

## 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

正会員	酒井 直己*1
同	山崎 久雄*2
同	高山 峯夫*3
同	笠井 和彦*4

## - その2 「1 サイクル平均履歴面積」による評価と検証 -

免震構造 エネルギー評価	応答解析 平均履歴面積	非線形粘性ダンパー
-----------------	----------------	-----------

## 1. はじめに

本報の目的は、オイルダンパーなど流体系ダンパーを含む免震構造の応答予測手法の構築をめざす上で必要な定量と考える免震層のエネルギー量の内、流体系ダンパーについてその評価法を提案するものである。具体的には免震層の最大変位を振幅とする1サイクル履歴面積の予測式を示し、免震層のエネルギー釣合い式<sup>1)</sup>にこれを付加して導かれる最大変位の値とパラメトリック解析結果を比較することで予測式の妥当性を示す。ただし前報<sup>2)</sup>で確認した等価則<sup>3)</sup>により流体系ダンパーは非線形粘性要素として扱う。

## 2. 非線形粘性要素の1サイクル履歴面積の定義

最初にパラメトリック解析の結果を用いて非線形粘性要素の1サイクル履歴面積  $E_{V0}$  を次式で定義する。

$$E_{V0} = E_V / N = E_V / (E_P / E_{P0}) \quad (1)$$

ここに  $E_V$  は非線形粘性要素の累積エネルギー量、 $N$  は弾塑性要素と共通の履歴サイクル数で、弾塑性要素の累積エネルギー量  $E_P$  とその1サイクル履歴面積  $E_{P0}$  より  $E_P/E_{P0}$  とする。 $E_{P0}$  は  $U_{max}$  と弾塑性パラメータから一意的に求まる。なお  $E_P$  と  $E_V$  は最大変位発生時の累積エネルギーとする。

## 3. 非線形粘性要素の「1サイクル平均履歴面積」

非線形粘性要素の力は  $F = C\dot{U}_{max}^\kappa$  で表され、その1サイクル履歴面積  $\bar{E}_{V0}$  は、定常応答では  $4(\pi/4)^\kappa C (\omega U_{max})^\kappa U_{max}$  である<sup>4)</sup>を別表現が、地震動の非定常性を考慮し、笠井ら<sup>5)</sup>の「骨格曲線面積」を参考に、かつ  $\kappa=0$  で面積が  $4CU_{max}$  になることから係数を4とした次式をまず仮定してみる。

$$\bar{E}_{V0} = 4 / (1 + \kappa) C (\omega U_{max})^\kappa U_{max} \quad (2)$$

図1は、BCJL2およびJMA神戸NSに対して、免震周期  $T_f=5$  秒、 $\alpha_p=1,3,5,7\%$ 、かつ  $\kappa=0.3$  として  $\alpha_v=0\sim7\%$  と変化させたときの  $E_{V0}$  と評価式  $\bar{E}_{V0}$  の比較である ( $\alpha_p$  と  $\alpha_v$  の定義は前報を参照)。ただし式(2)の  $\omega U_{max}$  には解析で得た最大速度  $\dot{U}_{max}$  を用いた。JMA神戸NSの対応は良好であるがBCJL2は評価式が過小である(紙面の都合で示していないが  $\kappa=1$  ではBCJL2も対応している)。これはBCJL2の場合、最大応答までに弾塑性要素の1次剛性上で振動する頻度が多く、このとき粘性力によるエネルギー ( $\kappa$  に依存) のみ累積される為と考えられる。これを補正するため、式(2)に  $\beta^{\kappa-1}$  を乗じた次式(「1サイクル平均履歴面積」)を提案する。

$$\bar{E}_{V0}(\beta) = \beta^{\kappa-1} \bar{E}_{V0} \quad (3)$$

$\beta$  をパラメトリック解析結果から同定すると、BCJL2で  $\beta=0.65$ 、JMA神戸NSで  $\beta=0.9$  を得た。この  $\beta$  は  $T_f$  や  $\alpha_p$  によらず共通の値として同定した。図2はBCJL2での  $E_{V0}$  と

$\bar{E}_{V0}(\beta)$  の比較である。両者の対応は改善され、式(3)により1サイクル履歴面積の評価が可能と判断できる。

## 4. 最大変位の誘導と検証

まず実際の最大速度  $\dot{U}_{max}$  と式(2)の  $\omega U_{max}$  の対応を確認する。図3よりBCJL2は良好であるが、JMA神戸NSの  $\dot{U}_{max}$  は元波の最大速度値  $\dot{U}_0=83\text{cm/s}$  (筆者計算) 付近に集中している。最大速度の評価ではこの2つの場合を扱う。ただし  $\omega U_{max}$  を用いる場合は式に  $U_{max}^{1+\kappa}$  が含まれ代数的に  $U_{max}$  が得られない。そこで  $U_{max}^{1+\kappa}$  を次式で近似する(図4)。

$$U_{max}^{1+\kappa} = P_1 U_{max} + P_2 U_{max}^2 \quad (4a)$$

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

$$P_2 = 0.06261\kappa - 0.3835\kappa^2 + 2.028\kappa^3 - 2.897\kappa^4 + 2.189\kappa^5 \quad (4c)$$

以上より、次のエネルギーの釣合い式から  $U_{max}$  を導く。

$$E_E + E_P + \bar{E}_V = 0.5 M V_E^2 \quad (5)$$

ここに、 $E_E$  は弾性歪エネルギー、 $M$  は質量、 $V_E$  は入力エネルギー等価速度である。

$\omega U_{max}$  を用いる場合の  $U_{max}$  は次式となる。

$$U_{max} = (Q_1 / Q_2) \{ \sqrt{Q_2 V_E^2 / Q_1^2 + 1} - 1 \} \quad (6a)$$

$$Q_1 = 4N(\alpha_p + \lambda_1 \alpha_v P_1)g, Q_2 = \omega_f^2 + 8N\lambda_1 \alpha_v P_2 g \quad (6b,c)$$

$$\lambda_1 = \beta^{\kappa-1} \omega^\kappa / \{ (1 + \kappa) 150^\kappa \} \quad (6d)$$

また  $\dot{U}_0$  を用いる場合の  $U_{max}$  は次式となる。

$$U_{max} = (R / \omega_f^2) \{ \sqrt{\omega_f^2 V_E^2 / R^2 + 1} - 1 \} \quad (7a)$$

$$R = 4N(\alpha_p + \lambda_2 \alpha_v)g, \lambda_2 = \beta^{\kappa-1} \dot{U}_0^\kappa / \{ (1 + \kappa) 150^\kappa \} \quad (7b,c)$$

図5より式(6)および(7)による計算値は解析結果とよく一致し、式(3)による評価は妥当であると判断できる。

## 5. まとめ

免震層の応答予測に用いる非線形粘性ダンパーの1サイクルエネルギー量は平均履歴面積で評価できることを示した。今後は本方法で用いた  $\beta$  や  $\dot{U}_{max}$  等の検討を含め、流体系ダンパーを併用した免震構造の応答予測法の提案を目指す。

## 参考文献

- 1) 高山峯夫ほか：4秒免震への道，理工図書，1997.8
- 2) 渡邊信也，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，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，2010.8
- 3) 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
- 4) 笠井和彦，鈴木陽，大原和之：減衰力が速度の指数乗に比例する粘性ダンパーをもつ制振構造の等価線形化法，日本建築学会構造系論文 第574号，77-84，2003.12
- 5) 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 第611号，29-37，2007.1

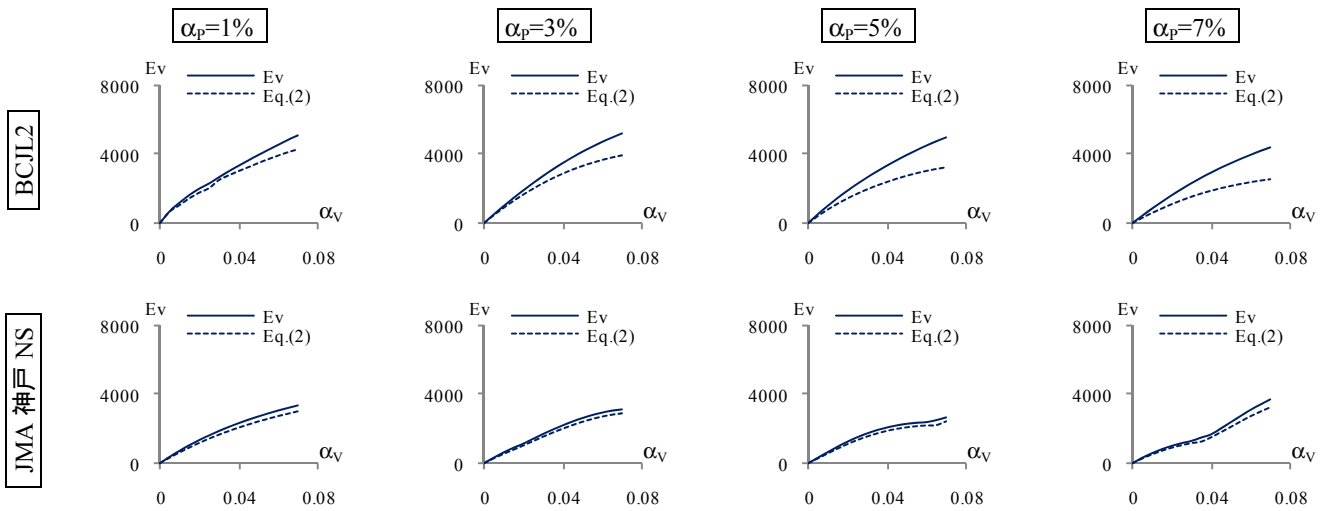


図1 非線形粘性要素( $T_f=5$ 秒,  $\beta=0.3$ )の1サイクル履歴面積と平均履歴面積(式2)の比較(縦軸:  $\text{cm/s}^2 \cdot \text{cm}$ )

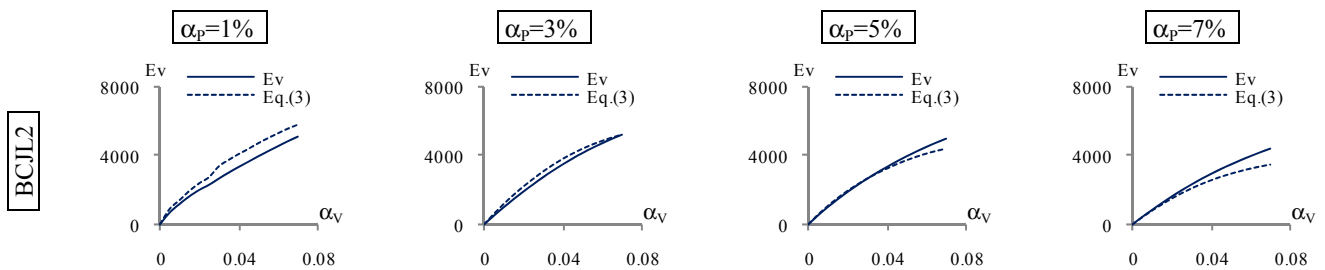


図2 非線形粘性要素( $T_f=5$ 秒,  $\beta=0.3$ )の1サイクル履歴面積と $\beta$ を考慮した平均履歴面積(式3)の比較(縦軸:  $\text{cm/s}^2 \cdot \text{cm}$ )

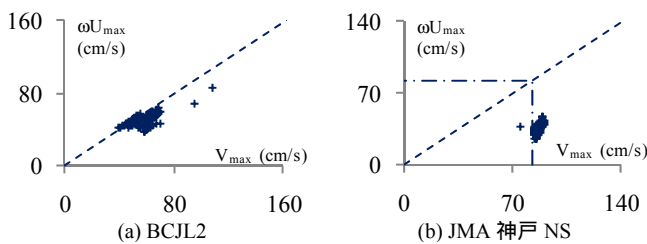


図3  $U_{\max}$  と  $V_{\max}$  の比較 ( $T_f=5$ 秒,  $\beta=0.3$ )

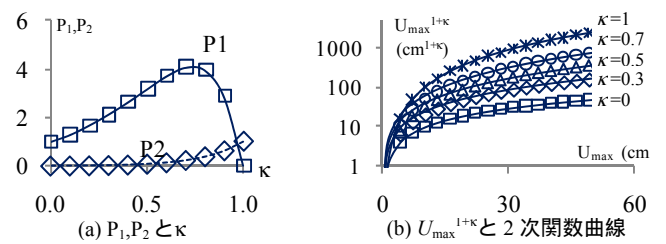


図4  $U_{\max}^{1+}$  の2次関数近似

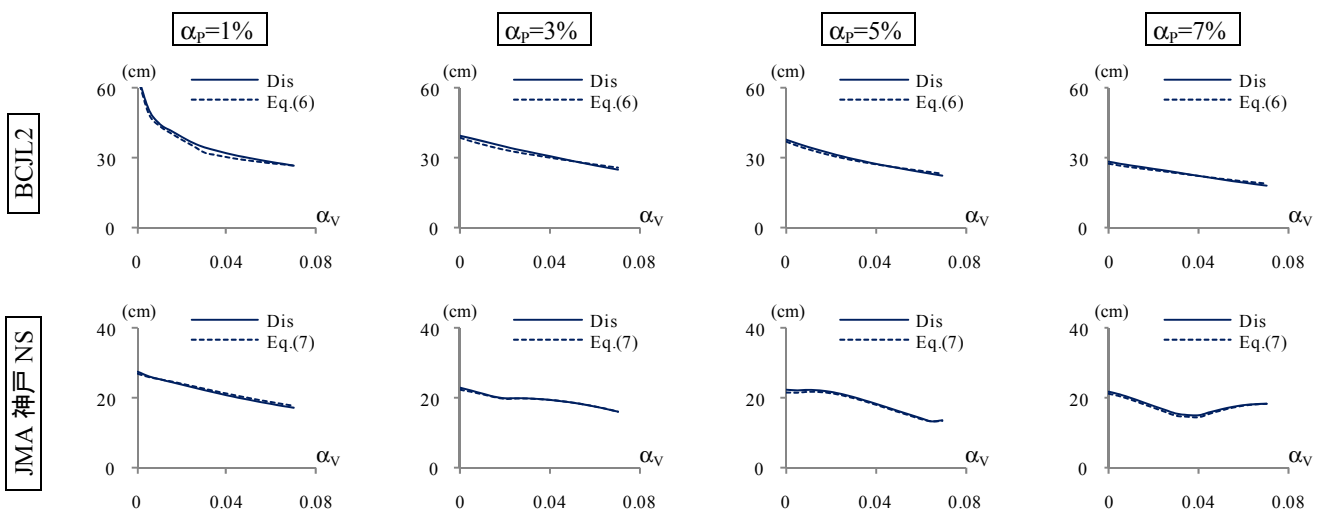


図5  $T_f=5$ 秒における最大変位の解析値と式(6)(7)の比較, BCJL2は $\beta=0.65$ ,  $V_{\max}=U_{\max}$ (式6)とし, JMA神戸NSは $\beta=0.90$ ,  $V_{\max}=V_0=83\text{cm/s}$ (式7)とした。また本計算は式(3)の検証目的であるので,  $V_E$ および $N$ は解析結果の値を用いた

\*1 ㈱大建設 テクニカルセンター 構造  
 \*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 DAIKEN SEKKEI, INC. Technical Center  
 \*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.