

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の繰り返し加振による性能低下を考慮した超高層建物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 High-rise Buildings Considering Performance Degradation of Stud-type Viscoelastic Dampers with Amplitude Dependencies Part1 Outline of Seismic Response Prediction Method
著者(和文)	西海隼, 佐藤大樹, 樹下亮佑, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 森岡宙光
Authors(English)	NISHIUMI Hayato, SATO Daiki, KINOSHITA Ryosuke, Alex SHEGAY, Ryota Tobari, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, MORIOKA Hiromitsu
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 429-432
Citation(English)	, , , pp. 429-432
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下を考慮した超高層建物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

制振構造 間柱型非線形粘弾性ダンパー 性能低下
超高層建物 長周期地震動 地震応答予測

正会員 ○ 西海隼^{*1}
// 樹下亮佑^{*3}
// 戸張涼太^{*5}
// 植木卓也^{*6}

正会員 佐藤大樹^{*2}
// Alex Shegay^{*4}
// 安永隼平^{*6}
// 森岡宙光^{*6}

1. はじめに

近年、設計を上回る地震動への対応および地震直後の継続使用を目的として、超高層建物では制振構造の導入が一般的となってきている。本報では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を対象とする¹⁾。間柱型ダンパーは取付け部材および周辺架構の変形の影響を大きく受けるため、ダンパーが実際に稼働する変形(実効変形)を設計時に考慮する必要がある^(例えば1)5)。筆者らは、文献1)において間柱型非線形粘弾性ダンパーを対象に、実効変形の低減を考慮し、かつダンパーの非線形性を等価線形化することで時刻歴応答解析なしに、地震応答を予測できる手法を提案した。しかし、粘弾性体はエネルギー吸収に伴う内部温度の上昇により性能が低下することが知られている。長周期・長継続地震動が超高層建物に入力されることを想定した場合、粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下が建物応答へ及ぼす影響を検討することは必須となる。

ダンパーの性能低下を考慮した検討として、戸張ら⁶⁾は非線形粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した地震応答予測手法を提案しているが、質量・剛性やダンパー量が均質な条件であり、その適用範囲はやや限られている。

そこで本報では、文献1)を拡張し、間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した超高層建物の地震応答予測手法の提案を目的とする。その中で、非線形粘弾性ダンパーをエネルギー吸収分布が同等となるようなバイリニアモデルへと置換することで、ダンパーが吸収するエネルギーの分布をエネルギーの釣合(以下、エネルギー法)⁷⁾を準用して予測する。本報その1では、提案手法の概要を示し、本報その2で、提案手法の精度検証を行う。

2. 応答予測手法の概要

2.1 応答予測手法の概要

図1に間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した応答予測手法の手順を示す。また、図2に応答予測に用い

るせん断モデルの概念図、図3に本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーの力学モデル⁸⁾を示す。

まずは、粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率、等価減衰定数の低下率 $g_{\lambda_{\Omega_i}}$, $h_{\lambda_{\Omega_i}} = 1.0$ として、性能低下を考慮しない建物応答の予測を行い、得られた値および3章に示すダンパーのエネルギーの予測手法を用いて $g_{\lambda_{\Omega_i}}$, $h_{\lambda_{\Omega_i}}$ を予測する。その後、 $g_{\lambda_{\Omega_i}}$, $h_{\lambda_{\Omega_i}}$ を再設定し、建物応答の予測を再度行うことで間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した建物応答を予測する。本予測手法の適用条件は、文献1)と同様に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に1次固有周期付近の速度応答スペクトルの値が概ね一定であることである。

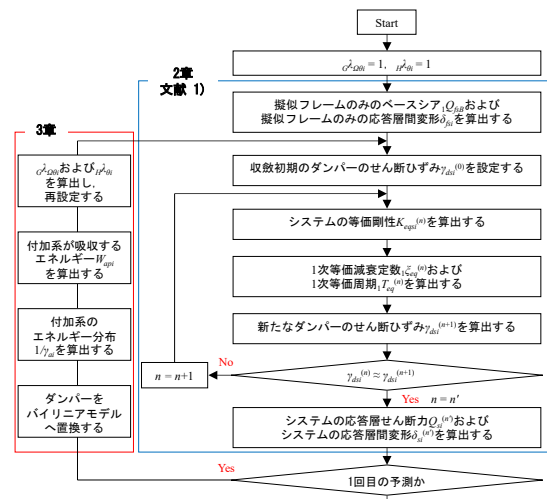


図1 応答予測手法のフロー

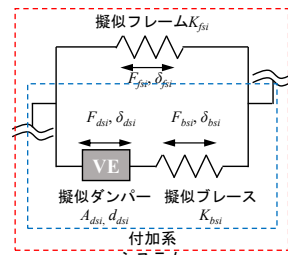


図2 せん断モデル

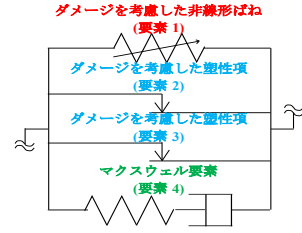


図3 粘弾性ダンパーの力学モデル

Seismic Response Prediction Method for High-rise Buildings Considering Performance Degradation of Stud-type Viscoelastic Dampers with Amplitude Dependencies
Part1 Outline of Seismic Response Prediction Method

NISHIUMI Hayato, SATO Daiki, KINOSHITA Ryosuke, Alex SHEGAY, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, MORIOKA Hiromitsu

2.2 応答予測手法の手順¹⁾

2.2.1 擬似フレームのみの応答ベースシアおよび層間変位の算出

質量 m_i 、擬似フレームの1次固有モード $1u_{fi}$ より、擬似フレームのみの1次等価質量 $1M_{eqf}$ を次式で算出する。

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

ここに、 N ：層数、 i ： i 層の諸元、計算値を表す。

次に、擬似フレームのみの1次固有周期 $1T_f$ と1次の構造減衰 $1\xi_f$ での加速度応答スペクトル $S_a(1T_f, 1\xi_f)$ より、擬似フレームのみの応答ベースシア $1Q_{fsB}$ および応答層間変位 δ_{fsi} を次式で算出する。

$$1Q_{fsB} = 1M_{eqf} \cdot S_a(1T_f, 1\xi_f) \quad (2)$$

$$\delta_{fsi} = B_{si} \cdot 1Q_{fsB} / K_{fsi} \quad (3)$$

また、 $1Q_{fsB}$ 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分布には、高次モード応答および地震波特性を考慮した次式で表される A_i'' 分布を用いる¹⁾。

$$A_i'' = \frac{S_i''}{S_1''} \quad (4)$$

$$S_i'' = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^3 \{ \sum_{p=i}^N m_p \cdot j\beta_f \cdot 1u_{fp} \cdot D_h(j\xi_{eq}) \cdot S_a(1T_f, 1\xi_f) \}^2}{\sum_{p=i}^N m_p}} \quad (5)$$

ここに、 $j\beta_f$ ：擬似フレームのみの刺激関数である。また、 D_h ：減衰効果係数であり、次式で評価する²⁾。

$$D_h(j\xi_{eq}) = \sqrt{(1 + \kappa \cdot 1\xi_f) / (1 + \kappa \cdot j\xi_{eq})} \quad (6)$$

本節では擬似フレームの応答を算出するため、式(5)の $j\xi_{eq}$ の代わりに j 次の構造減衰 $j\xi_f$ を用いる。また、本報では人工地震波の推奨値²⁾である $\kappa = 75$ と時刻歴解析より逆算した κ (本報その2) を用いる。

2.2.2 収斂初期の擬似ダンパーのせん断ひずみの設定

はじめに、擬似ダンパーのせん断応力度-せん断ひずみ関係をトリリニアモデルに近似する¹⁾。例として、図4に粘弾性ダンパーの温度、振動数の場合の骨格曲線、図5に近似するトリリニアモデルを示す。

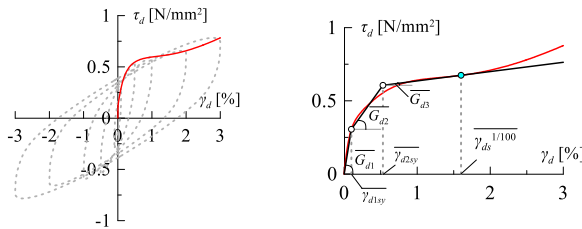


図4 粘弾性ダンパーの骨格曲線 図5 トリリニアモデル

次に、擬似ダンパーのせん断ひずみの初期値を算出する手順を示す。まずは、擬似ダンパーのせん断面積 A_{dsi} 、厚さ d_{dsi} を用いて、上述の手順で作成した擬似ダンパートリリニアモデルのせん断弾性率 (\overline{G}_{d1} , \overline{G}_{d2} , \overline{G}_{d3} (図5))、折れ点せん断ひずみ ($\overline{\gamma}_{d1sy}$, $\overline{\gamma}_{d2sy}$ (図5)) を、次式で擬似ダンパートリリニアモデルの第一、第二、第三剛性 (\overline{K}_{d1st} ,

\overline{K}_{d2st} , \overline{K}_{d3st}) および第一、第二折れ点変位 ($\overline{\delta}_{d1syi}$, $\overline{\delta}_{d2syi}$) に変換する。

$$\overline{K}_{d1st} = A_{dsi} \cdot \overline{G}_{d1} \cdot c\lambda_\theta \cdot c\lambda_f \cdot c\lambda_{\Omega\theta i} / d_{dsi} \quad (7)$$

$$\overline{K}_{d2st} = A_{dsi} \cdot \overline{G}_{d2} \cdot c\lambda_\theta \cdot c\lambda_f \cdot c\lambda_{\Omega\theta i} / d_{dsi} \quad (8)$$

$$\overline{K}_{d3st} = A_{dsi} \cdot \overline{G}_{d3} \cdot c\lambda_\theta \cdot c\lambda_f \cdot c\lambda_{\Omega\theta i} / d_{dsi} \quad (9)$$

$$\overline{\delta}_{d1syi} = \overline{\gamma}_{d1sy} \cdot d_{dsi}, \quad \overline{\delta}_{d2syi} = \overline{\gamma}_{d2sy} \cdot d_{dsi} \quad (10), (11)$$

ここに、 $c\lambda_\theta$, $c\lambda_f$ ：それぞれ等価せん断弾性率の温度および振動数補正係数である⁹⁾。

擬似ダンパートリリニアモデルと擬似ブレース剛性 K_{bsi} の関係より、付加系トリリニアモデルの第一、第二、第三剛性 (\overline{K}_{a1st} , \overline{K}_{a2st} , \overline{K}_{a3st}) および第一、第二折れ点変位 ($\overline{\delta}_{a1syi}$, $\overline{\delta}_{a2syi}$) をそれぞれ次式で算出する。

$$\overline{K}_{a1st} = \frac{K_{bsi} \cdot \overline{K}_{d1st}}{K_{bsi} + \overline{K}_{d1st}}, \quad \overline{K}_{a2st} = \frac{K_{bsi} \cdot \overline{K}_{d2st}}{K_{bsi} + \overline{K}_{d2st}} \quad (12), (13)$$

$$\overline{K}_{a3st} = \frac{K_{bsi} \cdot \overline{K}_{d3st}}{K_{bsi} + \overline{K}_{d3st}} \quad (14)$$

$$\overline{\delta}_{a1syi} = \frac{\overline{K}_{d1st} \cdot \overline{\delta}_{d1syi}}{\overline{K}_{a1st}} \quad (15)$$

$$\overline{\delta}_{a2syi} = \overline{\delta}_{a1syi} + \frac{\overline{K}_{d2st} (\overline{\delta}_{d2syi} - \overline{\delta}_{d1syi})}{\overline{K}_{a2st}} \quad (16)$$

その後、付加系トリリニアモデルの剛性と擬似フレームのみの応答層間変位 δ_{fsi} より、擬似ダンパートリリニアモデルの荷重 F_{dsi} 、変位 $\overline{\delta}_{dsi}$ を次式で算出する。

$$\overline{F}_{dsi} = \begin{cases} \overline{K}_{a1st} \cdot \delta_{fsi} & (\delta_{fsi} \leq \overline{\delta}_{a1syi}) \\ (\overline{K}_{a1st} - \overline{K}_{a2st}) \overline{\delta}_{a1syi} + \overline{K}_{a2st} \cdot \delta_{fsi} & (\overline{\delta}_{a1syi} < \delta_{fsi} \leq \overline{\delta}_{a2syi}) \\ (\overline{K}_{a1st} - \overline{K}_{a2st}) \overline{\delta}_{a1syi} + (\overline{K}_{a2st} - \overline{K}_{a3st}) \overline{\delta}_{a2syi} + \overline{K}_{a3st} \cdot \delta_{fsi} & (\overline{\delta}_{a2syi} > \delta_{fsi}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\overline{\delta}_{dsi} = \begin{cases} \overline{F}_{dsi} / \overline{K}_{d1st} & (\delta_{fsi} \leq \overline{\delta}_{a1syi}) \\ (\overline{F}_{dsi} - \overline{K}_{d1st} \cdot \overline{\delta}_{d1syi}) / \overline{K}_{d2st} + \overline{\delta}_{d1syi} & (\overline{\delta}_{a1syi} < \delta_{fsi} \leq \overline{\delta}_{a2syi}) \\ (\overline{F}_{dsi} - (\overline{K}_{d1st} - \overline{K}_{d2st}) \overline{\delta}_{d1syi} - \overline{K}_{d2st} \cdot \overline{\delta}_{d2syi}) / \overline{K}_{d3st} + \overline{\delta}_{d2syi} & (\overline{\delta}_{a2syi} > \delta_{fsi}) \end{cases} \quad (18)$$

収斂初期の擬似ダンパーのせん断ひずみ $\gamma_{dsi}^{(0)}$ を次式で算出する。

$$\gamma_{dsi}^{(0)} = \overline{\delta}_{dsi} / d_{dsi} \quad (19)$$

2.2.3 システムの等価剛性の算出

収斂計算 n 回目の付加系の等価剛性 K_{aeqsi} 、および擬似ダンパーの等価剛性 K_{deqsi} を次式で算出する。

$$K_{aeqsi}^{(n)} = \frac{K_{bsi} \cdot K_{deqsi}^{(n)}}{K_{bsi} + K_{deqsi}^{(n)}} \quad (20)$$

$$K_{deqsi}^{(n)} = \frac{A_{dsi} \cdot \overline{G}_{eq}}{d_{dsi}} \cdot c\lambda_{\gamma i}^{(n)} \cdot c\lambda_\theta \cdot c\lambda_f \cdot c\lambda_{\Omega\theta i} \quad (21)$$

ここで、 \overline{G}_{eq} ：温度 20°C、振動数 0.33 Hz、せん断ひずみ 100%における粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率、 $c\lambda_{\gamma i}$ ：等価せん断弾性率のせん断ひずみ補正係数である⁹⁾。

システムの等価剛性 K_{eqsi} を次式で算出する。

$$K_{eqsi}^{(n)} = K_{fsi} + K_{aeqsi}^{(n)} \quad (22)$$

2.2.4 1次等価減衰定数および1次等価周期の算出

最大応答定常振幅時における i 層の1次等価減衰定数 $1\xi_{eqimax}$ を次式で算出する。

γ_{d0i} 時の各層の非線形粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率 G_{eqi} と等価減衰定数 H_{eqi} を次式で算出する。

$$G_{eqi} = \tilde{G}_{eq} \cdot c_{\lambda\theta} \cdot c_{\lambda f} \cdot c_{\lambda\gamma_i} \quad (41)$$

$$H_{eqi} = \tilde{H}_{eq} \cdot h_{\lambda\theta} \cdot h_{\lambda f} \cdot h_{\lambda\gamma_i} \quad (42)$$

ここに、 \tilde{H}_{eq} : 温度 20°C, 振動数 0.33 HZ, せん断ひずみ 100%における粘弾性ダンパーの等価減衰定数, $h_{\lambda\theta}$, $h_{\lambda f}$, $h_{\lambda\gamma_i}$: それぞれ等価減衰定数の温度, 振動数およびせん断ひずみ補正係数である⁹⁾。

次に、バイリニアモデルの第一, 第二せん断弾性率 G_{d1i} , G_{d2i} を G_{eqi} および H_{eqi} を用いて, それぞれ次式で算出する。

$$G_{d2bi} = G_{eqi} \left\{ 1 - \frac{\pi \cdot H_{eqi} \cdot \gamma_{d0i}}{2(\gamma_{d0i} - \gamma_{dybi})} \right\} \quad (43)$$

$$G_{d1bi} = \frac{G_{eqi} \cdot \gamma_{d0i} - G_{d2bi}(\gamma_{d0i} - \gamma_{dybi})}{\gamma_{dybi}} \quad (44)$$

ここに、 γ_{dybi} : バイリニアモデルの折れ点ひずみである。

そして、 A_{dsi} , d_{dsi} を用いてバイリニアモデルの第一, 第二剛性 K_{d1bsi} , K_{d2bsi} , バイリニアモデルの折れ点変位 δ_{dysi} をそれぞれ次式で算出する。

$$K_{d1bsi} = A_{dsi} \cdot G_{d1bi} / d_{dsi}, \quad K_{d2bsi} = A_{dsi} \cdot G_{d2bi} / d_{dsi} \quad (45), (46)$$

$$\delta_{dysi} = \gamma_{dybi} \cdot d_{dsi} \quad (47)$$

式(43), (44)において G_{d2bi} および G_{d1bi} を得るためには、 γ_{d0i} と γ_{dybi} の仮定が必要である。また、バイリニアモデルのエネルギー分布が粘弾性モデルと同等となるためには γ_{d0i} 以外の振幅においても G_{eqi} および H_{eqi} が非線形粘弾性ダンパーとバイリニアモデルで同程度となることが重要である。そのため、図7に示す粘弾性ダンパーとバイリニアモデルの G_{eq} および H_{eq} とせん断ひずみ γ の関係を用いて γ_{d0i} と γ_{dybi} の適切な仮定方法を示す。ここで、図7の粘弾性ダンパーの G_{eq} および H_{eq} は式(41), (42)を、バイリニアモデルの G_{eqb} および H_{eqb} はそれぞれ次式を用いて算出される。

$$G_{eqb} = \begin{cases} G_{d1b} & (\gamma < \gamma_{dyb}) \\ \frac{G_{d1b} \cdot \gamma_{dyb} + G_{d2b}(\gamma - \gamma_{dyb})}{\gamma} & (\gamma_{dyb} \leq \gamma) \end{cases} \quad (48)$$

$$H_{eqb} = \begin{cases} 0 & (\gamma < \gamma_{dyb}) \\ \frac{2\gamma_{dy} (G_{d1b} - G_{d2b})(\gamma - \gamma_{dyb})}{\pi G_{eqb} \cdot \gamma^2} & (\gamma_{dyb} \leq \gamma) \end{cases} \quad (49)$$

図7より、最も広い範囲の γ で両者の G_{eq} が一致しているのは、 γ_{dyb} が最も小さくなる $\gamma_{d0} = 100\%$, $\gamma_{dyb}/\gamma_{d0} = 0.1$ とした場合である。また、図7より、 H_{eq} についても γ_{dyb}/γ_{d0} が小さいほど広い範囲の γ において両者は同程度となりやすいことがわかる。以上のことから本報では、各層で γ_{d0i}

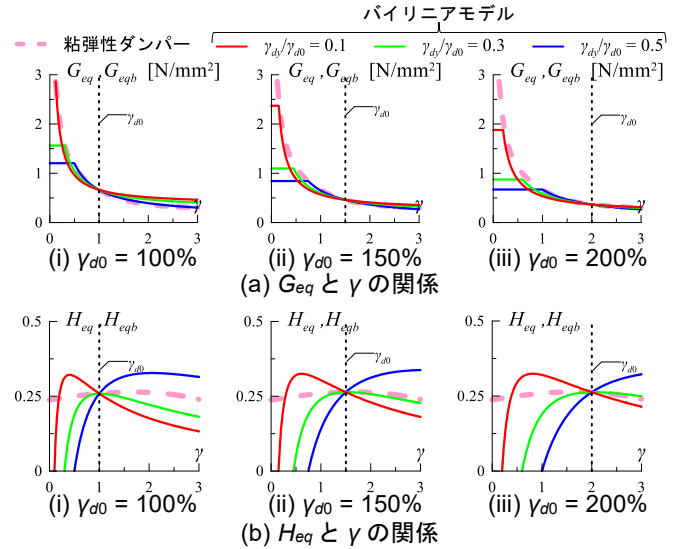


図7 粘弾性ダンパーとバイリニアモデルの振動特性の比較 (20°C)

= 100%, $\gamma_{dybi} / \gamma_{d0i} = 0.1$ と仮定したバイリニアモデルを用いることとする¹³⁾。

3.2 ダンパーが吸収するエネルギーの予測

各層の付加系が吸収するエネルギー W_{api} を次式で算出する。なお、擬似ブレースが弾性であるため、付加系が吸収するエネルギー $W_{api} =$ ダンパーが吸収するエネルギー W_{dpi} となる。

$$W_{api} = \frac{1}{\gamma_{ai}} \sum_{i=1}^N W_{api} = W_{dpi} \quad (50)$$

ここで、 $1/\gamma_{ai}$: 付加系の損傷分散係数 γ_{ai} の逆数であり、文献11)の手法で算出する。また、 ΣW_{api} : 付加系が吸収するエネルギーの総量であり、次式で算出する。

$$\sum_{i=1}^N W_{api} = E = \frac{M}{2} V_E^2 ({}_1T_f, {}_1\xi_{eq}^{(n)}) \quad (51)$$

通常、構造減衰が負担するエネルギーも入力エネルギー E には含まれるが、安全側の評価および簡便性のため式(51)では構造減衰が負担するエネルギーを無視し、すべての入力エネルギーがダンパーで吸収されると仮定して $\Sigma W_{api} = E$ としている。以上より算出した W_{dpi} を基に式(37), (38)より各層のダンパーの性能低下率 $g_{\lambda Q\theta i}$, $h_{\lambda Q\theta i}$ を予測する。

4. まとめ

本報その1では、提案手法の概要を示した。本報その2では、提案した応答予測手法の精度検証を行う。

参考文献は本報その2に併せて示す。

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士 (工学)

*3 元東京工業大学 大学院生・修士 (工学)

*4 オークランド大学 講師・Ph. D.

*5 JFE シビル株式会社

*6 JFE スチール株式会社

*Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

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

*Former Grad. Student, Tokyo Institute of Technology, M.Eng. *3

*Lecturer, University of Auckland, Ph.D. *4

*JFE Civil Engineering & Construction Corporation *5

*JFE Steel Corporation *6