

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 非線形粘性ダンパーを含む最大せん断力の予測—

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 応答解析 非線形粘性ダンパー
最大せん断力予測

1. はじめに

筆者らは、積層ゴム支承と履歴系ダンパーによる免震構造に対し、オイルダンパーなど粘性系ダンパーを付加した場合のその設置量と最大応答値の変化に着目したパラメタリック解析を行い¹⁾、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た²⁾。さらにこれをエネルギーの釣合い式の項に付加して導かれる最大変位予測式の妥当性を応答解析結果より示した²⁾。

一方、免震構造の設計において免震層の最大せん断力(係数)の評価も重要である。積層ゴム支承と履歴系ダンパーで構成される免震層であれば最大変位から単純に最大せん断力が求まるが、粘性系ダンパーが付加された場合は一般に最大変位と最大せん断力発生時の変位が異なるため最大せん断力は応答解析以外では単純に求まらない。

本報では、免震層の最大変位が予測済みとしたときの、免震周期やダンパーのパラメータに応じた最大せん断力発生時の変位と最大せん断力に関する簡便な予測式を提案し、応答解析結果よりその精度を検証する。

2. 粘性系ダンパーを含む免震層の最大せん断力

免震構造に用いられる代表的なオイルダンパー(リリーフ速度32cm/s、2次減衰係数比0.0678)³⁾は、150cm/s時の減衰力が等しくかつ減衰力が速度の0.3乗に比例する非線形粘性ダンパーと等価に評価できる⁴⁾ため、以降の検討に用いる粘性系ダンパーのモデルは、減衰力が $F_v=CV^\kappa$ の形で表される非線形ダッシュポットとする(ただし定式化は $\kappa=0.3$ と固定せず $0 \leq \kappa \leq 1$ で一般化する)。

積層ゴム、履歴系ダンパーおよび粘性系ダンパーで構成される免震層に生じるせん断力 F は次式である。

$$F = F_f + F_p + F_v \tag{1}$$

ここに、 F_f 、 F_p 、 F_v はそれぞれ積層ゴム、履歴系ダンパー、粘性系ダンパーに生じる力である。

F_f および F_p は次式である。

$$F_f = K_f U, \quad F_p = Q_p \tag{2a,b}$$

ここに、 U は免震層の変位、 K_f は積層ゴムの剛性、 Q_p は履歴系ダンパーの降伏荷重である。

また非線形ダッシュポットが定常変位 $U=U_{max} \sin(\omega t)$ で変形するときの任意の U における F_v は次式となる。

$$F_v = C(\omega U_{max})^\kappa \{1 - (U/U_{max})^2\}^{\kappa/2} \tag{2c}$$

式(1)の F は、 $0 < \kappa \leq 1$ では $0 < U < U_{max}$ において正側に極値を持つので、 $dF/dU=0$ となる $U(=U_c)$ を式(1)(2)に代入することで最大せん断力を得ることができる。すなわち U_c は最大

せん断力発生時の変位である。そこでまず $dF/dU=0$ を変形して次式を導く。

$$\{\kappa \lambda (U_c/U_{max})\}^{2(2-\kappa)} + (U_c/U_{max})^2 = 1 \tag{3a,b}$$

$$\lambda = C(\omega U_{max})^\kappa / (K_f U_{max})$$

式(3a)より (U_c/U_{max}) は κ および λ に依存することがわかる。また式(3b)は $\lambda = K_v / K_f$ と表せ、 K_v は非線形ダッシュポットの U_{max} における損失剛性⁵⁾である。ただし式(3a)の U_c は代数的に求まらないので、 $0 \leq \kappa \leq 1$ および $0 \leq \lambda \leq 5$ と変化させながら (U_c/U_{max}) を収束計算で求め、 κ および λ に関する次の回帰式を得た(図1)。

$$U_c/U_{max} = 1 + S_1 \kappa + S_2 \kappa^2 + S_3 \kappa^3 \tag{4}$$

ここに、

$$S_1 = -0.4445\lambda - 0.0027\lambda^2$$

$$S_2 = 0.5345\lambda - 0.5032\lambda^2 + 0.2562\lambda^3 - 0.0458\lambda^4 + 0.0029\lambda^5 \tag{5a,b,c}$$

$$S_3 = -0.1746\lambda + 0.1135\lambda^2 - 0.0288\lambda^3 - 0.0019\lambda^4 + 0.0006\lambda^5$$

したがって、粘性系ダンパーが付加された免震層の最大変位 U_{max} が既知であれば、 κ および λ を介して式(4)より U_c を求め、式(1)(2)に代入して得られる F を免震層の最大せん断力の予測値とする。

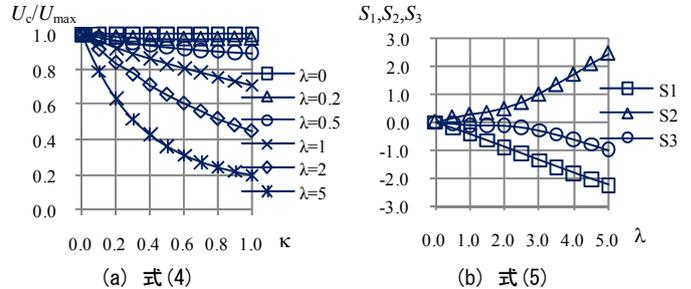


図1 (U_c/U_{max}) の回帰

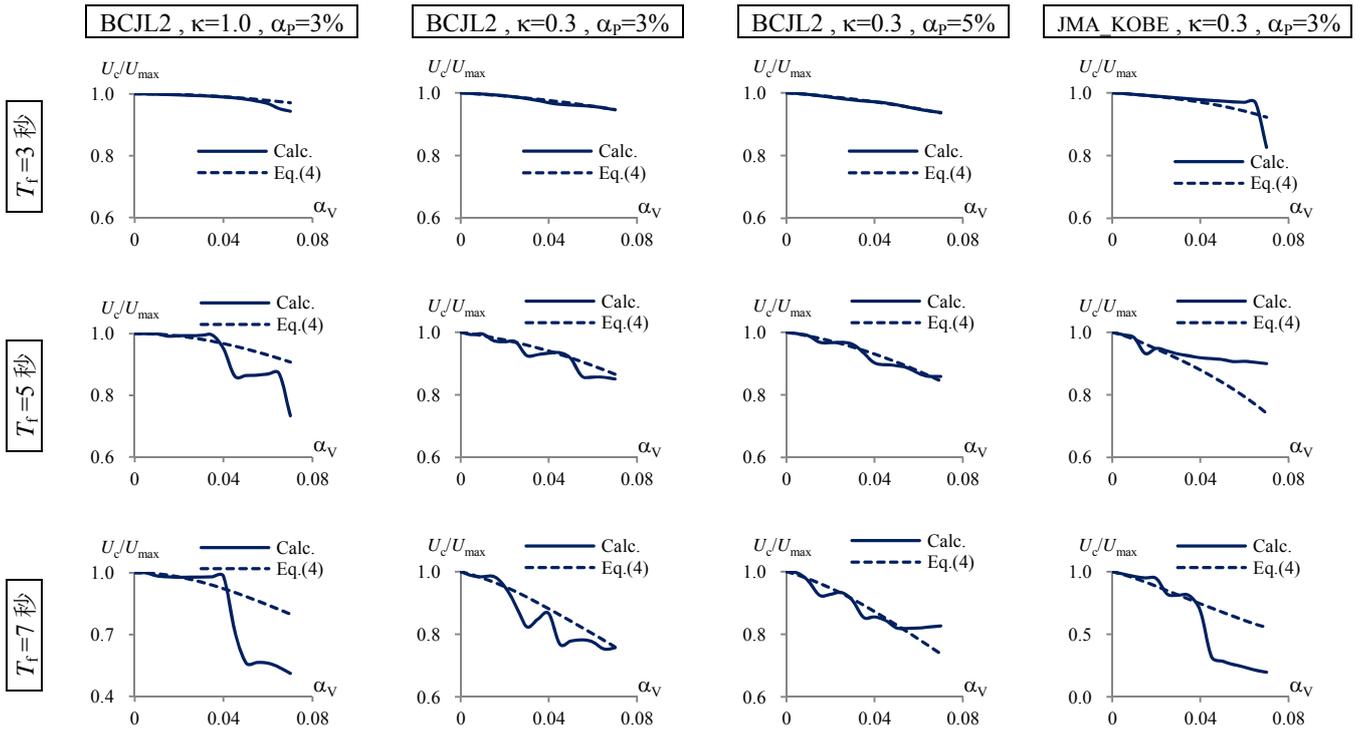
3. 最大変位に対する最大せん断力発生時の変位の検証

粘性系ダンパーの150cm/s時の減衰力の建物重量比 $\alpha_v=0 \sim 7\%$ に対する (U_c/U_{max}) の関係としてBCJL2⁶⁾およびJMA KOBE⁷⁾による解析値と式(4)での予測値を、極限られたケースであるが図2に示す。ここで、式(3b)の U_{max} には解析で得られた最大変位を用いているが、 ωU_{max} はJMA KOBEの場合、 U_{max} の予測法²⁾に倣い地震波の最大速度を用いた。

α_v の増大に伴い (U_c/U_{max}) は低下傾向を示し、解析値はやや変動的であるが、予測値は概ねその傾向に対応している。またこの低下傾向は免震周期 T_f の増長に対し顕著である。

4. 最大せん断力係数の検証

図3に最大せん断力係数の解析値と式(1)での予測値を示す。BCJL2, JMA KOBEとも解析値と予測値はよく一致している。また式(2c)の U_{max} と ωU_{max} も前述3.と同じ取扱いである。



(T_f は免震周期, α_p は履歴系ダンパーの降伏せん断力係数, α_v は粘性系ダンパーの150cm/sでの減衰力の建物重量比)
 図2 最大変位に対する最大せん断力発生時の変位(U_c/U_{max})の解析値と予測値(式4)

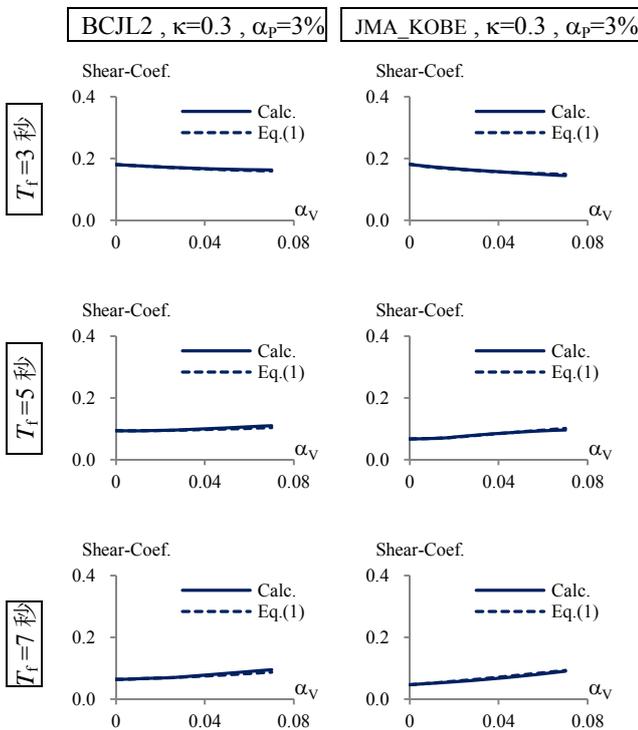


図3 最大せん断力係数の解析値と予測値(式1)

例えば図2のJMA KOBEにおける(U_c/U_{max})の解析値と予測値の差異が、図3のせん断力係数に現れないのは、 $\alpha_v=4\sim 7\%$ での全せん断力に占める積層ゴムの負担率が $T_f=5$ 秒で33~19%、 $T_f=7$ 秒で16~8%と、 U_c の影響度が低いと思われる。

5. まとめ

粘性系ダンパーを含む免震層の最大せん断力(係数)は、最大変位が既知であれば、最大せん断力発生時の変位を式(4)(5)の回帰式より求め、そのときの積層ゴムと履歴系ダンパーのせん断力、および式(2c)で求まる非線形粘性ダンパーの減衰力から精度よく推定することができる。

次報では、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応答予測法を示す。

参考文献

- 1) 酒井直己, 山崎久雄, 高山峯夫, 渡邊信也: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.905-906, 2009.8
- 2) 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
- 3) 日本免震構造協会: 免震部材標準品リスト2009, pp.643-722
- 4) 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), pp.235-236, 2010.8
- 5) 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 集 第574号, 77-84, 2003.12
- 6) 建設省建築研究所ほか: 設計用入力地震動作成手法技術指針(案)
- 7) 気象庁: <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/>

*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.