

動弾性有限積分法を用いたダム地震時応答解析 Seismic response analysis using elastodynamic finite integration technology

○山下伸幸* 中畑和之** 村上 章*

YAMASHITA Nobuyuki, NAKAHATA Kazuyuki and MURAKAMI Akira

1. はじめに

アースダムやロックフィルダムの地震時挙動を予測する場合、等価線形化法が用いられる。等価線形化法では、ひずみに応じてせん断剛性と減衰定数を変化させることで材料の非線形性を表し、時間領域では線形として解析が行われる。等価線形化法による解析には、SHAKEなどの有限要素法(FEM)による解析が多いが、ひずみが大きい領域では等価線形化法を適用することは難しく¹⁾、結果の妥当性を評価しづらいことがあり、異なる計算法の結果から評価を行う必要がある。そこで、波動伝播解析に用いられる動弾性有限積分法(Elastodynamic Finite Integration Technology: EFIT)を用いて等価線形解析を行い、有限要素法による結果と比較することで、妥当性の評価を行うことを目的とする。しかし、EFITによるダムの地震時応答解析はこれまでなされたことがないため、計算法の有効性を確認する必要がある。したがって、等価線形化法のモデルと手順を次の項で説明するが、等価線形化法を用いずに、EFITによるコンクリートダムの線形弾性解析を通して計算法の有効性を確かめた。

2. 等価線形化法

等価線形化法では、材料のせん断剛性 G と減衰定数 h をせん断ひずみ γ の関数としてとらえ、解析が行われる。 G - γ と h - γ の関係には、アースダムにおける適用例の多いHardin-Drnevichモデルを用いる。それぞれの関係式は式(1)で表される。

$$G = \frac{G_0}{1 + \gamma/\gamma_{ref}}, \quad h = h_{max} \left(\frac{\gamma/\gamma_{ref}}{1 + \gamma/\gamma_{ref}} \right) \quad (1)$$

γ : せん断ひずみ, G : せん断剛性, G_0 : 初期せん断剛性, h_{max} : 最大減衰定数,
 γ_{ref} : 基準ひずみ ($G/G_0 = 0.5$ となるときひずみ)

なお、初期せん断剛性および最大減衰定数は室内繰り返し三軸試験より得られる。
等価線形化法では、以下の手順で解析を行う²⁾。

- [1] せん断剛性 G および減衰定数 h の初期値を設定し、それらの値を用いて地震時応答解析を行う。解析中これらの値は一定とする。
- [2] 解析で得られたせん断ひずみの時刻歴から、有効せん断ひずみ γ_{eff} を算定する。有効せん断ひずみは一般的に、 $\gamma_{eff} = 0.65\gamma_{max}$ で与えられる。ここに、 γ_{max} は地震中に発生する最大せん断ひずみとする。
- [3] [2]で得られた有効ひずみ γ_{eff} に対する G と h を式(1)のひずみ依存曲線よりそれぞれ算定し、それらの値を用いて再び地震時応答解析を行う。
- [4] [2]~[3]の手順を繰り返し、解析に用いたせん断剛性と減衰定数と新しく求まるそれらの物性値の差が5%程度に収まっていれば、収束とみなし、結果はそのときの応答値とする。

3. 動弾性有限積分法 (EFIT)

動弾性有限積分法は弾性波の伝播解析に用いられる手法である。EFITは有限差分法(FDM)の一種であるが、離散化の概念で大きく異なる点は、支配方程式を微小四角形セルで積分してから、離散化を行うことである。これにより、材料定数や質量を定義するセルが明確に定義されるほか、異種材料の境界条件の取り扱いが容易に表現できる。EFITはFEMの陰解法のように剛性行列の逆行列を計算して解を得る必要がなく、陽的に解を求めていくため、並列計算による高速化が容易である。離散化の手順は参考文献³⁾を参照されたい。なお、計算を安定して実行するために、一般的な差分法と同様に、時間間隔 Δt はCFL条件を満足する必要がある。

*京都大学 Graduate School of Agriculture, Kyoto University キーワード：動弾性有限積分法，等価線形化法，地震

**愛媛大学 Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

4. コンクリートダムの変位解析

EFIT によるダムの変位解析が可能であることを確認するため、重力式コンクリートダムの FEM による動的弾性変位解析の結果と、EFIT による解析結果の比較を行った。解析モデルは両者とも、基礎を含めた 2 次元断面モデルとする。比較する対象は天端における上下流方向の変位である。図-1 (a)に FEM による解析加速度波形を、図-1(b)に EFIT による解析加速度波形を示す。波形の包絡線の形状はおおよそ近いものが得られており、最大加速度が現れる時刻は両者とも 36s 付近であるが、FEM は 152.80gal、EFIT は 138.93gal と、EFIT の方が小さい値となった。図-2(a)に FEM による解析加速度波形のフーリエスペクトルを、図-2(b)に EFIT による解析加速度波形のフーリエスペクトルを示す。0.5Hz 以下の周波数成分ではスペクトルの形状は近いものとなっているが、中～高周波領域では一致度は低い。EFIT においては、高周波領域のノイズが大きく、フィルタ処理や、モデル基礎の周波数特性に関して検討する必要がある。また、減衰のモデルに、FEM においては振動系の運動方程式を解くため、Reyleigh 減衰を、EFIT においては波動方程式を陽的に解くため、距離減衰⁴⁾を設定しており、これらの相違についても検討が必要である。

5. おわりに

FIT による等価線形化法を実施するに先立ち、EFIT による波動伝播の観点からコンクリートダムの地震時変位解析を行い、その有効性を検証した。EFIT によってダムの地震時変位解析を行うには、両者のモデルに対してさらなる検討が必要である。今後は、引き続き EFIT によるコンクリートダムの地震時変位解析の有効性を向上させるとともに、本研究の主たる目的である、アースダムにおける EFIT による等価線形化解析を行い、FEM の結果と比較・評価を行う。

参考文献

- 1)池田隆明・森伸一郎・三輪滋・西田純一・林宏親・谷口啓二郎：液状化アレー観測記録に対する等価線形法の適用性，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.125-128, 1997. 2)宇高竹和・大島快仁・渡邊泰介・仲摩貴史：全応力時刻歴非線形解析との比較に基づいた等価線形解析の精度に関する一考察，地盤工学ジャーナル，Vol.9, No.2, pp.185-202, 2014. 3) Nakahata, K., Tokunaga, J., Kimoto, K. and Hirose, S.: A large scale simulation of ultrasonic wave propagation in concrete using parallelized EFIT, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.2, No.11, pp.1462-1469, 2008. 4)Nakahata, K., Kawamura, G., Yano, T. and Hirose, S.: Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, *Construction and Building Materials*, Vol.78, pp. 217-223, 2012.

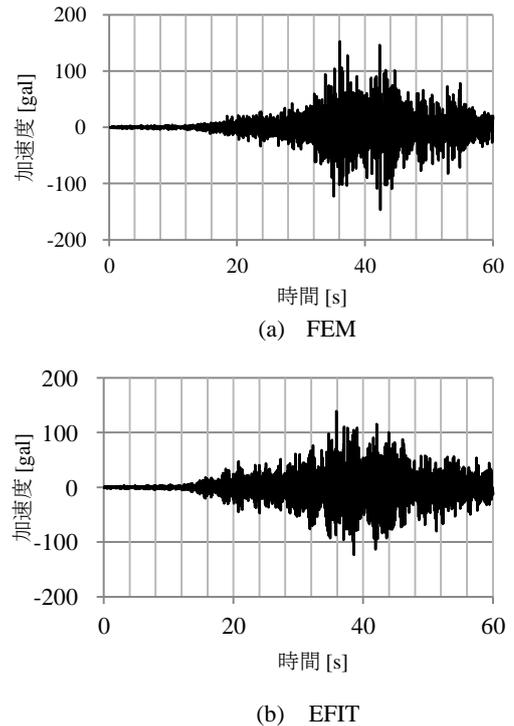


図-1 解析加速度波形
Acceleration waveforms

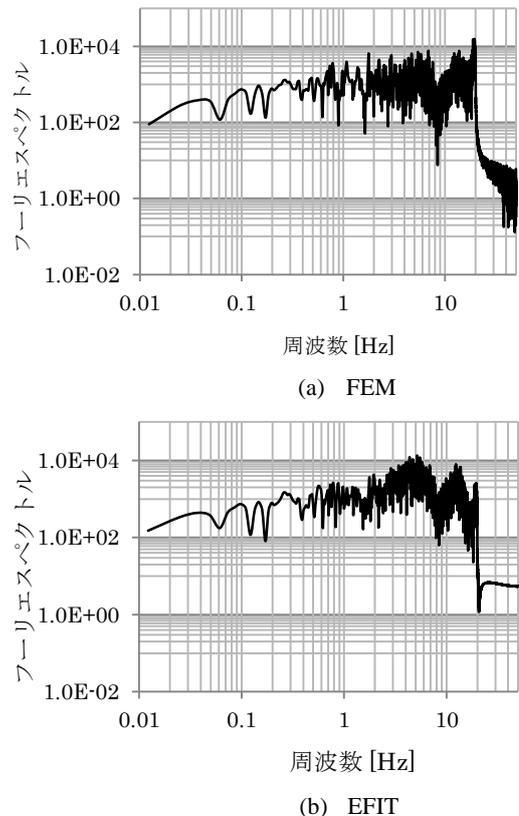


図-2 加速度波形のフーリエスペクトル
Fourier spectra of acceleration waveforms