

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長周期地震動に対する応答性状および性能評価実験
Title(English)	RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH STUD-TYPE VISCOELASTIC DAMPERS AGAINST LONG-PERIOD GROUND MOTIONS, AND PERFORMANCE EVALUATION TESTS
著者(和文)	太木本仁志, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也
Authors(English)	Hitoshi Takimoto, Daiki Sato, Ryota Tobari, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 66B, , pp. 345-352
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 66B, , pp. 345-352
発行日 / Pub. date	2020, 3
権利情報	日本建築学会

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および性能評価実験

RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH-RISE BUILDINGS WITH STUD-TYPE VISCOELASTIC DAMPERS AGAINST LONG-PERIOD GROUND MOTIONS, AND PERFORMANCE EVALUATION TESTS

太木本 仁志^{*1}, 佐藤 大樹^{*2}, 戸張 涼太^{*3}, 安永 隼平^{*4}, 植木 卓也^{*4}

Hitoshi TAKIMOTO, Daiki SATO, Ryota TOBARI, Jumpei YASUNAGA and Takuya UEKI

Research interest on structural vibrations induced by long-period ground motion has increased in recent years. When exposed to long-period ground motion, high-rise buildings with long natural periods tend to oscillate continuously for a long time. Accordingly, the use of passive control devices supplements the structural damping thereby mitigating the vibration of high-rise buildings. Among the types of passive control devices, a stud-type viscoelastic (VE) damper holds an advantage in space utilization, and it can handle small to large earthquakes. However, there is a general concern that the characteristics of viscoelastic dampers decrease due to repeated oscillations caused by long-period ground motion. The authors address this matter by investigating experimentally and analytically the properties of stud-type VE dampers employed to a high-rise building subjected to long-period ground motion. The random damper deformation waveform was first determined from the analysis of the building subjected to earthquake, and its equivalent-sinusoidal deformation waveform was then calculated and verified through experiment. Using the equivalent-sinusoidal waveform, proposed parameters defining the VE damper performance were calculated.

Keywords : *Passive control system, Stud-type viscoelastic damper, Long-period ground motion, High-rise building, Cumulative responses*

制振構造, 間柱型粘弾性ダンパー, 長周期地震動, 超高層建物, 応答累積値

1. はじめに

1.1 長周期地震動と制振ダンパー

近年, 検討が続けられている東海, 東南海, 南海地震等の海溝型巨大地震が起す長周期地震動により超高層建物は長い時間揺れ続けることが想定されている¹⁾。その対策として建物内に制振部材であるダンパーを設置することで, 地震エネルギーを吸収し, 主架構の損傷を抑える制振構造の需要が高まっている。制振部材の種類は, 鋼材・摩擦ダンパー, オイルダンパー, 粘性ダンパー, 粘弾性ダンパーの 4 種類に分類される²⁾。また, その設置方法には, 直接接合型に分類される層間変形を制振部材にそのまま伝達できるブレース型, 壁型, シアリンク型と, 間接接合型に分類される層間変形を梁や束などの曲げ変形などを介して伝達する間柱型, 方杖型, 接合部型などがある。その中で, 本論文では間柱型粘弾性ダンパーを研究対象とする。

間柱型粘弾性ダンパーの特徴として, 粘弾性ダンパーは微小な変形にも効果を発揮し, 小地震から大地震まで幅広く対応する。また, 間柱型は配置の自由度が高く, ブレース型に比べ, 開口部を多くとれるなど, 空間を有効に利用することが可能であり, 昨今は研究が盛んに行われている³⁾⁶⁾。しかし, 一般的に粘弾性ダンパーは, 長周期地震動による多数回の繰返し加振により, その特性が変化すこ

とが懸念される。これまでに笠井ら⁷⁾により実大ブレース型粘弾性ダンパーを対象とした長時間の正弦波加振実験が行われており, 動的特性の変化が明らかにされている。本研究対象の間柱型粘弾性ダンパーについても実大試験による性能評価や, 面外方向の変形に対する影響などの研究が行われている^{8), 9)}。また, 筆者らも長時間の正弦波加振実験を行い, 正弦波の振幅・振動数に関わらず同様に動的特性が変化することを確認している¹⁰⁾。しかし, 実際の地震動はランダム波であり, ランダム波による長時間の加振試験は, ランダム波の選定や作成が煩雑であること, アクチュエータや制御コンピュータの性能により, 一般的に実験が困難な場合が多い。そのようなランダム波によるダンパーの特性を把握する方法として, 正弦波置換法が提案されている¹¹⁾¹⁶⁾。既往の研究では, 小型の粘弾性ダンパーを対象とした長時間の正弦波および風応答波の加振実験が行われ, 動的特性の変化に加え, 正弦波置換法の有効性も確認されている^{11), 12)}。また, 実架構内に設置されたオイルダンパー, 実大粘弾性ダンパーについても長周期地震動を対象とした正弦波置換法の有効性が確認されている¹³⁾¹⁶⁾。しかし, これらは軸方向にダンパー力を発揮するブレース型のダンパーであり, せん断方向にダンパー力を発揮する間柱型粘弾性ダンパーを対象とした長周期地震動における正弦波置換法の有効性について実験的な検討は行われていない。

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 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 博士 (工学)

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

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

JFE Civil Engineering & Construction Corporation

JFE Steel Corporation, Dr. Eng.

1.2 本論文の目的と構成

以上より本論文では、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を把握するとともに正弦波置換法の妥当性を検証し、長周期地震動（ランダム波）に対する間柱型粘弾性ダンパーの性能を実験的に評価することを目的とする。

以下に本論文の構成を述べる。2章では実験に用いるダンパー変位波形を作成することを目的として、間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物モデルに長周期地震動を入力した時の応答性状を把握する。3章では実大間柱型粘弾性ダンパーの実験概要および2章で得られたダンパーの応答変位波形（ランダム波）から置換正弦波を作成し、その実験結果よりダンパーのエネルギー密度および温度上昇の検討を行い、間柱型粘弾性ダンパーへの正弦波置換法の有効性、ダンパー特性値の低下の傾向について述べる。4章では間柱型粘弾性ダンパーの特性値を初期値から低下させた解析を行い、ダンパー特性値が低下することによる応答性状を把握する。

2. 超高層建物モデルの応答性状

2.1 建物モデル概要

検討対象建物は、鉄骨造50階建の事務所ビルとする^{17), 18)}。部材断面は標準せん断力係数 $C_0 = 0.2$ の設計用地震力に対して許容応力度設計を行い決定している。Fig.1(a), (b)に検討建物モデルの軸組図および基準階伏図、Table1に架構部材の主要断面を示す。階高は1階5.5m、2~50階4mとする。軸組図の点線、基準階伏図の丸は粘弾性ダンパーの設置位置を示す。主架構のみをFrame model、1連パネルのダンパーを組み込んだモデルをS2、2連パネルのダンパーを組み込んだモデルをD2、S2とD2を合わせて全体架構と呼ぶ。S2、D2にはそれぞれ640基のダンパーを設置し、ダンパー量 α_{dl} はS2で0.3%、D2で0.6%となる（ α_{dl} の定義は後述する）。解析にはRESP-Dを用いる。基礎はモデル化せず、柱脚は固定とする。YC、YD通りの柱は長期応力を負担しないこととする。梁の剛性増大率 ϕ は片側、両側スラブ共にX方向は1.3、Y方向は1.5とする。各階では剛床を仮定した。構造減衰は主架構のみのモデル（Frame model）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。ダンパーの支持柱と梁の接合部の剛域は評価しない。本論文ではX方向を解析対象とする。Frame modelの総重量 W は806039kN、X方向の固有周期は1次7.38s、2次2.51s、3次1.44sである。

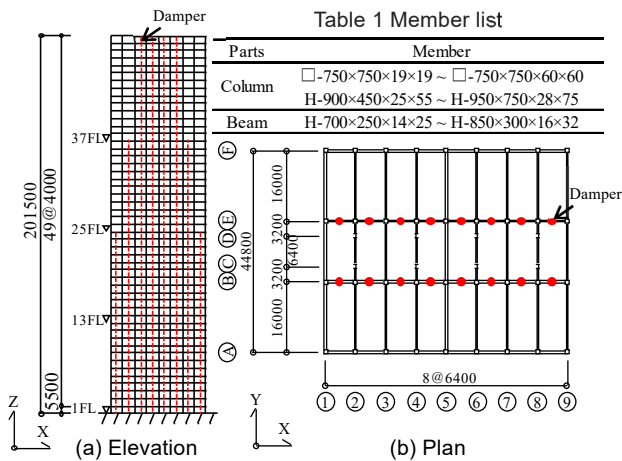


Fig.1 Elevation and Plan views [unit : mm]

2.2 ダンパー概要

2.2.1 ダンパーモデル

本論文では粘弾性体の総断面積と支持柱の寸法が異なる2種類のダンパーを用い、Fig.2に示す。Fig.2(a)は粘弾性パネルが1連（Single panel）、Fig.2(b)は粘弾性パネルが2連（Double panel）となっている。1つの粘弾性体のサイズ $A_s = 484 \times 484 \text{ mm}^2$ が2面、厚さ $d = 25 \text{ mm}$ で、上下の支持柱はH形鋼からなり、1連パネルにはH-650×300×16×25、2連パネルにはH-1100×300×16×28が取り付けられている。ダンパーの解析モデルは文献19)に示すものを用いた。なお本論文ではダンパーの重量もモデル化している。

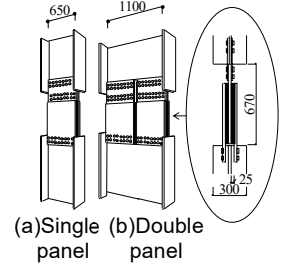


Fig.2 Viscoelastic damper [unit: mm]

2.2.2 ダンパー量の定義

ダンパー量 α_{dl} はダンパー1基あたりの切片荷重 Q_d を求め（後述）、それに第1層のダンパーの設置基数 N_{dl} を掛けたものを、建物の総重量 W で除して求めた（式(1)）。

$$\alpha_{dl} = Q_d \cdot N_{dl} / W \quad (1)$$

本論文では α_{dl} を算出する際のダンパーの切片荷重 Q_d を第1層において層間変形角 $R = 1/100 \text{ rad}$ 、ダンパーの実効変形比（=ダンパーの最大変形/最大層間変形） $\beta_e = 1$ 、つまり、せん断ひずみ $\gamma_d = 2.06$ と定義し、式(2)で算出する²⁰⁾。

$$Q_d = u \cdot K_{eq} \cdot d \cdot \gamma_d \quad (2)$$

ここで、 u はせん断ひずみに依存した降伏荷重特性比であり、式(3)で表される。

$$u(\gamma_d) = 0.4028 + 0.05580 \gamma_d - 0.008300 \gamma_d^2 - 0.003300 \gamma_d^3 \quad (3)$$

また、 K_{eq} は等価水平剛性であり、式(4)より求められる。

$$K_{eq} = A_s \cdot G_{eq} / d \quad (4)$$

ここで、 G_{eq} はせん断弾性率であり、式(5)で表される。

$$G_{eq}(\gamma_d) = 0.641(0.42960 + 2.6355 e^{-\gamma_d / 0.65317} + 5.5626 e^{-\gamma_d / 0.10130}) \quad (5)$$

各層におけるダンパーの層せん断力 ΣQ_{di} は、Fig.3に示すように第1層におけるダンパーの層せん断力 ΣQ_{d1} を基準とし、 A_i 分布に基づく設計用層せん断力分布をもとに3分割している。

2.3 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）と基盤促波であるOS2、OS1の3波を採用する²¹⁾。Fig.4(a), (b)に擬似速度応答スペクトル $\rho S_v(\zeta = 5\%)$ 、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（7.38s）付近では、OS2がART HACHIに対し、 ρS_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 ρS_v 、 V_E は約2倍となり、いずれもレベル2相当地震動であるART HACHIより大きな値を示す地震動であることが分かる。

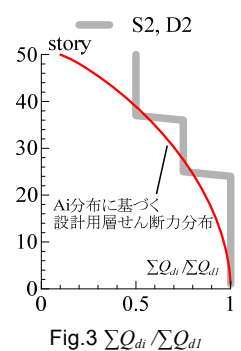


Fig.3 $\Sigma Q_{di} / \Sigma Q_{d1}$

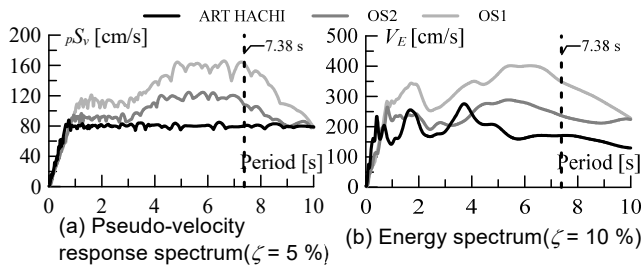


Fig.4 Earthquake spectra

2.4 時刻歴応答解析

解析は全て主架構が弾性とする。解析時間刻みは Frame model では $\Delta t = 0.01$ s, S2, D2 では $\Delta t = 0.0025$ s とした。Fig.5(a)~(c)に Frame model, S2, D2 に ART HACHI, OS2, OS1 を入力した時の最大層間変形角 R の高さ方向分布を, Fig.6(a)~(c)に最大応答加速度 Acc の高さ方向分布を, Fig.7(a)~(c)に最大層せん断力 Q の高さ方向分布を示す。(a)は ART HACHI, (b)は OS2, (c)は OS1 である。Fig.5(a)~(c)より, 最大層間変形角についてレベル 2 相当地震動の ART HACHI 入力時, Frame model では 0.01 rad を上回るが, 全体架構 (S2, D2) では 0.01 rad を下回る。また, S2, D2 で大きな差はない。OS1 入力時は Frame model に対し, S2 は約 0.84 倍, D2 は約 0.56 倍に変形が低減する。Fig.6(a)~(c)より, 最大応答加速度は ART HACHI, OS2,

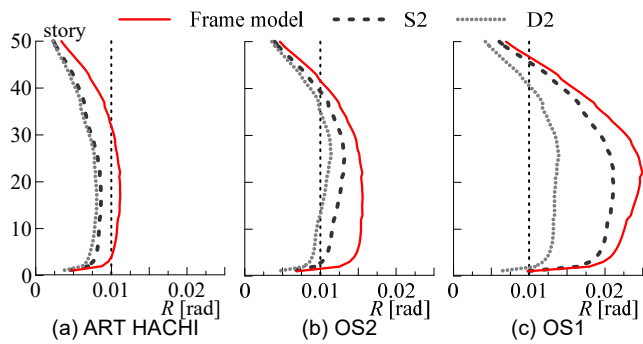


Fig.5 Peak story drift angle distribution

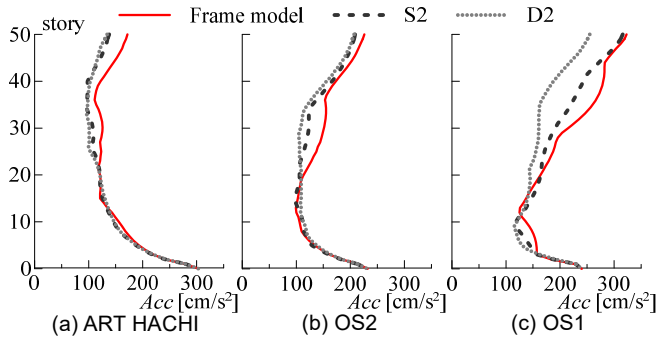


Fig.6 Peak acceleration response

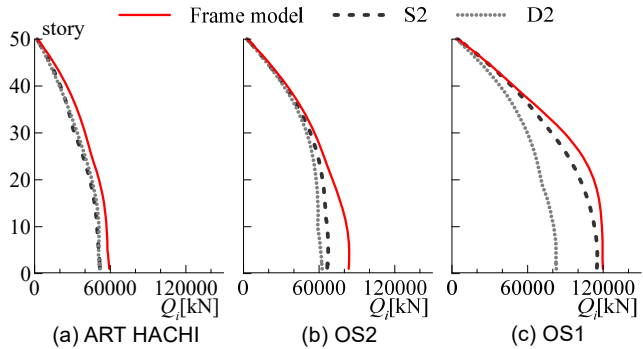


Fig.7 Peak story shear force distribution

OS1 の全てで頂部の応答が Frame model より全体架構 (S2, D2) の方が小さくなった。OS1 入力時は S2 と D2 で頂部の応答に差がある。Fig.7(a)~(c)より, Frame model に対して全体架構 (S2, D2) の最大層せん断力は ART HACHI および OS2 では同様の傾向で, ART HACHI で約 0.87 倍, OS2 で約 0.8 倍に低減される。OS1 入力時, S2 は Frame model に対し約 0.96 倍に低減され, D2 は Frame model に対し約 0.7 倍に低減される。Fig.8(a)~(c)に全体架構 (S2, D2) の粘弾性ダンパー各層 1 基あたりのエネルギー吸収量 w_d を, Fig.9(a)~(c)にダンパーの実効変形比 (=ダンパーの最大変形/最大層間変形) β_e の高さ方向分布を示す。(a)は ART HACHI, (b)は OS2, (c)は OS1 である。ここでダンパーは YB 通りの X4, X5 の間にあるダンパーを代表して取り出す。Fig.8, Fig.9(a)~(c)より, S2, D2 のどちらも ART HACHI, OS2, OS1 の順にエネルギー吸収量, 実効変形比ともに大きくなることを確認できる。OS1 入力時のエネルギー吸収量の最大値について D2 は S2 に対し ART HACHI 入力時は約 1.5 倍, OS2 入力時は約 1.28 倍, OS1 入力時は約 1.74 倍となる。また, S2 では OS1 入力時の実効変形比が 1 を超えることが分かる。このとき, ダンパーの累積変形量の最大は S2 の 8 層で 4.5 m, D2 の 8 層で 3.49 m である。ダンパーのエネルギー吸収量が大きな値となる 5~8 層付近の実効変形比に着目すると, S2 に対する D2 の実効変形比は ART

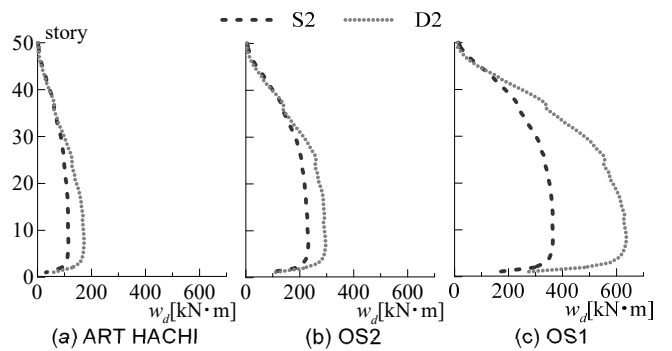


Fig.8 Energy absorption of damper per one unit

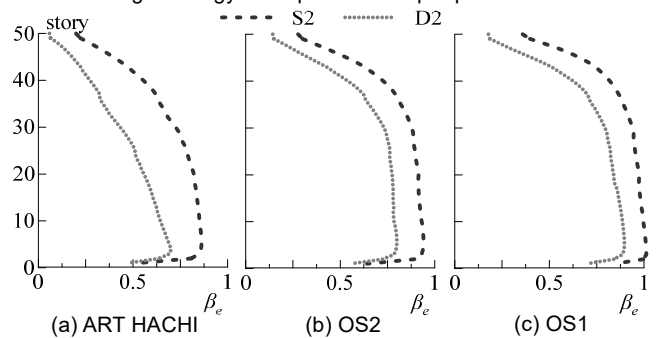


Fig.9 Effective damper deformation ratio

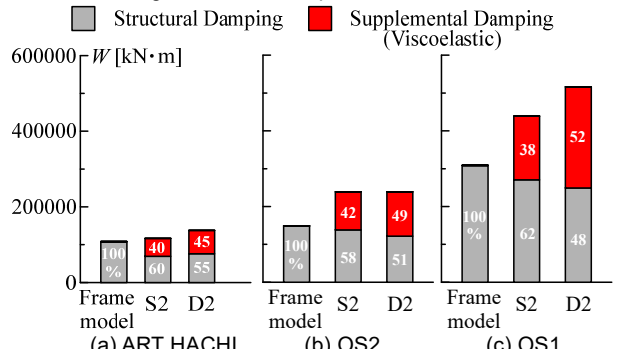


Fig.10 Energy distribution

HACHI, OS2, OS1 の順に 0.83 倍, 0.85 倍, 0.89 倍と上昇し, 制振効果が高まっている²²⁾。そのため, S2 と D2 の層間変形角の差が ART HACHI, OS2, OS1 の順に大きくなっていると考えられる。なお, 本論文ではダンパーの支持柱と梁の接合部の剛域は評価していないが, 支持柱である H 形鋼のせいで接合部の梁の剛域を評価したところ, 実効変形比は上昇するが, 応答には大きな影響を与えないことを確認している。Fig.10(a) ~ (c) に地震終了時の構造減衰 (Damping) による吸収エネルギーと粘弾性ダンパーによるエネルギー配分を示す。(a)は ART HACHI, (b)は OS2, (c)は OS1 である。Fig.10(a) ~ (c)より, ART HACHI, OS2, OS1 の順にエネルギーの総量 W が大きくなっている。これは Fig.4(b)のエネルギースペクトルからも確認できる。また, 粘弾性ダンパーのエネルギー吸収量の割合は S2 で 38% ~ 42%, D2 で 45% ~ 52% となり大きく変わらない。

本論文の建物モデルはダンパーを設置した場合(S2, D2)でも最大層間変形角 R が 0.01rad を大きく超えるが^{23), 24)}, 2 章の目的は実験に用いるダンパー変位波形を作成することであるため, 3 章の加振実験にはこの結果を用いることとする。

3. 正弦波を用いた加振実験によるダンパー性能評価

3.1 正弦波置換法概要

正弦波置換法とは,ランダム波に内在する様々なパラメータを, 共通の振幅と振動数で表される正弦波に置換することで, 様々なランダム波を用いることなく, 正弦波のみでその特性を包括的に把握できる手法である。ランダム波での結果は, ある地震波に対する特解でしかなく, その結果のみでダンパー性能を評価するのは難しい。それに比べて正弦波置換法は, 実験が非常に簡便となるだけでなく, これまで数多く行われてきた正弦波による試験結果を利用して, ランダム振動時のダンパー特性を幅広く評価することができる利点を有する¹¹⁾⁻¹⁶⁾。置換正弦波を作成する基となるランダム波には 2 章の時刻歴解析より, OS1, OS2 を D2 に入力した時, ダンパーのエネルギー吸収量が大きく, 実効変形比が最大となる 5 層のダンパー変位波形を用いる。

3.2 置換正弦波の作成

ランダム波を正弦波に置換した場合の振幅 u_d および振動数 f_r はランダム振動時のダンパーの実効継続時間 $e t_0$ (ダンパー変位波形の二乗累加値が全体の 5 ~ 95% となる時間), $e t_0$ 間における標準偏差 $u_{d,rms}$ および繰返し数 N_0^+ (変位波形が 0 軸を正の傾きで超える回数)

を用いて式(6), (7)よりそれぞれ求めることができる¹⁰⁾。

$$u_d = \sqrt{2} \cdot u_{d,rms}, \quad f_r = N_0^+ / e t_0 \quad (6), (7)$$

OS1, OS2 を入力した時刻歴応答解析より得られた粘弾性ダンパーの変位波形より, 正弦波置換法を用いて正弦波を作成する。置換正弦波の作成に必要な OS1, OS2 のダンパー変位波形の諸元 ($u_{d,rms}$, N_0^+ , $e t_0$, u_d , f_r) を Table2 に示す。本論文では式(6), (7)を用いて, OS1 のダンパーの変位波形より, $u_d = 30.8 \text{ mm}$, $f_r = 0.15 \text{ Hz}$, OS2 のダンパーの変位波形より, $u_d = 14.94 \text{ mm}$, $f_r = 0.15 \text{ Hz}$ となった。

Table2 Equivalent sine wave

	$u_{d,rms}$ [mm]	N_0^+ [-]	$e t_0$ [s]	u_d [mm]	f_r [Hz]
OS1	21.78	21	140.72	30.80	0.15
OS2	10.57	23	158.00	14.94	0.15

3.3 計測計画

3.3.1 試験体・計測概要

試験体および計測箇所を Fig.11(a), (b)に示す。(a)はセットアップ図, (b)は粘弾性パネル断面図である。粘弾性ダンパーは 1 連パネルを使用し, 粘弾性体のサイズは $A_s = 468512 \text{ mm}^2$, 厚さ $d = 25 \text{ mm}$ とする。周囲の治具に熱が移動しないように, 粘弾性パネルと上下取付具との接合部に 9 mm の断熱板を介して高力ボルト接合している。計測箇所は水平, 鉛直変位に加え, 粘弾性パネル内部の温度 (6 箇所) および支持柱部 (4 箇所), 雰囲気温度 (2 箇所) とする。粘弾性パネル内部の温度は, 粘弾性パネルを上下に 4 等分する位置を 3 点 (パネル中央部とその $\pm 121 \text{ mm}$ の点) 計測する。温度の詳細については付録 B を参照されたい。本試験において支持柱部の温度は断熱の効果により, 温度上昇していないことを確認している。荷重, 変位, ひずみ, 温度のサンプリング周波数は 50 Hz とする。

3.3.2 加振概要

Table3 に載荷条件を示す。OS1, OS2 入力時のダンパー変位波形 (ランダム波) およびそれぞれの置換正弦波の計 4 ケースの載荷を行う。Table3 には粘弾性パネル部の加振開始時の温度も示す。

3.4 ダンパー特性値の算出方法

ダンパー力 F_d はアクチュエータの荷重とする。粘弾性ダンパーのストローク (パネルのせん断変形) u_d は式(8)より求め, 本論文では $L_1 = 894 \text{ mm}$, $L_2 = 440 \text{ mm}$, $H_1 = 405 \text{ mm}$, $H_2 = 330 \text{ mm}$ とする。ダンパーのせん断応力度 τ_d はダンパー力 F_d を粘弾性体断面積 $A_s (= 468512 \text{ mm}^2)$ で除して求める (式(9))。

$$u_d = x_1 - x_2 - \frac{y_2 - y_1}{L_1} \cdot H_1 - \frac{y_4 - y_3}{L_2} \cdot H_2 \quad (8)$$

$$\tau_d = \frac{F_d}{A_s} \quad (9)$$

Table3 Experiment parameters

Frequency	Strain	Cycles	Total Times	Initial temperature
[Hz]	[%]	[-]	[s]	[°C]
0.15	123	21	151.8	17.6
OS1 Response wave			665	22.9
0.15	60	23	164.8	23.9
OS2 Response wave			662.6	23.4

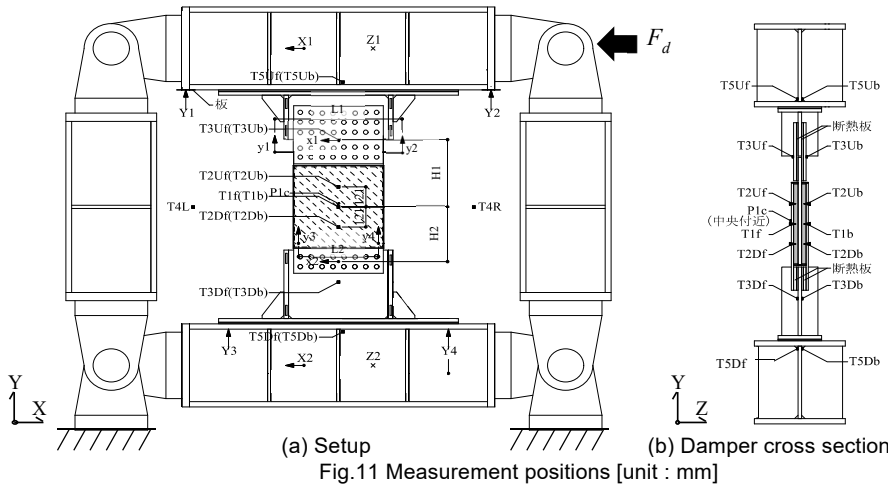


Fig.11 Measurement positions [unit : mm]

ダンパーのひずみ γ_d はパネルのせん断変形 u_d をパネル厚さ d で除して求める(式(10))。ダンパーのエネルギー吸収量 w_d をダンパーの体積 V で除したものをエネルギー密度 Ω と呼び、以下のように定義する(式(11))⁷⁾。

$$\gamma_d = \frac{u_d}{d}, \quad \Omega = \frac{w_d}{V} \quad (10), (11)$$

1サイクルごとのダンパーのせん断応力度の最大値 $\tau_{d,max}$ およびエネルギー密度 Ω を式(12), (13)より求める。なお、エネルギー密度に半波1および各载荷条件の最後の1サイクルは含まない。

$$\tau_{d,max}^{[n]} = \frac{|\tau_{d,max}^{(2n)}| + |\tau_{d,max}^{(2n+1)}|}{2}, \quad \Omega^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(\tau_d^{(i)} + \tau_d^{(i+1)}) \cdot (\gamma_d^{(i+1)} - \gamma_d^{(i)})}{2} \quad (12), (13)$$

N_D は1サイクルのデータ数である。

n サイクルのダンパーのせん断応力度の最大値は、Fig.12のように計測直後の1つ目の半波を除いた半波 $2n$ と半波 $2n+1$ の絶対値の平均値より算出する(ただし $n \geq 1$ とする)。また、エネルギー密度は1サイクルごとの

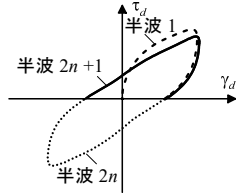
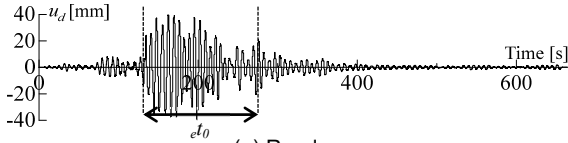
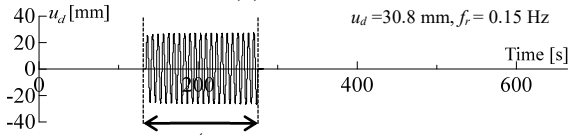


Fig.12 Definition of half wave

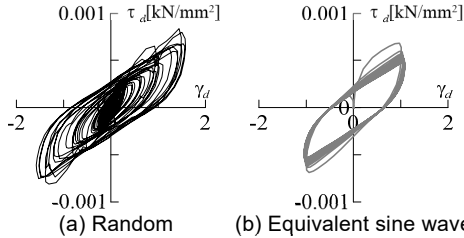


(a) Random



(b) Equivalent sine wave

Fig.13 Damper displacement history (OS1)



(a) Random

(b) Equivalent sine wave

Fig.14 $\tau_d - \gamma_d$ Loop (OS1)

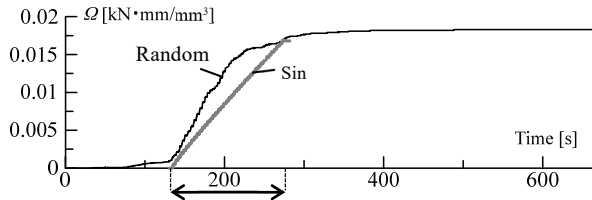


Fig.15 Ω history (OS1)

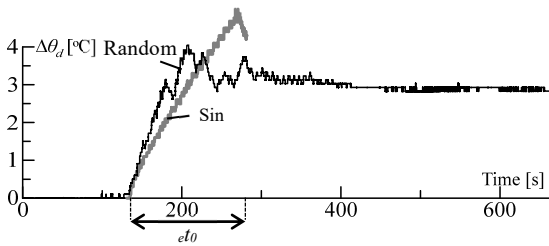


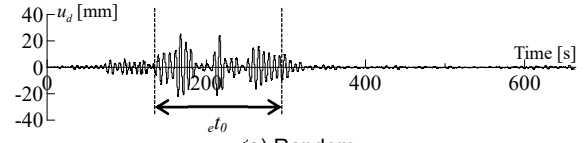
Fig.16 Temperature rise $\Delta\theta_d$ at T1b (OS1)

ダンパーのせん断応力度 τ_d -ひずみ γ_d 関係の履歴の面積より算出する。本論文では、等価せん断弾性率 G_{eq} 、等価減定数 H_{eq} をダンパーの特性値と呼び、それぞれ式(14), (15)より求める。なお、 $()$ はステップ、 $\langle \rangle$ は半波、 $[\]$ はサイクルを意味する。以降はダンパーの特性値に着目し、長時間の繰り返しによる変化について検討する。

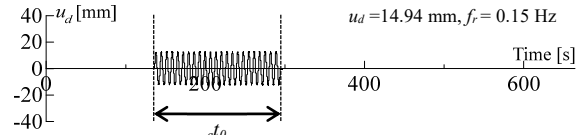
$$G_{eq}^{[n]} = \frac{|\tau_{d,max}^{(2n)}| + |\tau_{d,max}^{(2n+1)}|}{\frac{|\gamma_{d,max}^{(2n)}| + |\gamma_{d,max}^{(2n+1)}|}{2}}, \quad H_{eq}^{[n]} = \frac{\Omega^{[n]}}{2\pi \cdot G_{eq}^{[n]} \left(\frac{|\gamma_{d,max}^{(2n)}| + |\gamma_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \right)^2} \quad (14), (15)$$

3.5 置換正弦波によるダンパーのエネルギー密度と温度上昇

Fig.13(a), (b)にダンパーの変位波形を示す。(a)はOS1入力時の変位波形(ランダム波)、(b)はOS1の置換正弦波である。実効継続時間 $e t_0$ を破線で示している。Fig.14(a), (b)にダンパーのせん断応力度 τ_d -ひずみ γ_d 関係を示す。(a)はOS1入力時のダンパー変位波形(ランダム波)、(b)はOS1の置換正弦波である。Fig.15にダンパーのエネルギー密度 Ω の時刻歴、Fig.16に粘弾性パネル中央部の初期温度に対する上昇温度 $\Delta\theta_d$ の時刻歴をそれぞれ示す。Fig.15より、OS1入力時のダンパーの変位波形(ランダム波)と置換正弦波で加振終了時のエネルギー密度は概ね一致することが確認できる。Fig.16より、

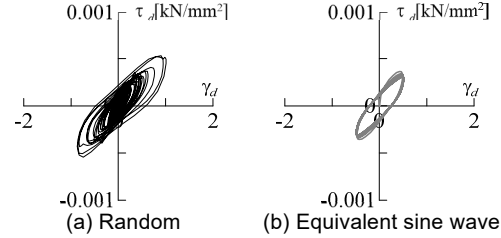


(a) Random



(b) Equivalent sine wave

Fig.17 Damper displacement history (OS2)



(a) Random

(b) Equivalent sine wave

Fig.18 $\tau_d - \gamma_d$ Loop (OS2)

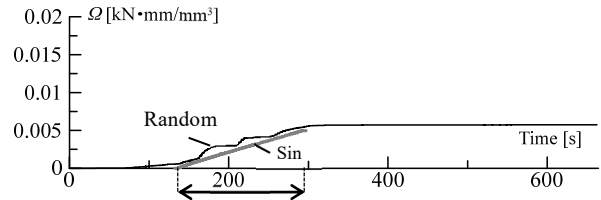


Fig.19 Ω history (OS2)

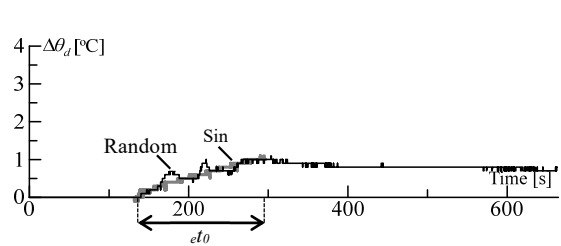


Fig.20 Temperature rise $\Delta\theta_d$ at T1b (OS2)

粘弾性パネルの温度上昇は正弦波の方が大きくなったが、誤差は1°C程度であり概ね一致している。Fig.17(a), (b)にOS2入力時のダンパーの変位波形を示す。(a)はOS2入力時の変位波形(ランダム波)、(b)はOS2の置換正弦波である。実効継続時間 t_{eq} を破線で示している。Fig.18(a), (b)にダンパーのせん断応力度 τ_d -ひずみ γ_d 関係を示す。(a)はOS2入力時の変位波形(ランダム波)、(b)はOS2の置換正弦波である。Fig.19にダンパーのエネルギー密度 Ω の時刻歴、Fig.20に粘弾性パネル中央部の初期温度に対する上昇温度 $\Delta\theta_0$ の時刻歴をそれぞれ示す。Fig.19より、OS2入力時のダンパーの変位波形(ランダム波)と置換正弦波で加振終了時のエネルギー密度は概ね一致している。Fig.20より、粘弾性パネルの温度上昇はOS2入力時のダンパーの変位波形と置換正弦波で同等の値を示している。

3.6 OS1, OS2入力時のダンパーの性能評価

Fig.21(a), (b)にOS1, OS2の置換正弦波のエネルギー密度 Ω に対する等価せん断弾性率 G_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} の低下率 $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ をそれぞれ示す。 $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ は3サイクル目で基準化し、 Ω は3サイクル目からの累積値とする。Fig.21(a), (b)より、加振終了までの $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ はOS1で $g\lambda_\Omega$ は約15%、 $h\lambda_\Omega$ は約4%低下する。また、OS2では $g\lambda_\Omega$ は約9%、 $h\lambda_\Omega$ は約4%低減することが分かる。3.5節より、ランダム波と置換正弦波で加振終了時のエネルギー密度 Ω は概ね一致することから、ランダム波では算出できないダンパー特性値の低下を置換正弦波による実験結果を用いることで把握できる¹⁰⁾。

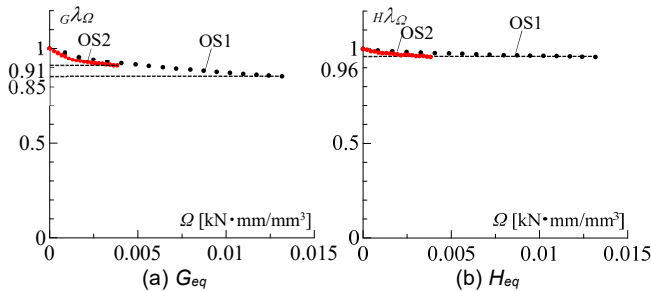


Fig.21 Normalized dynamic properties vs. energy density

4. ダンパー特性値(G_{eq} , H_{eq})の低下を考慮した時刻歴応答解析

4.1 解析概要

解析モデルは2章と同様に50層建物モデルを用いる。解析は全て主架構が弾性とする。2章で示したダンパーの特性値が変化しない建物モデル(D2)と3.6節のOS1, OS2の置換正弦波による G_{eq} 、 H_{eq} の低下率 $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ を考慮したダンパーを設置した建物モデル(D2')の応答を比較する。Table4にD2およびD2'の $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ を示す。D2'は建物に設置されている全てのダンパー特性値を一律にTable4に示す値に低下させている。

Table4 $g\lambda_\Omega$, $h\lambda_\Omega$ (OS1, OS2)

Case	OS1		OS2	
	$g\lambda_\Omega$	$h\lambda_\Omega$	$g\lambda_\Omega$	$h\lambda_\Omega$
D2	1	1	1	1
D2'	0.85	0.96	0.91	0.96

4.2 時刻歴応答解析

Fig.22, 23(a)~(c)にOS1, OS2を入力した時の応答値の高さ方向分布を示す。(a)は最大層間変形角、(b)は最大応答加速度、(c)は最大層せん断力である。Fig.22(a)~(c)より、OS1入力時のD2に対するD2'の最大層間変形角は約1.12倍、最大応答加速度は約1.07倍、最大層せん断力は約1.15倍となる。Fig.23(a)~(c)より、OS2入力時の

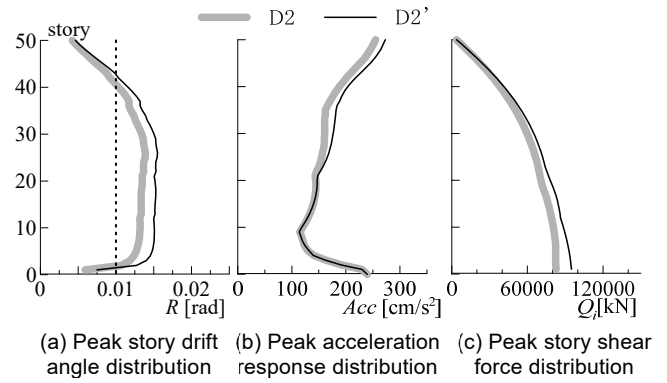


Fig.22 Peak story responses (OS1)

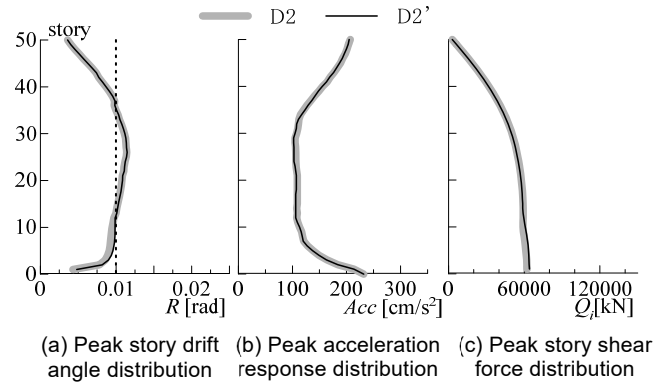


Fig.23 Peak story responses (OS2)

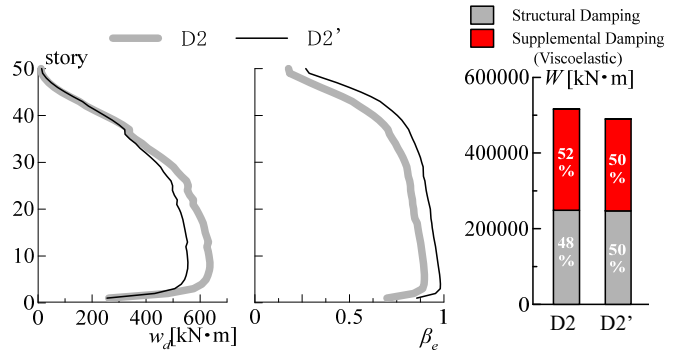


Fig.24 Story distribution of damper per one unit (OS1)

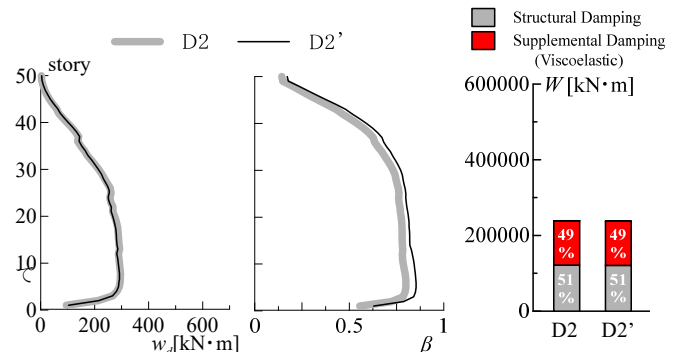


Fig.25 Energy distribution (OS1)

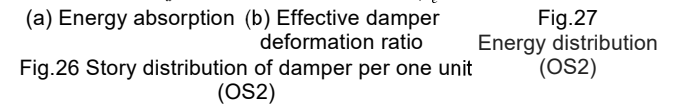


Fig.26 Story distribution of damper per one unit (OS2)

最大応答値は D2 と D2' で概ね変わらないことが分かる。Fig.24~27 に OS1, OS2 入力時の粘弾性ダンパー1 基あたりのエネルギー吸収量 w_d およびダンパーの実効変形比 β_e の高さ方向分布, 地震終了時の構造減衰 (Damping) による吸収エネルギーと粘弾性ダンパーによるエネルギー配分を示す。Fig.24(a), (b)より, OS1 入力時の w_d について D2'は D2 に対し, 約 0.87 倍となる。また, β_e は約 1.09 倍となる。Fig.25 より, OS1 入力時のエネルギー配分は D2 と D2' で概ね変わらないが, 粘弾性ダンパーによるエネルギー吸収量について D2' は D2 に対して約 0.91 倍となる。Fig.26(a), (b)より, OS2 入力時の β_e は D2'の方が D2 より大きな値を示すが, w_d は D2'と D2 で大差なく, β_e の増加による w_d に与える影響は小さい。Fig.27 より, OS2 入力時のエネルギー配分について D2'は α_{dl} を 1 割程度低下させたが D2 と概ね変わらない結果となった。これは, 本論文で用いた建物モデルのダンパー量が 0.6%と小さいためであると考えられる。

5. まとめ

本論文では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を把握するとともに正弦波置換法の妥当性を検証し, 長周期地震動 (ランダム波) に対する間柱型粘弾性ダンパーの性能を実験的に評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高層建物モデルの応答性状について, 長周期地震動である OS1 入力時の最大層間変形角は主架構のみのモデルである Frame model に対し, 2 連パネルのダンパーを組み込んだモデルである D2 ($\alpha_{dl} = 0.6\%$) は約 0.56 倍に最大層間変形角が低減され, ダンパー設置による効果が大きく見込める。また, 地震終了時の構造減衰 (Damping) による吸収エネルギーと粘弾性ダンパーによるエネルギー配分は OS1 入力時の D2 で粘弾性ダンパーによるエネルギーが約 52%となり, エネルギー総量の半分を負担する。
- (2) 実大粘弾性ダンパー加振実験では, ランダム波と置換正弦波によるエネルギー密度 Ω およびダンパー部の温度上昇 $\Delta\theta_d$ の傾向は概ね一致しており, 本研究対象の間柱型粘弾性ダンパーにおいても正弦波置換法は有効であることを確認した。
- (3) OS1, OS2 を超高層建物モデルに入力した時のダンパー変位の置換正弦波を用いたダンパー加振実験ではエネルギー密度 Ω に対する等価せん断弾性率 G_{eq} が約 9% ~ 15%, 等価減衰定数 H_{eq} が約 4% 低下することを確認した。
- (4) 加振実験結果を基に特性値を初期値から低下させたダンパーを設置した建物モデル (D2') と特性値が変化しないダンパーを設置した建物モデル (D2) の応答値を比較したところ, G_{eq} が 1 割程度の低下であれば応答は概ね変わらないことを確認した。これは, 本論文で用いたダンパーを設置した建物モデル ($\alpha_{dl} = 0.6\%$) の結果であり, ダンパー量を大きくした場合は応答の変化に注意が必要である。

今後は様々なひずみ, 振動数の組み合わせで行った間柱型粘弾性ダンパーの多数回繰り返し加振実験について別報で報告する。また, 文献 25) より, エネルギー密度を用いて粘性ダンパーの長時間繰返しによる性能低下を考慮した, 長周期地震動に対する超高層建物の応答評価手法が提案されており, 本研究対象の間柱型粘弾性ダンパーでも同様の手法を検証する予定である。

謝辞

本論文は, 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。JFE シビル株式会社の宮川和明氏, 吉永光寿氏には本論文を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。また, 株式会社ブリヂストンより試験体をご提供いただきました。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によるものです。

参考文献

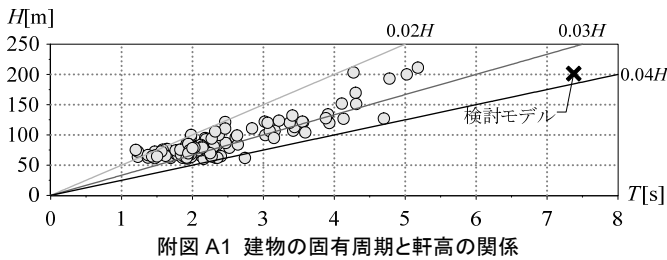
- 1) 日本建築学会: 長周期地震動と超高層建物の対策案—専門家として知っておきたいこと—, 2013.10
- 2) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造 設計・施工マニュアル 第 3 版, 2013.11
- 3) 辻聖晃, 藤原悠祐, 吉富信太, 金亨國, 竹脇出: 日本建築学会構造系論文集, 第 677 号, pp.1037-1046, 2012.7
- 4) 鈴木公平, 中尾貞治, 津之下睦, 高島英幸: 非線形粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の減衰性能評価と動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 745 号, pp.373-383, 2018.3
- 5) 鈴木公平, 津之下睦, 中尾貞治, 高島英幸: 非線形粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の多質点系モデルによる簡易評価, 日本建築学会技術報告集, 第 59 号, pp.85-90, 2019.2
- 6) 鈴木公平, 津之下睦, 中尾貞治, 高島英幸: 非線形粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の多質点系モデル置換による簡易評価法の適用限界に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 60 号, pp.625-630, 2019.6
- 7) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥: 長時間正弦波加振実験による 4 種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工学論文集, 第 63 号, pp.275-284, 2017.3
- 8) 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, pp.595-596, 2017.7
- 9) 戸張涼太, 金城陽介, 吉永光寿, 植木卓也, 正木信男, 森隆浩: 高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー—その 4 面内変形が面内方向の性能に与える影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269-270, 2018.7
- 10) 安永隼平, 佐藤大樹, 太木本仁志, 戸張涼太, 植木卓也: 間柱型粘弾性ダンパーの長周期地震動に対する性能評価 その 2 多数回正弦波加振実験による特性変化の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.737-738, 2019.9
- 11) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, 第 53 号, pp.67-74, 2007.3
- 12) 佐藤大樹, 所健, 笠井和彦, 北村春幸: 風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 号, pp.571-581, 2015.4
- 13) 佐藤大樹, 大内隼人, 長江拓也, 五十幡直文, 北村春幸, 中島正愛: 実大架構内に設置したオイルダンパーの性能評価および長周期地震動による温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.529-530, 2010.9
- 14) 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 杉山暢方, 松田和浩: 長周期・長時間地震動における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験, 日本地震工学会第 11 回年次大会梗概集, P2-10, 2015.11
- 15) 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩, 杉山暢方: 風応答時における実大粘弾性ダンパーの簡易評価実験および解析モデルの提案, 第 24 回風工学シンポジウム論文集, pp.289-294, 2016.12
- 16) 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 梶原浩一: 長周期地震動をうける超高層建物のオイルダンパーによる制振補強効果, 日本建築学会技術報告集, 第 58 号, pp.969-974, 2018.10
- 17) 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, 第 712 号, pp.873-883, 2015.6
- 18) 白田雄作, 佐藤大樹, 北村春幸, 松田頼征, 木村雄一, 山本優, 木村暢志: 単独地震の応答に基づく連動地震に対する超高層制振建物の応答推定手法—南海トラフ沿いにおける東海・東南海・南海三連動地震を対象として—, 日本建築学会構造系論文集, 第 747 号, pp.687-697, 2018.5
- 19) 森隆浩, 櫻井祐, 加藤亨二, 戸張涼太, 吉永光寿, 金城陽介: 高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー—その 2 時刻歴応答解析履歴モデル—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.597-598, 2017.7
- 20) BRIDGESTONE: 建築免震用積層ゴム製品仕様一覧, p.8, 2018.1
- 21) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について (技術的助言), 2016.6
- 22) 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: 粘性制振壁の配置位置及び設置タイプを考慮した超高層建物の制振評価, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 42 号, pp.425-430, 2013.6
- 23) 太木本仁志, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平: 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 1 間柱型粘弾性ダンパーを設置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.417-420, 2019.3
- 24) 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

- 25) 佐藤大樹, 長山祥, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価, 日本建築学会技術報告集, 第56号, pp.59-62, 2018.2
- 26) 加藤翼, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 石井正人, 吉江慶祐: 文献調査に基づく既存超高層建物の現状把握と地震応答解析モデルの構築, 日本建築学会技術報告集, 第45号, pp.575-580, 2014.6

附録 A 検討モデルの構造特性

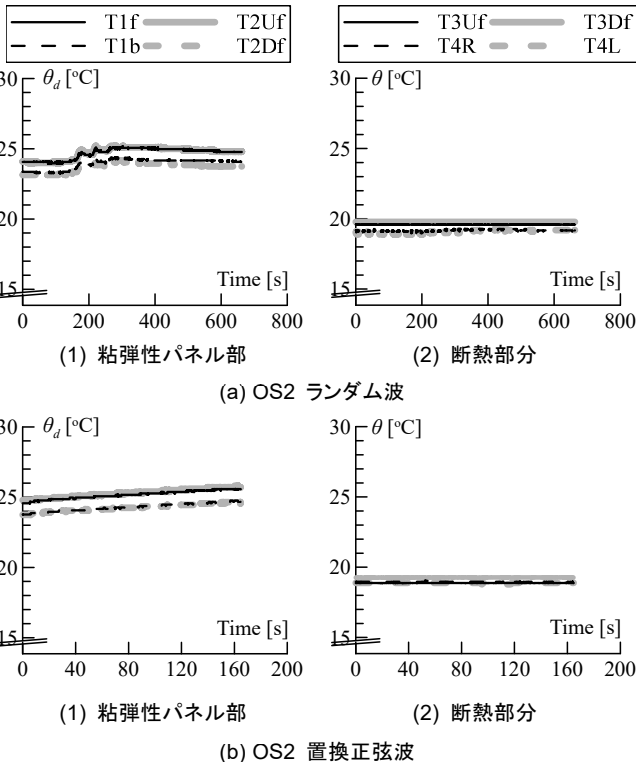
建物の諸条件から定まる構造特性として, 調査対象建物の軒高 H と 1 次固有周期 T の関係²⁶⁾を附図 A1 に示す。ここで, 同図には固有周期の概算値として, $T = 0.02H, 0.03H, 0.04H$ の関係を直線で併記している。附図 A1 には, 本論文で用いた検討対象建物の周期も示す。同図より, 固有周期は, $T = 0.025H \sim 0.03H$ に多く分布するが, 本論文の検討対象建物は, $T = 0.03H \sim 0.04H$ にあり, 比較的周期の長い建物であることがわかる。



附図 A1 建物の固有周期と軒高の関係

附録 B 粘弾性パネル部および断熱板部分の温度

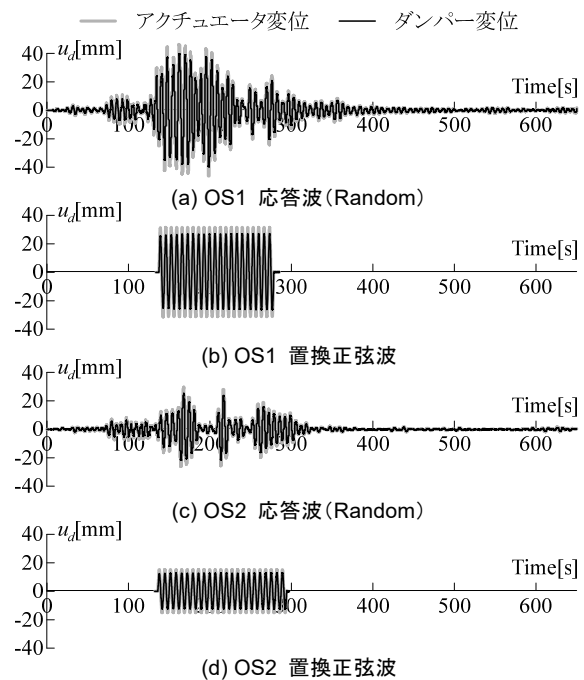
OS2 入力時のダンパー変位波形とその置換正弦波を入力変位としてダンパー加振実験を行った時の粘弾性パネル部 (T1f, T1b, T2Uf, T2Df) および断熱板を介した粘弾性パネルと上下取付具との接合部 (T3Uf, T3Df) の温度, 雰囲気温度 (T4R, T4L) の時刻歴を附図 B1(a), (b) に示す。附図 B1(1) は粘弾性パネル部, (2) は断熱部分である。附図 B1(a), (b) の (1) より, 粘弾性パネル中央部 (T1f, T1b) と端部 (T2Uf, T2Df) で初期温度は異なるが上昇の傾向に変わりはないことが分かる。附図 B1(a), (b) の (2) より, 断熱板を介した部分と雰囲気温度 (T4R, T4L) の上昇は見られず, 断熱効果が得られていることが分かる。



附図 B1 粘弾性パネル部および断熱部分の温度

附録 C アクチュエータ変位とダンパー変位

実験ではダンパー変位波形 (ランダム波) をアクチュエータ変位として入力するが, その際, ダンパー変位は粘弾性パネル部の回転が発生し, 実際のダンパー変位はアクチュエータ変位と多少の誤差が生じる。附図 C1(a) ~ (d) にアクチュエータ変位およびダンパー変位波形 (ランダム波および置換正弦波) を示す。(a) は OS1 のランダム変位波形, (b) は OS1 の置換正弦波, (c) は OS2 入力時のランダム変位波形, (d) は OS2 の置換正弦波である。附表 C1 に実験でのアクチュエータ変位およびダンパー変位の最大値および最小値を示す。附図 C1(a) ~ (d) および附表 C1 より, ダンパー変位の方がアクチュエータ変位より小さくなるのが分かる。ダンパー変位が変わることは置換正弦波の諸元 ($u_{d,rms}, N_0^+, \epsilon t_0, u_d, f_r$) も変わることを意味する。実験のダンパー変位波形 (ランダム波) を基に置換正弦波を作成する。附表 C2 に置換正弦波の作成に必要な OS1, OS2 のダンパー変位波形 (実験波形) の $u_{d,rms}, N_0^+, \epsilon t_0, u_d, f_r$ を示す (Ideal Damper Deformation)。本論 Table2 に示した解析より得られたダンパー変位波形 (ランダム波) の置換正弦波の諸元も同時に示す (Test Input for Actuator)。附表 C2 より, OS1, OS2 とともに実験波形から求めた N_0^+ は解析波形から求めた場合より 1 少なくなるが, ϵt_0 も短くなるため, f_r は概ね変わらない。 u_d が小さくなっているが, 附表 C1 に示すとおり, 実験のダンパー変位波形はアクチュエータ変位より小さな値となっており, 多少の誤差はあるが問題はないと考えられる。



附図 C1 アクチュエータおよびダンパー変位

附表 C1 最大変位および最小変位 (OS1, OS2)

Case	Deformation	$u_{d,max}$ [mm]	$u_{d,min}$ [mm]
OS1	Random Actuator	45.1	-45.5
	Random Damper	39.6	-39.5
	Sin Actuator	30.8	-30.8
	Sin Damper	27.3	-26.2
OS2	Random Actuator	29.0	-25.7
	Random Damper	25.3	-21.7
	Sin Actuator	14.9	-14.9
	Sin Damper	12.9	-12.4

附表 C2 置換正弦波諸元 (OS1, OS2)

Case	$u_{d,rms}$ [mm]	N_0^+ [-]	ϵt_0 [s]	u_d [mm]	f_r [Hz]	
OS1	Ideal Damper Deformation	19.27	20	136.60	27.25	0.146
	Test Input for Actuator	21.78	21	140.72	30.80	0.149
OS2	Ideal Damper Deformation	9.03	22	152.40	12.77	0.144
	Test Input for Actuator	10.57	23	158.00	14.94	0.146