

落石による作用外力の評価技術
および土堤等の緩衝効果に関する研究

共同研究報告書

令和5年3月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人名古屋工業大学

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て発行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

落石による作用外力の評価技術 および土堤等の緩衝効果に関する研究 共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ 寒地構造チーム

上席研究員	安中 新太郎 ^{※1}
総括主任研究員	今野 久志 ^{※2}
主任研究員	中村 拓郎
研究員	山澤 文雄
研究員	寺澤 貴裕
研究員	内田 侑甫 ^{※3}
元上席研究員	西 弘明 ^{※4}
元上席研究員	葛西 聡 ^{※5}
元研究員	荒木 恒也 ^{※6}
元研究員	守田 稷人 ^{※7}

国立大学法人名古屋工業大学

教授 前田 健一

※ 1 : 現 寒地基礎技術研究グループ

※ 2 : 退職

※ 3 : 現 耐寒材料チーム

※ 4 : 現 研究調整監

※ 5 : 退職

※ 6 : 現 国土交通省北海道開発局 函館開発建設部 工務課

※ 7 : 現 国土交通省北海道開発局 留萌開発建設部 羽幌道路事務所

要旨

落石防護施設のひとつであるロックシェットの頂版上あるいは落石防護擁壁背面のポケット部には、落石による衝撃力を緩和するために土質系材料の緩衝材が設置されている。また、落石対策工のひとつに落石防護土堤・溝があるが、これらによる対策は、緩衝効果に関する評価手法が確立されていないのが現状である。本研究では、土質系緩衝材の落石による外力評価技術および落石防護土堤や溝の緩衝効果の評価技術の提案を目的に、土質系緩衝材への落石による外力評価技術に関する実験的検討と落石防護土堤および溝の緩衝効果の評価技術に関する実験的および数値解析的検討を行った。落石防護土堤および溝に対しては、落石防護土堤・溝の設計の現状を整理し、小型モデルによる落石防護土堤の基本性能検証、実斜面を用いた実規模実験による落石防護土堤・溝の性能検証を行った。

キーワード：落石防護施設、落石防護土堤・溝、衝撃力、緩衝効果、個別要素法

目次

1. はじめに	1
1. 1 研究背景	1
1. 2 研究目的と検討項目	1
1. 3 研究の実施期間と体制	2
(1) 研究の実施期間	2
(2) 実施体制と役割分担	2
2. 土質系緩衝材への落石による外力評価に関する検討	3
2. 1 実験概要	3
(1) 模型実験装置概要	3
(2) 測定項目	4
(3) 実験ケース	4
2. 2 実験結果	5
(1) 最大落体衝撃力に影響を及ぼす要因に関する検討	5
(2) 衝撃力波形の立ち上がりを与える内部摩擦角の影響	6
(3) 衝撃力波形の継続時間を与える力積の影響	7
2.3 衝撃力波形の2波目に影響を及ぼす原因に関する検討	8
(1) 2波目の発生条件を与える反射波と貫入速度の影響	8
(2) 2波目の発生時刻を与える応力伝搬速度の影響	8
2. 4 第2章のまとめ	9
2章の参考文献	9
3. 落石防護土堤および溝の設計の現状	10
3章の参考文献	12
4. 小型模型による落石防護土堤の基本性能検証	13
4. 1 実験概要	13
(1) 実験ケース	13
(2) 試験体概要	14
(3) 実験方法および測定項目	14
(4) 試験体構築方法および材料試験結果	15

4. 2	実験結果	16
(1)	静的載荷実験	16
(2)	重錘衝突実験	23
4. 3	解析概要	49
(1)	解析ケース	49
(2)	解析モデル	50
(3)	解析パラメータ	52
4. 4	解析結果	56
(1)	静的載荷実験の再現解析	56
(2)	衝撃実験の再現解析	64
4. 5	第4章のまとめ	83
	4章の参考文献	83
5.	実斜面を用いた実規模実験による性能検証	84
5. 1	実験概要	84
(1)	実験目的	84
(2)	試験体概要	86
(3)	土堤材料	88
5. 2	ポケット実験	89
(1)	実験概要	89
(2)	鉛直変位	90
(3)	鉛直速度	91
(4)	エネルギー	92
(5)	衝撃力	93
(6)	反発係数に関する検討	94
(7)	ラーメの定数に関する検討	95
(8)	ポケット実験のまとめ	96
5. 3	土堤実験	97
(1)	実験概要	97
(2)	落体軌跡	98
(3)	落体速度	100
(4)	落体エネルギー	102
(5)	落体角速度	104
(6)	落体衝撃力	106
(7)	土堤実験のまとめ	107

5. 4	土砂系緩衝材の数値解析.....	108
(1)	解析概要.....	108
(2)	解析条件.....	110
(3)	離散化関.....	111
(4)	落体軌跡.....	117
(5)	落体速度.....	118
(6)	落体角速度.....	120
(7)	落体エネルギー.....	121
(8)	落体衝撃力.....	122
(9)	再現解析のまとめ.....	123
5 章	の参考文献.....	123
6.	おわりに.....	124

1. はじめに

1. 1 研究背景

落石防護施設のひとつであるロックシェッドの頂版上あるいは落石防護擁壁背面のポケット部には、落石による衝撃力を緩和するために土質系材料の緩衝材が設置されている。同種構造物の補修・補強においては、補強量を決めるために落石による構造物への作用外力を適切に評価することが必要である。

また、落石対策工のひとつに落石防護土堤・溝があるが、それらは地形・地質等の現場条件を利用して、落石エネルギーの吸収・消散を図ろうとするものであり、現場条件によっては施工が容易であり、経済的な対策となる場合もある。しかしながら、これらによる対策は、緩衝効果に関する評価手法が確立されていないのが現状である。

1. 2 研究目的と検討項目

本研究では、土質系緩衝材の落石による外力評価技術の提案および落石防護土堤や溝の緩衝効果の評価技術の提案を目的に、以下の検討を行った。

平成 28 年度

土質系緩衝材への落石による外力評価技術に関する検討として、地盤条件が変化した場合における落石衝撃力を把握するため、相対密度、土層幅、地盤材料を変えて小型模型実験を実施し、それぞれの落体衝撃力波形についての考察を行った。

平成 29 年度・平成 30 年度・令和元年度

落石防護土堤・溝の設計の現状を整理するとともに、落石防護土堤の基本性能を検証することを目的に、小型模型を用いた静的載荷実験と重錘衝突実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて個別要素法による再現解析を実施した。

令和 2 年度・令和 3 年度

落石防護土堤・溝の基本性能を検証することを目的に、実斜面を用いた実規模実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて個別要素法による再現解析を実施した。

1. 3 研究の実施期間と体制

(1) 研究の実施期間

自 平成28年7月1日 至 令和4年3月31日

(2) 実施体制と役割分担

研究項目	研究細目		研究の分担		備考
			寒地土木 研究所	名古屋工業 大学	
1. 土質系緩衝材の落石による外力評価技術に関する研究	①土質系緩衝材の落石による外力評価に関する検討	実験的検討	◎	○	
		解析的検討	○	◎	
2. 落石防護土堤および溝の緩衝効果の評価技術に関する研究	①落石防護土堤および溝の実験・数値解析等事例収集		◎	○	
	②落石防護土堤および溝の緩衝効果に関する解析的検討		○	◎	
とりまとめ			◎	○	

※◎主担当、○副担当

2. 土質系緩衝材への落石による外力評価に関する検討

近年、土木構造物の性能設計への移行が急務とされている。落石対策工の一つであるロックシェッドもその例外ではない。ロックシェッドの頂版上には、落石が衝突した場合の構造物の損傷抑制を目的として高緩衝性能を有する敷砂などの緩衝材が設置される。ロックシェッドの性能設計を考える上では、緩衝材の設計合理化も必要不可欠である。

落石対策便覧¹⁾によると、敷砂緩衝材の設置厚は0.9m以上もしくは落石直径を標準とするとあるが、緩衝材の相対密度や緩衝層幅といった条件に関する詳細な指標は明記されていない。また、一般に地盤材料は相対密度が変化すると強度や変形特性が大きく異なることが知られている。よって、ロックシェッドを合理的に設計するためには相対密度や緩衝層幅等の条件が変化した場合における、落石衝撃力を把握する必要がある。

本章では、相対密度、緩衝層幅、材料を変えた小型模型実験を実施し、それぞれの落体衝撃力波形についての考察を行う。

2. 1 実験概要

(1) 模型実験装置概要

本実験では、図-2.1に示す直径100mmもしくは400mm、高さがそれぞれ200mm、250mmの鋼製円筒土層に図-2.2に示す粒度分布の試料を用いて、相対密度を変えて厚さ100mmの緩衝層を作成した。実験は、質量4kg、直径100mmの球形落体を高さ1000mmもしくは1500mmから鉛直自由落下させて実施している。

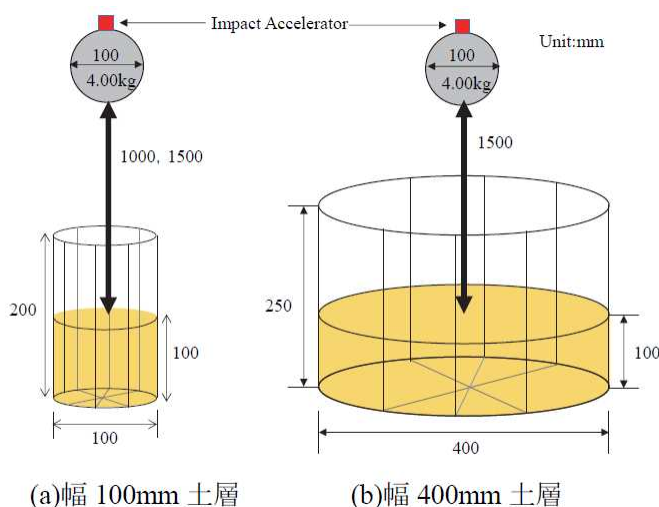


図-2.1 模型実験装置

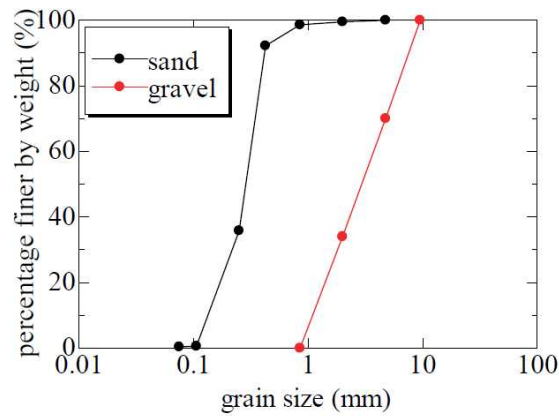


図-2.2 実験試料の粒度分布

(2) 測定項目

本実験での測定項目は、落体衝撃力と落体貫入量の2つである。落体衝撃力は、落体上部に設置した衝撃加速度計から得た測定値と落体質量の積として算出した。また落体貫入量は、落体の落下の様子を高速カメラで撮影した画像より求めた。

(3) 実験ケース

実験ケースは表-2.1に示す10通りである。まず、幅100mm土層に関して、緩衝材として砂と碎石の2種類を用いた。相対密度は15%と80%に設定した。さらに、幅400mm土層に関して、同様の試料を用いて緩衝材を作成した。相対密度は15%、50%、80%に設定した。落下高さは幅100mm土層の相対密度80%のケースのみ1000mmで、他の全てのケースは落下高さ1500mmで実験を行った。

表-2.1 実験ケース一覧

		Relative Density, D_r (%)		
		15	50	80
Soil layer Width, (mm)	100	sand or gravel		sand or gravel
	400	sand or gravel	sand or gravel	sand or gravel

2. 2 実験結果

(1) 最大落体衝撃力に影響を及ぼす要因に関する検討

① 落石対策便覧式による最大落体衝撃力の推定

実施した全 10 ケースの最大落体衝撃力を図-2.3 に示す。全ケースを統一的に比較するため、落石対策便覧に記載されている下記の推定式を用いて、落下高 1000mm で得られた最大落体衝撃力から、落下高 1500mm における最大落体衝撃力を推定した。

$$F_{\max} = P = 2.108 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha$$

ここに、 F_{\max} ：最大落体衝撃力、 m ：落体質量、 g ：重力加速度、 λ ：ラーメの定数、 H ：落下高さ、 α ：砂層厚と落体径から決定される割増し定数 ($\alpha=(D/T)^{1/2}$)、 D ：落体径、 T ：砂層厚

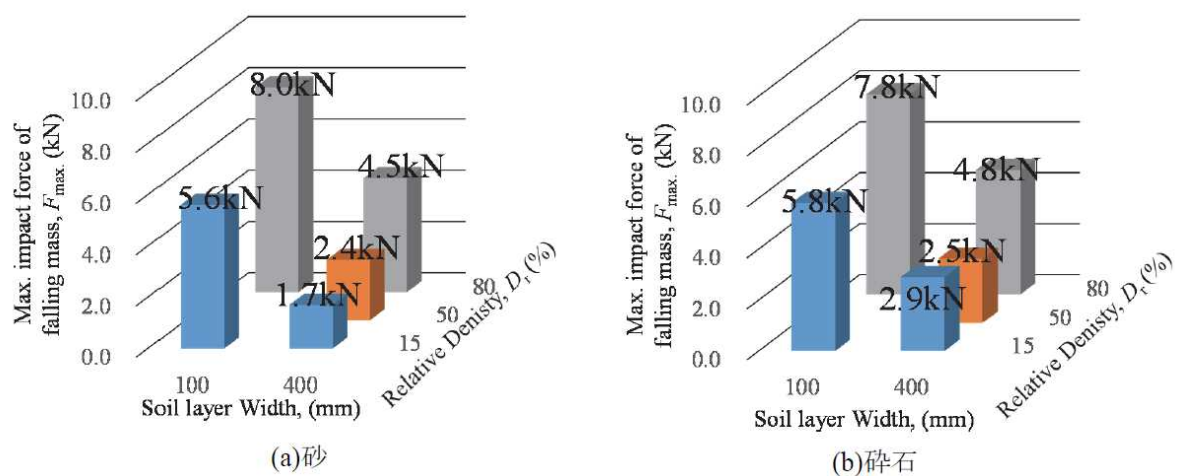


図-2.3 各種地盤条件が最大落体衝撃力に与える影響

② 最大落体衝撃力に与える砂の移動の影響

図-2.3 によると、同材料間では、相対密度が大きくなるほど、緩衝層幅が小さくなるほど最大落体衝撃力が大きくなる結果になった。緩衝層幅が小さくなるほど最大落体衝撃力が大きくなった理由としては、緩衝層幅が小さい方が落石の緩衝材衝突の際に土の側方への移動が拘束され、貫入が抑制されたためと推察される。また、緩衝層幅が小さい方がサイロ効果による影響を顕著に受けるため、幅 100mm 土層のケースの最大落体衝撃力が大きくなりやすい可能性も考えられる。

③ 最大落体衝撃力に与える内部摩擦角とサイロ効果

砂と碎石間で最大落体衝撃力を比較すると、幅 100mm 土層、幅 400mm 土層、いずれの場合においても相対密度が小さいケースでは、砂よりも碎石の方が最大落体衝撃力は大きな値を示し、相対密度が大きいケースでは砂と碎石の間で最大落体衝撃力はほぼ同じ値を示した。これは砂と碎石の内部摩擦角の違いが原因と考えられる。一般に、砂の内部摩擦角は $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 程度、碎石の内部摩擦角は $30^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 程度とされており、碎石の方が大きくなる。よって、材料の変形に対する抵抗性は、碎石の方が大きいと考えられる。相対密度が低いケースの貫入量が大きく、変形の度合いが大きいことから、砂と碎石の最大落体衝撃力の差が顕著に表れたものと考えられる。

④ 最大落体衝撃力に与える密度の影響

最大、最少密度試験の仕様が砂と碎石で異なり、それが最大落体衝撃力に影響している可能性も考えられる。現在は 2mm ふるいを通過する砂の最大最少密度試験に関しては、その方法が地盤工学会により明確に定義されており²⁾、広く知られている。しかし、碎石等の粗粒土を対象とした密度試験は、その方法が明確に定義されておらず、様々な手法が試されている。また、その手法により最大、最少密度は大きく異なることが知られている。

(2) 衝撃力波形の立ち上がりを与える内部摩擦角の影響

図-2.4 には幅 100mm 土層の各種時刻歴波形を、図-2.5 には幅 400mm 土層の各種時刻歴波形を示している。なお、幅 100mm 土層で実施したケースについては貫入量の時刻歴のデータを計測していないため、最終貫入量のみプロットで示した。落体衝撃力波形の立ち上がりに着目すると、幅 100mm 土層、幅 400mm 土層、いずれの場合においても相対密度が小さいケースでは、砂よりも碎石の方が落体衝撃力波形の立ち上がりが早く、相対密度が大きいケースでは砂と碎石の間で落体衝撃力波形の立ち上がりはほぼ同じとなった。これも、内部摩擦角の違いにより材料の変形に対する抵抗性が碎石の方が大きいためだと考えられる。また、幅 100mm 土層の相対密度 80% のケースにおいて立ち上がりに差がないのは、落体衝突による土の変形がほぼないため、内部摩擦角の差が落体衝撃力波形に現れなかったことが原因だと考えられる。

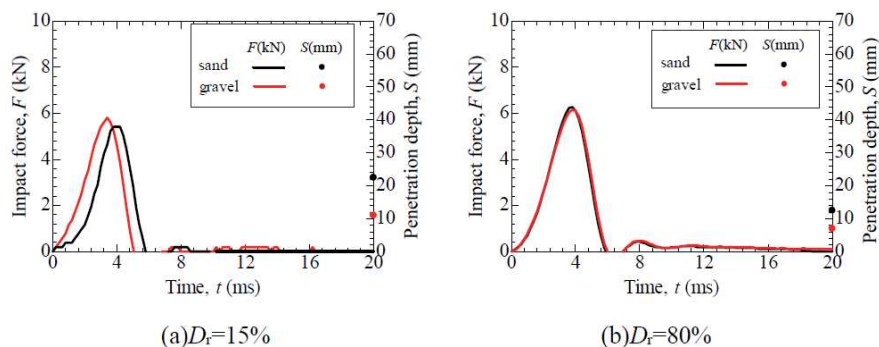


図-2.4 各種時刻歴波形 (幅 100mm 土層)

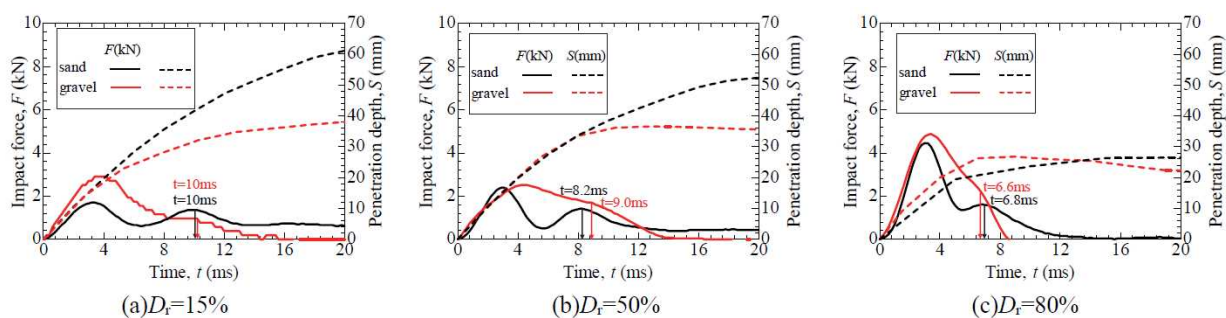


図-2.5 各種時刻歴波形（幅 400mm 土層）

（3）衝撃力波形の継続時間に与える力積の影響

図-2.5 の落体衝撃力波形の継続時間に着目して考察を行う。なお、幅 100mm 土層の相対密度 80% のケースは、落下高さが他ケースと異なるため、衝撃力波形の継続時間が過小に表れている恐れがあり、幅 100mm 土層は考察の対象外とした。まず、同じ材料で比較すると、砂、碎石とも相対密度が大きい方が落体衝撃力波形の継続時間が短いことがわかる。これは相対密度が大きい方が 1 波目で力積を多く消費してしまうためだと考えられる。また、異なる材料間で比較すると、いずれの相対密度においても、碎石の方が砂よりも継続時間が短い。図-2.6 には、土層幅 400mm、相対密度 50% における砂と碎石の 2 ケースの力積の時刻歴波形を示している。このように、途中までは消費する力積の量は同じだが、 $t=4\text{ms}$ 付近から碎石の力積消費量が大きくなる。よって、碎石の方が最終的に早く力積を消費してしまい、継続時間が短くなると考えられる。

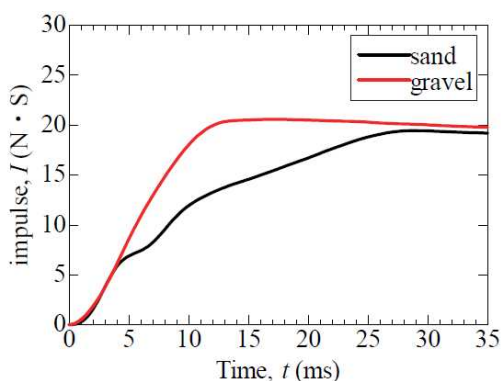


図-2.6 400mm 土層、 $D_r=50\%$ における力積の時刻歴波形

2.3 衝撃力波形の2波目に影響を及ぼす原因に関する検討

(1) 2波目の発生条件に与える反射波と貫入速度の影響

前述の図-2.4, 図-2.5の落体衝撃力波形に着目すると、幅400mm土層では相対密度の違いにかかわらず、砂は2波目が確認でき、碎石は多少上に凸の区間はあるが、砂ほどはっきりとした2波目は出ていないことがわかる。また、幅100mm土層は、いずれのケースも2波目が出ていないことがわかる。ここで、この結果を踏まえて落体衝撃力波形の2波目について考察をするにあたり、過去に2波目の発生原因である反射波の影響について考察した内藤らの解析の事例³⁾について紹介する。

内藤らは、敷砂緩衝材に重錘を鉛直落下させた実験を対象に二次元個別要素法解析を実施した。緩衝層は、幅1m、層厚0.9mの緩詰め状態とした。そして、幅1mの四角形落体を一定速度単調載荷させ、落体に作用する接触力の総和を落体衝撃力として計測した。その結果、あらゆる速度で一定速度単調載荷させても、ある貫入量までは落体衝撃力は一定値を示したが、ある貫入量を境に落体衝撃力が指数関数的に増加した。内藤らは緩衝材底面からの反射波が落体に作用し始める時刻における貫入量を境に落体衝撃力が増加することから、これは反射波の影響と考えた。

一定速度単調載荷で実施した解析では落体径と緩衝層幅が等しい条件でも反射波の影響がみられるのにもかかわらず、本研究で実施した模型実験では反射波の影響である2波目が確認されなかった。このことから、2波目の有無は、反射波が落体に到達した時刻における貫入速度の有無に依存している可能性があると言える。幅100mm土層のケースは落体が緩衝層に衝突後すぐ貫入は停止し、反射波が落体に作用するところには落体は静止状態となるため、2波目が出ないのではないかと考えられる。一方で幅400mm土層の砂のケースは2波目のピークが出る時刻(図-2.5中の黒矢印、 $Dr=15\%:t=10\text{ms}$ 、 $Dr=50\%:t=8.2\text{ms}$ 、 $Dr=80\%:t=6.8\text{ms}$)においてまだ貫入が進んでいるため、2波目が出るのではないかと考えられる。幅400mm土層の碎石のケースは上に凸の区間が現れる時刻(図-2.5中の赤矢印、 $Dr=15\%:t=10\text{ms}$ 、 $Dr=50\%:t=9.0\text{ms}$ 、 $Dr=80\%:t=6.6\text{ms}$)においてちょうど貫入が停止している。よって多少上に凸の区間が現れるものの、はっきりとした2波目は現れないものと考えられる。

(2) 2波目の発生時刻に与える応力伝搬速度の影響

前述の図-2.5上の黒矢印、赤矢印が示す時刻(それぞれ砂の衝撃力波形における2波目発生時刻、碎石の衝撃力波形における上に凸の区間の発生時刻)に着目すると、砂、碎石両方とも相対密度が大きくなるにつれ2波目もしくは上に凸区間の発生時刻が早くなっている。これは、相対密度が増加するにつれ、応力伝搬速度が増加したためと考えられる。

2. 4 第2章のまとめ

本章では、地盤条件が変化した場合における、落石衝撃力を把握するため、相対密度、土層幅、地盤材料を変えて小型模型実験を実施し、それぞれの落体衝撃力波形についての考察を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 砂と碎石間での最大落体衝撃力、衝撃力波形の立ち上がりの差は、砂と碎石の内部摩擦角の違いが原因と考えられる。
- 2) 落体衝撃力波形の継続時間は、力積の消費速度の違いによるものだと考えられる。
- 3) 落体衝撃力波形の2波目の有無は、反射波が落体に到達した時刻における貫入速度の有無に依存している可能性がある。

2章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 2) 公益社団法人 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2020.12
- 3) 内藤直人、前田健一、今野久志、牛渡裕二、鈴木健太郎、川瀬良司：応力伝播速度に着目した敷砂緩衝材の載荷速度依存性に関する DEM 解析、土木学会論文集 A2 (応用力学)、Vol.71、No.2 (応用力学論文集 Vol.18)、I_557-I_566、2015.

3. 落石防護土堤および溝の設計の現状

土質系落石防護施設は、規模の大きな落石への対策工のひとつであり、写真-3.1に示すような一般的な土質材料を使用した落石防護土堤・溝は、現場発生土が利用可能で、現場条件によっては施工も容易なことから、擁壁や防護柵等の他の対策工に比べて、経済的な対策となりうる場合もある。

本章では、落石防護土堤・溝の設計の現状を整理する。



写真-3.1 落石防護土堤・溝

道路管理のために設置される土質系落石防護施設は、日本道路協会の落石対策便覧¹⁾や道路土工指針²⁾等を参考に設計が行われ、現場適用されてきた。落石対策便覧に示される落石防護工の選定においては、エネルギーが大きく、跳躍高が小さいと予想される落石に対して、落石防護土堤が選定されることがされている。しかしながら、落石衝突時の土堤や溝のエネルギー吸収や消散のメカニズムは明らかにされていないため、落石補足性能等を具体的に照査する手法は確立されていない。近年、補強土等を活用した新工法の開発や現場適用も進められているが、一般的な土質材料による落石防護土堤・溝の諸性能が不明なことから、性能比較等も困難な状況にある。

落石対策便覧には、落石防護土堤・溝の設計の考え方として次の3つが示されている。

- ①落石を溝底面や土堤背後の平坦地または溝や土堤の法面で反復バウンドさせ、エネルギーを吸収・消散させる。
- ②落石の落下方向を土堤で転向・誘導する。
- ③補強土などを用いた急勾配の土堤により、落石の衝突による土堤自体の変形により落石エネルギーを吸収・消散させる。

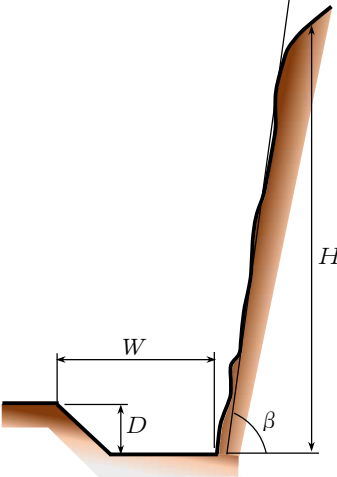
上記の①、②については、落石対策便覧の初版である昭和58年版³⁾から概ね同様の文章で表現されており、最新の平成29年版では③の補強土などを用いた防護土堤に関する記述が追加されている。また、平成12年版⁴⁾には各落石防護施設で対応可能な設計落石エネルギーが図示されており、落石防護土堤の設計落石エネルギーは300～3,000kJ程度とされていた。しかしながら、性能設計の枠組みが導

入された平成 29 年版の便覧では同図が削除されており、現在のところ、落石防護土堤が対応可能な落石エネルギーは、算定方法を含めて明示されていない状況である。

また、落石対策便覧における落石防護土堤・溝の形状の決め方は、落石の衝撃荷重に対する耐力および落石のかけ上り、飛越しに対する安全性に対して検討を行うとともに、土堤としての安定性や、必要に応じてのり面浸食等に対して検討を行う必要があるとされている。ただし、これらの具体的な照査手法は明示されておらず、平成 12 年版からは、昭和 58 年版の資料編にて落石が道路に到達する量の判定に用いられていた Ritchie⁵⁾の落石防止溝（平成 12 年版からは落石防護溝に改名）の寸法表（表-3.1）が、研究例として掲載されているのみである。なお、同表は、溝形状に対する実験結果を基に斜面勾配、斜面高、溝の幅、溝の深さが整理されたものである。また、平成 29 年版では、斜面高が高い場合等においては、落石シミュレーション等により検証することがよいとされている。

既設の落石防護土堤・溝の設計の実態を確認するために、国土交通省北海道開発局が発注した落石防護施設の設計業務の成果図書等を収集したところ、一般的な土質材料を使用した落石防護土堤・溝の設計は、前述の落石防護溝の寸法表を参考に形状が決定されている場合と、質点系の落石シミュレーションによって落石が土堤を飛び越えないことを検証する場合に大別されることを確認した。

表-3.1 落石防護溝の寸法

斜面の勾配 β	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 $76^\circ \sim 73^\circ$	5~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
	20~30	6	2.0	
1:0.5 63°	20~30	8	2.0	
	5~10	4	1.5	
	10~20	5	2.0	
1:0.75 53°	20~30	6	2.0	
	5~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
1:1.0 45°	20~	5	2.0	
	5~10	4	1.0	
	10~20	4	1.5	
	20~	5	2.0	

※ 参考文献 1、5 を参考に再描画

一方、近年、開発された補強土を用いた土質系落石防護施設については、適用可能な落石エネルギーの範囲は5,000kJ程度とされるものもあり、各メーカーから実験をもとにした具体的な設計法が提案されている。例えば、落石荷重を等価な静的荷重に置き換えて、土塊によるすべり抵抗力からすべり安全率を算出し、すべり安全率の許容値を満足するかどうかで安全性を照査する手法や、落石エネルギーおよび落石荷重に実験結果から得られた各種係数を乗じて最大変位量を算出し、許容変位量を満足するかどうかで安全性を照査する手法である。

以上のように、道路分野における土質系落石防護施設の設計においては、落石エネルギーを吸収・消散させるという設計の考え方は示されつつも、それらを具体的に照査する性能設計には至っていないことがわかる。これは、鉄道分野の落石防護土堤・溝の設計⁶⁾においても同様であった。現場発生土等の一般的な土質材料を使用した落石防護土堤・溝については、その汎用性や経済的貢献も期待されることから、早急に性能設計を確立することが望ましい。そのためには、実験等によって基本的な性能検証を行うとともに、その性能を照査する技術を確立する必要がある。

3章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針（平成21年度版）、2009.6
- 3) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、1983.7
- 4) 社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2000.6
- 5) Ritchie, A. M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No. 17, pp.13-28, 1963.
- 6) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル、pp.131-132、2019.3

4. 小型模型による落石防護土堤の基本性能検証

本章では、落石防護土堤の基本性能を検証することを目的に実施した小型模型を用いた静的載荷実験と重錘衝突実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて実施した個別要素法による再現解析の結果を示す。

4. 1 実験概要

(1) 実験ケース

実験ケース一覧を表-4.1に示す。使用材料、土堤の勾配、重錘形状を実験パラメータとし、実験における載荷方法は、静的載荷と振り子式による重錘衝突である。

表-4.1 実験ケース一覧

No.	ケース名	材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	運動量 (kg・m/s)	エネルギー (J)
1	S-S1.5-S	砂	1:1.5	球体	-	-	-	-
2	S-S1.5-P	砂	1:1.5	多面体	-	-	-	-
3	S-S1.0-S	砂	1:1.0	球体	-	-	-	-
4	C-S1.5-S	粘性土	1:1.5	球体	-	-	-	-
5	G-S1.5-S	碎石	1:1.5	球体	-	-	-	-
1, 2	S-I1.5-S-H*-R	砂	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
3	S-I1.0-S-H*	砂	1:1.0	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
4~6	S-I1.0-Sh-H*	砂	1:1.0	球体 (重)	178	0.55 1.82 6	585 1063 1931	960 3177 10474
7~8	C-I1.5-S-H*	粘性土	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
9~12	C-I1.0-Sh-H*	粘性土	1:1.0	球体 (重)	178	0.18 0.55 6 7	334 585 1931 2086	314 960 10474 12219
13, 14	G-I1.5-S-H*	碎石	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177

注) ケース名の*は落下高さ

(2) 試験体概要

図-4.1 に重錘衝突実験の概要図を示す。土堤模型の断面形状は落石対策便覧¹⁾に示される実際の高さの1/5~1/4縮尺として、土堤高さ $h=0.5\text{m}$ 、天端幅 $b=0.25\text{m}$ 、法面勾配1:1.5および1:1.0(底面幅1.75mおよび1.25m)の左右対称の台形状としている。土堤下面には厚さ0.9mの支持基層を設けている。土堤模型延長は全長9mであり、1つの実験に対して影響範囲を延長3m程度と仮定し、3m毎に荷重を作用させている。

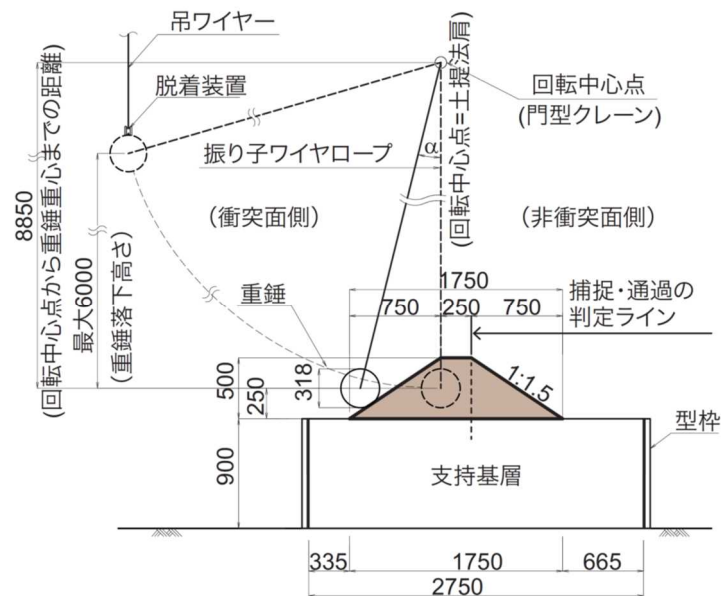


図-4.1 重錘衝突実験の概要図 (単位: mm)

(3) 実験方法および測定項目

重錘衝突実験は、重錘を振り子運動により土堤に衝突させて実施した。振り子運動の回転中心点は衝突面側の土堤模型法肩部と一致させており、重錘吊り下げ時に重錘重心高さが土堤底面から0.25mとなるように回転中心から重錘重心までの半径を8.85mとした。衝突時の重錘と回転中心点との角度は $\alpha=4$ 度程度となる。重錘は質量 $m=54\text{kg}$ および 178kg の球体形状で、表層に板厚9mmの鋼板を使用し、内部にコンクリートあるいは鉛を充填して製作した。重錘直径は0.318mで、土堤高さの3/5程度の大きさとなっている。重錘径は、便覧の土堤高さ $h=2\sim 2.5\text{m}$ に対して、1~1.5m程度の落石径を想定して設定した。各重錘の単位体積質量は多面体重錘および球体重錘でそれぞれ 3.21ton/m^3 および 10.57ton/m^3 である。また、静的載荷実験は、重錘を取り付けた構成治具を油圧ジャッキで押し出す水平載荷によって行っている。

本実験の測定項目は、高速度カメラによる重錘移動量および土堤構築時に予め配置した着色砂による実験後の土堤内部変形状況である。なお、高速度カメラのフレームレートは 1,000fps であり、重錘移動量は重錘に貼り付けた複数のターゲットの 3 次元方向それぞれの座標値を PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析により求め、得られた座標値から重錘重心の移動量を算出した。また、それら各方向の重錘移動量から、重錘の並進速度および角速度も併せて算出している。なお、重錘衝突時に飛散した土粒子が重錘のターゲットを覆うことにより追跡が乱れノイズが生じてしまったことから、各速度データは 3ms の中央値処理および 5ms の矩形移動平均処理を施しており、各データはターゲットを認識できる点までの整理としている。

(4) 試験体構築方法および材料試験結果

土堤の施工については、土堤模型本体は厚さ 0.25m 毎に、支持基層は 0.3m 毎に敷き均して振動締め機を使用して締め固めて成形している。支持基層は、土堤本体と同様の土砂材料を用いた。実験に使用した土堤材料の物性値一覧のほか、実験時における湿潤密度、含水比、簡易動的コーン貫入試験および衝撃加速度試験の各結果を表-4.2 に示す。

表-4.2 材料試験結果一覧

項目	単位	砂	粘性土	碎石
地盤材料の分類名	-	砂	シルト	礫
分類記号	-	S	ML	G
土粒子の密度	g/cm^3	2.58	2.66	2.67
60 % 粒径 D_{60}	mm	0.37	0.03	13.05
均等係数 U_c	-	2.15	6.21	36.25
最大乾燥密度 ρ_{dmax}	g/cm^3	1.59	1.37	2.18
最適含水比 w_{opt}	%	20.8	29.4	5.8
平均湿潤密度	g/cm^3	1.56	1.87	1.82
平均含水比	%	10.01	20.44	4.69
コーン試験 ²⁾ N_d	回	0 ~ 7	1 ~ 5	5 ~ 22
衝撃加速度 ³⁾	G	18.4 ~ 22.8	16.8 ~ 21.5	27.9 ~ 50.8

4. 2 実験結果

(1) 静的載荷実験

① 実験ケース一覧

静的載荷実験の実験ケースと実験結果の概要を表-4.3に示す。

表-4.3 静的載荷実験の実験ケースと実験結果の概要

ケース名	実施年度	材料	勾配	重錘形状	実験結果
S-S1.5-S	R1	砂	1:1.5	球体	押抜き
S-S1.5-P	R1	砂	1:1.5	多面体	押抜き (土塊小)
S-S1.0-S	R1	砂	1:1.0	球体	押抜き (土塊大)
C-S1.5-S	R1	粘性土	1:1.5	球体	圧縮変形主体
G-S1.5-S	R1	碎石	1:1.5	球体	押抜き (天端のみ)

② 衝突面と非衝突面の状況

載荷終了時における載荷面および非載荷面の正面写真を図-4.2に示す。図中の白色の実線はクラックを、破線は非載荷面から見た押抜き土塊を示している。いずれのケースでも重錘が土堤に貫入し、載荷面および土堤天端にひび割れが発生していた。また、C-S1.5-S以外のケースではその後に非載荷面に押抜き破壊が発生していた。

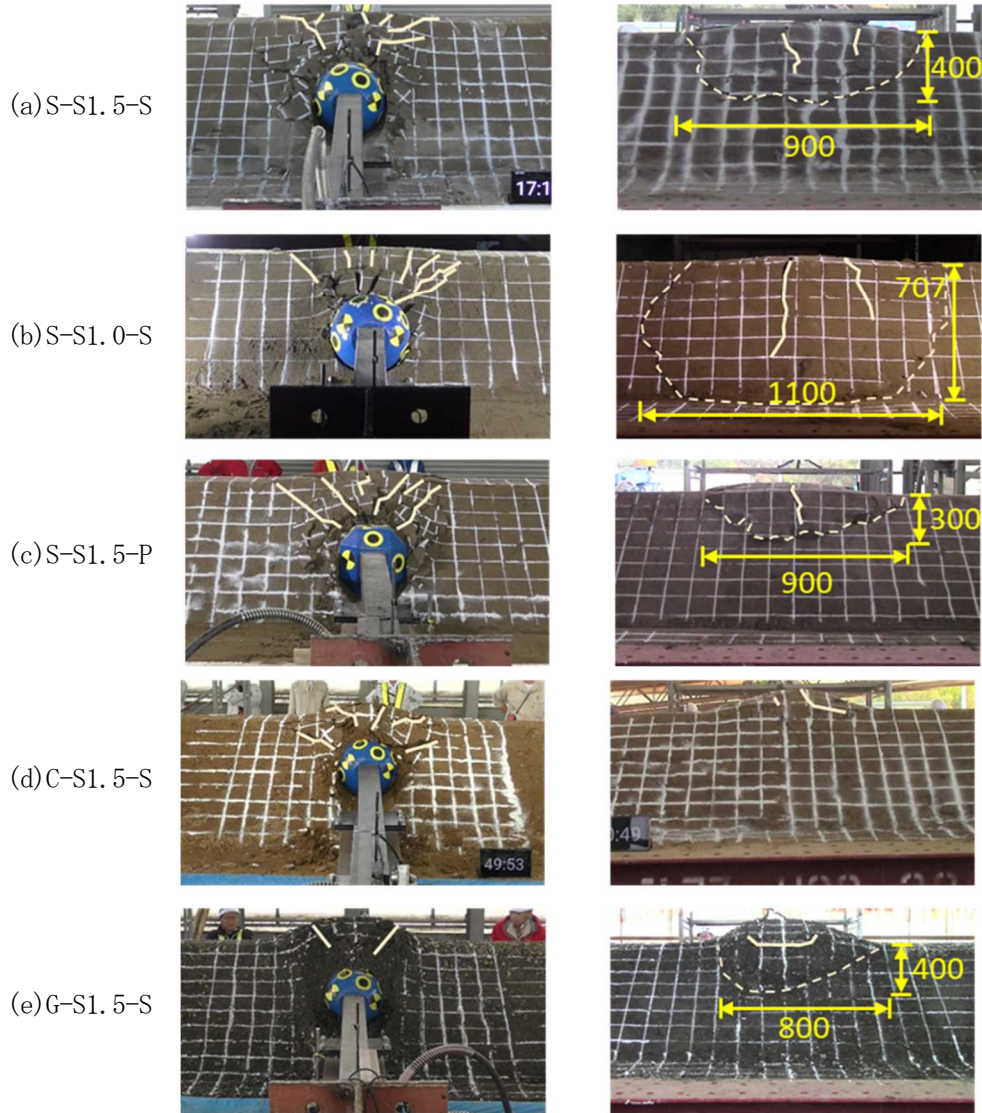
砂を使用した3ケースについて押抜き破壊の範囲を比較すると、S-S1.0-Sは他の2ケースよりも押抜き破壊の範囲が大きくなっている。この原因として、S-S1.0-Sでは載荷を受ける法面が急勾配であるため、緩勾配となっている他の2ケースよりも載荷時の法面に対して垂直な成分の分力が大きくなること、底面幅が小さいことによるものと考えられる。

粘性土を用いたC-S1.5-Sでは、砂を使用したケースと同様に重錘接触位置を中心に亀裂や盛り上がりが見られたが、比較的幅の広い亀裂が2本発生し、砂を使用したケースに比べて亀裂が少ない結果となった。また、天端の盛り上がりは砂を使用したケースよりも大きくなる結果となった。そして、非載荷面では押抜き破壊が見られなかった。これは、粘性土の粘着力が砂と比較して大きいため、押抜き破壊に対する抵抗性も大きくなるためと考えられる。

碎石を用いたG-S1.5-Sでは、他の4ケースと傾向が異なり、亀裂は幅が大きいものしか見られなかった。また、土堤天端の盛り上がりは他のケースよりも大きく、非載荷面では土堤延長800mm、法長400mmの押抜き破壊が見られた。

載荷面

非載荷面



(単位 : mm)

図-4.2 載荷面および非載荷面の正面写真

③ 载荷断面の破壊性状

载荷断面の写真および変形図を図-4.3に示す。なお、写真には着色砂のせん断から予想した想定すべり線を記入しているが、S-S1.0-S、G-S1.5-Sでは、一部の領域は土堤の開削時に崩れてしまい計測を行うことができなかった。

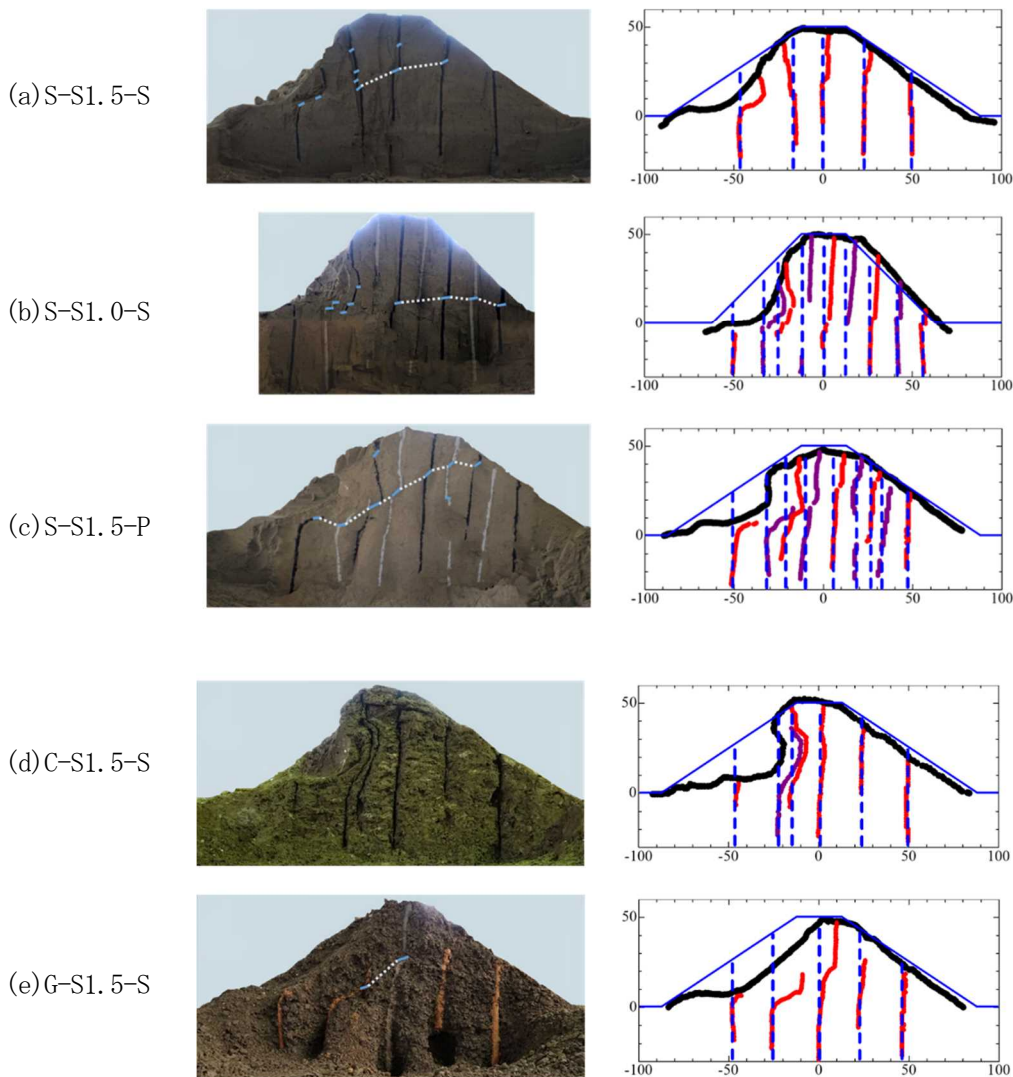


図-4.3 载荷断面の写真および変形図

S-S1.5-Sでは重錘接触箇所付近の着色砂がお椀型に変形しており、着色砂のせん断箇所を結んだ想定滑り線は重錘から非载荷面の中腹へ抜ける位置に発生しているものと考えられる。S-S1.0-Sでは、土堤内の着色砂の位置が支持基層内の着色砂よりも非载荷面側にずれていた。このことから、着色砂による計測箇所以外でせん断もしくは曲げが発生していたと考えられる。また、着色砂のせん断箇所を結んだ想定滑り線は重錘から非载荷面の法尻に抜けるように発生していると考えられる。S-S1.5-Pでは、前述の2ケースで見られたお椀型の変形が見られなかった。着色砂のせん断箇所を結んだ想定滑り線は重

錘から非載荷面の上部に向かって抜けていると考えられる。

粘性土を用いた C-S1.5-S では、砂を使用したケースで見られたせん断箇所が一切見られなかった。しかし、S-S1.5-S や S-S1.0-S と比較してより広範囲でお椀型に変形している様子が見られた。砕石を使用した G-S1.5-S では、地表面付近で非載荷面側に曲がっていた。粘性土を使用した場合、圧縮変形は起こるが砂を使用した場合と比較して載荷位置付近でのせん断が起こりにくくなり、載荷の影響が生じる範囲が狭くなると考えられる。砕石を使用した場合、載荷の影響が生じる範囲については砂を使用した場合と大きな差はないと考えられる。

④ 押抜き土塊形状

押抜き破壊時の押抜き土塊形状の模式図を図-4.4、地盤材料に砂を使用した各ケースでの押抜き土塊形状一覧を表-4.4 に示す。なお、押抜き土塊寸法は前述の図-4.2 に示したひび割れ位置より推定している。砂を使用した3ケースの結果を比較すると、S-S1.0-S、S-S1.5-S、S-S1.5-P の順に押抜き土塊の体積が大きい結果となっている。この結果から、押抜き土塊の体積は土堤が緩勾配の場合よりも急勾配の場合のほうが大きくなる傾向があると考えられる。これは③の考察同様、勾配の違いによって土堤にかかる外力の大きさが異なるためと考えられる。重錘の形状が球体の場合、多面体の場合よりも押抜き土塊の体積が大きくなる傾向にあると考えられる。S-S1.5-S と G-S1.5-S の結果を比較すると、砕石を使用した場合、砂を使用した場合と押抜き土塊の体積に大きな差は見られなかった。

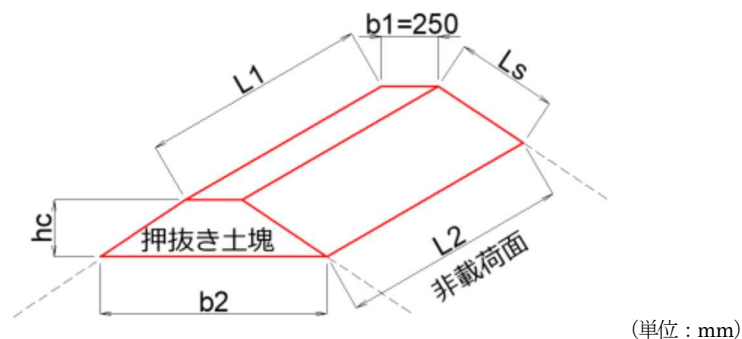


図-4.4 押抜き土塊形状の模式図

表-4.4 押抜き土塊形状一覧

項目	記号	単位	S-S1.5-S	S-S1.0-S	S-S1.5-P	G-S1.5-S
法長(被載荷面側)	L_s	(mm)	400	707	300	400
高さ	h_c	(mm)	221.880	499.924	166.410	221.880
底面幅	b_2	(mm)	915.640	1249.849	749.230	915.640
断面積	A	(m^2)	0.129	0.375	0.083	0.129
延長(載荷面側・重錘直径)	L_1	(mm)	318	318	285	318
延長(非載荷面側)	L_2	(mm)	800	1100	900	800
平均延長	L	(mm)	675	950	850	559
体積	V	(m^3)	0.079	0.266	0.049	0.072

⑤ 時刻歴分布および事象発生時刻

各ケースにおける荷重および変位の時刻歴分布を図-4.5に、法面ひび割れ等の事象発生時刻一覧を表-4.5に示す。S-S1.5-Sでは、貫入量は時刻に比例するように増加している。それに対して、荷重は徐々に増加するが時間経過とともに増加量が減っており、550秒付近で増加が終了している。これは、法面にひび割れが発生した時刻とほぼ一致している。600秒付近では急激に荷重が減少しており、この20秒後に押抜き破壊が発生している。S-S1.0-Sでは、貫入量と荷重がともにS-S1.5-Sと比較して急激に増加している。また、荷重は100秒付近で増加が終了し、その後に減少している。この現象直前には、押抜き破壊が発生している。S-S1.5-Pでは、貫入量は時刻と比例するように増加している。荷重は油圧ジャッキ終了まで増加を続けている。600秒付近で一度だけ荷重が減少しているが、その後すぐに元の値に増加していることから、これは559秒に行われたジャッキの盛替えの影響であると考えられる。

粘性土を用いたC-S1.5-Sでは、貫入量が時刻に比例するように増加している。荷重については載荷開始から急速に増加しているが100秒付近で増加が終了し、150秒付近で減少している。ジャッキの盛替えが行われた時刻である250秒付近で再び荷重が急激に増加している。砕石を用いたG-S1.5-Sでは、貫入量が時間とともに増加しているが、200秒付近までその増加量は時間経過とともに減少している。ジャッキの盛替えを行った200秒以降ではほとんど一定に貫入量は増加している。200秒付近での減少は213秒に行われたジャッキの盛替えの影響であると考えられる。また、300秒付近で荷重が減少した後に法面ひび割れが発生しており、砂同様に砕石でも法面ひび割れなどの破壊が土堤の強度の低下に関係していると考えられる。砕石を使用した場合、砂と同様に法面ひび割れが発生した際に荷重が減少しており土堤の強度も低下していると考えられる。

砂を使用した場合、急勾配の土堤では緩勾配よりも小さな荷重や貫入量で法面のひび割れや押抜き破壊など破壊に至ると考えられる。また、重錘が球体のケースでは法面ひび割れや押抜き破壊が発生すると荷重が減少している。これは、土堤の一部が破壊されることで土堤の外力に対する抵抗力が弱くなるためであると考えられる。重錘が多面体のケースでは、球体のケースよりも荷重の立ち上がりが緩やかで最大値も小さくなっている。このことから、重錘が多面体の場合、球体よりも貫入する際に抵抗を受けづらいと考えられる。地盤材料に粘性土を使用した場合、他の地盤材料を使用した場合と異なり、押抜き破壊が発生しなかったために荷重が減少しておらず土堤の強度もあまり低下しないと考えられる。このことから、粘性土を使用した場合は法面ひび割れが土堤の強度に与える影響は小さいと考えられる。また、荷重の最大値を比較すると粘性土が最も大きくなっている。これは粘性土では他のケースと異なり押抜き破壊による荷重の減少が起らなかったためと考えられる。

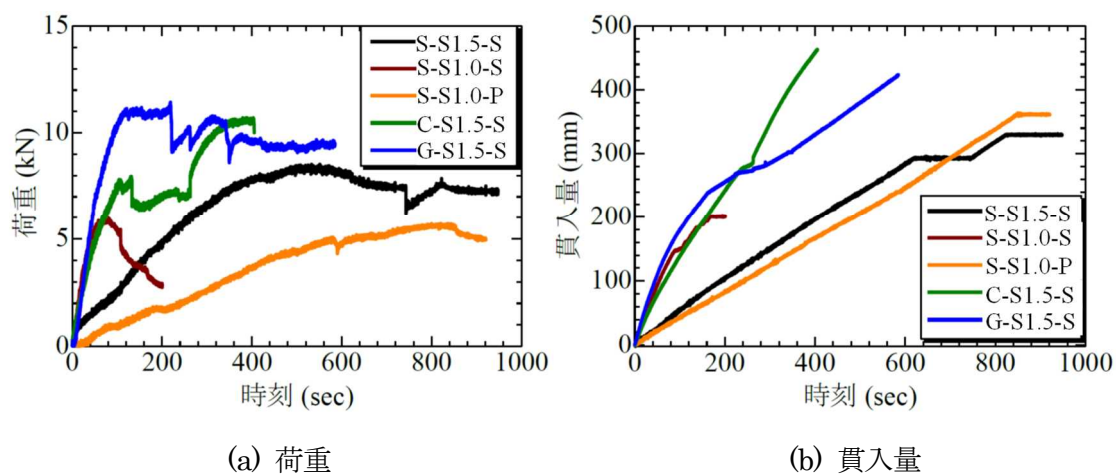


図-4.5 荷重および変位の時刻歴分布

表-4.5 事象発生時刻一覧 (sec)

ケース名	S-S1.5-S	S-S1.0-S	S-S1.5-P	C-S1.5-S	G-S1.5-S
油圧ジャッキ開始	-61	-52	-110	-5	-8
重錘が土堤に接触	0	0	0	0	0
法面盛り上がり	52	29	96	60	30
天端盛り上がり	434	47	441	194	90
法面ひび割れ	554	80	655	378	347
ジャッキ盛替え	578	—	559	265	213
押し抜き破壊	637	112	683	—	440
油圧ジャッキ終了	713	168	820	417	585

⑥荷重変位関係

荷重変位関係を図-4.6に示す。多面体以外の砂・粘性土の4ケースの剛性勾配はほぼ同程度。S-S1.5-Sの剛性勾配が他の砂のケースよりも若干小さい。最大荷重は、大きい順に碎石、粘性土、砂となっている。砂のケースでは、最大荷重が大きい順にS-S1.5-S、S-S1.0-S、S-S1.5-Pとなった。S-S1.5-Sの剛性勾配の低下は貫入量150mm程度まで生じておらず、その後、8kN程度を保持して280mm程度で荷重が急減している。S-S1.0-Sは80mm程度で剛性勾配が低下し、6kN程度まで上昇した後、140mm程度で急減している。S-S1.5-Pは剛性勾配が他のケースよりも明らかに小さいものの、貫入量240mm程度まで一定勾配で荷重が上昇、350mm程度で実験を終了している。粘性土は剛性勾配の低下が貫入量140mm程度まで生じていない。その後、7kN程度を保持して300mm程度で荷重が再上昇している。これは押抜き破壊が生じないためと考えられる。碎石は剛性勾配の低下が貫入量200mm程度まで生じていない。その後、11kN程度を保持して260mm程度で荷重の上昇・下降を示している。

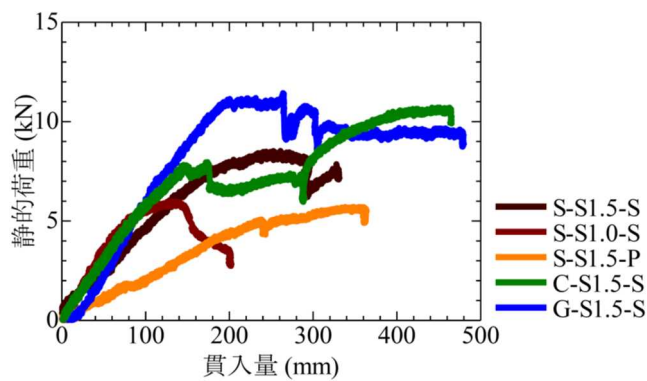


図-4.6 荷重変位関係

(2) 重錘衝突実験

1) 実験ケースと各応答値一覧

重錘衝突実験の実験ケースと各応答値の一覧を表-4.6に示す。

表-4.6 応答値一覧

ケース名	実施年度	条件			計画				衝突条件				
		材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	設定落下高さ (m)	設定衝突速度 (m/s)	設定力積 (kg・m/s)	設定エネルギー (J)	実衝突速度 Y (m/s)	実衝突速度 XYZ (m/s)	実力積 (kg・m/s)	実エネルギー (J)
S-11.5-S-H2-R	R1	砂	1:1.5	球体	54	2	6.263	338	1,059	7.091	7.116	383	1,358
S-11.5-S-H6-R					54	6	10.848	586	3,177	11.023	11.040	595	3,281
S-11.0-S-H2	R1	砂	1:1.0	球体	54	2	6.263	338	1,059	6.543	6.578	353	1,156
S-11.0-S-H6	H30				54	6	10.848	586	3,177	11.731	11.110	633	3,716
S-11.0-Sh-H0.55	R1	砂	1:1.0	球体(重)	178	0.55	3.284	586	960	3.543	3.552	631	1,117
S-11.0-Sh-H1.82					178	1.82	5.975	1,063	3,177	6.268	6.279	1,116	3,497
S-11.0-Sh-H6					178	6	10.848	1,931	10,474	11.139	11.148	1,983	11,043
C-11.5-S-H2	R1	粘性土	1:1.5	球体	54	2	6.263	338	1,059	6.694	6.698	361	1,210
C-11.5-S-H6					54	6	10.848	586	3,177	11.248	11.287	607	3,416
C-11.0-Sh-H0.18	R1	粘性土	1:1.0	球体(重)	178	0.18	1.879	334	314	2.144	2.148	382	409
C-11.0-Sh-H0.55					178	0.55	3.284	586	960	3.118	3.124	556	866
C-11.0-Sh-H6					178	6	10.848	1,931	10,474	11.205	11.247	1,994	11,174
C-11.0-Sh-H7					178	7	11.717	2,086	12,219	12.741	12.765	2,268	14,447
G-11.5-S-H2	R1	碎石	1:1.5	球体	54	2	6.263	338	1,059	6.242	6.260	337	1,052
G-11.5-S-H6					54	6	10.848	586	3,177	11.226	11.235	606	3,403

2) 材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響の検討 (その1)

① 実験ケース一覧

土堤材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。ここでは、質量が 54kg の重錘を用いた実験を対象とする。検討に用いた実験ケースを表-4.7に示す。

表-4.7 実験ケース一覧

ケース名	実施年度	材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	実衝突速度 (m/s)	換算落下高さ (m)	換算運動量 (ton・m/s)	換算エネルギー (kJ)	実験結果
S-11.5-S-H2-R	R1	砂	1:1.5	球体	54	7.116	2.582	0.384	1.367	捕捉
S-11.5-S-H6-R					54	11.040	6.215	0.596	3.291	通過
C-11.5-S-H2	R1	粘性土	1:1.5	球体	54	6.698	2.287	0.362	1.211	捕捉 (損傷軽微, 貫入せず)
C-11.5-S-H6					54	11.287	6.495	0.609	3.439	捕捉 (損傷軽微)
G-11.5-S-H2	R1	碎石	1:1.5	球体	54	6.260	1.998	0.338	1.058	捕捉 (天端で停止, 貫入せず)
G-11.5-S-H6					54	11.235	6.436	0.607	3.408	通過 (貫入せず)

② 重錘軌跡

重錘軌跡図を図-4.7 に示す。H2 はいずれも捕捉、H6 は砂と碎石の場合に通過している。砂の場合、H2 の重錘貫入量は最も大きかった。H6 は粘性土より小さく碎石よりも大きくなり、法肩上方へかけ上がる傾向が見られた。粘性土の場合、H2 の重錘貫入量は碎石と同程度で小さく、H6 では砂や碎石よりも大きかった。また、鉛直方向へ跳ね上がる傾向がみられた。碎石の場合、重錘貫入量は H2、H6 ともに最も小さく、法肩上方へ跳ね上がる傾向が見られた。

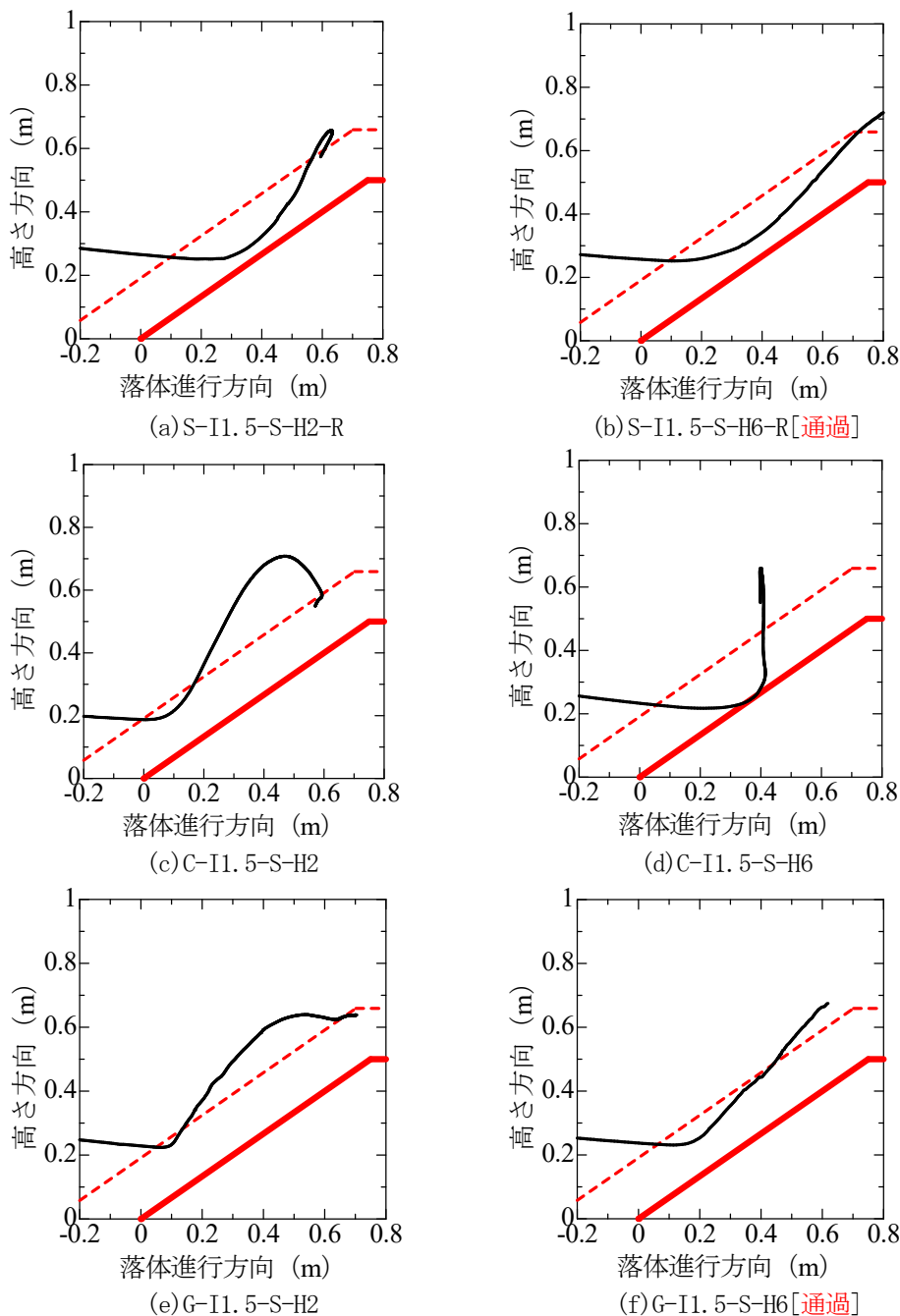


図-4.7 重錘軌跡図

③ 重錘貫入・かけ上がり速度

重錘貫入・かけ上がり速度波形を図-4.8に示す。

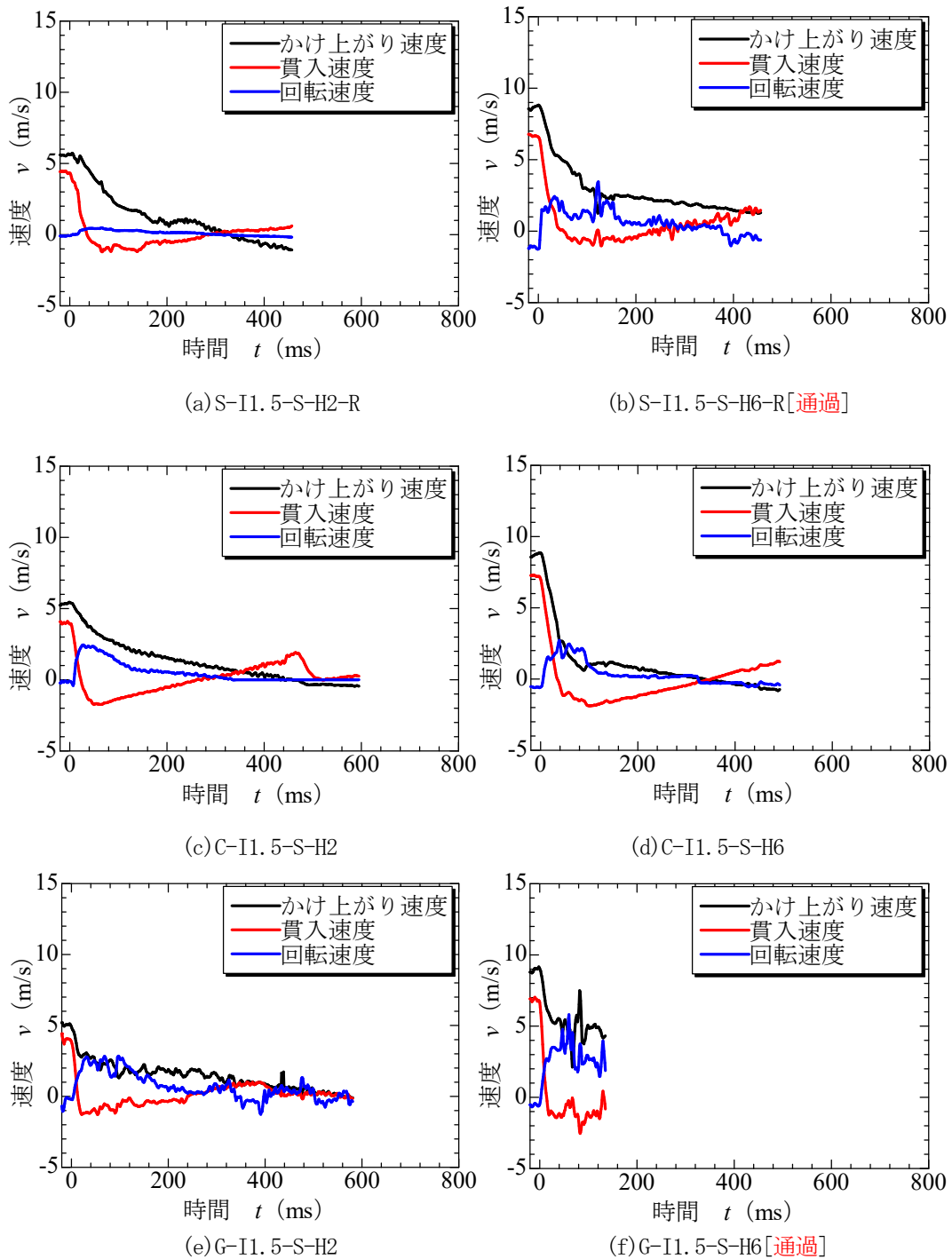
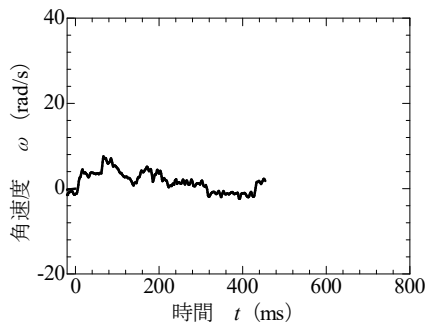


図-4.8 重錘貫入・かけ上がり速度波形

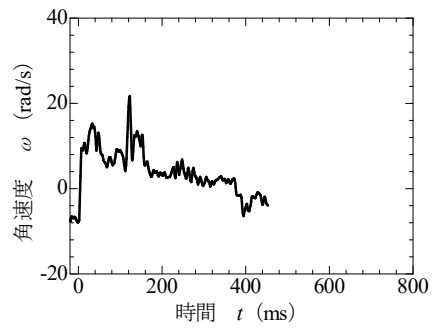
貫入速度はいずれも衝突直後に急減している。貫入速度が0になる時刻は、砂は40～50ms、粘性土は20～30ms、碎石は15ms程度であった。かけ上がり速度は、H2はいずれも衝突直後から緩やかに、H6は急激に減少している。砂は、回転速度よりもかけ上がり速度が大きいことから、かけ上がりは回転移動のほか、並進移動によっても生じている。粘性土は、H2は回転速度よりもかけ上がり速度が大きいことから、砂と同様に並進移動によるかけ上がりが生じている。H6は50～100ms程度でかけ上がり速度よりも回転速度が大きいので、回転してもかけ上がりが生じない空転挙動となっている。碎石は、H2は50～150ms程度でかけ上がり速度と回転速度が同じ程度であることから、かけ上がりは回転移動によって生じている。H6はノイズが大きいものの回転速度よりもかけ上がり速度が大きいので、砂と同様に並進移動によるかけ上がりが生じている。回転速度は、S-I1.5-H2以外のケースは衝突直後に急増し、最大応答値を示した後に緩やかに減少している。

④ 重錘角速度

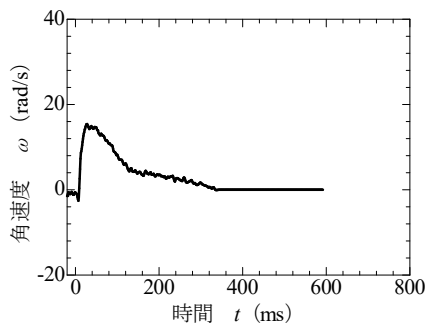
重錘角速度波形を図-4.9に示す。角速度波形も一部でノイズが大きいものの、重錘衝突後に角速度は急増して最大値を示し、緩やかに減少する性状を示す。砂の場合、H2は衝突直後から最大5～10rad/s程度で推移する。最大値は粘性土および碎石と比較して小さい。H6はH2よりも角速度が大きい傾向にある。50ms程度で最大15rad/s程度まで増加し、緩やかに減少する。粘性土の場合、H2は碎石と同様の波形性状を示し、50ms程度で最大15rad/s程度まで増加し、150ms程度まで急減してその後は緩やかに減少する。H6もH2とほぼ同様の波形性状で、最大値も同程度。碎石の場合、H2は粘性土と同様の波形性状を示す。H6は砂および粘性土と比べて最大値が20rad/s以上と大きい。



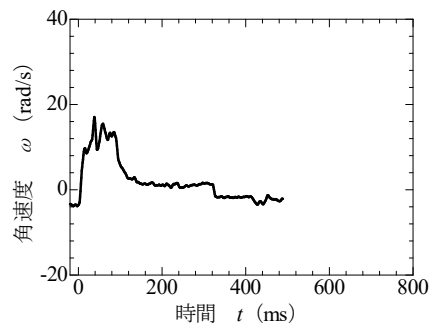
(a) S-I1.5-S-H2-R



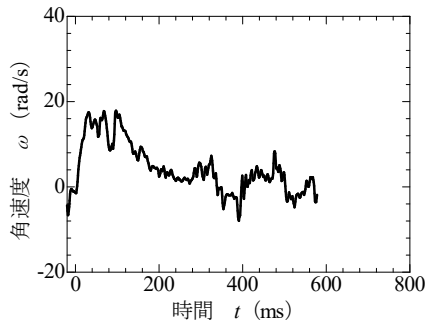
(b) S-I1.5-S-H6-R [通過]



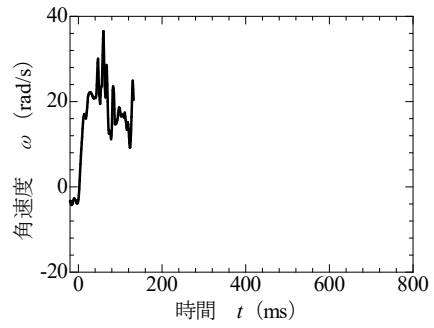
(c) C-I1.5-S-H2



(d) C-I1.5-S-H6



(e) G-I1.5-S-H2



(f) G-I1.5-S-H6 [通過]

圖-4.9 重錘角速度波形

⑤ 運動エネルギー

運動エネルギー波形を図-4.10に示す。いずれも線速度エネルギーに比べて回転エネルギーはいずれも小さい。貫入速度が0になる時刻付近（砂は40~50ms、粘性土は20~30ms、碎石は15ms程度）まで線速度エネルギーは急激に減少する。その後、緩やかに減少する。重錘が通過したS-I1.5-S-H6およびG-I1.5-H6は、貫入速度が0になる時刻付近まで急激に減少した後においても、1,000J程度の線速度エネルギーが残存している。これより、貫入速度が0になる時刻までに大部分のエネルギーが吸収されることが示された。

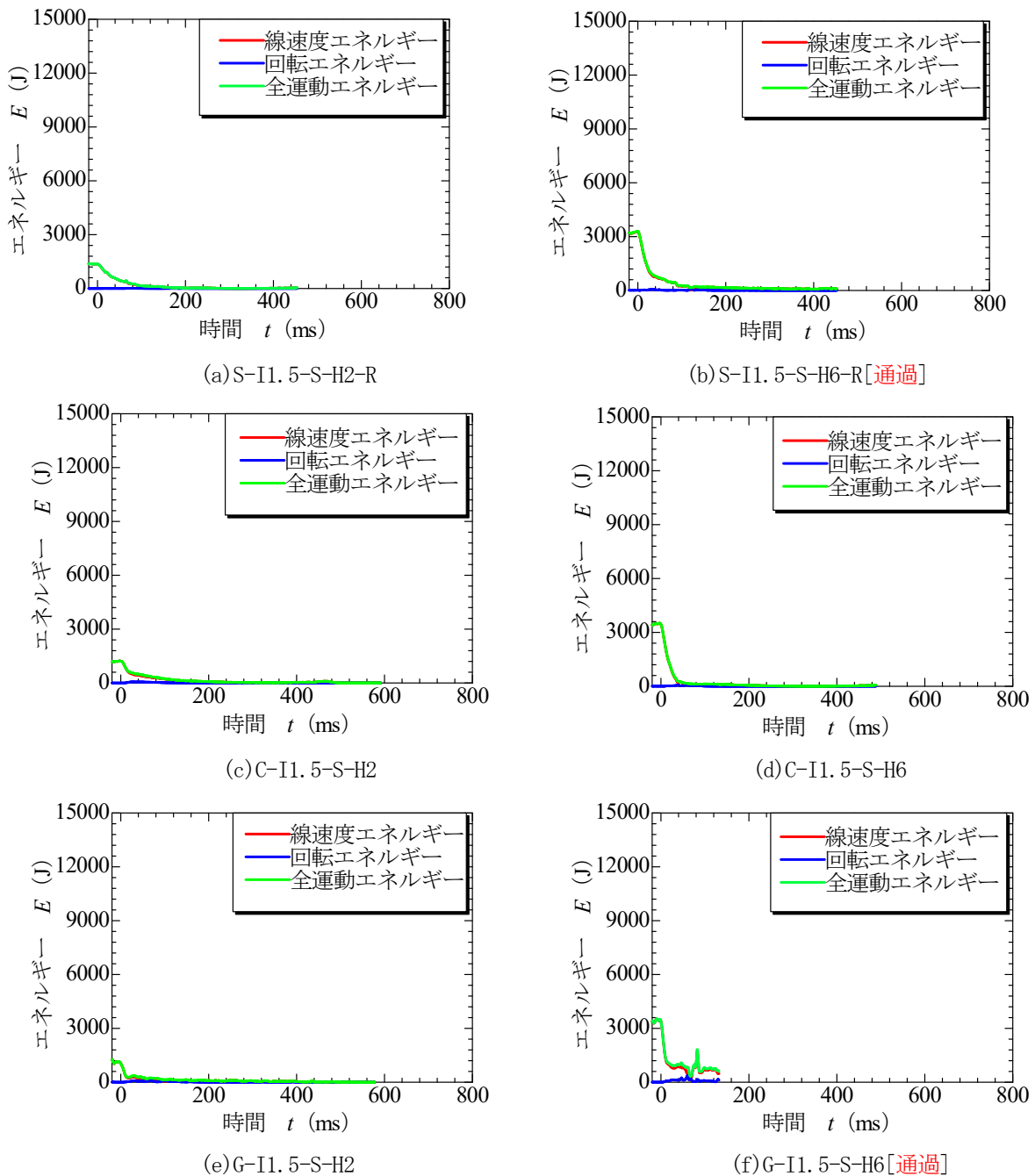
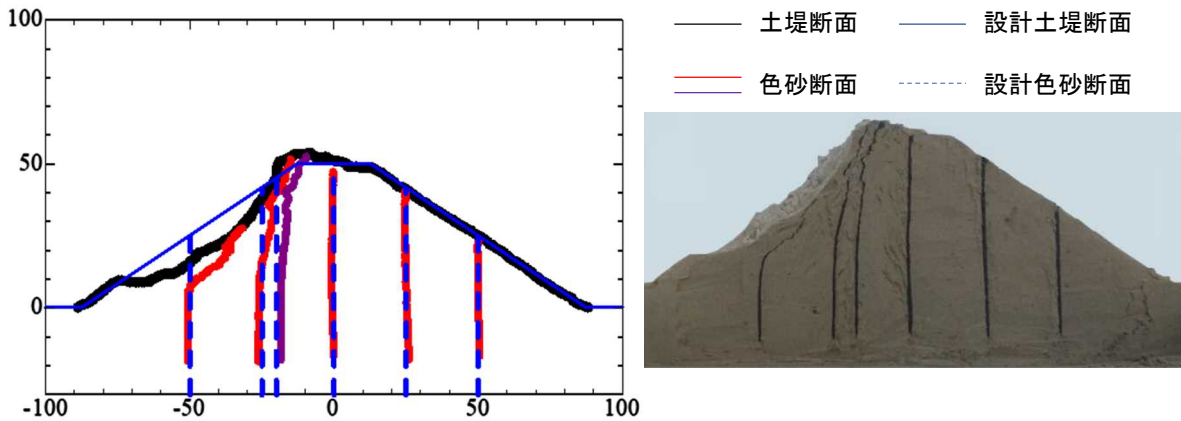


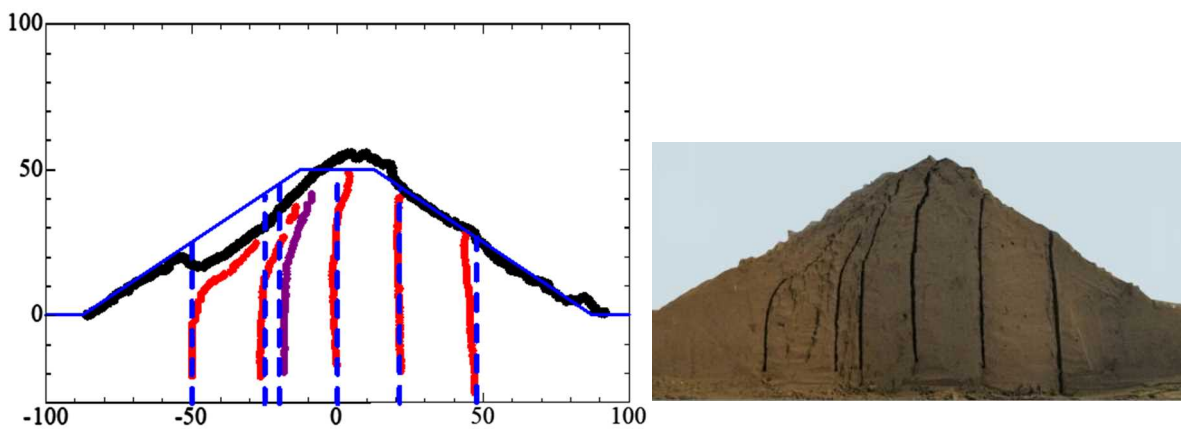
図-4.10 運動エネルギー波形

⑥ 破壊性状

衝突断面における変状図および写真を図-4.11~13に示す。砂を用いた場合、衝突部が大きく変形、内部の着色砂も下方から上方に向かって徐々に非衝突面側へ変形している。着色砂の変形部には昨年度と同様に複数のせん断箇所も見受けられることから、重錘の貫入およびかけ上げに伴ってすべり線が発生したものと考えられる。H6は土堤中央部の着色砂の変形も確認できることから、落下高さの増加に伴い変形も大きくなる傾向にある。



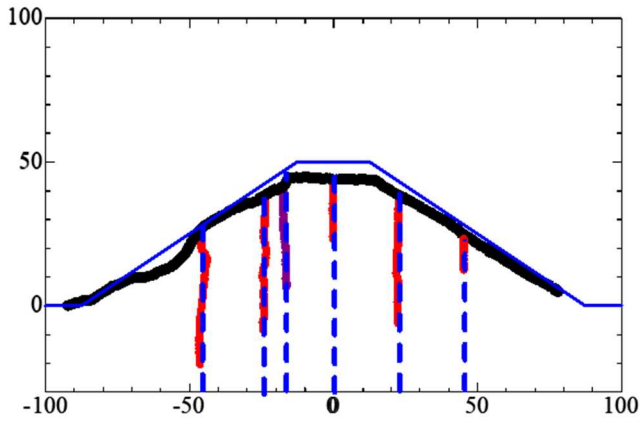
(a) S-I1.5-S-H2-R



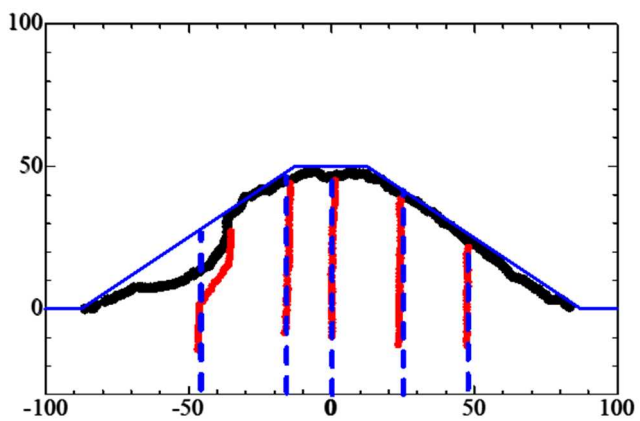
(b) S-I1.5-S-H6-R[通過]

図-4.11 衝突断面における変状図および写真 (砂) (単位:mm)

粘性土の場合、砂の場合よりも変形が小さく、H2 では着色砂の変形は生じていない。H6 では衝突部付近および着色砂が非衝突面側に大きく変形しているが、砂の場合と異なり衝突部が大きく湾曲するだけで、着色砂にせん断は生じていない。粘性土はすべり線が発生せず、圧縮変形が卓越する。



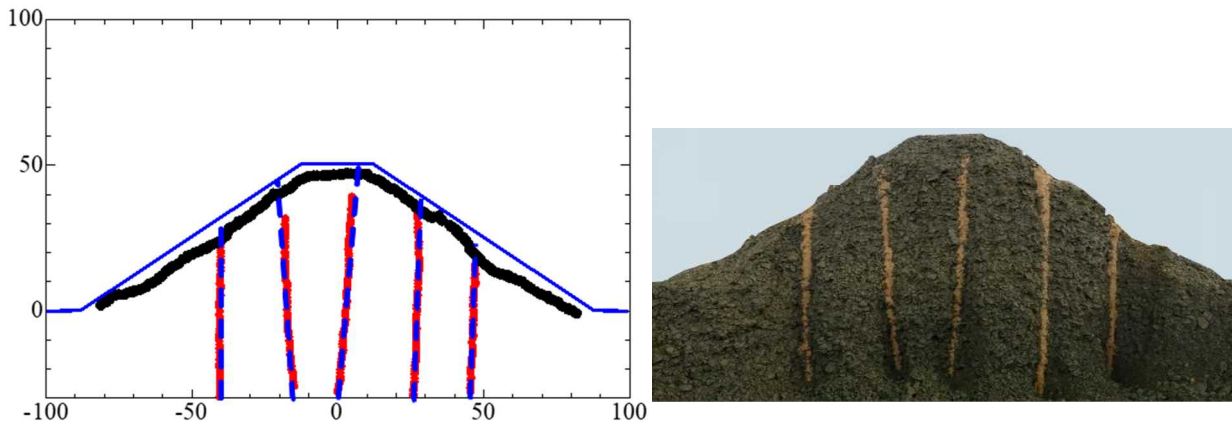
(a)C-I1.5-S-H2



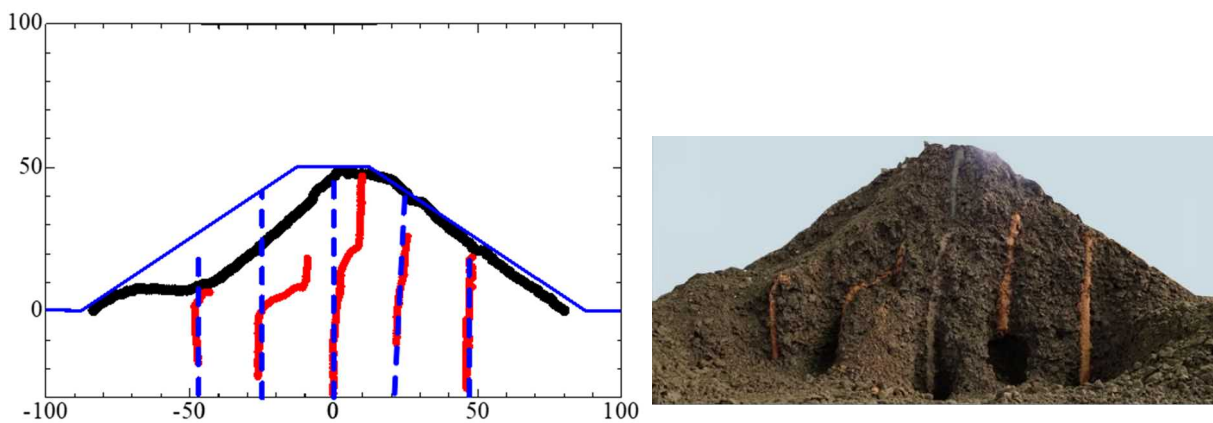
(b)C-I1.5-S-H6

図-4.12 衝突断面における変状図および写真 (粘性土) (単位:mm)

碎石の場合、両ケースともに衝突部および着色砂に明瞭な変形は生じていない。重錘が貫入しにくいことから、土堤の変形によるエネルギー吸収効果が効率的に発揮されないものと考えられる。



(a)G-I1. 5-S-H2



(b)G-I1. 5-S-H6[通過]

図-4.13 衝突断面における変状図および写真（碎石）（単位:mm）

衝突面および衝突箇所近傍の様子を図-4.14、図-4.15に示す。砂の場合、重錘が土砂を飛散させ、押し分けながら貫入しており、粘性土では衝突部近傍のみ変形・貫入が見られた。碎石では飛散量・貫入量ともに小さいことがわかる。

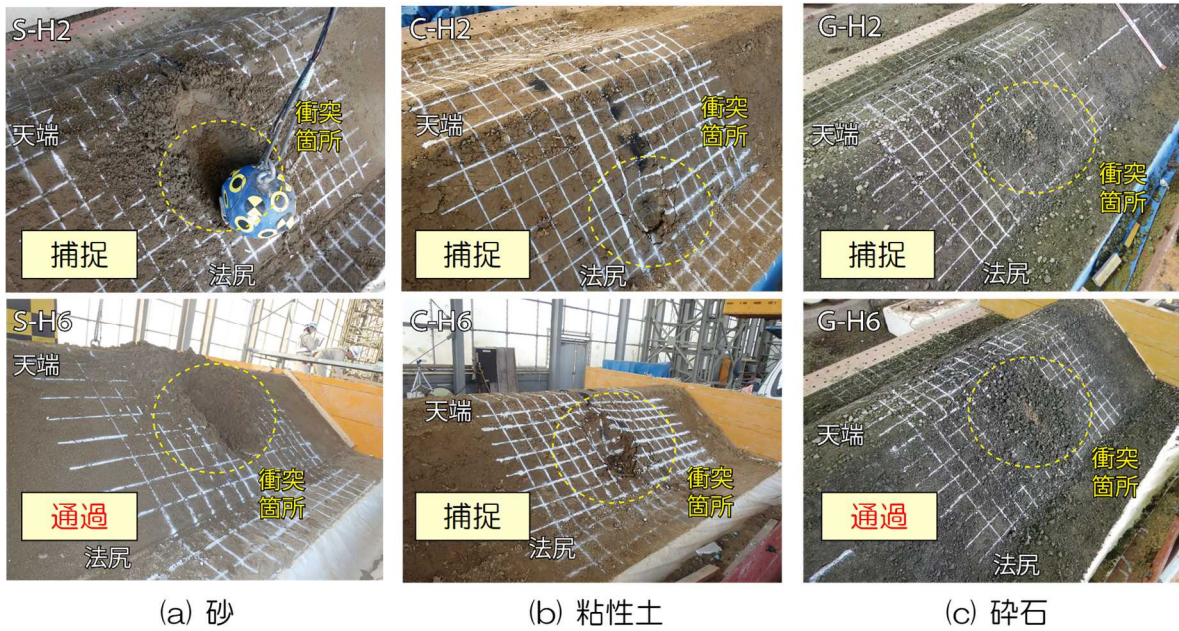


図-4.14 衝突面

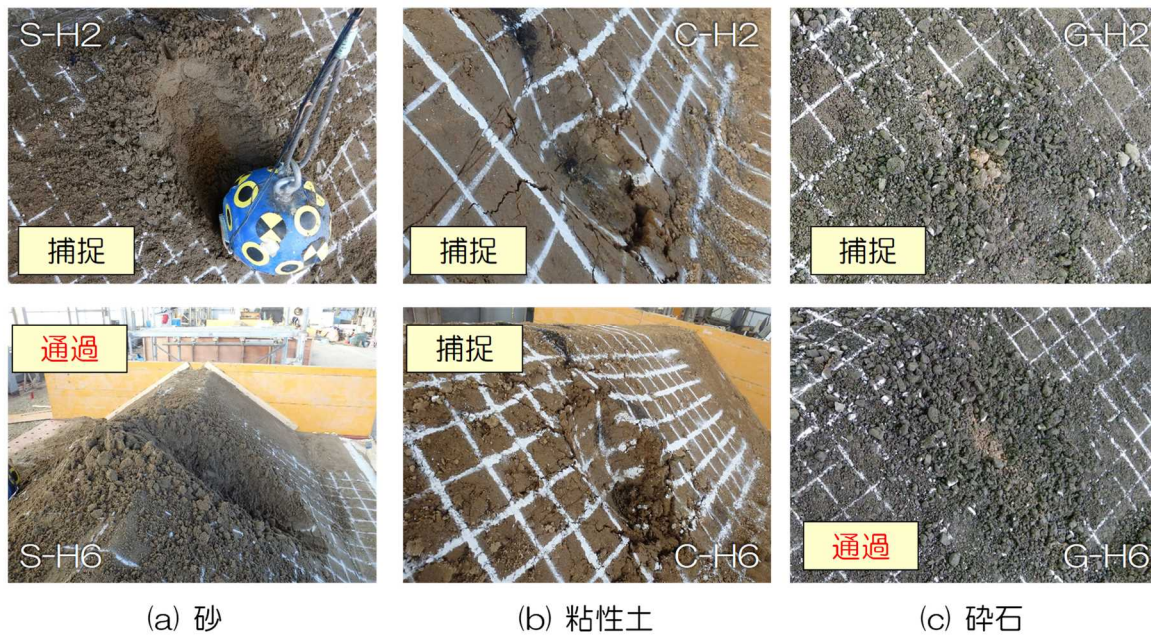


図-4.15 衝突箇所近傍

3) 材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響の検討 (その2)

① 実験ケース一覧

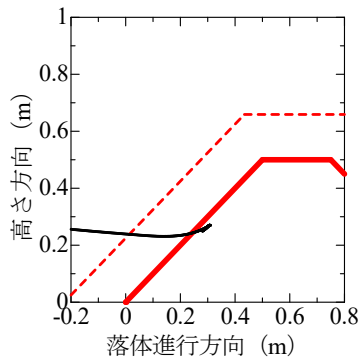
土堤材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。ここでは、質量が 178kg の重錘を用いた実験を対象とする。検討に用いた実験ケースを表-4.8 に示す。

表-4.8 実験ケース一覧

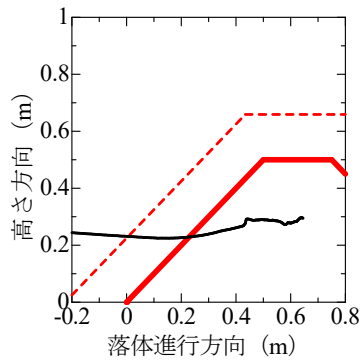
ケース名	実施年度	材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	実衝突速度 (m/s)	換算落下高さ (m)	換算運動量 (ton・m/s)	換算エネルギー (kJ)	実験結果
S-I1.0-Sh-H0.55	R1	砂	1:1.0	球体(重)	178	3.552	0.643	0.632	1.123	捕捉
S-I1.0-Sh-H1.82					178	6.279	2.010	1.118	3.509	捕捉
S-I1.0-Sh-H6					178	11.148	6.337	1.984	11.061	破壊・通過 (破壊甚大)
C-I1.0-Sh-H0.18	R1	粘性土	1:1.0	球体(重)	178	2.148	0.235	0.382	0.410	捕捉 (損傷軽微, 貫入せず)
C-I1.0-Sh-H0.55					178	3.124	0.498	0.556	0.869	捕捉 (損傷軽微, 貫入せず)
C-I1.0-Sh-H6					178	11.247	6.450	2.002	11.258	破壊・捕捉 (破壊甚大)
C-I1.0-Sh-H7					178	12.765	8.308	2.272	14.502	破壊・捕捉 (破壊甚大)

② 重錘軌跡

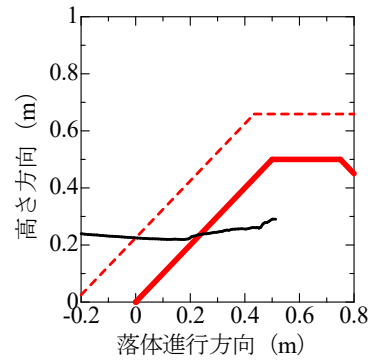
重錘軌跡図を図-4.16 に示す。砂はいずれのケースも緩やかに重錘位置が高くなり、土堤に貫入する。落下高さに関わらず、ほぼ同じ軌跡を示している。H1.82 までは土堤内で停止するが、H6 は衝突面から非衝突面までの土粒子を飛散させて重錘が通過する。粘性土の場合、H0.18・H0.55 および H6、H7 はそれぞれほぼ同じ軌跡を示している。H6、H7 は土堤内部に重錘が貫入し、土堤内部にて重錘位置が高くなり天端方向へ移動する。いずれも重錘を捕捉する。砂と粘性土を比較すると、H0.55 では、粘性土よりも砂の重錘貫入量が多い。砂は衝突時に重錘が停止したが、粘性土は若干跳ね返りが生じている。H6 では、両者ともに土堤内部へ重錘が貫入する。砂は重錘位置が緩やかに高くなり重錘が通過するのに対し、粘性土は土堤内部にて重錘位置が急激に高くなり天端方向へ移動して停止している。



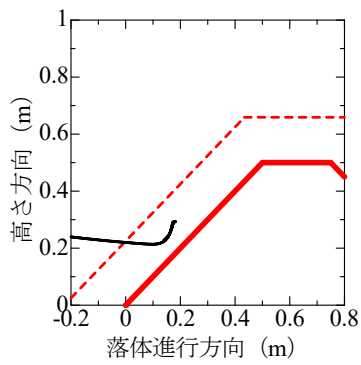
(a) S-I1.0-Sh-H0.55



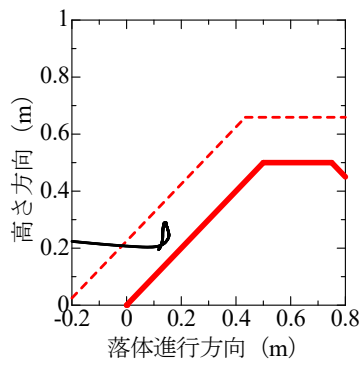
(b) S-I1.0-Sh-H1.82



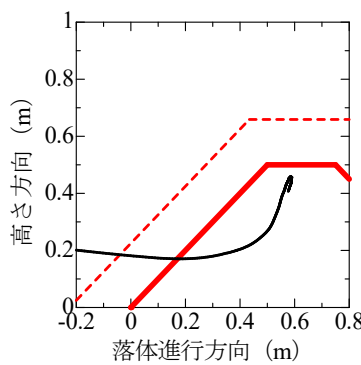
(c) S-I1.0-Sh-H6 [通過]



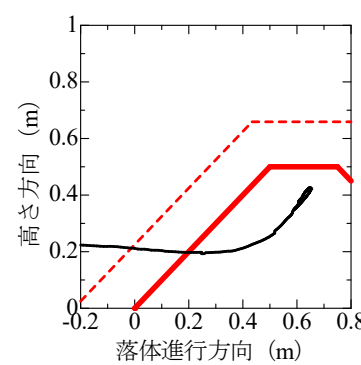
(d) C-I1.0-Sh-H0.18



(e) C-I1.0-Sh-H0.55



(f) C-I1.0-Sh-H6



(g) C-I1.0-Sh-H7

図-4.16 重錘軌跡図

③ 重錘貫入・かけ上がり速度

重錘貫入・かけ上がり速度波形を図-4.17に示す。貫入速度はいずれも衝突直後に減少している。砂の場合には、H1.82までは100ms程度で貫入速度が0となっている。H6は途中でターゲットを認識できなくなり計測不能となっているものの、実際には貫通していることから貫入速度は0とならない。粘性土の場合には、H0.55までは40ms程度で、H6からは80ms程度で貫入速度が0となっている。砂と比べて急激に貫入速度が減少する傾向にある。かけ上がり速度は、いずれも衝突直後から減少する。砂の場合には、いずれも緩やかに減少する。粘性土の場合には、H0.55までは緩やかに、H6からは急激に減少する。砂は、回転速度よりもかけ上がり速度が大きいことから、かけ上がりは回転移動のほか、並進移動によっても生じている。粘性土は、H0.55までは50~200ms程度まで回転速度とかけ上がり速度が同程度であることから、かけ上がりは回転移動によって生じている。H6以降は回転速度よりもかけ上がり速度が大きいことから、砂と同様にかけ上がりは回転移動のほか、並進移動によっても生じている。

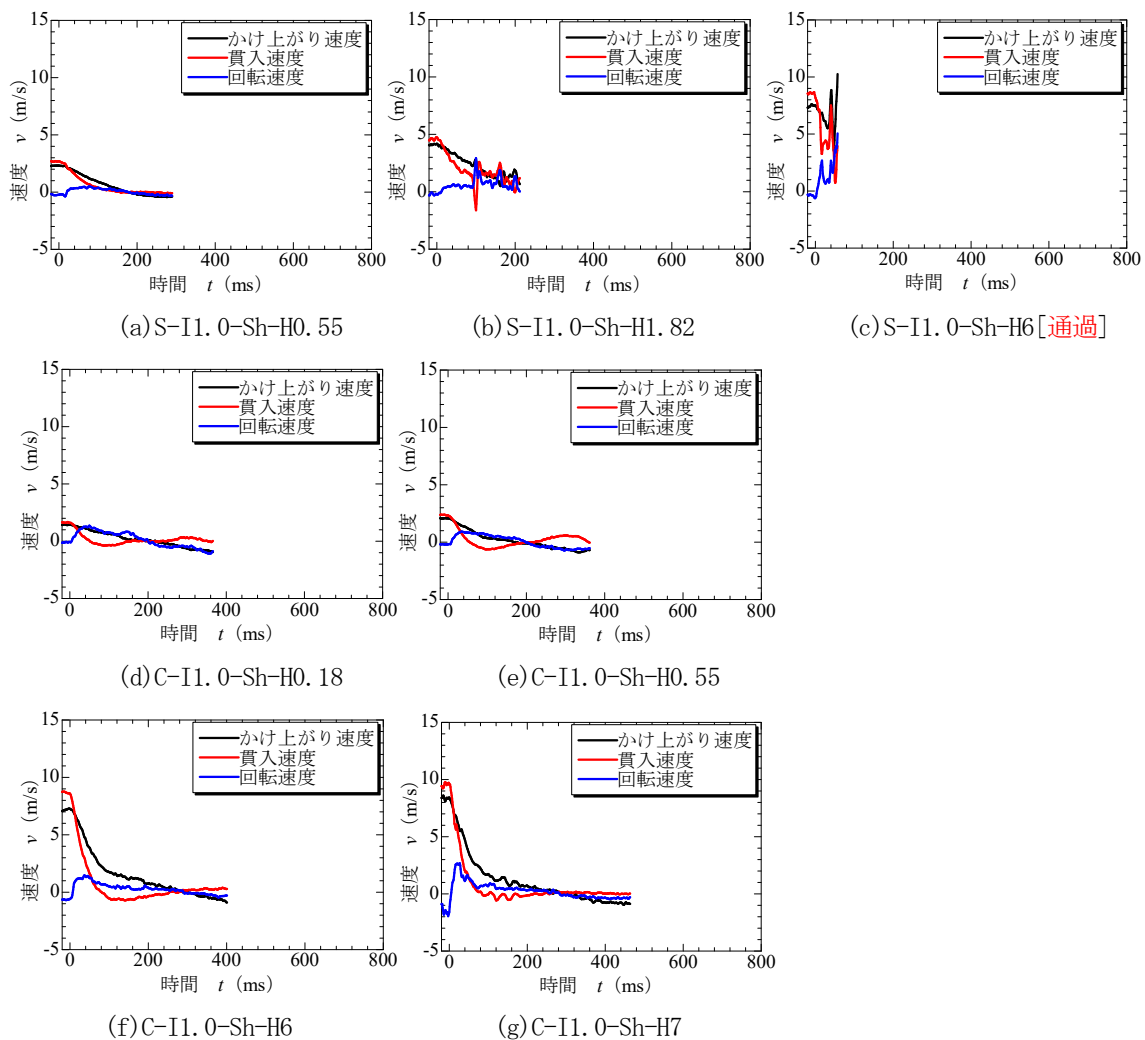


図-4.17 重錘貫入・かけ上がり速度波形

回転速度は、S-I1.0-Sh-H6 以外のケースは衝突直後に急増し、最大応答値を示した後に緩やかに減少する。S-I1.0-Sh-H6 はノイズが大きく途中で計測中断されたため、回転挙動は読み取れない。なお、高速度カメラでは重錘がほぼ回転せずに土堤に貫入することを確認している。

④ 重錘角速度

重錘角速度波形を図-4.18 に示す。

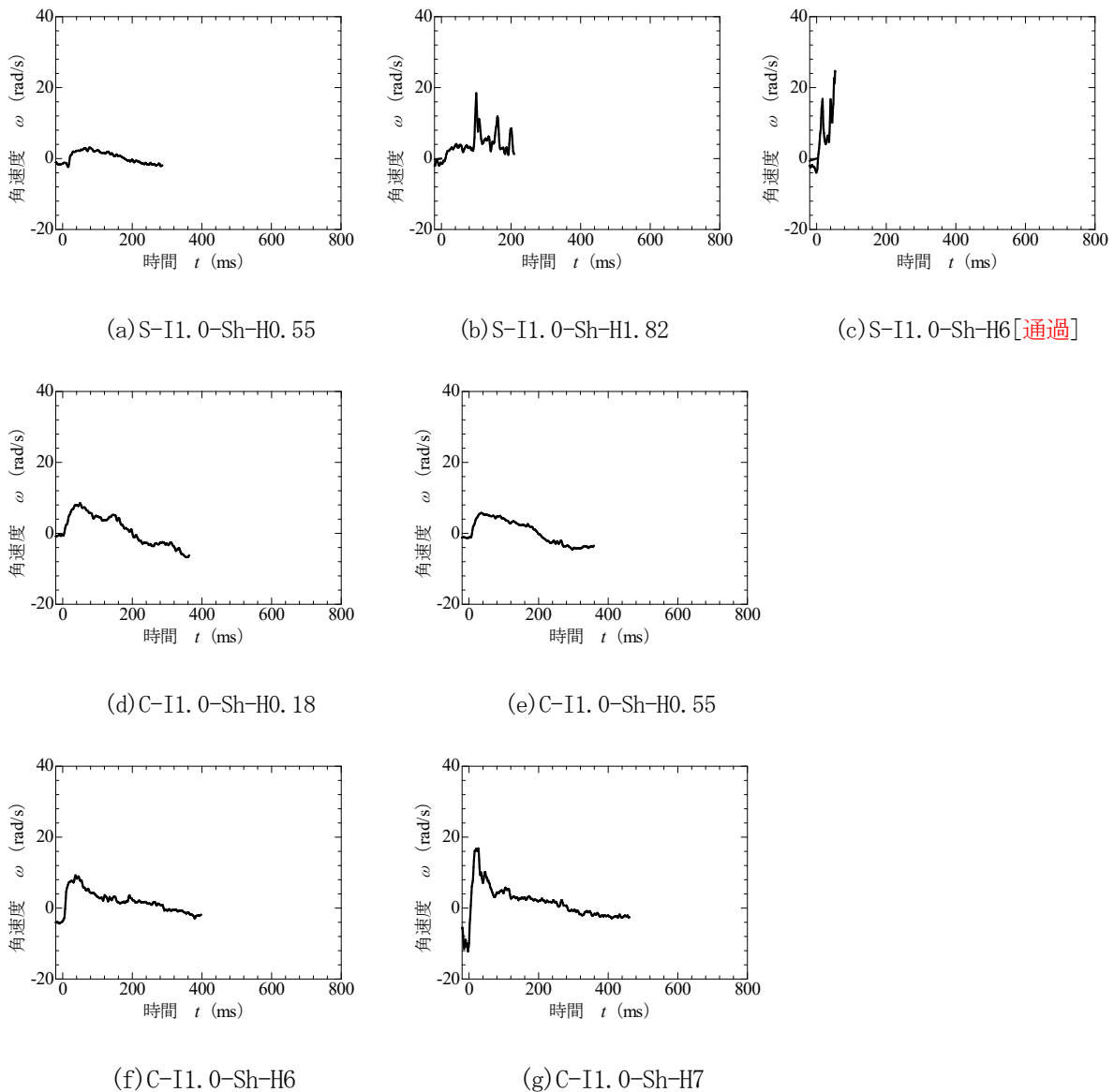


図-4.18 重錘角速度波形

⑤ 運動エネルギー

運動エネルギー波形を図-4.19に示す。線速度エネルギーに比べて回転エネルギーはいずれも小さい。貫通した砂のH6以外のケースは、貫入速度が0になる時刻付近（砂のH1.82までは100ms、粘性土のH0.55までは40ms、H6からは80ms程度）まで線速度エネルギーは急激に減少する。その後、緩やかに減少する。

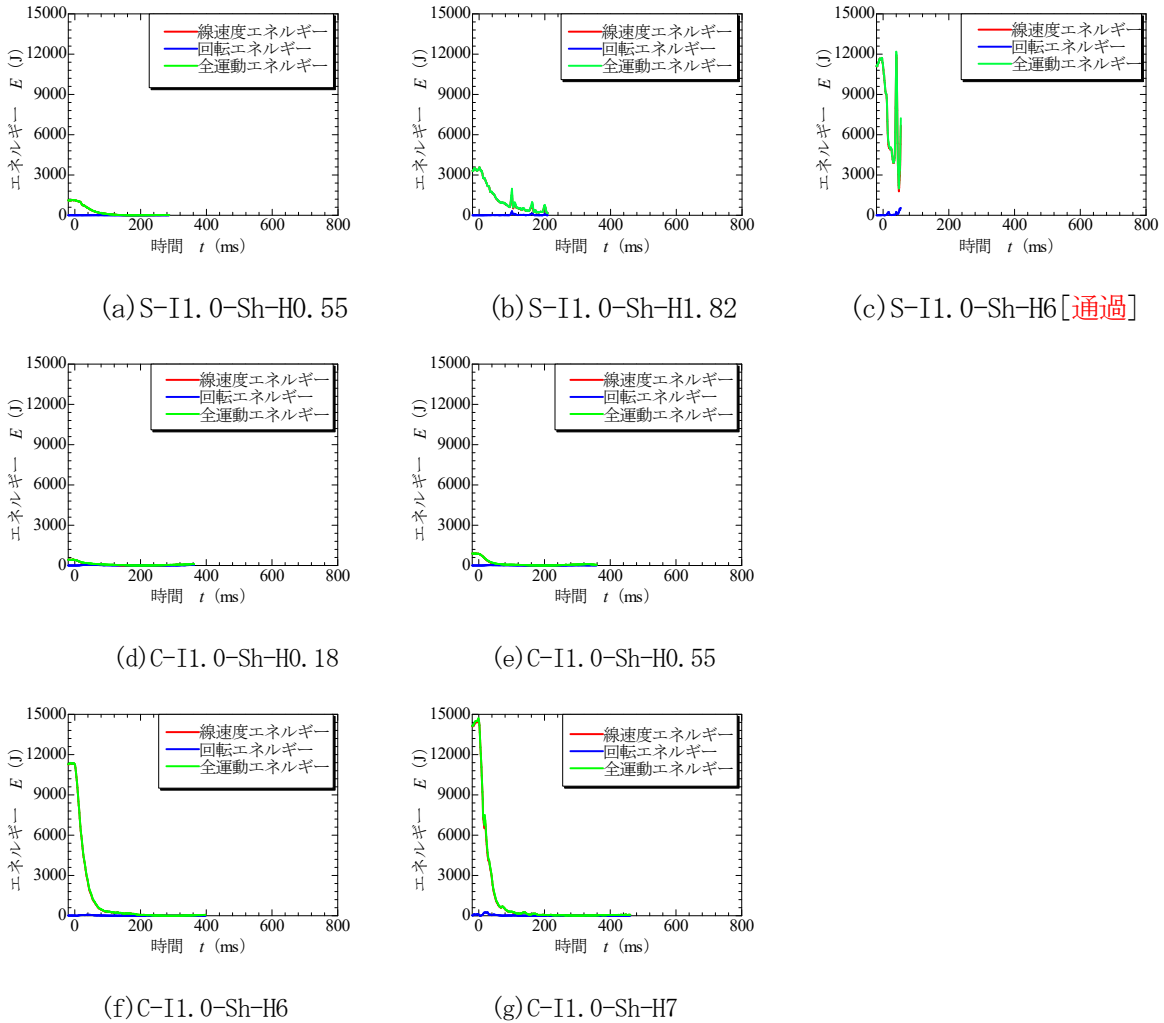
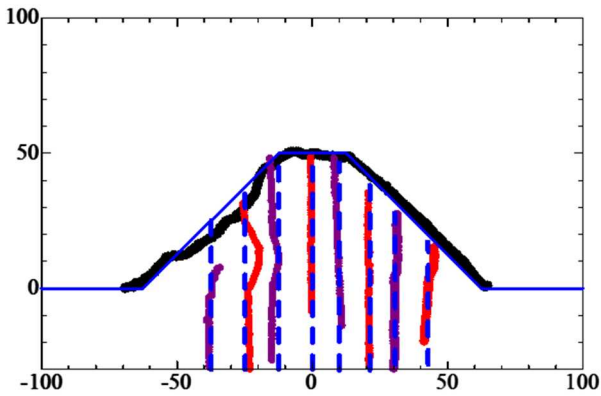


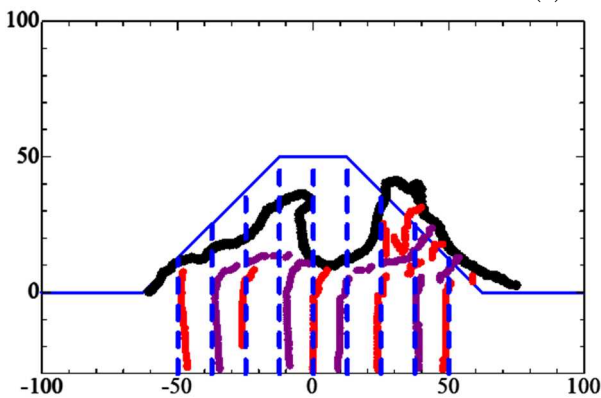
図-4.19 運動エネルギー波形

⑥ 破壊性状

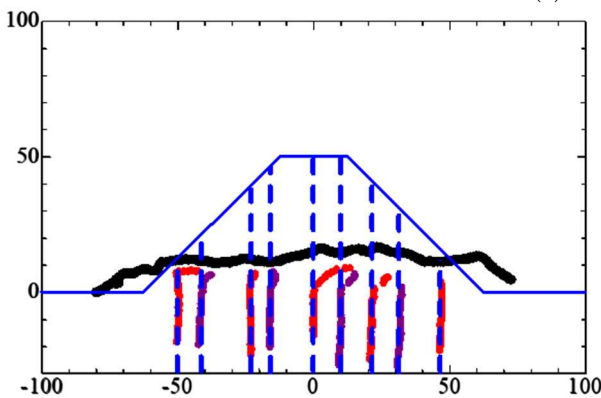
衝突断面における変状図および写真を図-4.20、図-4.21に示す。砂の場合、H0.55は衝突部周辺が変形し、内部の着色砂は中央部のみが大きく湾曲して変形する。H1.82は重錘が土堤の土粒子を飛散させ、停止した重錘の形状に沿って飛散した土粒子が堆積している状況となる。着色砂は土堤底面付近から非衝突面側に大きく折れ曲がっている。H6は重錘が土堤を通過したため、土堤の土粒子が大きく飛散し、土堤形状が大きく損なわれた。内部の着色砂は大部分が消失し、土堤底面付近に残された着色砂も直角に近い角度で折れ曲がっている。



(a) S-II.0-Sh-H0.55



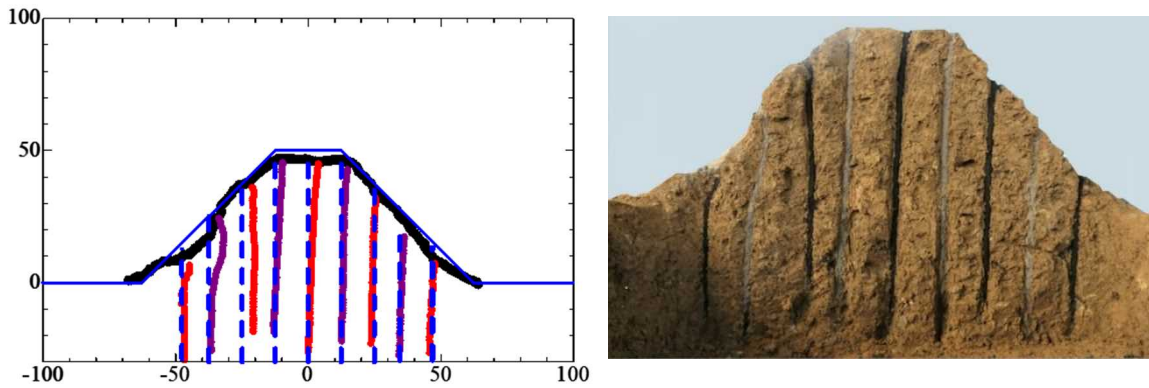
(b) S-II.0-Sh-H1.82



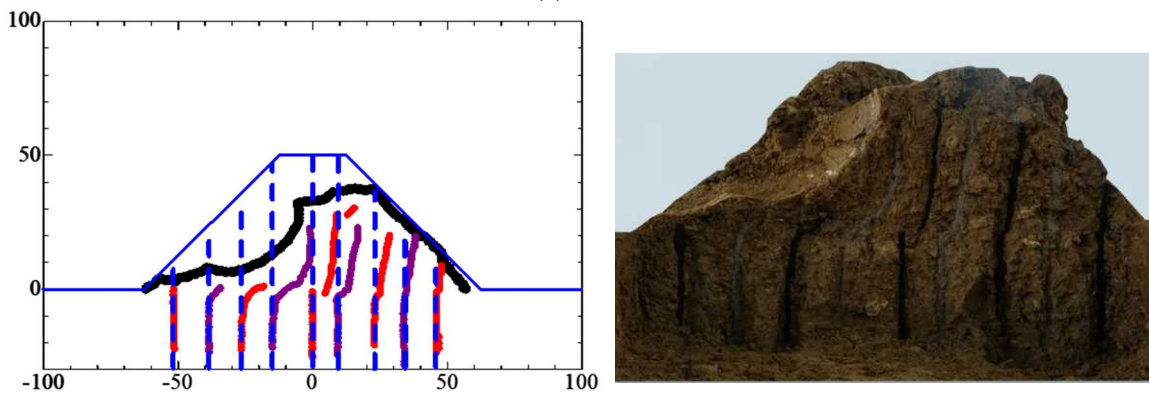
(c) S-II.0-Sh-H6[通過]

図-4.20 衝突断面における変状図および写真 (単位:mm)

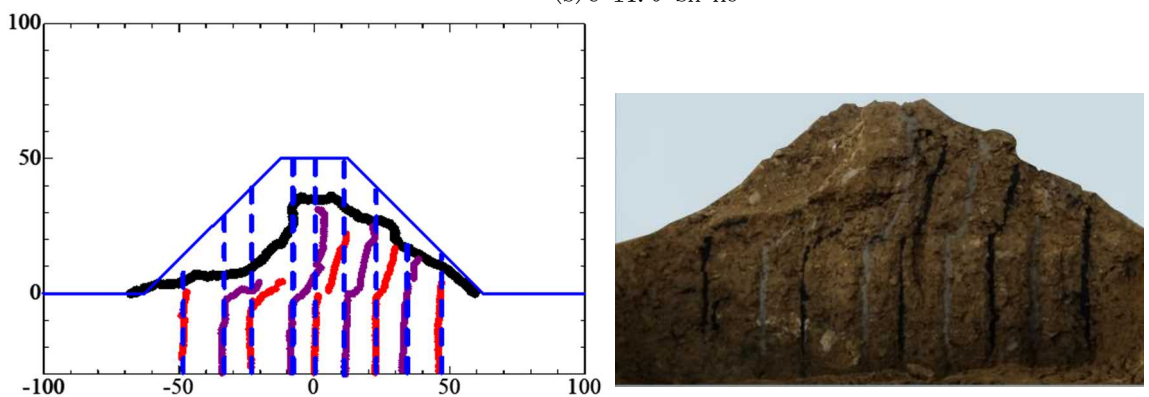
粘性土の場合、H0.55は衝突部のみわずかに変形し、内部の着色砂も湾曲に変形する。砂と比べて変形量は小さい。H6では衝突部は勿論のこと、土堤全体が大きく変形している。内部の着色砂も土堤底面でせん断ずれが生じている箇所も見受けられる。砂と比べて変形量は小さい。H7もH6と同様な破壊性状を示しているが、より変形量が多い。



(a)C-I1.0-Sh-H0.55



(b)C-I1.0-Sh-H6



(c)C-I1.0-Sh-H7

図-4.21 衝突断面における変状図および写真 (単位:mm)

4) 重錘質量の違いによる影響の検討

① 実験ケース一覧

重錘質量の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。実験では、54kg 重錘の落下高さ 6m のケースと同じ運動量、同じエネルギーになるよう、178kg 重錘で落下高さを調整した。検討に用いた実験ケース一覧を表-4.9 に示す。

表-4.9 実験ケース一覧

ケース名	実施年度	材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	実衝突速度 (m/s)	換算落下高さ (m)	換算運動量 (ton・m/s)	換算エネルギー (kJ)	実験結果
S-I1.0-S-H2	R1	砂	1:1.0	球体	54	6.578	2.206	0.355	1.168	捕捉
S-I1.0-S-H6	H30				54	11.110	6.293	0.600	3.333	通過
S-I1.0-Sh-H0.55	R1	砂	1:1.0	球体(重)	178	3.552	0.643	0.632	1.123	捕捉
S-I1.0-Sh-H1.82					178	6.279	2.010	1.118	3.509	捕捉
S-I1.0-Sh-H6					178	11.148	6.337	1.984	11.061	破壊・通過 (破壊甚大)

② 重錘軌跡

重錘軌跡図を図-4.22 に示す。

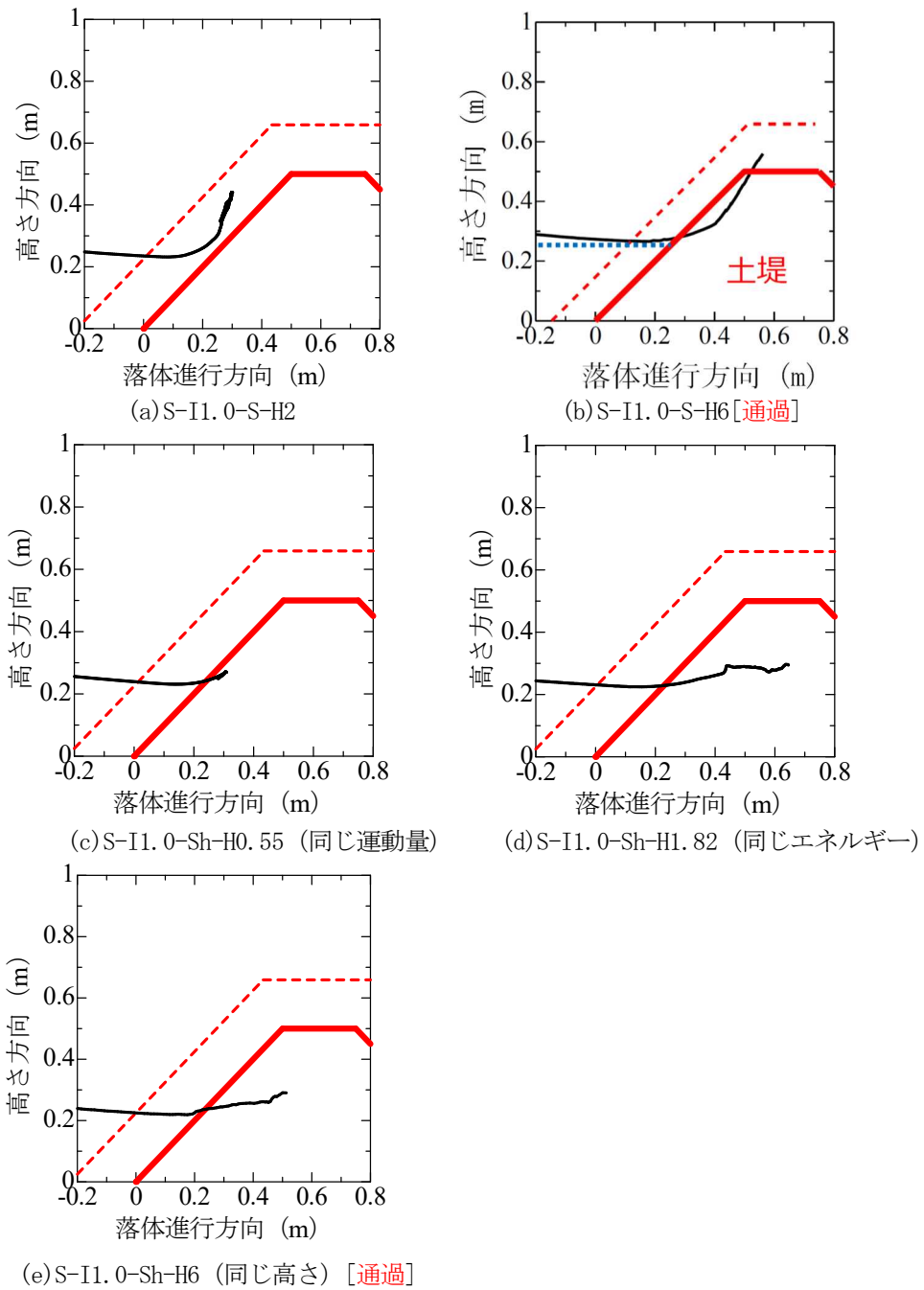


図-4.22 重錘軌跡図

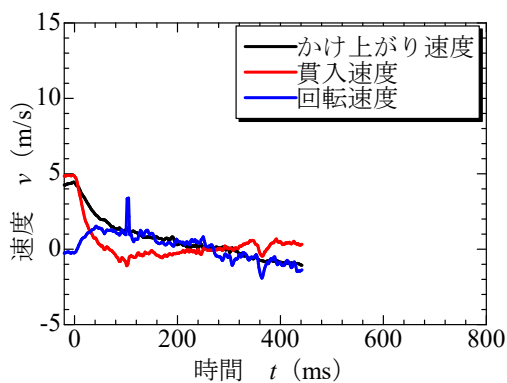
同じ運動量の場合 (S-H6 と Sh-H0.55 の比較)、S-H6 (54kg 重錘) は土堤に重錘が貫入し法肩上方へかけ上がる傾向を示すのに対し、Sh-H0.55 (178kg 重錘) では同じ高さで重錘が土堤に貫入する。また、S-H6 (54kg 重錘) は重錘がかけ上がって通過するものの、Sh-H0.55 (178kg 重錘) は土堤内で停止し捕捉している。同じ運動量でも、重錘質量が大きい場合には重錘のかけ上がりが抑制され、土堤内部に貫入して重錘が停止することから、捕捉性能が向上することがわかる。

同じエネルギーの場合 (S-H6 と Sh-H1.82 の比較)、S-H6 (54kg 重錘) は土堤に重錘が貫入し法肩上方へかけ上がる傾向を示すのに対し、Sh-H0.55 (178kg 重錘、同じ運動量) の場合と同様に Sh-H1.82 (178kg 重錘) では同じ高さで重錘が土堤に貫入する。ただし、落下高さが Sh-H0.55 よりも大きいので重錘貫入量も増加する。また、S-H6 (54kg 重錘) は重錘がかけ上がって通過するものの、Sh-H0.55 (178kg 重錘) と同様に Sh-H1.82 (178kg 重錘) は土堤内で停止し捕捉している。同じエネルギーでも、重錘質量が大きい場合には重錘のかけ上がりが抑制され、土堤内部に貫入して重錘が停止することから、捕捉性能が向上することがわかる。

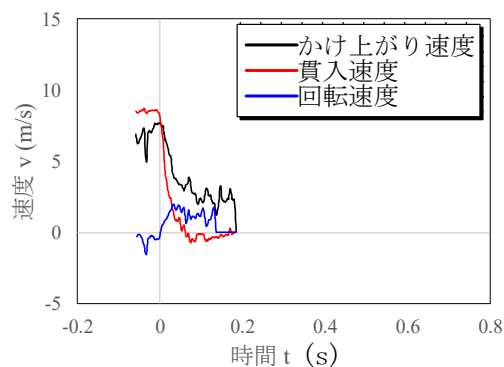
同じ落下高さの場合 (S-H6 と Sh-H6 の比較)、S-H6 (54kg 重錘) は土堤に重錘が貫入し法肩上方へかけ上がる傾向を示すのに対し、Sh-H0.55 (同じ運動量)、Sh-H1.82 (同じエネルギー) の場合と同様に Sh-H6 (178kg 重錘) では同じ高さで重錘が土堤に貫入するが、その後は衝突部の土粒子を飛散させて重錘が通過する。また、S-H6 (54kg 重錘) は重錘がかけ上がって通過するものの、Sh-H1.82 (178kg 重錘) と異なり Sh-H6 (178kg 重錘) は土堤内で停止し捕捉している。同じエネルギーでも、重錘質量が大きい場合には重錘のかけ上がりが抑制され、土堤内部に貫入して重錘が停止することから、捕捉性能が向上する。

③ 重錘貫入・かけ上がり速度

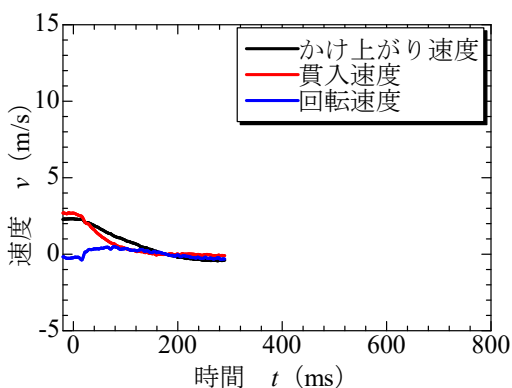
重錘貫入・かけ上がり速度波形を図-4.23に示す。貫入速度はいずれも衝突直後に急減している。54kg重錘のS-I1.0-S-H2およびH6は40ms程度で貫入速度が0になるが、178kg重錘はS-I1.0-Sh-H0.55で100ms、H1.82は200ms程度で0となっている。また、同じ運動量、同じエネルギーでも重錘質量が大きいほど貫入する時間が大きい。なお、S-I1.0-Sh-H6は貫通したため貫入速度は0になっていない。



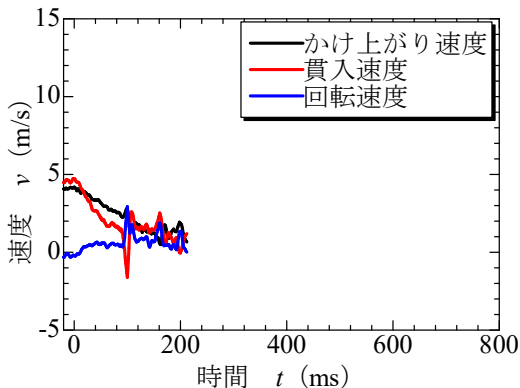
(a) S-I1.0-S-H2



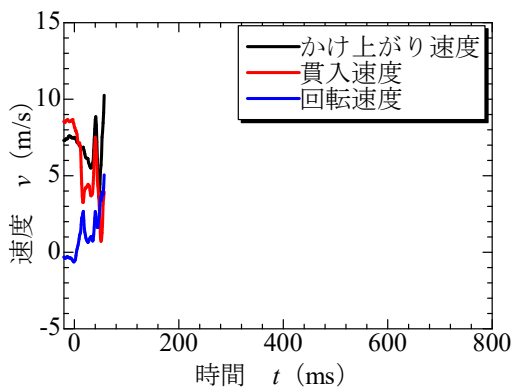
(b) S-I1.0-S-H6 [通過]



(c) S-I1.0-Sh-H0.55 (同じ運動量)



(d) S-I1.0-Sh-H1.82 (同じエネルギー)



(e) S-I1.0-Sh-H6 (同じ高さ) [通過]

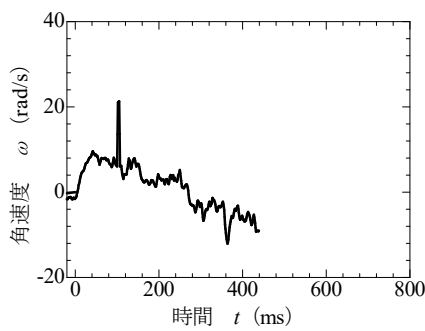
図-4.23 重錘貫入・かけ上がり速度波形

かけ上がり速度は、S-I1.0-S-H6 および S-I1.0-Sh-H6 以外はいずれも衝突直後から緩やかに減少している。S-I1.5-S-H2 は 50ms 以降の回転速度とかけ上がり速度が同程度であることから、かけ上がりは回転移動によって生じている。S-I1.0-S-H6 は衝突直後に急減するものの、かけ上がって通過したため途中で計測中断となっている。S-I1.0-Sh-H0.55/1.82 は回転速度よりもかけ上がり速度が大きいことから、砂と同様にかけ上がりは回転移動のほか、並進移動によっても生じている。なお、S-I1.0-Sh-H6 は衝突直後にノイズが大きくなり、その後土堤を通過したため計測中断となった。

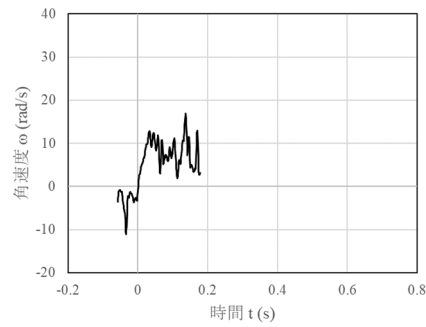
回転速度はいずれも衝突直後に急増し、S-I1.0-Sh-H6 以外は最大応答値を示した後に緩やかに減少している。54kg 重錘に比べて 178 重錘のケースの角速度が小さい傾向にある。同じ運動量、同じエネルギーでも重錘質量が大きいほど角速度が小さい。

④ 重錘角速度

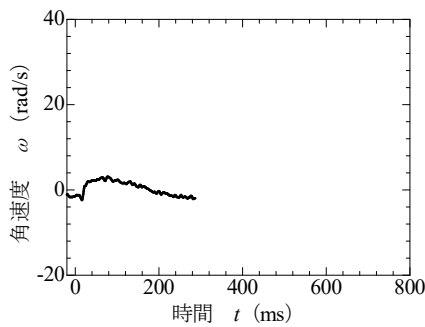
重錘角速度波形を図-4.24に示す。いずれも衝突直後に角速度が急増し、S-I1.0-Sh-H6 以外は最大値を示した後に緩やかに減少する。54kg 重錘は最大 10rad/s 程度であるが、178kg 重錘の S-I1.0-Sh-H6 以外のケースは 4rad/s 程度と小さい。重錘質量が大きいほど、回転しにくい傾向にある。



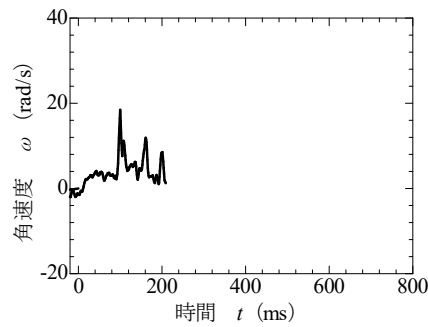
(a) S-I1.0-S-H2



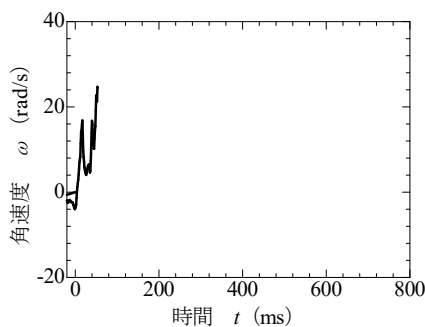
(b) S-I1.0-S-H6 [通過]



(c) S-I1.0-Sh-H0.55 (同じ運動量)



(d) S-I1.0-Sh-H1.82 (同じエネルギー)

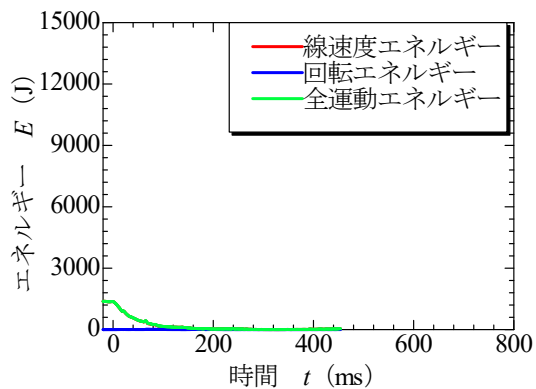


(e) S-I1.0-Sh-H6 (同じ高さ) [通過]

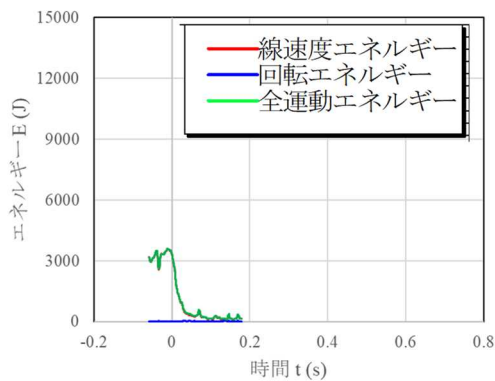
図-4.24 重錘角速度波形

⑤ 運動エネルギー

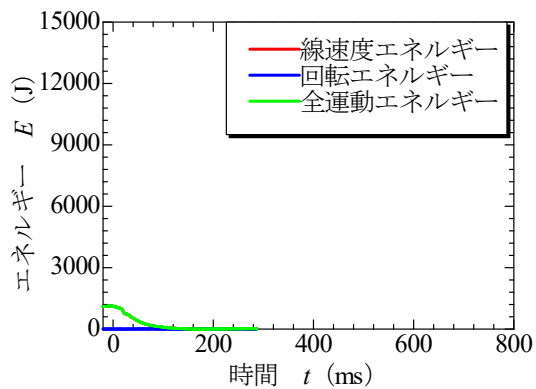
運動エネルギー波形を図-4.25に示す。線速度エネルギーに比べて回転エネルギーはいずれも小さい。通過した54kg重錘のS-I1.0-S-H6、貫通した178kgのS-I1.0-Sh-H6以外は緩やかに線速度エネルギーが減少している。



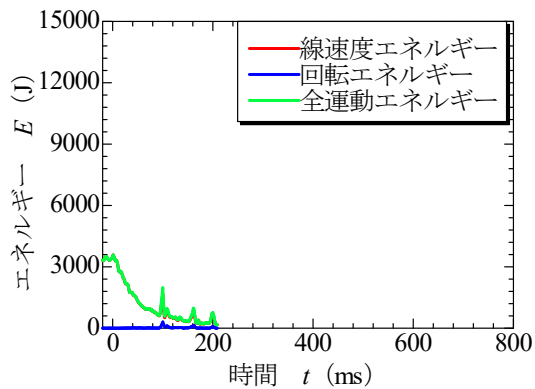
(a) S-I1.0-S-H2



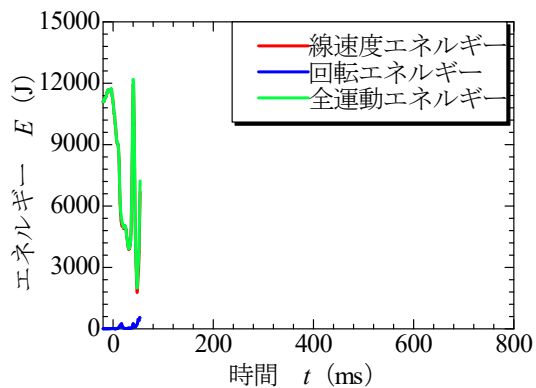
(b) S-I1.0-S-H6 [通過]



(c) S-I1.0-Sh-H0.55 (同じ運動量)



(d) S-I1.0-Sh-H1.82 (同じエネルギー)

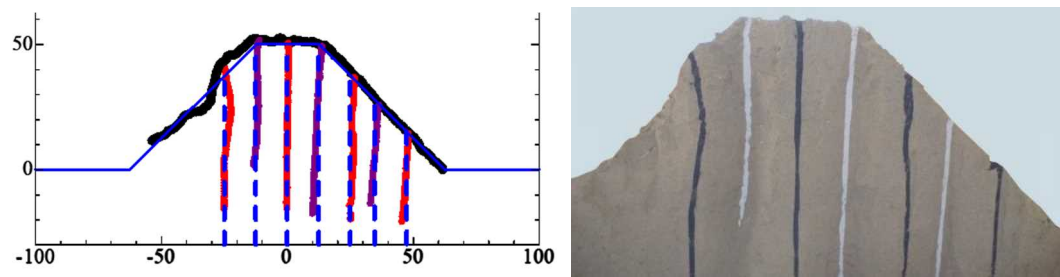


(e) S-I1.0-Sh-H6 (同じ高さ) [通過]

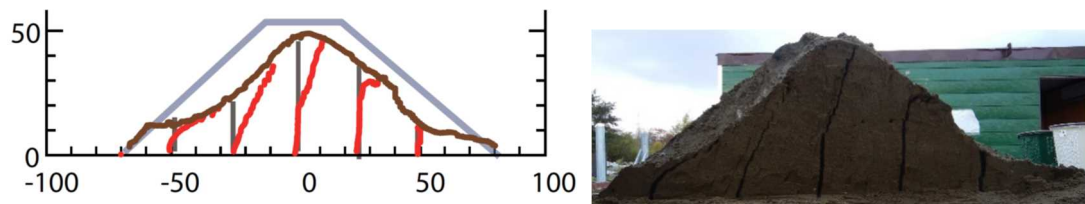
図-4.25 運動エネルギー波形

⑥ 破壊性状

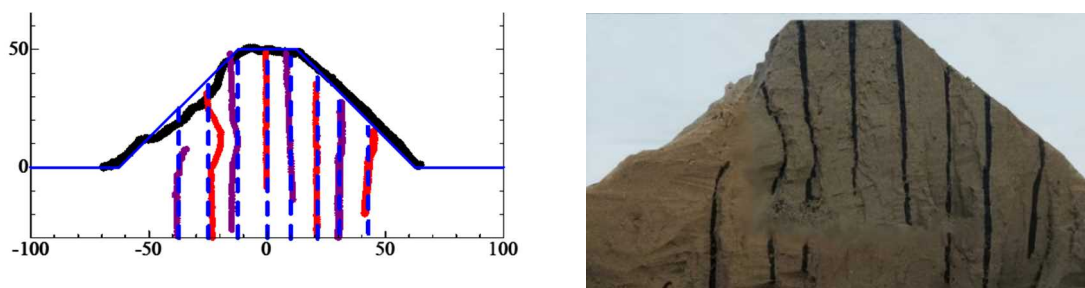
衝突断面における変状図および写真を図-4.26 に示す。54kg 重錘の S-I1.0-S-H2 は衝突部が若干変形し、内部の着色砂も衝突部が若干変形している。54kg 重錘の S-I1.0-S-H6 は衝突部周辺が大きく変形し、内部の着色砂の土堤底面から上方に向けて非衝突面側に曲がっている。178kg 重錘の S-I1.0-Sh-H0.55 は、同じ運動量の 54kg 重錘の S-I1.0-S-H6 よりも変形量が小さい。内部の着色砂は衝突部のみ湾曲している。178kg 重錘の S-I1.0-Sh-H1.82 は、同じエネルギーの 54kg 重錘の S-I1.0-S-H6 よりも変形量が大きい。内部の着色砂には土堤底面付近にせん断ズレが発生している。



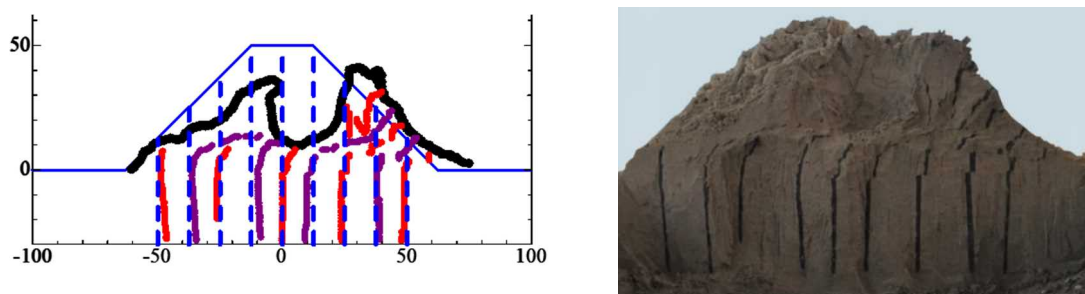
(a) S-I1.0-S-H2



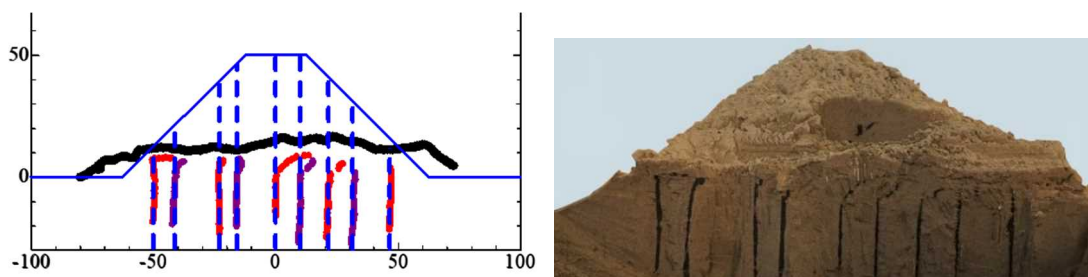
(b) S-I1.0-S-H6 [通過]



(c) S-I1.0-Sh-H0.55 (同じ運動量)



(d) S-I1.0-Sh-H1.82 (同じエネルギー)



(e) S-I1.0-Sh-H6 (同じ高さ) [通過]

図-4.26 衝突断面における変状図および写真 (単位: mm)

4. 3 解析概要

(1) 解析ケース

解析ケース一覧を表-4.10に示す。

表-4.10 解析ケース一覧

No.	ケース名	材料	勾配	重錘形状	重錘質量 (kg)	落下高さ (m)	力積 (kg・m/s)	エネルギー (J)
1	S-S1.5-S	砂	1:1.5	球体	-	-	-	-
2	S-S1.5-P	砂	1:1.5	多面体	-	-	-	-
3	S-S1.0-S	砂	1:1.0	球体	-	-	-	-
4	C-S1.5-S	粘性土	1:1.5	球体	-	-	-	-
5	G-S1.5-S	碎石	1:1.5	球体	-	-	-	-
1, 2	S-I1.5-S-H*-R	砂	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
3 -	S-I1.0-S-H*	砂	1:1.0	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
4~6	S-I1.0-Sh-H*	砂	1:1.0	球体 (重)	178	0.55 1.82 6	<u>585</u> 1063 1931	960 <u>3177</u> 10474
7~8	C-I1.5-S-H*	粘性土	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177
9~12	C-I1.0-Sh-H*	粘性土	1:1.0	球体 (重)	178	0.18 0.55 6 7	<u>334</u> <u>585</u> 1931 2086	314 960 10474 12219
13, 14	G-I1.5-S-H*	碎石	1:1.5	球体	54	2 6	338 586	1059 3177

注) ケース名の*は落下高さ

(2) 解析モデル

本再現解析には、実務設計への採用を念頭に、2次元DEM解析を用いることとした。既往の研究では、DEM解析により、実際に土堤が落石を捕捉した事例を再現することができ、土堤の落石衝突現象に適応可能とされている。実験の再現モデル及び土粒子モデルを図-4.27に示す。解析に使用した土粒子モデルは、既往の研究で地盤の圧縮性や強度を再現するのに最適であるとされる非円形粒子を採用した。非円形粒子は同一径の3つの円の中心を正三角形（1辺の長さは円の半径と同等）で結びその外接円を直径 D としている。基礎地盤の側面及び底面には、実験と同様の条件となるように変位が固定された固定端の境界条件とした。

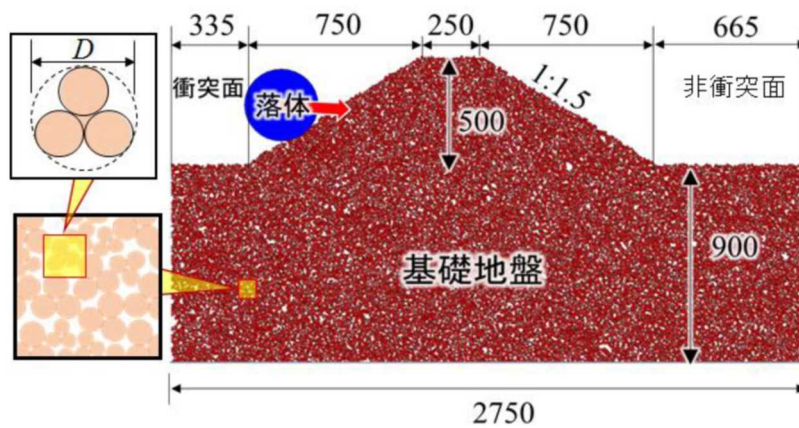


図-4.27 実験の再現解析モデル、土粒子モデル（単位：mm）

DEM 解析に用いた接触モデルを図-4.28 に示す。本解析では、既往の再現解析同様の接触モデル (Voigt モデル) を用い、粒子間を仮想的なボンド材料を用いて接着するボンド要素を用いて土の粘着力を表現することを試みた。ボンド要素は岩やコンクリートのような結合した材料の表現にも用いられており、ボンド部分は曲げ剛性を有するモデルである。接触部にモーメント M_b を伝達し、ボンド内の直応力 σ_b の最大引張応力がボンド強度 s_b まで耐えられるとする、ボンド要素 (直径 D_b) を考える。接触面法線方向に、引張力である接触力 f_{cn} に起因する垂直応力 f_{cn}/D_b と曲げモーメント M_b による最大垂直応力 (M_b/I_b) $D_b/2$ の和によって、ボンド応力の最大値 σ_{bmax} が算出され、それが、引張強度 s_b に達すると、ボンド要素が破断する。ここで、 I_b はボンド要素の断面二次モーメントである。本解析では、簡略化のために D_b はモデル化された土の最小粒径とした。

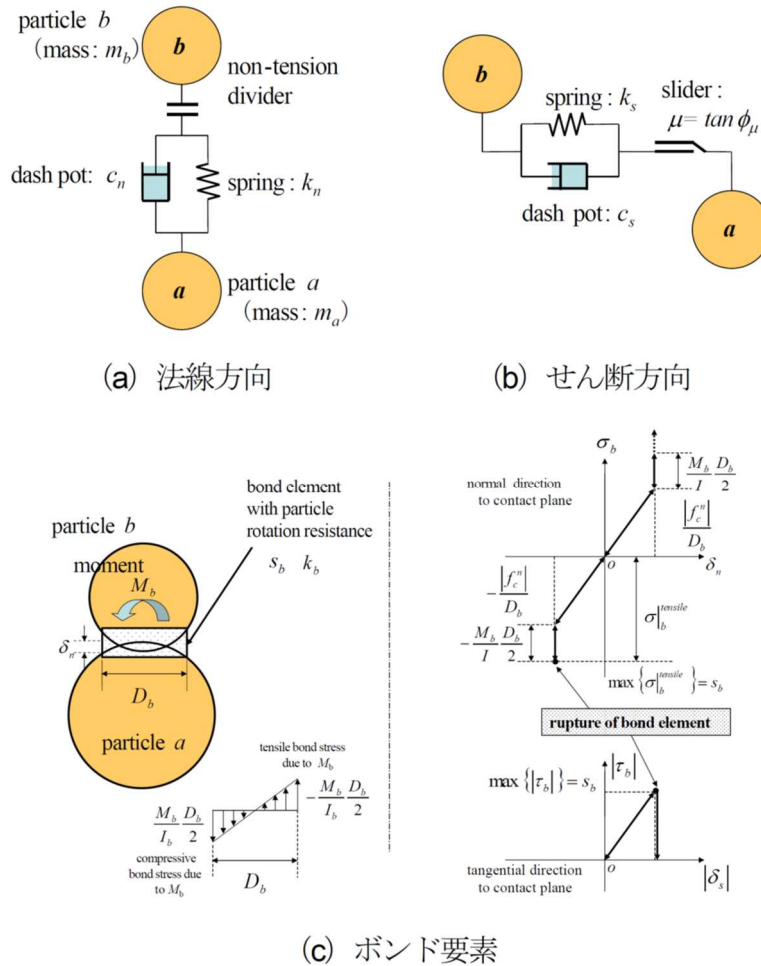


図-4.28 接触モデル

(3) 解析パラメータ

解析パラメータを表-4.11～表-4.13に示す。粒子直径は、最大粒径が落体直径の1/10以下が望ましいとした既往の研究を参考に、砂、粘性土では最大粒径を落体直径のおよそ1/20倍の大きさである0.01590mとし、最小粒径をその半分の0.00795mとした。砕石については最大粒径を砂、粘性土の4倍の大きさである0.06360mとし、最小粒径は最大粒径との幅を大きくするため、最大粒径の1/5である0.01272mとした。ばねには線形弾性ばねを用いており、地盤内部の応力伝播速度と合うように設定した。粘性係数は臨界減衰となるように減衰定数 $h=1$ とした。初期地盤の間隙比 e は既往の再現解析で用いた値と同じ $e=0.37$ とした。

表-4.11 砂の解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{max}	0.0300
	最小粒径 D_{min}	0.0150
	平均粒径 D_{50}	0.0225
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	k_s (N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_μ (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.0150
ボンドばね定数	k_b (N/m)	2.0×10^8
ボンド強度	s_b (Pa)	0.6×10^6

表-4.12 粘性土の解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{max}	0.0300
	最小粒径 D_{min}	0.0150
	平均粒径 D_{50}	0.0225
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	1.0×10^7
接線方向ばね定数	k_s (N/m)	2.5×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_μ (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.0150
ボンドばね定数	k_b (N/m)	1.0×10^8
ボンド強度	s_b (Pa)	0.6×10^6

※ばね定数を砂の半分の値として計算。粘着力は15kPaとした。

表-4.13 碎石の解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	基本設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{\max}	0.0636
	最小粒径 D_{\min}	0.0212
	平均粒径 D_{50}	0.0424
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	k_t (N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_μ (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.0150
ボンドばね定数	k_b (N/m)	2.0×10^8
ボンド強度	s_b (Pa)	0.6×10^6

※碎石は、最大粒子径を落体径の1/5、最小粒子径を落体径の1/15とした。

ボンド強度に関しては、既往の研究で実施した掘削解析と Culmann の斜面安定解析を参考にした。掘削解析では、ボンド強度をパラメトリックに変化させた水平地盤を作成し、微小の深さごとに掘削することで、各ボンド強度における水平地盤の限界自立高さを求めた。得られた限界自立高さから Culmann の斜面安定解析を参考にした図-4.29 の極限つり合い法を用いて粘着力を算出した。

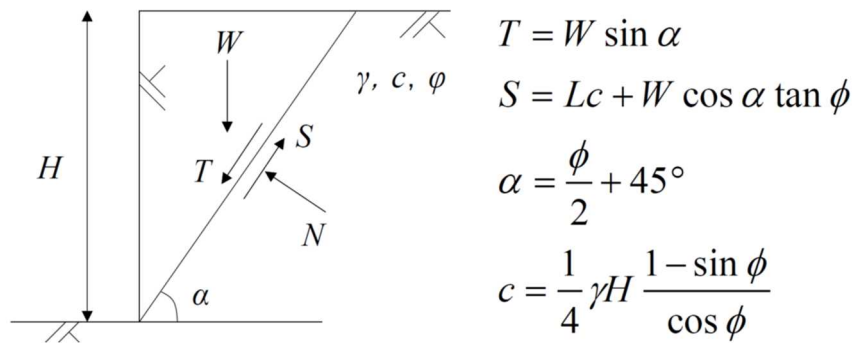


図-4.29 極限つり合い法の概要

その結果、図-4.30 のようにボンド強度と粘着力との間には線形関係が成り立つことが分かった。

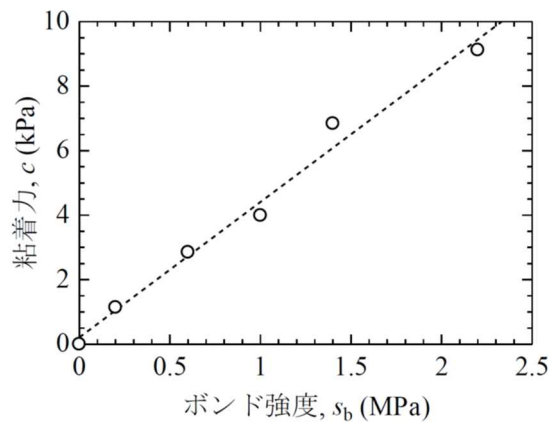


図-4.30 ボンド強度と粘着力との関係

本解析では掘削解析の水平地盤に引張クラックが発生する際に粘着力を算定できる下式を用いて砂の粘着力を約 3kPa と算定し、ボンド強度と粘着力との関係を用いてボンド強度を 0.6MPa と設定した。

$$c=1/2\times\gamma t\times H$$

ここに、 c : 粘着力 (kPa)、 γt : 湿潤単位体積重量 (kg/m^3)、 H : 引張クラックが発生する高さ (m)
 なお、湿潤単位体積重量を求める際の湿潤密度 ρ_t は実験に用いた土から得た $1510\text{kg}/\text{m}^3$ を用いた。また、引張クラックが発生する高さは、**図-4.31** に示す実験時の状況から 40cm と判断した。

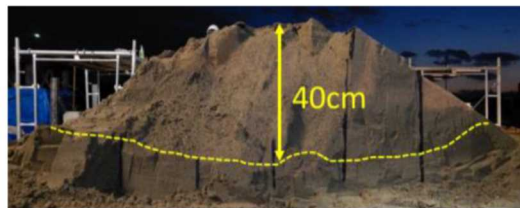


図-4.31 実験での引張クラック例

また、碎石の粘着力は砂と同じ 3kPa とし、粘性土の粘着力は、引張クラックが入っていなかったことから 12kPa、15kPa、18kPa の解析を行い、土堤の最終形状が実験と最も近くなった 15kPa とした。参考として、粘着力が 12kPa、15kPa、18kPa の場合の土堤の最終形状を表したものを**図-4.32** に示す。ばね定数について、碎石のばね定数は砂と同じ値とし、粘性土については、簡易貫入試験の結果、粘性土の N_a 値が砂のおおよそ 1/2 であったことから、ばね定数も砂の半分の値とした。なお、落体の形状、質量、入射条件については実験と同じになるように設定している。

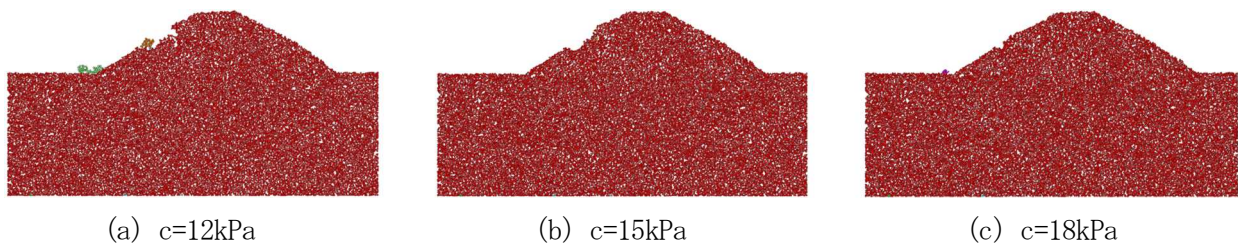


図-4.32 土堤最終形状

4. 4 解析結果

(1) 静的載荷実験の再現解析

① 解析ケース一覧

本項の検討に用いた解析ケース一覧を表-4.14に示す。

表-4.14 実験ケース一覧

ケース名	材料	勾配	重錘形状
S-S1.5-S	砂	1:1.5	球体
S-S1.5-P	砂	1:1.5	多面体
S-S1.0-S	砂	1:1.0	球体
C-S1.5-S	粘性土	1:1.5	球体
G-S1.5-S	碎石	1:1.5	球体

② 荷重変位関係

荷重変位関係を図-4.33～図-4.37に示す。図-4.33に示すS-S1.5-Sの場合、実験では300mmほどの貫入量で急激に荷重が減少しているが、解析では140mmから200mmほどの貫入量で緩やかに荷重が減少している。荷重の値は、実験が8kNから6kNほど、解析が1kNから0kNほどと、値、減少量ともに差がみられ、解析の方が小さい貫入量で荷重が減少する結果となった。

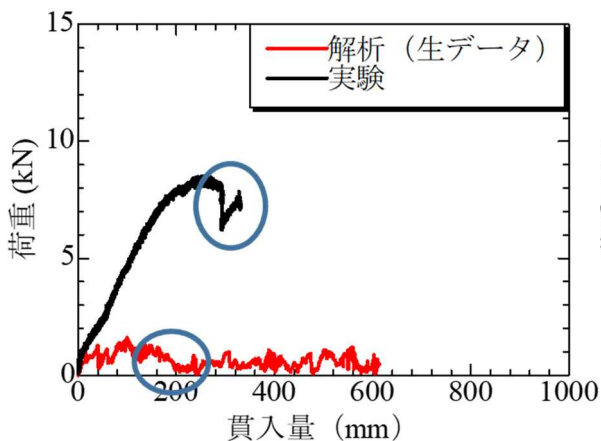


図-4.33 荷重変位関係 (S-S1.5-S)

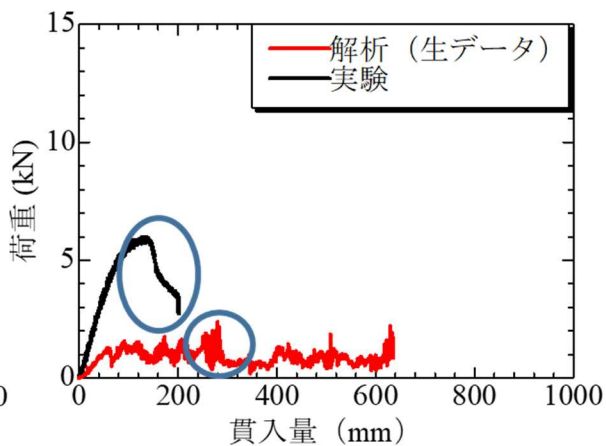


図-4.34 荷重変位関係 (S-S1.0-S)

図-4.34 に示す S-S1.0-S の場合、実験では 140mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少（およそ 2kN）し、緩やかな減少に転じたのち、再度急激に減少している。解析では 280mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している（およそ 1.5kN）。荷重の値は、実験が 6kN から 2.5kN ほど、解析が 2kN から 0.5kN ほどと、値、減少量ともに差がみられる。実験結果で比べると、法勾配 1.5 割と比べ、荷重のピーク値は 2kN ほど低く、荷重が急減するときの貫入量についても 150mm ほど小さい値となった。解析結果で比べると、実験結果ほど顕著な違いはみられないが、荷重減少時の貫入量は法勾配 1 割のほうが 120mm ほど大きい値となった。

図-4.35 に示す S-S1.5-P の場合、実験では 220mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少（およそ 1kN）し、その後増加している。解析では 160mm から 200mm ほどの貫入量で緩やかに荷重が減少している（およそ 1kN）。荷重の値は、実験が 5kN から 4kN ほど、解析が 2kN から 1kN ほどと、値に差がみられるが、減少量はほぼ一致する。実験では 360mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少（およそ 1kN）している。球体と比べて荷重の変化が緩やかで、荷重の減少も球体ほど急激ではない。

図-4.36 に示す C-S1.5-S の場合、実験では 160mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している（およそ 1.5kN）。解析では 160mm から 240mm ほどの貫入量で緩やかに荷重が減少しているが、減少した荷重はおよそ 1.5kN であり、実験とほぼ同じ減少量となっている。荷重の値は、実験が 8kN から 6.5kN ほど、解析が 3.5kN から 5kN ほどと、差がみられる。実験では 460mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している（およそ 1kN）。解析では 500mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している（およそ 1kN）。荷重の値は、実験が 10.5kN から 9.5kN ほど、解析が 3kN から 2kN ほどと、差がみられる。

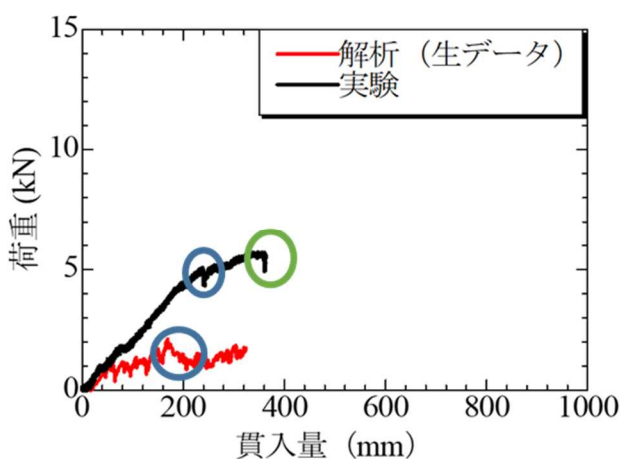


図-4.35 荷重変位関係 (S-S1.5-P)

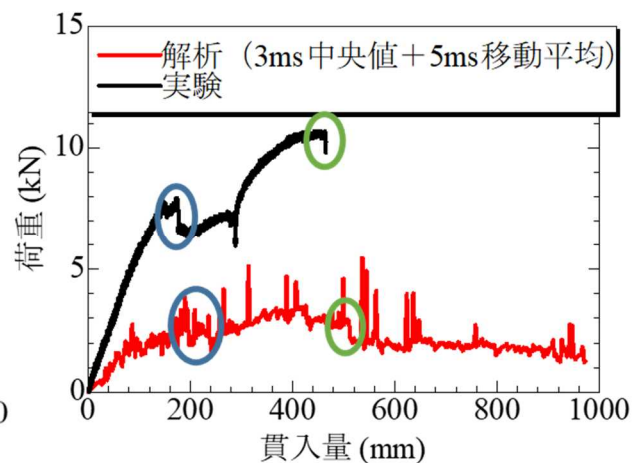


図-4.36 荷重変位関係 (C-S1.5-S)

図-4.37 に示す G-S1.5-S の場合、実験では 260mm から 320mm ほどの貫入量で急激な荷重の増減が繰り返されている。解析では 220mm から 360mm ほどの貫入量で急激な荷重の増減しが繰り返されている。荷重の値は、実験が 11kN から 9.5kN ほど、解析が 4kN から 1kN ほどと、差がみられるが、減少量は概ね一致する。実験では 460mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している。解析では 460mm から 480mm ほどの貫入量で急激に荷重が減少している。荷重の値は、実験が 9.5kN から 8.5kN ほど、解析が 3kN から 0.5kN ほどと、差がみられ、減少量についても差がみられる。

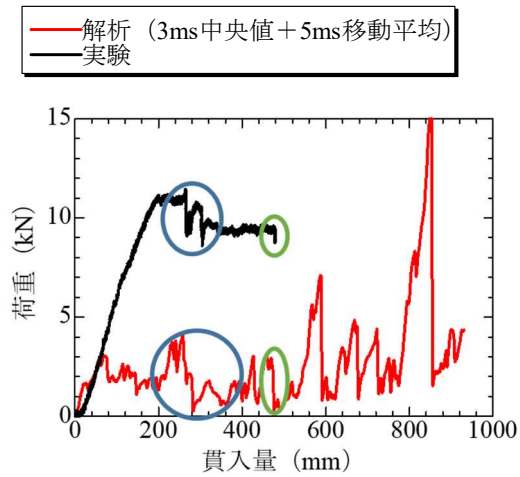


図-4.37 荷重変位関係 (G-S1.5-S)

③ 離散化図

S-S1.5-Sの離散化図を図-4.38に示す。なお、図横の数値は経過時間である。貫入量の増加に従い重錘周辺の粒子が離散化している状況が確認できる。また、土堤底面においても離散化が確認されることから、押抜き破壊は再現されている。しかしながら、荷重変位関係にもあるとおり荷重レベルが大きく異なることから、他のケースと同様に荷重抵抗機構を再現していないものと考えられる。

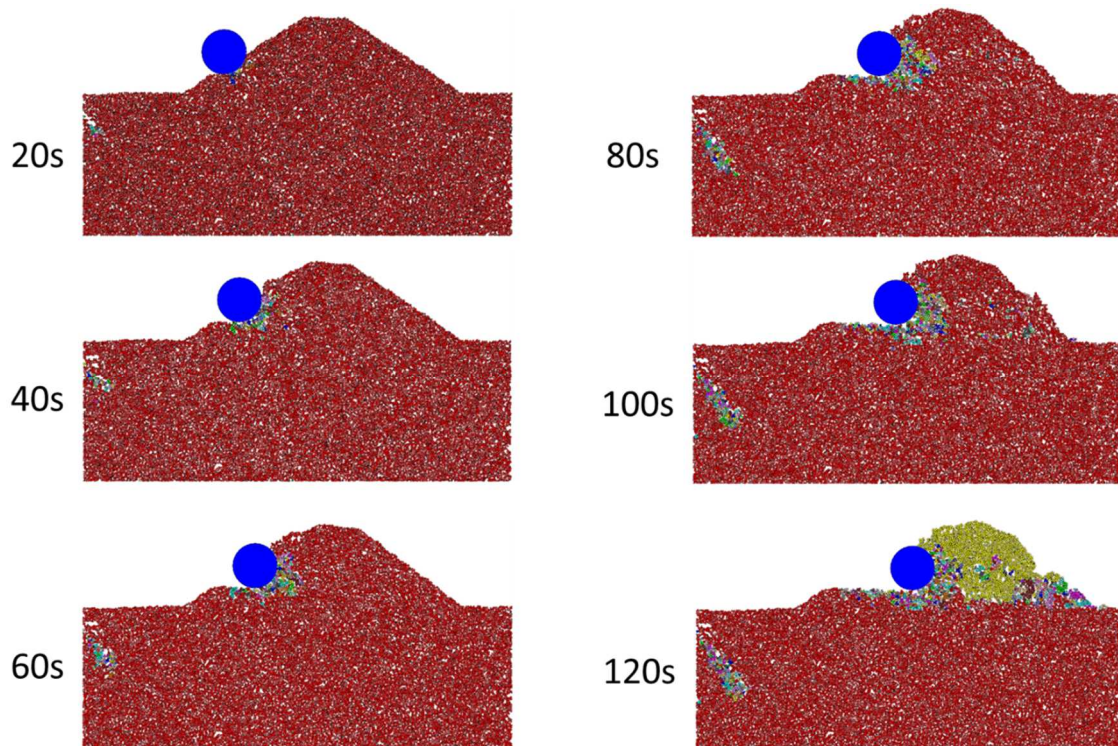


図-4.38 離散化図 (S-S1.5-S)

S-S1.0-Sの離散化図を図-4.39に示す。なお、図横の数值は経過時間である。他のケースよりも貫入量が小さい段階で土堤底面付近にて離散化が進んでいることは表現されているものの、荷重変位関係にもあるとおり荷重レベルが大きく異なることから、他のケースと同様に荷重抵抗機構を再現していないものと考えられる。

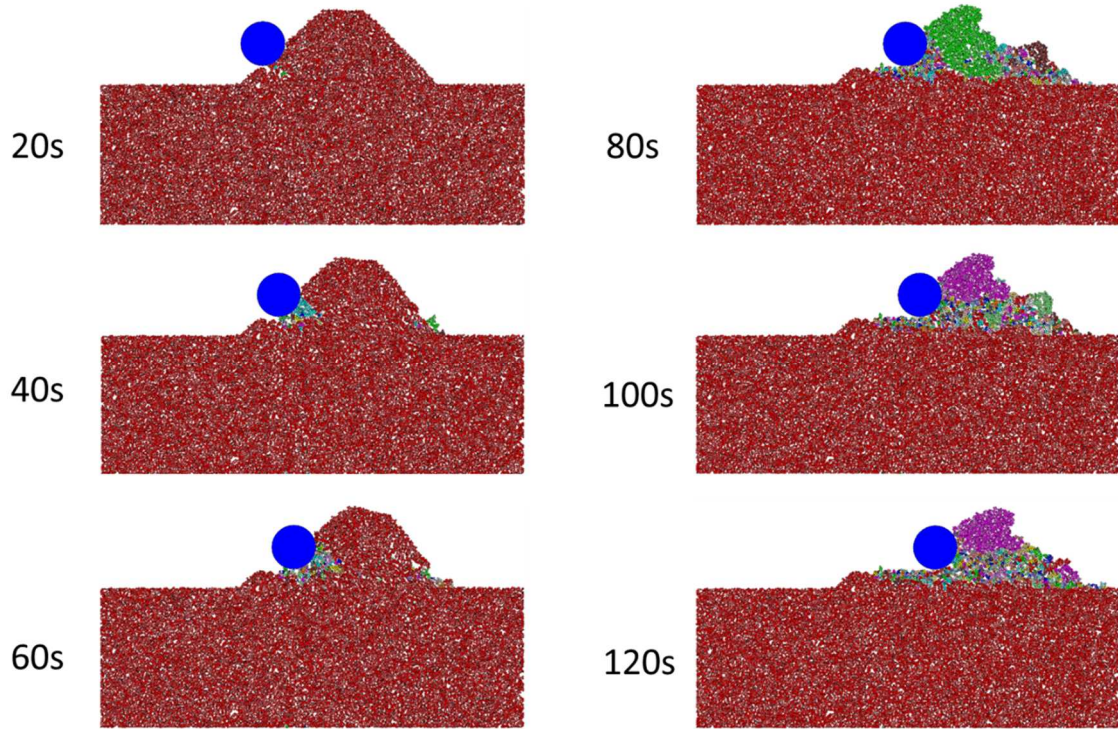


図-4.39 離散化図 (S-S1.0-S)

S-S1.5-Pの離散化図を図-4.40に示す。なお、図横の数値は経過時間である。多面体もすべり線まで再現できておらず、荷重変位関係にもあるとおりの荷重レベルが大きく異なることから、他のケースと同様に荷重抵抗機構を再現していないものと考えられる。

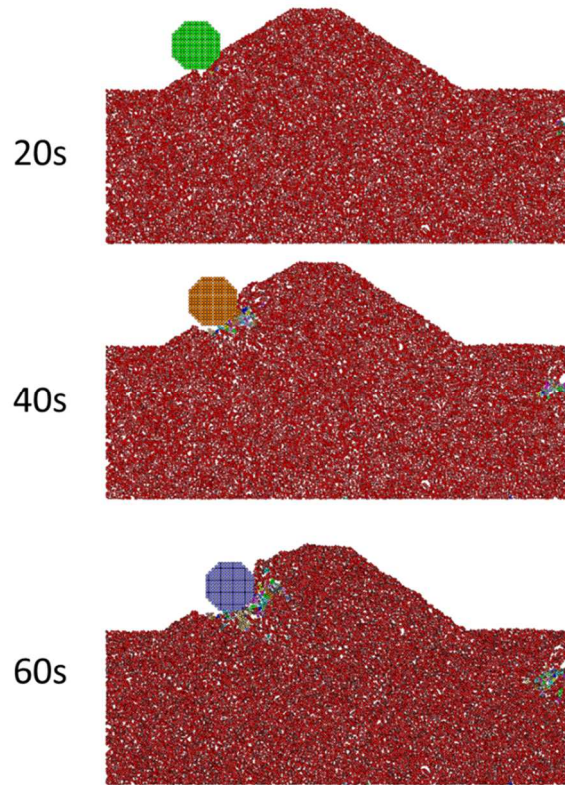


図-4.40 離散化図 (S-S1.5-P)

C-S1.5-S の離散化図を図-4.41 に示す。なお、図横の数值は経過時間である。バネ定数は砂の半分、粘着力は5倍としているため、砂や碎石よりも離散化が少なく、土塊が一体化した挙動を示す。しかしながら、荷重変位関係にもあるとおり荷重レベルが大きく異なることから、他のケースと同様に荷重抵抗機構を再現していないものと考えられる。

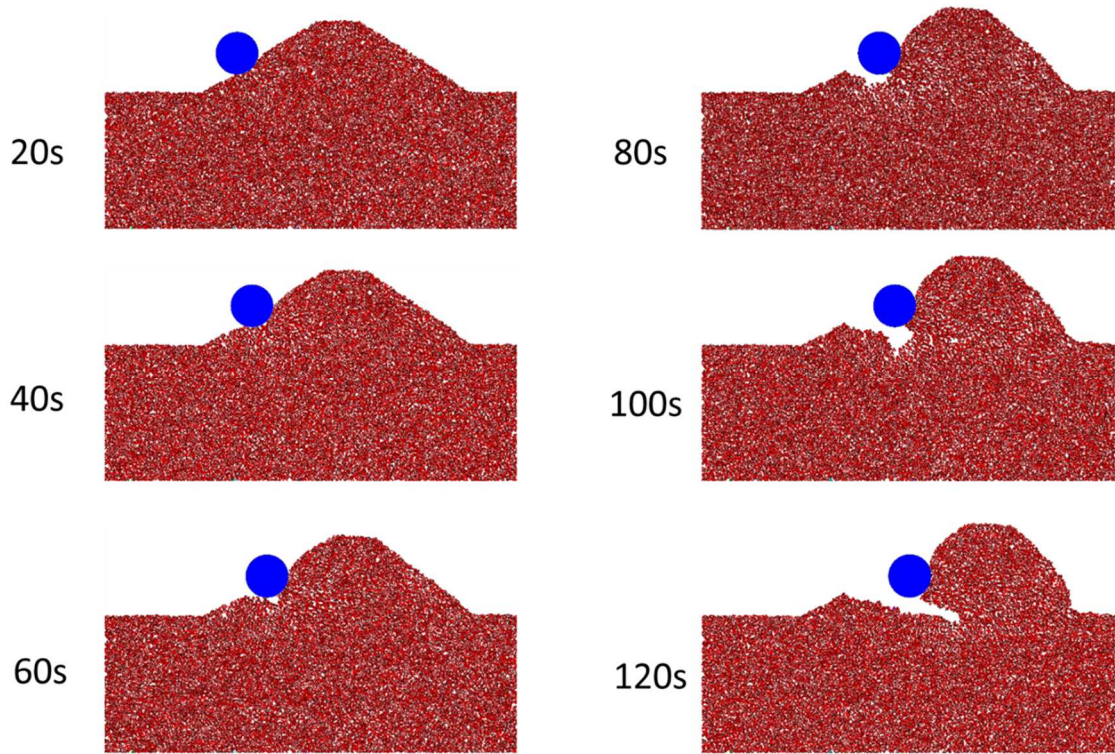


図-4.41 離散化図 (C-S1.5-S)

G-S1.5-Sの離散化図を図-4.42に示す。なお、図横の数值は経過時間である。粒子直径は、最大径を砂の2倍程度、最小径を1.5倍程度として碎石の挙動の再現を試みたが、砂よりも離散化する程度が小さい傾向となった。しかしながら、荷重変位関係にもあるとおりの荷重レベルが大きく異なることから、他のケースと同様に荷重抵抗機構を再現していないものと考えられる。

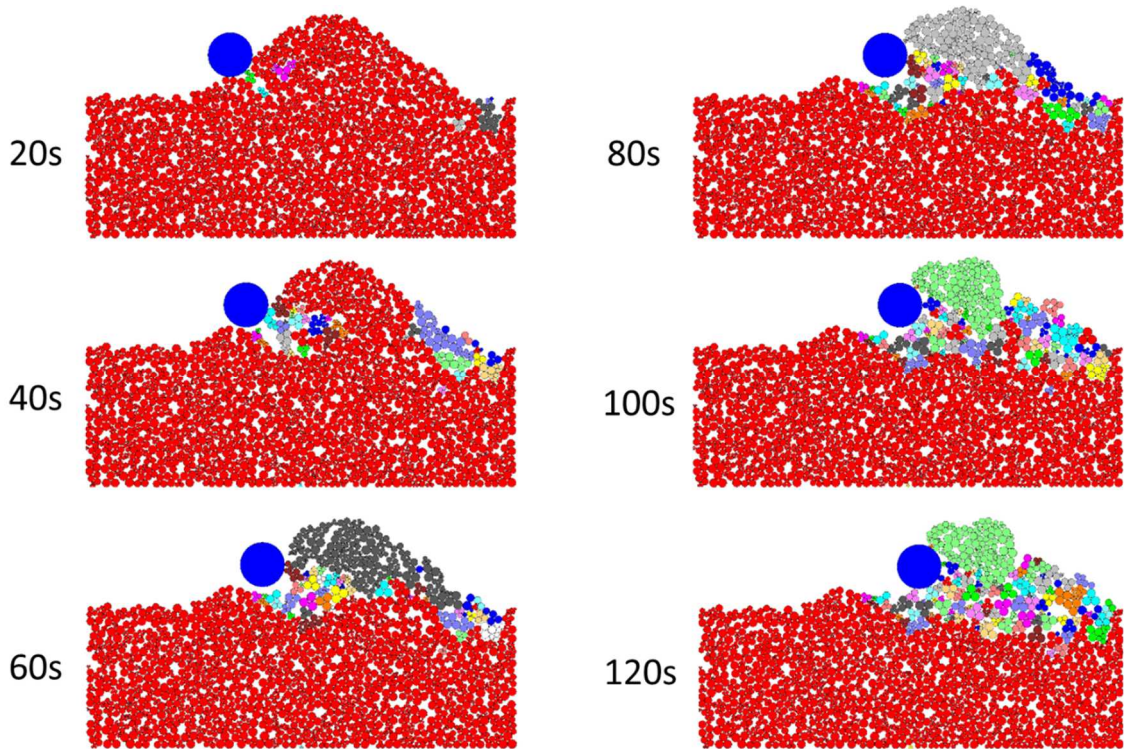


図-4.42 離散化図 (G-S1.5-S)

(2) 衝撃実験の再現解析

1) 材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響の検討 (その1)

① 解析ケース一覧

土堤材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。ここでは、質量が 54kg の重錘を用いた実験を対象とする。検討に用いた実験ケースを表-4.15 に示す。

表-4.15 解析ケース一覧

ケース名	材料	勾配	重錘	設定落下 高さ (m)	設定衝突 速度 (m/s)	設定 エネルギー (J)	実験 結果
S-I1.5-S-H2-R	砂	1:1.5	球体 54kg	2	6.263	1,059	捕捉
S-I1.5-S-H6-R	砂	1:1.5	球体 54kg	6	10.848	3,177	通過
C-I1.5-S-H2	粘性土	1:1.5	球体 54kg	2	6.263	1,059	捕捉
C-I1.5-S-H6	粘性土	1:1.5	球体 54kg	6	10.848	3,177	捕捉
G-I1.5-S-H2	碎石	1:1.5	球体 54kg	2	6.263	1,059	捕捉
G-I1.5-S-H6	碎石	1:1.5	球体 54kg	6	10.848	3,177	通過

② 重錘軌跡

重錘軌跡図を図-4.43に示す。砂の場合、土堤衝突直後に土堤に貫入後、法面を駆け上がるような落体挙動は再現解析においても表現できている。しかし、実験と比べて駆け上がる勾配は緩やかで、貫入量が大きくなっており、土堤を破壊しやすい挙動となっている。また、捕捉状況は実験と一致している。粘性土の場合、実験では土堤衝突直後に土堤に衝突後、上方に跳ね上がる挙動を示しているが、解析は跳ね上がる挙動を示していない。貫入量が実験値よりも少ないうちに駆け上がる挙動となっており、押しつける土の量が少ないために落下高さ6mの解析値では重錘が通過したと考えられる。碎石の場合、砂や粘性土と比べて土堤衝突後の貫入量が小さくなるという挙動は再現解析においても表現できている。また、貫入後の跳ね上がる挙動も概ね表現できている。落下高さ2mの場合では捕捉状況が異なるが、これは実験と比べ跳ね上がりが小さくなったことや、実験においても天端に乘っかり停止し、かろうじて捕捉したことが要因であると考えられる。砂、粘性土と比べ捕捉性能が低いと考えられる点は実験と一致する。

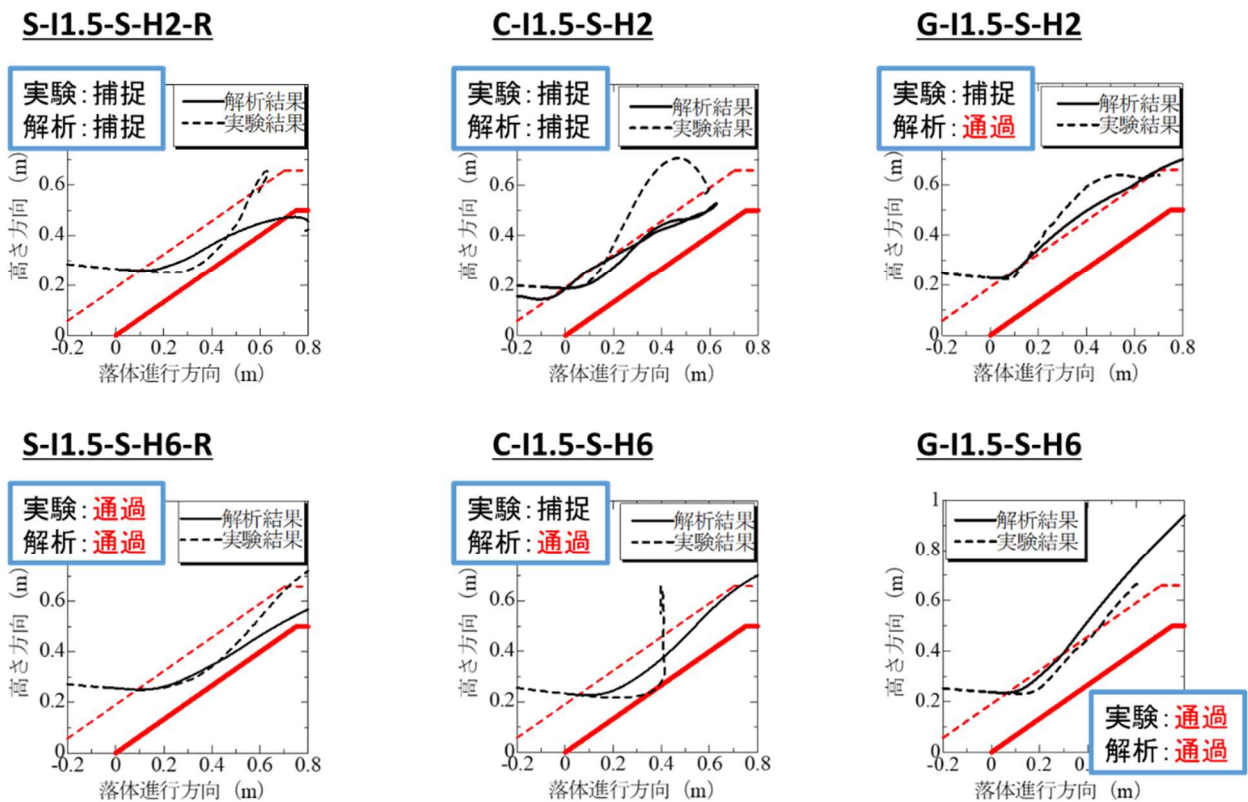


図-4.43 重錘軌跡図

③ 重錘速度

重錘速度を図-4.44に示す。砂の場合、水平速度は、衝突後、鉛直速度のピーク値をとる約40msまでは解析値と実験値はほぼ一致するが、約40ms以降は落下高さ2m、6mともに解析値が実験値を上回る。鉛直速度は、落下高さ2m、6mともに解析値が実験値を上回っているが、6mのほうが差は少ない。合成速度は、落下高さ2m、6mともに約40ms以降で、解析値が実験値を上回っている。

粘性土の場合、水平速度は、落下高さ2mにおいては実験値との大きな差はみられないが、6mの場合、衝突後、鉛直速度のピーク値をとる約40ms以降は解析値が実験値を大きく上回っている。これにより、解析では衝突後に土堤を駆け上がり、土堤全体が動くような挙動になると考えられる。鉛直速度は、水平速度とは逆に落下高さ2mにおいて実験値と大きな差がみられ、解析値は実験値を大きく下回る。合成速度は、落下高さ2mでは実験値のほうが、6mでは解析値のほうが衝突後の合成速度は大きくなっている。これは、落下高さ2mでは解析値の鉛直速度が実験値よりも小さく、6mでは解析値の水平速度が実験値よりも大きくなっているためであると考えられる。

砕石の場合、水平速度は、特に落下高さ2mでは、解析値が実験値を大きく上回っている。鉛直速度は、落下高さ6mではノイズが大きく、評価しにくいだが、落下高さ2mでは解析値と実験値とで大きな差はみられない。合成速度は、落下高さ2m、6mともに鉛直速度が最大値をとる約40ms以降は解析値が実験値を上回る傾向にある。

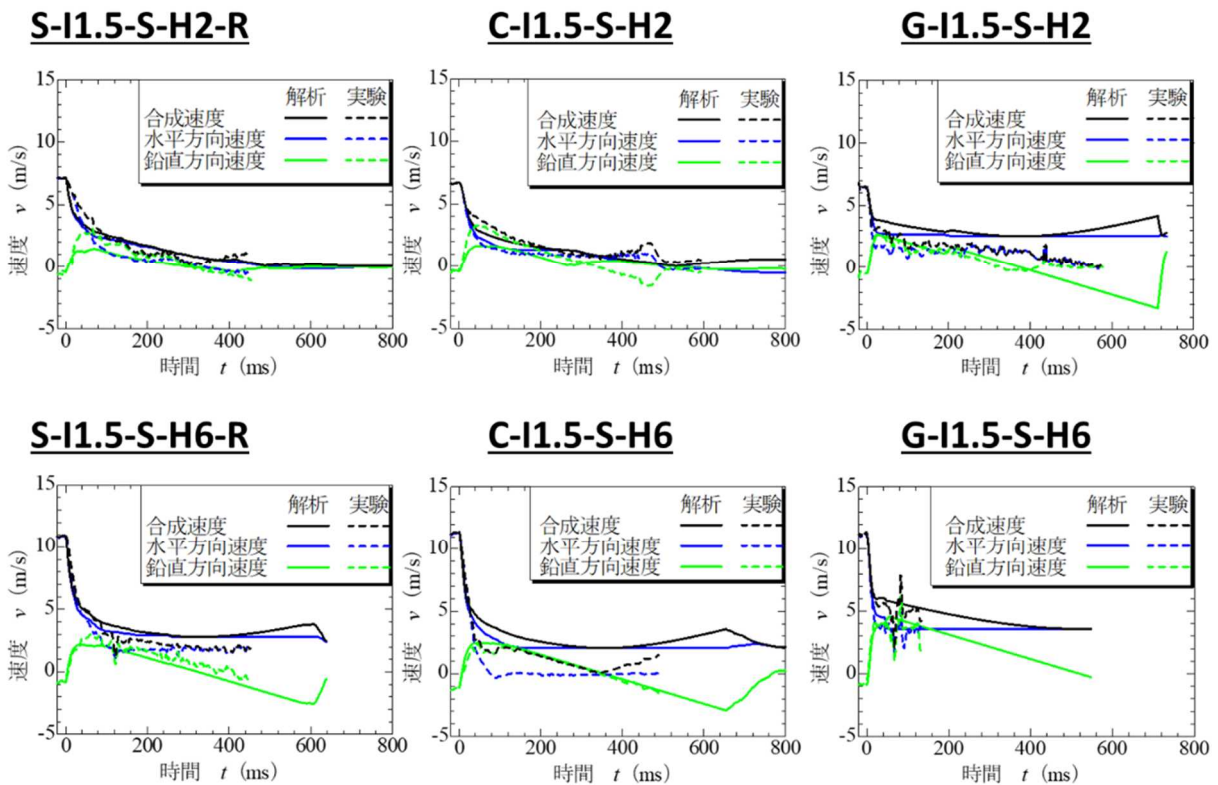


図-4.44 重錘速度波形

④ かけ上がり・貫入速度

かけ上がり・貫入速度波形を図-4.45に示す。かけ上がり速度は、砂では衝突直後は実験値が解析値を上回っているが、およそ70msを過ぎてからは解析値が実験値を上回ることがわかる。粘性土では落下高さ2mにおいては衝突後、かけ上がり速度は実験と解析で概ね一致している。一方、落下高さ6mでは砂と同じような傾向となるが、実験値と解析値のズレは砂よりも大きい。砕石では落下高さ2mでは解析値が実験値を上回っており、落下高さ6mでは実験値と解析値とで大きな差はみられない。

貫入速度の場合、砂では衝突直後は落下高さ2m、6mともに実験値が解析値を上回っているが、衝突後20～30msを過ぎてからは解析値が実験値を上回っている。粘性土では落下高さ2mでは衝突後約300msまでは解析値が実験値を上回っており、落下高さ6mでは砂と同様な傾向となっている。砕石では落下高さ2m、6mともに砂や粘性土ほど実験値と解析値とのズレはみられないが、実験値が解析値をやや上回っていることがうかがえる。

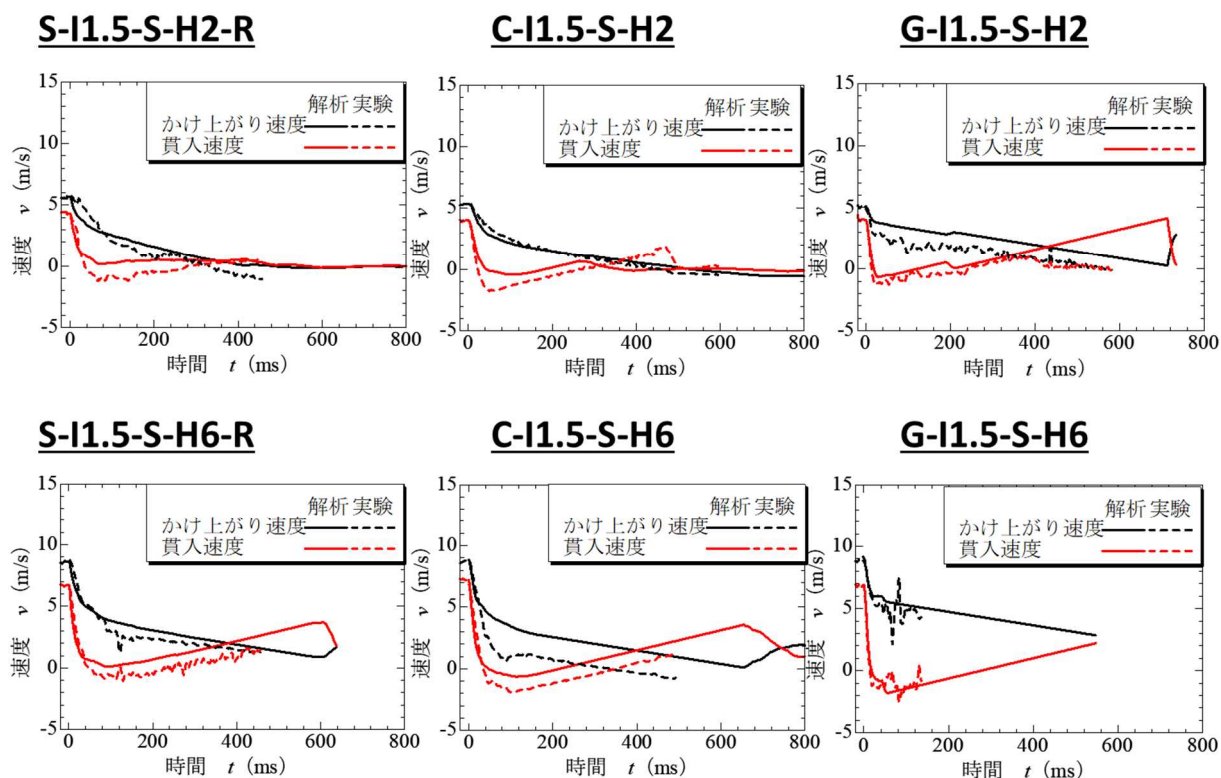


図-4.45 かけ上がり・貫入速度波形

⑤ 重錘衝撃力

重錘衝撃力波形を図-4.46 に示す。いずれのケースにおいても解析値は実験値と同様に落体衝突直後に比較的大きな衝撃力が発生していることがわかる。最大衝撃力は、実験値では碎石>粘性土>砂の順に、解析値では粘性土>碎石>砂の順に大きい。

砂では、落下高さ 2m、6m とともに解析値が実験値を上回っており、切り立ったような波形になっている。落下高さ 2m、6m とともに解析結果が実験結果を上回っている。

実験：2m・・・4～12kN、解析：2m・・・13kN

実験：6m・・・12～16kN、解析：6m・・・28kN

粘性土では、落下高さ 2m では解析値のほうが、落下高さ 6m では実験値のほうが衝撃力作用時間は長くなっている。落下高さ 2m、6m とともに解析結果が実験結果を上回っている。

実験：2m・・・8kN、解析：2m・・・24kN

実験：6m・・・20～24kN、解析：6m・・・56kN

碎石では、衝突瞬間の立ち上がり（一波目）は、ピーク値、立ち始める時刻、立ち終える時刻、衝撃力作用時間のすべてで碎石での解析値が実験値に近い波形となっている。砂や粘性土と比べ、解析値が実験値に近い値をとっている。

実験：2m・・・16～20kN、解析：2m・・・20kN

実験：6m・・・24～28kN、解析：6m・・・30kN

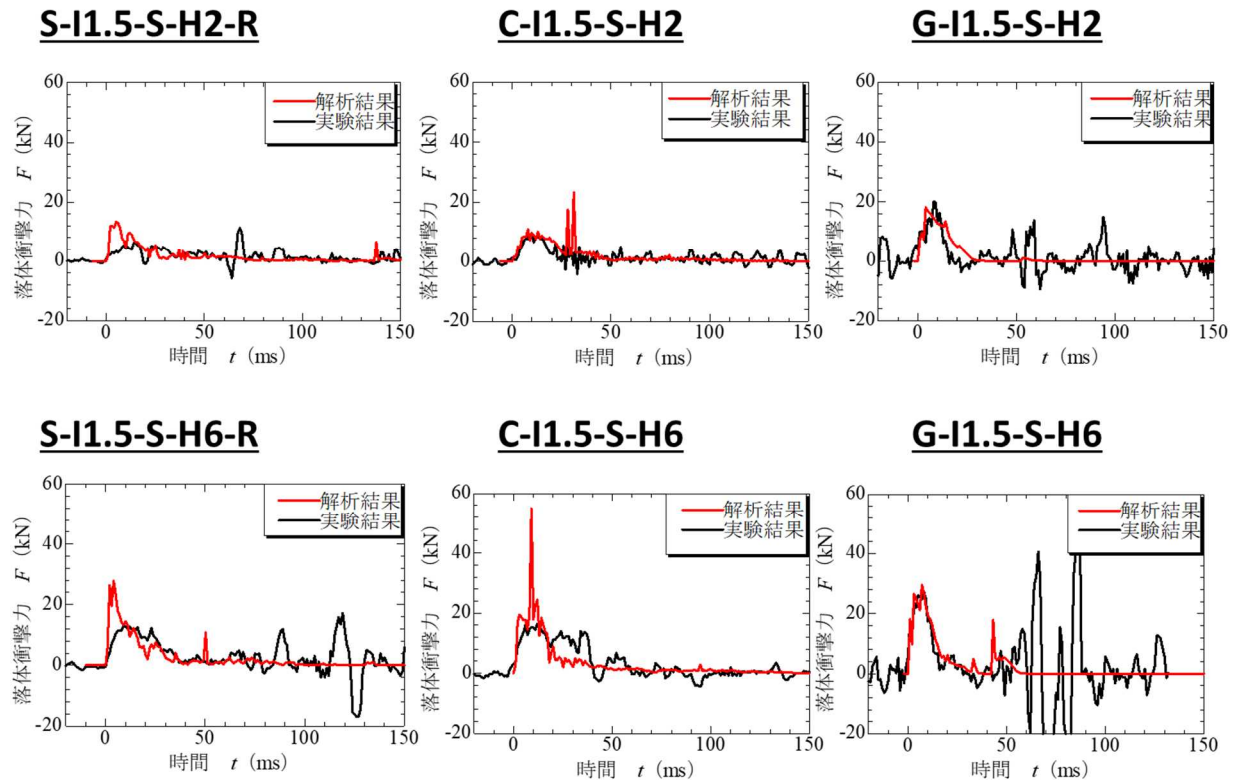


図-4.46 重錘衝撃力波形

⑥ 角速度およびエネルギー

角速度波形を図-4.47 に、エネルギー波形を図-4.48 に示す。いずれのケースも衝突後にエネルギーが急激に減少したのちに緩やかに減少していく過程が解析で概ね表現できているが、衝突後のエネルギーはどの材料でも解析値が実験値を上回っている。解析では、落下高さが大きくなるほどエネルギーが実験値よりも大きい値で急激なエネルギー減衰から緩やかなエネルギー減衰に移行する。衝突後の全運動エネルギーを実験と解析の差が大きい順に並べると、碎石>粘性土>砂となる。

砂の場合、落下高さ 2m の場合は衝突後 40ms 周辺での減衰の仕方に差はみられるが実験値と解析値との大きな差はなく、概ね精度よく解析できていると考えられる。落下高さ 6m の場合は、衝突後 100ms あたりでのエネルギー減衰の仕方に差がみられ、いずれのエネルギーも解析値が実験値を上回っている。粘性土の場合、落下高さ 2m では 40ms 周辺で、実験においてエネルギーが緩やかに減衰しているときにおいても解析では急激に減衰している箇所がみられるのに対し、落下高さ 6m では実験において急激に減少しているときにおいて解析では緩やかなエネルギー減衰となっている箇所がみられる。碎石の場合、落下高さ 2m、6m とともに回転エネルギーの実験値との差が大きい。

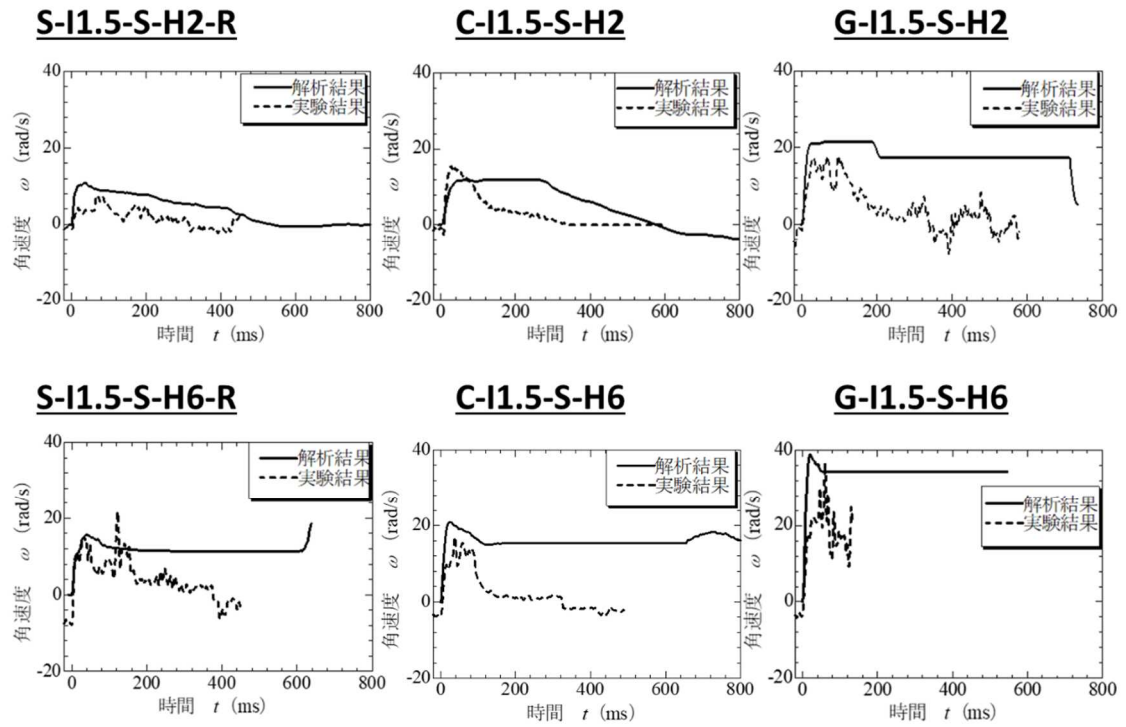


図-4.47 重錘角速度波形

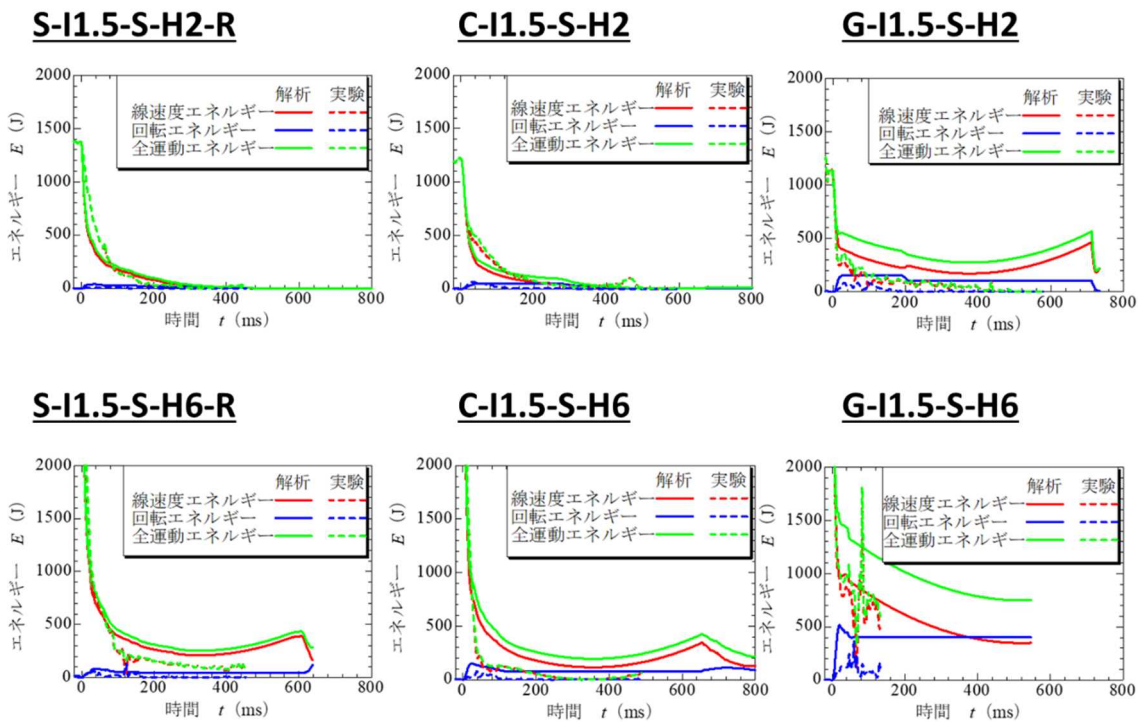


図-4.48 エネルギー波形

2) 材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響の検討 (その2)

①解析ケース一覧

土堤材料の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。ここでは、質量が 178kg の重錘を用いた実験を対象とする。検討に用いた解析ケースを表-4.16 に示す。

表-4.16 解析ケース一覧

ケース名	材料	勾配	重錘	設定落下 高さ (m)	設定衝突 速度 (m/s)	設定 エネルギー (J)	実験 結果
S-I1.0-Sh-H0.55	砂	1:1.0	球体 178kg	0.55	3.284	960	捕捉
S-I1.0-Sh-H1.82	砂	1:1.0	球体 178kg	1.82	5.975	3,177	捕捉
S-I1.0-Sh-H6	砂	1:1.0	球体 178kg	6.00	10.848	10,474	破壊・通過
C-I1.0-Sh-H0.18	粘性土	1:1.0	球体 178kg	0.18	1.879	314	捕捉
C-I1.0-Sh-H0.55	粘性土	1:1.0	球体 178kg	0.55	3.284	960	捕捉
C-I1.0-Sh-H6	粘性土	1:1.0	球体 178kg	6.00	10.848	10,474	破壊・捕捉
C-I1.0-Sh-H7	粘性土	1:1.0	球体 178kg	7.00	11.717	12,219	破壊・捕捉

②重錘軌跡

重錘軌跡図を図-4.49に示す。砂の場合、土堤衝突後、土堤法面を駆け上がることなく貫入し続ける特徴は解析でも概ね再現されている。S-I1.0-Sh-H1.82では重錘捕捉状況が異なっている。これは、土堤衝突後の水平速度が解析値のほうが大きいためであると考えられる。S-I1.0-Sh-H6では土堤衝突後、解析での軌跡は駆け上がりながら貫入を続けるようなものになっており、立ち上がりが法勾配よりも緩やかになっている。一方で実験での軌跡は衝突後に駆け上がることなく貫入し、その後法勾配とほとんど平行に駆け上がる軌跡となっている。粘性土の場合、すべての落下高さにおいて解析では実験よりも貫入が少ない状態で駆け上がる挙動となっている。落下高さ7mでは解析と実験とで落体の捕捉状況が異なるが、これは解析では貫入量が実験よりも少ないまま駆け上がる挙動をしたことでエネルギーが実験ほど減衰しなかったためだと考えられる。解析において、落下高さ6mと7mは法肩付近までの軌跡がほとんど同じになっている。

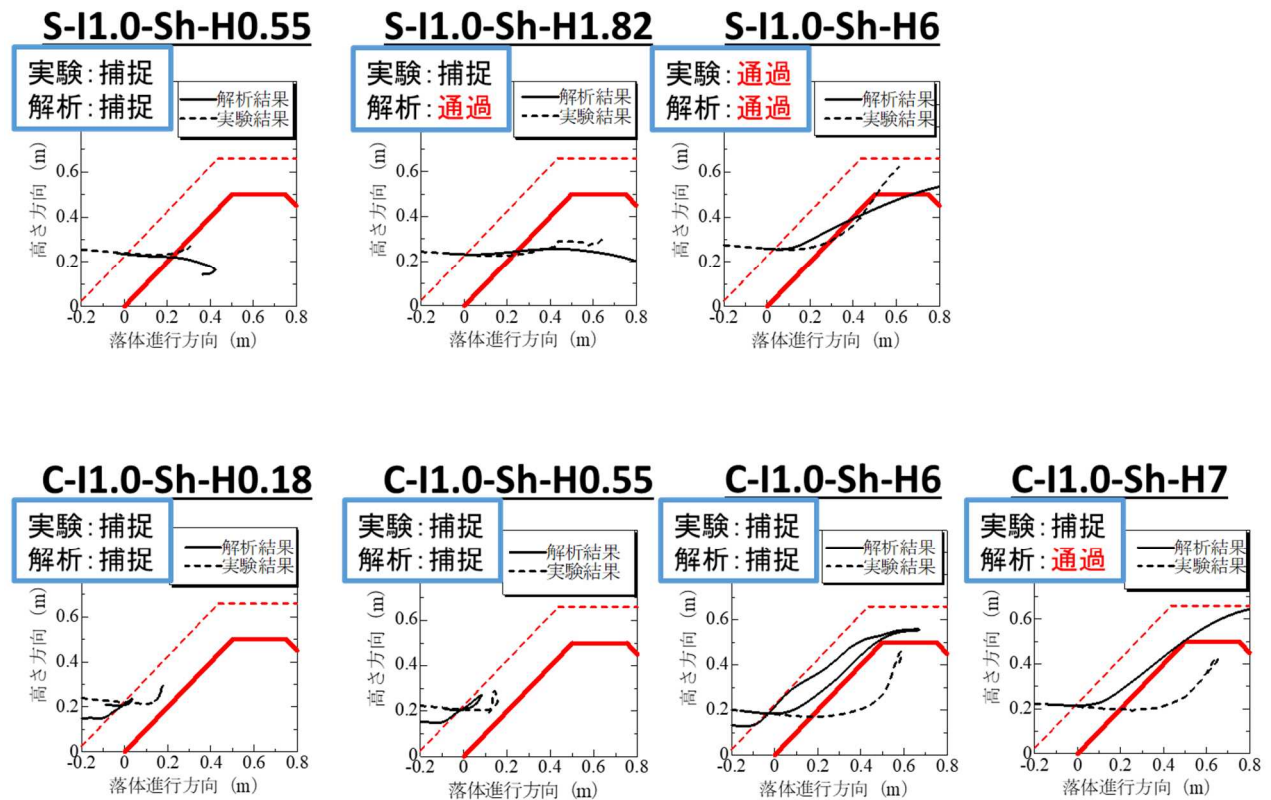


図-4.49 重錘軌跡図

③ 重錘速度

重錘速度波形を図-4.50に示す。砂の場合、すべての落下高さにおいて、解析での衝突後の水平速度が実験値を上回っていることがわかる。これにより、解析での軌跡は実験値よりも落体進行方向座標が大きくなるものだと考えられる。鉛直方向速度は解析と実験とで水平方向速度ほど大きな差はみられない(実験値でとがっている箇所はノイズだと考えられる)。粘性土の場合、落下高さ6m、7mでは衝突時から衝突後約60msまでは解析値の水平速度が実験値を下回っている。これにより解析では実験と比べて貫入しにくくなっており、軌跡が実験とずれていくと考えられる。落下高さ7mでは鉛直速度の解析値が実験値よりも大きい値をとっており、解析値と実験値のズレが他のケースよりも大きい。これにより落下高さ6mと7mとで貫入量に大きな差が出なかったと考えられる。

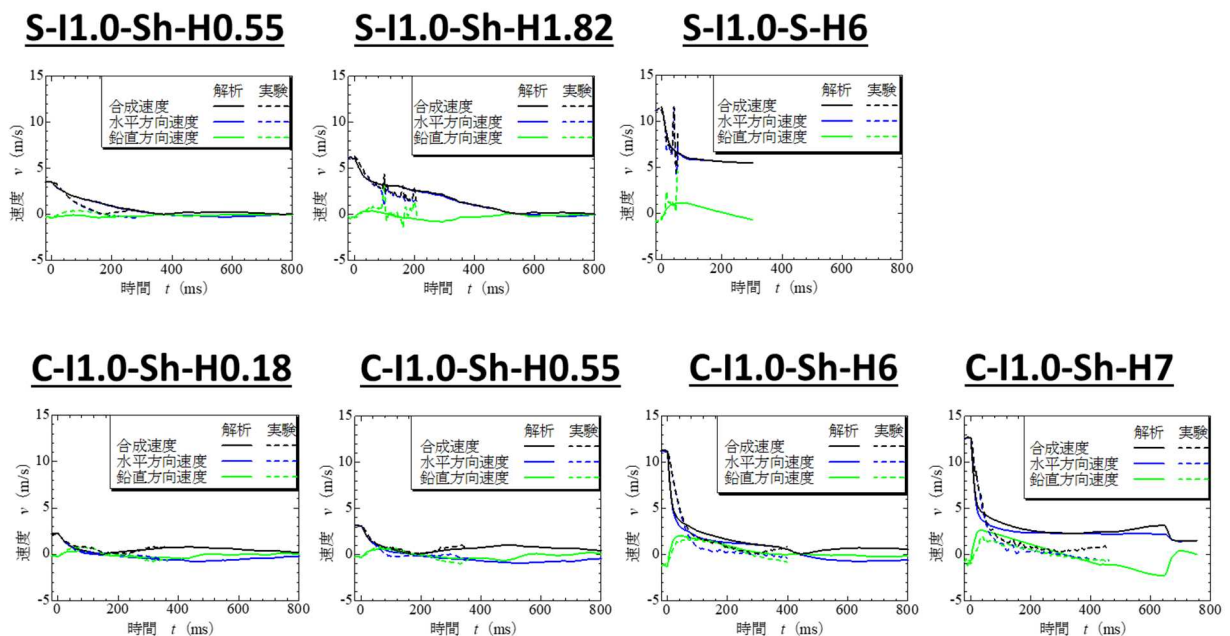


図-4.50 重錘速度波形

④ かけ上がり・貫入速度

かけ上がり・貫入速度波形を図-4.51 に示す。H1.82 までは砂および粘性土ともに概ね実験結果を再現している。H6 以降では、貫入直後の減少は再現しているものの、若干のズレが生じる。

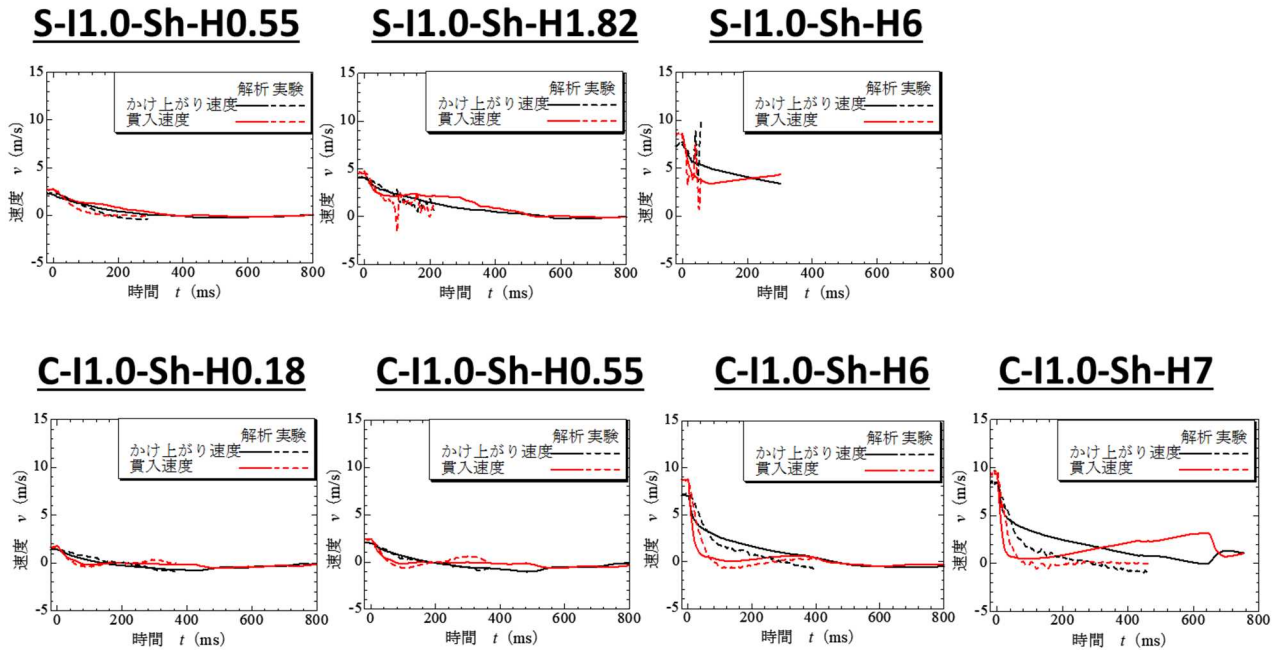


図-4.51 かけ上がり・貫入速度波形

⑤ 重錘衝撃力

重錘衝撃力波形を図-4.52に示す。同じ落下高さ(0.55m、6m)で比較すると、解析では粘性土よりも砂のほうが最大衝撃力は大きくなっている。砂の場合、ノイズが大きく、判別しにくい。解析では実験と同様にいずれのケースにおいても衝突直後に衝撃力は大きくなっている。また、解析の方が実験と比べて最大衝撃力が大きくなっている。粘性土の場合、解析では実験と同様にいずれのケースにおいても衝突直後に衝撃力は大きくなっている。0.55mのみ、最大衝撃力は解析値が実験値を上回っている。

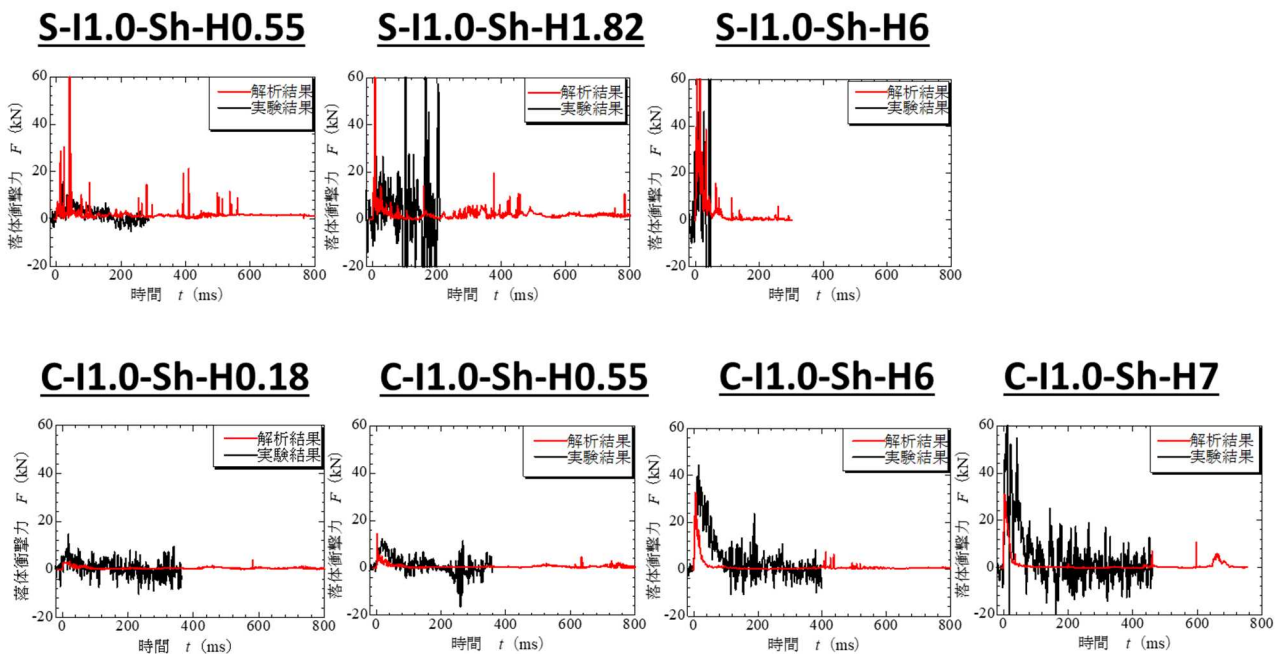


図-4.52 重錘衝撃力波形

⑥ 角速度およびエネルギー

角速度波形を図-4.53に、エネルギー波形を図-4.54に示す。いずれのケースにおいても実験と同様に土堤衝突直後にエネルギーが急激に減衰し、その後は緩やかに減衰していく様子が解析で概ね再現できている。しかし、砂、粘性土ともに衝突後のエネルギーは解析値の方が実験値よりも大きくなる傾向にあり、特に粘性土の落下高さ7mのケースでは実験値との差が特に大きくなっている。

砂の場合、質量が重いケースでは衝突後のエネルギー減衰に実験値と解析値で差がみられ、解析値が実験値を上回っている。粘性土の場合、落下高さ0.18m、0.55mでは実験値と解析値がほぼ一致しており、精度よく解析できているが、落体捕捉状況に差が出た落下高さ7mのケースでは実験値と解析値の差が大きく、解析では十分にエネルギーが減衰されていない。また、落下高さ6m、7mでは角速度の解析値が実験値を大きく上回っており、実験値と全運動エネルギーの値に差が出た一因であると考えられる。

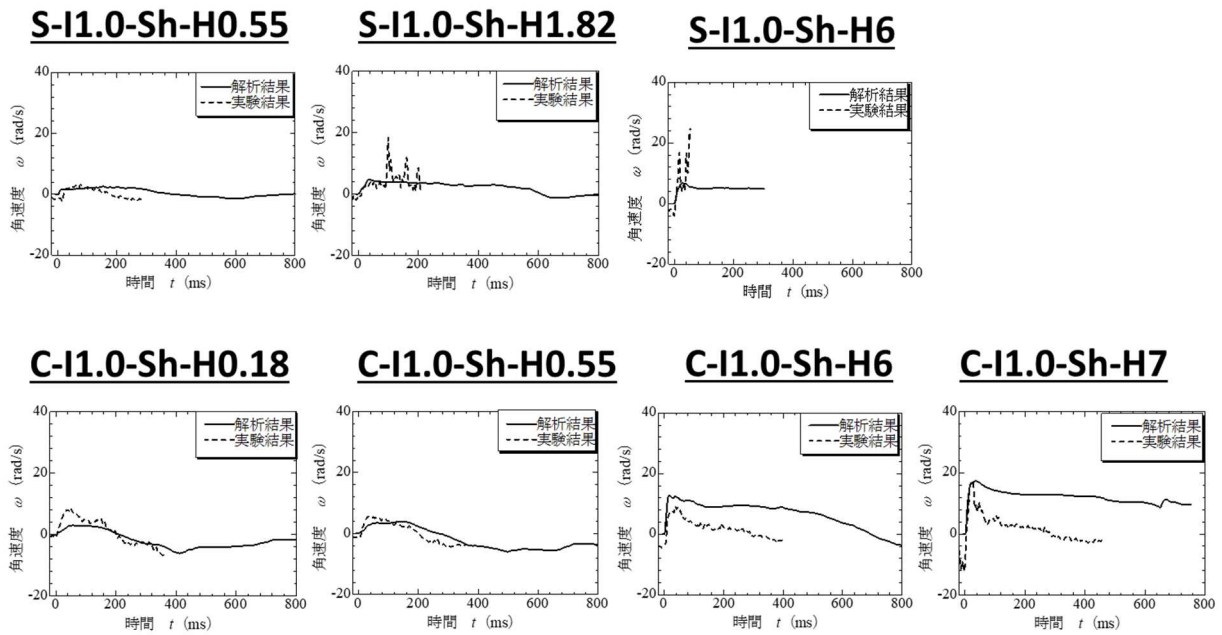


図-4.53 重錘角速度波形

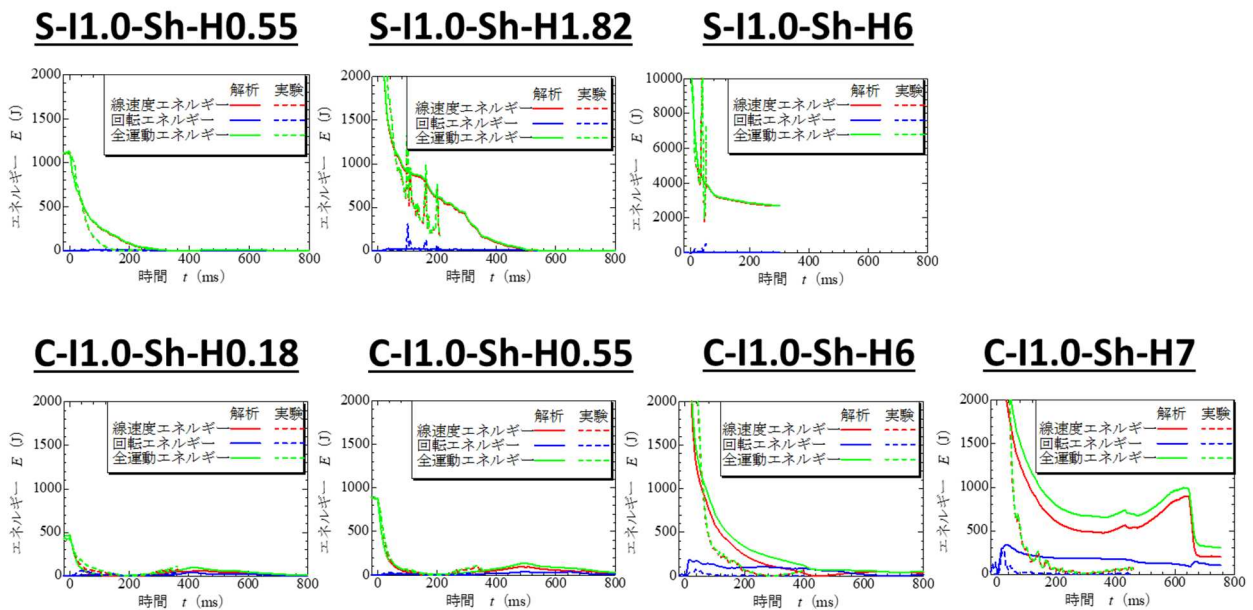


図-4.54 エネルギー波形

3) 重錘質量の違いによる影響の検討

① 解析ケース一覧

重錘質量の違いが耐衝撃挙動に及ぼす影響を検討する。実験では、54kg 重錘の落下高さ 6m のケースと同じ運動量、同じエネルギーになるよう、178kg 重錘で落下高さを調整した。検討に用いた解析ケース一覧を表-4.17 に示す。

表-4.17 解析ケース一覧

ケース名	材料	勾配	重錘	設定落下高さ (m)	設定衝突速度 (m/s)	設定エネルギー (J)	実験結果
S-I1.0-S-H2	砂	1:1.0	球体 54kg	2.00	6.263	1,059	捕捉
S-I1.0-S-H6	砂	1:1.0	球体 54kg	6.00	10.848	3,177	通過
S-I1.0-Sh-H0.55	砂	1:1.0	球体 178kg	0.55	3.284	960	捕捉
S-I1.0-Sh-H1.82	砂	1:1.0	球体 178kg	1.82	5.975	3,177	捕捉
S-I1.0-Sh-H6	砂	1:1.0	球体 178kg	6.00	10.848	10,474	破壊・ 通過

② 重錘軌跡

重錘軌跡図を図-4.55 に示す。運動量一定の場合、解析も実験と同様に、質量が小さく速度が大きいケースでは土堤貫入後、法面を駆け上がることで土堤を通過し、質量が大きく速度が小さいケースでは法面を駆け上がることなく貫入を続け、土堤に捕捉された。このことから、解析でも、同じ運動量であっても質量が大きく速度が小さいほうが、土堤に捕捉されやすいことを再現でき、軌跡もほぼ一致した。エネルギー一定の場合、解析と実験で捕捉状況が異なる結果となった。解析では土堤衝突後の水平方向速度が実験値ほど減衰しなかったためであると考えられる。しかし、軌跡は実験値とほぼ一致した。落下高さ一定の場合、解析と実験で落体捕捉状況や軌跡が一致しており、精度よく再現できていることがわかる。

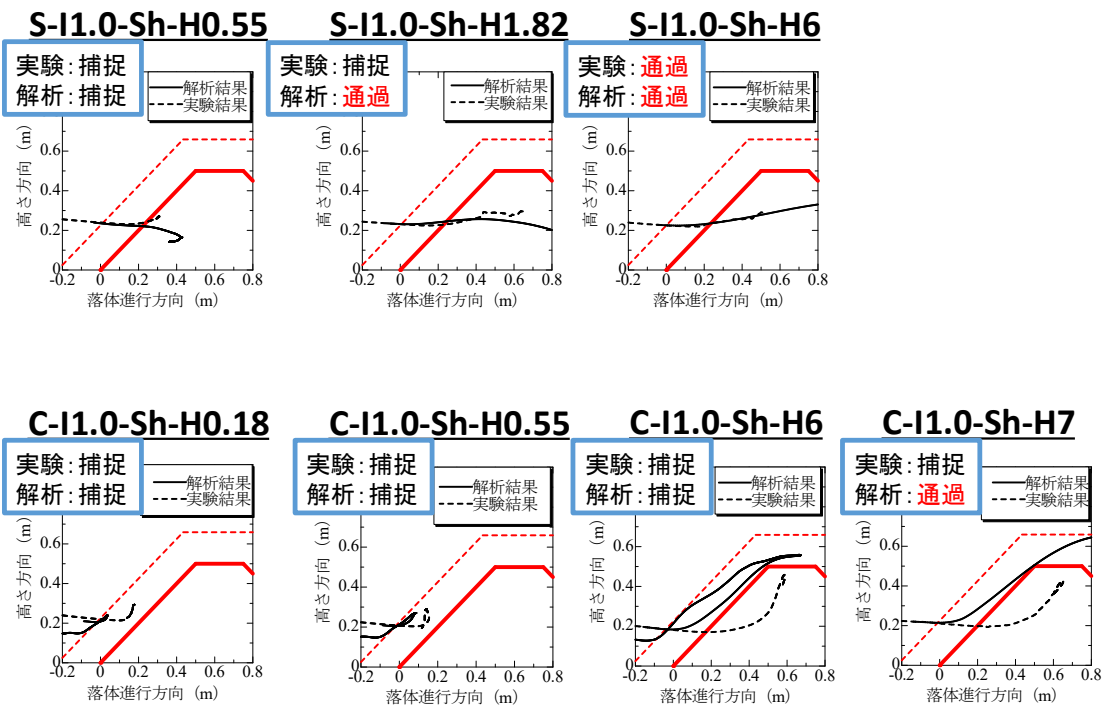


図-4.55 重錘軌跡図

③ 重錘速度

重錘速度波形を図-4.56 に示す。

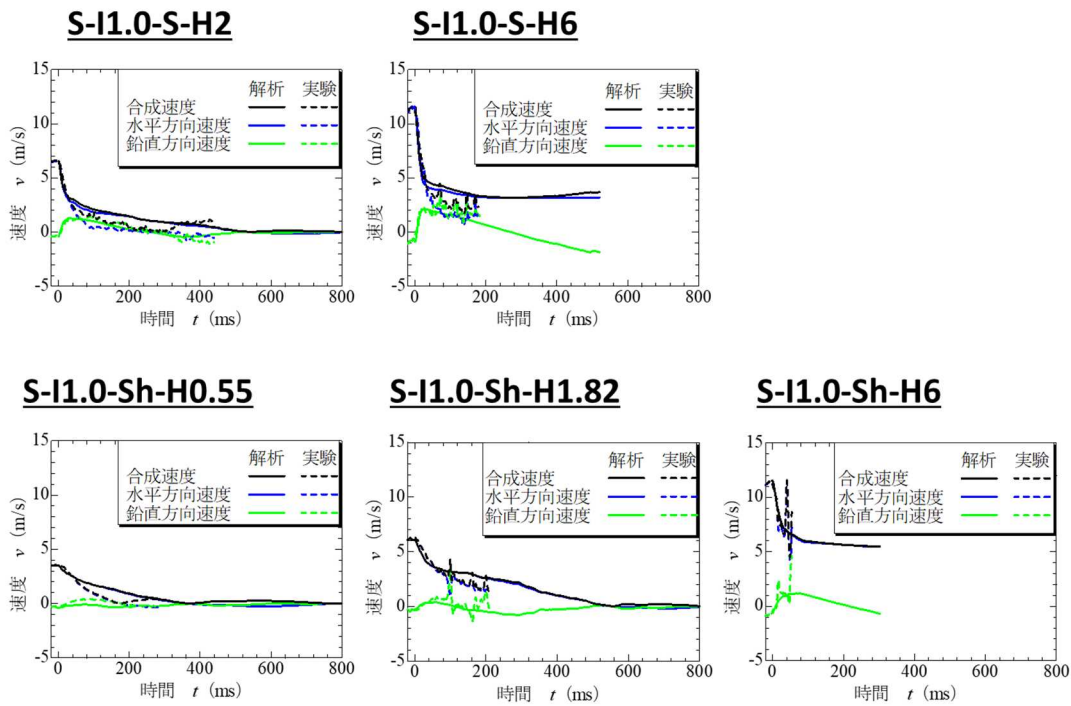


図-4.56 重錘速度波形

④ かけ上がり・貫入速度波形

かけ上がり・貫入速度波形を図-4.57 に示す。

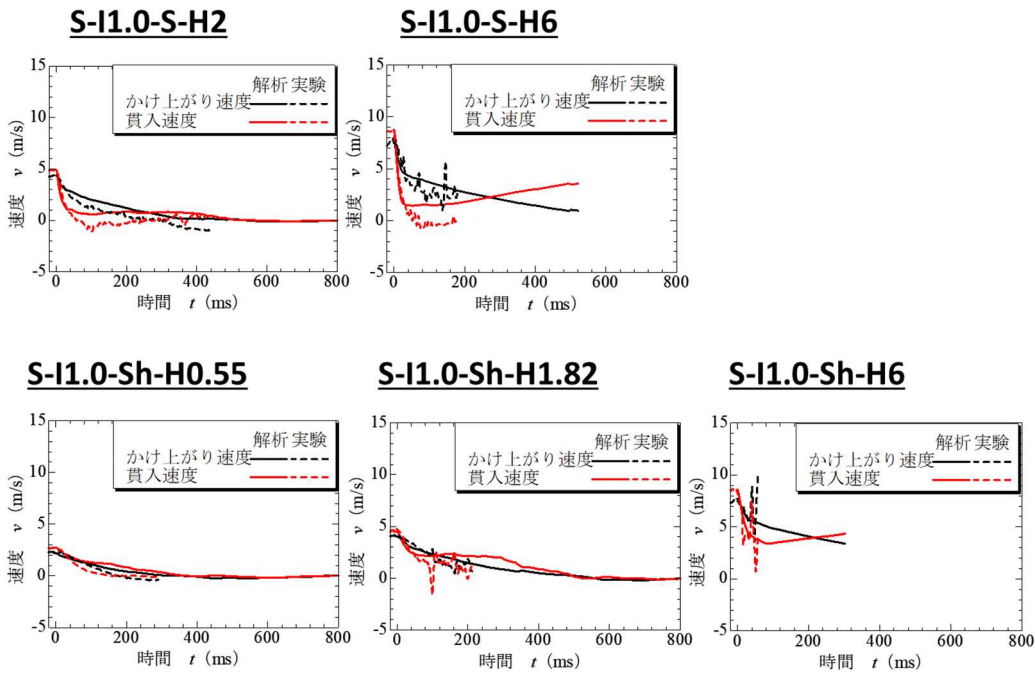


図-4.57 かけ上がり・貫入速度波形

⑤ 重錘衝撃力

重錘衝撃力波形を図-4.58 に示す。

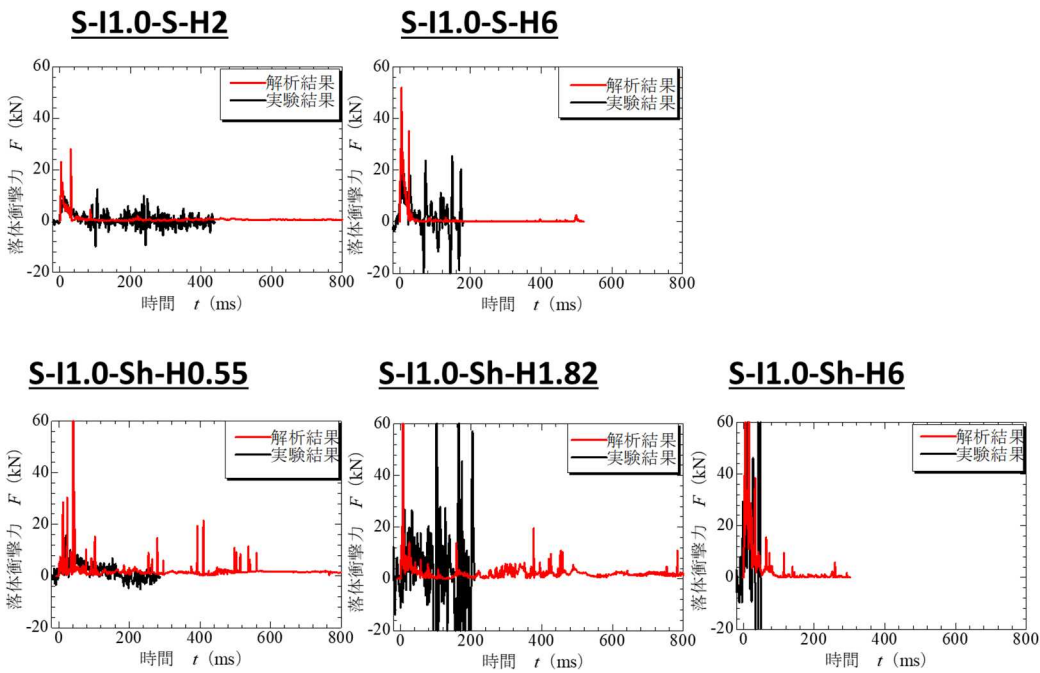


図-4.58 重錘衝撃力波形

⑥ 角速度およびエネルギー

角速度波形を図-4.59 に、エネルギー波形を図-4.60 に示す。運動量一定の場合、質量が小さく速度が速いケースでは落体を捕捉しきれず、エネルギーを減衰しきれていないが、質量が大きく速度が遅いケースでは落体を捕捉し、エネルギーを減衰しきっていることが解析でも再現されている。また、速度が速いケースの解析値では、衝突後の角速度が実験値よりも大きくなっており、実験値よりもエネルギーが減衰していない。エネルギー一定の場合、質量が大きいケースでは土堤衝突後に全運動エネルギーが急激に減衰するが、速度が大きいケースと比べて減衰の傾きが緩やかになっており、解析では実験ほど減衰しきらないうちに緩やかな減衰に移行している。落下高さ一定の場合、質量が大きいケースでは解析値における減衰後の全運動エネルギーが 2800J 程度であるのに対し、質量が小さいケースでは全運動エネルギーの最小値が 400J 程度である。よって、質量が大きいケースでは小さいケースの 7 倍のエネルギーを保持しており、土堤がエネルギーを吸収しきれていないことがわかる。また、質量が小さいケースでは角速度が実験値よりも大きい値をとっており、全運動エネルギーに占める回転エネルギーの割合も質量が大きいケースよりも大きい。

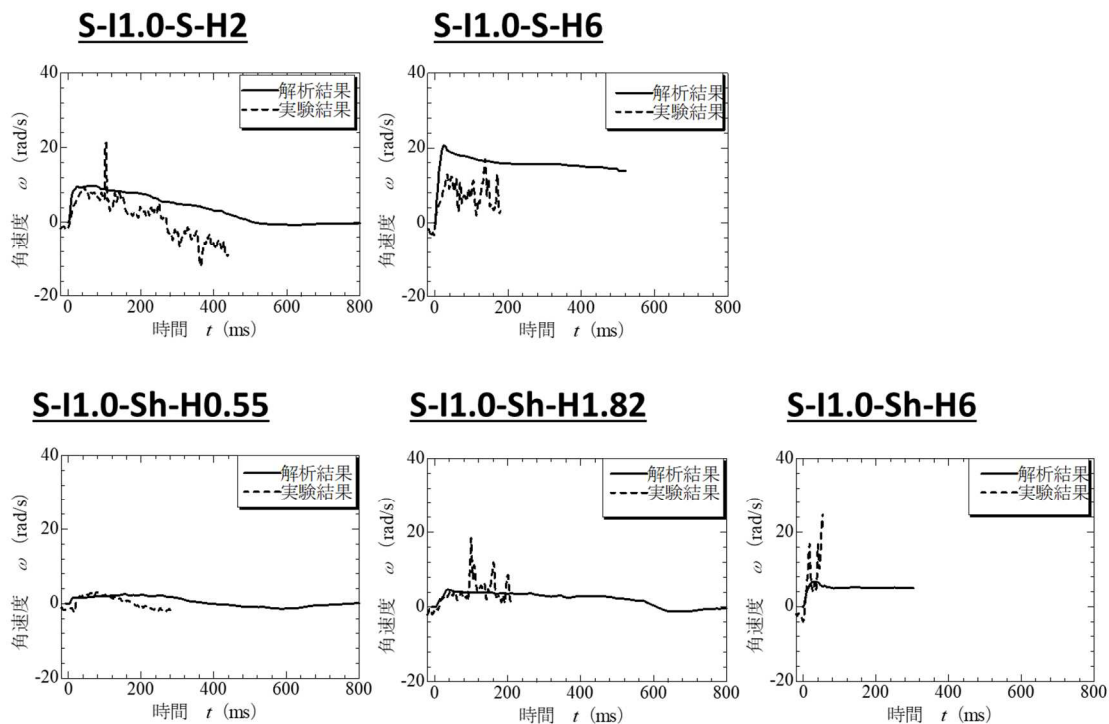
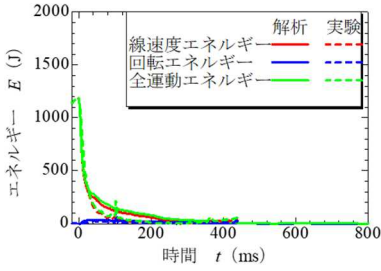
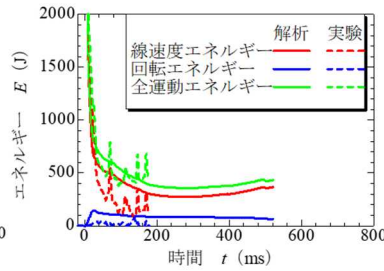
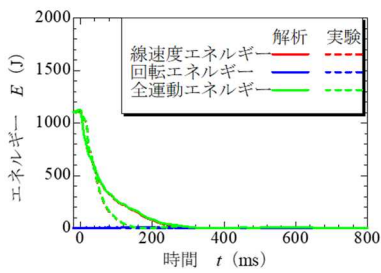
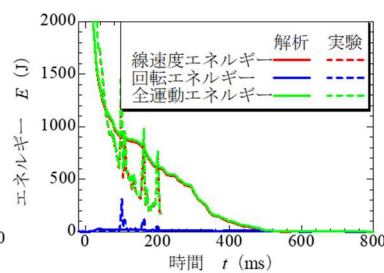
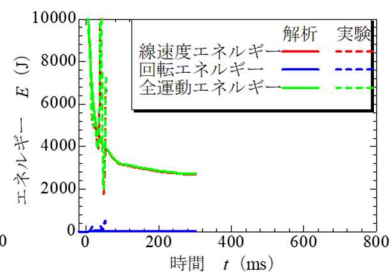


図-4.59 重錘角速度波形

S-I1.0-S-H2**S-I1.0-S-H6****S-I1.0-Sh-H0.55****S-I1.0-Sh-H1.82****S-I1.0-Sh-H6****図-4.60 エネルギー波形**

4) 解析に関するまとめ

かけ上がり速度は、衝突後しばらくしてからのかげ上がり速度について、解析値が実験値を上回る傾向にあることから、解析では落体が捕捉されにくくなると考えられる。貫入速度は、衝突直後の貫入速度について、解析値が実験値よりも減衰しやすくなる傾向にあることから、解析では実験ほど貫入が進展しないと考えられる。衝突後しばらくしてからのかげ入り速度について、解析値が実験値を上回る傾向にあり、これが実験と比べて土堤を大きく破壊してしまうことの要因であると考えられる。

砂の場合、54kg 重錘の場合、解析における軌跡図は実験と比べ、貫入量が少なく、駆け上がりが緩やかな挙動となっている。その原因として、衝突後、実験値ほど貫入しないうちに駆け上がる挙動を示していることや衝突後の水平方向速度の解析値が実験値よりも大きくなるからであると考えられる。178kg 重錘の場合、解析における軌跡図は、標準の質量のケースと比べて実験による軌跡図と一致する傾向にある。特に、落下高さ 6m のケースでは解析での軌跡が実験とほとんど同じになる。これにより、重い質量の落体の場合、解析では落体が土堤衝突後、貫入のみ進展し、駆け上がる挙動をしない軌跡を精度よく再現できているといえる。しかし、落下高さ 1.82m では落体の捕捉状況が実験と異なっており、衝突後の速度やエネルギーが実験よりも大きい値を示している。今後、側方抵抗を考慮する（粒子に疑似的に与える）ことにより衝突直後の駆け上りを抑制し、貫入量を増やすことでエネルギーが減衰し、過度な土堤破壊とならないと考えられる。

粘性土については、54kg 重錘の場合、砂と同様に、衝突後、実験ほど貫入することなく駆け上がっているような軌跡となっている。また、落下高さが 6m の実験では貫入後、落体が真上（鉛直上向き）に移動しており、解析ではこのような軌跡となっていない。その原因としては衝突後の水平方向速度の解析値が実験値を上回っているためと考えられる。178kg 重錘の場合、上記の標準の質量の場合と同様に、解析では衝突後、実験ほど貫入しないまま駆け上がる挙動をしている。落下高さが 6m、7m の実験では貫入後、落体が法面と平行に駆け上がっているが、解析ではこれよりも緩い勾配で駆け上がっている。今後、衝突直後に貫入しやすくするために土堤を軟らかくする必要がある（圧縮性の表現）。また、貫入後は押されることにより硬くなるようなモデルを構築する必要がある（塑性の表現）。砂と同じく側面抵抗を導入することにより衝突後のエネルギーや土堤破壊を抑制させるとともに、ばねモデルのカットオフや粒子の作成方法の検討が必要であると考えられる。

碎石の場合、軌跡は砂や粘性土と比べて解析により精度よく再現することができた。しかし、エネルギーを見ると、実験ほど減衰しにくく、砂と比べて実験と大きな差がみられ、回転エネルギーについては解析値が実験値を大きく上回る結果となった。これにより、落下高さ 2m では捕捉状況に違いがみられたと考えられる。現状よりも土堤を軟らかくすることで貫入しやすくし、土堤のエネルギー吸収率を上げる必要があると考えられる。解析においてはばね定数は砂と同じ値であるが、粒子径効果により土堤が硬くなり、貫入しにくくなったと考えられる。今後、側面抵抗の導入に加え、貫入しやすくするためにばね定数を小さくし、間隙を大きくする必要があると考えられる。

4. 5 第4章のまとめ

(1) 静的載荷実験

砂、粘性土、砕石で実験を実施。砂は球体重錘、多面体重錘、1:1.0 勾配も併せて実施し、それぞれの耐荷力を実験的に確認した。粘性土以外は押抜き破壊が生じた。粘性土は圧縮変形により、重錘が貫入する。

(2) 重錘衝撃実験

静的実験と同様に、砂、粘性土、砕石で実験を実施した。また、重錘質量も変化させたケースも併せて実施した。54kg 重錘を用いた材料が異なるシリーズでは、砂に比べて、粘性土は重錘が貫入することで大きな落石捕捉性能を発揮する。砕石は重錘が貫入しないことから落石捕捉性能に劣る傾向となった。178kg 重錘を用いた材料が異なるシリーズでは、土堤に重錘が貫入し、土堤内で重錘が停止する結果が得られた。落下高さが大きい場合には、砂では重錘が土堤を貫通した。粘性土では大きく押抜き破壊が生じるものの、重錘を捕捉する結果が得られた。54kg と 178kg 重錘を用いた重錘質量が異なるシリーズでは、54kg 重錘と同様の運動量やエネルギーとした場合には、178kg 重錘を用いると土堤に重錘が貫入して捕捉する傾向にあった。以上より、重錘が土堤に貫入する条件では落石捕捉性能が向上することがわかった。

(3) 静的載荷実験の再現解析

局所的な荷重の増減は表現可能であるものの、荷重レベルが大きく異なる結果となった。荷重に抵抗する押抜き土塊は土堤延長方向に拡がることから、2次元解析ではその荷重抵抗を発揮させることが出来なかったものと考えられる。

(4) 重錘衝突実験の再現解析

砂のかけ上がり挙動は再現可能であるものの、損傷度合いが過大評価となった。粘性土および砕石については、捕捉性能の優劣の表現は可能だが、圧縮変形および貫入量などの表現性について課題が残る。エネルギー波形等は概ね再現可能であるものの、重錘の捕捉の可否について実験結果と解析結果が異なるケースが生じた。捕捉の可否が異なるケースは、砂は 178kg 重錘を用いた S-I1.0Sh-H1.82、粘性土は 54kg 重錘を用いた C-I1.5-S-H6 および 178kg 重錘を用いた C-I1.0-Sh-H7、砕石は G-I1.5-S-H2 となる。これら 4 ケースは材料も重錘質量も異なることから、解析モデルの再考、3次元解析への発展が必要と考えられる。今後、側面抵抗、粘性土の圧縮性・塑性、砕石の粒子径・バネ定数等の検討が必要である。

4章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12

5. 実斜面を用いた実規模実験による性能検証

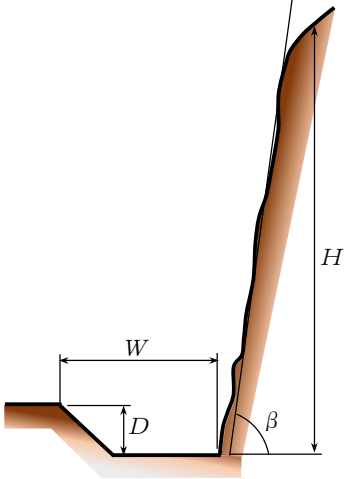
本章では、落石防護土堤・溝の基本性能を検証することを目的に実施した実斜面を用いた実規模実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて実施した個別要素法による再現解析の結果を示す。

5. 1 実験概要

(1) 実験目的

本実験では、落石対策便覧¹⁾P245に記載されるポケット寸法（落石防護溝の寸法、表-5.1参照）の妥当性を検証する。写真-5.1、写真-5.2に示す実験箇所の斜面勾配は 50° 程度、斜面高さは30m程度であることから、ポケット幅（法尻から土堤天端までの水平距離）は $W=5.0\text{m}$ 、ポケット高（法尻から土堤天端までの鉛直距離）は $H=2.0\text{m}$ と設定する。上記ポケット寸法により捕捉可能な重錘質量、落下高さを把握し、適用範囲を評価する。

表-5.1 落石防護溝の寸法

斜面の勾配 β	斜面高 $H(\text{m})$	溝の幅 $W(\text{m})$	溝の深さ $D(\text{m})$	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 $76^\circ \sim 73^\circ$	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	1.5	
	10~20	5	2.0	
	20~30	6	2.0	
	30~	8	2.5	
1:0.75 53°	5~10	4	1.0	
	10~20	5	1.5	
	20~	5	2.0	
1:1.0 45°	5~10	4	1.0	
	10~20	4	1.5	
	20~	5	2.0	

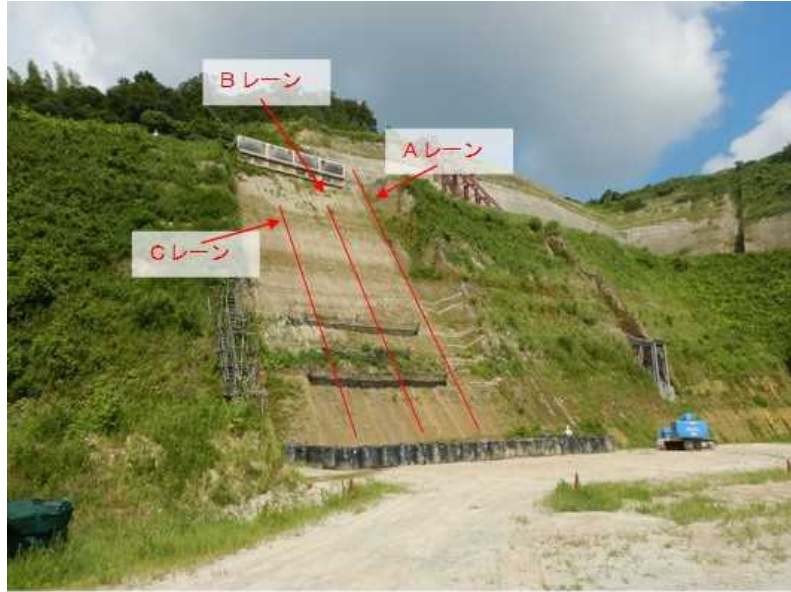


写真-5.1 実験斜面状況

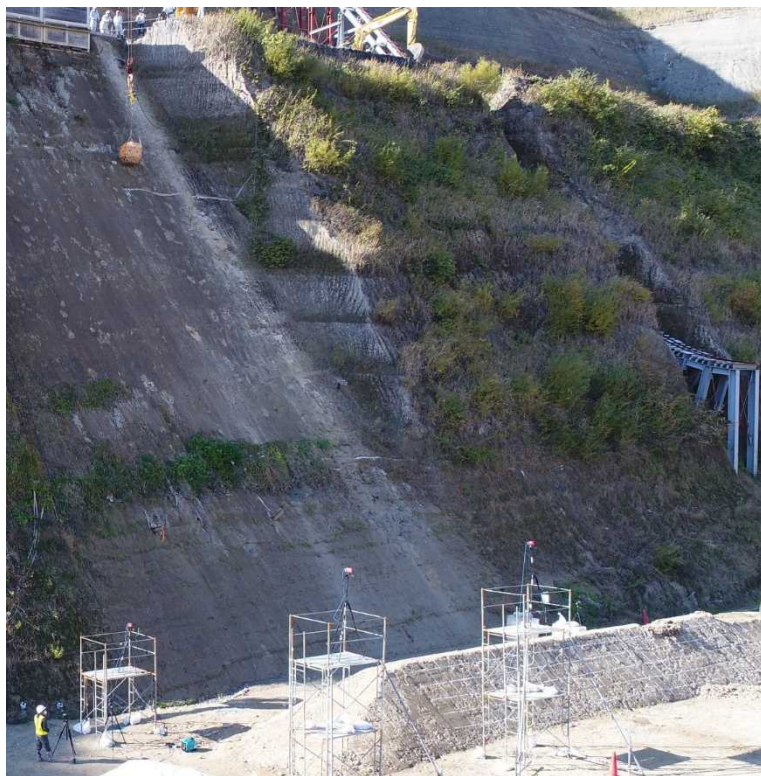


写真-5.2 実規模土堤実験状況

(2) 試験体概要

実験全体図を図-5.1に、試験体概要図を図-5.2に示す。

① ポケット部

ポケットは、地山および緩衝砂の2種類を想定する。コンクリート基礎が存置されていることから、緩衝砂の基盤層の影響も考慮することとし、表-5.2の組合せとする。敷砂厚は0.6mとする。

表-5.2 ポケット部材料の構成

ポケット部材料	Cレーン	Bレーン	Aレーン
地上	人工地山	緩衝砂	緩衝砂
地中	人工地山	人工地山	コンクリート基礎

※レーン名は、写真-5.1を参照。実験斜面を正面に見たときの呼称

② 土堤部

実験目的および斜面形状（勾配 50° ・高さ30m）より、ポケット幅（法尻から土堤天端までの水平距離）は $W=5.0\text{m}$ 、ポケット高（法尻から土堤天端までの鉛直距離）は $H=2.0\text{m}$ とする。敷砂厚を考慮し、法尻から土堤天端までの水平・鉛直距離を算出して土堤位置を設定する。土堤天端幅は0.3mとする。土堤勾配は、施工可能な最急勾配として1:1.2とする。試験体延長は16mとする。土堤端部は土堤本体勾配と同じく1:1.2とし、昇降を考慮して土堤構築時にカメラ設置位置に注意しつつ緩やかにスロープ状に構築する。

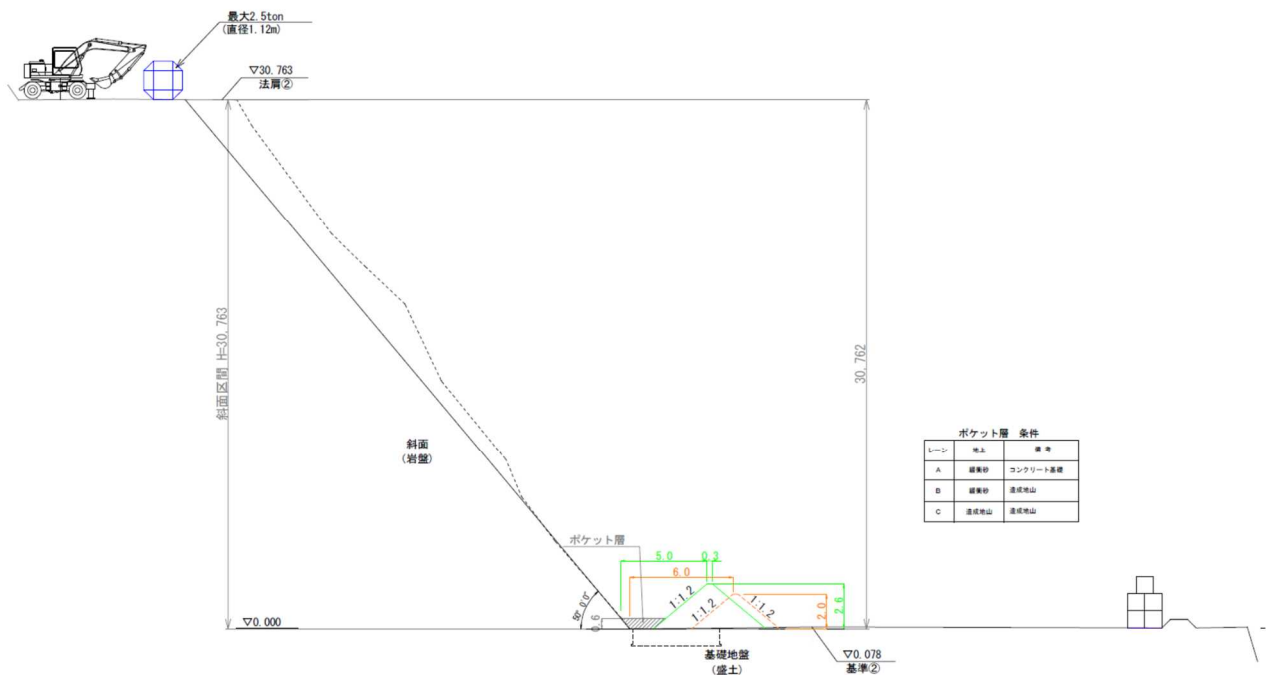


図-5.1 実験全体図 (単位 : m)

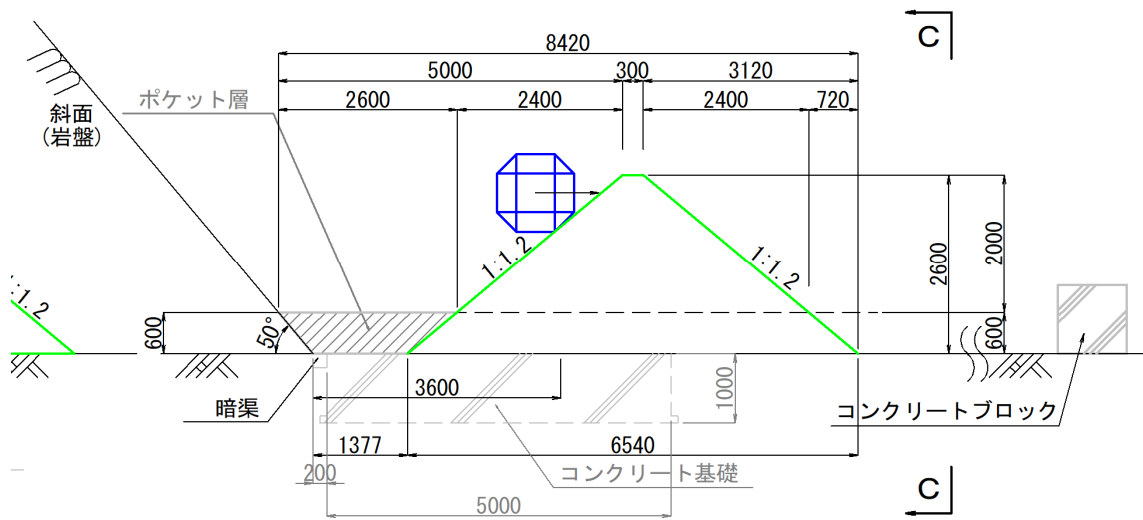


図-5.2 試験体概要図 (単位 : mm)

(3) 土堤材料

ポケット部のうち、緩衝砂の物性値を表-5.3に示す。人工地山については原地盤とし、表-5.4に示す土堤本体と同じ材料を用いている。

表-5.3 緩衝砂の物性値

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 ρ_{dmax}	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

表-5.4 土堤材料の物性値

地盤材料の分類名：細粒分まじり砂質礫		
項目	単位	試験結果
土粒子の密度	g/cm^3	2.63
均等係数	-	352
最適含水比	%	15.3
自然含水比	%	12.7
内部摩擦角	度	34.1
粘着力	kN/m^2	1.10

5. 2 ポケット実験

(1) 実験概要

落体質量 2.5t、落下高さ 10m or 15m の条件で鉛直落下実験を実施した。ポケット部に施工する表層材及び基礎部の組み合わせを変え、3 レーン用意した。実験ケースを表-5.5 にまとめる。

表-5.5 実験ケース一覧

ケース名	ポケット部 表層部/基礎部	質量 M (t)	落下高さ H (m)	初期位置エネルギー E ₀ (kJ)
A-M2.5-H10-V	敷砂/ コンクリート基礎	2.5	10	245.0
A-M2.5-H15-V		2.5	15	367.5
B-M2.5-H10-V	敷砂/人工地山	2.5	10	245.0
B-M2.5-H15-V		2.5	15	367.5
C-M2.5-H10-V	現地発生土/人工地山	2.5	10	245.0
C-M2.5-H15-V		2.5	15	367.5

なお、実験データの整理方法は下記のとおりとする。

1. いずれのケースも 2 次元解析を用いて落体の軌跡を算出する。
(実験時には 2 次元計測用の高速度カメラのみ設置)
2. 位置データを両側微分することで速度データを算出し、さらに 14ms の移動平均処理を行うことでスムージングを行う。⇒ エネルギーはスムージング後の速度から算出
3. スムージング後の速度を両側微分し、再度 14ms の移動平均処理を実施することで加速度を算出し、加速度に落体質量を乗じることで落体衝撃力を算出

(2) 鉛直変位

鉛直変位（移動量）の時刻歴波形を図-5.3に示す。Aケース（表層：敷砂、基礎：コンクリート）では、最大貫入量が盛土層厚 0.6m の半分程度（0.452m、0.347m）となっている。基礎部をコンクリートとしているため、表層部の敷砂の移動が拘束され、貫入量が小さくなったと考えられる。落下高さ 10m の方が 15m より最大貫入量が大きくなっている。落下高さ 10m の落下場所が土堤衝突実験の際に使用していたレーンに近いこと、埋め戻しにより緩衝層が緩くなっていたことも考えられる。Bケース（表層：敷砂、基礎：人工地山）では、最大貫入量は 0.612m、0.694m であり、盛土層厚 0.6m 分貫入している。Aケースより最大貫入量が大きいことから、基礎部の変形が許容されていることで、貫入量が大きくなったと考えられる。Cケース（表層：現地発生土、基礎：人工地山）では、最大貫入量はBケースと同程度であり、貫入量の観点からは敷砂と現地発生土の違いは見られない。

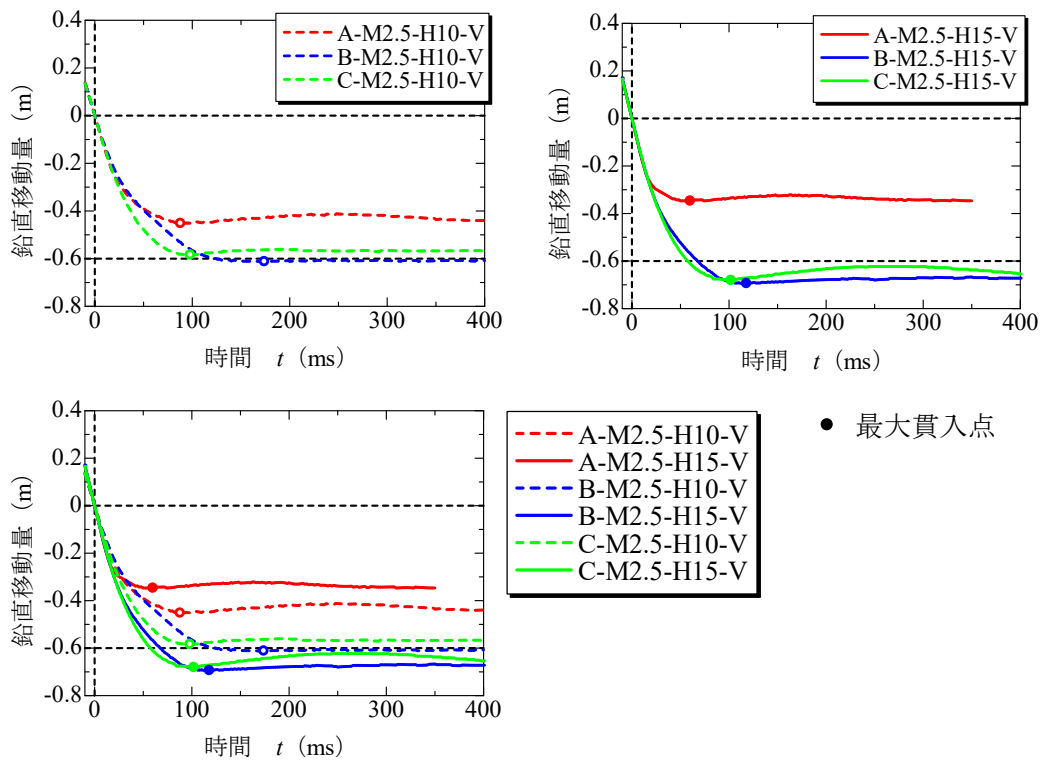


図-5.3 鉛直変位の時刻歴波形

(3) 鉛直速度

鉛直速度の時刻歴波形を図-5.4に示す。緩衝層への衝突後に鉛直速度が減少しており、最大貫入時刻以降では概ね一定で推移していることが読み取れる。Aケース（表層：敷砂、基礎：コンクリート）では、ポケット衝突直後は急激に鉛直速度が減衰し、その後減衰勾配が緩くなる。表層材は変形を許容するのに対して、基礎部のコンクリートはほぼ変形しないため（変形特性の違いが影響しているため）であると考えられる。Bケース（表層：敷砂、基礎：人工地山）では、衝突直後は急激に鉛直速度が減衰するが、その後減衰勾配が緩くなる（減衰勾配の変化はAケースよりも顕著に見られる）。緩衝層厚(0.6m)分の貫入が生じていたことから、緩衝層への貫入による急激な速度減衰が生じた後、基礎部の変形による緩やかな減衰に転じていたと考えられる。Cケース（表層：現地発生土、基礎：人工地山）では、他のケースと比べて速度の減衰勾配が緩やかであることが読み取れる。現地発生土の基質である粘性土の性質が起因していると考えられる。Aケース、Bケースに見られるような減衰勾配の変化が見られない。表層材の現地発生土と基礎部の人工地山はそれぞれ粘性土的な特徴を持っており、土質が似ていることから減衰勾配の変化が見られなかったと考えられる。

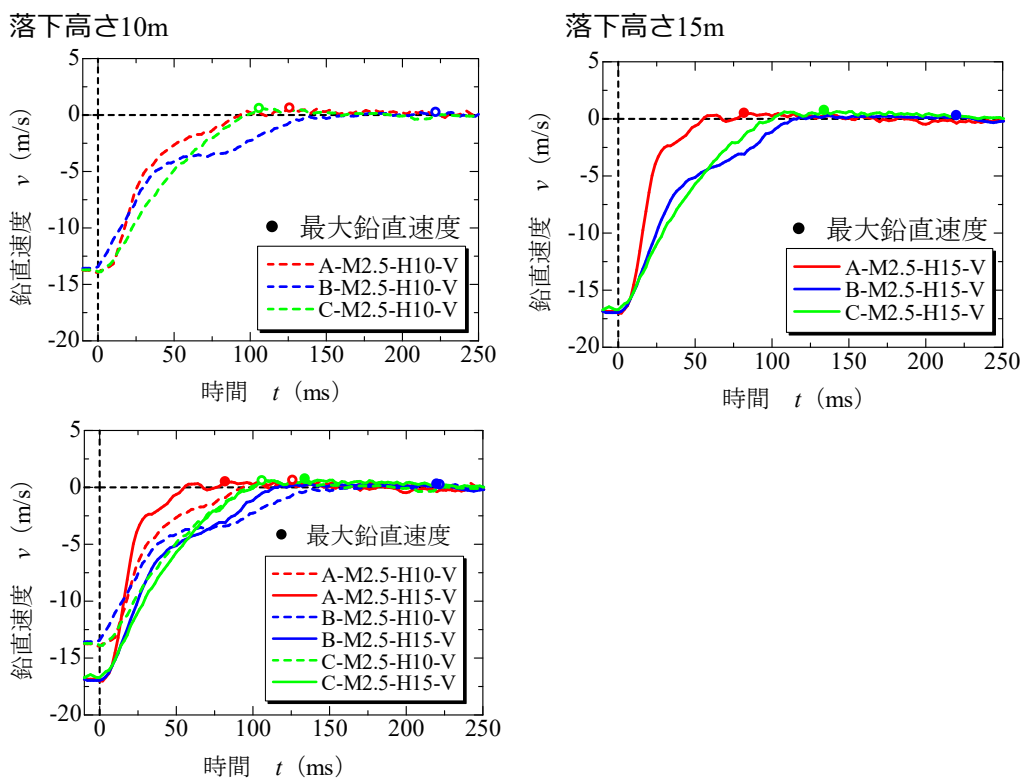


図-5.4 鉛直速度の時刻歴波形

(4) エネルギー

エネルギーの時刻歴波形を図-5.5 に示す。いずれのケースにおいても、ポケット衝突後から 50ms～100ms にかけてエネルギーが減少している。エネルギーの減衰勾配に着目すると、Aレーンが最も急激にエネルギー減衰していることが読み取れる。最大貫入量が小さい（最大貫入に達するまでの時間が小さい）ことが要因であると考えられる。Bレーンのエネルギー波形が 50ms 以降で勾配が緩やかになっている。速度波形でも示した、緩衝層衝突時と基礎部衝突時の差であると考えられる。

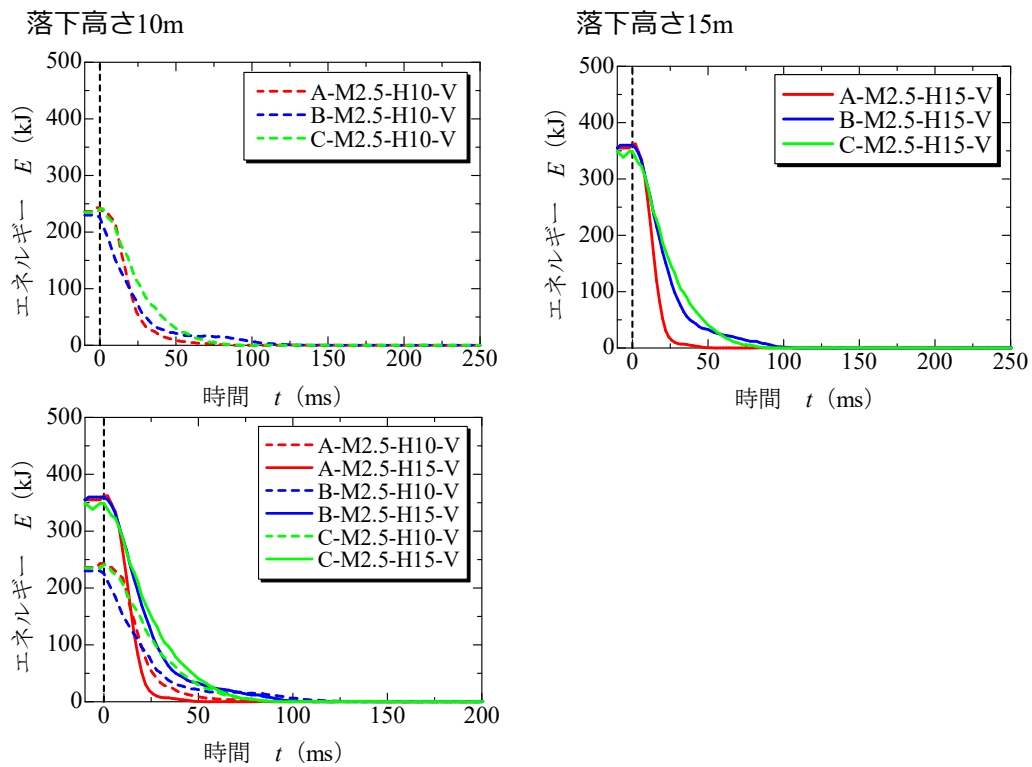


図-5.5 エネルギーの時刻歴波形

(5) 衝撃力

衝撃力の時刻歴波形を図-5.6 に示す。A、B、C ケースいずれも 20ms 前後で最大衝撃力となっている。A ケース（表層：敷砂、基礎：コンクリート）では、最大衝撃力が他のケースと比較して最も大きくなっている。また、最大衝撃力が B ケースより大きくなっており、コンクリート基礎からの反射波による影響であると考えられる。落下高さ 15m の最大貫入量が小さいにもかかわらず、最大衝撃力は約 2 倍程度大きくなっている。いずれの落下高さにおいても、コンクリート基礎への直接的な衝突はしていないことから、衝突時の外力が大きくなることでコンクリート基礎からの反射波による影響が大きくなり、最大衝撃力が大きくなったと考えられる。B ケース（表層：敷砂、基礎：人工地山）では、最大衝撃力に達した後、100ms 前後で第二波が発生している。基礎部が人工地山であることに起因していると考えられる。C ケース（表層：現地発生土、基礎：人工地山）では、C レーンの衝撃力波形は最大衝撃力に達した後、ポケット部衝突から最大衝撃力に達するまで立ち上がりの勾配に対して、緩やかに衝撃力が消散し 100ms 付近で収束していることが読み取れる。圧縮変形が卓越することから、衝撃力の継続時間が長くなったと考えられる。

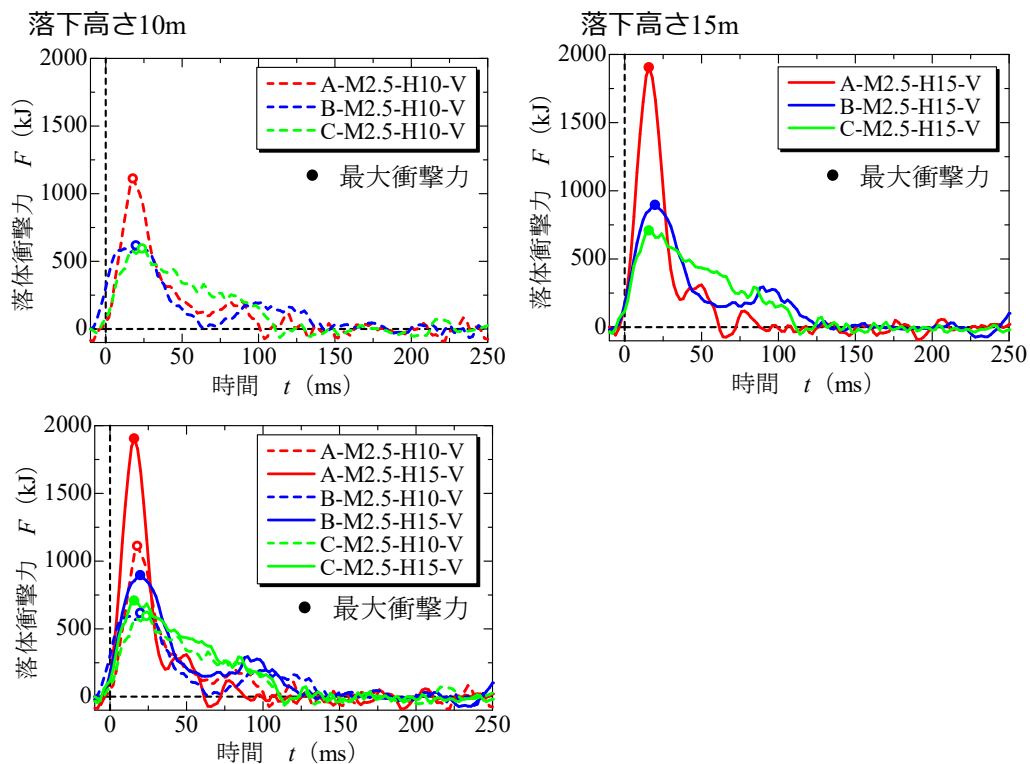
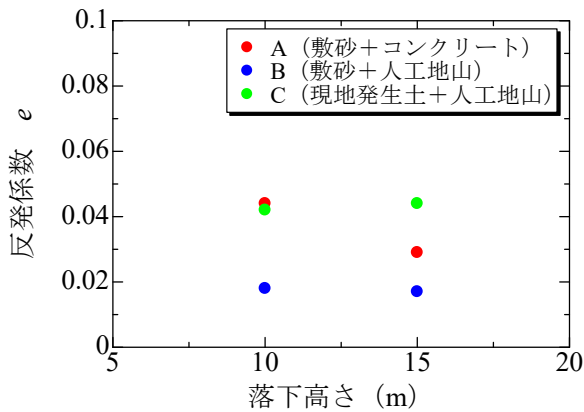


図-5.6 衝撃力の時刻歴波形

(6) 反発係数に関する検討

反発係数と落下高さの関係を図-5.7に示す。Aケース、Bケースとの比較から、基礎部の違いが反発係数に表れており、基礎部をコンクリート基礎とすることで反発係数が大きくなるのがわかる。基礎が人工地山のケースと比較してコンクリート基礎は変形しにくいいため、落体衝突時に表層部が締め固められることで反発係数が大きくなったと考えられる。Aケースでは、落下高さ10mのケースの反発係数が大きくなっている。落下高さ10mの最大貫入量が多いことから、落下高さ10mではコンクリート基礎からの影響が大きくなり、反発係数が大きくなったと考えられる。Bケースの方がCケースより反発係数が小さいことから、本実験条件では敷砂の方が現地発生土より衝突後の落体速度を抑制する効果があると言える。



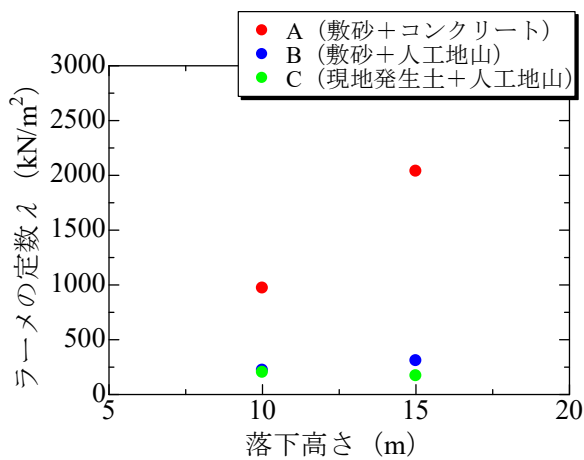
反発係数 e は以下の式より算出した

$$e = \frac{\text{最大鉛直速度 } v_{\max}}{\text{衝突直前鉛直速度 } v_0}$$

図-5.7 反発係数と落下高さの関係

(7) ラーメの定数に関する検討

ラーメの定数と落下高さの関係を図-5.8に示す。実験結果より、Aケースは非常に軟らかいものと軟らかいもの間に分類され、B、Cケースは非常に軟らかいものに分類される。Aケースのラーメの定数がB、Cケースより大きいことが読み取れる。Aケースの基礎をコンクリートとしていることに起因すると考えられる。BケースとCケースのラーメの定数は概ね一致している。このことから、速度波形や衝撃力波形などでは違いが見られたが「軟らかさ」の観点では近しい性質であると考えられる。



ラーメの定数は落石対策便覧¹⁾示される式より算出した

$$P_{\max} = 2.108(Mg)^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5}$$

ここに、 P_{\max} : 最大落体衝撃力 (kN)

M : 落体質量 (t)

g : 重力加速度 (m/s^2)

λ : ラーメの定数 (kN/m^2)

H : 落下高さ (m)

非常に軟らかいもの...1000kN/m²

軟らかいもの ...3000~5000kN/m²

固いもの ...10000kN/m²

図-5.8 反発係数と落下高さの関係

(8) ポケット実験のまとめ

- 1) いずれのケースも表層部等に落体が貫入し、リバウンドはほぼ発生しない。
- 2) 落体貫入量について、Aケースが30～40cm程度と小さい。B/Cケースは両者ともに60～70cm程度と大きい（Aレーンの基礎部がコンクリートで砂の移動の拘束により貫入量が小さいためと推定）。
- 3) 鉛直速度について、Aケースは衝突直後に急減し、その後減衰勾配が変化し緩やかに減衰する（基礎部コンクリートによる砂の拘束により減衰勾配が急変したものと推定）。BケースもAケースと同様であるが途中で減衰勾配がさらに変化する（落体貫入中や最大貫入時において表層部と基礎部の応力状態が複雑に変化し減衰勾配が複数回変化したものと推定）。Cケースは徐々に減衰勾配が変化し、急激な勾配変化は見受けられない（他ケースよりも表層部と基礎部での材料差が小さいことにより急激な勾配変化は生じないものと推定）。
- 4) エネルギーについて、Aケースが零レベルに到達する時刻が早く、Cケースが緩やかに減衰する。
- 5) 落体衝撃力について、Aケースが他のケースの2倍と大きい（最大値発生時刻は速度の減衰勾配が急変する時刻と一致）。Bケースは2波に明瞭に分かれて構成される（衝撃力が小さい時刻帯は速度減衰勾配が緩やかになった時刻帯と一致）。Cケースは2波に分かれず1波で構成される（現地発生土に含まれる礫による応力鎖あるいは基質の粘性土による圧縮変形等により敷砂と異なる荷重伝達機構が発揮され、速度の減衰勾配の急変が生じないものと推定）。

5. 3 土堤実験

(1) 実験概要

実験ケースと実験結果の概要を表-5.6に示す。質量を0.25t、2.5t、落下高さを15m~30mと変化させて実験を実施した。実施した全ケースで土堤は落体を捕捉している。本実験の範囲内では初期位置エネルギーが735kJ以下であれば落石を捕捉可能であることがわかる。

表-5.6 実験結果一覧表

ケース名	ポケット部 表層部/基礎部	質量 M (t)	落下高さ H (m)	初期位置エネルギー E ₀ (kJ)	実験 結果	備考
A-M2.5-H15-1	敷砂緩衝層/ コンクリート基礎	2.5	15	368	捕捉	
A-M2.5-H15-2		2.5	15	368	捕捉	
A-M2.5-H20-1		2.5	20	490	捕捉	
A-M2.5-H25-1		2.5	25	613	捕捉	
A-M2.5-H29-1		2.5	29	711	捕捉	
A-M2.5-H30-1		2.5	30	735	捕捉	土堤に直接衝突
B-M2.5-H24-1	敷砂緩衝層/ 人工地山	2.5	24	61	捕捉	
B-M0.25-H25-1		0.25	25	61	捕捉	土堤に直接衝突
B-M0.25-H25-2		0.25	25	588	捕捉	
C-M2.5-H20-1	現地発生材/ 人工地山	2.5	20	490	捕捉	
C-M2.5-H25-1		2.5	25	613	捕捉	
C-M0.25-H25-1		0.25	25	61	捕捉	

(2) 落体軌跡

Aレーン：敷砂緩衝層／コンクリート基礎の落体軌跡図を図-5.9に示す。緩衝層に衝突後、緩衝層へ貫入しながら進行し、緩衝層から脱出することなく、オフセットラインよりも下部で土堤に衝突した。ポケット衝突による落体の跳躍を抑制する効果が発揮されたと考えられる。土堤衝突後は跳躍しながら移動し、法面中腹で土堤に再衝突した。再衝突後は跳躍せずに土堤を駆け上がったのち停止し、捕捉された。A-M2.5-H30では、緩衝層に衝突することなく、直接土堤の法尻に衝突した。便覧¹⁾に記載された寸法で土堤を構築するとポケットに衝突せず、土堤に直接落石が衝突する場合もあり得ることがわかった。また、衝突後は土堤に貫入したのちその場で停止し、捕捉された。

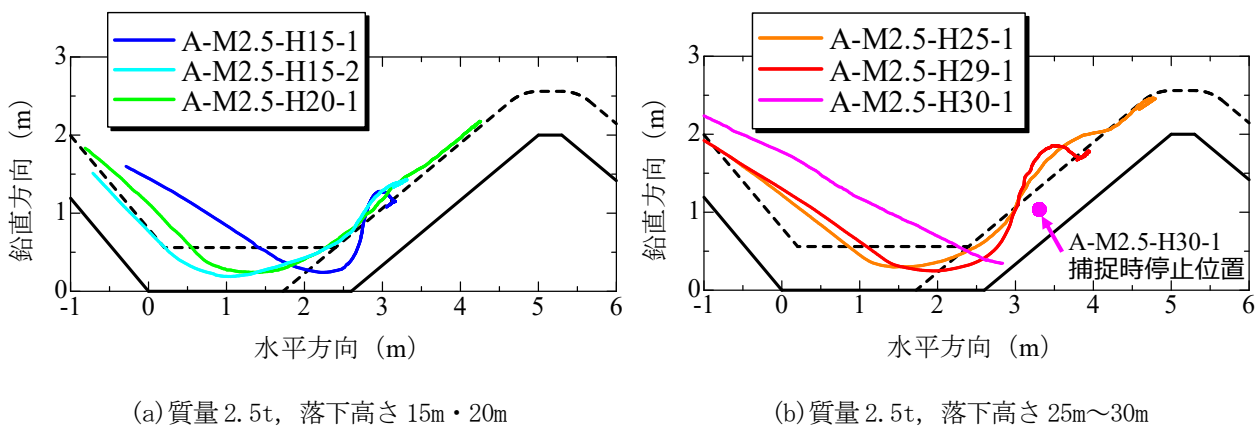
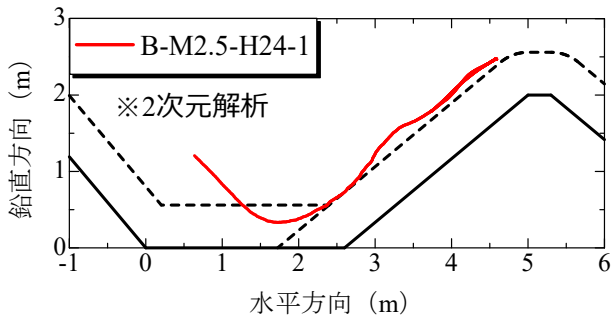
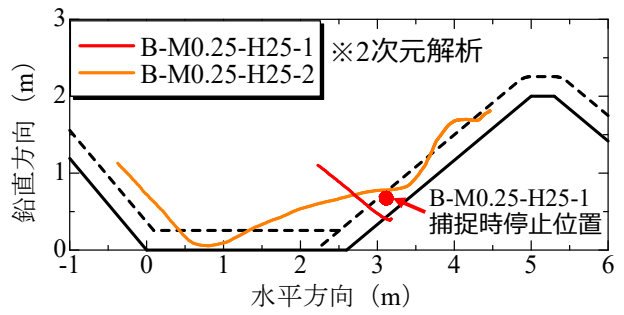


図-5.9 落体軌跡図 (Aレーン)

Bレーン：敷砂緩衝層／人工地山の落体軌跡図を図-5.10に示す。質量：2.5tのケースでは、Aレーンでのケースと同様にポケット衝突後は貫入しながら進行し、土堤法尻に衝突した。ポケットへの入射角はAレーンと大きな差はみられなかった。貫入量はAレーンと大きく変わらず、基礎の違いが軌跡に及ぼす影響は大きくはみられない。土堤衝突後は土堤天端付近まで駆け上がったのちに停止し、通過寸前で停止した。土堤が落体を捕捉できる限界に近い衝突条件・位置エネルギーであったと考えられる。質量：0.25tのケースのケースでは、B-M0.25-H25-1では落体は緩衝層に衝突することなく、直接土堤の法尻に衝突し、土堤衝突後は土堤に貫入したのちその場で停止し、捕捉された。B-M0.25-H25-2では落体はポケット衝突後に反発・跳躍し、土堤の中腹に再衝突した。土堤衝突後は土堤を駆け上がったのちに停止し、捕捉された。



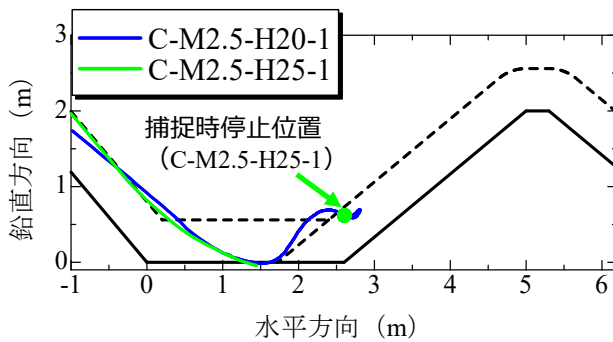
(a) 質量 2.5t, 落下高さ 24m



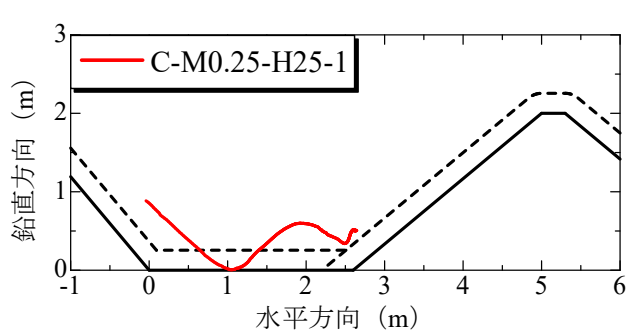
(b) 質量 0.25t, 落下高さ 25m

図-5.10 落体軌跡図 (B レーン)

C レーン：現地発生材／人工地山の落体軌跡図を図-5.11 に示す。ポケット衝突後、ポケットに大きく貫入した。落体半径と同じ程度まで貫入しており、敷砂緩衝層よりも大きく貫入した。C-M2.5-H20-1 と C-M0.25-H25-1 については、貫入終了後はポケットを脱出し、最大跳躍を迎えてから土堤に衝突した (C-M2.5-H25-1 はポケット脱出前に土堤に衝突した)。土堤衝突後、落体は土堤をほとんどかけ上らずにその場で停止し、捕捉された。



(a) 質量 2.5t, 落下高さ 20m・25m



(b) 質量 0.25t, 落下高さ 25m

図-5.11 落体軌跡図 (C レーン)

(3) 落体速度

Aレーンの落体速度波形を図-5.12に示す。ポケット衝突後は水平速度、鉛直速度ともに減衰していることが読み取れるが、土堤衝突による速度の大きな減衰は見られない。なお、A-M2.5-H30-1は土堤に直接衝突したことで速度が急激に減衰している。

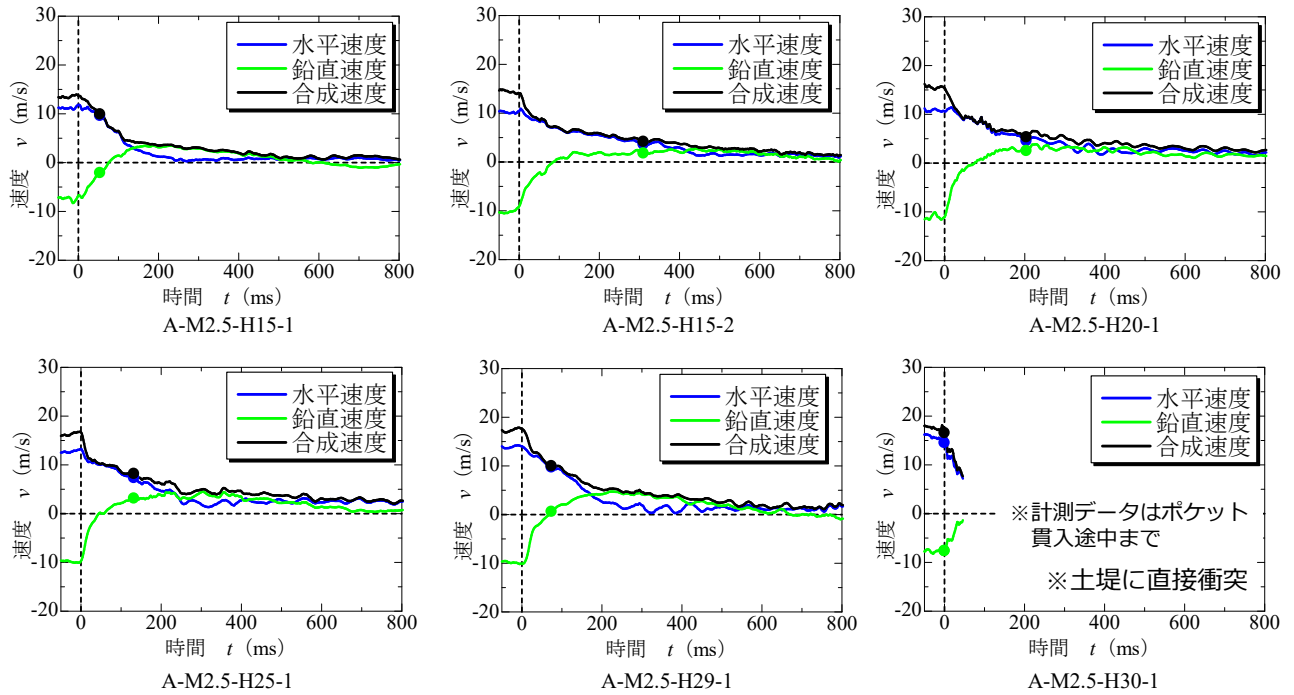


図-5.12 落体速度波形 (Aレーン)

BレーンとCレーンの落体速度波形を図-5.13に示す。ポケットの材料が敷砂緩衝層でないCレーンにおいてもポケット衝突により速度の大きな減衰が生じた。B-M0.25-H25-2, C-M0.25-H25-1は土堤衝突後に顕著に鉛直速度が増加している。土堤衝突により落体の進行方向が鉛直方向へ移行している。

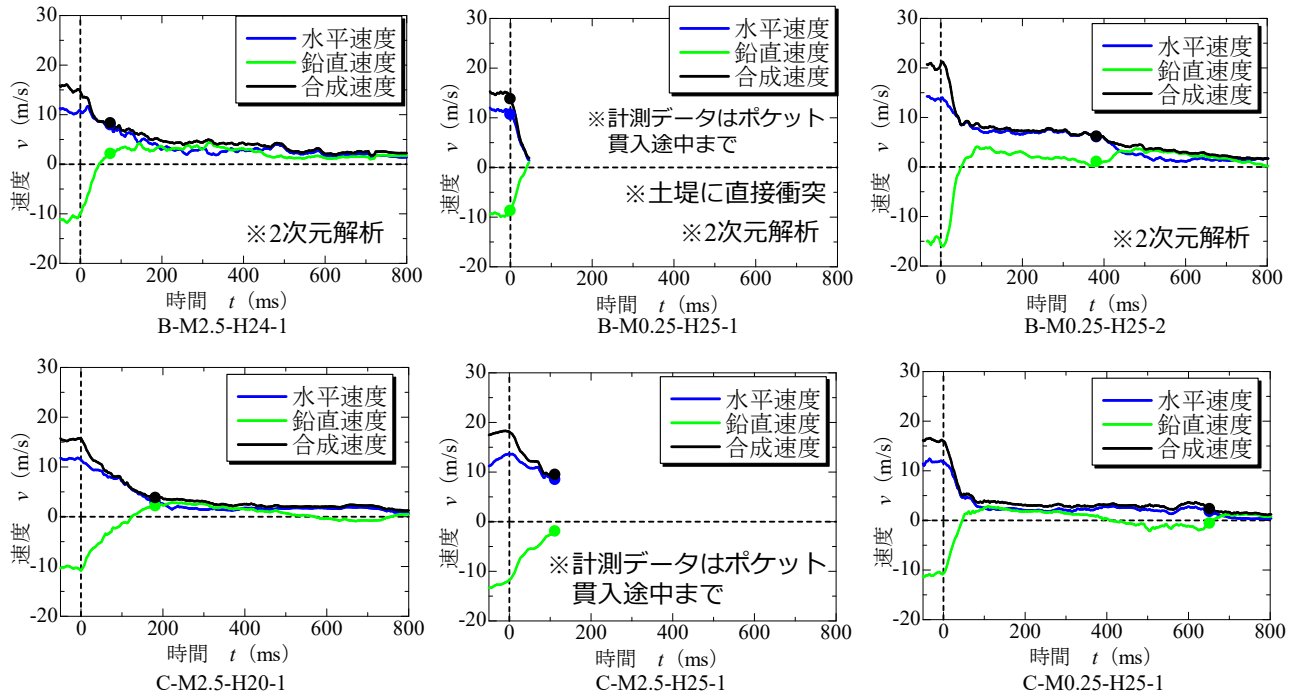
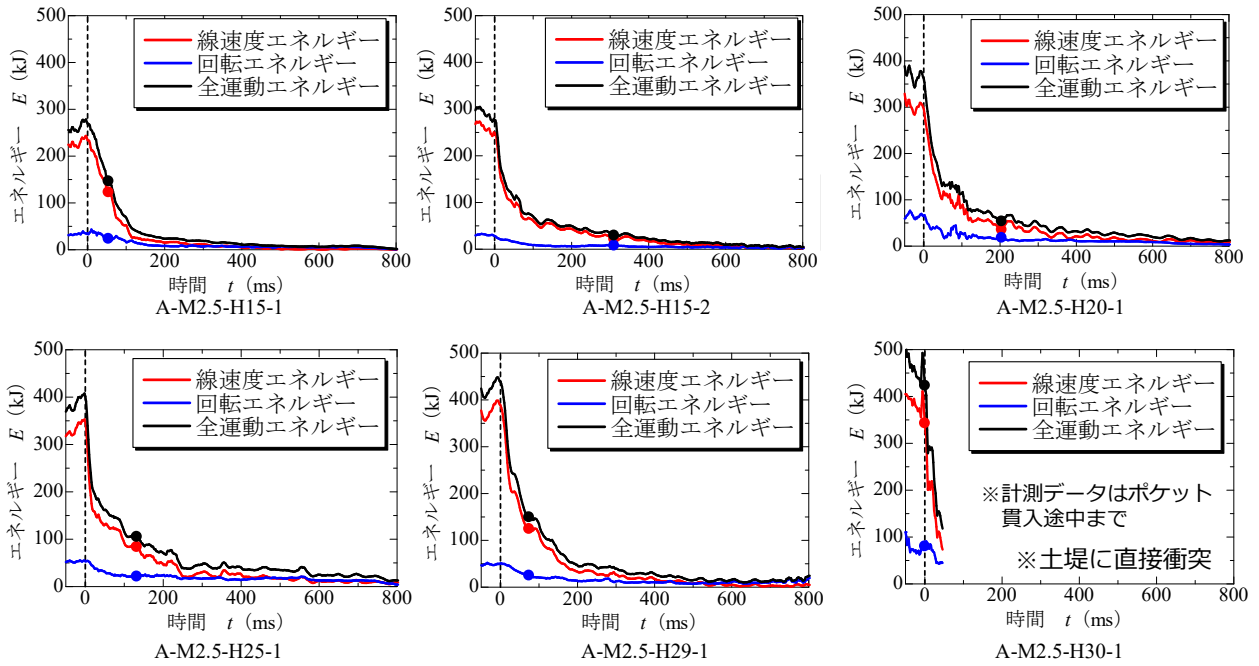


図-5.13 落体速度波形 (Bレーン・Cレーン)

(4) 落体エネルギー

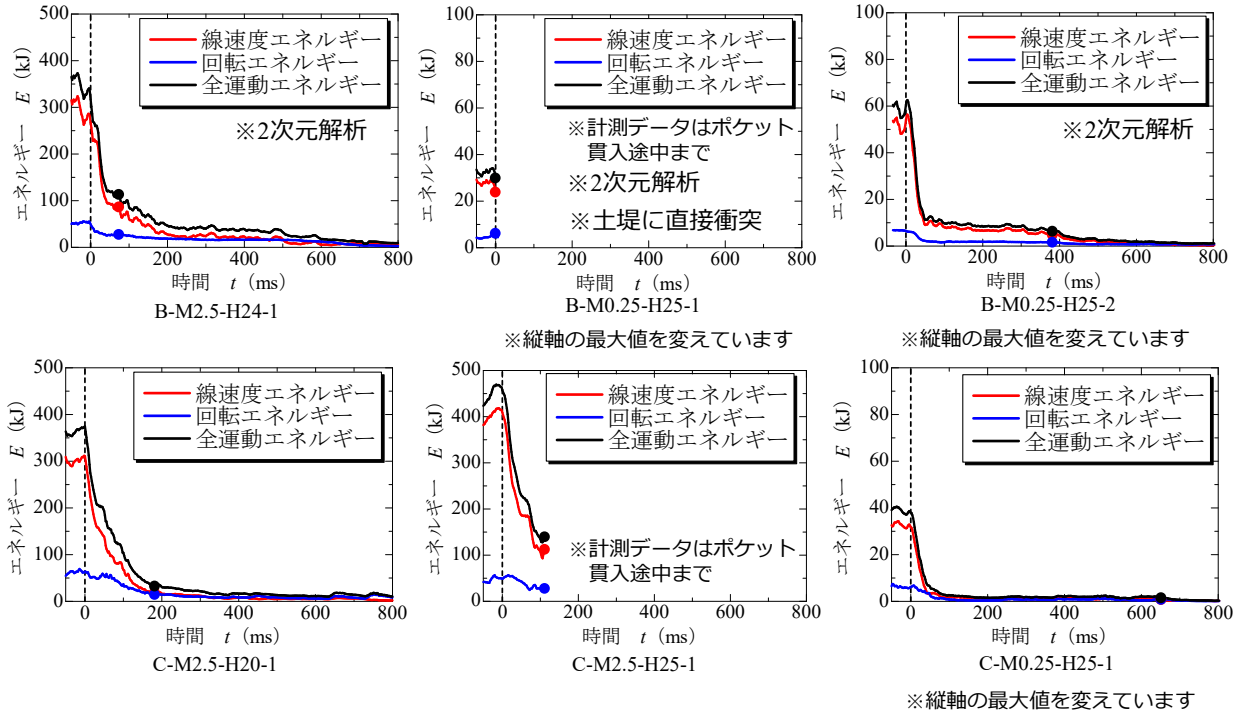
Aレーンの落体エネルギー波形を図-5.14に示す。ポケット衝突により線速度エネルギー、全運動エネルギーが急激に減少しているが、回転エネルギーについては急激な減少はみられない。



※土堤衝突時刻におけるエネルギーをプロットで示している

図-5.14 落体エネルギー波形 (Aレーン)

BレーンとCレーンの落体エネルギー波形を図-5.15に示す。ポケットが敷砂緩衝層でないCレーンにおいてもポケット衝突により多くのエネルギーが減少しており、土堤衝突までに約80%以上のエネルギーが吸収されている。ポケットへ大きく貫入したことが要因であると考えられる。

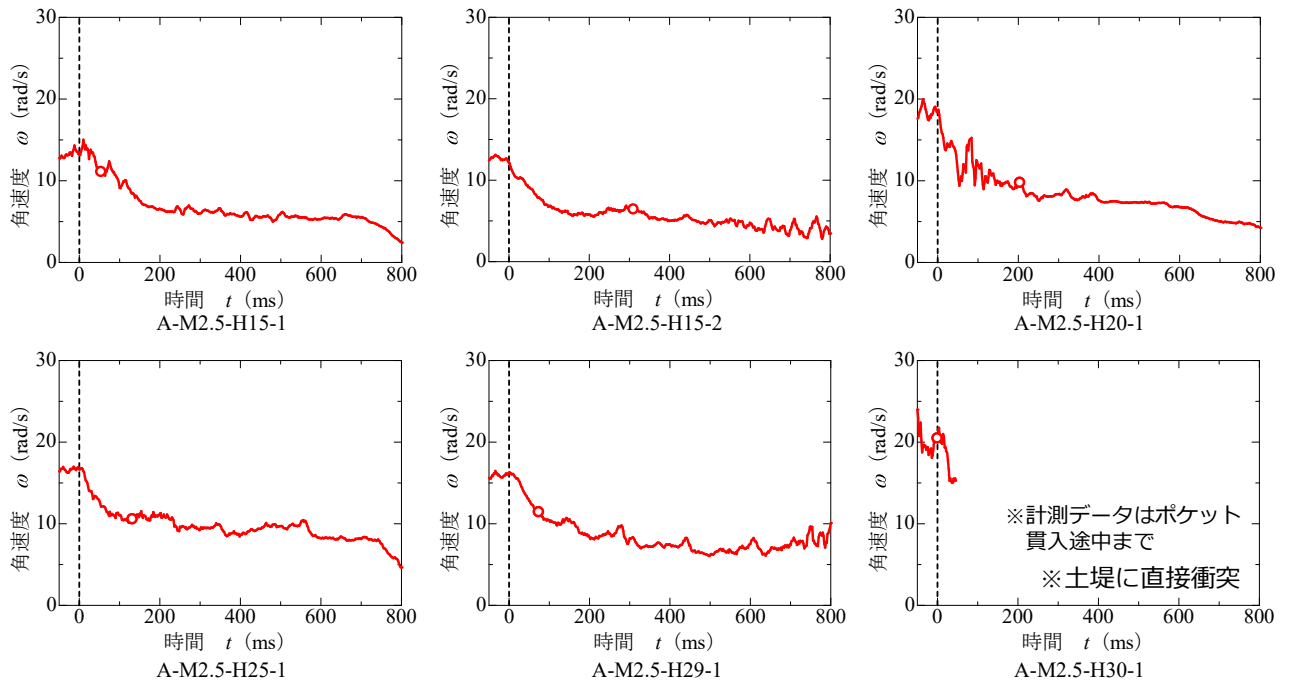


※土堤衝突時刻におけるエネルギーをプロットで示している

図-5.15 落体エネルギー波形 (B, Cレーン)

(5) 落体角速度

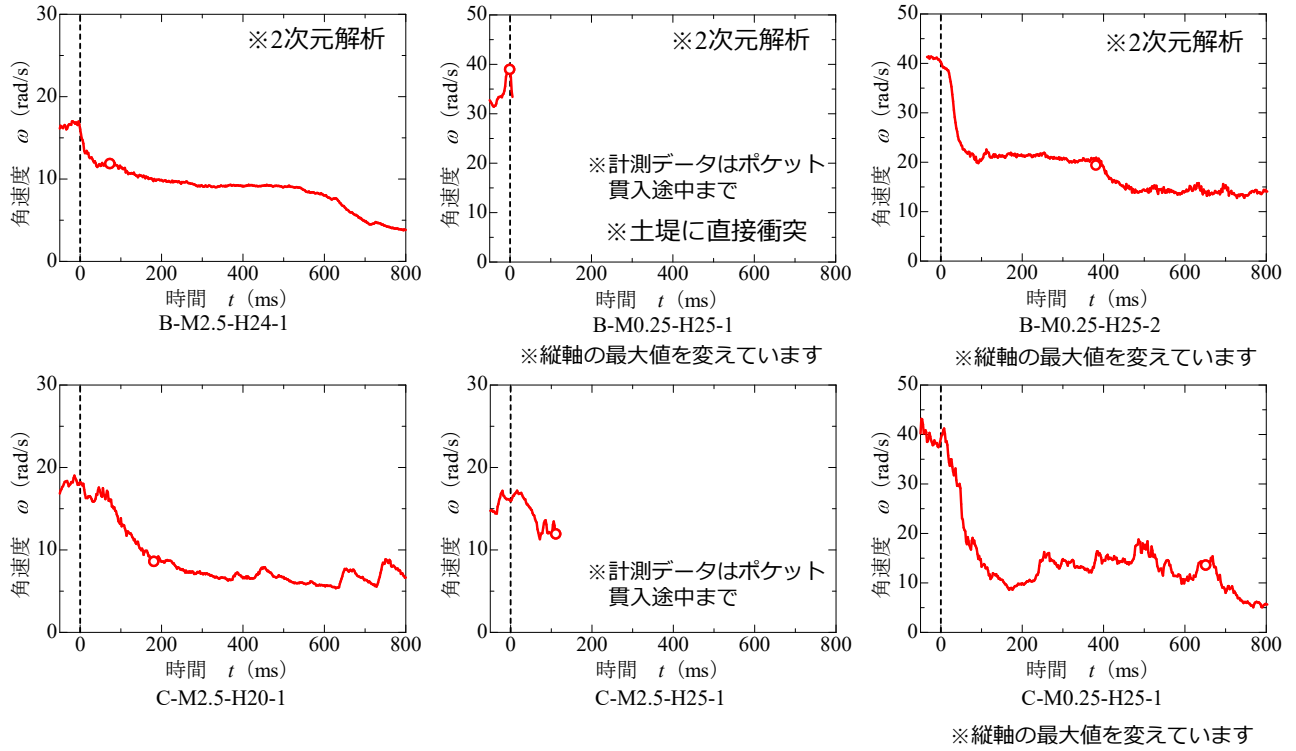
A レーンの落体角速度波形を図-5.16 に示す。ポケット衝突後、土堤衝突後ともに角速度は減少する傾向にあると読み取れる。土堤衝突後（土堤をかけ上がる最中）の角速度は約 10rad/s 以下で推移している。



※土堤衝突時刻における角速度をプロットで示している

図-5.16 落体角速度波形 (A レーン)

Bレーン、Cレーンの落体角速度波形を図-5.17に示す。ポケット衝突後、土堤衝突後ともに角速度は減少する傾向にあると読み取れる。0.25tでは慣性モーメントが小さいことで0.25tよりも大きい値で角速度が推移している。

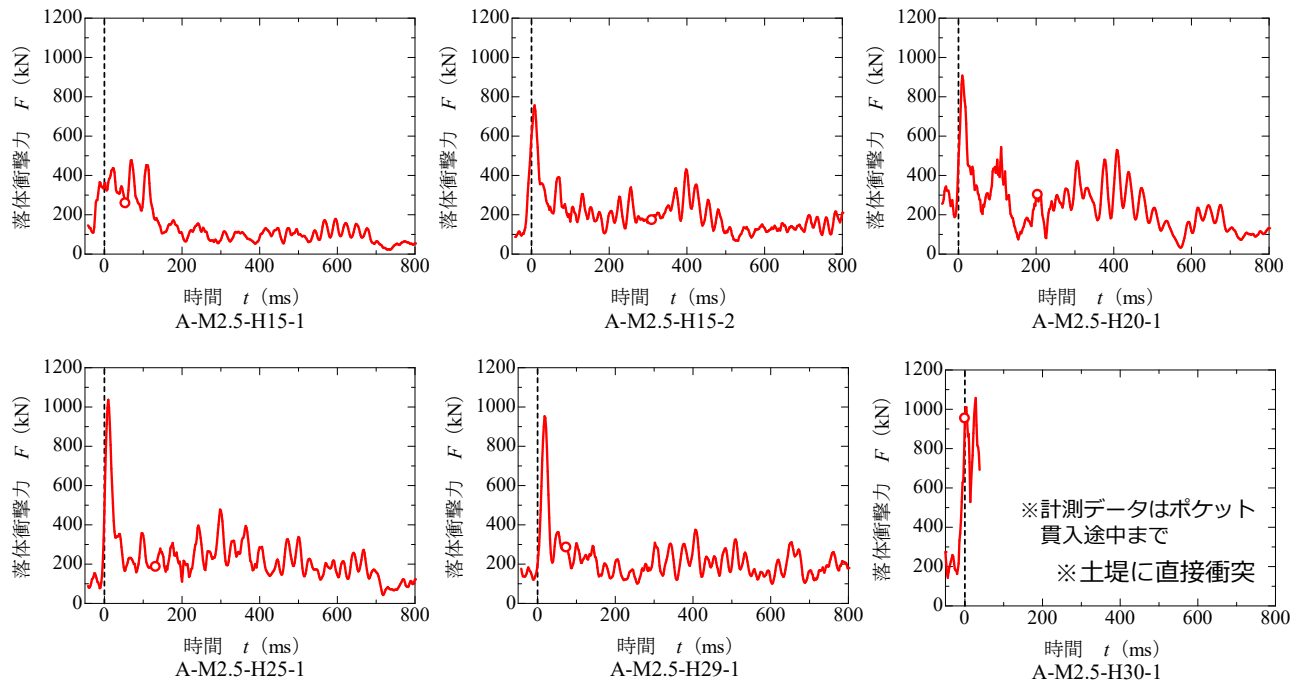


※土堤衝突時刻における角速度をプロットで示している

図-5.17 落体角速度波形 (B, Cレーン)

(6) 落体衝撃力

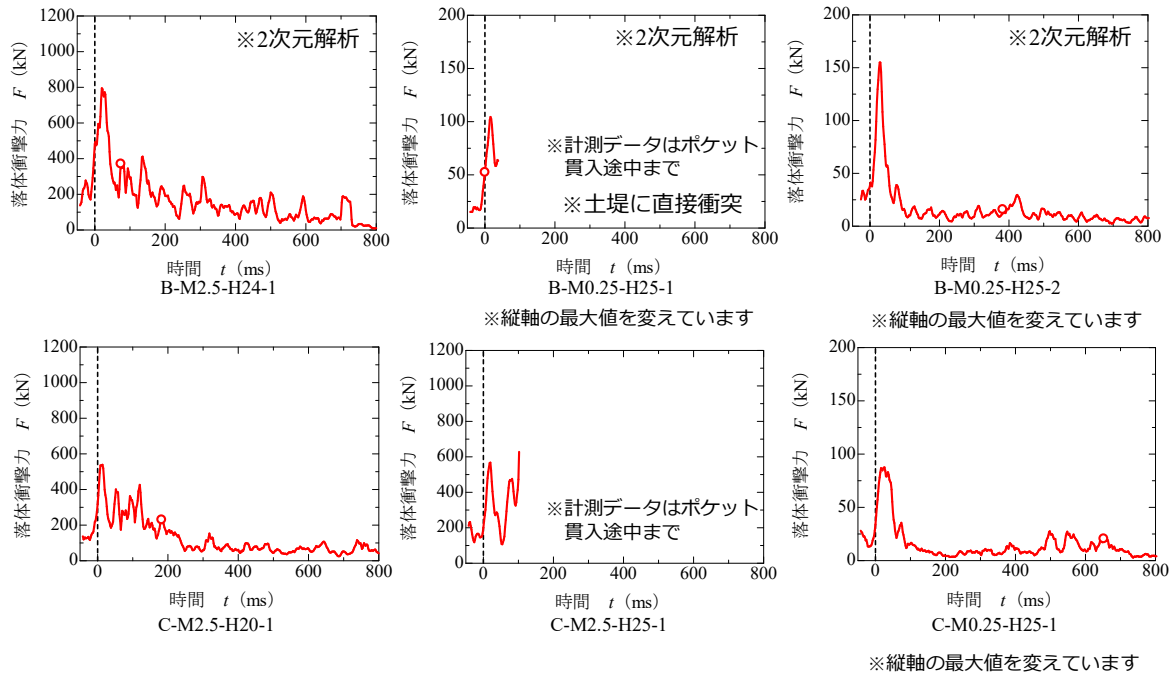
Aレーンの落体衝撃力波形を図-5.18に示す。いずれのケースともにポケット衝突直後に波形が立ち上がっており、土堤に直接衝突したA-M2.5-H30-1を除き、最大衝撃力はポケット衝突時に生じている。落下高さが大きいほど、最大衝撃力が大きくなっていることが読み取れる。



※土堤衝突時刻における衝撃力をプロットで示している

図-5.18 落体衝撃力波形 (Aレーン)

Bレーン、Cレーンの落体衝撃力波形を図-5.19に示す。B-M0.25-H25-2では、土堤衝突時刻にも波形の立ち上がりが見られる。ポケット衝突後に跳躍した後、土堤に衝突したことが要因であると考えられる。



※土堤衝突時刻における衝撃力をプロットで示している

図-5.19 落体衝撃力波形 (B, Cレーン)

(7) 土堤実験のまとめ

- 1) いずれのケースも落体を捕捉し、位置エネルギーは最大 735kJ であった。ポケット層への貫入により落体の跳躍や速度が減衰されている。
- 2) 落体の並進速度および角速度は、ポケット衝突時および土堤衝突時ともに減衰し、特にポケット衝突時の減衰が大きい傾向であった。
- 3) 落体のエネルギーは、土堤に直接衝突するケースを除いて、ポケット衝突により 50%程度以上減衰する。
- 4) 落体衝撃力は、土堤に直接衝突するケースを除いて、土堤衝突よりもポケット衝突が大きい。

5. 4 土砂系緩衝材の数値解析

実斜面を用いた実規模実験における土堤への落体衝突に対し、落体衝突速度および落体衝突位置を合わせて再現解析を試みる。なお、本節では、ポケットと土堤を分けて考えた方がポケットと土堤それぞれの衝突挙動の再現性を検討しやすいこと、再現解析によるポケット衝突後挙動が実験と異なる可能性があることから、土堤衝突時のみを再現解析の対象としている。

(1) 解析概要

二次元 DEM (個別要素法) により実験の再現解析を実施した。解析概要図を図-5.20 に示す。解析パラメータを表-5.7 に示す。入力パラメータは、実験結果から得られた土堤衝突条件 (衝突位置、衝突速度、角速度) を使用した。なお、図-5.21 のように、本実験では落体が緩衝層と接触したまま土堤に衝突したケースが多くみられたため、再現解析において落体初期位置を定める際に左図のようにポケット表層と落体が重複してしまい、解析を正常に実施できなくなる事例が生じた。土堤の衝突面側は緩衝層の層厚 0.6m 分と緩衝層へ貫入した状態で土堤に衝突したケース (C-M2.5-H20-1) があつたため、余裕長 0.1m の合計 0.7m に相当する土塊を掘削し、落体とポケット表層の重複を防いだ条件で再現解析を実施している。

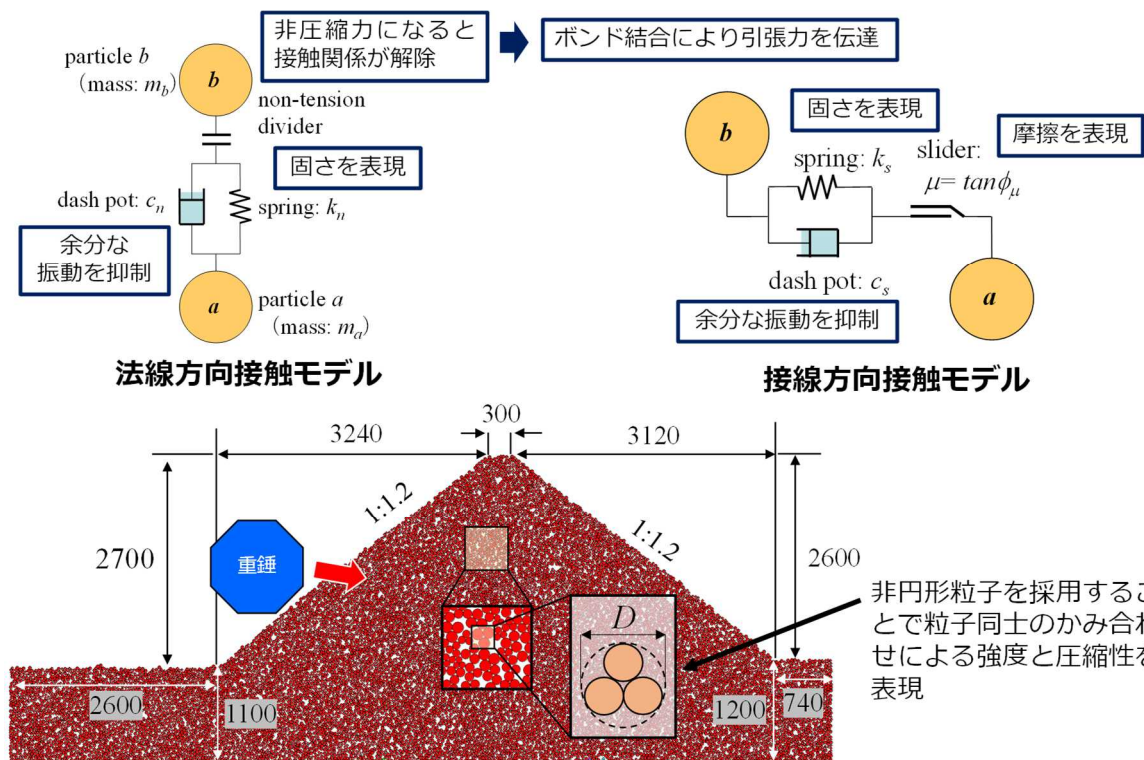


図-5.20 解析概要図 (単位: mm)

表-5.7 解析パラメータ

パラメータ	記号 (単位)	設定値
粒子直径	D (m)	
	最大粒径 D_{max}	0.05
	最小粒径 D_{min}	0.025
	平均粒径 D_{50}	0.0375
粒子の密度	ρ_s (kg/m ³)	2650
法線方向ばね定数	k_n (N/m)	2.0×10^7
接線方向ばね定数	k_s (N/m)	5.0×10^6
粒子間摩擦角	ϕ_u (deg.)	25
減衰定数	h	1.0
ボンド直径	D_b (m)	0.025
ボンドばね定数	k_b (N/m)	2.0×10^8

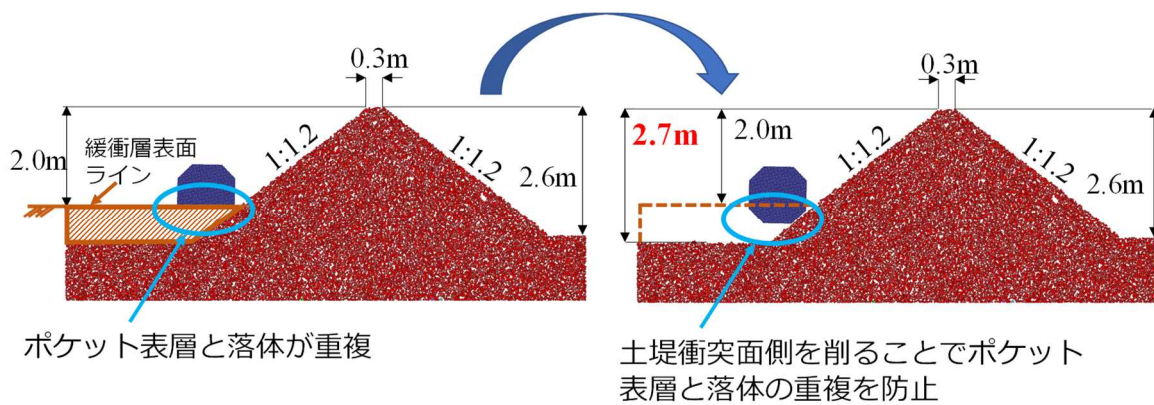


図-5.21 解析概要図

(2) 解析条件

解析ケースと落体の衝突条件を表-5.8に示す。なお、表中の衝突角については、図-5.22を参照されたい。

表-5.8 解析ケース一覧

ケース名	衝突高さ (m) 法尻原点	鉛直速度 (m/s)	水平速度 (m/s)	角速度 (rad/s)	衝突角 (°)	全運動エネルギー (kJ)
A-M2.5-H15-1	0.27	-2.47	9.61	11.10	54.24	146.65
A-M2.5-H15-2	0.54	2.55	3.30	6.43	2.09	29.62
A-M2.5-H30-1	0.33	-7.92	15.25	20.30	67.25	448.29
B-M0.25-H25-2	0.80	1.73	5.89	19.33	23.47	6.21
B-M2.5-H24-1	0.36	1.64	8.12	11.83	28.38	112.65
C-M2.5-H20-1	0.064	2.01	3.22	8.56	7.79	1.39

鉛直速度：負→鉛直下向き、正→鉛直上向きの速度をもって衝突

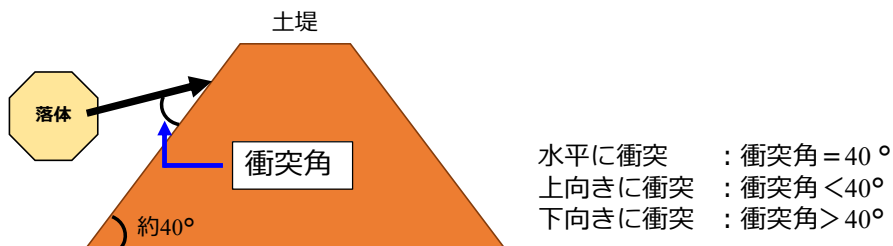


図-5.22 衝突角イメージ図

(3) 離散化図

基準ケースである A-M2.5-H15-1 の離散化図を図-5.23 に示す。

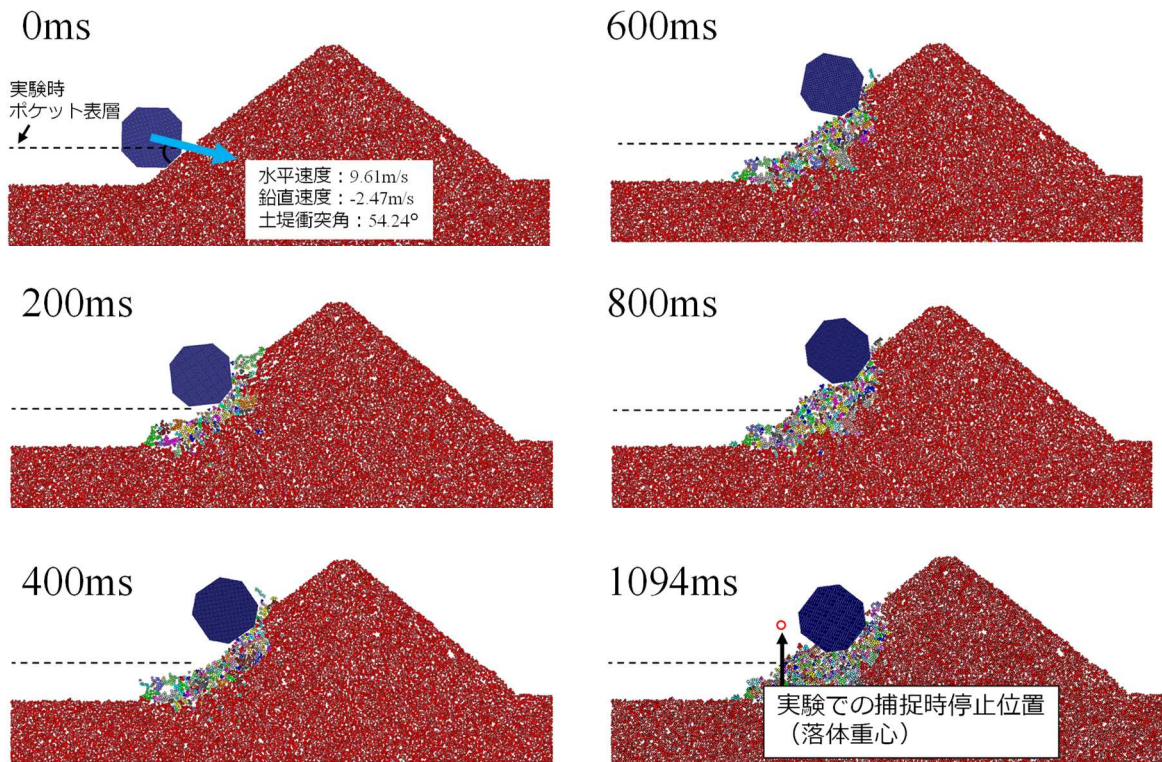


図-5.23 離散化図 (A-M2.5-H15-1, 基準ケース)

土堤衝突角の比較ケースである A-M2.5-H15-2 の離散化図を図-5.24 に示す。

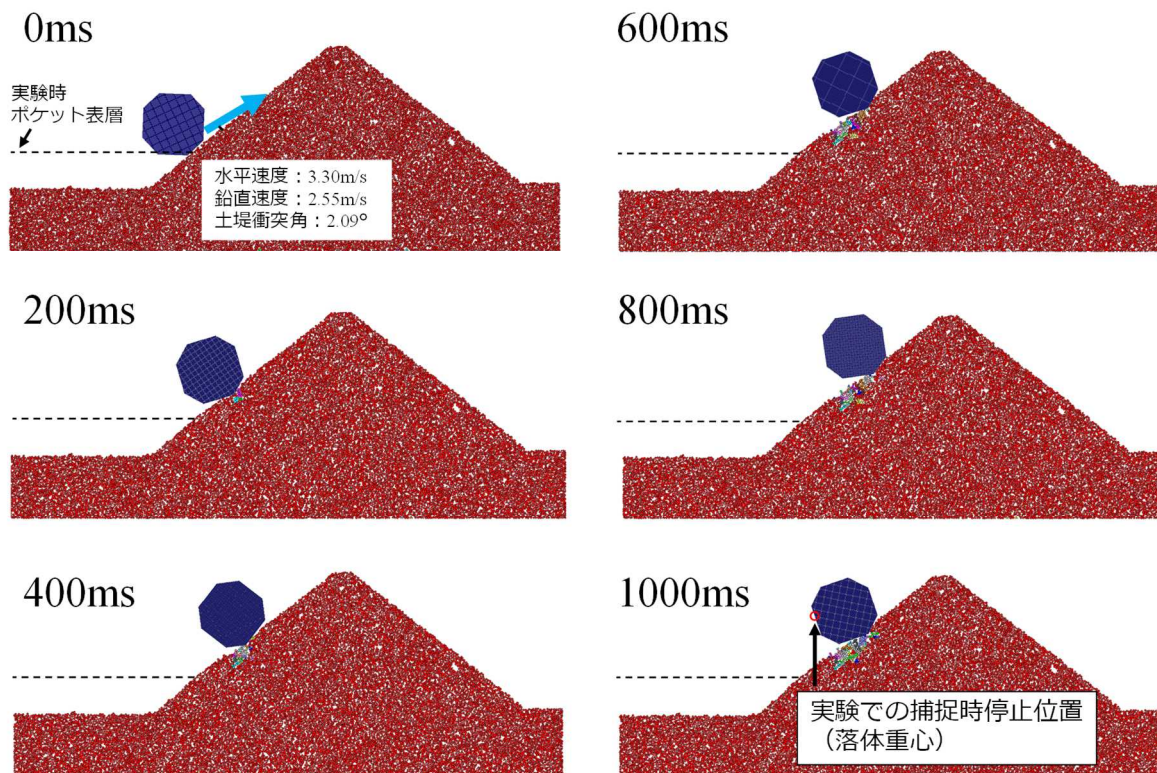


図-5.24 離散化図 (A-M2.5-H15-2, 土堤衝突角の比較ケース)

土堤に直接衝突したケースである A-M2.5-H30-1 の離散化図を図-5.25 に示す。

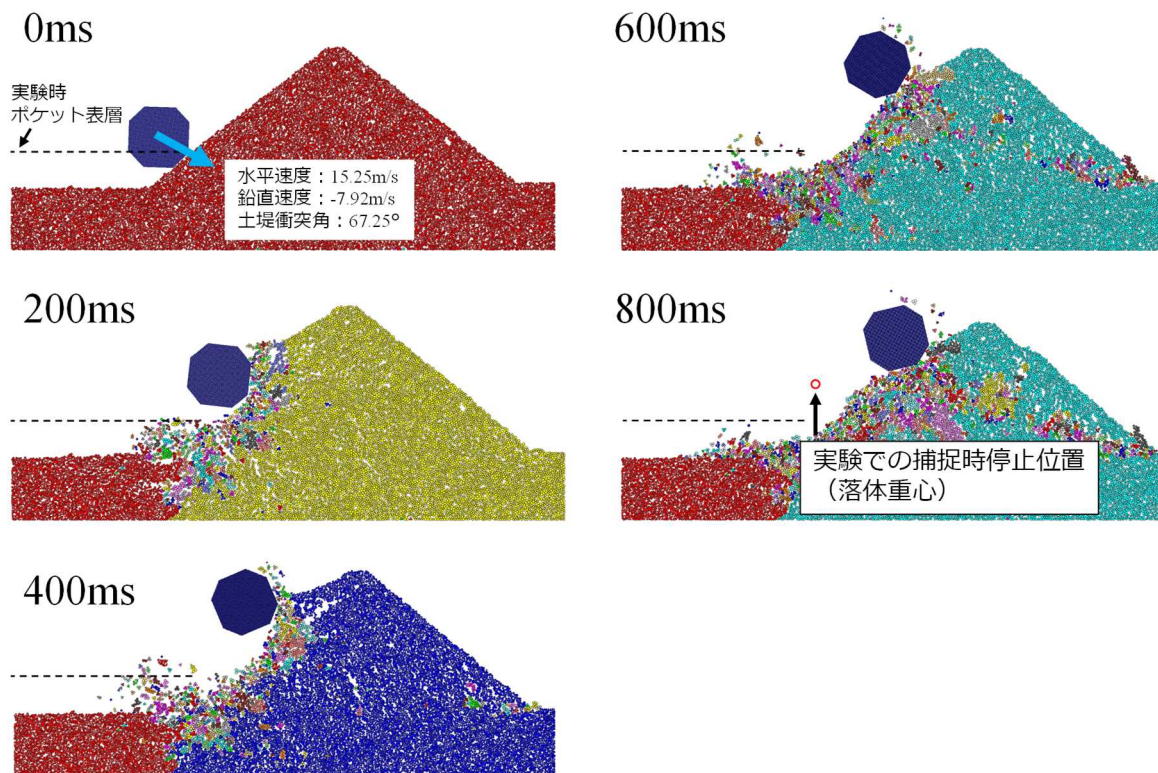


図-5.25 離散化図 (A-M2.5-H30-1、土堤に直接衝突したケース)

落体質量 0.25t のケースである B-M0.25-H25-2 の離散化図を図-5.26 に示す。

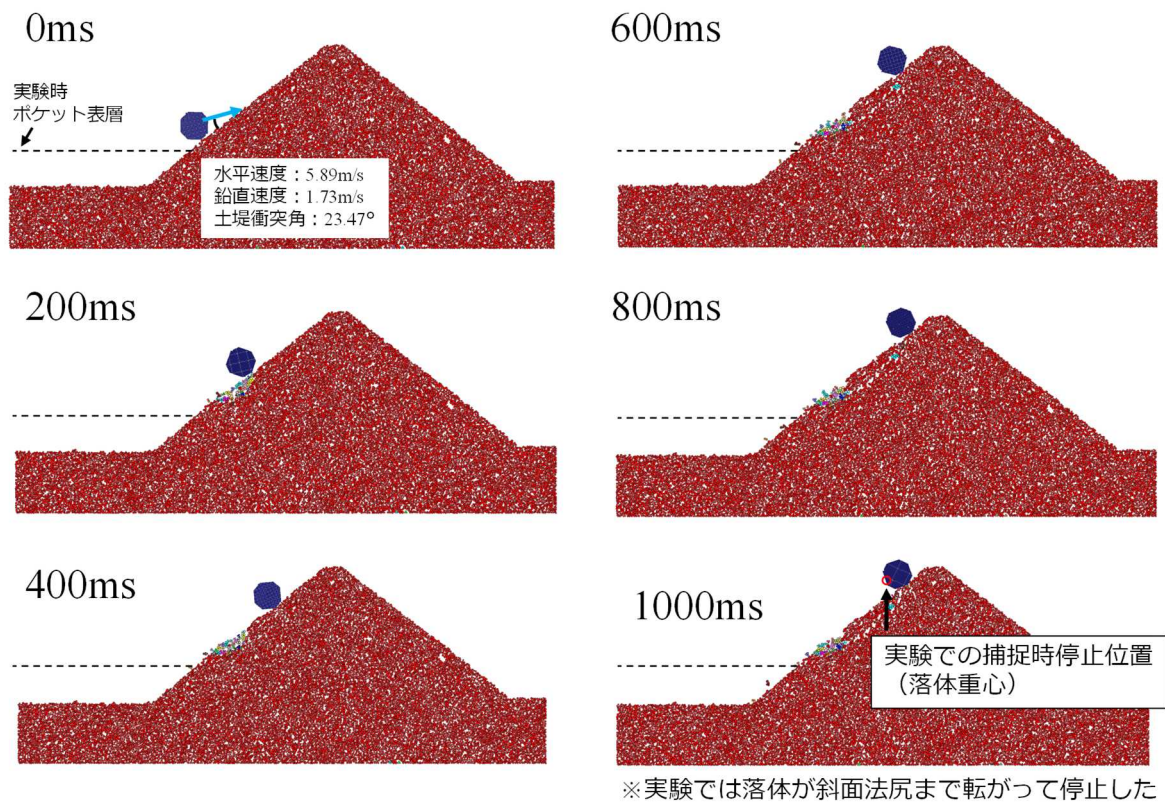


図-5.26 離散化図 (B-M0.25-H25-2 : 落体質量 0.25t のケース)

通過寸前で停止したケースである B-M2.5-H24-1 の離散化図を図-5.27 に示す。

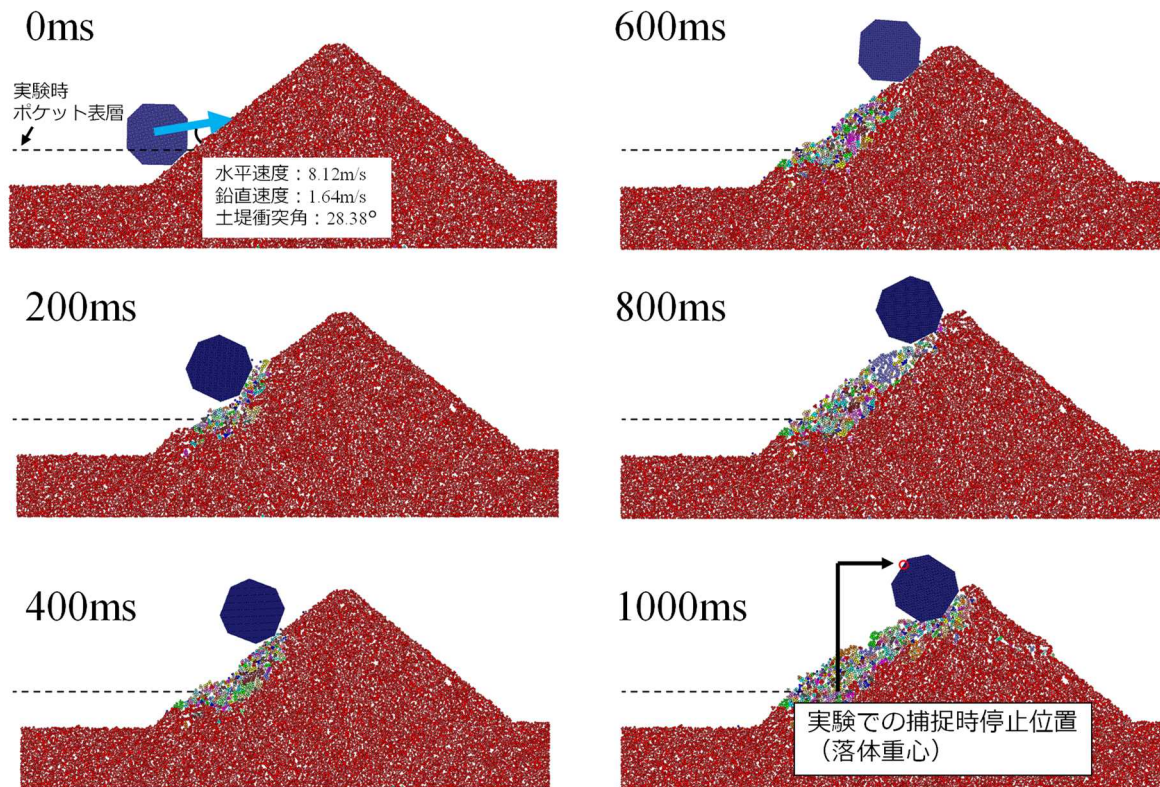


図-5.27 離散化図 (B-M2.5-H24-1 : 通過寸前で停止したケース)

ポケットでのエネルギー減衰が大きいケースである C-M2.5-H20-1 の離散化図を図-5.28 に示す。

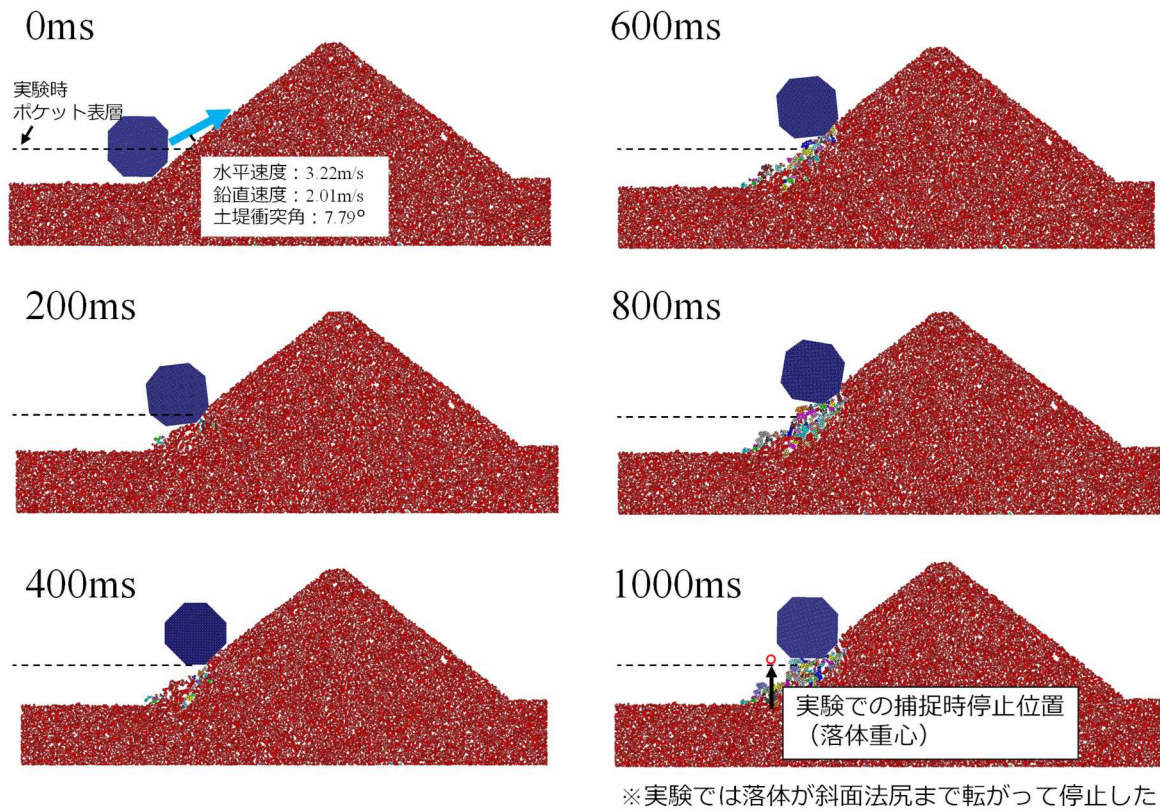


図-5.28 離散化図 (C-M2.5-H20-1 : ポケットでのエネルギー減衰が大きいケース)

(4) 落体軌跡

落体軌跡図を図-5.29に示す。実験結果では、落体が土堤に衝突後に反発し土堤法面から離れる挙動となっているが、解析結果では図-5.30に示すように土堤衝突後も落体は土堤を離れることなく落体が法面表層の粒子を削り飛ばしながら、法面を駆け上がる挙動を示している。実際の土堤に比べ、本解析モデルでは粒子の圧縮性が小さいことが示唆された。今後の課題として、B-M2.5-H24-1は実験結果では落体が天端付近まで到達し、通過寸前で停止したケースとなったが、再現解析においても捕捉した。また、いずれのケースともに捕捉時の到達高さは実験結果と概ね一致したことから、一定程度の再現性を示すことができたと考えられる。

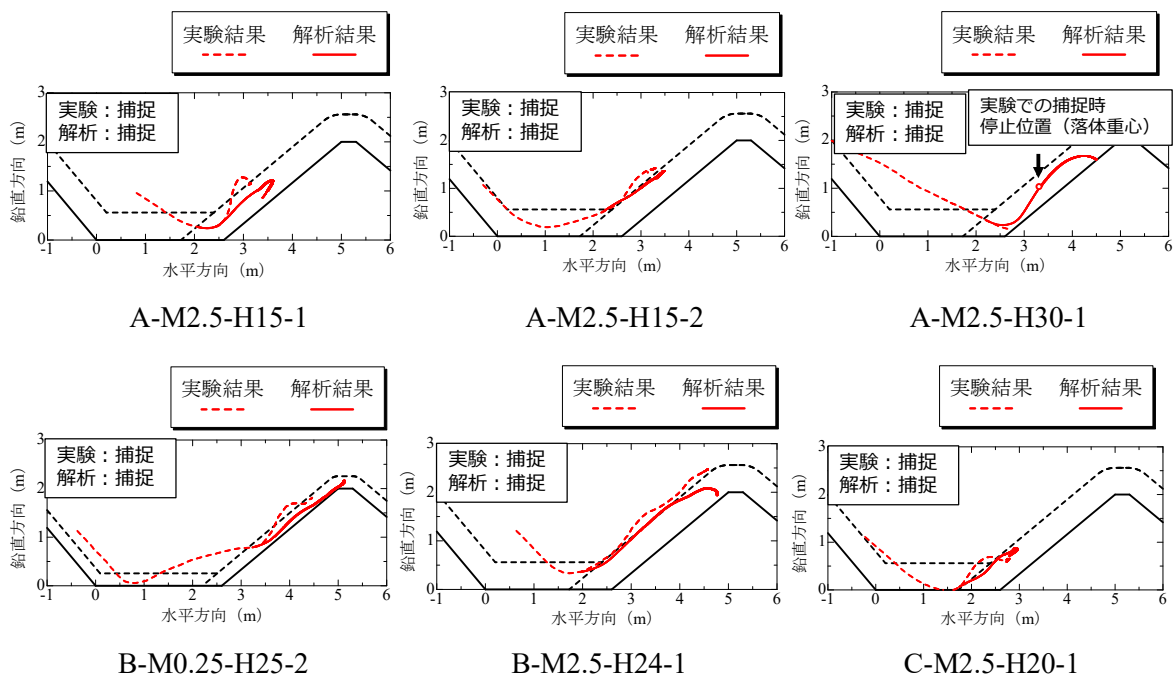


図-5.29 落体軌跡図

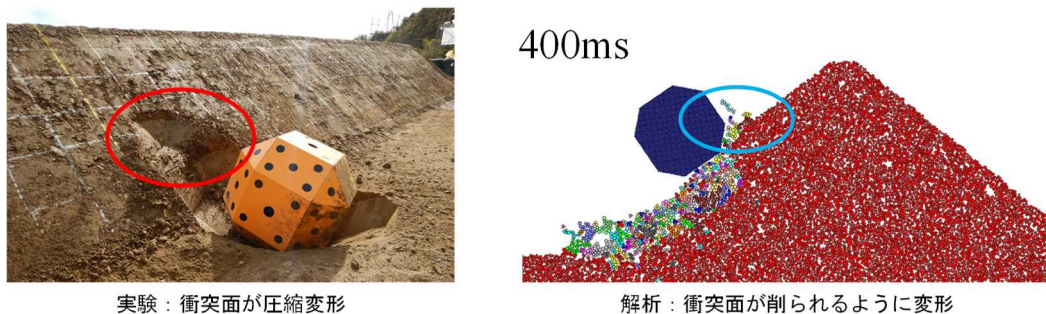


図-5.30 A-M2.5-H15-1の土堤変形性状

(5) 落体速度

落石速度波形図を図-5.31に示す。土堤衝突角の大きいケースでは鉛直速度及び合成速度の波形は概ね一致しているが、水平速度の波形は、解析結果の方が実験結果より大きい値で推移している（減衰していない）ことが分かる。実験では土堤衝突後に落体が鉛直上向き方向に反発する挙動を示しているが、解析ではモデルの粒子の圧縮性が小さいため、落体が法面をかける挙動となり、実験と比べて水平速度が減衰しない結果となったと考えられる。A-M2.5-H15-1、B-M0.25-H25-2の200ms前後で上記の傾向が強く見られる。この時刻における落体軌跡に着目すると、図-5.32に示すように解析では法面をかける挙動となっており、実験では鉛直上向き方向に反発する挙動を示している。土堤衝突角の小さい（ 10° 以下）ケース（A-M2.5-H15-2、C-M2.5-H20-1）では土堤衝突後の速度の減衰が緩やかであり、いずれの速度波形も概ね一致している。実験で落体が反発することなく、法面をかける挙動を示したため、解析と実験での軌跡のズレが小さくなったためであると考えられる。

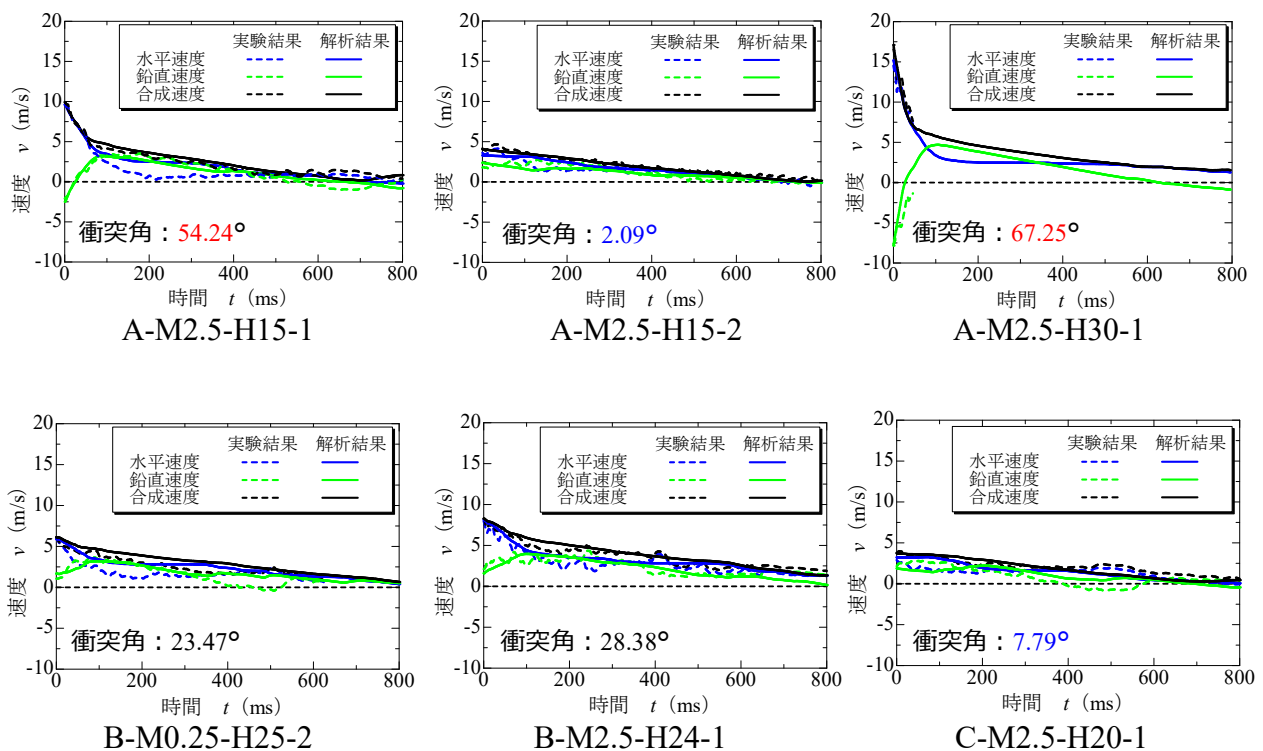


図-5.31 落石速度波形図

A-M2.5-H15-1

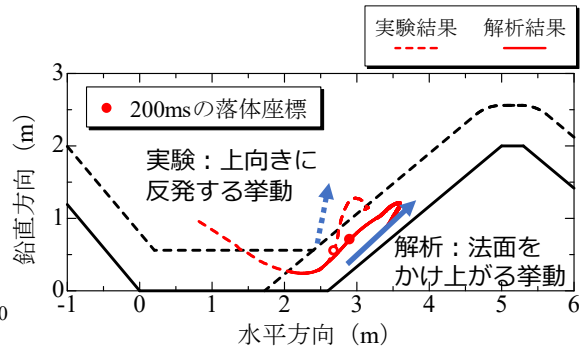
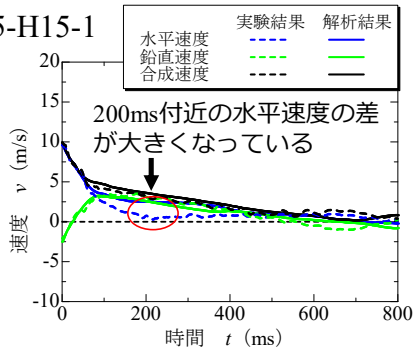


図-5.32 解析における法面のかけ上り挙動

(6) 落体角速度

落体角速度波形を図-5.33に示す。土堤衝突直後～約400msの角速度の波形は概ね一致している。約400ms以降の波形は実験結果よりも解析結果の方が小さい値で推移している。実験では土堤衝突後に落体が反発し法面から離れている時間があり、その間においては角速度が減衰しにくい。解析では法面をかけたがり続けるため常に摩擦が作用することで角速度が減衰し続け、解析結果と実験結果に差が生じたと考えられる。B-M0.25-H25-2では解析結果にて土堤衝突直後に角速度が増加しているが、これは、法面に対して落体が角当たりすることで線速度が回転に変換されることが要因であると考えられる。

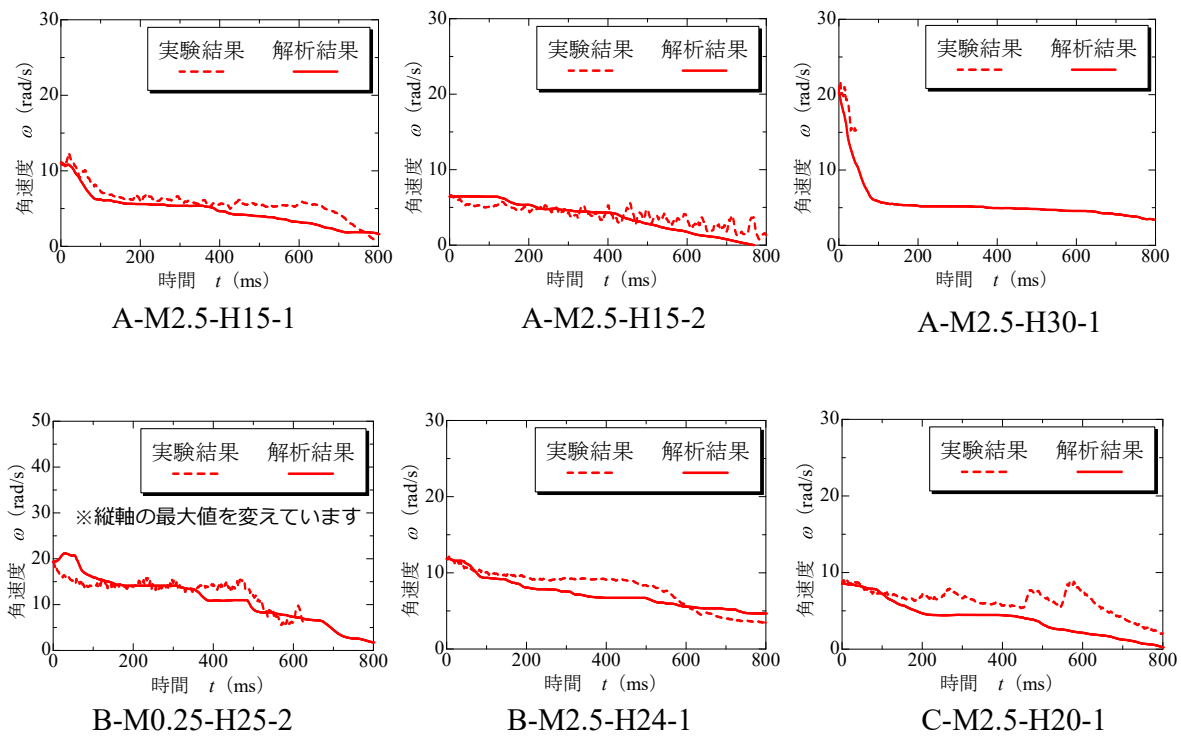


図-5.33 落体角速度波形

(7) 落体エネルギー

落体エネルギー波形を図-5.34に示す。土堤付近、もしくは土堤に直接衝突したケース (A-M2.5-H15-1, A-M2.5-H30-1, B-M2.5-H24-1) では土堤衝突後～約 100ms にかけてエネルギーが急激に減衰しており、その後は緩やかな減衰に転じている。緩衝層に大きく貫入した後土堤に直接衝突したケース (A-M2.5-H15-2, B-M0.25-H25-2, C-M2.5-H20-1) では、緩やかな減衰が継続している。どちらの衝突のモードにおいても、解析結果と実験結果のエネルギー波形は概ね一致していることから、解析により一定程度の再現性を示すことができたと考えられる。

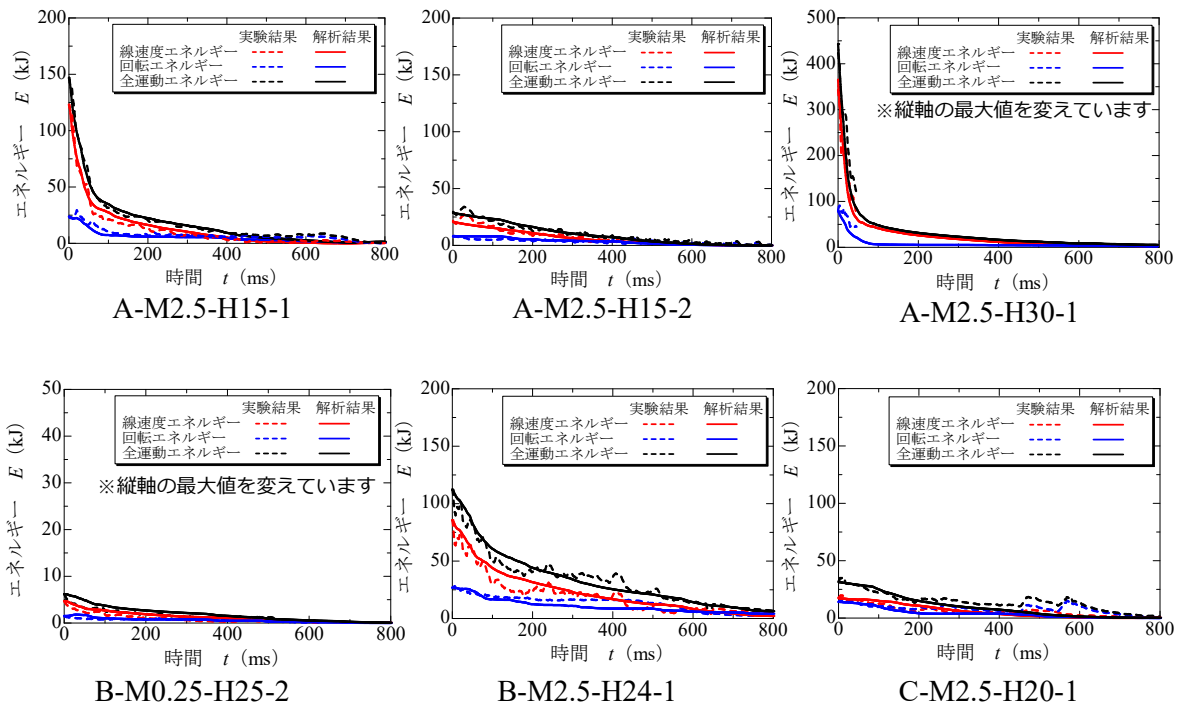


図-5.34 落体エネルギー波形

(8) 落体衝撃力

落体衝撃力波形を図-5.35 に示す。土堤への衝突角が大きいケース (A-M2.5-H15-1、A-M2.5-H30-1) では、土堤衝突直後の衝撃力の立ち上がり、及び最大衝撃力は解析結果と実験結果が概ね一致している。土堤への衝突角が小さいケース (A-M2.5-H15-2、B-M2.5-H24-1) では、解析結果において衝撃力の立ち上がりが見られず、解析結果の方が最大衝撃力の値が小さくなった。特に土堤への衝突角が最も小さい A-M2.5-H15-2 (衝突角: 2.09°) では解析結果と実験結果の差が顕著に見られた。解析では土堤への貫入量が小さくなる傾向があるため、衝突角の小さい本ケースでは土堤法面を転がり上がる挙動が卓越したことで、衝撃力の立ち上がりが見られなかったと考えられる。

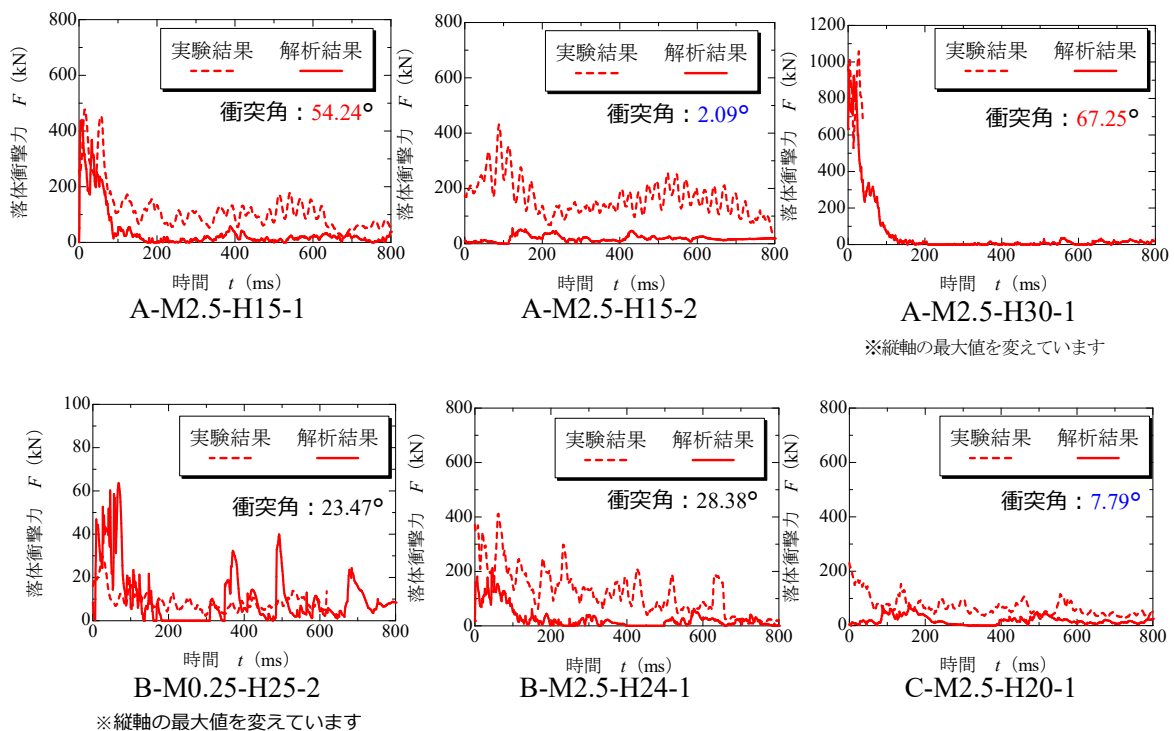


図-5.35 落体衝撃力波形

(9) 再現解析のまとめ

- 1) 実験と同様に、いずれのケースも落体を捕捉した。落体が土堤に直接衝突するケースを除き、落体捕捉位置はおおむね同様であった。
- 2) 落体軌跡について、実験では落体が土堤衝突後に反発して土堤法面から離れる挙動を示すのに対し、解析では土堤衝突後も落体は土堤法面から離れることなく表層粒子を削り飛ばしながら法面を駆け上がる挙動となった。土堤の圧縮変形の再現性が課題であると考えられる。
- 3) 落体の並進速度および角速度は、実験を概ね再現する傾向となった。軌跡の違いにより、水平速度および角速度が実験よりも大きい時刻帯が見受けられる。
- 4) 落体のエネルギーは、実験をおおむね再現できていた。
- 5) 落体衝撃力は、土堤衝突角が大きいケースは実験をおおむね再現していた。衝突角が小さいケースは明瞭な第1波が生じなかった。

5章の参考文献

- 1) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12

6. おわりに

本研究では、土質系緩衝材の落石による外力評価技術の提案および落石防護土堤や溝の緩衝効果の評価技術の提案を目的に、土質系落石防護施設の性能設計の確立に向けた基礎的研究として、土質系緩衝材への落石による外力評価技術に関する検討と落石防護土堤および溝の緩衝効果の評価技術に関する検討を行った。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

第2章では、地盤条件が変化した場合における落石衝撃力を把握するため、相対密度、土層幅、地盤材料を変えて小型模型実験を実施し、それぞれの落体衝撃力波形についての考察を行った。砂と碎石間での最大落体衝撃力、衝撃力波形の立ち上がりの差は、砂と碎石の内部摩擦角の違いが原因と推察された。また、落体衝撃力波形の継続時間は、力積の消費速度の違いによるものだと考えられる。落体衝撃力波形の2波目の有無は、反射波が落体に到達した時刻における貫入速度の有無に依存している可能性があることを示した。

第3章では、落石防護土堤・溝の設計の現状を整理した。現在の土質系落石防護施設の設計においては、落石エネルギーを吸収・消散させるという設計の考え方は示されつつも、それらを具体的に照査する性能設計には至っていない。現場発生土等を使用した落石防護土堤・溝は、経済的貢献も期待されるため、早急に性能設計を確立することが望ましいことを示した。

第4章では、落石防護土堤の基本性能を検証することを目的に、小型模型を用いた静的載荷実験と重錘衝突実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて個別要素法による再現解析を実施した。

静的載荷実験では、砂、粘性土、碎石で実験を実施した。砂では球体重錘、多面体重錘、1:1.0 勾配も併せて実施し、それぞれの耐荷力を実験的に確認した。粘性土以外では押抜き破壊が生じ、粘性土では圧縮変形により、重錘が貫入する結果であった。

重錘衝撃実験では、静的実験と同様に、砂、粘性土、碎石での実験に加え、重錘質量も変化させたケースも併せて実施した。54kg 重錘を用いた材料が異なるシリーズでは、砂に比べて、粘性土は重錘が貫入することで大きな落石捕捉性能を発揮する。碎石では重錘が貫入しないことから落石捕捉性能に劣る傾向となった。178kg 重錘を用いた材料が異なるシリーズでは、土堤に重錘が貫入し、土堤内で重錘が停止する結果が得られた。落下高さが大きい場合には、砂では重錘が土堤を貫通した。粘性土では大きく押抜き破壊が生じるものの、重錘を捕捉する結果が得られた。54kg と 178kg 重錘を用いた重錘質量が異なるシリーズでは、54kg 重錘と同様の運動量やエネルギーとした場合には、178kg 重錘を用いると土堤に重錘が貫入して捕捉する傾向にあった。以上より、重錘が土堤に貫入する条件では落石捕捉性能が向上することがわかった。

静的載荷実験の再現解析の結果、局所的な荷重の増減は表現可能であるものの、荷重レベルが大きく異なる結果となった。荷重に抵抗する押抜き土塊は土堤延長方向に拡がることから、2次元解析ではそ

の荷重抵抗を發揮させることが出来なかったものと考えられる。

重錘衝突実験の再現解析の結果、砂のかけ上がり挙動は再現可能であるものの、損傷度合いが過大評価となった。粘性土および碎石については、捕捉性能の優劣の表現は可能だが、圧縮変形および貫入量などの表現性について課題が残る。エネルギー波形等は概ね再現可能であるものの、重錘の捕捉の可否について実験結果と解析結果が異なるケースが生じた。これらは材料も重錘質量も異なることから、解析モデルの再考、3次元解析への発展が必要と考えられる。今後、側面抵抗、粘性土の圧縮性・塑性、碎石の粒子径・バネ定数等の検討が必要である。

第5章では、落石防護土堤・溝の基本性能を検証することを目的に、実斜面を用いた実規模実験と、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて個別要素法による再現解析を実施した。

ポケット部を対象とした実験では、いずれのケースも表層部等に落体が貫入し、リバウンドはほぼ発生しなかった。基礎部がコンクリートで砂の移動の拘束されたレーンで貫入量が小さく、エネルギーが零レベルに到達する時刻が小さくなった。また、土堤を対象とした実験では、いずれのケースも落体を捕捉し、位置エネルギーは最大735kJであった。ポケット層への貫入により落体の跳躍や速度が減衰されている。落体の並進速度および角速度は、ポケット衝突時および土堤衝突時ともに減衰し、特にポケット衝突時の減衰が大きい傾向であった。落体のエネルギーは、土堤に直接衝突するケースを除いて、ポケット衝突により50%程度以上減衰することを確認した。落体衝撃力は、土堤に直接衝突するケースを除いて、土堤衝突よりもポケット衝突が大きくなった。

再現解析においては、実験と同様に、いずれのケースも落体を捕捉する結果となった。落体が土堤に直接衝突するケースを除き、落体捕捉位置はおおむね同様であった。落体軌跡について、実験では落体が土堤衝突後に反発して土堤法面から離れる挙動を示すのに対し、解析では土堤衝突後も落体は土堤法面から離れることなく表層粒子を削り飛ばしながら法面を駆け上がる挙動となった。土堤の圧縮変形の再現性が課題であると考えられる。落体の並進速度および角速度は、実験を概ね再現する傾向となった。軌跡の違いにより、水平速度および角速度が実験よりも大きい時刻帯が見受けられる。落体のエネルギーは、実験をおおむね再現できていた。落体衝撃力は、土堤衝突角が大きいケースは実験をおおむね再現していた。

本研究では、実験および数値解析的検討によって落石防護土堤・溝の基本性能の一部を明らかにしている。性能設計の確立に向けては、実規模実験時に観測された落石のかけ上がり挙動が生じる条件など、引き続き検証が必要な事項も確認できた。特に、落石の入射角度や回転速度などの落石挙動の違いは、土堤の落石捕捉性能に大きく影響を及ぼす可能性がある。また、数値解析では、ケースによっては落石衝突時の土堤の変形性状等を正確に再現できておらず、性能設計における性能照査に数値解析を用いるためには、より高い精度での土堤の変形性状の再現が必要となる。これらの課題については後継的な検討が望まれる。

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.585 March 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046