

応答スペクトルを用いた免震層の最大応答予測法

- その2 応答予測式と応答予測曲線 -

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	最大応答予測	応答スペクトル
非線形粘性ダンパー		

1. はじめに

本報では、まず前報¹⁾で提案した応答予測法に則り、最大変位 U_{max} のみを未知数とする方程式(応答予測式)を導き、観測あるいは予測地震動(計5)の応答スペクトルを適用して求まる U_{max} を地震応答解析結果と比較検証する。また、既報³⁾の非線形粘性ダンパーを考慮した最大せん断力係数 α_{max} 予測式を用いて応答予測曲線の例を示し、最後に本手法がめざす設計での利用案を述べる。

2. 提案法による応答予測式

以下、前報で定義した記号の説明は省略する。免震層の最大変位 U_{max} は式(1)である。

$$U_{max} = D_h^P \cdot S_{D(h=5\%, T^*)} \quad (1)$$

D_h は Kasai 式とし、 P は次式¹⁾である。

$$D_h = 1.5 / (1 + 25 h_{eq}^*)^{0.5} \quad (2a, b)$$

$P = (1 - p S_{V(h=5\%, T^*)} / p S_{V(h=5\%, T^*)}) / (1 - D_{h(ref)})$
 h_{eq}^* は再評価減衰定数で次式¹⁾、また $h_{ref} = 20\%$ とした。

$$h_{eq}^* = \min \{ 1, (p S_{V(h=5\%, T^*)} / V_{0,max})^2 \} h_{eq} \quad (3)$$

h_{eq} は非線形粘性ダンパーを考慮した次式¹⁾である。

$$h_{eq} = 0.8 h_p + h_v = 1 / (4\pi W_i) \cdot (0.8 \Delta W_p + \Delta W_v) \quad (4)$$

係数 0.8 は履歴ダンパーの減衰低減率⁵⁾である。

式(4)の W_i および ΔW_p は次式である。

$$W_i = M \cdot (\alpha_p \cdot g + \omega_j^2 \cdot U_{max}) U_{max} / 2 \quad (5a, b)$$

$$\Delta W_p = 4 M \cdot \alpha_p \cdot g \cdot (U_{max} - \delta_{py})$$

δ_{py} は履歴ダンパーの降伏変位で 1cm とした。

また式(4)の ΔW_v は次式¹⁾である。

$$\Delta W_v = E_{v0}^* = \beta^{k-1} \cdot E_{v0}, E_{v0} = 4 / (1 + \kappa) C(\omega_{ref} \cdot U_{max})^k U_{max} \quad (6a, b)$$

式(6a)の E_{v0}^* は式(7)で表現できる⁴⁾。また $\kappa = 0.3$ 、 ω_{ref} は事前検討を行い 40cm 変形時の角振動数とした

$$E_{v0}^* = \beta^{k-1} \cdot (Q_1 \cdot U_{max} + Q_2 \cdot U_{max}^2), \beta = 0.65 \sim 0.85 \quad (7a, b)$$

ここに Q_1 および Q_2 は次のケース毎に以下の通りである。

$p S_{V(h=5\%)(T^*)} > V_{0,max}$ の場合:

$$Q_1 = 4M \cdot a_v \cdot g \cdot \omega_{ref}^k \cdot P_1 / (1 + \kappa) / 1.5^k \quad (8a, b)$$

$$P_1 = 1 + 1.821\kappa + 13.37\kappa^2 - 38.49\kappa^3 + 65.39\kappa^4 - 43.09\kappa^5$$

$$Q_2 = 4M \cdot a_v \cdot g \cdot \omega_{ref}^k \cdot P_2 / (1 + \kappa) / 1.5^k \quad (8c, d)$$

$$P_2 = 0.0626\kappa - 0.3835\kappa^2 + 2.028\kappa^3 - 2.897\kappa^4 + 2.189\kappa^5$$

$p S_{V(h=5\%)(T^*)} < V_{0,max}$ の場合:

$$Q_1 = 4M \cdot a_v \cdot g \cdot v_{0,max}^k / (1 + \kappa) / 1.5^k, Q_2 = 0 \quad (9a, b)$$

式(2)~(9)を式(1)に代入し、 U_{max} について整理したのが提案法による予測式である。 U_{max} は T_f 、 a_p 、 a_v に関する非線形方程式となり、 U_{max} を 0~3m に限定し 2 分法(収束計算)で求めた。ただし式(1)で $P=1$ とすれば U_{max} は 3 次式となり陽に

求まる。この場合 D_h は周期に関わらず一定値となる。

図1に積層ゴムと履歴ダンパーの場合の、図2に非線形粘性ダンパーを考慮($\alpha_p = 3.5\%$, $\alpha_v = 1.3, 5.7\%$)した U_{max} の比較検証を示す。入力地震動は既報(改善前)²⁾と同じである。

3. 提案法による応答予測曲線

α_{max} を既報³⁾を拡張した次式とし応答予測曲線を作成する。

$$\alpha_{max} = \alpha_p + \omega_j^2 \cdot U_c / g + a_v \cdot (\omega_{ref} \cdot U_{max} / 1.5)^k \{ 1 - (U_c / U_{max})^2 \}^{k/2} \quad (10a, b, c)$$

$$U_c = \{ 1 - 0.8741(1 - e^{-1.7454\lambda}) \cdot (1 - e^{-0.5284\lambda \cdot \kappa}) \} U_{max}$$

$$\lambda = K_v / K_f = a_v \cdot g(\omega_{ref} \cdot U_{max} / 1.5)^k / (\omega_j^2 \cdot U_{max})$$

図3は非線形粘性ダンパーを考慮した α_{max} の比較検証、図4は粘性ダンパーの効果が顕著な K-NET 鳴子 NS 波に対する応答曲線で予測結果と解析結果である。既報(改善前)²⁾に比べ、今回の予測曲線の方が非線形粘性ダンパーによる低減傾向をより捉えたものとなっている。

4. 本手法の設計利用案

本手法の特長は、具体的に地震動が与えられ、その応答スペクトルから簡易に応答予測値が得られ、しかも非線形粘性ダンパーの設置量に応じた応答の変化が確認できることである。地震動固有の減衰特性を考慮するならば反復計算が必要(マクロ化可能)であるが、それを無視するならば単純な表計算のみで処理できる。近年、検討され始めた長周期地震動や都市部での断層想定地震動などに対する新築・既存免震構造の応答予測や必要な粘性ダンパーの設置数の推定などに有効活用できるものと考えている。

5. まとめ

前報¹⁾の予測法から U_{max} 予測式を導出し、各地震動の応答スペクトルに適用し、 U_{max} および応答予測曲線を求めた。非線形粘性ダンパーを考慮した結果も応答解析結果の傾向を反映したものととして得られた。また設計利用案も示した。

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(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.8
 - 2) 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1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.453~456, 2012.8
 - 3) 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1~2, pp.555~558, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 2011.8
 - 4) 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1~2 pp.235~458, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2010.9
 - 5) 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
ELCENTRONS, HATINOHENS, TAFTW: 日本建築センター評定部, JR 鷹取 EW: JR 警報地震計(鷹取駅), 三の丸 NS: 愛知県設計用入力地震動研究協議会, K-NET 鳴子 NS: 防災科学研究所

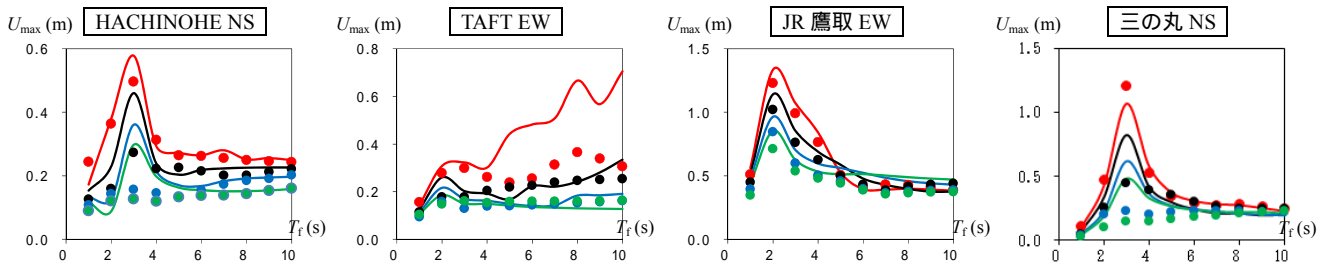


図1 U_{max} の検証 (積層ゴム+履歴ダンパーモデル $\alpha_p=1\cdot 3\cdot 5\cdot 7\%$, $\alpha_v=0\%$)

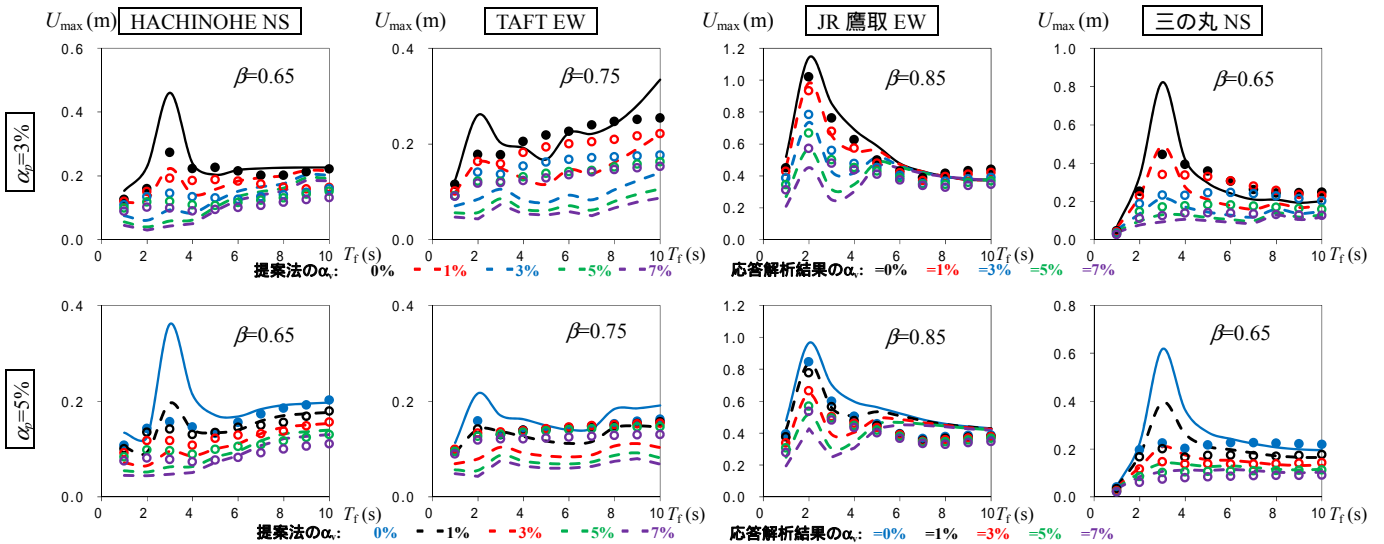
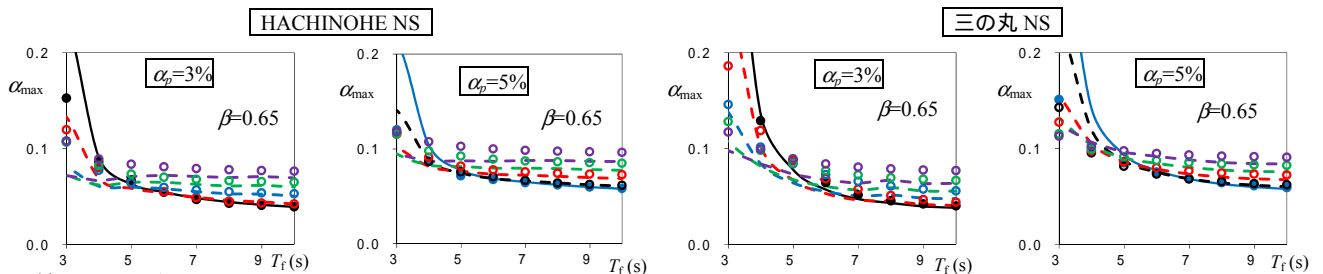


図2 U_{max} の検証 (積層ゴム+履歴ダンパー+非線形粘性ダンパーモデル $\alpha_p=3\cdot 5\%$, $\alpha_v=1\cdot 3\cdot 5\cdot 7\%$)



凡例は、図2に同じ

図3 α_{max} の検証 (積層ゴム+履歴ダンパー+非線形粘性ダンパーモデル $\alpha_p=3\cdot 5\%$, $\alpha_v=1\cdot 3\cdot 5\cdot 7\%$)

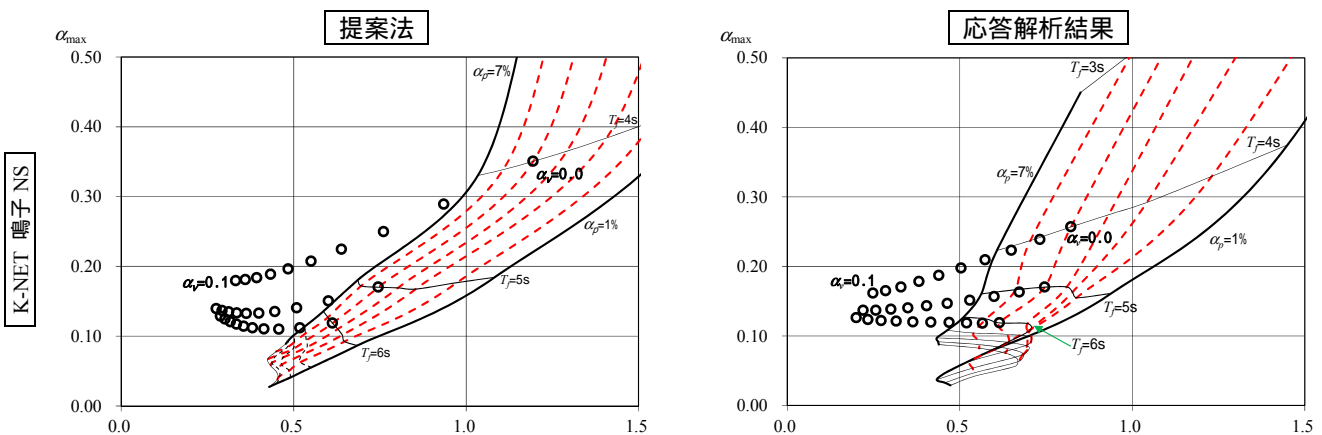


図4 提案法の応答予測曲線と応答解析結果の $U_{max} - \alpha_{max}$ 関係の比較

*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.