

## 非線形粘性ダンパーを含む免震層の簡便な応答予測法

## —その2 エネルギーの釣合いに基づく応答予測曲線—

正会員	○渡邊	信也* <sup>1</sup>
同	山崎	久雄* <sup>2</sup>
同	石鍋	雄一郎* <sup>3</sup>
同	高山	峯夫* <sup>4</sup>
同	笠井	和彦* <sup>5</sup>

免震構造	応答解析	非線形粘性ダンパー
最大せん断力予測	エネルギーの釣合い	

## 1. はじめに

既報<sup>1)</sup>では、積層ゴム支承、履歴系ダンパー、粘性系ダンパーからなる免震構造の最大変位での正負1サイクルにおける粘性系ダンパーの吸収エネルギー量の評価式を提案し、エネルギーの釣合い式より粘性系ダンパーの設置量に応じた最大変位予測式を示した。また前報<sup>2)</sup>では、最大変位を既知とし免震周期やダンパーのパラメータより粘性系ダンパーの減衰力を考慮した免震層の最大せん断力予測式を示した。

この2つの予測式を用いることで、エネルギーの釣合いに基づく、粘性系ダンパーを考慮した免震層の最大変位と最大せん断力係数に関する応答予測曲線を表わすことができる。すなわち設計用のエネルギースペクトル  $V_E$  および等価繰り返し回数を表す係数  $\chi$  を設定することで、免震周期  $T_f$ 、履歴系ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_p$ 、粘性系ダンパーの減衰力係数  $\alpha_v$  (150cm/s での減衰力の建物重量比) に応じた応答値を得ることができ、 $\alpha_v=0$  においては従来の包絡設計法<sup>3)</sup>と一致するものとなる。

本報では、粘性系ダンパーの設置量に着目した応答予測曲線を示し、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。ここで本検討に用いた免震構造の解析モデルは1質点系で、積層ゴムは線形バネ、履歴系ダンパーは完全弾塑性バネ、粘性系ダンパーは減衰力が速度の0.3乗に比例する非線形ダッシュポットである。また本予測法が対象とする免震層の基本特性は、 $T_f=3\sim 7$ 秒、 $\alpha_p=1\sim 7\%$ 、 $\alpha_v=0\sim 7\%$ の範囲である。

## 2. 粘性系ダンパーの設置量に着目した応答予測曲線

免震層の最大変位  $U_{max}$  は既報<sup>1)</sup>に示した粘性系ダンパーを含むエネルギーの釣合い式から得られるが、ここでは、 $\kappa=0.3$  として、様々に  $\alpha_p$  と  $\alpha_v$  を変化させたパラメトリック解析から同定した吸収エネルギー比  $\beta(\alpha_p, \alpha_v) = W_p / (W_p + W_v)$

(式1,  $W_p, W_v$  は履歴系および粘性系ダンパーの吸収エネルギー) を用いて簡便化した式(2)を用いる。最大せん断力係数  $\alpha_{max}$  は前報<sup>2)</sup>を用いる。ここに  $g$  は重力加速度である。

$$\beta(\alpha_p, \alpha_v) = \bar{\alpha}_p / (\bar{\alpha}_p + \alpha_v), \quad \bar{\alpha}_p = 1.635 \alpha_p - 8.359 \alpha_p^2 \quad (1a, b)$$

$$U_{max} = \zeta T_f \{ [ (2\pi\beta(\alpha_p, \alpha_v) V_E / \zeta)^2 + 1 ]^{0.5} - 1 \} / [ 4\pi^2 \beta(\alpha_p, \alpha_v) ] \quad (2a, b)$$

$$\zeta = \chi g \alpha_p T_f$$

## 3. 応答予測曲線の検証

図1は  $V_E, \chi, T_f$  をパラメータとして本予測法より求めた粘性系ダンパーの設置量  $\alpha_v$  による ( $\alpha_{max} - U_{max}$ ) 関係の応答

低減率(両軸とも  $\alpha_v=0$  に対する比)の変化である。いずれの  $\alpha_p$  においても  $\alpha_v$  による変位の低減効果は見られるが、層せん断力は、図1(a)~(c)の比較より、 $\alpha_p$  が大きいと上昇に転じる傾向が大きくなり、それは  $T_f$  の増長でより顕著となることが分かる。また、図1(b)と(d), (e)と(f)の比較より、 $V_E$  が小さいほど変位低減効果が大きい傾向があるが、図1(b)と(f), (d)と(e)の比較より、 $\alpha_v$  の変化がもたらす応答低減に与える  $\chi$  の影響は小さい。

図2(a)は  $V_E=150\text{cm/s}$ ,  $\chi=8$  での本予測法による応答曲線で、太線が  $\alpha_v=0$  (従来の包絡設計法) であり、図2(b)(c)(d)は各免震周期  $T_f=3\cdot 5\cdot 7$ 秒の応答曲線を拡大したものである。

図3は既往波4波による応答解析結果と本予測結果の比較である。応答解析では  $V_E$  が150cm/s程度になる様に入力レベルを調整した。採用した  $\chi=8$  の妥当性は確認していないが、本予測結果は応答解析結果の傾向をとらえており、本予測法が有用であることを示している。

図4に、積層ゴムと履歴系ダンパーだけでは大きく変位応答するが粘性系ダンパーを付加することで応答低減が図れる実例<sup>4)</sup>としてK-NET鳴子に対する応答解析結果と本予測結果を示す。また同図は、積層ゴム ( $T_f=4\cdot 5\cdot 6$ 秒) と履歴系ダンパーによる応答値(図中の線)と、 $\alpha_p=5\%$  に対し粘性系ダンパーを増設 ( $\alpha_v=0\sim 10\%$ ) することで変化する応答の傾向(図中○印)を示したもので、直観的に理解しやすい形と考える。本予測法で用いた条件は  $V_E=187\text{cm/s}$ ,  $\chi=3.6$  で、ともに最大変位発生時の値として  $\alpha_v=0$  での応答解析(3ケース)で得た中央値である。K-NET鳴子は周期3~4秒で大きく卓越する<sup>4)</sup>ため  $\alpha_p$  の応答曲線の傾向が相反しているが、 $\alpha_v=0$  での両者の応答は概ね対応している。また  $\alpha_v=0\sim 10\%$  と変化する時の本予測結果は応答解析結果に対し、変位低減傾向はやや抑制的であるが、せん断力係数については各  $T_f$  についてよく対応した結果となった。

## 4. まとめ

式(1)(2)による最大変位予測式と前報<sup>2)</sup>で示した最大せん断力の予測式から、エネルギーの釣合いに基づく粘性系ダンパーを考慮した応答予測曲線を作成し、時刻歴応答解析結果と比較検証を行った。

## 謝辞

本報は、社)日本免震構造協会 技術委員会 設計支援ソフト小委員会 (大建設計 酒井直己委員長) において検討された内容をまとめたもので、各位から貴重なご意見を頂きました。ここに記し謝意を表します。

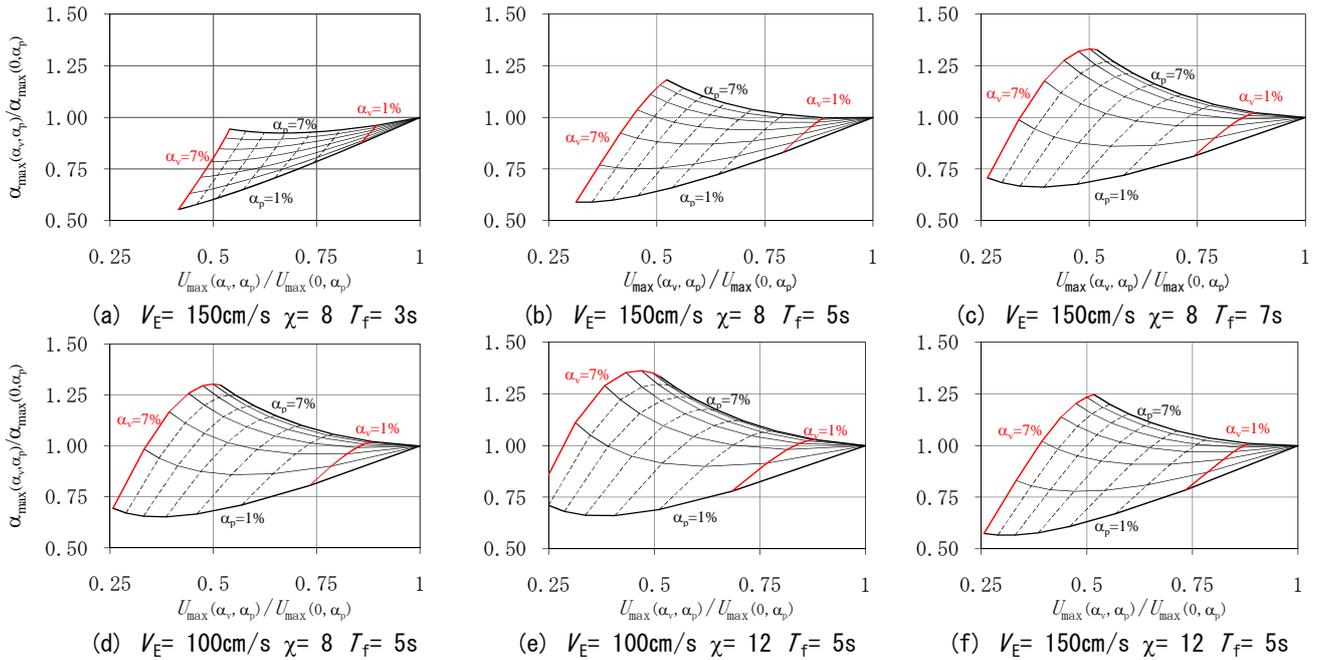


図1 粘性系ダンパーの設置量 $\alpha_v$ による応答低減率 ( $\kappa=0.3$ )

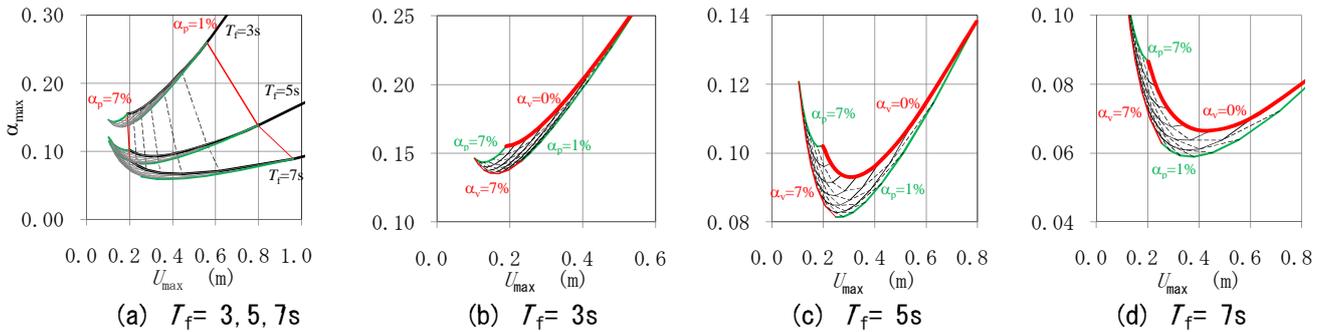


図2 本予測法による応答曲線 ( $V_E=150\text{cm/s}$ ,  $\chi=8$ ,  $\alpha_p=1\sim7\%$ ,  $\alpha_v=0\sim7\%$ ,  $\kappa=0.3$ )

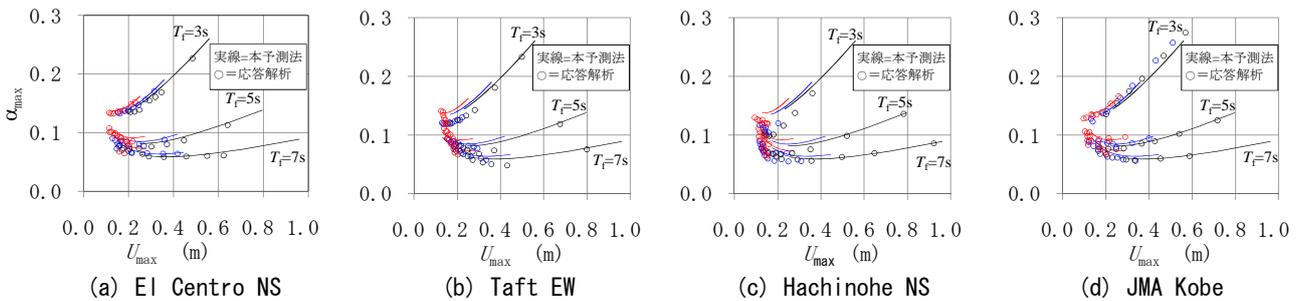


図3 時刻歴応答解析と本予測法の比較 ( $V_E=150\text{cm/s}$ ,  $\alpha_p=1\cdot3\cdot5\%$ ,  $\alpha_v=0\sim7\%$ ,  $\kappa=0.3$ )

※ $\alpha_p=1\%$ :濃, 3%:中, 5%:淡

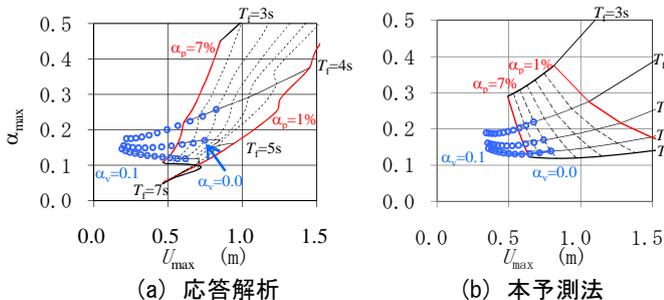


図4 K-NET鳴子による検討 ( $T_f=3\sim7\text{s}$   $\alpha_p=1\sim7\%$   $\alpha_v=0\sim10\%$ )

参考文献

- 1) 酒井直己, 山崎久雄, 高山峯夫, 笠井和彦: 免震層の応答予測に用いる非線形粘性ダンパーのエネルギー評価法 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 237-238, 2010. 8
  - 2) 山崎久雄, 渡邊信也, 高山峯夫, 笠井和彦: 非線形粘性ダンパーを含む免震層の簡便な応答予測法 その1 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2011. 8
  - 3) 高山峯夫ほか: 4秒免震への道, 理工図書, 1997. 8
  - 4) 浪田裕之, 山崎久雄, 高山峯夫, 石鍋雄一郎: 非粘性ダンパーの増設量に伴う免震層の応答変化 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp907-908, 2009. 8
- ※検討の地震波には, 日本建築センター, 気象庁, 防災科学技術研究所の公開波形を利用させていただきました。

\*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 日本大学 助手・博士 (工学)  
 \*4 福岡大学 工学部建築学科教授・工博  
 \*5 東京工業大学 建築物物理研究センター 教授・Ph. D.

\*1 NTT FACILITIES RESEARCH INSTITUTE Inc  
 \*2 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex  
 \*3 Research Associate, Nihon Univ., Dr.Eng.  
 \*4 Prof., Fukuoka University, Faculty of Engineering, Dr.Eng.  
 \*5 Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology.