

応答スペクトルを用いた免震層の最大応答予測法の新しい試み

—その2 応答予測値の検証—

正会員 ○渡邊 信也\*1  
同 山崎 久雄\*2  
同 高山 峯夫\*3  
同 笠井 和彦\*4

免震構造 減衰低減係数	最大応答予測 免震周期	応答スペクトル
----------------	----------------	---------

1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、積層ゴム支承、履歴系ダンパーからなる免震構造の最大変位の予測において、任意の応答スペクトル ( $h=5\%$ の  $S_D$  または  $\rho S_V$ ) を免震周期  $T_f$  に着目して使用し、減衰低減式  $D_h$  は AIJ 式を使用する簡便な応答予測法を提案した。ただし、AIJ 式をそのまま  $D_h$  に適用したのでは、 $\rho S_V < S_V$  となる長周期領域において、応答のばらつきが生じるため、 $S_V$  を地動の最大速度  $V_{0,max}$  で代用し、最大変位  $U_{max}$  での  $h_{eq}$  を  $V_{0,max}$  で再評価した  $h_{eq}^*$  を AIJ 式に適用することで、改善できることを示した。本報では、まず  $T_f$  に着目することの適用条件の検討を行い、続いて本予測法による免震周期  $T_f$ 、履歴系ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_p (=Q_p/(M \cdot g))$  に応じた応答変位  $U_{max}$ 、応答せん断力係数  $\alpha_{max} (=Q_{max}/(M \cdot g))$  を算出する応答予測式を求め、地震応答解析結果と比較することでその妥当性と有用性を検証する。

2.  $T_f$  に着目することの適用条件の検討

$T_f$  に着目することの適用範囲として、本パラメトリック解析では  $T_f=1\sim 10s$  で検討を行っており、積層ゴムを有する免震層の免震周期を十分含むと考えられる。しかし塑性変形が小さい場合には  $T_e$  と  $T_f$  がかい離し本手法の限界が予測されるため、入力レベルを小さくした地震波でその適用性を検討した。図1は BCJL2 を 20% と 10% とした場合の  $D_h-h_{eq}$  で、20% では  $\alpha_p \geq 7\%$ 、10% では  $\alpha_p \geq 5\%$  で対応が低下する。いずれも対応が低下するときの塑性変形は概ね 2.5cm 以下であったことを考え、 $T_f$  に着目する本提案法の適用条件は、 $\alpha_p=1\sim 10\%$ 、 $T_f=1\sim 10s$  かつ塑性変形 3cm 程度以上と言えらる。

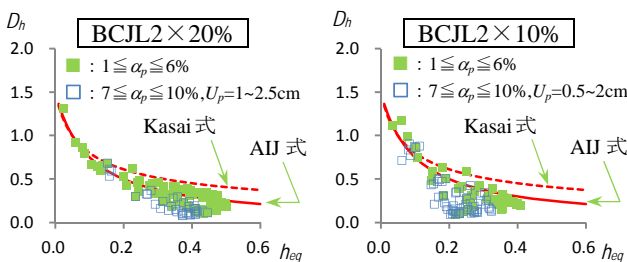


図1 BCJL2 の 20% と 10% での  $D_h-h_{eq}$  ( $U_p$  は塑性変形)

3. 提案手法の応答予測式

前報で記載した式を下記に再掲載する。

$$U_{max} = D_{h(AIJ)} \cdot S_{D(h=5\%)(T_f)}, D_{h(AIJ)} = 1.5/(1+10 h_{eq}^*) \quad (1a,b)$$

$$h_{eq}^* = \min \{1, (\rho S_{V(h=5\%)(T_f)} / V_{0,max})^2\} h_{eq} \quad (2)$$

$$h_{eq} = (1/4\pi) (\Delta W/W_i) \quad (3)$$

免震層の最大変位  $U_{max}$  は(3)式に(4)・(5)式を代入して(1)式(2)式を整理すると、従来の包絡設計法<sup>2)</sup>と同様に  $U_{max}$  の一元2次方程式となるので、容易に解くことができる。た

だし、 $\delta_{py}$  は履歴系ダンパーの降伏変位で、 $\alpha_p \cdot M \cdot g / \delta_{py}$  はダンパーの降伏後除荷時の剛性である。

$$\Delta W = 4\alpha_p \cdot M \cdot g \cdot U_{max} - 4(\alpha_p \cdot M \cdot g)^2 / (\alpha_p \cdot M \cdot g / \delta_{py}) \quad (4)$$

$$W_i = (\alpha_p \cdot M \cdot g + (2\pi/T_f)^2 \cdot M \cdot U_{max}) U_{max} / 2 \quad (5)$$

$U_{max}$  を得ると、(6)式より  $\alpha_{max}$  が得られる。

$$\alpha_{max} = \alpha_p + (2\pi/T_f)^2 \cdot U_{max} / g \quad (6)$$

ここに、 $\delta_{py}$  は 1 cm とした。

4. 提案手法による応答予測の検証

検証に用いる地震動の擬似速度応答スペクトル及び、地動最大速度を図2に示す(その1に掲載した同図も合わせて参照されたい)。EL CENTRO NS, TAFT EW, HACHINOHE NS は最大速度を 50cm/s とし、他は元波とした。EL CENTRO NS, HACHINOHE NS, JR 鷹取 EW, 三の丸 NS は長周期側で  $\rho S_V < V_{0,max}$  となるため、その周期域では本提案手法に則り、減衰低減式  $D_h$  には減衰定数の再評価値  $h_{eq}^*$  が反映される。BCJL2, TAFT EW については検討周期域で  $\rho S_V \geq V_{0,max}$  であるため、結果的に減衰定数は再評価されないことになる。

図3に提案手法によって算出された最大応答変位  $U_{max}$  を、また図4に従来の応答スペクトル法による  $U_{max}$  を、ともに応答解析結果と合わせて示す。従来法とは、減衰定数  $h_{eq}$  の再評価は一切行わず、割線周期  $T_e$  による応答スペクトルを用いるため収束計算を行ったものである。また両手法とも、告示設計法<sup>3)</sup>の条件である、 $h_{eq}$  の低減や  $D_h$  の下限設定は行っていない。

図3、図4より、従来法では応答が小さく評価される傾向のある  $\rho S_V < V_{0,max}$  の周期域について、提案法では  $h_{eq}^*$  の補正がかかり、その効果により応答解析結果への対応が改善されている。また、 $\rho S_V \geq V_{0,max}$  の周期域での対応については厳密に適合度を評価したものではないが、 $h=5\%$  の応答スペクトルを基に計算されることによる一定のばらつきはあるものの、提案法でも従来法と同程度の対応となっている。すなわち、免震周期  $T_f$  に着目し収束計算を要せずに行うことでも、従来の応答スペクトル解析の結果と同程度の予測値が得られ、しかも  $T_f \geq 4s$  では地震動の特性によっては従来法以上の対応が期待できる(図3,4とも横軸を  $T_f$  としている。図3はそのまま対応できるが、図4は収束後の  $T_e$  に着目した  $S_D$  による結果となっていることに注意)。

提案法により求めた  $U_{max}$  について(6)式を用いて最大応答層せん断力係数  $\alpha_{max}$  を求め、応答予測曲線の推移と応答解析結果を図5に示す(紙面の関係で  $T_f=3.5, 7s$  での結果を示す)。現実的な免震周期である  $T_f=3\sim 7s$  については、応答解析結果との対応に大きな問題はないと言える。

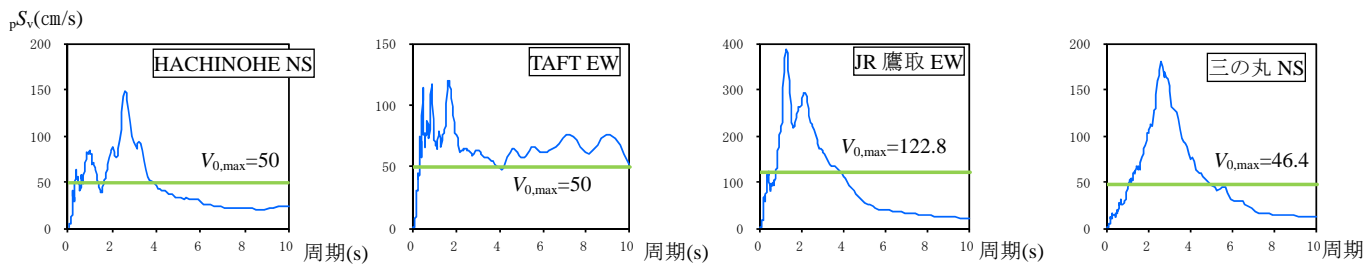


図2 検証に用いた波形の擬似速度応答スペクトルと地動最大速度

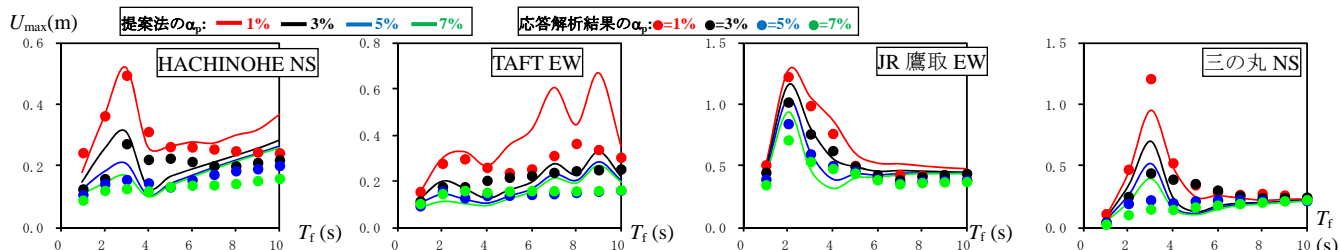


図3 最大応答変位（応答解析結果と提案法）の比較 ( $\alpha_p=3 \cdot 5 \cdot 7\%$   $T_f=1, 2, 3 \cdots 10s$ )

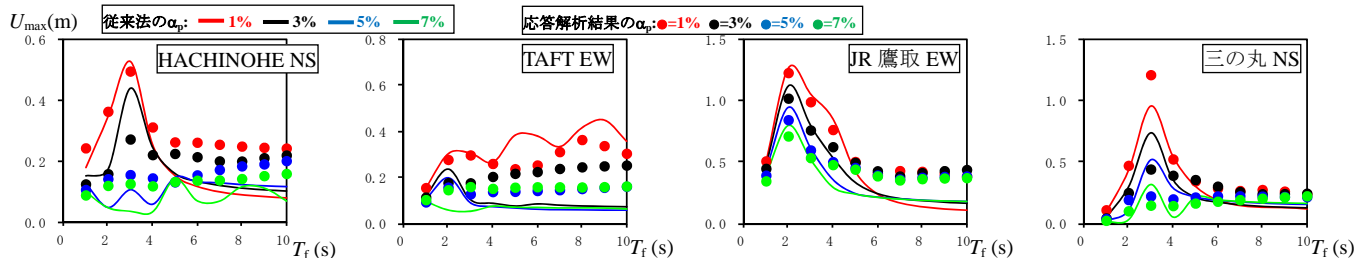


図4 最大応答変位（応答解析結果と従来法）の比較 ( $\alpha_p=3 \cdot 5 \cdot 7\%$   $T_f=1, 2, 3 \cdots 10s$ )

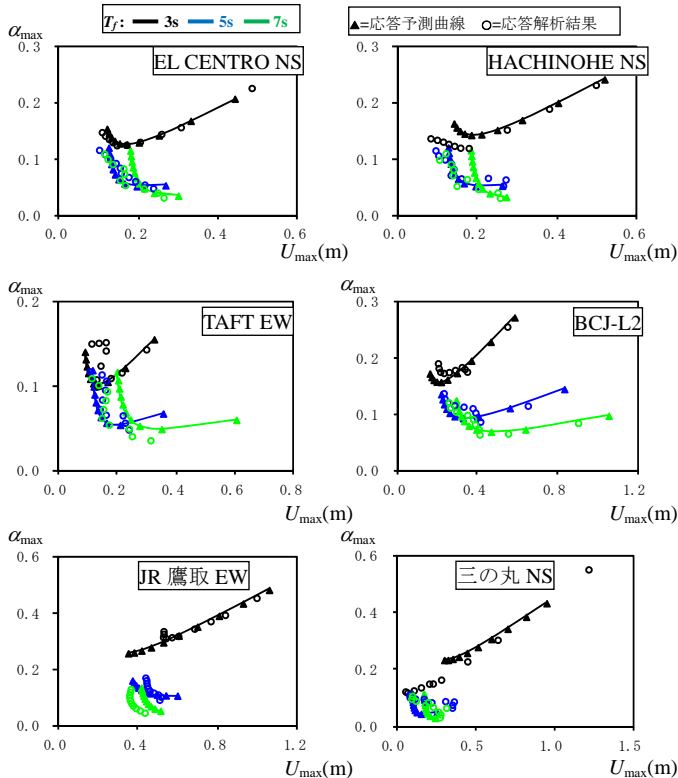


図5 提案法による応答予測曲線と応答解析結果  
(最大せん断力係数-最大変位)  
( $T_f=3 \cdot 5 \cdot 7s$ ,  $\alpha_p=1, 2, 3 \cdots 10\%$ )

## 5. まとめ

まず、提案法で用いる免震周期  $T_f$  に着目することの懸念に対して、3cm 程度以上の塑性変形を含む最大変形であれば適用可能であることを確認した。次にレベル2相当の地震動を用いて提案法による予測結果、従来法による予測結果、応答解析による結果をそれぞれ示した。従来法で小さく評価される傾向があった長周期域での予測結果も、減衰定数を再評価することで改善でき、また  $T_f$  に着目（収束計算を要せず表計算ツールで簡便処理）することでも従来法と比べて対応性の低下は認められなかった。今後は、理論的検討を充実しつつ、粘性系ダンパーの効果の導入や上部構造の影響を考慮した実用的な免震層の最大応答予測法への拡張をめざし、実務設計に貢献できるよう取り組んでいきたい。

## 参考文献

- 1) 山崎久雄, 渡邊信也, 高山峯夫, 笠井和彦: 応答スペクトルを用いた免震層の最大応答予測法の新しい試み その1, 減衰低減係数による応答のばらつき改善と免震周期への着目の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 2012.8
- 2) 高山峯夫ほか: 4秒免震への道, 理工図書, 1997.8
- 3) 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

## 地震波の出典

- ・ BCJL2: 日本建築センター模擬波(基盤波) BCJ-L2
- ・ ELCENTRONS, HACHINOHE NS, TAFT EW: 日本建築センター評定部観測観測地震波(1994年研究助成版) 50kine に基準化して用いた。上記はいずれも入手元は <http://www.bcj.or.jp/download/wave.html>。
- ・ JR 鷹取 EW: は JR 警報地震計(鷹取駅), 1995.1.17
- ・ 三の丸 NS: 愛知県設計用入力地震動研究協議会ほか

\*1 NTTファシリティーズ総合研究所 構造技術本部  
\*2 ユニオンシステム(株) 振動解析総合推進室  
\*3 福岡大学 工学部建築学科教授・工博  
\*4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph.D.

\*1 NTT FACILITIES RESEARCH INSTITUTE Inc  
\*2 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex  
\*3 Prof., Fukuoka University, Faculty of Engineering, Dr.Eng.  
\*4 Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.