

等価線形化と変数分離法に応答スペクトルとして S_{AVD} を適用した 耐震補強粘性ダンパー必要量検討法

神永 敏幸*

Examination Method of Seismic Retrofit Viscous Damper Requirement using S_{AVD} as Response Spectrum for Equivalent Linearization and Variable Separation Method

by Toshiyuki KAMINAGA

Abstract

This study proposes a method to uniformly calculate the amount of viscous damper that is necessary for the seismic retrofit etc. from the target story displacement using the peak parameter spectrum S_{AVD} , the analysis of the complex eigenvalue and the variable separation method. As a result, the presumption value was in an error range that was sufficient for the targeted value at the stage of structural planning in about 0.85-1.15 times the range. Additionally, the story displacement obtained by dynamic response analysis confirmed the presumption value very nearly excluded the uppermost story displacement.

要 旨

耐震補強等に用いる必要粘性ダンパー量を目標層間変形より画一的に求める方法として、エネルギー Spektral の変数分離法を用いた逆設計法と振動方程式の複素固有値解析より導出された等価線形化された振動方程式に、応答スペクトルとしてピークパラメータスペクトル S_{AVD} を適用した算定手法を提案した。その結果、評価推定値は目標値に対し約 0.85～1.15 倍の範囲に収まり構造計画段階で十分に使用できる誤差範囲となった。さらに、推定粘性ダンパー量を用いた動的応答解析より得られた層間変形は評価推定層間変形に対して最上層の変形を除きほぼ同等な値になる事を確認できた。

キーワード：変数分離法／等価線形化／複素固有値解析／ピークパラメータスペクトル／評価推定値

1. はじめに

近年、住宅、オフィス、工場等の建物や生産施設に甚大な被害と膨大な損害をもたらす大地震が多く発生している。そのため、構造設計者は施主が希望する耐震性能を備えた建物の設計や施主の要望による建物の耐震性能の検証を行い、その結果を説明する機会が増えつつある。この場合、建物が地震に対して「安全」であるとの説明を受けた施主は、地震経験後の建物状態として建物に大きな損傷が生じていない見た目にも健全な状態を予想していると思われるが、構造設計者は建物に大きなクラックや破壊が生じていても倒壊しない状態を想定しているため、

両者の「安全」の意味の取り方に祖語を生じる場合が多いと思われる。これは建物の耐震性能を示す用語の意味の取り方において、施主等一般の方と構造技術者との間に大きな隔りがある事を示す一例であるが、地震に対するこれからの建物は兵庫県南部地震の被害経験から、建物の主要構造部材を損傷させずに粘性ダンパーや弾塑性ダンパー等で振動エネルギーを吸収する制震建物や免震建物の建設が普及しつつあり、既存建物の耐震補強でも一般的な工法となりつつある。この事は、また、長寿命建物の普及に繋がりエコ社会への大きな貢献でもある。

しかし、建物が目標耐震性能を満足するためのダ

* 技術研究所振動基礎研究室

ンパー量や組合せを決定する方法は設計パラメータが多く非常に複雑であるため、一般的には試行錯誤的にダンパー量と配置を仮定し step by step による動的な時刻歴地震応答解析を行うことで、設計または補強を行っている。そのため、建物の目標耐震性能を満たすダンパー量や組合せについて検証する簡易な解析法が提案され、検証法の整備が進みつつある。その検討手法には、秋山による予測法^[1]、大井の提唱する入力率^[2]を用いた予測法^[3]、笠井らによる予測法^[4]、石丸らによる予測法^{[5]~[9]}および建築基準法で提案されている限界耐力計算による検証法^[10]等がある。

ここで用いる推定手法は、石丸らの提案する方法を利用し地震カテゴリー（震度と加速度、速度、変位の関係）^[11]に対する設定層間変形より必要粘性ダンパー量を算定する方法である。この検討法の基本は、①1 質点系による粘性減衰定数 $h=0.40(0.10)$ の弾性応答スペクトル $\rho S_{V,40(10)}(T)$ と周期に無関係な 3 つのパラメータである粘性減衰定数 h 、応答塑性率 μ 及びバイリニア係数 p の組み合わせより導出した実験式 $\tau(h, \mu, p)$ との積より弾塑性系の応答スペクトル $S_{eq}(T)$ を近似的に求められる「応答スペクトルの変数分離」を用い、最大応答値から h, μ, p を推定し、或いは h, μ, p より応答予測や性能検証を行う方法と、②多質点系振動方程式について各層のバイリニア係数 p_i と塑性率 μ_i を設定し、初期剛性ばねを複素ばね定数化する「等価線形化」を行い、複素固有値解析より各モードのモーダル塑性率 μ_i 、モーダルバイリニア係数 p_i 、モーダル粘性減衰定数 $h_{eq,j}$ と等価粘性減衰定数 $h_{cs,j}$ 及び等価固有円振動数 $\omega_{cs,j}$ を算定する方法により、③各モードについて応答値を推定し必要モードの 2 乗和の平方根法により全体の応答を求め、設定層間変形を満足する必要粘性ダンパー量を推定する手法である。この時、④地震カテゴリーと震度・加速度・速度・変位を関連付けている「ピークパラメータスペクトル S_{AVD} 」^{[12]~[14]}と言われる台形スペクトルを応答スペクトルとし、地震波形を用いないで目標とする震度による S_{AVD} スペクトル値から計算を行っている。ただし、ここではバイリニア履歴復元力と粘性減衰を有する系を対象とし、主フレームは弾性として検討を行う。以下に、石丸の著書^{[7],[15]}を参考に検討法の考え方を示す。

2. 1 自由度系の対震設計の考え方

2.1 基本理論

非線形応答を考慮した 1 質点系の対震設計は、速度換算応答スペクトル $S_{eq}(T)$ によって行う。しかし、このスペクトルは地震動スペクトル $S(T)$ や系の弾性時固有周期 T_E (固有円振動数 ω_0)、粘性減衰定数 h 、塑性率 μ 、バイリニア係数 p などがお互いに作用しあい複雑な関係を構成している。この関係を、周期に無関係な任意に指定する設計パラメータ h, μ, p よりなる実験式 $\tau(h, \mu, p)$ と設計用応答スペクトル $S(T)$ の積よりなる「変数分離」形の式から弾塑性系のエネルギー応答量 $S_{eq}(T)$ を算定する。下記にその関係式を示す。

$$S_{eq}(S(T), T_E, h, \mu, p) \approx S(T) \cdot \tau(h, \mu, p)$$

ここで、**図 1** に示すバイリニア型履歴変形エネルギーは種々の方法を試行錯誤的に試み最終的に **図 2** に示すバイリニア型履歴変形エネルギーとして定義し、このバイリニア型履歴変形エネルギーに対応する疑似速度応答スペクトル $S_{Bi}(T_E)$ 、 T_E に対して塑性化を考慮し試行錯誤的に定義した実効周期 T' にシフトして読んだ弾性時の入力スペクトル $\rho S_{V,40}(T')$ 又は $\rho S_{V,10}(T')$ 及びその比 $\tau_{40}(h, \mu, p)$ 又は $\tau_{10}(h, \mu, p)$ の関

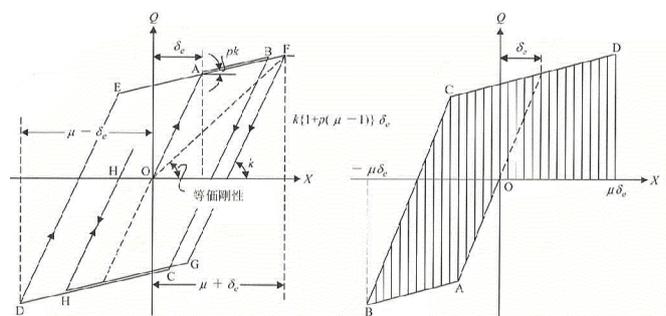


図 1 累積変形エネルギー^[7] 図 2 修正変形エネルギー^[7]

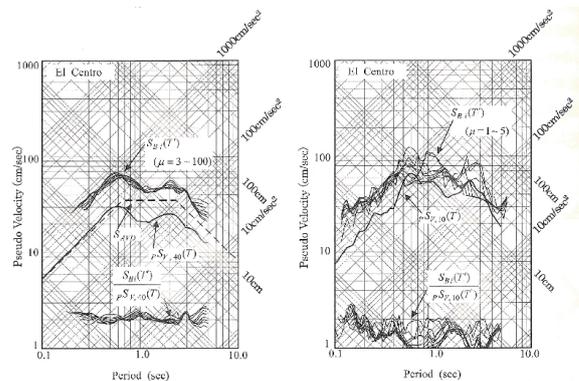


図 3 速度スペクトルと入力スペクトル^[7]

係を図 3 に示す。ここで下付き 10 は粘性減衰定数 $h=0.10$ で塑性率 $1 \leq \mu \leq 5$ の場合とする。以下に上記の関係式を示す。

(1) 実験式と弾塑性及び弾性エネルギーの関係

$$\tau_{40}(h, \mu, p) = \frac{S_{Bi}(T_E)}{p S_{V,40}(T')} \quad 3 \leq \mu \leq 100$$

$$\tau_{10}(h, \mu, p) = \frac{S_{Bi}(T_E)}{p S_{V,10}(T')} \quad 1 \leq \mu \leq 5$$

(2) 実効周期

$$T' = T_E \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\mu}{1+p(\mu-1)}} - \sqrt{\frac{2}{1+p}} \right\} \quad \mu \geq 3$$

$$T' = T_E \left\{ 0.155 \left[\frac{\mu}{1+p(\mu-1)} \right] + 0.845 \right\} \quad \mu \leq 3$$

(3) 弾塑性エネルギー

$$S_{Bi}(T_E) = \sqrt{\frac{2E_{Bi}(T_E)}{m}} \\ = \omega_0 x_e \sqrt{6(\mu-1)(1-p) + p(\mu^2-1) + 1}$$

(4) 実験式

$$S_{Bi}(T_E) = \tau_{10}(h, \mu, p) p S_{V,10}(T')$$

$$\tau_{10}(h, \mu, p) = (A_{10} + p \cdot A'_{10}) \log(\mu + 1.1) \\ + (B_{10} + p \cdot B'_{10}) \log(\mu - 0.9) + C_{10} + p \cdot C'_{10}$$

$$A_{10} = -3.3 - 1.6h + 3.9\sqrt{h} \quad A'_{10} = 17.5 + 5.1h - 58.3\sqrt{h}$$

$$B_{10} = 0.5 - 2.3h + 1.5\sqrt{h} \quad B'_{10} = -7.1 - 20.9h + 23.8\sqrt{h}$$

$$C_{10} = 3.7 + 1.8h - 4.7\sqrt{h} \quad C'_{10} = -9.1 - 24.5h + 28.4\sqrt{h}$$

$$S_{Bi}(T_E) = \tau_{40}(h, \mu, p) p S_{V,40}(T')$$

$$\tau_{40}(h, \mu, p) = (A_{40} + p \cdot A'_{40}) \log(\mu + 1.1) \\ + (B_{40} + p \cdot B'_{40}) \log(\mu - 0.9) + C_{40} + p \cdot C'_{40}$$

$$A_{40} = 6.1 + 23.9h - 22.4\sqrt{h} \quad A'_{40} = -8.1 - 43.8h + 38.8\sqrt{h}$$

$$B_{40} = -5.4 - 18.4h + 17.3\sqrt{h} \quad B'_{40} = 8.9 + 41.6h - 37.7\sqrt{h}$$

$$C_{40} = 1.4 - 7.0h + 4.1\sqrt{h} \quad C'_{40} = 0.7 + 9.5h - 7.7\sqrt{h}$$

以上より、弾塑性変形エネルギーの換算速度応答スペクトル $S_{Bi}(T_E)$ は、 T_E から T' にシフトした弾性系の応答スペクトル $p S_{V,40}(T')$ 又は $p S_{V,10}(T')$ に同定された実験式を乗じ、近似的に求めることが出来る。以下では、 $h=0.40$ について述べる。

2.2 応答値算定式

上述の実験式を元に応答値算定式について示す。設計用スペクトルとして $p S_{V,40}$ が与えられると次の関係式が得られる。

$$S_{Bi}(T_E) = p S_{V,40}(T') \tau_{40}(h, \mu, h) \\ = \omega_0 x_e \sqrt{6(\mu-1)(1-p) + p(\mu^2-1) + 1}$$

上式を変形すると、

$$p \left[\frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \right]^2 + 6(1-p) \left[\frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \right] \left[\frac{\hat{V}_y}{p S_{V,40}} \right]^2 \\ - 5(1-p) \left[\frac{\hat{V}_y}{p S_{V,40}} \right]^2 = \{\tau_{40}(h, \mu, p)\}^2 \\ p S_{V,40} = p S_{V,40}(T'), \quad \hat{V}_y = \omega_0 x_e, \quad \hat{V}_{\max} = \omega_0 \mu x_e$$

これは、 $(\hat{V}_{\max} / p S_{V,40}(T'))$ と $(\hat{V}_y / p S_{V,40}(T'))$ の関係、すなわち最大速度 \hat{V}_{\max} と降伏速度 \hat{V}_y の関係となる。同様に、最大変形 \hat{D}_{\max} 、最大(相対)加速度 \hat{A}_{\max} 、 $p S_{V,40}(T')$ における変形量 D_{40} 、加速度値 A_{40} について定義すると、

$$\frac{\hat{D}_{\max}}{D_{40}} = \frac{\hat{V}_{\max} / \omega_0}{p S_{V,40} / \omega'} = \frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \cdot \frac{\omega'}{\omega_0} = \frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \cdot \frac{T_E}{T'}$$

$$\frac{\hat{A}_{\max}}{A_{40}} = \left\{ (1-p) \frac{\hat{V}_y}{p S_{V,40}} + p \frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \right\} \frac{\omega_0}{\omega'} \\ = \left\{ (1-p) \frac{\hat{V}_y}{p S_{V,40}} + p \frac{\hat{V}_{\max}}{p S_{V,40}} \right\} \frac{T'}{T_E}$$

$$\frac{\hat{A}_y}{A_{40}} = \frac{\omega_0 \hat{V}_y}{\omega' p S_{V,40}} = \frac{\hat{V}_y}{p S_{V,40}} \cdot \frac{T'}{T_E}$$

$$\hat{D}_{\max} = \mu x_e, \quad \hat{A}_{\max} = \omega_0^2 x_e [1 + p(\mu-1)],$$

$$A_{40} = \omega' p S_{V,40}(T'), \quad D_{40} = \frac{p S_{V,40}(T')}{\omega'}, \quad \omega' = \frac{2\pi}{T'}$$

3. 多自由度系の対震設計の考え方

3.1 基本理論

粘性減衰を有するバイリニア履歴系の 1 質点系応答は、 $p S_{V,40}$ の弾性応答スペクトルを用いて 2 章で示した算定式を利用し推定できた。多質点系応答では、複素固有値解析を行い複素固有値より各モードの振動方程式を等価線形化により作成し、算定式を利用し応答を推定する。1 質点系の等価線形化は、系が定常振動している場合、粘性減衰力 $c\dot{x}$ と応答

速度 \dot{x} との関係は変形と粘性減衰力の時刻歴波形が図4のように、粘性減衰力と変形の履歴が図5のようになる。これより、粘性減衰力がゼロの場合変形は正・負の最大値をとり、粘性減衰力が正・負の最大値をとる場合変形はゼロとなる。また履歴は時計回りとなる。この粘性減衰エネルギーは変形と減衰力の描く面積の累積値として求められる。

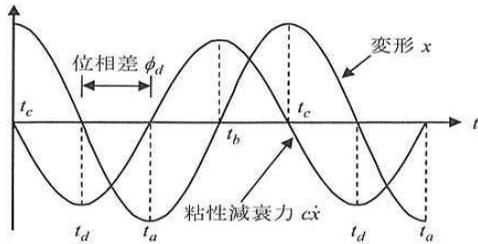


図4 変形と粘性減衰力の時刻歴波形^[7]

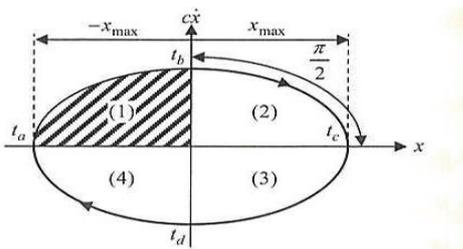


図5 変形と粘性減衰力のリサージュ^[7]

バイリニア型履歴の時刻歴波形は、変形を正弦波とした時の完全弾塑性型履歴の復元力 Q が図6のような時系列波形となり、三角関数で近似すると復元力と変形とに位相差が生じる。

完全弾塑性型履歴としていたため復元力と変形の関係は図7の平行四辺形として描けるが、復元力

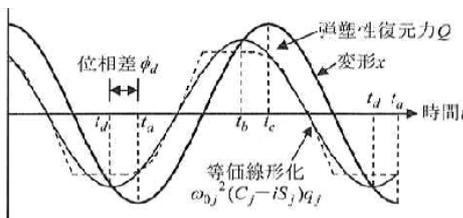


図6 弾塑性履歴減衰力の時刻歴波形^[7]

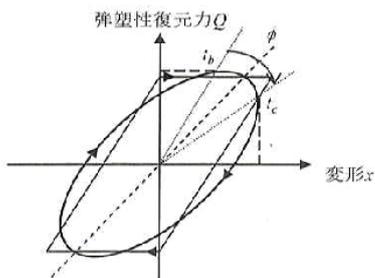


図7 弾塑性履歴減衰力の等価線形化^[7]

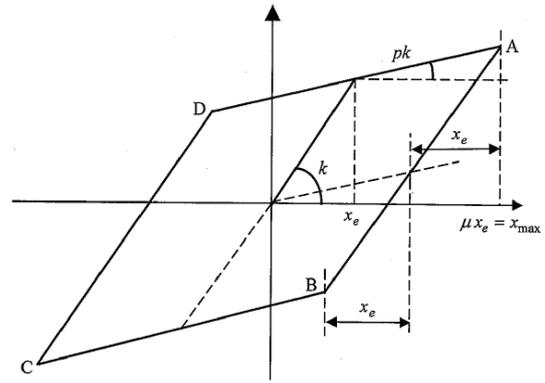


図8 バイリニア型履歴の定常振動^[7]

を三角関数で近似すれば復元力と変形の関係は図7に示すような楕円形になり、両者の面積差は小さいのでエネルギーの吸収性能の誤差はほとんどない。一方、粘性減衰力と変形の関係よりそれぞれが最大値をとる時の位相差が $\pi/2$ であるのに対し、弾塑性の等価線形化では $0 \sim \pi/2$ の位相差 ϕ を示し、塑性バネは弾性時で位相差がゼロ、塑性化が大きくなるにつれて大きくなる。

次に弾塑性履歴の数学的な表現は、図8に示すようにバイリニア型履歴を有する系が正弦波入力を受け $\mu = x_{max}/x_e$ の塑性率で定常振動するため、振動方程式は粘性減衰係数 c を用い、

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x, \dot{x}) = -m a \cos(\omega t + \psi)$$

となる。図8より復元力 Q の大きさは、

$$A \sim B \quad Q(x, \dot{x}) = k\{x - (1-p)(x_{max} - x_e)\}$$

$$B \sim C \quad Q(x, \dot{x}) = pkx - kx_e(1-p)$$

$$C \sim D \quad Q(x, \dot{x}) = k\{x + (1-p)(x_{max} - x_e)\}$$

$$D \sim E \quad Q(x, \dot{x}) = pkx + kx_e(1-p)$$

この復元力の第1項を Fourier 級数で近似すると、

$$Q(x, \dot{x}) \cong kx_{max}(C \cos \theta + S \sin \theta)$$

ここで、

$$C = \frac{1}{\pi}(1-p) \left[\theta' - \frac{1}{2} \sin 2\theta' \right] + p$$

$$S = -\frac{1}{\pi}(1-p) \sin^2 \theta'$$

$$\theta' = \cos^{-1} \left[1 - \frac{2}{\mu} \right]$$

この式は、バイリニア係数 p と塑性率 μ を与えて θ' 及び C と S を計算する。逆に C と S を与えて p, μ を計算することもできる。

$$C \sin^2 \theta' + S \left[\theta' - \frac{1}{2} \sin 2\theta' - \pi \right] - \sin^2 \theta' = 0$$

$$p = 1 + \frac{\pi S}{\sin^2 \theta'}, \quad \mu = \frac{2}{1 - \cos \theta'}$$

復元力 Q は、

$$Q(x, \dot{x}) = kx_{\max} \sqrt{C^2 + S^2} \left[\cos \theta \frac{C}{\sqrt{C^2 + S^2}} + \sin \theta \frac{S}{\sqrt{C^2 + S^2}} \right]$$

$$\cos \phi = \frac{C}{\sqrt{C^2 + S^2}}, \quad \sin \phi = \frac{S}{\sqrt{C^2 + S^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{S}{C}$$

従って、

$$Q(x, \dot{x}) = kx_{\max} \sqrt{C^2 + S^2} \cos(\theta - \phi)$$

入力 $e^{i(\omega t + \psi)}$ に対する応答変形は $e^{i\omega t}$ と表せるから復元力は、

$$Q(x, \dot{x}) = kx_{\max} \sqrt{C^2 + S^2} e^{i(\omega t - \phi)}$$

$$= kx_{\max} \sqrt{C^2 + S^2} (\cos \phi - i \sin \phi) e^{i\omega t}$$

上記 $\cos \phi$, $\sin \phi$ を代入すると、

$$Q(x, \dot{x}) = k(C - iS)x_{\max} e^{i\omega t}$$

$$x = x_{\max} e^{i\omega t}$$

以上より、ばね常数 k に複素数 $(C - iS)$ を乗じ、複素ばね定数化することで等価線形化できる。

また、このように弾塑性履歴を行う系を等価線形化した系について応答の定性的傾向を推察するため、等価固有振動数 ω_{CS} と等価粘性減衰定数 h_{CS} を自由振動の方程式より算定する。

$$\ddot{q} + \omega_0^2 (C - iS)q = 0$$

これを变形すると、

$$\ddot{q} + (a + ib)^2 q = 0$$

$$a = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{2} [C + \sqrt{C^2 + S^2}]}$$

$$b = -\frac{S}{2a} \omega_0^2 = \omega_0 \sqrt{\frac{1}{2} [-C + \sqrt{C^2 + S^2}]}$$

一方、等価粘性減衰系の方程式は、

$$\ddot{q} + 2h_{CS}\omega_{CS}\dot{q} + \omega_{CS}^2 q = 0$$

それぞれの解は、

$$q = Ae^{-bt} e^{iat}$$

$$q = Ae^{-h_{CS}\omega_{CS}t} e^{i\sqrt{1-h_{CS}^2}\omega_{CS}t}$$

これを等置して次式を得る。

$$\omega_{CS}^2 = \omega_0^2 \sqrt{C^2 + S^2} \quad : \text{等価固有振動数}$$

$$h_{CS} = \sqrt{\frac{-C + \sqrt{C^2 + S^2}}{2\sqrt{C^2 + S^2}}} \quad : \text{等価粘性減衰定数}$$

3.2 弾塑性履歴減衰系の性能

弾塑性履歴を有する多自由度系について理論を拡張し、基準座標上で応答を推定する方法を示す。ここでは、2自由度系を対象に検討する。

まず弾性時の振動方程式を層間変形 x_n について誘導する。

$$\mathbf{x}^T = [x_2 \quad x_1], \quad \mathbf{i}^T = [0 \quad 1]$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_2 & m_2 \\ m_2 & m_2 + m_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_2 & \\ & k_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_2 & \\ & c_1 \end{bmatrix}$$

$k_n x_n$: n 層の層せん断力

次に1自由度系と同様に入力 \dot{y} を $ae^{i(\omega t + \psi)}$ とし、かつ各層は塑性率 μ_n で定常履歴振動しているものとする。層間変形は $x_n = r_n e^{i\omega t}$ で振動していると仮定し、それにもなつて n 層の層せん断力特性を定常楕円型履歴で近似する。

$$\ddot{y} = ae^{i(\omega t + \psi)}$$

$$x_n = r_n e^{i\omega t}$$

$$Q_n = k_n (C_n - iS_n) x_n$$

ここで、粘性減衰がゼロもしくは剛性比例型として計算を進めると、固有値問題は粘性減衰マトリクスを無視でき以下の振動方程式となる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_{eq}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{i}\ddot{y}$$

$$\mathbf{K}_{eq} = \begin{bmatrix} k_2(C_2 - iS_2) & \\ & k_1(C_1 - iS_1) \end{bmatrix}$$

従って、弾性時、弾塑性時の固有値は次の式より得られる。

$$\text{弾性時} \quad \mathbf{K}\mathbf{r} - \omega^2 \mathbf{M}\mathbf{r} = 0$$

$$\text{弾塑性時} \quad \mathbf{K}_{eq}\mathbf{r} - \omega_{CS}^2 \mathbf{M}\mathbf{r} = 0$$

弾塑性時は複素固有値問題となる。

これらの解析より、弾性時では固有値、刺激関数、固有円振動数、固有周期、モード粘性減衰定数が得られる。また、弾塑性時の固有値解析では固有値、刺激関数、固有値に乘じられた $(C - iS)$ 値から履歴複素ばね値 (C_j, S_j) の組み合わせがわかり、各モードのモーダル塑性率 $\bar{\mu}_j$ 、モーダルバイリニア係数 \bar{p}_j 、等価固有円振動数 ω_{CS} 及び等価粘性減衰定数 h_{CS} を算定出来る。

3.3 粘性減衰と弾塑性履歴減衰の複合系の性能

弾塑性履歴と粘性減衰を有する多自由度系について検討法を示す。いま円振動数 ω_0 ，粘性減衰定数 h ，バイリニア型履歴を有する 1 質点系が，ある特定の大きさの塑性率 μ で定常振動しているとする，その振動方程式および特性方程式は以下ようになる。

$$\ddot{x} + 2h\omega_0\dot{x} + \omega_0^2(C - iS) = -\ddot{g}$$

$$\therefore \lambda^2 + 2h\omega_0\lambda + \omega_0^2(C - iS) = 0$$

したがって 2 つの固有値を λ_1 と λ_2 とおくと，

$$\begin{aligned} (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) &= \lambda^2 - (\lambda_1 + \lambda_2)\lambda + \lambda_1\lambda_2 \\ &= \lambda^2 + 2h\omega_0\lambda + \omega_0^2(C - iS) = 0 \end{aligned}$$

$$\therefore (\lambda_1 + \lambda_2) = -2h\omega_0, \quad \lambda_1\lambda_2 = \omega_0^2(C - iS)$$

これより，固有値の和から粘性減衰定数の効果を，固有値の積から弾塑性履歴減衰の効果を把握することが出来る。これを多質点系に拡張し複素固有値問題を解けば，各モードの粘性減衰定数 h_{0j} と履歴複素ばね値 (C_j, S_j) の組み合わせがわかり，各モードのモーダル塑性率 $\bar{\mu}_j$ とモーダルバイリニア係数 \bar{p}_j もわかる。これにより，特定の設計用入力地震動に対して，粘性減衰定数 h_{0j} をもち，モーダルバイリニア係数 \bar{p}_j を有するバイリニア型履歴系がモーダル塑性率 $\bar{\mu}_j$ を満足するときの応答量を推定でき，同時に時刻歴波形も求めることもできる。

ただし複素固有値問題の結果は，剛性マトリックスが各部材の塑性化の大きさに応じた複素数のばね定数を有する場合，少し複雑になる。

多質点系の弾性時振動方程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{i}}\ddot{y}$$

固有値の計算は，剛性マトリックス \mathbf{K} を複素ばねにより等価線形化した \mathbf{K}_{eq} を用いて行う。ここで，下式は上記式を 1 階の微分方程式に変換し， n 自由度系を $2n$ 自由度系に拡張したものである。

$$\mathbf{M}'\dot{\mathbf{d}} = \mathbf{K}'_{eq}\mathbf{d} - \mathbf{M}'\dot{\mathbf{i}}\ddot{y}$$

$$\mathbf{M}' = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \\ & -\mathbf{K}_{eq} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}'_{eq} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C} & -\mathbf{K}_{eq} \\ -\mathbf{K}_{eq} & \end{bmatrix},$$

$$\dot{\mathbf{i}} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{i}} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{Bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{x} \end{Bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{v}$$

上式に対応する固有ベクトル，スペクトル行列を，

$$\mathbf{R}' = [\mathbf{r}'_1 \quad \bar{\mathbf{r}}'_1 \quad \mathbf{r}'_2 \quad \bar{\mathbf{r}}'_2 \quad \cdots \quad \mathbf{r}'_n \quad \bar{\mathbf{r}}'_n]$$

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \bar{\lambda}_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \bar{\lambda}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & & \\ & \mathbf{A}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}$$

と表現すれば次式が成立する。ここで，上式の $\lambda_j, \bar{\lambda}_j$ は j 次モードの疑似共役な固有値である。また，固有ベクトル \mathbf{r}_j と $\bar{\mathbf{r}}_j$ の組み合わせは，両者とも複素数でかつ $\mathbf{r}_j \neq \bar{\mathbf{r}}_j$ となる。

$$(\mathbf{M}')^{-1}\mathbf{K}'\mathbf{R}' = \mathbf{R}'\mathbf{A}'$$

解は，

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{q} = [\mathbf{R}'\mathbf{D}^{-1}]\mathbf{D} \begin{bmatrix} \phi \\ \phi \\ \vdots \\ \phi \end{bmatrix} \mathbf{D}^{-1}\mathbf{q}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 & & \\ & \mathbf{D}_2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_j = \frac{1}{\lambda_j - \bar{\lambda}_j} \begin{bmatrix} \lambda_j & -\bar{\lambda}_j \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_j^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\bar{\lambda}_j \\ 1 & -\lambda_j \end{bmatrix}$$

ただし，マトリックス \mathbf{D} は次式で定義される行列である。基準座標は，

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}\mathbf{A}'\mathbf{D}^{-1}\mathbf{q} - \hat{\mathbf{1}}\ddot{y}$$

各モードの基準座標上の応答値である q_j^y, q_j^x は次式のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_j^y \\ \dot{q}_j^x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (\lambda_j + \bar{\lambda}_j) & -\lambda_j\bar{\lambda}_j \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_j^y \\ q_j^x \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{y}$$

ただし，各固有値の和と積は次のようになる。

$$\begin{aligned} (\lambda - \lambda_j)(\lambda - \bar{\lambda}_j) &= \lambda^2 + 2h_{eq,j}\omega_{0,j}(1 + ir_j)\lambda + \omega_{0,j}^2(C_j - iS_j) \\ &\quad - (\lambda_j + \bar{\lambda}_j) = 2h_{eq,j}\omega_{0,j}(1 + ir_j) \\ &\quad \vdots \\ &\quad \lambda_j\bar{\lambda}_j = \omega_{0,j}^2(C_j - iS_j) \end{aligned}$$

4. 応答予測法による必要粘性ダンパー量の推定手法

4.1 解析法について

必要粘性（オイル）ダンパー量の推定手法は 2 章，3 章で述べた石丸の理論・方法を基本として用いるが，この方法はある程度の大きさの塑性率 ($\mu \geq 5$) 発生を理論的ベースに算定式を誘導しているため，塑性率の小さな場合石丸の方法による算定式では安定的な解析を行うことが困難となる場合がある。そのため，ここでは石丸の方法を改良した秦らの方法^[6]による算定式を用いて応答値を推定し，目標とする層間変形を満足する必要粘性ダンパー量を算出

する手法を提案する。

必要ダンパー量を算出する解析は与えられた質点系モデルについて、①入力地震動の大きさと建物の応答目標を設定、②複素固有値問題によりモデル特性を特定、③ピークパラメータスペクトル S_{AVD} より応答スペクトル値を設定、④各次モードの粘性減衰定数 $h_{eq,j}$ 、モーダルバイリニア係数 p_j を用い変数分離法による推定式より各次モードの応答値を推定、⑤2乗和の平方根法を用いて系の応答値を推定、⑥目標層間変形に対する必要粘性ダンパー量を算定、⑦必要粘性ダンパー量を用い推定式と動的応答解析の結果について確認する。ここで、①～④より得られた推定応答値を評価推定値と呼ぶことにする。解析フローを図9に示す。

次に、使用する応答スペクトルについて説明する。変数分離法による応答値の推定では、使用する入力地震動を設定し、減衰定数 10% 或いは 40% による応答スペクトルを算定し、応答目標から得られる構造物特性に対応したスペクトル値を使用する。そのため、計算毎に使用する地震波の応答スペクトルを算定する必要がある。ここでは、計画段階での粘性ダンパー使用量を推定することを主目的とするため、気象庁震度階と対応させた地震動カテゴリーを基に台形のスペクトル、ピークパラメータスペクトル S_{AVD} を設定し粘性ダンパー量を算定するための応答スペクトルとして用いる。表1に震度と加速度・速度の関係を示す。表2に地震動カテゴリーと各カテゴリーに対応する加速度・速度・変位を示す。表2に示す地震動カテゴリーと加速度・速度・変位の対応は文献^[7]によるものである。

今回、必要粘性ダンパー量を算定するために用いた地震カテゴリーと加速度・速度・変位の対応は、各カテゴリーの最大値をカテゴリーのスペクトル値として用いた。カテゴリーC4 で使用する最大値を

表1 震度と加速度・速度の関係

震度	計測震度	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)
4	>4.0	40~100	4~10
5弱	>4.5	100~240	10~20
5強	>5.0	240~520	20~40
6弱	>5.5	520~830	40~60
6強	>6.0	830~1100	60~120
7	>6.5	1100ないし1500以上	120以上

表2 地震カテゴリー

カテゴリー	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	参考
C4	1000以上	100以上	60以上	震度7相当
C3	1000~700	100~70	60~30	震度6強相当
C2	700~400	70~40	30~15	震度6弱相当
C1	400以下	40~20	15以下	震度5強相当

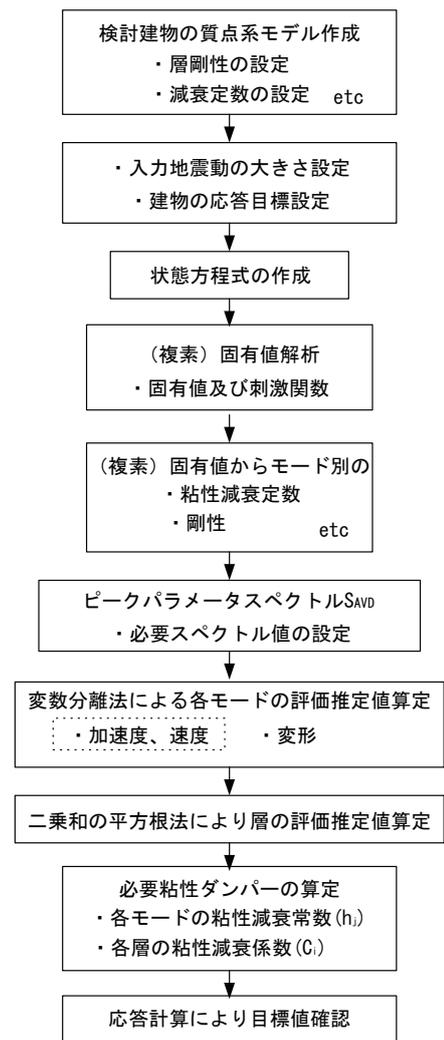


図9 解析フロー

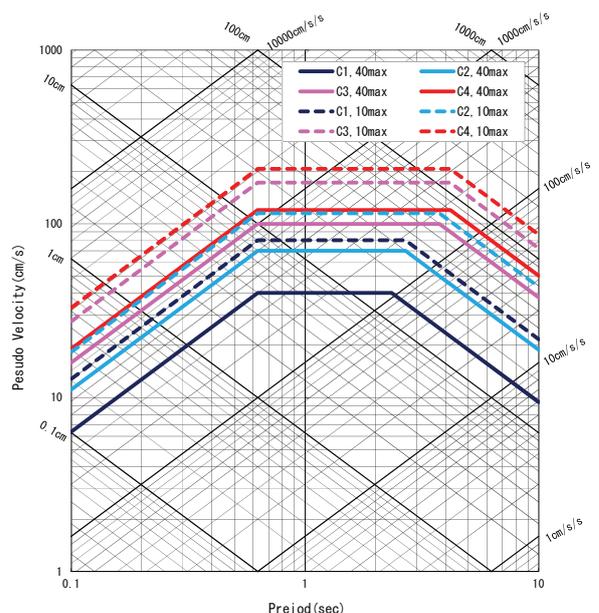


図10 地震カテゴリー別ピークパラメータスペクトル S_{AVD}

表 3 検討用地震カテゴリー

$pS_{V,40}$				
カテゴリー	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	参考
C4, max	1200	120	80	震度7相当
C3, max	1000	100	60	震度6強相当
C2, max	700	70	30	震度6弱相当
C1, max	400	40	15	震度5強相当

$pS_{V,10}$				
カテゴリー	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	参考
C4, max	2070	207	138	震度7相当
C3, max	1725	172.5	115	震度6強相当
C2, max	1150	115	69	震度6弱相当
C1, max	805	80.5	34.5	震度5強相当

表 3 のように設定した。また、図 10 に減衰定数 $h=10\%$ 、40%の応答スペクトルとしての S_{AVD} を示す。表 3 の値は、文献[7]の検討結果を基に設定した値である。ここで、 $pS_{V,40}$ は粘性減衰定数 $h=0.40$ として最大応答変位 S_D に当該円振動数 ω を乗じる方法により算定した疑似速度応答スペクトルである。そのため $pS_{V,40}$ は、地震動のような非定常な波形が連続する場合に入力と出力の振幅比が 1 になる（共振倍率が 1 となる）場合の疑似速度応答スペクトルで、応答からみると地震動そのもののパワーの大きさを示していると言える。

4.2 必要粘性ダンパー量の算定

検討用構造物を耐震補強するために必要となる粘性ダンパー量は、上記方法により算定するが、実際に必要粘性ダンパーを算定する詳細なフローは、図 11 に示す作業による。

ここで、各モードの必要粘性減衰定数 h_j から各層の必要粘性ダンパー C_i への変換は、各モードの減衰定数 h_j に固有円振動数 ω_j を乗じて減衰係数 C_{ij} を算定し、各層刺激関数 $r_{ij} \beta_{ij}$ によって分配した値の和 $\sum_{j=1}^n C_{ij}$ を各層減衰係数 C_i とした。

上記に示した各層での目標応答変位を満足する粘性減衰係数の算定は、独自に作成したプログラムにより計算する。ただし、各層に付与できる必要粘性減衰の限界は 20~30%程度と考えられるので、必要粘性減衰が 50%を超える場合は、途中で計算を打ち切るものとした。それ以上の粘性減衰を必要とする場合は他の方法により応答値を減ずる装置等の工夫が必要となる。例えば、粘性ダンパーと履歴ダンパーやダイナミック・マスダンパーを併用する等他の減衰装置を組合せて用いることも一つの方法と考えられる。

さらに、必要粘性ダンパー量が算定できたとしても多質点系モデルに算定ダンパーを採り入れて再度

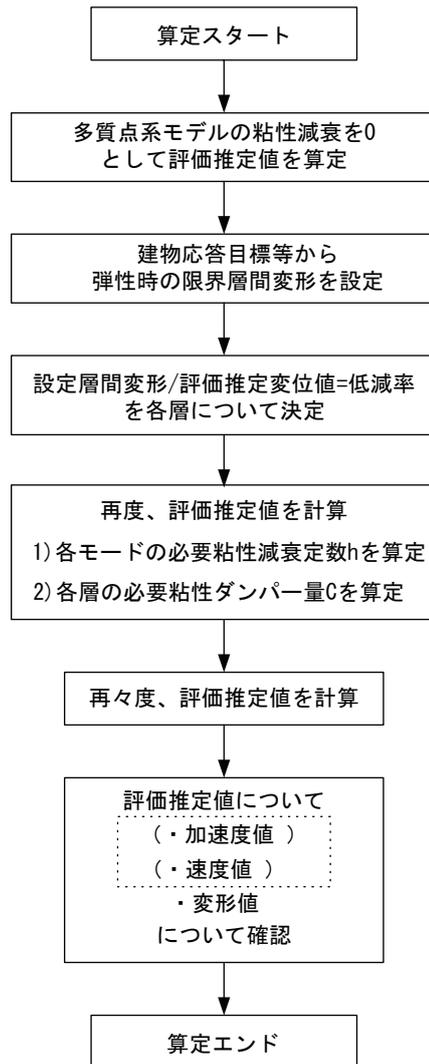


図 11 必要粘性ダンパー算定フロー

複素固有値解析を行い各モードの粘性減衰定数を算定すると、付与減衰が過減衰であるかないかを判断する事もできる。過減衰である場合、算定したダンパー量で応答目標をクリアできない事もあり注意が必要である。また以後の計算では過減衰となった次数より低次のモードについてのみ計算に用い、過減衰以上のモードについては計算に用いないようプログラムされている。さらに、質点数が多くなり弾塑性の問題が生ずると複素固有値問題で共役複素数を見つけ出す検定が非常に困難になる場合があり、固有値解析のエラーは以後の計算の信頼性を失くし意図した解析を行う事が出来なくなるので使用ダンパーの再検討を要することになる。

5. 必要粘性ダンパー量の算定例

ここでは、上記2章・3章で述べた手法を用い、4章に示す方法により目標層間変形を満足する必要

な粘性（オイル）ダンパー量の算定と検討結果について示す。検討に用いる解析モデルは6層鉄骨造建物、入力地震動のレベルはC1とする。応答目標は入力動レベルC1に対し弾性で最大層間変形角1/120以下とし、その時のオイルダンパー量を推定する。また、その結果を基に質点系動的解析ソフトにより時刻歴応答解析を行い推定ダンパー量の妥当性を確認する。

5.1 減衰無の場合の検討

解析モデルの入力データを表4に、解析結果を表5に示す。解析は絶対変位系による場合と相対変位系による場合について行えるが、ここでは相対変位系による結果を示す。

表4 解析モデルの入力データ

```

質点数N (N≤100)
6
1層間
FL  mi (ton)  D. Mi (ton)  ci (kN·s/m)  k0i (kN/m)  pi  μi  D. R. F
6   200      0          0          60000      1    1    0.89
5   200      0          0          70000      1    1    0.73
4   200      0          0          75000      1    1    0.59
3   200      0          0          80000      1    1    0.60
2   200      0          0          85000      1    1    0.56
1   200      0          0          95000      1    1    0.66
h
0
mode number of calculating the damping capacity
6
step number dt(sec)  dt/n  alfa  modal  force of DM
12000  0.01  1    1      6      -1
wave name
bcj12.csv
    
```

表5 解析結果(評価推定値：相対変位系)

```

### [PSV10] FORMULAR RESULTS : [RELATIVE MATRIX] ###
EARTHQUAKE CATEGORY LEVEL=C1
floor  relDmax  relVmax  relARmax
6      0.028   0.290   5.485
5      0.040   0.307   4.687
4      0.049   0.301   4.219
3      0.055   0.293   3.802
2      0.059   0.308   3.406
1      0.057   0.331   4.000
0      0       0       3.083
    
```

5.2 変形低減率に対する必要粘性減衰定数の検討

各層に設定した変形低減率(RDF)に対して低減変形を満足するのに必要な粘性減衰定数及び減衰係数の算定を行う。表6には建物各階高さと評価推定値より応答目標とする層間変形角 $r \leq 1/120(0.0083)$ を満足する変形低減率を示している。必要ダンパーを推定する入力データを表7に、解析結果を表8に示す。この条件を満たすためには評価推定変形を最大約55%程度まで低減させるダンパー量を設置する必要がある。

初期の粘性減衰を0として解析した層間変形

表6 変形低減率の算定結果

floor	h(m)	r(rad)	1/r	(1/120)	R. D. F	judgement
6	3.00	0.0093	107		0.89	0.0083 120
5	3.50	0.0114	88		0.73	0.0083 120
4	3.50	0.0140	71	0.0083	0.59	0.0083 120
3	4.00	0.0138	73		0.60	0.0083 120
2	4.00	0.0148	68		0.56	0.0083 120
1	4.50	0.0127	79		0.66	0.0083 120

表7 ダンパー算定入力データ

```

質点数N (N≤100)
6
1層間
FL  mi (ton)  D. Mi (ton)  ci (kN·s/m)  k0i (kN/m)  pi  μi  D. R. F
6   200      0          0          60000      1    1    0.89
5   200      0          0          70000      1    1    0.73
4   200      0          0          75000      1    1    0.59
3   200      0          0          80000      1    1    0.60
2   200      0          0          85000      1    1    0.56
1   200      0          0          95000      1    1    0.66
h
0
mode number of calculating the damping capacity
6
step number dt(sec)  dt/n  alfa  modal  force of DM
12000  0.01  1    1      6      -1
wave name
bcj12.csv
    
```

表8 変形低減率に対する必要粘性減衰定数

```

### DAMPING [C] TO PREDICTWITH [PSV10] FORMULAR ###
### [RELATIVE MATRIX] ###
EARTHQUAKE CATEGORY LEVEL=C1
floor  B. DISP  D. R. F  P. DISP  SUITEI-H Damper (C)  input
6      0.028   0.89    0.025   0.064   1890   1890
5      0.040   0.73    0.030   0.049   3222   3230
4      0.049   0.59    0.029   0.093   4680   4680
3      0.055   0.60    0.033   0.119   4149   4700
2      0.059   0.56    0.033   0.292   5142   5150
1      0.057   0.66    0.037   0.473   3850   5200
    
```

B.Disp に変形低減率を乗じて得られた目標層間変形 P.Disp を得るための各次の減衰定数 SUITEI-H から求めた各層の粘性減衰係数 Damper(C)は、1階では約3850kNs/m（入力値5200kNs/m）となる。ただし、初期粘性減衰定数 h を考慮するとその分必要ダンパー量を減少できる。

5.3 算定必要粘性減衰定数による検討結果

各層の算定必要粘性減衰係数を用いた応答値の推定を行う。入力データを表9に、解析結果を表10に、層間変形角の検討結果を表11に示す。解析ダンパー量は1層から3層で推定時量より若干増やした量としているが、推定層間変形角は目標値に対して1.32~0.83となっている。目標層間変形に対して最大15%程度超過しているが、計画段階の検討値としては十分使用できる誤差と考えられる。

この時の複素固有値解析結果より得られた建物構造特性を表12に示す。

弾性時固有周期 T は1.278sec、塑性化がある場合

表 9 算定ダンパーによる入力データ

質点数N (N≤100)							
6							
1層間							
FL	m _i (ton)	D. M _i (ton)	c _i (kN·s/m)	k _{0i} (kN/m)	p _i	μ _i	D. R. F
6	200	0	1890	60000	1	1	0
5	200	0	3230	70000	1	1	0
4	200	0	4680	75000	1	1	0
3	200	0	4700	80000	1	1	0
2	200	0	5150	85000	1	1	0
1	200	0	5200	95000	1	1	0
h							
0							
mode number of calculating the damping capacity							
6							
step numbe	dt(sec)	dt/n	alfa	modal	force of DM		
12000	0.01	1	1	6	-1		
wave name							
bcjl2.csv							

表 10 算定ダンパーによる解析結果

```
### [PSV10] FORMULAR RESULTS : [RELATIVE MATRIX] ###
EATHQUAKE CATEGORY LEVEL =C1
floor  relDmax  relVmax  relARmax
6      0.019    0.159    2.258
5      0.027    0.196    2.289
4      0.033    0.196    1.772
3      0.038    0.200    1.475
2      0.040    0.212    1.308
1      0.039    0.219    1.796
0      0        0        3.211
```

表 11 層間変形角検討結果

floor	h(m)	r(rad)	1/r	r/120
6	3.00	0.0063	158	1.32
5	3.50	0.0077	130	1.08
4	3.50	0.0094	106	0.88
3	4.00	0.0095	105	0.88
2	4.00	0.0100	100	0.83
1	4.50	0.0087	115	0.96

表 12 固有値解析より得られた建物構造特性

th	Teq (sec)	T' (sec)	Te (sec)	w (rad/sec)	heq	hcs	pcs	myucs
1	1.278	1.278	1.278	4.918	0.140	0	1	1
2	0.447	0.447	0.447	14.043	0.336	0	1	1
3	0.278	0.278	0.278	22.587	0.515	0	1	1
4	0.220	0.220	0.220	28.534	0.661	0	1	1
5	0.190	0.190	0.190	33.047	0.958	0	1	1
6	0.164	0.164	0.164	38.336	1.140	0	1	1

の等価固有周期 T_{eq} は塑性化が生じていないため同じく 1.278sec となる。実効周期 T' も等価固有周期と同じ理由により 1.278sec となる。各モードの粘性減衰定数は 1 次で 0.14 となっている。しかし、6 次の減衰定数は 1.14 となり過減衰が生じている。

ここでより目標値に近づけるため過減衰を無視しダンパー量を増やし、再計算を行った結果を示す。入力データを表 13 に、解析結果を表 14 に、層間変形角の検討結果を表 15 に、複素固有値解析結果より得られた建物構造特性を表 16 に示す。ダンパー量を表 9 の初期ダンパー量に対し約 1.9~0.26 倍した結果、目標層間変形を満足する結果となった。

固有値解析の結果より、2 次と 6 次のモードで過

表 13 再設定算定ダンパーによる入力データ

質点数N (N≤100)							
6							
1層間							
FL	m _i (ton)	D. M _i (ton)	c _i (kN·s/m)	k _{0i} (kN/m)	p _i	μ _i	D. R. F
6	200	0	500	60000	1	1	0
5	200	0	2000	70000	1	1	0
4	200	0	7630	75000	1	1	0
3	200	0	8500	80000	1	1	0
2	200	0	9800	85000	1	1	0
1	200	0	6600	95000	1	1	0
h							
0							
mode number of calculating the damping capacity							
6							
tep numbe	dt(sec)	dt/n	alfa	modal	force of DM		
12000	0.01	1	1	6	-1		
ave name							
cjl2.csv							

表 14 再設定算定ダンパーによる解析結果

```
### [PSV10] FORMULAR RESULTS : [RELATIVE MATRIX] ###
EATHQUAKE CATEGORY LEVEL =C1
floor  relDmax  relVmax  relARmax
6      0.015    0.065    0.309
5      0.024    0.111    0.525
4      0.028    0.152    0.723
3      0.032    0.175    0.832
2      0.033    0.185    0.877
1      0.035    0.175    0.831
0      0        0        1.082
```

表 15 層間変形角検討結果

floor	h(m)	r(rad)	1/r	r/120
6	3.00	0.0050	200	1.67
5	3.50	0.0069	146	1.22
4	3.50	0.0080	125	1.04
3	4.00	0.0080	125	1.04
2	4.00	0.0083	121	1.01
1	4.50	0.0078	129	1.07

表 16 固有値解析より得られた建物構造特性

th	Teq (sec)	T' (sec)	Te (sec)	w (rad/sec)	heq	hcs	pcs	myucs
1	1.264	1.264	1.264	4.971	0.219	0	1	1
2	0.596	0.596	0.596	10.548	1.002	0	1	1
3	0.409	0.409	0.409	15.346	0.277	0	1	1
4	0.276	0.276	0.276	22.795	0.870	0	1	1
5	0.228	0.228	0.228	27.614	0.281	0	1	1
6	0.056	0.056	0.056	111.331	1.034	0	1	1

減衰が生じているため使用には注意を要する。また必要量が多くなり計算の発散や誤差等問題となる場合、他の方法を考える必要がある。ここで計算例を示さないが、文献[15]より 2 層に跨る同程度のダンパー設置により 1 次の減衰定数を増加させることが可能となる場合も有り目標値に近づけることができると推定する。

5.4 解析ソフト EPRESP_NU による検討結果

ここでは、弾塑性せん断型モデル時刻歴応答解析プログラム「EPRESP_NU」^[17]により、推定粘性減衰を付与した場合の解析結果を示す。

解析に使用する入力地震波は BCJ-L2 波を使用す

る。解析例では入力動の回答スペクトルが表 3 より C1 レベルで 0.805m/s となるので、入力動の疑似速度回答スペクトルがこのスペクトル値に近似するよう係数倍した波を入力動として用いる。ここでは係数を 1.1 とすると最大加速度 Acc は 3.91m/s^2 、疑似速度回答スペクトル $pS_{V,10}$ は 0.82m/s 程度となる。この値は、表 1 より震度 5 強となる大きさである。入力地震波の時刻歴波形を図 12 に、回答スペクトルを図 13 に示す。解析入力データは表 9、表 13 と同じとする。この時の層間座標系の回答解析結果を表 17、表 18 に示す。

これより、推定ダンパー量による評価推定層間変形と時刻歴回答解析結果による層間変形とは最上層を除き大きな差がないほど同程度の値を得ることができた。推定ダンパー量による評価推定層間変形と時刻歴回答解析による層間変形を表 19 に示す。

以上より、変数分離法による逆設計法と複素固有値解析による等価線形化を用いた解析により目標値を満足する粘性ダンパー量を推定した結果、評価推定値は目標値に対して約 0.85~1.15 倍の範囲におさまり、構造計画段階における使用ダンパー量の推

定値として十分に使用できる誤差範囲となっている。また、更に目標値に近づけるために行った修正ダンパー量算定では 2~3 回の複素固有値解析を行うだけで目標値を満足する結果を得ることができた。その算定ダンパー量を用いて時刻歴回答解析を行った結果、評価推定変形は最上層階を除き回答解析値とほぼ同じ値となる事を確認できた。ただし、これらの推定ダンパー量を用いる場合変位以外に加速度や速度の回答値についても充分検討を行って設計に使用する必要がある。

5. まとめ

ここでは、耐震補強等に用いる粘性ダンパー量を画一的に求める方法として変数分離法による逆設計法と複素固有値解析による等価線形化を用いた算定手法を提案した。その結果、評価推定値は目標値に対しておよそ 0.85~1.15 倍程度の範囲におさまり構造計画段階で十分に使用できる誤差範囲となった。さらに、推定粘性ダンパー量を用い時刻歴回答解析

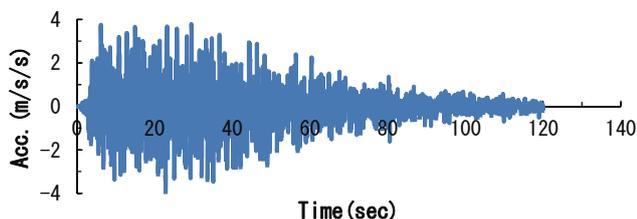


図 12 入力地震動時刻歴波形 (BCJ-L2)

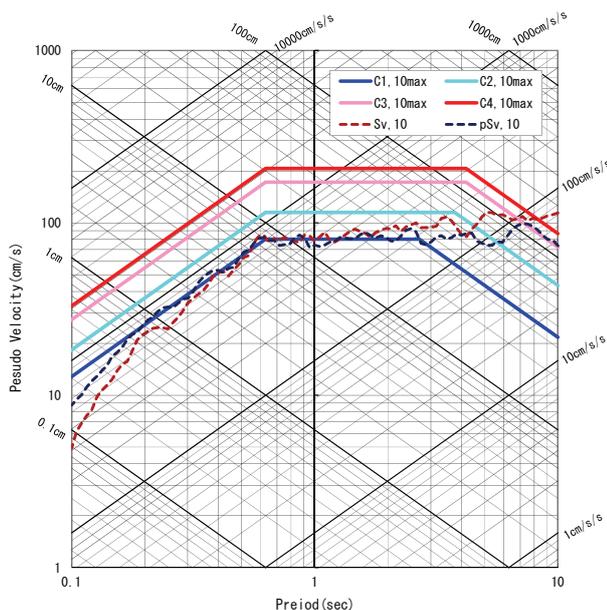


図 13 S_{AVD} と BCJ-L2 回答スペクトル ($h=0.10$)

表 17 推定ダンパー量による回答解析結果

層間座標系回答結果			
層	層間加速度	層間速度	層間変形
	m/s^2	m/s	m
6	0.992	0.101	0.016
5	1.273	0.138	0.024
4	1.395	0.156	0.032
3	1.558	0.183	0.037
2	1.815	0.212	0.040
1	2.446	0.226	0.039
0	0.000	0.000	0.000

表 18 修正ダンパー量による回答解析結果

層間座標系回答結果			
層	層間加速度	層間速度	層間変形
	m/s^2	m/s	m
6	1.652	0.114	0.015
5	1.560	0.144	0.022
4	1.072	0.122	0.026
3	1.234	0.144	0.031
2	1.448	0.160	0.033
1	2.447	0.201	0.035
0	0.000	0.000	0.000

表 19 推定ダンパー量による評価推定値と回答解析結果の比較 (層間変形)

層	推定ダンパー時			修正推定ダンパー時		
	評価推定変位 RP (m)	時刻歴変位 RA (m)	Rp/RA	評価推定変位 RP (m)	時刻歴変位 RA (m)	Rp/RA
6	0.019	0.016	1.19	0.015	0.015	1.00
5	0.027	0.024	1.13	0.024	0.022	1.09
4	0.033	0.032	1.03	0.028	0.026	1.08
3	0.038	0.037	1.03	0.032	0.031	1.03
2	0.040	0.040	1.00	0.033	0.033	1.00
1	0.039	0.039	1.00	0.035	0.035	1.00

により得られた層間変形は評価推定層間変形に対して最上層の変形を除きほぼ同程度の変形値になる事を確認できた。

今後は、粘性ダンパーと履歴ダンパーの組み合わせ或いは履歴ダンパーのみによる必要ダンパー量を画一的に推定できるよう、履歴ダンパーについて必要量を推定できるプログラムの作成・改良を行ことも耐震補強や設計にとって有効な技術的課題と言える。また、今制震デバイスとして注目されている減衰こまの理論を用いたデバイス（例えばダイナミック・マスダンパー）の算定法を導入する検討法を開発することも必要な課題と考える。さらに、これらの方法にたいする理論も進化をしており、より精度が高く簡単に必要ダンパー量を算定できる方法も提案されている。これらの考え方も取り入れた算定手法の構築も今後の課題と言える。

最後に、近い将来予想される大地震を考える上で、例えば震度7等の巨大地震動に対しどのような耐震技術を用いれどどの程度の被害にとどめることができるのか、予想外を当然の結果としないために現時の社内技術と（震度階等による）耐震レベルとの関係、言い換えれば自社の耐震技術レベルを再確認する事も必要と考える。

謝辞

本報告書を作成するにあたっては、石丸先生の執筆された応答性能に基づく「対震設計」入門（彰国社）、対震設計の方法-ダイナミックデザインへの誘い-（建築技術）および関係論文と秦一平氏の論文「免制震構造物の逆設計法に関する基礎的研究」-免震装置の開発とそのシステムへの適用-を参考にさせていただきました。また図も一部使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1]秋山宏：エネルギーの釣合いに基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999.11
- [2]大井謙一，高梨晃一，本間靖章：地震動のエネルギー入力率スペクトル，日本建築学会構造系論文集，第420号，pp.1-7，1991.2
- [3]中村孝也，堀則男，井上範夫：瞬間入力エネルギーによる構造物の地震時応答変形の推定，日本建築学会構造系論文報告集，第513号，pp.65-72，1998.11
- [4]笠井和彦，川鍋佳史：粘性減衰・履歴減衰を併用する構造における動特性と地震最大応答の等価線形予測法，日本建築学会構造系論文集，第574号，pp.43-51，2005.5
- [5]石丸辰治，多治見宏：塑性率制御法について，日本建築学会構造系論文報告集，第214号，pp.16-28，1973.12
- [6]石丸辰治：エネルギースペクトルによる性能設計，シンポジウム「耐震設計の一つの新しい方向」，日本建築学会，1995.10
- [7]石丸辰治，斎木健司：地震動のエネルギースペクトルの変数分離とその応用について，日本建築学会大会学術講演会梗概集，構造B，pp.697-704，1995.8
- [8]Shinji Ishimaru：Seismic Performance Design by Separated Variable of Energy Spectrum，Microcomputers in Civil Engineering，pp.343-354，1996.11
- [9]石丸辰治：応答性能に基づく「対震設計」入門，彰国社，2004.3
- [10]国土交通省住宅局建築指導課他編集：2001年版限界耐力計算法の計算例とその解説，2003.3
- [11]日本建築センター免震構造審査委員会：構造設計説明書抜粋資料，ビルディングレター，日本建築センター，pp.55-66，1996.11
- [12]村松郁栄：既存震度階の適用限界の吟味と改善の試み，文部省科学研究費成果報告（代表者：太田裕），A-61-6，1987
- [13]村松郁栄：震度について，地震工学振興会ニュース，No.145，1995
- [14]翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動の強さの指標との関係，地域安全学会論文集，Vol.1，1999
- [15]石丸辰治：対震設計の方法-ダイナミックデザインへの誘い-，建築技術，2008.7
- [16]秦一平：免制震構造物の逆設計法に関する基礎的研究-免震装置の開発とそのシステムへの適用-，日本大学理工博士論文，2007.9
- [17]対震構造研究室・(株)i2S2合同研究センター：設計支援プログラムダウンロードセンター：EPRESP_NU（弾塑性せん断型モデル時刻歴応答解析）プログラム，2008.6
<http://downloader.edpjrc.cst.nihon-u.ac.jp/>