

厚さ 90 cm の敷砂緩衝層の緩衝効果に関する重錘斜入射実験

Weight-fall test at oblique angle for impact energy absorption effect of a 90-cm-thick sand layer

(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
(株) 構研エンジニアリング
名古屋工業大学
名古屋工業大学
土木研究所寒地土木研究所

正会員 鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
○正会員 山内翼 (Tsubasa Yamauchi)
菅原正則 (Masanori Sugawara)
学生員 杉山直優 (Naomasa Sugiyama)
正会員 前田健一 (Kenichi Maeda)
正会員 今野久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

落石災害は、人命に直接関わりとともに、道路網の寸断等、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、凍結融解や斜面の劣化（風化）進行等さまざまな誘因・要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。落石対策便覧¹⁾に示される落石対策工のうち、落石防護土堤や溝等の土質系落石防護施設（以後、落石防護土堤あるいは単に土堤）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等の現場条件によっては最も経済的な対策工となる。しかしながら、同便覧における落石防護土堤に関する設計の考え方は、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述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。

このような背景から、我々研究グループでは土堤の性能照査型設計法確立に向け、小型土堤模型および実規模土堤模型実験を実施している。その結果、重錘が土堤に衝突する際には、衝突エネルギーは重錘貫入挙動により大部分が吸収されること、重錘角速度や土堤への衝突位置によっては重錘を捕捉できない場合がある等を明らかにしている。一方、落石対策便覧では、落石がポケットに落下した後のバウンド・かけ上がりを経た範囲内で停止させる、と記載されている。これは、図-1に示すように、まず土堤本体の斜面側に設けられるポケットに落石が衝突してエネルギーが減衰し、その減衰したエネルギーにて落石が土堤本

体に衝突することを意味する。これより、落石防護土堤は1) 土堤本体および2) ポケットの両者でエネルギーを減衰させて落石を捕捉する落石防護施設となることから、ポケットのエネルギー減衰等の緩衝効果を適切に評価することが肝要と考えられる。

以上より、本研究では落石防護土堤に関する落石捕捉性能把握のための基礎資料収集を目的として、落石防護土堤の斜面側ポケットに関する緩衝効果の検討を行うために、重錘斜入射実験を実施した。本論文では、敷砂緩衝層の厚さを 90 cm とし、重錘質量の異なる実験ケースに着目し、重錘の落下挙動および反発挙動等について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

写真-1 および 図-2 には、実験状況写真および実験概要図を示している。また、表-1 および 表-2 には、実験に用いた重錘一覧および緩衝砂の材料試験結果一覧を示している。表-1 には落石対策便覧に記載されている緩衝層厚と重錘直径の比 T/D も併せて示している。なお、表-2

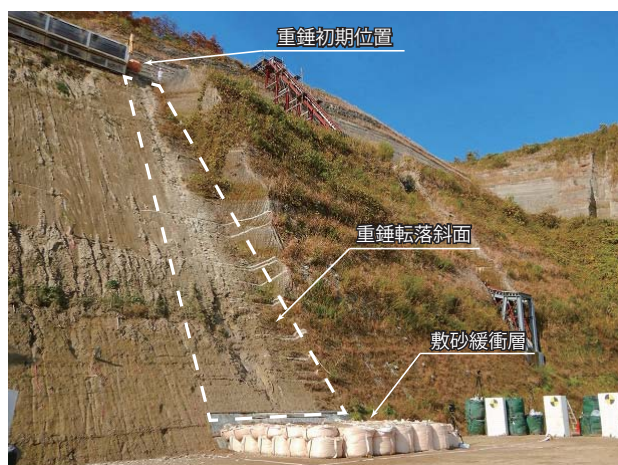


写真-1 実験状況写真

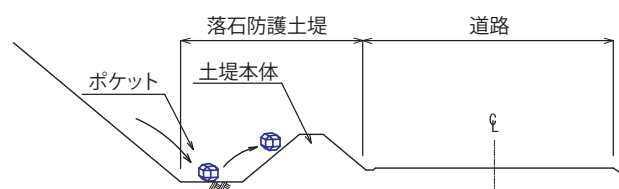


図-1 落石防護土堤の模式図

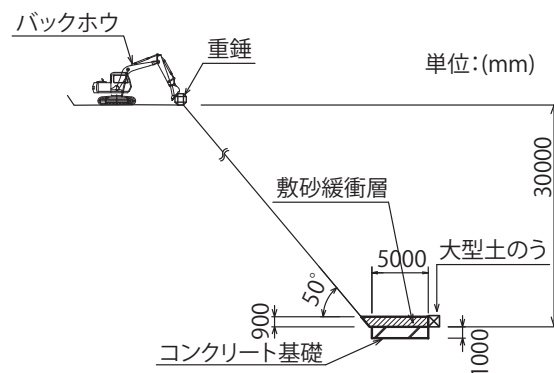


図-2 実験概要図

表-1 重錘一覧 (全3種類)

質量 (ton)	体積 (m ³)	単位体 積質量 (ton/m ³)	1辺の 長さ D (m)	球体 換算径 (m)	球体慣性 モーメント (ton・m ²)	層厚 比 T/D
0.25	0.094	2.660	0.510	0.564	0.008	1.765
1.60	0.627	2.552	0.960	1.062	0.180	0.938
2.50	0.995	2.513	1.120	1.239	0.384	0.804

表-2 材料試験結果一覧

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 ³	2.67
60% 粒径 D_{60}	mm	0.60
均等係数 U_c	-	3.53
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.68
最適含水比 w_{opt}	%	16.5
平均湿潤密度	g/cm ³	1.54
平均含水比	%	6.3
コーン試験 N_d	回	0~6
衝撃加速度	G	14~21

の締固め試験は B-b 法で実施しており、湿潤密度および含水比は各実験前に採取した試料の平均値を示している。

実験では、表-1 に示す各重錘を高さ 30 m、勾配 50 度の斜面天端からバックホウで押し出すことで落下させている。第1落下点となる法尻地表面には、落石対策便覧のロックシェッドにおける下限値である厚さ 0.9 m の敷砂緩衝層を、重錘進行方向長さ 5 m、幅 5 m の範囲に設置している。敷砂緩衝層の施工については、厚さ 0.3 m ごとに敷均し、起振力 10 kN の振動コンパクタで転圧した。なお、敷砂緩衝層直下には厚さ 1.0 m のコンクリート基礎を設置している。コンクリート基礎の平均一軸圧縮強度は 29.5 MPa で、表層かぶり 0.1 m の位置にひび割れ防止として D13 @ 250 mm の鉄筋を配置している。

表-3 には、実験ケースの一覧を示している。実験ケースは、敷砂緩衝層の厚さを 0.9 m に一定とし、重錘質量を 3 種類に変化させた全 6 ケースである。表中の実験ケース名については、第一項目の S に付随する数値は敷砂緩衝層厚を、第二項目の M に付随する数値は重錘質量を示し、末尾の数字は同じ条件で行った実験の順序を表している。なお、S0.9-M0.25-1 は緩衝層外へ落下したため、後述の実験結果では衝突時のみ考察している。

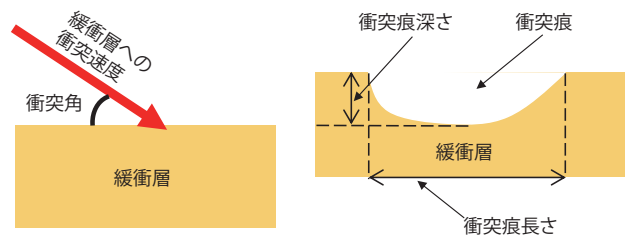
2.2 測定項目

本実験の測定項目は、敷砂緩衝層への重錘衝突時の反発挙動および実験後の敷砂緩衝層の衝突痕形状である。

重錘衝突時の反発挙動計測は、3 台の高速カメラ (500 fps) を用いて撮影し、重錘表面に描いた複数個のターゲットの 3 次元挙動を画像解析から求め、得られたターゲット

表-3 実験ケース一覧 (全6ケース)

ケース名	落下 高さ (m)	緩衝 層厚 T (m)	重錘 質量 (ton)	位置エネ ルギー E_0 (kJ)	実験結果
S0.9-M0.25-1	29.1	0.9	0.25	71.3	緩衝層外に落下
S0.9-M0.25-2					緩衝層内で停止
S0.9-M1.60-1			1.60	456.6	反発あり
S0.9-M1.60-2					反発あり
S0.9-M2.50-1			2.50	713.4	反発あり
S0.9-M2.50-2					反発あり



(a) 衝突角度

(b) 衝突痕

図-3 衝突角および衝突痕の概念図

の座標をもとに重錘重心の座標および角速度を算出した。得られた重心座標から重錘の線速度、運動エネルギーを、角速度から回転エネルギーをそれぞれ算出した。しかしながら、重錘衝突時に飛散した土粒子や太陽光の反射が原因で画像解析による算出値はノイズが大きくなってしまった。そのため、速度および角速度をもとに算出するデータは 10 ms の中央値処理および 14 ms の矩形移動平均処理を施している。

実験後の敷砂緩衝層の重錘衝突痕形状の計測は、最大深さ、重錘進行方向の最大長さおよび奥行き方向の最大幅を手動計測した。

3. 実験結果

3.1 衝突時の重錘挙動

表-4 には実験結果一覧を示している。表中の衝突時速度は図-3 に示すように衝突直前の速度であり、水平速度 V_h は重錘進行方向を、鉛直速度 V_v は鉛直下向きを、角速度 ω は重錘進行方向に対して順回転をそれぞれ正としている。線速度 V は水平速度、鉛直速度および奥行き方向速度の 3 成分を合成した合成速度として算出している。衝突角 θ は水平速度および鉛直速度から算出している。反発時の水平速度比、鉛直速度比 (反発係数)、角速度比はそれぞれ重錘衝突後の水平速度、鉛直速度および角速度を重錘衝突直前の各々の値で除して算出している。なお、実際の落石防護土堤においてポケットの緩衝効果を評価する場合には、土堤衝突直前の重錘速度に着目すべきと考えますが、本実験では鉛直速度が上向きに最大となる時刻での速度を反発後の速度として評価した。エネルギー吸収率は既往の研究²⁾と同様に衝突直前および衝突後の全運動エネルギーから算出した。

表-4 実験結果一覧

ケース名	衝突時									反発時				衝突痕		
	水平	鉛直	角速度	線速度	衝突	線速度	回転	エネルギー	全運動	水平	鉛直	角	エネルギー	深さ	長さ	幅
	速度	速度	ω	V	角度	エネルギー	エネルギー	ギ-比	エネルギー	速度	速度	速度	ギ-吸収率	d	l	b
	V_h (m/s)	V_v (m/s)	(rad/s)	(m/s)	θ (°)	E_v (kJ)	E_r (kJ)	E_r/E_v (%)	E (kJ)	(%)	(%)	(%)	(%)	(m)	(m)	(m)
S0.9-M0.25-1	11.90	11.78	33.99	16.75	44.7	34.84	4.62	13.3	39.46	-	-	-	-	-	-	-
S0.9-M0.25-2	10.36	17.45	36.90	20.29	59.3	51.64	5.45	10.5	57.08	0	0	0	100.0	0.030	1.76	1.03
S0.9-M1.60-1	13.55	8.52	20.11	16.13	32.2	204.59	36.41	17.8	241.00	71.9	27.9	74.3	57.6	0.026	3.13	1.67
S0.9-M1.60-2	12.45	7.53	18.97	14.55	31.2	171.57	32.37	18.9	203.94	68.2	26.6	68.7	53.5	0.028	2.93	1.58
S0.9-M2.50-1	12.53	10.02	17.60	16.26	38.7	356.24	59.44	16.7	415.68	77.6	39.7	64.8	44.3	0.033	3.30	1.94
S0.9-M2.50-2	16.53	7.96	16.15	18.41	25.7	426.03	50.08	11.8	476.11	76.7	25.5	116.4	41.9	0.037	3.41	1.96

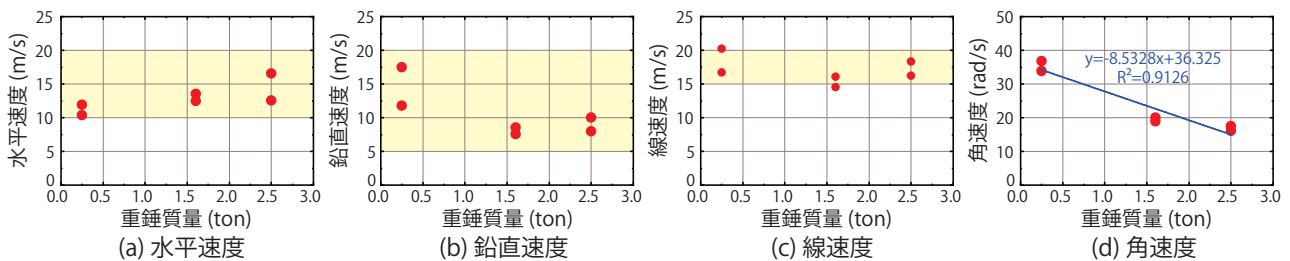


図-4 各速度と重錘質量の関係

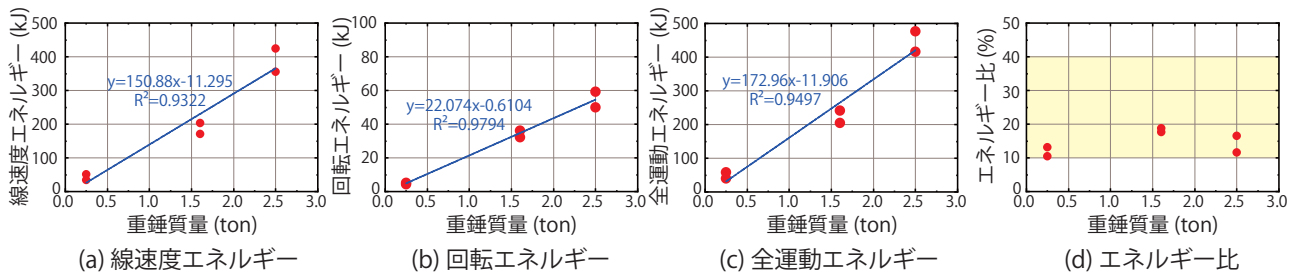


図-5 各エネルギーと重錘質量の関係

図-4には、緩衝層への重錘衝突時直前における水平速度、鉛直速度、線速度および角速度と重錘質量の関係を示している。(a)~(b)図より、水平速度は10~20 m/s程度、鉛直速度は5~20 m/s程度に広く分布していることが分かる。これは、斜面中腹での衝突状況および緩衝層との高さ関係により水平速度および鉛直速度は変化することによるものと考えられる。一方、(c)図の水平速度および鉛直速度を合成した線速度は概ね15~20 m/sであり、水平速度および鉛直速度よりも広く分布せずある速度に収束する傾向を示している。以上より、斜面を落下し緩衝層に衝突する際の重錘線速度のばらつきは小さいものの、衝突角度がばらつくことで水平速度および鉛直速度にばらつきが生じるものと考えられる。また、線速度は落下高さ29.1 mの場合の自由落下速度23.9 m/sに対して60~80%程度となる。このため、本実験における落石対策便覧の残存係数は $\alpha = 0.6 \sim 0.8$ 程度で、斜面勾配50度から算出した等価摩擦係数に換算すると $\mu = 0.429 \sim 0.608$ となる。(d)図の角速度について

では、重錘質量の増加に伴い角速度が小さくなる傾向にあることが分かる。これは、慣性モーメントが大きいのほど回転しにくいことによるものと推察される。

図-5には、線速度および角速度から算出した線速度エネルギー E_v 、回転エネルギー E_r 、両者を合算した全運動エネルギー E および線速度エネルギーに対する回転エネルギーの比 E_r/E_v （以後、エネルギー比）と重錘質量の関係を示している。(a)~(c)図より、線速度エネルギー、回転エネルギーおよび全運動エネルギーは重錘質量の増加に伴い各エネルギーも増加することが分かる。これは、図-4に示されるように、線速度エネルギーは線速度が概ね一定であるため重錘質量に比例して増加すること、重錘質量の増加に伴い角速度が減少するものの回転エネルギーは慣性モーメントを乗じて算出するため、重錘質量の増加に伴い増加すること、によるものと考えられる。(d)図のエネルギー比は10~20%程度であり、落石対策便覧に記載されている10~40%の範囲内に収まっている。

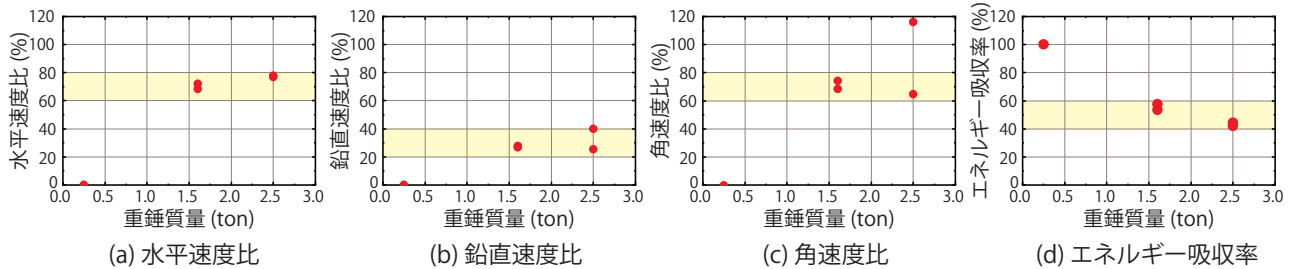


図-6 各速度比・エネルギー吸収率と重錘質量の関係

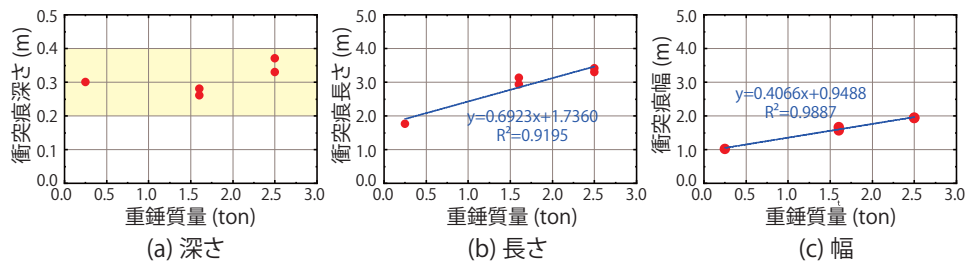


図-7 衝突痕と重錘質量の関係

以上より、重錘質量が小さいほど角速度が増加しやすいこと、重錘質量が大きいほど角速度が増加しにくい傾向にあることが分かった。ただし、回転エネルギーは慣性モーメントに大きく依存し、重錘質量が大きいほど回転エネルギーは大きくなる傾向にある。

3.2 反発時の重錘挙動

図-6には、水平速度比、鉛直速度比、角速度比およびエネルギー吸収率と重錘質量の関係を示している。なお、S0.9-M0.25-1は緩衝層外に重錘が衝突し反発挙動が計測できなかったため、図からは除外している。(a)~(c)図より、敷砂緩衝層内で重錘が停止して速度比が0となるS0.9-M0.25-2を除くと、水平速度比は70%、鉛直速度比は30%程度を示しており、角速度比については100%を超過しているS0.9-M2.5-2以外では70%と重錘質量にかかわらず比較的同程度の値となる。(d)図より、速度比が0となるS0.9-M0.25-2を除くとエネルギー吸収率も50%程度と大きな変化は見受けられず、落石対策便覧に記載されている55%と概ね一致している。しかしながら、本実験は限られたケースの条件で実施回数も少ないことから、数値解析により各速度比およびエネルギー吸収率について検証を行う必要があると考えられる。

以上より、限られた実験ケースであるものの、重錘質量が小さい場合には敷砂緩衝層内で重錘が停止する可能性があること、重錘質量が大きい場合には各速度比およびエネルギー吸収率に大きな変化は見受けられず同程度となる可能性があることが分かった。

図-7には、衝突痕の深さ、長さおよび幅と重錘質量の関係を示している。図より、衝突痕長さおよび幅は重錘質量の増加に伴い増加しており、衝突痕幅は重錘径の2倍程度となっている。一方、表-4より本実験では衝突角度は25~60°の範囲であるが、衝突痕深さは重錘質量に関わらず0.3m程度であることが分かる。なお、3次元挙動の画像解析においても最大重錘貫入量は0.3m程度であることを確認している。これより、敷砂緩衝層に重錘を斜入射させ

た場合には、重錘質量を増加させても最大重錘貫入量は大きく変化しない可能性があることが分かった。

4. まとめ

本研究では落石防護土堤に関する落石捕捉性能把握のための基礎資料収集を目的として、落石防護土堤の斜面側ポケットに関する緩衝効果の検討を行うために、重錘斜入射実験を実施した。本論文では、敷砂緩衝層の厚さを90cmとし、重錘質量の異なる実験ケースに着目し、重錘の落下挙動および反発挙動等について検討した。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。

- (1) 重錘質量が小さいほど角速度が増加しやすいこと、重錘質量が大きいほど角速度が増加しにくい傾向にある。ただし、回転エネルギーは慣性モーメントに大きく依存し、重錘質量が大きいほど回転エネルギーは大きくなる傾向にある。
- (2) 限られた実験ケースであるものの、重錘質量が小さい場合には敷砂緩衝層内で重錘が停止する可能性があること、重錘質量が大きい場合には各速度比およびエネルギー吸収率に大きな変化は見受けられず同程度となる可能性がある。
- (3) 敷砂緩衝層に重錘を斜入射させた場合には、重錘質量を増加させても最大重錘貫入量は大きく変化しない可能性がある。

本実験は限られたケースの条件で実施回数も少ないことから、今後は重錘質量および衝突角度等を変化させた数値解析により反発挙動等について検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 杉山直優，松尾和茂，阿部和樹，川瀬良司，前田健一，中瀬仁：実規模斜面における落体の反発係数に関する実験的検討，土木学会北海道支部論文報告集，第76号，A-32，2020.1