T2R2東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	 履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の塑性化および累積損傷分布 予測 その1 縮約モデルの検証		
Title(English)	Prediction method of damper yield and cumulative damage distribution of high-rise building with hysteretic damper Part.1 Verification of reduced model		
著者(和文)	 		
Authors(English)	Koki Hiratsuka, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka		
出典 / Citation			
Citation(English)	, , , pp. 501-504		
発行日 / Pub. date	2020, 3		

履歴型ダンパーを有する超高層制振建物の塑性化および累積損傷分布予測

その1 縮約モデルの検証

構造-振動

正会員 〇 平塚紘基^{*1} 正会員 佐藤大樹 正会員 田中英之^{*3}

超高層制振建物 履歴型ダンパー 風応答解析 累積損傷分布

1. はじめに

鋼材ダンパーに代表される履歴型ダンパーは、できる だけ小さな荷重レベルから早期にダンパーを塑性化させ ることで、エネルギー吸収を積極的に行うことができる。 しかし、超高層建物に履歴型ダンパーを採用した場合、長 周期地震などによって発生する多数回繰り返しによるダ ンパーの塑性度および累積疲労損傷度を評価する必要が ある¹⁾²⁾。

現状の超高層建物の耐風設計では、風荷重が構造設計 において支配的な荷重となる恐れがあるものの³⁾,弾性状 態で留めるように設計が行われている。しかし, 地震に対 する制振効果を得るために,超高層建物に低い荷重レベ ルで塑性化させる履歴型ダンパーを採用すると、風荷重 に対しても塑性化することが考えられる。よって,風荷重 に対しても履歴型ダンパーの塑性化予測および累積疲労 損傷度の評価が必要となってくる。一般的にダンパーの 塑性化および累積疲労損傷度を評価するためには、時刻 歴応答解析を用いる必要がある。しかし,風外力を用いて 超高層建物を対象とした時刻歴応答解析を行うと、地震 動に比べ圧倒的に継続時間が長いこと4,対象とする層数 が大きくなること,応答値をアンサンブル平均する必要 があること5から膨大な時間と計算量が必要となる。その ため,風荷重に対する履歴型ダンパーの塑性化予測及び 累積疲労損傷度を実用的に評価するために、時刻歴応答 解析を用いない手法が求められている。特に,累積疲労損 傷度と直接関連付けることができるエネルギーの釣合に 基づく評価^の(以下,エネルギー法)は有用であると考え られる。エネルギー法 %は,累積塑性変形倍率が全層で等 しくなる理想的な降伏せん断力分布である最適降伏せん 断力係数からのずれに基づいて算出され,損傷集中の程 度は損傷集中指数によって表される。佐藤ら⁷は,エネル ギー法のに着目し、風応答時における累積損傷分布の予測 手法を構築することを目的とし,最適降伏せん断力係数 分布や損傷集中指数を新たに提案した。しかし, 佐藤らの 手法"は、全層のダンパーが塑性化することを仮定して定 式化されているが、実際には全層のダンパーが塑性化す

Prediction method of damper yield and cumulative damage distribution of high-rise building with hysteretic damper Part.1 Verification of reduced model るとは限らない。そのため、ダンパーの塑性化予測を行った上で、累積損傷分布を予測することが重要となる。

そこで、本報では時刻歴応答解析を用いない風荷重に 対する履歴型ダンパーの塑性化の簡易判定手法を提案す るとともに、全層が降伏しない場合における佐藤らの手 法ⁿの適合性について検討する。検討には時刻歴応答解析 が用いられる。その際の効率を高めるために、本報その1 では、質点数を低下させた縮約モデルの精度について検 討する。対象はダンパーを設置していない非制振モデル および非制振モデルにダンパーを設置した制振モデルで ある。本報その2では、その1で縮約した制振モデルを 対象に、ダンパーの塑性化の簡易予測手法の提案および 本検討モデルにおける佐藤らⁿが提案した累積損傷分布 予測の適合性について検討する。

2. 非制振モデルおよび風外力の縮約

2.1. 縮約方法

本節では, 簡易的な検討をするために N 質点を N'質点 に縮約する手法について述べる。Fig. 1(a)に 1 次モードの 縮約の概要を, (b)に質量および風外力の縮約の概要を示 す。

ここで, n は縮約前後の質点数の比率を示す(式(1))。
 n=N/N'
 (1)



Koki HIRATSUKA , Daiki SATO , Hideyuki TANAKA

非制振モデルの縮約後における1次モードベクトル1¢, は、対応する層の1次モードベクトルと等しいと仮定し (Fig.1(a)), n および非制振モデル縮約前の1次モードベ クトル1¢rを用いて、式(2)より算出される。

$$_{1}\phi'_{fi} =_{1} \phi_{fni} \tag{2}$$

縮約後の質量 m'iは, 縮約する層の総和(Fig. 1(b)) と して表され, n および縮約前の質量 m_iを用いて式(3)より 得られる。

$$m'_{i} = \sum_{j=n(i-1)+1}^{ni} m_{j}$$
(3)

縮約後の1次モードベクトル1¢/f, 質量 m';および縮約 前の1次円振動数10gを用いて,縮約後の非制振モデルの 剛性 k'fiは,次式で表される⁸。

$$k'_{fi} = \frac{1\omega_f^2 \cdot m'_i \cdot \psi'_{fi} + k'_{fi+1} \left(\psi'_{fi+1} - \psi'_{fi} \right)}{1\psi'_{fi} - \psi'_{fi-1}}$$
(4)

ただし, $k'_{fN'+1} = 0$, $_1\phi'_{f0} = 0$ である。

縮約後の風外力 F'(t)_iは,上述した質量の縮約と同様に 縮約される層の総和として表現され (Fig. 1(b)),縮約前の 風外力 F(t)_iおよび n を用いて式(5)より得られる。

$$F'(t)_{i} = \sum_{j=n(i-1)+1}^{ni} F(t)_{j}$$
(5)

2.2.対象モデルおよび風外力概要

本報では、高さ 300 m の超高層建物 ⁹を対象とし、1 次固有周期 $_1T_f = 7.49$ s、質点間距離 h = 5 m とする 60 質点せん断型モデルを用いる (Fig. 2)。辺長比は Fig.3 に



Fig. 2Outline ofFig. 3Definition of wind directionNon-damping modeland side length ratio

示すように D/B=1 とする。

Fig. 4 に 60 質点モデル (60DOF) における風外力の一 例を示す。構造物に作用する風外力は風洞実験結果を用 いた。風洞実験データは、今回対象とするモデル高さおよ び再現期間 500 年風外力へ変換を行った。なお風向角 0° の風外力を用い、1 組につき 60 質点分の風力波形を 0.01 s 刻み 70000 ステップとし、700 s × 12 組取り出した。ま た,各波形前後に 50 s のエンベロープを設け,600 s (10 分間) での応答を評価に用いる。 2000 r /(k))



2.3. 非制振モデル固有値および応答値比較

固有値解析および時刻歴応答解析より得られた結果を もとに,縮約後のモデルの妥当性について検討を行う。な お,応答値は12波のアンサンブル平均をプロットしてい る。

Table 1 に固有値解析より得られた 60 質点非制振モデ ル (60DOF) の1次~3次固有周期 (${}_{1}T_{f60} \sim {}_{3}T_{f60}$) と 10 質 点非制振モデル (10DOF) の 1 次~3 次固有周期 (${}_{1}T_{f10} \sim {}_{3}T_{f10}$) を比較したものを, Fig. 5 に固有値解析より得られ た 60 質点非制振モデルの1次~3 次固有モード (${}_{1}\phi \sim {}_{3}\phi$) と 10 質点非制振モデルの1次~3 次固有モード (${}_{1}\phi \prime {}_{2} \circ {}_{3}\phi$) を比較したもの示す。

Table 1 より, 1 次固有周期は一致しており, 高次固有 周期においても精度よく一致していることがわかる。ま た Fig. 5 より, 1 次モードは一致しており, 高次モードに おいてもわずかに誤差があるものの概ね対応しているこ とが確認できる。

Table 1 Natural period

	10DOF	60DOF	T _{f10} / T _{f60}
$_1T_f$	7.49 s	7.49 s	1.00
$_2T_f$	3.05 s	3.08 s	0.990
$_{3}T_{f}$	1.93 s	1.94 s	0.995
		•	



Fig. 6(a)~(c)に時刻歴応答解析より得られた 層間変形 角 R, 応答速度 V および応答加速度 A を示す。Fig. 6(a)よ り, 建物下部に近づくにつれて 10 質点非制振モデルの応 答値がわずかに小さくなっていることが確認できる。ま た Fig. 6(b), (c)より, 建物頂部に近づくにつれて, 10 質 点非制振モデルの応答値がわずかに小さくなっている。 これは, 縮約した風外力, 縮約後の高次モードのずれによ り誤差が生じていると考えられる。しかし, 各応答値とも に概ね一致していることから,10 質点非制振モデルが妥当であることがわかった。



3. 制振モデルの縮約

3.1. N 質点モデルにおけるダンパー概要

本報では、せん断剛性および実効変形比を考慮して、ダ ンパーを N 質点非制振モデルに設置する。なお、ダンパ ー量 α_{dy1} (ダンパー1 層目の降伏せん断力係数)は、1%、 2%、4%の3パターンとし、層間変形角 R_{dy} は1/600とす る。Fig.7に各層の実効変形比 α_{ei} を示す。実効変形比は、 第1層目を1、第 N層目を 0.1とし、第1層目から第 N層 目まで直線となるように仮定した。付加系の降伏変位 δ_{ayi} は、式(6)より算出される。

$$\delta_{avi} = R_{dv} \cdot h / a_{ei} \tag{6}$$

Fig. 8 にダンパーの降伏耐力比 *Q*_{dyi}/*Q*_{dy1}を示す。各層の ダンパー量はAi分布に基づく地震層せん断力分布をもと に5 段階に分け,各グループのダンパー量はグループ最 下層のダンパー量をそのグループの各層に投入する。ダンパーの降伏耐力 *Q*_{dy1}(第1層),第2層以上のダンパーの降伏耐力 *Q*_{dy1}は式(7),(8)より算出される。

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \cdot W \tag{7}$$

$$Q_{dyi} = \frac{Q_i}{Q_1} \cdot Q_{dy1} \tag{8}$$

ここで, W: 対象モデル全重量, Q_i: i 層の地震層せん 断力, Q₁: 第1層の地震層せん断力である。よって, 式 (6)~(8)より,付加系の剛性 k_{ai}は次式で表される。



3.2. 制振モデルの縮約および縮約後のダンパー概要

簡易的に検討を行うために、制振モデルも縮約を行う。 縮約方法は、非制振モデルと同様の手法を用いる。制振モ デル縮約後における1次モードベクトル」がは、nおよび 制振モデル縮約前の1次モードベクトル」かを用いて、式 (10)より算出される。

$${}_{1}\phi'_{i} = {}_{1}\phi_{ni} \tag{10}$$

縮約後の1次モードベクトル1¢ⁱ, 質量 mⁱおよび縮約 前の制振モデルの1次円振動数1∞を用いて, 縮約後の制 振モデルの剛性 kⁱは次式で表される⁸⁾。

$$k'_{i} = \frac{1\omega^{2} \cdot m'_{i} \cdot q'_{i} + k'_{i+1} \left(q'_{i+1} - q'_{i}\right)}{1\varphi'_{i} - \varphi'_{i-1}}$$
(11)

縮約後の付加系の剛性 k'aiは,縮約後の制振モデルの剛性 k'i と非制振モデルの剛性 k'i を用いて次式で表される。

$$k'_{ai} = k'_i - k'_{fi} \tag{12}$$

縮約後の付加系の降伏変形 Savi は、次式で求められる。

$$\delta'_{ayi} = R'_{ayi} \cdot h' \tag{13}$$

ここで, *R'ayi*: 縮約後の付加系降伏層間変形角, *h'*: 縮約 後のモデルにおける質点間距離を表す。*R'ayi*は対応する層 の降伏層間変形角と等しいと仮定し, *n* および縮約前の付 加系降伏層間変形角*Rayi*を用いて,式(14)より算出される。

$$R'_{ayi} = R_{ayni} \tag{14}$$

また, 縮約後の質点間距離 h'は, n を用いて次式で求め られる。

$$h' = nh \tag{15}$$

よって,式(12),(13)より,付加系の降伏せん断力 Q'ayi は次式で求められる。

$$Q'_{ayi} = k'_{ayi} \cdot \delta'_{ayi} \tag{16}$$

3.3. 制振モデルの固有値および応答値比較

固有値解析および時刻歴応答解析より得られた結果を もとに,縮約後のモデルの妥当性について検討を行う。な お,応答値は12波のアンサンブル平均をプロットしてお り,代表例としてダンパー量2%の結果を示している。

Table 2 に固有値解析より得られた 60 質点制振モデル (60DOF)の1次~3次固有周期(1760~3760)と10 質点制 振モデル(10DOF)の1次~3次固有周期(1710~3710)を 比較したものを, Fig. 9 に固有値解析より得られた 60 質 点制振モデルの1次~3次固有モード(1¢~3¢)と10 質点 制振モデルの1次~3次固有モード(1¢~3¢)を比較した もの示す。Table 2 および Fig. 10より,非制振モデル(2.3 節)と同様に,高次になると誤差が生じているが,概ね一 致していることが確認できる。



Fig. 10(a) ~ (c)に時刻歴応答解析より得られた層間変形 角 R,応答速度 V および応答加速度 A を示す。Fig.10(a)よ り,建物下部に近づくにつれて,応答値が一致していない ことが確認できる。Fig.10(b),(c)より,建物頂部に近づく につれてわずかに誤差が発生していることがわかる。こ れは,10 質点非制振モデルと同様の原因が考えられる。 しかし,各応答値ともに概ね60 質点制振モデルと一致し

- *2東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)
- *3株式会社 竹中工務店



ており、10 質点制振モデルが妥当であることがわかった。 なお、ダンパー量 1%、4%ともに制振モデル縮約前後での 固有値および応答値が概ね一致していることを確認して いる。

4. まとめ

本報その1では、ダンパーを設置していない非制振モ デルおよびダンパーを設置した制振モデルを対象とし、 時刻歴応答解析の効率を高めることを目的に、質点数を 低下させた縮約モデルの精度について検討した。その結 果、わずかな誤差があるものの応答値が概ね一致してお り、それぞれの縮約モデルの妥当性を示すことができた。

謝辞及び参考文献は、その2にまとめて示す。

^{*1}東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology Associate Prof. , FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Takenaka Corporation