

リスク評価のための解析の役割, その現状と課題 (Why, How)

西村 強

正会員 鳥取大学工学部 土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
E-mail:tnishi@cv.tottori-u.ac.jp

Key Words : *rockslope, numerical analysis, consequence, frequency, risk-based approach.*

1. はじめに

斜面安定解析は、道路などの構造物建設に伴う人工斜面の機能性や安定性の評価あるいは防災上の観点から自然斜面の安定性の確認などに日常的に実施されている。今日では、土砂斜面から岩盤斜面に至る斜面の性状の変化に対応して、多くの解析モデルがある。解析手法についてみれば、たとえば、極限平衡解析、有限要素法などの連続体力学に基づく方法あるいは剛体の力学を基本とする個別要素法などが良く用いられる。極限平衡解析では、平面すべりの仮定などの単純化、破壊誘因の確率モデルの導入など可能であるが、要素自体の変形やその進行性（クリープ）などの表現しにくい。一方、有限要素法では、そのようなことは表現できるが、不連続面の情報（方向、間隔など）をどのようにモデルするかの方に議論がある。対象と目的に応じた選択が重要といえる。

昨今では、市販されている解析ソフトも豊富であり、また、コンピューター自体の高速・大容量とともに、可視化技術（あるいはソフト）の進歩により3次元動画で解析結果を表示することも当然のようにすらなってきた。このような状況下においても、解析法の特徴の把握と（与えられた問題に適した）解析法の選定、解析に必要な定数の選択、さらには、解析結果の評価は、技術者の判断に委ねられることには変化はない。

今日では、リスクという時代のキーワードに対応して、破壊機構のモデル化とともに、斜面の安定解析に求められている、もう一つの要求は、どの程度の頻度で、崩壊は発生するのか、発生したとすれば、どの程度の被害が想定されるかという観点から解析結果の表示と説明が求められている。本文では、リスク評価における解析の役割についてまとめることにする。

2. リスク評価における解析法の役割

斜面におけるリスク評価では、災害規模とその発生確率、それによる被害額を算定することになる。算定の第一段階では、崩壊規模とその発生確率を予測することが必要となる。これには、次のようなレベルがあるとされている¹⁾。

レベル1：災害履歴の統計処理による簡易予測法

レベル2：斜面特性に基づくフラジリティを反映した予測

レベル3：GIS技術を活用した予測法

レベルが上がる（上の例では、数値が大きくなる）ほど、精度も高くなるが、必要とする情報量も多くなり、難易度も高くなるとされる。たとえば、レベル1の段階では、検討対象区間内の災害履歴を統計処理する生起確率法や降雨と災害の相関が高いと予想される区間において降雨履歴と災害履歴の関係の分析を利用する手法がある。いずれも、斜面の特性を加味する手法ではないこと

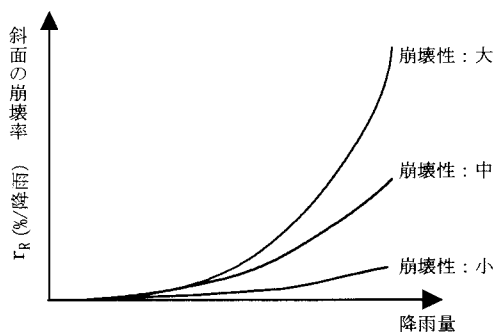


図-1 フラジリティカーブの模式図¹⁾

表-1 解析的手法の特徴

解析法	入力条件	長 所	短 所
極限解析法	- すべり面、不連続面 - せん断強度 など	- 簡易 - キープロック判定	- 要素内の応力・ひずみの表現 - 不安定化後の挙動の予測
連続体解析 (例：有限要素法)	- 地形 - 応力—ひずみ関係 - 初期応力、強度 - 地下水 など	- 要素内変形が表現できる - 解析ソフトが充実 - 様々の構成式の導入が可能	- 不連続性の高い岩盤では適用しにくい - 崩壊後の表現
不連続体解析 (例：個別要素法)	- 地形 - 不連続面の方向 - 変形特性、強度 - 地下水 など	- 要素の分離が表現できる - 安定—不安定—崩壊を表現できる	- 不連続面の情報に依存しすぎる - 解析定数の決定
質点系解析	- 地形 - 岩塊の形状、体積 - 反発係数 など	- 簡易 3次元も容易	用途が限られる

から、ここで取り扱う解析の役割は少なそうである。斜面特性（崩壊パターンや地形・地質特性等）に基づくフラジリティを反映した予測法では、素因に加え、誘因を考慮して、対象斜面の崩壊率を求める。たとえば、図-1のように、降雨が誘因とされれば、降雨強度と崩壊率の関係式が必要となる。しかし、土砂斜面の例でも誘因が明らかではない場合が多い。ましてや、不連続面の影響が見逃せない岩盤斜面を対象とするときは、誘因の明確化および（明確にされたとして）誘因の年発生確率の算定等に解決すべき課題が存在していると考えられる。GISを活用したレベルは、レベル1、2を応用したレベルであり、今後の技術開発が期待されるレベルである²⁾。

解析の役割は、調査等によって明らかになった情報（What, Where, When）を元に素因・誘因（why）の明確化、さらに、どのように（How、たとえば、崩壊モードや崩壊規模）結果（consequence、たとえば、到達域やある地点における速度など）に至るか、さらに、その発生頻度を表現していくことが求められると言える。しかし、素因・誘因の特定、その発生頻度の把握が容易でない場合もある。そのような場合は、それらの簡易なモデル化を行い、起こりうる結果の表示が最低限の役割となる。

3. 解析的方法の種類と目的

(1) 解析的方法の種類と事例

岩盤斜面の安定性を評価する（まずは、whyに対する

解答を与える）ためには、解析が必要である。よく、経験的方法と解析的方法に大別されるが、本文では、過去の事例に基づいて、経験的な式等によるものを経験的な方法、たとえば、崩壊高さと到達域の事例評価から崩壊土量の到達域の予測を行えば、経験的手法に基づく解析と考える。一方、調査資料に基づき、何らかの力学原理を導入し、安定性や崩壊後の到達域などを評価する場合を解析的方法とする。本章では、後者に関する記述を行う。解析手法を大別すれば、極限平衡法や質点系解析法と数値解析法となるであろう。質点系の解析法は落石など岩塊の落下後の挙動を対象にする例が多い³⁾。さらに、数値解析法は連続体解析と不連続体解析に区別できる。これらの特徴をまとめると表-1のようになる。事例を紹介すると以下のようである。

鷲田ら³⁾は、落石の運動に関する予測手法を報告している。この手法は、質点系の解析法と言えるが、地表面と接するときは、円形の要素を用いて回転運動を表現している。落石に関する数値解析法は、例が多く、Descocudresら⁴⁾は、3次元空間での剛体の回転運動が表現できる3次元解析法EBOULEMENTを報告している。Spang⁵⁾は、ROCKFALLと呼ばれる解析法を提案している。これらの落石に対する解析法の目的は、運動を開始した岩塊の軌跡や運動エネルギーの表現にある。それは、防護工の設置位置や大きさの決定に資料となる。

斜面上に存在する岩塊の安定性あるいは斜面そのものの安定性を評価するには、剛体あるいは連続体等のモデ

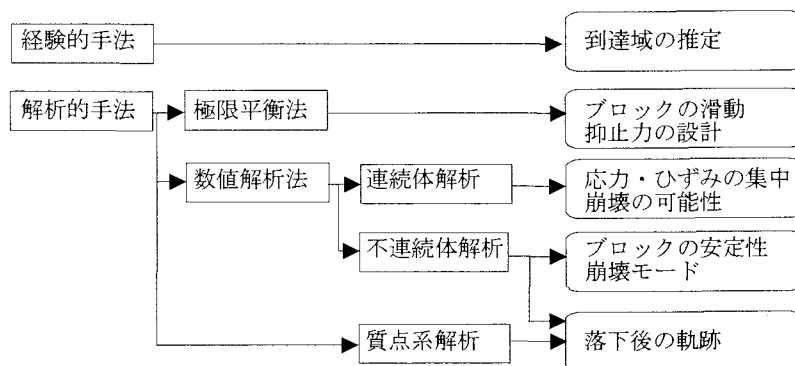


図-2 解析法の種類と目的（文献21の例を一部改変）

ル化が中心となる。キーブロック解析による不安定岩塊の抽出—極限平衡解析を実施する例が多い。Bergamin⁹⁾は、スイス国内の山岳道路の落石対策に関する解析を示しており、岩塊の安定のための設計抑止力を求める事例を報告している。有限要素法を用いる場合は、不連続面の影響を考慮するために、母岩としての変形・強度特性に加え、ジョイント要素を用いたり、あるいは、等価な力学特性を有する連続体に置き換えたりすることになる。平野ら⁷⁾は、新第三期火山砕屑岩におけるキャップブロック型スラビング崩壊に関する検討を報告している。また、秋山ら⁸⁾は、不安定化が予測される岩体の3次元FEM解析を報告している。このような例からもわかるように、崩壊発生が予測される地点における岩体内の安定性やすべり面の推定などが、解析の目的となる事が多い。

不連続体解析については、個別要素法（DEM）⁹⁾、不連続変形法（DDA）¹⁰⁾や離散化極限解析法（RBSM）などがある¹¹⁾。川村¹²⁾らは、現場落石実験に基づいてDEMの入力パラメーターの決定と斜面上の岩塊が落下した際の軌跡や到達距離の解析を実施し、落石対策工の設計に用いた例を報告している。次に、DDAを用いた例についてみると、大津ら¹³⁾は、実際の国道に隣接する岩盤斜面を検討対象とし、不連続面分布に関する幾何学的な不確実性を考慮した場合の、地震に起因する斜面崩壊により発生する損失に及ぼす影響について検討を加えている。その結果として、不連続面情報に起因する不確実性は、岩盤斜面の崩壊による社会的な損失に重大な影響を及ぼすことを明らかにしている。この解析は、二次元解析であるが、Wu J.H.ら¹⁴⁾は、要素が剛体回転を行うとき、要素サイズが大きくなるという（DDAの解析上の）問題点を解決する手法を提案し、併せて、3次元解析手法への発展を報告している。Hybridな手法の報告例もある。Eberhardt¹⁵⁾らは、有限要素法—個別要素法の結

合したHybrid解析手法を用いて、岩盤斜面内のせん断変形と破断面の生成、そして、すべり面への進行的な破壊過程を解析している。また、崩壊土砂を流体と見立てて、崩壊後の到達域を取り扱った例もある¹⁶⁾。落石の軌跡解析法や斜面崩壊に伴う到達距離の予測に関する研究例を取りまとめた資料は文献にもある^{17),18)}。

(2)解析の目的と手法の選択

以上、限られた例を挙げてきたが、解析の目的は、図-2のようにまとめられる。数値解析は、落石の軌跡や岩盤斜面の安定性を定量的に評価する目的で援用される。

このような目的を達成するためには、地表・地質踏査結果や調査計測データなどを総合的に検討して岩盤崩壊を評価する必要がある。岩盤内には、必ずといって良いほど不連続面が存在する。岩盤を等方性と仮定した場合の連続体解析では、岩盤としての変形・強度特性のみで解析が可能であるが、このようなモデル化では、目的を達成できないことがある。そこで、ジョイント要素を導入する、等価な連続体を仮定する、あるいは、不連続体解析を用いることになるが、岩石と不連続面それぞれについて、変形・強度に関する物性値を用意しなければならないことになる。調査で明らかになる情報を如何に解析に生かすが、解析側のポイントになる。たとえば、主となる（であろう）破壊面が明瞭であり、その数も限られているとすれば、極限解析法による安定性の評価や不連続体解析法による崩壊後の挙動解析などが可能であろう。しかし、系統的に不連続面が観測されるとき、統計的手法の導入も必要であろう。大津ら¹³⁾が実施しているように、入力パラメーターの不確実性を考慮して結果を評価することが重要である。今後も、さまざまな崩壊形態に関する解析事例を増やし、モデル化の技術や物性に関する資料を蓄積していくことが解析精度の向上にと

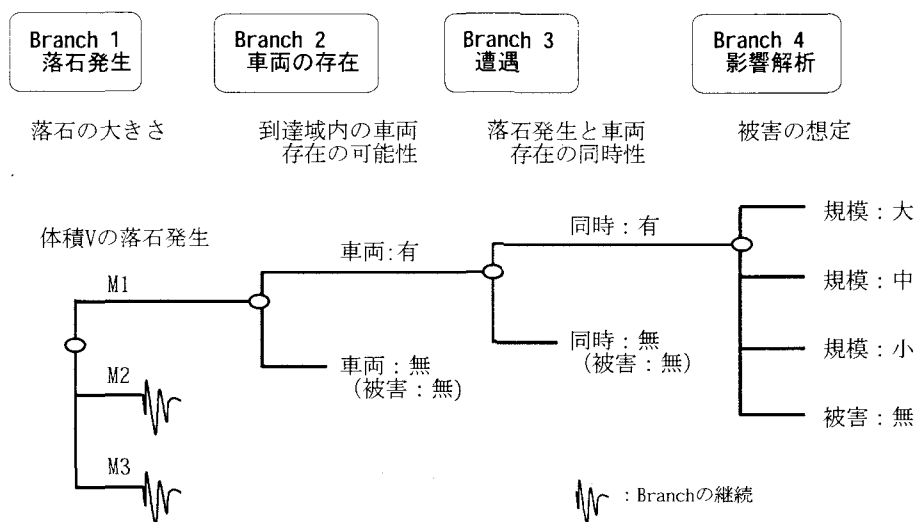


図-3 被害想定シナリオの一例（文献23の例を一部改変）

って不可欠なこととなる。

4. 不確実性下のモデル化

(1) モンテカルロ法の導入

不連続性岩盤斜面や斜面上に存在する岩塊の安定性は、多くの物理的および力学的因子に依存する。たとえば、落石の場合、岩塊の形状、斜面の傾斜、接触面の粗さ、あるいは、その面の挟在物などである。これらの素因に、降雨や地震などの誘因が加わって、崩壊あるいは落石が発生する。前項にのべたように、岩盤斜面に関する解析は、強度などの力学的要因と不連続面や地形などの幾何学的要因に関する情報が不確実な状態下での解析となる。必要となる情報が全て既知となっているとは限らず、また、ある程度の分布を有するものとして与えられることもある。Dudt & Heidenreich¹⁹⁾は、落石の軌跡に関する解析に際して、入力値の不確実性は、必要となるパラメータ値が未知である場合とランダム性を有する場合の2種に区分けできるとして、モンテカルロ法を適用して軌跡の予測を行っている。

また、モンテカルロ法を導入する場合、相当数の繰り返しを行わねば、入力値の分布を反映した出力値の分布が得られない、さらに、複数の入力変数があるときは、それらの組み合わせも加わって、試行回数も増加することもある。効率的に入力値を組み合わせ、入力値群の特性を反映した出力を得ることが必要となる²⁰⁾。岩盤斜面の安定解析にも、このようなことに配慮した例があることが文献²⁰⁾にまとめられている。また、他の工学的な分野にも解析例の報告がある²¹⁾。いずれにせよ、単に

モンテカルロ法を導入するばかりでなく、パラメータの特性を理解した上で、解析に当たることが重要であろう。

(2) 素因・誘因と結果の利用

力学的および幾何学的な要因に関する検討に加え、斜面崩壊に関するリスク評価に際しては、それがいつ起きるのか、10年に一度おきるのか、それとも100年に一度おきるものなのか、想定される被害が大きくても発生する可能性の低い事例と、さほど大きな被害はならないが頻繁に発生しかねない事例を比較することが必要になることもある。これは、強度劣化などの素因の進行とともに、降雨や地震などの誘因の発生確率に関係してくる。土砂斜面では、降雨がもっとも有力な誘因であるとして考える場合が多いが、降雨のみが有力なものとは言えない岩盤斜面では土砂斜面に比べ、誘因の発生確率の取り扱いが難しい。このような場合、まず、ある特定の誘因に絞って解答を示すのが一案であろう。たとえば、前述の大津ら¹³⁾の解析では、地震を優位な誘因として解析を行っている。そして、もう一案は、誘因の発生確率が把握しにくいとき、崩壊発生履歴等を勘案して想定される被害を算定するやり方である。この取り扱い方法では、脆弱性を評価する手順を素通りし、現象（崩壊、落石）の規模とその頻度の関係を崩壊発生履歴に依存するとともに、解析手法を利用して、結果（到達域など）を予測することになる。2.に述べたレベルからすれば、レベル1に解析を付け加えたものになる。このような例の一つとして、Singh²²⁾らは、崩壊発生頻度と崩壊の大きさ（体積）の関係に、地震学で用いられるGutenberg-

Richter式を用いている。彼らの解析が対象としているのは、カナダ西部であるが、崩壊頻度と大きさの履歴の蓄積があれば、リスク評価に十分利用できる考え方と思われる。Guzzettiの報告²⁴⁾には、イタリア国内で発生した地すべりや岩盤崩壊による災害事例を過去数世紀にもわたって調査した例をまとめている。

このように、過去の資料を基に、規模と頻度(frequency)に注目することも一案である。そのためには、データの管理・提供することが大事であるとする。この他にも斜面のリスク評価に関する事例は、文献²⁵⁾にまとめられているので一読をお勧めしたい。

5. 被害想定シナリオ作成と解析結果の利用

(1) 被害想定シナリオ作成

解析が(一応の)役割を果たした後、得られた解析結果をどのように被害想定に用いるか、および、その解析結果の利用の限界あるいは留意点は何かの2点について述べる。

崩壊が発生したとしても、道路や居住地域に崩壊岩塊(土砂)が至る可能性が認められなければ、対策を講じる必要はない。被害に至る可能性を探る手法として、イベントツリー(Event tree)法やフォルトツリー(Fault tree)法が用いられることがある²⁶⁾。

図-3は、落石による道路通行車両への被害想定シナリオとしてイベントツリー法を用いた例である。これによれば、Branch 1において、崩壊の大きさ(落石の体積)と年発生頻度の資料、Branch 3で該地点の交通量に関する資料、そして、Branch 4において、通行車両などの財産に関する資料を加味すれば、被害の想定ができることになる。解析の役割は、Branch 2において、たとえば、落石が道路に至るかを示すことである。Branch 1において、誘因の発生確率と崩壊(落下)の資料があればよいが、それが存在しないとき、前述したように、過去の資料に基づき崩壊規模・発生頻度の推定結果を利用するのも一案となる。金ら²⁵⁾は、このようなシナリオに基づき、3次元個別要素解析²⁶⁾結果を用いた落石遭遇解析を報告している。

(2) 解析結果の利用と留意点

確率論的手法は、過去の統計量に基づいて将来の発生を予測することから、ある意味で推計的であると考えられる。素因・誘因の発生確率を簡略化して、斜面の崩壊履歴(頻度・規模)などの情報を用いる例を述べたが、一斜面の崩壊履歴が保存されている例は稀と考えられるので、斜面特性の共通する他の斜面の事例も資料として参照することも十分あり得る。この場合、想定できる結

果は、推計的であるばかりでなく、次のようなことに留意すべきであると判断する。つまり、その想定される結果は、対象斜面の想定被害額の(計算上の)絶対値を与えるものではなく、相対的な比較に用いるべき値を与えていると考えるべきである。留意点として次のことを挙げておきたい。

- 過去の資料に基づき、現時点で将来予測をしている。状況の変化(地形変化、外力や強度劣化など)があれば、その結果は変化する。
- その結果は、解析に用いる仮定やパラメーターの値や被害想定シナリオに依存する。

とは言え、優先的に対策を施すべき地点の選定に有用なツールである事には変わりない。リスク評価に基づいた岩盤斜面の安定解析と設計に関する研究も報告されるようになってきている²⁷⁾。(与えられた問題に適した)解析法の選定、解析に必要な定数の選択、さらには、資料の蓄積と活用にと、さらなる研究開発が重要であることを述べて本章の結びとする。

参考文献

- 1) 土木研究所：道路斜面災害のリスク分析・マネジメント支援マニュアル(案)，pp.4-1-4-54，2004。
- 2) Xie, M., Esaki, T., Zhou, G. and Mitani, Y.: Geographic Information Systems - Based three-dimensional critical slope stability analysis and landslide hazard assessment, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, pp.1109-1118, 2003.
- 3) 鷲田修三，古賀泰之，伊藤良弘：落石運動の予測手法について，第24回土質工学会研究発表会講演集，Vol.2，pp.1611-1614，1989。
- 4) Descoeudres, F. and Zimmermann, T. H.: Three dimensional dynamic calculation of rockfalls, *Proceedings of the 6th ISRM Congress* (Montreal), Balkema, pp.337-342, 1987.
- 5) Spang, R. M.: Optimized rockfall protection by 'ROCKFALL': *Proceedings of the 8th ISRM Congress* (Tokyo), Balkema, pp.1233-1242, 1995.
- 6) Bergamin, S., Kirchofer, P. and Filippini, R.: Rock mechanics investigations for the endangered Briston Road, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.34, No.2, pp.83-98, 2001.
- 7) 平野勇，松岡俊文，山田泰広，石川慶彦：新第三期火山砕屑岩におけるキャップロック型スラビング崩壊に関する検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，第34巻，pp.231-236，2005。
- 8) 秋山泰祐，伊藤和伯，宮下尚志，川北稔，岸徳光：不安定化が懸念される岩体の3次元FEMを用いた検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，第34巻，pp.249-255，2005。

- 9) Cundall, P. A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. Symposium on rock mechanics. Nancy, Vol. 2, pp.129-136, 1971.
- 10) Shi, G.H. and Goodman, R.E. : Two dimensional discontinuous deformation analysis, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 9, pp. 541-556, 1985.
- 11) 日本材料材料学会編：岩の力学，丸善，pp.477-479, 1993
- 12) 川村國夫，西岡幹雄，久保田勝彦，現場落石実験による不連続性岩盤斜面の危険度評価，土木学会論文集. No.736/III-63, pp. 39-50, 2003.
- 13) 大津宏康，大西有三，伊藤利和，竹山雄一郎，西山哲：不連続面情報の不確実性に着目した斜面崩壊による社会的損失の推定に関する研究，土木学会論文集，No.736/III-63, pp. 231-248, 2003.
- 14) Wu, J. H., Ohnishi, Y. and Nishiyama, S. : A development of the discontinuous deformation analysis for rock fall analysis, *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics*, Vol. 29, pp. 971-988, 2005.
- 15) Eberhardt, E., Stead, D. and Coggan, J. S. : Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 69-87, 2004.
- 16) Nakamura, H. and Fathani, T. F. : Numerical analysis of the movement distance and velocity of landslides, *Landslide risk management*, (Edited by Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E.), Balkema, CD-ROM, 2005.
- 17) 栢谷浩，佐々木哲也，倉岡千郎，古賀泰之，三木茂：落石対策(落石運動のメカニズムと予測 (その2))，土と基礎，Vol.50, No.4, pp.48-53, 2002.
- 18) Hungr, O., Corominas, J. and Eberhardt, E. : Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity, *Landslide risk management*, (Edited by Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E.), Balkema, pp. 99-128, 2005.
- 19) Dudt, J.P. and Heidenreich, B. : Treatment of the uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls, *International conference on landslides*, Davos, pp. 507-514, 2001.
- 20) McKay, M. D. and Conover, W. J. : A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, Vol.21, No. 2, pp.239-245, 1979.
- 21) 土木学会岩盤力学委員会・岩盤崩落問題研究小委員会編：岩盤崩壊の考え方，一現状と将来展望一，土木学会，CD-ROM, 2004.
- 22) 若杉圭一郎，小尾繁，牧野仁史：モンテカルロシミュレーションによる高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価に対するデータ不確実性解析，核燃料サイクル機構技報，No.14, pp.149-160, 2002.
- 23) Singh, N. K. and Vick, S. G. : Probabilistic rockfall hazard assessment for roadways in mountainous terrain, *3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazard*, 2003.
- 24) Guzzetti, F. : Landslide fatalities and the evaluation of risk in Italy, *Engineering geology*, Vol. 58, pp. 89-107, 2000.
- 25) 金美錦，西村強，木山英郎，谷口洋二：3次元個別要素法を活用した確率論的落石遭遇解析，第60回土木学会学術講演会概要集(CD-ROM)，2005.
- 26) Nishimura, T., Seiyama, T., Kiyama, H. and Taniguchi, Y. : A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method. *Proceedings of the 3rd international symposium on rock stress*. RS Kumamoto 03, pp. 449-454, 2003.
- 27) Pine, R.J. and Roberds, W.J. : A risk-based approach for the design of rock slopes subjected to multiple failure modes—illustrated by a case study in Hong Kong, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 42, pp. 261-275, 2005.