

落石に働く衝撃加速度計測による落石シミュレーションの改善

Improving the Rockfall Simulation by Measuring the Impact Acceleration of Rockfalls

山近哲志*・川村洋平**・氏平増之***・伊藤健****

Satoshi YAMACHIKA, Youhei KAWAMURA, Masuyuki UJIHIRA and Ken ITO

*非会員 筑波大学大学院博士前期課程 システム情報工学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1)

**正会員 工博 筑波大学大学院講師 システム情報工学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1)

***正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条西8)

****非会員 筑波大学大学院博士前期課程 システム情報工学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1)

For pertinent countermeasure of rockfalls, rockfall simulation was studied many times. Any rockfall simulation has not gotten consistency between the simulation result and real rockfall. There are a few causes. One is whether method of calculation used the simulation approaches the mechanics of real rockfall. Two is whether parameters using the calculation are assigned pertinent value in. This study suggests direct measurement of rockfall's detail motion which as method of closing of the problems. It would be possible to determine pertinent value in parameter by comparing the detail motion to calculation result. In this research, 3-dimensional rockfall simulation developing in this laboratory is explained. Then the problems and improvement of the simulation is shown. Finally the result of experiments on impact acceleration that applies to rockfalls is shown.

Key Words : rockfall, simulation, impact acceleration, dynamic model

1. 緒言

日本は環太平洋造山帯の一部にあたり山岳地帯が数多く存在する。その山岳部を縫うように数多くの道路が存在する。主要な幹線道路が通っていることも珍しくない。そのような場所では、常に落石が発生する危険性があり、何らかの対策をとらなければならない¹⁾。防護柵や防護壁などの落石に対して受動的な対策を行う場合、落石の経路や速度の情報を得るため落石の評価を行わなければ、その設置に際して適切な設計を行うことができない。これまで、落石の評価方法として、既往の現場落石実験などの実績に基づいて安全側に設定された経験則に用いることで評価を行っていたところが、落石対策を必要とする現場は多様であり、必ずしも経験則が適当でない場合がある。近年では、シミュレーションを行うことにより、落石の経路や速度の定量的・定性的な予測評価をしようと試みられている。シミュレーションを用いて落石を評価する際にその信頼性を決める上で最も重要になるのは、各種パラメータの決定である。パラメータの決定方法は実際の落石挙動との整合性が得られるように、そのビデオ映像や経験則を用いてシミュレーション結果と比較することで決定しているのが現実である。能野・山上ら

は落石軌跡から逆問題を解くことにより、適切なパラメータを選定できることを示している²⁾。しかし、落石の力学的観点からのパラメータの評価はされていない。そこで著者等は、落石シミュレーションのパラメータ決定や計算結果の評価に、落石に働く物理量を直接計測したデータを用いることを考えた。具体的には、落石に働く衝撃加速度や回転量、速度、軌跡である。これらのデータが信頼性のある数値データとして得られれば、シミュレーション結果と比較することにより、シミュレーションに用いるパラメータを決定できると考えられる。

本論文では、現在開発中の3次元落石シミュレーションの特徴を示し、その問題点と改善方法を述べる。次に落石に働く衝撃加速度に着目して行った実験について、その結果とシミュレーションで用いる力学モデルとの比較考察を行う。

2. 落石シミュレーションの概要

現在さまざまな手法を用いた落石シミュレーションが開発されている³⁾。特に2次元でのシミュレーションについては多くの研究が行われており、現在ではその信頼性の向上が重要な研究課題となっている。また、3次元でのシミュレーションについては近年活発に研究

が行われている。現在、著者等も3次元落石シミュレーションの開発を行っている⁴⁾。以下にその計算手法や特徴、問題点を挙げる。

2.1 力学モデルと計算手法

本研究のシミュレーションは、落石の運動方程式を差分し数値的に解くことにより軌跡を求めている。落石の軌跡を支配する運動方程式は、落石の運動形態により異なり、運動形態は大きく跳躍運動と衝突運動の2つに分けられる。

跳躍運動については容易に計算することができる。跳躍運動中は落石に働く力は重力のみであり、鉛直方向の自由落下、水平方向の等速度運動、そして回転についての等角速度運動のみ合わせとして表すことができる。すなわち初期速度や初期角速度を知ることができれば跳躍運動を知ることができることとなる。

衝突運動については、落石形状に直方体を用いるので工夫が必要である。まず球形で考えられる転がり運動というもの、小さな衝突運動の連続として考える。また一般に衝突運動では落石に働く斜面からの反力というものは容易に知りえない。そうすると摩擦抵抗力がどれくらい働くか、反発時の速度はどれくらいかという情報を知ることが難しい。そこで、現在構築中のシミュレーションでは衝突時の運動を、個別要素法(DEM)に代表されるような剛体の要素を考え、図-1のように要素間に仮想的にバネとダッシュポット、スライダーを設置することにより力の伝達を行うモデルに置き換えて計算を行う。このとき各要素とは直方体のブロックと斜面の二つの要素である。接触時に斜面法線方向と斜面接線方向にバネ・ダッシュポット・スライダーを設け、運動方程式を立てることで3次元での計算を行っている。この手法を用いて衝突時の並進運

動と回転運動の運動方程式を立てるとそれぞれ式(1)、(2)のようになる。

$$m\ddot{u}_i + c\dot{u}_i + ku_i = mg_i \quad (1)$$

$$I\ddot{\theta}_i + cr^2\dot{\theta}_i + kr^2\theta_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 m :質量、 u_i :各軸の並進方向の変位量、 k :バネ定数、 c :減衰粘性係数、 θ_i :各軸まわりの回転量、 I :慣性モーメント、 r :回転半径、 g_i :重力加速度の各軸成分であり、 k 、 c は減衰振動をするような値をとる。これを差分近似し解くことにより、衝突運動の落石の運動を知ることができる。これらの計算を3軸それぞれについて計算することにより、反発時の併進速度や回転速度を知る。スライダーについては、適当な摩擦係数を与えることですべりを表現することができる。

ここで k 、 c はともにこの運動方程式の解を左右する重要なパラメータであり、衝突運動の様子を決めるものとなる。また、衝突運動から求められる反発時の速度・角速度は、跳躍時の初期条件となり跳躍運動を決定することになる。すなわち、式中のばね定数 k と減衰粘性係数 c は、落石の軌跡を決める非常に重要なパラメータとなる。シミュレーションでは、粘性減衰係数を定数として与えた場合、跳躍量が経験則や実験結果を超えて大きな値を出してしまう。そこで試行錯誤の結果、次のように衝突時の速度とバネ定数の関数として計算している。

$$c = \alpha V_{in}^2 (2\sqrt{mk}) \quad (3)$$

ここで α は斜面法線方向では1/200、斜面接線方向では1/2000とし、 V_{in} は衝突時の各軸の速度成分である。3.4節で示すが、このパラメータを用いた場合でも衝撃加速度を再現しようとした場合に問題があり、再考の余地があることがわかる。

2.2 本シミュレーションの特徴

著者等が開発中の落石シミュレーションの特徴として、まず挙げられるのは3次元で計算を行っている点である。3次元で計算を行う利点は、横方向の運動を加味することにより、2次元では不可能な落石の横方向の広がりというものを評価できる点にある。これは落石対策を行う上で重要な設計要素であり、著者等が3次元でのシミュレーションの構築を目指したのもそのためである。また、走行方向への運動を考えることにより、斜面方向の運動がより正確になることが考えられる。

続いて、落石形状に直方体を用いている点に特徴がある。これまで開発されてきているシミュレーションは落石形状を質点や円・球形を用いたものが多い。こ

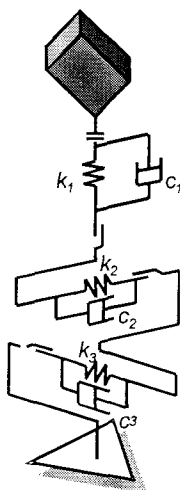


図-1 シミュレーションで用いる力学モデル

これらの落石形状を用いた場合、落石の姿勢の変化による落石運動の変化を評価できない。一方、実際の落石は多面体であり、巨視的に直方体である場合が多い。さらにそれが、棒状であるか塊状であるかというのは落石運動に大きな影響を与える。よってシミュレーションを直方体で行い、その大きさを自由に変えられることは大きな利点となる。

落石運動は、落石が発生する斜面の形状に大きく依存する。著者等が開発中のシミュレーションでは、実際の斜面を測量し数値的に表すことにより、シミュレーション上に表している。正確に斜面の測距を行い斜面の変化による落石挙動の違いを知ることができる。また測量では得られない細かな凹凸も測定点を微少に変化させることで表現している。

図-2 はシミュレーションを行った結果の一例であり、表-1 にそのときのシミュレーションの各種条件を示す。解析条件のバネ定数や減衰粘性定数の値は、落石実験のビデオ映像などと整合するように決定している。斜面は、セオドライトとレーザ測距儀を用いて図-3 に示す北海道銭函にある採石場の斜面高さ83m×幅58mの範囲を253点計測したものである。プログラム上で斜面は計測点をむすんだ四角形の集合として表される。シミュレーション結果は試行10回分の落石軌跡

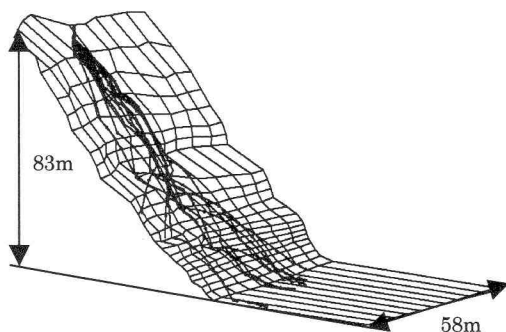


図-2 シミュレーション結果の一例

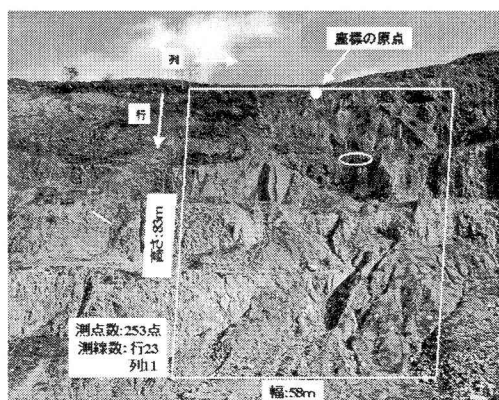


図-3 計測した斜面(北海道銭函)

表-1 シミュレーションの各種条件

岩石	寸法	長軸径	0.5 m
		中軸径	0.5 m
		短軸径	0.5 m
	質量		330 kg
	比重		2.64
	初動時の落下高さ		2.0 m
解析条件	初動時の姿勢		ランダム
	シミュレーション回数		10 回
	バネ定数	k_1	2.0×10^6 N/m
		k_2	2.0×10^6 N/m
		k_3	2.0×10^6 N/m
	粘性減衰定数	c_1	$23.4 \times V_1^2$ N・s/m
		c_2	$23.4 \times V_2^2$ N・s/m
		c_3	$302.2 \times V_3^2$ N・s/m
	摩擦係数		0.3
斜面	斜面角		39°
	斜面の凹凸		考慮しない

※粘性減衰係数中の V_i は衝突時の各方向の速度である。

を同時に表示している。各試行で落石軌跡に違いがあらわれるのは試行ごとの初期姿勢が異なることのみである。すなわち、落石の形状が直方体であることにより、その形状が与える落石軌跡の影響というものを表している。このようにシミュレーションを行うことにより図-3 の斜面における落石の軌跡や速度、横への広がりといった情報を得ることができる。

2.3 問題点およびその改善方法

2.2 節で述べたように DEM 手法を用いた衝突運動のモデル化においては、ばね定数と減衰粘性係数がシミュレーション結果を左右する重要なパラメータとなる。しかし、衝突時の物理現象を解析するのは難しく、それらの適切な値を定性的に求めることはこれまであまりなされていない。現在は、解析を行おうとする斜面に実際の落石が発生させ、そのときビデオ映像から得られる落石の様子とシミュレーション結果とを比較することや、これまで用いられてきた経験則を用いて、シミュレーション結果に整合性が得られるように各種

パラメータを決定している。しかしこれでは、定性的な落石の評価をしているとは言い難い。また斜面ごとに実際の落石と比較をしなければならないならばシミュレーションを行う意味合いが薄れる。

そこで本研究では、落石の実際の運動を詳細に調べることにより、ビデオ映像や経験則の代わりにすることを考えている。ビデオ映像で知ることのできる落石の運動は大まかな軌跡くらいで、詳細な軌跡や回転量、衝撃時の力など細かな運動を知することは難しい。その落石運動の詳細を求める新しい手法として、それらの運動を調べるのに適切な計測センサを用いることを考えている。落石に働く物理量を計測することにより得られたデータから詳細な運動を得ようというものである。計測する物理量は跳躍運動中に働く遠心力、地磁気および地面との衝突時に働く衝撃加速度である。前者二つからは、落石の姿勢角を得ることで落石の回転数を知ることが可能である。衝突前後の回転数の変化を知ること、すべりの有無や接線方向のバネ・ダッシュポットの係数を選定できる。後者の衝撃加速度からは、反発時の速度の大きさを知ることができる。衝突前後の姿勢角と合わせることで反発の方向も知ることができる。先に述べたように跳躍運動の初期速度と初期角速度を知ることができれば落石の軌跡を求めることができる。このような落石軌跡計測システムを構築することができれば、詳細な落石運動を数値的に得ることができ、シミュレーションとの比較を定量的に行え、適切な評価が可能になると考えられる。

本論文では、そのようなセンサユニットによる計測の前段階として、衝撃加速度の計測から得られる結果と力学モデルによる計算結果の比較を行うことで、力学モデルの妥当性を検討する。

3. 落石に働く衝撃加速度の直接計測

落石に働く衝撃加速度に注目して行った実験について述べる。その結果とシミュレーションの力学モデルから得られる計算結果との比較を行い、その考察を行う。

3.1 実験方法

本実験では、落石と岩盤斜面をコンクリートブロックとコンクリートの地面に置き換えて、ブロックが地面へ衝突するときに、そのブロックに働く加速度を計測する。図-4は実験の概要図である。計測と解析を簡単にするために、ブロックの運動を鉛直方向のみに限

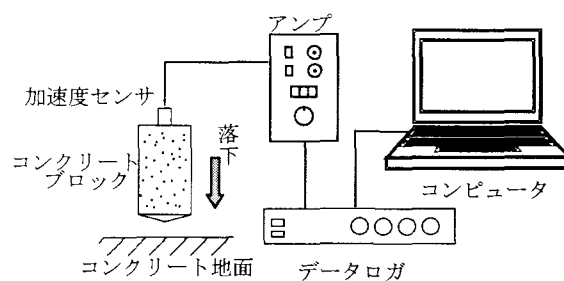


図-4 実験の概念図

定するようにして実験を行った。ブロックを所定の高さにワイヤで吊るし、そのワイヤを切断することでブロックを自由落下させた。地面との衝突時にブロックに働く衝撃加速度をブロック上面に設置した一軸感度の圧電型加速度センサを用いて計測した。そのデータは専用アンプを用いて電圧データへ変換し、データロガを用いてサンプリングを行った。コンクリートブロックの規模としては、室内実験を行える程度のものとした。ブロックには地面との衝突を一点で行えるように、底面を錐の形に加工して実験を行った。

表-2は各種実験装置の諸元となる。サンプリング周波数は、一衝突の波形を詳細に確認でき、かつ2次衝突も確認できる計測時間を得られるようにするため、20kHzとした。計測時間は0.4sである。

表-2 実験装置の諸元

コンクリートブロック	質量: 6kg, 形状: 直方体 (底面加工)
加速度センサ	TEAC 社製 606ST 定格加速度: $\pm 50000\text{m/s}^2$
アンプ	TEAC 社製 SA-630 最大出力 $\pm 10\text{V} / \pm 50000\text{m/s}^2$
データロガー	GRAPHTEC 社製 DM3100 サンプリング周波数 20kHz

3.2 実験結果

今回の実験で得られた衝撃加速度波形の一例として表-3の試行3のデータを図-5に示す。ブロック質量6kg, 落下高さ100mmのときの結果である。初めの大きな立ち上がりは1次衝突時の加速度である。一定時間後に現れる加速度が2次衝突時のものである。3次衝突以降の衝突も計測できているが、衝突時に起こる回転の影響が大きく、センサ感度軸が大きく傾いているため議論の対象外とする。また、圧電型加速度センサは重力加速度を計測できないが、実験結果に対して重力加速度は非常に小さな値であるため、無視できるものとする。衝突後に現れるマイナスの加速度はセンサの特性によるものであり、重力加速度を感知しているのではない。

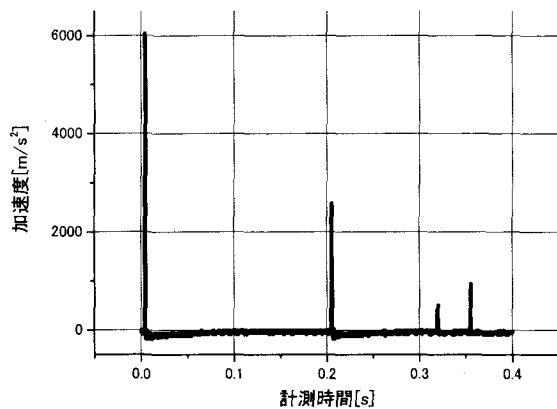


図-5 計測された加速度波形の一例(試行3)

3.3 センサ情報の信頼性

まず、実験で得られた衝撃加速度の情報が実際のブロックの挙動を示しているのかを検証する。検証方法としては、2つの情報から得られる1次衝突後の反発速度を比較することによって行う。1つは、1次衝突時にブロックに働く衝撃加速度を積分することによって得られるものである。積分範囲は図-6に示すように加速度が0から再び0になるまでとした。衝突中にブロックに働く加速度は、突入時のブロックの速度を打ち消し、反発速度を与えるような大きさを持つので、加速度センサから得られる加速度情報と衝突速度を知ることができれば、次式(4)のように反発速度を知ることができる。

$$V_{out} = V_s + V_{in} \quad (4)$$

ここで、 V_{out} は反発速度、 V_s は加速度積分値、 V_{in} は衝突速度である。衝突速度は初期落下高さから算出可能である。

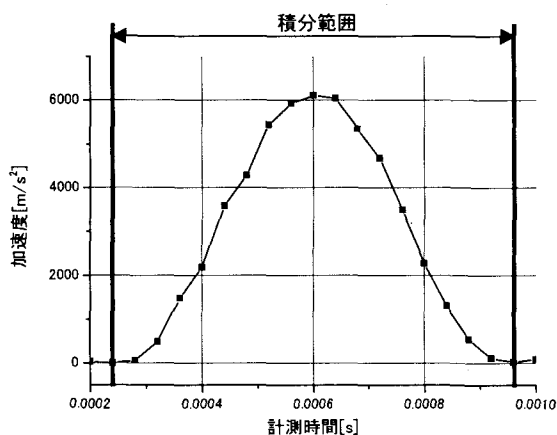


図-6 1次衝突時の加速度変化の拡大図(試行3)

一方、図-7に示すように1次衝突と2次衝突の時間間隔を計測することによっても、反発速度を知ることができる。正確には1次衝突の立ち下りから2次衝突の立ち上がりまでの時間を計測する。実験は鉛直方向のみの運動となるようにしているので、各衝突の間は鉛直方向のみの跳躍運動と仮定する。そのため各衝突間の時間から初期速度である反発速度を計算することが可能となる。重力加速度を g 、衝突間の時間を Δt とすると、次式(5)を用いて反発速度が求められる。

$$V_{out} = -g\Delta t / 2 \quad (5)$$

実験で得られた結果について、これらのことを比較してみると、表-3のような結果となる。ブロック質量6kg、初期落下高さ10cmである。式(5)で得られる反発速度はセンサの性能に影響を受けないので、実際の反発速度をあらわす真の値と仮定する。2つの方法で得られる反発速度にオーダーの異なるような誤差がないことから、加速度センサから得られる加速度データを積

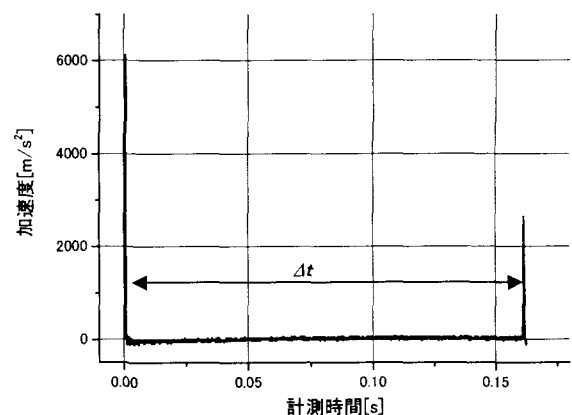


図-7 1次衝突と2次衝突の時間間隔(試行3)

表-3 反発速度の比較

	V_s [cm/s]	$V_{out}=V_s+V_{in}$ [cm/s](1)	Δt [sec]	$V_{out}=-g\Delta t/2$ [cm/s](2)	誤差率 {(2)-(1)}/{(2)} ×100[%]
試行1	215.4	75.4	0.170	83.4	9.57
試行2	223.3	83.3	0.173	84.6	1.55
試行3	213.7	73.8	0.160	78.4	5.90
試行4	208.3	68.4	0.155	75.8	9.80
試行5	217.2	77.3	0.171	83.6	7.57
試行6	218.7	78.7	0.177	86.6	9.09
試行7	222.0	82.0	0.173	84.9	3.43
試行8	216.9	76.9	0.164	80.3	4.22

分することで落石の反発速度を知ることが可能であると考えられる。すなわち、シミュレーションで用いる力学モデルにおいて加速度センサで得られる衝撃加速度を現すことが可能となれば、シミュレーションで実際の落石の挙動をより詳細に再現できるということになる。

2つの方法で導き出した反発速度の間に比較的大きな誤差が出た理由としては、実験方法に原因があると考えられる。実験では、衝突中に多少なりともブロックが地面との接触点周りに回転してしまう。加速度センサは1軸感度なので、鉛直方向からその軸がずれるとセンサ出力が小さくなり、式(4)で得られる反発速度が小さな値となってしまう。また、回転の影響でブロックの2次衝突の際に底面の錐の頂点が鉛直から傾いてしまい、衝突間の時間間隔 Δt が大きくなってしまう。これによって、式(5)で得られる反発速度は大きくなってしまう。これらのことは、誤差率がどれもプラスの値になっていることから説明できる。今後、3軸の加速度センサや回転運動が計測可能なセンサを構築できれば、これらの要素は排除できると考えられる。

3.4 力学モデルとの比較

加速度センサの出力がブロックの衝突時の衝撃加速度をかなり精度よくあらわしていることから、その加速度波形と力学モデルより算出される加速度を比較する。

図-8の実線は、1次衝突時の衝撃加速度を詳細にみるためサンプリング周波数を200kHzにして計測した結果である。このときサンプリング周波数を増加させたため計測時間が短くなり、2次衝突は計測されていない。破線はシミュレーションで用いる力学モデルにおいて、加速度の最大値が実験値と一致するようなパラメータを選んだときの計算結果である。一見して、加速度の

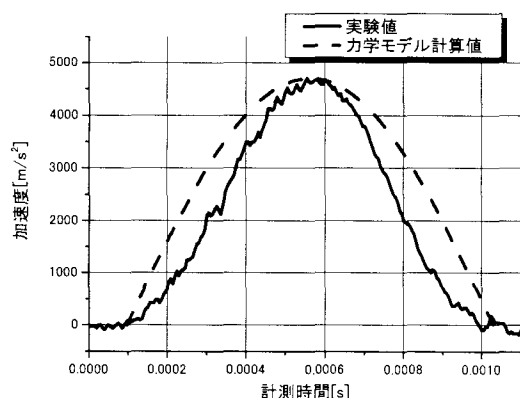


図-8 実験値と力学モデル計算値の比較

変化の傾向が異なっていることがわかる。力学モデルは鉛直方向の運動のみを考えた場合、バネとダッシュポットを並列に設置したKelvin-Voigtモデルとなり、単純な減衰振動の半波長分の波形となる。一方、実験結果は立ち上がりが緩やかで徐々に変化が大きくなるような形をとり、力学モデルとは大きく異なる波形になることがわかる。このことは、反発力の支配的な力である復元力、すなわち力学モデルにおけるバネ定数に大きな問題があると予想できる。また、反発速度を計算することによって得られる反発係数について比較をしてみても、力学モデルは0.9以上の弾性衝突に近い値を示すのに対して、実験値は0.3から0.4程度の値となる。エネルギーの散逸、つまり力学モデルで用いる減衰機構に問題があることがわかる。このようなことから、現在用いている力学モデルでは実験値を再現することができないということになる。

シミュレーションを行う上で重要となるのは、衝突後の速度情報を正確に得ることである。これまでのように、既往の実験結果とおおむね一致するような反発速度を得られるパラメータを選ぶことでも、それなりの結果の得られるシミュレーションを行うことは可能である。しかし、多数あるパラメータを一意に決めることが難しくなり、落石条件の違いによるパラメータの変化に対応することが難しくなる。衝突時に落石に働く反発力を再現する力学モデルを用いることが可能となれば、一意的にパラメータが決めることができる。そのパラメータが各種落石条件の違いによりどのように変化するかを知ることができれば、多様な現場に適したパラメータを選ぶことが容易におこなえると考えられる。

3.5 力学モデルの改善

実験で得られた衝撃加速度を再現することが可能な力学モデルについて検討を行う。3.4節で述べたように、これまで落石シミュレーションで用いていた力学モデルでは、実験で得られる衝撃加速度を再現できないことがわかった。改善方法として力学モデルの変更による改善と、力学モデルを変更せずにパラメータを変化させることで行う改善について述べる。

(1) 力学モデルの変更による改善

岩石の動的挙動を表すモデルとして、Kelvin-Voigtモデルを直列に複数個つなげることで表せることが提案されている⁵⁾。そこで、力学モデルとしてブロックを図-9のように複数の球の集合として表して数値シミュレーションを行った。球同士はKelvin-Voigtモデルで結合されており、引張にも抵抗力を持つようにあ

る。落下の条件は今回行った実験と同じようになるようにした。このブロックを自由落下させ地面との接触時に一番上の球の速度から加速度を算出した。



図-9 複数の球を用いた力学モデル

図-10 はその結果である。まだ実験結果と一致させるようなパラメータは選べていないが、変化の傾向として単純な減衰振動の半波長の波形ではなく、立ち上がりが緩やかに変化するという点で実験値と一致することが示されている。また、反発係数といった観点からも 0.4 程度の値となり、波形を崩すことなく実験結果と同じような波形を得られることがわかる。

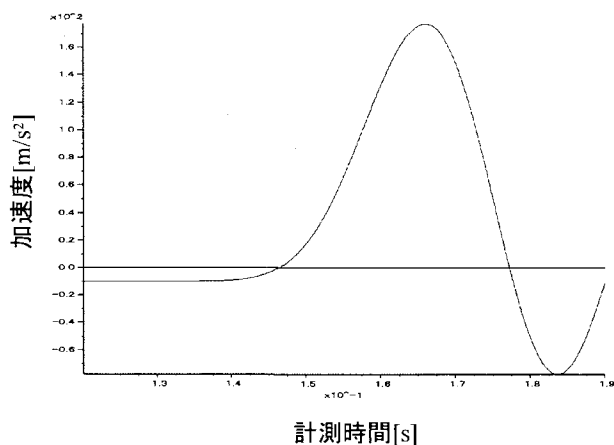


図-10 複数の球を用いた力学モデルの計算結果

ブロックを構成する球を 2 次元や 3 次元にして、より多くの粒子でブロックを構成することにより、より実験結果に近い加速度波形を得られるのではないかと考えられる。また、はね返り後の不安定な波形に関しても、球同士の結合力が適切に決められれば、実験値に近づくものと思われる。

(2) パラメータの変更による改善

より複雑な力学モデルをつくることにより再現することは可能であろうが、計算が複雑になることにより計算量の増大が予想される。そこで、現在用いている力学モデルをそのまま用いて、バネ定数や減衰粘性係数のパラメータを特徴付けることで実験結果を再現できないかについて考える。なおここで比較対照とする

実験値は図-8の実験値と同じである。

Hertz の理論を用いた球の衝突の解析では、圧縮力・反発力はその球の変位の $3/2$ 乗の関数となって変化することが知られている⁶⁾。このことを考慮して、バネ定数を次式のように変化させて計算を行う。

$$k = \alpha z^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

ここで、 α は任意の係数であり、 z は鉛直方向の変位である。このような可変パラメータを用いることで図-11 のような結果が得られる。 α は計算結果が実験値の最大値と一致するような値を選んだ。減衰係数は任意の定数を与えた。変化の傾向としては立ち上がりが緩やかな点で一致している。反発係数という点では、減

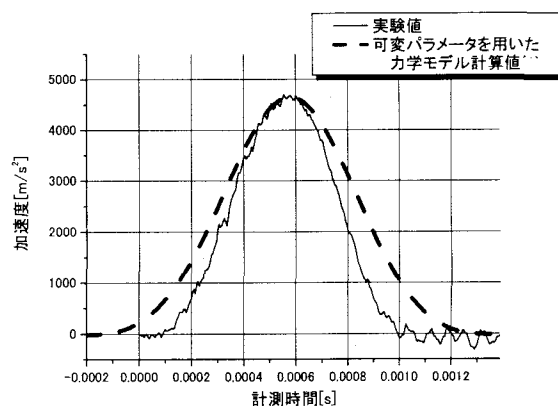


図-11 バネ定数を変位の関数とした場合

衰係数を大きくしていくことで実験値に合わせることが可能である。しかし、減衰係数を大きくしていくと、衝突直後の落下速度が減衰機構に大きな働きをするため、波形が大きく崩れる結果となってしまう。そこで、粘性減衰係数についてもバネ定数のように変位によって変化させる可変パラメータを用いることとした。

$$c = \beta z^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

パラメータに式(6)、(7)を共に用いることで、図-12 が得られた。 α, β は加速度の最大値と反発係数が実験結果と一致するように $\alpha = 3.5 \times 10^{12}$ 、 $\beta = 1.3 \times 10^9$ という値を与えた。加速度の波形としては完全な一致とはいえないが、実験結果と同じような形を保ちながらもエネルギーの散逸を表せている。

パラメータ中の α や β にはブロックや地面の物性値や幾何学形状の情報が入ることが予想され、今後はその検討が必要である。

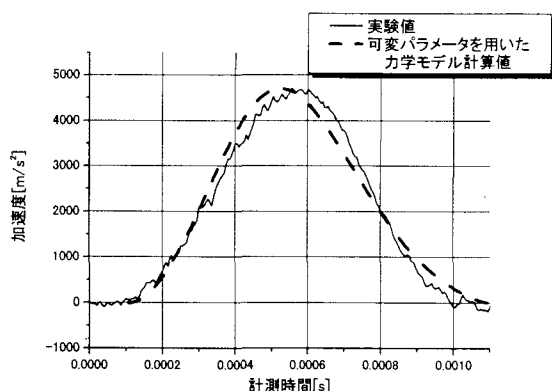


図-12 バネ定数と粘性減衰係数を共に変位の関数とした場合

4. 結言

本論文では、現在開発中の3次元落石シミュレーションについて特徴や問題点を述べた。問題点の解決方法として、落石に働く物理量を直接計測することにより得られる落石軌跡とシミュレーションより得られる落石軌跡を比較することが必要であることを述べた。最後に、センサを用いて落石軌跡を求める上で最も重要である落石と地面の衝撃加速度についての基礎実験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 加速度センサを用いることにより衝突時の落石に働く衝撃加速度をかなり忠実に計測できる。
- 2) これまで著者らが落石シミュレーションで用いてきた衝突時の力学モデルでは、力学的観点

から実際の衝突運動を表現することはできない。

- 3) 力学モデルを改善する方法とパラメータを変位の関数とする方法が衝撃加速度を再現する方法として有効であることを示した。

今後の課題として、式(6)、(7)の可変パラメータで用いた α や β という係数が実験条件の変化によってどのような変化するかを調べる必要がある。ブロックの物性値や幾何学形状などから、これらの適切な係数を導出することができれば、実験を行うことなくパラメータを決定することができるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会,「落石対策便覧」,(社)日本道路協会,2000
- 2) 能野一美・山上拓男,「落石運動解析に要する個別要素法パラメータの同定法」,土木学会,土木学会論文集 No. 701/III-58, pp409-420, 2002. 3
- 3) (社)日本道路協会,「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—」,(社)日本道路協会,2002
- 4) 細谷昭悟・中根昌士・松本直樹・氏平増之・樋口澄志,「落石の三次元数値シミュレーションに関する研究(続報)—凹凸のある採石場の斜面へ適用した場合—」,日本応用地質学会,応用地質 Vol. 45, No. 1, pp2-12, 2004
- 5) 山口梅太郎・西松裕一,「岩石力学入門」,東大出版会,1967
- 6) S. P. Timoshenko・J. N. Goodier (金多潔 監訳),「弾性論」,コロナ社,1973

(2005年4月15日受付)