

## Lecture

## 地すべり解析における有限要素法の利用 第15回 Finite element method for landslide analysis No.15

## 5. 座談会／地すべり解析におけるFEMの今後の展望

## Round-table Talk／The Future View of FEM in Landslide Analysis

楠本岳志／農林水産省中国四国農政局  
Takeshi KUSUMOTO／Chugoku-Shikoku Regional Agricultural  
Administration Office, Ministry of  
Agriculture, Forestry and Fisheries

鶴飼恵三／群馬大学工学部  
Keizo UGAI／Faculty of Engineering, Gunma University

吉松弘行／財団法人砂防・地すべり技術センター  
Hiroyuki YOSHIMATSU／SABO Technical Center

倉岡千郎／日本工営株式会社  
Senro KURAOKA／Nippon Koei Co., Ltd.

浅野志穂／独立行政法人森林総合研究所  
Shiho ASANO／Forestry and Forest Products Research Institute

キーワード：有限要素法，地すべり，斜面安定  
Key words：finite element method, landslide, slope stability

## 5.1 座談会の趣旨

本講座を通じて，地すべり現象の解析や対策工の設計におけるFEMの有効性及適用方法などが解説されてきた。今回は，こうした解析技術が一般の実務においてどのように取り扱われているかの現状を意見交換するとともに，今後FEMに関連する解析技術がどのように発展を遂げるべきか自由に議論をしていただくことを目的として，本稿の著者5名による座談会を実施した。なお，個々の発言はあくまで個人的見解を述べたものであり，発言者の所属組織の方針を代弁したのではないことに留意されたい。

## 5.2 座談会の会話より（抜粋）

講座委員会の委員長である群馬大学工学部の鶴飼恵三が司会進行を務めた。

鶴飼：本日はお忙しい中お集まりいただき有難うございます。地すべり解析，特に実務においてFEMを利用する場合のいろいろな問題について自由に討論して

まいりたく存じます。

まず，これまでに実務にFEMを適用した事例の中で特に印象が残っているものがありましたら，どのような解析だったのかをご発言ください。

吉松：三次元の飽和・不飽和浸透流解析などは実務で最近多く行われ

るようになったと思います。住民への説明責任を問われるケースが増えておりますので，過去に行ってきた対策に関して解りやすく評価をしなくてはならないとともに，今後どこに対策工を施工すれば安全率がこのくらい上がるといった検討も重要です。その場合，より具体的な議論ができるようになったという意味で，FEMはとても強力なツールであるという印象を持っています。

楠本：私もFEMのような解析技術を実務に応用していくことに賛成ですが，予測結果に関する評価は今後ますます重要になると思います。ある仮定に基づいてこういう水位変動が予想されたが，別の仮定では違う結果になってしまう可能性があるという認識や長期的に観測を続けながら予測結果をきちんと追跡評価していくことが必要でしょう。

倉岡：仰せのように浸透流解析などにより，地下水排除工の計画と設計の合理化を図ることは重要であり，そのような業務が増す機運にあると思います。また，民間企業の人間として様々な解析をやらせていただきま



楠本岳志



座談会風景



吉松弘行

したが、浸透流解析の他に、長大斜面の掘削時の変位と応力を解析することで適切な法面を設計したり、崩壊した斜面の崩壊メカニズムをFEMにより検討して今後の対策に生かす例が挙げられます。

浅野：私も地下水浸透や大規模岩盤崩壊の問題

などにおいてFEMが用いられる例を目にしますが、特に気になるのはモデル化する際の解析者の立場です。例えば住民の方含めてみんなで理解するために行う災害の再現や将来予測などの解析なのか、設計手法そのものを合理化しようとする解析なのか、それぞれの解析目的に応じてモデル化の主眼が変わるはずですし、その判断がFEMを上手に利用する上での鍵になるのではないかと考えています。

鵜飼：地すべり分野でFEMが用いられる場面は、みなさんが仰るように、特に浸透流解析への利用が多いという印象を持っています。ただ、地盤工学分野を見ると、むしろ変形・安定解析にFEMを積極的に利用しようという向きがあります。なぜ、地すべり分野での変形・安定解析にFEMがあまり普及していないのでしょうか。地質学的に古い年代の材料を相手にしなくてはいけないことや地盤内の不均質性、亀裂などの不連続性のモデル化が問題なののでしょうか。

楠本：地すべりでは、地盤工学一般の問題に比べて、不均一性や不確定な部分があるため解析に用いる力学定数を決めるのが非常に難しいと思います。これが、地すべり地をFEMでモデル化する上でのひとつの悩みになっていると思います。

吉松：地すべり土塊の厚さは極めて大きいですが、すべり面など大きな応力や変形が生じている箇所は全体のうち極めて限定された部分ですね。このような部分に対しても適切な物性値を与えることができるかが特に難しいでしょう。FEMは数値解析法としてはすでに完成度の高いツールであると思いますが、やはりモデル化と物性値の評価が今後の課題だと思います。

鵜飼：数値解析手法に見合ったモデル化と物性値の決め方も今後きちんと議論していかななくてはならないということでしょうか。

吉松：その両方の議論がないと、予測した結果の妥当性を誰でも評価できるというふうにはならないでしょうね。誰でも比較的簡単に定数を決定できるような仕組みが必要なのだと思います。

浅野：別の観点から発言しますが、FEMを用いた逆解析なども最近をよく行います。電気探査などにおいて土の物性を評価するときにFEMで逆解析します。



浅野志穂

FEMに用いるべき定数を決定することは難しいことですが、現象をある仮定に基づいて評価する場合にどのような均質化がありうるかを検討する時に、FEMはとても有効な場合があります。

鵜飼：逆解析という意味

では、浸透流解析の場合でも、普通は土の浸透特性について過去の観測データなどに基づいて逆解析的に定数決定を行いますね。観測結果の逆解析という使い方もFEMの重要な側面だと思います。

定数決定のほかに、FEMでのモデル化についても十分に検討が必要であるというご意見が先ほどありましたが、これについてはいかがでしょうか。

楠本：地すべり全体の中で集水ボーリング一本をどのようにモデル化するかということ一つを取っても、厳密にモデル化するのか、何らかの均質化を行うのか、モデル化についてもわかりやすい指針のようなものが必要なのではないでしょうか。

浅野：その時も解析の目的に応じて、対策工の個別の挙動をどこまで細密に表現するかの判断が変わると思います。例えば規模の大きい地すべり全体をモデル化してのマクロな挙動を追う目的であるのに、モデル全体の中で一本の孔による水位変化の数10cmの違いを議論するのはスケールの少し難しいような気がしますし、むしろそういう場合は、全体の傾向をとらえるためにある程度等価に均質化したモデル化を使うといったことなども必要になってくると思います。

鵜飼：対策はローカル、効果はグローバル、このあたりが難しいところですね。これについては、今後も議論がなされるべきだと思います。

従来設計法の枠組みの中では対策工の効果が必ずしも合理的に予測結果に反映されなかった実態を考えても、こうした問題に対して積極的な評価を行うことのできるFEMが、今後実務で使われる見通しはありますね。ところで、FEMが実務に利用されている現場は、こうした事情に配慮する必要がある現場、ということなのでしょうか。

楠本：国や地方公共団体の財政がたいへん厳しいことを考えますと、解析のコストは小さくないので、地すべりの規模や重要度が大きい場合でないと、FEMを個別の地すべり対策に適用するのは難しいのが現状ではないかと思っています。だからこそ、せつかく解析をしたのであれば、対策工を設計したから終わり、というのではあまりにももったいないと思います。地すべりの管理に継続的にFEMを利用していくことを考えるべ



鵜飼 恵三

きではないかと個人的には思います。

**鵜飼**：より大きな時間的スケールから考えた数値解析, という視点ですね。

**楠本**：そうです。同じ防災でも洪水予測などでは一般的な確率年の議論が、地すべり対策では基準化されていませ

ん。FEMを使えば、この辺の議論を行うことができるようになると思います。

**吉松**：少し概念的な話になりますが、地すべり対策の安全率1.2という数値を議論する場合、もともとそれは既往最大降雨のもとで1.2を確保しておけば、100年確率豪雨の時にでも安全率1.05程度は確保できる、というくらいの感覚があったものと思います。しかし、そういう確率的思考を明確に直接設計に取り入れる可能性が開けたという意味において、FEMの存在意義はきわめて大きいですね。

**鵜飼**：予算縮減により、あるいは地すべりの重要度に応じてこのあたりの確率年を調整することもできる。非常に判りやすい設計が可能となりますね。

**吉松**：今後は何か事業を考える場合に、FEMの解析で設計を行い、毎年施工しながら観測して対策工の評価を繰り返す、すなわち管理施工のような要領で防災事業をやっていくことだって考えられるでしょう。モニターする解析対象の選定項目も重要だと思います。

**鵜飼**：モニターするのは、水位、変位など、従来と同じような内容でいいのでしょうか。

**吉松**：そうですね。本当は力や応力を知りたいところですが、一般には測定が困難でしょう。だからこそ、変形と力とをうまく結びつけられるFEMはとても有用であると思います。

**倉岡**：抑止工の設計においてもFEMは極めて有効です。地すべり抑止杭の設計にFEMを利用することを検討していますが、杭の変形、ひずみなどを計測すれば、そこに作用する分担力などを推定することができます。アンカー工なども同様でしょう。このように、構造物が介在する場合には力や変形を計測することもできます。したがって、実際に計測された力とFEMで求められた力とを比較することで、物性値を修正するなどしてFEMモデルを更新すると同時に設計の妥当性を確認することもできます。

**浅野**：吉松さんが仰ったように、変形に着目して実際の現象を評価できるのは、素晴らしいことだと思います。従来の極限平衡法ではなかなか変形の議論ができませんでした。力のバランス以外に確認する条件がありませんから、どうしても「滑った」「滑らない」という議論になります。それはもちろん非常に大切なこと

が、実際の現象はそれだけではなく、動いているものを止めるという行為もありますから、変形を情報として提示してくれるFEMは、実現象を表現できる計算手法だとも言えると思います。

**鵜飼**：より現実に近い詳細な情報を与えてくれるというのは、住民にとって有難いことですね。地すべりもひとつの自然災害ですが、他の災害において最近さかんに住民避難の問題が叫ばれていることに関して、やはり地すべり対策もこのような方向に進んでいくべきでしょうか。

**楠本**：大多数の方々は、対策工事をしさえすればもう安全だと考えているように思います。でもそれは間違いで、今後はそのようなソフト対策もあわせて考えるべきでしょうね。

**吉松**：財政的な限界もありますし、住民の警戒避難を考えていくことはとても現実的だと思います。FEMを利用することで、地すべりを文字通りすべりと言う運動量から管理していくということになりますね。FEMで得た結果の信頼性についても、徐々に説明責任を問われることになるでしょう。そうした場合には、先ほど議論のありました地盤の不均質さや物性値の問題もありますが、その他に、確率降雨として想定する降雨パターンをどのように決めたらよいか、また、解析領域をどの程度の広さに設定したらよいかなど、技術的な検討事項がいろいろとあると思います。このような学会の研究委員会で、技術者が互いの経験を共有し、FEMによる地すべり解析について、より実践的な技術を共同で確立していくべきだと思います。

**鵜飼**：FEMによる地すべり解析を考える上でのポイントとして、物性値の決め方、モデル化のあり方、それらを含めたガイドライン的なものの整備など、解析を実施するサイドからのいろいろなアイデアが議論されていますが、解析を発注する側からのご感想のようなものは特にありますか。

**楠本**：現実問題として、現場を相手にする場合、まず調査してみないと分からないので、何もわからない状態で調査が開始される。しかし、あとで「この現場はFEMで解析しながら対策工を検討したい」というふうに気付いたとしても、すでに調査は発注され、かなり業務が進んでしまっているんですね。つまり、最初からFEMで解析を行うことを前提に調査がなされない場合が多いのではないかと思います。

**鵜飼**：調査の前に、ここは「FEMで解析すべき」というふうに判断できたらいい、という意味ですね。しかし、現実にはかなり難しいでしょうね。

**楠本**：そうかも知れません。ただ、事業の着手当初から一貫してFEM解析を必要に応じて実施する可能性を視野に入れながら、地すべり地全体の特性を効率的に把握するにはどうしたらよいか、バランス感覚のある調査が望まれるのだと思います。良い調査を行わない

と、FEMの「良さ」を十分に引き出せなくなってしまう。一部の方がFEMは高くつくという印象をお持ちの背景には、費用対効果を踏まえた印象があるのだと思います。中途半端な調査に基づくFEM解析結果からFEMそのものの性能を評価されたのでは、少しFEM解析がかわいそうかなあとと思いますね（笑）。

**鵜飼**：現場では、そのような調査がなされているのですか。

**楠本**：はい。大規模な地すべりの管理においては、やはりFEMによる浸透流解析が有効だと思います。そのための調査を行いました。できれば三次元の安定解析にもこれらを生かしていかれたらと思っています。とにかく発注者も、FEMによる設計がどのようなものなのか、解析に関する知識をある程度もつべきなのだと思います。

**吉松**：規模が大きい地すべりでは管理が重要になるという話が先にもありましたが、調査と解析、評価、再解析といった具合に、長期的にFEMによる地すべり管理が行えるのが理想だと思います。しかし、FEM解析に必要なコストをなるべく抑えるために、有限要素メッシュの切り直し作業をできるだけ減らすような工夫をするなど、いくつか検討すべき点もあると思います。

**倉岡**：実際の現場では、やはり早くかつ安く解析を実施してほしいという声が多く聞かれます。厳密にモデル化して細密な有限要素メッシュに基づいて解析することも必要ですが、様々な現場に対応するためにより簡素なモデル化技術を開発する必要があると思います。不均質な系を効率的に近似して解くことができれば、「FEMは時間と費用がかかる」といった難しいイメージを払拭することができるでしょう。

**浅野**：そうしたことと同時に、FEMはどうも難しそうだという意識を払拭するには、解析実務における様々な高い壁を取り除くことが必要だと思います。極端な言い方をしますと、数字を入れれば比較的容易に答えが出るような枠組みがしっかりできれば、FEMはもっと普及すると思います。例えば極限平衡法による安定計算が広く普及したのは、基準化しているとかイメージを掴みやすいとかと同時に計算担当者が変わってもさほど結果が変わらない扱いやすさもあるからではないでしょうか。

**吉松**：FEMソフトの中身が完全にブラックボックス化するのもどうかと思いますが、計算に用いられている仮定や全体の流れはある程度つかんでおいて頂いた上で、できるだけ解析者が使いやすいインターフェイスを備えたソフトウェアが登場すると思います。

**鵜飼**：使いやすさの点ではまだまだソフトウェアに課せられた課題はありそうですね。いずれにせよ、多くの解析手法の中で、FEMでない解析できないような問題というのは結構あるわけで、そういうものをもっと前面に出していけば、FEMの有効性をさらに理解して頂けるのではないかと思います。

**楠本**：いずれにせよ、一般の方はFEMの厳密な数学的定式化を理解しようとはしていないわけです。ですから、鵜飼先生が仰るように、FEMにより実際にうまく行った事例をもっと公開していただきたいですね。そういう積み重ねが普及につながるのだと思います。



倉岡千郎

**鵜飼**：そうですね。「地すべり解析におけるFEMの利用に関する研究委員会」の報告書では、事例を多く取り入れて、皆様に役立てていただける情報をご提供する予定です。

**楠本**：また、先ほど出ました費用対効果ということに関しましては、例えば、スケールメリットを意識したFEMの利用法なども考えられそうですね。1つの地すべり地ブロックではなく広域を空中探査したり、デジタル地形図を作って、最低限の地上での調査結果をふまえて一度に広域をモデル化する。その結果として、FEMで広域エリアの危険度判定ができるのではないのでしょうか。

**鵜飼**：ハザードマップを作成するような要領ですね。

**吉松**：FEMによるデータ解析の論理構造はGISのそれと非常に似通った点があります。これは大いに利用すべきです。GISとFEMとは容易に連携ができると考えています。

**浅野**：調査技術も進化しています。多くの地盤のデータが集められるようになり三次元的なモデルを構築するための環境は整いつつあります。ハザードマップをはじめ、広域防災のニーズは今後も高まって行くでしょう。そこへFEMのような定量的に説明ができる手法が入ってくれば、効果的だと思います。

**倉岡**：説明責任の点からも、対策のわかりやすさは大事です。そのためにも、もっとFEMに関する理解を産学官で一緒に深めていけたらいいですね。例えば鵜飼先生が以前に企画されたFEMに関する技術者講習会のようなものを、どんどん実施していったら良いのではないかと思います。

**鵜飼**：FEM解析が具体的にどのような手法で、どのような点に留意しなくてはいけないのか、また、解析をより効果的に行うにはどのような環境を整えればいいのか、いろいろなお提言がなされたと思います。

本日は活発なご討論を有難うございました。

### 5.3 座談会の概要と編集について

この座談会は平成17年2月4日、一時間半をかけて都内にて開催された。本稿はその会話の一部を講座委員である群馬大学工学部の若井明彦が編集、抜粋したものである。

(原稿受付2005年2月5日、原稿受理2005年2月28日)