

地震時の地盤の変位予測に与える減衰の影響 その2

地震応答解析, 減衰, 変位

応用地質 正会員 竹島 康人 応用地質 国際会員 吉田 望
京都大学 国際会員 澤田 純男 日本大学 国際会員 中村 晋

1 はじめに 地盤の地震応答解析では, 逐次積分法としてよく使われる Newmark の β 法などでは各時間ステップでインパルス応答関数を求めていること, 各時間ステップで剛性が変化することなどから高振動成分の応答が起りやすい。さらに, 地震応答解析では時間増分の数が非常に多いので, 各時間増分で釣合式を完全に満たすのではなく, ある程度の不釣合力が残った状態でそれを次のステップに持ち越す事も普通に行われるが, これも高振動数成分の応答が発生する要因になる。

このような高振動数成分は, まず加速度におけるパルス波形として現れる。その影響が余り大きくない場合にはこのパルス波形は自由振動の様に小さくなっていき, その他の挙動, 例えば変位や応力, ひずみにその影響を見ることは出来ない。しかし, 影響が大きくなるとパルスが発生した節点の隣接要素にまでその影響が大きく及ぼされ, 数値積分を安定的に行うことが困難になることもある。このようなパルスの発生を抑えるために, 減衰項は必須である。特に, 系の剛性が小さいとよりパルスの影響度が大きくなるので, 液状化解析のように剛性が期待できない状態になる場合にはパルスを抑え, 計算を安定的に行うために大きな減衰項を考えることも良く行われることである。

ところで, 前報¹⁾では地盤の地震応答解析に用いられる剛性比例減衰が最大加速度および最大変位に大きく影響することを示した。すなわち, 数値計算を安定的に行うために人為的に導入している減衰が結果に影響しているわけであり, 高精度の予測を行うためには問題があるといえる。

実現象としての減衰で一般に認識されているのは, 地下逸散減衰のような解析領域以外の問題, 材料非線形として考慮される履歴減衰を除けば散乱の減衰であろう。従って, 散乱の減衰程度の減衰を導入することで数値計算が安定的に行えると都合が良いのであるが, 表層地盤ではその値に共通的な了解が得られる状況ではない。また, 散乱の減衰は高振動数領域では振動数とともに減少していく性質を示し, 先に挙げた剛性比例減衰とは反対の性質を持っているので, 仮に散乱の減衰がわかったとしても数値計算の要求とは相反するものである。

このことは, 剛性比例減衰だけで計算を行う手法には限界があることを意味していることになる。剛性比例減衰または剛性比例減衰がその一部である Rayleigh 減衰は制御できるパラメータが最大でも2つであり, 多様な条件

には対応できない可能性がある。そこで, 本論では減衰定数をより大きな自由度で設定できるモード比例減衰をもちいて, 数値積分の安定化と応答の関係について検討する。

2 解析手法と解析モデル 剛性比例減衰については前報で報告した。本論で用いるモード比例減衰は, 減衰項があっても多自由度の系が離散化できる(固有値解析できる)という仮定の下で導かれる減衰で, 次式で定義される。

$$[C] = [M][\xi][2h_i\omega_i][1/m_j][\xi]^T[M] \quad (1)$$

ここで, $[\xi]$ は固有ベクトルで構成されるマトリックス, $[2h_i\omega_i]$ は $2h_i\omega_i$ を対角に持つマトリックス, $[1/m_j]$ は一般化質量の逆数を対角に持つマトリックスである。この方法で求めた減衰マトリックスは全成分が0ではなく, バンドマトリックスのような計算を軽減する手法は使えないので計算時間は飛躍的に増大する。

文献2)で示した地盤を解析対象とする。この地盤では等価線形, 非線形いずれの場合でも一定減衰に対して周波数比例減衰(剛性比例減衰)ではひずみが20%以上小さくなることが示されているし, その他の安定性の検討も行われて比較の対象として適当である。

3 解析手順 前述のように, 減衰項として物理的意味のある散乱の減衰の実際の量はよくわからない。そこで, ここでは全周波数に対して一定減衰2%に対する応答がターゲットとすべき正しい応答であると設定する。

また, 本論では数値計算の安定化を検討することになっているが, 実際に計算を行ってみると, 本計算のような全応力の一次元解析で数値計算が出来ないほどの悪い条件を作ることは大変であった。そこで, 数値計算の安定化を悪くさせるもとである加速度のパルスに焦点を当て, パルスが現れるように計算条件を設定する。すなわち, 文献2)で示されているように一定減衰を用いると時間増分が少し大きくなるとパルスが非常に大きくなり最大加速度は 100m/s^2 以上の値に簡単になってしまう(ただし, 計算は最後まで行うことはできる)。解析に用いる地震波は模擬地震動であり, 時間増分 Δt は0.04秒で, 通常地震波の地震応答解析に用いる値よりやや大きい。そこで, これを再分割して計算を行ったところ4分割($\Delta t=0.01$)では文献2)でも示されているように一部の層で最大加速度が倍程度大きくなるパルスが現れたが, 3分割($\Delta t=0.0133$)では最大加速度が 100m/s^2 以上となった。そこで, 4分割のケースを標準として, そこで現れるパルス

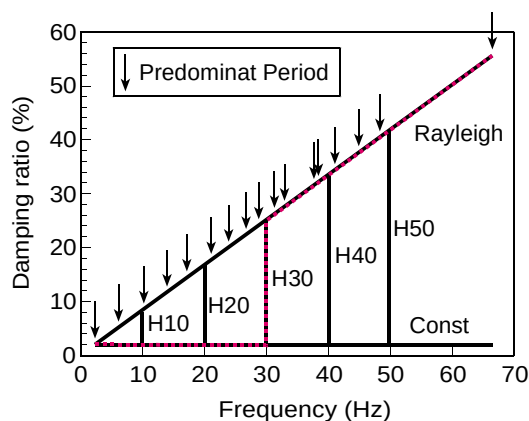


図1 減衰の設定方法

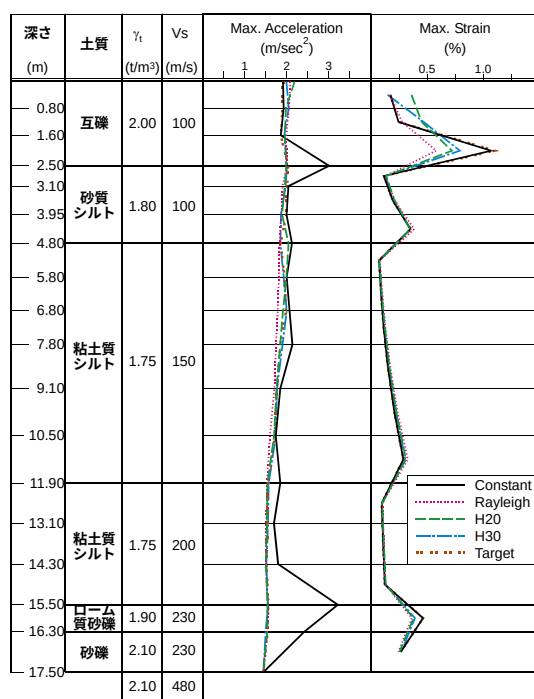


図2 解析モデルと最大応答値

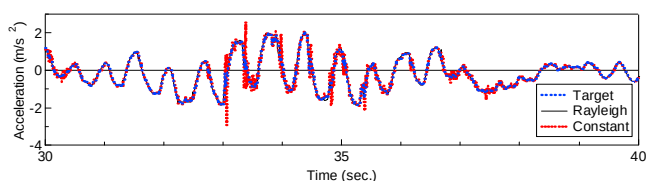


図3 GL-2.5mの加速度時刻歴

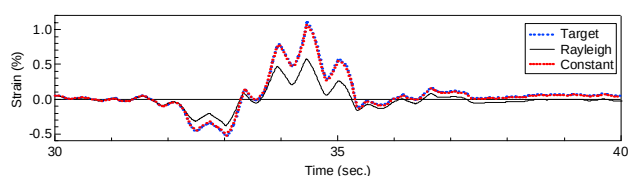


図4 3層 (GL-1.6~2.5m) のせん断ひずみ時刻歴

を抑えるとともに変位応答の変化を検討する。なお、分割数を10以上とすると応答にはほとんど変化がなかったので、これをターゲットとする。このように時間増分を小さくすると安定性は得やすくなるが時間増分の逆数に

比例して数値積分の時間が増加するので、実務では採用しにくく、代わりに剛性比例減衰などで応答を抑える方法が用いられるわけである。

関心のある周波数帯域の減衰を制御（この場合には一定値2%）し、高振動数成分の減衰を大きくする方法として図1に示すように低振動成分は一定値で高振動数成分はRayleigh 減衰（剛性比例）の値を用いることにした。すなわち、減衰は図の Rayleigh と Const の間にあり、10, 20, 30, 40, 50Hz で変化する。例えば H30は図の赤線の様な減衰である。

4 検討結果と考察 図2に代表的なケースの最大応答値を示す。ここで、Constant と Target は一定減衰で時間増分の分割数が異なるのみである。Rayleigh は剛性比例減衰の結果、H20 と H30減衰を制御した解析である。Target 以外の時間増分は0.01秒（4分割）である。

まず、一定減衰の Constant と Target を比較すると、Constant には前述のようなパルスの応答がでている。図3、図4には差の現れた部分の加速度とひずみの時刻歴を時間軸を拡大して示すが、Constant では各所でパルスが現れていることがわかる。一方、図4のせん断ひずみはほとんど一致している。すなわち、加速度に現れるパルスを除けば二つは同じ応答をしているといえる。

次に、実務でも用いられることの多い剛性比例減衰では図2の最大加速度、図3の加速度時刻歴は Target と同じ様な挙動を示すが、図2の最大ひずみで非線形の大きい層の最大ひずみを過小評価していることがわかる。なお、図では図3の加速度時刻歴はほとんど一致しているように見えるが、詳細に見ると差が現れ、数 Hz より高振動数の成分に影響を与えることは文献2)に示したとおりである。

最後に、減衰を調整したケースについてみると、最大加速度に見られるパルスは H10の計算でも十分抑えられている。しかし、図2に見られるように、高減衰の領域が広いとひずみは小さい。ひずみの過小評価を少なくするには高振動数まで小さい減衰を使う必要がある。

4 おわりに 自由に減衰を制御できる手法で減衰が地震応答に与える影響を検討したところ、加速度に現れるパルスはかなり容易に抑えることが出来るが、かなり高振動数成分で大きい減衰を用いてもひずみの過小評価は発生することがわかった。なお、本研究は科学技術振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」および「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」に基づいて実施したものである。

参考文献

- 1) 吉田望, 竹島康人, 澤田純男, 中村晋 (2004): 地震時の地盤の変位予測に与える減衰の影響 その1, 第39回地盤工学研究発表会講演集
- 2) Yoshida, N., Sawada, S., and Nakamura, S. (2004): Accuracy of Dynamic Response Analysis of Ground by Means of Damping and Nonlinear Characteristics, Proc. The 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and The 3rd International Conference on earthquake Geotechnical Engineering, Berkeley, USA, Vol. 1, pp. 126-133