

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

Fundamental experiment on restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall

上條明洋*, 音田奨**, 榎谷浩***
Akihiro KAMIJO, Susumu ONDA, Hiroshi MASUYA

* 日本サミコン株式会社 北陸支店 (〒920-8002 金沢市玉鉾 5-12)
** 日本サミコン株式会社 技術部 (〒950-0925 新潟市弁天橋通 1-8-23)
*** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

It is essentially required to know several coefficients at least to estimate a rock fall trajectory on slope and rationally evaluate the risk by rock falls. However, empirical coefficients have been used, when engineer simulate the rock fall phenomenon. In this study, we have carried out fundamental tests concerning restitution coefficient and frictional coefficient of rock fall, which are the most fundamental parameters to simulate the trajectory of a rock fall on slope. The free fall tests on horizontal ground using two types of rock falls have been introduced. The results have been concretely shown as a restitution coefficient. We have done the traction tests of rock on the three kinds of grounds. The relationship between traction force and displacement of rock have been shown. The dynamic frictional coefficient have been made clear. The roughness effect between rock and ground face also have been investigated utilizing the results of restitution tests.

Key Words: rock fall, restitution coefficient, frictional coefficient, roughness effect
キーワード：落石，反発係数，摩擦係数，ラフネス

1. はじめに

近年、山間地の道路および道路に隣接した山斜面上の多くには、落石災害の対策工が整備されつつある。落石対策工は、発生源における対策である予防工と、到達地点における対策である防護工に大別され、現地状況に合った工法が選定されている。ここで、工法および対策区間については、現地調査や過去の災害事例を基にして技術者が経験的予測より決定しているのが現状である。一方、近年、落石の運動形態を数值的に解析する落石シミュレーションの研究開発が進められている。落石シミュレーションは、コンピューター上で落石の速度、軌跡などを予測するもので、落石対策工の合理的な計画に有効であると考えられ、多くの手法が提案されている^{1~10)}。各種の落石シミュレーションでは、より実現象の落石に近い運動機構のシミュレートを目的として開発機関独自のパラメータを導入しているが、落石と地盤の反発係数および摩擦係数については多くの手法で用いられている共通的なパラメータである。

本研究では、反発係数と摩擦係数に着目し、実物の岩塊を用いて基礎的実験を行い、その結果を検討している。また、反発係数の実験結果を用いて、ラフネスの影響についても検討している。

2. 落石運動シミュレーションと基本パラメータ

斜面での落石運動の予測は、対策工の範囲、規模を決定する上で重要であり^{1, 11, 12)}、特に現地調査や熟練技術者により信頼性のある予測ができる場合には、落石シミュレーションが有効であると考えられている。最初のシミュレーション手法に関する概念は、1960年代に米国のRichieにより示されている²⁾。図-1は彼が行った実験結果の観察により、斜面勾配と運動形態の分類を示したものであり、単純な分類であったが落石運動シミュレーション発展の原点といえる。

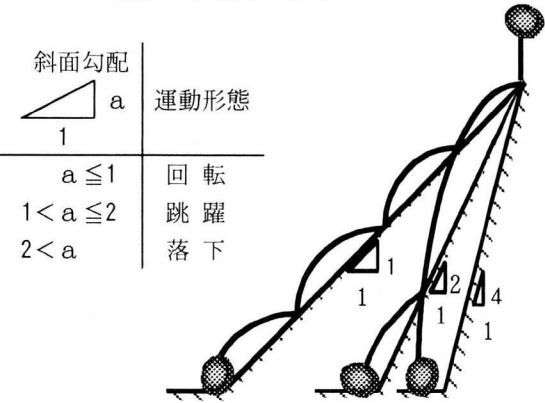


図-1 斜面勾配と運動形態

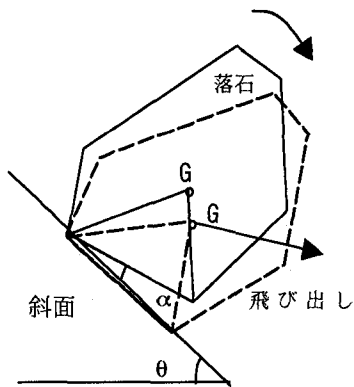


図-2 回転による落石の飛び出し

日本では福岡が、1970年代に落石の痕跡からの軌跡の算定法を発表しており、多角形としてモデル化した場合の落石の飛び出し(図-2)や斜面突起による落石の飛び出しなどについて論じている³⁾。その後、落石を質点とする各種シミュレーション手法がわが国で発達し、提案されている^{4, 5)}。図-3は落石の運動と作用力の取り扱い方法を示したものである。図中の作用力として最も重要なものは、落石が斜面衝突時に受ける斜面からの抗力である。この抗力を衝突後の斜面鉛直方向の速度に影響する反発係数、および斜面方向のすべり運動速度に影響する摩擦係数で表現し、パラメータとして導入しているシミュレーション手法が多くある。シミュレーションに導入されるパラメータに着目した実験はいくつか報告されている^{6, 7)}が、反発係数および摩擦係数に、どのような値を実際に用いる

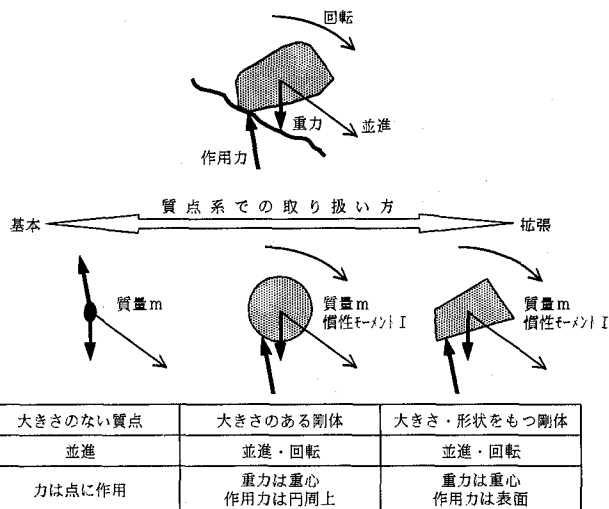


図-3 落石の運動と作用力

べきかあまり明らかなでないのが現状である。

図-4はシミュレーションに用いられる斜面と落石衝突時の幾何学的取り扱いについて示したものである。実際の斜面と落石には大小様々な凹凸が存在し、落石の運動に影響を与える。斜面も落石自体も人工物ではないため、現場の状況を幾何学的に忠実に表現することは、一般に困難である。そこで、斜面と落石の凹凸を表現する係数の導入が、多くのシミュレーション手法で検討されている。本研究でもこの係数をラフネスと呼び⁸⁾、落石の衝突運動において、斜面と落石の凹凸による影響を表現するパラメータとして、シミュレーションへの導入を検討する。

本研究では、シミュレーションを合理的に行う上での最も基本的で重要なパラメータである反発係数と摩擦係数、そしてラフネスの基礎実験データを提示する。

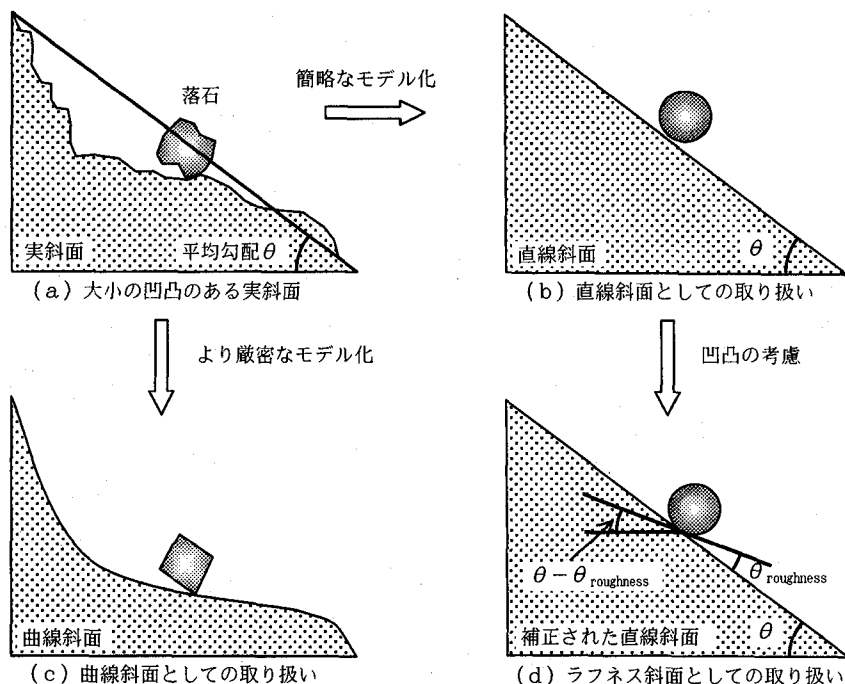
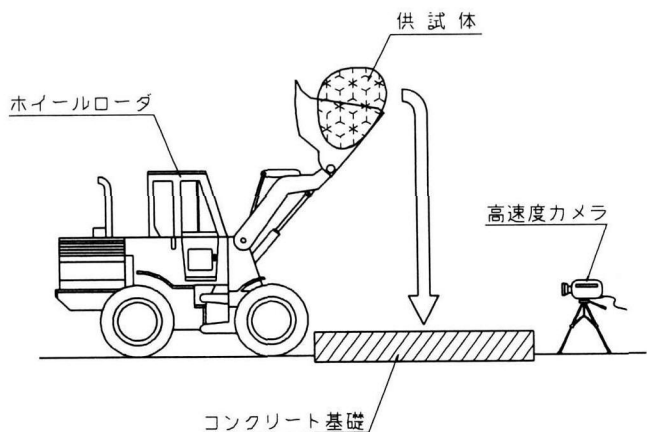
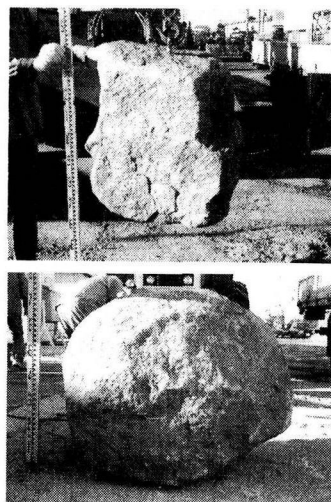


図-4 斜面と落石形状の各種取り扱い方法の概念



図－５ 反発係数実験概要図



写真－１ 実験に使用した岩塊

表－１ 反発係数実験結果一覧

実験 ケース	岩塊 形状	落下高 h (m)	リバウンド高 h' (m)	水平跳躍距離 Xo (m)	反発係数 e	
					平均 (標準偏差)	
Case 1	長 方 形 型 (219kg)	0.50	—	測定不可	—	0.18
Case 2		1.00	0.040	0.740	0.20	
Case 3		2.00	0.230	0.350	0.34	
Case 4		2.50	0.025	2.500	0.10	
Case 5		3.00	0.025	3.000	0.09	
Case 6	球 型 (800kg)	0.50	0.005	0.900	0.10	0.09 0.13 (0.087)
Case 7		1.00	0.010	0.570	0.10	
Case 8		1.50	0.010	1.000	0.08	
Case 9		2.00	0.015	0.500	0.09	
Case10		2.50	—	0.270	—	
Case11		3.00	0.020	0.650	0.08	

3. 反発係数実験

3. 1 実験方法

図－５に実験概要を示す．実験は，供試体である岩塊をホイールローダで所定の高さよりコンクリート基礎上に落下させることにより行った．使用した岩塊は，質量 219kg の長方形型と，質量 800kg の球型の２種類，落下高さは，各岩塊について 0.5m～3.0m とした．

写真－１には，実験に使用した岩塊を示す．岩種はいずれも花崗岩である．コンクリート基礎は，長さ 3600mm，幅 3600mm，厚さ 400mm の鉄筋コンクリート製で，シュミットテストハンマーでの強度試験の結果，圧縮強度は 46 MPa，ヤング係数は 3.22×10^4 MPa であった．測定項目は，岩塊がコンクリート基礎に衝突した後の鉛直方向のリバウンド高さ h' と，リバウンド後に再び衝突した位置までの水平方向の跳躍距離 X_o とした．ここで， h' は高速カメラで撮影した映像より， X_o はコンクリート基礎の破損個所を実験後にスケールで計測することにより求めた．

3. 2 実験結果および考察

表－１に実験結果を示す．表中の「—」は高速カメラの映像不良によりリバウンド高さが測定できなかったケースである．ここで，反発係数 e は，岩塊のコンクリート基礎への衝突前と衝突後の速度の比より求められるため，次式より算出した．

$$\text{反発係数 } e = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{2gh_2}}{\sqrt{2gh_1}} \quad (1)$$

ここで， V_1 ：衝突前の岩塊の鉛直方向速度
 V_2 ：衝突後の岩塊の鉛直方向速度
 h_1 ：落下高さ
 h_2 ：リバウンド高さ
 g ：重力加速度

である．

反発係数の実験値は，長方形型の岩塊を用いた２ケースで 0.2～0.35 を示した以外は，落下高さに関係なく 0.1 程度であった．全ケースにおける平均値は 0.13，標準偏差は 0.087 であった．

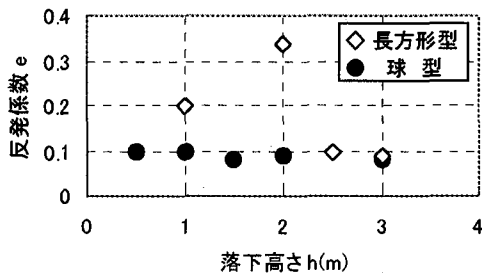


図-6 反発係数と落下高さの関係

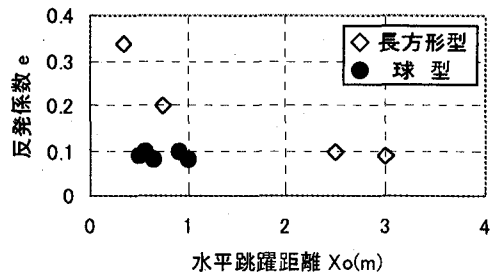


図-7 反発係数と水平跳躍距離の関係

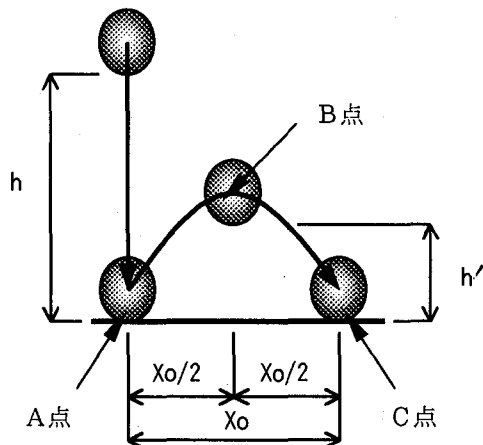


図-8 岩塊の軌跡の推定

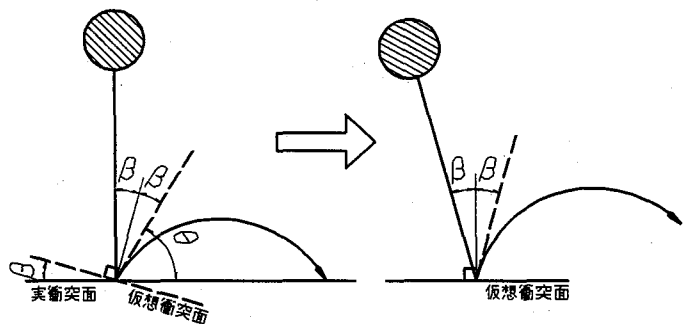


図-9 パラメータ β の算出

図-6に反発係数 e と落下高さ h の関係を示す。球型の岩塊を用いたケースでは、落下高さによる影響が少なく、0.1程度でほぼ様な反発係数が得られた。落石の落下高さが高くなることにより衝突速度が増加すると衝突地盤の塑性変形に落石エネルギーが吸収され、反発係数は減少するという実験報告¹¹⁾もあるが、本実験では、コンクリート基礎の変形は表面破損にとどまり、この報告のような傾向は確認されなかった。一方、長方形型の岩塊のケースでは、不規則なばらつきがあり、明確な傾向が確認されなかった。

図-7には反発係数 e と水平跳躍距離 X_o の関係を示す。球型の岩塊を用いたケースでは、水平跳躍距離は1m以下でほぼ様な分布を示した。一方、長方形型の岩塊を用いたケースでは、反発係数が大きくなるほど水平跳躍距離は小さくなる傾向が確認された。

上記2つの図より、長方形の岩塊については、衝突面の垂直線と岩塊の重心のずれが各実験ごとに異なり、回転を伴って水平方向に大きく跳躍する場合と回転はわずかで鉛直方向に大きくリバウンドする場合があったと考えられる。また、球型の岩塊については、各実験ごとで上記のずれに大きな違いがないため、反発係数、水平跳躍距離ともにほぼ様な値が得られたと考えられる。

3.3 ラフネスの影響

本実験において、コンクリート基礎に衝突した岩塊は、落下高さおよび形状を問わず、ほとんどのケースで回転を伴って水平方向に跳躍する状況を示した。そこで、衝突後の水平方向の跳躍距離と鉛直方向のリバウンド高さから岩塊の軌跡を推定した。

岩塊の軌跡は、図-8に示すように、高さ h から鉛直自由落下させた岩塊が、コンクリート基礎への衝突点(A点)から水平方向に $X_o/2$ の距離でリバウンド高さ h' に到達(B点)し、さらに $X_o/2$ の距離で再びコンクリート基礎に衝突(C点)する事とし、この3点を放物線で結ぶことにより推定した。鉛直自由落下させた岩塊がコンクリート基礎面への衝突後に水平方向に跳躍する現象は、岩塊の重心が衝突面との垂直線上になかった事や岩塊の凹凸、落下当初に伴ったわずかな回転運動が原因と考えられる。

そこで、このような現象を図-9の様に、鉛直自由落下する岩塊が衝突面より θ の角度でリバウンドしたと考え、衝突面の法線に対する衝突角度 β を算出した。ここで、 β は本実験において、岩塊表面の凹凸や衝突前後の岩塊の回転を含めた衝突運動を表現するパラメータであり、落石シミュレーションに導入されるラフネスの影響を表すものと考えられる。

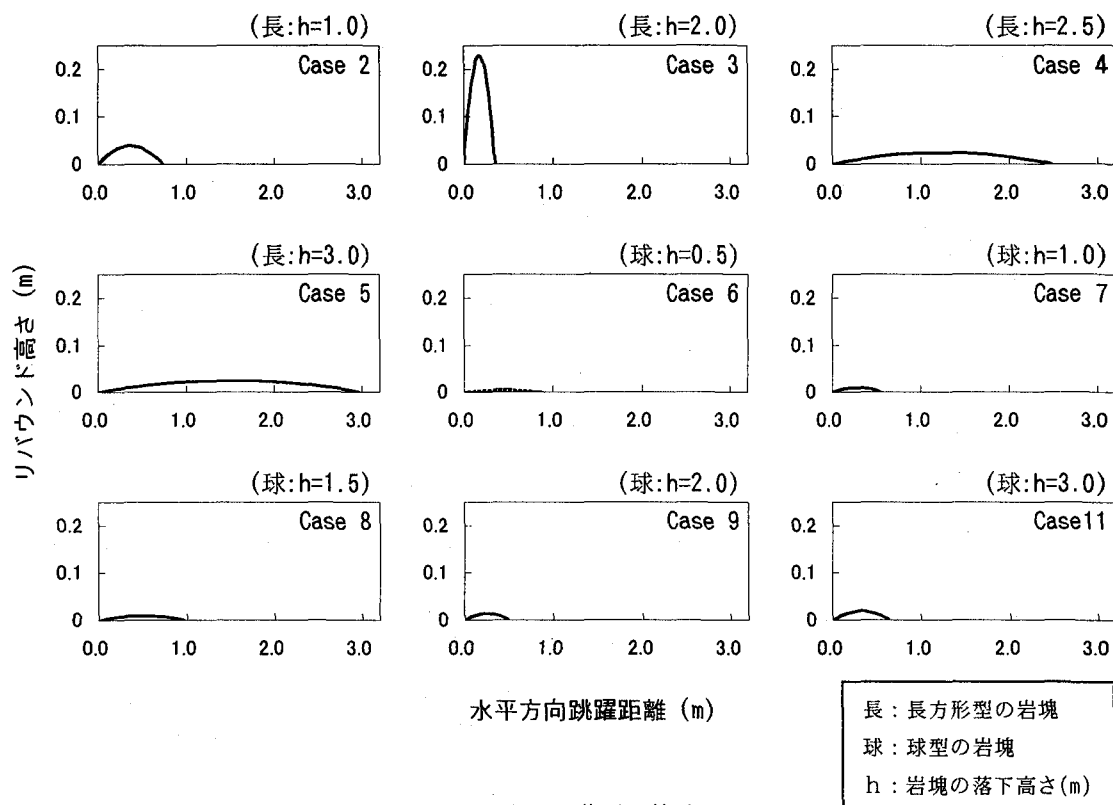


図-10 落石の軌跡

表-2 β の算出結果

実験 ケース	β (deg)
Case 1	—
Case 2	38.9
Case 3	10.4
Case 4	43.9
Case 5	44.0
Case 6	44.4
Case 7	43.0
Case 8	43.9
Case 9	41.6
Case10	—
Case11	41.5
平均値	39.1
標準偏差	10.9

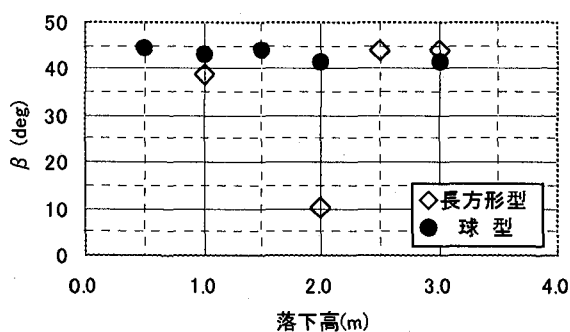
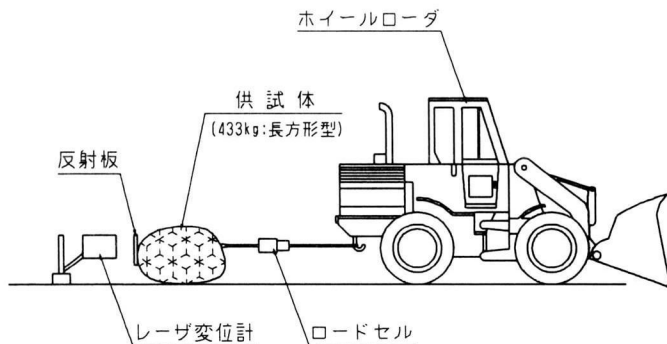


図-11 落下高さと β の関係

図-10は、リバウンド高さと水平方向への跳躍距離から推定した岩塊の衝突後の軌跡を示す。Case3 以外はリバウンド高さが極めて小さく、水平方向に跳躍していることがわかる。また、球型の岩塊を用いた実験では、水平跳躍距離に大きな違いはなく、同様な軌跡であるのに対し、長方形型の岩塊を用いた実験では、水平跳躍距離にばらつきがあり、大きく異なる軌跡であることがわかる。表-2には、図-10に示した岩塊の軌跡より求めた β の算出結果を示す。また、図-11には、岩塊の落下高さと β の関係を示す。本実験における β は、落下高さおよび形状に関係なくほとん

どのケースで40度以上になっていることがわかる。しかし、長方形型で落下高さ2.0mのCase3では10.4度といった他のケースとは全く異なるデータが得られた。また、全実験ケースの平均では39.1度が得られた。これは、岩塊を鉛直に自由落下させたため、衝突前の水平方向速度が零であることを考えると、比較的大きな値であると言える。これより、岩塊は衝突後の回転とラフネスの影響により水平方向に跳躍すると考えられる。また、本実験により得られた反発係数の平均値が0.13と通常考えられている下限付近の値を示したことは、Wuが報告¹²⁾した、入射角度が大きいほど反発係数は小さくなるという実験結果に一致している。



図－１２ 摩擦実験概要図

表－３ 摩擦係数実験結果

地盤条件	摩擦係数		
	最大 μ_{max}	最小 μ_{min}	平均 μ_a
コンクリート	0.90	0.30	0.59
砂利	1.03	0.25	0.68
土	1.29	0.29	0.90

４．摩擦係数実験

４．１ 実験方法

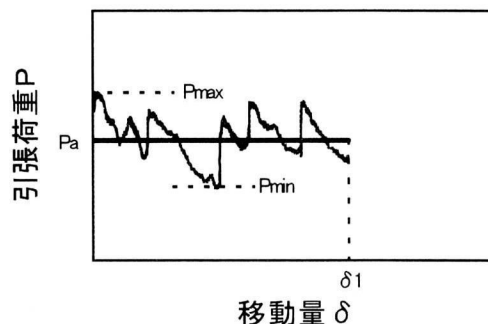
図－１２に実験の概要図を示す．

実験は、質量 433kg の長方形型の岩塊をホイールローダで牽引し、このときの引張荷重と岩塊の移動量から摩擦係数を求めた．引張荷重はワイヤーロープに取り付けたロードセルより、移動量はレーザ変位計により測定した．地盤条件は、コンクリート、砂利および土の３種類とし、地盤の傾斜、凹凸の程度による実験値のばらつきをなくすために同地盤について数回の実験を繰り返し行った．なお、実験を行った各地盤は実験用に用意されたものではなく、自然な地盤である．

４．２ 実験結果および考察

表－３に実験結果を示す．表中の最大摩擦係数 μ_{max} は、実験データの最大荷重 P_{max} より、最小摩擦係数 μ_{min} は、最小荷重 P_{min} より、平均摩擦係数 μ_a は平均荷重 P_a より算出した．ここで、最大摩擦係数 μ_{max} は静止摩擦係数に相当し、最小摩擦係数 μ_{min} は動摩擦係数の最小値と考えられる． P_{max} 、 P_{min} 、の各荷重は、図－１３に示すように実験データより読み取り、 P_a は、荷重－移動量曲線の積分を行い移動量で除することにより算出した．また、表－３に示した値は、各地盤において行った数回の実験の平均値であり、平均摩擦係数については、土で 0.90 と最大、砂利で 0.68、コンクリートでは最も小さく 0.59 が得られた．

表－３より、砂利と土地盤の最大摩擦係数 μ_{max} がいずれも 1.0 を超えていることがわかる．これは、岩塊と地盤における凹凸のかみ合わせや、岩塊の進行方向前面に、掘り起こされた土や砂利が溜まったことが影響したと考えられる．写真－２は、土地盤での実験状況を示し、岩塊前面に掘り起こされた土が溜まっていることが確認できる．これは、実際の落石が斜面に衝突しリバウンドするまでに斜面上ですべる現象とほぼ同様で、本実験で得られた値はシミュレーションのパラメータとして検討できると考えている．



$$\begin{aligned}\mu_{max} &= P_{max} / (mg) \\ \mu_{min} &= P_{min} / (mg) \\ \mu_a &= P_a / (mg)\end{aligned}$$

ここで、 m : 岩塊の質量
 g : 重力加速度
 P_a : 平均引張荷重

図－１３ 摩擦係数の算出



写真－２ 土地盤における摩擦係数実験状況

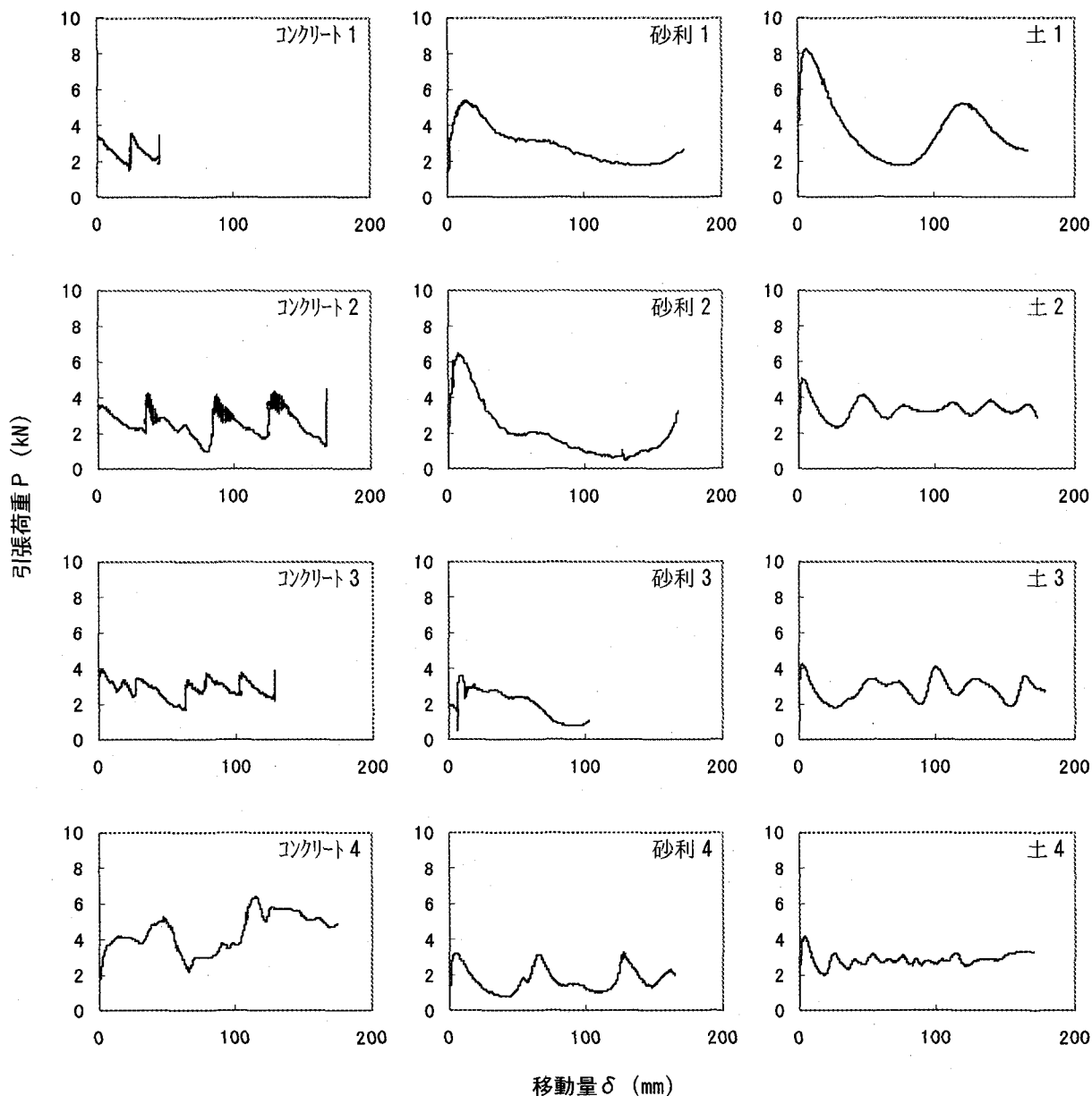


図-14 摩擦係数実験における岩の引張荷重と移動量の関係

図-14には摩擦係数実験における岩塊の引張荷重と移動量の関係を示す。コンクリート地盤の波形は、荷重が急激に増加した後、岩塊の移動と同時に荷重が減少する現象が繰り返される傾向を示した。1回の荷重の減少にかかる移動量は20～45mmであった。一方、砂利地盤の波形は、コンクリート地盤に比べて荷重の増加が緩やかになり、1回の荷重の減少で大きく移動する傾向をした。その移動量は、50～100mm以上であった。また、土地盤の波形は、荷重の増加と岩塊の移動に伴う荷重の減少が他の2種類の地盤より短い周期で繰り返される傾向を示した。1回の荷重の減少にかかる移動量は6～70mmであった。砂利と土地盤の波形

は引張荷重の増加と減少の両方で移動が伴い緩やかなカーブの山型になる傾向を示したが、コンクリート地盤の波形は、荷重の増加時には移動がほとんどなく、減少時に直線的に移動するノコギリ型になる傾向を示した。実験状況についても、砂利、土地盤の場合は、岩塊の移動が連続的であったのに対し、コンクリート地盤の場合は、移動と停止が繰り返される傾向を示していた。いずれの地盤についても、繰り返し行った実験結果は同様な傾向を示した波形があるが、すべてのケースで一致したものはなく、同地盤においても場所によって傾斜或不規則な凹凸があり、その影響が実験結果に表れていると考えられる。

5. まとめ

本研究では、現在、開発・研究が進められている各種の落石シミュレーションにおいて最も基本的なパラメータである反発係数、摩擦係数および岩や斜面の凹凸を考慮するパラメータであるラフネスに着目し、実物の岩塊を用いて基礎的実験を行い、検討した。

得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 岩塊のコンクリート基礎への鉛直自由落下実験により得られた反発係数は平均値で 0.13、標準偏差で 0.087 であった。
- 2) 本研究で得られた反発係数は、Wu の岩盤斜面での実験報告と類似した比較的小さい値であった。実際の斜面での衝突では、落石の入射角度は通常 90 度より小さいので、本実験結果は下限値を示していると考えられる。
- 3) 鉛直自由落下実験に関わらず、全ての実験において衝突後は水平方向に回転を伴う跳躍が観測され、ラフネスの影響が実験的に確認された。
- 4) ラフネスの影響を反射速度方向が衝突面となす角度 β で具体的に表現した。 β の平均値は 39.1 度、標準偏差は 10.9 度であった。
- 5) コンクリート、砂利、土の 3 種類の地盤に対して摩擦係数実験を行い、引張荷重-移動量関係で各地盤における滑り特性を示した。
- 6) 摩擦係数実験における引張荷重-移動量関係を用いた実際の摩擦係数の算出方法を示した。本実験では、コンクリートで 0.59、砂利で 0.68、土で 0.90 が得られた。

本実験で得られた、反発係数、摩擦係数およびラフネスを表現する角度は、限られた条件の数少ないデータより求めた参考値である。今後、さらに多種多様な条件下における十分なデータの蓄積とシミュレーション手法での合理的な反発係数、摩擦係数、ラフネスの具体的考慮に関する検討が必要と考えている。

謝辞：本研究は、社団法人日本道路協会「落石シミュレーション手法検討 W. G.」における検討を参考に行ったものである。ここに委員各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) W. Heierli, A. Merk and A. Temperli : Schutz gegen Steinschlag, 2. Auflage, Eidgenössisches Verkehrs-und energiewirtschaftsdepartment bundesamt für strassenbau, 1985.
- 2) M. Richie : Evaluation of rockfall and its control, Highway reserch record No.17, pp.13-28, 1963.
- 3) 福岡正巳：落石の運動機構について、第 11 回日本道路会議論文集、第 2 部会、pp.96-98, 1973.
- 4) 吉田博, 右城猛, 榎谷浩, 藤井智弘：斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価、構造工学論文集 Vol.37A, 土木学会, pp.1603-1615, 1991.
- 5) 榎谷浩, 福田尚晃, 堤下克彦：斜面上の落石の運手法の開発、構造工学論文集 Vol.43A, 土木学会, pp.1589-1596, 1997.
- 6) 小村辰彦, 村西隆之, 西澤謙二, 榎谷浩：落石シミュレーション解析のパラメーター設定と実斜面の凹凸評価、第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.63-68, 2000.6.
- 7) 倉岡干郎, 太田敬一, 杉山実：立木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析、第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.97-100, 2000 年 6 月.
- 8) T. J. Pfeiffer, D. Higgins and A.K. Turner: Computer aided rockfall hazard analysis, Proceedings of 6th International IAEG congress, pp.93-103, 1990.
- 9) 右城猛, 篠原昌二, 谷田幸治, 八木則男：落石斜面衝突運動に関する研究、第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.91-96, 2000 年 6 月
- 10) S.Wu : Rock evaluation by Computersimulation, Transportation research record, Transportation research board, Washington D.C, pp.1-5, 1985.
- 11) 日本道路協会：落石対策便覧, 日本道路協会, 2000 年 6 月.
- 12) 土木学会衝撃問題研究小委員会：ロックシェッドの耐衝撃設計, 構造工学シリーズ 8, 土木学会, 1998 年 11 月.

(2000 年 9 月 14 日 受付)