

## 落石防護土堤への実規模衝突実験による落体挙動及び落石捕捉性能の検討

名古屋工業大学 学生会員 ○磯合 凌弥 正会員 前田 健一  
 学生会員 杉山 直優 学生会員 木村 絢  
 (株) 構研エンジニアリング 正会員 鈴木健太郎  
 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 正会員 中村 拓郎

### 1. はじめに

我が国では、集中豪雨や大地震及びインフラの更新時期も重なり、大規模な落石災害の発生リスクが高まっている。落石対策便覧<sup>1)</sup>において落石防護土堤(以下、土堤と示す)は土のみで構成され、経済性、施工性などに優れた落石対策工であるとされている。しかし、エネルギー吸収メカニズムが未解明であり、設計指針が確立されていない。本稿では土堤への実規模衝突実験を実施し、土堤衝突時の落体反発挙動及び落石捕捉性能に関する検討を行った。

### 2. 実験概要及び計測項目

図-1 に実験概要図、図-2 に実験場写真を示す。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 型落体(図-3)を、クレーンを用いて落下レーン上から落下させ、土堤に衝突させた。土堤寸法は図-1 の実験概要図の通りであり、土堤の落石捕捉性能を向上させるため、ポケット部に厚さ 0.6m の敷砂による緩衝層を設置した。また、表-1 に実験ケース及び実験結果一覧を示す。ケース名は H に続く文字は落下高さであり、末尾の数字は同ケースの実験順である。なお、実験結果の詳細は後述する。計測項目は落体のポケット部及び土堤への衝突の様子について 500fps の高速度カメラで撮影し、PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析により落体の反発挙動を算出した。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 落体重心の軌跡図に関する考察

図-4 に落体重心の軌跡図を示す。軌跡図は斜面法尻を原点としており、実線にて斜面・ポケット・土堤の形状を、破線にて重錘半径分のオフセットラインを示している。各ケースにおける水平方向の最大到達地点の座標をプロットにて示す。また H30-1 は土堤衝突後、砂の飛散により落体が完全に隠れてしま

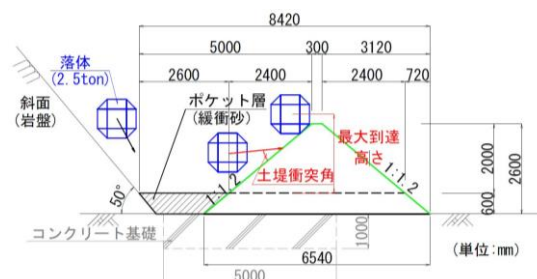


図-1 実験概要図

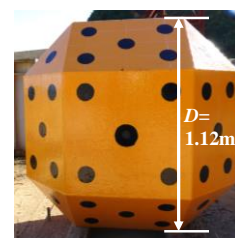


図-2 実験場写真

図-3 EOTA 型落体

表-1 実験ケース及び実験結果一覧

| No. | ケース名  | 落体質量 (t) | 落下高さ (m) | 位置エネルギー $E_0$ (kJ) | 土堤衝突角 ( $^\circ$ ) | 土堤衝突速度 (m/s) | 最大水平到達距離 (m) | 捕捉安全率* | 結果 |
|-----|-------|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|--------|----|
| 1   | H15-1 | 2.5      | 15       | 367.5              | 54.2               | 9.92         | 3.14         | 1.69   | 捕捉 |
| 2   | H15-2 |          | 15       | 367.5              | 2.1                | 4.17         | 3.31         | 1.60   | 捕捉 |
| 3   | H20-1 |          | 20       | 490.0              | 4.2                | 5.33         | 4.24         | 1.25   | 捕捉 |
| 4   | H25-1 |          | 25       | 612.5              | 18.8               | 8.19         | 4.77         | 1.11   | 捕捉 |
| 5   | H29-1 |          | 29       | 710.5              | 39.4               | 9.99         | 3.94         | 1.35   | 捕捉 |
| 6   | H30-1 |          | 30       | 735.0              | 67.2               | 17.19        | 3.31         | 1.60   | 捕捉 |

\*捕捉安全率=最大水平到達距離/捕捉可能距離

ったため、算出可能な地点までの軌跡を示す。軌跡図より、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 は落体がポケット部に衝突した後、ポケット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、土堤を駆け上がる挙動となり捕捉された。H15-1, H29-1 はポケット部への貫入中に落体が土堤に衝突しており、土堤に貫入した後、土堤法面上を再び跳躍することで土堤から離れ、再度土堤に衝突することで捕捉された。再衝突する際、落体は法面に対してほぼ垂直

キーワード 落石, 落石防護土堤, 実規模実験, 落石捕捉性能, 捕捉安全率

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16 号館 227 号室 TEL052-735-5497

に衝突しているため、再衝突後に土堤を駆け上がる挙動は見られなかった。H30-1は斜面上で落体が大きく跳躍し、ポケット部に衝突せず、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、停止した。

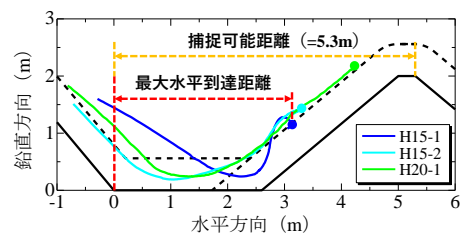
### 3.2 落体の最大到達地点と衝突角に関する考察

土堤衝突条件による、落体挙動の違いを考察するため、図-5に捕捉安全率と落体の土堤衝突角の関係を示す。捕捉安全率とは捕捉可能距離(斜面法尻から土堤道路側天端までの水平距離)を落体の最大水平到達距離で除した値であり、捕捉安全率が1を上回ると捕捉を、1以下であれば通過を意味している。また、捕捉安全率が大きいほど余裕をもって土堤が落体を捕捉していることを表す。図-5より、土堤衝突角が大きくなるほど、捕捉安全率が大きくなる傾向が読み取れる。また、落下高さ最大のケース(H30-1)であっても、土堤衝突角が大きくなることで落下高さ15mのケース(H15-1, H15-2)と同等の捕捉安全率となることが示された。ここで、図-6に捕捉安全率に差が生じたH25-1(捕捉安全率=1.11)とH30-1(捕捉安全率=1.60)の落体衝突後の土堤変状の様子を示す。H25-1では土堤衝突速度が8.19m/s、衝突角が18.8°と小さく、最大到達距離が4.77mと天端付近まで落体が到達しているが、土堤に大きな変状は見られない。一方、H30-1では土堤衝突速度が17.19m/s、衝突角が67.2°と大きく、下向きの衝突となった。最大到達距離は3.31mと土堤中腹付近までしか落体が到達せず、落体が土堤に大きく貫入していることが分かる。このことから、土堤への衝突角が大きいかほど落体の土堤への貫入挙動が卓越することで、法面を駆け上がりにくくなり、捕捉安全率が大きくなる、つまり最大水平到達距離が小さくなることが示唆された。

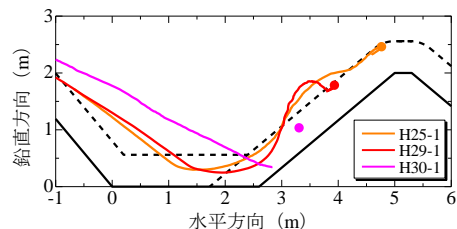
## 4. まとめ

本稿では土堤への実規衝突実験を実施し、土堤衝突時の落体反発挙動及び落石捕捉性能に関する検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本実験では、落体が土堤衝突後に土堤法面を駆け上がることで及び、法面上で跳躍し土堤法面に再度衝突することで捕捉されることが示された。
- 2) 土堤衝突角が大きくなるほど捕捉安全率が大きくなる傾向が示された。これは土堤への衝突角



(a) 落下高さ 15m, 20m



(b) 落下高さ 25m, 29m, 30m

図-4 落体重心の軌跡図

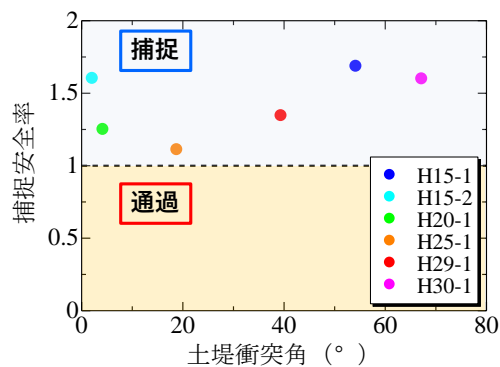


図-5 土堤衝突角と捕捉安全率の関係



(a) H25-1

(b) H30-1

図-6 落体衝突後の土堤変状

が大きくなるほど、落体の土堤への貫入挙動が卓越し、土堤法面を駆け上がりにくくなるためであると示唆された。

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

## 参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.