

落石シミュレーションにおけるパラメータ同定を目的とした衝撃加速度の検討

Deliberation from Impact Acceleration Applied to Rockfall for Identification of Parameters on Rockfall Simulation

西山えるむ^{*}・川村洋平^{**}・山近哲志^{***}・齊藤知宏^{****}・氏平増之^{*****}

Erumu NISHIYAMA, Youhei KAWAMURA, Satoshi YAMACHIKA, Tomohiro SAITO and Masuyuki UJIHIRA

^{*}非会員 日鉄鉱業株式会社部課長代理 (〒100-8377 東京都千代田区丸の内二丁目3番2号)^{**}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)^{***}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)^{****}非会員 日鉄鉱業株式会社鳥形山鉱業所生産1課採石係長 (〒781-1915 高知県吾川郡仁淀川町大植1076番地)^{*****}非会員 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)

For pertinent countermeasure of rockfalls, rockfall simulation was carried out several times. Any of the rockfall simulation have not gotten similar results consistently between the simulation result and real rockfall, because parameters of simulation are not exactly decided. The reason for that, is the mechanics of real rockfall is not clearly found out. This study suggests a method which most probable parameters are determined by measuring acceleration applied to rockfall. Using this method, mechanics model of simulation is adjusted, and these parameters will be derived by comparing accelerations of real rockfall and simulation. In this research, basic experiments are done for deciding parameters from acceleration applied to rockfall. It is researched how to change the acceleration in different experiment conditions, dropping height, mass and material.

Key Words : rockfall, impact acceleration, simulation, parameter

1. 緒言

落石対策は、主要幹線道路が山岳部を通る日本においては安全の確保のために重要な課題の一つとなっている。また鉱山や採石場などの採掘現場においても、操業効率の向上のために切羽の最適化において保安上の問題の一つとして落石問題がある。露天掘り鉱山において残壁斜面では風雨にさらされて風化が進行したり、地震や採掘作業による応力変化により亀裂が発生したりと落石の発生する危険性が高まってくる¹⁾。

落石対策としては、落石発生そのものを抑える能動的な対策が主であるが、落石予防工の施工が困難な場合や、露天掘り鉱山のように次々に新たな斜面を作るような場所においては受動的な対策、すなわち落石の発生後にその被害を最小限に抑える対策を行うこともしばしばある。そのような場合、落石被害を予測・軽減するためには、その落石の運動を評価する必要がある。落石の質量や落下速度、跳躍量などを評価することは対策工が受け持つべき外力や防護すべき範囲などを決定する際に重要である。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

定された経験則を用いる評価と同時に数値シミュレーションを用いた評価も行われている。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。また、落石現象はまだ明らかにされていない点も多く、数値シミュレーションにおいて適切なパラメータの決定方法は確立されていない。²⁾³⁾

著者等は開発した落石シミュレーションを現場適用するに当たって、落石に作用する衝撃加速度に着目しパラメータの決定を行おうと考えている。本論文ではその方法を確立するに当たっての基礎実験として落石の衝突実験を行い、落石の条件の変化によりどのように加速度が変化するかを調べる。なお、表-1に示すような各種条件用いる。

表-1 実験条件

	落下ブロック	底質	落下高さ [cm]
落下高さ 変化	コンクリート	コンクリート	8, 12, 16
底質 変化	コンクリート	土・礫・緩衝材 石灰岩盤	15 10
質量 変化	石灰岩3種類 (17.2, 38.6, 71.4[kg])	石灰岩盤	20

2. 数値シミュレーションのシステム

本章では著者等が開発中の落石シミュレーションについて述べ、新たに構築しようとしているパラメータ決定方法について説明する。

2.1 計算手法

数値シミュレーションの手法としては、質点系解析および非質点系解析に大別され、実際の運動に近い解析を行える非質点系は個別要素法(DEM)および不連続変形法(DDA)と大きく二つに解析手法が分けられる³⁾。現在開発中の落石シミュレーションは非質点系解析のDEMに近い手法を用いている。図-1に示すようにバネ・ダッシュポット・スライダーの系を、剛体にみなした落石と斜面の間に3方向に設置することで、法線方向の系が衝突、接線方向の2つの系が回転、それぞれの力のやり取りを行うことで3次元での計算を可能にしている⁴⁾。

落石運動は跳躍運動と接触運動に大別でき、跳躍運動は接触時に作用した力と地形形状に支配される。したがって接触時の運動をより正確に再現することがシミュレーションを行う上で重要であるので、接触時の力学モデルにおけるバネ定数 k や減衰粘性係数 c はシミュレーションにおける重要なパラメータとなる。

$$m\ddot{u}_i + c_i\dot{u}_i + k_i u_i = mg_i \quad (1)$$

$$I\ddot{\theta}_i + c_i r^2 \dot{\theta}_i + k_i r^2 \theta_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 m :質量、 u_i :並進方向の変位量、 k :バネ定数、 c :減衰粘性係数、 θ_i :回転量、 I :慣性モーメント、 r :回転半径、 g_i :重力加速度、添え字の i は図-1中の添え字1~3に対応する各軸方向成分を表す。 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。

2.2 パラメータ決定方法

シミュレーションの結果を左右するパラメータの決定方法としては、対象斜面における落石実験および経験則より得られている跳躍量などを考慮し、試行錯誤を繰り返して決定しているのが現実である。よりシステムチックに行う手法として、能野らが落石痕などから

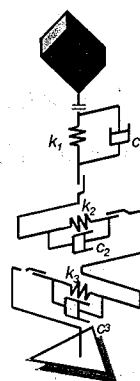


図-1 シミュレーションで用いる力学モデル

パラメータを同定する方法を示している⁶⁾。しかし、このような落石の軌跡や跳躍量、落石痕など跳躍時の運動の情報から、接触時に作用する力を求めるパラメータを決める手法では定性的な決定方法とは言い難い。また、跳躍時の運動が一致するように接触時の運動のパラメータを決定したということは、ある特定の結果を得られたに過ぎず、落石条件が異なれば再度検討をしないといけない。

そこで跳躍時の運動を観察して、そこから得られた情報を力学モデルより得られる計算結果と比較することで、より定性的なパラメータを決定することを試みる。具体的には落石が地面との衝突時に働く衝撃加速度を計測し、接触時に受ける力により発生する加速度を力学モデルでも再現できるようにパラメータを決定することを目指す。さらに、質量や落下高さ、材質などでどのように衝撃加速度が変化するか、法線方向のパラメータと接線方向のパラメータがどのような関係にあるかを知ることができれば、実規模の実験をすることなく、室内における実験、ひいては落石と斜面の物性値のみからパラメータの決定も行うことができるのではないかと考えている。

2.3 力学モデルの修正

これまでの研究において、コンクリートブロックが地面に衝突したときに作用する衝撃加速度を計測し、力学モデルとの比較を行っている⁵⁾。単純なバネ・ダッシュポット系では実験で得られる衝撃加速度を表せないことがわかっている。図-2は鉛直落下実験より得られた衝撃加速度と単純なバネ・ダッシュポット系の力学モデルより計算される衝撃加速度を重ねたものである。実線が実験結果であり、質量4kgのコンクリートブ

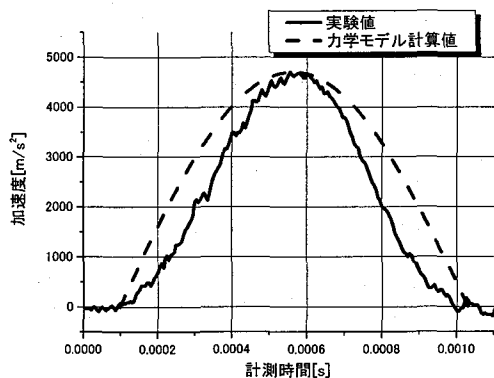


図 - 2 実験値と力学モデル計算値の比較

ロックを高さ10cmの高さから鉛直落下させたときに得られた加速度である。一方、破線が力学モデルより得られる計算結果であるが、バネ定数やダッシュポットの係数は実験より得られた加速度の最大値や衝突時間が一致するように与えている。単純なバネ・ダッシュポット系は減衰振動の半波長を示すのに対し、実験より得られる衝撃加速度波形は衝突直後と跳躍する直前が緩やかに変化するという特徴を持つ。これは、Hertzの理論より衝突時のブロックと地面の接触面積が変化することにより、作用力の変化の割合が変わることにあると考えられる。しかし、Hertzの理論は弾性理論であるので反発係数が1以下になることは説明できない。一方、Kuwabara・KonoらはHertzの理論に加えて物質の粘弾性特性を用いることで適切なエネルギーの損失を表す球体同士の衝突時の運動方程式を示している⁷⁾。バネ定数や減衰粘性定数がその変位の増加とともに増えていくように表され、反発係数に着目した実験結果と整合することを示している。

そのことを参考に式(1)に示した並進の運動方程式の減衰粘性係数 c およびバネ定数 k を式(3)のように修正した。

$$c_i = \alpha_i u_i^n, k_i = \beta_i u_i^n \quad (3)$$

ここで、 α, β, n は現在のところ物性値より決まる定数であり、Kuwabara・Konoらは α には粘性の物性値、 β には弾性の物性値、そして n には1/2という値を入れた運動方程式を用いている。このように図-1で示したような剛体で表現する力学モデルにおいても垂直方向のバネ・ダッシュポット系に限った場合、パラメータを変位に関数として衝撃加速度の数値解を得ると図-3に示すようには実験結果とよく一致した結果が得られる。ここで示している計算値は任意の定数を試行錯誤して

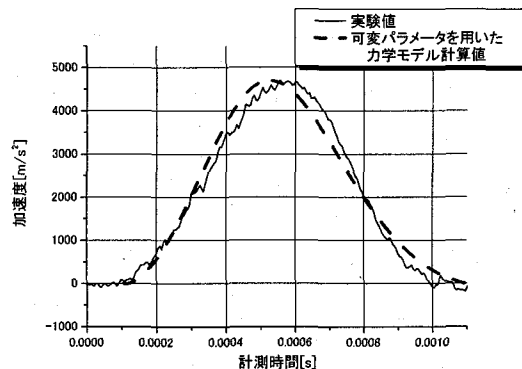


図 - 3 バネ定数と粘性減衰係数を共に変位に関数とした場合の力学モデルと実験結果の比較⁴⁾

決定、SI単位系では $\alpha=1.1 \times 10^{13}$ 、 $\beta=2.0 \times 10^9$ 、 $n=3/2$ という値を入れている。なお、乗数 n は加速度の変化の傾向、すなわち衝突直後と跳躍する直前が緩やかに変化する実験結果を再現するためのパラメータとなっている。3.2節で示す底質がコンクリートの場合の計算結果も同様のパラメータを用いている。

3. 鉛直落下実験

3.1 実験概要

2.3節で示したパラメータを変位に関数とした並進運動の方程式が、落石条件の違いによりどのように変化するのかを室内レベルの小規模実験で検証を行う。落下高さと衝突面の材質を変化させて落石、ここではコンクリートブロックを用いて、そのブロックに作用する衝撃加速度を計測した。実験の概要図として図-4を示す。実験は計測および解析を容易にするため鉛直方向のみに運動を限定し、所定の高さから自由落下させてブロックを地面に衝突させた。その際にブロック上面に設置した加速度センサによって衝撃加速度を計測した。コンクリートブロックは質量4kg、直径10cm、高さ20cmの円柱形であり、地面衝突時に一点で衝突し

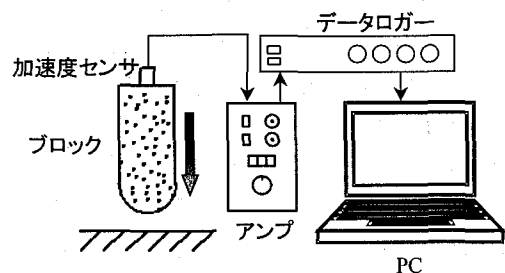


図 - 4 実験概要図

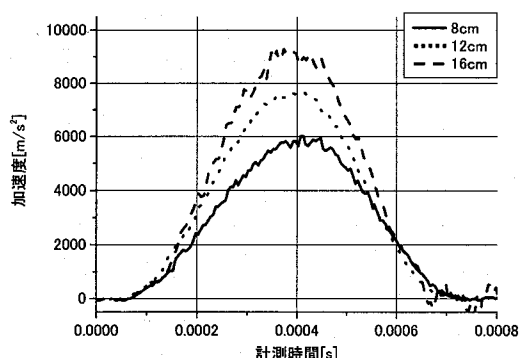


図 - 5 落下高さを変化させた場合の
加速度波形の変化

再び鉛直方向へ跳ね返るように底面を球形に加工している。計測器は、TEAC社製606STという20kHzまでフラットな周波数特性を持つ圧電型の1軸感度の加速度センサを用いている。

なお、ブロックに作用する衝撃加速度が実際にブロックに作用する力と同一であるということはこれまでの研究で、実際の反発を観測することより得られる反発係数と衝撃加速度波形を積分して得られる反発係数を比較することで示している⁵⁾。

3.2 高さ変化による衝撃加速度の変化

この節では落石における初期条件の一つである落下高さ、すなわち衝突時の初期速度の違いにより加速度波形がどのように変化するか調べる。図 - 5は落下高さが8cm(実線)、12cm(点線)、16cm(破線)のときの結果を示している。加速度波形はどれも衝突直後と跳躍直前の加速度変化が緩やかであるという点で一致している。

コンクリートブロックに加速度が働いている時間、すなわちブロックが地面と衝突している時間であると考えられるが、どの結果もほぼ同一の衝突時間となっている。線形の減衰振動系であれば初期条件が波長の大きさに影響しないということであるが、パラメータを修正したモデルにおいてもそのことは変わらないということとなる。すなわち、 α や β 、 n と落石条件との関わりを考えた場合、衝突時の速度は関係しないということが推定される。

図 - 6, 7, 8に実験結果と数値解の比較をした図を示す。修正した力学モデルに用いるパラメータは落下高さ12cmの時の実験結果と一致するように試行錯誤を繰り返して決定している(図 - 6)。波形が完全に一致する

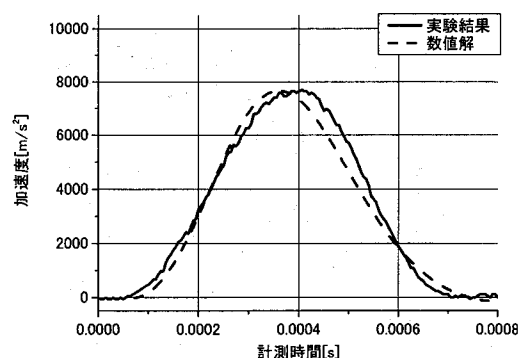


図 - 6 落下高さ 12cm のときの実験結果と数値解の比較

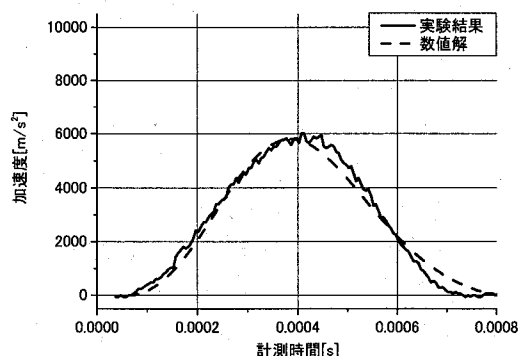


図 - 7 落下高さ 8cm のときの実験結果と数値解の比較

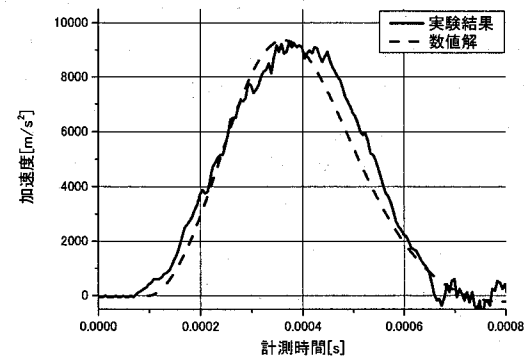


図 - 8 落下高さ 16cm のときの実験結果と数値解の比較

には至っていないが、反発係数と最大の加速度が一致するようにパラメータを決定している。そこで得られたパラメータをそのままに初期条件としての衝突速度を落下高さ8cm、16cmに対応させて計算したものが図 - 7, 8である。修正した力学モデルより得られた数値解は、実験より得られる加速度波形によく追従していることがわかる。

パラメータとその他の落石条件との関係には言及できないが、修正した力学モデルが少なくとも現在の系における実験結果と同様の結果を示すことから、パラメータを変位の関数とする手法は正しいと考えられる。理論的に求められた1/2という乗数については、ブロックが球体でないなどブロック形状が異なるためではないかと考えられる。

3.3 底質の違いによる衝撃加速度の変化

衝突地面の材質を変化させることでブロックに働く衝撃力がどのように変化するかを調べた。3つのケースとして土、礫、緩衝材を用いて行った。土、礫は適当な容器に緩詰めして装填したものを用いて衝突面とした。緩衝材として固めのスポンジを用いてコンクリート地面の上に厚さ約2cmのものを敷いて実験を行った。落下高さは一律15cmに固定して行った。

・Case1(底質：土)

図-9に乾燥した土にブロックを落下させたときの結果を示す。これまでに示してきたコンクリートブロックの加速度波形とは異なり高周波の波が現われている。周波数解析をしてフーリエスペクトルを調べたと

ころ、10～15kHz付近の成分が主であることがわかった(図-10)。高さ20cmのブロック内を往復する弾性波の伝播速度をおおよそ5000m/sと考えると求められる周波数帯と一致する。したがって、高周波の成分はコンクリートブロックを往復する弾性波の影響と考えられ、高周波成分はブロックの巨視的な運動へ与える加速度とは無関係なノイズと判断できる。このことは、高周波成分を加えたまま積分した値と1kHzのローパスフィルタを用いて高周波を取り除いたものを積分した値がほぼ一致することからも、高周波成分が巨視的にブロックに作用する力としては無関係であることが示せる。したがって、1kHzのローパスフィルタを用いて高周波成分を除去した図中の破線がブロックの並進運動に寄与する加速度であると言える。底質がコンクリートの場合にこのような高周波が現われていないのは、衝撃加速度に対して弾性波による加速度は相対的に低振幅であり、衝突時間が短いために弾性波の波数が少なくなることが考えられる。

圧縮行程では底質がコンクリートの場合とは異なる加速度変化を示している。これは、緩詰め土粒子が衝突時に動くことにより、ブロックと底質の接触面積が大きくなり反力が大きくなると考えられる。一方、

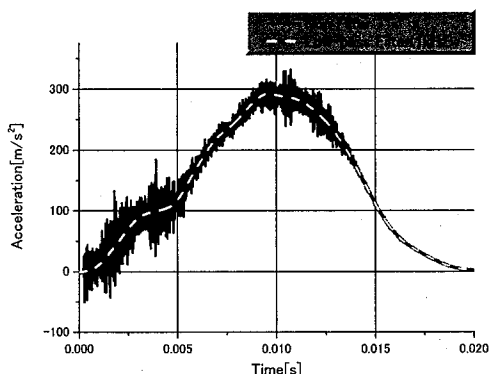


図-9 衝撃加速度 (底質：土)

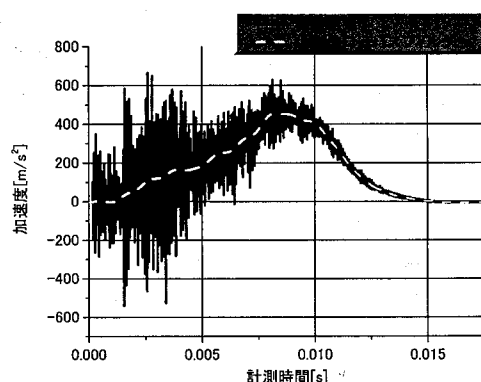


図-11 衝撃加速度 (地面：礫)

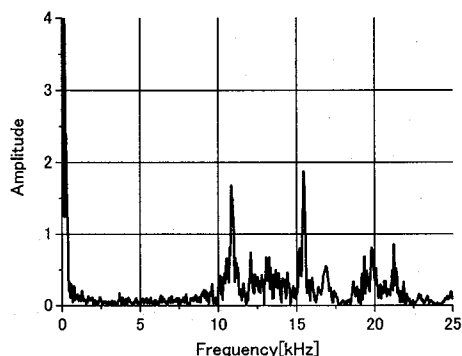


図-10 加速度波形の周波数成分 (底質：土)

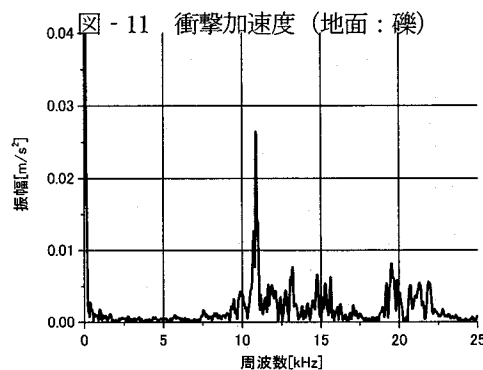


図-12 衝撃加速度の周波数成分 (地面：礫)

反発行程では、底質の土粒子は変形しないことが予想されるので同質の材料であるコンクリートと同様に立下りは緩やかな変化をしている。

・Case2(低質：礫)

図-11は、底質が礫の地面に衝突させたときの加速度波形である。土の場合と同様に高周波が現われ、図-12に示す周波数解析の結果は10~15kHz付近の成分であることがわかる。これを除去した波形(図-11中の破線)は土の場合と同様な波形となっている。ただし、粒子の一つ一つの質量が土の場合より大きいため、弾性波と予想される高周波成分の振幅は土の場合より大きくなっている。また、巨視的な加速度であるローパスフィルタをかけた図中の破線も土の場合よりも大きな加速度となっている。ただし、衝突時間は土に対して礫の場合の方が短いので、全体としてブロックに働く反発力が変わらないといえる。

土および礫ともにいえることであるが、底質が離散体で大きく変形してしまうような場合、圧縮行程に関しては現在用いている力学モデルでは対応できないことがわかる。衝突面も離散体でモデル化すれば、再現可能かもしれない。

・Case3(底質：緩衝材)

弾性体ではない物質に衝突させた場合にどのような加速度波形を示すかに興味があるため、緩衝材に衝突させたときの場合も計測した。図-13にその結果を示す。土や礫、コンクリートとは明らかに違う波形を示している。衝突直後と跳躍直前の加速度変化は緩やかで徐々に傾きが急になる点はコンクリートの場合と一致しているが、局地付近で急激な変化をしている点で他の底質の場合とは異なる。このような波形になった場合、現在用いている修正された力学モデルでも困難

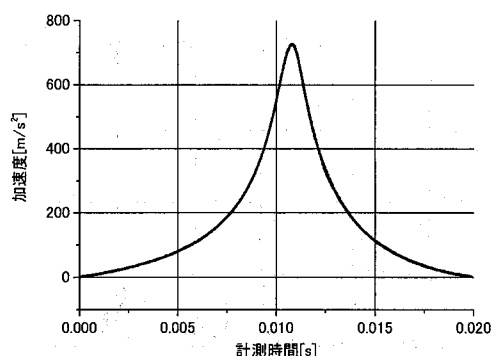


図-13 衝撃加速度(地面：緩衝材)

であると考えられる。パネ・ダッシュポットの構成自体を変更する必要があることが予想される。

3.4 鉛直落下試験のまとめ

室内において可能な実験として、落下高さの変化させた場合の落下ブロックに作用する衝撃加速度の変化と、底質が異なる場合の落下ブロックに作用する衝撃加速度の変化を調べた。

落下高さを変化させた実験においては、線形要素を用いた場合の減衰振動系と同様に初期速度の違いが波長の長さに関係ないことがわかり、その結果に一致するようなパラメータを与えた修正された力学モデルの計算値もその結果に追従して変化することから、任意に決定したパラメータにおいて、初期速度は関係してこないことがわかった。

底質の違いによる衝撃加速度の変化を検証した実験においては、底質が連続体か、また非連続体かで圧縮行程の加速度変化が異なることがわかり、このことは衝突時の圧縮行程時に粒子が移動するためと考えられる。また、スポンジのような非線形弾性体の場合はコンクリートや土などとは異なる構成則が必要であることがわかった。したがって、現在用いている力学モデルを用いて対象とできるのは、岩盤斜面などの硬い地面を持つ場合に限定されるといえる。ただし、土や礫の斜面であった場合も地面自体をモデル化することで再現は可能かもしれない。

4. 実規模実験

4.1 実験概要

ここでは、実規模の斜面においてシミュレーションを適応するに当たり、落石質量の変化における衝撃加速度波形の変化について述べる。今後シミュレーション適用にあたり落石質量の変化により加速度波形がどのように変化していくかを知ることが可能となれば、鉛直落下試験を行う際のブロックの質量を小さくすることが可能となり、より簡便な試験により鉛直方向のパラメータ決定が行える。今後行う予定の実規模落石とシミュレーションの整合をとる実験を行うことを考慮して十分な規模の残壁をもつ露天掘り鉱山において実験を行った。なお実験サイトは、国内最大の露天掘り石灰石鉱山である高知県仁淀川町の鳥形山鉱山(日鉄鉱業株式会社、図-14)である。



図 - 14 鳥形山概景

実験は、残壁斜面同質の石灰岩露出部を選び、3章で使用したコンクリートブロックを用いて石灰岩に落下させた場合の加速度を計測し、底質がコンクリートと石灰岩で同様の傾向を示すことを検証する。それから、実験場付近にある3種類の質量の異なる石灰岩を選び、同様に鉛直落下実験を行うことで、質量の違いによる加速度波形の変化を調べる。なお、衝突面である石灰岩露出部は完全に平坦ではなく、また実験による衝突で崩れてしまう。そのために露出部分に細かな石灰岩粒子の薄い層ができて、3.3節で示したような高周波の成分が加速度波形に乗ってしまう。高周波成分を取り除くために防ぐために予め5kHzローパスのアナログフィルターを使用している。

4.2 コンクリートと石灰岩盤の違い

図 - 15に3章で行ったコンクリート地面の場合と鳥形山鉱山における石灰岩岩盤で底質が異なる場合の加速度波形の違いを示す。同じ10cmの落下高さでも最大値や衝突時間が異なる波形となっているのはヤング率や減衰係数が異なるためと考えられる。石灰岩岩盤は固体でかつ連続体であるという点でコンクリートと同様であるので、加速度の変化の傾向としては同様の傾向を示している。したがって、適用する力学モデルとしては、底質がコンクリートの場合と同様の力学モデルを使用することが可能と考えられる。

一方、ヤング率などの材料定数を変化させることで最大加速度や衝突時間の加速度波形の特徴が大きく変化しているということから、底質の材料定数を変化させることによる加速度の変化を調べていく必要がある。

4.3 質量の違いによる加速度の変化

質量の違いによる落下高さの変化を知るために3種

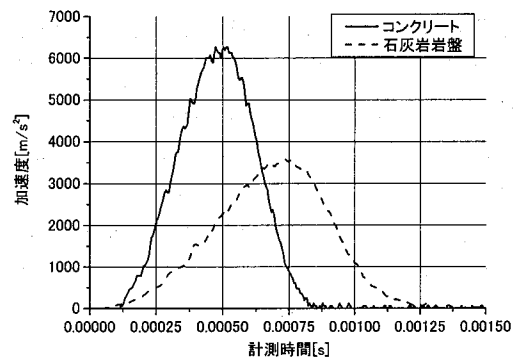


図 - 15 コンクリートと石灰岩岩盤の底質の違いによる加速度波形の変化

類の異なる質量(17.2kg, 38.6kg, 71.4kg)の石灰岩を同質の石灰岩岩盤に衝突させたときの加速度を比較する。図 - 16にそれぞれの実験より得られた加速度波形を示す。非常に複雑な波形になっているが、これは実験に用いていた岩石(図-17)が、鉱山の採石作業によって発生したもので、重心位置と地面接触点が鉛直線上になく、また底面に複数の角があるなどの理由により落下後の衝突時に複数回接触を起こしてしまうた

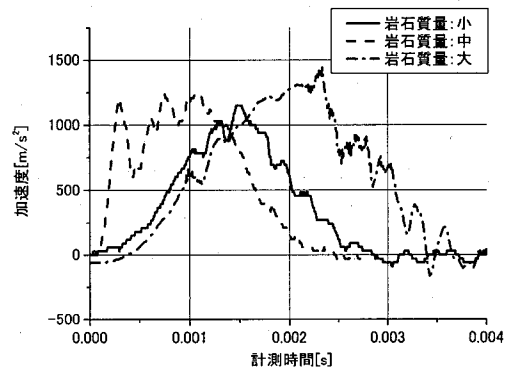


図-16 質量の違いによる加速度波形の変化



図-17 落下実験に使用した石灰岩の一例 (質量 71.4kg)

めだと考えられる。実験結果をみるかぎり質量変化による加速度波形の特徴変化は現われていない。ただし、図-15の破線が示すブロックと底質(コンクリート-石灰岩岩盤)の場合より、石灰岩-石灰岩岩盤のときの方が落下高さが高くなっているにもかかわらず、最大加速度は低下し、衝突時間が増加する傾向となっている。すなわち、コンクリートに対する石灰岩の傾向が示されていることがわかる。

5. 結言

本論文では、落石シミュレーションのパラメータ決定方法として岩石に作用する衝撃加速度を計測することで、シミュレーションより得られる加速度と比較することを提案した。その手法を用いて現在用いているシミュレーションと衝撃加速度計測を行った結果、現在用いているシミュレーションの力学モデルは修正の余地があり、バネ定数や減衰粘性係数は変位の関数とする手法で適切に実験結果を再現できることを示した。

そのようにパラメータを修正した力学モデルは、落下高さを変化させた場合の実験結果とよく一致した。一方、底質の違いにはコンクリートや石灰岩岩盤では同様の加速度波形を示すが、本質の材質が異なる緩衝材や、岩石と同質であっても不連続体である礫や土では加速度波形が異なり、修正された力学モデルの適用は難しいことを示した。すなわち、現在用いている力学モデルから実際の衝撃加速度を再現しようとした場合、条件として連続体と見なせる程度の岩盤等級を持ち、大きな非線形性を持たない岩盤に対して適用可能であることが示唆されている。

今後の課題として、ヤング率などの材料特性と加速

度波形の関係を岩盤等級などの基準を用いて調べる必要がある。また今回はデータの取れなかった岩石質量の変化によりどのように加速度波形の特徴の変化などを追及していかなければならない。

参考文献

- 1) 杣津雄治・西山えるむ,「石灰石露天掘り鉱山残壁における落石について」,石灰石鉱業協会,石灰石 No. 338, pp. 51-56, (2005)
- 2) (社)日本道路協会,「落石対策便覧」,(社)日本道路協会, 2000
- 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, pp. 2-12, 2004
- 5) 山近哲志・川村洋平・氏平増之・伊藤健,「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」,応用力学論文集, Vol. 8, pp. 531-538, 2005
- 6) 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, pp. 409-420, 2002. 3
- 7) KUWABARA, Goro・KONO, Kimitoshi,「Restitution Coefficient in a Collision between Two Spheres」, Japanese Journal of Applied Physics Vol.26, No.8, August, 1987, pp1230-1234

(2006年4月13日受付)