A - 4 1

落石防護土堤の静的荷重水平載荷実験

Static loading test of rockfall protective soil embankment

(株) 構研エンジニアリング	○正会員	保木和弘 (Kazuhiro Hoki)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	高橋浩司 (Koji Takahashi)
名古屋工業大学	学生員	松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
名古屋工業大学	正会員	前田健一 (Kenichi Maeda)
土木研究所寒地土木研究所	正会員	西弘明 (Hiroaki Nishi)

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,静的水平載荷試験の結果に 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12m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、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。重錘は球体お



写真-1 実験状況写真

正会員	鈴木健太郎(Kentaro Suzuki
正会員	高橋浩司 (Koji Takahashi)
学生員	松尾和茂 (Kazushige Matsuc
正会員	前田健一 (Kenichi Maeda)
正会員	西弘明 (Hiroaki Nishi)



(a) 土堤概要







(c) S1.5-P (多面体重錘, 1:1.5 勾配)



接点 (d) S1.0-S (球体重錘, 1:1.0 勾配)



図-1 実験概要図

平成30年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第75号



(a) 載荷面実験状況

(b) 被載荷面実験状況

(c) 載荷面状況(重錘除去後)

写真-2 実験後の土堤状況

実験	載荷方法	土堤勾配	重錘	
S1.5-S		1:1.5	球体	
S1.5-P	静的	1:1.5	多面体	

表-1 実験ケース一覧

表-2 材料試験結果一覧

1:1.0

球体

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 (<i>ø</i>)	(°)	36.50
粘着力 (C)	(kN/m ²)	0.75

よび多面体の2種類を用い,両者ともに質量54kgになる よう表層に板厚9mm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,第1項目はSの後ろに土堤法面勾配を, 第2項目は重錘形状を示している.静的実験は,重錘に接続した油圧ジャッキにより,土堤に水平荷重を作用させた. 荷重載荷速度は300 mm/min程度,最大ストロークは300 mm である.荷重作用高さは重錘重心を土堤底面から0.25 mの高さに設定した.

2.2 施工方法および計測方法

S1.0-S

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/cm³,9% 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.

静的実験における計測項目は、ワッシャ型ロードセルに よる載荷荷重,接触式変位計による水平方向の重錘変位量 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.

3. 実験結果

3.1 破壞性状

写真-2には実験後における載荷面および被載荷面の写 真を,図-2には載荷断面に関する変形図および変形写真 を示している.なお,図-2(b)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.実 験では,いずれのケースも重錘が土堤へ貫入して土堤法面 および土堤天端にひび割れおよび盛り上がりが発生し,被 載荷面に円形状や矩形状にひび割れが生じて押抜き型に破 壊した.

写真-2より,球体重錘で1:1.5 勾配のS1.5-Sにおける載 荷面側は載荷位置に貫入痕が生じ,その上方法面に放射状 の亀裂および盛り上がりが生じている.土堤天端は若干盛 り上がり,比較的幅の広いひび割れが3本程度発生してい る.被載荷面側は土堤延長 *L*₂ = 1.0 m,法長 *L*_s = 0.5 m 程度 の円形の亀裂が生じている.

多面体重錘で1:1.5 勾配のS1.5-Pにおける載荷面側も球 体重錘の場合と同様な変形状況となっているものの,上方 法面の放射状の亀裂および盛り上がりは球体よりも小さい. 一方,土堤天端の盛り上がりは球体重錘の場合よりも大き



図-2 載荷衝突断面に関する変形図および変形写真

表-3 押抜き土塊形状一覧

項目	記号	単位	S1.5-S	S1.5-P	S1.0-S
法長 (被載荷面側)	L_s	(mm)	500	300	707
高さ	h_c	(mm)	277	166	500
底面幅	b_2	(mm)	1,082	749	1,250
断面積	Α	(m ²)	0.185	0.083	0.375
延長(載荷面側・重錘直径)	L_1	(mm)	300	300	300
延長(被載荷面側)	L_2	(mm)	1,000	700	1,000
平均延長	L	(mm)	650	500	650
体積	V	(m ³)	0.120	0.042	0.244
重量	М	(kN)	1.766	0.612	3.585
抵抗力1 ($M_c \times tan\phi$)	P_f	(kN)	1.307	0.452	2.653
抵抗力2 (C×b2×L)	P_c	(kN)	0.527	0.281	0.609
抵抗力合計 $(P_f + P_c)$	Р	(kN)	1.834	0.733	3.262

く, 亀裂幅の広いひび割れが5本程度発生している. 被載 荷面側は土堤延長 $L_2 = 0.7 \text{ m}$, 法長 $L_s = 0.3 \text{ m}$ 程度に円形状 の亀裂が生じており, 載荷面および被載荷面ともに球体重 錘の場合よりも亀裂範囲が小さい.

球体重錘で 1:1.0 勾配の S1.0-S における載荷面側も他の ケースと同様な変形状況となっているものの,天端の 3本 の亀裂幅は他のケースよりも大きく,変状範囲は小さい. 被載荷面側は球体重錘の場合と同様に土堤延長 $L_2 = 1.0 \text{ m}$ であるものの,法長方向の亀裂位置は法尻(法長 $L_s = 0.7 \text{ m}$ 程度)となり,矩形状に亀裂が生じて他のケースと大き く異なっている.

図-2より, S1.5-Sの載荷位置付近は着色砂 F2/F1の中 央部が被載荷面側にお椀状に変形している.写真より,着



図-3 土塊形状模式図

色砂 F1 の上方は細かいせん断ずれが確認される.また,各 着色砂を連結させた想定すべり線は,重錘から土堤天端へ, 重錘から土堤被載荷面側の中腹へ,重錘から土堤底面へ抜 ける位置に発生しているものと考えられる.着色砂 C は底 面から 0.25 m 付近, R1 が 0.3 m 付近の高さでずれており, R2 には大きなずれは確認されない.

S1.5-P は衝突断面掘削時に一部が崩壊したため,分かり うる範囲にて図を作成し,変形写真にもスケッチの一部を 転記している.写真より,載荷位置付近は着色砂 F1 の中央 部が被載荷面側にお椀状に変形している.また,重錘上部 から水平に抜けるすべり線が発生している.

S1.0-Sの載荷位置付近は着色砂F1の中央部が被載荷面 側にお椀状に変形している.F1/C/R1/R2の4本が底面から 0.1m付近の高さでずれていることも確認できることより, 土堤底面から土堤被載荷面側の法尻へ抜けるせん断面が発 生しているものと推察される.

以上より,押抜き土塊は緩勾配よりも急勾配の場合のほうが断面全体に発生する傾向にあることが分かった.一方, 重錘形状を変えた場合にも土塊形状が変化することが確認 されたが,重錘形状によるすべり線の変化によるものか, あるいは試験体誤差なのか確認する必要がある.



図-4 荷重および変位に関する時刻歴分布図

事象	S1.5-S	S1.5-P	S1.0-S
油圧ジャッキ開始	-3 秒	-8秒	-7 秒
重錘が土堤に接触	0秒(20)	0秒(23)	0秒(24)
法面盛り上がり	20 秒	0秒	6秒
天端盛り上がり	40 秒	27~37 秒	16 秒
法面斜めひび割れ	52 秒	32 秒	16 秒
ジャッキ盛り替え	-	52 秒	-
押抜き破壊	55~60秒	54 秒	33 秒
油圧ジャッキ終了	60 秒	63 秒	48 秒

表-4 事象発生時刻一覧

()内は油圧ジャッキ開始時からの時刻

3.2 押抜き土塊形状による耐力算定

表-3 および 図-3 には、押抜き土塊形状一覧および土 塊形状模式図を示している。押抜き土塊寸法は 写真-2 に 示すひび割れ位置より推定した。表には材料試験結果より 得られた単位体積質量、内部摩擦角および粘着力を用いて 算出した土塊抵抗力に関する試算結果も併せて示している。 ここで、抵抗力1は摩擦係数 tan ¢ に土塊重量を乗じて、抵 抗力2 は粘着力 C に土塊底面幅および平均延長を乗じてそ れぞれ算出した。なお、抵抗力には土塊側面分は考慮して いない。

表より,土塊形状は多面体重錘の S1.5-P が小さく,急勾 配の S1.0-S が大きく示される結果となる.また,土塊抵抗 力は 1~3 kN 程度と試算される.

3.3 荷重および水平変位に関する時刻歴分布図

表-4には各事象に関する発生時刻一覧を示している. また,図-4には,載荷荷重および水平方向変位量の時刻 歴分布図を示している.ここで,載荷荷重データには65秒 程度周期で2kN程度のノイズが含まれていることを確認 しており,載荷荷重については参考値として取り扱うこと とした.

表より,いずれのケースにおいてもまず載荷面周辺の法 面が盛り上がり,その後土堤天端の盛り上がりを経て押抜 き型の破壊性状を示すことが分かる.

図より, S1.5-Sの最大荷重は天端もりあがりが確認され た 30~60秒の区間の 1.5 kN 程度と推察される.S1.5-Pの 場合は法面斜めひび割れが確認された 30~60秒区間の 1.5 kN 程度, S1.0-Sの場合は球体 1:1.5 と同様に 15~35秒の 1.5 kN 程度が最大荷重と推察される.これら最大荷重は **表-3**と比較して小さく示されていることから,再度検証 する必要がある.なお,油圧ジャッキ開始から接触までの 荷重増加は,重錘に溶接した H 鋼とその H 鋼を上下に挟み 込んだ 3 箇所のローラーとの摩擦分の影響によるものと考 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静的水平載荷実験を実施した.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.

- 静的荷重が作用する場合の破壊性状は、重錘が土堤へ 貫入して土堤法面および土堤天端にひび割れおよび盛 り上がりが発生し、被載荷面に円形状や矩形状にひび 割れが生じて押抜き型を示す。
- 2) 押抜き土塊は緩勾配よりも急勾配の場合のほうが断面 全体に発生する傾向にある.一方,重錘形状を変えた 場合にも土塊形状が変化することが確認されたが,重 錘形状によるすべり線の変化によるものか,あるいは 試験体誤差なのか確認する必要がある.
- 3) 土堤高さ0.5m程度で法面勾配が1:1.0~1:1.5の場合, 静的耐力は1.5kN程度と推察されるものの,試験体誤 差および計測器のノイズ等により正確な値を測定する ことが出来なかった。今後はこれら課題を踏まえて再 度検証する予定である。

参考文献

1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2017.12