

# 落石防護土堤の荷重作用による強度特性変化に関する実験的検討

Experimental study on the change of strength properties of soil under load in a rockfall protection embankment

名古屋工業大学	学生員	磯合凌弥 (Ryoya Isoai)
(株)構研エンジニアリング	○正員	菅原正則 (Masanori Sugawara)
(株)構研エンジニアリング		海部友和 (Tomokazu Kaifu)
(株)構研エンジニアリング		菊池優希 (Yuki Kikuchi)
名古屋工業大学	正員	前田健一 (Kenichi Maeda)
豊橋技術科学大学	正員	内藤直人 (Naoto Naito)
(国研) 土木研究所寒地土木研究所	正員	中村拓郎 (Takuro Nakamura)

## 1. はじめに

落石対策便覧<sup>1)</sup>に示される落石防護土堤（以後、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には、施工が容易で経済的な対策工となる。また、落石が衝突した場合でも被災箇所を掘削し再構築することが可能なため、他の対策工と比べて補修も容易な構造物と言える。一方、落石対策便覧における土堤の設計の考え方は、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載されているのみであり、定量的な設計法は確立されていないのが現状である。このような状況を鑑み、著者らは土堤模型を用いた実験的検討を行ってきた<sup>例え 2)</sup>。その結果、重錘は土堤に貫入もしくはかけ上がる挙動を示すこと、土堤は天端や非衝突面にクラックが生じ内部にはすべり線が生じる場合があること、などを明らかにしている。

落石により被災した土堤は、上記のようにクラックやすべり線が生じ、押抜き破壊等に至り、強度低下が発生することが考えられるが、被災箇所の補修にはこれら強度低下が発生した損傷範囲を特定する必要がある。一方、自然斜面や切土斜面の硬度を簡便に評価する方法として土壌硬度試験<sup>3)</sup>が適用されており、被災した土堤の損傷範囲を評価できる可能性がある。

このような背景から、本研究では、土堤の落石捕捉性能検証を目的とした静載荷実験および重錘衝突実験（写真-1）の試験体を対象に、土壌硬度試験による強度特性変化について検討を行った。なお、土堤模型構築中および構築後に衝撃加速度試験<sup>4)</sup>、簡易動的コーン貫入試験結果<sup>3)</sup>を実施し、土堤構築材料の基本的な強度特性をまとめている。

## 2. 各種試験内容

### 2.1 土堤模型実験

#### (1) 実験概要

図-1には、重錘衝突実験概要図を示している。本実験に用いた試験体は静載荷実験および重錘衝突実験ともに実規模の1/2程度の中型土堤である。試験体寸法は高さ1.0m、天端幅0.2m、法面勾配1:1.2、延長4.6mである。土堤本体下層には厚さ0.6mの基層を設けた。土堤本体端部は木製型枠にて固定している。静載荷実験は、重錘に接続した油圧ジャッキにより水平荷重を作用

させた。また、重錘衝突実験は振り子運動により重錘を衝突させた。静載荷箇所および重錘衝突箇所（以後、載荷および衝突を単に衝突と呼称）は、土堤本体の高さ方向・延長方向の中央部である。重錘形状はEOTA型<sup>5)</sup>とし、1辺あたり0.5mで土堤本体高さの1/2とした。重錘は質量234.5kg、換算密度2.648ton/m<sup>3</sup>であった。

土堤試験体の施工については、基層は厚さ0.3m毎、土堤本体は厚さ0.25m毎に土砂を敷き均して振動締め機を使用して締め固めて整形している。なお、土堤本

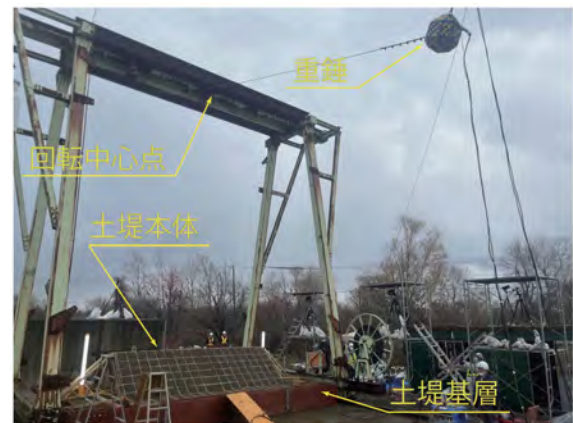


写真-1 実験状況 (16)

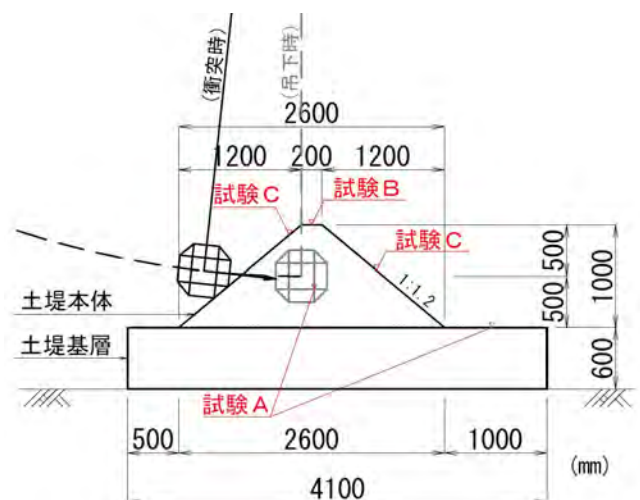


図-1 実験概要図 (重錘衝突実験)

表-1 実験ケース一覧

試験体名	载荷方法	計画落下高さ (m)	実測衝突速度 (m/s)	換算落下高さ (m)	衝突エネルギー (kJ)	非衝突面状況
S	静载荷	-	-	-	-	押抜き破壊
I4	重錘衝突	4	9.37	4.48	10.30	クラック
I6		6	11.64	6.90	15.88	押抜き破壊
I7		7	12.44	7.89	18.15	押抜き破壊



(a) 衝突面 (b) 非衝突面  
写真-2 実験後の土堤状況

体および基層ともに同じ土砂材料を用いた。

表-1には、実験ケース一覧を示している。実験ケースは、载荷方法および重錘落下高さを変化させた全4ケースである。表には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。

## (2) 実験結果

写真-2には、実験後の土堤衝突面および非衝突面における外観状況を示している。土堤に描画された白線の間隔は0.25 mであり、赤線は土堤中央部の载荷位置を示している。

写真より、静载荷実験のS試験体の場合には、衝突面には重錘の貫入痕が形成され、貫入痕の周囲が放射状に盛り上がり、土堤天端にも放射状にクラックが発生している。非衝突面は延長1.5 m、高さ0.75 m程度の逆

台形状のクラックが発生しており、土堤本体内部ですべり線が生じて押抜き破壊が生じたものと推察される。

重錘衝突実験の場合には、いずれも衝突面には重錘衝突位置から上方にかけて回転してかけ上がった転動跡が見受けられる。非衝突面に着目すると、I4試験体の場合には天端に複数のクラックが発生しており、土堤本体高さ中央付近に水平方向のクラックも確認できる。I6/I7試験体の場合には半小判状の押抜き破壊が発生しており、S試験体と異なり中央部が膨らんでいることが分かる。また、重錘落下高さの増加に対応して半小判状のクラック位置が広範囲に発生していることも分かる。

以上より、静载荷実験および重錘衝突実験ともに衝突面には貫入痕や転動跡が、非衝突面には押抜き破壊が発生する結果となった。

## 2.2 各種土質試験

表-2には、試験ケース一覧を示している。試験位置は図-1に示すとおりである。各試験実施のタイミングは、試験A/Bは土堤試験体構築中あるいは実験後であり、土堤試験体の基本的な強度特性の把握を目的として実施した。試験Cのタイミングは実験後であり、衝突によって変化する強度特性を把握する目的で実施した。また、試験Aは土堤基層および土堤本体の高さ方向中間部で実施した。試験Bは土堤天端から実施しているが、土堤天端の貫入抵抗を詳細に把握するため、通常はハンマーの自由落下高さが500 mmだが、自由落下高さを125 mm（落下エネルギーは標準の1/4）として実施している。試験Cは衝突面および非衝突面の法面全体を対象とした。なお、試験に使用した土壌硬度計は、地盤調査の方法と解説<sup>3)</sup>に記載される測子先端形状が円錐の標準型のほか、軟弱な土壌を対象とした平面型（測子先端の円板面積2 cm<sup>2</sup>）も組み合わせて実施した。

表-3には別途実施した室内土質試験から得られた土堤材料の物性値一覧を示している。実験に用いた土砂材料は砂に分類される。

## 3. 試験結果

### 3.1 衝撃加速度試験

図-2には、試験Aの衝撃加速度試験結果を示している。衝撃加速度は1箇所あたり10点の測定を行い、10点の上下2点ずつを取り除いた後の6点の平均値として示している。

図より、(a)図の土堤基層の場合には、実験前よりも実験後が10～40%程度増加していることが分かる。これは、実験準備等により人力で複数回踏み固められたためと考えられる。一方、(b)図の土堤本体の場合には、

表-2 試験方法実験ケース一覧

試験記号	試験名	試験実施のタイミング	試験箇所	得られる情報	試験数 (1試験体あたり)
A	衝撃加速度試験 <sup>4)</sup>	・土堤構築中 ・実験後	・土堤基層天端 ・土堤本体中間部	加速度	土堤基層 N=2 土堤本体 N=2
B	簡易動的コーン貫入試験 <sup>3)</sup>	・実験後	・土堤天端から	N <sub>d</sub> 値	土堤基層 N=1 土堤本体 N=1
C	土壌硬度試験 <sup>3)</sup>	・実験後	・土堤本体法面全体	土壌硬度	衝突面/非衝突面を複数回実施

表-3 物性値一覧

項目	単位	試験結果
地盤材料の分類名	-	分級された砂
分類記号	-	SP
土粒子の密度	g/cm <sup>3</sup>	2.690
60% 粒径 D <sub>60</sub>	mm	0.276
均等係数 U <sub>c</sub>	-	1.83
最大乾燥密度 ρ <sub>dmax</sub>	g/cm <sup>3</sup>	1.413
最適含水比	%	25.4
実験時含水比	%	9.5

実験前よりも実験後が 5 ~ 20 % 程度減少傾向がうかがえる。これは、静載荷荷重あるいは衝撃荷重が作用したことによるものと考えられるが、減少率が小さく測定誤差の可能性もある。

3.2 簡易動的コーン貫入試験

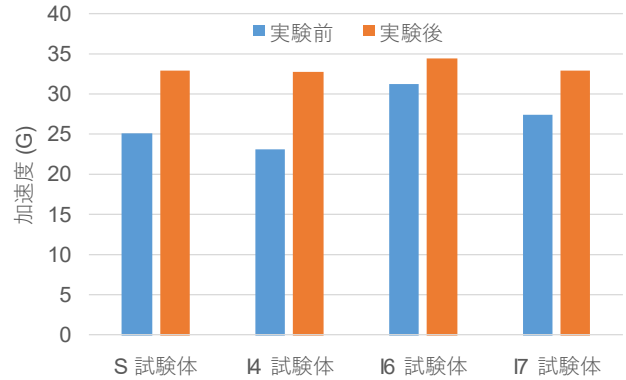
図-3には、試験 B の簡易動的コーン貫入試験結果を示している。N<sub>d</sub> 値は、自由落下高さ 125 mm の場合は 1/4 を乗じ、自由落下高さ 500 mm 相当に補正して示している。

図より、N<sub>d</sub> 値は、土堤基層で 1 ~ 17 回、土堤本体下部 (1 ~ 2 層目) で 1 ~ 10 回、土堤本体上部 (3 ~ 4 層目) で 0 ~ 3 回程度となった。また、各試験体でばらつきが大きいものの、N<sub>d</sub> 値は土かぶり圧に応じて土堤本体天端から土堤基層に向かって大きくなる傾向にあることが分かる。なお、I6 試験体の場合には、土堤基層の N<sub>d</sub> 値が他よりも小さく示されているが、明確な要因は不明である。

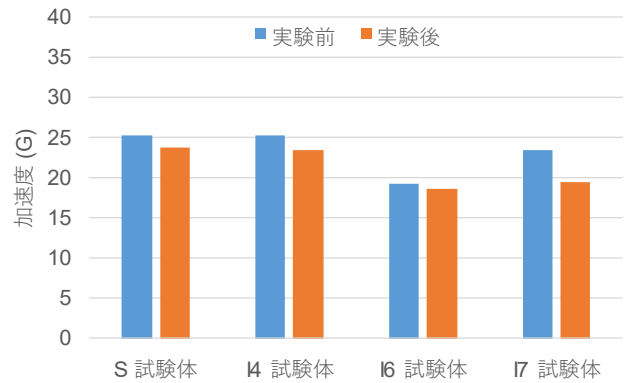
3.3 土壌硬度試験

図-4には、試験 C の土壌硬度試験結果について、静載荷実験の S 試験体および重錘衝突実験の I7 試験体を例に示している。試験は、円錐形状の標準型を線分中点で、平面型を白線交点で、土堤中央部の赤線を境に左右半分の領域にてそれぞれ実施した。なお、標準型は図中の緑色の枠内、平面型は橙色の枠内でそれぞれ平均値を算出し、各計測値を平均値で除して増減を色分けしている。各色は、減少率 50% 以上を赤系、減少率 50 ~ 100% を青系、増加を緑色としてそれぞれ示している。

図より、S 試験体および I7 試験体ともに衝突面は縦長の矩形形状の領域で、非衝突面は縦横比が同程度の領域で赤色系となっていることが分かる。これら領域は、衝突箇所および押抜き破壊範囲と同程度であることから、



(a) 土堤基層



(b) 土堤本体

図-2 衝撃加速度試験結果

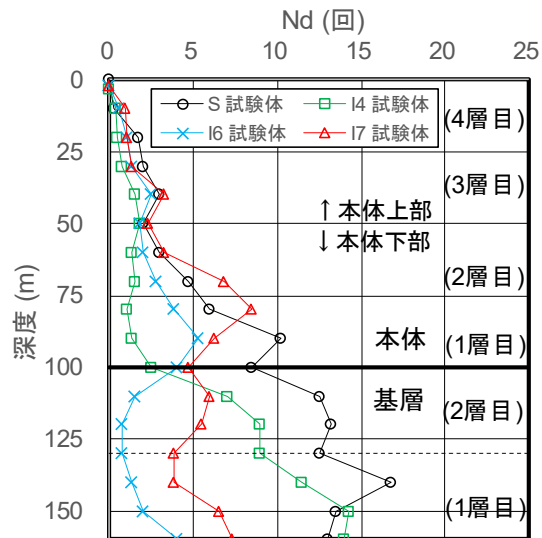
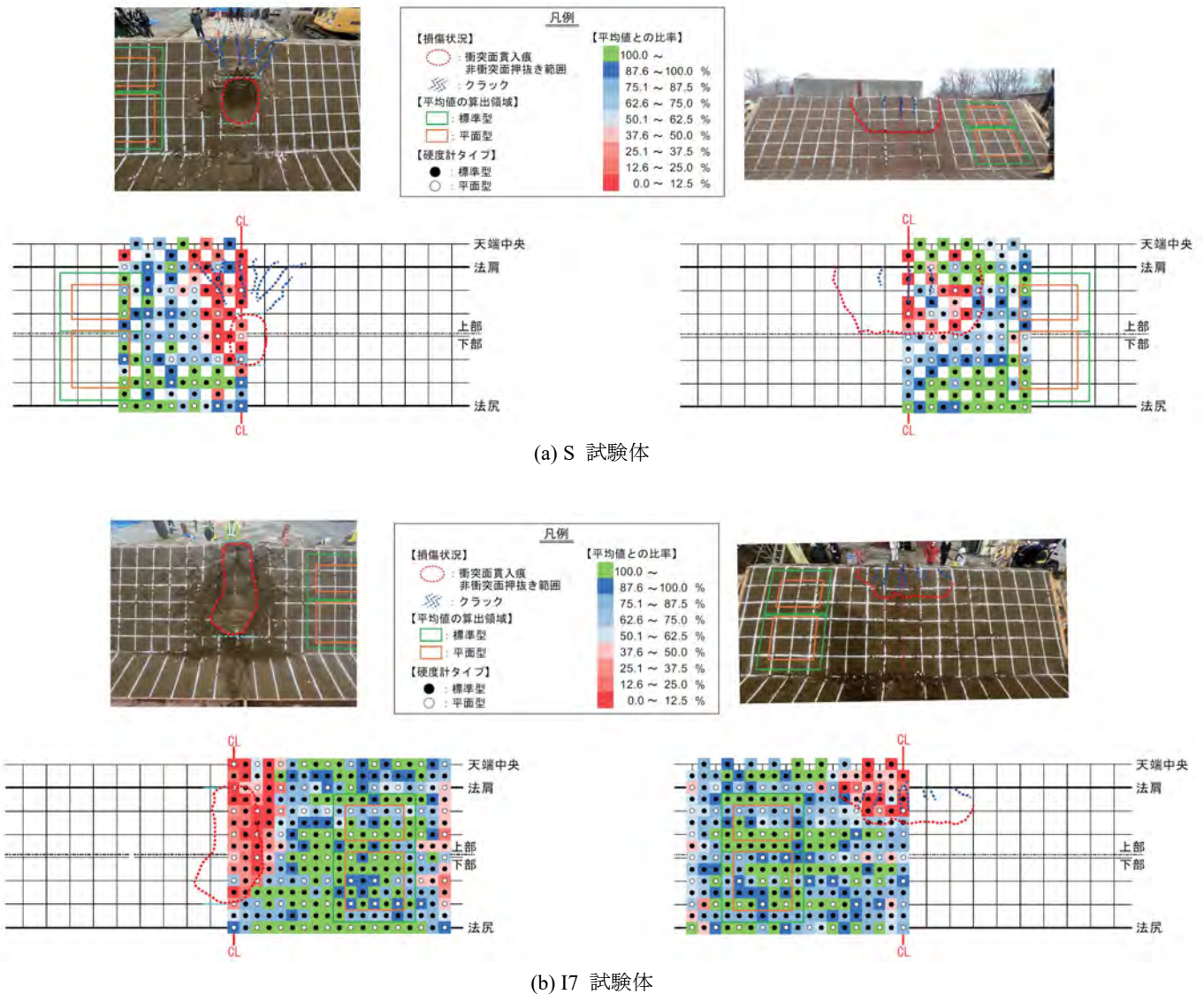


図-3 簡易動的コーン貫入試験結果



図一 4 実験後の土堤状況

静載荷重あるいは衝突荷重が作用した影響によるものと推察される。なお、I7 試験体は土堤本体端部においても赤色系の範囲が確認される。これは、木製型枠付近であることから施工時の締固め度が相対的に小さいことが要因と考えられる。

以上より、静載荷重あるいは衝突荷重が作用した場合には、衝突箇所および押抜き破壊範囲にて土壌硬度が 50 % 程度以下に減少することが確認された。これは、図に示していない I4/I6 試験体も同様であった。これより、土堤の被災範囲および補修必要範囲について、土壌硬度試験等の簡易な試験によって特定できる可能性が示唆された。

#### 4. まとめ

本研究では、土堤の落石捕捉性能検証を目的とした静載荷重実験および重錘衝突実験の試験体を対象に、土壌硬度試験による強度特性変化について検討を行った。検討の結果、静載荷重あるいは衝突荷重が作用した場合には、衝突箇所および押抜き破壊範囲にて土壌硬度が 50 % 程度以下に減少する傾向が確認された。これによ

り、土堤の被災範囲および補修必要範囲について、土壌硬度試験等の簡易な試験によって特定できる可能性が示唆された。

今後は、実施工の土堤実態調査を行い、実際に使用されている材料、土壌硬度、衝突痕状況等を実験結果と比較し、損傷範囲の特定方法を提案していく考えである。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 鈴木健太郎，海部友和，菊池優希，松尾和茂，前田健一，今野久志：土堤材料を変化させた落石防護土堤の重錘衝突実験，北海道支部論文報告集第 76 号，土木学会，A-33，2020.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013
- 4) <https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=HK-130011> (閲覧日：2022 年 12 月 6 日)
- 5) European Organisation for Technical Approvals: Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits, 2013.