

中間階免震建物の簡易設計方法に関する基礎研究 下部構造の特性を考慮した応答加速度予測手法の提案

Study on Simple Design Method for Mid-Story Isolated Building

Proposal of response acceleration prediction method considering characteristics of understructure

○草間一樹³, 秦一平¹, 阿久戸信宏¹, 郭鈞桓²

*Kazuki Kusama³, Ippei Hata¹, Nobuhiro Akuto¹, Chunhuan Kuo²

Abstract: This paper reports on a method for predicting the response acceleration of mid-story seismic isolated building. In order to make predictions, we organized how mid-story seismic isolation layer would fluctuate depending on the frequency characteristics of the understructure. We also proposed a design method that takes into account the characteristics of the mid-story isolated building and confirmed that it can predict the mid-story isolated building with good.

1. はじめに

免震建物の設計において、基礎部に免震層を設ける基礎免震構造と、建物中間部に免震層を設ける中間階免震構造がある。基礎免震の場合、免震層から上の構造（以下、「上部構造」）を免震化することが可能である。しかし、中間階免震の場合には免震層から下の構造（以下、「下部構造」）については応答の低減効果を期待することができない。また、下部構造の特性によって入力地震動が増幅され免震層から上部構造にかけて応答性状に影響を及ぼすことが懸念される。

既往研究において、中間階免震建物の簡易設計法として免震階設定指標¹⁾を用いた設計法が提案されている。免震階設定指標は、中間階免震建物の設置層の関係から、免震層の免震層周期 T_{iso} 、上部、下部構造の影響を示した指標となっている。さらに、黒田・秦らが提案する応答性能設計図表²⁾を用いて、免震層パラメータの逆設計法が可能となっている。この逆設計法は基礎免震建物について応答変位および応答加速度について精度よく予測できることが示されているが、中間階免震建物には示されていない。ここで懸念されることは、中間階免震建物の場合、基礎に入力された地震動が免震層の下部構造の特性によって周波数特性が変化し、免震層に入力される地震動特性を簡便に把握することが出来ないことである。

そこで本研究では、中間階免震建物の免震層および上部構造の応答を精度よく予測する手法について提案する。まず、中間階免震建物の応答特性について整理し、下部構造の影響による上部構造の応答増幅率を把握可能な予測包絡線を提案する。そして、予測包絡線を用いた加速度評価を示し、中間階免震建物の応答加速度を予測しその精度について示す。

2. 中間階免震建物の応答性状

中間階免震建物の応答加速度特性について基礎免震建物と比較して考察する。基礎免震建物の場合、地震動は免震層に直接作用するため、地震動の擬似速度応答スペクトル $pS_{v,40}$ から上部構造の応答加速度を評価することが可能である。しかし、中間階免震建物の場合、地震動は下部構造を伝達して免震層に作用するため、下部構造の固有周期によって免震層に入力される周期特性が変化する。Fig.1より、下部構造での応答加速度の増幅により免震層下の層の絶対加速度（応答加速度）は高次モード周期帯でスペクトルの増幅が確認できる。その高次モードの周期特性の変化が影響することによって、免震層を含めた上部構造の応答加速度は増幅する傾向にある。そのため、黒田・秦らが提案する応答性能設計図表を用いる場合、免震層に入力される2次モードと3次モードの増幅した擬似速度応答スペクトル $pS_{v,40}$ を把握することができず、免震層を含めた上部構造の応答加速度の予測精度を担保することができない。以上の観点から、中間階免震建物の免震層に入力される周期特性の増幅傾向を把握する必要がある。

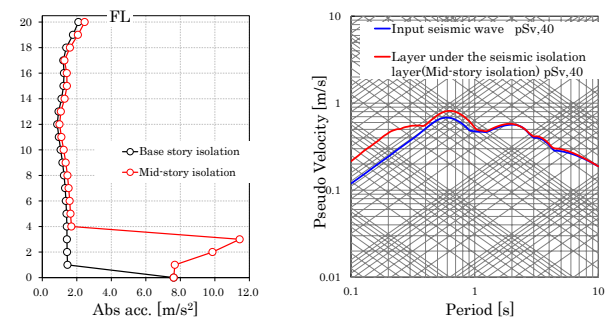


Fig.1 Response characteristics of mid-story isolated Building (exp. 20-DOF mdoel)

3. 中間階免震建物のパラメータスタディ

中間階免震建物の免震層下の周期特性の傾向を把握するため、20 質点系モデルを対象にパラメータスタディを実施する。建物モデル及び免震層パラメータを Table.1 に示し、解析用地震波 50 波を Table.2 に示す。免震層については同一の性能を持つ免震層の設置位置を 2 層から 9 層に変更することとする。ここで、時刻歴応答解析より得られた免震層下の応答加速度を用いて疑似速度応答スペクトルを作成する。そして、下部構造の 1 次固有周期 $T_{u,1st}$ の時の入力地震動に対する作成した免震層下の疑似速度応答スペクトルの増幅傾向 ($pS_{v,40}$ 比) を整理する。

Fig.2 にパラメータスタディ結果を整理して示す。中間階免震建物の免震層位置によって $pS_{v,40}$ 比の増幅量に傾向があることが確認できる。ここで、 $pS_{v,40}$ 比を簡易に把握するため、抽出したデータの最大値を包絡する赤線の予測包絡線を作成した。なお、分布にばらつきのある層を考慮するため、各層に対して平均値 ± 標準偏差の範囲のデータを抽出している。

4. 中間階免震建物の応答加速度予測

作成した予測包絡線を用いて中間階免震建物の応答加速度評価方法について示す。

まず、中間階免震建物の下部構造のみの 1 次固有周期 $T_{u,1st}$ を算出し、Fig.2 に示した赤線の予測包絡線の該当周期から $pS_{v,40}$ 比を決定する。次に、応答性能設計図表の (1) 式から (5) 式に示す実験式において、 $pS_{v,40}$ 比を、(3) 式と (4) 式の 2 次モードと 3 次モードの実験式にそれぞれ掛け合わせる。以上より、中間階免震建物における下部構造の影響による周波数特性の増幅を考慮した、中間階免震建物の加速度評価を行うことが可能である。

前述した予測方法を用いて中間階免震建物の加速度評価を行う。対象モデルは免震層位置を 4 層とした 20 質点系せん断モデルとする。Fig.3 に時刻歴応答解析結果を示す。なお、入力地震動は凡例に示す 4 波を 50[kine] に基準化したものを用いる。Fig.3 より、予測値が時刻歴応答解析結果を概ね包絡しており安全側の評価が出来ていることが確認できる。よって、提案した中間階免震建物の応答加速度評価が妥当であることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、中間階免震建物の下部構造による周波数特性の変化を把握し、把握した周波数特性を応答性能設計図表に組み込むことで、中間階免震建物の応答加速度を予測可能であることを示した。

Table.1 Parameter of analysis model

Parameter of structure			Parameter of isolation	
Total building mass [ton]	Stiffness Proportional Damping $h_1 = 2\%$	Natural period [s]	p_d	μ_d
29,868		1.40	0.2	10

Table.2 Input seismic wave

El Centro-NS	Osaka205-EW	C2-El_Centro	C2-JR_TAKATORI
El_Centro-EW	中越-NS	C3-El_Centro	C3-JR_TAKATORI
Hachinohe-NS	中越-EW	C4-El_Centro	C4-JR_TAKATORI
Hachinohe-EW	TSUKIDATE-NS	C2-Hachinohe	C2-JR_TAKATAZUKA
TAFT-NS	TSUKIDATE-EW	C3-Hachinohe	C3-JR_TAKATAZUKA
TAFT-EW	JMAJ-NS	C4-Hachinohe	C4-JR_TAKATAZUKA
JMA-KOBE-NS	JMAJ-EW	C2-TAFT	C2-RANDAM
JMA-KOBE-EW	中越-JNS	C3-TAFT	C3-RANDAM
JR_TAKATORI-NS	中越-JEW	C4-TAFT	C4-RANDAM
JR_TAKATORI-EW	TSUKIDATE-NS	C2-JMA-KOBE	C2-TOHOKU UNIVERSITY
一の前-EW	TSUKIDATE-EW	C3-JMA-KOBE	C3-TOHOKU UNIVERSITY
Sendai501-NS	BCI-L1	C4-JMA-KOBE	C4-TOHOKU UNIVERSITY
Tohoku-NS	BCI-L2	(75[kine]基準化)	

◇ 2 story ◇ 3 story ◇ 4 story ◇ 5 story ◇ 6 story ◇ 7 story ◇ 8 story ◇ 9 story

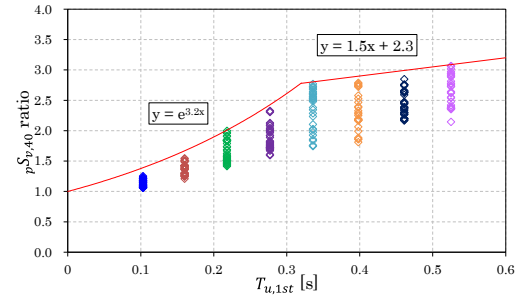


Fig.2 Predictive envelope of the proposed $pS_{v,40}$ ratio

$$ABS_{max,j} = ABS_{max,1st,j} + ABS_{max,2nd,j} + ABS_{max,3rd,j} - \alpha \quad (1)$$

$$ABS_{max,1st,j} = 2(\hat{h}_{eq1st} + \hat{h}_{cs1st})\omega_{eq1st}V_{max,1st}\beta_{1j}r_j + \omega_{eq1st}^2 D_{max,1st}\beta_{1j}r_j \quad (2)$$

$$ABS_{max,2nd,j} = A_{40,2nd} \cdot R_{2nd}(\hat{p}_d, \hat{\mu}_d, \hat{h}_0, \hat{T}, \hat{m}) \cdot \beta_{2j}r_j \quad (3)$$

$$ABS_{max,3rd,j} = A_{40,3rd} \cdot R_{3rd}(\hat{p}_d, \hat{\mu}_d, \hat{h}_0, \hat{T}, \hat{m}) \cdot \beta_{3j}r_j \quad (4)$$

$$A_{40,i} = pS_{v,40,i} \cdot \omega_{eq,i} \quad (5)$$

$ABS_{max,i,j}$: Ref resp acc. of the i-th mode of layer j	α : Corrected constant
$ABS_{max,j}$: Maximum resp acc. of layer j	\hat{h}_{eq1st} : 1st mode viscous damping ratio
\hat{h}_{cs1st} : 1st mode equivalent damping ratio	ω_{eq} : i-th mode equivalent circular frequency
$\beta_{i}r_j$: participation vector of the i-th mode of layer j	$D_{max,1st}$: Ref resp disp.
$A_{40,i}$: Input acceleration in i-th mode	$V_{max,1st}$: Ref resp vel.
R_i : Resp ratio for i-order mode	$\hat{\mu}_d$: 1st modal plasticity
\hat{p}_d : 1st modal bilinear coefficient	\hat{T} : Periodic ratio
\hat{h}_0 : 1st modal viscous damping ratio	\hat{m} : Mass ratio

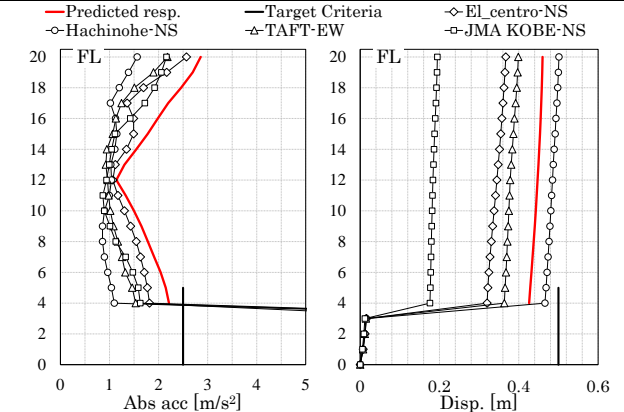


Fig.3 Result of time history analysis

参考文献

- [1] 黒瀬梨加, 秦一平他: 「中間階免震建物の簡易設計方法に関する基礎的研究 その 1, その 2」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 871-874, 2017. 8
- [2] 黒田竜司, 秦一平他: 「複数のクライテリアを同時に満足する免震簡易設計方法に関する研究その 1, その 2」, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 933-936, 2018. 8
- [3] 秦一平, 石丸辰治他: 「非線形粘性ダンパーと弾塑性ダンパーを併用した系の応答性能設計手法」, 日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp. 47-54, 2007. 7
- [4] 小林正人, 井澤保一他: 「モード連成作用を考慮した中間層免震構造の各部地震応答予測」, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp.73-80,2003.10