T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを有する超高層制振建物における等価減衰定数を用いた 制振性能評価 その 1 応答低減率による評価		
Title(English)	The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers Part1 Evaluation based on damping effect factor		
著者(和文)			
Authors(English)	Yuya Sawa, Daiki Sato, Ryota Tobari, Mitsutoshi Yoshinaga, Jumpei Yasunaga, Yosuke Kaneshiro		
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 285-288		
Citation(English)	, , , pp. 285-288		
発行日 / Pub. date	2021, 3		

履歴ダンパーを有する超高層制振建物における等価減衰定数を用いた制振性能評価

その1 応答低減率による評価

構造一振動

制振構造	履歴ダンパー	超高層建物
等価減衰定数	実効変形比	制振性能評価

1. はじめに

制振構造は制振ダンパーの塑性履歴エネルギーや粘性 減衰の消散により,建物の振動および振動エネルギーを 軽減させ,建物の振動および主架構の損傷を低減させる ものである¹⁾。しかしながら,制振ダンパーは,地震動の レベル毎に有効に作用するダンパー投入量・配置が存在 することから,それらの決定にはパラメトリックな解析 および検討が重要となる。

石井・笠井²は状態 NR 解析により,層間変形に対する 制振ダンパーの水平変形成分の比(以降,実効変形比)を 考慮したせん断モデル化手法を提案している。文献 3),4) では状態 NR 解析から得られる骨組特性値²⁾を用いた制 振性能評価手法の提案を行い,複数の建物に適用できる ことを確認している。また,古谷ら⁵はエネルギー法を用 いた制振性能評価手法の提案を行い,レベル2相当の地 震動レベルまでは,評価値と応答値が良好な関係を示す と述べている。しかし,極端に大きな地震動に対しては評 価値と応答値に差が生じる。筆者らは文献 6)にて,実効 変形比とダンパー塑性率の関係を明らかにしたが,時刻 歴応答解析の応答値による関係を示しており,評価法の 確立には至っていない。

そこで本報は、ダンパー配置およびダンパー投入量の 優劣を評価する制振性能評価の提案を目的とする。その1 では、履歴ダンパー(以降、ダンパー)を設置した制振建 物を対象とし、時刻歴応答解析することなく、任意の外力 が作用した時のダンパー配置およびダンパー投入量の優 劣の評価を行う。具体的には、実効変形比を考慮したせん 断モデルを用いて等価減衰定数を算出し、制振性能評価 をする。また、評価の精度に関しては、時刻歴応答解析結 果と比較することで確認を行う。その2では、骨組特性 値から得られる実効変形比の中間とその時の等価減衰定 数を用いて、ダンパー配置および投入量の優劣を評価す る制振性能評価法を提案する。

The vibration control performance evaluation based on equivalent damping ratio for high-rise building with hysteretic dampers Part1 Evaluation based on damping effect factor

正会員	○ 澤 侑弥*1	正会員	佐藤大樹*2
]]	戸張涼太*3	11	吉永光寿*3
]]	安永隼平*4	//	金城陽介*5

2. モデル概要

2.1 検討対象建物およびダンパー概要

検討対象建物は 35 層の鉄骨構造建物とする 4。Fig.1 に 基準階伏図, Fig.2 に軸組図を示す。建物の総重量は 352,773kN,主架構のみの 1 次固有周期 T_{f1} は 3.97s であ り,構造減衰は T_{f1} に対して,減衰定数 $h_0=0.02$ となる初 期剛性比例型とする。また、本報では X 方向のみ検討を 行い、主架構は弾性状態を保つものとする。

ダンパーの高さ方向配置は Fig.2 に示す連層配置とする。履歴ダンパーとして座屈拘束ブレースを用い、部材長さ L_d に対して塑性化部長さ $L_d/3$,塑性化部断面積 A_d に対して弾性部断面積 $2A_d$ とし、塑性化部には LY225 材を用

ダンパー配置通り い完全弾塑性とする。各層のダ Y4 ンパー降伏層せん断力分布は, ۲3_∞ 1 層のダンパー降伏層せん断力 Y2 2 *Q*_{dy1}を基準とし,Ai分布に基づ Y1 5@8=40 m く設計用層せん断力分布をも X1 X2 X3 X4 X5 X6 とに、8,15,24 層で切り替わ Plan Fig.1 34@4 = 136ε 4 Inside Outside Center Chidori1 Chidori2 (3.48)(3.63)(3.59)(3.44)(3.36)С D В (3.44)(3.44)(3.48)(3.47)(3.42)(3.43)Fig.2 Elevation (T₁ [s])

SAWA Yuya, SATO Daiki, TOBARI Ryota, YOSHINAGA Mitsutoshi, YASUNAGA Jumpei, KANESHIRO Yosuke る4段階とする⁴⁾。式(1)に Q_{dy1} と1層のダンパー降伏層 せん断力係数 α_{dy1} の関係を示す。

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \sum_{i=1}^{N} m_i g \tag{1}$$

ここで、Nは層数、 m_i は i 層の質量、g は重力加速度を示 す。なお、本報では α_{dy1} をダンパー量と定義する。ダンパ ーは Y2、Y3 通りに配置する。ダンパー配置は Fig.2 に示 す 11 通りとし、本建物モデルは奇数スパンであるため、 Inside のようなダンパー配置の場合、1 層あたりのダンパ ー数は 8 本であるのに対し、Center の場合 1 層あたり 4 本となるため、1 本あたりの断面積を 2 倍としている。以 降、Inside、Outside、Center を基準配置と呼び、Chidoril~ F はそれらの併用型配置と呼ぶ。なお、Fig.2 に示す括弧 内の値は、ダンパー配置を変えることで固有周期が変化 するため、各ダンパー配置の α_{dy1} = 0.015 における弾性 1 次固有周期 T_1 を示す。

2.2 せん断モデル化手法の概要²⁾

2.1 節に示した各骨組要素からなるモデルを部材構成 モデルと呼び,各要素を水平バネに置換したものをせん 断モデルと呼ぶ。部材構成モデルとせん断モデルの対応 関係を Fig.3 に示す。Fig.3(a)に示す F, δ は主架構に作用 するせん断力および層間変位を示し、 \hat{K}_d , \hat{F}_d , $\hat{\delta}_d$ はそ れぞれ軸方向のダンパー剛性,軸力,変位を示す。Fig.3(b) に示すせん断モデルは擬似フレーム(下付き fs),擬似ダ ンパー(ds),擬似ブレース(bs)で構成され,各K,F, δ はそれぞれ剛性,軸力,変位を示す。なお,擬似ダンパ ーと擬似ブレースを合わせて付加系(as)と呼び,付加系 と擬似フレームを合わせてシステムと呼ぶ。



(a) Member model (b) Shear model Fig.3 Member model and Shear model

以下に,実効変形比を考慮したせん断モデル化手法を 示す。せん断モデルの各バネ系は状態 NR 解析よりモデ ル化が行える。状態 N 解析は,主架構のみの弾性部材モ デルの各層にAi分布などの外力を作用させる解析である。 状態 R 解析は,主架構のみの弾性部材モデルの制振部材 設置箇所に剛性の極端に大きな弾性バネを挿入すること で,その相対変位が限りなくゼロに近い状態を保ち,各層 にAi分布などの外力を作用させる解析を示す。

状態 N の *i* 層 *j* 番目の制振部材設置箇所における相対 変位 $\delta_{N,(i,j)}$ の水平成分の層間変位 $\delta_{N,i}$ に対する比 $\alpha_{N,(i,j)}$ が算 出できる(式(2))。また,層せん断力 $Q_{N,i} \geq \delta_{N,i}$ で状態 N の層剛性 $K_{N,i}$ が得られる(式(3))。ここで, $K_{N,i}$ は擬似フ レーム剛性 $K_{fs,i}$ と同値である。

$$\alpha_{N,(i,j)} = \frac{\delta_{dN,(i,j)}}{\delta_{N,i}}, \quad K_{N,i} = K_{fs,i} = \frac{Q_{N,i}}{\delta_{N,i}}$$
(2),(3)

状態 R の弾性バネ軸力水平成分 $F_{dR,(i,j)}$ と層間変位 $\delta_{R,i}$ より、剛性 $K_{dR,(i,j)}$ を各制振部材設置箇所について計算し、i層におけるダンパー数 N_{dj} を用いて、擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ が算出できる。

$$K_{dR,(i,j)} = \frac{F_{dR,(i,j)}}{\delta_{R,i}} , \quad K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} \alpha_{N,(i,j)} K_{dR,(i,j)}$$
(4),(5)

擬似ダンパー剛性 $K_{ds,i}$ は部材構成モデルにおけるダンパ ー剛性の水平成分 $K_{d,(i,j)} \ge \alpha_{N,(i,j)}$ を用いて算出できる(式 (6))。また,擬似ダンパーと擬似ブレースは直列の関係で あることから,付加系剛性 $K_{as,i}$ は式(7)で表される。

$$K_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{dj}} \alpha_{N,(i,j)}^{2} K_{d,(i,j)}, \quad K_{as,i} = \frac{K_{ds,i} K_{bs,i}}{K_{ds,i} + K_{bs,i}}$$
(6),(7)

3. 制振性能評価

3.1 骨組特性値による制振性能評価値

まず,部材構成モデルとせん断モデルの対応式を示す。 部材構成モデルのダンパー軸変位,軸力,剛性それぞれの 水平成分を δ_d , F_d , K_d とする。また,せん断モデルの擬似 ダンパー変位,軸力,剛性をそれぞれ δ_{ds} , F_{ds} , K_{ds} とする。 以上より,部材構成モデルとせん断モデルの対応関係式 は式(8a-c)で表される。

 $\delta_{ds} = \delta_d / \alpha_N$, $F_{ds} = \alpha_N F_d$, $K_{ds} = \alpha^2 N K_d$ (8a-c) せん断モデルの擬似ダンパーが弾性時における実効変 形比 $\alpha_{es,i}$ (以下,実効変形比の下限)の定義を示す。部材 構成モデルの層間変位 δ_i は、せん断モデルにおける層間 変位 $\delta_{fs,i}$ (= $\delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}$)と同様である。式(8a-c)より実効変 形比の下限値 $\alpha_{es,i}$ は式(9)で表すことができる⁶。

$$\alpha_{es,i} = \frac{\delta_{d,i}}{\delta_i} = \frac{\alpha_{N,i}\delta_{ds,i}}{\delta_{ds,i} + \delta_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + K_{ds,i}/K_{bs,i}} = \frac{\alpha_{N,i}}{1 + \kappa_{ds,i}}$$
(9)

$$\sum \sum \mathcal{O}, \quad \kappa_{dc,i} = K_{dc,i}/K_{bc,i} \geq \frac{1}{2} \sum_{0} \infty$$

3.2 等価減衰定数 heg の算出

等価減衰定数 h_{eq} の算出方法を記す。本報その1では, h_{eq} を Ai 分布の外力を基に算出し,主架構のみのモデル (以降,フレームモデル)の最大層間変形角 $R_{f,max}$ が 1/300, 1/200, 1/100 となる層せん断力 Q_i を用いる。Ai 分布の周 期は T_{f1} とする。まず,各層のシステムの変位を求める。 i 層のシステムの1次剛性 $K_{s1,i}$ (= $K_{fs,i}$ + $K_{as,i}$),2 次剛性 $K_{s2,i}$ (= $K_{fs,i}$),降伏せん断力 $F_{sy,i}$,降伏変位 $\delta_{sy,i}$ (= $\delta_{asy,i}$)とする と Q_i が作用した時の変位 $\delta_{s,i}$ は式(10)より算出できる。

$$\delta_{s,i}' = \begin{cases} Q_i / K_{s1,i} & (Q_i < F_{sy,i}) \\ (Q_i - F_{sy,i} + K_{s2,i} \delta_{asy,i}) / K_{s2,i} & (F_{sy,i} \le Q_i) \end{cases}$$
(10)

本報その1では等価減衰定数 heg を式(11)で評価する。

$$h_{eq} = \sum_{i=1}^{N} h_i W_i / \sum_{i=1}^{N} W_i + h_0$$
(11)

ここで, h₀は構造減衰を示し, i 層の減衰定数 h_iは文献 7) を基に式(12)より得る。

$$h_{i} = \frac{2(1 + K_{as,i}/K_{fs,i})}{\pi \mu_{s,i}} \ln \frac{\mu_{s,i} + K_{as,i}/K_{fs,i}}{(1 + K_{as,i}/K_{fs,i})(\mu_{s,i})^{\frac{1}{1 + Kas,i/K_{fs,i}}}}$$
(12)

式(11)の W_i は最大ポテンシャルエネルギーを示し,式(13) で算出できる。また,式(12)の $\mu_{s,i}$ はシステム塑性率を示 し,式(14)で算出できる。なお, $\mu_{s,i} \ge 1$ とする。

$$W_i = Q_i \delta'_{s,i}/2, \quad \mu_{s,i} = \delta'_{s,i}/\delta_{sy,i}$$
 (13),(14)

3.3 ダンパー量・配置による各評価値の違い

Fig.4に各ダンパー配置の状態Nの実効変形比 α_N (以降, 実効変形比の上限)の平均 $\overline{\alpha}_N$,実効変形比の下限 α_{es} の平 均 $\overline{\alpha}_{es}$, $R_{f,max} = 1/300$, 1/200, 1/100 の h_{eg} を示す。なお, 平均化は1~全体の2/3層までとする4).6)。Fig.4より、ダ ンパー配置によって $\overline{\alpha}_N$ および $\overline{\alpha}_{es}$ が異なることが確認で きる。基準配置に着目すると、 $\overline{\alpha}_N$ に関しては Center> Inside > Outside となり、ダンパー配置が内側になるにつれ 大きくなることがわかる。しかし $\overline{\alpha}_{es}$ では, Inside > Outside >Center となる。この原因は、1本あたりのダンパーの断 面積が異なるためである(2.1節前述)。併用型配置に着 目すると、Chidori2 では $\overline{\alpha}_N$ および $\overline{\alpha}_{es}$ は他のダンパー配 置と比較して大きな値を示すことがわかる。次いで hegに ついて述べる。基準配置においては、いずれの外力でも Inside が最も大きく, Outside と Center の差はあまりない。 h_{eq} の大小関係に関して $\overline{\alpha}_N$ が大きな値を示し、かつ $\overline{\alpha}_N$ と $\bar{\alpha}_{es}$ の差が小さいダンパー配置だと大きな h_{ea} を示す傾向 にある。併用型配置において, 概ね基準配置よりも大きな hegを示し、かつ広い範囲のダンパー量で hoよりも大きな 値を示す。併用型配置は基準配置と比較して $\overline{\alpha}_N$ と $\overline{\alpha}_{es}$ の 差が小さく,いずれの外力でも大きな hea を示すことが確 認できる。中でも Chidori2 は最も大きな h_{eq} を示す。

3.4 heqを用いた制振性能評価

本節では応答低減率 D_h^{80} を用いてダンパー配置および ダンパー量の優劣を評価する。式(15)に D_h の算出方法を 示す。

$$D_{h} = \sqrt{(1 + \alpha h_{0})/(1 + \alpha h_{eq})}$$
(15)

本報では $\alpha = 25$ として算出する⁸)。Fig.5(a)~(c)に $R_{f.max} = 1/300, 1/200, 1/100$ の時の D_h を示す。横軸はダンパー配置とする。なお、本評価においては $\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.030$ までで検討を行う。Fig.5(a)より、全てのダンパー配置・量で $D_h = 1$ に近い値を示すことから、フレームモデルと応答に差がないと予測できる。Fig.5(b)より、概ね全てのダンパー配置で $\alpha_{dy1} = 0.010$ で小さな D_h を示す。しかし、Outside と Center は限りなく $D_h = 1$ に近い値を示すことからあまり応答低減はしないと推測できる。なお、Chidori2 の $\alpha_{dy1} = 0.015$ で D_h は最も小さな値を示した。





Fig.5(c)では、全てのダンパー配置において $\alpha_{dy1} = 0.005$ で $D_h = 1$ を示す。Outside、Center 以外のダンパー配置で α_{dy1} = 0.020~0.030 で小さな D_h を示すが $\alpha_{dy1} = 0.020$ 以降であ まり差はない。いずれのダンパー配置でも $\alpha_{dy1} = 0.030$ 前 後で D_h は収束すると考えられる。





4. 時刻歴応答解析による比較

4.1 入力地震動概要

長周期領域で擬似速度応答スペクトル S_{pV} = 80 cm/s と なる模擬地震動で、位相特性として HACHINOHE 1968 EW を用いる。以降 ART HACHI と呼ぶ。Fig.6(a)に構造減 衰 h=5%の S_{pV} , (b)に h=10%のエネルギースペクトル V_E を示す。2.1 節でも前述したように、図中に示す検討固有 周期範囲はダンパー配置・量を変えることで変化する固 有周期を示す。なお、フレームモデルで、 $R_{f,max}$ = 1/300, 1/200, 1/100 となるように入力地震動倍率を調整して、3.4 節と比較する。本建物のおいては、ART HACHI だと、0.4, 0.6, 1.2 倍波であった。



- *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 博士(工学)
- *5 JFE スチール株式会社

4.2 時刻歴応答解析結果

本節では基準配置と併用型配置の Chidori2, A, E を対 象として時刻歴応答解析を行う。Fig.7(a)~(c)に 0.4, 0.6, 1.2 倍波を入力した時の最大層間変形角 R_{max} を示す。 Fig.7(a)より, 0.4 倍波ではいずれのダンパー配置・量にお いてもフレームモデルとあまり差がなく, Fig.5(a)の評価 と一致する。Fig.7(b)より, 0.6 倍波では Outside と Center 以外は, α_{dv1}=0.010, 0.015 で最も応答が低減し, Fig.5(b) における予測と概ね一致していることが確認できる。 Fig.7(c)より, 1.2 倍波において Outside と Center は α_{dy1} = 0.015 までは応答が低減し、それ以降は横ばいとなる。そ れ以外はα_{dv1}=0.015, 0.020以降で応答が増大する。Fig.5(c) における評価で $\alpha_{dv1} = 0.020 \sim 0.030$ で差はなかったため, 概ね一致していると言える。Fig.5のダンパー配置の評価 において, Chidori2 が最も応答が低減するという評価に対 して、Fig.7 で最も応答が低減するダンパー配置は Chidori2 であったため一致する。また、ダンパー量におい てはいずれの外力でも Fig.5 の評価は安全側となること が確認できる。



5. まとめ

本報では、履歴ダンパーを設置した制振建物を対象と し、時刻歴応答解析することなく、任意の外力が作用した 時のダンパー投入量およびダンパー配置の制振効果にお ける優劣を評価することを目的とした。

本評価と時刻歴応答解析結果の比較において,ダンパ ー配置の優劣関係においては良好な関係を示し,有効な ダンパー配置を評価することができることを確認した。 有効に作用するダンパー量においては外力によって差は 生じるものの,安全側の評価であることが確認できた。

謝辞および参考文献はその2にまとめて記す。

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, Dr.Eng. *4
- JFE Steel Corporation *5