

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	間柱型粘弾性ダンパーと履歴ダンパーを並列配置した超高層制振建物のせん断モデル化手法
Title(English)	CONVERTING MEMBER MODELS INTO EQUIVALENT SHEAR SPRING MODELS FOR HIGH-RISE PASSIVE CONTROL BUILDINGS WITH STUD-TYPE VISCOELASTIC DAMPERS AND HYSTERETIC DAMPERS IN PARALLEL
著者(和文)	樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介
Authors(English)	Ryosuke Kinoshita, Daiki Sato, Ryota Tobar, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro
出典(和文)	日本建築学会技術報告集, Vol. 28, No. 68, pp. 103-108
Citation(English)	AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 28, No. 68, pp. 103-108
発行日 / Pub. date	2022, 2
権利情報	日本建築学会

間柱型粘弾性ダンパーと履歴ダンパーを並列配置した超高層制振建物のせん断モデル化手法

CONVERTING MEMBER MODELS INTO EQUIVALENT SHEAR SPRING MODELS FOR HIGH-RISE, PASSIVE CONTROL BUILDINGS WITH STUD-TYPE VISCOELASTIC DAMPERS AND HYSTERETIC DAMPERS IN PARALLEL

樹下亮佑 — * 1 佐藤大樹 — * 2
戸張涼太 — * 3 安永隼平 — * 4
植木卓也 — * 4 金城陽介 — * 5

Ryosuke KINOSHITA — * 1 Daiki SATO — * 2
Ryota TOBARI — * 3 Jumpei YASUNAGA — * 4
Takuya UEKI — * 4 Yosuke KANESHIRO — * 5

キーワード：
超高層制振建物, 間柱型粘弾性ダンパー, 履歴ダンパー, 並列配置, せん断モデル

Keywords:
Passively controlled high-rise building, Stud-type viscoelastic damper, Hysteretic damper, Parallel configuration, Equivalent shear spring model

In recent years modeling methods of equivalent shear spring models for passive control structures have been proposed. However, no methods are available for configurations with multiple kinds of dampers in parallel. Thus, in this paper, a method is proposed to create an equivalent shear spring model of passive control structures with parallel configurations of stud-type viscoelastic dampers and hysteretic dampers. The parameters of the proposed model are calculated by considering the response of the structure in four states. This paper shows that the proposed modelling method can accurately reproduce the results of time-history analysis of member models.

1. はじめに

近年, 長周期地震動への関心が高まっており, その対策として制振構造の需要が高まっている。本研究では間柱型粘弾性ダンパーを用いた制振構造を対象に検討を行う。しかし, 間柱型のダンパーは大梁, 間柱を介して層間に設置されるため, プレース型などのダンパーよりもエネルギー吸収効率が悪いといったデメリットがある¹⁾。そのため, 実務の設計においては主としてプレース型などのダンパーを設置し, 空間を妨げずにダンパーを設置することができる間柱型のダンパーを付加的に設置するといった構造計画が考えられる。

一方, 制振構造の設計には複数の地震波での時刻歴応答解析が必要であるため, 部材構成モデル (以降, 部材モデル) での検討は設計者に大きな負担がかかる。そのため, 多質点系せん断モデル (以降, せん断モデル) を使用することは, 設計段階のパラメトリックスタディに適している。しかし, 制振構造のせん断モデルは, 層間変形に対するダンパー変形の比 (以降, 実効変形比) を適切に評価したものでなければ, 建物応答を適切に評価できない。一般に超高層建物に制振ダンパーを設置した場合, 全体曲げ変形の影響で中層から高層部にかけて実効変形比が減少することや^{例え 2), 3)}, 本報で使用するような間柱型のダンパーは, ダンパーが取り付く間柱や, 間柱が取り付く大梁の変形によって実効変形比が増減する^{例え 4)}ことが知られている。

実効変形比を考慮したせん断モデル化手法として, 石井ら⁵⁾が状態 N, R 解析という 2 種類の静的解析より得られる骨組特性値を用いてせん断モデルを作成する手法を提案している。また, 骨組特性値を用いて制振性能を評価する手法も提案されている^{例え 2), 3)}。しかし, そ

れらは 1 種類のダンパーを使用した場合のみの報告に留まっている。

複数種類のダンパーを併用した建物モデルに関する研究として, 太木本ら⁶⁾は間柱型粘弾性ダンパーと履歴ダンパーを併用した場合, 間柱型粘弾性ダンパーのみを用いた場合よりも地震時の応答が低減し, 間柱型粘弾性ダンパー 1 基当たりのエネルギー吸収量が増加することを示している。また, 添田ら⁷⁾は履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列配置した建物モデルを対象に, 状態 N, R 解析に加えて状態 pN, pR 解析という 4 種類の静的解析より得られる特性値をもとにせん断モデルを作成する手法を提案している。しかし, それは履歴ダンパーと粘性ダンパーを直列配置したモデルのみの検討であり, その他複数種類のダンパーを併用した建物モデルや, 複数種類のダンパーを並列配置した建物モデルのせん断モデル化に関する報告は未だない。

そこで, 本報では間柱型粘弾性ダンパーとプレース型の履歴ダンパーを並列配置した超高層制振建物を対象に, 全体応答およびダンパーのエネルギー吸収量を高精度で再現するせん断モデルの作成手法を提案し, その精度を検証する。なお, 層の最大応答値のみならず, ダンパーのエネルギー吸収量の正確性を重要視する理由は, 本報で使用している粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下を, エネルギー吸収量を元とした指標で評価しているからである⁸⁾。

2. せん断モデルの作成手法概要

2.1 既往手法によるせん断モデルの作成手法概要⁵⁾

以下に, 文献 5) に示されている状態 N, R 解析 (Fig.1) より得られる骨組特性値をもとに作成されるせん断モデル (以降, N/R モデル)

¹⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生
(〒226-8503 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・博士 (工学)

³⁾ JFE シビル(株)

⁴⁾ JFE スチール(株) 博士 (工学)

⁵⁾ JFE スチール(株)

¹⁾ Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

²⁾ Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

³⁾ JFE Civil Engineering & Construction Corporation

⁴⁾ JFE Steel Corporation, Dr.Eng.

⁵⁾ JFE Steel Corporation

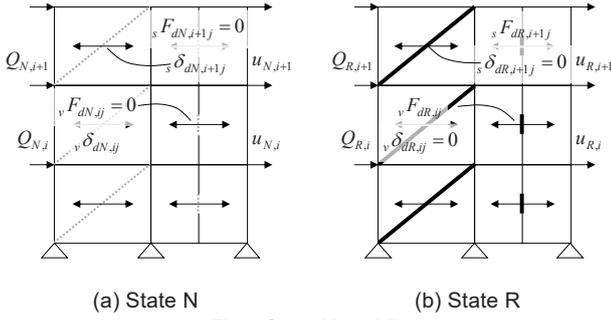


Fig.1 State N and R

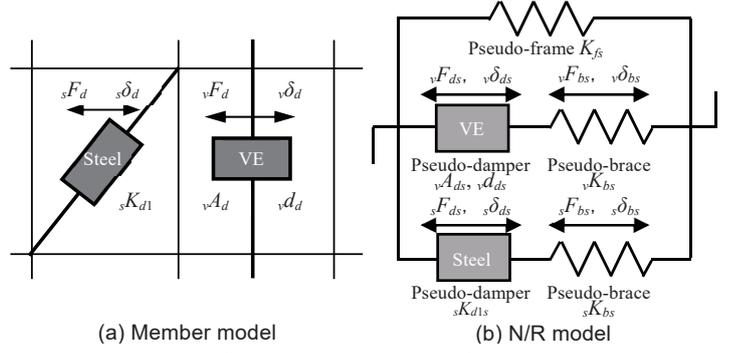


Fig.2 Member model and N/R model

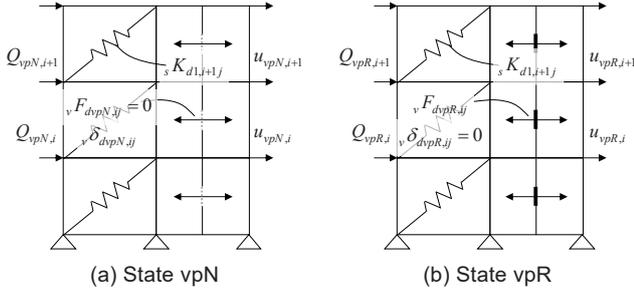


Fig.3 State vpN, vpR, spN and spR

の概要を示す。Fig.2 に部材モデルと N/R モデルの概念図を示す。本報では、制振ダンパーとして間柱型粘弾性ダンパー（以降、粘弾性ダンパー）と屈曲拘束ブレース（以降、鋼材ダンパー）を使用する。N/R モデルは擬似フレーム、擬似ブレースおよび擬似ダンパーから構成される。擬似フレームは弾性としてモデル化する。

次に、骨組特性値（後述）の算出方法を示す。状態 N, R 解析より、層剛性 $K_{N,i}$ および状態 N 時の粘弾性、鋼材ダンパーの実効変形比 $v\alpha_{N,ij}$, $s\alpha_{N,ij}$ 、粘弾性、鋼材ダンパー設置箇所への架構剛性 $vK_{dR,ij}$, $sK_{dR,ij}$ を次式より算出する ($K_{N,i}$, $v\alpha_{N,ij}$, $s\alpha_{N,ij}$, $vK_{dR,ij}$, $sK_{dR,ij}$ をまとめた総称を骨組特性値)。なお、本報では文献 5) に倣い、状態 N, R 解析時の外力分布は A_i 分布に基づくものとする。

$$K_{N,i} = Q_{N,i} / \delta_{N,i} \quad (1) \quad v\alpha_{N,ij} = v\delta_{dN,ij} / \delta_{N,i}, \quad vK_{dR,ij} = vF_{dR,ij} / \delta_{R,i} \quad (2a,b)$$

$$s\alpha_{N,ij} = s\delta_{dN,ij} / \delta_{N,i}, \quad sK_{dR,ij} = sF_{dR,ij} / \delta_{R,i} \quad (3a,b)$$

ここで、 Q , δ : 層せん断力、層間変形、 F_d , δ_d : ダンパー設置箇所の負担荷重の水平成分、相対変形の水平成分、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、 i は i 層の諸元、計算値、 ij は i 層 j 番目のダンパー設置箇所の諸元、計算値、左下の添え字 v および s は粘弾性ダンパーおよび鋼材ダンパーの諸元、計算値であることを示す。また、鋼材ダンパーの諸元、計算値は水平方向の換算値であり、以降も同様である。これらの骨組特性値を用いて、N/R モデルの各諸元を次式で設定する。

$$K_{fs,i} = K_{N,i}, \quad vK_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v\alpha_{N,ij} \times vK_{dR,ij}, \quad sK_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} s\alpha_{N,ij} \times sK_{dR,ij} \quad (4-6)$$

$$vA_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v\alpha_{N,ij} \times vA_{d,ij}, \quad v\delta_{ds,i} = \frac{1}{vN_{d,i}} \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v\delta_{d,ij} / v\alpha_{N,ij} \quad (7a,b)$$

$$sK_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} (s\alpha_{N,ij})^2 \times sK_{d1,ij}, \quad sF_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} s\alpha_{N,ij} \times sF_{dy,ij} \quad (8a,b)$$

ここで、 K_{fs} : 擬似フレーム剛性、 K_{bs} : 擬似ブレース剛性、 vA_d , $v\delta_d$: 粘弾性ダンパーのせん断面積、厚さ、 sK_{d1} , sF_{dy} : 鋼材ダンパーの初期剛性、降伏軸力の水平成分、 N_d : ダンパー設置数、右下の添え字 s は

ばね系 (N/R モデル) の諸元、計算値である。また、部材モデルと N/R モデルの対応関係は以下の通りである。

$$Q_{s,i} = Q_i, \quad \delta_{s,i} = \delta_i \quad (9a,b)$$

$$vF_{ds} = v\alpha_{N,i} \times vF_d, \quad v\delta_{ds} = v\delta_d / v\alpha_{N,i} \quad (10a,b)$$

$$sF_{ds} = s\alpha_{N,i} \times sF_d, \quad s\delta_{ds} = s\delta_d / s\alpha_{N,i} \quad (11a,b)$$

2.2 提案するせん断モデルの作成手法概要

以下に提案するせん断モデル（以降、pN/pR モデル）の作成手法の概要を示す。pN/pR モデルは、N/R モデルと同様に擬似フレーム、擬似ブレースおよび擬似ダンパーから構成される。(Fig.2(b)) しかし、pN/pR モデルは、擬似ブレースおよび擬似ダンパーの諸元を Fig.3 に示す状態 vpN, vpR, spN, spR 解析より得られる修正骨組特性値（後述）を用いて設定する点が N/R モデルと異なる。N/R モデルは状態 N, R を満たす弾性部材モデルの剛性マトリクスと N/R モデルの剛性マトリクスが対応するように各諸元を導出している。本手法ではそれらに改良を加え、pN/pR モデルの粘弾性ダンパー諸元算出時には鋼材ダンパー設置箇所、鋼材ダンパー諸元算出時には粘弾性ダンパー設置箇所に適当な剛性を持った弾性ばねを設置することで、各ダンパーから周辺架構に生じる反力およびそれに伴って生じる周辺架構の変形を考慮する。

次に、状態 vpN, vpR, spN, spR 解析の概要を述べる。状態 vpN, vpR 解析は鋼材ダンパー設置箇所に鋼材ダンパーの初期剛性 sK_{d1} を持った弾性ばねを設置し、状態 vpN 解析は、粘弾性ダンパー設置箇所に剛性が 0 の弾性ばね、vpR 解析は、粘弾性ダンパー設置箇所に剛性が極端に大きい弾性ばねを挿入した弾性部材モデルに外力を作用させる解析である (Fig.3(a),(b))。また、状態 spN, spR 解析は粘弾性ダンパー設置箇所に任意の剛性を持った弾性ばねを設置し、状態 spN 解析は鋼材ダンパー設置箇所に剛性が 0 の弾性ばね、状態 spR 解析は、鋼材ダンパー設置箇所に剛性が極端に大きい弾性ばねを挿入した弾性部材モデルに外力を作用させる解析である (Fig.3(c),(d))。本報では、粘弾性ダンパー設置箇所の弾性ばね剛性には、せん断ひずみ

v_d 100%時の等価剛性 $(K_{deq}(v_d) = 1.0)$ を与えるが、状態 spN, spR 解析における粘弾性ダンパー設置箇所の弾性ばね剛性が修正骨組特性値(後述)および pN/pR モデルの応答に与える影響が小さいことを確認している。また、 $v_d K_{deq}$ の算出は文献 9) を参照されたい。

以下、修正骨組特性値の算出方法を示す。状態 vpN 時の粘弾性ダンパーの実効変形比 $v\alpha_{vpN,ij}$ および粘弾性ダンパー設置箇所の架構剛性 $vK_{dvpR,ij}$ は、状態 vpN, vpR 解析より得られる(式(12))。また、状態 spN 時の鋼材ダンパーの実効変形比 $s\alpha_{spN,ij}$ および鋼材ダンパー設置箇所の架構剛性 $sK_{dspR,ij}$ は、状態 spN, spR 解析より得られる(式(13))。なお、状態 vpN, vpR, spN, spR 解析時の外力分布は、状態 N, R 解析と同様に Ai 分布に基づくものとする。

$$v\alpha_{vpN,ij}(sK_{d1}) = v\delta_{dvpN,ij}/\delta_{vpN,i}, \quad vK_{dvpR,ij}(sK_{d1}) = vF_{dvpR,ij}/\delta_{vpR,i} \quad (12a,b)$$

$$s\alpha_{spN,ij}(vK_{deq}) = s\delta_{dspN,ij}/\delta_{spN,i}, \quad sK_{dspR,ij}(vK_{deq}) = sF_{dspR,ij}/\delta_{spR,i} \quad (13a,b)$$

ここで、右下の添え字 vpN, vpR, spN, spR はそれぞれ状態 vpN, vpR, spN, spR の計算値であることを示し、 (sK_{d1}) および (vK_{deq}) は鋼材ダンパーの初期剛性および粘弾性ダンパーの等価剛性によって変化する値であることを示す。以降、 $v\alpha_{vpN,ij}, vK_{dvpR,ij}, s\alpha_{spN,ij}, sK_{dspR,ij}$ をまとめた総称を修正骨組特性値と呼ぶ。これらの修正骨組特性値を用いて、pN/pR モデルの諸元を次式で設定する。

$$vK_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v\alpha_{vpN,ij} \times vK_{dvpR,ij}, \quad sK_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} s\alpha_{spN,ij} \times sK_{dspR,ij} \quad (14,15)$$

$$vA_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v\alpha_{vpN,ij} \times vA_{d,ij}, \quad v d_{ds,i} = \frac{1}{vN_{d,i}} \sum_{j=1}^{N_{d,i}} v d_{d,ij} / v\alpha_{vpN,ij} \quad (16a,b)$$

$$sK_{d1s,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} (s\alpha_{spN,ij})^2 \times sK_{d1,ij}, \quad sF_{dys,i} = \sum_{j=1}^{N_{d,i}} s\alpha_{spN,ij} \times sF_{dy,ij} \quad (17a,b)$$

ここで、右下の添え字 s は N/R モデルと同様にばね系 (pN/pR モデル) の諸元、計算値である。また、部材モデルと pN/pR モデルの対応関係についても以下に示す。

$$vF_{ds} = v\alpha_{vpN} \times vF_d, \quad v\delta_{ds} = v\delta_d / v\alpha_{vpN} \quad (18a,b)$$

$$sF_{ds} = s\alpha_{spN} \times sF_d, \quad s\delta_{ds} = s\delta_d / s\alpha_{spN} \quad (19a,b)$$

また、擬似フレーム剛性および部材モデルと pN/pR モデルの主架構の対応関係は N/R モデルと同様であることに注意されたい。

3. 検討対象建物およびせん断モデルの諸元

3.1 検討対象建物およびダンパー概要

検討対象建物は、鉄骨造地上 50 階建の事務所ビルとする¹⁰⁾。Fig.4 に建物モデルの軸組図と基準階伏図、Table1 に架構部材の主要断面を示す。本報では、粘弾性ダンパーのみを設置した D2h (Fig.4(a)) と、粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを併用した SV2-D2h (Fig.4(b)) で検討を行う。軸組図の赤線、基準階伏図の赤丸は粘弾性ダンパーの設置位置、青線は鋼材ダンパーの設置位置を示す。X 方向を解析対象とし、主架構のみのモデルの 1 次固有周期 T_{1f} は 7.13 s である。鋼材ダンパーの設置を前提として主架構を設計しているため、主架構のみの 1 次固有周期は比較的長くなっている ($T_{1f} = 0.035H$, H : 建物高さ)。構造減衰は主架構のみのモデルの 1 次固有周期に対して減衰定数 $\zeta = 0.02$ となる剛性比例型とする。なお、構造減衰の設定の違いが、後述する N/R モデルおよび pN/pR モデルの応答の精度に及ぼす影響が小さいことを確認している。また、主架構の塑性化が N/R モデルおよび pN/pR モデルの精度に及ぼす影響を省き、議論を明確にするために、本報では主架構を弾性とする。なお、本解析には構造計算

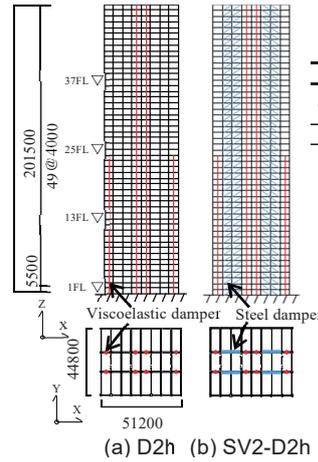


Fig.4 Elevation and plan [unit : mm]

Table1 Member list	
Parts	Member
Column	□-750×750×19×19 ~ □-750×750×60×60 H-900×450×25×55 ~ H-950×750×28×75
Beam	H-700×250×14×25 ~ H-850×300×16×32

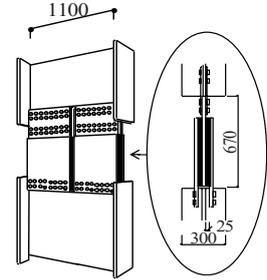


Fig.5 Stud-type viscoelastic damper [unit : mm]

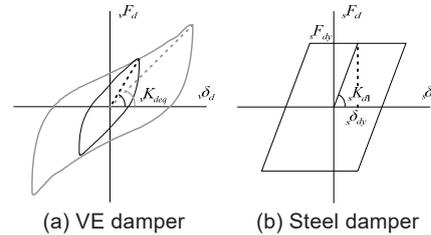


Fig.6 Restoring force characteristics of damper

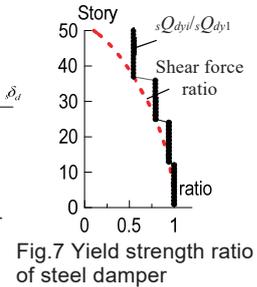


Fig.7 Yield strength ratio of steel damper

プログラムである RESP-D, RESP-F3T を用いており、部材モデルの解析には RESP-D, N/R, pN/pR モデルの解析には RESP-F3T を用いた。

続いて、粘弾性ダンパーおよび鋼材ダンパーの概要について述べる。本報で用いる粘弾性ダンパーを Fig.5 に示す。1つの粘弾性体のサイズは面積 $484 \times 484 \text{ mm}^2$ 、厚さ 25 mm であり、2つの粘弾性パネルが連なっている。支持部材は H 形鋼からなり、寸法は $H-1100 \times 300 \times 16 \times 28$ とする。Fig.6(a) に粘弾性ダンパーの復元力特性を示す。本報で用いる粘弾性ダンパーはひずみ依存性を有しており、粘弾性ダンパーの 1 ループ内の負担せん断力 F_d の最大値と原点を結んだ割線剛性である等価剛性 K_{deq} は、ダンパー変位が大きいくほど小さくなる。また、本報では文献 11) に示される解析モデルを用いている。鋼材ダンパーは塑性化部と弾性部で構成され、部材長さ L_d に対して、塑性化部 $L_d/3$ 、塑性化部断面積 A_d に対して弾性部断面積 $2A_d$ とする。塑性化部には LY225 材を用い、完全弾塑性とする。Fig.6(b) に鋼材ダンパーの復元力特性を示す。ただし、本報では断面積を一定とした等価断面のダンパーとして扱うこととする。各層の鋼材ダンパーの降伏層せん断力分布は、第 1 層の鋼材ダンパー降伏層せん断力 sQ_{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もとに、1, 13, 25, 37 層で切り替わる 4 段階とする²⁾ (Fig.7)。 sQ_{dy1} と第 1 層の鋼材ダンパー降伏層せん断力係数 $s\alpha_{dy1}$ の関係は次式で表される。

$$sQ_{dy1} = s\alpha_{dy1} \sum_{i=1}^N m_i g \quad (20)$$

ここで、 N : 層数、 m_i : 第 i 層の質量、 g : 重力加速度を表す。なお、本報では第 1 層の鋼材ダンパー降伏層せん断力係数 $s\alpha_{dy1}$ を鋼材ダンパー量と呼び、 $s\alpha_{dy1} = 0.005 \sim 0.030$ の計 6 種で検討を行う。

3.2 せん断モデルの特性値および諸元の比較

骨組特性値、修正骨組特性値および N/R, pN/pR モデルの各諸元を

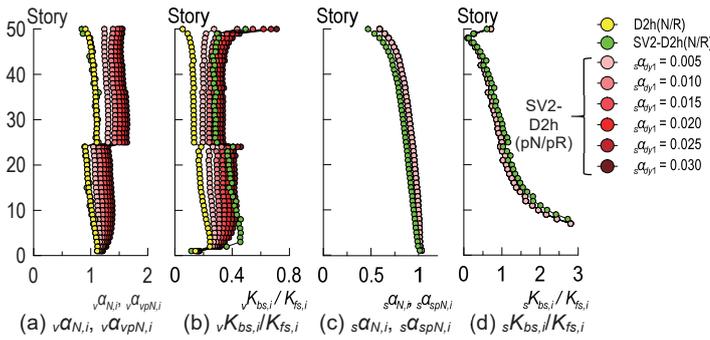


Fig.8 Frame parameter for control

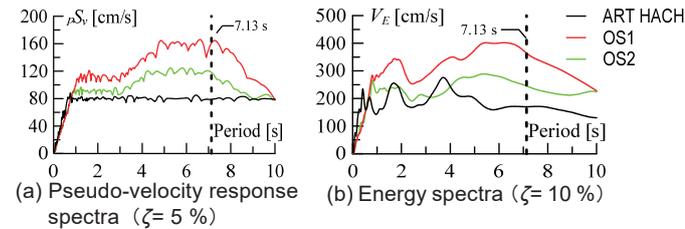


Fig.9 Earthquake response spectra

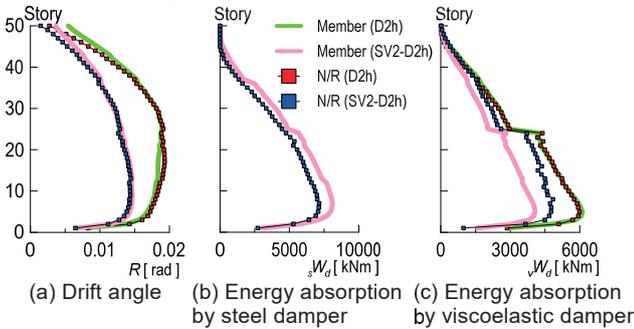


Fig.10 Response of D2h and SV2-D2h ($\alpha_{dy1} = 0.005$, OS1)

比較する。Fig.8 に $\alpha_{N,i}$, $\alpha_{spN,i}$, $K_{bs,i}/K_{fs,i}$, $\alpha_{N,ij}$, $\alpha_{spN,ij}$, $K_{bs,i}/K_{fs,i}$ の高さ方向分布を示す。ここで示す $\alpha_{N,i}$, $\alpha_{spN,i}$ および $\alpha_{N,ij}$, $\alpha_{spN,ij}$ は、各ダンパー設置箇所 $\alpha_{N,ij}$, $\alpha_{spN,ij}$ および $\alpha_{N,ij}$, $\alpha_{spN,ij}$ の層ごとの平均値である。まずは、D2h(N/R) と SV2-D2h(pN/pR) を比較する。Fig.8(a),(b) より、 $\alpha_{N,i}$, $\alpha_{spN,i}$ および $K_{bs,i}/K_{fs,i}$ は鋼材ダンパーを設置していない D2h よりも鋼材ダンパーを設置している SV2-D2h の方が大きくなる。また、 α_{dy1} が大きいほど $\alpha_{spN,i}$ および $K_{bs,i}/K_{fs,i}$ は大きくなる傾向を示す。次に、SV2-D2h(N/R) と SV2-D2h(pN/pR) を比較する。Fig.8(a),(b) より、SV2-D2h(pN/pR) は鋼材ダンパーの初期剛性によって $\alpha_{spN,i}$ および $K_{bs,i}/K_{fs,i}$ の値が異なるが、SV2-D2h(N/R) は鋼材ダンパーの初期剛性によらず $\alpha_{N,i}$, $K_{bs,i}$ の値が一定となる(式(1)~(8))。また、Fig.8(c),(d) より、 $\alpha_{N,i}$, $\alpha_{spN,i}$ は SV2-D2h(pN/pR) の方が若干大きくなり、 $K_{bs,i}/K_{fs,i}$ は SV2-D2h(N/R) の方が若干大きくなる。これは N/R モデルは状態 N, R 解析 (Fig.1), pN/pR モデルは状態 spN, spR 解析 (Fig.3(c),(d)) より $\alpha_{N,i}$, $\alpha_{spN,i}$ および $K_{bs,i}$ を算出するが、粘弾性ダンパー設置箇所のばね剛性が、状態 N よりも状態 spN の方が大きく、状態 R よりも状態 spR の方が小さいことに起因する。

4. 時刻歴応答解析によるせん断モデルの精度検証

4.1 入力地震動概要

入力地震動には海溝型地震に分類される 1968 年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分を用いた模擬波 (以降、この模擬波を ART HACHI と呼ぶ) と基盤低波である OS1, OS2 の 3 波を採用する。Fig.9

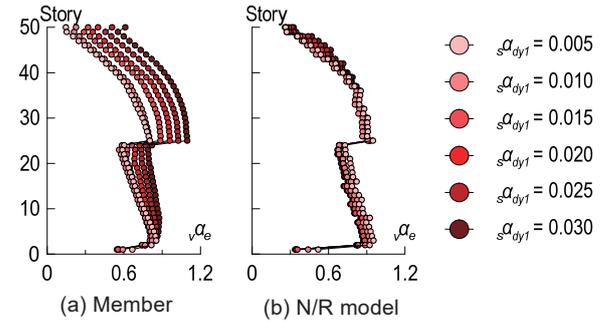


Fig.11 Effective deformation ratio of viscoelastic damper (OS1)

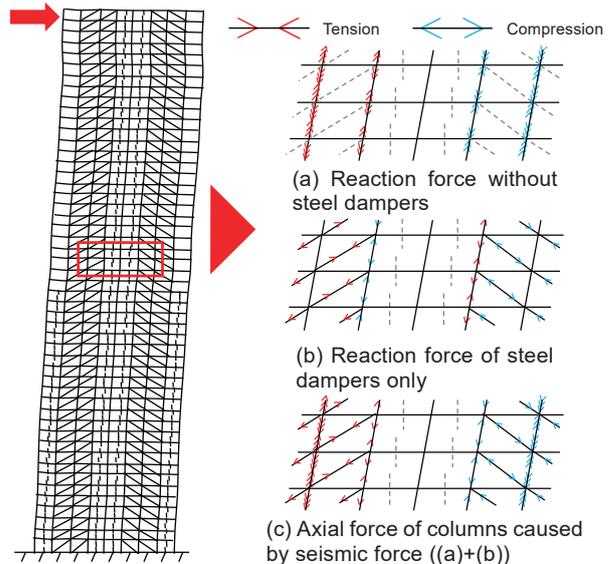


Fig.12 Axial force in columns and steel dampers caused by static load

に擬似速度応答スペクトル p_{Sv} ($\zeta=5\%$)、エネルギースペクトル V_E ($\zeta=10\%$) をそれぞれ示す。

4.2 部材モデルと N/R モデルの応答比較および N/R モデルの問題点

部材モデルと N/R モデルの応答比較および N/R モデルの問題点を考察する。Fig.10 に OS1 入力時の D2h と SV2-D2h ($\alpha_{dy1} = 0.005$) の応答を示す。(a) は層間変形角 R , (b) は鋼材ダンパーのエネルギー吸収量 W_d , (c) は粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量 W_d である。Fig.10 より、粘弾性ダンパーのみを設置した D2h は、部材モデルと N/R モデルの応答が精度良く一致することが確認できる。しかし、粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを並列配置した SV2-D2h は、層間変形角 R は概ね一致しているが、鋼材ダンパーのエネルギー吸収量 W_d および粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量 W_d で誤差が生じており、特に粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量の誤差が顕著である。

次に、SV2-D2h のダンパーのエネルギー吸収量で誤差が生じた原因を考察する。ここでは、特に誤差が大きい粘弾性ダンパーについて考察する。Fig.11 に OS1 入力時の部材モデルと N/R モデルの粘弾性ダンパーの実効変形比 α_e を示す。ここで、 α_e は次式で表される。

$$\alpha_e = \delta_{d,max,ij} / \delta_{s,max,i} = \alpha_{N,i} \times \delta_{d,max,ij} / \delta_{s,max,i} \quad (21)$$

ここで、右下の添え字 max は最大値であることを示す。Fig.11 より、部材モデルの粘弾性ダンパーの実効変形比 α_e は、鋼材ダンパー量 α_{dy1} の増加に伴って増加している。しかし、N/R モデルの α_e は α_{dy1} の大小に関わらず概ね一致している。次に、 α_{dy1} の増加に伴って部材モデルの α_e が増加する原因を考察する。Fig.12 に水平荷重載荷時の

柱軸力の概念図を示す。(a)は主架構のみのモデルの柱軸力、(b)は鋼材ダンパーから周辺の柱に生じる反力、(c)はSV2-D2hの水平荷重重載荷時の柱軸力である。ここでは、前述したとおり粘弾性ダンパーの反力が周辺架構に及ぼす影響が小さいことを確認しているため、粘弾性ダンパーの反力は無視することとする。Fig.12(a)より、主架構のみのモデルに右向きの水平荷重が作用した場合、左半分の柱には引張軸力、右半分の柱には圧縮軸力が生じることとなる。しかし、Fig.12(b)に示すように、鋼材ダンパーからの反力により、鋼材ダンパー周辺の柱にそれぞれ軸力が生じる。そうすると、SV2-D2hに水平荷重が生じた際の柱軸力はFig.12(a)とFig.12(b)の足し合わせとなり、Fig.12(c)のようになる。すると、粘弾性ダンパー周辺の柱の軸力はFig.12(a)、(b)それぞれの軸力によって相殺される形となり、粘弾性ダンパー周辺の柱の軸伸縮、つまり粘弾性ダンパー周辺架構の曲げ変形が緩和される。次に、Fig.13に柱の鉛直変位差による粘弾性ダンパーの変形増減の概念図を示す。ここでは、粘弾性ダンパー設置スパンの左側の柱の軸伸縮のみが生じるものとする。Fig.13(a)より、右向きの水平荷重重載荷時に粘弾性ダンパーが設置されている架構の左側の柱に引張力が生じると、左側の柱が伸びて右側の柱と比べて相対的に上方に移動するため、粘弾性ダンパーは左向き、つまりダンパー変形が減少する方向に変形する。しかし、Fig.13(b)より、右向きの水平荷重重載荷時に粘弾性ダンパーが設置されている架構の左側の柱に圧縮力が生じると、左側の柱が縮んで右側の柱と比べて相対的に下方に移動するため、粘弾性ダンパーは右向き、つまりダンパー変形が増加する方向に変形する。粘弾性ダンパー設置スパンと隣接するスパンに鋼材ダンパーを設置するとFig.13(a)の左側の柱の変形が小さくなり、さらに鋼材ダンパー量 $s\alpha_{dy1}$ が大きくなるとFig.13(b)のような変形状態となり、粘弾性ダンパーの変形が増加する。この傾向は文献12)と同様である。そのため、部材モデルではFig.11(a)のように $s\alpha_{dy1}$ の増加に伴って粘弾性ダンパーの実効変形比 α_e が増加したが、N/Rモデルでは上記の影響を考慮できておらず、 $s\alpha_{dy1}$ の大小に関わらず同様の骨組特性値およびN/Rモデル諸元を算出する(式(1)~(8)、Fig.8)ため、ダンパーのエネルギー吸収量に誤差が生じたと考えられる。

4.3 部材モデルと pN/pR モデルの応答比較

粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを並列配置したSV2-D2hは、一方のダンパーの反力により生じる柱の軸伸縮の影響でもう一方のダンパーの変形が増減するが、N/Rモデルではその影響が考慮できず、ダンパーのエネルギー吸収量で誤差が生じた。そこで、pN/pRモデルの応答精度を検証し、上記の問題点を解消することを示す。なお、粘弾性ダンパーのみを組み込んだモデル(D2h)はN/Rモデルで十分な精度であったため、以降はSV2-D2hについて述べる。Fig.14に鋼材ダンパー量 $s\alpha_{dy1}$ ごとの部材モデル、N/Rモデル、pN/pRモデルの応答を示す。(a)は層間変形角 R 、(b)は鋼材ダンパーのエネルギー吸収量 sW_d 、(c)は粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量 W_d である。ここで、紙幅の都合上、 $s\alpha_{dy1} = 0.010, 0.020, 0.030$ のSV2-D2hにOS1を入力した場合のみを示すが、その他の鋼材ダンパー量、地震動入力時も同様の傾向となることを確認している。Fig.14(a)より、層間変形角は部材モデル、N/Rモデル、pN/pRモデルで大きな差はなく、高層部(建物全体の上部1/3層である35~50層)を除けば、部材モデルの応答に対するN/Rモデル、pN/pRモデルの応答の比率は、それぞれ0.83~1.05, 0.85~1.07である。次に、Fig.14(b)より鋼材ダンパーのエネルギー吸収量

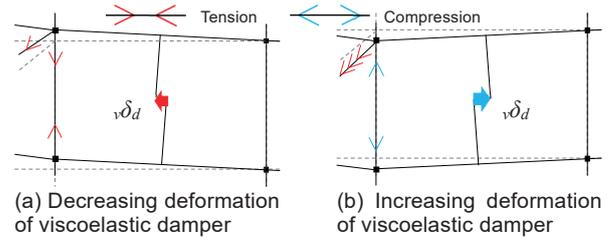


Fig.13 Increasing and decreasing deformation of viscoelastic damper caused by vertical deformation of columns

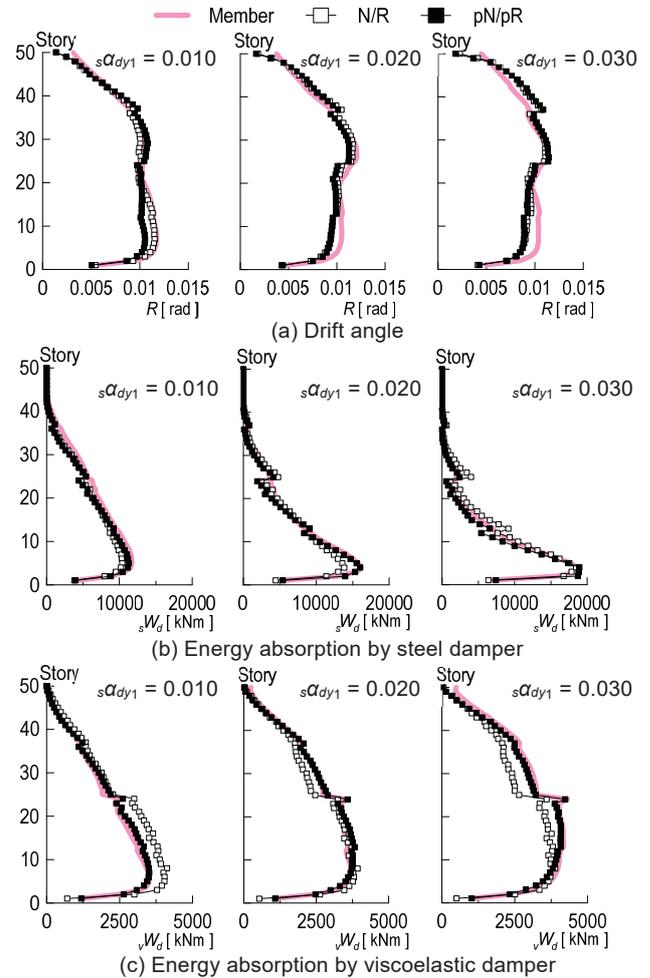


Fig.14 Comparing response with member, N/R and pN/pR models (OS1, SV2-D2h)

を比較すると、pN/pRモデルはN/Rモデルよりも若干精度が向上したように見受けられるが、モデル化による違いはほとんどなく、高層部を除けば、部材モデルの応答に対するN/Rモデル、pN/pRモデルの応答の比率は、それぞれ0.80~1.30, 0.75~1.20である。一方で、Fig.14(c)より粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量は、N/Rモデルでは部材モデルとの誤差が比較的大きいが、pN/pRモデルの応答は部材モデルの応答と精度よく一致し、高層部を除けば、部材モデルの応答に対するN/Rモデル、pN/pRモデルの応答の比率は、それぞれ0.48~1.30, 0.90~1.15である。pN/pRモデルの粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量の精度向上とは裏腹に、部材モデル、N/Rモデル、pN/pRモデルの層間変形角が概ね一致する原因は不明である。しかし、本検討範囲では、OS1入力時の $s\alpha_{dy1} = 0.010$ の層間変形角を除き、pN/pRモデルの層間変形角およびダンパーのエネルギー吸収量の精度は、

N/R モデルと同等もしくは向上する傾向が見られた。

以上より、pN/pR モデルは、部材モデルの層の最大応答値およびダンパーのエネルギー吸収量を高精度で再現可能であるといえる。また、pN/pR モデルの応答精度に関して、鉄骨造 20 階建の建物モデル¹⁾を用いた場合でも同様の結果が得られている。なお、今回検討に使用した解析環境 (CPU : 3.00GHz, メモリ : 16.0GB) では、pN/pR モデルの解析時間は部材モデルの約 0.02 倍であった。

5. まとめ

本報では間柱型粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを並列配置した建物モデルに対して有用なせん断モデルの作成手法を示した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 状態 N, R 解析を用いてモデル化したせん断モデル (N/R モデル) は、間柱型粘弾性ダンパーのみを設置した建物モデルには十分な精度でモデル化できたが、間柱型粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを並列配置した建物モデルでは、主にダンパーのエネルギー吸収量で誤差が生じた。
- 2) 間柱型粘弾性ダンパーと鋼材ダンパーを並列配置した場合、一方のダンパーの反力により生じる柱の軸伸縮の影響でもう一方のダンパーの変形が増減するが、N/R モデルではこの影響を考慮できず、骨組特性値を鋼材ダンパーおよび粘弾性ダンパーの剛性によらない値として算出するため、ダンパーのエネルギー吸収量で誤差が生じた。
- 3) 本報では、状態 vpN, vpR, spN, spR 解析を提案し、各種解析より鋼材ダンパーの初期剛性および粘弾性ダンパーの等価剛性に依存する特性値 (修正骨組特性値) を算出し、せん断モデルを作成した (pN/pR モデル)。pN/pR モデルは N/R モデルで大きな誤差が生じるダンパーのエネルギー吸収量が、部材モデルの応答と精度よく一致した。

本手法は、構造設計の検討段階において有益な手法であると思われる。しかし、主架構を弾塑性、より広範囲の鋼材ダンパー量および粘弾性ダンパーのサイズ、さらに曲げ変形が卓越する超々高層建物での検討など、本手法の適用範囲の検証に関しては今後の課題とする。

謝辞

本報告は、JFE シビル株式会社、JFE スチール株式会社、東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。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 (JPMJOP1723) によるものです。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル、第 3 版、2013.11
- 2) 古谷慶、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：履歴ダンパーを有する超高層弾性架構の実効変形比に着目した制振性能評価、構造工学論文集、Vol.58B, pp.197-207, 2012.3
- 3) Shigehito Watanabe, Kohei Soeta, Daiki Sato, Haruyuki Kitamura, Masato Ishii, Keisuke Yoshie, Mitsuru Miyazaki, Kazuhiko Sasaki, Yuichi Iwasaki: Performance evaluation of high-rise building considering placement and attach-type of viscous wall dampers, AIJ J. Technol. Des, Vol.19, No.42, pp.425-430, 2013.6

- 渡辺重仁、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：粘性制震壁の配置位置及び設置タイプを考慮した超高層建物の性能評価、日本建築学会技術報告集、Vol.19, No.42, pp.425-430, 2013.6
- 4) Hiroshi Kuramoto, Wataru Kohira, Seiya Kato, Tomoya Matsui, Hiroshi Nakamura, Ken Tokoro, Koh Uematsu, Kazuhiko Kasai, Akira Wada: Dynamic behavior of steel frame installing stud column with viscoelastic damper, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.606, pp.97-104, 2006.8
倉本洋、小平涉、加藤清也、松井智哉、中村博志、所健、植松工、笠井和彦、和田章：粘弾性ダンパー付き間柱を設置した鉄骨フレームの動的挙動、日本建築学会構造系論文集、No.606, pp.97-104, 2006.8
- 5) Masato Ishii, Kazuhiko Kasai: Shear spring model for time history analysis of multi-story passive controlled buildings, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1
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、Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1
- 6) 太木本仁志、佐藤大樹、戸張涼太、植木卓也：間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物の長周期地震動に対する応答性状 その 2 間柱型粘弾性ダンパーと鋼材ブレースダンパーを併用した建物モデルの応答性状、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.421-424, 2019.3
- 7) Kohei Soeta, Daiki Sato, Masato Ishii, Haruyuki Kitamura: Equivalent shear spring modeling method of super tall steel structure building with continuous arrangement of viscous dampers and hysteretic dampers, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.85, No.768, pp.197-207, 2020.2
添田幸平、佐藤大樹、石井正人、北村春幸：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、日本建築学会構造系論文集、Vol.85, No.768, pp.197-207, 2020.2
- 8) 太木本仁志、佐藤大樹、戸張涼太、吉永光寿、安永集平、金城陽介：長周期地震動に対する間柱型粘弾性ダンパーの動的特性および超高層制振建物の簡易応答評価法、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.221-224, 2020.3
- 9) 金城陽介、植木卓也、村上行夫、戸張涼太、宮川和明、森隆浩：高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー～その 1 実大試験による性能評価～、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2, pp.595-596, 2017.8
- 10) Masashi Kimura, Haruyuki Kitamura, Toshiaki Sato, Yuichi Kimura, Hideshi Aono, Yu Yamamoto: Seismic response evaluation method for maximum response and cumulative damage of high-rise building under the Tokai-Tonankai-Nankai multi-segment earthquake based on the response of the earthquakes constituting the multi-segment earthquake, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.80, No.712, pp.873-883, 2015.6
木村暢志、北村春幸、佐藤利昭、木村雄一、青野英志、山本優：東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超高層建物の最大値と累積値の応答評価法、日本建築学会構造系論文集、Vol.80, No.712, pp.873-883, 2015.6
- 11) Hideaki Kato, Takahiro Mori, Nobuo Murota, Ken Ishii, Masaru Kikuchi: A hysteresis model of high-damping rubber bearings using an integral type deformation history constitutive law, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol.76, No.667, pp.1721-1728, 2011.9
加藤秀章、森隆浩、室田伸夫、石井建、菊地優：高減衰履歴ゴムの変形履歴積分型復元力モデルに関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.76, No.667, pp.1721-1728, 2011.9
- 12) 細谷佳雅、佐藤大樹、石井正人、北村春幸、佐々木和彦、岩崎雄一、佐藤利昭、松田頼征、吉江慶祐：変形増幅機構に耐震ブレースを併用した制振構造の性能評価、構造工学論文集、Vol.63B, pp.265-273, 2017.3
- 13) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針、第 1 版、2014.11

[2021 年 5 月 31 日原稿受理 2021 年 7 月 29 日採用決定]