

## 地震を考慮した数値解析手法の変遷と現状

財団法人砂防・地すべり技術センター 向井啓司, ○相楽 涉

国土技術政策総合研究所河川環境研究室 富田陽子\*

国土交通省三峰川総合開発工事事務所 林 満\*

(\*前国土交通省富士砂防事務所)

### 1 はじめに

地震を考慮した数値解析手法は、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数値解析手法が提案・開発されている。これら地震を考慮した数値解析手法について、それぞれの特徴等を比較するとともに、とくに代表的な動的解析手法としてニューマーク法とFEM(有限要素法)の研究開発の変遷と現状について考察する。

### 2 地震の考慮した主な数値解析手法

地震を考慮した数値解析手法のうち、静的解析の代表的な手法としては、震度法と震力法があげられる。震度法は、すべり面を仮定して、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安全率を算定する手法である。震力法は、震度法と同様であるが、斜面内の増幅を考慮するため、すべり土塊に作用させる地震力をすべり土塊の高さの比により変化させる。

動的解析は、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がアースダム・堤防の地震時安定検討の一手法として提案<sup>1)</sup>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 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)<sup>2)</sup>、Ambraseys and Sarma(1967)<sup>3)</sup>らによってアースダムに適用され有効性が証明されている。Makdisi and Seed(1978)<sup>4)</sup>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)<sup>5)</sup>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)<sup>6)</sup>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)<sup>7)</sup>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)<sup>8)</sup>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は、地盤の動的解放を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)<sup>9)</sup>である。渡辺(1972)<sup>10)</sup>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)<sup>11)</sup> <sup>12)</sup>は「フィルダムの動的

解析-I, II」を發表する。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、Kuвано et. al(1988)<sup>13)</sup>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)<sup>14)</sup>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。

#### 4 まとめ

以上の数値解析手法の研究経緯から現状をとりまとめる。

- ① 液状化を除くと、地盤の地震解析は、堤防・アースダムの分野を中心に発展してきた。
- ② 渡辺・馬場法は、ニューマーク法の 1 つではあるが FEM の出力結果を必要とする。
- ③ 鉄道総研法と渡辺・馬場法の違いは、入力波と変形の積算法である。
- ④ 解析で残留変形を考慮する場合、非線形解析を実施するのが望ましいが、非線形解析が一般化したのは最近 10 年程度であり、それ以前は等価線形解析が主流であった。
- ⑤ 等価線形法は、原理的には残留強度を求め得ない。
- ⑥ 等価線形解析と他の手法を組み合わせて残留変形を求める手法が、渡辺・馬場法と永久変形解析である。
- ⑦ 解析手法の検討にあたっては、手法の難易度と解析によって求める精度を考慮して解析手法の選定等を見極めることが重要である。

#### 参考文献

- 1) N. M. Newmark : Effects of Earthquakes on Dam and Embankments, Geotechnique Vol. 15, No. 2, 139-160, 1965
- 2) H. B. Seed, G. R. Martin : The Seismic Coefficient in Earth Dam Design, Jour. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE Vol. 92, SM3, 25-28, 1966
- 3) N. N. Ambraseys, S. K. Sarma : The Response of Earth Dams to Strong Earthquakes, Geotechnique Vol. 17, No. 3, 181-213, 1967
- 4) F. I. Makdisi, H. B. Seed : Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations, Jour. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE Vol. 104, GT7, 849-867, 1978
- 5) H. B. Seed : Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, Geotechnique Vol. 29, No. 3, 215-263, 1979
- 6) 渡辺啓行, 馬場恭平 : フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察, 大ダム 第 24 巻, 第 97 号, 25-38, 1981
- 7) V. B. Nguyen, J. Jiang, T. Yamagami : Modified Newmark Analysis of Seismic Permanent Displacements of Slopes, Jour. of the Japan Landslide Society Vol. 41, No. 5, 12-20, 2005
- 8) 館山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己 : 盛土の耐震設計法に関する研究, 鉄道総研報告 Vol. 12, No. 4, 7-12, 1998
- 9) I. M. Idriss, H. B. Seed : Seismic Response of Horizontal Soil Layers, Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968
- 10) 渡辺啓行 : 有限要素法による粘弾性体の振動解析, 土木学会論文報告書 第 198 号, 21-25, 1972
- 11) 渡辺啓行 : フィルダムの動的解析 I 動的解析の方法, 大ダム 第 22 巻, 第 87 号 46-64, 1979
- 12) 馬場恭平 : フィルダムの動的解析 II 動的解析の実例, 大ダム 第 22 巻, 第 87 号 65-79, 1979
- 13) J. Kuвано, K. Ishikawa : Analysis of Permanent Deformation of Earth Dams Due to Earthquakes, Soil of Foundations Vol. 28, No. 1, 63-70, 1988
- 14) 鶴飼恵三, 井田寿朗, 若井明彦 : 動的弾塑性 FEM による地震時斜面のすべり解析, 地すべり 第 32 巻, 第 1 号, 8-11, 1995