T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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

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 巨大地震が起こ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。制振部材の種別は, 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,その特性が変化するこ

*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) *³JFE シビル 株式会社 *⁴JFE スチール 株式会社 博士 (工学)

とが懸念される。これまでに笠井らっ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⁾⁻¹⁰。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。

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 Co = 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 5.5 m, 2~50 階 4 m 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_{d1}は S2 で 0.3%, D2 で 0.6%となる (*a*_{d1}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

ø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ζ=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 806039 kN, X 方 向の固有周期は1次7.38s,2次2.51s,3次1.44sである。



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 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× $300 \times 16 \times 25$ 、2連パネルにはH- $1100 \times 300 \times 16 \times 28$ が取り付いてい 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。





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))。

 $\alpha_{dl} = Q_d \cdot N_{dl} / W \tag{1}$

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 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⁾。

 $Q_d = u \cdot K_{eq} \cdot d \cdot \gamma_d \tag{2}$

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。

 $u(\gamma_d) = 0.4028 + 0.05580 \gamma_d - 0.008300 \gamma_d^2 - 0.003300 \gamma_d^3$ (3) また, K_{eq} は等価水平剛性であり,式(4)より求められる。

 $K_{eq} = A_s \cdot G_{eq} / d$ 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^{-12/0.63317}+5.5626 e^{-12/0.10130}) 各層におけるダンパーの層せん断力 S2, D2 SQ_{di}は, Fig.3 に示すように第 1 層に 50 おけるダンパーの層せん断力 SQ_{d1} を 40 基準とし, Ai 分布に基づく設計用層せ 30 ん断力分布をもとに 3 分割している。 20

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



(4)

(5)

と呼ぶ)と基整促波である 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 $_{p}S_{v}(\zeta = 5\%)$, 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, $_{p}S_{v}$ は約 1.3 倍, V_{E} は約 1.4 倍と なる。また、OS1 が ART HACHI に対し $_{p}S_{v}$, 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。



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,



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 wd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 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 きくなることが確認できる。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



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 $_{elo}$ (ダンパー変位波形の二乗累加値が全体の $5 \sim 95\%$ となる時間), $_{elo}間における標準偏差<math>u_{d,rms}$ 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⁾。

 $u_d = \sqrt{2} \cdot u_{d,rms}, \quad f_r = N_0^{+} /_e t_0$ (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^+ , $_{d0}$, 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 mm, f_r = 0.15 Hz, OS2 の ダンパーの変位波形より, u_d = 14.94 mm, f_r = 0.15 Hz となった。

Table2 Equivalent sine wave

	$u_{d,rms} = N_0^+$		et 0	u _d	f_r
	[mm]	[-]	[s]	[mm]	[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 mm²,厚さ d=25 mm と する。周囲の冶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±121 mmの点)計測する。温度の詳細につ いては附録 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

ダンパーカ 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 はダンパーカ F_d を粘弾性体断面積 A_s (= 468512 mm²)で除して求める (式(9))。





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)) η 。

$$\gamma_d = \frac{u_d}{d} , \quad \Omega = \frac{w_d}{V}$$
(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 t_{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および各載荷条件の最後の1サイクルは含まない。



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、〈〉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。

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



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 _d 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_{td}-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Δθ_d 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 $_{G\lambda\alpha, H\lambda\alpha}$ をそ れぞれ示す。 $_{G\lambda\alpha, H\lambda\alpha}$ 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 $_{G\lambda\alpha, H\lambda\alpha}$ は OS1 で $_{G\lambda\alpha}$ は約 15%, $_{H\lambda\alpha}$ は約 4%低下する。また, OS2 では $_{G\lambda\alpha}$ は約 9%, $_{H\lambda\alpha}$ 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⁾。



ダンパー特性値(Geq, Heq)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 $_{\alpha}\lambda_{\alpha}$, $_{\lambda\alpha}$ 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 $_{\alpha}\lambda_{\alpha}$, $_{\mu}\lambda_{\alpha}$ 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	$\lambda_{\Omega}, {}_{H}\lambda_{\Omega}$ (C	DS1, OS2	2)	
Case	0	S1	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



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_c 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_c 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_c 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_c 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 $_c\lambda_a$ 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 (*a*_{d1} = 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Δθα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 (D2¹)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(α_{d1} = 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:非線形型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: 非線形型粘弾性ダンパーを有 する間柱型制振構造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:非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振構造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 面外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巻,第710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) 臼田雄作,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 時刻歴応答解析用履歴モデル ~, 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 $H \ge 1$ 次固 有周期 T の関係 ²⁰⁾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~0.03Hに多く分布するが、本論文の検討対象建物は、T=0.03H~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(Tlf, Tlb, 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)は粘弾性パネル中央部(Tlf, Tlb)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 Cl(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 Cl(a)~(d)および附表 Cl 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ことが分かる。ダンパー変位が変わることは置換正弦波 の諸元 $(u_{d,rms}, N_0^+, e_{t_0}, u_{d_1}, f_r)$ 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 ud, rms, No⁺, eto, ud, fr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 ともに実験波形から求めた No⁺ は解析波形から求めた場合より1少なくなるが, etoも短くなるため, frは概 ね変わらない。ua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



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

附表 C2 置換正弦波諸元(OS1, OS2)

Case		U d, rms	N_0^+	$_{e}t_{0}$	u_d	f_r
		[mm]	[-]	[s]	[mm]	[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