

大型土のうによる小規模落石に対する応急対策に関する実験的検討

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○中村 拓郎
三浦 之裕
畠山 乃

大型土のうは道路や河川を対象とした緊急を要する応急復旧工事で広く活用されている。本研究では、50kJ程度までの小規模な落石に対する簡便な応急対策の提案に向けて、耐候性大型土のうの落石衝突時の挙動や破損状況、落石捕捉性能を検証することを目的に、土のう袋材、中詰め材、積み方等を実験パラメータとした重錘衝突実験を実施し、現場適用時の留意点等を整理した。

キーワード：落石、大型土のう、応急対策、実規模実験

1. はじめに

激甚化・頻発化する豪雨や大規模地震等の自然現象にともなって、自然斜面からの落石等による斜面災害の深刻化が懸念され、北海道のような積雪寒冷地域においては、融雪期にも落石が生じている。自然斜面では、複数の石が群として点在していることが多いが、落石対策便覧においては、落石防護施設で対応すると判断した落石群のうち最大規模の作用となるものを落石の作用とすればよい¹⁾とされている。落石群がある斜面において施設の被災や経年劣化等による部材交換が必要となった場合や、新たに落石の懸念が生じた斜面に隣接する道路では、通行規制や別の施設によって対応する必要がある。

落石が懸念される斜面における応急対策の代表例としては、鋼製の仮設防護柵があり、道路防災工調査設計要領(案)²⁾等を参考に設計されている。令和6年8月に発生した宮崎県日向灘を震源とする地震においても、落石によって国道220号の一部区間が全面通行止めとなったが、写真-1(a)に示す仮設防護柵を設置することで片側交通規制に移行している。なお、この片側通行規制への移行には約16日間を要している³⁾。一方、近年は、高エネルギーを有する大規模な落石や崩壊土砂に対応できるような製品開発も進められており、例えば、3段積層した大型土のうをポリエチレンロープとポリエチレンネットで一体化して擁壁構造とする工法⁴⁾等が提案されている。これらの工法は、大規模な落石を対象としている場合が多く、資材調達や施工に時間を要する可能性もある。

坂本らは、北海道の国道の防災カルテ点検で「落石・崩壊」においてR2年度時点でも要対策と判定された箇所から196箇所を抽出して落石の大きさに関する分析を行っており、斜面上には0.5m未満の大きさの落石が約43%



(a) 仮設防護柵



(b) 大型土のう 2段積み

写真-1 被災後の応急対策

(83/196箇所)、斜面下には0.3m未満の大きさの落石が約50% (43/85箇所)であることを報告している⁵⁾。このような小規模な落石に対して前述の仮設防護柵等による対策は過大となる可能性があり、現地調査が可能な資材や標準工法によって早急に対応できることが望ましい。

大型土のうは道路や河川を対象とした緊急を要する応急復旧工事で広く活用されている。斜面防災としては、落石の可能性が低いと判断された斜面において、少量の土砂や小石等を防ぐことを目的に、写真-1(b)に示すよ

表-1 実験ケース一覧

実験番号	载荷方式	ケース名称	土のう袋材種類*	中詰め材種類	土のうの積み方	想定落石エネルギー
0	斜路回転落下式	—	耐候性	砂	1段1列	1 kJ
1	振り子式	WS-D-50	耐候性	砂	2段2列	50 kJ
2	振り子式	FS-D-50	フレコン	砂	2段2列	50 kJ
3	振り子式	WG-D-50	耐候性	土砂	2段2列	50 kJ
4	振り子式	WS-S-50	耐候性	砂	2段1列	50 kJ
5	振り子式	WS-SC-25	耐候性	砂	2段1列 - 連結	25 kJ
6	振り子式	WS-SC-50	耐候性	砂	2段1列 - 連結	50 kJ

* 耐候性：耐候性大型土のう、フレコン：フレキシブルコンテナ



(a)2段2列



(b)2段1列



(c)2段1列 - 連結

写真-2 大型土のうの積み方

うに大型土のうが設置される場合も少なくない。また、大型土のうの中詰め材には現地発生土を活用することも可能であり、耐候性を有する土のう袋材も市場に流通している。落石対策として耐候性の大型土のうを選定することができれば、即日の規制解除等による社会的影響の大幅な軽減だけでなく、恒久対策までの猶予期間の確保等による維持管理コストの縮減も見込まれる。

大型土のうを活用した落石対策については、「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル⁹⁾で施工例が紹介されているものの、具体的な適用範囲等は明示されていない。上田らは、3段積みの大型土のう積層体を対象に、実斜面を活用して大きな落石エネルギーを想定した重錘衝突実験を行い、土のうの損傷状態等を報告している⁷⁾。応急対策としては、落石規模に応じた対策を選定できることが望ましいため、1段配置や2段積みにした大型土のうの落石捕捉性能についても明らかにする必要がある。本研究では、小規模な落石に対する簡便な応急対策の提案に向けて、1段配置や2段積みの耐候性大型土のうの落石衝突時挙動や落石捕捉性能を確認することを目的に、斜路回転落下式および振り子式の重錘衝突実験を実施した。

2. 実験概要

(1) 実験ケース

本研究における実験ケースを表-1に示す。本研究は、载荷方式の異なる2種類の実験シリーズで構成される。

斜路回転落下式の実験シリーズでは、1kJ程度の落石エネルギーを想定して、耐候性大型土のうを1列に配置し、重錘の落下高さを変えて衝突エネルギーを調整した全30ケースの重錘衝突実験を実施した。振り子式の実験シリーズでは、従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギー相当の落石エネルギーである50kJ程度を想定して、大型土のうを2段積みで配置し、土のう袋材、中詰め材、積み方等を実験パラメータとした全6ケースの重錘衝突実験を行った。

(2) 試験体

試験体に使用した大型土のうは、耐候性大型土のうと一般的なフレキシブルコンテナを用いた土のうの2種類とした。耐候性大型土のうに用いた袋材は、「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアルに規定された性能を満足した長期仮設対応（3年）型で、直径が約1.1m、高さが約1.0mの形状寸法の製品を用いた。また、比較用の袋材であるフレキシブルコンテナは、容量が約1,000L、最大吊り荷重が1,000kgのPP（ポリプロピレン）製であり、直径が1.1m、高さが1.08mの製品を用いた。

大型土のうの中詰め材は、砂と土砂の2種類とした。砂は、石狩市親船産の路盤・埋戻し用の埋砂を用いた。土砂は、札幌市内の資材備蓄基地に保管されていた工事発生土であり、地盤材料としては細粒分質砂質礫に分類される。中詰め材を充填後の大型土のうの重量は、砂を充填した耐候性大型土のうが約1.5ton、フレキシブルコンテナ土のうが約1.4ton、土砂を充填した耐候性大型土のうが約1.3tonであった。なお、本実験におけるフレキ

シブルコンテナを用いた土のうは、耐候性大型土のうと同程度の重量とするために、実験用として最大吊り荷重以上の重量の中詰め材を充填している。

振り子式の実験シリーズにおける試験体では、土のうを2段積みとし、**写真-2**に示すように、2段2列、2段1列に配置した。2段2列の場合は1段目は4個×3列、2段目を3個×2列で配置し、2段1列の場合は2段目を3個×1列で配置した。2段目の土のうは、実験毎に再設置し、重錘衝突によって損傷が認められた場合に交換することとした。また、実験ケース5と6では、2段目の土のうの一体化を図るために、スリングベルトとレバーストックを用いて結束した。なお、応急対策として土のうを積み上げた直後に落石が衝突することを想定しているため、土のうを積み上げた直後に実験を行っている。

(3) 重錘衝突実験

本研究における重錘衝突実験の載荷方式は、**写真-3**に示すように斜路回転落下式と振り子式の2種類とした。

a)斜路回転落下式

斜路回転落下式は、H形鋼で30度の斜路を構築し、回転運動をともなって試験体に重錘を衝突させる方式である。斜路の吐出し口の高さは、高さが約1mの土のう中央付近に重錘が衝突するように後述する重錘寸法を考慮して125mmとした。重錘は1辺が250mmの多面体のEOTA型で、質量は29.3kgである。重錘の落下高さは3.0m、3.5m、4.0m、5.0m、6.0m、7.0mとし、各落下高さで5回ずつ実験を行った。なお、試験体は、落下高さ5.0mの5回目の実験が終わった後に一度だけ交換した。

b)振り子式

振り子式は、重錘を所定の高さから振り子運動によって試験体に衝突させる方式である。門型フレームにワイヤロープで吊り下げた重錘をクレーンで所定の高さまで吊り上げた後、振り子運動によって試験体に衝突させた。なお、本実験では、衝突時に吊り下げロープと重錘の切り離しは行っていない。重錘には、先端が丸みを帯びた直径0.5mの円筒形で、質量が1,181kgのロードセル一体型の鋼製重錘を用いた。重錘の載荷位置は、2段積みの2段目の大型土のうの中央付近となるように高さ1.5mの位置とした。重錘の落下高さは、重錘の衝突エネルギーが従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギーと



(a)斜路回転落下式



(b)振り子式

写真-3 重錘衝突実験の様子

同程度の50kJとなることを目標に調整した。

3. 斜路回転落下式の実験結果

回転運動をともなった衝突エネルギー1kJ程度の落石を想定した斜路回転落下式の実験結果を**表-2**に示す。高速カメラの撮影画像から解析した水平方向の衝突速度は、斜路での回転落下挙動の影響を受けてばらつきがあるものの、落下高さと概ね比例関係になった。落下高さが高いほど衝突速度は大きくなる傾向が認めれ、本実験においては、土のうに対する重錘の水平方向の衝突エネルギーは0.34kJから1.00kJとなった。また、いずれの実験ケースにおいても、土のうに大きな変形や移動は認められず、回転運動をともなって衝突したにも関わらず、重錘が大型土のうを飛び越えることもなかった。

表-2 斜路回転落下式の実験結果概要

落下高さ (m)	載荷 回数	衝突速度※1 (m/sec)	衝突エネルギー※2 (kJ)	土のう背面への 重錘の飛び越え	損傷状況	備考
3.0	5 回	4.79 ～ 6.53	0.34 ～ 0.62	なし	損傷なし	
3.5	5 回	5.66 ～ 7.40	0.47 ～ 0.80	なし	損傷なし	
4.0	5 回	5.23 ～ 6.53	0.40 ～ 0.62	なし	5回目で 袋材破れ	
5.0	5 回	6.10 ～ 7.84	0.55 ～ 0.90	なし	破れ範囲 拡大	実験後に取替え
6.0	5 回	5.66 ～ 8.28	0.47 ～ 1.00	なし	2回目で 袋材破れ	
7.0	5 回	6.53 ～ 8.28	0.62 ～ 1.00	なし	破れ範囲 拡大	

※1 高速カメラの撮影画像から解析した水平方向の衝突速度、※2 水平方向の衝突速度より算出



(a)落下高さ 4m で 5 回目の衝突後

(b)落下高さ 6m で 2 回目の衝突後

(c)落下高さ 7m で 5 回目の衝突後

写真4 斜路回転落下式実験における土のうの損傷状況

重錘衝突後の試験体の損傷状況の一例を写真-4に示す。落下高さ4mの5回目の重錘衝突後に、重錘衝突位置近傍に袋材の軽微な破れが認められた。落下高さ6mの実験ケースを開始する直前で試験体を一度交換して実験を継続した結果、落下高さ6.0mの1回目の重錘衝突時にも袋材の破れが認められ、その後、落下高さ7.0mまで繰返して重錘を衝突させることによって、少しずつ損傷範囲は広がった。ただし、落下高さ7mの5回目の重錘衝突後においても、重錘衝突部の近傍でやや変形が生じていたものの、中詰め材の流出や土のうの移動は認められなかった。

以上の結果から、直径25cm程度の落石については、1kJ程度までの衝突エネルギーが繰返し作用した場合にも、大型土のう本体には大きな損傷も無く、耐候性の袋材を使用することで、その耐用年数期間は捕捉性能を保持できるものと考えられる。なお、落石は跳躍する可能性があるため、土のう1袋の高さを考慮して配置を検討する必要がある。

4. 振り子式の実験結果

従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギー相当の落石を想定した振り子式の実験結果の概要を表-3に、重錘衝撃力を図-1に、試験体の損傷状況を写真-5から写真-10に示す。なお、重錘衝撃力は、重錘に取り付けられたロードセルによる測定値である。重錘衝撃力の時刻歴波形をみると、いずれのケースも衝突後に10～20ms程度で最大値に到達している。WS-S-50を除いた5ケースでは、土

のうの損傷程度に違いはあるものの、重錘を捕捉し、積み上げた土のうの背面への重錘の突破を防ぐ結果となった。

(1) 土のう袋材・中詰め材の違いによる影響

耐候性大型土のうを用いたWS-D-50とフレキシブルコンテナを用いたFS-D-50では、衝撃力波形における最大衝撃力や継続時間に違いが認められたものの、どちらも重錘を捕捉できた。重錘衝突による土のうの損傷状況としては、どちらの実験ケースでも1段目の土のうに損傷や移動は認められず、主たる損傷は重錘が衝突した2段目の土のうであった。2段目の1列目（重錘衝突側）の重錘衝突部近傍で袋材が破れ、2列目（後列）に配置した土のうからの中詰め材の流出が生じた。また、2列目に配置された土のうは大きく変形しているものの、土のうの転落は生じなかった。

土のうの中詰め材に砂を用いたWS-D-50と、土砂を用いたWG-D-50を比較すると、前述のフレキシブルコンテナを用いた土のうと同様に、衝撃力波形における最大衝撃力や継続時間に違いが認められたものの、いずれも重錘を捕捉できており、重錘衝突後の損傷状況も概ね同様の結果となった。

本実験の範囲においては、土のう袋材や中詰め材の違いによって重錘衝撃力の時刻歴波形が異なるものの、重錘の捕捉性能や土のうの損傷状況に顕著な違いは認められなかった。これは、各土のうの重量が約1.3～1.5tonと概ね等しかったためと考えられる。

以上の結果から、2段積みの2段目であっても、中詰め

表-3 振り子式の実験結果概要

ケース名称	土のう袋材種類	中詰め材種別	土のうの積み方	衝突速度※1 (m/sec)	衝突エネルギー※2 (kJ)	損傷状況
WS-D-50	耐候性	砂	2段2列	7.9	37.3	重錘捕捉、衝突部の破れ
FS-D-50	フレコン	砂	2段2列	8.7	44.7	重錘捕捉、衝突部の破れ
WG-D-50	耐候性	土砂	2段2列	9.1	49.3	重錘捕捉、衝突部の破れ
WS-S-50	耐候性	砂	2段1列	9.1	48.6	重錘が土のうを突破
WS-SC-25	耐候性	砂	2段1列 - 連結	5.3	16.6	重錘捕捉、土のう変形
WS-SC-50	耐候性	砂	2段1列 - 連結	9.0	47.6	重錘捕捉、土のう変形

※1 高速度カメラの撮影画像から解析した水平方向の衝突速度、※2 水平方向の衝突速度より算出

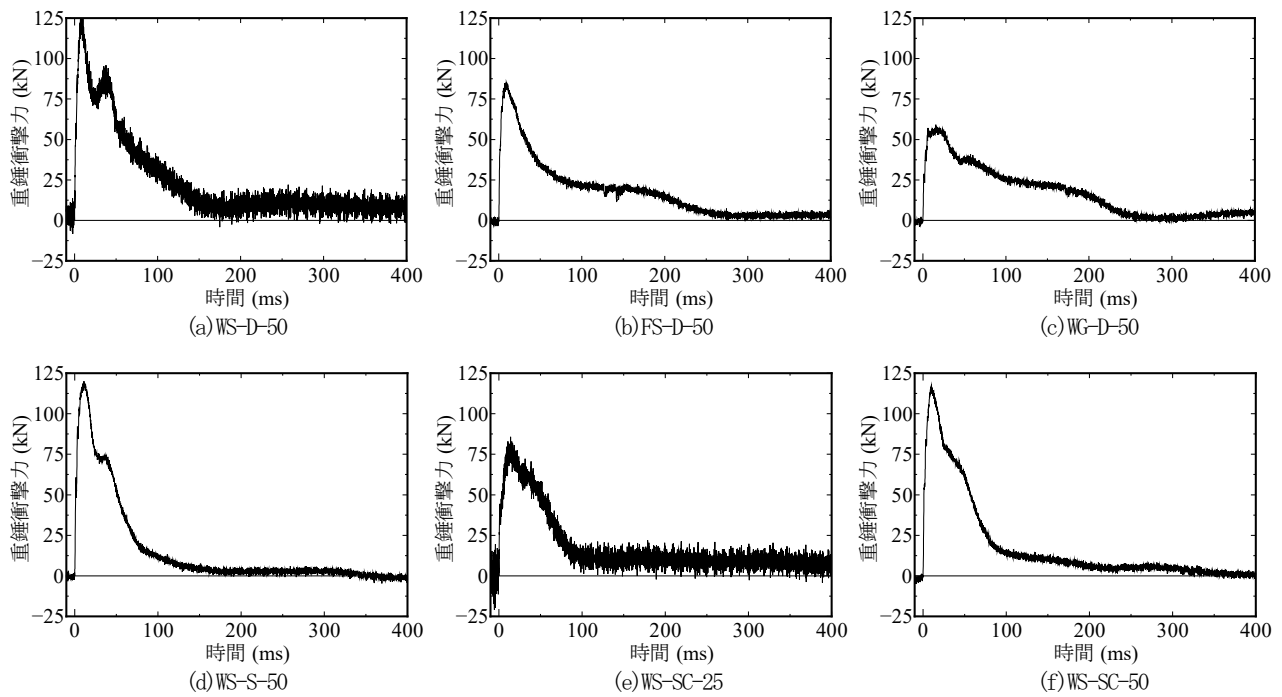


図-1 重錘衝撃力の時刻歴波形



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-5 WS-D-50



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-6 FS-D-50



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-7 WG-D-50



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-8 WS-S-50



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-9 WG-SC-25



(a) 衝突面



(b) 背面

写真-10 WS-SC-50

材を十分に充填した土のうを2列配置することによって、従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギー相当の落石を捕捉できると考えられる。なお、落石は回転運動や跳躍をとともなうため、落石の衝突位置が土のうの天端付近

まで高くなると落石が土のうを飛び越える可能性があるため、土のうの配置を検討する際には落石径や跳躍高さにも留意する必要がある。

(2) 土のうの積み方による影響

前述のとおり2段目の土のうを2列に配置した場合は、重錘衝突部の袋材の破れや中詰め材の流出が生じたものの、従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギー相当の重錘を捕捉する結果となった。一方、2段目を2列に安定して配置するためには、1段目は3列で配置する必要がある、その場合は設置面積も大きくなる。これまで現場で2段積みで配置された土のうは、写真-1(b)に示したように、1段目は2列、2段目は1列で配置されていることが多い。そこで、2段目の土のうを1列に配置した場合についても実験による捕捉性能の検証を行った。なお、本実験では、他の実験ケースにおいて1段目の土のうに変形や移動が認められなかったことから、実験効率化のため、2段2列の積み方と同様に1段目を3列で配置し、2段目は1段目の1列目と2列目の中間に配置している。

2段目を1列に配置して、2段目に従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギーを相当の運動エネルギーを想定した重錘を衝突させた結果、写真-8に示すように、重錘は土のうを押し出して試験体の背面側に通過し、重錘が衝突した土のうから中詰め材が多量に流出した。これは、同様の条件で落石が土のうに衝突した場合に、車道側への土のうの転落や、落石の車道へ突破を唆している。

2段1列で配置したWS-S-50で大型土のうが突破された結果をふまえ、2段目の土のうの連結による捕捉性能の向上について試行することとした。「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアルには、大型土のうの補強を講じるための連結材として、結束ベルト、ロープ等が示されている。しかしながら、川岸らは、河川工事での大型土のうの利用を想定した実験において、人力での結束ベルトによる連結では引張力に対する大型土のうの一体性が弱いことを報告している⁸⁾。そのため、本実験においては、大型土のうの一体性を高めるためには連結材にある程度の緊張が必要であると考え、スリングベルトをレバブロックによって緊張することで、土のうの一体性の向上を試みた。なお、スリングベルトの緊張を維持するために、レバブロックは試験体の背面側に取り付けた状態で実験を行っている。

スリングベルトで拘束した土のうに対して、従来型落石防護柵の設計可能吸収エネルギー相当の50kJと、その半分の25kJを目標とした重錘を衝突させたところ、どちらの実験ケースも土のうに大きな変状は生じずに、重錘を捕捉する結果となった。写真-9、写真-10に示すように、重錘が衝突した土のうの両側に配置した土のうもやや移動しており、3体の土のうが一体となって重錘に抵抗することで、重錘を捕捉するだけではなく、1段目からの土のうの転落も生じなくなったと考えられる。

本実験によって、2段目の土のうの一体化を図ることで捕捉性能が向上することが明らかになった。今後は、

捕捉性能が向上する一体化の条件や、現場で簡便に適用できる土のうの連結方法について継続して検討を進める予定である。

5. おわりに

本研究では、小規模な落石に対する簡便な応急対策の提案に向けて、1段配置や2段積みの耐候性大型土のうの落石衝突時挙動や落石捕捉性能を確認することを目的に、斜路回転落下式および振り子式の重錘衝突実験を実施した。その結果、直径25cm程度で1kJ程度の衝突エネルギーの落石であれば、回転運動がともなう場合でも大型土のう1体で捕捉できることを確認できた。また、2段積みで大型土のうを配置する場合には、2段目を2列にするか、2段目の土のうを連結して一体性を確保することで従来型落石防護柵で対応する程度の衝突エネルギーの落石を捕捉できる可能性を示した。

現在の落石に対する応急対策は、落石規模に応じた対策の選定方法や適用期間等について整理されたものがないため、現地の状況等を踏まえた技術者の知識と経験に基づく検討と、通行止め等の規制による社会的影響を考慮した道路管理者の判断に委ねられるところが多い。本稿が現場での応急対策を選定する際の参考資料のひとつとなれば幸いである。

謝辞：本研究における斜路回転落下式による実験は、道路政策の質の向上に資する技術研究開発（本格研究）の令和5年度採択課題「衝撃履歴を受ける落石防護土堤の残存耐力評価法と土を利活用した合理的な復旧・補強の技術研究開発」の実験装置として製作した斜路の機能確認の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 2) 社団法人北海道開発技術センター：道路防災工調査設計要領（案）落石対策編、2001.3
- 3) 国土交通省 九州地方整備局 宮崎河川国道事務所：国道220号（日南市宮浦～風田）の全面通行止めについて、記者発表資料【道路：第1報】～【道路：第5報】、2024.8
- 4) 難波正和、前川幸次、濱晃子、河崎隆志：大型土のうを用いた防護擁壁の実規模重錘衝突実験および土砂流下衝撃載荷実験、土木学会第73回年次学術講演会、I-234、2018.8
- 5) 坂本尚弘、川又基人、倉橋稔幸：防災カルテ点検における着目すべき落石の大きさの分析、第67回（2023年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集、pp.697-700、2024.2
- 6) 一般財団法人 土木研究センター：「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル〔第2回改訂版〕、2023.5
- 7) 上田大輔、沢田和秀、難波正和、八島厚：大型土のう積層体を用いた落石防護施設の実規模衝突実験、地盤工学ジャーナル、Vol.8、No.3、pp.285-297、2023.9
- 8) 川岸靖、山本浩二、石田正利：連続箱型鋼製枠の一体性検証実験、土木学会第71回年次学術講演会、III-185、2016.9