

## 減衰の設定方法が長周期地震動評価に与える影響

計算力学研究センター ○董勤喜, 柴山恭, 吉見顕一郎  
 鉄道総合技術研究所 坂井公俊, 田中浩平, 室野剛隆

## 1. はじめに

計算機速度と数値計算手法, 地盤調査技術の進歩に伴い, 広域にわたる地震動を理論的に計算することが可能となっている. ここで, 地震動評価で用いる減衰は  $\alpha f^\beta$  といった形で表現されることが多く, 高振動数ほど小さな減衰となっている. さらに, 陽解法による計算では, 剛性に比例する減衰を無視した方が計算が容易であるため, 有限要素法によって断層を含む大規模領域の地震動を計算する場合には, 質量比例減衰を用いる場合が多い<sup>1, 2)</sup>. 一方で, 低振動数成分の地震動を理論的手法によって評価する場合, 地盤構造の同定精度やメッシュ分割の制約により, 現状では 1Hz 程度よりも高振動数分の地震動を有効に評価することは困難である. そのため, 質量比例減衰という高振動数で極端に小さくなる減衰を用いて計算を実施すると, 無意味な振動が大きく継続するため, 低振動数成分の精度低下や, 計算が不安定になってしまう可能性も考えられる. ここで, 2つの参照振動数を設定できるレイリー減衰を用いることで, より広い振動数帯で上記の減衰にフィッティングした地震動評価が可能となるとともに, 計算精度を有さない高振動数の振動を抑制することも出来る. そこで本検討では, 陽解法にレイリー減衰を導入するとともに, 減衰の設定方法が長周期地震動に与える影響について検討する.

## 2. 運動方程式の解法

地震波動伝播方程式を式(1)に示す.

$$M\ddot{u} + (C^v + C)\dot{u} + Ku = f \quad (1)$$

初期条件  $u_0, \dot{u}_0$  が既知である.

ここに,  $M, C, K$  は全体質量, 減衰と剛性マトリックスである.  $C^v$  は粘性吸収境界の減衰マトリックスである.  $f$  は震源からなる等価節点力ベクトルである.  $\ddot{u}, \dot{u}, u$  は加速度, 速度, 変位ベクトルである.

## 2.1. 質量比例減衰の場合

質量比例減衰の場合  $C = \alpha M$  とし, 時間積分は中央差分法を用いると, 式(1)は

$$\begin{aligned} \left( M + \frac{\Delta t}{2}(C^v + \alpha M) \right) u_{t+\Delta t} &= \Delta t^2 f_t - (\Delta t^2 K - 2M)u_t \\ &- \left( M - \frac{\Delta t}{2}(C^v + \alpha M) \right) u_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

となる.

粘性吸収境界や集中質量マトリックスは対角であるため, 陽解法を用いた場合, 並列計算効率は高い.

## 2.2. レイリー減衰の場合

レイリー減衰の場合  $C = \alpha M + \beta K$  とし, 中央差分法を用いると反復計算が必要であるため, 膨大な計算時間がかかる. そこで本検討では, 質量比例減衰項は中央差分法を適用し, 剛性比例減衰項は後退差分法を用いた<sup>2)</sup>. 式(1)は

$$\begin{aligned} \left( M + \frac{\Delta t}{2}(C^v + \alpha M) \right) u_{t+\Delta t} &= \Delta t^2 f_t - K(\Delta t^2 u_t + \Delta t \beta (u_t - u_{t-\Delta t})) \\ &+ 2Mu_t - \left( M - \frac{\Delta t}{2}(C^v + \alpha M) \right) u_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

となる. ここに,  $\alpha, \beta$  は質量減衰係数と剛性減衰係数である.

式(3)の左辺( $\cdot$ )の逆行列を求める必要はないため, レイリー減衰を考慮する場合にも質量比例減衰とほぼ同じ CPU 時間で大規模地震動の解が求められる.

## 3. 計算例による長周期地震動の評価

1995 年兵庫県南部地震を例とし, 減衰の設定方法が長周期地震動評価に与える影響を検討する.

## 3.1. 解析条件

解析モデルとして, 文献<sup>3)</sup>に示される解析領域と断層モデルを用いた. 解析領域と 5 枚のセグメントの位置関係を図-1(a)に示す. 図-1(b)に示す地盤モデルは, 防災科学技術研究所で公開している J-SHIS を用いた. 解析モデルの深さは 40km とし, 図-1(b)に示す層境界の深さと有限要素法の要素の中心深さを比較して, 要素がどの層に属するかを判定し, 物性値を設定した.

メッシュは有効振動数 0.5Hz (保証周期 2.0 秒以上)を満たすサイズで分割した. メッシュ分割にあたり, 地表から地下 770.0m までは 70m 間隔で分割し,

キーワード 長周期地震動, 有限要素法, 陽解法, 大規模並列計算, レイリー減衰

連絡先 〒142-0041 東京都品川区戸越 1-7-1 (株) 計算力学研究センター 技術 2 部 TEL 03-3785-3947

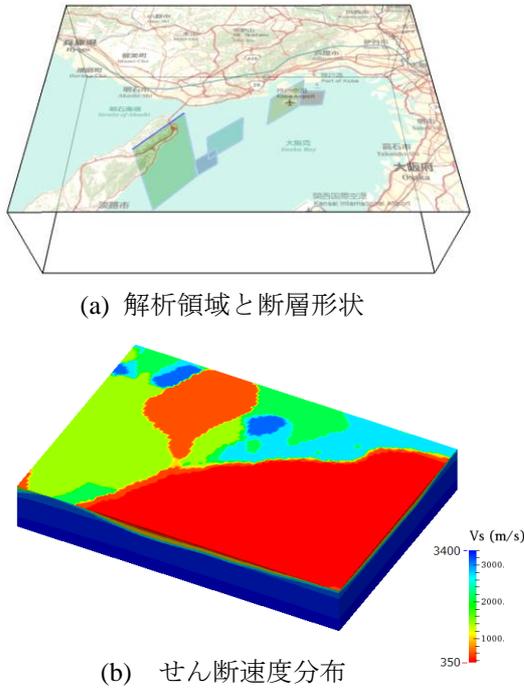


図-1 解析対象領域と地下構造せん断速度の分布

770.0m 以深は速度に応じてメッシュサイズを変化させ、四面体と六面体で節点数約 1000 万、要素数約 1260 万の規模のメッシュを生成した。モデルの側面と底面に粘性吸収境界を設けた<sup>4)</sup>。解析にあたり、5つの断層を 512 個の小断層に分割し、点震源でモデル化した。また、中村・宮武の震源時間関数を採用した。

伝播経路の Q 値としては、兵庫県エリアの地盤  $Q=90f^{0.8}$  を利用した。振動数と減衰比との関係を図-2 に示す。解析にあたり、レイリー減衰係数は  $\alpha=0.048661$ 、 $\beta=0.001228$  に設定した。なお、小規模モデルの解析においてシングル計算と並列計算が同じ結果となることを確認しており、かつ今回のモデルにおいて質量比例減衰とレイリー減衰では同じ計算時間であることも確認済である。

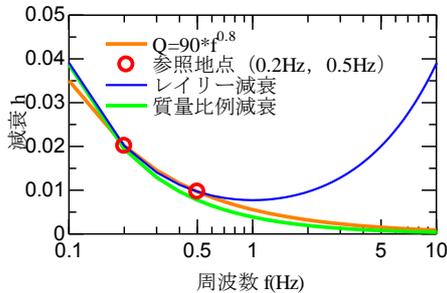


図-2 振動数と減衰比との関係

3.2. 解析結果

解析時間刻みは 0.01 秒とし、解析時間は 50 秒とした。観測点での時刻歴データと地表面の節点での時刻歴データを出力し、0.5Hz から 2.0Hz に直線のスロープをもつローパスフィルタをかけた。ローパスフィル

タをかけた速度波形を図-3 に示す。質量比例減衰と、レイリー減衰の場合の速度時刻歴波形を比較すると、質量比例減衰を用いた場合には計算終了の 50 秒においても波形が収束していない。また、鷹取付近で観測された記録の継続時間は 15 秒程度となっており、レイリー減衰を用いることで、より妥当な継続時間の波形となっていることが分かる。

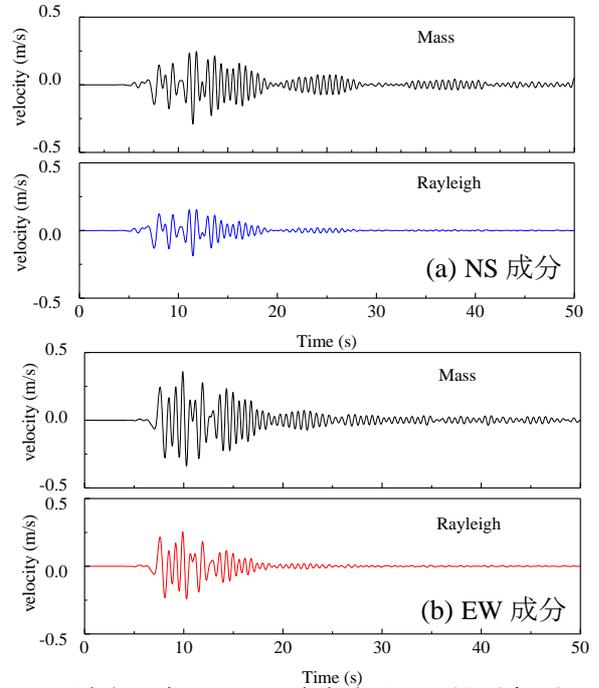


図-3 減衰の違いによる速度波形の比較 (鷹取)

4. おわりに

今回は、有効振動数以上でより大きな減衰を設定可能なレイリー減衰による地震動計算を実施し、従来から一般的に用いられている質量比例減衰との簡単な比較を行った。今後より詳細な考察を行うことで、長周期地震動を計算する際の適切な減衰の設定方法について提案を行う予定である。

謝辞

防災科学技術研究所の J-SHIS の地盤データを用いた。

参考文献

- 1) H. Bao, J. Bielak, O. Ghattas, L. F. Kallivokas, D. R. O'Hallaron, J. R. Shewchuk, and J. Xu: Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.152, pp.85-102, 1998.
- 2) B. T. Aagaard: *Finite-Element Simulations of Earthquakes*, Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2000.
- 3) 平井ほか：分岐断層の特性化震源モデルを用いた兵庫県南部地震の強震動シミュレーション, *日本地震工学会論文集* Vol.6, No.3, pp.1-11, 2006.
- 4) J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer: Finite Dynamic Model for infinite Media, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, Vol.95, No.3, pp.859-877, 1969.