# 実規模落下実験における重錘のエネルギー減衰に関する検討

(株)構研エンジニアリング ○正会員 阿部和樹 名古屋工業大学 学生会員

(株)構研エンジニアリング 正会員

高橋浩司 名古屋工業大学 正会員

杉山直優 前田健一

(株)構研エンジニアリング

正会員

鈴木健太郎 東電設計(株)

正会員

中瀬 仁

### 1. はじめに

本研究では,落石挙動を把握する手段として広く 用いられている質点系落石シミュレーションの精度向 上を目的として, 実規模実験におけるエネルギー減 衰に着目した各種パラメータの分析整理を行った.

図-1 に示すように、落石は落下前の位置エネル ギーを持っている状態から,落下過程の各段階でエ ネルギーの形を変えながら減速し、停止に至る.『落 石対策便覧』ではこれまでの実験結果等を踏まえ, 斜面を落下する際の減衰要素として①等価摩擦係 数(μ),線運動と回転運動との関係を示す②回転 エネルギー係数  $(\beta)$  が示されている. また, 参考とし て③平場に衝突することによるエネルギー減衰につ いての記載がある.本検討では、これに到達距離を 算定する上で必要なパラメータとなる④転がり摩擦 係数を加え, 実規模実験結果を分析整理し, 『落 石対策便覧』との比較を行うことで検証を行った.

## 2. 実験概要

実験概要を図-2に,実験条件を表-1に示す.本 実験では、質量 0.25t, 0.49t, 1.00t, 1.60t の重錘 (全て EOTA に準拠した形状)を所定の高さからア スファルト舗装面, コンクリート舗装面, 土砂地盤上 へ転落させ, 重錘の挙動を高速度カメラ(400fps)で 撮影した. 重錘にはターゲットを貼り付け, 撮影画像 を用いた PTV 解析により重錘の挙動を計測した.

# 3. 検討結果

## 3.1 等価摩擦係数の算出

重錘が斜面から転落し、被衝突地盤に衝突する直前 のエネルギーから算出した等価摩擦係数を整理した結 果を図-3に示す. ばらつきはあるものの, 概ね 0.40 以 上の値を持っていることが分かる. 実験に使用した斜面 は軟岩に区分される(写真-1)ため、『落石対策便覧』に よれば区分 B(設計に用いる $\mu$  = 0.15 程度)に該当する

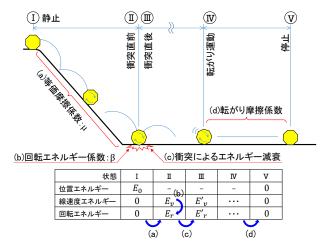


図-1 落石の落下過程における概念図

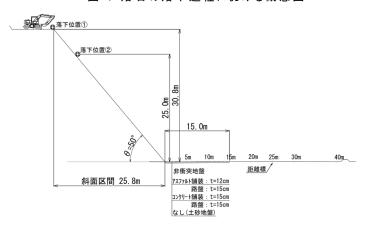


図-2 実験概要図

表-1 実験条件一覧

2 2 3 3 3 3 7 1 1 3 3					
非衝突地盤	重錘質量 (t)	落下高さ(m)			
アスファルト	0.25, 0.49	30.8			
	1.00, 1.60	25, 30.8			
コンクリート	1.00, 1.60	25			
土 砂	0.25, 0.49, 1.00, 1.60	30.8			



写真-1 実験フィールド全景

キーワード:エネルギー減衰,等価摩擦係数,落石,重錘落下実験

連絡先:〒065-8510 札幌市東区北 18条東 17丁目 1-1 構研エンジニアリング TEL 011-780-2813 FAX 011-785-1501

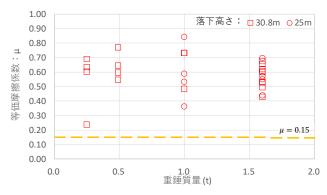


図-3 等価摩擦係数の算出結果

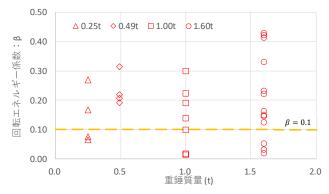


図-4 回転エネルギー係数の算出結果

と評価できるが、実験結果はより大きな値となった.これ は落下過程において、重錘の斜面への衝突や貫入等 の多様な減衰作用を受けたためであると考えられる.

## 3.2 回転エネルギー係数の算出

重錘が被衝突地盤に衝突する直前の線速度及び回転速度から算出した回転エネルギー係数を $\mathbf{Z}$ -4に示す。『落石対策便覧』では、線速度エネルギーの  $\mathbf{10}$ %分を回転エネルギーとして見込んでいるが、既往の実験結果では  $\mathbf{40}$ %程度まで達する場合もあるとされている。本実験結果でも約  $\mathbf{7}$  割のケースで  $\mathbf{0}$ . $\mathbf{10}$  を上回る結果が得られた。また、最大値を見ると重錘質量が大きくなるにつれて  $\mathbf{\beta}$  も大きくなる傾向が見受けられる(最大  $\mathbf{43}$ %)。重錘が大きくなると慣性モーメントも増大するため、到達距離にも影響を及ぼすことが想定される。

### 3.3 衝突によるエネルギー減衰

被衝突地盤への衝突直前と衝突直後の全運動エネルギーの割合を図-5に示す。この数字が小さければ、より減衰効果が高いこととなる。『落石対策便覧』では、平場に衝突した後のエネルギーを0.45倍とできる事例が紹介されている。本実験では最大でも0.48であり、全体の9割以上のケースで0.45を下回る数値が得られており、地盤衝突時に高い減衰作用があったものと想定される。

被衝突地盤の違いでは、特にアスファルトにおける減衰率にばらつきが目立つが、これは重錘の衝突のしか



図-5 衝突前後でのエネルギー減衰率の算出結果

表-2 転がり摩擦係数の算出結果

落石質量 (t)	0.25	0.49	1.00	1.60
転がり摩擦係数	0.098	0.156	0.115	0.090
			0.117	0.112

たによって地盤面が陥没やひび割れ等の複数の変形・破壊のパターンをとったことがエネルギー吸収量の変化に繋がったためであると考えられる。コンクリートでは表面の損傷のみの単一パターンであったこと、逆に土砂は変形を許容しやすいことが要因となり、それぞればらつきが抑えられていると考えることができる。

### 3.4 転がり摩擦係数の算出

重錘が線運動に移行した後の速度の傾きを計測できた全 6 ケースについて、転がり摩擦係数を算出した結果を表-2 に示す。線運動はいずれも土砂地盤上である。重錘質量との相関は見られず、転がり摩擦係数は  $0.09\sim0.15$  程度の範囲にあると考えられる。

## 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる.

- ・落石エネルギーを精度良く算出するためには、落 体の斜面への貫入や斜面の変形等の減衰効果を 評価した上で反映させる必要がある.
- ・今回の実験では $\beta$ が0.1を上回るケースが多く、 斜面条件によっては、全運動エネルギーに占める 回転エネルギーの割合は無視できないものとなる.
- ・重錘は平場に衝突することで、衝突地盤の種類に関わらず、少なくとも 45%程度までエネルギーが減衰する.
- ・EOTA に準拠した形状の重錘が土砂地盤上を転がる場合,転がり摩擦係数は 1.0×10<sup>-1</sup> 程度となることが示唆された. 今後,これを落石シミュレーションに加味することで,精度の向上が期待できる.

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、実験場の提供及び実験実施に 向けての助言等、株式会社ライテク、富山鉱山株式会社の 皆さまに多大なるご支援を戴いた。ここに記し謝意を表す。