

若井明彦*

1 はじめに

1.1 FEMによる地すべり解析

地すべりの分野に限らず、防災技術における数値解析の役割は近年ますます重要なものとなっている。これは災害多様化への対応や安全性・経済性の追求といった設計本来の目的の充足のほかに、防災対策の将来計画や効果判定に関する行政の説明責任が一層増したことに伴い、より定量的な（一般者に説明しやすい）評価・予測手法が必要となったことが関係している。

一口に数値解析といっても多種多様なものがあるが、解析技術の発展と工学的要求とを鑑みた場合、今日の（あるいは近い将来の）地すべり解析に最も適した数値解析手法のうちの一つは、有限要素法

（Finite Element Method、以降FEMと略）であろう。FEMに基づく地すべり解析の典型例を表1に列挙する。解析の目的に応じて、適した力学モデルに基づくFEMプログラムを採用する必要がある。なお、FEMに基づく地すべり解析について包括的に解説した成書としては文献1）、また土の構成モデルを含む弾塑性FEMの理論と実践については文献2）が参考となる。

1.2 LEMとFEM

地盤内のある薄い層ないし地質構造的な不連続面で塑性化が生じ、その塑性領域が空間的に連続して面を形成した時、その面で囲まれた上部土塊が重力等の影響で運動・崩壊することがある。この運動の不連続面をすべり面という。斜面の安定性評価の計

表1 FEMによる地すべり解析の例

解析の目的	解析の種別	必要なFEMプログラム
斜面の全体安全率Fsを評価したい	変形（弾塑性）解析	弾塑性FEM（せん断強度低減法）
地すべり抑止工（杭工、アンカー工など）の効果の評価したい	変形（弾塑性）解析	弾塑性FEM（せん断強度低減法、もしくは変位／荷重制御解析）
斜面内の浸透流、水位分布等を予測したい 地下水排除工の効果の評価したい	浸透流解析	飽和不飽和浸透FEM （降雨解析、透水解析）
外力による斜面の変形を予測したい（圧密なし）	変形（弾塑性）解析	弾塑性FEM（変位／荷重制御解析）
外力による斜面の変形を予測したい（圧密あり）	変形（弾塑性） －浸透 連成解析	土－水連成 弾塑性FEM （変位／荷重制御解析）
地震時の斜面の被害を予測したい （非液状化、または全応力に基づく液状化解析）	動的／変形（弾塑性）解析	動的弾塑性FEM（地震応答解析）
地震時の斜面の被害を予測したい （有効応力に基づく液状化解析）	動的／変形（弾塑性） －浸透 連成解析	土－水連成 動的弾塑性FEM （地震応答解析）
クリープ変形などを予測したい	変形（弾粘塑性）解析	弾粘塑性FEM（時刻歴解析）
斜面の全体安全率Fsを評価したい （※ただし剛塑性仮定に基づいて）	剛塑性解析	剛塑性FEM（せん断強度低減法、 もしくは荷重制御解析）

* 群馬大学工学部助教授

算法として従来から用いられている極限平衡法 (Limit Equilibrium Method、以降LEMと略) は、仮定した上部土塊の滑動力とすべり面上に発揮されるせん断抵抗力——手法によっては、すべり土塊の内力を加味して——の大小関係から安全率を評価するものである。FEMに比べてLEMは計算が格段に簡単であるが、適切なすべり機構と内力分布を仮定しない限り、厳密解が得られる保証はない。ただ安全率に関して言えば、既往の研究成果からLEMでも工学的にはほぼ十分な精度を有する解を得ることが可能となっている。しかし、これ以外に、そもそもFEMには考慮できてLEMでは考慮できない重要な物理情報が一つあることを忘れてはならない。それは「変形」である。

変形を扱えないということは、変形の具体値が重視される現象の予測が困難だということである。例えば、すべり土塊の移動に伴う地すべり抑止杭のたわみ変形がすべり面位置でのせん断抑止力を生むことから分かるように、地盤と構造物との相互作用を適切に評価するためには、変形を考慮したFEMなどの解析手法の採用が望まれる。LEMではすべり面での不連続的な運動を仮定するだけで、そこから現実的な変位量を算出することができない。また地震時の過大な残留変形のように、必ずしもすべり面を伴わない変形・破壊現象はLEMではまったく手に負えないことになる。

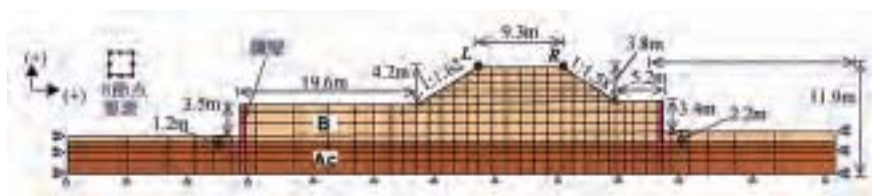


図1 動的弾塑性FEMによる鉄道盛土の残留変位予測

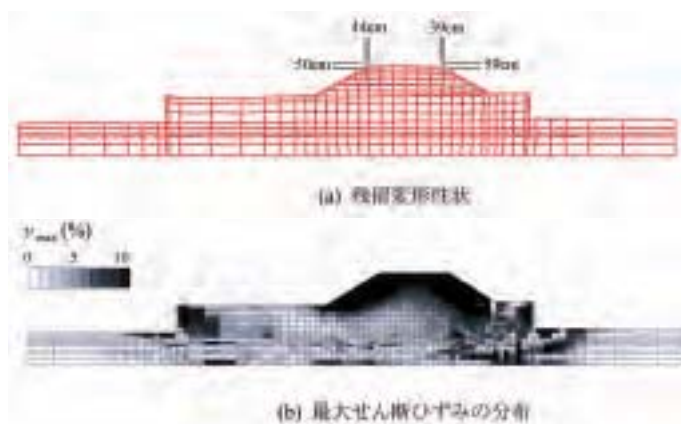


図2 地震後の盛土の被害状況 (FEMによる予測結果)

2 FEMによる斜面の地震被害シミュレーションの例

2.1 震度法との違い

FEMのメリットは様々な場面で発揮されるが、最もその特長が生かされた解析課題の一つが斜面の地震被害シミュレーションであろう。これはFEMで離散化された全体系の運動方程式を時間積分により時刻歴的に逐次追跡するものである。土の繰返し載荷時の力学的性質を表現できる構成モデルの採用が必須である。

一方、地震時の斜面の安定性を論ずる場合、これまで広く設計に用いられてきた手法は、地震動による慣性力を静的な力に置き換え、LEMに基づいて安全率を評価するいわゆる震度法である。震度法では、実際には一瞬しか作用しない地震力を永遠に作用する力と考えている、斜面の地震時被害を崩壊・非崩壊の二値問題として単純化している、系の増幅や変形を適切に考慮することが難しい、など多くの不都合がある。

2.2 解析ポイント①：残留変位量

FEMによる地震被害シミュレーションとして最もポピュラーな解析は、地震後にどの程度の残留変形が生ずるのかを予測することである。

このような解析事例として、兵庫県南部地震で被災したある鉄道盛土のFEM

解析例 (図1) を紹介しよう。土の動的変形特性とせん断強度 c 、 ϕ をともに考慮しうる簡易な繰返し載荷モデルに基づく全応力解析がなされている。盛土部については揺すり込み沈下を表現するためのダイレイタンス特性が考慮されている。地震後の残留変形性状の予測結果を図2(a)に示す。実測との一致度が良好なことが既往の研究²⁾で確認されている。このような解析により、許容変位量に基づく土構造物の耐震性評価を行うことが可能となる。また最大せ

ん断ひずみの分布 (図 2 (b)) により、どの部分が地震中に大きな塑性変形を生ずるのかを視覚的に把握することができ、斜面の地震時崩壊機構を検討することが容易となる。斜面に擁壁が隣接する場合、補強材などを使用している場合など、それらの構造物に作用する各種内力や相互作用力 (土圧等) についても照査できる。

2.3 解析ポイント②：斜面崩壊の再現

地震後に斜面が大規模に崩壊する事例では、残留変位量を定義することが難しい。これを表現するには土のひずみ軟化特性を考慮した構成モデルを採用する必要がある。

図 3 は新潟県中越地震 (2004) で発生した造成宅地の谷埋め盛土部分の崩壊事例の FEM シミュレーションの結果⁹⁾である。FEM に用いた地盤定数は現場の表面波探査の結果に基づいた。斜面が地震中に強度低下し、自重を支えきれずに崩壊する現象を直接表現することを試みた。構成モデルの構築段階で液状化強度曲線などを考慮することで、液状化の関係した斜面崩壊事例も再現することが可能であるが、より厳密な予測を試みるのであれば、さらに精緻な液状化構成モデルを用いた有効応力解析が望まれる。

2.4 解析ポイント③：地質構造上の弱面

地すべり斜面など山間地の地震時斜面崩壊を FEM により再現する場合の一つの重要なポイントは不連続面の考慮である。FEM では再滑動型地すべりの既存すべり面や岩盤内の層理面などを薄層の

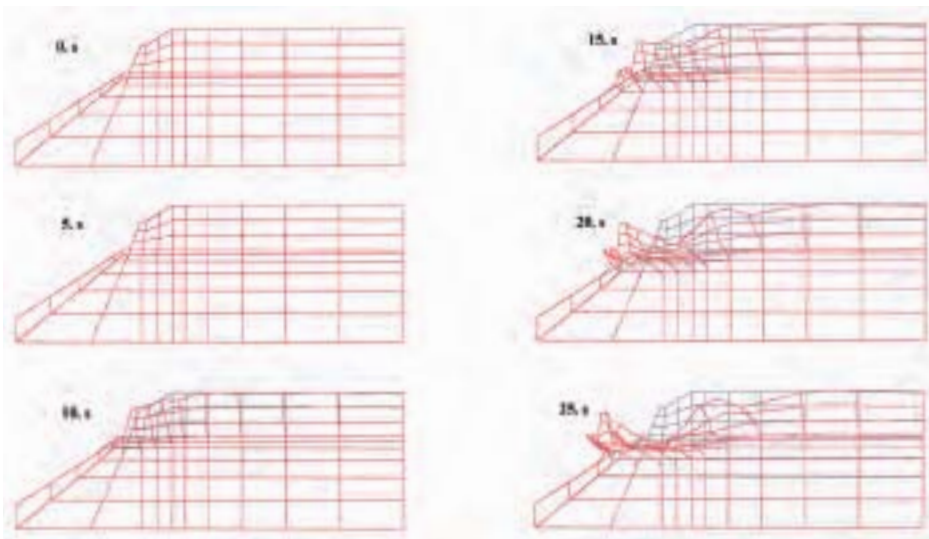


図3 谷埋め盛土の地震崩壊シミュレーション (盛土左端はコンクリート擁壁)

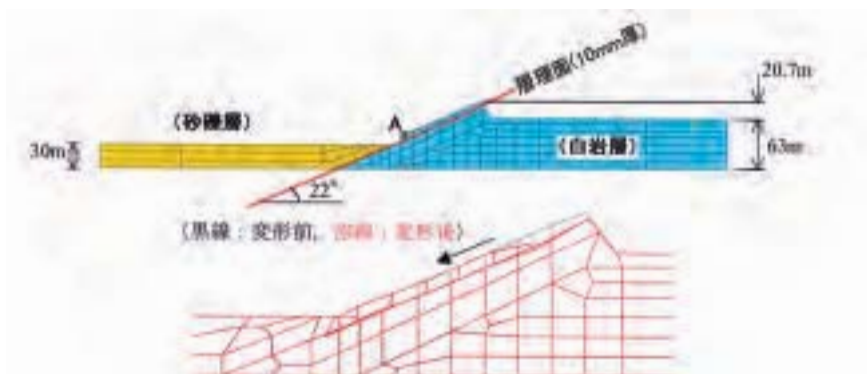


図4 流れ盤斜面の地震崩壊シミュレーション

有限要素等でモデル化する場合がある。

図4は層理の走向傾斜と斜面勾配とが近い斜面、いわゆる流れ盤斜面の地震時崩壊シミュレーション⁹⁾(新潟県中越地震時)の例である。地震により層理面を境に上部岩塊が崩落している。図5はこの斜面で採取した層理面要素の室内繰返しせん断試験結果および今回の構成モデルによる再現である。層理面の力学特性が適切に表現されている。

3 まとめ

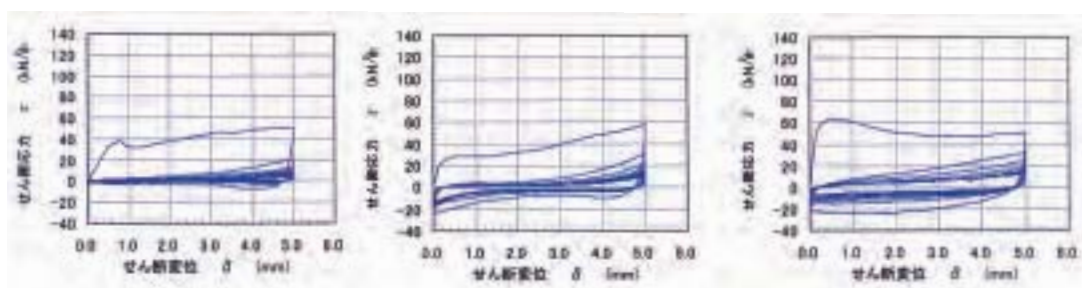
本稿では斜面の地震時被害シミュレーションに焦点を当て、FEMによる現象予測の可能性とモデル化における着目点を例示した。解析になじみのない読者におかれても、解析目的に応じて様々なFEM解析があることをご理解いただけたのではないかと考える。

FEMをはじめとする数値解析手法が真の威力を発揮するのは、現象の適切なモデル化に必要な事前情報の存在が前提である。従って、数値解析手法の精緻化だけを目指すのではなく、解析手法の精度向

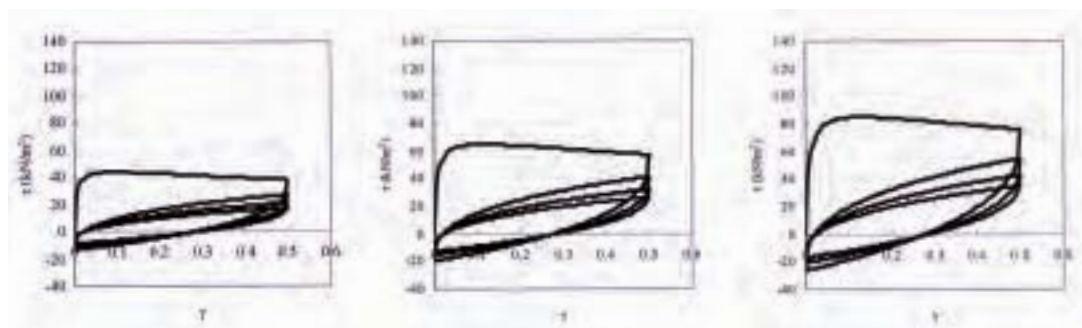
上に見合った地盤調査、室内試験、現地計測が個々の事例で行われるよう、現象予測に与えられるべき時間的、経済的余裕への理解が今後望まれる。

【参考文献】

- 1) 日本地すべり学会編(2006)：有限要素法による地すべり解析、山海堂(※2006.8刊行予定)。
- 2) 地盤工学会編(2003)：地盤技術者のためのFEMシリーズ/第①巻 はじめて学ぶ有限要素法、第②巻 弾塑性有限要素法がわかる、第③巻 弾塑性有限要素法をつかう、地盤工学会。
- 3) 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.
- 4) 若井明彦・釜井俊孝・鶴飼恵三(2005)：高岡団地における盛土崩壊事例の有限要素シミュレーション、宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム論文集、地盤工学会、pp.25-30.
- 5) 若井明彦・鶴飼恵三・尾上篤生・樋口邦弘・黒田清一郎(2006)：層理面に沿った地震時斜面崩壊に関する有限要素シミュレーション、第41回地盤工学研究発表会(印刷中)。



(a) 室内試験： $\sigma = 40\text{kN/m}^2$ $\sigma = 80\text{kN/m}^2$ $\sigma = 120\text{kN/m}^2$



(b) 解析モデル： $\sigma = 40\text{kN/m}^2$ $\sigma = 80\text{kN/m}^2$ $\sigma = 120\text{kN/m}^2$

図5 層理面の室内繰返し載荷試験を図4に用いた解析モデルで再現した結果