

動的 Winkler ばねモデルを用いた杭支持建築構造物の地震時剛性設計

竹脇 出・土井明裕・辻 聖晃・上谷宏二

1. 序

杭支持された建築構造物の地震時の挙動を評価する方法には、弾性支承梁の方法と応答変位法を組み合わせた方法、Penzien 型のモデルを用いた方法、動的 Winkler 型ばねを用いた方法、3次元有限要素モデルを用いた方法、薄層要素法を用いた方法、Green 関数を用いて離散ばねに置換する方法等、多数のものが提案されている。挙動を詳細に表現できるモデルは、研究レベルでは興味深い、過大な計算負荷を伴う場合が多く、実際の設計においては、重要な挙動特性を許容精度で表現可能であり、かつ計算負荷が小さい方法が望まれている。ここでは、Gazetas らによる動的 Winkler 型ばねを用いた解析手法および逆問題型の設計手法を提案する。

2. 多点入力による連続体モデル (MIC モデル)

Fig.1(a)に示すような層状地盤内に杭が存在する場合を扱う。ここでは1本の杭に関する定式化を行う。上部構造物はせん断型構造物モデルとして扱い、杭頭は固定とする。基礎のロッキングは考慮しない。動的 Winkler ばねの剛性は杭頭拘束に対応して地盤のヤング係数の1.2倍とし、減衰係数は逸散減衰と履歴減衰の和とする。

自由地盤の応答は1次元重複反射理論により評価する。第1層地盤における自由地盤と杭の変位をそれぞれ u_{gl}, u_{pl} で表すと、第1層地盤における杭に関する支配微分方程式は次のように表される。

$$E_p I_p \frac{\partial^4 u_{pl}}{\partial z_1^4} + m_p \frac{\partial^2 u_{pl}}{\partial t^2} = S_1(u_{gl} - u_{pl}) \quad (1)$$

(1)式の変位振幅に関する一般解は次のように表現できる。

$$\hat{U}_{pl}(z_1) = D_1 e^{-\lambda_1 z_1} + D_2 e^{\lambda_1 z_1} + D_3 e^{-i\lambda_1 z_1} + D_4 e^{i\lambda_1 z_1} + \eta_1 \hat{E}_1(z_1) \quad (2)$$

ここで $\eta_1 = \alpha_1 / \{(\omega / V_{sl})^4 - \lambda_1^4\}$ 。

各地盤層について4個の未定係数が存在するため、 n 層地盤上に n_b 層 (n_b 自由度)の構造物モデルが存在する場合には、各加振振動数について $4 \times n + n_b$ 次元の線形連立方程式を解く必要がある。

3. 単一点入力による有限要素モデル (SIFEM モデル)

Fig.1(b)に示すようなモデルを扱う。本モデルは、中村、竹脇、島野(1992)により提案されたモデルに、工学的基礎面下方への波動逸散効果と動的 Winkler 型ばねを導入したモデルである。

自由地盤と杭の変位関数は、それぞれ1次関数、3次関数とする。MIC モデルと同様に杭の減衰は考慮せず、自由地盤の減衰は剛性比例型として扱う。Winkler 型ばねの剛性は前節と同じものとし、減衰係数は前節の減衰係数(振動数依存)において構造物 杭系の1次固有振動数で評価したもの(振動数非依存)とする。

4. SIFEM モデルに対する応答スペクトル法

本論文では、複素固有値解析に基づく応答スペクトル法を用いる。

5. 上部構造1次固有振動数をパラメタとする上部剛性設計法

上部構造の指定層間変位のレベルから層間剛性が決定できること、および、上部構造の1次固有振動と自由地盤の1次固有振動の共振領域以外では、上部構造の剛性のレベルが杭の応力比に大きな影響を及ぼさないことを示すことができる(Fig.2, 3)。比較的低層の構造物では、上部構造の1次固有モードを直線形とする有効な剛性設計法が構成可能である。また、層間変位の分布形を希望する分布形とするには、1次固有モード形を調整する方法が構成できる。

6. 杭径をパラメタとする杭応力比設計法

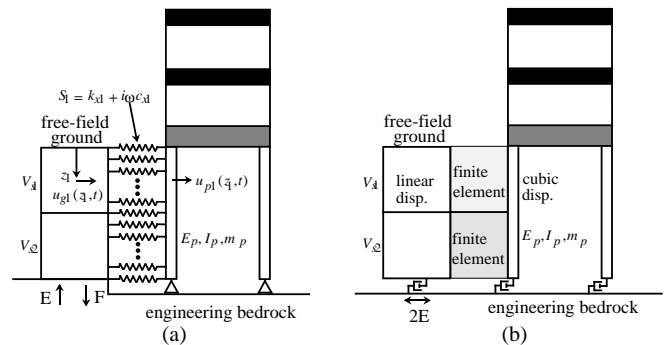


Fig.1 (a) Multi-input continuum model, (b) single-input FEM model

杭のサイズが上部構造応答(層間変位)に大きな影響を及ぼさないことを示すことができる(Fig.4)。同じモデルにおいて、杭径を1mから2mまで変化させたときの杭の応力比の最大値の変動をFig.5に示す。1mから1.5mの範囲ではある程度の変動が見られるが、1.5mを超えるあたりから変化率が低下することがわかる。Fig.5から設計者は、応力比に応じた杭径を決めることができる。

7. 結論

- (1) 自由地盤と構造物 杭系の質量差を適切に設定した単一点入力有限要素モデルは、多点入力連続体モデルの良好な近似モデルとなり得る。単一点入力有限要素モデルは、応答スペクトル評価を容易とする利点を有している。
- (2) 比較的低層の構造物では、1次固有振動数をパラメタとすることにより、指定した層間変位の最大値の平均分布を呈する構造物の剛性分布を見出すことができる。中高層の構造物でも層方向の一樣化アルゴリズムを組み込むことが可能である。
- (3) 指定した「杭の応力比(許容応力に対する地震時最大応力の比)」を呈する杭のサイズは、杭径をパラメタとすることにより比較的容易に見出すことが可能である。

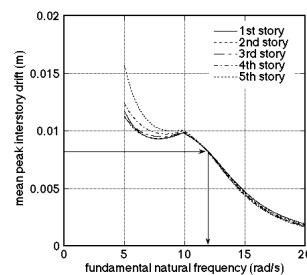


Fig.2 Mean peak story drift w.r.t. fundamental frequency

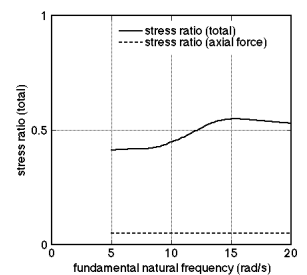


Fig.3 Maximum pile stress ratio w.r.t. fundamental frequency

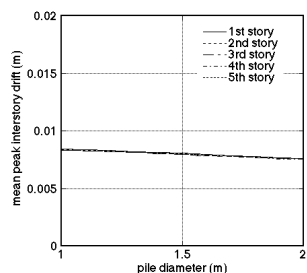


Fig.4 Mean peak story drift w.r.t. pile diameter

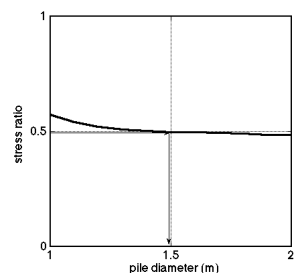


Fig.5 Maximum pile stress ratio w.r.t. pile diameter