

大型土のうによる衝突力減衰機構把握のための実験
Experiments for understanding the decrease mechanism
large-size soil-bag having against the collision impact

上田大輔¹，沢田和秀²，林幹之³，小池真仁⁴

- 1 ライテク・岐阜大学・工学部工学研究科・d-ueda@raiteku.com
- 2 岐阜大学・工学部
- 3 岐阜大学・工学部
- 4 ライテク

概 要

大型土のうは、施工が容易で現場に対する柔軟性が高いことから土砂災害現場での仮復旧対策の実績が多い。一方で、大型土のうは、落石などに対する挙動や防護施設としての性能が明確になっていないことから、現場適用時の安全性が危惧される。本研究では大型土のうと重錘による実物大重錘衝突実験を行うことにより、重錘衝突による土のうの反応とエネルギー減衰機構について考察した。その結果、土のうは重錘衝突時の貫入と土のう本体の移動、転倒により衝突物の運動エネルギーを減衰させており、その内貫入と移動での減衰量が占める割合が大きいことがわかった。さらに、衝突物の重量と衝突速度が一定であれば、土のうの重量が大きいほど、土のうの変形と移動によるエネルギー減衰効果が高まり、その変形量や移動量自体も低減させることがわかった。

キーワード：大型土のう，落石防護施設，地盤材料

1. はじめに

道路事業における土砂災害時の仮復旧対策では、特に早急な道路機能の回復が求められる。このような復旧事業の流れの中で、近年では大型土のうを積層状に構築した仮設防護施設の実績が増加している。しかしながら、昨今急増する集中豪雨による同時多発的な災害発生に対して、財政難や人手不足などの理由から本復旧が追いつかず、大型土のうが長期間残置されるような現場もあり、仮復旧対策としての耐用年数を超えた大型土のう積層体の性能が危惧されるところである。

1.1 研究背景

大型土のうを用いた防護施設を中長期的な運用や本復旧対策に適用する場合、補強材との組みあわせや袋自体の改良等の工夫が必要である。さらに、中長期での運用や本復旧へ適用する場合には、まず仮復旧として適用されている大型土のう積層体自体の落石などに対する性能を満足するかどうかを定量的に評価できる仕組みが必要である。しかしながら、大型土のう積層体は実際の落石衝突などに対して、どの程度の規模に耐えられるか、どのような挙動を示すか、といった実績や研究成果はほとんどないのが現状である。

1.2 研究目的

このような背景を受け、本研究では将来的に土のうの性能を検討する上で重要となる土のうの挙動特性について調査した。具体的には、大型土のうが落石などから入力された運動エネルギーを減衰する際に、どのような反応を示すのかを実規模衝突実験により確認した。また、実験で得られた重錘の運動エネルギーと、土のうの反応との関係について整理し、エネルギー減衰機構に対して、土のうの反応がどのように影響しているのかを調査した。

2. 振り子式重錘衝突実験

2.1 実験方法

2.1.1 実験装置と供試体

図1と写真1に実験装置の概要を示す。図1より、実験装置では振り子の支点となるバックホウ1が重錘を吊り上げ、もう1台のバックホウ2により、重錘を所定の高さまで引き上げることで、一定の高さから落下させることが可能な構造となっている。写真1に示すようにバックホウ2と重錘はスリングベルトで連結しており、これを切断することで土のうに衝突させる仕組みである。

使用する重錘は、写真2に示すようにEOTA (European Organisation for Technical Approvals, 欧州技術認証機構)

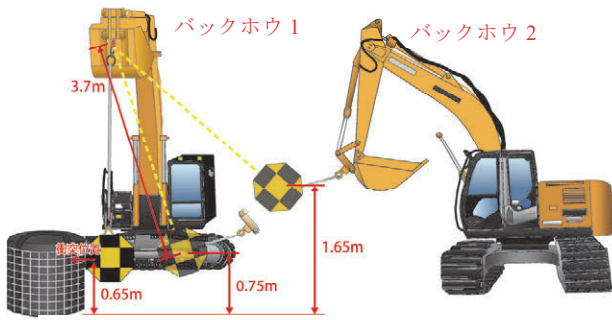


図1 振り子式による重錘衝突実験の概要図



写真1 重錘吊上げ状況

写真2 重錘の形状

が定める ETAG27 に規定されている形状とし、鋼板により多面体形状を構築した上で、コンクリートで内部を充填した構造である。

実験に用いた大型土のうは、写真3のように直径1.1m×高さ1.1mの形状で、「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル¹⁾に規定された要求性能を満足するものとした。袋体の側面と底面は表面加工の施されていないポリプロピレンで構成されている。各実験ケースで使用する大型土のうに対しては100mmピッチのメッシュを施し、写実験前後のメッシュ上で周長と高さを計測することで体積を計測するとともに、重錘衝突によって衝突方向に変形した貫入量を計測した(写真4参照)。

土のうの内部充填土砂の土質は、表1より、砂分が87%を占める粘性土まじり砂で、砂を主体とした粒径の揃った粒度となっており、締固め特性が悪い土砂である。



写真3 大型土のうの概観

写真4 大型土のうの採寸状況

表1 大型土のうに充填した内部材土砂の土質

一般物理試験		粒度試験		
材料分類	粘性土まじり砂	石分	75mm以上 (%)	—
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.37	礫分	2~75mm (%)	0.1
		砂分	0.075~2mm (%)	87.0
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.686	シルト分	0.005~0.075mm (%)	5.2
		粘土分	0.005mm未満 (%)	7.7
自然含水比 w (%)	15.2	最大粒径	mm	4.75
		均等係数 U _c		29.53

2.1.2 実験ケースと計測項目

本実験では、重錘の速度と土のうの重量が衝突挙動に与える影響を確認するために、振り子で衝突させる際の重錘の落差と土のうの重量を変えて4ケース実施した(表2参照)。各ケースで使用する土のうは、製作時に、定期的に土のう内の土砂を均して間隙を小さくしながら土砂を充填したものと(ケース1, ケース3)、一度も土のう内の土砂を均さずに充填したもの(ケース2, ケース4)とで、重量に差をつけた。なお、土のう製作時の不備により、ケース1とケース3は同じ土のうを使用している。

実験時は、フレームレート300fpsの高速度カメラによる動画撮影で側面からの衝突状況を撮影した。また、衝突後の供試体について、重錘の貫入量や土のう本体の移動量を計測した。重錘と土のうの挙動を定量的に調査するために、重錘中心に設けた中空部に加速度計を設置することにより、重錘の加速度を計測した。加速度計は圧電型3軸加速度センサー(MEAS製M-4630)と記録計(増幅器とキーエンス製NR-2000)で構成され、センサーからの出力を0.2ms間隔でサンプリングした。また、土のう衝突面の反対側において、3軸加速度センサー(GEOSCIENCE RESEARCH LABORATORY製)を設置し(図2参照)10ms間隔でサンプリングした。

表2 振り子式重錘衝突実験のケース

ケース	土のう質量 M (t)	土のう体積 V (m ³)	重錘の落差 H (m)	備考
1 (重-遅)	1.71	1.13	0.1	ケース1と3は同じ土のうを使用
2 (軽-遅)	1.58	1.12	0.1	
3 (重-速)	1.71	1.13	1.0	ケース1と3は同じ土のうを使用
4 (軽-速)	1.54	1.13	1.0	

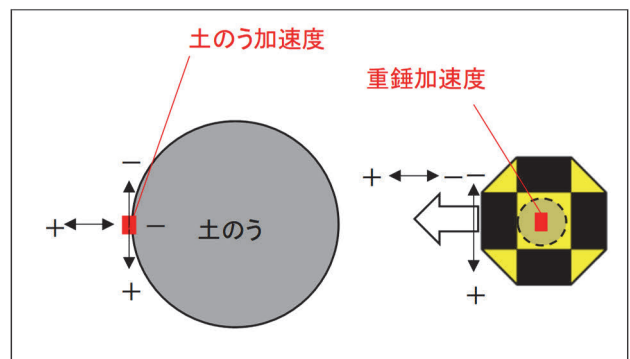


図2 重錘と土のうの加速計設置箇所(上空からの見下ろし図)

2.2 実験結果

2.2.1 重錘衝突時の土のうの反応

図3は、ケース3の重錘衝突時において、土のうが特長的な反応を示した瞬間を高速度カメラのコマ送り画像で示したものである。図3を基に、重錘衝突時の土のうの反応過程について、ケース3を代表として以降に詳述する。

重錘衝突を受けた土のうは、衝突直後から重錘の貫入による変形が生じる。この貫入では、変形が衝突部分に

限定される段階と、貫入が進み変形が土のう全体に波及して袋体が膨張する段階に分けられ、これらの変形がおおむね終了する 0.030 秒後に土のうが移動を開始する。衝突から約 0.074 秒後には、移動を伴いながら土のうのつま先部を支点とした転倒が開始する。以降移動を伴っている間は、転倒角度に大きな変化は見られないが、衝突から約 0.179 秒後に移動が終了すると、土のうが次第に衝突方向に傾き、転倒角度が徐々に大きくなる。衝突から 0.350 秒後に土のうの転倒角度が最大となった後は、徐々に転倒前の位置に戻り、0.522 秒後にその反応は完全に停止する。

表 3 は、図 3 の手順で確認した各ケースの土のうの各反応における所要時間を、衝突時を 0 秒として一覧に整理したものである。表 3 より、土のうの反応では、全ケースにおいて衝突後約 0.03 秒から 0.05 秒の間で貫入が終了していることがわかる。また、貫入終了と同時に移



図 3 ケース 3 における土のうの各反応状況

表 3 衝突時を 0 秒とした土のうの各反応の所要時間

ケース	土のうの各反応時間(秒)		
	貫入時間	移動時間	転倒時間
1 (重-遅)	0.000~0.041	0.041~0.112	0.071~0.315
2 (軽-遅)	0.000~0.044	0.044~0.139	0.091~0.424
3 (重-速)	0.000~0.030	0.030~0.179	0.074~0.522
4 (軽-速)	0.000~0.051	0.051~0.183	0.081~0.830

動が開始し、その後移動と並行して転倒が開始する。その後、転倒を経て土のうが完全に停止するまでに要する時間は最短で約 0.32 秒、最長では 0.83 秒となっており、ケース 1 からケース 4 の順に遅くなる傾向となった。これは、重錘の衝突速度が速いと、土のうが停止するまでの時間が長くなり、土のうの重量が大きいと、停止までの時間が短くなることを示している。一方で、貫入時間については、土のう重量が大きいと貫入時間が短くなり、移動時間は衝突速度が速いと、より長くなる傾向が確認できた。

表 4 は、図 5 で示すように衝突直前の土のうの外形を衝突後の土のうの画像に重ね合わせることで求めた、各ケースの貫入量と移動量を整理したものである。表 4 より、衝突速度が大きくなると、貫入量と移動量が大きくなることがわかる。一方で、土のうが重くなると、貫入量と移動量は小さくなる傾向となった。ケース 1 とケース 2 間で移動量に大きな違いがなかったことは、低速度領域での衝突では、土のうの重量が移動量に与える影響が小さいためと考える。

図 5 は、各ケースの高速度カメラによる観察結果と計測結果を基に、全ケース共通で見られた重錘衝突時の土のうの反応過程をイメージとして整理したものである。

表 4 各ケースにおける土のうの変位状況

ケース	土のう質量 M (t)	衝突速度 v (m/s)	貫入量 (m)	移動量 (m)
1 (重-遅)	1.71	1.38	0.024	0.019
2 (軽-遅)	1.58	1.41	0.055	0.018
3 (重-速)	1.71	4.27	0.108	0.128
4 (軽-速)	1.54	4.34	0.169	0.191



図 4 ケース 4 の衝突後の貫入量と移動量の計測結果

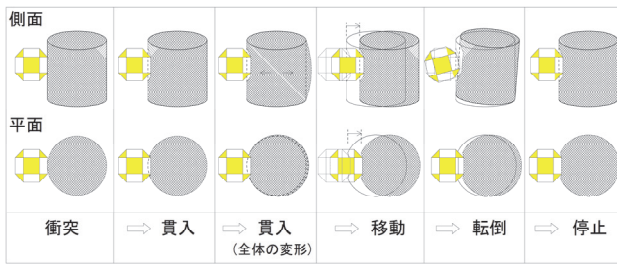


図5 重錘衝突時の土のうの反応過程概念図

図5より、衝突を受けた土のうは、初めに重錘が貫入することにより衝突面で変形が生じ、その後貫入が継続することにより、土のう全体に変形が波及することで袋が膨張する。貫入が終了すると、土のう本体が移動を開始するが、その途中で移動と並行して転倒が開始する。その後、土のう本体の移動が先に停止すると、慣性力によって転倒の傾きが最大となり、その後転倒前の位置に着地し反応は停止する。なお、貫入による土のう全体の変形については、ケース1やケース2のように衝突速度が小さいと、その反応は小さくなり、貫入に要する時間も短くなる。

以上の重錘衝突と土のうとの挙動の観察結果をまとめると、土のうは重錘衝突時に重錘の貫入による変形と土のう本体の移動、転倒という流れで反応が生じる。さらに、各反応の所要時間や貫入量や移動量といった変位量について着目すると、衝突速度が速くなると、移動時間や転倒時間が長くなることに加え、貫入量と移動量が大きくなることが確認できた。これに対して、土のうの重量が大きくなると、貫入時間が短くなり貫入量も小さくなる傾向となった。これは、土のうの重量が増加すると、土のう全体の相対密度が増加し、剛性が高まることが理由と考える。これらのことから、土のうは重錘の貫入や土のう本体の移動、転倒といった反応によって、重錘の運動エネルギーを減衰させていると考える。

2.2.2 衝突時の重錘加速度と重錘速度の時間変化

図6は、各実験ケースにおいて(1)式により算出した重錘加速度の3軸合成値と、(2)式により算出した重錘速度の衝突時を0秒とした時間変化を示したものである。また、図6中には、表3で整理した土のうの各反応時間を図示している。

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1)$$

ここに、

a : 3軸合成加速度 (m/s²)

a_x : X軸加速度 (m/s²)

a_y : Y軸加速度 (m/s²)

a_z : Z軸加速度 (m/s²)

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} a(t) dt \quad (2)$$

ここに

v : 重錘速度 (m/s)

t : 任意の時間 (s)

t_0 : 重錘衝突時の時間 (0s)

a : 重錘加速度 (m/s²)

図6より、各ケースの重錘加速度は衝突後、約0.02秒後から0.03秒後の間にピークに到達し、約0.10秒後には衝突前の加速度以下となる。土のう重量と衝突速度を変えたケースに着目すると、ケース1とケース2に比べ衝突速度が速いケース3とケース4では、最大加速度が大きくなり、最大加速度に到達するまでの時間が短くなっている。また、ケース2とケース4に比べ、土のうが重いケース1とケース3では、それぞれ最大加速度が大きくなると共に、最大加速度からの低下の傾きも大きくなり、衝突時の波形がシャープな形状となっている。

重錘速度は衝突後指数関数的に減少し、衝突から0.10秒前後を境に傾きが緩やかになり、ケース1とケース2は約0.20秒後、ケース3とケース4では約0.50秒前後で速度が0m/sとなる。衝突速度が異なるケースに着目すると、ケース1とケース2に比べ衝突速度が速いケース3とケース4では、重錘速度の傾きが緩やかになる0.1秒後から速度が0m/sとなる重視停止までの時間が長くなっている。土のうの重量が異なるケースに着目すると、ケース2とケース4に比べて、ケース1とケース3は重錘速度低下の傾きが大きく、重錘が停止するまでの時間が短い。

以上の結果をまとめると、重錘の衝突速度が速くなると、重錘加速度はピーク到達までの時間が短くなりピークも大きくなるのに対し、重錘速度は低下の傾きが緩やかになり停止までの時間が長くなる。一方で、土のうの重量が大きくなると、重錘加速度のピークは大きくなり波形はシャープな形状となるのに対し、重錘速度は低下の傾きが大きくなり停止までの時間が短くなる。これらの結果は、画像解析で確認した反応停止までの時間や、計測による土のうの移動量と同傾向を示している。

重錘加速度と土のうの反応時間に着目すると、全ケースにおける重錘の貫入時間は約0.03秒~0.05秒となっており、重錘加速度のピークが貫入時間内で生じていることがわかる。さらに、重錘加速度がピークに到達する前後での、土のうの反応を画像解析で確認すると、ピーク到達時の土のうの反応は貫入による衝突面付近での変形のみであったが、ピーク到達後は土のうの袋が膨張する等、変形が全体に波及していることが確認できた。

砂を緩衝材とした既往の重錘落下実験²⁾では、落体衝撃力のピークは、衝突による圧縮で他の領域と比べて相対的に硬い領域が形成され、強い抗力を受けたことで生じたと報告されている。さらに、落体の貫入は、落体衝撃力がピークを迎えた後も継続していることが報告されている。

この既往研究内容を踏まえると、本実験で得られた重錘加速度のピークは、土のう内部の充填土砂が貫入によ

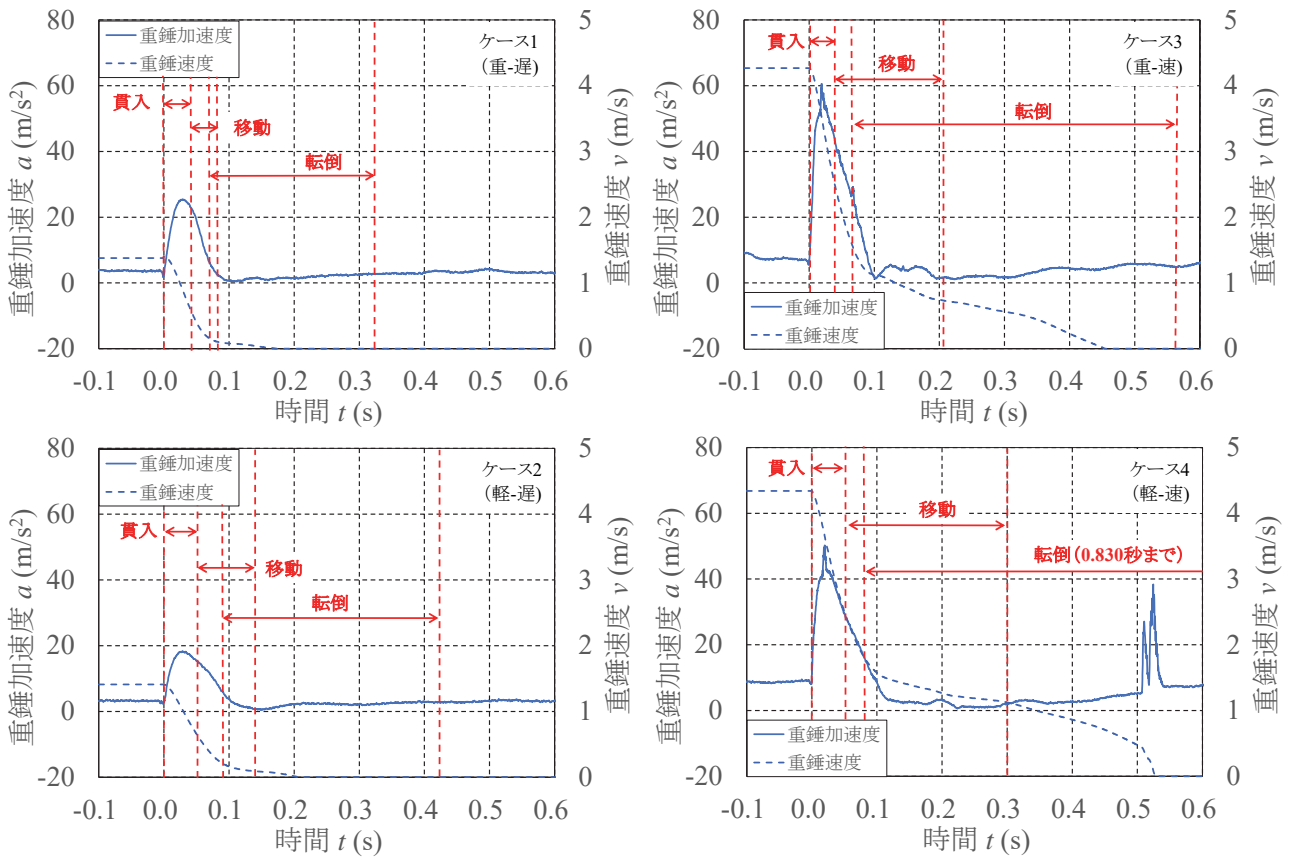


図6 重錘加速度と土のう加速度の時間変化

り圧縮され、衝突面が相対的に硬くなったことで、抗力が最大となったため生じたものとする。さらに、重錘加速度のピーク到達後は、硬くなった衝突面を重錘が押し出すことによって、土のう全体に変形を波及させながら貫入が緩やかに継続していたと考える。また、このピーク到達前後の貫入に要する時間は、土のうの重量が小さいと長くなる傾向となっている。これは、相対密度が小さいと土のう全体の剛性が小さくなり、より変形しやすくなるためである。また、重錘速度と反応時間の関係を見ると、貫入時に重錘速度が大きく低下し、土のうが転倒を開始するタイミングで重錘速度の低下が緩やかとなっている。この貫入時の速度低下の傾向は土のうによる抗力が増したことによるもので、転倒時の速度低下傾向は土のう本体の移動と並行して転倒が開始したことによって、地盤との摩擦抵抗が減少したためと考える。

2.2.3 土のうの加速度と重錘変位量の時間変化

図7は、重錘衝突時を0秒とした、土のうの加速度の時間変化を示したものである。加えて、図7には(2)式による重錘速度と(3)式から算定した重錘変位量の時間変化と土のうの各反応時間を赤破線で示している。なお、土のうの加速度の増加開始時間は、土のう本体の移動が開始した時間に合わせている。

$$\chi(t) = \chi(t_0) + \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (3)$$

ここに

- χ : 重錘の変位量 (m)
- t : 任意の時間 (s)
- t_0 : 重錘衝突時の時間 (0 s)
- v : 重錘速度 (m/s)

図7より、全ケースにおける土のうの加速度は、移動開始から加速度が増加し、0.1秒前後でピークが生じ、0.15秒付近で0m/s²に戻る。その後、加速度は衝突方向に対して逆方向である負の値へ低下し、おおよそ0.8秒までに全てのケースで0m/s²付近に戻っていることがわかる。土のうの最大加速度については、重錘の衝突速度が速くなると、大きくなり、その波形も長くなる。また、土のう重量が大きくなると最大加速度は大きくなり、衝突前の加速度に戻る時間は短くなる傾向となった。土のうの加速度と反応時間に着目すると、それぞれ衝突方向へ山形波形となっている時間と、負の方向へ低下している時間に対して、移動時間と転倒時間が概ね一致していることがわかる。さらに、ケース2とケース3、ケース4の土のう加速度では、ピーク後一度低下した後の2回目のピークと、転倒開始の時間が一致していることが確認できる。

以上の衝突速度増加に伴う土のうの最大加速度の増加と波形時間の増加は、重錘速度増加によって土のうへの入力エネルギーが増加したことを示しているこれに対し、土のうの重量増加によって、最大加速度が増加し、

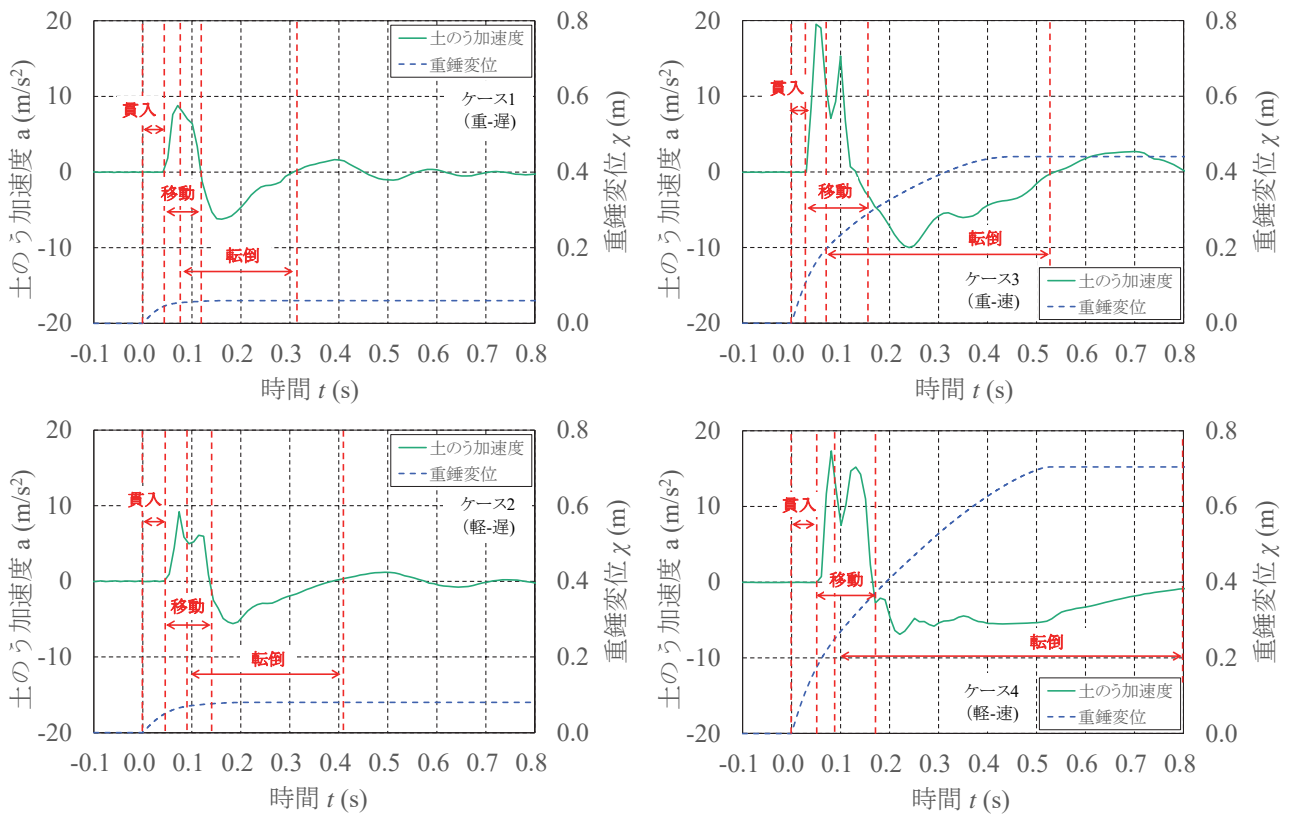


図7 土のう加速度と重錘変位量の時間変化

加速度波形の反応時間が短縮したことは、土のう内部土砂の相対密度増加により全体の剛性が高まると共に、内部土砂の間隙減少により、土粒子の移動が阻まれることで、衝突に伴う変形が小さくなったためであると考えられる。これらの結果は、表3で示す衝突速度の増加に伴う土のうの反応時間増加の傾向と、表4に示す土のう重量増加に伴う移動量減少の傾向とも整合している。

土のう加速度のピークについては、一度目が重錘衝突によって、貫入終了後に土のうが移動開始したことで生じたものである。二度目のピークは各ケースにおいて、転倒開始時間(0.07秒～0.09秒)や、図6の重錘速度が緩やかになるタイミングと近接していることから、転倒により地盤との摩擦抵抗が減少したためであると考えられる。なお、重錘に比べ土のうの最大加速度が小さくなったことは、貫入による緩衝効果が働いたためであり、この土のうの緩衝効果については西田³⁾らが行ったワイヤネット上に敷設された大型土のうへ重錘を鉛直落下させた実験や、國眼⁴⁾らが巨礫から道路面を保護する目的で用いた土のうの適用事例からも報告されている。

表5は、重錘衝突後に計測した土のうの貫入量と移動量、および二つの合計値と、図7における土のう移動開始時と転倒開始時、移動終了時の重錘変位量を整理したものである。表5のケース2を代表として詳述すると、移動開始時(0.044秒)の重錘変位量は0.049mであり、貫入量の計測値である0.055mと概ね一致しており、移動終了時(0.139秒)における重錘変位量0.076mについても、貫入量と移動量の合計値である0.073mと概ね一致することがわかる。ケース1を除く他のケースについても

同様に、移動開始時と移動終了時における計測値と重錘変位量は概ね近い値となっている。一方で、転倒開始時については、ケース1で重錘変位量が計測値である0.043mを上回っているのに対し、ケース2とケース3、ケース4では重錘変位量が計測値を下回っていることがわかる。

以上のように、貫入量の計測値と重錘変位量が一致したタイミングで移動が開始したことは、土のうの反応が貫入から移動へ切り替わったことを示している。また、転倒開始時に重錘変位量が計測値を上回っていたケース2とケース3、ケース4については、転倒開始以降も土のう本体の移動が継続した状態であり、計測値を下回っていたケース1については、概ね移動が終了していた状態であることを示している。さらに、移動終了時の重錘変位量と計測値が一致したことは、この時点で本体の移動が終了し、土のうの反応が転倒のみの状態となったこと

表5 土のうの変位計測値と重錘変位量

ケース	計測値 (m)		重錘変位量 (m)	
	項目	値	項目	値
ケース1 (重-遅)	貫入量	0.024	移動開始	0.044
	移動量	0.019	転倒開始	0.054
	貫入量+移動量	0.043	移動終了	0.058
ケース2 (軽-遅)	貫入量	0.055	移動開始	0.049
	移動量	0.018	転倒開始	0.070
	貫入量+移動量	0.073	移動終了	0.076
ケース3 (重-速)	貫入量	0.108	移動開始	0.111
	移動量	0.128	転倒開始	0.202
	貫入量+移動量	0.236	移動終了	0.310
ケース4 (軽-速)	貫入量	0.169	移動開始	0.174
	移動量	0.191	転倒開始	0.238
	貫入量+移動量	0.360	移動終了	0.387

を示している。このように、高速度カメラによる画像解析で判断した土のうの反応過程が、土のう加速度や重錘変位量などの時間変化と整合していることから、衝突に対する土のうの貫入、移動、転倒という反応過程は概ね妥当であると考えられる。

図8は、各ケースの重錘速度と(4)式から算定した重錘の運動エネルギーを基に、その変化率の時間変化を示したものである。また、図中には、全ケースにおける各反応の平均時間を図示している。

$$E = 1/2mv^2 \quad (4)$$

ここに、

E : 重錘の運動エネルギー (kJ)

m : 重錘質量 (t)

v : 重錘速度 (m/s)

図8より、衝突を受けた土のうは貫入段階で50%から70%程度の運動エネルギーを減衰する。貫入終了後は衝突面から土のう全体に残存運動エネルギーが伝達され、転倒開始前の本体の移動までで20%から30%程度を減衰し、残りの運動エネルギーを転倒で減衰させていることがわかる。また、土のうによるエネルギー減衰効果は衝突時から0.1秒までの貫入と移動で約80%から95%減衰しており、この貫入や移動による減衰効果は、重錘の衝突速度が遅いケースや、土のう重量が大きいケースほど高くなっている。

山砂などをサンドクッションとして用いた落石覆工でのエネルギー伝達率に関する研究⁵⁾では、サンドクッションから落石覆工へのエネルギー伝達率が3.8%~16.2%となり、剛性の高い構造の方がサンドクッションと覆工境界面でのエネルギー反射量が大きく、伝達エネルギーが小さいことを報告している。また、鈴木ら⁶⁾は砂質土で構築した小型土提模型での重錘衝突実験により、重錘が土提に衝突して貫入終了までに60%から90%程度のエネルギーが吸収され、重錘が通過した時点での残存運動エネルギーは10%であったとの報告をしている。

以上の既往研究内容を踏まえると、土のうによる防護施設は土提と同様、貫入時におけるエネルギー減衰効果が最も大きいと考える。また、土のうの重量が大きいと

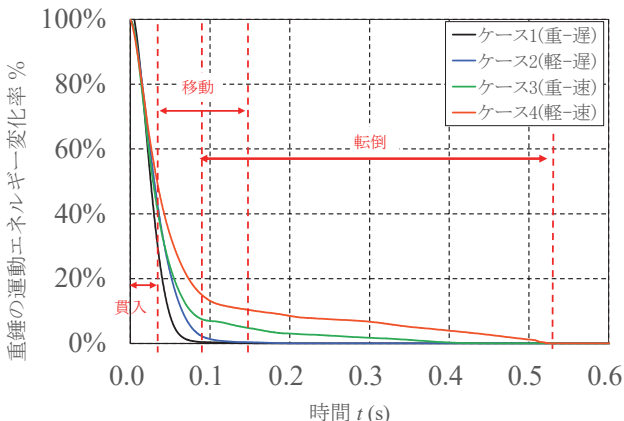


図8 重錘の運動エネルギーにおける時間変化

貫入によるエネルギー減衰効果が高まったことは、重量増加に伴い剛性が高まったことで、既往研究と同様、衝突面におけるエネルギー反射効果が高まったことが原因の一つと考える。

3. まとめ

本研究では、実物大の振り子式重錘衝突実験により、衝突に対する大型土のうの挙動確認および、大型土のうに衝突した重錘が停止に至るまでの土のうの反応とそれに伴う運動エネルギーの減衰特性について確認した。その結果、以下の結果を確認することができた。

- 1) 衝突に対して、土のうは貫入、本体の移動、転倒という流れで反応することで衝突による運動エネルギーを減衰させている。また、重錘速度の増加に伴い土のうの貫入量や移動量といった変位量は大きくなり、反応が完全に停止するまでの時間も長くなる。一方で、土のうの重量が大きくなると変位量は小さくなり、停止までの時間も短くなる。
- 2) 衝突を受けた土のうが貫入の反応を示している間に重錘加速度がピークに達したことは、土のうが圧縮されることにより剛性が高まり、衝突面での重錘に対する抗力が高まったためである。このことは、土のうの貫入段階が最も重錘の速度低下に寄与していることを示唆している。
- 3) 衝突を受けた土のうは、本体の移動開始と転倒開始に伴い加速度が2度のピークを迎える。二度目の転倒によるピークは、土のうと地盤との摩擦が減少することで生じるものであり、これに合わせて衝突体である重錘速度の低下の傾きも小さくなる。また、衝突を受けた土のうの最大加速度は、重錘の最大加速度よりも小さくなるが、これは衝突を受けた土のうの緩衝効果によるものである。
- 4) 重錘からの入力エネルギーは、衝突から約0.1秒までの土のうの貫入と移動によって約80%~95%が減衰され、残存運動エネルギーは土のうの転倒によって減衰される。また、貫入や移動によるエネルギー減衰効果は土のうの重量が大きい程高くなるが、これは質量増加に伴い剛性が高まったことで、衝突面におけるエネルギー反射効果が高まったことが原因の一つと考える。

4. おわりに

本実験結果より、土のうの重量が増加すると、貫入による減衰効果が高まることに加え、本体の移動量低減にも働くことが確認できた。これは、近年土砂災害での実績が多い写真5(左側)に示す大型土のう積層体のように、高さ方向と衝突方向に土のうを積み重ねて重量を増加させることが、衝突に対する防護性能の向上につながることを裏付けるものである。一方で、写真5(右側)のように一列一段で適用される場合には、衝突に対して抗



写真5 大型土のうを用いた仮設防護施設の設置事例

力として働く土のうの重量は、単体でのものと変わりはないため、積層体に比べエネルギー減衰効果は小さくなり、小規模の落石であっても保全対象側へ飛び出す可能性がある。このため、大型土のうを防護工として適用する場合には、必要な壁高に関わらず積層体として用いる方が望ましいと考える。

また、本実験では、重錘の衝突速度が小さいと貫入によるエネルギー減衰効果がより大きいという結果が得られた。このことから衝突の規模が小さくなるほどその傾向が強まり、最終的には土のう本体が移動せずに貫入による減衰効果のみで重錘を停止させることができる衝突規模の領域が存在すると推察される。将来的に土のうの防護施設の設計を見据えた場合、衝突を受けて土のうが移動し始める単体の限界を把握しておくことは重要と考える。今後は、本研究での振り子式重錘衝突実験の補完として、追加実験や動的数値解析を行うことにより、衝突によって土のうが移動しない限界の衝突規模について、その傾向を確認する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 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，p. 4, p. 6, p. 17, 2017.
- 2) 峯祐貴，前田健一，松尾和茂，杉山直優，川瀬良司：落石衝突時の敷砂緩衝材内部の変形挙動に及ぼす地盤特性の影響，構造工学論文集，Vol. 66A, pp. 975-987, 2020.
- 3) 西田陽一，榎谷浩：ワイヤネット上の敷砂の緩衝性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 57A, pp. 1145-1154, 2001.
- 4) 國眼定，上田大輔，八谷誠，八嶋厚，野津隆太：直轄国道斜面に分布する巨礫の全面通行止めの措置を伴う除去工，地盤工学ジャーナル，14巻2号，pp. 225-240, 2019.
- 5) 園田佳巨，佐藤紘志，石川信隆，榎谷浩：落石覆工へのエネルギー伝達率に関する基礎的考察，土木学会論文集，No.446, pp.147-155, 1992.
- 6) 鈴木健太郎，半渡裕二，松尾和茂，前田健一，今野久志：砂質土で構築した小型落石防護土提の重錘衝突実験，構造工学論文集，Vol.66A, pp. 951-962, 2020.