変位依存・速度依存ダンパーが高さ方向に不均等に配置された制振構造建物の地震応答予測に関する研究

東京工業大学　藤田　雄一郎

1. はじめに

一般的に制振構造の地震応答を確認する際は時刻歴解析が行われるが、その結果は特定の地震動に対する特解であり、制振構造の応答性能を包括的に把握することは難しい。そこで、その性能を地震動の応答スペクトルに関連付けて簡易に把握することができれば、構造設計の実務において有用であり、既往の研究[1]として「せん断棒モデル」（バネ系）において、外力分布が Ai 分布に則る場合の弾塑性・粘弾性ダンパーをもつ構造を対象としたものがある。また、非線形粘性・オイルダンパーをもつ構造については検討されていない。そこで本研究では、それら 4 種のダンパーをもつ制振構造の応答を、バネ系を用いて外力分布に左右されず包括的に予測する方法を提案し、さらに「部材構成モデル」（部材系）における制振構造の各部材の部材力を、時刻歴解析を行わずに評価する。

2. 各種ダンパーをもつ制振構造の応答予測法

2.1 等価一質点系への縮約方法[1]と計算フロー

バネ系における制振構造の質量 m_i, 主架構剛性 K_{fi}, 擬似速度応答スペクトル S_{pv} は既知とする。地震波は擬似速度一定領域をもつとする。T=0.03H の Ai 分布に基づく各層の外力 F_i を用いて、等価一質点系での固有周期 $T_{eq}^{(0)}$, 等価質量 $M_{eq}^{(0)}$を求める。ここで $u_i^{(0)}$ は i 層の水平変位を、N は質点数を表す。なお、右上の( )は解の収斂回数を示す。

$$T_{eq}^{(0)} = 2\pi\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{m_i(u_i^{(0)})^2}{F_i u_i^{(0)}}\right]},\quad M_{eq}^{(0)} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(m_i u_i^{(0)})\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}[m_i(u_i^{(0)})^2]} \qquad \text{(1a,b)}$$

主架構のみのベースシア $Q_B^{(0)}$, 層間変形$\Delta u_i^{(0)}$を求める。ここで、h_0 は主架構のみの初期減衰定数を、$B_i^{(0)}$ は $T_{eq}^{(0)}$のときの Ai 分布に基づく層せん断力とベースシアの比を表す。

$$Q_B^{(0)} = (2\pi/T_{eq}^{(0)})\cdot S_{pv}(T_{eq}^{(0)},h_0)\cdot M_{eq}^{(0)},\quad \Delta u_i^{(0)} = B_i^{(0)}Q_B^{(0)}/K_{fi} \qquad \text{(2a,b)}$$

以上で、主架構のみの応答を計算できる。また、図１に各ダンパーをもつ制振構造の応答予測フローを、図２に各ダンパーの構成要素を示す。図２中の記号添え字 d，b，a は、それぞれダンパー、支持材、付加系の諸元であることを表す。

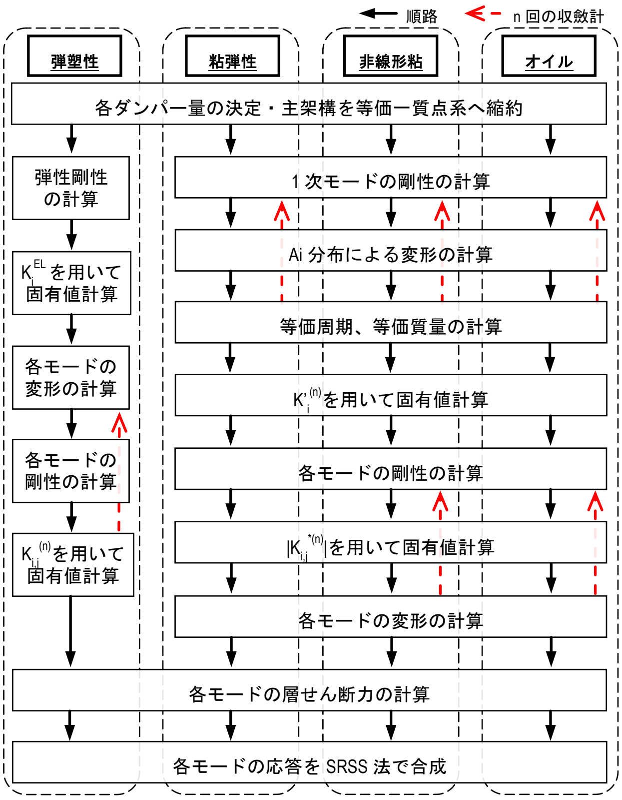

図１　応答予測フロー

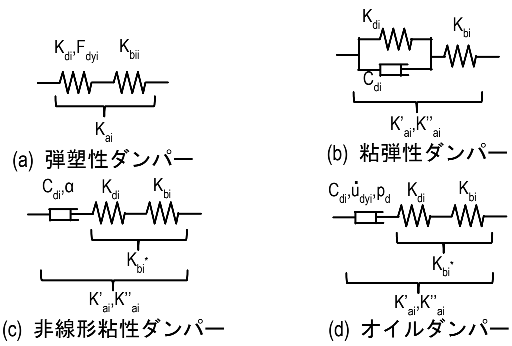

図２　各ダンパー構成要素の定義

2.2 弾塑性ダンパーをもつ制振構造

ダンパー剛性 K_{di}，降伏耐力 F_{dyi}，支持材剛性 K_{bi} は既知とし、ダンパーは完全弾塑性とする。

①制振構造の各モードの変形の計算

式(3)の固有値問題に、システム弾性剛性 K_i^{EL}(=K_{ai}+K_{fi})の剛性マトリックス $\mathbf{K}^{EL}$を代入し解くことで、弾性時の固有円振動数 ω_j^{EL}，モードベクトル $\phi_{i,j}^{EL}$，刺激係数 β_j^{EL} を得て、j 次モードの層間変形$\Delta u_{i,j}^{(0)}$を求める。ここで、$\mathbf{M}$ は質量マトリックスを表

す。

$$\left[\mathbf{K}-\omega_j^2\mathbf{M}\right]\phi_{i,j}=0 \tag{3}$$

$$\Delta u_{i,j}^{(0)}=(\beta_j^{EL}\phi_{i,j}^{EL}-\beta_j^{EL}\phi_{i-1,j}^{EL})\cdot(T_j^{EL}/2\pi)\cdot S_{pv}(T_j^{EL},h_0) \tag{4}$$

付加系降伏変形 u_{ayi}(=F_{dyi}/K_{ai})，j 次モードの付加系塑性率 $\mu_{ai,j}^{(1)}$(=|⊿$u_{i,j}^{(0)}$|/u_{ayi})を求める。付加系は、$\mu_{ai,j}^{(1)}\leq$ 1 ならば弾性挙動を示し、$\mu_{ai,j}^{(1)}>1$ ならば弾塑性挙動を示す。今後は式の都合上、$\mu_{ai,j}^{(1)}\leq 1$ ならば $\mu_{ai,j}^{(1)}$=1 として計算を進める。式(3)に、j 次モードの各層の剛性 $K_{i,j}^{(1)}$(=K_{ai}/$\mu_{ai,j}^{(1)}$+K_{fi})の剛性マトリックス $\mathbf{K}^{(1)}$を代入し解くことで、j 次モードの固有円振動数 $\omega_j^{(1)}$，モードベクトル $\phi_{i,j}^{(1)}$，刺激係数 $\beta_j^{(1)}$を得る。モード歪エネルギー法[3]より j 次モードの主架構の減衰定数 $h_{0,j}^{(1)}$を求める。j 次モードの各層の等価減衰定数 $h_{eqi,j}^{(1)}$を、弾性歪エネルギー$W_i^{(0)}$(=$K_{i,j}^{(1)}$⊿$u_{i,j}^{(0)}$/2)で重み付けし、システム全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}^{(1)}$を求める[1]。ここで、p_i は二次剛性比を表す。

$$h_{eqi,j}^{(1)}=h_{0.j}^{(1)}+\frac{2}{\mu_{ai,j}^{(1)}\pi p_i}\ln\frac{1+p_i(\mu_{ai,j}^{(1)}-1)}{(\mu_{ai,j}^{(1)})^{p_i}}\ ,\ h_{eq,j}^{(1)}=\frac{\sum_{i=1}^{N}(h_{eqi,j}^{(1)}W_{i,j}^{(1)})}{\sum_{i=1}^{N}W_{i,j}^{(1)}} \tag{5a,b}$$

減衰効果係数 $D_{h,j}^{(1)}$を式(6)で求める。式中の a は、観測地震波では 25、BCJ-L2 では 75 を用いる[2)3)]。

$$D_{h,j}^{(1)}=\sqrt{(1+ah_0)/(1+ah_{eq,j}^{(1)})} \tag{6}$$

塑性化にともなう長周期化を考慮して平均化した $\overline{S_{pv}}$ を用いて[2]、層間変形⊿$u_{i,j}^{(1)}$を求める。

$$\overline{S_{pv}}(T_j^{(1)},h_0)=\frac{1}{T_j^{(1)}-T_j^{EL}}\int_{T_j^{EL}}^{T_j^{(1)}}S_{pv}(T,h_0)dT \tag{7}$$

$$\Delta u_{i,j}^{(1)}=(\beta_j^{(1)}\phi_{i,j}^{(1)}-\beta_j^{(1)}\phi_{i-1,j}^{(1)})\cdot D_{h,j}^{(1)}(T_j^{(1)}/2\pi)\cdot\overline{S_{pv}}(T_j^{(1)},h_0) \tag{8}$$

手順①を n 回繰り返すことで、安定した層間変形⊿$u_{i,j}^{(n)}$を得る。

②制振構造の各層の応答の計算

j 次モードの層せん断力 $Q_{i,j}$(=$K_{i,j}^{(n)}$⊿$u_{i,j}^{(n)}$)を求め、1~3 次モードまでの⊿$u_{i,j}^{(n)}$, $Q_{i,j}$ を SRSS 法で足し合わせ、制振構造の層間変形⊿u_i，層せん断力 Q_i を求める。なお、$h_{eq,j}^{(n)}\geq 1.0$ ならば⊿$u_{i,j}^{(n)}$=0, $Q_{i,j}$ =0 とする。

2.3 粘弾性ダンパーをもつ制振構造

ダンパー粘性係数 C_{di}，ダンパー剛性 K_{di}，支持材剛性 K_{bi} は既知とする。

①制振構造の等価一質点系への縮約[1)2)]

文献 2 の理論に従い、ダンパー貯蔵剛性 $K'_{di}{}^{(1)}$(=K_{di})，損失剛性 $K''_{di}{}^{(1)}$(=$C_{di}\omega_{eq}^{(0)}$)，損失係数 $\eta_{di}^{(1)}$(=$K''_{di}{}^{(1)}$/$K'_{di}{}^{(1)}$)から、付加系貯蔵剛性 $K'_{ai}{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_{ai}{}^{(1)}$，システム貯蔵剛性 $K'_i{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_i{}^{(1)}$を求める。式(1a)と同様に、$T_{eq}^{(0)}$の Ai 分布に基づく外力 $F_i^{(0)}$を用いて、等価一質点系での等価周期 $T_{eq}^{(1)}$を求める。手順①を n 回繰り返すことで、安定した $T_{eq}^{(n)}$を得る。

②制振構造の各モードの変形の計算

式(3)に、$K'_i{}^{(n)}$の剛性マトリックス $\mathbf{K}'^{(n)}$を代入し解くことで、制振構造の j 次モードの固有円振動数 ω'_j を求める[4]。手順①の $\omega_{eq}^{(0)}$に ω'_j を代入し、j 次モードの付加系損失剛性 $K''_{ai,j}$，システム貯蔵剛性 $K'_{i,j}$，損失剛性 $K''_{i,j}$ を得て、システム複素剛性|$K^*_{i,j}$|(=$\sqrt{K'^2_{i,j}+K''^2_{i,j}}$)を求める。式(3)に、|$K^*_{i,j}$|の剛性マトリックス|$\mathbf{K}_j^*$|を代入し解くことで、モードベクトル $\phi_{i,j}^*$，刺激係数 β_j^*を求める。$\phi_{i,j}^*$，ω'_j を用いて、モード歪エネルギー法[3]より j 次モードの主架構の減衰定数 $h_{0,j}$ を求める。$K''_{ai,j}$，$\phi_{i,j}^*$，ω'_j を用いて、モード歪エネルギー法[4]より j 次モードの付加減衰定数 $h_{a,j}$ を求め、j 次モードのシステム全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}$ を求める[2]。

$$h_{eq,j}=h_{0,j}+0.92h_{a,j} \tag{9}$$

式(6)に $h_{eq,j}$ を代入し $D_{h,j}$ を得て、層間変形⊿$u_{i,j}$ を求める。

$$\Delta u_{i,j}=(\beta_j^*\phi_{i,j}^*-\beta_j^*\phi_{i-1,j}^*)\cdot D_{h,j}(T'_j/2\pi)\cdot S_{pv}(T'_j,h_0) \tag{10}$$

③制振構造の各層の応答の計算

j 次モードにおける S_v/S_{pv} の増加を係数 ξ_j で補正する[5)6)]。

$$\xi_j=(0.6h_{eq,j}+0.1)(T_j-0.8)+1\geq 0.8 \tag{11}$$

C_{di} に ξ_j を乗じ、手順②と同様の計算を行うことで、ランダム振動時の粘性力の増加を考慮したシステム複素剛性|$K^*_{i,j}(\xi_j)$|を得て、j 次モードの層せん断力 $Q_{i,j}$(=|$K^*_{i,j}(\xi_j)$|⊿$u_{i,j}$)を求める。1~3 次モードまでの⊿$u_{i,j}$, $Q_{i,j}$ を SRSS 法で足し合わせ、制振構造の層間変形⊿u_i，層せん断力 Q_i を求める。なお、$h_{eq,j}^{(n)}\geq 1.0$ ならば⊿$u_{i,j}^{(n)}$=0，$Q_{i,j}$ =0 とする。

2.4 非線形粘性ダンパーをもつ制振構造

ダンパー粘性係数 C_{di}，指数係数 α，ダンパー剛性 K_{di}，支持材剛性 K_{bi} は既知とし、K_{di} と K_{bi} の直列バネを等価支持材剛性 K_{bi}^*と定義する。

①制振構造の等価一質点系への縮約[1)2)]

文献 2 の理論に従い、⊿$u_i^{(0)}$と $\omega_{eq}^{(0)}$から、システム貯蔵剛性 $K'_i{}^{(1)}$, 損失剛性 $K''_i{}^{(1)}$を求める。式(1)と同様に、$T_{eq}^{(0)}$の Ai 分布に基づく外力 $F_i^{(0)}$を用いて、等価一質点系での等価周期 $T_{eq}^{(1)}$, 等価質量 $M_{eq}^{(1)}$を求める。

同じく文献 2 の理論に従って求めた各層の等価減衰定数 $h_{eqi}{}^{(1)}$を弾性歪エネルギー$W_i{}^{(0)}$で重み付けし、制振構造全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}{}^{(1)}$を求める。式(6)に $h_{eq,j}{}^{(1)}$を代入し $D_{h,j}{}^{(1)}$得て、短周期・高減衰化を考慮した層せん断力 $Q_i{}^{(1)}$，層間変形$\angle u_i{}^{(1)}$を求める。

$$Q_i^{(1)} = B_i^{(0)} \cdot D_h^{(1)} \frac{T_{eq}^{(0)}}{T_{eq}^{(1)}} \frac{M_{eq}^{(1)}}{M_{eq}^{(0)}} \cdot Q_B^{(1)}, \Delta u_i^{(1)} = \frac{Q_i^{(1)}}{K_i'^{(1)}} \qquad (12)$$

手順①を n 回繰り返すことで､安定した固有周期 $T_{eq}{}^{(n)}$を得る。

②制振構造の各モードの変形の計算

式(3)に、$K'_i{}^{(n)}$の剛性マトリックス $\mathbf{K}'^{(n)}$を代入し解くことで､制振構造の j 次モードの固有円振動数 ω'_j，モードベクトル $\phi'_{i,j}$，刺激係数 β'_j を得て [4]、j 次モードの層間変形$\angle u_{i,j}{}^{(0)}$を求める。

$$\Delta u_{i,j}^{(0)} = (\beta'_j \phi'_{i,j} - \beta'_j \phi'_{i-1,j}) \cdot (T'_j/2\pi) \cdot S_{pv}(T'_j, h_0) \qquad (13)$$

手順①と同様に文献 2 の理論に従い、$\angle u_{i,j}{}^{(0)}$と ω'_j から、j 次モードのシステム貯蔵剛性 $K'_{i,j}{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_{i,j}{}^{(1)}$ を得て、システム複素剛性 $|K^*_{i,j}{}^{(1)}|$(= $\sqrt{\{K'^{(1)}_{i,j}\}^2 + \{K''^{(1)}_{i,j}\}^2}$)を求める。式(3)に、$|K^*_{i,j}{}^{(1)}|$の剛性マトリックス$|\mathbf{K}_j{}^{*(1)}|$を代入し解くことで、モードベクトル $\phi^{*\,(1)}_{i,j}$，刺激係数 $\beta_j{}^{*(1)}$を求める。$\phi^{*\,(1)}_{i,j}$，ω'_j を用いて、モード歪エネルギー法 [3]より j 次モードの主架構の減衰定数 $h_{0,j}{}^{(1)}$を求める｡文献 2 の理論に従い、α=0，1 のときの j 次モードの等価減衰定数 $h_{eq,j}|_{\alpha=0}{}^{(1)}$，$h_{eq,j}|_{\alpha=1}{}^{(1)}$を得て、それらの内挿補間により j 次モードの等価減衰定数 $h_{eq,j}{}^{(1)}$を求める。式(6)に $h_{eq,j}{}^{(1)}$を代入し $D_{h,j}{}^{(1)}$を得て、層間変形$\angle u_{i,j}{}^{(1)}$を求める。

$$\Delta u_{i,j}^{(1)} = (\beta_j^{*(1)} \phi^{*\,(1)}_{i,j} - \beta_j^{*(1)} \phi^{*\,(1)}_{i-1,j}) \cdot D_{h,j}^{(1)} (T'_j/2\pi) \cdot S_{pv}(T'_j, h_0) \qquad (14)$$

手順②を n 回繰り返すことで、安定した層間変形$\angle u_{i,j}{}^{(n)}$を得る。

③制振構造の各層の応答の計算

式(11)に $h_{eq,j}{}^{(n)}$，T'_j を代入し、ξ_j を得る。非線形粘性ダンパーをもつシステムの補正係数は $\xi'_j(=\xi_j{}^{\alpha} \le \xi_j)$ とする。以後は、粘弾性ダンパー（2.2 節）の手順③と同様の計算を行う。

2.5 オイルダンパーをもつ制振構造

ダンパー粘性係数 C_{di}，リリーフ速度 $\dot{u}_{dyi}$，二次粘性比 p_d，ダンパー剛性 K_{di}，支持材剛性 K_{bi} は既知とし､K_{di} と K_{bi} の直列バネを等価支持材剛性 $K_{bi}{}^*$と定義する。

①制振構造の等価一質点系への縮約 [1)2)]

ダンパーリリーフ変形 $u_{dyi}{}^{(1)}(=\dot{u}_{dyi}/\omega_{eq}{}^{(0)})$，等価支持材変形比 $\lambda_i{}^{(1)}(=C_{di}\omega_{eq}{}^{(0)}/K_{bi}{}^*)$から文献 2 の理論に従い、付加系リリーフ率 $\mu_{ai}{}^{(1)}(=\angle u_i{}^{(0)}/u_{ayi}{}^{(1)})$を求める。付加系は、$\mu_{ai}{}^{(1)} \le 1$ ならばリニア挙動を示し、$\mu_{ai}{}^{(1)} > 1$ ならばバイリニア挙動を示す。今後は式の都合上、$\mu_{ai}{}^{(1)} \le 1$ ならば $\mu_{ai}{}^{(1)}$=1 として計算を進める。文献 2 の理論に従い、リニア挙動時のダンパー損失剛性 $K''_{di}{}^{(1)}(=C_{di}\omega_{eq}{}^{(0)})$から、システム貯蔵剛性 $K'_i{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_i{}^{(1)}$を求める。式(1)と同様に、$T_{eq}{}^{(0)}$の Ai 分布に基づく外力 $F_i{}^{(0)}$を用いて､等価一質点系での等価周期 $T_{eq}{}^{(1)}$，等価質量 $M_{eq}{}^{(1)}$を求める。さらに、バイリニア粘性要素を、それと等しい骨格曲線面性をもつリニア粘性要素に置換し [2)]､等価なリニア粘性要素のシステム貯蔵剛性 $K'_{Li}{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_{Li}{}^{(1)}$を求める。等価なリニア粘性要素から求まる各層の等価減衰定数 $h_{eqLi}{}^{(1)}$をバイリニア要素の各層の等価減衰定数 $h_{eqi}{}^{(1)}$とし、それを弾性歪エネルギー$W_i{}^{(0)}$で重み付けし、制振構造全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}{}^{(1)}$を求める。式(6)に $h_{eq,j}{}^{(1)}$を代入し $D_{h,j}{}^{(1)}$得て、短周期・高減衰化を考慮した層せん断力 $Q_i{}^{(1)}$，層間変形$\angle u_i{}^{(1)}$を求める。

$$Q_i^{(1)} = B_i^{(0)} \cdot D_h^{(1)} \frac{T_{eq}^{(0)}}{T_{eq}^{(1)}} \frac{M_{eq}^{(1)}}{M_{eq}^{(0)}} \cdot Q_B^{(1)}, \Delta u_i^{(1)} = \frac{Q_i^{(1)}}{K_i'^{(1)}} \qquad (15)$$

手順①を n 回繰り返すことで､安定した固有周期 $T_{eq}{}^{(n)}$を得る。

②制振構造の各モードの変形の計算

式(3)に、$K'_i{}^{(n)}$の剛性マトリックス $\mathbf{K}'^{(n)}$を代入し解くことで､制振構造の j 次モードの固有円振動数 ω'_j，モードベクトル $\phi'_{i,j}$，刺激係数 β'_j を得て [4]、j 次モードの層間変形$\angle u_{i,j}{}^{(0)}$を求める。

$$\Delta u_{i,j}^{(0)} = (\beta'_j \phi'_{i,j} - \beta'_j \phi'_{i-1,j}) \cdot (T'_j/2\pi) \cdot S_{pv}(T'_j, h_0) \qquad (16)$$

手順①と同様に文献 2 の理論に従い、$\angle u_{i,j}{}^{(0)}$と ω'_j から、j 次モードのシステム貯蔵剛性 $K'_{i,j}{}^{(1)}$，損失剛性 $K''_{i,j}{}^{(1)}$, 等価なリニア粘性要素の損失剛性 $K''_{aLi}{}^{(1)}$を得て、システム複素剛性$|K^*_{i,j}{}^{(1)}|$(= $\sqrt{\{K'^{(1)}_{i,j}\}^2 + \{K''^{(1)}_{i,j}\}^2}$)を求める。式(3)に、$|K^*_{i,j}{}^{(1)}|$の剛性マトリックス$|\mathbf{K}_j{}^{*(1)}|$を代入し解くことで、モードベクトル $\phi^{*\,(1)}_{i,j}$，刺激係数 $\beta_j{}^{*(1)}$を求める。$\phi^{*\,(1)}_{i,j}$，ω'_j を用いて、モード歪エネルギー法 [3]より j 次モードの主架構の減衰定数 $h_{0,j}{}^{(1)}$を求める。$K''_{aLi}{}^{(1)}$，$\phi^{*\,(1)}_{i,j}$，ω'_j を用いて、モード歪エネルギー法 [4]より j 次モードの付加減衰定数 $h_{a,j}$ を求める。j 次モードのシステム全体の等価減衰定数 $h_{eq,j}$ を求める [2)]。

$$h_{eq,j}^{(1)} = h_{0,j}^{(1)} + 0.8 h_{a,j}^{(1)} \qquad (17)$$

式(6)に $h_{eq,j}{}^{(1)}$を代入し $D_{h,j}{}^{(1)}$を得て、層間変形$\angle u_{i,j}$ を求める。

$$\Delta u_{i,j}^{(1)} = (\beta_j^{*(1)} \phi_{i,j}^{*\ (1)} - \beta_j^{*(1)} \phi_{i-1,j}^{*\ (1)}) \cdot D_{h,j}^{(1)}(T'_j/2\pi) \cdot S_{pv}(T'_j, h_0) \quad (18)$$

手順②を n 回繰り返すことで、安定した層間変形⊿$u_{i,j}{}^{(n)}$を得る。

③制振構造の各層の応答の計算

式(11)に $h_{eq,j}{}^{(n)}$, T'_j を代入し、ξ_j を得る。なお、$\mu_{ai}{}^{(1)}>1$ ならば、$\xi_j=1$ とする。以後は、粘弾性ダンパー（2.2 節）の手順③と同様の計算を行う。

3. 状態 N, R 解析

3.1 部材系からバネ系への変換方法

部材系におけるダンパー設置位置に剛性ゼロの弾性バネ（状態 N)、剛性∞の弾性バネ（状態 R）を設置し静的解析を行い、それぞれの層剛性 K_{Ni}, K_{Ri} を得る [7]。これらより、部材系の諸元を、バネ系における主架構剛性 $K_{fsi}(=K_{Ni})$, 支持材剛性 $K_{bsi}(=K_{Ri}-K_{Ni})$へ変換できる。部材系のダンパーを、バネ系の疑似ダンパーへ変換する方法は、文献 8 を参照されたい。なお本章のみ、バネ系の諸元に添え字「s」を付け、部材系の諸元と区別している。

3.2 部材力評価法

ある層せん断力 Q_i, 層間変形⊿u_iのときの、i 層 k 番目の部材のモーメント $M_{i,k}$ とせん断力 $Q_{i,k}$ は、それぞれ状態 N, R のときのモーメント $M_{Ni,k}$, $M_{Ri,k}$, せん断力 $Q_{Ni,k}$, $Q_{Ri,k}$ の線形結合で求められる。ここで、A_i, B_i は比例係数である。

$$M_{i,k} = A_i M_{Ri,k} + B_i M_{Ni,k}\ ,\ Q_{i,k} = A_i Q_{Ri,k} + B_i Q_{Ni,k} \qquad (19a,b)$$

$$A_i = \frac{\Delta u_{Ni} Q_i - Q_{Ni} \Delta u_i}{Q_{Ri} \Delta u_{Ni} - \Delta u_{Ri} Q_{Ni}}\ ,\ B_i = \frac{Q_{Ni} \Delta u_i - \Delta u_{Ri} Q_i}{Q_{Ri} \Delta u_{Ni} - \Delta u_{Ri} Q_{Ni}} \qquad (20a,b)$$

4. 応答予測精度の検証

4.1 解析モデル

図 7 に解析モデル図を示す。支持材は、水平剛性の合計値が、主架構剛性の 2 倍となるように設定した。表 1 に付加するダンパー量を示す。なお、ダンパーは主架構剛性に比例して配置した。入力地震波は、BCJ-L2 とする。

4.2 時刻歴解析と予測の比較

図 8 に、部材系、バネ系での時刻歴解析と応答予測の比較を示す（紙面の都合上、低層配置の層間変形角、モーメントのみ抜粋）。図より、部材系とバネ系の解析結果が良く対応していること、バネ系の諸元を用いた予測結果が良好なことがわかる。なお、他のダンパー配置、ダンパー種類でも同様の結果となり、解析と予測の誤差は 2 割程度に収まる。

5. まとめ

時刻歴解析を行わずに、各種ダンパーをもつ制振構造の応答を包括的に予測する方法を提案し、その精度が良好であることを示した。さらに、予測した層せん断力、層間変形から任意の部材の力も予測できることを示した。

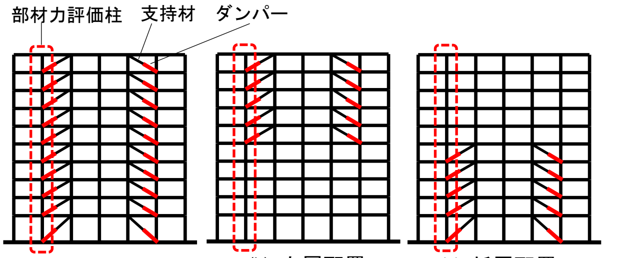

図 7　解析モデル（JSSI テーマストラクチャー・トリムタイプ）

表 1　各解析モデルにおける等価減衰定数

	h_{eq}（全層配置）	h_{eq}（上層配置）	h_{eq}（低層配置）
弾塑性ダンパー	0.07	0.03	0.05
粘弾性ダンパー	0.10	0.04	0.07
非線形粘性ダンパー	0.10	0.04	0.07
オイルダンパー	0.10	0.04	0.07

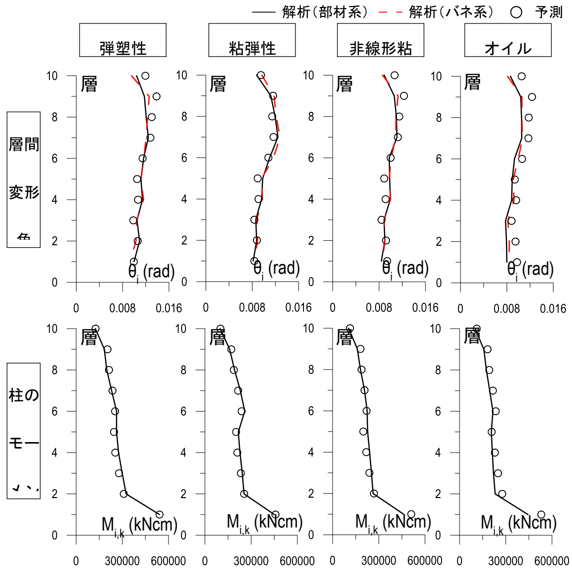

図 8　時刻歴解析と応答予測の比較（低層配置）

参考文献

1) 竹内徹，市川康，中島秀雄，笠井和彦：ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測，日本建築学会構造系論文集，N0583, pp115-122，2004.9
2) JSSI 編：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第 2 版，2005.9
3) 笠井和彦，伊藤浩資：弾塑性ダンパーの剛性・降伏力・塑性率の調節による制振構造の応答制御手法，日本建築学会構造系論文集，No595, pp.45-55，2005.9
4) 大熊潔，笠井和彦：弾性架構と粘弾性ダンパーをもつ多質点構造における全体減衰系への置換法-振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度その 2 –，日本建築学会構造系論文集，No648, pp.347-356，2010.2
5) 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的特性と地震最大応答の等価線形化予測法，日本建築学会構造系論文集，No591, pp.43-51，2005.5
6) 笠井和彦，山下忠道，山崎義弘，IGUSA Takeru：捩れ振動をともなう 1 層高減衰構造のスペクトル応答予測法，日本建築学会構造系論文集，No636, pp.225-234，2009.2
7) 石井正人，笠井和彦：多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案，日本建築学会構造系論文集，N0647, pp103-112，2010.1