

地すべりを再現するための数値解析手法の現状

A review for the numerical methods to simulate natural-slope landslides

若井明彦^{a)*}, 吉松弘行^{b)}

Akihiko WAKAI and Hiroyuki YOSHIMATSU

Abstract

A review for the numerical methods to simulate natural-slope landslides, serving to discuss and synthesize key findings on this subject, is reported. The past works on the subject can be classified into the two categories such that (1) researches to understand and describe the landslide mechanisms and (2) researches to simulate the process of motion of a landslide mass. A state of the art review corresponding to each category will be demonstrated and it may offer new perspectives on the issue or point out an area in need of further research.

Key words : Review, Landslide, Numerical method, Simulation, Natural slope

和文要旨

自然斜面の地すべりシミュレーションに供する数値解析手法について、重要事項を総括するための総説が報告される。同課題に関する既往の研究は、大別して、(1) 地すべり機構の理解や記述のための研究、あるいは(2) 地すべり地塊の運動過程を再現するための研究、の二種類に分類することができる。これら二分類それぞれに関する既往の研究を総括することにより、現在の議論の見通しや将来研究の必要な方向性に関する知見が示される。

キーワード: 総説, 地すべり, 数値解析手法, シミュレーション, 自然斜面

1. はじめに

数値解析が科学技術のあらゆる分野で現象予測の切り札としてその地位を確固たるものにしたのは、20世紀後半からの電算技術の飛躍的進歩に後押しされたものであるが、地すべり関連分野における発展を考える場合、個々の力学現象を記述する構成則や数理モデルの研究がこれに大きく貢献したことは論を待たない。

数値解析によって地すべりに関連する力学現象を再現する既往の多くの試みは、大別して、

- (1) 地すべりの発生機構の再現
 - (2) 地すべり地塊の運動過程の再現
- の二つに分類できる。

前者においては、地すべり機構が形成される過程を力学的に再現するための、土質力学的な見地からの土や岩の力学特性の数理モデル化が欠かせない。この詳細は例えば文献 (Murakami *et al.* (2010)) に譲るが、このように様々な土や岩の特性を精緻に表現するための手法が次々に開発され、それらは地すべり研究の高度化と地すべり対策の合理化に大きな役割を果たしている。特にFEMに関する解析技術の現状が、文献 (日本地すべり学会編 (2006)) にまとめられているので参照されたい。

一方、後者の視点での試みは、特に近年の大地震や豪雨時等で頻発している地すべりダムならびに堰止め湖の

現象解明と防止対策などのため、その検討意義が急速に高まっている。地すべり地塊の運動を再現するために、系の質量保存則、運動保存則の両方あるいは一方の方程式を用いた数値解析を用いる研究は、今後の中山間地における広域防災対策の観点からも極めて重要であろう。

次章以降、上記それぞれの観点から試みられてきた既往の主な研究を総括するとともに、それらの学術的あるいは技術的課題について整理する。なお、本誌上の既往の総説・論説等においてほとんど詳述される機会のなかった後者の視点の研究の変遷については、特に体系的な整理を含めて本報で詳しく論じたい。

2. 地すべりの発生機構の数値解析

2.1 古典的な安定解析手法との関わり

地すべり解析の主たる目的が斜面保全であることから、従来の斜面安定解析の主眼は、斜面の力学的な極限平衡状態 (崩壊機構の形成) に対する全体安全率を算定することに置かれてきた。こうした実務的な要請に応える解析手法として広く用いられているのが極限平衡法 (LEM) である。通常、想定すべり面上の土塊を分割し、それら分割片とすべり面あるいは分割片同士の間作用力を想定した静定化問題として扱い、最も生じやすい機構 (臨界すべり面) を探索する手法が用いられる (詳しくは、例えば、地盤工学会編 (2006))。

また、地すべりの再活動に備える対策工を検討する場合、既存すべり面の強度定数を土質調査等から適切に把握することが必ずしも容易でないことや災害後に迅速に

* 連絡著者 / corresponding author

a) 群馬大学
Gunma University
〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1

b) 川崎地質株式会社
Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd.

応急対策工を計画せざるをえない行政からの要請と関連して、上述の極限平衡法に基づく安定解析を実務設計に適用する際、すべり面深度等に基づく経験則を併用した強度定数の逆算法を採用することが多い。全体安全率の増分量が対策工の効果判定の指標として用いられることからわかるように、実務設計において用いられる極限平衡法に基づく斜面安定解析は、現実の斜面内部の力学機構そのものの再現と言うよりは、むしろ現況評価と対策量算定のための一連の設計手順を具体化した手続きとしての色彩が強いと言うべきであろう。

こうした古典的な安定解析手法と一線を画す形で登場したのが、有限要素法（以降、FEMと略す）等に基づく数値解析である。斜面内部の応力場とひずみ場を斜面全体の境界条件と整合する形で求めながら、かつ斜面内部の各点を構成する材料の力学的応答（応力増分に対するひずみ増分）を観察事実に対して忠実に考慮する。こうした連続体力学を基盤とした厳密な解析手法は、古典的な安定解析手法では必ずしも適切に考慮できなかった、斜面各部の変形から破壊への遷移過程や、斜面内の対策構造物等の相互作用などがある程度一貫して考慮することができる。

また一方で、FEMは極限平衡法による安定解析と力学的にはほぼ同等の計算を敢えて行うことも可能である。すべり面が通過する可能性のある斜面内の材料の強度定数を漸減させながら、自重による釣り合い計算が発散する瞬間を極限平衡状態と見なして全体安全率を逆算する手法は総称して“せん断強度低減法 (Shear Strength Reduction Method; 以降SSRMと略す)”と呼ばれ、Zienkiewicz *et al.* (1975) の着想をもとに、鵜飼 (1989, 1990) などにより広く実務への普及が試みられてきた。その後のSSRMの実用性検証に関連する主な研究としては、Lane *et al.* (2000), Manzari *et al.* (2000), Trandafir *et al.* (2001) などが挙げられる。

2.2 有限要素法 (FEM) とSSRM

わが国の地すべり対策工を計画する実務でFEMに基づく数値解析が採用される場合、歴史的経緯を考慮すれば、必然的にその用途は全体安全率の算定ということになる。前出のSSRMにより全体安全率を求める場合、強度定数を漸減させた際に生じた残差力を全体平衡に帰させる反復計算が必要となるため、応力分配と超過せん断力の評価に際してタフな（単純な）構成則が計算過程の安定化にとっては有利である。こうした背景で弾完全塑性体および降伏規準にMohr-Coulomb式を用いるモデル化が地すべり解析のためのFEMに広く採用されることになった。SSRMを実装した実際の弾塑性FEMの解析コードの例については、文献（地盤工学会編（2003））を参照されたい。一方、大塚他（2001）はSSRMを剛塑性FEMに取り入れて斜面の安定性を評価する手法を開発している。

その後、SSRMを採用したFEM解析（以降、SSRFEM

と略す）の豊富な現象記述能力を、三次元斜面安定問題や各種の地すべり抑止工（杭工やアンカー工）の評価に適用する試みが活発化した。例えば、Cai *et al.* (2000), 鵜飼他（2001）, 蔡他（2003）などにより、SSRFEMで得られる全体安全率が極限平衡法によるそれと調和的であり、かつより複雑かつ詳細な条件下の問題にも容易に適用しうることが示された。

上記以外にも、弾塑性FEMによる抑止杭等の多様な機構解析がなされている。木下他（2001）による深礎杭の事例、太田他（2003）による地すべり土塊の三次元性を考慮した事例、石井他（2004）による「くさび杭」の適用限界を把握するための一連のパラメトリック・スタディ、簡略化された二次元モデルでの解析ではあるが、地すべり鋼管杭設計要領の設計式との有用な比較がなされている山田他（2005）の事例、任意条件下での最大抑止力の把握とそれらの包含的設計チャートを指向した若井他（2006）の試みなどは、それぞれ興味深い。なお、斜面内の構造物要素のモデル化は解の信頼度に影響する。一般に杭工のモデル化には、ソリッド要素によるものと梁要素によるものがある。後者の場合には要素自体が幅の概念を有していないため、適切な抑止力評価のためには、杭幅を反映した接触面積を仮想して地盤との相互作用力を調整するなど、十分な注意が望まれる。

2.3 地下水位と間隙水圧、地下水排除工の評価

斜面の安定性評価に地下水位の考慮は重要である。一般に、要素内部の積分点における間隙水圧（応力）を等価節点力として全体系の平衡に反映する方法と、地下水位以下の土塊の浮力および透水力を直接外力として平衡計算に算入する方法とが考えられる。これらは田中他（1996）が総括している。SSRFEMでは、強度定数を漸減しながら全体系の極限平衡状態を探索するので、これらの残差力分配手続きの中に上述の節点力を追加するだけで、容易に全体安全率を得ることができる。

なお、地下水排除工の効果を評価するためには、排除工から地下水が浸透流出する（間隙水圧が低下する）挙動を再現する必要がある。あるいは、豪雨時の水位上昇を予測するためには、雨水が徐々に斜面内に浸透する過程を再現しなくてはならない。一般にこれらのために用いられるのが、FEMによる飽和-不飽和浸透流解析である。同解析においては、不飽和状態での土の透水特性を表すために、飽和状態に対する不飽和状態の透水係数の比（比透水係数）と体積含水率との関係、また、土中のサクシオンと体積含水率との関係をそれぞれ数理モデル化する手法（Van Genuchtenモデル等）が用いられる。

FEMにおける各種排水工のモデル化手法としては、排水部位の節点の圧力水頭をゼロにするなどして排水性を確保する方法（鵜飼他（1998）など）、排水パイプを一次元の浸透要素でモデル化する方法（西田他（2000）など）、排水部位の近傍要素のマクロな透水性に着目したモデル化手法（井良沢他（2002）、牧野他（2003）な

ど) 等がある。なお、斜面内の各層の透水係数を事前調査だけから適切に定めるのは難しいため、水位観測を併用しながら逆解析的に各パラメータを調整しつつ、追加対策工の効果に関する将来予測等を行うといった手続きが現実的である。

この他、降伏関数にひずみ速度依存項を有する弾粘塑性構成モデルをすべり面材料の応力ひずみ関係に採用することで、地下水位ないしは見かけの安全率の変化が地すべり地塊の運動速度に与える影響をクリープ変形的にモデル化する試みも近年始められている (例えば, Ishii *et al.* (2012))。今後の発展を期待したい。

2.4 地震地すべりの再現

地震時の変形・破壊挙動を再現するためには、地震動の増幅と繰返し载荷条件下での土の力学特性を適切に考慮できる時刻歴応答解析が望ましいが、このような要望に応える一般的な手法は、運動方程式を逐次的積分しながら系の変形を追跡する動的弾塑性FEMである (例えば, Toki *et al.* (1985), Griffiths *et al.* (1988), Woodward *et al.* (1994), Ugai *et al.* (1996), Iai *et al.* (1999), 渦岡 (2000), Wakai *et al.* (2004), 浅野他 (2006) など)。当初、弾完全塑性モデル等の単純な土の構成モデルから始められたこれらの研究は、徐々に複雑な構成モデルの適用に広げられてきた。

一方、昨今の大地震では地すべり地塊が高速かつ長距離移動して河道閉塞を生ずるなどの深刻な被害が相次いだ。このような滑動崩落の危険度を予測するには、地震前に斜面の自重を支持していた内部の土が地震動に伴う繰返し载荷で徐々に強度を失い、ついには斜面の自重を支持できなくなってしまうといった強度低下ないしひずみ軟化特性のモデル化が必要となる。

盛土や軟弱地盤等における緩い砂の液状化に伴う強度低下を対象とした解析では、負のダイレイタンスによる過剰間隙水圧上昇が有効拘束圧の低下をもたらし、結果的にせん断抵抗が失われるという有効応力モデルが構成則として用いられる (渦岡 (2000) など)。しかし、多くの自然斜面の地すべりでは、地層中の固結構造の破壊が徐々に進行することに伴う強度低下が認められ、必ずしも間隙水圧の上昇だけがひずみ軟化の主因ではない。このような場合には、全応力モデルが簡便である (若井他 (2007), Wakai *et al.* (2010))。例えば、地下水排除工による地すべりの耐震安全性の向上効果をFEMで評価する場合、液状化を主眼に置いた有効応力モデルに基づく解析では、地下水位低下があたかも地震時の土の強度低下を直接抑制する予測結果を得てしまうため、固結した土から成る斜面では、地下水排除工の効果を過大評価する恐れがあるので注意が必要である。

この他、このような個別斜面の詳細解析だけにとどまらない広域的なFEM解析の新たな可能性として、一次的な地形・地質情報をもとに、中山間地の広域的な地震応答解析を行うためのFEM解析コードを若井他 (2008)

は開発しており、これを林他 (2011) が地震地すべり危険斜面の抽出に応用している。

2.5 FEM以外の数値解析手法

FEM以外の数値解析手法としては、それぞれの力学的仮定や数値計算の特性などに応じて適用対象が異なるが、例えば、剛体要素同士が非線形バネで連結されたモデルを用いるRBSM (剛体バネモデル) およびそれを拡張した安定解析手法 (濱崎他 (2006)) や支配方程式を差分近似して全体求解する有限差分法 (FDM) に基づく解析手法 (中川他 (2008)) のように、FEMのような連続体モデルに近い解析手法のほか、構成材料の顕著な破壊・大変形挙動を指向した個別要素法 (DEM)、不連続変形法 (DDA) などの不連続体モデルの手法がある。DEMは斜面全体を球・円もしくは多面体の個別要素に分割して、要素間の接触力を考慮しながら個々の要素の剛体的な運動軌跡を予測する手法 (Nakashima *et al.* (2010)) であるのに対して、DDAはFEMと同様に接触する要素同士の剛性行列を解きながら、要素の接触部に相対変位が生ずるような不連続体としての挙動も併せて追跡するもので (例えば, 大野他 (2010))、いずれも大変形問題に有利と考えられる。

3. 地すべり地塊の運動過程の数値解析

3.1 地すべり地塊の移動範囲の予測手法の区分

2011年台風12号による2,000mm以上の豪雨による紀伊山地の山体崩壊と地すべりダムの形成 (千木良, 2012) や東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) を起因として火山堆積物地帯に長距離移動する地すべり災害 (蔡, 2011) などに見られるように大規模な土砂災害が発生している。

地すべり地塊の移動距離の予測手法に関する研究は、地すべり地塊の移動範囲に影響を与える属性要因から危険範囲を求める統計的手法と、地すべり地塊の質量保存式と運動量保存式を用いて発生域及び流下域の地形及び移動地塊の強度特性を勘案する数値解析手法に区分される。前者に比較して後者は、多種多様な地形及び地すべり特性の適用が高く、地すべり地塊の移動速度、移動深、堆積深及び移動停止条件を容易に導入できる。

地すべり地塊の移動範囲の数値解析は、解析手法の区分より以下の二つに大きく分類される。

- 1) 単一の質点系による移動範囲の解析手法
- 2) 連続系あるいは固体集合系による移動範囲の解析手法

さらに、数値解析手法の区分は一次元あるいは二次元平面による解析手法、節点格子の移動の可否によるEulerianあるいはLagrangian法の解析スキーム、内部散逸応力の評価手法による区分がなされる。ここでは、内部散逸応力の評価の分類で記述し、併せて解析手法について述べる。

3.2 単一の節点系による移動範囲の解析手法

当手法は、地すべり移動地塊を単一質点の運動方程式

を解析する手法である。この解析手法では地すべり地塊の内部変形が議論できないが、質量保存式も無く解析節点が少ないため簡単に計算時間が短い特徴がある。

芦田ら(1985)は、固体摩擦と流体摩擦による地塊の運動量保存式を用いて移動土塊が流体的挙動に遷移する現象を解析している。この解析手法は流動層の地すべり地塊内に占める割合が小さくなると流体係数が大きくなることが示されており、含水比が高い地塊は長距離移動する理論的根拠が示されている。この流動化現象を示す豪雨時の長距離移動をなす斜面崩壊について流動係数を導入し、地塊底面の動摩擦抵抗が減少する運動方程式による解析が実施されている(吉松, 1996)。数値解析は、流下斜面勾配の変化と崩土の流速の影響を考慮する必要性から最適Runge-Kutta法による一次元断面解析である。

これら質点系による移動範囲の解析手法は、移動地塊の内部応力と変形、移動地塊の領域ごとの流動深と速度が検討できないため、精度の高い面的な移動範囲の検討は不十分である。現在、面的な移動範囲、移動時の地塊各部における変形特性及び発生機構を検討する必要性から連続系による移動範囲の解析手法が主流を占めている。

3.3 連続系あるいは固体集合系による移動範囲の解析手法

連続系の解析手法は、質量保存と力の釣り合い条件による運動量保存のNavier-Stokes式が基本として用いられる(Hungr, 1995)。当手法は、支配方程式について数値計算を行い移動範囲の解析を行う手法で、一般に洪水氾濫あるいは土石流氾濫などの流体解析でよく用いられている。地すべり地塊の広域の移動範囲を解析する場合、三次元解析は大規模の計算機容量及び長時間の計算が必要とされることから、鉛直方向の移動特性の影響は、流下方向の移動特性に比較して無視できると仮定された支配方程式が用いられる。すなわち、積分範囲が変数の場合の積分公式であるLeibnizの定理を用いて運動地塊の底面から表面まで積分を行い、深度方向に平均化した移流方程式が用いられる(Iverson *et al.*, 2001)。

この支配方程式は、通常、移動深及び流速の解析諸量の時間項、移流項、重力に起因する駆動力項、間隙水の水圧力項、運動方向とその横方向の内部散逸応力項、運動地塊の底面抵抗力項を介在する。斜面土砂災害の移動現象は多種多様の運動様式を示すが、この移動範囲の予測には移動現象の特徴に応じた内部散逸応力及び底面抵抗力の評価が極めて重要である(Iverson *et al.*, 2001)。

一方、特に粘性の高い斜面移動現象において、一次元断面で移動地塊全領域の変形に関する研究もなされている。Hunt(1995)は、時間項を含まないNavier-Stokes式にNewtonian流体の抵抗力を内部散逸応力として、底面抵抗力として鉛直応力に比例する摩擦力を設定している。数値解析は摂動法による一次元断面の解析である。

この連続系による移動範囲の解析手法は、土石流の現象などのように流体の挙動が卓越する場合は乱流に由来

する拡散項が付記されるが、地すべり地塊の移動範囲の支配方程式は、拡散項を含まない移流方程式で表される。高速の流速を有する移流項が介在する数値解析では、増幅誤差及び位相誤差により数値振動が発生する(藤井, 1995; 棚橋, 1999)。このため人為的な粘性項の導入や現地試験より得られる物理定数が導入できないなど精度が低く安定性の悪い数値解析が行われる可能性がある。このため長距離移動する地すべり地塊の構成式の検討と同様に数値解析スキームの十分なる検討も必要である。

さて、この内部散逸応力及び底面抵抗力の評価手法としてこれまで以下の手法が提案されている。

(1) Coulomb理論による内部散逸応力及び底面抵抗力の評価

内部散逸応力の評価は、Savage *et al.*(1989)の先駆的研究によって岩屑流及び雪崩の移動範囲を検討するために提案され、Mohr-Coulomb理論による破壊時の応力を用いて評価されている。支配方程式の構築は、固体摩擦流れの連続性より求められるNavier-Stokes式、あるいは深度方向に平均化した非線形の浅水長波(Saint Venant式)が用いられる。解析手法は、数値振動を制御するため有限差分法の離散化スキームにより、移動格子のLagrangian法と固定格子のMacComackの陰的Eulerian法によって数値解析が実施され、粒状体流れの傾斜模型実験の比較では、Lagrangian法の解析結果が良好であることが述べられている。Norem *et al.*(1990)は、二次元断面であるが底面抵抗にCoulomb摩擦力とBingham流体抵抗力を組み合わせ、Savage *et al.*(1989)が用いたLagrangian法を適用して海底地すべりの流動範囲の数値解析を実施している。Savage *et al.*(1989)の解析手法は、岩屑や雪崩の移動範囲の解析手法として提案されたものであるが、海底地すべりへの適用の比較においては密な流れの上部境界層のせん断応力の評価が極めて重要であることが示されている。Chen *et al.*(2000)は、このMohr-Coulomb理論による内部散逸応力及び底面抵抗力を鉛直応力に比例する摩擦力で評価し、質量の保存性を高めるためLagrangian Galerkin型有限要素法による解析手法を提案した。流状体流れの模型実験及び香港における道路に沿う急傾斜の崩土による移動範囲と比較を行い、当内部散逸応力の評価手法で精度の高い移動範囲の予測ができたことを報告している。しかしながら、地すべり地塊が堆積する領域では要素網が変形し、解析精度が低下するため解析値のスムージング化を行うなど数値計算に苦慮している。解析スキームとしてのLagrangian法は、地すべり地塊の移動に伴い要素節点も移動するので質量の保存性が高く、移流項に起因する数値振動も小さいが、解析要素網の再構築などの操作や長時間の計算が必要であるなど経済的負担が大きい。

この要素網の変形に伴う解析精度の低下を克服するため、時間項に関してEulerの後退差分を用いるEulerian-Lagrangian有限要素法による2次元断面、3次元の流動

解析も実施されている (Crosta *et al.*, 2001)。応力の構成式則は弾塑性モデルで、内部散逸応力の評価はMohr-Coulomb, Druger-Plager, あるいはvon Misesの破壊基準が用いられている。

Iverson *et al.* (2001) は、固体と流体の混合流れの内部散逸応力としてCoulomb理論を適用して構造格子で地すべり移動範囲の解析を実施した。当解析は、移動地塊の粒子と間隙水の混合体を一緒に取り扱うモデル (Coulomb混合モデル) を用いて、土塊破壊条件より水平応力を算出し、この応力より地すべり移動地塊の内部散逸応力を評価するとともに鉛直応力に比例する底面の摩擦力を考慮している。解析は質量保存性を確保するため固定格子の有限体積法で離散化を行い、移流項に起因する数値振動は衝撃波を捕捉し、多次元方向の地形影響の強い領域では数値振動の抑止効果が高いRiemann法で解析されている。Denlinger (2007) は、CaliforniaのMerced川で発生した地すべりダムを形成したFerguson岩盤すべりに当解析手法を適用した。この手法の提案によって数値振動が少なく精度の高い地すべり地塊の移動範囲の実用的な解析手法が確立したと言える。

張ら (2004), 吉松ら (2005) の手法も同様に移動時の内部散逸応力としてCoulomb混合モデルを適用しており、宮本 (2002) によって提案された地すべり移動地塊のフラックス値の反転によって地すべり移動地塊が傾斜面で停止する条件を導入した解析を実施している。なお、張ら (2004) の解析手法は、固定格子のEulerian法による有限差分法により離散化を行い、質量保存性を確保するために各要素内で質量の保存計算を行っている。移流項に起因する数値振動防止は三次精度の風上差分を行い、Denlinger *et al.* (2001) が実施した乾燥粒子流の模型実験との比較において数値計算結果がより高精度であったと報告している。吉松ら (2005) の手法は、空間諸量 (深度, 流速) について高解像度の解析をなすため、解析領域内の分布を三次関数の内挿関数で表現する固定格子のEulerian法のスキームによるCIVA-有限要素法で解析するものである。質量保存性の確保は内挿関数の拘束条件に課すとともに、移流項に起因する数値振動の抑制は、支配方程式の残差に比例する衝撃捕捉項の付加による解析スキームを用いている。

Iverson *et al.* (2001) は、流体の影響を流動地塊層の中へ組み入れたCoulomb混合モデルを用いたが、Pitman *et al.* (2005) は更にこの理論を発展させた粒状層の薄層と間隙流体の二層系流体モデルを考え、その相互作用は流速に従属する応力で評価する解析手法を提案した。数値解析は、一次元の非保存系表示の双曲型方程式を固有値法で実施している。

現実的な曲線状の流路に沿って流下する高速移動地塊の解析手法についてPudasaini *et al.* (2005) は、Savage *et al.* (1989) のCoulomb理論による内部散逸応力の評価手法を発展させ、流体混合の斜面地塊が平面曲線水路を

流下する解析手法を提案している。数値解析は、大きな値の移流項を含む非線形の変曲型方程式を解く必要があることより、中央差分法による高解像度の衝撃捕捉スキームであるTVD手法と制限関数を適用している。

種々の解析スキームの観点から記述すると、Mangency *et al.* (2005) は、乾燥粒子流についてSavage *et al.* (1989) 理論を適用し、静水圧、均一層の内部応力及び鉛直応力と流速に比例する摩擦力による条件でLagrangianスキームにより移動範囲の解析を実施した (SHWCINモデル)。Pirulli (2007) は、SHWCINモデルを基本として、不均質な内部応力、任意形の非構造格子スキームを用いる有限体積法で移動範囲の数値解析を実施している (RASH 3 Dモデル)。

以上のようにCoulomb混合モデルを用いて内部散逸応力の評価を行う地すべり地塊の移動予測の解析については、火山地帯の大規模地すべり移動範囲の解析で衝撃波を捕捉するPitman *et al.* (2003) のTITAN 2 Dモデル (Riemann法に類するGodunovスキーム)、乾燥粒子流の移動についてLagrangian有限体積法で解析したWieland *et al.* (1999) の事例に見られるように多くの研究がなされている。解析手法として2000年以降になると解析要素網の再構築の煩雑さを避けるため、固定格子のEulerian法による質量保存性の確保のため有限体積法が主流となっている。また、移流項に起因する数値振動を防止する主な手法としてRiemann解法及びTVDスキームが適用されている。Castelnun *et al.* (2003) も、Savage *et al.* (1989) の提案した内部散逸応力の考え方をういたSaint-Venant式を適用し、質量の保存性を確保するため衝撃捕捉及び制限関数を適用した有限体積法で解析を実施している。

さらに、運動時の流路勾配の要因による応力変化や各種の内部散逸応力について勘案可能な解析手法も提案されている。McDougall *et al.* (2004) は、内部散逸応力としてCoulomb理論を適用するが、移動地塊時の応力はひずみに影響を受けると考え、ひずみ増分量の応力を付加して粒子法の離散化スキームを用いて解析を行っている。粒子法を用いた理由は、三次元の複雑な地形を考慮できること、摩擦力を通して生じるひずみによる不均質な内部応力の評価が可能なこと、移動地塊の拘束が可能なこと、摩擦抵抗あるいはレオロジーなどの多様な運動モデルを選択できること、メッシュレスの解析手法であることより解析要素の変形がないことを挙げている。Favreau *et al.* (2010) は、地すべり移動地塊の流下断面の凹凸の影響を勘案するためMangency *et al.* (2005) が用いているCoulomb摩擦力によるSaint-Venant式を解析した (SHLTOPモデル)。地震の影響は、地震伝播モデルによる地盤表面の計算応力として境界条件で解析に導入されている。数値解析は、数値震動防止のため衝撃捕捉項の役割をなす数値フラックスを調整する有限体積法により実施されている。

このように地すべり地塊の高速で長距離移動する現象の内部散逸応力にCoulomb混合モデル, 及び底面抵抗力として鉛直力に比例する摩擦力を適用する数値解析事例が多い。

一方, 従来のCoulomb混合モデルは, 地すべり地塊が運動初期よりMohr-Coulomb理論の破壊条件により岩屑化し, 地すべり現象が一体の剛体として移動する現象と相違するとして, 移動による流動化が遷移的に考慮される解析手法が武蔵ら(2011)によって検討されている。当解析手法は移動地塊を粒状要素の集合として, その要素間に間隙バネを配置し連続体から不連続体まで解析が可能な拡張個別要素法(DEM)を適用している。移動地塊の内部散逸応力はこの間隙バネによって勘案されるが, このパラメータの設定が今後の課題であると報告している。底面抵抗力は, 間隙水圧を考慮した鉛直応力に比例する摩擦力が適用されるが, 岩屑化した粒子の形状に起因した抵抗を発揮させるため複数の円形粒子を剛結した工夫がなされている。数値解析は鉛直二次元断面での解析である。なお, 同様に運動地塊のMohr-Coulomb理論の破壊条件を適用して, 連続体力学の離散化条件で剛体から岩屑流へ流動化する遷移現象の数値解析手法が吉松ら(2012)によって提案されている。解析手法は, 二次元平面領域のCIVA-安定化有限要素法である。これら研究によって一連の遷移形態を有する地すべり解析が実用の段階に達したと言える。

(2) 粘性レオロジー理論による内部散逸応力と底面抵抗力の評価

粘性レオロジー理論によって内部散逸応力と底面抵抗力を評価する解析手法も研究されている。Hunger(1995)は, 高速の移動をなす地すべりは流動化した基盤層状の比較的粘性の高い薄層を伴う剛体運動であると考え, 底面抵抗力としてPlastic流れ, Friction流れ, Newtonian層流れ, Turbulent流れ, Bingham流れ, Coulomb粘性流れ及びVoellmy式の抵抗力を設定して, 多数のブロック集合体の相互作用をLagrangian法を用いて検討している(DANモデル)。当解析では水平方向の拘束として最大流動深に対する形状関数を導入し, 流下する流路断面の影響も考慮されている。内部散逸応力の評価は, Rankineの土圧係数を運動中のひずみに増減比例させて主働, 受働時の水平応力として設定されている。このブロック集合体流れの現地適用性を高めるため, Tinti *et al.*(1997)は, 流体の抵抗としてReynold数による乱流抵抗力を導入した解析手法を検討している。Miao *et al.*(2001)も実際の地すべり斜面の移動解析を通して, 極限平衡状態の地すべり開始から地すべり運動時の評価及び堆積範囲の予測が可能であることを報告している。

既往のDANモデルはブロック集合体の幅が一定と仮定している。流下幅が変化する場合, 誤差を抑えるために, その幅の変化を設定する必要がある。また, 流下時の地すべりの抵抗力は流下水路底面のみに作用し, 水

路側面の湿潤領域には作用しないと設定されているなど現実地すべりの適用には課題が存在する。Kwan *et al.*(2006)は, これら課題を改良したブロック集合体モデル(DMMモデル)を提案している。

一方, これらDANモデルの運動方程式は, いずれも力の釣り合い条件より構築されたものである。Wang *et al.*(2010)は, 既往のDANモデルの解析ではブロックの相互作用の内部応力やモデルに使用するパラメータに不確実性があるとして, 新しく内部散逸エネルギーの保存則によって運動量に関する支配方程式を構築した。流下に伴う地すべり地塊の高さの変化量は, 位置エネルギー及び変形によるポテンシャルエネルギーの変化より評価されており, 平面状のダム破壊問題のベンチマーク解析との比較より提案手法が精度の高い手法であることが示されている。数値解析は, オリジナルなDANモデルと同様にLagrangianスキームによる有限差分法である。

なお, 同様にブロック集合体モデルとして斜面上の土砂地塊の運動を解析している研究事例を紹介する。里深ら(2003)は, 山腹崩壊の土砂の流出現象において強度の強い(不飽和の部分)地塊はブロック状の土塊となって活動するとして, 六角形円柱のブロックの密な集合体を設定した。内部散逸応力は, 円柱間に作用する引力(or斥力)及び円柱間に働くせん断応力を, 底面抵抗力は, 鉛直応力に比例する摩擦力が設定されている。円柱間に作用するせん断力は, それぞれの円柱間の相対速度値によって評価されている。数値解析は差分法により実施されている。若井ら(2004)は, 崖崩れ災害の移動現象を再現するために個別要素法(DEM)による二次元断面解析を行っている。内部散逸応力は相対速度に比例する粘性応力などのDEM要素間の接触応力として評価されている。これらブロック集合体による移動範囲の解析は, ブロックの形状及び使用個数によって内部散逸応力が変化するため適切な設定手法の確立が望まれる。

Sousa *et al.*(1991)は, 高速で長距離移動する崩土は層構造が無く移動時の相互作用によって攪乱した状態で流下するとして, 内部散逸応力としてNewtonian及びBinghamの粘性抵抗力による評価を行い, 非圧縮性の層状粘性流体として二段階の陽的有限差分法で御岳などの岩屑流の移動範囲の解析を行っている。第一段階では一時的にタイムステップ前の流速, 圧力条件を陽的差分法で求め, 第二段階で支配方程式を満足するように修正されるMarker and Cell法で数値解析が実施されている。

Quecedo *et al.*(2004)は, Savage *et al.*(1991)らが報告したように地すべり移動地塊が流下する斜面は凹凸があり, 平滑な斜面は少なく凹部形状で斜面の鉛直応力が増加する現象について曲線座標系で解析する手法を提案した。支配方程式はIverson *et al.*(2001)が用いた深度方向に平均化したNavier-Stokes式であり, レオロジーモデルによる内部散逸応力もこの深度方向に評価すべきであるとして, プラグ流れの状態における深度方向に

平均化した応力テンソルと圧力の関数として評価する解析手法を提案している。レオロジーモデルは、流体レオロジー、Newtonian流体、Visco-plastic流体、Frictional流体の各レオロジーモデルが考察されている。数値解析は、数値振動防止のため時間項の二次精度を図ったTwo-Step Taylor Galerkin法のアルゴリズムによる有限要素法で、移動境界に特別な処理を必要としない解析手法であることが報告されている。Obrien *et al.*(1993) は、高濃度の固体流れのせん断応力としてBinghamモデルを基本として複雑な応力状態を評価するため、三次関数表示のレオロジーモデルを導入した解析手法 (FLO-2 Dモデル) を提案している。Medina *et al.*(2008) は、非水圧条件の流動層における圧力項の修正と数値不安定性の課題を克服するためにVoellmyモデルによる内部せん断力と、鉛直応力に比例する摩擦力を考慮した解析手法 (FLATモデル) を提案している。本手法では、Reimann解法 (有限体積法における各要素の節点辺の中央点において数値フラックスによる数値振動を抑制するEulerianスキーム) により数値振動を抑制している。さらに、流速の関数として表現されるせん断応力に起因する底面洗掘による流路変動も考慮されている。また、各解析セルの時間ステップごとの移動状況、斜面勾配と地塊の摩擦角との比較により斜面上の運動、停止を解析しており、この評価は、実際の地すべりの堆積領域において著しい解析精度の改善が見られたと報告している。

Pirulli *et al.*(2008) は、摩擦型、Voellmy型、粘性三次表示レオロジー型による内部散逸応力と速度の関数の底面摩擦力を評価して三角形要素のEulerian有限体積法を提案した (RASH 3 Dモデル)。なお、Haddad *et al.*(2010) によって内部散逸応力の評価は、単純な評価が好ましいとしてBinghamモデルによる評価を行い、粒子法による解析手法も提案されている。これら解析手法の提案によってレオロジー挙動をなす地すべりの移動範囲の予測解析が確立したと言える。

一方、微小な変形現象の解析事例として、粘弾性レオロジーモデルを用いたクリープ的な挙動をなす地すべりの解析について、Forlati *et al.*(2001) が有限要素法を用いて大規模の岩盤地すべりについて解析を実施している。解析中のパラメータ値は一定として、支配方程式は、内部応力と外部応力が平衡する解析式である。急速な運動を取り扱う移流項が存在しないため、この解析ではタイムステップごとの変形量による不平衡応力の再配分を繰り返して計算によって求める手法が用いられている。

(3) 土圧係数による内部散逸応力の評価

土圧係数による水平土圧を評価し、鉛直応力とこの水平土圧より内部散逸応力を評価する手法として、Hutter *et al.*(1991) は、間隙水圧に関係しないRankine土圧による内部散逸応力を評価するLagrangian有限差分法による解析手法を提案した。またHunger *et al.*(1995) も同様にRankineの土圧係数による解析手法を検討している。

Sassa (1989) は、移動地塊の内部摩擦角に従属する関数式で評価する土圧係数による解析手法を用いている。底面抵抗力は、間隙水圧を考慮した鉛直応力に比例した摩擦力が設定されている。当手法は、平面2次元領域の移動範囲の数値解析に関する先駆的な研究であり、陽的有限差分法により解析がなされている。また、Sassa *et al.*(2010) は、当手法の重力加速度項に地震加速度を導入し、地震を起因とする地すべりの長距離移動現象の数値解析手法も提案している。汪ら (2004) は、長距離移動する地すべり土塊の流動化メカニズムとして粒子破碎による見かけの摩擦係数変化モデルを当手法に導入し、秋田県澄川地すべり、福島県裨返地すべりを数値解析し、良好な堆積範囲が予測できたことを報告している。

(4) 土質強度の構成則による内部散逸応力の評価

Forlati *et al.*(2001) の解析事例に見られるように、弾塑性構成則より求められるひずみの進行による不平衡応力の繰り返し再配分計算によって地すべり地塊の微小変形の数値解析は、有限要素法でよく実施される (日本地すべり学会編, 2006)。

一方、Crosta *et al.*(2009) は、内部散逸応力について弾塑性応力の評価としてMohr-Coulomb及びDrucker-Pragerの降伏理論を用いる地すべり地塊の大変形の移動解析を実施した。既往の有限要素法に見られる要素網の変形による解析精度の低下を防止するために、Euler法の後退時間ステップスキームと移流項の数値振動を防止するため流線方向の重み付け内挿関数を用いるStreamline Upwind Petrov Galerkin法 (SUPG法) のEulerian-Lagrangian有限要素法による解析手法を提案している。なお、土塊強度の構成則の適用ではないが、SUPG法の有限要素法を適用したCoulomb混合モデルによる内部散逸応力を評価した解析事例は吉松ら (2004) が検討している。

阿部ら (2005, 2007) は、地塊の構成則を用いて高速長距離移動する土砂運動を粒子法に属するMaterial Point Method (MPM) によって解析を実施している。MPM法は連続体の支配方程式、すなわち質量、運動量、角運動量及びエネルギーの保存則を弱形式化し、その式をLagrange粒子及び内挿関数によって離散化して解析する。このため要素を全く用いないことより大変形時でも計算の破綻がなく、粒子を用いて完全Lagrange法で移流計算をするために数値発散が発生しにくい特徴がある。また、当手法は乾燥粒子流の解析においてSavage *et al.*(1989) が提案したMohr-Coulombモデルの応力を用い、宮城県築館地すべりの解析においてはHungr (1995) のDANモデルを適用するなど汎用性が高い解析手法である。さらに、当手法は剛体と弾性体の移動解析が可能な手法であることも報告されている。当手法は剛体から流動体への遷移現象が解析可能なことを示した先駆的な解析手法である。

(5) 粒子の非弾性衝突力による内部散逸応力の評価

当解析モデルは、斜面上の乾燥粒子流れでは間隙流体が無視できるので、流動に伴う内部散逸応力が粒子の非弾性衝突の応力によって評価できると考える解析手法であり、道上ら（1998）、宮本（2002）によって提案された。内部散逸応力の評価は、土石流の汜濫解析において使用される構成則で粒子の非弾性衝突により生じる濃度の関数式で表現されるせん断応力を用いる。数値解析は、水深方向に平均化されたNavier-Stokes式を用い、節点の配置は、Staggered格子、時間ステップがLeap-Frog法による陽的有限差分法である。当手法は解析中のフラックスの反転をもって斜面上の地塊が停止する条件が導入されており、斜面地塊が斜面上に停止残留する解析が実施できる手法で極めて実用性の高い解析手法である。

4. 技術的課題

地すべりの用語には、「すべり」という運動様式を示す語句が含まれており、運動の開始初期より運動の停止期までの力学現象や運動形態を調査・研究する上で、数値解析手法は有用である。停止状態の斜面安定も含めて、活動初期の応力状態から急激な運動をなす種々の運動様式を数値解析によって究明するには、力の釣り合い条件より得られる運動量保存式あるいは内部散逸エネルギーの保存式の支配方程式を解くことが基本となる。

このため数値解析の調査・研究における課題は以下の技術的な事項に集約される。

- 1) 活動の停止状態も含めて種々の地すべり運動様式を高精度に解析するため地すべり地塊の推力とその抵抗力及び内部散逸応力を表現する支配方程式の開発導入
- 2) 広域の長時間の解析及び落石から流動に至る種々の運動様式について数値解析が可能な離散化手法の開発導入
- 3) 数値解析に用いる、運動様式及びその様相の遷移変化に対応する地盤物性に関する構成式の開発導入

第一項の支配方程式の開発導入に関しては、地すべり発生機構において、すべり面、あるいはひずみの集中により漸次形成されるすべり面の力学的評価が重要であり、数値解析は、静的な極限平衡法と同等の解析が現在可能である。さらに、すべり面における変形に伴う強度低減特性も勘案できるようになって、「すべり」の運動様式を評価できるようになってきている。

運動過程の分野では、緩速から急速に至る種々の運動様式について、運動の抵抗力である散逸応力の評価モデルが種々提案され、単一な運動様式の斜面移動現象について運動範囲などの解析が可能となっている。

さて、斜面安定の評価では、ほぼ静的な釣り合い条件による数値解析が行われるために、運動速度に関連する内部散逸応力、地形条件の変化に関連する応力及び移動に伴う削剥現象を考慮する必要がない。このため変形か

ら破壊の遷移過程や、斜面内の対策構造物との連成解析が可能な支配方程式が用いられ、数値解析手法は地すべり災害の軽減に寄与している。しかしながら、初期条件は、応力解析でありながら自重のみによる初期応力状態より開始されている。既往の地すべり運動に由来する偏応力、あるいは現在の斜面形成の応力状態が反映されていない。これら応力評価について調査・観測は極めて困難であるが、数値解析では変形解析が実施でき、変形計測を背景に逆解析などを通して実際の地すべり斜面の応力状態に呼応した支配方程式の調査・研究が可能であり、斜面の初期応力の評価が技術的課題として残されている。

運動過程の解析では、実際の地すべりの観測データが少なく、運動速度に依存する精度の高い内部散逸応力、地形変化に呼応する応力及び削剥現象を導入した支配方程式の開発導入が残されている。

第二項の離散化手法については、斜面の安定性評価は、土塊強度の構成式によって応力場とひずみ場に関連づけて解析されるが、ひずみは解析領域の要素網区分の疎密に影響される。特にすべり面は、移動地塊の厚さに比して極めて薄いためすべり面の構成則である弾完全塑性体などのモデルを高精度に評価する離散化手法及び適用基準の開発が残されている。

移動解析においては、質量保存式と運動量保存式の移流項に起因する数値安定性を確保するため、高精度及び高解像度の離散化手法が永遠の課題として残されている。既に飛散現象に対応する離散化手法として粒子法が提案されているが、広域及び高速な経済的手法の開発が残された課題である。

第三項においては、数値解析の結果は用いた地盤物性値の精度に影響される。斜面発生機構、あるいは運動過程の解析分野に関わらず適切な地盤物性値を用いることが極めて重要である。特に、運動と供に変化する各種の地盤物性の非線形特性を考慮した構成式の確立が必要である。さらに地すべり災害の危険範囲などを高精度に予知・予測するために、支配方程式に介在する内部散逸力項に用いられる地盤物性値の設定手法の開発が残された重要な課題である。

5. あとがき

最近、2011年紀伊半島及び東北地方太平洋沖地震において大規模の想定外とされる斜面土砂災害が発生している。これら斜面土砂災害は地すべりから岩屑流あるいは土石流へと輻輳的な運動様式を呈する。この斜面土砂災害の防止軽減の対策実施には発生位置の斜面の安定性及び流下危険範囲の予知・評価が必須事項である。これまで、静的あるいは動的な斜面安定性の評価、斜面对策工の設計及び効果評価、地すべり移動地塊の危険範囲に対する警戒避難対策などに関して多くの数値解析手法が検討提案され、各種分野における個々の課題についてはその有用性と効果が発揮されている。

数値解析手法は、斜面土砂災害を軽減・防止する検討において強力な道具・手段である。道具・手段は使用・利用してその効用が発揮、理解されることより、地すべり学会誌などにおいて数値解析道具として利便性あるいは改良性について盛んなる論議がなされることを期待している。

引用文献

- 阿部慶太, Johansson, J. 小長井一男 (2005): MPMを用いた乾燥砂の流動解析, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, pp. 1-10.
- 阿部慶太, Johansson, J. 小長井一男 (2007): MPMを応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法, 土木学会論文集C, Vol. 63, No. 1, pp. 93-109.
- 浅野志穂, 落合博貴, 黒川潮, 岡田康彦 (2006): 山地における地震動の地形効果と斜面崩壊への影響, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 6, pp. 457-466.
- 芦田和男, 江頭進治, 神矢 弘, 佐々木浩 (1985): 斜面における土塊の抵抗則と移動速度, 京大防災研究所年報, 第28号B-2, pp. 1-11.
- Cai, F. and Ugai, K. (2000): Numerical analysis of the stability of a slope reinforced with piles, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 1, pp. 73-84.
- 蔡飛・鶴飼恵三 (2003): アンカー工による斜面補強効果—極限平衡法と弾塑性FEMの比較, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 4, pp. 8-14.
- 蔡飛 (2011): 東日本大震災に伴う斜面災害, 平成23年度(社)日本地すべり学会関東支部シンポジウム概要集, pp. 29-32.
- Castelnau, A. M., Vilotte, J. -P., Bristeau, M. O., Perthame and Bouchut, F. (2003): Numerical modeling of avalanches based on Saint Venant equations using a kinetic scheme, Jour. of Geophys. Res., Vol. 108, No. B11, pp. 9.1-9.18.
- Chen, H. and Lee, C. F. (2000): Numerical simulation of debris flows, Jour. Can. Geotech. Vol. 37, pp. 146-160.
- 千木良雅弘 (2012): 台風12号による深層崩壊発生場, 平成24年度(一財)砂防・地すべり技術センター講演会講演概要集, pp. 3-13.
- Crosta, G. B., Imposimato, S. and Roddeman, D. (2009): Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris - avalanches, Engineering Geology, Vol. 109, pp. 135-145.
- Crosta, G. B., Calvetti, F., Imposimato, S., Roddeman, D., Frattini, P. and Agliardi, F. (2001): Granular flows and numerical modelling of landslides, Debrisfall assessment in Mountain Catchments for Local End-Users, Contract EVG1-CT-1999-00007, p 71.
- Denlinger, R. P. (2007): Simulation of potential runout and deposition of the Ferguson rockslide, Merced River Canyon, California, USGS. Open File Report 2007-1275, pp. 1-21.
- Delinger, R. P. and Iverson, R. M. (2001): Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical predictions and experimental test, Jour. of Geophys. Res., Vol. 106, No. B1, pp. 553-566.
- Favreau, P., Mangwency, A., Lucas, A., Crosra, G. and Bouchut, F. (2010): Numerical modelling of landslide, Geophys. Res. Letters, Vol. 37, pp. 1-5.
- Forlati, F., Gioda, G. and Scavia, C. (2001): Finite element analysis of a deep-seated slope deformation, Rock Mech. Engng, Vol. 32, No. 2, pp. 135-159.
- 藤井孝藏 (1995): 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, 234 p.
- Griffiths, D. V. and Prevost, J. N. (1988): Two- and three-dimensional dynamic finite element analyses of the Long Valley Dam, Geotechnique, Vol. 38, No. 3, pp. 367-388.
- Haddad, B., Pastor, M., Palacios, D. and Munoz-Salinas, E. (2010): A SPH depth integrated model for Popocatepetl 2001 lahar (Mexico): Sensitivity analysis and runout simulation, Engineering Geology, Vol. 114, pp. 312-329.
- 濱崎英作・竹内則雄・大西有三 (2006): 三次元斜面安定問題に対する簡易離散化極限解析法の開発, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 9-17.
- 林一成, 若井明彦, 田中頼博, 阿部真郎 (2011): 地形・地質解析と有限要素解析システムを用いた地震時の地すべり危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 48, No. 1, pp. 1-11.
- Hungr, O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches, Jour. Can. Geotech. Vol. 32, pp. 610-623.
- Hunt, B. (1995): Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches, ASCE, Jour. Hydro. Engng. Vol. 120, No. 12, pp. 1350-1362.
- Hutter, K. and Koch, T. (1991): Motion granular avalanche in an exponentially curved chute: experiments and theoretical prediction, Phil. Trans. Royal A: Vol. 334, pp. 93-138.
- 井沢道屋・南雲政博・大川滋 (2002): 三次元シミュレーション解析を用いた地下水排除工の定量的効果判定, 日本地すべり学会誌, Vol. 39, No. 2, pp. 224-234.
- Iai, S., Ichii, K., Sato, Y. and Kuwajima, R. (1999): Earthquake response analysis of a high embankment on an existing hill slope, 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp. 697-702, Lisboa, Portugal.
- 石井靖雄・藤澤和範・西本春男・倉岡千郎・太田敬一 (2004): 有限要素解析によるくさび杭の設計式の適用範囲の検討, 第43回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 423-424.
- Ishii, Y., Ota, K., and Kuraoka, S. (2012): Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide, Landslides, Vol. 9, No. 3, pp. 335-348.
- Iverson, R. M. and Denlinger, R. P. (2001): Flow of variable fluidized granular mass across three-dimensional terrain, 1. Coulomb mixture theory, Jour. Geophys. Vol. 106, Res. No. B1, pp. 537-552.
- 地盤工学会編 (2003): 弾塑性有限要素法をつかう, 地盤技術者のためのFEMシリーズ③, 地盤工学会.
- 地盤工学会編 (2006): 斜面の安定・変形解析入門—基礎から実例まで—, 地盤工学会.
- 木下慎逸・田中比月・酒井哲哉・吉松弘行 (2001): 地すべりに関する深礎杭の3次元解析事例, 日本地すべり学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 108-115.
- Kwan, J. S. H. and Sun, H. W. (2006): A improved landslide mobility model, Jour. Can. Geotech. Vol. 43, pp. 531-539.
- Lane, P. A. and Griffiths, D. V. (2000): Assessment of stability of slopes under drawdown conditions, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, Vol. 126, No. 5, pp. 443-450.
- Mangency, A., Bouchut, F., Vilotte, J. P., Lajeunesse, E. and Aubertin, A. (2005): On the Saint-Venant equations to simulate the spreading of a granular mass, Jour. Geophys. Res. Vol. 110, B09103, pp. 1-17.
- 牧野孝久・倉岡千郎・鶴飼恵三・若井明彦・蔡飛・角田信吉 (2003): 生須地すべりに関する集水井工の3次元有限要素浸透流解析, 第42回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 135-138.
- Manzari, M. T. and Nour, M. A. (2000): Significance of soil dilatancy in slope stability analysis, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 75-80.
- McDougall, S. and Hungr, O. (2004): A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain, Jour. Can. Geotech. Vol. 41, pp. 1084-1097.
- Medina, V., Hurlimann, M. and Batemann, A. (2008): Application of FLATModel, a 2D finite volume code to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula, Landslides, Vol. 5, pp. 127-142.
- Miao, T., Liu, Z., Niu, Y. and Ma, C. (2001): A sliding block model of the runout prediction of high-speed landslides, Jour. Can. Geotech. Vol. 38, No. 2, pp. 217-225.

- 道上正規, 宮本邦明, 片嶋啓介, 植村慎 (1998): 土塊の運動機構と一次元数値計算法, 水工学論文集, 第42巻, pp. 925-930.
- 宮本邦明 (2002): 土塊の運動の二次元シミュレーション, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 2, pp. 5-13.
- Murakami, A., Wakai, A. and Fujisawa, K. (2010): Numerical methods, Part II Soils and Foundations-Past, Present and Future, Soils and Foundations, Vol. 50, No. 6 [Jubilee Issue], pp. 877-892.
- 武蔵由育, 山崎美穂, 水山高久, 小杉賢一朗 (2011): 崩壊土砂の運動のシミュレーション手法に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 3, pp. 37-45.
- 中川光雄, 山田正雄 (2008): 有限差分法・大変位解析による地すべりシミュレーションの適用性, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 6, pp. 377-384.
- Nakashima, Y., Kuraoka, S. and Hata, Y. (2010): A numerical analysis of slope failure in welded tuff caused by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, Prof. Symposium, INTER-PREVENT, pp. 596-603.
- 日本地すべり学会編 (2006): 有限要素法による地すべり解析, 対策工の合理的な設計に向けて, 山海堂, 131p.
- 西田憲司・山上拓男・蔣景彩 (2000): 三次元有限要素法に基づく排水ボーリング効果の定量的評価法, 日本地すべり学会誌, Vol. 37, No. 3, pp. 1-9.
- Norem, H., Locat, J. and Schieldrop, B. (1990): An approach to the physical and the modelling of submarine flowslides, Marine Geotech. Vol. 9, pp. 93-111.
- O'Brien, J. S., and Julian, P. Y. (1993): Two-dimensional water flood and mudflow simulation, Jour. Hydro. Engng., Vol. 119, No. 2, pp. 244-261.
- 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏 (2010): 地震時大規模地すべりの発生機構-荒砥沢地すべりを例として, 日本地すべり学会誌, Vol. 47, No. 2, pp. 84-90.
- 太田敬一・倉岡千郎 (2003): 二次元安定計算に基づいて設計された杭工の有限要素法による検証, 第42回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 197-200.
- 大塚悟・宮田善郁・池本宏文・岩部司 (2001): 剛塑性有限要素法による斜面安定解析, 日本地すべり学会誌, Vol. 38, No. 3, pp. 75-83.
- Pitman, E. B. and Le, L. (2005): A two-fluid model for avalanche and debris flows, Phil. Trans. Royal Soc. A Vol. 363, pp. 1573-1601.
- Pitman, E. B., Nichita, C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M., Bursik, M. (2003): Computing granular avalanches and landslides, Physics of Fluids, Vol. 15, No. 12, pp. 3638-3646.
- Pirulli, M., Bristeau, M. O., Mangeney, A. and Scavia, C. (2007): The effect of the earth pressure coefficients on the runoff of granular material, Environmental Modeling & software, Vol. 22, pp. 1437-1454.
- Pirulli, M. and Mangeney, A. (2008): Result of back-analysis of the propagation of rock avalanches as a function of the assumed rheology, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 41, No. 1, pp. 59-84.
- Pudasaini, S. P., Wang, Y. and Hutter, K. (2005): Rapid motion of free-surface avalanches down curved and twisted channels and their simulation, Phil. Trans. Royal A : Vol. 363, pp. 1551-1571.
- Quecedo, M., Pastor, M., Herreros, M. I., and Fernandez Merodo (2004): Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method, Int. Jour. Numer. Meth. Engng., Vol. 59, pp. 755-794.
- Sassa, K. (1989): Geotechnical model for the motion of landslides (Special lecture), Proc. 5th Inter. Symp. On landslides, Vol. 1, pp. 37-56.
- Sassa, K., Nagai, O., Solidum, R., Yamazaki, Y. and Ohta, H. (2010): An integration model simulation the initiation and motion of earthquake and rain induced landslides and its application to the 2006 Lyte landslide, Landslides, Vol. 7, Issue 3, pp. 219-236.
- 里深好文, 高橋 保 (2003): 斜面崩壊を起因とする土石流に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, 第47巻, pp. 583-588.
- Savage, S. B. and Hutter, K. (1989): The motion of a finite mass of granular material down a rough incline, Jour. Fluid Mech. Vol. 199, pp. 177-215.
- Savage, S. B. and Hutter, K. (1991): The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout, Part 1: Analysis, Acta. Mechanica Vol. 86, pp. 201-223.
- Sousa, J. and Voight, B. (1991): Continuum simulation of flow failures, Geotechniques, Vol. 41, No. 4, pp. 515-538.
- Strelkoff, T. (1970): Numerical solution of Saint-Venant equation, Jour. Hydro. Div. ASCE, Vol. 96 (HY 1), pp. 223-251.
- 棚橋隆彦 (1999): はじめてのCFD—移流拡散方程式, コロナ社, 271p.
- 田中忠次・鶴飼恵三・河邑眞・阪上最一・大津宏康 (1996): 地盤の三次元弾塑性有限要素解析, 丸善, 219p.
- Tinti, S., Bortolucci, E. and Vannini, C. (1997): A block-based theoretical model suited a gravitational sliding, Natural Hazards, Vol. 16, pp. 1-28.
- Toki, K., Miura, F. and Oguni, Y. (1985): Dynamic slope stability analyses with a non-linear finite element method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 151-171.
- Trandafir, A., Popescu, M. and Ugai, K. (2001): Two-dimensional slope stability analysis by LEM and FEM considering a non-linear failure envelope, 第40回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 219-222.
- 鶴飼恵三 (1989): 弾塑性FEMによる斜面の全体安全率の評価法, 土質工学会論文報告集, Vol. 29, No. 2, pp. 190-195.
- 鶴飼恵三 (1990): 安定解析におけるせん断強度低減法の有用性, 土と基礎, Vol. 38, No. 1, pp. 67-72.
- Ugai, K., Wakai, A. and Ida, H. (1996): Static and dynamic analyses of slopes by the 3-D elasto-plastic FEM, Proc. of 7th International Symposium on Landslides, pp. 1413-1416, Trondheim, Norway.
- 鶴飼恵三・蔡飛・若井明彦・阪上最一 (1998): 集水ボーリングの効果に関する定量的評価手法の提案, 日本地すべり学会誌, Vol. 35, No. 3, pp. 1-7.
- 鶴飼恵三・蔡飛・鄭穎 (2001): 二列に配置された抑止杭の効果を弾塑性FEMにより評価する方法の提案, 日本地すべり学会誌, Vol. 37, No. 4, pp. 18-23.
- 渦岡良介 (2000): 地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究, 岐阜大学学位論文, pp. 161-170.
- Wakai, A. and Ugai, K. (2004): A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 4, pp. 83-97.
- 若井明彦, 鶴飼恵三, 清水義彦, 長田健吾 (2004): 崖崩れによる土砂到達範囲のDEMシミュレーションと簡易予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 6-16.
- 若井明彦・鶴飼恵三・蔡飛・田中潔 (2006): 地すべり抑止杭の合理的な最大抑止力評価のための簡易設計支援システム, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 18-28.
- 若井明彦, 鶴飼恵三, 尾上篤生, 樋口邦弘, 黒田清一郎 (2007): 層理面のひずみ軟化挙動に起因する流れ盤斜面の地震時崩壊の有限要素シミュレーション, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 3, pp. 1-11.
- 若井明彦, 田中頼博, 阿部真郎, 吉松弘行, 山邊康晴, 渡邊泰介 (2008): 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, 日本地すべり学会誌, Vol. 45, No. 3, pp. 21-32.
- Wakai, A., Ugai, K., Onoue, A., Kuroda, S. and Higuchi, K. (2010): Numerical Modeling of an earthquake-induced landslide considering the strain-softening characteristics at the bedding plane, Soils and Foundations, Vol. 50, No. 4, pp. 515-527.
- 汪發武, 佐々恭二, 松本樹典, 奥野岳志 (2004): 粒子破碎を考慮した地すべりの流動化メカニズムと運動範囲予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 17-28.

- Wang, X., Morgenstern, N. R. and Chan, D. H.(2010) : A model for geotechnical analysis of flow slides and debris flows, Jour. Can. Geotech. Vol. 47, pp. 1401 – 1414.
- Wieland, M., Gray, J. M. N. T. and Hutter, K.(1999) : Channelized free-surface flow of cohesionless granular avalanches in a chute with shallow lateral curvature, Jour. Fluid Mech., Vol. 392, pp. 73 – 100.
- Woodward, P. K. and Griffiths, D. V.(1994) : Non-linear dynamic analysis of the Long Valley Dam, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, pp. 1005 – 1010.
- 山田正雄・大野亮一 (2005) : 4. FEMの地すべり解析への適用例, 講座「地すべり解析における有限要素法の利用」, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 6, pp. 89 – 92.
- 吉松弘行 (1996) : ファジィネスを考慮した質点系モデルによる崩土の流下距離予測, 地すべり, 第33巻, 第1号, pp. 15 – 19.
- 吉松弘行, 桜庭雅明, 檜山和男 (2005) : CIVA-安定化有限要素法による地すべり地塊の運動シミュレーション, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 3, pp. 1 – 11.
- 吉松弘行, 張馳 (2004) : 安定化有限要素法による地すべり地塊の運動シミュレーション, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 1 – 8.
- 吉松弘行, 若井明彦, 丸井英明, 菅野孝美 (2012) : 地塊の破壊条件を考慮した安定化有限要素法による地すべりの到達範囲予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 49, No. 6, pp. 313 – 321.
- 張馳, 吉松弘行, 岩堀康希, 阿部真郎 (2004) : 数値解析による崩壊土塊の到達範囲予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 9 – 17.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W.(1975) : Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics, Geotechnique, Vol. 25, No. 4, pp. 671 – 689.

(原稿受付2012年12月18日, 原稿受理2013年1月7日)