

地盤の地震応答解析における減衰の影響に対する検討

佐藤工業 正会員 ○吉田 望
 京都大学 正会員 沢田純男
 日本大学 正会員 中村 晋

1. はじめに

地盤の地震応答解析には等価線形解析と非線形解析がある。前者は時間領域と周波数領域のどちらでも適用可能であるが、一般には SHAKE¹⁾で代表されるような周波数領域の解析が行われる。原理的には、応力-ひずみ関係の時間的変化を逐次計算する非線形法の方が精度がよさそうであるが、問題がないわけではない。一つは、地震応答解析に用いるための応力-ひずみ関係の精度の問題²⁾、もう一つは減衰の問題である。地盤の問題では Rayleigh 減衰が用いられることが多い。この減衰の特性は固有モード毎に以下のように定義される。

$$h_i = \alpha / (2\omega_i) + \beta \omega_i / 2$$

Rayleigh 減衰は、実減衰として用いられるより、数値計算の安定性のためにも用いられることが多い（剛性比例部分）。この減衰は式から分かるように、周波数が大きくなると減衰は比例的に大きくなる。すなわち、高次のモードに対する再現性は非常に悪いということになる。本論では、いくつかの減衰が

地震応答解析の精度に与える影響を検討する。

減衰の問題は数値解析法の問題と切り離せない。本体の非線形の手法も問題となるが、例えば等価線形と非線形では同じ条件で比較することは出来ない。ここでは、SHAKE および SHAKE の欠点を改良する方法³⁾ (DYNEQ⁴⁾) を等価線形法として用い、一方、非線形解析は STADAS⁵⁾の一次元版である DYNES を用いる。DYNEQ では有効ひずみ γ_e を周波数 f の関数として次式のように表している。

$$\gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} \quad f_p \leq f \leq f_e$$

（低周波、高周波部分は γ_{max} と0で一定）

ここで、 γ_{max} は最大ひずみ、 f_p はせん断ひずみ時刻歴である。またこれ以外に、振動数依存型の各種減衰が考慮されている。

このような検討は実記録を用いて行う方法もあるが、動的変形特性の精度の問題があるので、ここでは要因が特定可能な解析どうしの比較とした。

2. 解析モデル

文献6)に示した地盤を解析する。図-1に地盤条件を以下に示す最大応答値とともに示す。計算は、弾性のケースと非線形のケースの二つを行った。非線形の応力-ひずみ関係には双曲線モデルを用いた。

3. 解析結果と考察

弾性計算では周波数領域の解析では一定減衰2%を与えるケースと一次固有周期（0.42秒）で2%となる周波数比例減衰を与えるケースを行った。また、逐次積分では、一次固有周期で2%となる Rayleigh 減衰を与えた。解析の結果得られた最大応答値を図-1の中央に示す。また、図-2に増幅比を、図-3に地表の時刻歴（主要部のみ）をそれぞれ比較して示す。

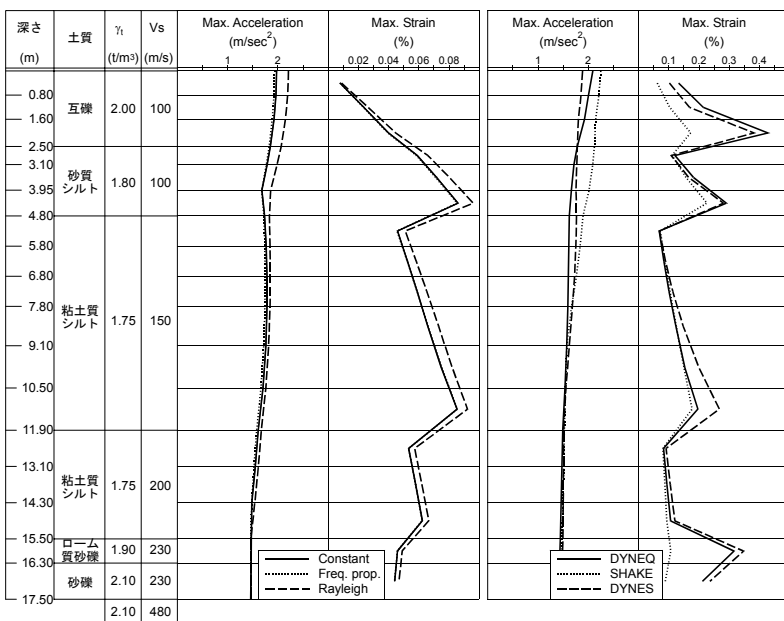


図-1 地盤と最大応答（左は弾性、右は非線形）

キーワード 地震応答解析, 非線形, 等価線形, Rayleigh 減衰, 安定性

連絡先 〒243-0211 神奈川県厚木市三田47-3 佐藤工業（株）中央技術研究所 Tel. 046-241-2172

図-2から、いずれのケースでも一次固有振動数より低周波数側ではどのケースもほとんど同じであるが、高振動側では一定減衰のケースがもっとも増幅が大きく、ついで周波数比例、Rayleigh減衰となっている。ピーク値ではRayleigh減衰の増幅比は一定減衰に比べ数分の1になっており、Rayleigh減衰ではこのような周波数領域の応答を逃す可能性がある。また、図-1ではRayleigh減衰の応答が大きく、図-2と反対の傾向に見える。Rayleigh減衰の増幅比はバンド幅0.8Hzの三角ウィンドウで平滑化しているので局所的には増幅が大きくなっている所もあることが原因かもしれない。

図-1に非線形解析時の最大応答値を、図-4にスペクトル比を、図-5に地表の加速度時刻歴を比較して示す。また、図-6にはひずみの大きい第3層の応力-ひずみ関係である。

図-5の加速度波形を見るだけでは三つの解析は同じ程度に見えるが、SHAKEの増幅が高振動領域で急激に小さくなっていること、図-6に点線で示した入力した応力-ひずみ関係に比べれば応力を過大評価していることはこれまでも指摘したのと同じである。このためひずみが小さく、応力が大きく、対応して加速度も大きくなっており、精度が良くないことが明瞭である。

等価線形では図に示した履歴減衰だけを考慮した解析以外にさらに周波数比例減衰を考慮した解析も行ったが差はほとんどなかった。すなわち、非線形応答では比例減衰は余り結果に影響しない。

等価線形(DYNEQ)と非線形(DYNES)は減衰を与える式は同じようであるが、前者が周波数に比例するのに対し、後者はモードに依存する。この差と図-6に示す応力-ひずみ関係の差が増幅比には大きく影響している様であるが、最大応答で見るとそれほどの差はない。なお、DYNEQでは履歴曲線の形状は基本的に楕円であるので、双曲線モデルで減衰が非常に大きくなっていることもあり、図のような大きな差になっている。

非線形法では、一次の卓越振動数は小さくなり増

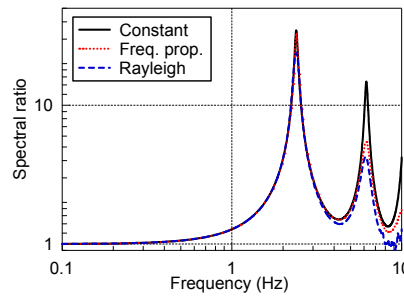


図-2 増幅比（弾性）

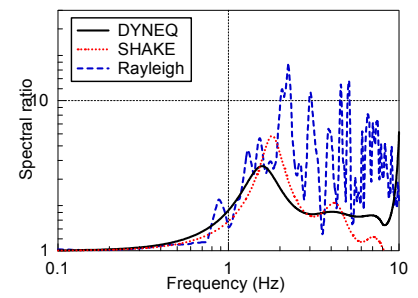


図-4 スペクトル比（非線形）

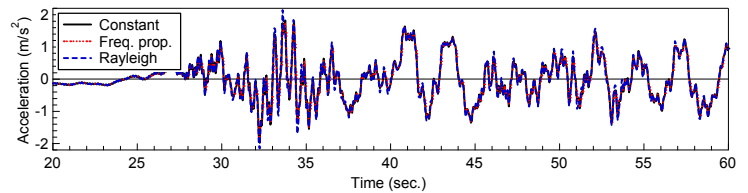


図-3 地表の加速度時刻歴（弾性）

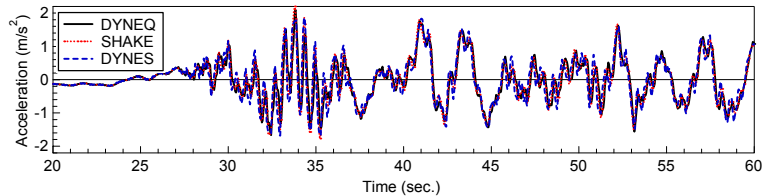


図-5 地表の加速度時刻歴（非線形）

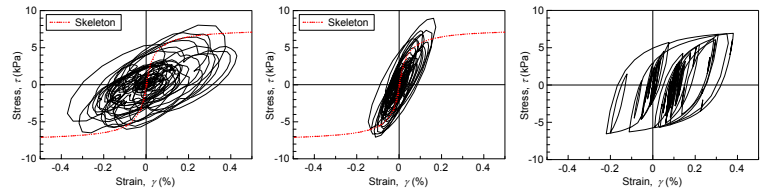


図-6 地表の加速度時刻歴（DYNEQ, SHAKE, DYNES）

幅も小さくなっているが、これより高い振動数では弾性解析に比べ増幅は全体的により大きくなっており、等価線形法とは大きな差がある。この原因の解明については今後の課題としたい。

参考文献

1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley ; 2) Yoshida, N. (2001): Dynamic soil properties and modeling, Proc., XV Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquake, Istanbul, Turkey, pp. 233-242 ; 3) Yoshida, N. et al: Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping (掲載予定) ; 4) 吉田望, 末富岩雄 (1996) : DYNEQ : 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, pp. 61-70 (<http://boh0709.hoops.livedoor.com> で公開) ; 5) Yoshida, N. (1993): STADAS, A computer program for static and dynamic analysis of ground and soil-structure interaction problems, Report, Soil Dynamics Group, The University of British Columbia, Vancouver, Canada ; 6) 性能評価に基づく各種設計荷重の指針 (案) 報告書, (社) 建築研究振興協会, 1998