

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘性ダンパーと履歴ダンパーを連層配置した超高層鋼構造建物の簡易モデル作成手法
Title(English)	EQUIVALENT SHEAR SPRING MODELING METHOD OF SUPER TALL STEEL STRUCTURE BUILDING WITH CONTINUOUS ARRANGEMENT OF VISCOUS DAMPERS AND HYSTERETIC DAMPERS
著者(和文)	添田幸平, 佐藤大樹, 石井正人, 北村春幸
Authors(English)	Kohei Soeta, Daiki Sato, Masato Ishii, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 768, pp. 197-207
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 768, pp. 197-207
発行日 / Pub. date	2020, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

粘性ダンパーと履歴ダンパーを連層配置した超高層鋼構造建物の簡易モデル作成手法

EQUIVALENT SHEAR SPRING MODELING METHOD OF SUPER TALL STEEL STRUCTURE BUILDING WITH CONTINUOUS ARRANGEMENT OF VISCOUS DAMPERS AND HYSTERETIC DAMPERS

添田幸平*¹, 佐藤大樹*², 石井正人*³, 北村春幸*⁴

*Kohei SOETA, Daiki SATO, Masato ISHII
and Haruyuki KITAMURA*

In design, simple model is frequently used but this has not been done for “combination-system”. Thus, this paper proposes a method to create an equivalent shear spring model of “combination-system” consisting of its characteristic values, dampers and their support members, and frames. The parameters for the model are calculated by conducting static analysis of the building frame in four states (i.e. states N, R, pN and pR). These parameters are vital to evaluate the seismic control effect of the “combination-system”. This paper shows that the proposed model reproduces the results of time-history analysis of member models.

Keywords : high-rise building, seismic control, hysteretic damper, viscous damper, equivalent shear spring model, combination-system

超高層建物, 制振構造, 履歴ダンパー, 粘性ダンパー, バネ系モデル, 併用配置

1. はじめに

超高層建築物は、大地震や想定を超える地震に対しても建物の変形・損傷を低減することを目的としてパッシブ制振構造を用いることが一般的となっている。

パッシブ制振構造は、制振ダンパーによる粘性減衰エネルギーあるいは塑性履歴エネルギーの吸収から、建物の振動エネルギーを低減して建物の振動および主架構の損傷を低減するものである¹⁾。剛性の確保と大地震時のエネルギー吸収能力に優れている履歴ダンパーと、中小地震から大地震までエネルギー吸収した後揺れの早期収束を図れる粘性ダンパーを併用し²⁾、(1) 高い耐震性能の確保、(2) ばらつきを考慮した応答バランスの確保、(3) コストバランスに配慮した構造計画も見られる。また、建築計画の制約や経済的制約の中で行う部分的耐震改修に対応するため、ダンパーを部分配置した研究も見られる^{例えば 3), 4)}。

曲げ変形の大きい超高層制振建物は中層から上層にかけてダンパーの制振性能が低下する恐れがある。筆者らの一部は、制振性能の低下を改善するために、履歴ダンパーと粘性ダンパーを混合連層配置した制振構造（以後、併用モデル）を提案し、ダンパー配置計画の有用性を骨組モデルによる時刻歴応答解析⁵⁾と縮小模型実験⁶⁾から確認した。筆者ら⁷⁾は、下層に履歴ダンパーを設置し、上層に粘性ダンパーを配置した地上30階の超高層鋼構造建物を用い、粘性ダンパー設置層で制振性能が改善され、履歴ダンパーおよび粘性ダンパーをそれぞれ単独に用いたときよりもエネルギー吸収効率が高く

なることを骨組モデルによる時刻歴応答解析結果から確認した。

一方、時刻歴応答解析により適切なダンパーの配置と量を検討する際、時刻歴応答解析のみに頼り過ぎると初期設定の見間違いにより発散に陥ることがある。時に現実とかけ離れた低減効果を期待することや、安全性・居住性の向上まで見失ってしまう恐れがある⁸⁾。このような状況を避けるために、ダンパーと応答の関係を包括的に把握できる応答予測手法を用いて概略設計を行い、その過程で得られる指標から制振性能を把握することが必要である。

そこで、本研究の目的は、最大値だけでなくエネルギーなどの累積値に着目した制振効果の理解に繋がる応答予測手法を示し、応答予測手法の過程で得られる指標に基づく、併用モデルの制振性能評価法を提案することである。

これらを展開する上で簡易モデルを必要とするが、併用モデルに対する簡易モデルの作成手法に関する研究は無く、特にエネルギーなどの累積値を評価した研究は無い。併用モデルに対しても既往の簡易モデルをそのまま用いる場合や、精度は高いが計算負荷も高い骨組モデルを用いているのが現状である。しかし、併用モデルに対して既往の簡易モデルを適用した場合、骨組モデルによる時刻歴応答解析結果（ダンパーによるエネルギー吸収量）を再現できないことが指摘されている⁹⁾。

これらの問題点を踏まえ、本論文は併用モデルに対して有用な簡易モデル（以後、本モデルと称す。）の作成手法を示す。本論文で提案する簡易モデルの作成手法は、笠井・岩崎¹⁰⁾により1層構造につ

*¹ (株)久米設計構造設計部 修士(工学)

*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)日建設計構造設計グループ 博士(工学)

*⁴ 東京理科大学 副学長・博士(工学)

Structural Engineering Division, KUME SEKKEI Ltd., M.Eng.

Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng.

Structural Design Division, Nikken Sekkei Ltd., Dr.Eng.

Vice President, Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

いて提案され、石井・笠井¹¹⁾により多層構造について提案された「骨組特性値」を用いた手法（以後、既往手法と称す。既往手法を用いて作成したモデルを既往モデルと称す。）を、併用モデルに適用できるよう改良するものである。なお、筆者らが簡易モデルに重要性を置く理由は、柱・梁・制振ダンパーなどの膨大な部材からなる骨組モデルが質点系のように少数な特性値に縮約されるだけでなく、得られた特性値が制振性能を可視化し、同一尺度で定量的に評価できるからである。

本論文の構成を以下に示す。2章に、地上30層の超高層鋼構造建物を用い、既往手法の問題点とその原因分析を示す。3章に、問題点に対する改良方法の提案を示す。4章に、履歴ダンパーと粘性ダンパーを高さ方向に様々な組み合わせで併用配置した建物に対して、簡易モデルを作成し、骨組モデルと時刻歴応答解析結果を比較することで、本モデルの精度検証を示す。なお、本論文は2012年日本建築学会関東支部研究報告⁹⁾において発表した内容に新たな分析結果および考察を加え、作成したものである。

本論文での用語の定義・表現を以下に列記する。

- ・ i 層の諸元には、左添え字 i を付ける。
- ・ 簡易モデル（バネ系）の諸元には、右添え字 s を付ける。
- ・ ダンパー部の諸元には、右添え字 d を付ける。また、斜め軸方向に配置するブレースタイプの諸元は、水平方向の換算値として示す。

2. 既往手法の問題点の抽出

本章では、地上30層の超高層鋼構造建物を用い、応答結果から既往モデルの問題点を確認し、原因がどこにあるか応答結果を用いて分析する。

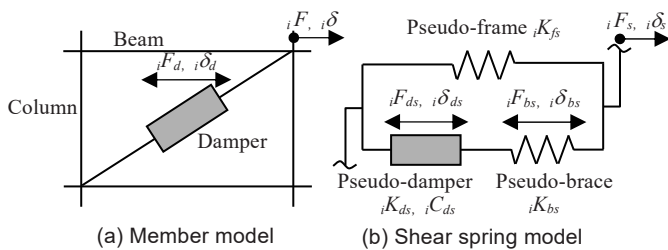


Fig.1 Correspondence between member model and shear spring model

2.1 既往手法の概要^{10),11)}

Fig.1 に示すように、既往モデル (Fig.1(b)) は、擬似フレーム (Pseudo-frame)、擬似ブレース (Pseudo-brace) および擬似ダンパー (Pseudo-damper) から構成される。擬似ブレースと擬似ダンパーは直列結合される。各諸元の設定手順について、Fig.2を用いて詳しく述べる。Fig.2(a)に併用モデルのモデル図を示し、Fig.2(b)およびFig.2(c)に既往手法である状態N解析およびR解析の概念図を示し、Fig.2(d)およびFig.2(e)に本手法である状態pN解析およびpR解析の概念図 (4章、後述) を示す。

擬似フレーム剛性 ${}_iK_{fs}$ および骨組特性値 ${}_i\alpha_N$ は、主架構のみの弾性骨組モデル (Fig.2 (b) : 状態 N (No-damper)) を用い、擬似ブレース剛性 ${}_iK_{bs}$ は主架構の制振ダンパー設置位置に剛性が極端に高い (ダンパー部の変形が限りなく 0) 弾性バネを挿入したモデル (Fig.2 (c) : 状態 R (Rigid-damper)) を用い、2 ケースの静的弾性解析結果から得られ、式 (1) によって算出される。なお、本論文では文献¹¹⁾に倣い、静的解析時の荷重は A_i 分布に基づくものとする。

$${}_i\alpha_N = {}_i\delta_{dN} / {}_i\delta_N, {}_iK_{bs} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iK_{dR}, {}_iK_{dR} = {}_iF_{dR} / {}_i\delta_R \quad (1a, b, c)$$

ここで、 ${}_iK_{dR}$: ダンパー設置箇所の架構剛性、 ${}_i\delta_d$: ダンパー設置箇所の相対変形の水平成分、 ${}_i\delta$: 架構の層間変形、 ${}_iF_d$: ダンパー設置箇所の弾性バネが負担する軸力の水平成分、右下の添え字 N および R は状態 N および状態 R の計算値であることを示す。

これらの特性値を用いて擬似フレーム、擬似ブレース、擬似付加系の諸元を設定する。各層のダンパーの骨組特性値、擬似ブレース剛性および擬似ダンパー部の諸元の設定を以下に示す。また、簡易モデルと骨組モデルの対応関係についても以下に示す。

◆主架構 :

- ・ 擬似フレーム剛性 ${}_iK_{fs} = {}_iK_N$ (2)

- ・ 対応関係 ${}_iF_s = {}_iF, {}_i\delta_s = {}_i\delta$ (3a,b)

◆履歴ダンパー設置層 :

- ・ 骨組特性値 ${}_i\alpha_N$ 、擬似ブレース剛性 ${}_iK_{bs} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iK_{dR}$ (4)

- ・ 諸元 ${}_iK_{d1s} = ({}_i\alpha_N)^2 \cdot {}_iK_{d1}, {}_iK_{d2s} = ({}_i\alpha_N)^2 \cdot {}_iK_{d2}, {}_iF_{dys} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iF_{dy}$ (5a,b,c)

ここで、 ${}_iF_{dy}$: 履歴ダンパーの降伏せん断力

- ・ 対応関係 ${}_iF_{ds} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iF_d, {}_i\delta_{ds} = {}_i\delta_d / {}_i\alpha_N$ (6a,b)

◆粘性ダンパー設置層 :

- ・ 骨組特性値 ${}_i\alpha_N$ 、擬似ブレース剛性 ${}_iK_{bs} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iK_{dR}$ (7)

- ・ 諸元 ${}_iC_{ds} = ({}_i\alpha_N)^2 \cdot {}_iC_d, {}_iK_{ds} = ({}_i\alpha_N)^2 \cdot {}_iK_d$ (8a,b)

- ・ 対応関係 ${}_iF_{ds} = {}_i\alpha_N \cdot {}_iF_d, {}_i\delta_{ds} = {}_i\delta_d / {}_i\alpha_N$ (9a,b)

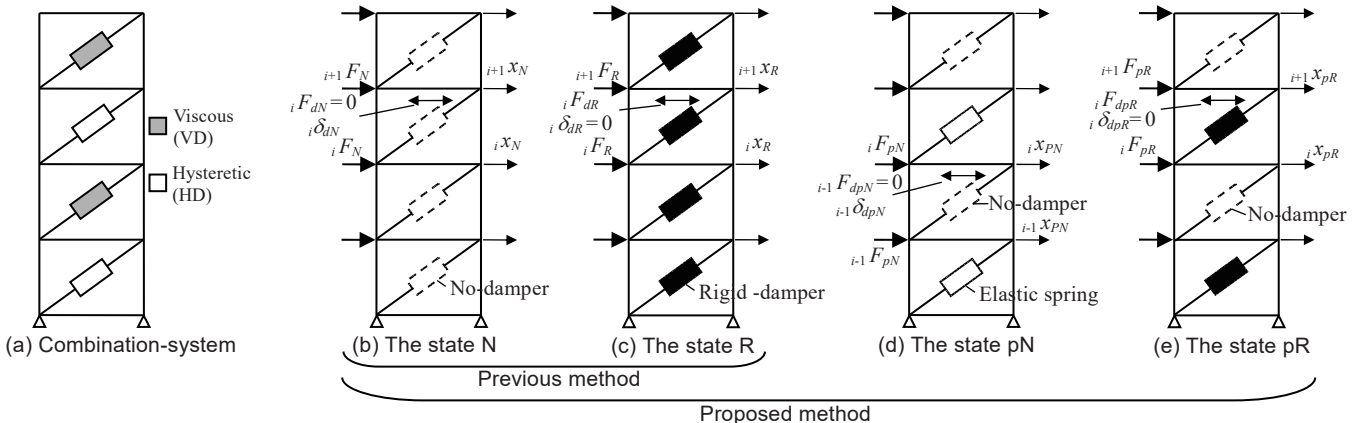
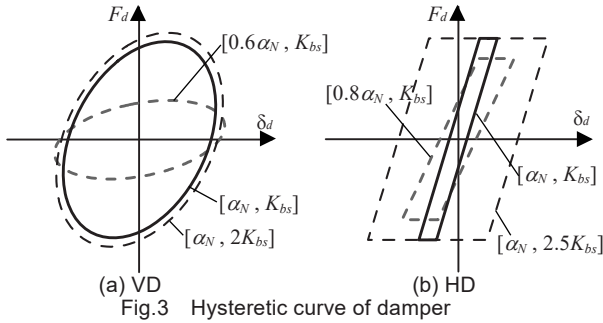


Fig.2 (a)Member model and the state (b)N, (c)R, (d)pN and (e)pR

α_N は層間変形に対するダンパー変形の水平成分(以後、実効変形比と称す。)の上限値¹⁰⁾を示し、 K_{bs} は簡易モデルにおけるダンパー設置箇所の架構剛性¹¹⁾を示す。擬似ブレースと擬似ダンパーを直列結合した要素に正弦波変形を与えた時の擬似ダンパー部の履歴曲線をFig.3に示す。Fig.3(a)より、粘性ダンパー(VD)は α_N が小さくなると粘性ダンパーの負担荷重にロスが生じ、履歴曲線の高さが小さくなる。また、擬似ブレース剛性が高くなると粘性ダンパーの変形のロスが小さくなり、履歴曲線の幅は大きくなる。Fig.3(b)より、履歴ダンパー(HD)も同様の傾向を示す。骨組特性値 α_N および擬似ブレース剛性 K_{bs} が高いほど履歴曲線を囲む面積は大きくなり、高い制振効果を得られる。



2.2 検討用建物の概要、入力地震動の概要および応答解析結果

検討対象建物は、Fig.4に示す地上30階の超高層鋼構造建物⁷⁾であり、解析はX方向のみを対象とする。主架構の弾性1次固有周期 T_{f1} は4.46sである。なお、主架構は弾性状態を保つものとし、構造減衰は架構の T_{f1} に対して2%となる剛性比例型とする。

ダンパーの配置はY2およびY3通りに連層配置とする(Fig.4(b))。本論文では、上下層間で位相差が極端に大きくなる、ブレース型の履歴ダンパーと粘性ダンパーを連層配置した場合を想定する。近年、ダンパー効率を上げるために様々なダンパー配置計画がなされていることを鑑み、履歴ダンパーを全層に配置したモデルHD30、粘性ダンパーを全層に配置したモデルVD30、下層に履歴ダンパー・上層に粘性ダンパーを配置し境界層を25層、20層、15層、10層、5層としたモデル5種(それぞれHD25, HD20, HD15, HD10, HD05)、下層に粘性ダンパー・上層に履歴ダンパーを配置し境界層を25層、20層、15層、10層、5層としたモデル5種(それぞれVD25, VD20, VD15, VD10, VD05)、履歴ダンパーと粘性ダンパーを3層毎に交互に配置したモデルADの計13種の様々なパターンの配置を用いる

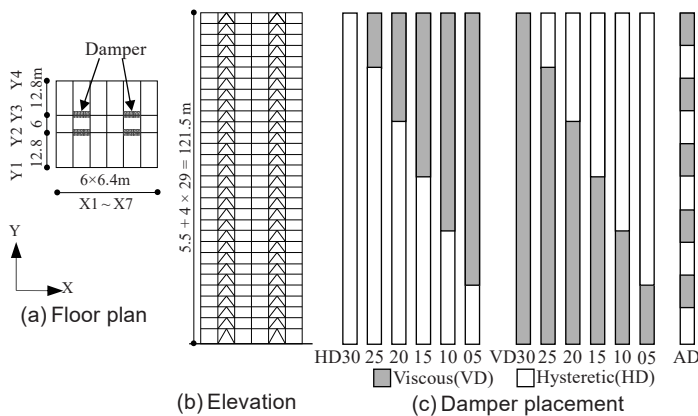


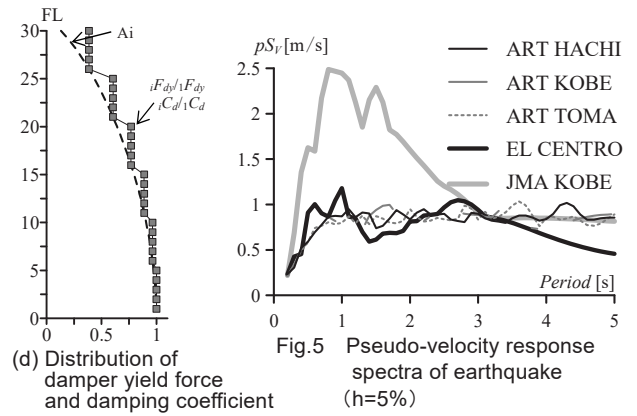
Fig.4 Outline of the 30th floor building models

(Fig.4(c))。併用モデルの各層のダンパーは、HD30で決めたダンパーの各階の降伏せん断力とVD30で決めた各階のダンパーの粘性係数をその階の値として、併用モデルに適用する。履歴ダンパーには、LY225材からなる座屈拘束ブレースを用い、第1層の降伏せん断力係数 $\alpha_{dy}=0.025$ を採用する。また、HD30による各層の履歴ダンパーの降伏せん断力 F_{dy} は、Fig.4(d)に示すように、第1層のダンパー降伏せん断力 ${}_1F_{dy}$ を基準とし、Ai分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに5層ごとの6段階とした。粘性ダンパーは、線形粘性ダッシュポットと弾性バネを直列結合したモデルを用いる。各層の弾性バネ剛性 K_d と粘性係数 C_d との関係は長周期建物用ダンパーとして $K_d=4.5C_d$ とする¹⁾。第1層の線形粘性ダッシュポットの粘性係数 ${}_1C_d$ は、後述するART HACHI入力時によるHD30およびVD30の入力エネルギー E に対するダンパーによるエネルギー吸収量 ${}_1w_d$ の総和の比 $\Sigma {}_1w_d/E$ が等しくなるように設定する⁷⁾。なお、1層の付加粘性減衰定数 ${}_1h_d = {}_1C_d \omega_{f1} / (2 {}_1K_f) = 5.0\%$ である。また、VD30による各層の粘性ダンパーの粘性係数 ${}_1C_d$ は、Fig.4(d)に示すように、第1層の粘性係数 ${}_1C_d$ を基準とし、Ai分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに5層ごとの6段階とした。

検討用入力地震動は、速度応答スペクトルを $S_V=0.8\text{ m/s}$ ($h=5\%$)とした模擬波3波および最大速度を 0.5 m/s に基準化した観測波2波の計5波を用いる。模擬波の位相特性はHACHINOHE 1968 EW(以降ART HACHI)、JMA KOBE 1995 NS(以降ART KOBE)、TOMAKOMAI 2003 NS(以降ART TOMA)を採用する。観測波は、EL CENTRO 1940 NS波(以降EL CENTRO)、JMA KOBE 1995 NS波(以降JMA KOBE)を採用する。Fig.5に擬似速度応答スペクトル $pS_V(h=5\%)$ を示す。

Fig.6にHD15のART HACHI波による各階の最大層間変形角 ${}_iR$ 、各階の最大層せん断力 ${}_iQ$ およびダンパーによるエネルギー吸収量 ${}_1w_d$ を示す。最大層間変形角(Fig.6(a))および最大層せん断力(Fig.6(b))に着目すると、既往モデル(Previous)は骨組モデル(Member)を概ね再現できているが、ダンパーによるエネルギー吸収量(Fig.6(c))は境界層付近で骨組モデルを再現できていない。粘性ダンパー部分の ${}_1w_d$ は骨組モデルと比べて既往モデルが大きく、履歴ダンパー部分の ${}_1w_d$ は骨組モデルと比べて既往モデルが小さいことが確認できる。以上の傾向は、他のダンパー配置においても同様であった。

以降の分析結果は、紙幅の都合上HD15のART HACHI波による応答結果のみを示す。



(d) Distribution of damper yield force and damping coefficient

Fig.5 Pseudo-velocity response spectra of earthquake ($h=5\%$)

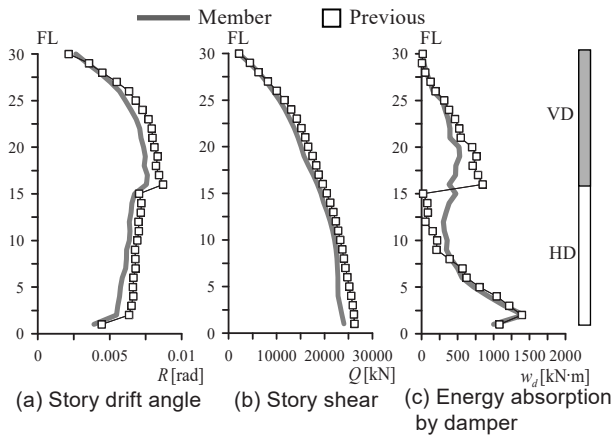


Fig.6 Comparison of response (HD15, ART HACHI)

2.3 問題点の原因分析

前節で示した、既往モデルが骨組モデルのダンパーによるエネルギー吸収量を再現できないという問題点を、まずダンパー部の履歴曲線から分析する。既往モデルと骨組モデルにおけるエネルギー吸収量の乖離が大きいHD15の16層および15層(粘性ダンパーと履歴ダンパーとの境界層)に設置したダンパー部の履歴曲線をFig7に示す。なお、時間軸は単位時間あたりのダンパーによるエネルギー吸収量が多い部分を含む19~28sとする。

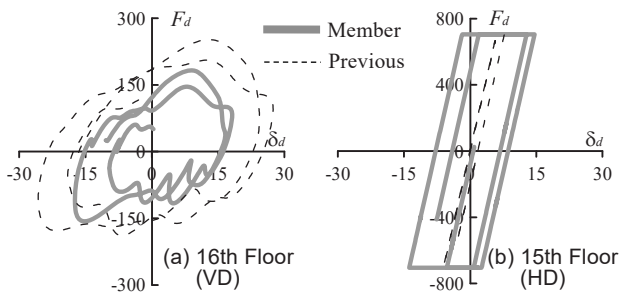


Fig.7 Hysteretic curve of damper (HD15, ART HACHI)

まず、粘性ダンパーを設置した16層について示す(Fig.7(a))。履歴曲線の高さ(最大荷重)に着目すると、既往モデル(Previous)は骨組モデル(Member)を再現できていないことが確認できる。これは2.2節で示したように、 α_N が過大評価されていると考えられる。履歴曲線の幅(最大変位)についても、既往モデルは骨組モデルを再現できていないことが確認でき、 K_{bs} が過小評価されていると考えられる。(7)式より、 α_N が小さくなると $K_{bs}(=\alpha_N K_{dr})$ も小さくなるため、総じて α_N が適切に評価されていないと考えられる。

次に、履歴ダンパーを設置した15層について示す(Fig.7(b))。履歴曲線の高さ(最大荷重)に着目すると、既往モデルは骨組モデルを再現できていることが確認できる。これは α_N が適切に評価できていると考えられる。一方、履歴曲線の幅(最大変位)に着目すると、既往モデルは履歴ダンパーの変形のロスが大きく、骨組モデルを再現できていないことが確認できる。これは2.2節で示したように、 K_{bs} が過小評価されていると考えられる。

適切に評価されていないと考えられる、粘性ダンパー設置層の α_N について示す。先述した通り α_N は実効変形比の上限値であることから、粘性ダンパー設置層の実効変形比の上限値が α_N と一致するか確認する。HD15による粘性ダンパーの量を0とし、履歴ダンパーのみを部分的に配置した状態の実効変形比(Effective deformation ratio)

α_e の高さ方向分布をFig.8に示す。全層にダンパーを設置していない主架構モデル(Frame)の見かけの実効変形比(ダンパー非設置層の見かけのダンパー変形の水平成分の最大値/層間変形の最大値)も重ねて示す。なお、HD15および主架構モデルによるダンパー非設置層の見かけのダンパー変形は、ダンパー剛性を限りなく0とした見かけの弾性バネの変形から算出する。Fig.8から、HD15において粘性ダンパーを設置することを想定している、ダンパー非設置層(16~30層)の実効変形比は、主架構モデルの実効変形比よりも小さくなっている。履歴ダンパー設置層においては、付加剛性に伴い曲げ変形が誘発され実効変形比が減少している。以上のことから、履歴ダンパーを高さ方向に部分的に配置すると、主架構の実効変形比と比べてダンパー非設置層の実効変形比が減少することがわかる。つまり、併用モデルによる、粘性ダンパー設置層の実効変形比の上限値が減少することとなり、 α_N を改良する必要がある。

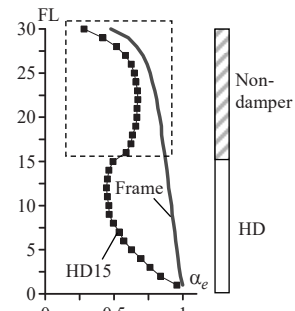


Fig.8 Effective deformation ratio (ART HACHI)

次に、履歴ダンパー設置層の K_{bs} について示す。先述した通り K_{bs} はダンパー設置箇所(15層)の架構剛性であることから、履歴ダンパーおよび粘性ダンパー設置層における曲げ変形の性状を確認する。Fig.9にHD30, HD15による層間変形 $i\delta$ 、ダンパーの水平変形 $i\delta_d$ 、曲げ変形 $i\delta_m(=i\delta-i\delta_d)$ 、ダンパーの負担せん断力 iF_d の時刻歴波形を示す。代表して15層(履歴ダンパー設置層)および16層(粘性ダンパー設置層)を示す。ただし、 $i\delta, i\delta_d$ および $i\delta_m$ は各層の層間変形の最大値 $i\delta(\max)$ で基準化し、 iF_d は最大値 $F_d(\max)$ で基準化したものを示す。

Fig.9(a)に示す全層に履歴ダンパーを設置したHD30において、ダンパー変形が最大時に、15層および16層ともにダンパー荷重が最大を示していることが確認できる。また、曲げ変形はダンパーの負担せん断力と概ね同位相である。架構が変形することでダンパーがせん断力を負担し、その反力により柱の負担軸力(柱の軸伸縮)が誘発され、層間変形に対する全体曲げ変形の割合が大きくなる¹²⁾。一方、Fig.9(b)に示すHD15において、ダンパー変形が最大時に、履歴ダンパーが負担するせん断力は最大を示すが、ダンパー荷重が速度に比例する粘性ダンパーでは、ダンパー変形が最大時に負担せん断力はほぼ0を示していることが確認できる。また、HD15における15層の曲げ変形はHD30と概ね同位相であるが、曲げ変形の振幅はHD30と比べて小さい。Fig.10に示す層間変形の最大値に対する曲げ変形の最大値(曲げ変形比)の高さ方向分布からも確認できる。履歴ダンパーが負担するせん断力と粘性ダンパーが負担するせん断力との間に位相差が生じ、HD15による境界層付近(10~15層)の曲げ変形比がHD30と比べて減少し曲げ剛性が高くなっている。つまり、併用モデルによる履歴ダンパー設置箇所(15層)の架構剛性 K_{bs} を改良する必要がある。

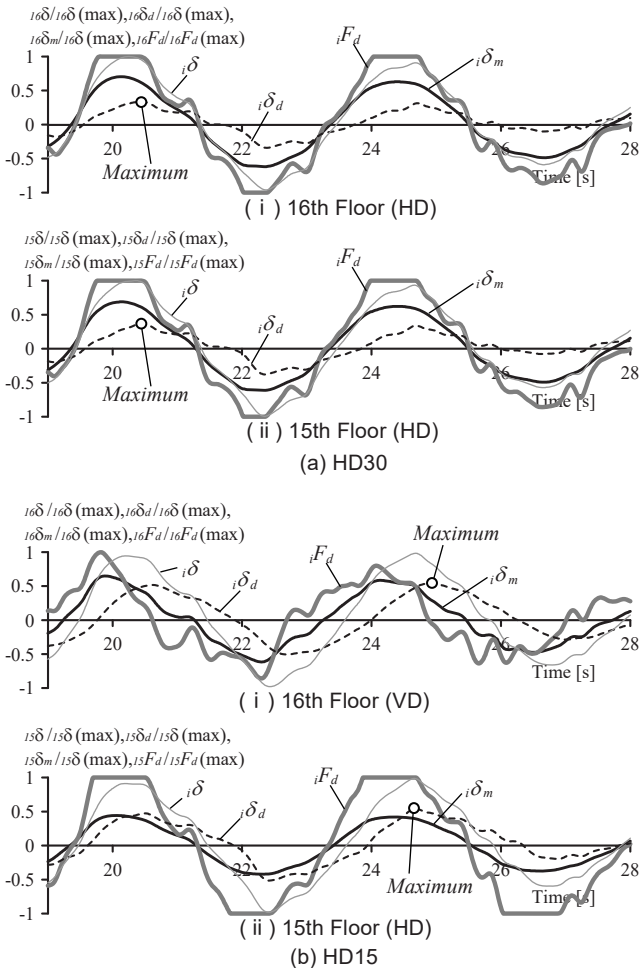


Fig.9 Time history (HD15, ART HACHI)

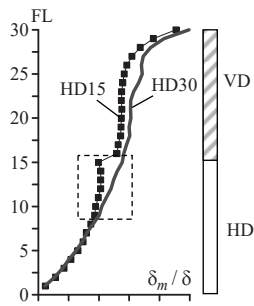


Fig.10 Bending deformation ratio (ART HACHI)

3. 問題点に対する改良方法の提案

既往の手法^{10),11)}は、状態 N・R を満たす骨組モデルの剛性マトリクスと簡易モデルの剛性マトリクスが対応するよう各諸元 (K_f , α_N , K_{dR} , K_{bs}) を導出している。併用モデルにも対応できる各諸元を数式により厳密に導出することはできないため、本論文は、状態 pN・R 解析から得られる指標を補正する手法を提案する。本手法について、Fig.2 を用いて述べる。

既往手法である状態 N 解析 (Fig.2(b)) および状態 R 解析 (Fig.2(c)) に加え、Fig.2(d) および Fig.2(e) 示す 2 ケースの静的解析 (状態 pN・pR 解析) を追加で行い、各種の骨組特性値を計算し、これらの特性値を用いて既往の特性値を補正する。前節で示した問題点 2 つを改良する状態 pN および状態 pR の概要について以下に示す。

まず、問題点① (履歴ダンパーを高さ方向に部分的に配置すると

ダンパー非設置層の実効変形比が減少すること) の影響を考慮する方法については、既往モデルの粘性ダンパー設置層の骨組特性値 $i\alpha_N$ を状態 pN から得られる特性値を用いて補正することで上記の影響を考慮する。状態 pN (Fig.2(d), partial-No-damper) は、履歴ダンパー設置層のみに、弾性バネを挿入したモデルの各層に A_i 分布などの外力を作用させるものであり、 i 層の粘性ダンパー設置層による骨組特性値の補正值 $i\alpha_{pN}$ は式 (10) から求められる。なお、弾性バネの剛性は使用する履歴ダンパーの初期剛性とする。

$$i\alpha_{pN}(K_d) = i\delta_{dpN} / i\delta_{pN} \tag{10}$$

ここで、右下の添え字 pN は状態 pN の計算値であることを示し、(K_d) は履歴ダンパーの初期剛性 K_d によって変化する値であることを意味する (付録 A)。 $i\alpha_{pN}$ は履歴ダンパーの量および設置層数に依存するものである (4.1 節、付録 A に示す)。

次に、問題点② (履歴ダンパーが負担するせん断力と粘性ダンパーが負担するせん断力との間に位相差が生じることから、全層に履歴ダンパーを設置したときに比べて併用モデルにおける履歴ダンパー設置箇所の架構剛性が増加すること) の影響を考慮する方法については、既往モデルの履歴ダンパー設置箇所の架構剛性 iK_{dR} を状態 pR から得られる特性値を用いて補正することで上記の影響を考慮する。状態 pR (Fig.2(e), partial-Rigid-damper) は、粘性ダンパー設置層のダンパーを外し、履歴ダンパー設置層のみに剛性が極端に高い弾性バネを挿入したモデルに、 A_i 分布などの外力を作用させるものであり、 i 層の履歴ダンパー設置箇所の架構剛性の補正值 iK_{dpr} は式 (11) から求められる。

$$iK_{dpr} = iF_{dpr} / i\delta_{pR} \tag{11}$$

ここで、右下の添え字 pR は、状態 pR の計算値であることを示す。 iK_{dpr} はダンパー量に依存せず、粘性ダンパー設置層数に依存する。

Fig.11 に骨組モデルから簡易モデルへの変換手続きを示す。各種 (状態 N, R, pN, pR) の静的弾性解析を行うことから特性値を計算し、これらの特性値を用いて擬似フレーム、擬似ブレース、擬似付加系の諸元を設定する。各層のダンパーの骨組特性値、擬似ブレース剛性および擬似ダンパー部の諸元の設定を以下に示す。また、簡易モデルと骨組モデルの対応関係についても以下に示す。

◆主架構：

- ・擬似フレーム剛性 $iK_{fs} = iK_N$ (12)
- ・対応関係 $iF_s = iF, i\delta_s = i\delta$ (13a,b)

◆履歴ダンパー設置層：

- ・骨組特性値 $i\alpha_N$ 、擬似ブレース剛性 $K_{bs} = i\alpha_N iK_{dpr}$ (14)

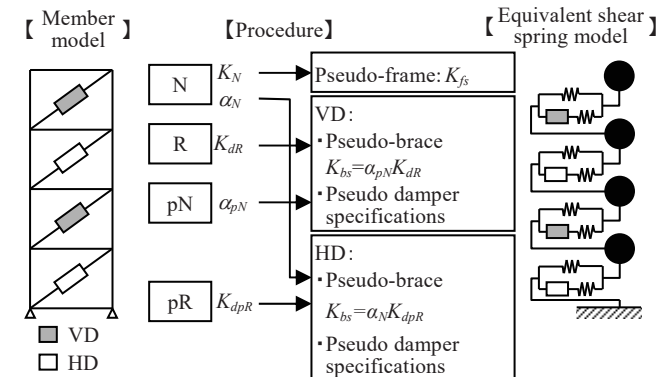


Fig.11 Procedure for the conversion from member model to equivalent shear spring model

・ 諸元 $iK_{d1s} = (i\alpha_N)^2 iK_{d1}$, $iK_{d2s} = (i\alpha_N)^2 iK_{d2}$, $iF_{dys} = i\alpha_N iF_{dy}$ (15a,b,c)

・ 対応関係 $iF_{ds} = i\alpha_N iF_d$, $i\delta_{ds} = i\delta_d / i\alpha_N$ (16a,b)

◆粘性ダンパー設置層:

・ 骨組特性値 $i\alpha_{pN}$, 擬似ブレース剛性 $iK_{bs} = i\alpha_{pN} iK_{dR}$ (17)

・ 諸元 $iC_{ds} = (i\alpha_{pN})^2 iC_d$, $iK_{ds} = (i\alpha_{pN})^2 iK_d$ (18a,b)

・ 対応関係 $iF_{ds} = i\alpha_{pN} iF_d$, $i\delta_{ds} = i\delta_d / i\alpha_{pN}$ (19a,b)

4. 提案手法の適用と精度検証

4.1 $i\alpha_{pN}$ および iK_{bs} の性状

ダンパー配置を変えた計 13 種のモデル (Fig.4(c)) による $i\alpha_{pN}$ および iK_{bs} の高さ方向分布を Fig.12 に示す。なお、 iK_{bs} は iK_{fs} で基準化したものを示す。 $i\alpha_{pN}$ の算出には、 $i\alpha_{dy} = 0.025$ の時の初期剛性に相当する弾性バネを設置する。履歴ダンパー設置層の $i\alpha_{pN}$ は補正を行わないため $i\alpha_N$ を示す。Fig.12(a) から、併用モデルによる粘性ダンパー設置層の $i\alpha_{pN}$ は HD30 の $i\alpha_N$ よりも小さな値を示すことが確認できる。つまり、状態 pN は、粘性ダンパー設置層による実効変形比

の上限値を減少する (問題点①) 効果を持つことが確認できる。また、併用モデルによる粘性ダンパー設置層の $i\alpha_{pN}$ は履歴ダンパー設置層が多いほど低下することが確認できる。これは、2.3 節で示したように、履歴ダンパーがせん断力を負担することで、層間変形に対する全体曲げ変形の割合が大きくなり、履歴ダンパー量が多いほど、また集中的に連層配置した場合に顕著となるためである¹²⁾。履歴ダンパー量が多いほど、 $i\alpha_{pN}$ が減少することについては付録 A で確認している。

Fig.12(b) から、併用モデルによる履歴ダンパー設置層の iK_{bs} は、全層に同一種類のダンパーを配置したときと比べて増加することが確認できる。特に境界層で突出している。状態 pR は履歴ダンパー設置箇所の架構剛性を増加する (問題点②) 効果を持つ。

4.2 時刻歴解析による精度検証

骨組モデルの応答 (Member) を精算値として提案手法の精度検証を行う。Fig.13, 14 に ART HACHI 波による各階の最大層間変形角 R およびダンパーによるエネルギー吸収量 w_d を示す。また、状態 N

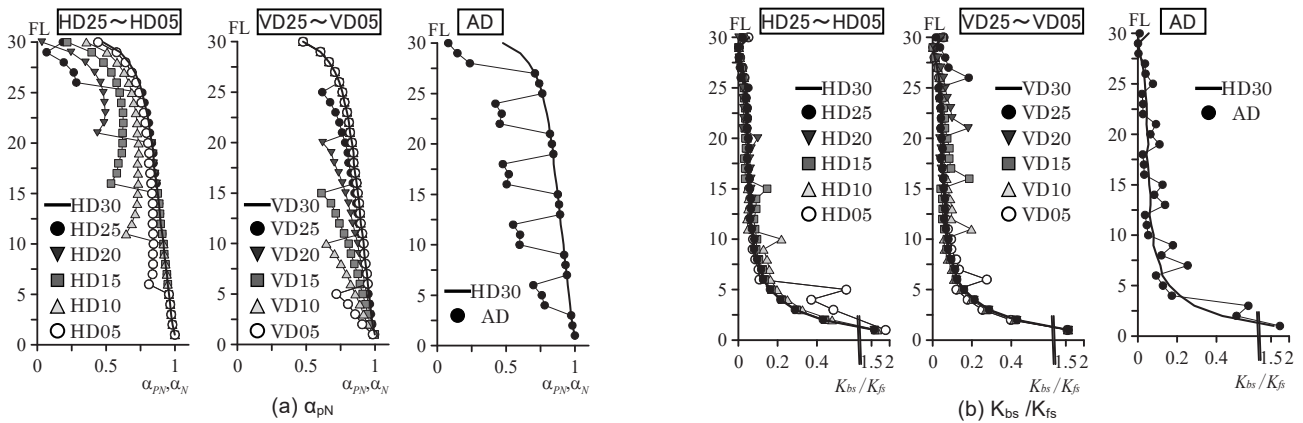


Fig.12 Comparison of distribution of α_{pN} and K_{bs}

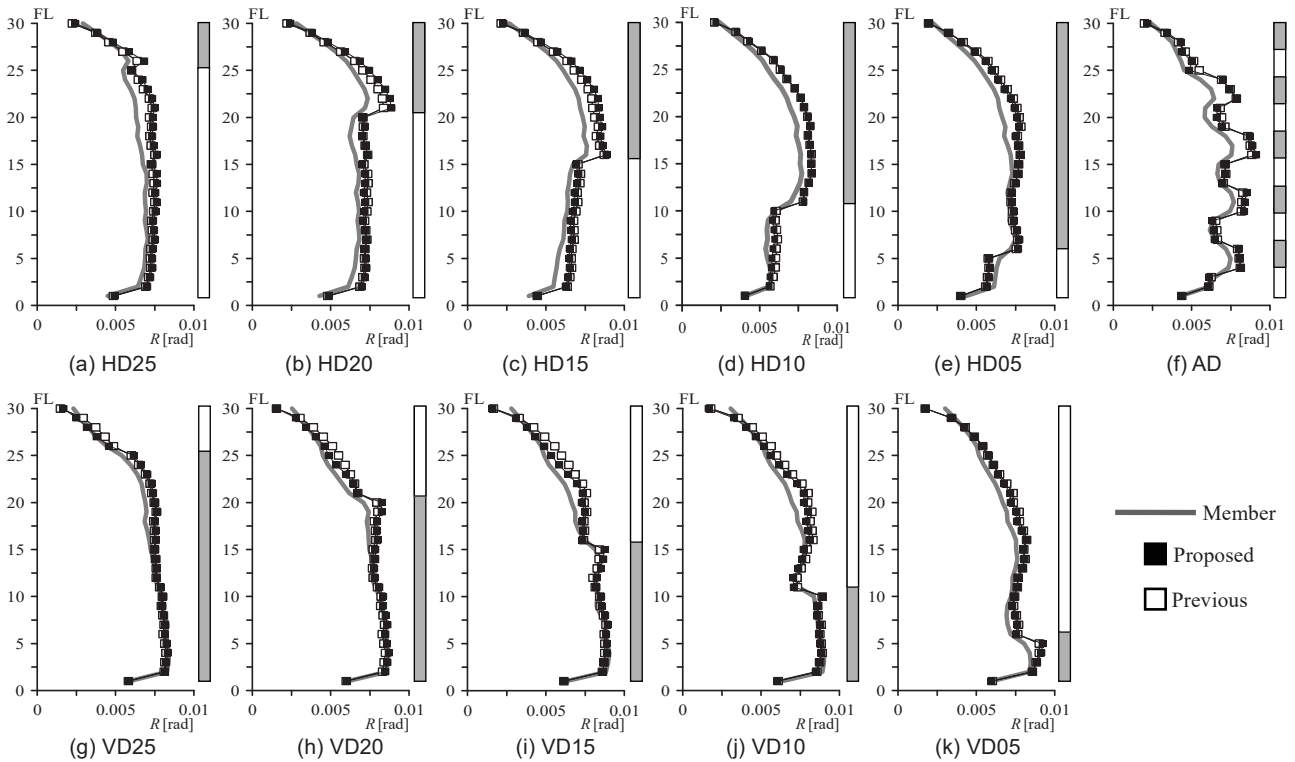


Fig.13 Comparison of story drift angle (ART HACHI)

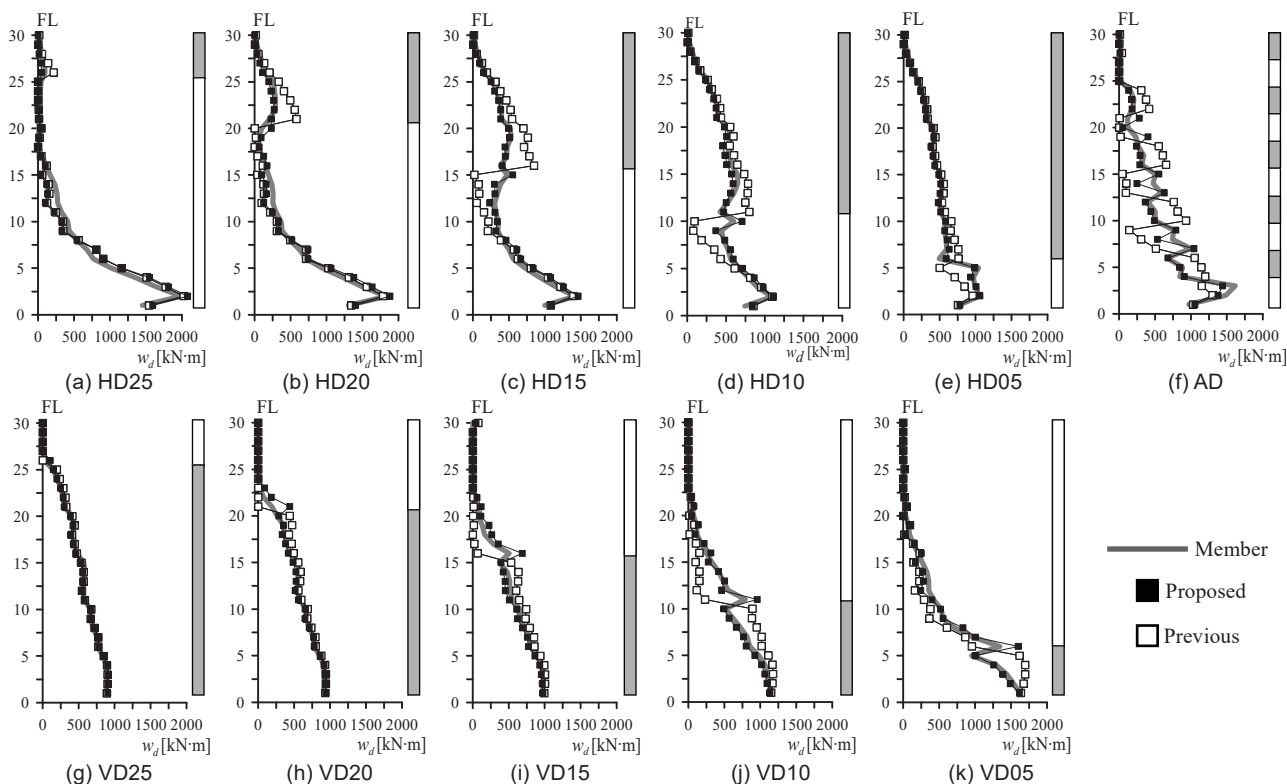


Fig.14 Comparison of energy absorption by damper (ART HACHI)

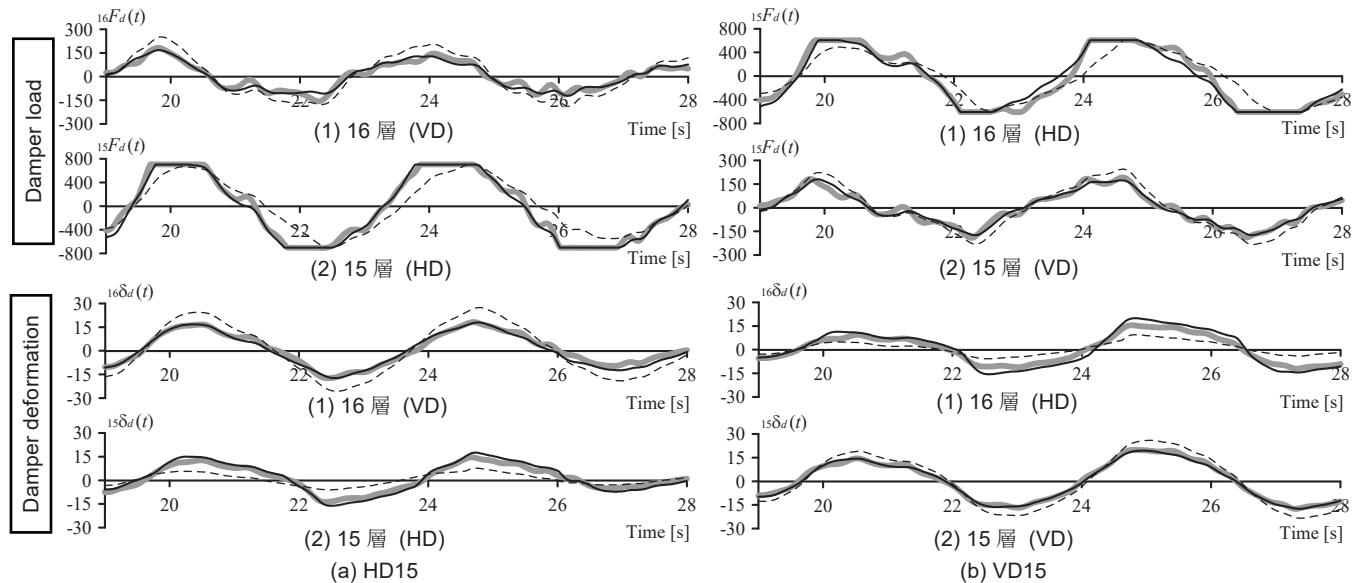


Fig.15 Time history of damper load and damper deformation(ART HACHI)

Member Proposed Previous

および状態 R のみを用いたモデルの応答（既往モデル：Previous）、状態 pN および状態 pR を用いたモデルの応答（本モデル：Proposed）を重ねて示す。Fig.13 の層間変形角 θ に着目すると、ダンパー配置を変えた 13 種いずれにおいても、本モデルおよび既往モデルとの間に大きな差は見られない。中間階から上層にかけて本モデルは骨組モデルに対して安全側の評価を得ているが、他の地震波では危険側の評価を得る場合も確認できている。本モデルの応答は骨組モデルの応答と概ね一致していることから、設計段階のパラメトリックスタディに対して十分有効である。

Fig.14 のダンパーによるエネルギー吸収量 w_d に着目すると、ダンパー配置の異なる 13 種のモデルいずれにおいても、既往モデルは境

界層付近で骨組モデルを再現できていない。一方、本モデルは境界層付近の w_d が改善され、骨組モデルの w_d を精度良く再現している。この原因を分析するために、Fig.15 に HD15 および VD15 による 15 層および 16 層（履歴ダンパーと粘性ダンパーとの境界層）のダンパー荷重および変形の時刻歴波形を示す。入力地震動は ART HACHI である。HD15 および VD15 において、いずれも既往モデルは骨組モデルの最大荷重および位相を再現していないが、本モデルは骨組モデルの振幅および位相を精度良く再現している。ダンパー荷重による最大値の再現性から、 α_N および α_{pN} が適切に評価されているといえる。ダンパー変形による最大値の再現性から、 K_{dR} および K_{dPR} が適切に評価されているといえる。Fig.16 に示すダンパーの履歴曲

線からも、既往モデルと比べて提案モデルの再現性が高いことが確認できる。

次に、JMA KOBE 入力時の骨組モデルと簡易モデルの応答の比較を Fig.17, 18 に示す。代表して HD15, VD15 および AD について示す。層間変形角 R に着目すると、いずれも高次モードの影響を受け、上層で大きな層間変形が生じており、本モデルおよび既往モデルともに精度は確保できていない。ダンパーによるエネルギー吸収量 w_d に着目すると、本モデルは骨組モデルの分布形状を概ね再現しているが、ART HACHI 入力時と比べると精度は劣る。

Fig.19 にダンパー配置 13 種 (Fig.1(c)) かつ入力地震動 5 波 (Fig.2) の全てのケースにおける各層の骨組モデルと本モデルの応答比較を示す。層間変形角 R は、前述したように JMA KOBE ではばらつきが大きく、精度が劣るが、他の位相特性では概ね誤差 ±15% 以内に収まることが確認できる。ダンパーによるエネルギー吸収量 w_d は、概ね ±15% 以内に収まり精度は良好である。履歴ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_{dy} = 0.005, 0.015, 0.035$ についても同様の結果を得られている (付録 C)。また、付録 D に示すように、地上 8 階の中低層鋼構造建物に対しても本モデルの有用性を確認している。

5. まとめ

骨組特性値を用いた簡易モデルの作成手法を拡張し、履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列連層配置した建物 (併用モデル) に対して有用な簡易モデルの作成手法を示した。精度検証には、履歴ダンパーおよび粘性ダンパーをブレース型に設置した地上 30 階の超高層鋼構造建物を用いた。以下に得られた知見を示す。

- 1) 既往手法は、問題点①: 粘性ダンパー設置層の実効変形比 (ダンパー変形の水平成分の最大値 / 層間変形の最大値) の上限値が減少する。問題点②: 履歴ダンパーの負担せん断力と粘性ダンパーの負担せん断力との間に位相差が生じるため、併用モデルの全体曲げ変形が緩和される。を考慮できない。
- 2) 1)の問題点を改善するために、既往手法 (状態 N・R 解析) に、状態 pN 解析および状態 pR 解析を加える手法を提案した。状態 pN は、粘性ダンパー設置層による実効変形比の上限値を減少する (問題点①) 効果があり、状態 pR は履歴ダンパー設置箇所の架構剛性を増加する (問題点②) 効果がある。
- 3) 提案する簡易モデルは、限定された例題建物による検証であるが、様々なダンパー配置、ダンパー量および地震波に対して、骨組モデルの応答を精度良く再現できる。

本モデルは、ダンパーの変形が最大時に粘性ダンパーの負担荷重が小さい場合に適用されるものである。したがって、大きく傾いた楕円の履歴曲線を示す粘性系のダンパーに対しての適用可能かどうかの検証は今後の課題とする。

本研究の最終目的である、各種の骨組特性値および応答予測手法の過程で得られる指標に基づく併用モデルの制振性能評価法については、次報で示す予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(株) 日建設計の吉江慶祐氏、ならびにオイレス工業 (株) の宮崎充氏、佐々木和彦氏、岩崎雄一氏から貴重な御助言・御協力をいただきました。感謝の意を表します。

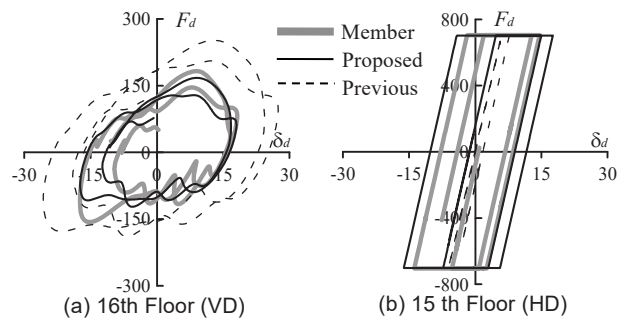


Fig.16 Hysteretic curve of damper (HD15, ART HACHI)

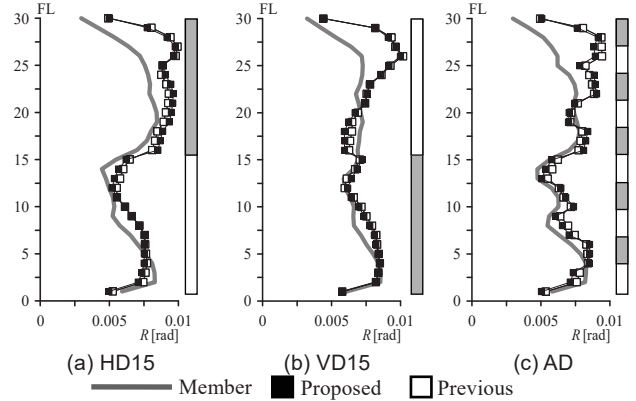


Fig.17 Comparison of story drift angle (JMA KOBE)

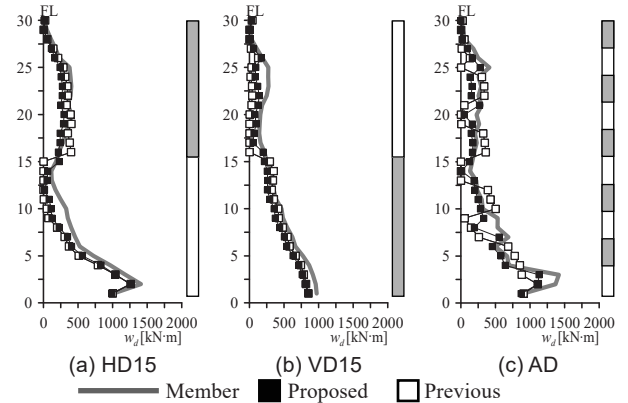


Fig.18 Comparison of energy absorption by damper (JMA KOBE)

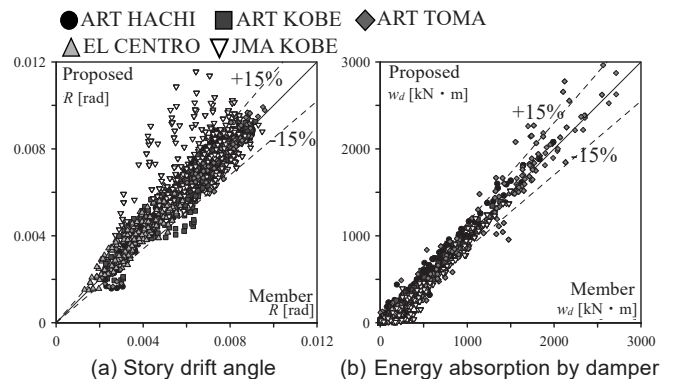


Fig.19 Comparison of member model and proposed model

参考文献

1) The Japan Society of Seismic Isolation (JSSI), Manual for design and construction of passively-controlled buildings (Third edition), 2013. 1 (in Japanese)
(社) 日本免震構造会 (JSSI), パッシブ制振構造設計・施工マニュアル

第3版, 2013. 1

2) Uchikosi M.: Basics of seismic control Appropriate Selection Method of Passive Control Devices, Kenchikugijutsu, Inc., No. 796, pp. 86-87, 2016. 5 (in Japanese)
打越瑞昌: 制振の基本 制振部材の適切な選定方法, 建築技術, No. 796, pp. 86-87, 2016. 5

3) Takeuchi T., Ichikawa Y., Nakashima H., and Kasai K.: Response Evaluation of Passively Controlled Multistory Building with Non-uniform Damper Distribution, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 583, pp. 115-122, 2004. 9 (in Japanese)
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バッシブ制振構造の応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第583号, pp. 115-122, 2004. 9

4) Shimada Y., Sato D., Nagae T., Kitamura H., Fukuyama K., Kajiwara K., Inoue T., Nakashima M., Saito T., Fukuwa N., and Hitaka T.: Investigation on Partial Install of Hysteretic Dampers into Lower Stories of High-rise Buildings:-Retrofitting against Long-period Ground Motion-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 649, pp. 549-557, 2010. 3 (in Japanese)
島田侑, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛, 斎藤大樹, 福和伸夫, 日高桃子: 超高層建物の下層階に部分配置する履歴ダンパーの効果と影響に関する検討—長周期地震動を想定した耐震改修—, 日本建築学会構造系論文集, No. 649, pp. 549-557, 2010. 3

5) Atsumi T., Kitamura H., Ishii M. and Uramoto H.: Vertical Distribution of Hysteretic and Velocity-Dependent Dampers for High-Rise Steel Structure (Part 1, 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, pp. 763-766, 2006. 7 (in Japanese)
渥美孝純, 北村春幸, 石井正人, 浦本弥樹: 鋼構造超高層建物における履歴減衰型・粘性減衰型制振部材の高さ方向併用配置の提案(その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 763-766, 2006. 7

6) Ishida T., Sato D., Kitamura H., Sasaki K., Miyazaki M., Yoshie K., Ishii M. and Fujita T.: Shaking Table Tests of 10th Story Steel Model Using Combinations of Hysteretic and Viscous Dampers, Journal of Structural Engineering, Vol. 55B, pp. 507-515, 2009. 3 (in Japanese)
石田琢志, 佐藤大樹, 北村春幸, 佐々木和彦, 宮崎充, 吉江慶祐, 石井正人, 藤田隆史: 履歴型・粘性型ダンパーをハイブリットに配置した10層フレームの振動台実験, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 507-515, 2009. 3

7) Soeta K., Sato D., Kitamura H., Ishii M., Yoshie K., Miyazaki M., Sasaki K. and Iwasaki Y.: Influence of the Continuous Arrangement of Hysteretic Damper and Viscous Damper on Vibration Control Effect of High-rise Building, AIJ Journal of Technology and Design, No. 39, pp. 477-482, 2012. 6 (in Japanese)
添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 連層配置した履歴型ダンパーと粘性型ダンパーが超高層建物の制振効果に与える影響, 日本建築学会技術報告集, No. 39, pp. 477-482, 2012. 6

8) Kitamura H.: Seismic Response Analysis Methods for Performance Based Design (Second edition), SHOKOKUSYA Publishing Co., Ltd., 2009. 4 (in Japanese)
北村春幸: 性能設計のための建築振動解析入門(第2版), 彰国社, 2009. 4

9) Soeta K., Sato D., Kitamura H., Ishii M., Yoshie K., Miyazaki M., Sasaki K. and Iwasaki Y.: Simple Model of High-rise Building with Tandem Arrangement of Hysteretic Damper and Viscous Damper, Proceeding of The 82th Architectural Research Meetings, KANTO Chapter, Architectural Institute of Japan, pp. 209-212, 2012. 3 (in Japanese)
添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 履歴型・粘性型ダンパーを直列連層配置した鋼構造超高層建物の簡易モデル作成手法, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 209-212, 2012. 3

10) Kasai K. and Iwasaki K.: Reduced Expression for Various Passive Control Systems and Conversion to Shear Spring Model, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 605, pp. 37-46, 2006. 7 (in Japanese)

笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, No. 605, pp. 37-46, 2006. 7

11) Ishii M. and Kasai K.: Shear Spring Model for Time History Analysis of Multi-story Passive Controlled Buildings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 647, pp. 103-112, 2010. 1 (in Japanese)
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, No. 647, pp. 103-112, 2010. 1

12) Ishii M., Kitamura H., Wada A., and Kasai K.: A Study on Analytical Model for Frames Using Viscoelastic Dampers, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 531, pp. 55-62, 2000. 5 (in Japanese)
石井正人, 北村春幸, 和田章, 笠井和彦: 粘弾性型制振部材付き架構のモデル化に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No. 531, pp. 55-62, 2000. 5

13) Soeta K., Sato D., Kitamura H., Huruya K., Ishii M., Yoshie K., Miyazaki M., Sasaki K. and Iwasaki Y.: Evaluation of Damping Effect Considering Effective Damper Deformation Ratio for High-rise Building (Part 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, B-2, pp. 775-776, 2011. 7 (in Japanese)
添田幸平, 佐藤大樹, 北村春幸, 古谷慶, 石井正人, 吉江慶祐, 宮崎充, 佐々木和彦, 岩崎雄一: 超高層建物における実効変形比に着目した制振性能評価(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 775-776, 2011. 7

14) Kasai K. and Nishimura T.: Equivalent Linearization of Passive Control System with Oil Damper Bilinearly Dependent on Velocity, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 583, pp. 44-54, 2004. 9 (in Japanese)
笠井和彦, 西村忠宗: 減衰力が速度にバイリニア的に比例するオイルダンパーをもつ制振構造の等価線形化手法, 日本建築学会構造系論文集, No. 583, pp. 44-54, 2004. 9

15) Nomura N., Sato D., Kitamura H. and Fujisawa K.: Response Performance for The High Earthquake-proofing Low and Medium-rise Steel Structure with H-SA700 High-Strength Steel and Hysteretic Damper, Journal of structural engineering, Vol. 58B, pp. 179-187, 2012. 3 (in Japanese)
野村尚史, 佐藤大樹, 北村春幸, 藤澤一善: 建築構造用高強度鋼材 H-SA700 と制振部材を組合せた高耐震化中低層鋼構造建物の応答性状, 構造工学論文集, Vol. 58B, pp. 179-187, 2012. 3

付録A α_{pN} とダンパー剛性の関係

Fig.A1に, HD15における弾性バネの剛性を変化させたときの $i\alpha_{pN}$ を示す。弾性バネは $i\alpha_{ds} = 0.005, 0.015, 0.025, 0.1, 2.5$ の初期剛性とする。Fig.A1から, 弾性バネの剛性の増加に伴い, 各層の $i\alpha_{pN}$ は減少することが確認できる。また, 各層の $i\alpha_{pN}$ は弾性バネ剛性が一定値を超えると頭打ちを示すことも確認できる。

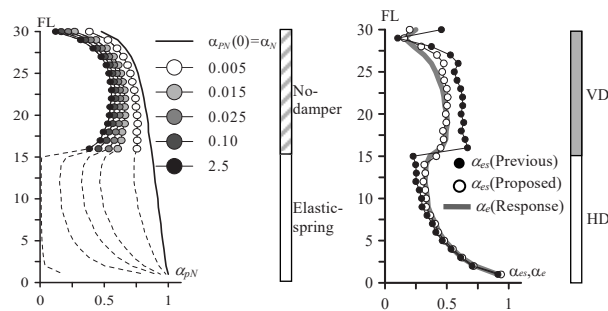


Fig.A1 Distribution of α_{pN} (HD15, ART HACHI)

Fig.B1 Comparison of α_{es} and α_e (HD15:Elastic, ART HACHI)

付録B 実効変形比の下限値の算出と精度検証

簡易モデルから得られる実効変形比 $i\alpha_{es}$ は, 層間変形 $i\delta_i$ がダンパー変形の水平成分 $i\delta_{hs}$ と擬似ブレース変形の水平成分 $i\delta_{bs}$ との和である関係から, 履歴ダンパー設置層では履歴ダンパーが弾性時, 粘性ダンパー設置層(線形粘性)では, 円振動数 ω の定常振動時と仮定したとき, 次式より算出できる(7.13), (14)。

(B1) 式および (B2) 式から算出した $i\alpha_N$ および $i\alpha_{pN}$ が実効変形比の上限値を示し、 K_{bs} が高いほどダンパー量の増加に伴う実効変形比の減少が小さいことがわかる。

・履歴ダンパー設置層 (弾性時) :

$$i\alpha_{es} = \frac{i\delta_d}{i\delta} = \frac{i\alpha_N \cdot i\delta_{ds}}{i\delta_{ds} + i\delta_{bs}} = \frac{i\alpha_N}{1 + (iK_{d1s} / iK_{bs,PR})}, \quad iK_{d1s} = i\alpha_N^2 \cdot K_{d1} \quad (B1a,b)$$

・粘性ダンパー設置層 (線形粘性時) :

$$i\alpha_{es} = \frac{i\delta_d}{i\delta} = \frac{i\alpha_{PN} \cdot i\delta_{ds}}{i\delta_s} = \frac{i\alpha_{PN}}{\sqrt{1 + (iC_{ds} \cdot \omega / iK_{bs}^*)^2}}, \quad iC_{ds} = i\alpha_{PN}^2 \cdot C_d, \quad iK_{d1s} = i\alpha_{PN}^2 \cdot K_d, \quad iK_{bs}^* = \frac{iK_{bs,R} \cdot K_{ds}}{iK_{bs,R} + iK_{ds}} \quad (B2a,b,c,d)$$

ここで、 ω は主架構の 1 次固有円振動数とする。

Fig.B1 に (B1) 式および (B2) 式から算出した $i\alpha_{es}$ (理論値) と骨組モデルの応答結果 $i\alpha_e$ の高さ方向分布の比較を示す。また、状態 N および状態 R のみを用いたモデルの $i\alpha_{es}$ (既往モデル: Previous), 状態 pN および状態 pR を用いたモデルの $i\alpha_{es}$ (本モデル: Proposed) を重ねて示す。検討モデルは HD15 とし、履歴ダンパーを弾性とする。検討用入力地震動は ART HACHI である。本モデルから得られた $i\alpha_{es}$ (Proposed) は、時刻歴解析結果から得られた $i\alpha_e$ (Response) を精度良く再現していることが確認できる。以上のことから、各種の骨組特性値を適切に評価できていることが確認できる。

付録 C 履歴ダンパーのダンパー量を変えた場合の精度検証結果

履歴ダンパーのダンパー量のみ $i\alpha_{dy}=0.005, 0.015$ および 0.035 に変えた場合について、精度検証結果を示す。HD15 による ART HACHI 入力時の骨組モデルと簡易モデルの応答分布の比較を Fig.C1 に示す。 $i\alpha_{dy}=0.005$ において、既往モデルと本モデルとの間に大きな差は見られず、簡易モデルは骨組モデルの応答を精度良く再現している。 0.015 および 0.035 において、本モデルは境界層付近の w_d が改善され、骨組モデルの w_d を精度良く再現している。ダンパー量が大きいくほど既往モデルの再現性は低く、本モデルの有用性は高いと考える。

ダンパー配置 3 種 (HD15, VD15, AD), ダンパー量 4 種 ($i\alpha_{dy}=0.005 \sim 0.035$), 地震波 5 波による全てのケースの精度検証結果を Fig.C2 に示す。層間変形角 (図 C2(a)) は JMAKobe で精度誤差が大きいことが確認できるが、他の位相特性では概ね誤差 $\pm 15\%$ 以内に収まる。ダンパーによるエネルギー吸収量図 C2(b) は、概ね $\pm 15\%$ 以内に収まることを確認できる。

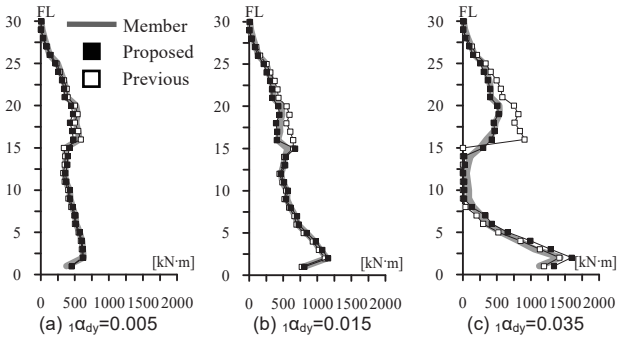


Fig.C1 Comparison of energy absorption by damper (HD15, ART HACHI)

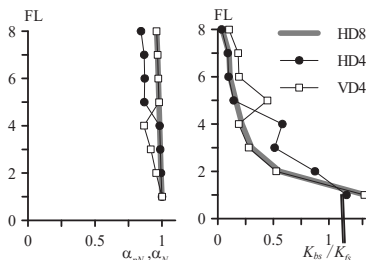


Fig.D2 Distribution of α_{pN} and K_{bs}

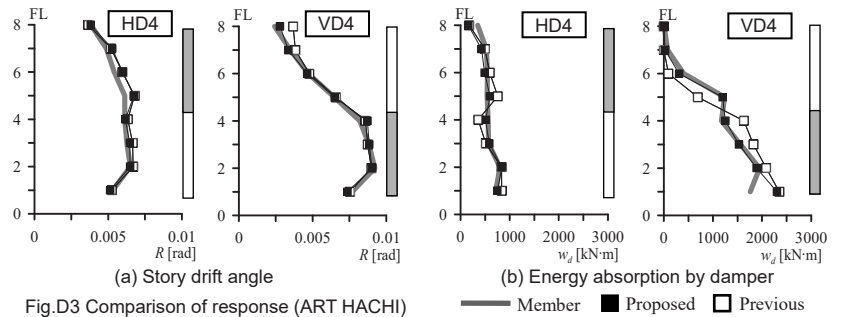


Fig.D3 Comparison of response (ART HACHI)

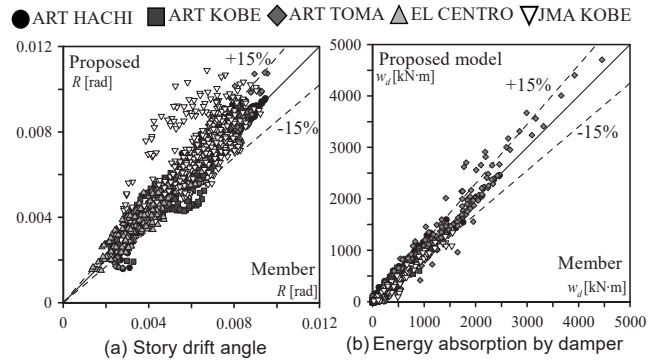


Fig.C2 Comparison of member model and proposed model (HD15, VD15, AD)

付録 D 地上 8 階の中低層鋼構造建物での精度検証結果

Fig.D1 に示す、地上 8 階の中低層鋼構造建物¹⁵⁾ (Fig.D1(a)) に対して簡易モデル作成手法を適用し、精度検証を行う。なお、主架構は弾性状態を保つものとする。

併用モデルとして、下層に履歴ダンパー・上層に粘性ダンパーを配置し境界層を 4 層とした HD4, 下層に粘性ダンパー・上層に履歴ダンパーを配置し境界層を 4 層とした VD4 の 2 種の配置を用いる (Fig.D1 (b))。第 1 層の履歴ダンパーの降伏せん断力係数は $i\alpha_{dy}=0.025$ である。第 1 層の粘性ダンパー (線形) による付加粘性減衰定数は $i h_d = i C_d \cdot \omega / (2 \cdot i K_f) = 5\%$ とする。粘性ダンパーにおける直列結合するバネ剛性 K_d は、短周期建物用ダンパーとして $i K_d = 18 i C_d$ を採用する¹⁾。2~8 層の履歴ダンパーおよび粘性ダンパーは第 1 層と等しいダンパーを使用する。検討用入力地震動は、2.2 節と同様 5 波である。

各モデルの $i\alpha_{pN}$ および K_{bs} / K_f の高さ方向分布を Fig.D2 に示す。 $i\alpha_{pN}$ の算出には、 $i\alpha_{dy} = 0.025$ の時の初期剛性に相当する弾性バネを設置する。Fig.D2 から、地上 30 階の超高層鋼構造建物と同様の傾向を示すことが確認できる。

ART HACHI 入力時の骨組モデルと簡易モデルの応答分布の比較を Fig.D3 に示す。層間変形角の最大値は、既往モデルと本モデルとの間に大きな差は見られず、簡易モデルは骨組モデルの応答を精度良く再現していることが確認できる。ダンパーによるエネルギー吸収量 w_d に着目すると、本モデルは境界層付近の w_d が改善され、骨組モデルの w_d を精度良く再現している。なお、他の地震波についても ART HACHI と同様の精度が確保できていることを確認している。

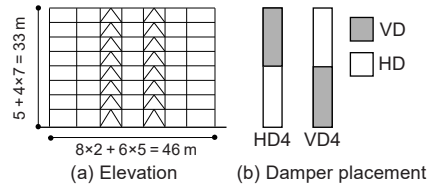


Fig.D1 Summary of the 8th floor building

EQUIVALENT SHEAR SPRING MODELING METHOD OF SUPER TALL STEEL STRUCTURE BUILDING WITH CONTINUOUS ARRANGEMENT OF VISCOUS DAMPERS AND HYSTERETIC DAMPERS

Kohei SOETA ^{*1}, *Daiki SATO* ^{*2}, *Masato ISHII* ^{*3}
and Haruyuki KITAMURA ^{*4}

^{*1} Structural Engineering Division, KUME SEKKEI Ltd., M.Eng.

^{*2} Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng.

^{*3} Structural Design Division, Nikken Sekkei Ltd., Dr.Eng.

^{*4} Vice President, Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

Seismic control has become generally used in super tall steel structure buildings. A combination of viscous dampers and hysteretic dampers is increasingly used nowadays to ensure high earthquake resistance of high-rise buildings – as such, this is called a “combination-system”. In design of buildings, simple model such as equivalent shear spring model is frequently used. However, there is no current research on simple model of “combination-system”, thus, this paper proposes a method to create an equivalent shear-spring model of “combination-system” consisting of its characteristic values, dampers and their support members, and frames.

In creating the shear spring model, the parameters are calculated by conducting static analysis of the building frame in four states – (i) state N for frame only state, (ii) state R in which an elastic spring with extremely high rigidity is placed in the damper’s installation position, (iii) state pN in which elastic springs are only placed in the hysteretic dampers’ installation stories, and (iv) state pR in which an elastic spring with extremely high rigidity is only placed in the hysteretic damper’s installation position.

The parameters obtained from states pN and pR are important in evaluating seismic control effect of “combination-system”. The obtained characteristic values from state pN show that the upper limit of the effective deformation ratio in the viscous damper’s installation floor decreases. The obtained characteristic values from state pR show phase difference between the hysteretic damper load and viscous damper load.

A 30-storey high-rise building with brace-type continuous arrangement of viscous dampers and hysteretic dampers is used to verify the proposed model. A total of 13 damper placement combinations are used in this study. This paper shows that the proposed model reproduces the results of time-history analysis of member models. With respect to energy absorption of damper, the proposed model is more accurate than the previous models because the former evaluates various characteristic values and can reproduce the damper load at each step of the time-history analysis.

(2019年6月10日原稿受理, 2019年10月28日採用決定)