

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 既提案法の精度改善と非線形粘性ダンパーの考慮 -

正会員 山崎 久雄*1
同 渡邊 信也*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

本報は既法¹⁾の改良の為、まず既提案法の要点を述べる。免震層の最大変位 U_{max} を応答スペクトルより次式で求める。

$$U_{max} = D_h \cdot S_{D(h=5\%)} \quad (1)$$

D_h は減衰低減係数式で AIJ 式²⁾ または Kasai 式³⁾, S_D は変位スペクトル, D_h には式(2)の再評価減衰定数 h_{eq}^* を用いる。

$$h_{eq}^* = \min\{1, (\rho S_V / V_{0,max})^2\} h_{eq} \quad (2)$$

ρS_V は擬似速度スペクトル, $V_{0,max}$ は地動最大速度で, h_{eq}^* とすることで D_h のばらつきが改善した¹⁾。また着目周期を免震周期 T_f としたことで, U_{max} は収束計算でなく簡易な代数式で求まり, 実地震動など不規則な応答スペクトルに対しても従来の等価線形化法²⁾と同様以上の精度であった¹⁾。

本報では, T_f とは異なる着目周期を提案し, また新たに地震動固有の減衰低減の周期特性も簡易的に評価する。さらに非線形粘性ダンパーによる効果を反映させるのに, その減衰定数 h_v を1サイクル平均履歴面積⁴⁾⁵⁾より求めることで本予測法がそのまま適用できることを示す。

検討に用いたモデルを図1(a)に示す。積層ゴムを線形, 履歴ダンパーを完全 Bi-Linear バネ, 粘性ダンパーを $F_v = CV^{\kappa}$ 型ダッシュポットとする。パラメータは $T_f = 1 \sim 10s$, 履歴ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_p = 1 \sim 10\%$, 粘性ダンパーの $150cm/s$ の減衰抵抗力係数 $\alpha_v, \alpha_{v,150} = 0 \sim 7\%$, $\kappa = 0.3$ である。

本報では改良内容と非線形粘性ダンパーの考慮法を示し, 次報で様々な地震動での検証や応答予測曲線の例を示す。

2. 骨格曲線と $h=5\%$ 要求曲線との交点周期 T^* に着目

八戸 NS での図2(a) (着目周期= T_f) を見ると $T_f = 4s$ で予測値が単調に増加し解析値を超えていく。また図2(b)より $T = 4s$ は $\rho S_V < V_{0,max}$ となり式(2)より $h_{eq}^* < h_{eq}$ となる。例えば $T_f = 6s$ のモデルは h_{eq}^* が $\rho S_V(T=6s)$ で評価され $0.33h_{eq}$ となるが, $\alpha_p = 5\%$ の場合, 実際の等価周期 $T_{eq} = 3.1s$ では $\rho S_V > V_{0,max}$ なので $h_{eq}^* = h_{eq}$ となる。つまり T_f に着目では長周期に過ぎた。

そこで着目周期を, 図1(b)や図2(c)に示すように骨格曲線と $h=5\%$ の要求曲線との交点での等価周期 T^* としてみる

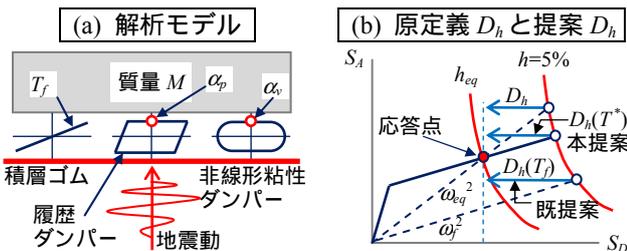


図1 解析モデルと提案 D_h の概念図

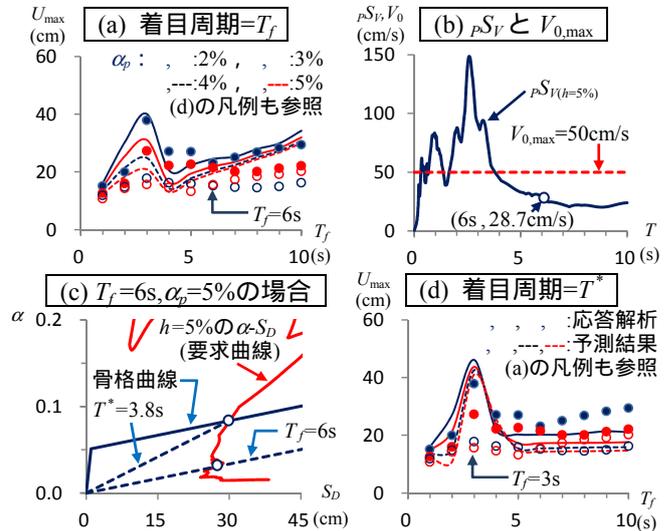


図2 八戸 NS(50cm/s)での応答結果と予測値

と $T_f = 6s, \alpha_p = 5\%$ のモデルは $T^* = 3.8s$ で $h_{eq}^* = h_{eq}$ となる。

T^* に着目した予測結果を図2(d)に示す。 $\alpha_p = 2\%$ を除き $T_f = 6s$ が改善できた。 T^* も収束計算は不要で与条件から簡単に求まる。また着目周期を適当な仮定変位での T_{eq} とすることも検討したが T^* とした結果との差は僅かであった。

3. 地震動固有の減衰低減の周期特性の簡易評価

再び図2(d) (着目周期= T^*) を見ると, $T_f = 3s$ の $\alpha_p = 3\%$ で予測値が解析値を上回っている。この原因に地震動固有の減衰低減の周期特性を考える。図3(a)は八戸 NS の $h=5, 10, 20, 30\%$ での ρS_V である。図3(b)は $h=5\%$ に対する各スペクトル比, すなわち八戸 NS 固有の減衰低減特性 D_h' (実線, 周期に依存) とそれに対応する D_h (破線, 一定値) である。 D_h は当該 D_h' の平均的な値であるが周期によってばらつき, 特に $T=2\sim 3s$ 付近で $D_h' < D_h$, また $T = 4s$ で $D_h' > D_h$ かつ減衰低減も僅少である。 $T_f = 3s, \alpha_p = 2\sim 5\%$ のモデルは, U_{max} 時で $T_{eq} = 2.8\sim 2.3s$ となり, $D_h' < D_h$ となる周期域に該当し, 予測値が大きく評価されたと考えられる。

一方, 図3(b)より D_h' と D_h の相対関係は h に関わらずほぼ同傾向である。つまり, ある $h(=h_{ref})$ の関係を周期毎に予め求めておき, それを計算中の D_h に適用すれば D_h' を模擬できる。そこで式(1)の D_h を拡張した式(3)を試みる。

$$U_{max} = D_h^P \cdot S_{D(h=5\%)} \quad (3a,b)$$

$$P = (1 - \rho S_{V(h,ref)} / \rho S_{V(h=5\%)}) / (1 - D_{h(h,ref)})$$

図3(c)の破線は $h_{ref} = 20\%$ で求めた P による各 h の D_h^P で, それぞれの D_h に概ね対応できている。

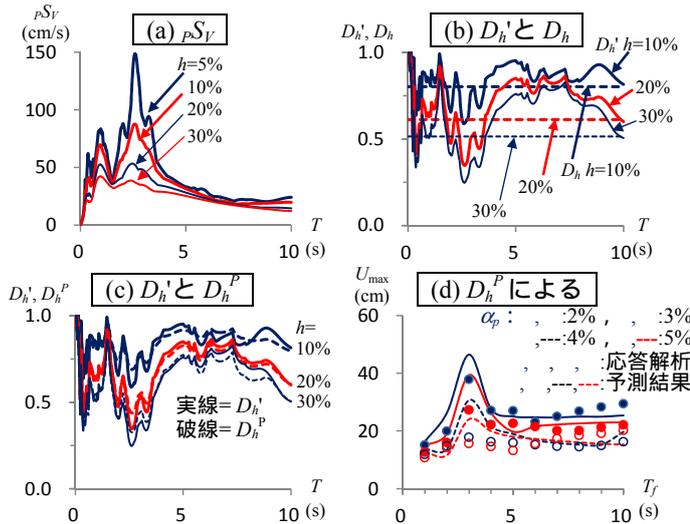


図3 八戸 NS(50cm/s)の減衰低減特性とその考慮

図3(d)は式(3)を用いた応答予測結果であり、図2(d)に比べ $T_f=3s$ の予測精度が改善されている。またこの D_h^p による効果は他の地震動でも確認している。ただし、式(3)を用いる場合の U_{max} は反復計算で求める必要がある。

4. 非線形粘性ダンパーの減衰定数 h_v の考慮と D_h との対応
 非線形粘性ダンパーを $F_V=CV^\kappa$ 型のダッシュポットモデルで扱う。これによりリリース機構を有し F_V-V 関係が Bi-Linear 型のオイルダンパーも等価則⁷⁾⁵⁾により一元的に扱うことができる。また、不規則な地震動に対する最大応答時の等価1サイクルエネルギーは平均履歴面積⁴⁾で評価でき、既報⁵⁾で次式の提案とその検証を行っている。

$$E_{V0}^* = \beta^{\kappa-1} \cdot E_{V0}, E_{V0} = 4 / (1 + \kappa) C (\omega U_{max})^\kappa U_{max} \quad (4a, b)$$

E_{V0}^* が求める1サイクル平均履歴面積で、 β は地震動パラメータで衝撃型:0.9 ~ 振動型:0.65程度とすればよい対応を得る。 C は V^κ に対する減衰係数で $\alpha_{v,150}$ から求まる。ただし $pS_v < V_{0,max}$ となる場合、式(4b)の ωU_{max} は $V_{0,max}$ とする。

$\Delta W_p, h_p$ を履歴ダンパーの、 $\Delta W_v, h_v$ を粘性ダンパーのそれぞれ U_{max} 時の1サイクル履歴面積と減衰定数とし、全体の減衰定数 h_{eq} を次式で求める (W_i は弾性歪エネルギー)

$$h_{eq} = h_p + h_v = 1 / (4\pi W_i) \cdot (\Delta W_p + \Delta W_v), \Delta W_v = E_{V0}^* \quad (5a, b)$$

図4は $T_f=3 \sim 6s, \alpha_p=2 \sim 5\%, \alpha_v=0 \sim 7\%$ モデルの BCJL2 と JR 鷹取 EW での、(a)(b)は実際の1サイクルエネルギー E_{V0}^* と式(4)の E_{V0}^* の対応度、(c)(d)は実際の $U_{max}/pS_v(h=5\%)$ と式(5)の h_{eq}^* との関係で、 D_h (Kasai 式) との対応が確認できる。

図5は同じく α_v に対する U_{max} の解析値と予測値で、地震動で異なる応答低減傾向にも概ね対応できており、本予測法の妥当性を示唆した結果になっている。

5. まとめ

既提案の応答スペクトルを用いた免震層の簡易応答予測法に対し、着目周期をスケルトンカーブと $h=5\%$ 要求曲線の交点での等価周期とし、さらに地震動固有の減衰低減効果の周期特性を簡易評価することで精度改善を行った。

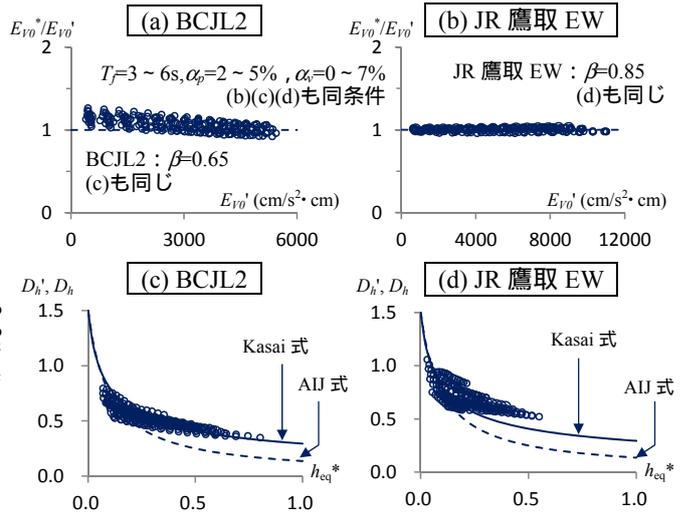


図4 E_{V0}^* の検証と h_v を考慮した h^* の D_h との対応

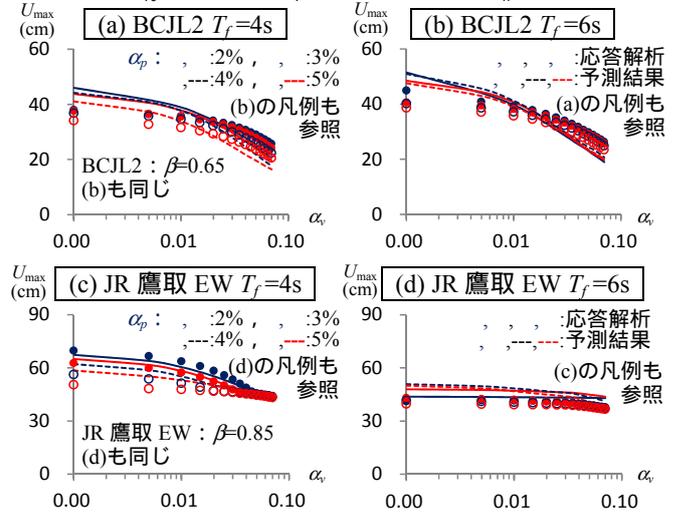


図5 非線形粘性ダンパー ($\kappa=0.3$) による変位低減

また非線形粘性ダンパーについて、その減衰定数 h_v の評価式と、本提案法での適用性を示した。次報では様々な地震動に対して、本提案法による予測結果の検証を行う。

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1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.453-456, 2012.9
- 2) 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
- 3) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集 第571号, 53-62, 2003.9
- 4) 笠井和彦, 小椋崇之, 西村忠宗: リニア粘性要素とバイリニア粘性要素の制振効果における等価則, 日本建築学会構造系論文集 第611号, 29-37, 2007.1
- 5) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.235-458, 2010.8
- 6) 酒井直己, 山崎久雄, 高山峯夫, 笠井和彦: 非線形粘性ダンパーの増設量に伴う免震層の応答の変化 その1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.905-908, 2009.8
- 7) 小川良典, 笠井和彦: バイリニア粘性要素と非線形粘性要素の等価則, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.503-504, 2008.9 用いた地震波の出典はその2に示す。

*1 ユニオンシステム(株) 振動解析総合推進室
 *2 NTTファシリティーズ総合研究所 構造技術本部
 *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 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex
 *2 NTT FACILITIES RESEARCH INSTITUTE Inc
 *3 Prof., Fukuoka University, Faculty of Engineering, Dr.Eng.
 *4 Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.