

落石運動シミュレーションについての一考察

STUDY ON THE SIMULATION OF ROCK FALL ON SLOPE

榎谷 浩*、音田 奨**、則武真紀子***、小村辰彦****

Hiroshi MASUYA, Susumu ONDA, Makiko NORITAKE and Tatsuhiko KOMURA

* 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)

** 日本サミコン株式会社 技術部 (〒950-0925 新潟県新潟市弁天橋通 1 丁目 8 番 23 号)

*** 株式会社帝国建設コンサルタント (〒500-8881 岐阜県岐阜市青柳町二丁目 10)

**** 博 (工) 東京コンサルタンツ株式会社 (〒168-0063 東京都杉並区和泉 3-1-8)

キーワード：落石、シミュレーション、斜面、植生、3次元

(rock fall, simulation, slope, flora, three dimensions)

1. はじめに

落石がどこで、どのような規模で発生するかは、重要な問題である。また、具体的な発生時期をあらかじめ知ること重要な問題ではあるが、一般に困難である。しかし、経験を積んだ技術者の判断により、落石発生の場所と規模の予測ができる場合が多い。また、斜面調査結果や過去の事例に基づいて、ある程度予測することも可能である。

落石の発生位置とその規模が特定できる場合、もしくは、かなりの信頼性をもって仮定できる場合、落石発生後の落石の具体的な運動が問題となる。具体的な運動とは落石の斜面上の軌跡と速度である。その予測は経験工学に基づく方法と数値シミュレーションによる方法に大別される。落石対策便覧¹⁾によれば、斜面の等価摩擦係数と斜面勾配を用いて速度が算出できる。また、過去のデータに基づく最大跳躍量も示されているため、設計においてはこれらを参考に、設計条件を決定できる。しかし、実際の斜面は、個々に岩盤、地質などの性状、斜面の凹凸、

植生等の条件が多種多様であるため、実際の現象と経験的な予測とが一致しない場合も少なくない。

そのため、経験的な予測の範囲を超える場合、あるいはすでに防護工が斜面に設置されている等の特殊な条件を特に考慮すべき場合には、各種の数値シミュレーション手法を利用して、その結果を設計の参考にするのが望ましい。最近、より合理的でかつ正確な落石の危険度予測とその結果に基づく防災対策が求められてきており、信頼できるシミュレーション手法が必要とされる。コンピュータの発達により地形情報や落石情報データベースなどと連動した情報技術を利用したシミュレーション手法の発展が大きく期待されているのが現状である。

ここでは、内外での落石シミュレーション手法発達の歴史的経緯について概説する²⁾。また、国内のいくつかのシミュレーション手法を用いた適用例を紹介する。また、著者らが現在開発に取り組んでいるシミュレーション手法の現状について紹介する。

表-1 落石シミュレーション手法の発達

年代	シミュレーション手法の動向	国内の論文発表など	国外の論文発表など
	落石運動評価の必要性の発現	岐阜県白川町で飛騨川バス転落事故発生(1968)	落石勾配と運動形態の分類と落石の制御に関する論文：Ritchie(3)
1970	米国にてシミュレーションの基となる考えの提示		
	日本にて質点系シミュレーション手法開発開始	落石の運動機構に関する論文：福岡(4)	
1975		落石防護工設置に関する調査研究報告：高速道路調査会(5)	
		落石対策の手引きを発行：日本国有鉄道(6)	
1980	スイス、オーストリアにて ROCKFALL (質点系) の開発開始 Spang et al. (22)	土木研究所における落石実験：佐々木ら (7)	
		落石対策便覧の発刊：日本道路協会(8)	
		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開催：吉田ら (9)、右城ら (10) など	落石衝突角度と反発係数の論文：Wu(28)
1985			開発したシミュレーション手法の利用法と問題点に関する論文：Spang et al. (22)
		室内落石模型実験結果とシミュレーション手法の報告：土木研究所(25)	落石に楕円体を用いた各種地盤に対するシミュレーション手法の論文：Bozzolo(29)
	スイスにて3次元シミュレーション手法開発開始		3次元シミュレーション手法の論文：Descocudres et al.(30)
	米国において CRSP の完成		シミュレーション手法(CRSP)の論文：Pfeiffer et al.(31)
	ROCKFALL (カナダ) の完成 Hung et al.(23)		確率モデルを用いたシミュレーション手法の論文：Poronuzzi(32)
1990		福井県越前町で岩盤崩落によるロックシェッドの破壊事故発生：川上(11)	落石被害と軌跡予測に関する報論文：Hung et al. (23)
		ころがりモードと跳躍モードを設定した質点系のシミュレーション手法に関する論文：Kobayashi et al.(26)	岩盤での不連続変形法の解析に関する論文：Shi(16)
	日本において DEM (非質点系) の岩盤崩落や落石問題への適用開始	確率論的な考えを導入したシミュレーション手法の論文：吉田ら(17)	
	日本において 落石形状考慮や3次元問題への展開開始 (質点系)		
	日本において DDA (非質点系) の落石問題への適用開始	構造物の衝撃挙動と設計法の発刊：土木学会衝撃問題研究小委員会(12)	
1995	CRSP の改訂		
	ROCKFALL (オーストリア) の完成 Spang et al.(24)	落石形状と運動エネルギーに関する論文：氏平ら(27)	シミュレーションにおける各パラメーターと逆解析による定数同定に関する論文：Azzoni(33)
		北海道古平町で豊浜トンネル岩盤崩落事故発生(1996)	
	各手法におけるパラメーターの定義、設定法の検討開始	大西らによる不連続変形法(DDA)の落石解析の報告：Onishi et al.(15)	

	3次元シミュレーション手法の論文：梶谷ら (18)	シミュレーション手法 ROCKFALL の概要と問題点の報告：Spang et al.(24)
RocFall (カナダ) の完成 Stevens(34)	落石を多面体とする 3D シミュレーション手法の論文：氏平ら(35)	確率解析手法を用いた落石予測と防護に関する論文：Stevens (34)
	シミュレーション手法における運動方程式の同定法と災害事例への適用の論文：右城ら (36)	
	DEM (個別要素法) によるシミュレーションについての報告：倉岡ら(37)	
	DDA の岩盤工学への適用に関する論文：佐々木ら (38)	
	ロックシェットの耐衝撃設計を発刊：土木学会衝撃問題研究小委員会 (19)	
	落石対策技術マニュアルを発刊：鉄道総合技術研究所(39)	シミュレーションの現状と 3 次元厳密シミュレーション手法に関する論文：Labiousse et al. (40)
2000	落石対策便覧 (改訂版) 発刊：日本道路協会(1)	
2001	RocFall (カナダ) の改訂	

表-1 は落石シミュレーション手法に関する歴史的経過の概略を示したものである。最初に落石シミュレーションを用いたのは米国の Ritchie³⁾である。彼は、落石防止溝の設計法を見直すために実施した現場実験を観察し、落石の運動形態を3つの運動形態、回転運動 (Roll)、跳躍運動 (Bounce)、落下運動 (Fall) と表現している。そして、斜面上の落石運動を、これら3つの組み合わせを用いて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ている。

1970年代には、世界各国において落石運動シミュレーション手法の開発が各々独自の観点により始められた。使用された仮定は各手法さまざまであるが、いずれも一個の落石にのみ着目し、その運動を追求める手法であった。

わが国では1968年に犠牲者104名を出した未曾有の土砂災害である飛騨川バス転落事故が発生した。この事故を契機に、道路沿いでの土砂災害に対する安全性の向上が強く要望されるようになり、防護施設の整備が進められた。日本では、1970年代初頭に福岡⁴⁾が初めて落石運動機構に関する論文を発表しており、落石の痕跡からの運動軌跡再現と衝突時のエネルギー損失の算定を行っている。この後、1974年には、落石の最大跳躍高、落下速度、運動エネルギー

の参考値等を示した調査研究が高速道路調査会の報告⁵⁾され、この成果は、落石対策の手引き⁶⁾、落石対策便覧^{7,8)}に採りこまれている。

1985年前後には2, 3の研究者により実斜面への適用を目指して開発されたシミュレーションプログラムが報告されている^{9,10)}。これらのシミュレーションに関する研究の基となる実斜面における落石落下実験も数多く行われている。落石の運動は、落石自体の並進運動と回転運動であり、斜面などからの作用力で運動が変化する。これらの手法は、2次元の質点系の運動方程式として解く方法であり、落石の運動形態を飛行、線運動、衝突の3つの運動形態として解析する方法である (図-1)。

ロックシェットの破壊事故が発生し¹¹⁾、土木学会でもこの破壊事故を受け研究主題の一つをロックシェットとする衝撃問題に関する研究活動が1989年に始まった。この中で過去の落石実験結果の紹介がされ、落石シミュレーションの展望も示されている¹²⁾。また、越前海岸の岩盤崩落を再現、予想するために Cundal により考案された個別要素法 (DEM : Distinct Element Method) を応用した検討が行われている^{13,14)}。その後、落石シミュレーションにもこの手法が適用されるようになった。また、不連続変形法 (DDA:Discontinuous Deformation Analysis)

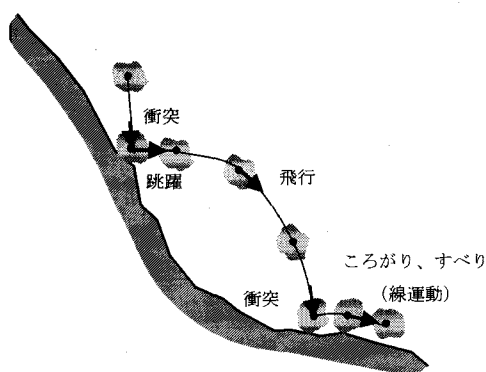


図-1 落石運動

と呼ばれる不連続挙動解析手法の適用も行われるようになった^{15,16)}。これらの手法は、落石と斜面全体を解析対象とする手法である。シミュレーションを行うには、落石形状をはじめ比較的多くのパラメータ情報が必要とされる。

一方、質点系のシミュレーションにおいてより信頼性を向上させるために確率変数の導入も行われている¹⁷⁾。また、3次元運動を取り扱う手法の開発も見られるようになった¹⁸⁾。このような結果は、ロックシェットの耐衝撃設計¹⁹⁾で確率を考慮した限界状態設計法における落石荷重としてその概念が紹介されている。以上のようにシミュレーション手法の発達は日進月歩であり、現在に至っている。

落石運動シミュレーション手法の基本的アプローチ方法と歴史的経過に着目して分類すると、ほとんどの手法は、質点系の落石シミュレーション手法と非質点系の落石シミュレーション手法に大別できる。

3. 解析結果

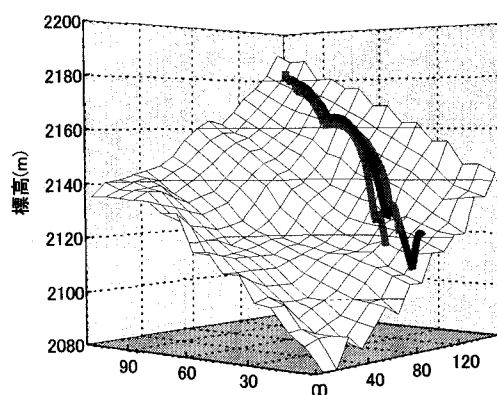
3.1 3次元解析の事例

榎谷・小村は雪崩対策としてスノーシェットを計画中の山岳道路において、斜面上方の多数の不安定岩塊に対する落石対策工の必要性の検討と落石到達範囲の推定のために3次元解析を行っている^{20,21)}。

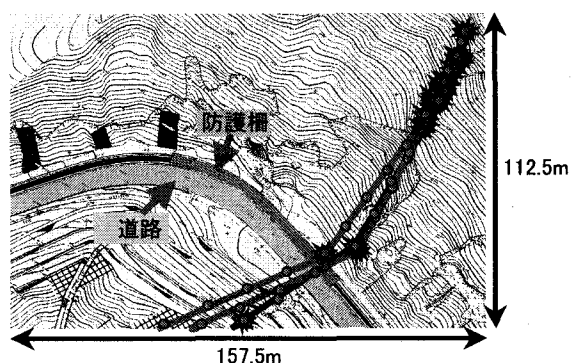
斜面のモデル化は道路軸方向に157.5m、斜面方向に112.5mの範囲を約5m間隔で座標を設定した。対象落石は標高が最も高く、落石径が最も大きい岩塊とした。パラメータ値である動摩擦係数を変化さ

せシミュレーションを行っている。

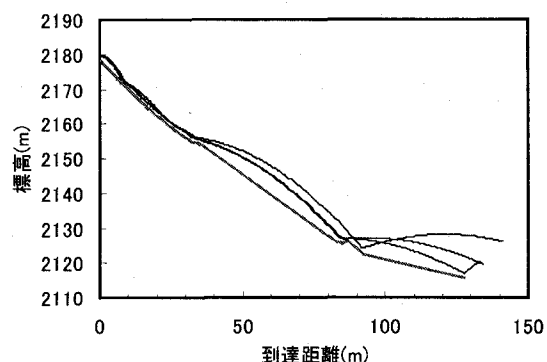
図-2(a)に解析結果による落石の3次元軌跡を示す。図-2(b)に示す落石経路は(a)の軌跡を平面上に投影したものであり、落石の到達範囲が把握できる。また、図-2(c)に示すように落石経路の横断を図化することで跳躍を読みとることができる。3次元解析を用いることで、より現実的に落石現象を表



(a)3次元軌跡図



(b)平面落石軌跡図



(c)落石経路の2次元表示

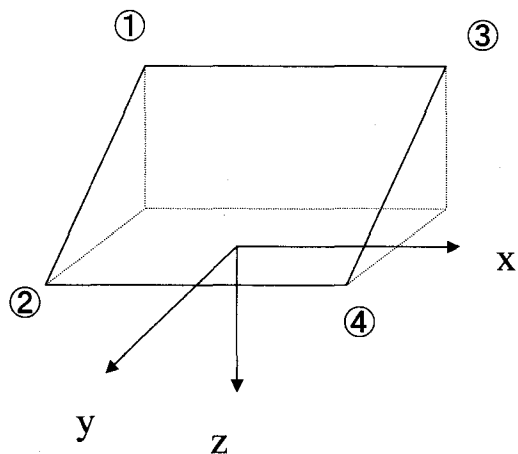
図-2 KURSS(Kanazawa University Rockfall Simulation System)による3次元解析結果

現できることがわかる。

3. 2 植生に関する解析事例

図-3 に示す単純な3次元斜面(1平面で形成される斜面)について、植生の影響について考慮した解析の結果を示す。植生は、立木の半径 r_t 、高さ h_t 、樹木密度 ρ_t (本/m²) の3つのパラメータ(各々平均値と標準偏差)で表現した。なお、枝葉は考慮せず一本の木立の幹は一定太さとし、鉛直に育っているものとした。

図-4 は木の高さの違いによる軌跡を示したものである。木の高さが高いほうが衝突しやすいのが自然である。この場合は20mにしたときに衝突回数3回、5mにしたときは衝突回数が2回となっているが、これだけでは単純に比較できない。そこでそれぞれ同じ条件で10回ずつ解析を行なってみた。すると20mにしたときは平均衝突回数2.3回、5mにしたときは0.8回となり、20mのほうが木に当たる確率が大きくなり、考えられる現象をよく再現していると思



節点番号	X	Y	Z
①	-10	-10	-20
②	-10	10	0
③	10	-10	-20
④	10	10	0

落石の初期位置 $(X, Y, Z) = (0, -9, -25)$

落石の半径 0.3m、質量 1000kg、初速度 零

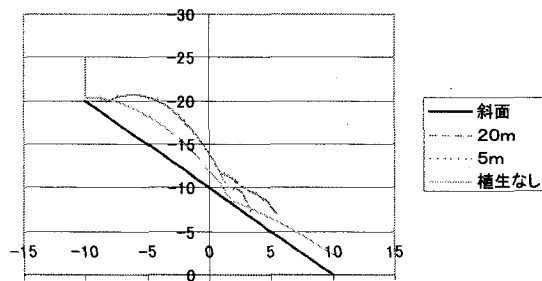
落石と斜面との反発係数 0.8 摩擦係数 0.1

木立と落石の衝突時の反発係数 0.2、摩擦係数 0.1

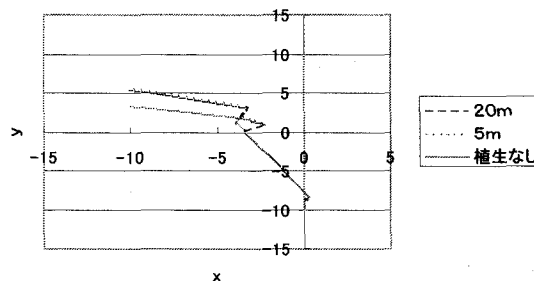
図-3 解析斜面と落石の条件

表-2 立木条件

CASE	立木の条件		
	半径(m)	高さ(m)	密度(本/m ²)
1	0.3	20	0.3
2	0.3	5	0.3
3	1.2	20	0.3
4	0.2	20	0.3
5	0.3	20	0.6
6	0.3	20	0.1



(a) yz 平面



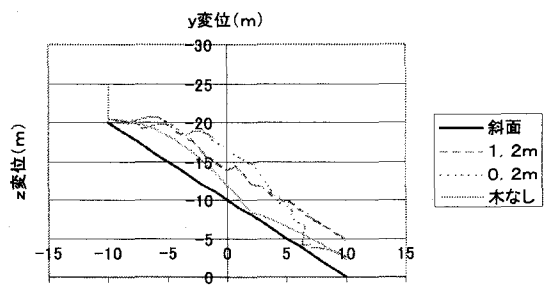
(b) xy 平面

図-4 木の高さの影響(CASE1, 2)

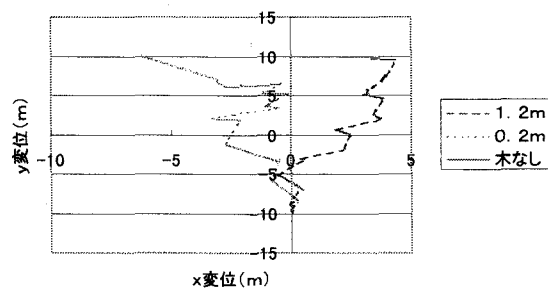
われる。

図-5 は木の半径の影響を示したものある。木の半径が大きいほど衝突可能領域が大きくなるため、衝突回数は増えるはずである。この場合は1.2mのときに12回で、0.2mのときに7回となっている。高さの影響を調べた時と同様に、それぞれ10回ずつ解析を行なってみる。半径が1.2mのときは14.5回、0.2mのときは6.2回となり半径が大きいほど衝突回数が増えるという現象が再現されている。

図-6 は木の密度の影響を示したものである。樹

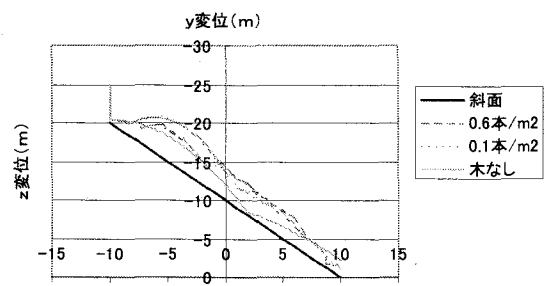


(a) yz 平面

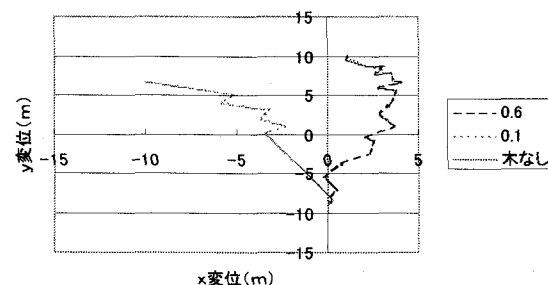


(b) xy 平面

図-5 木の高さの影響 (CASE3, 4)



(a) yz 平面



(b) xy 平面

図-6 木の高さの影響 (CASE5, 6)

木密度が大きいほど植生の面積が増えるため、木にあたる確率は増えて当然である。この場合は樹木密度が 0.6 (本/m²) のときは 14 回衝突し、0.1 (本/

m²) のときは 4 回衝突している。ちなみにそれぞれ 10 回ずつ解析した結果は、樹木密度 0.6 (本/m²) のときの平均衝突回数が 11.3 回、0.1 (本/m²) のときが 2.6 回となっており、予想される現象をよく再現していると考えられる。

4. あとがき

本研究では、落石シミュレーション手法の歴史的経緯について概説した。また、著者らが現在開発に取り組んでいる植生を考慮した 3 次元植生シミュレーション手法の現状について紹介した。

今後、落石シミュレーションの斜面防災に果たす役割はますます重要になるものと予想される。これに伴い、解析パラメータの設定法の確立をはじめ、斜面途中の植生、転石や防護施設の影響を合理的に考慮できるより洗練された 3 次元シミュレーション手法の開発を進めたいと考えている。

謝 辞

平成 10 年 11 月に開始された落石シミュレーション手法ワーキング活動 (日本道路協会 落石防護施設小委員会) を通じ、ワーキンググループの皆様には本研究に関して有意なご意見ならびにアドバイスを頂いた。記してここに深謝を表す。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会 (2000) : 落石対策便覧 (改訂版)、2000.
- 2) (社) 日本道路協会 : 落石対策便覧に関する資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料-、2002.
- 3) Ritchie, M. : Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record No. 17, pp. 13-28, 1963.
- 4) 福岡正巳 (1973) : 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.
- 5) 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書、高速道路調査会、1974.
- 6) 日本鉄道施設協会 : 落石対策の手引き、1978.
- 7) 佐々木康、谷口栄一、舟見清己、谷本亘、堀口正巳 : 落石の跳躍量に関する実験、第 14 回日本道路会議論文集、pp. 113-115、1981.

- 8) (社) 日本道路協会：落石対策便覧, 1983.
- 9) 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、第一回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集、pp. 55-61. 1983.
- 10) 右城猛、村上哲彦：落石の飛跳躍高の推定、第一回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp. 48-54. 1983.
- 11) 川上英男：ロックシェットの崩壊機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 2、pp. 701-706、1990.
- 12) (社) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃問題と設計法、構造工学シリーズ 6、1993.
- 13) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Proc. of Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Vol. 1, Nancy France, II-8, 1971.
- 14) Cundall, P. A. and O. D. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65, 1979.
- 15) Ohnishi, Y., K. Yamamukai and G. Chen: Application of DDA in rock fall analysis, Proceedings of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium, pp. 2031-2037, 1996.
- 16) Shi, G. : Forward and backward discontinuous deformation analysis of rock block systems, Proc. of the International Symposium on Rock Joints, pp. 731-743, 1990.
- 17) 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評価、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 1603-1615、1991.
- 18) 榎谷浩、福田尚晃、堤下克彦：斜面上の落石の運動解析手法の開発、構造工学論文集、Vol. 43A, pp. 1589-1596、1997.
- 19) (社) 土木学会衝撃問題研究小委員会：ロックシェットの耐衝撃設計、構造工学シリーズ 8、1998.
- 20) 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講演会論文集、pp. 63-68、2000.
- 21) 榎谷浩、佐々木哲也、倉岡千郎、古賀泰之、三木茂：講座 落石対策、4. 落石運動メカニズムとその予測(その 2)、土と基礎、Vol. 50、No. 4、pp. 48-53、2002.
- 22) Spang, R. M. : Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical application, Proc. of 5th Int. Symposium on Land Slides. Pp. 237-243, 1988.
- 23) 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.
- 24) Spang, R. M. and T. Sönser : Optimized rockfall protection by "ROCKFALL", Proc. 8th ISRM, pp. 1233-1242, 1997.
- 25) 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、1989.
- 26) Kobayashi, Y., E. L. Harp, and T. Kagawa: Simulation of rockfalls triggered by earthquakes, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 23, pp. 1-20, 1990.
- 27) 氏平増之、細谷昭悟、小川健太、高貝暢浩：フィールドにおける落石落下挙動、資源と素材、Vol. 112, pp. 843-850. 1996.
- 28) Wu, S. (1985) : Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record 1031, pp. 1-5, 1985.
- 29) Bozzolo, D. : Rockfall analysis : A mathematical model and its test with field data, Proc. 5th Int. Symp. on Land Slides, pp. 555-560, 1988.
- 30) Descoeudres, F. and T. Timmermann : Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls, Proc. 6th Int. Congr. Rock Mech., Montreal, pp. 337-342, 1987.
- 31) Pfeiffer, T. J. and T. D. Bowen : Computer

simulation of rockfalls, Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol.26, No.1, pp.135-146, 1989.

32) Paronuzzi, P. : Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.22, pp.175-183, 1989.

33) Azzoni, A., G. L. Barbera and A. Zaninetti : Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model, Int. J. Rock. Mech. Min. & Geomech. Abstr., Vol.32, No.7, pp.709-724, 1995.

34) 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, University of Toronto, Department of Civil Engineering, 1998.

35) 氏平増之、細谷昭悟、鈴木新吾 : 3次元シミュレ

ーションの試み、北海道応用地学合同研究会論文集、No.8、pp.169-175、1997.

36) 右城猛、吉田博、矢野光昭、高石脇、八木則男 : 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-37、pp.380-389、1997.

37) 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.

38) 佐々木猛、大西有三、吉中龍之進 : 不連続変形法 (DDA) とその岩盤工学への適用に関する研究、土木学会論文集、No.493/III-27、pp.2031-2037、1996.

39) 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.

40) Labiouse, V. and F. Descoeurdes (1999) : Possibilities and difficulties in predicting rockfall trajectories, Proc. of Joint Japan-Swiss Scientific Seminar on Impact Load by Rock Falls and Design of Protection Structures, Kanazawa, pp.29-36, 1999.