

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                               |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 論題(和文)            | 振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーを設置した制振構造の地震応答予測手法 その1 応答予測手法の概要                                                                                                                           |
| Title(English)    | Seismic response prediction method for passive control structure installed stud-type VE damper with amplitude dependency Part1. Outline of seismic response prediction method |
| 著者(和文)            | 樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介                                                                                                                                            |
| Authors(English)  | Ryosuke Kinoshita, Daiki Sato, Ryota Tobari, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro                                                                                   |
| 出典 / Citation     | 日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 305-308                                                                                                                                              |
| Citation(English) | , , , pp. 305-308                                                                                                                                                             |
| 発行日 / Pub. date   | 2022, 3                                                                                                                                                                       |

## 振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーを設置した制振構造の地震応答予測手法

## その1 応答予測手法の概要

構造—振動

正会員 ○ 樹下亮佑<sup>\*1</sup>正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>〃 戸張涼太<sup>\*3</sup>〃 安永隼平<sup>\*4</sup>

間柱型粘弾性ダンパー 振幅依存性 等価線形化

〃 植木卓也<sup>\*4</sup>〃 金城陽介<sup>\*4</sup>

地震応答予測 長周期地震動 高次モード

## 1. はじめに

近年、南海トラフ地震等の長周期地震動の発生が予測されており、超高層建物は長時間、大振幅で振動し続けることが懸念されている<sup>1)</sup>。そこで、建物の振動を抑制する制振構造<sup>2)</sup>の需要が高まっている。一方、制振構造の設計には複数の地震波を用いた時刻歴応答解析が必要であるが、時刻歴応答解析を繰り返すことによる試行錯誤的な設計では、時間効率に優れているとは言えない。それを解決する手段として、ダンパーと応答の関係を包括的に把握できる応答予測法を用いて概略設計を行う手法が挙げられる。

非線形性を有する建物の応答予測法として、等価線形化法が挙げられる。等価線形化法は、非線形性を有する応答を等価な線形系に置換して推定する手法であり、ダンパーの効果と応答の関係を包括的に理解することにも有効である。制振構造の等価線形化法に関する研究は精力的に行われており、竹内ら<sup>3)</sup>、石井ら<sup>例え4)</sup>は制振構造の応答予測法、笠井ら<sup>例え5)</sup>は目標応答を満たす制振ダンパーの設計法を提案している。しかし、振幅依存性を有する非線形粘弾性ダンパーの等価線形化について示された例は少なく<sup>例え6)</sup>、特に、間柱型ダンパーについて言及されている例はほとんどない。そこで、本報では振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーを対象とする。

間柱型ダンパーは、柱梁架構内の任意の位置に設置可能であり、開口が広く取れるといったメリットを有する。しかし、間柱、大梁の変形により、層間変形に対するダンパー変形の比（以降、実効変形比）が減少することが知られている<sup>例え6)</sup>。そのため、竹内ら<sup>3)</sup>、笠井ら<sup>例え5)</sup>などの等価せん断型モデル（以降、せん断モデル）を用いることを前提とした手法を間柱型ダンパーに適用する場合、実効変形比を適切に考慮したせん断モデルを用いる必要がある。

実効変形比を考慮したせん断モデルの作成には、石井ら<sup>7)</sup>の手法が有効である。ここでは、状態 N, R 解析という 2 種類の静的解析より得られる骨組特性値を用いることで、部材構成モデルの応答を再現するせん断モデルが作成可

能であることが示されており、筆者らも、本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーでその有効性を確認している<sup>8)</sup>。そのため、状態 N, R 解析より作成したせん断モデルを用いることで、間柱型ダンパーを用いた制振構造においても、せん断モデルの使用を前提とした手法が適用可能である。

そこで、本報では、振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーを用いた制振構造の等価線形化法に基づく地震応答予測手法を提案する。本報その 1 では、応答予測法の概要について述べる。その際、層間変形角等の応答のみならず、ダンパー変形をも正確に予測する方法と、より簡易的に層間変形角等の応答を予測する方法の 2 種類の応答予測法について示す。

## 2. 非線形粘弾性ダンパーの解析モデル概要

本報で用いる粘弾性ダンパーの概要を示す。本報では、振幅依存性を有する非線形粘弾性ダンパーを対象とするため、Fig.1 に示すように、粘弾性ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_d$  が変化するとループの形状が変化し、Fig.2 で定義する等価せん断弾性率  $G_{eq}$  および等価減衰定数  $H_{eq}$  が変化する。Fig.3 に粘弾性ダンパーの解析モデルの概念図を示す。本報では文献 9) の解析モデルを用い、Fig.3 に示すように 4 要素でモデル化する<sup>10)</sup>。粘弾性ダンパーは最大経験せん断ひずみに応じて剛性が低下する非線形ばね（以降、要素 1）、最大経験せん断ひずみに応じて減衰量が低下する 2 つの塑性要素（以降、要素 2, 3）、Maxwell 要素（以降、要素 4）で構成され、せん断応力度  $\tau_d$ 、せん断ひずみ  $\gamma_d$  関係は次式で与えられる<sup>10)</sup>。

$$\tau_d = G_e \cdot \gamma_d + G_{p1} \int_0^{\gamma} e^{-(\gamma - \gamma')/l_1} \frac{d\gamma'}{d\gamma'} d\gamma' + G_{p2} \int_0^{\gamma} e^{-(\gamma - \gamma')/l_2} \frac{d\gamma'}{d\gamma'} d\gamma' + g_v \int_0^{\gamma} e^{-(\gamma - \gamma')/v} \frac{d\gamma'}{dt'} dt' \quad (1)$$

$$G_e = \{\theta_e + (1 - \theta_e) e^{-\gamma_{dmax}/\alpha_e}\} g'_e \quad (2)$$

$$G_{p1} = \{\theta_p + (1 - \theta_p) e^{-\gamma_{dmax}/\alpha_p}\} g'_{p1} \quad (3)$$

$$G_{p2} = \{\theta_p + (1 - \theta_p) e^{-\gamma_{dmax}/\alpha_p}\} g'_{p2} \quad (4)$$

Seismic response prediction method for passive control structure  
installed stud-type VE damper with amplitude dependency  
Part1. Outline of seismic response prediction method

KINOSHITA Ryosuke, SATO Daiki, TOBARI Ryota,  
YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, KANESHIRO Yosuke

ここに、 $\gamma_{dmax}$ : 過去に経験した最大せん断ひずみ、 $\Gamma$ : せん断ひずみの変化の絶対値の累積値、 $G_e$ : 経験最大せん断ひずみによる剛性の低減係数、 $G_{p1}$ 、 $G_{p2}$ : 経験最大せん断ひずみによる減衰の低減係数である。Fig.4に粘弾性ダンパーの温度20°C、振動数0.33Hz、最大せん断ひずみ1.0（以降、標準状態）で定常振動した場合のせん断応力度、せん断ひずみ関係を示す。Fig.4に示すように、1サイクル目、第一象限の経験最大せん断ひずみ到達前は、剛性と減衰の低減効果の影響で2サイクル目と比べると荷重変形履歴に膨らみが生じる（ $G_e$ 、 $G_{p1}$ 、 $G_{p2}$ でその影響を考慮）。また、 $\theta_e$ 、 $\alpha_e$ 、 $\theta_p$ 、 $\alpha_p$ 、 $g'_e$ 、 $h$ 、 $g'_{p1}$ 、 $g'_{p2}$ 、 $l_2$ 、 $g'_v$ 、 $v$ は材料定数であり、特に、 $g'_e$ 、 $g'_{p1}$ 、 $g'_{p2}$ 、 $g'_v$ は粘弾性ダンパーの初期温度、および粘弾性ダンパーの性能変動によって値が変化する。 $g'_e$ 、 $g'_{p1}$ 、 $g'_{p2}$ 、 $g'_v$ は次式で表される<sup>11)</sup>。

$$g'_e = \frac{X \cdot G \cdot \lambda_\theta \cdot g_{p1} + (X - XY) \cdot \left\{ \theta_p + (1 - \theta_p) e^{-1/\alpha_p} \right\} \cdot \left\{ g_{p1} \cdot l_1 (1 - e^{-1/l_1}) + g_{p2} \cdot l_2 (1 - e^{-1/l_2}) \right\}}{\theta_e - (1 - \theta_e) e^{-1/\alpha_e}} \quad (5)$$

$$g'_{p1} = G \cdot \lambda_\theta \cdot H \cdot \lambda_\theta \cdot X \cdot Y \cdot g_{p1} \quad (6)$$

$$g'_{p2} = G \cdot \lambda_\theta \cdot H \cdot \lambda_\theta \cdot X \cdot Y \cdot g_{p2} \quad (7)$$

$$g'_v = G \cdot \lambda_\theta \cdot H \cdot \lambda_\theta \cdot X \cdot Y \cdot g_v \quad (8)$$

ここに、 $g_e$ 、 $g_{p1}$ 、 $g_{p2}$ 、 $g_v$ : 粘弾性ダンパーの初期温度20°Cかつ性能変動がない場合の材料定数、 $g\lambda_\theta$ 、 $h\lambda_\theta$ : 等価せん断弾性率 $G_{eq}$ 、等価減衰定数 $H_{eq}$ の温度補正係数、 $X$ 、 $Y$ : 粘弾性ダンパーの性能変動による材料定数の補正係数である。

$g\lambda_\theta$ 、 $h\lambda_\theta$ 、 $X$ 、 $Y$ は次式で算出される<sup>10),11)</sup>。

$$g\lambda_\theta = -9.029 \times 10^{-5} \times \theta^2 - 1.668 \times 10^{-2} \times \theta + 1.3697 \quad (9)$$

$$h\lambda_\theta = -2.108 \times 10^{-4} \times \theta^2 + 5.958 \times 10^{-3} \times \theta + 0.9652 \quad (10)$$

$$X = G \cdot \lambda_p \cdot \left\{ 1 - 0.026784 \left( h\lambda_p^{2.2481} - 1 \right) \left( h\lambda_p - 1.366 \right) \right\} \quad (11)$$

$$Y = H \cdot \lambda_p \cdot \left\{ 1 + 0.026784 \left( h\lambda_p^{2.2481} - 1 \right) \left( h\lambda_p - 1.366 \right) \right\} \quad (12)$$

ここに、 $\theta$ : 粘弾性ダンパーの初期温度、 $g\lambda_p$ 、 $h\lambda_p$ : 諸要因による $G_{eq}$ 、 $H_{eq}$ の変動を考慮した係数（以降、それぞれ等価せん断弾性率変動係数、等価減衰定数変動係数）である。各材料定数の値は文献10)を参照されたい。

### 3. 応答予測手法の概要

#### 3.1 詳細応答予測法（DPM）の概要

非線形粘弾性ダンパーを組み込んだ建物モデルの詳細応答予測法（Detail prediction method: DPM）の手順を示す。応答予測に用いるせん断モデルの概念図をFig.5に示す。Fig.5より、対象とするせん断モデルは主架構剛性を表す擬似フレーム、ダンパーの変形のロスを表現する擬似ブレース、擬似ブレースと直列に配置される擬似ダンパーで構成される<sup>7),8)</sup>。本報では、擬似ブレースと擬似ダンパーの直列系を合わせて付加系、擬似フレームと付加系の並列系を合わせてシステムと称する。本報では擬似フレーム（主架構）は弾性とする。せん断モデルの作成手順は本報その2に示す。また、DPMは、入力地震動が速度応答スペクトル一定領域を持ち、ダンパー付加前後とも速度応答スペクトル一定領域の範囲に1次固有周期を持つことを適用条件とする。

まずは、 $i$ 層の質量 $m_i$ 、 $i$ 層1次の主架構（擬似フレーム）

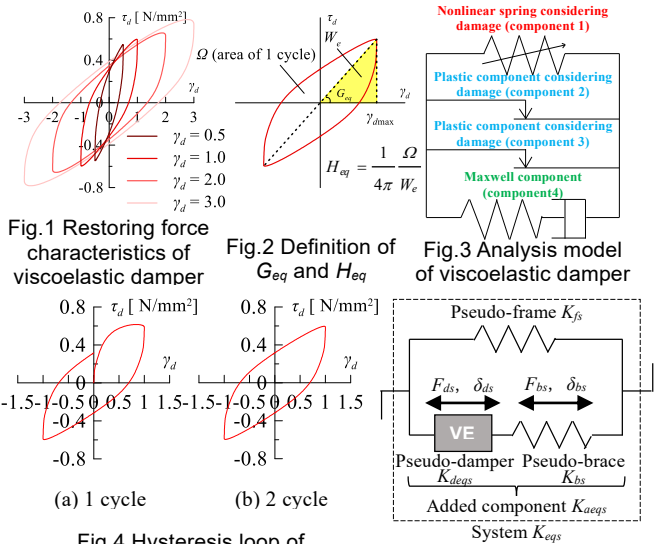


Fig.4 Hysteresis loop of viscoelastic damper (0.33 Hz, 20°C)

Fig.5 Shear model

のみの固有モード $1u_{fi}$ より、主架構のみの等価1自由度系における1次等価質量 $1M_{eq}$ を次式で算出する。

$$1M_{eq} = \left( \sum_{i=1}^N m_i \cdot 1u_{fi} \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \cdot 1u_{fi}^2 \quad (13)$$

ここに、 $N$ : 層数、右下の添え字 $i$ は $i$ 層の諸元、計算値を表しており、以降も同様である。次に、主架構のみの1次固有周期 $1T_f$ と1次の構造減衰 $1\zeta_0$ に対応する加速度応答スペクトル値 $S_d(1T_f, 1\zeta_0)$ より、主架構のみの応答ベースシア $1Q_{sB}^{(0)}$ を次式で算出する。

$$1Q_{sB}^{(0)} = 1M_{eq} \cdot S_d(1T_f, 1\zeta_0) \quad (14)$$

右上の添え字(0)は応答ベースシアを算出する際の収斂計算における0回目の値（仮定の値）である。また、ベースシアに対する各層の層せん断力の比 $B_{si}$ を算出する際の層せん断力係数の高さ方向分布を表す係数 $A''$ は、高次モードの影響を考慮し、主架構のみの1~3次モードの2乗和平方根（SRSS）より次式で算出する。

$$A'' = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^3 \left\{ \sum_{p=i}^N m_p \cdot \beta_{f,j} \cdot u_{fp} \cdot D_h(j, \xi_0) \cdot S_d(jT_f, 1\zeta_0) \right\}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^3 \left\{ \sum_{i=1}^N m_i \cdot \beta_{f,j} \cdot u_{fi} \cdot D_h(j, \xi_0) \cdot S_d(jT_f, 1\zeta_0) \right\}^2}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{p=i}^N m_p} \quad (15)$$

ここに、 $\beta_{fj}$ : 主架構のみの刺激係数、左下の添え字 $j$ は $j$ 次モードの諸元、計算値であり、以降も同様である。また、 $D_h$ : 減衰効果係数であり、次式で評価する<sup>12)</sup>。

$$D_h(\xi) = \sqrt{(1 + \alpha \cdot \xi_0) / (1 + \alpha \cdot \xi)} \quad (16)$$

ここに、 $(\xi)$ は、任意の減衰定数 $\xi$ によって値が変化することを示す。また、本報では人工地震波を対象とした場合の推奨値である $\alpha = 75$ を用いる<sup>2)</sup>。

続いて、システムの等価剛性および等価減衰定数より、システムの層せん断力、層間変位を算出する手順を示す。システムの等価剛性を算出するにあたって、粘弾性ダンパーの等価剛性を算出する必要があるが、本報で用いる粘弾性ダンパーは振幅依存性を有しており、粘弾性ダンパーのせん断ひずみが増加すると、粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率、つまり等価剛性が低下する特性を有する（Fig.1, 2）。よって、システムの等価剛性を算出するには収斂計算

を用いる必要がある。まずは、仮定する擬似ダンパーのせん断ひずみ $\gamma_{dsi}^{(n)}$ を次式で算出する。

$$^{(0)}\gamma_{dsi}^{(n)} = B_{si} \cdot Q_{sb}^{(n)} / (K_{fsi} \cdot d_{dsi}) \quad (17)$$

ここに、 $K_{fsi}$ : 擬似フレーム剛性、 $d_{dsi}$ : 擬似ダンパーの厚さ、右上の添え字 $(n)$ は応答ベースシアを算出する際の収斂計算における $n$ 回目の値、左上の添え字 $(0)$ は擬似ダンパーのせん断ひずみを算出する際の収斂計算における $0$ 回目の値(仮定の値)であることを示す。次に、システムの等価剛性 $K_{eqsi}$ を次式で算出する。

$$^{(p)}K_{eqsi}^{(n)} = K_{fsi} + ^{(p)}K_{aeqsi}^{(n)} \quad (18)$$

ここに、左上の添え字 $(p)$ は擬似ダンパーのせん断ひずみを算出する際の収斂計算における $p$ 回目の値である。また、 $K_{aeqsi}$ : 付加系の等価剛性であり、次式で算出する。

$$^{(p)}K_{aeqsi}^{(n)} = K_{bsi} \cdot ^{(p)}K_{deqsi}^{(n)} / (K_{bsi} + ^{(p)}K_{deqsi}^{(n)}) \quad (19)$$

ここに、 $K_{bsi}$ : 擬似ブレース剛性である。また、 $K_{deqsi}$ : 擬似ダンパーの等価剛性であり、次式で算出される。

$$^{(p)}K_{deqsi}^{(n)} = A_{dsi} \cdot G_{deqsi} \cdot ^{(p)}G_{\lambda_{fi}}^{(n)} \cdot g_{\lambda_{\theta}} \cdot g_{\lambda_f} \cdot G_{\lambda_p} / d_{dsi} \quad (20)$$

ここに、 $A_{dsi}$ : 擬似ダンパーのせん断面積、 $G_{deqsi}$ : 標準状態における粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率(本報で用いる粘弾性ダンパーは $0.641\text{N/mm}^2$ )である。また、 $g_{\lambda_{fi}}$ 、 $g_{\lambda_f}$ : 粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率のせん断ひずみ補正係数、振動数補正係数であり、それぞれ次式で表される<sup>10)</sup>。

$$^{(p)}G_{\lambda_{fi}}^{(n)} = 0.42960 + 2.6355e^{-(p')\gamma_{dsi}^{(n)}/0.65317} + 5.5626e^{-(p')\gamma_{dsi}^{(n)}/0.10130} \quad (21)$$

$$G_{\lambda_f} = 1.1836 + 0.3813 \times \log_{10} f \quad (22)$$

ここに、 $f$ : 振動数である。本報では、主架構のみの一次固有周期を用いて、 $f = 1/T_f$ とする。高次モードや、粘弾性ダンパーの設置による短周期化の影響により、 $f$ の値が変化することが考えられるが、振動数 $f$ が高いほど $G_{\lambda_f}$ は大きくなり、粘弾性ダンパーの等価剛性 $K_{deqsi}$ は高くなることから、本報では簡便性および安全側の措置として、主架構のみの一次固有周期 $1/T_f$ を用いている。

次に、層間変位 $\delta_{si}^{(n)}$ 、付加系の負担せん断力 $Q_{asi}^{(n)}$ を次式で算出する。

$$^{(p)}\delta_{si}^{(n)} = B_{si} \cdot Q_{sb}^{(n)} / ^{(p)}K_{eqsi}^{(n)}, \quad ^{(p)}Q_{asi}^{(n)} = ^{(p)}K_{aeqsi}^{(n)} \cdot ^{(p)}\delta_{si}^{(n)} \quad (23,24)$$

次に、新たな擬似ダンパーのせん断ひずみ $\gamma_{dsi}^{(n+1)}$ を次式で算出する。

$$^{(p+1)}\gamma_{dsi}^{(n)} = ^{(p)}Q_{asi}^{(n)} / (^{(p)}K_{deqsi}^{(n)} \cdot d_{dsi}) \quad (25)$$

$^{(p)}\gamma_{dsi}^{(n)} \approx ^{(p+1)}\gamma_{dsi}^{(n)}$ となるまで式(18)~(25)を繰り返す。本報では、 $^{(p)}\gamma_{dsi}^{(n)}$ に対する $^{(p+1)}\gamma_{dsi}^{(n)}$ の誤差1%以内であることを収束条件としている。安定した $\gamma_{dsi}^{(n)}$ が得られると、 $i$ 層1次の等価減衰定数 $1\xi_{eqi}^{(n)}$ を次式で算出する。

$$1\xi_{eqi}^{(n)} = \Delta W_{si}^{(n)} / 4\pi W_{si}^{(n)} \quad (26)$$

ここに、 $W_{si}^{(n)}$ : 弾性ひずみエネルギー、 $\Delta W_{si}^{(n)}$ : 擬似ダンパーの1サイクル間の消費エネルギーであり、それぞれ次式で算出する。

$$W_{si}^{(n)} = (B_{si} \cdot Q_{sb}^{(n)})^2 / 2 \cdot ^{(p)}K_{eqsi}^{(n)} \quad (27)$$

$$\Delta W_{si}^{(n)} = A_{dsi} \cdot d_{dsi} (E_{1i}^{(n)} + E_{2i}^{(n)} + E_{3i}^{(n)} + E_{4i}^{(n)}) \quad (28)$$

ここに、左上の添え字 $(p')$ は、式(18)~(25)の収斂計算にお

いて、収束条件を満たしたときの計算値であることを示す。

本報で用いる粘弾性ダンパーはFig.3に示すように4要素モデルであり、式(28)の $E_{1i}$ 、 $E_{2i}$ 、 $E_{3i}$ 、 $E_{4i}$ はそれぞれ要素1~4のエネルギー吸収量を粘弾性ダンパーの体積で除した値である。Fig.4に示すように、本報で用いる粘弾性ダンパーは経験最大せん断ひずみに応じてループの形状が変化するため、2サイクル目以降の定常振動を想定し、 $E_{1i}^{(n)}$ 、 $E_{2i}^{(n)}$ 、 $E_{3i}^{(n)}$ 、 $E_{4i}^{(n)}$ をそれぞれ次式で算出する<sup>13)</sup>。

$$E_{1i}^{(n)} = 0 \quad (29)$$

$$E_{2i}^{(n)} = 2 \cdot G_{p1}^{(n)} \cdot l_1 \left\{ 2 \cdot ^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)} - l_1 (2 - e^{-^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)}/l_1}) (1 - e^{-2^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)}/l_1}) \right\} \quad (30)$$

$$E_{3i}^{(n)} = 2 \cdot G_{p2}^{(n)} \cdot l_2 \left\{ 2 \cdot ^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)} - l_2 (2 - e^{-^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)}/l_2}) (1 - e^{-2^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)}/l_2}) \right\} \quad (31)$$

$$E_{4i}^{(n)} = 2\pi^2 f \cdot v \cdot g_v \cdot ^{(p')} \gamma_{dsi}^{(n)} / \{ 1 + (2\pi f \cdot v)^2 \} \quad (32)$$

式(32)において、 $0 < f \leq 1.89$ (周期0.53秒以上)では、振動数 $f$ が高いほど $E_{4i}$ は大きくなり、 $1\xi_{eqi}$ が大きくなるため、式(22)の $f$ と同様の理由で、 $f = 1/T_f$ としている。

次に、各層の等価減衰定数 $1\xi_{eqi}^{(n)}$ を各層の弾性ひずみエネルギー $W_{si}^{(n)}$ で重み付けし、建物全体の1次等価減衰定数 $1\xi_{eq}^{(n)}$ を次式で算出する。

$$1\xi_{eq}^{(n)} = \left( \sum_{i=1}^N 1\xi_{eqi}^{(n)} \cdot W_{si}^{(n)} / \sum_{i=1}^N W_{si}^{(n)} \right) + 1\xi_0 \quad (33)$$

また、システム等価1自由度系における1次等価周期 $1T_{eq}^{(n)}$ 、1次等価質量 $1M_{eq}^{(n)}$ を次式で算出する。

$$1T_{eq}^{(n)} = 2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^N (m_i \sum_{p=1}^i B_{sp} / ^{(p')} K_{eqsp}^{(n)})} \quad (34)$$

$$1M_{eq}^{(n)} = \left( \sum_{i=1}^N m_i \sum_{p=1}^i \frac{B_{sp}}{^{(p')} K_{eqsp}^{(n)}} \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \left( \sum_{p=1}^i \frac{B_{sp}}{^{(p')} K_{eqsp}^{(n)}} \right) \quad (35)$$

$D_h(1\xi_{eq}^{(n)})$ (式(16)より、 $\xi = 1\xi_{eq}^{(n)}$ として算出)、 $1T_{eq}^{(n)}$ 、 $1M_{eq}^{(n)}$ を用いて、次式で新たな応答ベースシア $1Q_{sb}^{(n+1)}$ を算出する。

$$1Q_{sb}^{(n+1)} = 1Q_{sb}^{(0)} \cdot D_h(1\xi_{eq}^{(n)}) \cdot 1T_f / 1T_{eq}^{(n)} \cdot 1M_{eq}^{(n)} / 1M_{eq}^{(0)} \quad (36)$$

$1Q_{sb}^{(n)} \approx 1Q_{sb}^{(n+1)}$ となるまで式(17)~(36)を繰り返す。Fig.6にDPMにおける収斂計算のフローを示す。本報では、 $1Q_{sb}^{(n)}$ に対する $1Q_{sb}^{(n+1)}$ の誤差1%以内であることを収束条件としている。 $1Q_{sb}^{(n)} \approx 1Q_{sb}^{(n+1)}$ となれば、次式で各層のせん断力 $Q_{si}^{(n)}$ 、層間変位 $\delta_{si}^{(n)}$ を算出する。

$$Q_{si}^{(n')} = B_{si} \cdot 1Q_{sb}^{(n')}, \quad \delta_{si}^{(n')} = Q_{si}^{(n')} / K_{eqsi}^{(n')} \quad (37,38)$$

ここに、右上の添え字 $(n')$ は、式(17)~(36)の収斂計算にお

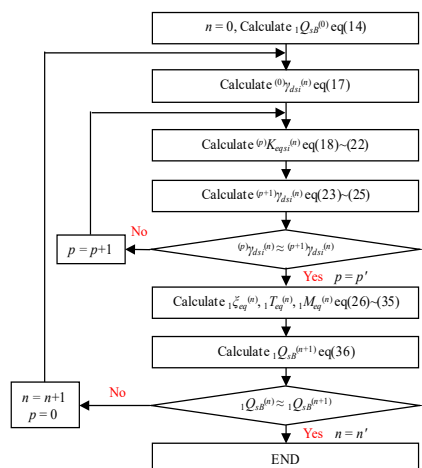


Fig.6 Flowchart of convergent calculation (DPM)

いて、収束条件を満たしたときの計算値であることを示す。

Fig.6 に示すように、DPM は擬似ダンパーのせん断ひずみとベースシアに対して 2 重の収斂計算を行うことで、収斂計算におけるベースシアの変化に擬似ダンパーのせん断ひずみを常に対応させながら計算を行っている。そうすることで、層せん断力や層間変形のみならず、ダンパー変位の予測も可能となる。

### 3.2 簡易応答予測法 (EPM) の概要

続いて、簡易応答予測法 (Easy prediction method : EPM) の手順を示す。応答予測に用いるせん断モデルはDPMと同様にFig.5に示すものとする。また、EPMも入力地震動が速度応答スペクトル一定領域を持ち、ダンパー付加前後とも速度応答スペクトル一定領域の範囲に1次固有周期を持つことを適用条件とする。

まずは、DPMと同様に、式(13)より主架構のみの1次等価質量を算出した後、次式で主架構のみの応答ベースシア  ${}_1Q_{fB}$ 、層間変位  $\delta_{fsi}$  を算出する。

$${}_1Q_{fB} = M_{eqf} \cdot S_a({}_1T_f, \xi_0), \quad \delta_{fsi} = B_{si} \cdot {}_1Q_{fB} / K_{fsi} \quad (39,40)$$

EPM では、ベースシアの収斂計算は行わないため、主架構のみの応答ベースシアを  ${}_1Q_{fB}$  と表記する。

続いて、システムの等価剛性および等価減衰定数より、システムの層せん断力、層間変位を算出する手順を示す。システムの等価剛性を算出するには収斂計算を用いる必要があるため、まずは、仮定する擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[0]}$  を次式で算出する。

$$\gamma_{dsi}^{[0]} = \delta_{dsi}^{[0]} / d_{dsi}, \quad \delta_{dsi}^{[0]} = \delta_{fsi} \cdot K_{aeqsi}(\gamma'_{dsi}) / K_{deqsi}(\gamma'_{dsi}) \quad (41,42)$$

ここに、 $\delta_{dsi}$ : 擬似ダンパーの変位、右上の添え字[0]は、EPMにおける収斂計算0回目の値 (仮定の値) であることを示す。また、 $K_{deqsi}(\gamma'_{dsi})$ 、 $K_{aeqsi}(\gamma'_{dsi})$  はせん断ひずみ  $\gamma'_{dsi}$  時の擬似ダンパーおよび付加系の等価剛性であることを示している。本報では擬似ブレースの影響により層間変形に対して擬似ダンパーの変位が小さくなる影響を考慮し (Fig.5)、式(40)より得られた主架構のみの応答層間変位  $\delta_{fsi}$  の  $\alpha'_{ei}$  倍 ( $0 < \alpha'_{ei} \leq 1$ ) がダンパー変位として生じた際の擬似ダンパーおよび付加系の等価剛性をもとに、 $\gamma_{dsi}^{[0]}$  を設定している。 $\gamma'_{dsi}$  は、次式で算出される。

$$\gamma'_{dsi} = \alpha'_{ei} \cdot \delta_{fsi} / d_{dsi} \quad (43)$$

本報では、全層で一律に  $\alpha'_{ei} = 0.7$  とするが、 $\alpha'_{ei}$  の違いが応答予測の精度に及ぼす影響が小さいことを確認している。

次に、擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[q]}$  を用い、式(18)~(22)よりシステムの等価剛性  $K_{eqsi}^{[q]}$  を算出する。ここに、右上の添え字[q]は、EPMにおける収斂計算q回目の値であることを表し、以降も同様である。

次に、擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[q]}$  とシステムの等

価剛性  $K_{eqsi}^{[q]}$  を用い、式(26)~(34)より建物全体の1次等価減衰定数  ${}_1\xi_{eq}^{[q]}$ 、1次等価周期  ${}_1T_{eq}^{[q]}$  を算出する。しかし、EPMでは、弾性ひずみエネルギー  $W_{si}$  の算出に主架構のみの応答ベースシア  ${}_1Q_{fB}$  を用いる点がDPMと異なる (式(44))。

$$W_{si}^{[q]} = (B_{si} \cdot {}_1Q_{fB})^2 / 2K_{eqsi}^{[q]} \quad (44)$$

次に、 $D_h({}_1\xi_{eq}^{[q]})$ 、 ${}_1T_{eq}^{[q]}$  を用いて、次式で新たな擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[q+1]}$  を算出する。

$$\gamma_{dsi}^{[q+1]} = \gamma_{dsi}^{[0]} \cdot D_h({}_1\xi_{eq}^{[q]}) \cdot {}_1T_{eq}^{[q]} / {}_1T_f \quad (45)$$

$\gamma_{dsi}^{[q]} \approx \gamma_{dsi}^{[q+1]}$  となるまで計算を繰り返す。Fig.7にEPMにおける収斂計算のフローを示す。本報では、 $\gamma_{dsi}^{[q]}$  に対する  $\gamma_{dsi}^{[q+1]}$  の誤差10%以内であることを収束条件としている。また、本報の検討範囲では、1~2回の収斂作業で収束条件を満たすこと、 $\gamma_{dsi}^{[q]}$  に対する  $\gamma_{dsi}^{[q+1]}$  の誤差10%以内を満たすと予測値が概ね収束することを確認している。

$\gamma_{dsi}^{[q]} \approx \gamma_{dsi}^{[q+1]}$  となれば、 $\gamma_{dsi}^{[q]}$  を用い、式(35)でシステムの1次等価質量  $M_{eq}^{[q]}$  を算出する。ここに、右上の添え字[q]は、EPMの収斂計算において、収束条件を満たしたときの計算値であることを示す。また、 $D_h({}_1\xi_{eq}^{[q]})$ 、 ${}_1T_{eq}^{[q]}$ 、 $M_{eq}^{[q]}$  を用い、式(36)~(38)でベースシア  ${}_1Q_{fB}^{[q]}$  および各層の層せん断力  $Q_{si}^{[q]}$ 、層間変位  $\delta_{si}^{[q]}$  を算出する。

EPMは、 $\gamma_{dsi}^{(0)}$  を  $D_h({}_1\xi_{eq}^{[q]}) \cdot {}_1T_{eq}^{[q]} / {}_1T_f$  を用いて全層で一定の割合で変化させるため、最終的に得られた層間変位  $\delta_{si}^{[q]}$  と擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[q]}$  は対応しないが、DPMと比較して、計算フローが簡略化される利点を有する。

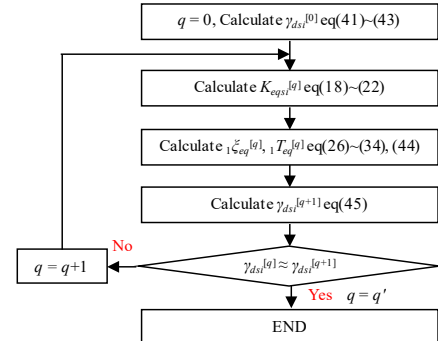


Fig.7 Flowchart of convergent calculation (EPM)

## 4. まとめ

本報その1では、振幅依存性を有する粘弾性ダンパーを設置した制振構造建物の地震応答予測法の概要を示した。その際、層せん断力や層間変形のみならず、ダンパー変形をも正確に予測するDPMと、より簡易に層せん断力、層間変形を予測するEPMの2種類の予測法を示した。本報その2では、DPM、EPMを用いて予測した応答と時刻歴応答解析結果を比較し、予測精度を検証する。

謝辞および参考文献はその2にまとめて示す。

\*1 学生会員 東京工業大学 大学院生

\*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

\*3 JFEシビル株式会社

\*4 JFEスチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology \*1

Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. \*2

JFE Civil Engineering & Construction Corporation \*3

JFE Steel Corporation \*4