

# 実規模実験及び二次元 DEM を用いた 敷砂緩衝層による落石エネルギー吸収効果の評価

Evaluation of rockfall energy absorption effect of sand cushion by weight-impact test and 2D DEM

磯合凌弥\*, 前田健一\*\*, 杉山直優\*, 木村絢\*\*\*, 菅原正則\*\*\*\*, 今野久志\*\*\*\*\*  
Ryoya Isoai, Kenichi Maeda, Naomasa Sugiyama, Aya Kimura, Sugawara Masanori, Hisashi Konno

\*名古屋工業大学, 大学院工学研究科工学専攻博士前期課程 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)  
\*\*博 (工), 名古屋工業大学教授, 社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)  
\*\*\*名古屋工業大学, 社会工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)  
\*\*\*\* (株) 構研エンジニアリング, 地質部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)  
\*\*\*\*\*博 (工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

キーワード: 落体衝突実験, 敷砂緩衝層, 二次元 DEM 解析  
Keywords: weight-impact test, sand cushion, 2D DEM

## 1. はじめに

我が国の道路や鉄道などの交通インフラは海岸線や山岳地帯の急崖に近隣した区間にも多く整備されており, 人々の生活に必要な不可欠な存在である. しかし一方で, 豪雨, 地震, 斜面の劣化 (風化) 進行など様々な要因から落石災害が多発するリスクが高まっている. そのためこれらの落石災害を抑制するため, 落石対策工の合理的な設計手法の確立が求められている.

落石対策工の現行設計マニュアルに位置づけられる落石対策便覧<sup>1)</sup>において落石防護土堤 (以下, 土堤と示す) は土のみで構成され, 道路側方に平坦な余地があり土堤及び土堤背面にポケット部を設置できる場合に用いられる. 図-1 に落石防護土堤のイメージ図を示す. 土堤は現場での発生土を土堤材料とすることができ, かつ施工が容易であるため経済性, 施工性に優れた落石対策工であるとされている. しかし, 土堤の落石エネルギー吸収メカニズムについては定量的な評価がされておらず, 土堤の性能設計法は未だ確立されていない. 以上の背景から我々研究グループでは土堤の性能設計法確立に向けた実規模実験<sup>2)</sup>を実施した. 実験では落石対策便覧に記載される寸法表 (表-1) を参考に土堤を構築し, 高さ約 30m の斜面上から落体を落下させた. しかし, 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. その要因として落体の土堤のかけ上がりや土堤上部の押しぬき破壊が生じることが挙げられた. この結果を受け, 土

堤が落石を捕捉するためには土堤背面のポケット部でのエネルギー吸収性能向上の必要性が示された.

そこで, 本研究ではポケット部での落体エネルギー吸収性能を検討するため, ポケット部に砂による緩衝層を設置した実規模実験を実施した. 加えて実験結果をもとに二次元 DEM 解析を行い, 再現性を評価した.

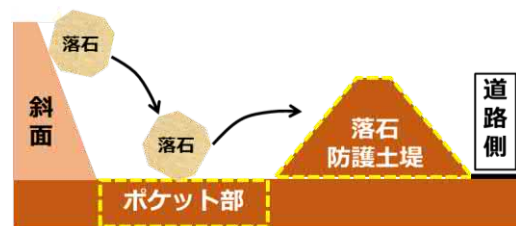


図-1 落石防護土堤 イメージ図

表-1 落石防護溝の寸法 (落石対策便覧 P245 引用)

斜面の勾配 $\beta$	斜面高 $H$ (m)	溝の幅 $W$ (m)	溝の深さ $D$ (m)	備 考
ほぼ鉛直 90°	5~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
	20~	6	1.5	
1:0.25~0.3 76°~73°	5~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
	20~30	6	2.0	
	30~	8	2.0	
1:0.5 63°	5~10	4	1.0	
	10~20	5	2.0	
	20~30	6	2.0	
	30~	8	2.5	
1:0.75 53°	0~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
	20~	5	2.0	
1:1.0 45°	0~10	4	1.0	
	10~20	4	1.5	
	20~	5	2.0	

## 2. 実規模実験

### 2.1 実験概要及び計測項目

図-2、図-3 に実験概要図及び実験現場写真を示す。本実験の実験ケースは表-2 に示し、ケース名は S の右隣の数字が緩衝層厚 (m), M の右隣の数字が落体質量 (t), 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。実験では質量 2.5t, 1.6t, 0.25t の EOTA<sup>3)</sup>型重錘 (図-4, 表-3 に形状寸法を示す) を高さ約 30m, 勾配約 50°の斜面上から落下させた。ポケット部となる地表面に長さ 5.0m, 幅 5.0m の敷砂緩衝層を設置し、層厚を 1.2m, 0.9m, 0.6m, 0.3m と変化させた実験を行った。緩衝層は厚さ 0.3m ごとに敷きならし、転圧を行うことで施工した。また、基礎地盤の変形による影響を少なくするため緩衝層直下には厚さ 1.0m の鉄筋コンクリートを施工した。

実験時には 3 台の高速度カメラ (500fps) で落体挙動を撮影し、画像解析にて落体の三次元挙動を算出し、落体軌跡、速度、エネルギーを導出した。実験後には衝突痕寸法を手動にて測定した。また、落体の衝突が基礎地盤に与える影響を調べるため緩衝層施工前にコンクリート上に感圧シート (FUJIFILM 製 プレスケール) を設置した。図-5 に感圧シートの配置図を示す。感圧シート<sup>4)</sup>とは圧力が作用することでカプセル状の薬品が破壊され発色し、色の濃度から圧力を計測するものである。感圧シートの測定範囲は 10MPa~50MPa のものを使用した。

### 2.2 実験結果及び考察

#### (1) 落体重心の軌跡

図-6 に層厚ごとの緩衝層衝突時の落体重心の軌跡図を示す。軌跡は落体の緩衝層への衝突点を原点としている。グラフ右方向が落体進行方向であり、落体の緩衝層衝突 30ms 前から、落体が緩衝層もしくは砂の飛散により完全に隠れて座標データの算出ができなくなった地点までを算出範囲とした。また、最大貫入点、最大跳躍点をプロットにて示している。S0.9-M0.25-1 (No.3) と S0.3-M0.25-1 (No.13) は緩衝層の外枠に設置していた大型土のうに衝突したため、土のう衝突までの軌跡とした。S0.9-M0.25-2 (No.4) は緩衝層衝突後、砂の飛散により落体が完全に隠れたため、落体が完全に隠れるまでの軌跡と落体が緩衝層上に見え始めてからの軌跡を示している。図より、いずれのケースにおいても落体は緩衝層へ衝突後、貫入しながら水平方向に移動したのち反発する挙動を示している。最大貫入量は 0.10m~0.44m であり、落体径の 2 割~6 割程度である。落体は緩衝層へ貫入した状態で 1m~2.8m ほど進行したのち、地表面に飛び出している。また、入射条件の違いによる影響はあるものの、緩衝層厚が大きいほど、最大貫入量及び地表面に飛び出すまでの進行方向距離が大きくなる傾向が読み取れる。このことから緩衝層厚が大きいほど、落体が緩衝層に貫入している範囲が大きいことがわかる。なお、S0.9-

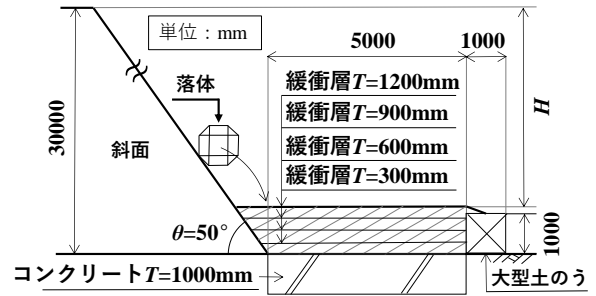


図-2 実験概要図

表-2 実験ケース一覧

No.	ケース名	緩衝層厚 (m)	落体質量 (t)	落下高さ (m)	位置エネルギー $E_0$ (kJ)
1	S1.2-M1.6-1	1.2	1.6	28.8	451.6
2	S1.2-M2.5-1		2.5	28.8	705.6
3	S0.9-M0.25-1	0.9	0.25	29.1	71.3
4	S0.9-M0.25-2		0.25	29.1	71.3
5	S0.9-M1.6-1		1.6	29.1	456.3
6	S0.9-M1.6-2		1.6	29.1	456.3
7	S0.9-M2.5-1	2.5	2.5	29.1	713.0
8	S0.9-M2.5-2		2.5	29.1	713.0
9	S0.6-M0.25-1		0.25	29.4	72.0
10	S0.6-M1.6-1	0.6	1.6	29.4	461.0
11	S0.6-M1.6-2		1.6	29.4	461.0
12	S0.6-M2.5-1		2.5	29.1	720.3
13	S0.3-M0.25-1	0.3	0.25	29.7	72.8
14	S0.3-M0.25-2		0.25	29.7	72.8
15	S0.3-M1.6-1		1.6	29.7	465.7

図-3 実験現場写真

表-3 落体形状寸法



図-4 EOTA 型重錘 (1.6t)

質量 M (t)	一辺の長さ D (m)	換算慣性モーメント $I$ ( $t \cdot m^2$ )
0.25	0.51	0.008
1.60	0.96	0.180
2.50	1.12	0.384

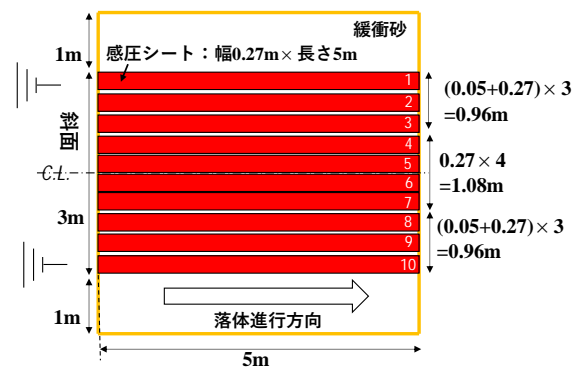


図-5 感圧シート配置図

M0.25-2 (No.4) では落体が緩衝層上で停止したことから、ポケット部に緩衝層を設置することで落体質量や緩衝層厚、入射速度などの条件によっては、緩衝層上で落体を捕捉できることが示唆された。

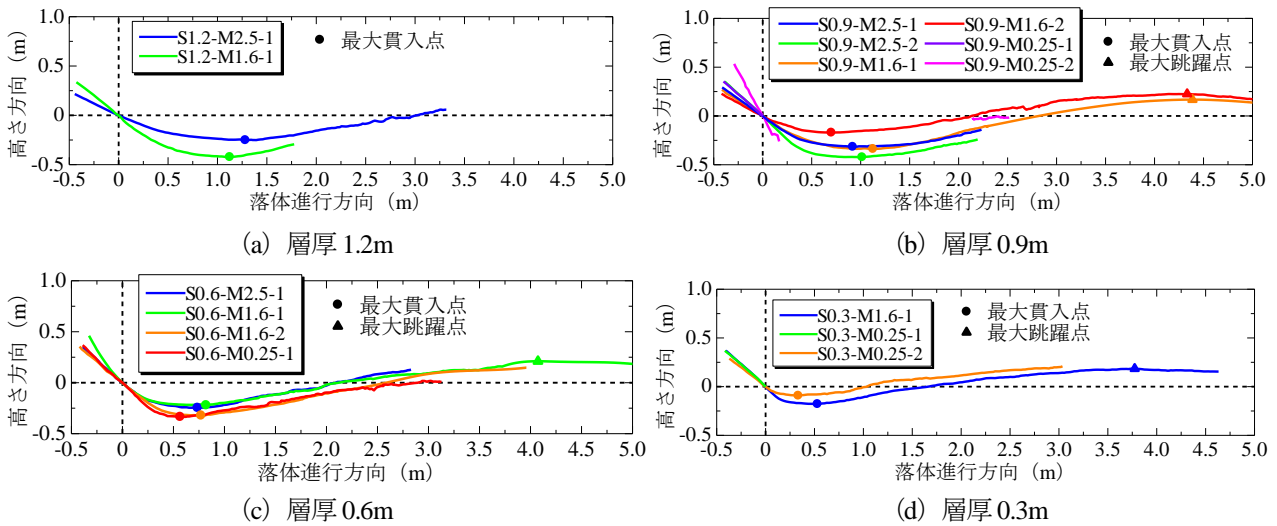


図-6 緩衝層衝突時の落体重心の軌跡

## (2) 緩衝層衝突時のエネルギー減衰率

表-4 に緩衝層衝突時の落体のエネルギー及びエネルギー減衰率を示す。全運動エネルギー $E$  は線速度エネルギー $E_v$ と回転エネルギー $E_r$ の和である。エネルギー減衰率は衝突前後の落体エネルギーの比であり、式(1)より算出した。衝突後の各運動エネルギーは鉛直速度最大時刻での値とした。

$$\text{エネルギー減衰率(\%)} = \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $E_1$ : 緩衝層衝突直前の運動エネルギー (kJ)

$E_2$ : 鉛直速度最大時刻での運動エネルギー (kJ)

S0.9-M0.25-1 (No.3) と S0.3-M0.25-1 (No.13) は緩衝層の外枠に設置していた大型土のうに衝突したため、衝突後のデータはなしとした。また、S0.9-M0.25-2 (No.4) は緩衝層衝突後、砂の飛散により落体が完全に隠れたため、衝突後のデータは参考値として扱った。

図-7 に層厚比と各エネルギー減衰率の関係を示す。層厚比とは緩衝層厚を落体径で除した無次元量であり、層厚比が大きいほど落体径に対して緩衝層厚が大きいことを意味する。図には S0.9-M0.25-2 (No.4) を除いたケースによる近似直線を破線で示し、近似式及び相関係数  $r$  を表記している。図より、層厚比と線速度エネルギー減衰率の相関係数は  $r = 0.912$ 、全運動エネルギーの相関係数は  $r = 0.880$  であり、層厚比が大きくなるほど線速度エネルギー減衰率及び全運動エネルギー減衰率が大きくなる傾向が強く見られた。ここで、図-8 に層厚比と貫入率の関係を示す。貫入率とは最大貫入量を落体径で除した無次元量であり、貫入率が大きいほど落体径に対する最大貫入量が大きいことを意味する。図より、層厚比と貫入率の相関係数は  $r = 0.845$  であり、層厚比が大きくなるほど貫入率が大きくなる傾向が読み取れる。また、図-9 に S1.2-M1.6-1 (No.1) と S0.3-M1.6-1 (No.15) 実験後の衝突痕形状を示す。図には衝突痕の外縁を黄色線に

表-4 緩衝層衝突時の落体のエネルギー減衰率

No.	ケース名	層厚比	貫入率	緩衝層衝突直前エネルギー (kJ)			線速度エネルギー減衰率 (%)	回転エネルギー減衰率 (%)	全運動エネルギー減衰率 (%)
				線速度エネルギー $E_v$	回転エネルギー $E_r$	全運動エネルギー $E$			
1	S1.2-M1.6-1	1.25	0.46	267.75	44.01	311.75	79.1	68.8	77.6
2	S1.2-M2.5-1	1.07	0.35	355.15	61.40	416.55	73.7	42.8	69.1
3	S0.9-M0.25-1	1.76	-	39.43	4.89	44.32	-	-	-
4*	S0.9-M0.25-2	1.76	0.59	44.19	7.52	51.71	98.6	85.9	96.7
5	S0.9-M1.6-1	0.94	0.27	236.49	28.37	264.87	73.4	50.0	70.9
6	S0.9-M1.6-2	0.94	0.29	196.74	32.87	229.62	66.3	43.4	63.0
7	S0.9-M2.5-1	0.80	0.29	371.29	57.83	429.11	64.8	53.6	63.3
8	S0.9-M2.5-2	0.80	0.33	407.05	59.57	466.62	67.9	67.0	67.8
9	S0.6-M0.25-1	1.18	0.37	42.14	7.26	49.40	75.1	46.9	71.0
10	S0.6-M1.6-1	0.63	0.29	263.70	29.03	292.73	62.7	44.3	60.8
11	S0.6-M1.6-2	0.63	0.24	275.31	50.36	325.66	56.1	64.0	57.3
12	S0.6-M2.5-1	0.54	0.29	418.49	62.31	480.81	65.2	48.5	63.1
13	S0.3-M0.25-1	0.59	-	46.10	7.06	53.16	-	-	-
14	S0.3-M0.25-2	0.59	0.20	29.62	6.68	36.30	58.8	39.0	55.2
15	S0.3-M1.6-1	0.31	0.21	271.64	51.87	323.51	56.1	55.7	56.0

\*S0.9-M0.25-2 (No.4) は衝突後に落体が緩衝層に完全に隠れたため参考値として扱う

て示している。層厚比が 1.25 である S1.2-M1.6-1 (No.1) の衝突痕の方が、層厚比が 0.31 である S0.3-M1.6-1 (No.15) の衝突痕よりも広範囲にわたり変形していることがわかる。以上のことから、層厚比が大きくなるほど、貫入率及び衝突痕の影響範囲が大きくなり、落体が緩衝層に接している領域が大きくなることで落体に対して摩擦力が及ぼす仕事が大きくなると考えられる。その結果、層厚比が大きくなるほど線速度エネルギー及び全運動エネルギー減衰率が大きくなると推察される。ここで図-7 より層厚比と回転エネルギー減衰率の相関係数は  $r = 0.094$  であり、線速度エネルギー減衰率及び全運動エネルギー減衰率と比較して相関がみられない結果となった。この要因として、層厚が大きくなるほど摩擦が大きくなることでエネルギーは減少する一方で、回転運動は摩擦により生じるため、回転エネルギーが減少しにくくなったことなどが考えられるが、詳細については今後の検討課題である。

## (3) 感圧シートの反応結果

図-10 に各実験ケースの感圧シートへの影響の有無、図-11 に実験終了後の感圧シートの様子を示す。感圧シ

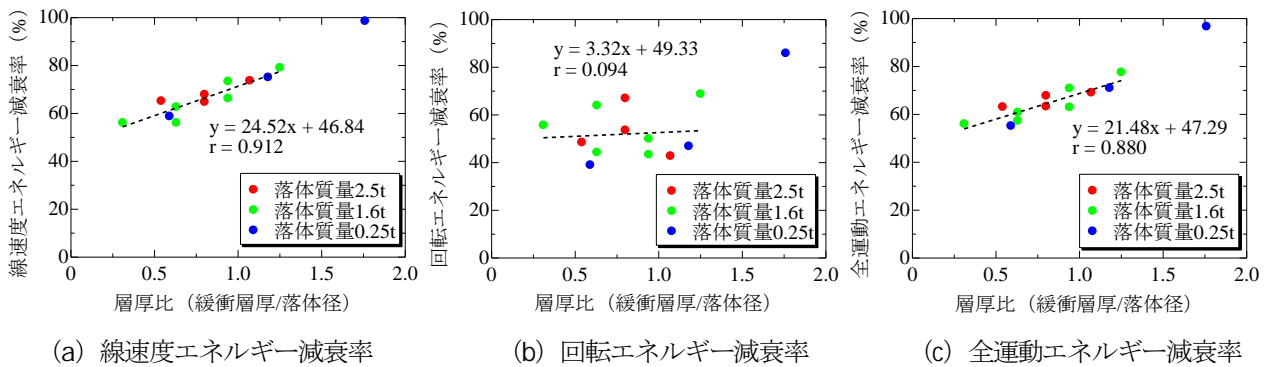


図-7 層厚比とエネルギー減衰率の関係

ートを回収したのは全実験ケース終了後のため、全ての落体衝突による影響が反映された状態となっている。緩衝層中央付近に設置した感圧シート No.6~No.8 については斜面法尻側の破損が激しく、シートの一部が欠けた状態となっている。加えて、斜面からの湧水によりシートの薬品が流れ落ちている箇所があり、圧力を算出できなかった。そのため、感圧シートの破損状況及び目立って発色している箇所を目視で確認し反応の有無を判断した。図-11には各実験ケースにおける衝突痕の外縁を示している。ここで、図-10より、緩衝層厚 0.9m のケースを見ると、緩衝層衝突時の落体全運動エネルギーが 236kJ の S0.9-M1.6-1 (No.5) ではシートの発色がないが同エネルギーが 371kJ の S0.9-M2.5-1 (No.7) では発色が確認された。このことから層厚 0.9m の場合、落体の衝突エネルギーが 370kJ より大きいと基礎地盤への影響があり、240kJ より小さい場合は影響がないと推察される。また、緩衝層衝突時のエネルギーがおおよそ等しい S1.2-M1.6-1 (No.1) と S0.6-M1.6-1 (No.10) を比較すると、前者はシートの発色がないが、後者は発色がある結果となった。このことから、緩衝層衝突時のエネルギーが大きく、緩衝層厚が小さいほど基礎地盤への影響が生じやすいことが示された。

### 3. 二次元 DEM 解析

本章では二次元 DEM を用いた緩衝層への落体衝突実験の再現解析を実施した。ここでは緩衝層厚 0.9m, 落体質量 1.6t の 2 ケース (S0.9-M1.6-1 (No.5), S0.9-M1.6-2 (No.6)) の実験時の緩衝層衝突時の並進速度、角速度、入射角を初期条件として、緩衝層衝突後の落体挙動を解析し、実験結果との比較を行った。

#### 3.1 解析条件

本再現解析には実務設計への採用を念頭に、関連研究の成果などを考慮し、二次元 DEM 解析を用いた。図-12に解析概要図、表-5に解析パラメーター一覧を示す。緩衝層の長さは実験同様 5m であり、奥行きは単位奥行

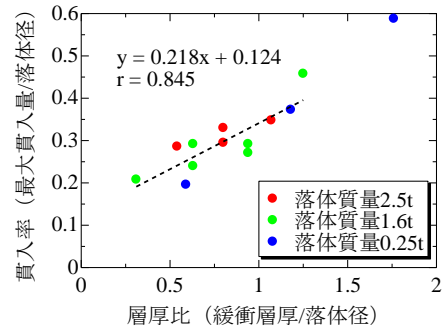


図-8 層厚比と貫入率の関係

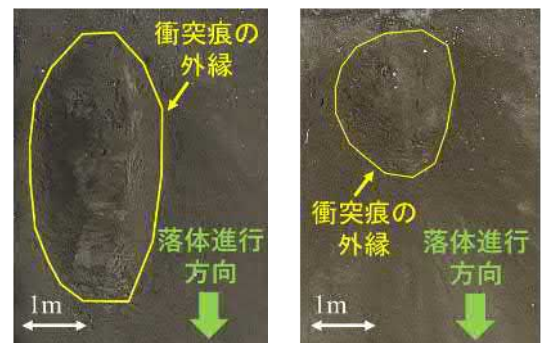


図-9 衝突痕形状

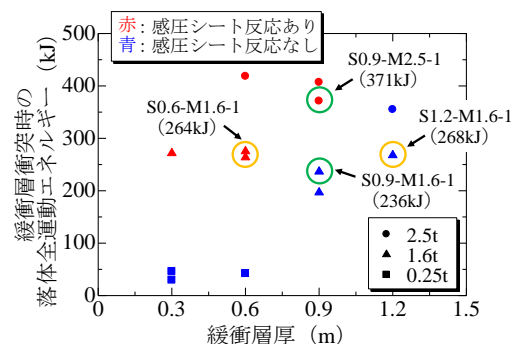
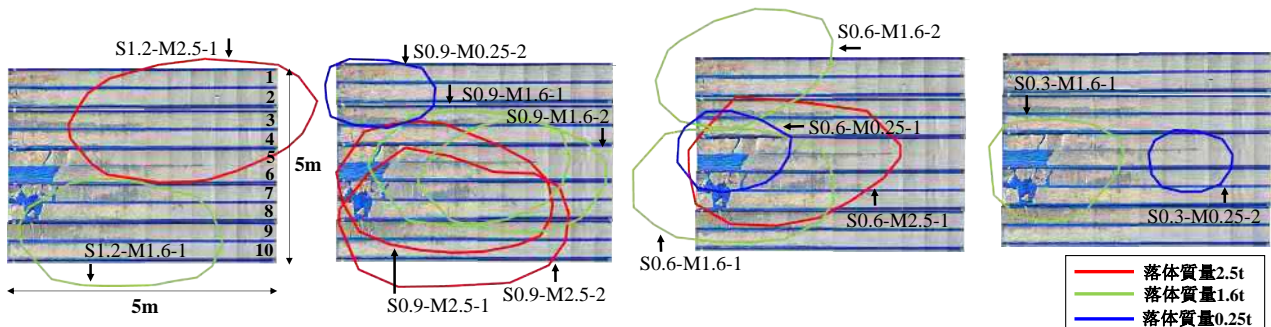


図-10 感圧シートの反応の有無の関係

きでの計算とした。粒子径、ばね定数、減衰定数などの各種パラメータは既往の研究<sup>5),6)</sup>を参考に設定した。また緩衝層の側面及び底面は、実験と同様の条件になるように固定端の境界条件とした。



(a) 緩衝層厚 1.2m (b) 緩衝層厚 0.9m (c) 緩衝層厚 0.6m (d) 緩衝層厚 0.3m

図-11 感圧シートの状態と衝突痕範囲

### 3.2 解析結果及び実験結果との比較による考察

#### (1) 落体重心の軌跡図の比較

図-13に解析結果(実線)と実験結果(破線)の落体重心の軌跡図を示す。落体の緩衝層への衝突点を原点としており最大貫入点をプロットにて示す。また、緩衝層から脱出した地点での角度を記載している。図より、再現解析では実験結果と比較して、最大貫入量及び落体が緩衝層から脱出する地点の落体進行方向座標が小さくなっている。つまり、再現解析の方が実験結果より落体が緩衝層内を進む距離が小さくなっている。この要因として、実験では緩衝層の奥行き方向に5mの幅があり、緩衝層奥行き方向にも土粒子が飛散できるのに対し、再現解析では奥行きが単位奥行きであるため、緩衝層奥行き方向への土砂の変形が拘束されており、奥行き方向へ土粒子が飛散しないことが挙げられる。また緩衝層から脱出した地点での角度に着目すると、解析結果と実験結果の差は $\pm 4^\circ$ となっている。このことから落石挙動は解析次元の影響が大きく、更なる解析精度の向上には三次元DEMを取り入れた上での検討が必要だと考えられる。

#### (2) 落体エネルギーの時刻歴波形の比較

図-14に解析結果(実線)と実験結果(破線)の落体の全運動エネルギーの時刻歴波形を示す。緩衝層への衝突時刻を0msとし、最大貫入時刻をプロットで示す。図より、解析結果における全運動エネルギーの推移を見ると、衝突直後に急激に減衰し、その後の減衰はなだらかになっており、実験結果の推移を概ね再現できている。また、最大貫入時刻に着目すると解析結果の方が実験結果よりも早い時刻に最大貫入に達していることがわかる。これより、図-13に示した軌跡図において解析結果が実験結果よりも貫入量が少なくなる要因として最大貫入に達する時刻が早いことが挙げられる。ここで、貫入前後でのエネルギー減衰性状を評価するために、図-15に最大貫入前後でのエネルギー減衰率の時刻歴データを示す。貫入によるエネルギー減衰性状とその後のエネルギー減衰性状の違いを評価するために、最大貫入時刻を0msとしている。すなわち、0ms以前が緩衝層への貫入による

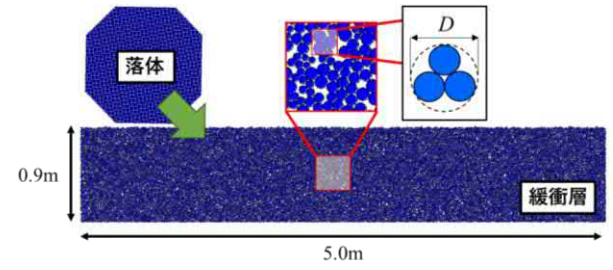


図-12 解析概要図

表-5 解析パラメータ一覧

パラメータ	記号 (単位)	基本設計値
粒子直径	$D$ (m)	
	最大粒子径 $D_{max}$	0.01275
	最小粒子径 $D_{min}$	0.006375
	平均粒径 $D_{50}$	0.0095625
粒子の密度	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2650
法線方向ばね定数	$k_n$ (N/m)	$2.0 \times 10^7$
接線方向ばね定数	$k_s$ (N/m)	$5.0 \times 10^6$
粒子間摩擦角	$\Phi_\mu$ (deg.)	25
減衰定数	$h$	1.0
ボンド直径	$D_b$ (m)	0.006375
間隙比	—	0.298

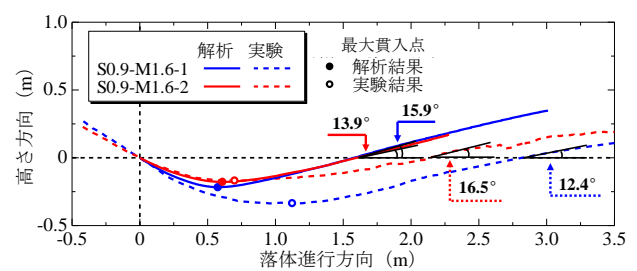


図-13 落体重心の軌跡図の比較

エネルギー減衰を、0ms以降が貫入終了後のエネルギー減衰を表している。図より、解析結果は実験結果と同様に、緩衝層への貫入によるエネルギー減衰率の増加勾配が貫入後のエネルギー減衰率の増加勾配よりも大きくなっている。また、最大貫入時のエネルギー減衰率や貫入後のエネルギー減衰率も実験結果と概ね同じ値となって

いる。このことから、本解析により緩衝層衝突による落体エネルギーの時刻歴波形性状及びエネルギー減衰率については概ね再現可能であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究ではポケット部に砂による緩衝層を設置した実規模実験より敷砂緩衝層衝突時の落体挙動、落体エネルギー吸収性能の検討を実施した。また、二次元 DEM を用いた再現解析を実施し、実験結果との比較検討を行った。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 緩衝層厚が大きいほど、最大貫入量及び地表面に飛び出すまでの落体の進行方向距離が大きくなり、落体が緩衝層に貫入する範囲が大きくなる傾向が見られた。
- 2) 本実験結果より、層厚比が大きくなるほど線速度エネルギー減衰率及び全運動エネルギー減衰率が大きくなる傾向が見られた。これは層厚比が大きくなるほど、貫入率及び衝突痕の影響範囲が大きくなり、落体が緩衝層に接している領域が大きくなることで落体に対して摩擦力が及ぼす仕事が大きくなる傾向が要因と考えられる。
- 3) 感圧シートの反応結果より、緩衝層衝突時の落体エネルギーが大きく、緩衝層厚が小さいほど基礎地盤への影響が生じやすいことが示された。
- 4) 二次元 DEM を用いた実験の再現解析から、落体重心の軌跡に関しては最大貫入量及び地表面に飛び出す地点での進行方向距離が小さい点で、実験結果との差が見られた。要因として奥行き方向への土粒子の飛散が制限されていること、及び最大貫入に達する時刻が実験より早いことが挙げられた。一方で、落体エネルギーの時刻歴波形やエネルギー減衰率については概ね再現可能であることが示された。
- 5) 落石挙動の再現解析では解析次元の影響が大きいため、解析精度の向上には三次元 DEM を取り入れた上での検討が必要だと考えられる。

今後は緩衝層を設置したポケット部と土堤を組み合わせ条件で実験を行い、落石防護土堤全体での落石捕捉性能の検討を行う予定である。加えて、三次元 DEM を取り入れた検討を進め、解析精度の向上を目指す。

#### 謝辞

本研究に用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)20H02241 の助成を受けたものである。ここに記して感謝の意を表す。

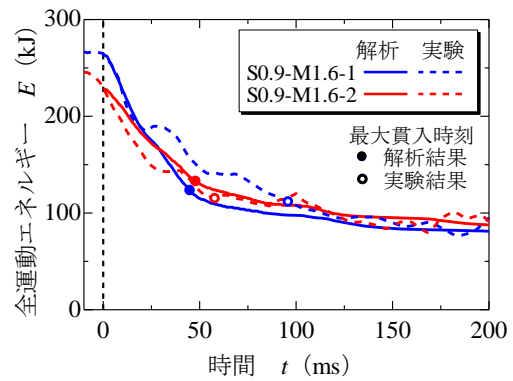


図-14 全運動エネルギーの時刻歴波形の比較

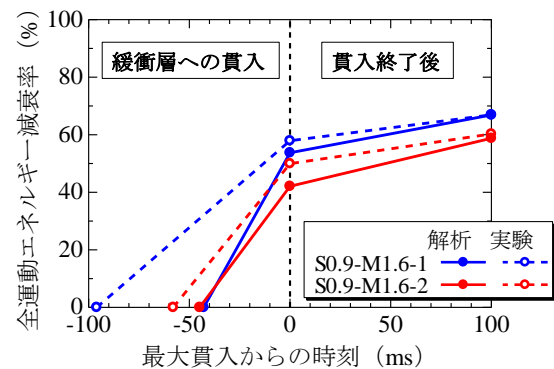


図-15 最大貫入時刻前後でのエネルギー減衰率

#### 参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, pp.243-246, 2017.
- 2) 杉山直優, 前田健一, 鈴木健太郎, 今野久志, 峯祐貴, 磯合凌弥: 落石捕捉性能把握に向けた実規模落石防護土堤の落体衝突実験, 構造工学論文集, Vol. 67A, pp. 864-877, 2021.
- 3) European Organization for Technical Approvals (EOTA) : ETAG27, GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTIONKITS, p.34, 2008.
- 4) 奥村勇太, 前田健一, 内藤直人, 栗橋祐介, 川瀬良司, 今野久志: 伝達衝撃応力測定のための感圧シートの利用, 平成 27 年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.74, 2015.
- 5) 田中敬大, 前田健一, 堀耕輔, 牛渡裕二, 川瀬良司, 鈴木健太郎: 二次元個別要素法を用いた落石防護土堤の衝撃緩衝性能に関する数値解析, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.819-832, 2018.
- 6) 羽柴寛文, 前田健一, 内藤直人, 山口悟, 牛渡裕二, 鈴木健太郎, 川瀬良司: 落石特性の異なる水平堆積層内の衝撃力伝達挙動に関する二次元個別要素法解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.68, No.2, pp.443-454, 2012.