

落石シミュレーションの現状と今後の課題

CURRENT STATE AND ISSUES OF ROCKFALL SIMULATION TECHNIQUES

松尾 修

Osamu MATSUO

工修 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官

キーワード：落石、数値シミュレーション、現場実験
(rockfall, numerical simulation, field test)

1. はじめに

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道路や鉄路へ到達するかを評価することが必要である。これら落石運動諸量の評価は、実務においては既往の現場落石実験に基づく経験則によりなされてきた^{1), 2)}。他方、落石対策を必要とするような現場条件はきわめて多様であり、限られた数の実験に基づくこれら経験則を適用することが必ずしも適当ではないと考えられることが往々にしてある。このような場合には経験則以外の予測評価手法によらざるを得ない。そこで近年、落石シミュレーション手法が適用されつつある。これまでに開発ないし適用されつつある手法は、限られた数の実験事例等をもとに設定された経験則に比べれば力学的な合理性に優れている、あるいは多様な現地条件などに適応し得る等の利点があると考えられるが、現地条件に対応したモデル化、計算パラメータの設定法、計算結果の妥当性の検証、計算結果の評価法など、多くの課題が残されているのも事実である。

そこで、(社)日本道路協会道路土工委員会落石防護施設検討小委員会では、落石シミュレーション手法が現場で適切に利用されることを意図して、「落石シミュレーション手法検討WG」(以下WGと略称)を設置し、既存の落石シミュレーション手法の検証のための調査研究を行ってきた。

本稿は、上記WGにおける検討内容および主要な

結果を紹介するものである。WGの成果は2002年4月に同協会より出版されている³⁾ので、詳細についてはそちらを参照していただければ幸いである。

2. WGでの検討内容

WGでの検討の主目的は、これまでに国内外で開発された落石シミュレーション手法の検証を行うことである。このため、以下の事項について検討した。

(1) 落石運動特性の把握

これまでに国内で実施された現場落石実験16事例および国外の4事例、室内模型実験、さらには落石現場調査事例を収集し、系統的に整理・分析して、資料集とするとともに、落石運動特性に関する新たな知見を得た。

(2) 落石シミュレーション手法の整理・分析

これまでに開発・提案されてきた多様な落石シミュレーション手法を、質点系・非質点系、運動現象をモデル化する方法の違いにより整理分類した。

(3) それぞれの手法の適用性の評価

入手・利用可能であった10種類の落石シミュレーション手法(質点系手法6種、非質点系手法4種)を対象に、単純斜面モデルを用いたシミュレーション計算による手法の基本特性把握、計算パラメータの感度分析を行うとともに、現場落石実験2事例を対象としたシミュレーション計算による適用性の検討を行った。

(4) 落石シミュレーション手法の現場への適用方法の提案

落石シミュレーション手法を実務において適切に用いるために必要な事項を整理・提案した。

3. 落石の運動特性

WGでは、これまでに国内で実施された現場落石実験 16 事例および国外の 4 事例、室内模型実験、さらには落石現場調査事例を収集し、系統的に整理・分析した。落石の運動特性についてはこれまでも多くの報告がなされているが、包括的に整理されたのは今回が初めてであろう。実験により観察結果が異なる点もあるが、やや主観的に重要と思われる知見をいくつか抽出して列挙すると以下のとおりである。

- (1) 落石の落下速度は、落下高さがある値以上になると一定値に収束する傾向にある。
- (2) 落石の落下速度を推定する実務的な方法として、次式で定義される等価摩擦係数を斜面の条件にに応じて与えて求める方法^{1), 2)}があるが、実際の落石事例によれば等価摩擦係数はより大きい。すなわち、現在実務で用いられている落石速度推定法は過大となる場合があることを示している。

$$V = \sqrt{2(1 - \mu / \tan \theta) g H}$$

ここに、 V ：落石速度、 μ ：等価摩擦係数、 θ ：斜面の平均傾斜角、 H ：落石の落下高さである。ちなみに、 $\sqrt{2gH}$ は自由落下速度である。また、等価摩擦係数とは、一様な摩擦係数を有する斜面を落石がすべり落下する状況に仮想的に置き換えた場合の摩擦係数であり、既往の現場実験より経験的に与えられている。

図-1 に斜面勾配と等価摩擦係数の関係を示す。この図で、落石災害斜面から推定されたデータはい

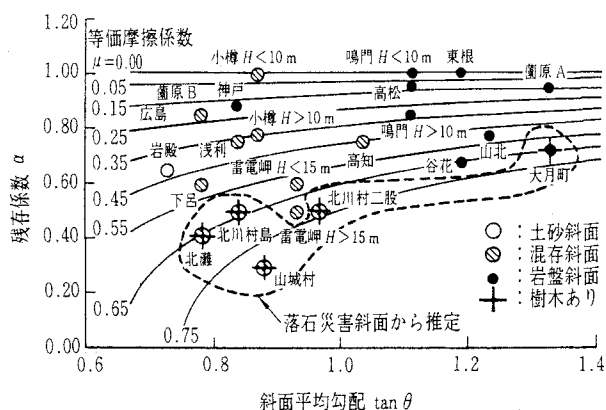


図-1 等価摩擦係数と斜面勾配の関係

ずれも、裸地で行われた現場落石実験のデータに比べて等価摩擦係数が大きい。ここに示す落石災害斜面はいずれも樹木で覆われており、このことから、樹木の存在は落石運動に対して抵抗として作用していることが推定できる。また、同図から明瞭には読み取れないが、落下高さが大きくなると等価摩擦係数が大きくなる傾向にあることがわかっている。このことは上記(1)の裏返しでもある。

(3) 落石が斜面に衝突したときの、衝突前後における斜面法線方向の速度の比は、入射時の法線方向速度が大きいほど小さくなる傾向にある(図-2 参照)。すなわち、反発係数は一定でない。このことは、入射速度が大きくなると斜面への衝突によるエネルギー消費の割合が大きくなることを意味しており、また、その帰結として上記(1)の傾向が生じるのであろう。なお、接線方向速度の変化には明瞭な傾向が見られていない。

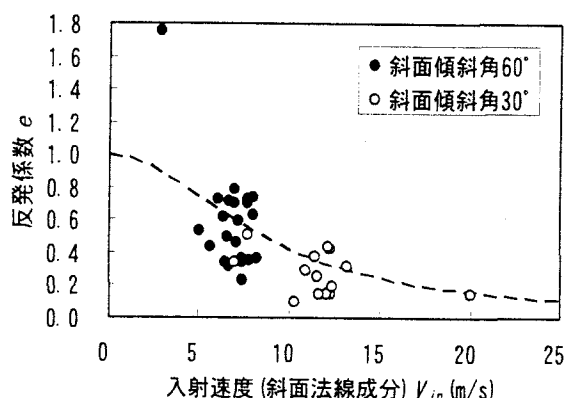


図-2 高松の実験から求められた反発係数と法線方向入射速度との関係

4. 落石シミュレーション手法の整理・分析

落石運動を予測する方法には、既往の落石実験等の結果にもとづき経験則として定式化された方法と、数値シミュレーションによる方法とがある。ここでは、後者についてWGで整理分析された結果の概要を述べる。

(1) 質点系シミュレーション手法と非質点系シミュレーション手法

質点系シミュレーション手法：基本的には落石を大きさのない質量を有する質点(回転慣性を与える手法も多い)、または、経常の簡単な円柱や球形の剛体と仮定し、斜面を線状あるいは面状の剛壁と仮定して、質点と斜面との間の衝突、すべり、ないしはころがり等の運動を初等力学的に定式化して数値

的に解く手法である。30 年余りの歴史がある。

非質点系シミュレーション手法：落石を形状・大きさを持ったブロックとして取り扱い、斜面を複数のブロックの集合体として取り扱う方法。個別要素法と不連続変形法がある。両者の違いは、要素が剛体であるか弾性体であるか、および落石と斜面の間のインターフェイスのモデル化にある。

(2) 質点系シミュレーション手法の分類と特徴

これまでに極めて多様な方法が提案・開発されている。図-3 は落石運動の取り扱いの概念図を示したものである。

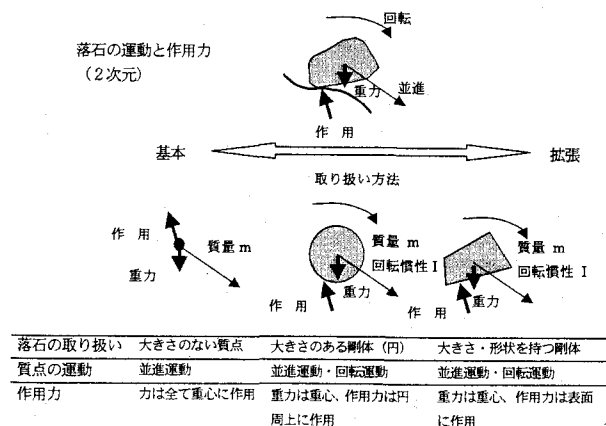


図-3 落石運動の取り扱いの概念図

左から、質点の力学の基本である落石の回転を無視したモデル、回転を考慮したモデル、さらには落石および斜面形状の不整形による斜面からの作用力の方向の不規則性を考慮したモデル、というようなものがある。質点系に属する手法の多様性は、考慮する運動形態、衝突運動のモデル化、回転運動の考慮、落石運動の不規則性のモデル化等によっている。なお、落石及び斜面の形状の不整形や斜面の地覆状況のばらつきによる衝突時の不規則性の影響を取り込むことは質点系の計算ではなかでも大切であるが、このことを表現するために、衝突運動を支配する1ないし複数個のパラメータをランダムに変動させるアルゴリズムを組み込んでいる事例が多い。

一般的に、多様な運動形態や落石の回転を取り込み、衝突現象を細かくモデル化するほど、少なくとも定性的には実際の落石運動に近づくと言える。他方、その場合には設定するパラメータの数も多くなる。実際の現場では、斜面調査の結果にもとづき工学的判断を加えた上でこれらのパラメータが設定されるのであるから、細かい精度を要するパラメータ

を用いるのは現実的ではない。したがって、精緻にモデル化された手法の方が精度がよいとは一概に言えるわけではなく、現場状況に即したパラメータを適切に設定できるかどうかという点と併せて評価されるべきものである。

(3) 非質点系シミュレーション手法の分類と特徴

落石運動予測に用いられる個別要素法 (DEM) と不連続変形法 (DDA) は、もともと不連続面を有する岩盤などの挙動解析のために開発されたものである。したがって、岩盤崩壊等のように複数の岩塊が落下するような場合にも適用できる。手法の詳細については別途参照していただきたい⁴⁾。落石問題に適用する際の技術的課題を挙げると、質点系の場合と同じく落石と斜面が接触する部分に設けられたインターフェイスのパラメータの設定法と、不確定な現象である落石運動を如何に再現するかということがある。後者については、どのようなパラメータを変動させて試行計算を行うかという課題と、いかに少ない試行回数で済ませるかという課題が含まれる。試行回数を最小化するという課題は、計算時間の問題によっており、計算機能力の向上によりいずれ解消されるであろう。

非質点系手法による落石運動の予測計算結果は、落石形状の不規則性をそのまま取り込んでいるため、定性的には質点系手法に比べて優れている。今後の技術的課題としては、質点系手法と全く同様に、現場状況に即したパラメータの設定が第一であると考えられる。

5. 落石シミュレーション手法の適用性に関する数値シミュレーション

(1) 数値シミュレーションの概要

斜面特性の異なる現場で実施された落石実験 2 事例に対して、以下に示す 10 種類の落石シミュレーション手法を用いて再現計算を実施した。なお、非質点系の手法は 2 種類であるが、それぞれ細部のアルゴリズムに相違がある 2 つの計算プログラムを用いたので合計 10 種類としている。

(質点系の手法)

吉田らの手法 (吉田ら、1983)

古賀らの手法 (古賀ら、1989)

右城らの手法 (右城ら、2000)

梶谷・小村らの手法 (小村ら、2000)

コロラド州の手法(通称:CRSP)(Barret, 1989)
トロント大学の手法(通称:RocFall)

(Stevens, 1998)

(非質点系の手法)

個別要素法

(Cundall, 1971; ソフトブレーン, 1998)

不連続変形法

(Shi and Goodman, 1984; Ohnishi et al. 1996)

計算は以下の作業方針の下で行われた。

1) 現場落石実験の結果を詳細に分析して得られた諸特性(主に落石の斜面への衝突時の特性)データを用いて、それぞれの計算手法が有する計算パラメータ値を設定する。それだけで設定できないその他のパラメータについては、それぞれの手法が経験的に適当と考える値を用いる。

2) 計算対象とした落石実験は多数回の落石を行っており、これに対応して、計算も複数回の試行計算を行うものとし、実験結果と計算結果の比較は統計的に行う。複数回の試行計算を行うにあたって、質点系手法では反発係数等をランダムに与えるルーチンが使用され(ただし与え方は手法毎に異なる)、非質点系手法では代表的な寸法の正方形(0.5m x 0.5m)の落石モデルの初期回転角を10種類に変化させて、それぞれ実行された。

(2) 計算結果

ここでは、1979年に香川県高松市の岩盤斜面で行われた落石実験に対するシミュレーション計算の結果を紹介する。図-4、図-5は、ある条件に属する落石実験に対する計算結果であり、図-4が質点系手法の結果、図-5が非質点系手法の結果である。図-4で(g)図が実験結果であり、図中には多数回の落石実験での落石軌跡の包絡線が太線で描かれている。比較の便のため、計算結果を示すその他の図にも、その包絡線が太線で描き込まれている。図-5(図-4と比べて斜面の向きが左右逆であるが同じ斜面である)においても同様である。

一見すると、実験結果に概ね近い結果を与えているものとやや離れているように見えるものとがあるが、この結果をどのように評価するかは実のところ相当に難しく、WGでも十分に合意に至らなかったところである。ここには紙数の制約上提示できないが、別の条件における計算結果ではやや傾向が異なる印象を与えるものもあった。また、計算条件の細部まで共通的に定めることができなかったため、計

算手法によりフィッティング計算の程度に違いがあった可能性もある。以上弁明した上で、おおよそわかったことを記せば以下のようなものである。

1) 質点系手法については、衝突前後における落石の回転運動の変化、反発係数のばらつきおよび速度依存性を考慮するなど、衝突現象をある程度厳密にモデル化の方が少なくとも定性的には再現性はよくなる。他方、衝突現象をやや簡略化してモデル化した手法でも、豊富な経験にもとづき設定された経験的パラメータ値を有するもの(たとえばCRSP)ではほぼ再現性はよかった。

2) 非質点系手法においては、定性的には概ね再現性がよかった。ただし、図-5を眺めると、落石軌跡が実験結果ほどにはばらついていないように見える。これは、試行計算の計算回数が10回と少なかったこともあるが、衝突特性にランダム性を考慮できるようにはなっていないこと、落石の形状が一定であることも影響していると考えられる。また、同図(d)の手法は、(c)の手法に対して衝突時の線運動エネルギー消散比を制御できるよう部分改良されたものであるが、両者を比べると(d)の方が定性的に実験結果により近いように見える。これは本来の不連続変形法(Shi and Goodman, 1984)は衝突時のエネルギー減衰を過小評価する傾向があることを示唆するものと思われる。

6. 落石シミュレーションの現場への適用にあたっての留意事項

WGでは、落石シミュレーション手法を現場で利用しようとする際に、これを適切に用いるための留意事項等を整理した。これは、いわゆる経験的手法にも適用限界があること、および落石シミュレーション計算手法が実務的に十分な信頼性を持つと言える段階に至っている訳ではないという認識の下に行ったものである。言い換えれば、合理的な利用普及を促進するとともに、不適切な利用がなされないようにとの意図である。

ここでは図-6を紹介するに留める。これは、ある斜面で落石運動予測を行う際に、「経験的手法」、「数値シミュレーション手法」および「現場落石実験」を如何に使い分けるか、ということを示したフローである。要約すると、斜面条件が経験的手法の適用範囲外であり、かつ現場落石実験も適用しがたい(これができる現場は稀と思われる)場合に、数

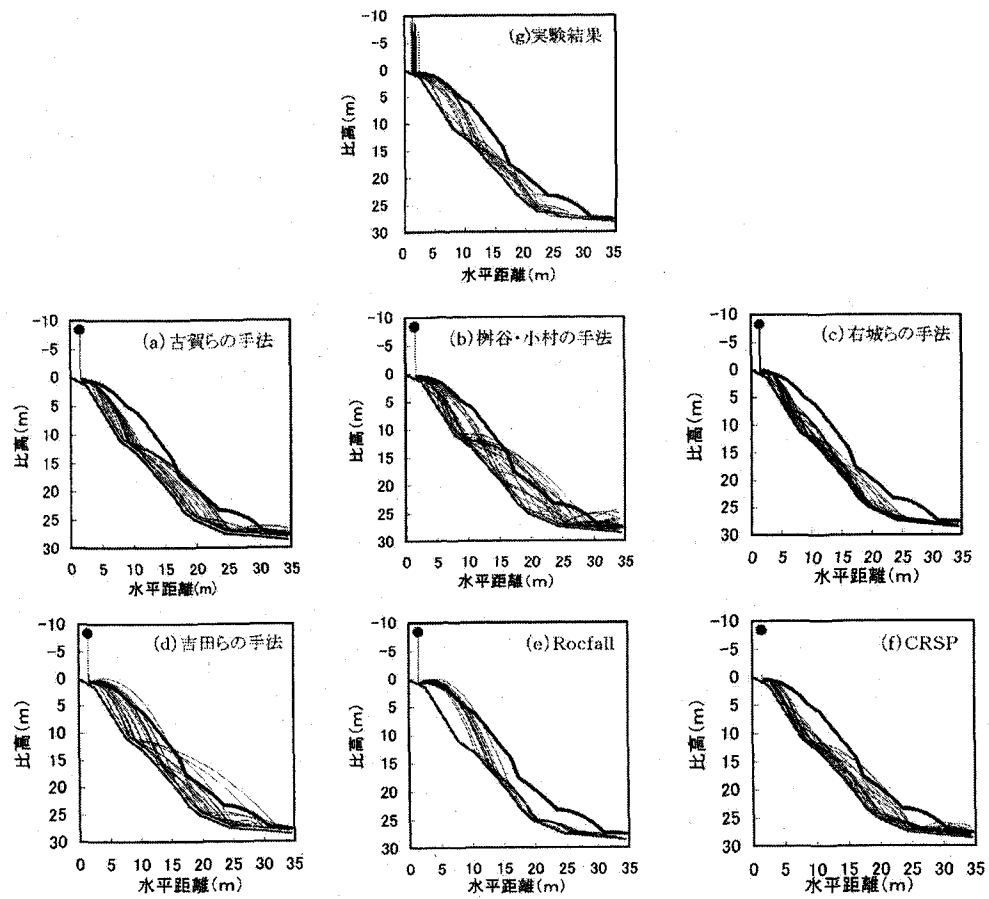


図-4 高松実験に対するシミュレーション計算結果（質点系）

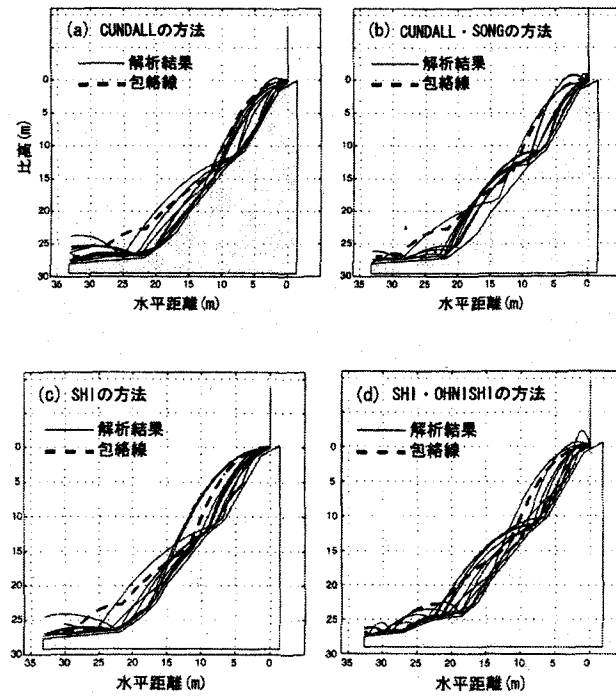


図-5 高松実験に対するシミュレーション計算結果（非質点系）

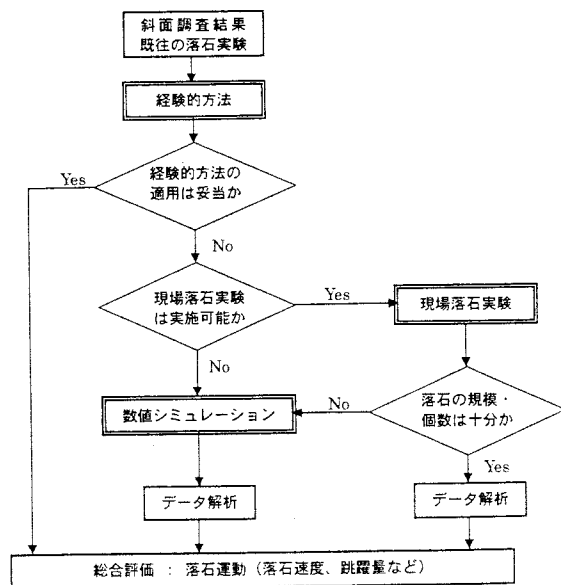


図-6 落石運動予測手法の選択フロー

値シミュレーションを利用する、ということである。その場合においても、数値シミュレーションの結果のみで判断するのではなく、一応経験的手法による結果も念のため参照し、さらに大切なことは、当該斜面およびその周辺斜面をも含めて落石状況をよく観察するとともに、周辺地域における過去の落石事例等を含めて総合的に判断すべきである。これが現時点におけるコンセンサスと言ってよいと思われる。

7. 落石シミュレーション手法の技術的課題

最後に、落石シミュレーション手法の信頼性向上のための技術的課題について述べることにしたい。

(1) 斜面状況に対応した計算パラメータの設定法

いずれの手法においても、現地の斜面条件・落石条件に対応した適切なパラメータ値の設定法が示されていなければ実用に供することができない。計算手法の実用性・信頼性を向上させるための要件である。このためには、できるだけ多様な条件の落石実験事例や落石事例に対する検証を積み重ねていくことに尽きるとと思われる。

(2) 現場斜面、落石のモデル化

現場は斜面形状、表面地質、地覆状況、落石形状など、きわめて複雑である。数値シミュレーションではこれを相当程度単純化してモデル化される。単純化の程度によって定性的にも定量的にも結果がどの程度変動するかを経験的に把握しておくことが必要である。また、斜面および落石の運動は3次元

な拡がりを持っており、多くの場合2次元モデルである計算手法においてこれを如何に考慮に入れるかも重要である。なお、実際に対策工の延長を設定する際には落石の3次元的拡がりを予測することが求められる。

(3) 植生・立木の抵抗の考慮

我が国の落石被害現場のうち約80%が樹木の繁茂した斜面で発生している¹⁵⁾。樹木は落石の落下運動に無視できない抵抗機能を有しているであろうことは経験的に明らかであり、また、図-1にも示唆されたとおりである。樹木の抵抗効果を適切に考慮できる手法の開発と実用化が望まれる。なお、一部このような試みがなされている^{16)、17)}。

(4) 落石シミュレーション結果の評価法

落石現象は、その発生および運動挙動の両面において不確定な現象である。このため、多数回の試行計算が行われることが多いが、得られた結果を統計的に評価するための基本的な考え方を整理しておく必要がある。力学モデルの単純化（計算手法）、現地条件のモデル化に関連する信頼性の問題に対する考慮、および保全すべき道路等の安全度についての考慮（リスク管理の考え方）が含まれよう。

8. おわりに

本稿では、(社)日本道路協会道路土工委員会落石防護施設検討小委員会の下に平成11年度から12年度の2年間設置された「落石シミュレーション手法検討WG」において、落石シミュレーション手法に関して検討した結果の一部概要を紹介した。その報告書は2002年4月に刊行された。落石問題は現象の複雑さの故にきわめて経験工学的（アート）であり、今後とも本質的には変わらないと思われるが、落石シミュレーションのような技術を活用することにより少しでも合理化していくことが必要である。そのためにも、今後とも実用化普及のための検討が望まれる。

最後に、上記WGメンバーの一人である筆者が概要を報告させていただくことにつき、上記WGの委員の方々（秋山泰之、右城猛、音田奨、倉岡千郎、古賀泰之、小村辰彦、佐々木哲也、中里薫、淵上正浩、北條明、馬貴臣、榎谷浩、松尾修、松葉美晴、三木茂、村西隆之、矢野洋明、若林修の各氏；アイウエオ順）に謝意を表します。また、使用した図もすべてWG報告書³⁾から引用させていただいた。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧、2000.
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル、1999.
- 3) (社) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料ー落石シミュレーション手法の調査研究資料ー、2002.
- 4) 亀村勝美：講座 不連続性岩盤の調査・解析と評価、4. 不連続性岩盤における調査・解析事例（応力変形問題）（その1）、土と基礎、Vol. 48, No. 4, pp.51-56, 2000.
- 5) 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、土木学会、pp. 51-61, 1983.
- 6) 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、建設省土木研究所資料第2770号、1989.
- 7) 右城猛、篠原晶二、谷田幸治、八木則男：落石の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論文集、土木学会、pp. 91-96, 2000.
- 8) 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論文集、土木学会、pp. 63-68, 2000.
- 9) Barret, R.K.: Rockfall modeling and attenuator testing, Colorado State Department of Highways, Denver, 1989.
- 10) Stevens, W.D.: RocFall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, A thesis submitted with the requirements for the degree of Master of Science, University of Toronto, Department of Civil Engineering, 1998.
- 11) Cundall, P.A.: A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems, Proc. of Symposium of the International Society of Rock Mechanics, Vol. 1, Nancy/France, II-8, 1971.
- 12) ソフトブレーン：2D-Block for windows 操作説明書、1998.
- 13) Shi, G. and R.E. Goodman: Discontinuous deformation analysis, Proc. of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 269-277, 1984.
- 14) Ohnishi, Y., K. Yamamukai and G. Chen: Application of DDA in rockfall analysis, Proc. of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium, pp. 2031-2037, 1996.
- 15) 松尾修、佐々木哲也、堤達也：落石防護工の被害に関する実態調査、第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp. 69-74, 2000.
- 16) 倉岡千郎、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論文集、土木学会、pp. 97-100, 2000.
- 17) 榎谷浩、氣谷慶太、若林修、音田奨、井原朋美：落石斜面の植生の影響に関する一考察、第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp. 79-82, 2000.