

異なる層厚の緩衝層のエネルギー吸収効果に関する実規模落体斜入射実験

Weight-impact full scale test at oblique angle for energy absorption effect of sand cushion layer in different thickness

名古屋工業大学	○学生員	杉山直優 (Naomasa Sugiyama)
名古屋工業大学	正 員	前田健一 (Kenichi Maeda)
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	非会員	菅原正則 (Masanori Sugawara)
(株)構研エンジニアリング	正 員	牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
土木研究所寒地土木研究所	正 員	今野久志 (Hisashi Konno)

1. はじめに

落石対策工の主な設計マニュアルに位置付けされている落石対策便覧¹⁾に示される落石防護土堤（以下、単に土堤と示す）は土のみで構成され、設置スペースや土砂材料の確保が容易な場合には経済性、施工性、維持管理性に最も優れた落石対策工となり得る。同便覧には落石防護土堤の設計の考え方として土堤背後のポケットや土堤本体への衝突によりエネルギーを吸収・消散させると記載されているが、そのメカニズムについては判明しておらず、土堤の性能設計法は未だに確立されていない。

以上の背景から、本研究では土堤の性能設計法確立に向け、実スケールの土堤を対象とした落体衝突実験²⁾を昨年度に実施した。実験は落石対策便覧に記載された形状寸法を参考に土堤を施工して実施したが、すべての実験ケースで落体は土堤を通過する結果となった。その要因として第一落下点となるポケットで落体エネルギーが十分に吸収されなかったために土堤の天端付近に衝突して土堤を押し抜いたり、浅い入射角で土堤に衝突して土堤に貫入せず、法面を駆け上がったことで土堤本来の耐力を発揮できなかったことが挙げられる。そこで本実験では、土堤の落石捕捉性能を適正に評価するためにはポケットの落体エネルギー吸収性能の向上が重要であると考え、ポケット部に異なる層厚の緩衝砂盛土（緩衝層）を設置し、落体が緩衝層に衝突した際の反発挙動や緩衝層のエネルギー吸収性能について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

実験概要図を図-1に、実験風景写真を図-2に示す。本実験では最大落下高さ 30m、勾配 50° の斜面上から質量 1.6t、落体径 $D=0.96\text{m}$ の EOTA 型重錘（図-3に落体図を示す）をバックホウで押し出すことで落下させた。また、第1落下点となる地表面には長さ 5m、幅 5m の緩衝層を設置し、緩衝層厚を 1.2m、0.9m、0.6m、0.3m と変化させて実験を行った。それぞれの緩衝層厚は落体径の約 1.2 倍、1.0 倍、0.6 倍、0.3 倍に対応している。緩衝層の施工については、厚さ 0.3m ごとに敷きならし、起振力 10kN の振動コンパクタによる転圧を行った。緩衝層に用いた材料の物性値を表-1に示す。なお、可能な限り同一の条件で実験を行うために、緩衝層直下には厚さ $T=1.0\text{m}$ のコンクリートを施工している。コンクリート

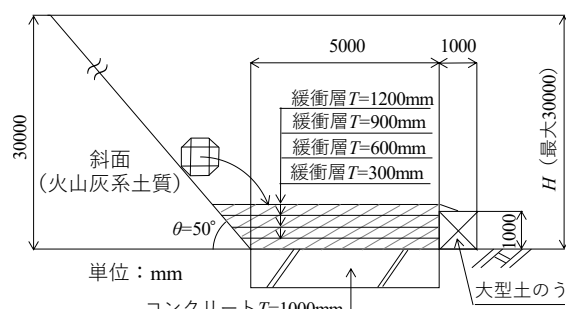


図-1 実験概要図

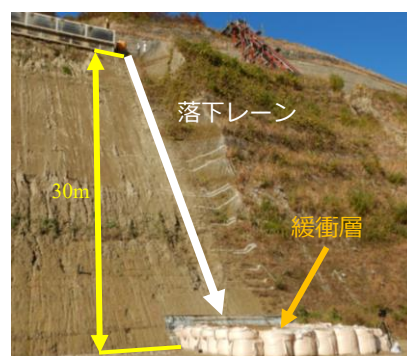


図-2 実験風景写真

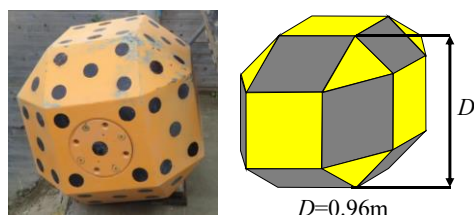


図-3 実験に用いた落体（質量 1.6t、EOTA 型重錘）

の平均一軸圧縮強度は 29.5N/mm^2 であった。また、ひび割れ防止を目的としてコンクリート表層かぶり 0.1m の位置に 250mm おきに異形棒鋼鉄筋 D13 を配置している。

実験ケース一覧を表-2に示す。実験ケース名は、S の右隣の数字が緩衝層厚、M の右隣の数字が質量、末尾の数字が同じ条件で行った実験の順序を表している。また、本実験では緩衝層厚 0m のケースとしてコンクリート ($T=1.0\text{m}$) へ直撃させる実験も行った。位置エネルギーについては落下高さから換算した値を記載している。

表-1 緩衝層材料の物性値

地盤材料の分類名：分級された礫まじり砂		
項目	単位	試験結果
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 $\rho_{d\max}$	g/m^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	%	6.30
コーン試験 N_d	回	0～6
衝撃加速度 ³⁾	G	14～21

表-2 実験ケース一覧

ケース名	落下高さ H (m)	緩衝層厚 T (m)	落体質量 M (t)	位置 エネルギー (kJ)	落下対象
S1.2-M1.6-1	28.8	1.2	1.6	452	緩衝層
S0.9-M1.6-1	29.1	0.9		456	
S0.9-M1.6-2					
S0.6-M1.6-1	29.4	0.6		461	
S0.6-M1.6-2					
S0.3-M1.6-1	29.7	0.3		466	
S0.0-M1.6-1	30.0	0		470	コンクリート

表-3 実験結果一覧

ケース名	緩衝層厚 T (m)	層厚比 T/D	衝突角 $(^\circ)$	衝突直前水平速度 (m/s)	衝突直前鉛直速度 (m/s)	衝突直前合成速度 v (m/s)	衝突直前角速度 ω (rad/s)	水平速度比	反発係数	角速度比	貫入量 (m)	衝突痕長さ (m)	衝突痕幅 (m)	衝突痕面積 (m ²)
S1.2-M1.6-1	1.2	1.25	40.4	13.35	11.36	17.59	22.12	0.605	0.203	0.583	0.44	3.44	1.60	17.3
S0.9-M1.6-1	0.9	0.938	32.2	13.55	8.52	16.13	20.11	0.719	0.279	0.743	0.26	3.13	1.67	16.4
S0.9-M1.6-2			31.2	12.45	7.53	14.55	18.97	0.682	0.266	0.687	0.28	2.93	1.58	14.5
S0.6-M1.6-1	0.6	0.625	45.0	13.19	13.17	18.64	17.85	0.818	0.248	0.668	0.28	2.32	1.49	10.9
S0.6-M1.6-2			43.4	12.85	12.16	17.70	25.17	0.820	0.285	0.540	0.23	2.5	1.59	12.5
S0.3-M1.6-1	0.3	0.313	45.2	12.36	12.45	17.61	21.75	0.966	0.215	0.761	0.20	1.73	1.52	8.26
S0.0-M1.6-1	0	0	32.6	15.09	9.63	17.91	24.86	0.844	0.324	0.825	0.021	0.22	0.59	0.41

2.2 計測項目

本実験における計測項目は落体の緩衝層衝突時の反発挙動及び実験後の緩衝層の衝突痕形状である。反発挙動は3台の高速度カメラ(500fps)を用いて撮影した。また、落体表面に描かれた複数のターゲットの3次元挙動を画像解析から求め、得られたターゲットの座標をもとに落体の重心座標を算出した。得られた座標をもとに落体の軌跡、速度、角速度、運動エネルギーを算出したが、落体が緩衝層に衝突した際の砂の飛散や太陽光の写り込みが原因で画像解析から算出したデータはノイズが大きくなった。そのため、速度、角速度から算出するデータはスパイクノイズを取り除くため、10msの中央値処理及び14msの矩形移動平均処理を行い、データをスムージングした。緩衝層の衝突痕形状については、貫入量や平面寸法形状を計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 落体挙動

(1) 実験結果一覧

実験結果を表-3に示す。層厚比 T/D は緩衝層厚 T を落体径 D ($D=0.96\text{m}$)で除したものを表す。衝突角は図-4に示すように、落体が緩衝層へ衝突する直前の鉛直速度および水平速度から算出した。水平速度は落体進行方向を正に、鉛直速度は鉛直下向きを正にしている。合成速度は水平速度と鉛直速度、緩衝層奥行き方向速度の合成値を表す。また、角速度は落体の進行方向に対して順回転を正としている。水平速度比、反発係数、角速度比はそれぞれ緩衝層衝突後の水平速度、鉛直速度、角速度を緩衝層衝突直前の各々の値で除して算出した。なお、緩衝層衝突後の速度は緩衝層衝突後の鉛直速度が最大になる時刻での速度としている。貫入量及び衝突痕長さ、衝突痕面積については図-5に示すように落体の緩衝層およびコンクリートへ衝突後の衝突痕の寸法を表している。また、衝突痕面積は衝突痕長さを長軸、衝突痕幅を短軸

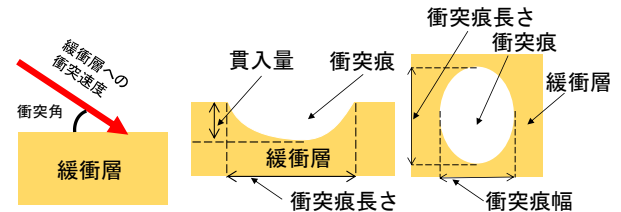


図-4 衝突角

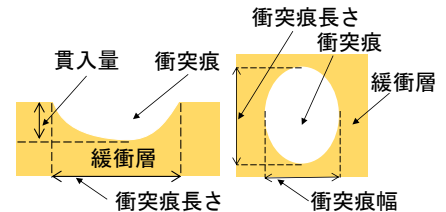


図-5 衝突痕の寸法

とする楕円の面積として算出した。

表-3より、衝突角は $31.2^\circ \sim 45.2^\circ$ となっており、いずれのケースも斜面勾配 50° を下回っている。これは落体が斜面を跳躍しながら落下していることに起因すると考えられる。また、衝突直前速度について、水平速度は $12.36\text{m/s} \sim 15.19\text{m/s}$ 、鉛直速度は $7.53\text{m/s} \sim 13.17\text{m/s}$ 、合成速度は $14.55\text{m/s} \sim 18.64\text{m/s}$ 、角速度は $17.85\text{rad/s} \sim 25.17\text{rad/s}$ とばらついた。

(2) 落体反発挙動

図-6に層厚比 T/D と水平速度比、反発係数、角速度比の関係を示す。図中の青プロットが水平速度比と層厚比の関係、赤プロットが反発係数と層厚比の関係、緑プロットが角速度比と層厚比の関係を表している。また、図には緩衝層を設置しているケース($T/D \neq 0$ のケース)における近似直線を実線にて示している。図より、 $T/D \neq 0$ のケースでは T/D が大きくなるほど水平速度比が小さくなっている。水平速度が減衰する要因として、落体が緩衝層に衝突後、掘り進める際に生じる摩擦が挙げられる。ここで、図-7に T/D と貫入量の関係を、図-8に T/D と衝突痕面積の関係を示す。これらの図にも図-6と同様に、 $T/D \neq 0$ のケースにおける近似直線を実線にて示している。また、図-9にS1.2-M1.6-1とS0.3-M1.6-1の衝突痕写真を示す(衝突痕の外縁を黄色線にて示している)。図-7および図-8より、 T/D が大きくなるほど貫入量、衝突面積

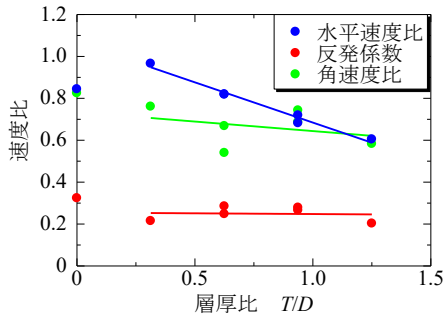


図-6 層厚比と各速度比の関係

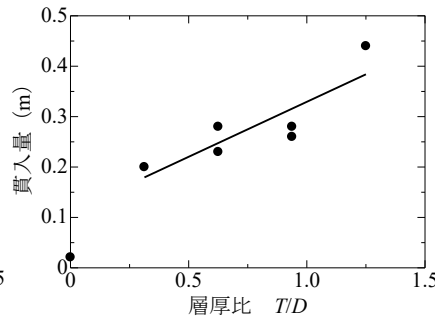


図-7 層厚比と貫入量の関係

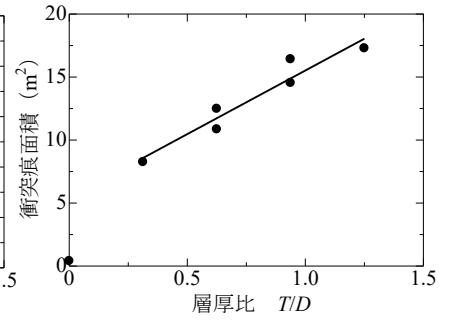


図-8 層厚比と衝突痕面積の関係

ともに大きくなっていることがわかる。また、図-9からも、 T/D の大きいS1.2-M1.6-1の衝突痕の方がS0.3-M1.6-1の衝突痕よりも広範囲にわたり緩衝層が変形しており、落体の大部分が緩衝層と接しながら反発した様子がわかる。以上のことから、層厚比が大きくなるほど落体の多くの面が緩衝層と接することで摩擦力がより多くの仕事をしたため、水平速度比が小さくなったと考えられる。反発係数や角速度比についても T/D が大きくなるほど小さくなる傾向にあることが窺えるが、その傾向は水平速度比ほど顕著ではない。ゆえに、本実験から層厚の変化が落体挙動の変化に大きく影響を及ぼすパラメータは水平速度であると唆される。

3.2 緩衝層のエネルギー吸収性能

(1) 緩衝層衝突時の落体運動エネルギー

表-4に落体の緩衝層衝突時のエネルギー E と斜面の等価摩擦係数 μ 、線速度エネルギー E_v と回転エネルギー E_r の比率 E_r/E_v を示す。なお、線速度エネルギー E_v および回転エネルギー E_r はそれぞれ以下の式(1)、(2)により算出した。

$$E_v = \frac{1}{2} M v^2 \quad (1)$$

$$E_r = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2)$$

ここに、 M ：落体質量 (t)

v ：落体合成速度 (m/s)

I ：落体重心周りの慣性モーメント (t・m²)

ω ：落体の角速度 (rad/s)

全運動エネルギー E は落体の線速度エネルギー E_v と回転エネルギー E_r の和により算出した。また、等価摩擦係数 μ は落石対策便覧をもとに以下の式(3)により算出した。

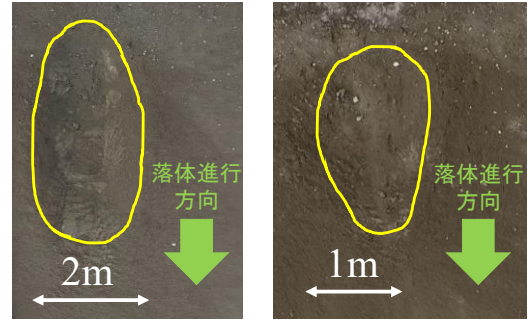
$$\mu = \left(1 - \frac{v^2}{2gH}\right) \tan \theta \quad (3)$$

ここに、 g ：重力加速度 (m/s²)

H ：落下高さ (m)

θ ：斜面勾配

本実験ではいずれのケースも同じ斜面から落体を落下させているが、表-4より、緩衝層衝突時の落体の全運動エネルギーは204kJ～315kJとなっており、約100kJのばらつきが生じている。落体は斜面を跳躍しながら落下する際に斜面上を反発することである程度エネルギーを失うと考えられるが、本実験の結果から、同じ斜面を落下する場合でも斜面上を反発する箇所や反発回数がばらつ



(a) S1.2-M1.6-1

(b) S0.3-M1.6-1

図-9 緩衝層への衝突痕

表-4 落体衝突時のエネルギー諸元、等価摩擦係数

ケース名	緩衝層衝突時 全運動エネルギー E (kJ)	斜面の 等価摩擦係数	緩衝層衝突時 E_r/E_v (%)
S1.2-M1.6-1	293	0.565	17.7
S0.9-M1.6-1	241	0.665	17.8
S0.9-M1.6-2	204	0.763	18.9
S0.6-M1.6-1	308	0.487	10.3
S0.6-M1.6-2	301	0.557	23.4
S0.3-M1.6-1	286	0.563	17.5
S0.0-M1.6-1	315	0.542	21.4

くことで緩衝層衝突時の運動エネルギーにばらつきが生じる可能性があると考えられる。また、本実験で落体を落下させた斜面は火山灰系の土質で構成されており、落石対策便覧によるとその等価摩擦係数の代表値は0.25であるが、本実験から得られた等価摩擦係数は0.487～0.763となっており、便覧に記載されている値の1.5倍～3倍程度大きい。しかしながら、実務設計等で等価摩擦係数を用いて落石の緩衝層への衝突エネルギーを推定する際には落石挙動の不確定要素が多いことや等価摩擦係数が落石の回転エネルギーを考慮していないことを踏まえて検討していく必要があると考えられる。

表-4中の緩衝層衝突時の線速度エネルギー E_v に対する回転エネルギー E_r の比に着目すると、緩衝層衝突時の回転エネルギーは線速度エネルギーの10.3%～23.4%となっており、およそ10%から20%で推移している。落石対策便覧には落石の回転エネルギーは線速度エネルギーの40%程度まで達する場合もあるが、大半の落石において回転エネルギーは線速度エネルギーの10%程度であるとの記載がある。このことから、本実験における回転エネルギーと線速度エネルギーの比は概ね落石対策便覧に記載されている内容と一致しているといえる。

(2) 層厚比とエネルギー吸収率の関係

図-10 に層厚比と緩衝層のエネルギー吸収率の関係を示す。エネルギー吸収率は以下の式(4)により算出した。

$$\text{エネルギー吸収率 (\%)} = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \times 100 \quad (4)$$

ここに、 E_1 ：衝突直前での全運動エネルギー (kJ)

E_2 ：衝突直後での全運動エネルギー (kJ)

なお、図には $T/D \neq 0$ のケースにおける近似直線を実線で示している。図より、 $T/D \neq 0$ のケース間で比較すると、 T/D が大きくなるほどエネルギー吸収率が大きくなる傾向にあることがわかる。これは、3.1 (2) で考察したように、 T/D が大きくなるほど水平速度比が小さくなることに起因するものと考えられる。落石対策便覧では層厚が落体径を超える、すなわち、 T/D が 1 を超えると層厚を増やしても緩衝効果は小さいとあるが、この結果は落体衝撃力についての検討であり、エネルギー吸収率についての検討はされていない。従って、本実験の結果から T/D が 1 を超えても貫入量や衝突痕の長さが大きくなることで水平速度が減衰し、緩衝層のエネルギー吸収率が向上すると考えられる。なお、 $T/D=0.938$ のケースと $T/D=0.625$ のケースを比較するとエネルギー吸収率はほとんど同じとなっているが、これは $T/D=0.938$ のケースの衝突角 (約 32°) が $T/D=0.625$ のケースの衝突角 (約 44°) よりも小さかったためであると考えられる。しかしながら、衝突角がエネルギー吸収率に及ぼす影響は今後の検討課題である。

$T/D=0$ のケースと $T/D \neq 0$ のケースを比較すると $T/D=0$ のケースは $T/D \neq 0$ のケースよりもエネルギー吸収率が小さくなっている。ここで、図-11 にコンクリート衝突後の落体写真を、図-12 にコンクリート衝突に伴う衝突痕を示す。図-11 から、コンクリート衝突により落体が損傷し、落体表面の鋼板接合部が開口している様子がわかる。また、図-12 から、落体がコンクリートに角当たりしたことによりコンクリート表面が局所破壊している様子がわかる。以上より、コンクリート直撃のケースでは落体の破壊に加え、角当たりによるコンクリートの局所破壊により落体の運動エネルギーが吸収されたと考えられる。一方で、緩衝層を設置したケースでは落体やコンクリート表面が破壊されなかったため、緩衝層への貫入により落体の運動エネルギーが吸収されたと考えられる。以上より、緩衝層の設置により落体及び緩衝層直下のコンクリートが破壊されなかったことや落体のエネルギー吸収率が大きくなったことから、緩衝層設置による緩衝効果は発揮されることが考えられる。

4.まとめ

本実験ではポケット部に異なる層厚の緩衝砂盛土を設置し、落体を衝突させた際の反発挙動や緩衝層のエネルギー吸収性能について検討した。本実験により得られた結果を以下に示す。

- 1) 層厚比 T/D が大きくなるほど落体の水平速度比が小さくなる。その理由として、緩衝層厚が大きくなるほど落体の緩衝層との接地面積が大きくなることで摩擦力がより多くの仕事をする事が挙げ

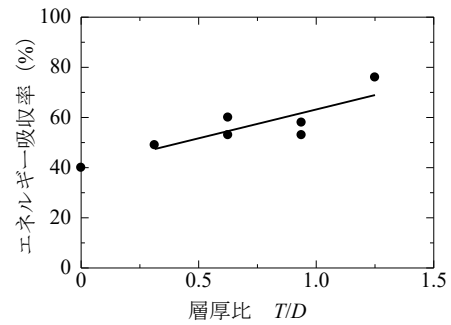


図-10 層厚比とエネルギー吸収率の関係



図-11 コンクリート
衝突後の落体

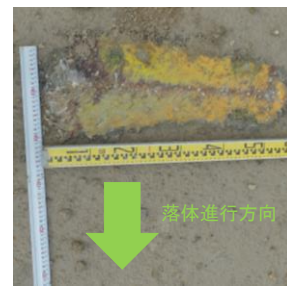


図-12 コンクリート
衝突痕

られる。

- 2) 本実験から得られた斜面の等価摩擦係数は落石対策便覧に記載されている値の 1.5 倍～3 倍程度大きくなった。落石の緩衝層への衝突エネルギーを推定する際には落石挙動の不確定要素が多いことや等価摩擦係数が落石の回転エネルギーを考慮していないことを踏まえて検討することが必要であると考えられる。
- 3) T/D が大きくなるほどエネルギー吸収率は大きくなる傾向にあるが、その大部分は層厚比が大きくなるほど水平速度比が小さくなることによるものであると考えられる。
- 4) 緩衝層の設置により落体やコンクリートが破壊されず、エネルギー吸収率も $T/D=0$ のケースよりも大きくなったことから、緩衝層設置による緩衝効果は発揮されることが考えられる。

今後は、衝突角が緩衝層の緩衝効果に及ぼす影響を整理したうえで緩衝層延長上に土堤を設置した実験を行い、土堤の落体捕捉性能について検討する予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧、2017
- 2) 杉山直優、前田健一、峯祐貴、磯合凌弥、鈴木健太郎、今野久志：落石防護土堤の性能設計法の確立に向けた重錘衝突実験、第 32 回中部地盤工学シンポジウム、pp.33-40.
- 3) 新技術情報提供システム：
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/dtlprint?regNo=HK-130011%20>
(閲覧日：2020年12月16日)