

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物のせん断モデル化 ~ その1 間柱型粘弾性ダンパーのみを組み込んだ建物モデルのせん断モデル化 ~
Title(English)	Converting member models into shear models for high-rise building with Stud-type viscoelastic damper. Part I. Converting member models with Stud-type viscoelastic dampers only into shear models
著者(和文)	樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也
Authors(English)	Ryosuke Kinoshita, Daiki Sato, Ryota Tobar, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 325-328
Citation(English)	, , , pp. 325-328
発行日 / Pub. date	2021, 3

間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物のせん断モデル化

～その1 間柱型粘弾性ダンパーのみを組み込んだ建物モデルのせん断モデル化～

構造—振動

正会員 ○ 樹下亮佑^{*1}
// 戸張涼太^{*3}
// 植木卓也^{*4}

正会員 佐藤大樹^{*2}
// 安永隼平^{*4}

制振構造 間柱型 粘弾性ダンパー
超高層建物 長周期地震動

1. はじめに

近年、南海トラフ地震の発生が予測されていることから、長周期地震動への関心が高まっている。長周期地震動は継続時間の長いゆっくりとした大きな揺れで遠方まで伝わる性質を持つ。長周期地震動が発生した際、長い固有周期を持つ超高層建物は、共振現象により大きな被害を受ける可能性がある。その対策として、制振部材（ダンパー）を建物に設置し、主架構の損傷を抑える制振構造の需要が高まっている。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。しかし、一部のダンパーを除いて、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り、自由度が多い部材構成モデルはパラメトリックスタディに適していない。そこで、短時間で時刻歴応答解析を行うことができるせん断モデルを使用することは、簡易的に建物応答を評価するための有効な手段である。笠井、岩崎は制振ダンパーの実行変形（制振部材に有効に働く変形）を考慮した1質点のせん断モデルを提案しており¹⁾、石井、笠井によって多質点に拡張されている²⁾。

そこで本報では、間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物を多質点のせん断モデルに置換し、部材構成モデルの応答と比較することで、その精度を検証する。その1では、制振ダンパーとして間柱型粘弾性ダンパーのみを用いた建物モデルで検討を行う。

2. モデル化概要

2.1 検討対象建物

検討対象建物は、鉄骨造 50 階建の事務所ビルとする。Fig.1 に検討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。階高は1階 5.5 m, 2～50 階

Table1 主要断面リスト

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

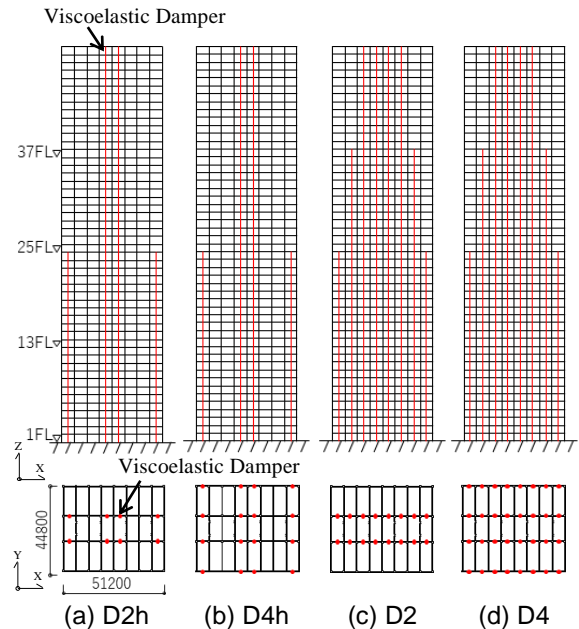


Fig.1 検討対象建物 [unit : mm]

4 m とする。軸組図の赤線、基準階伏図の赤丸は間柱型粘弾性ダンパーの設置位置を示す。X 方向を解析対象とし、主架構は弾性とする。主架構のみのモデルの総重量 W は 806,039 kN, 1 次固有周期は 7.39 s である。スラブによる梁の剛性増大率は片側、両側スラブともに X 方向は 1.3, Y 方向は 1.5 とする。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 $\zeta = 0.02$ となる初期剛性比例型とする。なお、本解析には構造計算プログラムである RESP-D, RESP-F3T を用いた。

Converting member models into shear models for high-rise building with Stud-type viscoelastic damper.

Part I. Converting member models with Stud-type viscoelastic dampers only into shear models

KINOSHITA Ryosuke, SATO Daiki, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya

2.2 本報で用いる間柱型粘弾性ダンパー

本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを Fig.2 に示す。支持柱および粘弾性パネルの諸元について、1つの粘弾性体のサイズは $A_s = 484 \times 484 \text{ mm}^2$ 、厚さ $d = 25 \text{ mm}$ で2つの粘弾性パネルが重なっている。上下の支持部材は H 形

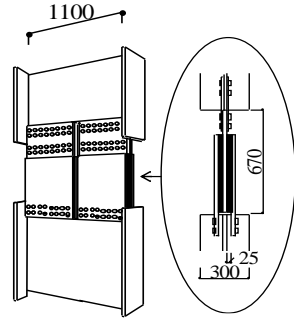


Fig.2 間柱型粘弾性ダンパー
[単位 : mm]

鋼からなり寸法は H-1100 × 300 × 16 × 28 とする。ダンパーの解析モデルは文献 3) に示すものを用いた。なお本報ではダンパーの重量もモデル化している。

2.3 せん断モデル化手法の概要

以下に実効変形比を考慮したせん断モデル化手法を記す。主架構バネ（擬似フレーム）は弾性としてモデル化する。せん断モデルの各要素は、擬似フレーム剛性 K_{fs} 、擬似ブレース剛性 K_{bs} 、粘弾性体のせん断断面積と厚さの換算値 A_{ds} 、 d_{ds} で構成され、それらは Fig.3 に示す状態 N 解析より得られる K_N 、 α_N と状態 R 解析より得られる K_{DR} の骨組特性値より算出される（後述）^{1,2)}。

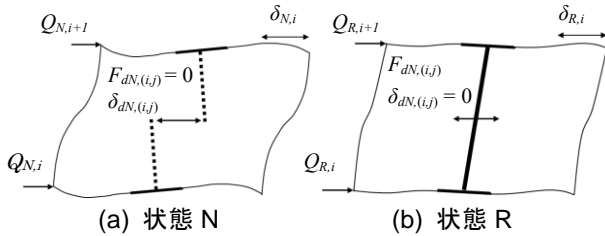


Fig.3 状態 NR 解析の概念図

状態 N 解析は、主架構のみの弾性部材モデルの各層に任意の外力を作用させる解析である。本報では、Ai 分布に基づいて外力を与えている。状態 N 解析より、第 i 層 j 番目の制振部材設置箇所における相対変形の水平成分 $\delta_{dN,(i,j)}$ の層間変形 $\delta_{N,i}$ に対する比 $\alpha_{N,(i,j)}$ (式(1)) を算出する。 i 層の層せん断力 $Q_{N,i}$ を層間変形で除した層剛性 $K_{N,i}$ (式(2)) は主架構のみの弾性層剛性 $K_{fs,i}$ である。

$$\alpha_{N,(i,j)} = \delta_{dN,(i,j)} / \delta_{N,i} \quad (1)$$

$$K_{fs,i} = K_{N,i} = Q_{N,i} / \delta_{N,i} \quad (2)$$

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位置に剛性が極端に大きい弾性バネを挿入することにより、その相対変形が限りなくゼロに近くなる状態を保ち、各層に任意の外力を作用させる解析である。本報では、Ai 分布に基づいて外力を与えている。状態 R における第 i 層 j 番目の制振部材負担せん断力 $F_{dR,(i,j)}$ と層間変位

$\delta_{R,i}$ で剛性 $K_{dR,(i,j)}$ (式(3)) を各制振部材設置箇所について計算し、第 i 層における間柱型粘弾性ダンパー総数を N_i とすると、擬似ブレース剛性 $K_{bs,i}$ を得られる (式(4))。

$$K_{dR,(i,j)} = F_{dR,(i,j)} / \delta_{R,i} \quad (3)$$

$$K_{bs,i} = \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{N,(i,j)} \times K_{dR,(i,j)} \quad (4)$$

せん断モデルに用いる i 層の粘弾性体のせん断断面積 $A_{ds,i}$ と厚さ $d_{ds,i}$ は、部材構成モデルにおける第 i 層 j 番目の粘弾性体のせん断断面積 $A_{d,(i,j)}$ と厚さ $d_{d,(i,j)}$ 、式(1)の α_N を用いて算出される (式(5)、(6))。

$$A_{ds,i} = \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{N,(i,j)} \times A_{d,(i,j)} \quad (5)$$

$$d_{ds,i} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} d_{d,(i,j)} / \alpha_{N,(i,j)} \quad (6)$$

このようにして得られた K_{fs} 、 K_{bs} 、 A_{ds} 、 d_{ds} を用いてせん断モデルを作成する。Fig.4 に部材構成モデルとせん断モデルの概念図を示す。ここで、部材構成モデルのダンパー変位、ダンパー内力をそれぞれ δ_d 、 F_d とすると、せん断モデルの擬似ダンパー変位 δ_{ds} 、擬似ダンパー内力 F_{ds} はそれぞれ式(7)、(8)で表される。

$$\delta_{ds} = \delta_d / \alpha_N, \quad F_{ds} = F_d \times \alpha_N \quad (7), (8)$$

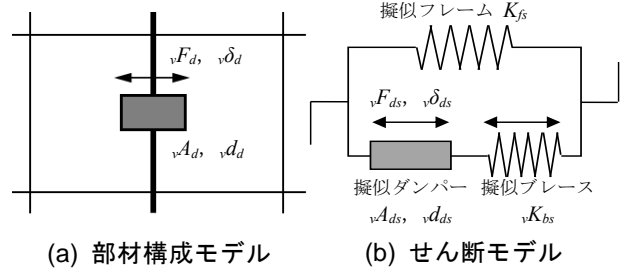


Fig.4 部材構成モデルとせん断モデル

Fig.5 にせん断モデルの各要素を示す。Fig.5(a)より、間柱型のダンパーは大梁を介して層間に設置されるため、付帯梁の曲げ変形の影響でダンパー部の変形が増減する。 α_N の算出は状態 N (ダンパー部の剛性が 0) 解析より得られるので、付帯梁の曲げ変形がダンパー部の変形を増加させる方向に働き、低層部の α_N の値が 1 を超えている。しかし、高層部では層の曲げ変形が大きくなるため、ダンパー部のせん断変形成分が減少し、高層になるにつれて α_N が小さくなる傾向を示した。また、Fig.5(b)に示す K_{bs} は、状態 R (ダンパー部の剛性が ∞) 解析より得られるため、付帯梁の曲げ変形がダンパー部の変形を減少させる方向に働くため、層間変形に対してダンパー部のせん断変形が小さくなる。そのため、 K_{bs} はブレース型などと比べて小さくモデル化される傾向があり、その結果、D4 以外全層にわたって K_{bs} が K_{fs} よりも小さい値となった。また、高層部では層の曲げ変形が卓越し、ダンパー変形が減少するため、高層になるにつれて K_{bs} の値が小さくなる傾向を示す。Fig.5(c)に示す A_{ds} は、式(5)より α_N の値と

各層の間柱型粘弾性ダンパーの数に依存するため、 $v\alpha_N$ の値が大きく、間柱型粘弾性ダンパーの数が多し低層で大きな値を示し、 $v\alpha_N$ の値が減少する影響とダンパー数が減少する影響で、高層になるにつれて値が小さくなる。Fig.5(d)に示す $v d_{ds}$ は式(6)より $v\alpha_N$ の値に依存するため、 $v\alpha_N$ が減少する高層部になるにつれて値が上昇する傾向を示す。

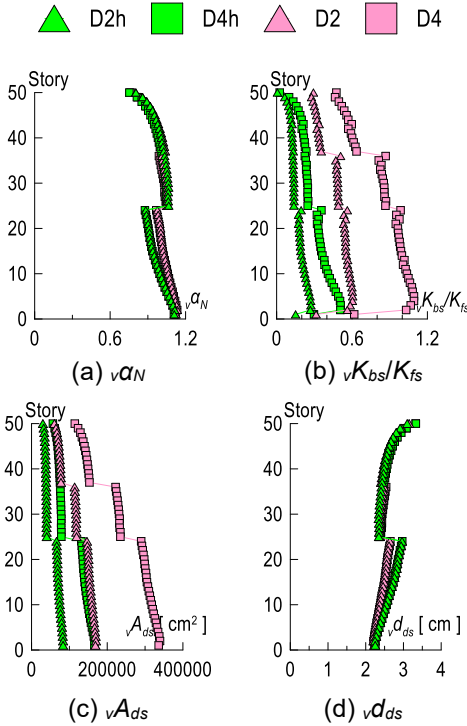


Fig.5 せん断モデルの各要素

3. 時刻歴応答解析

3.1 入力地震動

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)と基整促波であるOS1, OS2の3波を採用する。Fig.6に擬似速度応答スペクトル pS_v ($\zeta=5\%$)、エネルギースペクトル V_E ($\zeta=10\%$)をそれぞれ示す。主架構の1次固有周期(7.39s)付近では、OS2がART HACHIに対し、 pS_v は約1.3倍、 V_E は約1.4倍となる。また、OS1がART HACHIに対し pS_v 、

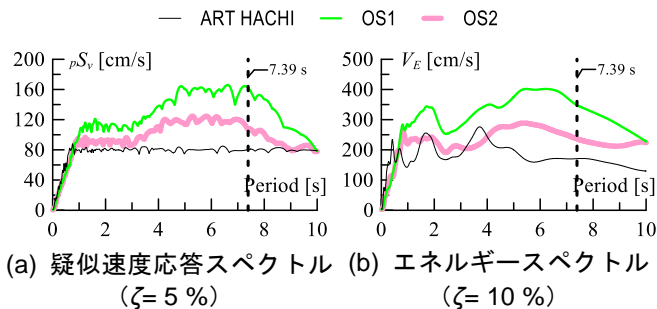


Fig.6 応答スペクトル

V_E は約2倍となり、いずれもレベル2相当の地震動(ART HACHI)より大きな値を示す地震動であることが分かる。

3.2 部材構成モデルとせん断モデルの応答比較

間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ50層の部材構成モデル(Fig.1)をせん断モデルに置換して時刻歴応答解析を行い、応答を比較することでせん断モデルの妥当性を検証する。Fig.7(a)に層間変形角 R 、(b)に粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量 W_d 、(c)に粘弾性ダンパーの実効変形比 $v\alpha_e$ の最大応答値の高さ方向分布、Fig.8に5層の粘弾性ダンパーのループ、Fig.9に5層の層間変形角の時刻歴を示す。Fig.7, 8はART HACHI入力時のみを示し、Fig.9は3波の時刻歴を示す。ここで、 i 層の実効変形比 $v\alpha_{e,i}$ は部材構成モデルのダンパー最大変位 $v\delta_{d,max,i}$ 、最大層間変位 $\delta_{max,i}$ 、またはせん断モデルの擬似ダンパー最大変位 $v\delta_{ds,max,i}$ 、擬似フレームの最大層間変位 $\delta_{s,max,i}$ を用いて式(9)で表される。

$$v\alpha_{e,i} = v\delta_{d,max,i} / \delta_{max,i} = v\alpha_{N,i} \times v\delta_{ds,max,i} / \delta_{s,max,i} \quad (9)$$

また、Fig.8に示す粘弾性ダンパーのせん断応力度 $v\tau_d$ 、ひずみ度 $v\gamma_d$ はそれぞれ次式で表される。

$$v\tau_d = vF_d / vA_d = vF_{ds} / vA_{ds} \quad (10)$$

$$v\gamma_d = v\delta_d / v d_d = v\delta_{ds} / v d_{ds} \quad (11)$$

Fig.7(a)より、層間変形角はせん断モデルの応答が部材構成モデルと概ね一致し、特に低層から中層にかけては精度よく一致していることがわかる。しかし、高層はせん断モデルの応答が若干危険側に評価される傾向があり、ダンパーの数が多しほどその傾向が顕著である。Fig.7(b)、(c)より、粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量と実効変形比は部材構成モデルとせん断モデルの応答が精度よく一致している。このことから、せん断モデルでも間柱型粘弾性ダンパーの変形を過大評価しておらず、粘弾性ダンパーの付帯梁の曲げ変形や層の曲げ変形によるダンパー変形の減少を適切に評価できている。また、層間変形角のように高層でせん断モデルの応答が危険側に評価される

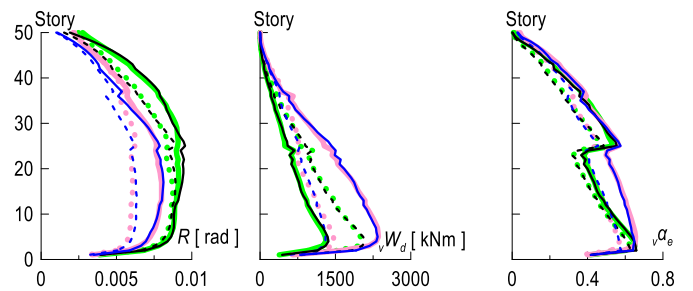
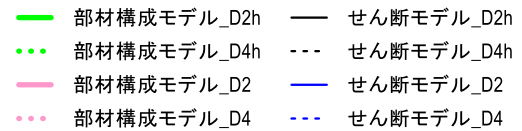


Fig.7 最大応答値 (ART HACHI)

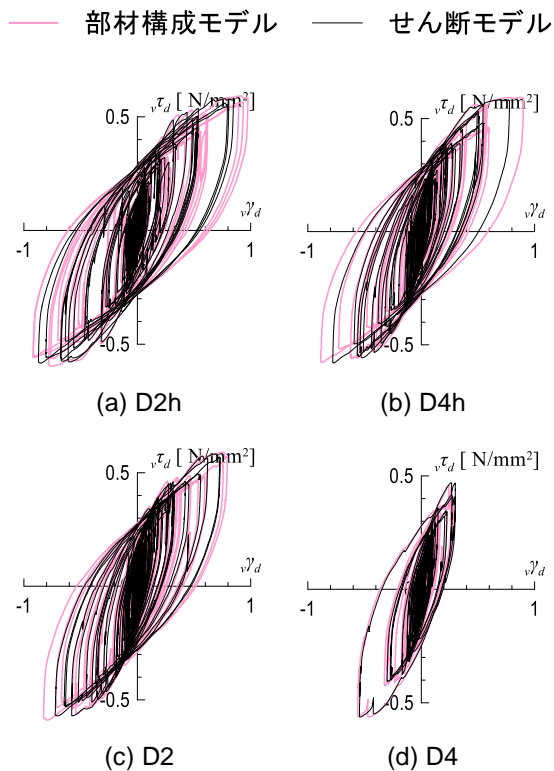


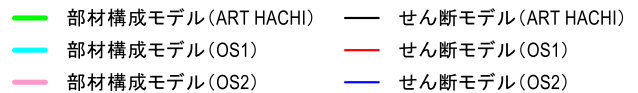
Fig.8 ダンパーループ (5層, ART HACHI)

ことはなく、全層にわたって精度よく一致した。Fig.8より、5層の粘弾性ダンパーのループを比較すると、各モデル部材構成モデルとせん断モデルの応答が精度よく一致している。このことから、せん断モデルは粘弾性ダンパーの時刻歴も適切に評価することができる。Fig.9より、5層の層間変形角の時刻歴を比較すると、各モデルともに部材構成モデルとせん断モデルの応答が精度よく一致している。このことから、せん断モデルは層の最大応答だけでなく、層の応答の時刻歴も精度よく再現できることがわかる。また、各地震波ともに精度よく応答が一致したため、地震波によらず適切に建物応答を評価することができる。

4. まとめ

間柱型粘弾性ダンパーの実効変形を考慮したせん断モデルを作成し、部材構成モデルの応答と比較することでせん断モデルの精度を検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 各モデル、層の最大応答値は部材構成モデルとせん断モデルでおおむね一致した。しかし、層間変形角は高層部で若干応答が乖離し、せん断モデルは応答を危険側に評価する傾向があった。また、その傾向



(a) D2h

(b) D4h

(c) D2

(d) D4

Fig.9 層間変形角時刻歴 (5層)

はダンパーの数が多いほど顕著であったため、実務設計に適用する場合には注意が必要である。

- (2) ダンパーループを比較すると、各モデル部材構成モデルとせん断モデルの応答が精度よく一致した。このことから、せん断モデルは粘弾性ダンパーの時刻歴も適切に評価できる。
- (3) 各モデルともに部材構成モデルとせん断モデルの層の応答の時刻歴が部材構成モデルと精度よく一致した。このことから、せん断モデルは層の最大応答だけでなく、層の応答の時刻歴も精度よく再現できる。また、各地震波ともに精度よく応答が一致し、地震波によらず適切に建物応答を評価することができる。

謝辞、参考文献はその2にまとめて記す

*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

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

Associate Professor, FIRS, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng. *2

JFE Civil Engineering & Construction Corporation *3

JFE Steel Corporation *4