

# 土質系落石防護施設の設計法に関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 30～令 3

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西弘明、葛西聡、安中新太郎、  
今野久志、荒木恒也、山澤文雄、  
寺澤貴裕、内田侑甫、石原寛也

## 【要旨】

落石等の道路斜面災害は人命に直接関わるとともに、道路網の寸断によって地域生活に多大な影響を与えることから、落石災害を防止する適切な対策の実施が求められている。本研究では、規模の大きな落石への対策工のひとつである土質系落石防護施設を対象に、現在の設計の考え方や新工法の概要等を整理することによって性能設計の確立に向けた課題を明確にした。また、一般的な土質材料を用いた落石防護土堤・溝の基本性能を確認することを目的に、小型模型や実規模模型を用いた載荷実験を実施し、土質材料や法面勾配等の違いが土堤の落石補足性能に及ぼす影響、溝の緩衝効果、土堤が捕捉できる落石エネルギー等を確認した。さらに、数値解析による性能照査技術の確立に向けて、個別要素法による土堤の破壊挙動に関する再現解析を行うことで、解析精度向上のための課題を示した。

キーワード：落石防護施設、落石防護土堤・溝、個別要素法

## 1. はじめに

落石の発生は人命に直接関わるとともに、道路網の寸断によって地域生活に大きな影響を与える。このため、落石等による災害を防止する適切な対策の実施が求められる。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-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。

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<sup>1)</sup>や道路土工指針<sup>2)</sup>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とされている。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。

本研究では、土質系落石防護施設の性能設計の確立に向けた基礎研究として、既往の設計の考え方や新工



写真-1 落石防護土堤・溝

法の概要等を整理するとともに、一般的な土質材料で構成された落石防護土堤・溝の基本性能を確認するための実験的検証を行った。また、数値解析による性能照査技術の確立に向けて、個別要素法による模型実験の再現解析を実施し、解析精度向上のための課題の抽出を行った。

## 2. 土質系落石防護施設の設計・施工上の課題

落石対策便覧<sup>1)</sup>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。

①、②については、落石対策便覧の初版である昭和58年版<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>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Ritchie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<sup>5)</sup>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的设计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。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的设计においては、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・溝的设计においても同様であった<sup>6)</sup>。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. 落石防護土堤・溝の基本性能検証

一般的な土質材料で構成される落石防護土堤・溝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、実斜面を活用した実規模模型による重錘衝突実験を実施した。また、数値解析を活用した性能照査技術の確立に向けて、これらの実験結果の一部に対して個別要素法による再現解析を実施している。本章では、これらの実験結果および再現解析結果の一部を概説する。

#### 3.1 小型模型による実験的検証

##### 3.1.1 静的載荷実験による性能検証<sup>7)</sup>

###### (1) 実験概要

実験ケース一覧を表-1に示す。土質材料等の違いが土堤の破壊性状等に及ぼす影響等を確認するために、構成材料は、砂、粘性土、碎石の3種類とし、その他に土堤勾配や載荷治具先端に取り付けた重錘形状を変化させた。なお、重錘形状は、後述の重錘衝突実験と同形状としている。試験体の一例として、法面勾配1:1.5のケースの概要図を図-1に示す。試験体は、実物

表-1 静的載荷実験の実験ケース一覧

	ケース	構成材料	法面勾配	重錘形状
(a)	S1.5-S	砂	1 : 1.5	球体
(b)	S1.0-S	砂	1 : 1.0	球体
(c)	S1.5-P	砂	1 : 1.5	多面体
(d)	C1.5-S	粘性土	1 : 1.5	球体
(e)	G1.5-S	碎石	1 : 1.5	球体

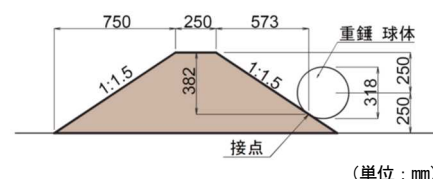


図-1 小型模型概要図（法面勾配1:1.5の場合）

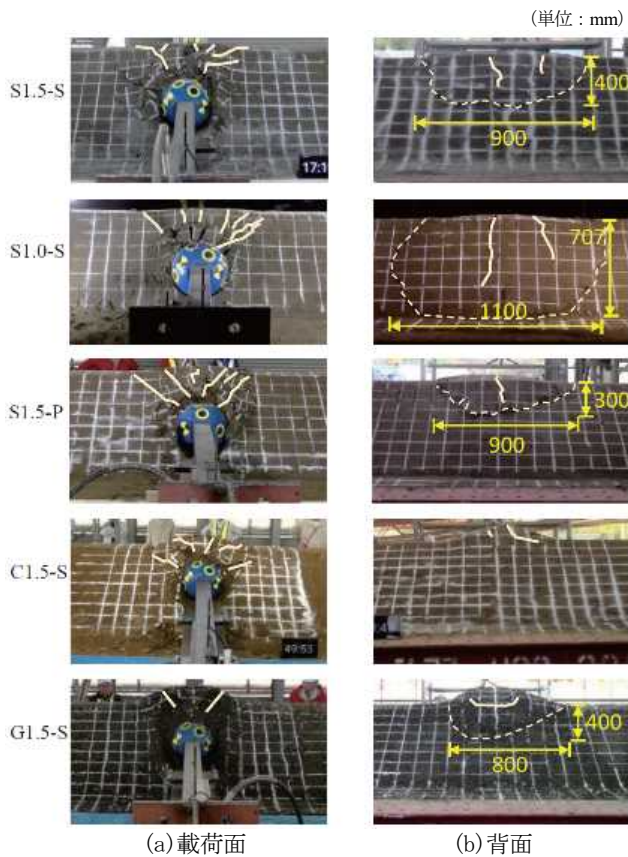


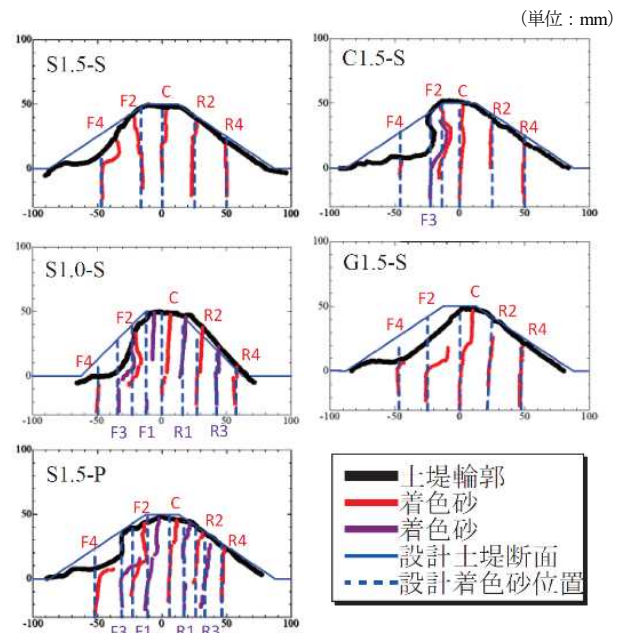
図-2 破壊性状

大の1/5~1/4の大きさを想定した小型模型とした。断面形状は、高さは0.5m、天端幅0.25m、底面幅1.75m（法面勾配1:1.5）または1.25m（法面勾配1:1.0）の左右対称の台形状とした。なお、土堤は、深さ0.9mの支持基層上に設置している。試験体の成形は、支持基層を厚さ0.3m毎に、土堤を厚さ0.25m毎に敷均し、振動締固め機による締固めを行った。載荷は、油圧ジャッキによる水平載荷とし、載荷位置は、土堤の半分の高さ（0.25m）とした。

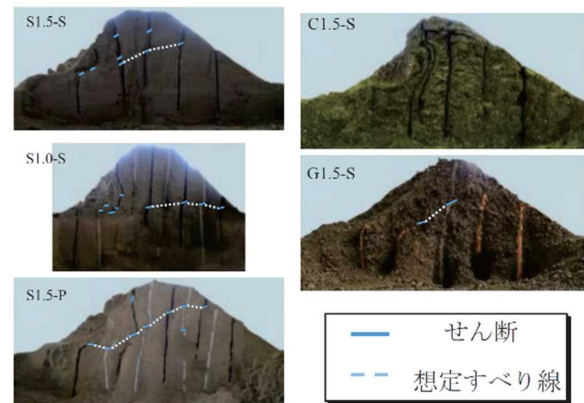
## (2) 実験結果

載荷終了時の載荷面および背面の状況を図-2に示す。なお、図中の白色実線はひび割れをトレースしており、背面の破線は押抜き土塊の範囲を示している。いずれのケースにおいても、重錘は土堤に貫入しており、載荷面および土堤天端にはひび割れが発生している。また、破壊性状としては、粘性土を用いたC1.5-Sでは明確な押抜き土塊が認められなかったものの、それ以外のケースでは押抜き破壊の様相を呈している。

砂で構成されたS1.5-S、S1.0-S、S1.5-Pを比較すると、法面勾配が小さいS1.0-Sでは、押抜き土塊の範囲が大きくなった。これは、法面に対して垂直成分の分力が大きくなるとともに、底面幅が小さいことに起因



(a) 変形



(b) せん断面

図-3 載荷位置での断面変形

していると考えられる。粘性土で構成されたC1.5-Sでは、砂を使用したケースに比べてひび割れが少ないものの、天端の盛り上がりは大きくなっている。粘性土の粘着力が砂に比較して大きいため、押抜き破壊に対する抵抗力が大きくなったと推察される。碎石で構成されたG1.5-Sでは、他のケースと比較すると、ひび割れ本数が少ないが1本のひび割れ幅が大きくなる傾向が認められた。

載荷終了後に確認した載荷位置の断面変形を図-3に示す。なお、変形図中のF1~4（載荷面）、C（中央部）、R1~4（載荷面背面）は、土堤の変形を判別しやすくする目的で試験体成形時に混入した着色砂の位置である。また、断面写真には、せん断面からから予想した想定すべり線を付記している。構成材料に砂を使用したS1.5-S、S1.0-S、S1.5-Pでは、載荷位置の断面において着色砂のお椀型の変形やせん断面が認められた。

粘性土を使用した C1.5-S では、お椀型の変形が生じているものの、せん断面は生じていなかった。一方、砕石を使用した G1.5-S では、お椀型の変形は認められないが、せん断面が生じていた。

以上の実験結果より、静的な荷重作用下では、構成材料や法面勾配等の違いによって、土堤の破壊性状が異なることが明らかになった。粘性土で構成された土堤は、砂で構成された土堤と比べてせん断に対しては高い抵抗性を有しており、砕石の場合には砂よりも変形への抵抗性が高くなる傾向があることが示唆された。

### 3.1.2 重錘衝突実験による性能検証<sup>8)</sup>

#### (1) 実験概要

実験概要図を図-4に示す。実験は、質量178kgの球体を所定の高さから振り子運動によって試験体に衝突させる重錘衝突実験とした。実験ケース一覧を表-2に示す。なお、表中には実験時の重錘の捕捉状況も付記している。試験体の構成材料は、砂、粘性土の2種類とし、重錘の落下高さを変化させている。試験体は、前述の静的載荷実験と同様に実物大の1/5~1/4の大きさを想定した小型模型であり、法面勾配は1:1.0としている。重錘直径は、0.318mであり、土堤高さの3/5程度となっている。実験では、重錘の挙動を高速度カメラで撮影し、画像解析によって移動量等を算出した。

#### (2) 実験結果

表-2に示すように、砂で構成される試験体では、落下高さ6mのケースで重錘が土堤を通過していることに対して、粘性土で構成される試験体では、落下高さ7mのケースでも重錘は捕捉されている。なお、本研究では重錘の重心が土堤背面の法肩の延長線を越えたケースを通過とした。粘性土は、砂よりも粘着力が大きいため、土粒子が移動しにくく変形に対する抵抗が大きくなり、捕捉性能が高くなったと推察される。

重錘衝突時の衝突面の状況を写真-2に、重錘の軌跡図を図-5に示す。砂で構成された土堤では、重錘の衝突高さの表層部あるいは土堤内部で重錘が捕捉された。一方、粘性土で構成された土堤の場合、C-H0.55では重錘が表層にて停止し、C-H6、C-H7では重錘が土堤に貫入して、重錘が土堤天端方向へ移動する挙動が確認された。土質材料が異なると衝突後の落石の挙動も異なることが確認された。

小型模型を用いた重錘衝突実験の結果、土質材料の違いは、土堤の破壊性状だけではなく、捕捉できる落石エネルギーにも影響を及ぼすことが明らかになった。なお、重錘質量の違いによる捕捉性能への影響についても、別途、検証実験<sup>9)</sup>を行っており、その結果、運動

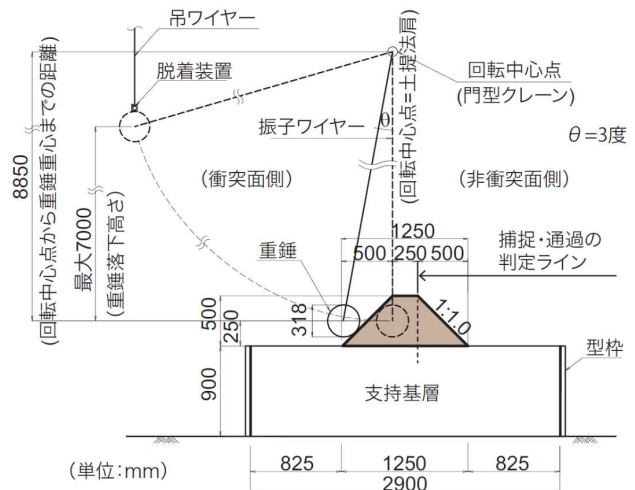


図-4 重錘衝突実験の概要図

表-2 重錘衝突実験の実験ケース一覧

ケース	構成材料	落下高さ (m)	実測速度 (m/s)	換算エネルギー (kJ)	実験結果
S-H0.55	砂	0.55	3.55	1.12	捕捉
S-H1.82		1.82	6.28	3.51	捕捉
S-H6		6.00	11.15	11.06	通過
C-H0.55	粘性土	0.55	3.12	0.87	捕捉
C-H6		6.00	11.25	11.26	捕捉
C-H7		7.00	12.77	14.50	捕捉

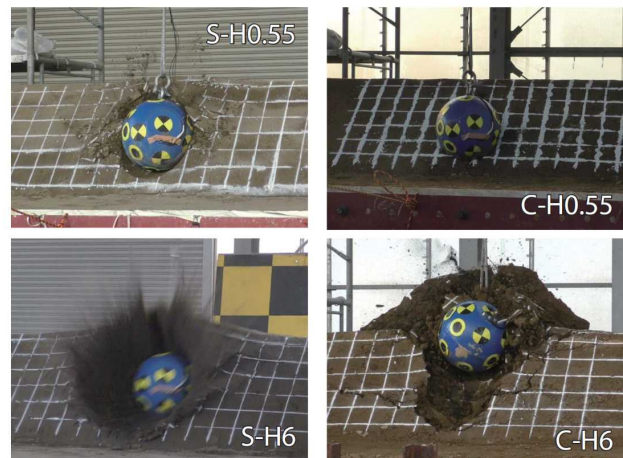


写真-2 重錘衝突時の状況

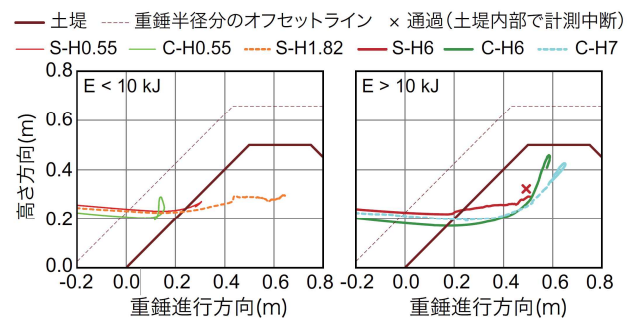


図-5 重錘の軌跡図

量あるいは衝突エネルギーが同程度の場合、重錘質量が大きいと重錘が貫入してかけ上がりが防止されること、運動量が同程度の場合には重錘質量の違いによって破壊性状が異なること等を確認している。

### 3.2 実斜面を用いた実規模実験による性能検証

#### 3.2.1 落石防護溝の緩衝層の性能検証<sup>10)</sup>

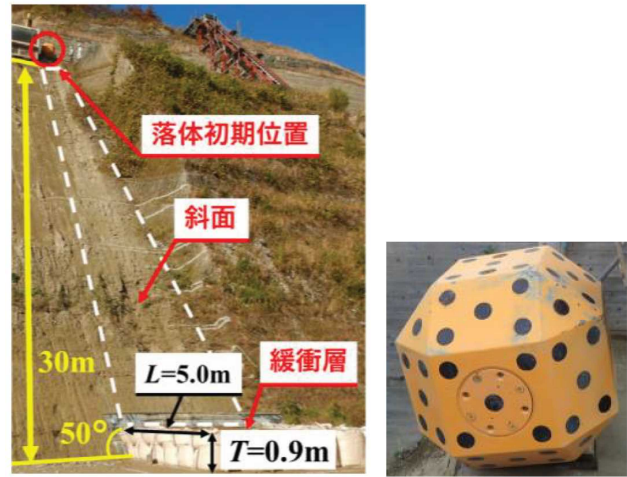
##### (1) 実験概要

実験は、写真-3に示すように、実斜面上を落体が落下して溝部を想定した平面に衝突する斜入射実験とした。実験ケース一覧を表-3に示す。落体は、EOTA型の多面体形状で、0.25tと1.6tの2種類の重錘とした。実験で使用した実斜面は、高さが約30mで、勾配が約50°である。被衝突体となる平面は、敷砂緩衝層とコンクリートの2種類とし、厚さ0.9m、幅5.0mとした。実験中の落体の挙動を高速度カメラによって撮影し、画像解析によって落体の移動量等を算出した。

##### (2) 実験結果

落体重心の軌跡図を図-6に示す。落体の衝突点を原点とし、緩衝層に衝突させたケースを実線で、コンクリートに衝突させたケースを破線で示しており、最大跳躍点にはマーカーをプロットしている。なお、緩衝層に衝突させたS-0.25-1では、衝突後に落体が緩衝層に埋没し、貫入中のデータを取得できなかったため、データの一部が欠測となっている。緩衝層に衝突させたケースでは、落体は緩衝層に貫入した後に跳躍しており、コンクリートに直接衝突したケースでは、コンクリートへの貫入は確認されなかった。また、最大跳躍点は、コンクリートに衝突させたケースの方が緩衝層に衝突するケースよりも大きくなっている。なお、落体が直接コンクリートに衝突したC-0.25-2では、衝突後に落体が破損し、その破片が広範囲に飛散している。これらのことから、溝部に砂等による緩衝層を設けることによって、落体の跳躍高を抑制するだけでなく、条件によっては、緩衝層上で落体を補足できる可能性が示唆された。また、溝部の緩衝層が固い場合には、落体が破損することによって、落石被害の影響範囲が大きくなる可能性もあることが明らかになった。

落体の運動エネルギーの時刻歴波形を図-7に示す。なお、落体が衝突した時刻を0msとし、緩衝層に衝突させたケースを実線で、コンクリートに衝突させたケースを破線で示している。また、緩衝層への貫入によって落体の挙動を計測できなかったS-0.25-1と、落体が破損したC-0.25-2のケースでは同図より除外している。緩衝層へ衝突するケースでは、衝突後に緩やかに運動エネルギーが減少している。一方、コンクリ



(a) 斜面全景 (b) EOTA型重錘 1.6t  
写真-3 緩衝層の性能検証実験の全景

表-3 緩衝層の性能検証実験の実験ケース一覧

ケース	落体質量 (t)	被衝突体	緩衝層厚 (m)
S-0.25-1	0.25	敷砂緩衝層	0.9
S-1.6-1			
S-1.6-2			
C-0.25-1	0.25	コンクリート	-
C-0.25-2			
C-1.6-1			

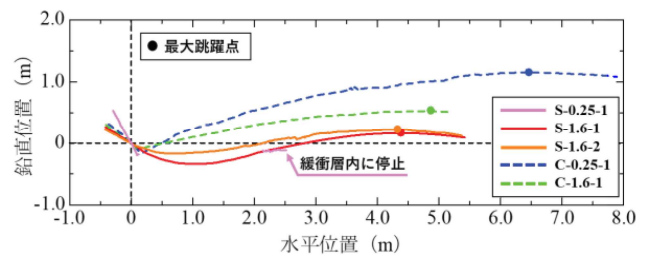


図-6 落体重心の軌跡図

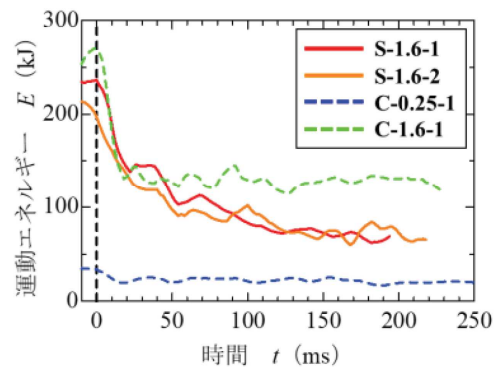


図-7 エネルギーの時刻歴波形

トに直接衝突するケースでは、衝突直後に急激にエネルギーが低下し、その後のエネルギーの減衰は認められなかった。実験後の落体衝突平面の様子を観察したところ、敷砂緩衝層には約3.0m×1.5mの衝突痕が生

じており、コンクリートには局所的な破壊が生じていることを確認している。このことから、緩衝層へ衝突させたケースでは、落体と緩衝層との接触面積が大きくなり、接触している間に摩擦や貫入抵抗によってエネルギーが減衰し、コンクリートに直接衝突させたケースでは、局所的な破壊によって、短時間でエネルギーが減衰したものと推察される。

実斜面を活用した斜入射実験による溝の性能検証の結果、溝における緩衝層の有無によって、落石の軌跡が変化しうることを確認した。このため、落石防護土堤・溝の性能を照査する上では、溝の緩衝効果も適切に考慮する必要があると考えられる。

### 3.2.2 落石防護土堤・溝の性能検証

#### (1) 実験概要

実験概要図を図-8に、斜面全景および重錘を写真-4に示す。本実験では、最大高さ30m、勾配50°の斜面を用いて、質量2.5tのEOTA型重錘を落下させ、土堤に衝突させた。実験ケースは、落下高さを15~30mの間で調整した全6ケースである(表-4)。土堤の構成材料には、現地発生土である粗石混じり細粒分混じり砂質礫を使用した。試験体寸法は、図-8の実験概要図に示すとおりであり、土堤の落石捕捉性能を向上させるために溝部(ポケット部)に厚さ0.6mの敷砂による緩衝層を設置している。実験中の落体の挙動を高速カメラによって撮影し、画像解析によって落体の移動量等を算出した。

#### (2) 実験結果

落体重心の軌跡図を図-9に示す。軌跡図は、斜面法尻を原点としており、斜面・溝部・土堤の形状を実線で、重錘半径分のオフセットラインを破線で示している。また、各ケースにおける水平方向の最大到達地点にマーカーをプロットしている。なお、H30-1では土堤衝突後に砂の飛散により落体が完全に隠れてしまったため、画像解析で認識できる算出可能な地点までの軌跡を示している。

本実験では、全てのケースで土堤が落体を捕捉する結果となった。H15-2、H20-1、H25-1では、落体が溝部に衝突した後、溝部から跳躍して緩衝層を脱出する段階で土堤に衝突した。その後、落体は土堤を駆け上がったものの、土堤を乗り越えてはいない。H15-1、H29-1では、落体が溝部への貫入中に土堤に衝突しており、土堤への貫入後に、土堤法面上を再び跳躍することで土堤から離れ、再度土堤に衝突して捕捉されている。なお、再衝突する際には、落体は法面に対してほぼ垂直に衝突しており、再衝突後に土堤を駆け上が

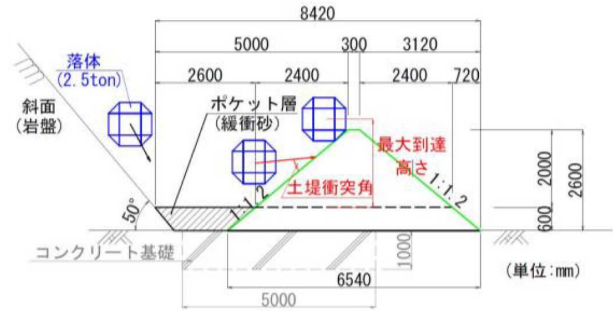


図-8 実規模土堤の重錘衝突実験の概要図

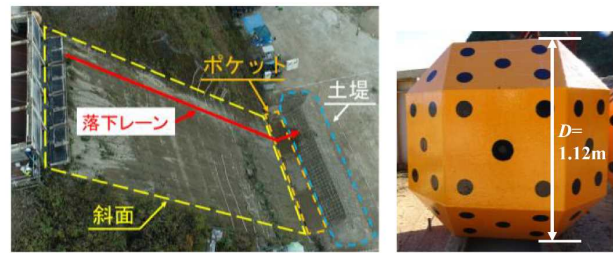


写真-4 実規模土堤の重錘衝突実験の全景

表-4 実験ケース一覧

ケース	落下高さ (m)	位置エネルギー (kJ)	衝突角度 (°)	衝突速度 (m/s)	結果
H15-1	15	367.5	54.2	9.92	捕捉
H15-2	15	367.5	2.1	4.17	捕捉
H20-1	20	490.0	4.2	5.33	捕捉
H25-1	25	612.5	18.8	8.19	捕捉
H29-1	29	710.5	39.4	9.99	捕捉
H30-1	30	735.0	67.2	17.19	捕捉

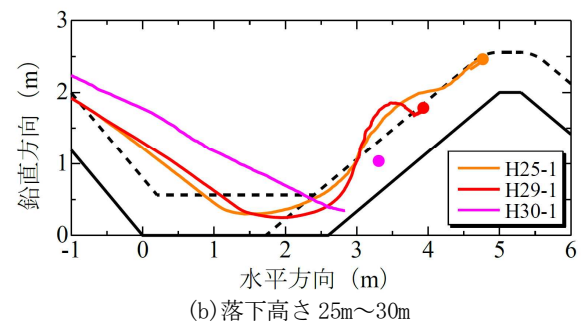
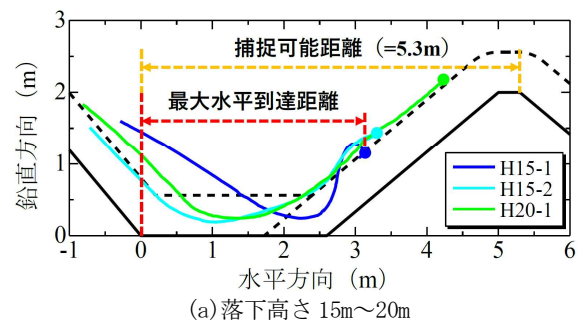


図-9 落体重心の軌跡図

る挙動は認められなかった。H30-1 では、斜面上で落体が大きく跳躍し、溝部に衝突せず直接土堤に衝突した。土堤衝突後は、他のケースと比較して大きく土堤に貫入し、法面上で跳躍した後に停止している。

斜面での落体の挙動の違いによって、溝部での緩衝効果や土堤表層でのかけ上り挙動等に差異があっても、本実験における落石防護土堤・溝の材料と形状の組合せによって 700kJ 程度までのエネルギーを有する落石を補足できることが明らかになった。なお、この数値は落石防護土堤・溝の限界状態としての吸収エネルギーの上限値を示すものではない。一方、別途実施した緩衝層を設けない実規模土堤実験<sup>11)</sup>においては、重錘が土堤を駆け上がって土堤を乗り越えるような挙動を示すケースも確認されている。今後、落石防護土堤・溝の限界状態を明確にすることとともに、落石の入射角度や回転速度などの落石条件の違いによる土堤の落石捕捉性能の違いに関する検討を引き続き行う必要があると考えられる。

### 3.3 破壊挙動の再現解析の課題整理

#### 3.3.1 数値解析手法の概要

落石対策便覧に示される性能照査方法のひとつとして実験による性能検証が定められている。ただし、落石防護施設の設置条件が多様であることから、検証実験とは異なる条件における性能検討にあたっては、部分的な実験や数値解析的手法等を用いて補完することも認められている。現在、具体的な数値解析的手法は規定されていないものの、将来的には、数値解析による性能照査技術の確立が期待される。ここでは、実験結果に対する再現解析の結果の一部を示すとともに、解析精度向上に向けた今後の課題を示す。

実験結果の再現解析においては 2 次元の個別要素法 (Distinct Element Method) を採用し、粒状性の堆積層内の落石による衝撃力伝達挙動の再現実績のある解析モデル<sup>12)</sup>を用いた。再現対象は、法面勾配 1 : 1.5 の小型模型に直径 318mm、質量 54kg の球体重錘を振り子運動で衝突させる重錘衝突実験とし、解析ケースは落下高さ 1m、2m、3m、6m の 4 ケースとした。解析モデルや再現対象とした実験の詳細については、参考文献 13) を参照されたい。

#### 3.3.2 解析結果と課題の整理

実験と数値解析における全運動エネルギーの時刻歴波形を図-10 に示す。なお、全運動エネルギーは、落体の重心速度から算出した運動エネルギーと回転エネルギーの和である。実験で計測された全運動エネルギーは、落下高さによらず、衝突直後に急激に減少し、

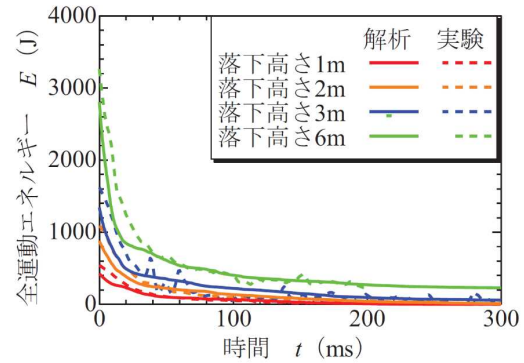


図-10 全運動エネルギーの時刻歴波形

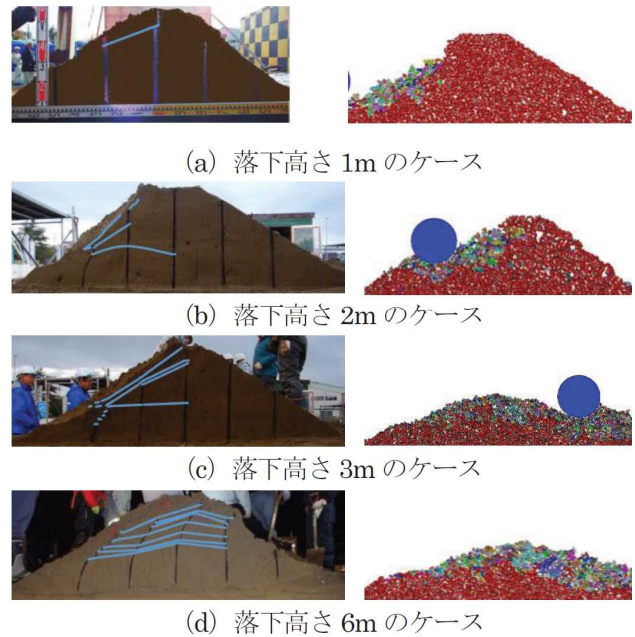


図-11 重錘衝突後の断面形状

その後、緩やかに減少している。数値解析においても同様の傾向が認められ、個別要素法によって土堤のエネルギー吸収性能を精度よく再現できる可能性を確認できた。次に、実験と数値解析における落体衝突後の土堤断面の状況を図-11 に示す。なお、各図の左側が衝突面、右側が背面である。写真には、土堤成形時に混入した着色砂の様子から想定したすべり面をトレースしている。解析結果の断面では、種々の色の粒子が存在しており、ボンド結合でつながっている破片が同色となっている。すなわち、色の種類が多いほどボンド要素がより破断していることを示している。落下高さが低い 1m のケースでは、変状の範囲や程度が概ね一致しているものの、落下高さが大きくなるほど、実験と比較して数値解析では変状が大きくなる傾向を示した。落下高さの高いケースでは、重錘の影響範囲が大きくなり、側面抵抗のない 2 次元解析と側面抵抗の

ある実験(実現象)に差異が生じたものと考えられる。

本研究の範囲においては、個別要素法の既存の解析モデルを準用することで、落石の吸収エネルギーを定量的に推定できる可能性が確認できた。しかしながら、落体による外力が大きくなるほど変形性状に差異が生じる結果となった。数値解析の精度を高めるためには、落石防護土堤・溝の解析パラメータの最適化に関する検討を継続しつつ、2次元モデルに側面抵抗を適切に反映させる手法、3次元へのモデル拡張等を行うこと等が求められる。

#### 4. まとめ

本研究では、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、既往の設計法の考え方等の整理、落石防護土堤・溝の基本性能に関する実験的検証、個別要素法による模型実験の再現解析を実施した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 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。
- 2) 小型模型を活用した静的載荷・重錘衝突実験の結果、構成材料や法面勾配等の違いによって吸収エネルギーや破壊性状が変化し、落石の捕捉性能に影響することを示した。
- 3) 実斜面を利用した実規模大の落石防護土堤・溝の重錘衝突実験の結果、溝の緩衝性能が土堤の落石補足性能に影響を及ぼすこと確認するとともに、本実験における落石防護土堤・溝の材料と形状の組合せによって700kJ程度までのエネルギーを有する落石を補足できることを明らかにした。
- 4) 個別要素法の既存の解析モデルを準用することで、落石の吸収エネルギーを定量的に推定できる可能性を確認した。ただし、既存モデルでは落体による外力が大きくなるほど変形性状に差異が生じる結果となった。

本研究では、実験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の研究で引き続き検討を行う。

#### 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 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) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、2000.6
- 4) 公益社団法人 日本道路協会：落石対策便覧、1983.7
- 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
- 7) 峯祐貴、松尾和茂、前田健一、高橋浩司、山内翼、今野久志：異なる地盤材料を用いた落石防護土堤の静的荷重水平載荷実験、土木学会北海道支部 論文報告集第76号、A-35、2020.1
- 8) 牛渡裕二、鈴木健太郎、高橋浩司、山内翼、峯祐貴、前田健一、今野久志、西弘明：土質材料を変化させた落石防護土堤の重錘衝突実験、令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会、I-147、2020.9
- 9) 鈴木健太郎、山内翼、高橋浩司、牛渡裕二、杉山直優、前田健一、中村拓郎、今野久志：重錘質量を変化させた落石防護土堤の耐衝撃挙動、令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会、I-148、2020.9
- 10) 磯合凌弥、前田健一、峯祐貴、杉山直優、牛渡裕二、菅原正則、今野久志：実規模斜入射実験による落体反発挙動及びエネルギー減衰に対する被衝突体の影響、土木学会全国大会第76回年次学術講演会、I-222、2021.9
- 11) 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.68A、pp.864-877、2021.3
- 12) 前田健一、羽柴寛文、刈田圭一、牛渡裕二、川瀬良司：二次元個別要素法を用いた落石による水平堆積層の衝撃力伝達挙動、応用力学論文集、Vol.67、No.2、pp.355-364、2011.
- 13) 松尾和茂、前田健一、峯祐貴、鈴木健太郎、川瀬良司、今野久志：2次元個別要素法を用いた落石防護土堤の小型模型実験における再現解析、第12回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、2019.12



# FUNDAMENTAL STUDY ON DESIGN METHOD OF SOIL ROCKFALL PROTECTION FACILITY

Research Period: FY2019-2022

Research Team: Structures Research Team,  
Cold-Region Construction Engineering  
Research Group

Author: NISHI Hiroaki

KASAI Satoshi

YASUNAKA Shintaro

KONNO Hisashi

ARAKI Kouya

YAMASAWA Humio

TERASAWA Takahiro

UCHIDA Yusuke

ISHIHARA Hiroya

**Abstract:** Roadside slope failures including rockfalls pose a direct threat to human life and also have a significant impact on the local community life, for example, by disrupting the road networks. Accordingly, the implementation of proper countermeasures to prevent rockfall disasters is required. This study has reviewed the concept of the conventional method as well as a new method of designing rockfall protection embankments and ditches to cope with relatively large rockfall events, and the problems involved have thus been identified. Experiments have also been conducted on small- and full-scale embankments, for which different types of earth materials were used, and the effect of a sand cushion installed in pockets of an embankment was demonstrated. Numerical analysis of these experiments was also performed and we now understand the fundamental performance of the tested structures and materials.

**Keywords:** Rockfall protection facility, Rockfall protection soil bank, Rockfall protection ditch, Distinct Element Method