

破碎を伴う落石現象の物理モデル化に関する研究

伊藤和也* , 豊澤康男* , 日下部治**

Centrifugal Modelling of Rockfall Simulation Associated with Rock Fracturing

by Kazuya ITOH*, Yasuo TOYOSAWA*, and Osamu KUSAKABE**

Abstract; Rock-fall is the rapid movement of rock from a steep slope. The types of movement may be classified into four types: free falling, bouncing, rolling or sliding. Rockfalls along highways often occur where natural rock slopes are cut. When a piece of rock reaches the roadway below, it might cause a hazard to roadway users. In Japan nationwide inspection on potentially dangerous slopes has been carried out every five years and hundreds of millions of yen are annually spent on rock slope maintenance, and rockfall hazard mitigation on both new and existing slopes. Although rock-fall protections works are applied, rock-fall prone areas are increasing every year because of road extension work and degradation of slope materials. In order to implement a rockfall protection work, it is important to evaluate and estimate the response of a recognized rockfall site, its scale and time, the rockfall (i.e., velocity, bounce height, falling course, final position), rockfall forces (i.e., impact force, kinetic energy), etc. Several researchers have developed computer simulations to investigate rockfall mechanism. These provide estimates of probable bounce heights and velocities for rockfall. Recently, additional statistical data have been added providing probability distributions for velocity, energy and bounce height of rockfalls. The computer program is applicable to almost all slope configurations. It is more flexible than design criteria that require slopes of given configurations. Simulation, however, requires detailed site conditions and slope geometry input data and assumptions; therefore accuracy varies, depending on the quality of the input data. It is expected that centrifuge modeling could provide a more consistent set of data, properly taking both stiffness variation with depth and damping characteristics of soil into account.

In this study, a series of centrifuge model tests were performed to observe the movement of falling rocks during the falling process. The test program includes the measurements of trajectory of falling rock captured by a high speed camera. A series of centrifuge model tests confirmed that falling rocks exhibit various types of falling modes; free falling, rolling or sliding, sometimes associated with rock fracturing during the falling process. As a result, in the case of model crushable rock, it was found that the observed movement patterns were rolling with small bounces, and rolling with large bounces, occurring fracturing

Keywords; Rock fall, Centrifuge model test, Trajectory, Safety.

* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

** 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

国土の70%が山岳・丘陵地である我が国は、落石・土石流・斜面崩壊・地すべりなどの斜面災害が毎年多発している。このような斜面災害は、ときに人命や財産を奪い、また交通網を遮断するなど地域に経済的な打撃を与える。中でも、落石等の危険箇所は全国に約77,000箇所あり、それらによる道路災害は、1年間に約4,150件発生している。そのため、毎年多くの予算を計上し落石対策が行われているが、現状は法面の劣化が経年的に進行しており、危険箇所は減少することなく増加している¹⁾。

落石防災対策においては、発生源における落石発生危険性の評価とともに、落石がどのような経路、跳躍高さ、および速度を持って保護対象に到達するかを評価することが必要となる。しかし、落石現象は落下する岩石の位置エネルギー・大きさ・形状と斜面地盤の物性、斜面角度などによって影響される複雑な現象であり、いまだに落石の運動メカニズムや衝突現象などについて十分な解明には至っていない。そのため実務レベルでは、既往の現場落石実験等の実績に基づいて、概ね安全側に設定された経験則^{2)~4)}を用いている場合が多い。

しかし、経験則を適用することが適当ではない現場も多く存在するため、近年では落石が斜面を落下する際の落下軌跡や速度等を定量的・合理的に予測評価するための落石シミュレーション手法が多く開発・提案されている^{5)~12)}。このような落石シミュレーション手法の礎となる落石の運動形態を初めて体系的に示し

たのはRitche¹³⁾である。Ritcheは、落石防止溝の設計法を見直すために実施した現場実験において16mmスローモーションカメラを用いて落石の運動を詳細に観察した。観察の結果、Fig. 1に示すように落石の運動形態は斜面勾配により、落石がある区間で何度も衝突を繰り返し回転しながら落下する回転運動(Roll)、一度あるいは二度衝突し飛行する跳躍運動(Bounce)、そして跳躍が見られない落下運動(Fall)の3つに大別している。そして、これら3つの組み合わせを用いて落石運動を表現するシミュレーション手法の可能性について示唆した。Ritcheの実験結果は、多くの研究者に引用され、その後のシミュレーション手法の発展に大きく寄与した。

これらの手法は、経験則に基づく予測に比べれば合理性に優れているが、現地条件に対応したモデル化、計算パラメーターの設定法、そして計算結果の妥当性の検証など多くの課題も残されている。そのため、落石シミュレーション手法のパラメーターを得る目的で、現場落石実験^{11),14)~17)}、室内模型実験^{5),7),18)}、落石現場調査^{19),20)}などが国内外にて実施されている。しかしながら、落石の運動メカニズムは、斜面の形状や凹凸、地質の硬軟、植生状況、落石の形状や寸法などによって複雑に変化するため、まだ未解明な部分が多いのが現状である。

斜面からの落石により作業者が被災する労働災害について調査したところ、過去10年間で40件程度報告されていた²¹⁾。災害事例の中には、落石が落石対策工を突破・跳躍して防護されている箇所にいた労働者が被災する事例も数例報告されている。Fig. 2は落石防護柵の改修工事の際に発生した労働災害の一例である。この災害事例では、落石が斜面上を転がり落ちる際に、一部が破碎したことにより、想定外の跳躍量が発生したため、落石防護柵を飛び超え、被災者の頭部に直撃したものと考えられている。このような現象は落石対策工の設計や落石シミュレーション手法にも考慮されていないのが現状である。一方、落石対策工の構造設計は10倍以上の過大設計であるとの指摘がなされているが、斜面上の落石の破碎現象を考慮することにより、落石対策工への衝撃圧はさらに低減できる可能性もある。

平成14年10月に国土交通省により策定された「土木・建築にかかる設計の基本について」の中で、落石は「偶発作用」として扱われ、大規模地震とならび「統計的な評価が行えないが、作用として理解が容易な方法で明示するよう努めるものとする」と記載されている²²⁾。そのため、今後の落石対策工の設計方法は、落石シミュレーション等から跳躍高さ・

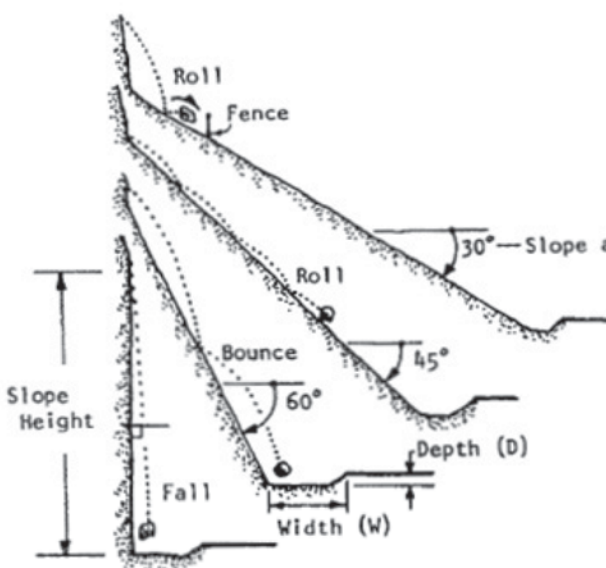


Fig. 1 Rockfall travel mode from Ritche
Ritcheによる落石の運動形態¹³⁾

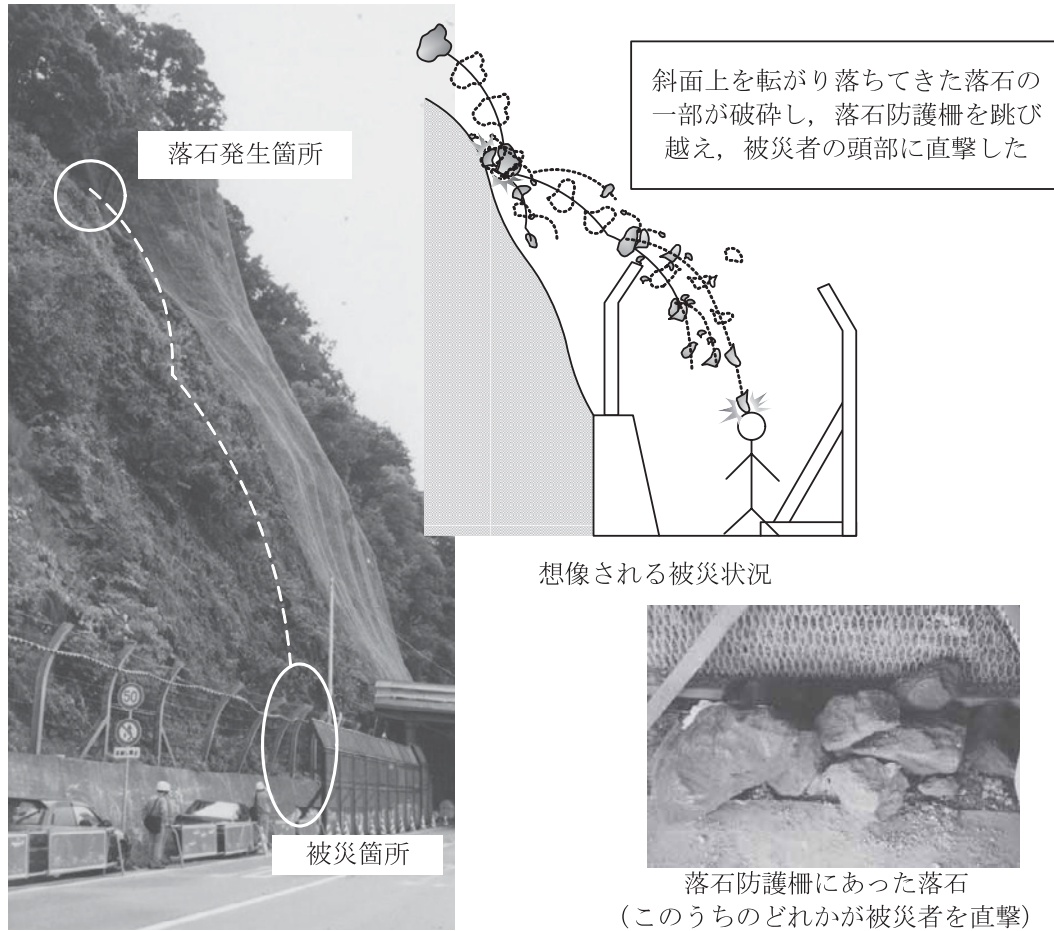


Fig. 2 Case history of labor accident due to rockfall.
落石による労働災害事例

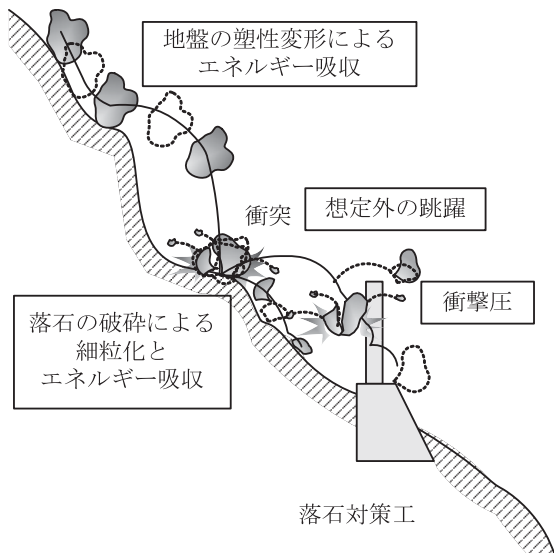


Fig. 3 Type of movement of falling rocks.
実際の落石の運動

設計耐力・落石の運動エネルギーを設定する「性能設計」に移行していくものと想像される。しかしながら、上述したように落石現象は落下する岩石の位

置エネルギー・大きさ・形状・破碎強度と斜面地盤の物性、斜面角度などによって影響される複雑な現象であり、いまだに落石の運動メカニズムや衝突現象などについて十分な解明には至っていない。

このような背景から、本研究では多くのパラメーターが自明となり、応力条件を実際と等価にすることが出来る遠心模型実験手法を用いて、Fig. 3に示すような破碎を伴いながら衝突と跳躍を繰り返す落石現象について物理モデル化を行い、現場実験では行うことができない多くのパラメトリックスタディーを行い、落石現象の運動形態を把握するものである。本報では、遠心場落石発生装置の開発・試作とそれを用いた実験結果について示す。

2. 落石現象の物理モデル化および実験方法

2.1 遠心模型実験装置

全ての実験は (独)産業安全研究所が所有する遠心模型実験装置(NIIS Centrifuge Mark-II, Photo 1)を用

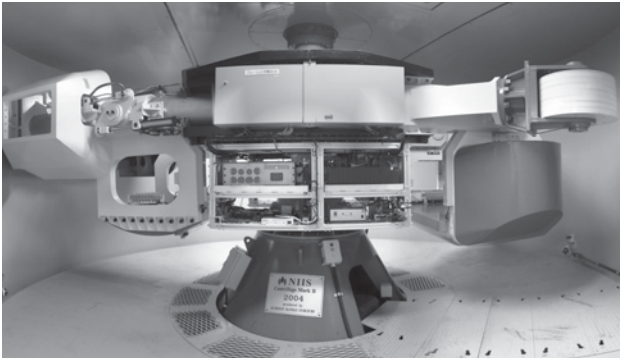


Photo 1 NIIS Mark II Centrifuge.
(独)産業安全研究所 遠心模型実験装置

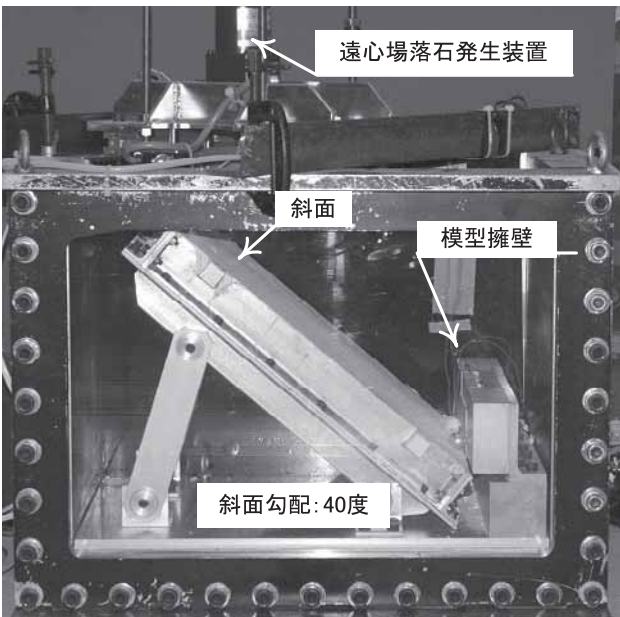


Photo 2 General arrangement of models.
実験装置全景

いて行った。遠心模型実験装置の主要諸元をTable 1に示す。本装置は平成16年に更新されたものであり、静的実験と動的実験のプラットフォームを専用化させることで、実験の効率を高めている。今回使用した静的実験用プラットフォームの寸法は1100mm x 1500mmであり、大型装置並の搭載スペースを有している。なお、計測は遠心模型実験装置内に搭載した計測アンプからGP-IBを介して無線LANにより遠心模型実験装置外に伝送している。本装置の詳細は既報²³⁾に譲る。

2.2 実験土槽と模型斜面

本実験装置の全体図をPhoto 2に示す。使用した土槽は内寸が幅500mm，奥行き300mm，高さ400mmの鋼製であり，容器の前面には幅32mmの亚克力を設置し，側面から挙動を観察できるようにしている。

Table 1 Technical specifications of NIIS centrifuge.
遠心模型実験装置の主要諸元

(1)装置本体 (静的実験用プラットフォーム)

最大遠心加速度	100 g
最大回転数	194.1 rpm
最大搭載質量	1000 kg
遠心場能力	50 G - tons
有効半径	2.38 m
プラットフォーム寸法	1.1 m x 1.5 m
主電動機	440V
	直流 90 kW

(2)周辺機器

ロータリージョイント		
油圧	最大圧力	21.0 MPa
	ポート数	2
空圧	最大圧力	0.7 MPa
	ポート数	1
水圧	最大圧力	0.5MPa
	ポート数	2

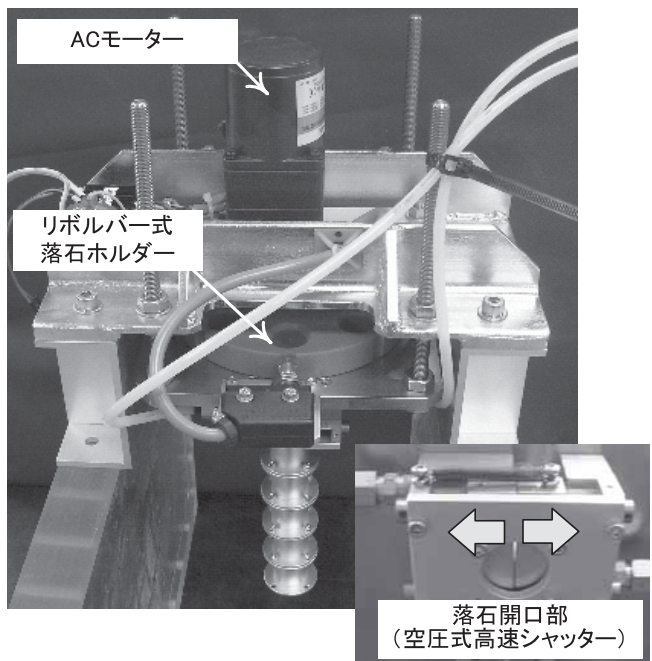


Photo 3 Detail of Ball Dropping System.
遠心場落石発生装置

模型斜面は石膏と豊浦砂を重量比3:1にて配合した混合試料を鉄製モールド(幅400mm，奥行き260mm，高さ50mm)に打設し，凹凸がないように成形をして作成した。この鉄製モールドの底部を鉄柱で支持することにより任意の角度の斜面にすることが可能となる。本実験では，自然斜面での落石現象にて様々な落石形態を発生するとされている40度となるように調整した。

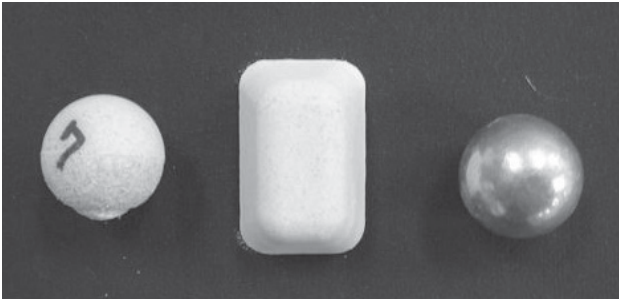


Photo 4 Model rocks (left: plaster (25 %) and Toyoura sand (75 %) mixture sphere, middle: plaster (25 %) and Toyoura sand (75 %) mixture block, right: aluminium sphere).

落石模型(左:石膏(25%)&豊浦砂(75%)混合球,中:石膏(25%)&豊浦砂(75%)混合矩形,右:アルミニウム球)

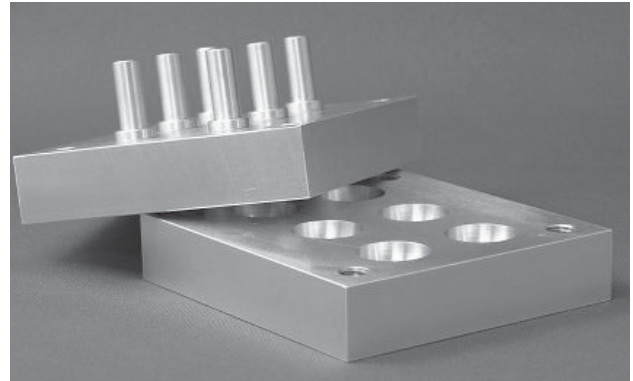


Photo 5 Mixture spheres making mold. 混合試料の球形を作成するためのモールド

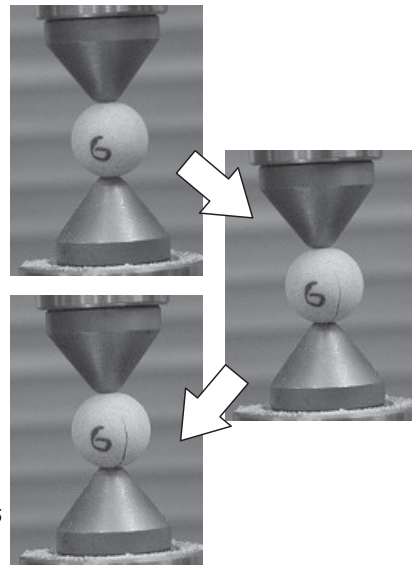
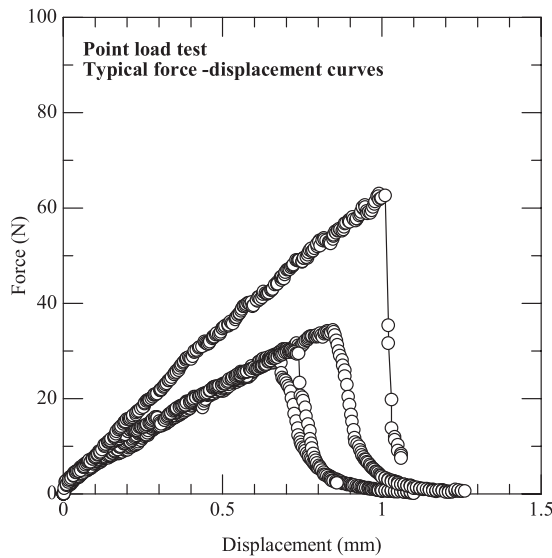


Fig. 4 Point load tests (left: apparatus for the point load test, middle: typical load - displacement relationship of point load test, right: illustrations of particles during test).

点載荷試験(左:点載荷試験装置,中:荷重~変位関係の一例,右:破碎の進展状況)

2.3 遠心場落石発生装置

本研究にて開発した遠心場落石発生装置をPhoto 3 に示す。本装置はリボルバー式落石ホルダー(最大8球搭載),それを回転させるモーター,そして落石ホルダーに充填された落石を斜面に落下させる落石開口部(空圧式高速シャッター)から成り立っている。本装置は遠心場にて落石開口部を解放させることにより模型落石を落下させるシステムである。また,リボルバー式落石ホルダーをモーターにより回転させることにより,落石を落石開口部に充填することができるため,1度の遠心模型実験装置の運転にて最大8個の落石を落体させることができるようになっている。

2.4 落石のモデル化について

本研究にて使用した落石模型はPhoto 4に示すように,材質をアルミニウム,石膏と豊浦砂の混合試料(重量比1:3)の球体タイプ(20mm)と,混合試料の矩形タイプの3種類である。アルミニウム球は剛体を想定したものである。一方,混合試料は落体運動中に破碎を生じる場合を想定して作成したものである。混合試料の球体模型はPhoto 5に示すようなモールドにスラリー状になった試料を注入することにより作成している。このモールドは1度に6個の球を作成することが出来る。本研究では,モールドの中から1球のみを実験に使用し,他の5球は点載荷試験に供し,点載荷圧裂強度とそのばらつきを求めている。Fig. 4は点載荷

Table 2 Statistical values of point load test.
点載荷試験の圧裂強度の統計結果

	豊浦砂+石膏 (重量比 3:1)
試験体個数	18
平均点載荷圧裂強度(kPa)	105.36
標準偏差(kPa)	43.66
変動係数	0.43



Photo 6 Closed-up view of the high speed camera.
高速度ビデオカメラの遠心模型実験装置設置状況

Table 3 Main specifications of the high speed camera.
高速度ビデオカメラの主要諸元

センサー素子	CMOS (カラー/モノクロ)
データ/ピクセル	10 Bit/ピクセル
撮影コマ数	100 ~ 21,000 frame per sec (fps)
撮影速度	up to 4,000 fps at 512 x 512 pixel up to 5,000 fps at 512 x 500 pixel up to 10,000 fps at 512 x 248 pixel
レンズマウント	C-Mount or F-Mount available
外径寸法(mm)	本体部 : W145xH142xD296 カメラヘッド部 : W80xH80xD77
記憶メモリー	10.4 秒 at 5000 fps
電子シャッター	OPEN to 1/200,000 秒

試験の荷重～変位関係の代表的なグラフを球体の破碎の進展状況とともに示したものである。最大荷重は変位が0.6～1.0mmの際に発生しており、その後急激に低下し、最大値の0～20%程度の値となっている。Table 2は点載荷圧裂強度の統計結果を示したものである。ここで、点載荷圧裂強度 σ_t は得られた最



Photo 7 Closed-up view of the camera head and lighting system.
カメラヘッドと照明装置の設置状況

Table 4. Test cases
実験ケース

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Case								
RF-01	B2	-	B4	B5	R1	R3	AL	B3
RF-02	B4	B5	B6	B7	B8	R4	AL	-

記号

B: 豊浦砂+石膏 (重量比 3:1) 混合球体

R: 豊浦砂+石膏 (重量比 3:1) 混合躯体

AL: アルミニウム球

※ここで、番号はモールド打設 No を示す

大荷重 F_0 から、以下の式を用いて求めた²⁴⁾。

$$\sigma_t = 1.4 \frac{F_0}{2\pi a^2} = 0.9 \frac{F_0}{D^2}$$

ここで、 F_0 = 最大荷重、 a は球体の半径、 $D=2a$ は載荷点間距離である。

点載荷試験での統計結果から、変動係数が0.43と比較的ばらついている。Takeiらは破碎性地盤の載荷試験の時間依存効果をモデル化する際に、人工材料であるチョークや自然材料である石英などの材料を用いて圧裂試験を行っている²⁵⁾。その結果、自然材料の変動係数は0.45程度であることを確認した。したがって、本研究の模型落石の点載荷圧裂強度 σ_t は自然材料程度のばらつきであるといえる。

2.5 高速度ビデオカメラシステム

落石の運動形態を確認し、さらに詳細に落石の軌

Table 5 Characteristics of rockfall movement.
全ケースの落石運動の特徴

No. Case	1	2	3	4	5	6	7	8
RF-01	【B-2】 回転 微砕	-	【B-4】 回転→破 砕→回転	【B-5】 回転→破 砕→跳躍	【R-1】 計測失敗	【R-3】 回転 →滑落	【AL】 回転	【B-3】 回転 微砕
RF-02	【B-4】 分解→跳 躍・衝突→ 破砕	【B-5】 回転 微砕	【B-6】 回転→破 砕→跳 躍・衝突	【B-7】 半球状に 破壊. 跳躍量大	【B-8】 回転 微砕	【R-4】 滑落	【AL】 回転	-

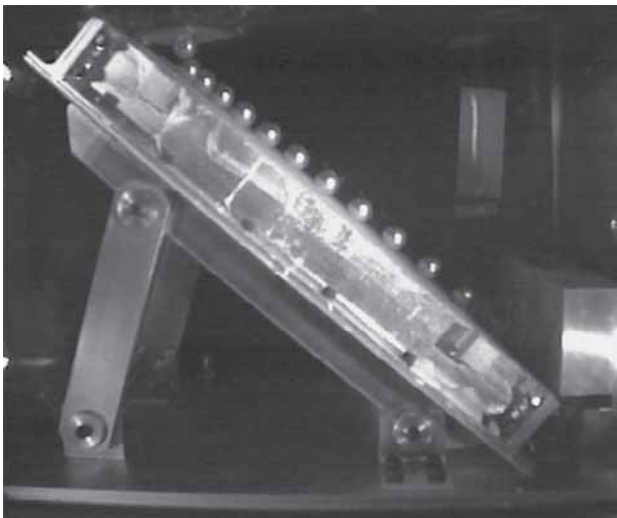


Photo 8 Typical example of simulated trajectory of falling aluminum sphere (RF-01-7).
アルミニウム球の落石模型による落石軌跡の一例

跡を把握するために、高速度ビデオカメラシステムを使用した。この高速度ビデオカメラシステムは平成17年度に遠心模型実験装置に導入されたものであり、遠心模型実験装置に搭載するために耐G性、カメラケーブル、制御計測室でのリモートコントロール機能が備わっている（Photo 6）。高速度ビデオカメラシステムの主な仕様を、Table 3に示す。高速度ビデオカメラは1秒間で5000コマの映像を撮影するため、露出時間は1/5000秒よりも短い。そのため、照明は非常に高照度なランプが必要とされる。そこで、本研究ではPhoto 7のように3個のハロゲンランプを搭載した照明装置を2台模型土槽の左右に設置した。

2.6 実験ケース

本実験のケースはTable 4に示す全14ケースである。これら全てのケースについて、側面からの高速度ビデオカメラによる撮影を行い、模型落石の運動

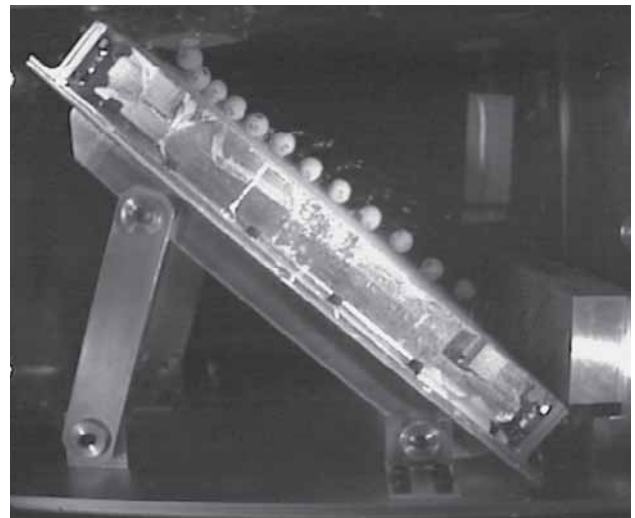


Photo 9 Typical example of simulated trajectory of falling mixture sphere without fracturing during the falling process (RF-02-5).
破砕が生じなかった混合試料球体の落石模型による落石軌跡の一例

形態の把握を行った。

3. 実験結果および考察～落石の運動軌跡について～

Table 5に全ケースの落石運動の特徴を示す。また、Photo 8～12にそれぞれの落石模型の代表的な落石軌跡を示す。これらの写真は高速度ビデオカメラにて撮影された1/5000秒のムービーファイル（AVI形式）からフリーソフト²⁶⁾を用いて1/250秒間隔の多重露光写真（ストロボ撮影）にしたものである。なお、全てのケースにおいて落石の軌道は奥方向に移動しているが、これは回転場におけるコリオリ力の影響によるものである。

アルミニウム球について、代表的な落石軌跡をPhoto 8に示す（ケースRF-01-7）。アルミニウム球は2ケースとも落下後、回転運動（rolling）のみで落下

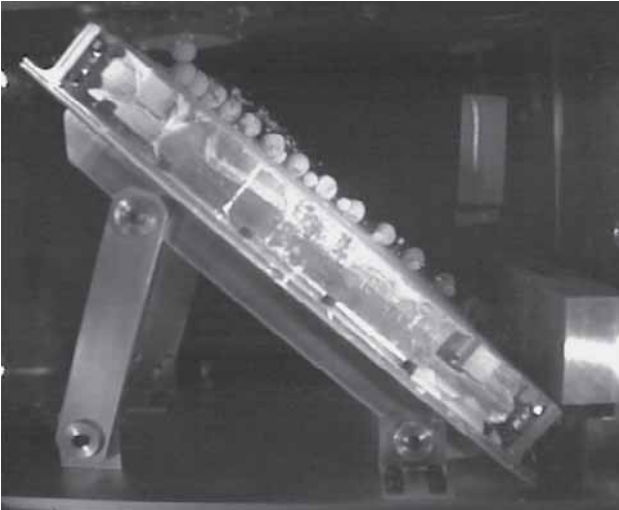


Photo 10 Typical example of simulated trajectory of falling mixture sphere with fracturing during the falling process (RF-01-4).
 破砕が生じた混合試料球体の落石模型による落石軌跡の一例



Photo 12 Simulated trajectory of falling mixture sphere while loading slide door of multiple ball-dropping system (RF-02-4).
 混合試料躯体の落石模型による落石軌跡の一例

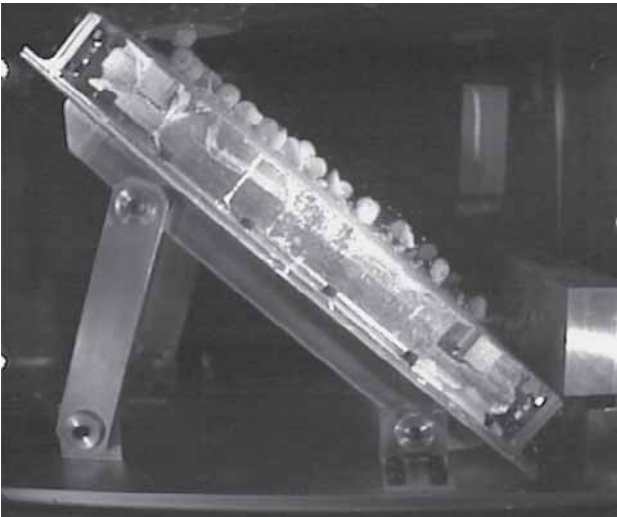


Photo 11 Typical example of simulated trajectory of falling mixture blocks (RF-01-6).
 遠心場落石発生装置内で既に破砕していた混合試料球体の落石模型による落石軌跡

している様子がわかる。また、徐々に速度が増加する等加速度運動となっていることがわかる。

石膏と豊浦砂の混合試料球の落石軌跡は斜面から落下する際の破砕の有無で2種類に大別することができる。Photo 9は落体中に破砕が生じなかった混合試料球の落石軌跡の一例である(ケースRF-02-5)。混合試料球を落下させた全9ケース中4ケースがこれに該当した。破砕が生じなかった混合試料球の落石軌跡はアルミニウム球と同様に回転運動を中心とし

て落下している。斜面と接した際に微粉砕しているが、これは混合試料球作製用モールドの注入口部分が若干凸凹していたためである。Photo 10は落体中に破砕が生じた混合試料球の落石軌跡の一例である(ケースRF-01-4)。混合試料球を落下させた全9ケース中4ケースがこれに該当した。破砕が生じた混合試料球の落石軌跡はアルミニウム球や破砕が生じなかった混合試料球の落石軌跡とは大きく異なり、回転運動から一部分が破砕して飛散している。破砕する際には回転時の遠心力も付与しており、大きな跳躍となっている。また剥離した混合球は、その形状が凸凹となり、隅部を支点として跳躍するため、大きく跳躍する傾向が見られた。混合試料球の全9ケースのうち1ケースは模型落石が遠心場落石発生装置内で二つに分割し、半球状となった(Photo 11)。この分割した落石模型は落体中に破砕したケースよりも跳躍運動が明確に確認することができる。すなわち、半球の球面部分では回転運動をしているが、平面部分に移行する際にその境界部分を中心として跳躍運動に移行している様子が確認できる。本ケースは落体中の落石の破砕による落石運動形態の影響を確認する本来の目的とは外れているが、落石運動が落石形状に大きく左右されていることを示す結果となった。

矩形タイプの混合試料落石模型の軌跡をPhoto 12に示す。矩形タイプの落石模型は製氷皿を利用して作製したため台形状となっている。そのため、1回転した後、接触面積が大きい面が下となり斜面との

摩擦を受けながら滑り落ちていく軌跡を示した。

Hungrらは落石対策に関する報告書¹²⁾の中で落石運動のメカニズムに関して既往の研究をまとめ、Ritche¹³⁾やEvans²⁷⁾の結果から落石の形状は運動挙動に大きな影響を及ぼさないとまとめている。一方、日本道路協会道路土工委員会落石防護施設小委員会が非質点系の落石シミュレーション手法(個別要素法(DEM)、不連続変形法(DDA))を用いて主要パラメーターの感度分析を行っている²⁸⁾。その中で落石形状について、短形から円形に近づくにつれて跳躍高さが小さくなり、回転運動が卓越する傾向があると述べている。本研究は落石形状以外のパラメーターについては固定した状態での実験である。上述の落石形状が異なる実験の多重露光写真から、落石形状が異なることにより運動形態が大きく異なっており、落石防護施設小委員会の結果と同様の傾向を得た。

5. まとめ

本研究は、遠心模型実験を用いて破碎を伴いながら衝突と跳躍を繰り返す落石現象について物理モデル化するために遠心場落石発生装置の開発・試作を行い、落石現象の運動メカニズムの把握を行った。本報では落石の破碎の有無や落石形状の違いが落石軌跡に与える影響について検討を行った。その結果、(1)球形タイプの模型落石は破碎しないケースでは落石形態は回転運動のみであったが、破碎する場合には回転運動から跳躍運動に変化する場合も見られた。また、(2)破碎した破片は大きな跳躍を示した。矩形タイプの模型落石は運動開始後にわずかに跳躍・回転運動した後、すべり落ちていくすべり運動に遷移していた。

今後、落石運動に影響を与える様々なパラメーターについても実験を行い、より高精度な落石シミュレーション手法の開発に努める予定である。特に、落石が破碎する現象は数値シミュレーションにて表現できていないので、破碎現象を考慮したシミュレーション手法の提案を行う予定である。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金(萌芽研究、課題番号16656145、研究代表者：伊藤和也)の補助を得て実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 藤城泰行：落石対策の現状，道路，pp.15-18，1983.
- 2) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告，高速道路調査会，1974.
- 3) (社)日本道路協会：落石対策便覧，1983.
- 4) (財)鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，鉄道総合技術研究所，1999.
- 5) 古賀泰之，伊藤良弘，森下義，鷺田修三，谷口栄一：落石防災対策に関する調査報告書(その1)，土木研究所資料第2770号，206p，1989.
- 6) 吉田博，荒田久和：マイコンによる落石の飛跡シミュレーション，第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集，pp.55-61，1983.
- 7) 右城猛，吉田博，矢野光昭，高石脇，八木則夫：斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察，土木学会論文集，No.581/VI，Vol.37，pp.380-389，1997.
- 8) Spang, R. M. and Sonser, T.: Optimized rockfall protection by "ROCKFALL"，Proc. 8th ISRM, pp.1233-1242, 1997.
- 9) Stevens, W. D.: RocFall A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Univ. of Toronto., 1998.
- 10) 倉岡千郎：DEM(個別要素法)による落石運動の数値解析，ITASCA Consulting Group, INC. UDEC Version 3.0 Vol. II Appendices，1998.
- 11) Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D.: Computer simulation of rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. 26, No. 1, pp. 135-146, 1989.
- 12) Hungr, O. and S. G. Evans: Engineering aspects of rockfall hazards in Canada, Report to the Geological Survey of Canada and Transport Canada, pp. 20-26, 1989.
- 13) Ritchie, A. M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No. 17, pp. 13-28, 1963.
- 14) (社)日本道路協会：落石対策便覧(改訂版)，2000.
- 15) 日本道路公団東京支社：落石実験調査報告書，1973.
- 16) Azzoni, A., Barbera, G. L., and Zaninetti, A.: Analysis and prediction of rockfalls using a

- mathematical model. *Int. J. Rock. Mech. Min. & Geomech. Abstr.*, Vol. 32, No. 7, pp. 709-724, 1995.
- 17) Bozzolo, D., and Pamini, R.: Simulation of rock falls down a valley side. *Acta Mechanica*, Vol. 63, pp. 113-130, 1986.
- 18) Chau, K. T., Wu, J. J. and Wong, R. H. C.: The coefficient of restitution for rocks/boulders falling onto soil slopes with various densities. *Proceeding of the Int. Sym. Slope stability Engineering, IS-Shikoku'99*, pp. 1355-1360, 1999.
- 19) 一般国道11号落石災害調査委員会：一般国道11号落石災害調査報告書，1991.
- 20) 右城猛，玉井佐一，明坂宣行，山岡幸弘，八木則男：高知県における落石災害と落石の運動特性，*土木学会論文集*，No.581/VI，Vol.37，pp.39-48，1997.
- 21) 例えば，建設業労働災害防止協会：平成14年度版 建設業安全衛生年鑑，建設業労働災害防止協会，247p，2002.
- 22) 国土交通省 大臣官房技術調査課：土木・建築にかかる設計の基本について，<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021/131021.pdf>
- 23) Horii, N., Itoh, K., Toyosawa, Y., and Tamate, S.: Development of NIIS Mark-II Geotechnical Centrifuge. *The 2nd Int. Conf. Physical Modelling in Geotechnics*, 2006 (投稿中).
- 24) Hiramatsu, Y. and Oka, Y.: Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 3, pp. 88-99, 1966.
- 25) Takei, M., Kusakabe, O., and Hayashi, T. : Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests, *Soils and Foundations*, Vol. 41, No. 1, pp. 97-121, 2001.
- 26) 大久保政俊：ストロボ動画作成ソフトウェア「どう見る君」，<http://www.ricen.pref.hokkaido.jp/>
- 27) Evans S. G. and Hungr, O.: Engineering aspects of rockfall hazards in Canada, Report to the Geological Survey of Canada and Transport Canada, 102p., 1989.
- 28) (社)日本道路協会 道路土工委員会 落石防護施設小委員会：落石対策便覧に関する参考資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料，pp.307-324，2002.

(平成18年1月11日受理)

抄 録

静電粉体塗装用塗料の着火性に関する研究(その1)

崔 光石, 山隈瑞樹, 鄭 載喜

近年、静電粉体塗装は一般の吹付塗装に比べ、生産効率が高く、環境にやさしいという大きなメリットから普及率が極めて高い。しかし、静電粉体塗装は高電圧印加により塗料を帯電させ、接地した被塗物に向かって移動させる工程であり、放電による粉塵爆発・火災の発生が危惧されていることから、粉体塗料の最小着火エネルギー(MIE)を測定した。測定には、国内外で標準的に用いられているIEC規格に準拠した吹上げ方式着火試験装置(ハルトマン式、MIKE-3)を使用し、着火試験用粉体塗料としては、ポリマーを主成分とする粉体塗料(ポリエステル、エポキシ、ポリエステル/エポキシ、アクリル、ナイロン)及び5種類(色別)のポリエステル粉体塗料の計10種類を用いた。その結果、粉体塗料は数mJの小さい放電エネルギーでも着火する危険性が明らかとなった。特に、粉体塗料の粒径を考慮すると、エポキシ粉体塗料の方が他の粉体塗料に比べて、着火しやすいという結果が得られた。また、粉体塗料に含まれている顔料などの成分によっては、MIEはほとんど変化しないことが明らかになった。

(図5, 表2, 参考文献19)

噴霧・噴出帯電の静電気危険性評価法の検討

大澤 敦

配管やノズルなどから液体が噴出すると液体および液滴に静電気が帯電して着火源となることがあるので、各種工程の現場において簡便に噴霧・噴出帯電の静電気危険性を評価する方法を構築することは工程の安全化と静電気による着火の防止対策の指針を与え、安全工学の立場からも重要である。本研究では噴霧・噴出の静電気危険性を評価するための測定技術とこの測定データを元に評価する手法を構築することを目標としている。測定技術として接地円筒ケージと電界計による空間電荷密度の測定、吸引ファラデーチューブによる空間電荷密度の測定また

はフローティングプローブによる電位測定の方法を検討した。また、評価手法としては、各測定データを元にポアソンの方程式と $E = -V$ を用いて噴霧空間の電界強度分布を求め、静電気放電の可能性を評価する方法を検討した。圧搾空気ドライブオグ2流体ノズルを用いた噴霧帯電のモデル実験により、これらの3つの測定方法を検討して、接地円筒ケージ・電界計と吸引ファラデーチューブの測定が妥当な結果を導き、現場で簡便に測定できることを考慮すると接地円筒ケージ・電界計による方法が適していることを示した。また、静電気放電の可能性を評価するための簡便なモデルも提案している。

(図7, 参考文献4)

破碎を伴う落石現象の物理モデル化に関する研究

伊藤和也, 豊澤康男, 日下部治

落石は道路、鉄道、住宅等へ影響を及ぼす斜面災害の中でも発生頻度が比較的高い災害現象の一つである。また、落石に起因する労働災害について調査したところ、過去10年間で40件程度報告されていた。中には落石が突破・跳躍して落石対策工により保護されている箇所にはいた労働者が被災する事例も報告されており、落石の運動形態や衝突現象など、落石対策の計画・設計に必要な事柄についても未だ十分には解明されていないのが現状である。そこで本研究は、多くのパラメーターが自明となり、応力条件を等価にすることが出来る遠心模型実験手法を用い、破碎を伴いながら衝突と跳躍を繰り返すような落石現象について物理モデル化を行い、その運動形態・衝突現象の解明を試みた。本報では、新たに開発した遠心場落石発生装置の概要と、それを用いて行った落石実験の落石軌跡および落石の破碎状況を確認した。その結果、球形タイプの落石形態は回転運動が主であるが、破碎を伴うと回転運動から跳躍運動に変化し、破片は大きな跳躍をすることが確認された。

(図4, 表5, 写真12, 参考文献28)