

地震数値解析と 地すべりについて

向井啓司*

1 はじめに

平成16年10月23日17時56分、新潟県中越地方を中心にマグニチュード6.8の地震（新潟県中越地震）が発生し、芋川流域においては多数の地すべりや斜面崩壊が発生した。

これまで地震による斜面における土砂移動現象は、表層崩壊がほとんどであり、地すべりの発生はないとされてきた。また、過去に日本では地震によりこのような同時多発的に地すべり現象が発生した事例はほとんど記録されていない。しかしながら、平成16年新潟県中越地震では、表層崩壊のみならず地すべり土塊そのもののほぼすべてが滑動する現象が多発した。平成16年新潟県中越地震による地すべり発生は、今後の地震と地すべりの関係について問題提起したものといえる。

地震数値解析は、震度法をはじめ、静的解析や動的解析、2次元解析や3次元解析等さまざまな解析手法が研究・開発されている。これらの数値解析手法のうち、とくに代表的な動的解析手法として用いられているニューマーク法とFEM（有限要素法）の研究開発の経緯について概観し、それぞれの特徴について紹介する。

2 主な地震数値解析

地震数値解析のうち、静的解析の代表的な手法としては、震度法があげられる。震度法は、すべり面を仮定して、対象とする斜面を安定した地山と滑動する土塊に作用する地震力と抵抗力の釣り合いからその安全率を算定する手法である。

また、動的解析では、代表的な数値解析手法として、2次元のニューマーク法とFEMがあげられる。そのほかにはDEM（個別要素法）や3次元FEM等がある。ニューマーク法は、1965年にNewmarkが

*（財）砂防・地すべり技術センター斜面保全部技術課長

アースダム・堤防の地震時安定検討の一手法として提案したものである。これは、すべり土塊を剛体、すべり面における応力-ひずみ関係を剛塑性関係と仮定し、すべり土塊に作用する加速度とすべり面のせん断抵抗との釣り合いからすべり土塊と地山部との相対運動方程式を立て、土塊のすべり量を算定するものである。FEMはニューマーク法よりも古い歴史を有するが、地震時のアースダム解析に適用されたのは1966年（Clough）とされている。ただし、当時は弾性解析として用いており残留変形を評価するまでには至っていなかった。FEMは、計算対象の構造が外力により変形する場合等を解析する際、対象構造をメッシュで区切り、各々の要素内で成り立つ連立一次方程式をもとに、各要素における方程式を全解析領域分足し合わせることでマトリクス方程式より解を求めるものである。

3 地震数値解析手法の地すべりを対象とした分類と特性

地すべりを対象とした場合、既往の数値解析手法は図1のような分類が考えられる。すなわち、外力の作用、解析の次元、現象の評価、地震動の増幅といった条件から数値解析手法を分類したものである。これに地下水（間隙水圧）を条件に加えると、FEMは全応力法と有効応力法に分類することができる。

また、地震、地すべり土塊の評価および地すべり対策の観点から主な数値解析手法の特性を評価すると表1のようになる。

4 ニューマーク法とFEMの主な研究の変遷

ニューマーク法は、1965年のNewmark以降、Seed and Martin (1966), Ambraseys and Sarma (1967) らによってアースダムに適用され有効性が

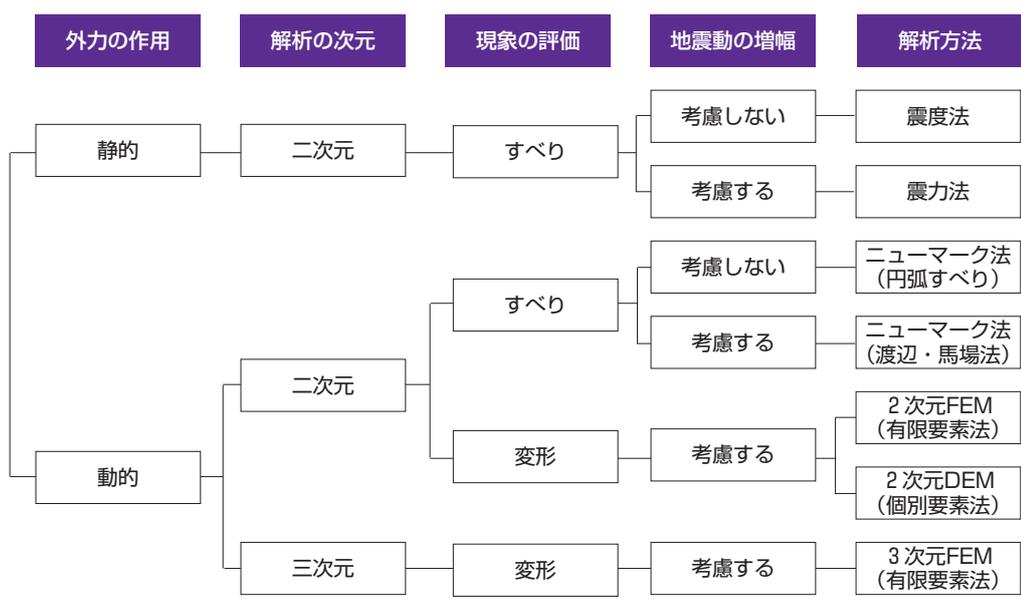


図1 数値解析手法の分類

表1 数値解析手法の特性

数値解析手法	解析種別	時刻歴波形	間隙水圧	すべり安全率	変形量	対策工のモデル化			
						土工	排水	アンカー	杭
震度法	静的	×	△*	○	×	○	△*	×	×
震力法	静的	×	△*	○	×	○	△*	×	×
ニューマーク法 (円弧すべり)	動的な円弧すべり	○	△*	○	○	○	△*	△*	△*
ニューマーク法 (渡辺・馬場)	2次元FEM+動的な円弧すべり	○	△*	○	○	○	△*	△*	△*
2次元FEM (全応力法)	2次元FEMによる動的変形解析	○	×	×	○	○	×	○	○
2次元FEM (有効応力法)	2次元FEMによる動的変形解析	○	○	×	○	○	○	○	○
2次元DEM	2次元DEMによる動的変形解析	○	×	×	○	○	×	○	○

△*モデル化された間隙水圧や対策工を解析に組み込むことは可能

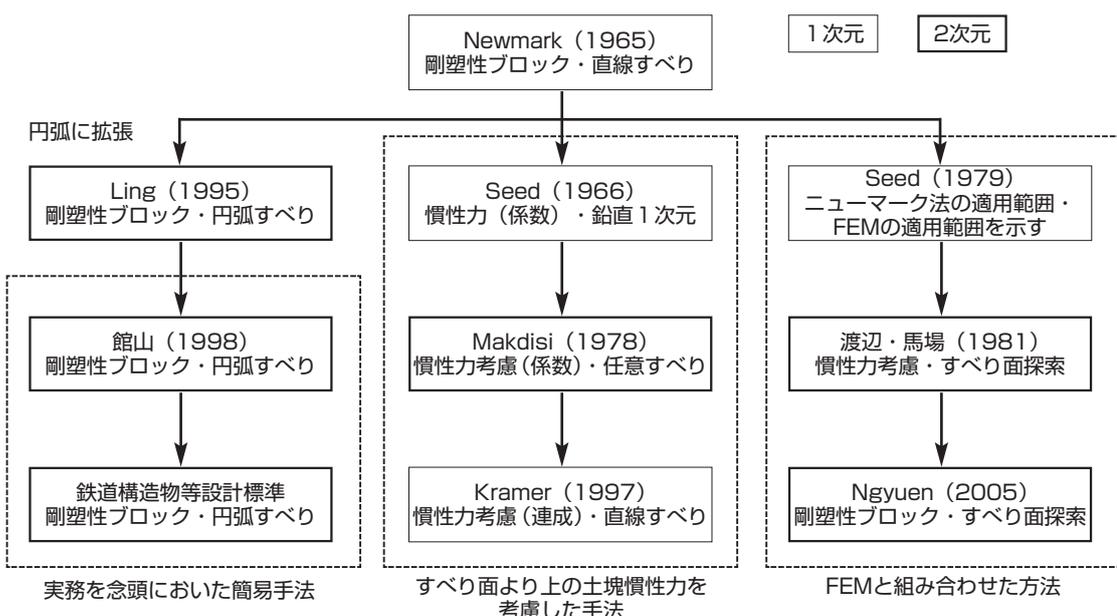


図2 ニューマーク法の分類系統

証明されている。Makdisi and Seed (1978) は、すべり深度と最大加速度の関係を整理し、アースダムで想定されるすべりの分類を試みた。Makdisiはマグニチュードの異なる地震に対する残留変異量を無次元で表した。Seed (1979) は、地震時のアースダムの残留変異上限値をまとめ、アースダムの耐震設計指針をまとめている。渡辺・馬場 (1981) は、FEMの動的解析とニューマーク法を組み合わせた手法 (渡辺・馬場法) を提案した。この手法は、Nguyenら (2005) でも見られる。鉄道分野におけるニューマーク法は、館山ら (1998) が円弧すべりでの適用法 (鉄道総研法) を示し、その後、鉄道構造物等設計標準に反映された。

FEMでは、地盤の動的解放について応力ひずみ関係の非線形性を、等価線形法によって考慮したのがIdriss and Seed (1968) である。渡辺 (1972) は、直接積分法による動的FEMに取り組み、等価線形法および粘弾性でフィルダムの地震時挙動の解析を実施し、渡辺と馬場 (1979) は「フィルダムの動的解析-I、II」を発表した。渡辺・馬場の動的FEMは等価線形法で、残留変形は基本的には出力されないため、ニューマーク法と組み合わせている。ニューマーク法を使用せずに、等価線形法で残留変形を求める手法が永久変形解析と呼ばれる簡便法である。永久変形解析は、Kuwano et. al (1988) 等で

使用され、弾性FEMと等価線形FEMおよび累積ひずみ解析から構成される。鶴飼ら (1995) は、非線形の動的FEMとニューマーク法を実施し、両手法により計算される残留変形を比較し、入力地震波の周期を変えたとき、ニューマーク法はとくに斜面が2次モード振動する場合に変形を過小評価することを報告している。

5 地震数値解析手法適用の現状

表1に示した数値解析手法のうち一般的に用いられている解析手法は、震度法、ニューマーク法 (円弧すべり)、ニューマーク法 (渡辺・馬場法)、2次元FEM動的変形解析 (全応力法)、2次元FEM動的変形解析 (有効応力法) があげられる。

DEM (個別要素法) や3次元FEM解析については、現状一般の実務レベルで用いられている手法ではなく、解析時間・費用が他の解析手法よりも高く、動的問題に対する適用事例が少ないものと考えられる。

震度法は、河川砂防技術指針 (案)、道路土工のり面工・斜面安定工指針等多数の基準で採用されている。ニューマーク法 (円弧すべり) は鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計編で採用され、ニューマーク法 (渡辺・馬場法) は大規模地震に対するダ

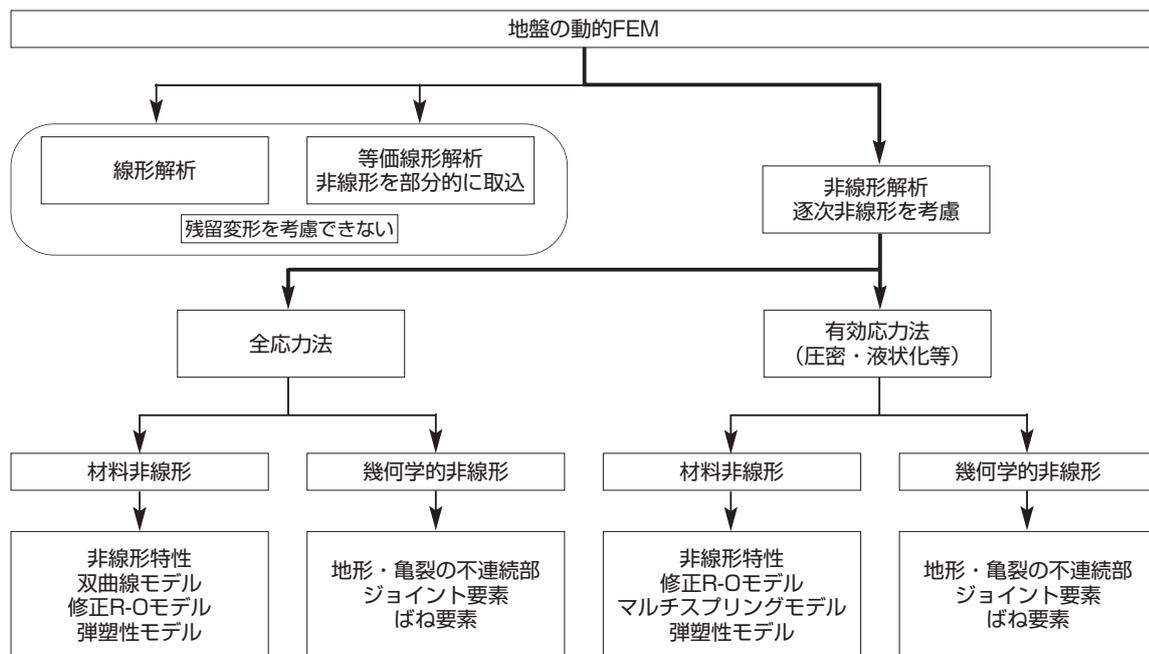


図3 FEMの分類系統

ム耐震性能照査指針（案）・同解説で採用、空港高盛土工指針で推奨されている。また2次元FEM動的変形解析（有効応力法）は空港高盛土工設計指針で推奨され、それぞれの分野で用いられている。

6 おわりに

これまで地震数値解析は、アースダムや堤防等の分野を中心に発展してきた経緯がある。しかしながら地すべり対策を対象とした数値解析手法が一般的な実務レベルでは示されておらず、新潟県中越地震時に芋川流域で発生した地すべり現象そのものを再現できる数値解析手法は現時点では開発されていないのが現状であると考えられる。

近年、地震数値解析手法の研究・開発の進歩はめざましいものがある。しかしながらこれらの地震数値解析手法を含めて、地すべりに対して地震数値解

析を用いて評価する場合、解析対象となる地盤としての地すべり土塊は不連続であり不均質な性状を有している特徴があり、数値解析手法の選択だけではなく、解析条件となる物性値の設定やそれらを組み入れるモデルの構築が非常に重要であると考えられる。

【引用文献】

- ・向井啓司他：地震を考慮した数値解析手法の変遷と現状、平成18年度砂防学会研究発表会概要集
- ・向井啓司他：地震を考慮した数値解析手法による地すべり解析の適用性、平成18年度砂防学会研究発表会概要集
- ・Keiji Mukai et al. : The landslides of Imokawa River catchment which occurred by The Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, INTERPRAEVENT International Symposium.2006

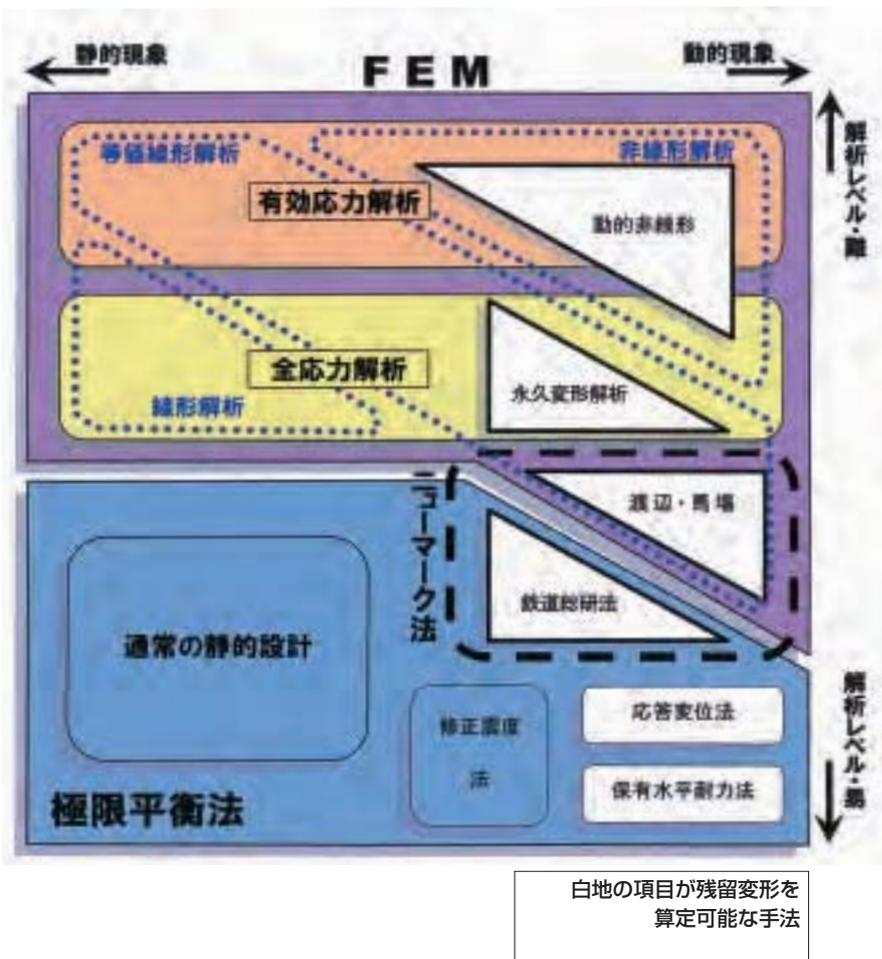


図4 地震数値解析手法の位置づけ