NtDetail1.asp?REG_NO=HK-130011 (閲覧日:2019 年 12 月 5 日)

(岡見口・2019 平12 月 5 日)

 4) 鈴木健太郎,高橋浩司,山内翼,堀耕輔,前田健一, 今野久志:法面勾配を変化させた落石防護土堤の重錘 衝突実験,土木学会北海道支部論文報告集,第75号, A-42,2019.1