

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	縮約質点数の変化が超高層制振建物における履歴型ダンパーの塑性化判定に及ぼす影響
Title(English)	EFFECTS OF CHANGES IN CONTRACTED DEGREE OF FREEDOM ON PLASTICIZATION PREDICTION OF HYSTERETIC DAMPER IN HIGH RISE PASSIVELY CONTROLLED BUILDING
著者(和文)	平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之
Authors(English)	Koki Hiratsuka, Daiki Sato, Hideyuki Tanaka
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 120-125
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 120-125
発行日 / Pub. date	2020, 11

縮約質点数の変化が超高層制振建物における履歴型ダンパーの 塑性化判定に及ぼす影響

EFFECTS OF CHANGES IN CONTRACTED DEGREE OF FREEDOM ON PLASTICIZATION PREDICTION OF
HYSTERETIC DAMPER IN HIGH RISE PASSIVELY CONTROLLED BUILDING

平塚 紘基¹⁾ 佐藤 大樹²⁾ 田中 英之³⁾
Koki HIRATSUKA¹⁾, Daiki SATO²⁾ and Hideyuki TANAKA³⁾

ABSTRACT

The current wind-resistant design of structures is performed under the assumption that the main structure is kept to an elastic state and mainly relies on design guidelines for load recommendations on buildings. However, as the building's height increases, it becomes subjected to stronger external wind forces. In this circumstance, if a hysteretic damper is installed in a high-rise building, there is a possibility that the damper may behave plastically due to larger external wind forces. Therefore, understanding the plasticity behavior of hysteretic dampers installed in high-rise buildings under the load recommendations on buildings will pave the way to easily evaluate the elasto-plastic behavior of these passively controlled buildings. For this reason, the authors propose a method to determine the hysteretic damper plasticity based on the load recommendations on buildings and examine the effect of using an equivalent model with reduced degree of freedom.

Key Words: High-rise passively controlled building, Hysteretic damper, Wind response analysis, Time history analysis, Wind resistant design, Reduced model

1. はじめに

超高層建物は、風外力が建物の高層化に伴い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、現状の耐風設計では想定される最大級の強風に対して、主要な構造体をほぼ弾性状態で留めるように設計が行われている¹⁾。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(以下、ダンパー)を採用すると、風外力に対しても塑性化することが考えられる。近年このような問題を踏まえて、日本免震構造協会によって免震建築物における免震層の風外力に対する応答状態ランク分け²⁾が提案され、風外力に対する塑性化が許容され始めたものの、制振構造には適用できないのが現状である。

風応答時における制振構造の塑性化を把握するためには、一般的に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解析を行うと、地震に比べ圧倒的に継続時間が長いこと¹⁾、応答値をアンサンブル平均する必要があること³⁾、対象とする層数が多いことから膨大な時間と計算量が必要となり設計者の大きな負担となる。一方で風応答時における弾性挙動は、建築物荷重指針・同解説⁴⁾(以下、荷重指針)を用いて簡

¹⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

²⁾ 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

³⁾ 株式会社竹中工務店 技術研究所 主任研究員 (〒270-1395 千葉県印西市大塚 1 丁目 5-1)

易的に評価することができ、建築物の耐風設計を行う際に一般的に用いられている。そのため荷重指針を応用してダンパーの塑性化を簡易的に判定できれば、風に対する超高層制振建物の弾塑性挙動を実用的に把握しやすくなる。また層数を縮約することで、塑性化判定をより効率的に行うことが可能となる。これらのことを踏まえて筆者らは、縮約モデルを含めたダンパーの塑性化を簡易的に判定する手法の提案を行っている^{5), 6)}。しかしながら、風洞実験結果を用いない場合における荷重指針の荷重評価は、これまでに蓄積された風洞実験結果に基づき、風荷重を近似的にモデル化して算出しており⁷⁾、風洞実験結果を用いる時刻歴応答解析結果と比較すると誤差が発生する可能性がある。そのため、風荷重を時刻歴応答解析を用いることなくより精度よく評価するためには、風洞実験結果を用いるスペクトルモード解析⁸⁾を用いることが有用である。そこで本報では、縮約したモデルも含め、スペクトルモード法により塑性化判定を行い、縮約質点数の変化が塑性化判定手法に与える影響について検討を行う。なお、本報では構造物の振動により風力特性が変化しないことを前提とし、空力不安定振動の問題は対象外とする。また、変動成分のみの風直交方向を対象に検討を行う。

2. 縮約方法, 解析対象モデルおよび風外力概要

2.1 縮約方法概要^{5), 6)}

多自由度モデルを少自由度モデルに縮約する手法について述べる。縮約後の剛性は、それを未知量とした1次固有振動特性の等価性条件を逆問題的に解くことで決定する。すなわち、縮約前後の1次固有円振動数と1次モードが等しくなることを等価性条件とする(Fig. 1(a))。縮約後の質量は、縮約前の縮約代表位置間の各層の質量を、上層側の縮約代表位置において単純に加えたものとする(Fig. 1(b))。また、風外力の縮約は、質量の縮約と同様に縮約前の縮約代表位置間の各層に作用する外力を上層側の縮約代表層位置において単純に加えたものとする(Fig. 1(b))。

次にフレーム(2.2 節参照)に対して並列に挿入する

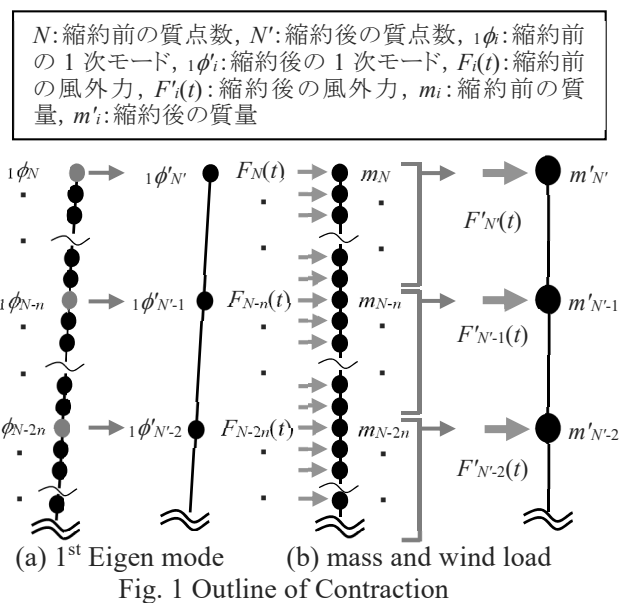
付加系(2.3 節参照)の縮約方法について述べる。縮約後の付加系の剛性は、縮約後のシステム(フレーム+付加系, 2.3 節参照)の剛性と縮約後のフレームの差によって算出する。また、縮約後の付加系降伏変形は、付加系縮約前後の降伏層間変形角が等しくなることを等価性条件とすることで決定する。縮約後の付加系の降伏層せん断力は上述した付加系剛性および付加系降伏変形を用いて算出する。なお、以後「 $'$ 」つきのものは、縮約後の値を表す。

2.2 フレーム概要

本報では、文献9)の高さ300 m、辺長比 $D/B = 1$ (D, B :建築物の幅, 奥行)のモデルからアウトリガーを除いた超高層建物を対象とする60質点せん断型モデル(フレーム)を用いる。フレームの1次固有周期は、 $1T_f = 7.49$ sであり、構造減衰を剛性比例型として、 $1T_f$ に対して、1次減衰定数 $1\xi_f = 1\%, 2\%, 4\%$ の3種類を用いる。なお、フレームは弾性状態を保つものとする。

2.3 ダンパーの実効変形を考慮した付加系概要

1層目のダンパー降伏せん断力係数(以下、ダンパー量) α_{dy1} は、0.01, 0.02, 0.04の3パターンとし、ダンパーの降伏層間変形角 R_{dy} は1/600とする。各層のダンパー降伏せん断力 Q_{dyi} は、第1層目のダンパー降伏層せん断力 Q_{dy1} を基準とし、Ai分布に基づく設計用地震層せん断力分布を基に4段階とする(Fig. 2)。 Q_{dy1} は、 α_{dy1} を用いて式(1)で表される。ダンパーの降伏変形 δ_{dyi} は R_{dy} および質点間距離 h_i を用いて以下の式(2)で表される。式(1), (2)より求まる値を用いて、ダンパー剛性 k_{di} は式(3)より求められる。



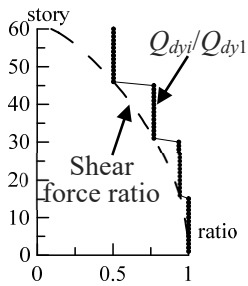


Fig. 2 Yield strength ratio

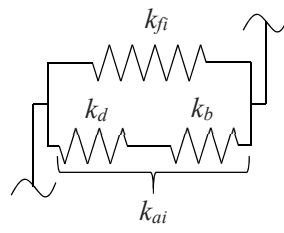


Fig. 3 Model of frame with Additional component

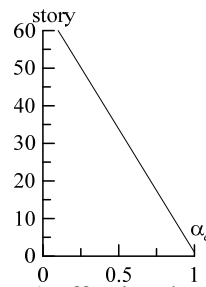


Fig. 4 Effective damper deformation

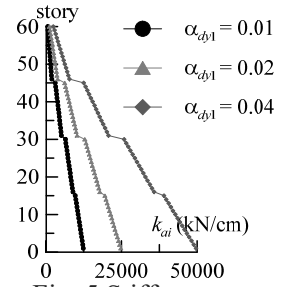
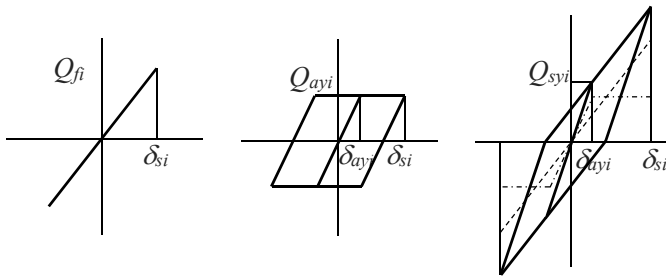


Fig. 5 Stiffness distribution



(a) Frame (b) Additional component (c) System

Fig. 6 Restoring force characteristic

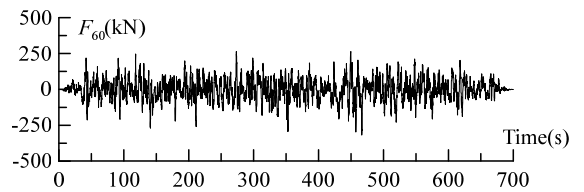


Fig. 7 Time history of wind force

$$Q_{dy1} = \alpha_{dy1} \cdot W, \quad \delta_{dy1} = R_{dy} \cdot h_i, \quad k_{ai} = Q_{dy1} / \delta_{dy1} \quad (1), (2), (3)$$

ここで、 W :全重量を表す。しかし、モデル化したダンパーを、主架構をモデル化したバネに対して並列配置したせん断型モデルを用いるとダンパーに有効に働く変形(以下、実効変形)を過大に評価することとなり、危険側の評価となる¹⁰⁾。そこで本報では、ダンパーの実効変形を考慮した付加系を用いる。Fig. 3 に付加系剛性 k_{ai} の概念図を示す。Fig. 3 より k_{ai} はフレーム剛性 k_{fi} に並列に配置されたダンパー剛性 k_{di} に直列配置されたバネ剛性 k_{bi} を合わせた総称としている。また、 k_{ai} を算出する際に用いる実効変形比(層間変形に対する実効変形の比) α_{ei} は、第 1 層目を 1、第 60 層目を 0.1 とし、第 1 層目から第 60 層目まで直線となるように仮定している(Fig. 4)。また、付加系降伏層せん断力 Q_{ay1} は、 Q_{dy1} と同値である。よって以上の条件から、付加系の剛性 k_{ai} は式(4)で表される。なお、付加系降伏変形 δ_{ay1} は式(5)で表される。

$$k_{ai} = Q_{ay1} / (\delta_{dy1} / \alpha_{ei}), \quad \delta_{ay1} = (\delta_{dy1} / \alpha_{ei}) \quad (4), (5)$$

Fig. 5 に α_{dy1} ごとの k_{ai} の高さ方向分布を示す。また、本報では Fig. 3 に示すようなフレームに付加系を設置したモデルを以後システムと呼ぶこととする。なお、付加系は粘性減衰を有さない。

2. 4 システム降伏層せん断力

Fig. 5 にフレーム、付加系、システムの復元力特性を示す。Fig. 6 中に δ_{si} はシステムの変形を表し、 Q_{fi} は δ_{si} 時のフレーム層せん断力を表す。システム降伏層せん断力 Q_{sy1} は、Fig. 6 に示した復元力特性より、次式より算出される。

$$Q_{sy1} = k_{fi} \cdot \delta_{ay1} + Q_{ay1} \quad (6)$$

2. 5 風外力概要

構造物に作用する風外力は風洞実験結果(地表面粗度区分Ⅲ)を用いた。層風力係数の時刻歴データは、高さ方向に 14 点で測定している。このデータを、対象建物の高さ、質点数および建物地点東京(基準風速 $U_0 = 36 \text{ m/s}$)での再現期間 500 年風外力へ変換を行った。なお、小地形の影響、季節係数および風向係数の影響は考慮していない。風外力は 1 組につき 60 質点分の波形を 0.05 s 刻み 14000 ステップとし、24 組取り出した。

Fig. 7 に本報で用いる頂部風外力 F_{60} の時刻歴波形を示す。本報では時刻歴応答解析の過渡応答の影響を避けるため、各波形前後に 50 s のエンベロープを設け、中間の 600 s(10 分)間での応答を評価に用いる。なお、本報では前述したように変動成分のみの風直交方向風外力を対象とし、24 波のアンサンブル平均により応答値を評価する。

3. 付加系塑性化判定

本章では、システムの弾性 1 次の状態(固有周期, 減衰, モード)を用いて、システムに作用する層せん断力をスペクトルモード解析により算定し、その値に基づき付加系の塑性化判定を試みる。なお、後述する算出式に関しては縮約前後で同様であることから統一的に示すものとする。

3.1 塑性化判定概要

本報では、塑性化判定に文献 2)に基づく風応答状態ランクを適用する。文献 2)より、ランク A: 風荷重に対して弾性挙動を示すケース、ランク B: 風荷重に対して弾性限を超えるが、風荷重の変動成分に対しては弾性挙動をするケース、ランク C: 風荷重に対して弾性限を超え、風荷重の変動成分に対しても弾塑性挙動をするケースと定義されている。本報では、変動成分のみの風直交方向を対象とすることから風応答状態ランクはランク A およびランク C のみとなる。各ランクは次式で判定する。

$$wL Q_{si} < Q_{syi} \dots \text{ランク A}, \quad wL Q_{si} > Q_{syi} \dots \text{ランク C} \quad (7), (8)$$

ここで、 $wL Q_{si}$: システム弾性時の風直交方向層せん断力を表す。なお、実際の各ランクの履歴曲線は Fig. 8 のようになる。

3.2 システム弾性層せん断力

システム弾性層せん断力 $wL Q_{si}$ は、スペクトルモード解析により算出する。文献 7)では、境界振動数(1次固有振動数の 1/3)を境に準静的成分と共振成分に分離し、スペクトルモード解析を行っているが、本報では波形分離することなくスペクトルモード解析を行う。 i 層の風外力時刻歴 $F_i(t)$ とシステム弾性時における 1次モード ${}_1\phi_{si}$ を用いて 1次モード風外力時刻歴 ${}_1F(t)$ は式(9)より算出する。1次モード風外力のパワースペクトル密度 ${}_1S_F(f)$ とシステム弾性時の 1次モード剛性 ${}_1K$ および 1次減衰定数 ${}_1\xi_s$ を用いてスペクトルモード解析により、1次モード応答変位 ${}_1q_s$ の標準偏差 ${}_1\sigma_{qs}$ は式(10)より算出される。なお、システムの 1次減衰定数 ${}_1\xi_s$ は、付加系が減衰を持たない(2.3 節)ことから、 ${}_1\xi_f$ よりも低下する。よって ${}_1\xi_s$ は式(12)より算出される。

$${}_1F(t) = \sum_{i=1}^N {}_1\phi_{si} \cdot F_i(t), \quad {}_1\sigma_{qs} = \left[\int_0^{\infty} |{}_1H(f)|^2 \cdot {}_1S_F(f) df \right]^{1/2} \quad (9), (10)$$

$${}_1H(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_s} \right)^2 + 2i {}_1\xi_s \frac{f}{f_s}} \cdot \frac{1}{{}_1K}, \quad {}_1\xi_s = ({}_1f_f / {}_1f_s) \cdot {}_1\xi_f \quad (11), (12)$$

ここで、 ${}_1H(f)$: システム弾性時における 1 次の周波数応答関数、 i : 虚数単位、 f_s : システム弾性時の 1 次固有振動数、 f_f : フレームの 1 次固有振動数を表す。風応答時における多質点系でのシステム弾性時の層間変形の標準偏差 ${}_1\sigma_{\delta si}$ は、式(13)より算出される。式(13)で求めた ${}_1\sigma_{\delta si}$ を用いて、式(14)よりシステム弾性時における最大層間変形 δ_{si} を算出する。なお、式(14)中に示す g_p はピークファクターであり、式(15)より求める。

$${}_1\sigma_{\delta si} = {}_1\sigma_{qs} \cdot ({}_1\phi_{si} - {}_1\phi_{si-1}), \quad \delta_{si} = {}_1\sigma_{\delta si} \cdot g_p, \quad g_p = \sqrt{2 \ln(600 {}_1f_s) + 1.2} \quad (13), (14), (15)$$

システム弾性時における層せん断力 $wL Q_{si}$ を、式(14)の δ_{si} とシステム剛性 k_{si} を用いて次式より算出する。

$$wL Q_{si} = k_{si} \cdot \delta_{si} \quad (16)$$

4. 塑性化判定結果

本章では、縮約前後の塑性化判定と 60 質点 (60DOF) システム弾塑性時における時刻歴応答解析結果 (以下、弾塑性解析結果) の比較を行い、縮約質点数の変化が塑性化判定に及ぼす影響について検討を行う。なお、縮約後の質点数は 30 質点, 20 質点, 10 質点, 5 質点 (30DOF, 20DOF, 10DOF, 5DOF) である。

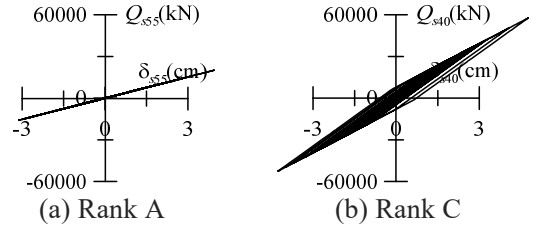


Fig. 8 Hysteresis curves ($\alpha_{dy1} = 0.01, {}_1\xi_f = 1\%$)

4.1 システム弾塑性時の時刻歴応答解析結果における塑性化の評価

本報では、塑性化判定と同様に弾塑性解析結果においても文献 2)に基づく風応答状態ランクを適用する。Fig. 9 にスペクトルモーダル解析より算出した wLQ_{si} (wLQ'_{si}) を用いた場合の判定結果と弾塑性解析結果を比較したものを示す。図中に示す大きいカラーのプロットは弾塑性解析結果におけるシステムがどのランクかを判断するプロットとなっており、小さいプロットである判定結果が大きいプロット上にある場合、判定結果と弾塑性解析結果が一致していることを表す。弾塑性解析結果は、各層で 24 波中、ランク A が 13 波以上ある場合はランク A、ランク C が 12 波以上ある場合はランク C とする。また、凡例に示すかっこ内の数字は、24 波中に何波が弾塑性解析結果で判断しているランクとなっているかを表しており、Rank A(24-21)の場合、24 波中ランク A と判断した結果が 24 波から 21 波あることを意味する。

Fig. 9 より、弾塑性解析結果において、 $1\xi_f$ が増加することによって、わずかながらランク C となる層が少なくなっていることがわかる。これは $1\xi_f$ の増加に伴い、変動成分が減少したためである。また、ランクが変化する層付近において判断しているランクの波数が他の層に比べ少なくなっていることが確認でき、ランクごとのばらつきが大きくなっていることが確認できる。

4.2 スペクトルモーダル解析結果のシステム弾性層せん断力を用いた塑性化判定

まず初めに $1\xi_f = 1\%$, 2% において、全ての α_{dy1} で縮約前後で塑性化判定に大きな変化がないことが確認できる。

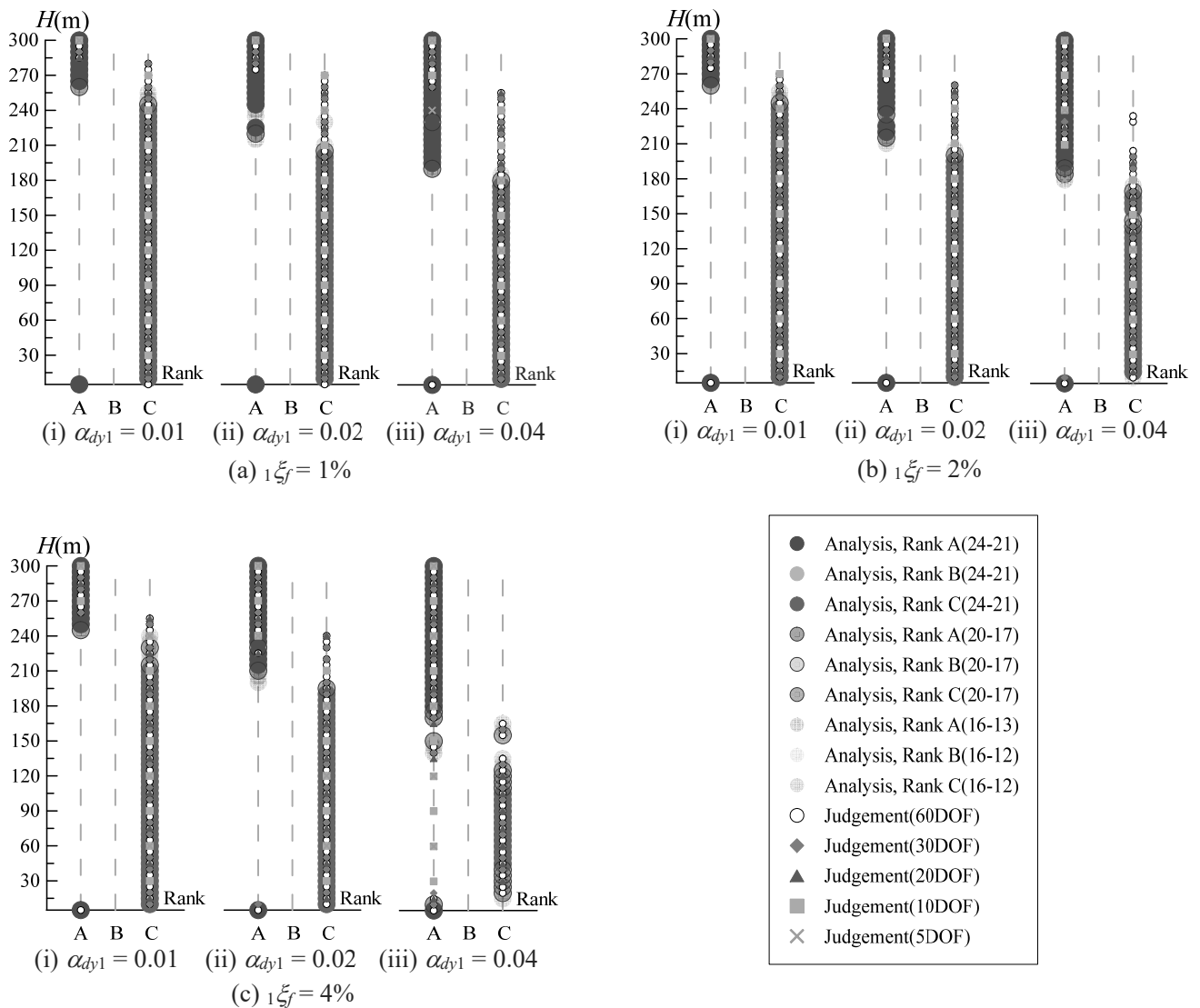


Fig. 9 Comparison of plasticity judgement and elasto-plastic analysis

縮約前後に関わらず塑性化する層を判定できており、誤差が生じている範囲は弾塑性解析結果においてランク A である層でランク C と判定しており、安全側の判定誤差であることが確認できる。一方で $1\xi_f = 4\%$ は、 $\alpha_{dy1} = 0.01, 0.02$ で $1\xi_f = 1\%, 2\%$ と同様の結果が得られたことに対して、 $\alpha_{dy1} = 0.04$ で、10DOF と 5DOF において塑性化する層を判定できておらず、危険側の判定誤差となっていることがわかる。これは縮約することで、スペクトルモーダル解析により算出した応答値に誤差が生じていることが原因として考えられる。

5. まとめ

本報では、縮約したモデルも含め、スペクトルモーダル法により履歴型ダンパーの塑性化判定を行い、縮約質点数の変化が塑性化判定手法に与える影響について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1). システム弾塑性時の時刻歴解析結果において、風応答状態ランクが変化する層付近で判断しているランクの波数が他の層に比べ少なくなっており、ランクごとのばらつきが大きい。
- (2). システム弾性 1 次の状態(固有周期, 減衰, モード)のスペクトルモーダル解析から得られたシステム弾性層せん断力 wLQ_{si} (wLQ'_{si} : 「'」つきのものは縮約後を表す)を用いた塑性化判定において、構造減衰 $1\xi_f = 4\%$, ダンパー量 $\alpha_{dy1} = 0.04$ で、縮約後の 10 質点, 5 質点を除いて塑性化する層を精度よく判定でき、判定誤差が安全側の判定誤差となった。
- (3). 縮約後の質点数が縮約前の質点数に比べ大きく異なる場合(本報では 10 質点および 5 質点), 応答値の誤差が生じることから、精度よく塑性化判定をできない可能性が考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムによるものです。ここに記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 2004.6
- 2) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐風設計指針, 2012
- 3) 吉江慶祐, 北村春幸, 大熊武司, 和田章: 時刻歴応答解析結果におけるアンサンブル平均のばらつき, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.233-234, 2005.7
- 4) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015
- 5) 田中英之, 平塚紘基, 佐藤大樹: 履歴型ダンパーを有する超高層建物における塑性化予測の効率的な縮約質点数 その 1 固有値および応答値の比較, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.55-56, 2020.9
- 6) 平塚紘基, 佐藤大樹, 田中英之: 履歴型ダンパーを有する超高層建物における塑性化予測の効率的な縮約質点数 その 2 塑性化予測の比較, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.57-58, 2020.9
- 7) 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 2 建築物の風応答・風荷重評価/CFD 適用ガイド, 2017.2
- 8) 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 鈴木悠也, 北村春幸: 変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 30 号, pp.79-84, 2012.2
- 9) 岡日出夫, 笠井和彦, 渡井一樹, 佐藤大樹, 前田周作, 鈴木庸介: 建築物のさらなる高層化に向けた曲げせん断モデル化手法の提案 その 2 既往手法の適用限界とその要因, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.955-956, 2019.9
- 10) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治: 実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp.543-552, 2011.3