

弾塑性パラメータを有する基礎免震建築物の固有値推定に関する基礎研究

11 質点系基礎免震モデルを用いた検討

Study on Estimation of Eigenvalues in base isolation Buildings with Elasto-Plastic parameters

Study using 11-DOF base seismic isolation model

○大浦英恵³, 秦一平¹, 阿久戸信宏¹, 郭鈞桓²*Hanae Oura³, Ippei Hata¹, Nobuhiro Akuto¹, Chunhuan Kuo²

Abstract: This paper proposes estimating methods of eigenvalues in non-proportionally damping model. First, the tendency of eigenvalues to change with different elasto-plastic parameters was checked. From the result of verification, an equation was constructed to estimate eigenvalues in non-proportionally damping model from eigenvalues in non-damping model without the complex eigenvalue analysis. The prediction of eigenvalues calculated from the formula is estimated accurately.

1. はじめに

免震建物の実務設計では、免震層パラメータを適宜変更しながら目標応答値を満足するまで時刻歴応答解析を繰り返し行う検討や、平12建告第2009号(以下、「告示免震」)で用いられる応答評価^[1]が一般的である。告示免震においては、1質点系モデルに置換して応答スペクトル法に基づく方法で応答評価を行う。しかし、多質点系に展開した場合には計算精度に欠けるため、あまり利用されていない。

そこで、多質点系モデルの応答評価方法としてモーダルアナリシスが有効である。この方法は固有値解析を介すため、各モード周期や刺激関数を把握でき建物性能を考慮した設計が可能である。しかし、免震建物のような非比例減衰系モデルの場合には複素固有値解析が必須だが、一般には用いられないのが現状である。

以上の観点より本研究では、非比例減衰系の免震建物モデルの固有値を複素固有値解析を介することなく推定する方法を提案する。そこで、まずは免震層の周期比 \hat{T} (免震層等価周期 T_{iso} /1次固有周期 T_0)及び弾塑性要素が固有値に与える影響を確認する。そして、無減衰系建物モデルの固有値から非比例減衰系の固有値を推定する式を作成し、推定精度について確認する。

2. 建物モデル

対象建物は、11層せん断型質点系の基礎免震モデルとする。Table.1に免震層の検討パラメータを示す。免震層パラメータを決定する際には、まず、目標とする周期比 \hat{T} を満足する免震層等価剛性を設定する。次に、その免震層等価周期及び1次履歴減衰定数 h_{1st} を満足する弾塑性パラメータを決定する。そして、決定した免震層パラメータを用いたモデルの複素固有値解析

を実施し傾向を整理する。本検討に用いる上部構造モデルの1次固有周期 T_0 は0.7[s]である。

Table.1 Parameters of seismic isolation layer

\hat{T}	h_{1st}	p_d
1.0 - 4.0 (1.0 increment)	0.15 - 0.3 (0.05 increment)	0.05 - 0.2 (0.05 increment)

3. 各固有値の変化傾向

5次モードまでを対象に、複素固有値解析による等価周期 T_{eq} 、履歴減衰定数 h_{cs} 、刺激関数の変化傾向をFig.1からFig.4に示す。ここでは、Fig.1からFig.3は周期比 $\hat{T} = 4.0$ のときを示す。

Fig.1に無減衰系 j 次モードの等価周期に対する1次履歴減衰定数 h_{1st} を与えたときの j 次モード等価周期の比率 $T_{j,x}/T_{j,0}$ を縦軸、 h_{1st} を横軸に示す。ここで、 x は h_{1st} である。 h_{1st} が増加するほど等価周期 $T_{j,x}$ も増加しており、長周期化していることが分かる。また、高次モードほど変化が小さいことも確認できる。

Fig.2に1次履歴減衰定数に対する j 次モードの履歴減衰定数の比率 h_j/h_{1st} を縦軸、 j 次モードの等価周期に対する1次等価周期の比率 $T_{j,x}/T_{1st,x}$ を横軸に示す。横軸上で右側ほど高次モードとなる。高次モードの履歴減衰の付与率が急激に減少していることが分かる。この傾向は周期比 \hat{T} によらず同様であった。

Fig.3に1次履歴減衰定数 h_{1st} 別の刺激関数を示す。なお、バイリニア係数は $p_d = 0.1$ で一定である。 h_{1st} の違いによる刺激関数の影響はほぼないことが確認された。この結果は各周期比ごとと同様の結果であった。さらに、バイリニア係数 p_d を変化させたときにも刺激関数の影響はなく、弾塑性パラメータによる影響が少ないことを確認している。

Fig.4に周期比 \hat{T} の変化による刺激関数の変化傾向を示す。ここでは、1次履歴減衰定数 $h_{1st} = 0.2$ 、バイ

1: 日大理工・教員・建築 2: 日大理工・任期制職員・建築 3: 日大理工・学部・建築

リニア係数 $p_d = 0.1$ の場合における結果のみを示す。1次モードの刺激関数は周期比 \hat{T} が小さいほど、上層で増幅し下層で減少する傾向にあることが分かる。また、高次モードの形状は各モードで変化がないものの、周期比が小さいほど刺激関数は増幅している。

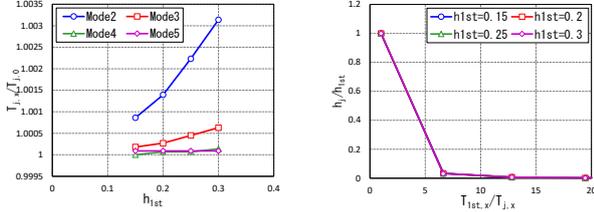


Fig.1 Tendency of $T_{1st,x}/T_{j,x}$ Fig.2 Tendency of h_j/h_{1st}

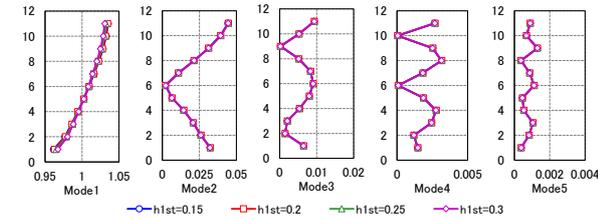


Fig.3 Tendency of participation vector by h_{1st}

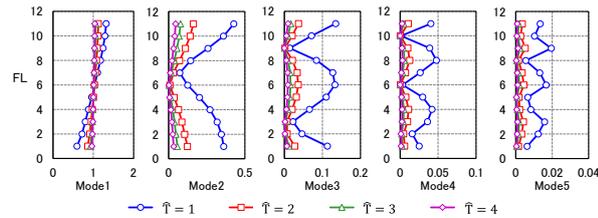


Fig.4 Tendency of participation vector by \hat{T}

4. 固有値推定式の作成

3章の複素固有値解析結果を整理し、等価周期、履歴減衰定数、刺激関数の推定式を作成した。等価周期と履歴減衰定数の推定式を(1)式と(2)式に示す。

刺激関数の推定式を算出する。刺激関数の分布形状を層数 N によらない基準化するために、層位置 i の基準化式を用いる。最上層位置を1, 最下層位置を-1とする。また、無減衰系の刺激関数の中層部で最も値が小さい(2nd・4th)または大きい(3rd・5th)層位置 n_0 として基準化を行い、基準化した層位置 n'_i を得る。

$$T_{j,x} = T_{j,0} \times e^{(\alpha \times \hat{T}^b) \times h_{1st}^2} \quad (1)$$

	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5
a	0.0	1.098	0.467	0.114	0.022
b	0.0	-2.505	-3.108	-3.235	-2.549

$$h_j = h_{1st} \times 10.7 \times (T_{1st,x}/T_{j,x})^{-3.11} \quad (2)$$

$$n'_i = \left(\frac{i}{N-n_0}\right) \times (i - n_0) \quad (i > n_0) \quad \text{or} \quad n'_i = \left(\frac{i}{n_0-1}\right) \times (i - n_0) \quad (i < n_0) \quad (3)$$

$$\beta_{1st} \gamma_i = a_{11} \times n'_i + a_{21} \times n_i^2 + a_{31} \quad (4)$$

$$\beta_{2nd} \gamma_i = a_{11} \times n'_i + a_{21} \times n_i^2 + a_{31} \times n_i^3 + a_{41} \times n_i^4 + a_{51} \quad (5)$$

$$\beta_{3rd} \gamma_i = a_{11} \times n'_i + a_{21} \times n_i^2 + a_{31} \times n_i^3 + a_{41} \times n_i^4 + a_{51} \times n_i^5 + a_{61} \times n_i^6 + a_{71} \quad (6)$$

$$\beta_{4th} \gamma_i = a_{11} \times n'_i + a_{21} \times n_i^2 + a_{31} \times n_i^3 + a_{41} \times n_i^4 + a_{51} \times n_i^5 + a_{61} \times n_i^6 + a_{71} \times n_i^7 + a_{81} \times n_i^8 + a_{91} \quad (7)$$

$$\beta_{5th} \gamma_i = a_{11} \times n'_i + a_{21} \times n_i^2 + a_{31} \times n_i^3 + a_{41} \times n_i^4 + a_{51} \times n_i^5 + a_{61} \times n_i^6 + a_{71} \times n_i^7 + a_{81} \times n_i^8 + a_{91} \times n_i^9 + a_{101} \times n_i^{10} + a_{111} \quad (8)$$

5. 固有値推定式の推定精度

提案する推定式の推定精度について示す。推定式から得られる推定値と解析値との比較を行う。まず、等価周期と履歴減衰定数の推定精度を Fig.5 と Fig.6 に示す。なお、Fig.5 の凡例は等価周期の解析値に対する推定値の比率、Fig.6 の凡例はモード_周期比である。いずれのモードにおいても精度よく推定できていることが確認できる。次に、刺激関数の推定精度を確認する。評価には相対二乗平均平方根誤差(相対 RMSE)と相関係数 ρ を用いる。相対 RMSE は誤差を相対的に評価しており 0[%]に近いほど精度が良い。また、相関係数 ρ は刺激関数の分布形状を評価し 1.0 に近いほど精度が良いことを表している。相対 RMSE と相関係数 ρ を各 1 次履歴減衰定数 h_{1st} 、周期比 \hat{T} 、モードごとに算出し Fig.7 に示す。凡例は Fig.6 と同様である。相対 RMSE は 15[%]以内、相関係数 ρ は 0.96 以上となっており精度よく推定できていることが分かる。

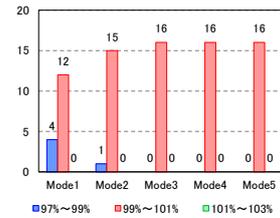


Fig.5 Estimated accuracy of $T_{j,x}$

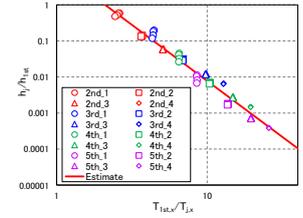


Fig.6 Estimated accuracy of h_j

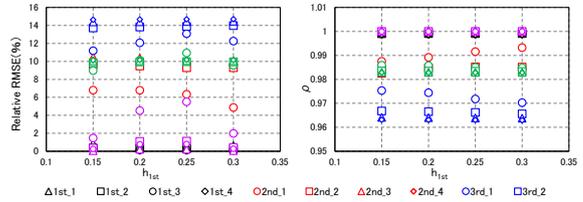


Fig.7 Relative RMSE and correlation coefficient of participation vector

6. まとめ

本研究では、基礎免震建物の免震層パラメータによる複素固有値解析の固有値の変化傾向を確認し、提案する推定式の精度が良いことを確認した。

今後は層数の異なるモデルで検討を行い、同様の評価が可能か検証する。

参考文献

[1] 建築研究所, 日本免震構造協会, 建築研究振興協会: 改正建築基準法の免震関係規定の技術的背景, ぎょうせい, 2001.8
 [2] 山上哲哉, 秦一平, 阿久戸信宏他 3 名: 非比例減衰系の固有値推定に関する基礎的研究 その1~その3, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.559~564, 2021.7
 [3] 石丸辰治: 応答性能に基づく「耐震設計」入門, 彰国社, 2004.3