

## 落石の運動エネルギーと落下姿勢が衝突挙動に及ぼす影響

### INFLUENCE OF KINETIC ENERGY AND POSTURE ON ROCK COLLISION BEHAVIOR

中島祐一\*, 河合政岐\*\*, 松島亘志\*\*\*, 倉岡千郎\*\*\*\*

Yuichi NAKASHIMA, Masaki KAWAI, Takashi MATSUSHIMA, Senro KURAOKA

\* 工修 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

\*\* 理修 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

\*\*\* 工博 筑波大学大学院助教授 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

\*\*\*\* 工博 日本工営株式会社 中央研究所 マネジメントリーダー (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

キーワード: 実験、落石、高速度カメラ  
Experiment, Falling rock, high-speed video camera

#### 1. はじめに

急峻な地形を有する我が国では落石被害は後を絶たず、よりの確な落石挙動の事前予測と合理的な対策法の確立が急務である。

これまで、落石の運動機構の解明や、対策工の効果検証、数値シミュレーションの入力値の検討のために多くの現場の落石実験が実施されているが、現場の実験では斜面の不規則な凹凸形状や植生、表層の土砂特性、落石形状など多くの影響因子が混在しているため、要因を落石と斜面の力学特性に絞って衝突挙動を実験により検討した例は少ない。過去に落石をコンクリート表面に落下させた事例<sup>1)</sup>が挙げられるが、落石と岩盤斜面、あるいは表土との衝突について系統的に実験した例は無いのが現状である。

そこで本論文では、落石供試体として立方体形状に整形した花崗岩岩石を用い、大きさや落下高さを変化させて花崗岩碎石場の岩盤平坦地および崖すい平坦地に落下させる実験を実施し、斜面形状や落石形状の影響をできるだけ排し力学特性と衝突挙動の関係を検討した。衝突時の挙動は高速度カメラを用いて詳細に計測し、落石の大きさと落下高さ、地面との衝突時の姿勢が衝突挙動に及ぼす影響を検討した結果を示す。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 実験方法

図-1 に実験概要を示す。実験は、供試体である岩石を吊り上げることができるようチェーンを掛け、

チェーンごとバックホウのバケット部の爪に掛け所定の高さに持ち上げた後、岩盤、および崖すい平坦地に落下させることにより行った。チェーンを用い吊り上げた理由は、供試体をなるべく回転させずに自由落下させるためである。

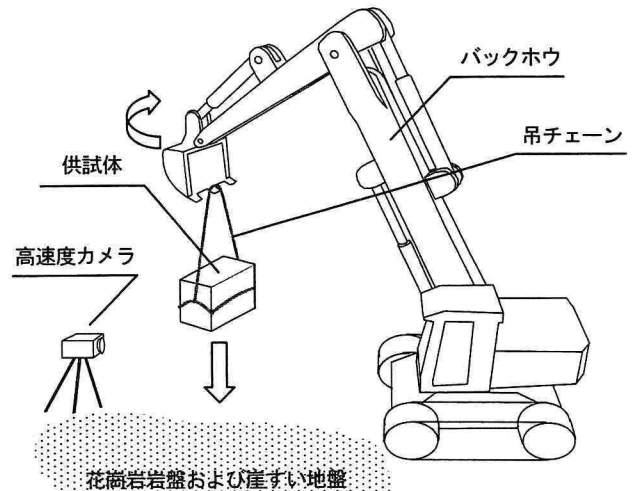
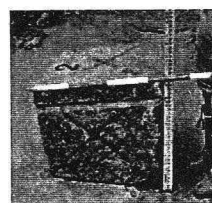


図-1 実験状況概要図

一辺 50cm 程度



一辺 75cm 程度



写真-1 供試体例

実験中の供試体の挙動は高速度カメラ（500 フレーム/sec）により撮影し、画像を解析することによって供試体の速度等諸量を測定した。

## 2.2 供試体

写真-1 に実験に使用した供試体の例を示す。

供試体は、茨城県真壁産の花崗岩で一辺 50cm 程度および 75cm 程度に小割りで整形したものをを用いた。物理および強度試験の結果、密度 2.637 kg/m<sup>3</sup>、圧縮強度 120MPa であった。供試体は正確に整形されていないため大きさにばらつきがあり、密度を 2.637 として質量を算出すると、一辺 50cm 程度のもので 390kg～511kg、一辺 75cm 程度のもので 1351kg、1492kg である。

## 2.3 落下地点状況

実験は茨城県真壁郡真壁町の採石場で実施した。

落下対象は、花崗岩岩盤および崖すい堆積地でいざれもなるべく平坦な場所を選定した。

花崗岩岩盤のシュミットハンマーによる強度試験の結果、反発度は 60 であった。

崖すい堆積地の簡易貫入試験による N<sub>d</sub> 値は 65 であった。

## 2.4 実験ケース

表-1 に花崗岩岩盤に落下させた実験ケースを、表-2 に崖すい堆積地に落下させた実験ケースを示す。

落下高さは 1m～3m とした。表中の落下高さは、落下手法により、設定した落下高さと実際の落下高さに

は違いが生じたため、衝突直前の速度より落下高さを逆算し求めた値を示す。また、衝突時の姿勢の影響を検討するため、同程度の落下高さで吊り上げ時のチェーンの掛け方を変えることにより姿勢を変えて実験を実施した。但し、一辺 75cm 程度の供試体については、チェーンの強度の問題から吊り上げにより落下させることが出来なかったため、バケットから直接落下させた。

## 2.5 測定項目および測定方法

測定項目は、落下高さ h<sub>1</sub> と衝突直前の岩石の鉛直方向速度 V<sub>1</sub>、および衝突後の岩石の鉛直方向速度 V<sub>2</sub> と衝突後の鉛直方向の跳ね返り高さ h<sub>2</sub> を高速度カメラで撮影した画像を解析することにより求めた。

また、衝突後の水平方向の移動距離 X、崖すい堆積地での実験においては、加えてめり込み量 D を各ケースの実験終了毎にスケールを用いて測定した。

測定結果から各ケースの反発係数 e を求めた。

反発係数 e は岩石の衝突直前と直後の速度の比より次式により算出した。

$$e = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (1)$$

ここで、

V<sub>1</sub>：衝突前の岩石の鉛直方向速度

V<sub>2</sub>：衝突後の岩石の鉛直方向速度

h<sub>1</sub>：落下高さ

h<sub>2</sub>：鉛直方向の跳ね返り高さ

である。

表-1 花崗岩岩盤への落下実験ケース

実験ケース	供試体形状	供試体質量 [kg]	落下高さ [h]	衝突時の姿勢	
Case-1	一辺50cm程度の立方体形状	483	0.78	角	
Case-2			1.41	辺～面	
Case-3			1.29	辺～面	
Case-4			1.47	辺～面	
Case-5			1.62	辺～面	
Case-6			1.45	角	
Case-7			3.23	角	
Case-8			3.51	角	
Case-9			2.95	辺～面	
Case-10			511	2.97	角
Case-11				2.67	角
Case-12				1.84	辺～面
Case-13	一辺75cm程度の立方体形状	1.66		角	
Case-14		1.75		辺～面	
Case-15		2.42	角		

表-2 崖すい堆積地への落下実験ケース

実験ケース	供試体形状	供試体質量 [kg]	落下高さ [h]	衝突時の姿勢		
Case-16	一辺50cm程度の立方体形状	390	3.03	角		
Case-17			3.06	辺～面		
Case-18			3.01	角		
Case-19			2.78	角		
Case-20			3.13	辺～面		
Case-21			0.83	辺～面		
Case-22			1.25	角		
Case-23			一辺75cm程度の立方体形状	1492	2.06	角
Case-24					2.49	角
Case-25					2.41	角
Case-26	0.69	角				
Case-27	0.61	角				

注：落下高さおよび衝突時の姿勢は高速度カメラの撮影画像による。

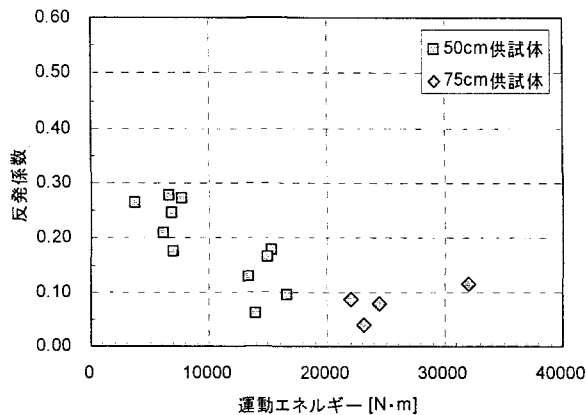


図-2 反発係数と運動エネルギーの関係 (岩盤)

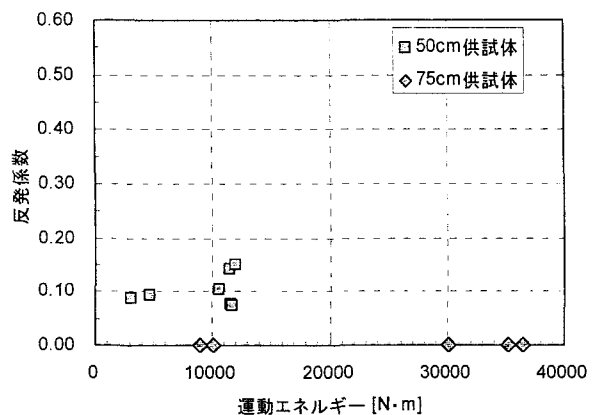


図-3 反発係数と運動エネルギーの関係 (崖すい堆積地)

### 3. 実験結果

#### 3.1 運動エネルギーが反発挙動に及ぼす影響

花崗岩岩盤に落下させた結果、反発係数の実験値は 0.28~0.04 と落下高さや供試体の大きさによりばらつきがあり、全ケースにおける平均値は 0.16、標準偏差は 0.081 であった。

破壊に起因したエネルギーロス運動エネルギーに依存すると考え、衝突時の運動エネルギーを求め、反発係数  $e$  との関係を示した図を、図-2 に示す。

図より、衝突時の運動エネルギーが大きい、すなわち落下高さが高く、供試体質量が大きくなる程反発係数が小さくなる傾向が確認された。

実験後の供試体および衝突岩盤を観察すると、表面に白い粉末がついており、大きな圧縮力とともに、せん断力を受けていると推定される。従って今回の実験では、大きな塑性破壊が生じており、運動エネルギーにより反発係数に違いが生じたものと考えられる。

図-3 に崖すい堆積地での実験結果として、運動エネルギーと反発係数  $e$  の関係を示す。

一辺 75cm 程度の供試体を用いた実験では、衝突時に反発挙動は確認されず、衝突箇所を支点として回転運動のみが生じた。実際は、わずかに地盤が落石を押し戻していると考えられるが、仮にここでは  $e=0$  とした。

反発係数の実験値は、0.07~0.15 とばらつきはあるものの、花崗岩岩盤に落下させたケースよりは小さく、平均値は 0.10、標準偏差は 0.031 であった。

一辺 75cm 程度の供試体の反発係数を 0 と考えれば、運動エネルギーが大きいと反発係数が小さくなる傾向にあるといえるが、花崗岩岩盤のケースほど顕著ではない。これは、崖すい堆積地の実験では、衝突対象の

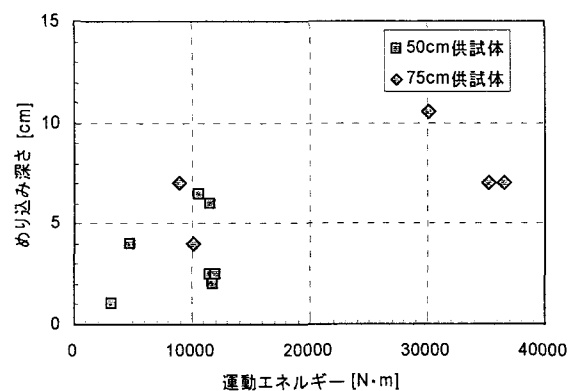


図-4 むり込み深さと運動エネルギーの関係

崖すいの塑性破壊は明瞭であるが、供試体である花崗岩岩石の塑性破壊が生じないためであると考えられる。

塑性破壊について、むり込み深さと伴に面積の計測を試みたが、衝突後や 2 回目以降の衝突で地盤が大きく乱されるために、むり込みの形状は不明瞭であった。そこで、むり込み深さと、運動エネルギーの関係について検討した。図-4 にむり込み深さと運動エネルギーの関係を示す。

むり込み深さは 1cm~10.5cm とばらつきがあるものの、全てのケースでむり込みが生じた。また、図より、運動エネルギーが大きいほど、むり込み深さが深くなるのが分かる。

#### 3.2 姿勢が衝突挙動に及ぼす影響

衝突時の高速カメラの画像を観察した結果、最初の衝突が生じた後、跳躍を伴わずに他点で衝突するケースがあった。このように跳躍の前に複数回岩盤と接触したケースを辺~面で落下とし、そうでないものを角

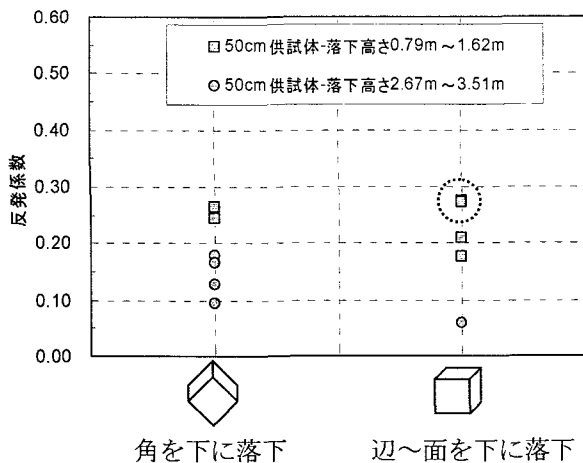


図-5 反発係数と落下姿勢の関係

で落下として落下姿勢を分類した。図-5に、落下高さを2分類して、姿勢と反発係数との関係を検討した図を示す。これより、今回の実験結果では角、辺～面のどちらの姿勢で落下しても同程度のばらつきがみられ、姿勢と反発係数との間に明瞭な関係は見られなかった。

カメラ画像を詳細に観察した結果、辺～面で落下したケースのうち高い反発係数となったケース(図中丸印)では、最初の衝突が生じた後、他点で衝突し跳躍する際に大きな回転を伴わず、比較的鉛直方向に跳躍していた。このように辺～面衝突と分類したケースであってもわずかな姿勢の違い、衝突面の凹凸により挙動にばらつきが見られるため、反発係数との間に明瞭な関係が見られなかったものと考えられる。

図-6に落下時の姿勢とめり込み深さの関係を示す。辺～面での落下と分類されたケースは一辺50cm程度の供試体の3ケースのみであるが、角を下に落下した場合の方がめり込み深さが大きくなる傾向が確認された。

#### 4. まとめ

本研究では、斜面の不規則な凹凸形状や植生、表層の土砂特性、落石形状など多くの影響因子をできるだけ排し、整形した花崗岩岩石を高さと大きさ、衝突時の姿勢を変えて花崗岩岩盤および崖すい堆積地に垂直落下させる基礎的実験を行い、衝突挙動に及ぼす影響を検討した。得られた結果について以下に列挙する。

- (1) 花崗岩岩盤への垂直落下実験により得られた反発係数は平均値で0.16、標準偏差で0.081であった。
- (2) 花崗岩岩石と花崗岩岩盤との反発係数は、供試体大きさと落下高さによりばらつきが生じ、運動エ

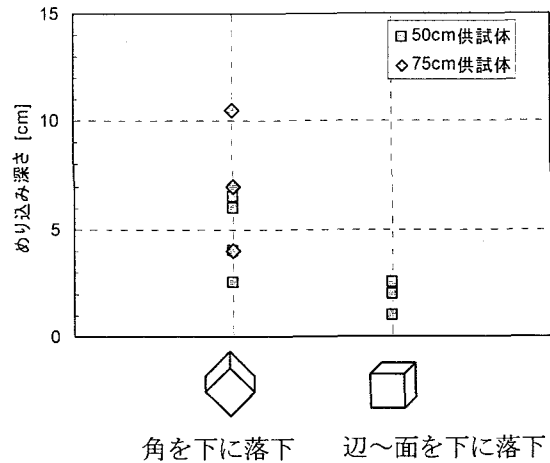


図-6 めり込み量と落下姿勢の関係

ネルギーが大きいほど、反発係数は小さくなる傾向を示した。

- (3) 崖すい堆積地への垂直落下実験では、75cmの供試体では反発挙動は確認されず、50cmの供試体では、平均値で0.10、標準偏差で0.031であった。
- (4) 衝突時の姿勢が衝突挙動に及ぼす影響を検討した。花崗岩岩盤への垂直落下実験では、反発係数と姿勢との間に明瞭な関係は認められなかった。
- (5) 崖すい堆積地への垂直落下実験では、角で衝突する場合の方がめり込み深さが大きくなる傾向が確認された。

本実験では落下姿勢の制御が困難であり、十分な量のデータの蓄積ができなかったため、姿勢の影響については今後さらなるデータの蓄積と検討が必要と考える。さらに、DEMなどのシミュレーション手法で用いる反発係数などのパラメータの合理的な決定手法あるいはモデルの検討が必要である。

#### 謝辞

本実験の実施にあたり、寺西石材株式会社の関係各位、ならびに筑波大学の佐藤和正氏、戸田研吾氏には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 例えば、氏平増之、細谷昭悟、小川健太、高貝暢浩：フィールドにおける落石の落下挙動—岩盤斜面の落石に関する研究(第1報)—、資源と素材、Vol.112, pp843-850, 1996
- 2) 上條明洋、音田奨、榊谷浩：落石現象における反発係数と摩擦係数に関する基礎実験、構造工学論文集、Vol.47A, pp1605-1612, 2001