

# 異なる地盤材料を用いた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 with different soil materials

名古屋工業大学	○学生員	峯 祐貴 (Masaki Mine)
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)
(株) 構研エンジニアリング	正 員	高橋浩司 (Koji Takahashi)
(株) 構研エンジニアリング	正 員	山内 翼 (Tsubasa Yamauchi)
寒地土木研究所	正 員	今野久志 (Hisashi Konno)

## 1.はじめに

我が国で多発する落石から道路等の構造物を防護するための方法として、ポケット部（斜面と対策工との空き空間）等に土を用いた対策工（落石防護土堤・溝）のより積極的な利用が考えられる。落石防護土堤は、設置スペースさえあれば現地発生土の流用も可能で経済性、施工性、維持管理性能に優れた落石対策工法と言える。

しかし、現行ではコンクリートや鋼などの人工材料を用いた対策工のように変形・破壊モードを考慮した性能評価がなされていない。そこで、本研究では落石防護土堤及びポケット部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 500mm の土堤模型を対象とした挙動確認実験を実施した。本論文では、静的水平載荷実験の結果について報告する。

## 2.実験概要

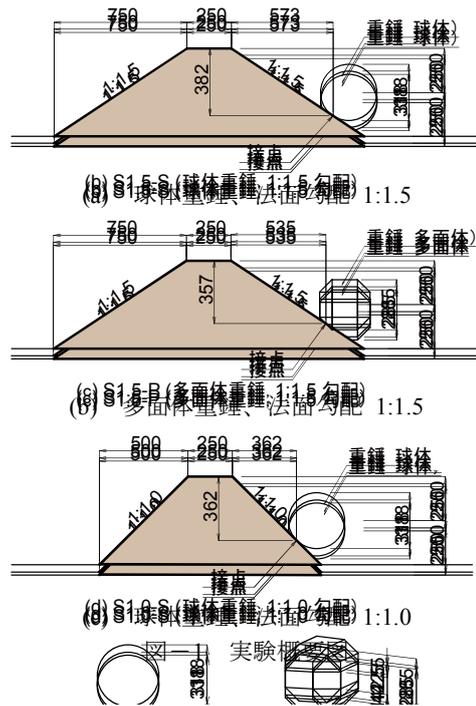
### 2.1 試験体概要

図-1 に実験概要図を示す。土堤模型には、砂、碎石、粘性土の 3 種類の地盤材料を使用しており、断面形状は高さ 500mm、天端幅 250mm、底面幅 1750mm もしくは 1250mm の左右対称の台形状となっている。土堤模型延長は全 9m であり、1 つの実験に対して影響範囲が延長 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 900mm の支持基層を設けている。重錘は球体と多面体の 2 種類を使用した。質量はどちらの重錘も 54kg であり、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。直径は球体が 318mm、多面体が 285mm である。本実験は、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。荷重作用高さは重錘重心を土堤底面から 250mm の高さに設定した。

表-1 に実験ケースの一覧を示す。表中のケース名については、第 1 項目が使用した地盤材料の種類および土堤法面勾配を、第 2 項目が重錘形状を示している。表-2 に実験に使用した地盤材料の材料試験の結果を示す。

### 2.2 施工方法及び計測方法

土堤構築にあたり、土堤模型は厚さ 250mm 毎に、支持基層は 300mm 毎に敷均して振動締め固め機を使用して締め固めて成形している。実験後にサンプリングを行い、湿潤密度、含水比を計測した結果を表-2 に示している。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、ビデオカメラによる変位の計測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。ただし、着色砂は近い箇所での変形を判別しやすくする目的で、砂および粘性土を使用したケースでは同じ素材で黒色と白色の 2 色を、碎石を使用したケースではベージュとグレーの 2 色を使用した。

## 3.実験結果

### 3.1 破壊性状

図-2 に載荷終了時の載荷面および非載荷面の様子を、図-3 に載荷位置の断面を示す。なお、図-2 内の黄色の実線はクラックを、破線は非載荷面から見た押抜き土塊を示している。図-3(b)には着色砂のせん断から予想した想定すべり線を記入している。また、S1.0-S、G1.5-S では、一部の領域は土堤の閉開時に崩れてしまい計測を行うことができなかった。いずれのケースでも重錘が土堤に貫入し、載荷面及び土堤防天端にひび割れが発生していた。また、C1.5-S 以外のケースではその後に非載荷面に押抜き破壊が発生していた。

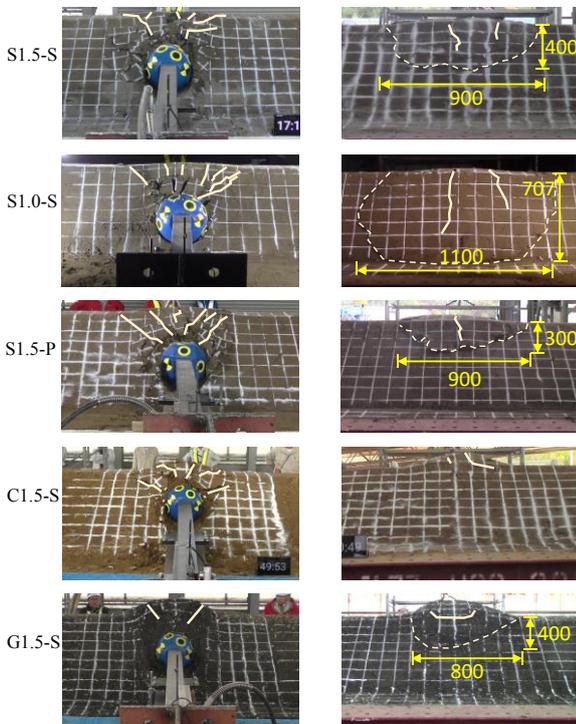
砂を使用した 3 ケースについて押抜き破壊の範囲を比較すると、S1.0-S は他の 2 ケースよりも押抜き破壊の範囲が大きくなっている。この結果は既往の研究<sup>4)</sup>で得ら

表-1 実験ケース一覧

ケース名	載荷方法	地盤材料	土堤勾配	重錘形状
S1.5-S	静的載荷	砂	1:1.5	球体
S1.0-S		砂	1:1.0	球体
S1.5-P		砂	1:1.5	多面体
C1.5-S		粘性土	1:1.5	球体
G1.5-S		碎石	1:1.5	球体

表-2 材料試験結果一覧

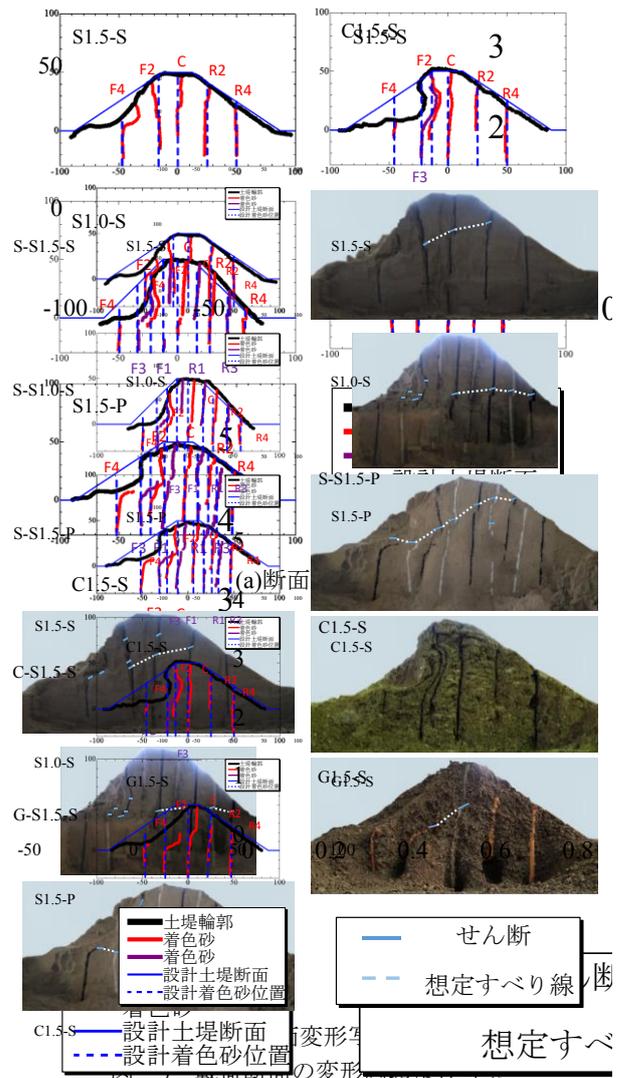
地盤材料		砂	粘性土	碎石
項目	単位			
土粒子の密度	( $g/m^3$ )	2.58	2.66	2.67
60%粒径 $D_{60}$	(mm)	0.37	0.03	13.05
均等係数 $U_c$	-	2.15	6.21	36.25
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$	( $g/m^3$ )	1.59	1.37	2.18
最適含水比 $w_{opt}$	(%)	20.80	29.4	5.8
内部摩擦角 $\phi$	( $^{\circ}$ )	36.50	29.76	38.60
粘着力 $C$	( $kN/m^2$ )	-	4.64	-
平均湿潤密度	( $g/cm^3$ )	1.56	1.87	1.82
平均含水比	(%)	10.01	20.44	4.69
コーン試験 <sup>2)</sup> $N_d$	-	0~7	1~5	5~22
衝撃加速度 <sup>3)</sup> $G$	-	18.4~22.8	16.8~21.5	27.9~50.8



(a) 載荷面状況 (b) 非載荷面状況  
図-2 載荷終了時の様子

れている結果にも一致しており試験体による誤差ではないと考えられる。この原因として、S1.0-Sでは載荷を受ける法面が急勾配であるため、緩勾配となっている他の2ケースよりも載荷時の法面に対して垂直な成分の分力が大きくなること、底面幅が小さいことによるものと考えられる。

C1.5-Sでは、砂を使用したケースと同様に重錘接触位置を中心に亀裂や盛り上がりが見られたが、比較的幅の広い亀裂が2本発生し、砂を使用したケースに比べて亀裂が少ない結果となった。また、天端の盛り上がりは砂を使用したケースよりも大きくなる結果となった。そして、非載荷面では押抜き破壊が見られなかった。これ



は、粘性土の粘着力が砂と比較して大きいと、押抜き破壊に対する抵抗性も大きくなるためと考えられる。

G1.5-Sでは、他の4ケースと異なり、亀裂は幅が大きいものしか見られなかった。また、土堤天端の盛り上がりは他のケースよりも大きく、非載荷面では土堤延長800mm、法長400mmの押抜き破壊が見られた。

図-3に示した着色砂の変形に着目すると、S-S1.5-Sでは着色砂F4の重錘接触箇所付近がお椀型に変形しており、また、着色砂のせん断を結んだ想定滑り線は重錘から非載荷面の中腹へ抜ける位置に発生しているものと考えられる。

S1.0-Sでは、着色砂F1において、土堤内の着色砂の位置が支持基層内の着色砂よりも非載荷面側にずれていた。このことから、着色砂による計測箇所以外でせん断もしくは曲げが発生していたと考えられる。また、着色砂のせん断を結んだ想定滑り線は重錘から非載荷面の法尻に抜けるように発生していると考えられる。

S1.5-Pでは、上の2ケースで見られたお椀型の変形が見られなかった。着色砂のせん断を結んだ想定滑り線は重錘から非載荷面の上部に向かって抜けていると考えられる。

また、既往の研究<sup>4)</sup>では今回得られた結果と異なり、

複数の想定すべり線が得られていた。これは今回の実験と比較して重錘の貫入速度が速くなっていたために衝撃载荷を行ったケース<sup>5)</sup>のように複数のすべり線が発生していたと考えられる。

C1.5-Sでは、砂を使用したケースで見られたせん断が一切見られなかった。しかし、着色砂F1およびF2がS-S1.5-SやS1.0-Sと比較してより広範囲でお椀型に変形している様子が見られた。

G1.5-Sでは、着色砂F2は地表面付近で非載荷面側に曲がっていた。

以上から、粘性土を使用した場合、圧縮変形は起こるが砂を使用した場合と比較して衝突位置付近でのせん断が起こりにくくなり、载荷の影響が生じる範囲が狭くなると考えられる。また、碎石を使用した場合、载荷の影響が生じる範囲については砂を使用した場合と大きな差はないと考えられる。

### 3.2 押抜き土塊形状の比較

図-4に押抜き破壊時の押抜き土塊形状の模式図を、表-3には地盤材料に砂を使用した各ケースでの押抜き土塊形状一覧を示す。押抜き土塊寸法は図-2に示すひび割れ位置より推定した。

地盤材料に砂を使用した3ケースの結果を比較すると、S1.0-S、S1.5-S、S1.5-Pの順に押抜き土塊の体積が大きい結果となっている。この結果から、押抜き土塊の体積は土堤が緩勾配の場合よりも急勾配の場合のほうが大きくなる傾向があると考えられる。これは3.1の考察同様、勾配の違いによって土堤にかかる外力の大きさが異なるためと考えられる。また、重錘の形状が球体の場合、多面体の場合よりも押抜き土塊の体積が大きくなる傾向にあると考えられる。既往の研究<sup>4)</sup>でも今回と同様の結果が得られている。

また、S1.5-SとG1.5-Sの結果を比較すると、碎石を使用した場合、砂を使用した場合と押抜き土塊の体積に大きな差は見られなかった。

### 3.3 荷重および水平変位に関する時刻歴分布図

表-4には各ケースにおける載荷時の法面ひび割れ発生等の時刻を、図-5には各ケースにおける変位および荷重の時刻歴分布図を示している。

図-5から、S1.5-Sでは、貫入量は時刻に比例するように増加している。それに対して、荷重は徐々に増加するが時間経過とともに増加量が減っており、550秒付近で増加が終了している。これは、法面にひび割れが発生した時刻とほぼ一致している。600秒付近では急激に荷重が減少しており、この20秒後に押抜き破壊が発生している。

S1.0-Sでは、貫入量と荷重がともにS1.5-Sと比較して急激に増加している。また、荷重は100秒付近で増加が終了し、その後減少している。この現象の直前には、押抜き破壊が発生している。

S1.5-Pでは、貫入量は時刻と比例するように増加している。荷重は油圧ジャッキ終了まで増加を続けている。600秒付近で一度だけ荷重が減少しているが、その後すぐに元の値に増加していることから、これは559秒に行われたジャッキの盛替えの影響であると考えられる。

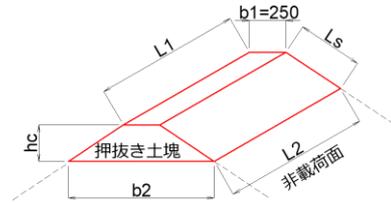


図-4 押抜き土塊形状の模式図

表-3 押抜き土塊形状一覧

項目	記号	単位	S1.5-S	S1.0-S	S1.5-P	G1.5-S
法長(被載荷面側)	$L_1$	(mm)	400	707	300	400
高さ	$h_c$	(mm)	221.880	499.924	166.410	221.880
底面幅	$b_2$	(mm)	915.640	1249.849	749.230	915.640
断面積	$A$	( $m^2$ )	0.129	0.375	0.083	0.129
延長(載荷面側・重錘直径)	$L_1$	(mm)	318	318	285	318
延長(非載荷面側)	$L_2$	(mm)	800	1100	900	800
平均延長	$L$	(mm)	675	950	850	559
体積	$V$	( $m^3$ )	0.079	0.266	0.049	0.072

以上の結果から、地盤材料に砂を使用した場合、急勾配の土堤では緩勾配の土堤よりもより小さな荷重や貫入量で法面のひび割れや押抜き破壊などの破壊に至ると考えられる。また、重錘が球体のケースでは法面ひび割れや押抜き破壊が発生すると荷重が減少している。これは、土堤の一部が破壊されることで土堤の外力に対する抵抗力が弱くなるためであると考えられる。重錘が多面体のケースでは、球体のケースよりも荷重の立ち上がりは緩やかで最大値も小さくなっている。このことから、重錘が多面体の場合、球体よりも貫入する際に抵抗を受けづらいためと考えられる。

C1.5-Sでは、貫入量が時刻に比例するように増加している。荷重については載荷開始から急速に増加しているが100秒付近で増加が終了し、150秒付近で減少している。ジャッキの盛替えが行われた時刻である、250秒付近で再び荷重が急激に増加している。

G1.5-Sでは、貫入量が時間とともに増加しているが、200秒付近までその増加量は時間経過とともに減少している。ジャッキの盛替えを行った200秒以降ではほとんど一定に貫入量は増加している。荷重は200秒付近と300秒付近で減少している。200秒付近での減少は213秒に行われたジャッキの盛替えの影響であると考えられる。また、300秒付近で荷重が減少した後に法面ひび割れが発生しており、砂同様に碎石でも法面ひび割れなどの破壊が土堤の強度の低下に関係していると考えられる。

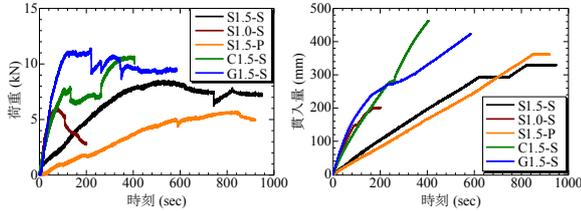
以上の結果から、地盤材料に粘性土を使用した場合、他の地盤材料を使用した場合と異なり、押抜き破壊が発生しなかったために荷重が減少しておらず土堤の強度もあまり低下しないと考えられる。碎石を使用した場合、砂と同様に法面ひび割れが発生した際に荷重が減少しており土堤の強度も低下していると考えられる。このことから、粘性土を使用した場合は法面ひび割れが土堤の強度に与える影響は小さいと考えられる。また、荷重の最大値を比較すると粘性土が最も大きくなっている。これは粘性土では他のケースと異なり押抜き破壊による荷重の減少が起こらなかったためと考えられる。

### 3.4 荷重載荷時の非衝突面の挙動

図-6に角ケースにおける非載荷面のPIV解析結果を

表-4 事象発生時刻一覧(sec)

ケース名	S1.5-S	S1.0-S	S1.5-P	C1.5-S	G1.5-S
油圧ジャッキ開始	-61	-52	-110	-5	-8
重錘が土塊に接触	0	0	0	0	0
法面盛り上がり	52	29	96	60	30
天端盛り上がり	434	47	441	194	90
法面ひび割れ	554	80	655	378	347
ジャッキ盛替え	578	-	559	265	213
押し抜き破壊	637	112	683	-	440
油圧ジャッキ終了	713	168	820	417	585



(a)荷重の時刻歴分布図 (b)貫入量の時刻歴分布図  
図-5 各ケースにおける貫入量・荷重の変化

示す。時刻は天端盛り上がり時と押し抜き破壊時である。ただし、C1.5-Sは押し抜き破壊が発生していないため載荷終了直前の時刻である。

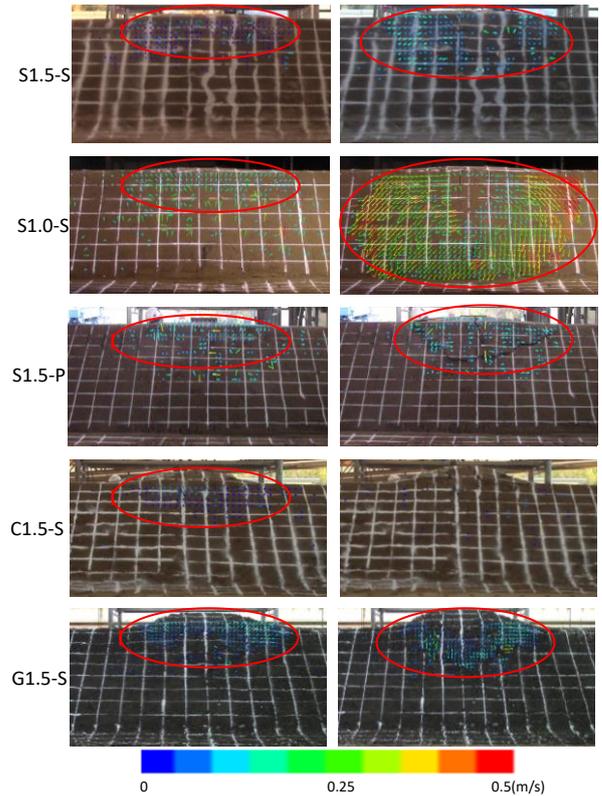
(a) 図より、すべてのケースにおいて、天端の盛り上がり発生時には天端付近で鉛直上向きの速度が生じていた。(b) 図より、押し抜き破壊時にはすべてのケースで押し抜き土塊からひび割れに向けて速度が生じていた。どのケースでも天端盛り上がり時に速度が生じていた領域では、押し抜き破壊時に速度が生じている。このことから、押し抜き土塊は天端盛り上がり時に形成され始めると考えられる。

また、押し抜き破壊が発生時には押し抜き土塊が周囲に崩れている。このように体積が減少することで土塊抵抗が減少しており、それが 3.3 で考察した押し抜き破壊時の荷重の減少の原因となっていると考えられる。

4.まとめ

本研究では落石防護土堤に関する落石防護性能の把握のための基礎資料収集を目的として、土堤模型を対象とした静的水平載荷実験を実施した。本研究で新たに得られた知見は以下である。

- 1)静的荷重が作用した場合、砂を使用したケースでは載荷位置の断面において着色砂のお椀型の変形やせん断が見られたが粘性土を使用した場合、お椀型の変形は見られたがせん断は見られなかった。碎石を使用した場合には、お椀型の変形は見られなかったがせん断は見られた。しかし、見られたせん断の数は砂よりも少なかった。このことから、粘性土は砂と比較してせん断に対しては高い抵抗性を持っており、碎石は砂よりも変形、せん断について抵抗性が高いと考えられる。
- 2)地盤材料に砂もしくは碎石を使用し、球体重錘を使用した場合、重錘貫入時の荷重は法面ひび割れや押し抜き破壊が発生すると減少したが、粘性土を使用した場合は減少しなかった。このことから、砂、碎石を使用した場合と比較して、粘性土を使用した場合は法面ひび割れが土堤の強度に与える影響は小さいと考えられる。
- 3)多面体の重錘を使用したケースでは、球体を使用した



(a)天端盛り上がり時 (b)押し抜き破壊時

図-6 各ケースの押し抜き破壊発生時の挙動

ケースと比較して荷重の増加が緩やかであった。これは、多面体は球体と比較して貫入時のすべり線が浅く発生することで押し抜き土塊の体積が小さくなるためと考えられる。

- 4)天端盛り上がり時に速度が生じている範囲では、押し抜き破壊時にも速度が生じている。このことから押し抜き土塊は天端盛り上がり時にすでに形成されているものと想定される。また、押し抜き破壊時に押し抜き土塊の体積が減少し、土塊抵抗が減少することが、荷重の時刻歴波形で押し抜き破壊時に荷重が減少する原因となっていると考えられる。

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：地盤工学ハンドブック、1999.
- 3)新技術情報提供システム：  
[http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev//Search//NtDetail.asp?REG NO=HK-130011](http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev//Search//NtDetail.asp?REG%20NO=HK-130011)  
(閲覧日：2019年12月5日)
- 4)保木和弘、鈴木健太郎、高橋浩二、前田健一、松尾和茂、西弘明：落石防護土堤の静的荷重水平載荷実験、平成30年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会、A-41、2019.01.26.
- 5)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、2019.01.26.