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)	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
Title(English)	
著者(和文)	長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 杉山暢方, 松田和浩
Authors(English)	Sho Nagayama, Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Nobumasa Sugiyama, Kazuhiro Matsuda
出典(和文)	日本地震工学会第11回年次大会梗概集, , , P2-10
Citation(English)	Proceedings of the 11th Annual Meeting o f Japan Association for Earthquake Engineering, , , P2-10
発行日 / Pub. date	2015, 11

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

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

長山祥[1)]、佐藤大樹[2)]、笠井和彦[3)]、杉山暢方[4)]、松田和浩[5)]

1) 学生会員　東京工業大学大学院生
e-mail : nagayama.s.ab@m.titech.ac.jp
2) 正会員　東京工業大学建築物理研究センター、准教授　博士（工学）
e-mail : daiki-s@serc.titech.ac.jp
3) 正会員　東京工業大学建築物理研究センター、教授　Ph.D.
e-mail : kasai@serc.titech.ac.jp
4) （株）フジタ（元東京工業大学）、修士（工学）
e-mail : nobumasa.sugiyama@fujita.co.jp
5) 正会員　東京工業大学建築物理研究センター、助教　博士（工学）
e-mail : matsuda@serc.titech.ac.jp

要　約

本論文は、実大粘弾性ダンパーを対象とした加振実験を行い、長周期・長時間地震動による温度・動的特性の変化の把握を行う。また、実大粘弾性ダンパーに対する正弦波置換法の適用性を確認する。結果より、内部の粘性体に温度上昇は見られるものの、時間経過とともに熱伝導・伝達の効果により温度が低下していくことが確認された。また、正弦波置換法において地震応答時のダンパー温度・動的特性の変化を再現でき、本手法の有効性が確認された。

キーワード：　実大粘弾性ダンパー、長周期・長時間地震動、正弦波置換法、特性評価

1. はじめに

一般に、粘弾性ダンパーは、振動時に吸収した振動エネルギーを熱に変換し、温度が上昇する。その温度上昇に伴い、ダンパーの抵抗力が低下する温度依存性を有している。そのため、長周期地震動などの継続時間が長い地震が発生した際に、粘弾性ダンパーの温度上昇量は大きくなり、ダンパーへの影響が懸念される。以上のことから、長周期・長時間地震動に対する粘弾性ダンパーの特性変化を把握する必要がある。これまでに笠井ら[1)]により長時間の正弦波加振実験が行われている。その結果、加振直後ではエネルギー吸収により粘弾性ダンパーの温度上昇と剛性低下が起こるが､熱伝導･伝達の効果により、ある時点で温度上昇が留まり定常状態に移るため、粘弾性ダンパーは剛性が低下し続けることは無く一定性能を保持することが確認された。しかし、この結果は、長時間の正弦波を入力した場合であり、長時間のランダム波を入力した際のダンパーの温度変化を評価する実験は僅かである[2)-5)]。また、粘弾性ダンパーは振動数依存性も有しており、粘弾性体のエネルギー吸収による発熱量は、入力の振動数特性によって複雑に変化する[6)-9)]。そのため、様々な振動数成分を有する長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパー特性を、1つの振動数成分しか有しない正弦波で評価することの妥当性は明らかでない。

長時間のランダム波で実大実験を行うことは、ランダム波の作成が非常に煩雑であることに加え、実

験装置の性能上困難な場合が多い。そのため、粘弾性ダンパーの動的特性を評価するためには、一定振幅・振動数による実験がこれまで一般的に行われてきた。既往の研究では、小型の粘弾性ダンパーを対象とし、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、正弦波を用いて風応答時におけるダンパー特性の変化を評価する手法(正弦波置換法)の有効性が確認されている[10),11)]。また、正弦波置換法は実架構内に設置されたオイルダンパーの性能評価にも、適用できることを確認している[12)]。しかし、実大の粘弾性ダンパーを対象とした、長周期・長時間地震動における正弦波置換法の適用性に関して、未だ実験的な検討は行われていない。

そこで本論文の目的は、実大粘弾性ダンパーを対象とした加振実験を行い、長周期・長時間地震動による温度・動的特性の変化を把握するとともに、正弦波置換法の実大粘弾性ダンパーに対する適用性を確認することである。

2. 試験体および計測概要

本実験では、ダンパー長さL = 4024.5mm、層せん断面積As = 9.12×10^{5}mm^2、粘弾性体の厚さt = 8mm、粘弾性体積層数n = 6のアクリル系粘弾性体（3M製ISD111）の粘弾性ダンパーを試験体とする[13)]。図1に本実験の試験体セットアップを、図2に計測箇所一覧を示す。図1、図2に表記されている数字は歪・温度における計測チャンネルの番号である。歪はA-A'断面で6箇所計測し（①～⑥）、温度はB-B'断面で12箇所、C-C'断面で10箇所とダンパー周辺温度の計23箇所（1～26）で計測を行う。温度の測定には、熱電対を用いた。温度計測の時間刻みは、Δt=1.0秒、ダンパーの変位と荷重の計測の時間刻みは、Δt=0.01秒で加振開始から実験終了まで連続で測定した。なおダンパーの初期温度については、22±1℃とした。

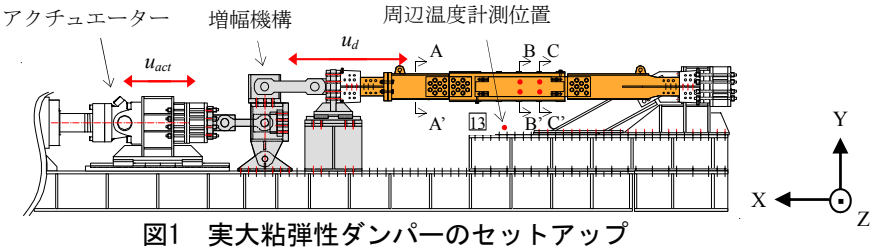


図1　実大粘弾性ダンパーのセットアップ

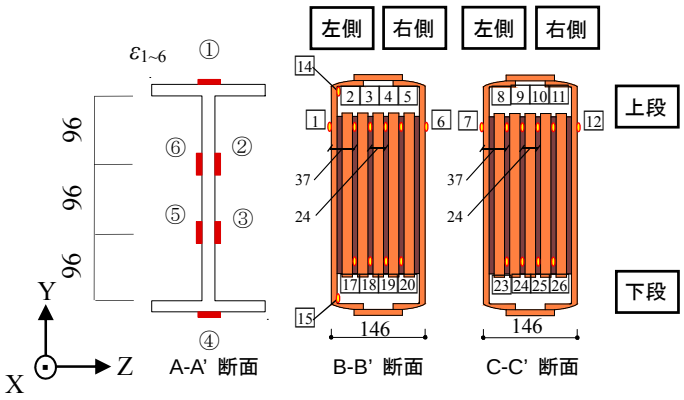


図2　試験体断面および歪・温度計測位置（単位：mm）

3. 長周期応答波の作成

3.1 地震応答波の作成

実験に用いる地震応答波は、超高層建物を想定した多質点系モデルを用い、長周期地震動を入力波とした時刻歴応答解析を行い、得られた多質点系モデルの層間変位の中で最大の層間変位 δ を、ダンパーの軸方向変位 u_d に変換して用いる（式1）[14)]。ここで、θ はダンパーの取り付け角度とする。

$$u_d = \delta \cdot \cos\theta \tag{1}$$

解析用入力地震波として、長周期地震動の一種である三の丸波を採用する[15),16)]（図3）。図4に速度応答スペクトルS_V（h=5%）、図5にエネルギースペクトルV_E（h=10%）を示す。三の丸波は図4に示すスペクトルから分かるように、3秒付近にピークを有している。時刻歴応答解析に用いる建物モデルについて、実在する超高層の建物を想定しており、建物高さは128mで、30階建てとなっている。図6に質量分布、図7に剛性分布を示す。1次固有周期は約3秒、減衰定数はダンパーが設置されているとし、1次と2次で10%となるレーリー減衰としている。固有値解析の結果として図8に、1次から3次までの刺激関数を示す。ここで、${}_s\beta$: s 次の刺激係数、${}_s\phi_i$: s 次, i 層の固有モードを表す。

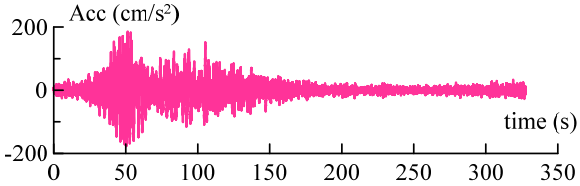


図3　三の丸波の時刻歴波形

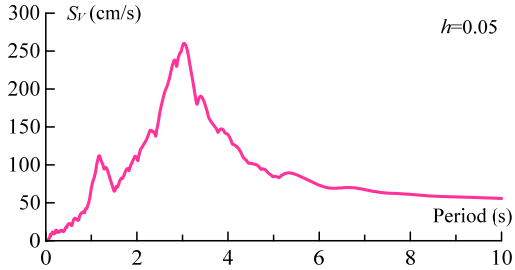


図4　三の丸波の速度応答スペクトル

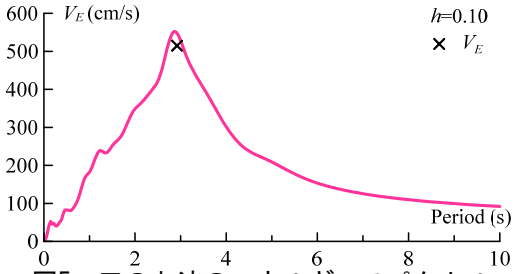


図5　三の丸波のエネルギースペクトル

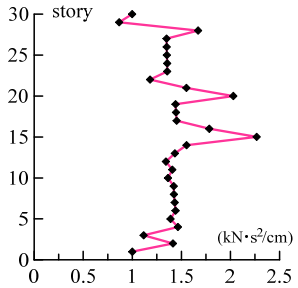


図6　質量分布

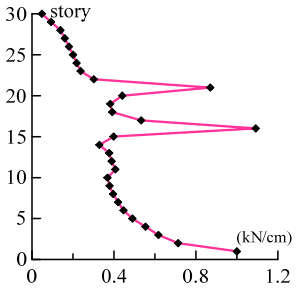


図7　剛性分布

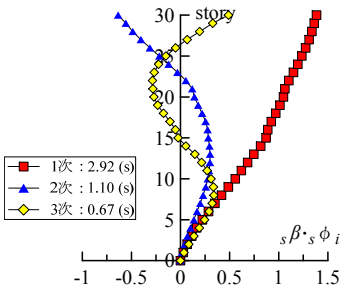


図8　刺激関数

時刻歴応答解析により得られた、層間変位 δ，層間変形角 R，ダンパー応答の標準偏差 σ_δ を図 9, 10, 11 に示す。また、入力エネルギーの速度換算値 V_E[17)]を図 5 中にプロットする。図 10, 11 より、7~14 階において層間変形角 R が 1/100 を越え、10 階で標準偏差 σ_δ が最大となった。今回地震応答波として採用する入力波は、時刻歴応答解析により得られた層間変形の中から、最大変形も大きく、標準偏差が最大となる層を採用する。これは、長周期地震動の継続時間が長いことから、最大値だけでなく標準偏差も温度上昇に影響を及ぼすためである[10)]。建物にダンパーをブレース型で配置している状態を仮定し、ダンパーの取付け角を 30°~45° とすると、ダンパーの軸方向変位は水平変位の約 0.8 倍となる（式 1）。本実験ではダンパーの応答変位を入力波として用いるため、最大層間変形を 0.8 倍する。本実験で使用する粘弾性ダンパーの粘弾性体の厚さは 8mm であり、このダンパーを建物に配置していると仮定すると、最大せん断歪は約 500%となる。なお、計測を行う機器の入力データ点数の限界より、入力波の継続時間を 327.7 秒から 300 秒に変更した。

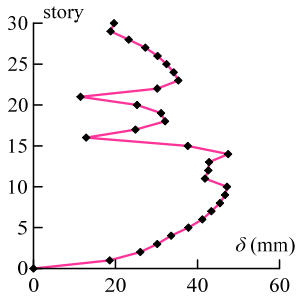


図9　層間変形

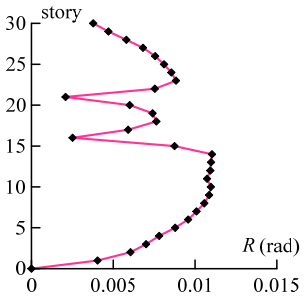


図10　層間変形角

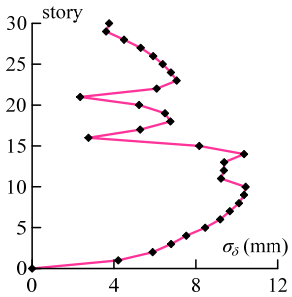


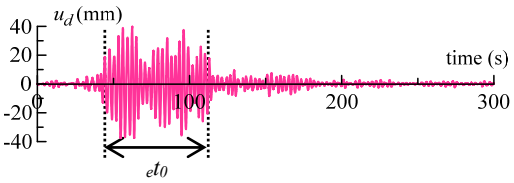
図11　標準偏差

3.2 置換正弦波の作成

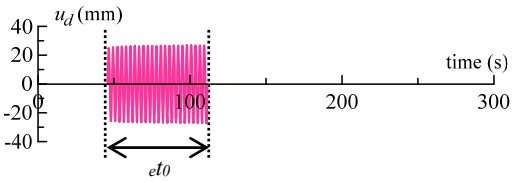
正弦波置換法[10]とは、ランダム波に内在する様々なパラメータを、共通の振幅と振動数で表される正弦波に置換することで、様々なランダム波を用いることなく、正弦波のみでその特性を包括的に把握できる手法である。さらに、本手法は、正弦波に置換することで実験が非常に簡便となるだけでなく、ランダム振動時の特性を、これまで提案されている定常状態の理想化された理論や計算法などにつなげることができるため非常に有用である。ここで、地震応答波に正弦波置換法を適用する際、風応答の場合[4),5),11)]と異なり、継続時間には実効地震継続時間 ${}_et_0$[17)]を用いる必要がある。置換振動数 f_r および置換振幅A_r は、地震動時のダンパー応答変位がゼロ軸を正の傾きで越える回数（繰り返し数）N_0^+、実効地震継続時間 ${}_et_0$ およびダンパー応答変位の標準偏差σ_uを用いて式(2)より算出される。

$$f_r = N_0^+ / {}_et_0, \quad A_r = \sqrt{2}\sigma_u \tag{2}$$

以上の方法により、本実験においては、A_r = 24.96mm, f_r = 0.350Hz, N_0^+ = 23, ${}_et_0$ = 65.8秒となった。これらより得られた地震応答波と置換正弦波を図12に示す。



(a) 地震応答波



(b) 置換正弦波

図12　変位時刻歴波形

4. 地震応答波入力による実験結果

表1に本実験で入力した地震応答波の載荷諸元、図13にB-B'断面左側上段における地震応答波の温度時刻歴、図14にダンパーの履歴面積より求めた吸収エネルギーW_d の時刻歴を示す。

図13より、図2で示す温度計測位置において、粘弾性ダンパー中央部であるch3での最高温度は34.75℃、ch2での最高温度は31.95℃、鋼材であるch1での最高温度は25.24℃となり、ダンパーの中心部に近いほど粘弾性体の最高温度が高くなり、粘弾性体の温度と比較して鋼材の温度は低くなることが確認できる。また、時間が経つにつれて、周辺温度である26℃付近に温度が収束するという傾向も見られる。これは、内部で発生した熱が鋼板を通して熱伝導することによって温度の差が生じにくくなると考えられる。図13, 14より吸収エネルギーW_d の増加とともに、粘弾性体の温度が上昇し、吸収エネルギーW_d が一定になると、熱伝導・伝達の効果により温度が減少していくことが確認できる。これらより、地震応答波におけるエネルギー吸収とダンパー温度の上昇は実効地震継続時間内が大部分を占めており、それ以外の時間ではほとんど上昇しないことが分かる。

表1　地震応答波載荷諸元

入力波	周期 (s)	最大せん断歪 (%)	周辺温度 (°C)	継続時間 (s)
地震応答波	-	500	26	300

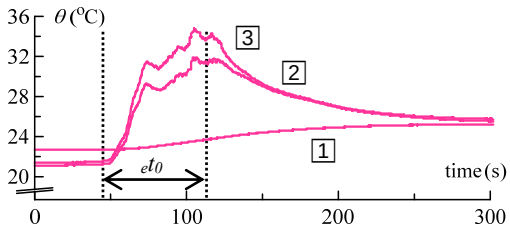


図13　B-B'断面左側上段　地震応答波温度時刻歴

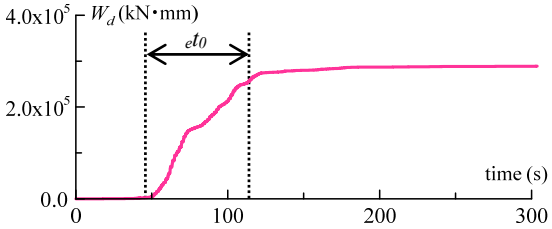


図14　地震応答波の吸収エネルギー時刻歴

5. 置換正弦波入力による実験結果

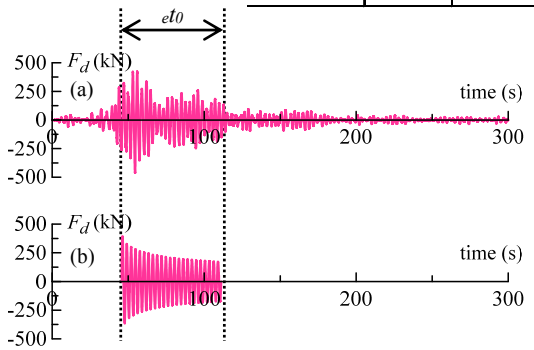
5.1 地震応答波と置換正弦波の比較

長周期地震動におけるダンパー応答を模擬した地震応答波および置換正弦波の加振実験により得られたエネルギー吸収と温度の時間変化を比較し、正弦波置換法の妥当性を実験的に検証する。

表2に本実験で入力した置換正弦波の載荷諸元、図15の(a), (b)に地震応答波実験と置換正弦波実験で計測されたダンパー力の時刻歴、図16の(a), (b)にダンパー力ー変位履歴、図17にはB-B'断面左側上段における地震応答波と置換正弦波の温度時刻歴、図18にはダンパー履歴面積より求めた吸収エネルギー W_d を比較したものを示す。また、全計測位置での温度時刻歴を付録に示す。図17および18より、正弦波置換法による正弦波加振実験は、地震応答波加振実験結果と同等のエネルギー吸収や温度上昇を示しており、本手法の有効性が確認できる。

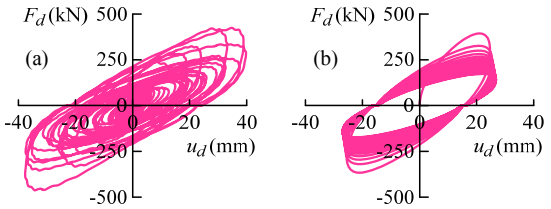
表2　置換正弦波載荷諸元

入力波	周期 (s)	最大せん断歪 (%)	周辺温度 (°C)	継続時間 (s)
置換正弦波	2.86	300	26	65.8



(a) 地震応答波，(b) 置換正弦波

図15　ダンパー力時刻歴波形



(a) 地震応答波，(b) 置換正弦波

図16　ダンパー履歴

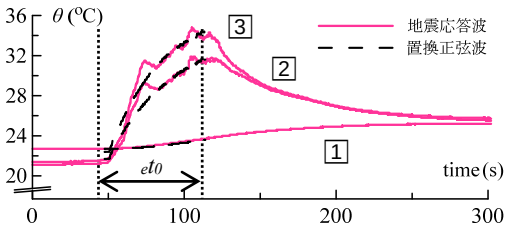


図17　B-B'断面左側上段
地震応答波と置換正弦波の温度時刻歴

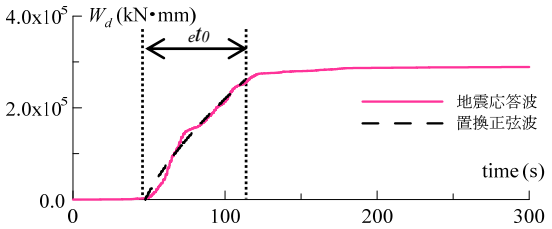


図18　吸収エネルギー時刻歴の比較

5.2 貯蔵剛性K'_dおよび粘性係数C_dの変化

ランダム波は、様々な振幅や振動数を有するため、長時間振動時におけるダンパーの動的特性の変化を評価することは難しい。それに対し、正弦波置換法を用いることで1つの振幅と振動数に変換できる

ため、1サイクルごとのダンパーの動的特性の変化を評価することが可能になる。本節では、置換正弦波実験の結果からダンパー特性の算出を行う。図19は定常状態での履歴である。

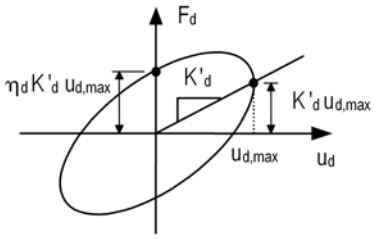


図19　定常状態での履歴

K'_d はダンパーの貯蔵剛性、η_d はダンパーの損失係数と呼ばれ、それぞれ楕円の傾きと太さの程度を表す[14]。K'_d は、各ステップiでの実験値 $F_d^{(i)}$ と $u_d^{(i)}$ を用いて式(3a)より算出される[18]。また、η_d は K'_d を用いて式(3b)より得られる[6]。

$$K'_d = \frac{n\sum F_d^{(i)} u_d^{(i)} - \sum F_d^{(i)} \sum u_d^{(i)}}{n\sum \left(u_d^{(i)}\right)^2 - \left(\sum u_d^{(i)}\right)^2}, \qquad \eta_d = \frac{W_d}{\pi K'_d \left(u_{d,\max}\right)^2} \tag{3a, b}$$

ここに、Σは総和記号であり1サイクル中でそれぞれn個の $F_d^{(i)}, u_d^{(i)}$を対象とする。W_d は1サイクル当たりのダンパーの吸収エネルギーを表し、履歴の面積より得られる。$u_{d,max}$ はダンパー最大変形である。また，ダンパーの粘性係数 C_d は，求めた K'_d, η_d および振動数 f を用いて次式で算出できる[18]。

$$C_d = \frac{\eta_d K'_d}{(2\pi f)} \tag{4}$$

jサイクルでのダンパー力 $F_d^{\langle j\rangle}$, 貯蔵剛性 $K'^{\langle j\rangle}_d$, 粘性係数 $C_d^{\langle j\rangle}$ を1サイクルでの $F_d^{\langle 1\rangle}, K'^{\langle 1\rangle}_d, C_d^{\langle 1\rangle}$ でそれぞれ基準化したものを図20に示す。図20より、継続時間内において貯蔵剛性 K'_d, 粘性係数 C_d ともに5割ほどの低減が見られたが、時間経過とともに減少量は小さくなっていくことが分かる。これは、粘弾性体において熱伝導・伝達により次第に温度が発散されるためである[1]。

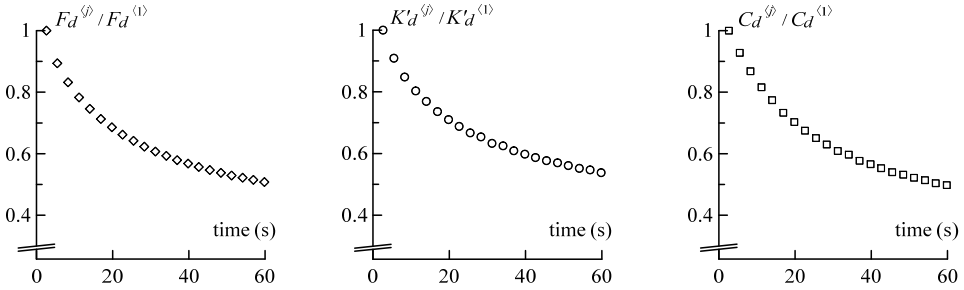


図20　ダンパー力F_dと貯蔵剛性K'_dおよび粘性係数C_dの変化

6. まとめ

本研究では、実大粘弾性ダンパーを対象とし、継続時間の長い長周期地震動におけるダンパー応答を模擬した地震応答波およびそれと等価なダンパーの動的特性が得られる置換正弦波の2種類の加振実験を行い、長周期地震動による温度・動的特性の変化を確認し、正弦波置換法の実大粘弾性ダンパーに対する適用性の検証を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 実在する超高層の建物に入力地震波として、長周期地震動の一種である三の丸波の入力を行った。得られた層間変形より、本実験で使用する粘弾性ダンパーが建物に配置しているとすると、最大せん断歪は約500%となった。

(2) 地震応答波入力による実験結果より、ダンパーの中心部に近いほど粘弾性体の最高温度が高くなり、約13℃上昇した。それに対し、鋼材の温度はあまり上昇しないことが確認された。また、粘弾性体の温度は、周辺温度に収束していくという傾向が見られた。

(3) 長周期地震動におけるダンパー応答を模擬した地震応答波と置換正弦波の加振実験により得られたエネルギー吸収およびダンパー温度の時間変化を比較し、正弦波置換法の精度検証を行った。地震用の継続時間 ${}_{e}t_0$ を用いることにより、長周期地震応答波加振実験により得られたエネルギー吸収や温度上昇を再現できることが分かった。

(4) 本実験条件において、ダンパーの貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d は、載荷時間内において5割ほどの低減が見られた。熱伝導・伝達の効果により、時間経過とともに減少量は小さくなっていくことが確認された。

参考文献

1) 笠井和彦、佐藤大樹、黄一華：継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法、日本建築学会構造系論文集、第 599 号、2006 年、pp.61-69.

2) C. Higgins, K. Kasai : Experimental and analytical simulation of wind response for a full-scale VE-damped steel frame, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.77-78, 1998, pp.297-313.

3) 下村祥一、大熊武司：粘弾性ダンパーを有する木造建て建物の弾塑性風応答に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第632号、2008年、pp.1813-1821.

4) 杉山暢方、笠井和彦、佐藤大樹、松田和浩：長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験　その1　風応答時によるダンパー内部温度の検討、日本建築学会関東支部研究報告集、2015年、pp.261-264.

5) 杉山暢方、笠井和彦、佐藤大樹、松田和浩：長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験　その2　風応答波によるダンパー動的特性の変化および正弦波置換法の検証、日本建築学会関東支部研究報告集、2015年、pp.265-268.

6) 佐藤大樹、笠井和彦、田村哲郎：高層建築の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究 －粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験－、日本建築学会構造系論文集、第609号、2006年、pp.65-73.

7) 佐藤大樹、田村哲郎、笠井和彦：粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建物の風応答特性に関する風洞実験、日本建築学会構造系論文集、第617号、2007年、pp.95-102.

8) 佐藤大樹、笠井和彦、田村哲郎：粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第635号、2009年、pp.75-82.

9) 佐藤大樹、笠井和彦、田村哲郎：粘弾性ダンパーを有する制振構造の振動数依存性を考慮した風応答予測法、日本建築学会構造系論文集、第74巻、第646号、2009年、pp.2255-2262.

10) 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、Vol.53B、2007年、pp.67-74.

11) 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、2015年、pp.571-581.

12) 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、B-2、2010年、pp.529-530.

13) 笠井和彦、馬場勇輝、伊藤浩資、所健、引野剛、大木洋司、村井亮平：粘弾性ダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験、第77巻、第676号、2012年、pp.985-994.

14) （社）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1版, 2003.10、第2版, 2005.9、第3版, 2013.11

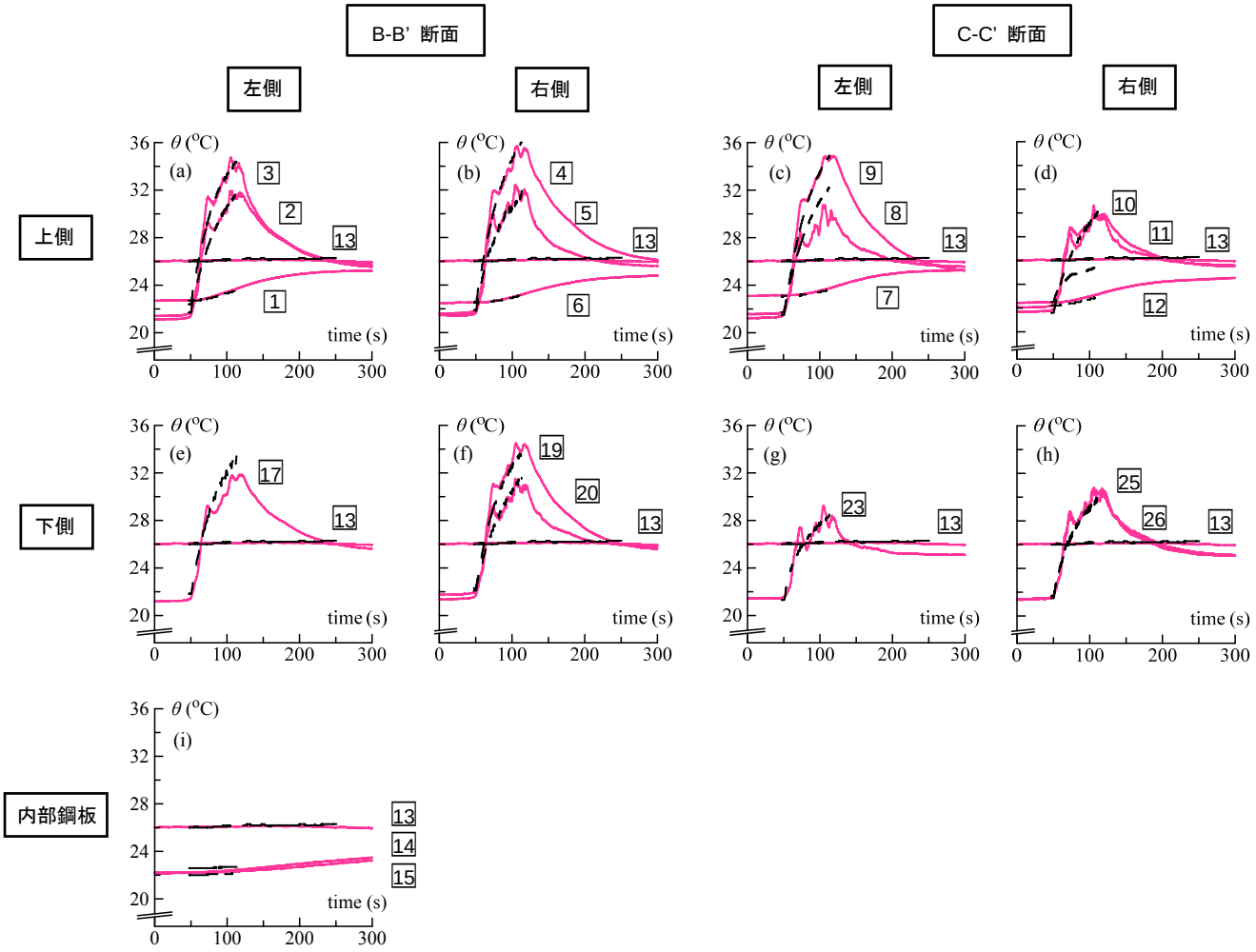
15) 愛知県建築住宅センター：名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成（概要版）、（財）愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会、2004年、pp.1-48.

16) 佐藤大樹、島田侑、大内隼人、長江拓也、北村春幸、福山國夫、梶原浩一、井上貴仁、中島正愛：

長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率 －部分切り出し架構に対するＥ－ディフェンス振動台実験－、日本建築学会構造系論文集、第75巻、第653号、2010年、pp.1217-1226.
17) 秋山宏、北村春幸：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応、日本建築学会構造系論文集、第608号、2006年、 pp.37-43.
18) 大木洋司、笠井和彦、高橋治：微小振幅における速度依存ダンパーの性能について、構造工学論文集、Vol.50B、2004年、pp.601-609.

付録．長周期地震応答波と置換正弦波による粘弾性ダンパーの全計測位置での温度時刻歴

粘弾性ダンパーの全計測位置での温度時刻歴を付図1に示す。置換正弦波はいずれの計測位置においても、地震応答波の結果をよく再現できており、本手法の有効性が確認できる。



付図１　各計測位置における地震応答波と置換正弦波の温度時刻歴