T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	VARIATIONS IN DYNAMIC PROPERTIES OF FOUR TYPES OF FULL-SCALE DAMPERS UNDER LONG-DURATION HARMONIC LOADING AND THEIR SIMPLIFIED PREDICTION METHODS
著者(和文)	笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥
Authors(English)	KAZUHIKO KASAI, Daiki Sato, Kazuhiro Matsuda, Sho Nagayama
出典(和文)	構造工学論文集, Vol. 63B, , pp. 275-283
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 63B, , pp. 275-283
発行日 / Pub. date	2017, 3
権利情報	日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

Journal of Structural Engineering, Vol.63B, March 2017
構造工学論文集 Vol.63B (2017 年 3 月)
Architectural Institute of Japan
日本建築学会

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

VARIATIONS IN DYNAMIC PROPERTIES OF FOUR TYPES OF FULL-SCALE DAMPERS UNDER LONG-DURATION HARMONIC LOADING AND THEIR SIMPLIFIED PREDICTION METHODS

笠 井 和 彦*, 佐 藤 大 樹**, 松 田 和 浩***, 長 山 祥****
Kazuhiko KASAI, Daiki SATO, Kazuhiro MATSUDA and Sho NAGAYAMA

In order to study effectiveness of dampers in the super-tall buildings subjected to long-period and long-duration earthquake, four types of full-scale dampers typically used in Japan are examined by the long-duration harmonic loading tests. The test specimens are the so-called oil damper, viscous damper, viscoelastic damper, and steel damper, respectively. Different behavior and variations in their dynamic properties are observed, and they are summarized by referring to distinct materials and mechanisms of the dampers. The viscous and viscoelastic dampers show relatively large variations in the dynamic properties, and simplified evaluation rules to predict the peak cyclic force variations for the dampers are proposed.

Keywords : *Response control system, Long-period ground motion, Super-tall building, Cumulative responses, Dynamic Properties, Simplified evaluation rule*
制振構造，長周期地震動，超高層建物，応答累積値，動的特性，簡易評価手法

1. はじめに

1.1 長周期地震動と制振ダンパー

近年，南海トラフによる長周期地震動が首都圏や大阪，名古屋などの大都市で発生することが想定されている [1)]。長周期地震動は，固有周期の長い超高層建物が揺れやすく，堆積層の厚い平野部において揺れの継続時間が長くなりやすいといった特徴を持ち，2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では，超高層建物が共振することで 10 分間以上揺れ続けたという報告がなされている [2)]。南海トラフ地震は，東北地方太平洋沖地震の揺れを上回る大きさで長時間揺れ続けることが懸念されていることから，長周期地震動に対する既存建物への修復性や事業継続性までも考慮した対策が急がれている。

しかし，継続時間の長い長周期地震動は，以前から知られていたものの関心が持たれ始めてからの歴史はまだ浅く，現行の超高層建物の大半は従来の地震動に適応するように設計されたものである。長周期地震動は，従来の設計用地震動よりも数倍の入力エネルギーを有することから，建物によっては想定以上の被害が発生する可能性がある。このような被害が想定される建物に対して応答を低減させるために長周期地震動対策として十分なエネルギー吸収能力を持つ制振ダンパーによる制振改修が採用されている。

こうした状況下より，長周期地震動を受ける超高層建物の制振性能に関しての解析的研究[例えば 3), 4)]や振動台実験[例えば 5)-7)]が行われている。文献 7)を参照すると，長周期地震動を受ける超高層建物は，多数回の繰り返し変形を受ける梁の端部にエネルギーの大半が集中し大きな損傷を受けるが，ダンパーによる制振改修によって損傷を低減できることを示している。

ただし，制振ダンパーは種類によって様々な依存性を持ち [8)]，入力されるエネルギーと継続時間によって特性が時々刻々と変化するものもあり，長時間の繰り返しによって建物応答に影響を及ぼす可能性がある。大振幅・多数回の繰り返しによる各依存性は，免震部材では数多く検討されているが[例えば 9), 10)]，制振ダンパーでは少なく[例えば 11)]，十分に把握されていないのが実情である。

1.2 本論文の目的と構成

以上より本論文の目的は，長時間の繰り返し加振の影響を考慮した制振設計法の提案の基盤として，代表的な 4 種の実大制振ダンパーに対する長時間の正弦波加振実験に基づき，制振ダンパーの動的特性の変化を明らかにすることである。

実大制振ダンパーに対し，振幅，周期，繰り返しサイクル数などを様々に変えて行った長時間の正弦波加振実験の結果をもとに，各

* 東京工業大学未来産業技術研究所　教授・Ph. D.　Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.
** 東京工業大学未来産業技術研究所　准教授・博士（工学）　Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*** 東京工業大学未来産業技術研究所　助教・博士（工学）　Assistant Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
**** 東京工業大学大学院総合理工学研究科　大学院生　Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Institute of Technology

種ダンパーの最大ダンパー力，エネルギー吸収量，そして等価な剛性や粘性などを表す動的特性の変化を明らかにし，その簡易な評価手法も示す[12), 13)]。

2 章では，試験体として用いた 4 種の制振ダンパーそれぞれの諸元と，変位，力，歪，温度などの計測計画を述べる。3 章では，これらのダンパーを用いて行った合計 35 の実験における加振条件と特性値の算定方法を説明する。4 章では，長周期地震動の理想的な載荷として各種ダンパー共通に，振幅±20mm，周期 4s，加振時間 600s（150 サイクル）の正弦波入力を行った結果を述べる。5 章，6 章では，サイクル数の増加とともに動的特性値が比較的大きく変化した粘性，粘弾性ダンパーそれぞれについて，より広範な振幅，周期，加振時間の実験も含め議論し，最大ダンパー力の低下率の変化の簡易予測式を示す。

2. 試験体概要

現在日本で普及している鋼材，粘性，オイル，粘弾性の 4 種の制振ダンパーが実際に建物に与える制振効果を検証するために，2009 年に E－ディフェンスにおいて，実大 5 層制振建物の震動台実験（以下，建物実験）が行われ，様々な知見が得られた[14)-17)]。その後，東京工業大学にて，理想的な境界条件での制振ダンパーの特性を詳細に把握するため，様々な振幅，周期の正弦波やランダム波を入力しての動的加振実験が行われた[18)-24)]。本論文では，それらの実験の中から，長時間の正弦波加振実験を考慮する。

以下に，4 種のダンパー試験体について説明するが，これ以後ダンパーの名称に用いる D1, D2, D3 は，建物実験で使用した構面を指す[14)-17)]。すなわち，D1, D2 は，建物短手方向で外側の向かい合う構面に位置しており，同型のダンパーである。D3 は，建物長手方向で内部の構面に位置し，D1, D2 の約 2 倍の容量をもつダンパーである。

2.1 オイルダンパー

本論文で用いたオイルダンパーは，ピストンとシリンダーから構成され，シリンダー内をピストンロッドが往復することにより，シリンダー内部に封入した作動油の流動が起こり，ピストン運動の速度に比例した流動抵抗力を発生させる弁が設けられている。また，ピストンの曲げを避けるために端部はピン接合となっている。

図 1 に動的加振実験のセットアップ図，図 2 に計測図を示す。ダンパーストローク u_d はストローク部上下左右 4 点で計測する。ダンパー内部の温度は構造上，直接計測することができないため表面温度をオイルダンパーの温度として，シリンダー中心位置を基準に±50mm，±100mm，+150mm，ピストンロッドにシリンダー端から+50mm（左方向を正とする）の計 7 ヶ所に熱電対を添付し温度を計測する。また，歪ゲージは，ブレース中央部と中央部から±100mm の位置全 3 断面（i=1~3）に 4 枚ずつ添付する。表 1 にオイルダンパーの諸元を示す。表中の C_d は内部粘性，p は 2 次粘性比，K_d は内部剛性である。

2.2 粘性ダンパー

粘性ダンパーは，シリンダー内をピストンロッドが往復すること

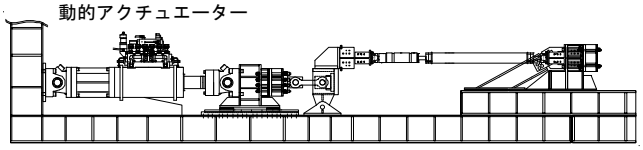
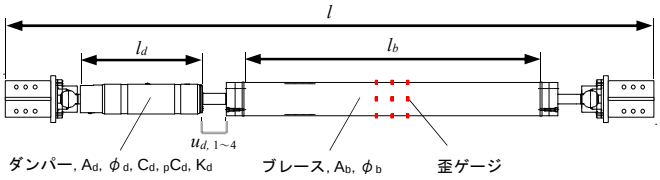
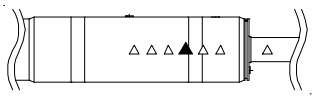


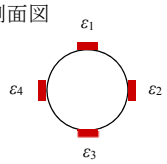
図 1　オイルダンパーセットアップ



(a) オイルダンパー側面図



(b) 温度計測位置



(c) 歪ゲージ添付位置

図 2　オイルダンパー計測

表 1　オイルダンパー諸元

	階	l (mm)	ダンパー						ブレース			F_{dy} (kN)
			l_d (mm)	A_d (mm²)	ϕ_d (mm)	C_d 規格値	pC_d 規格値	K_d 規格値	l_b (mm)	A_b (mm²)	ϕ_b (mm)	
D1 D2	4F	4025	611	2522	140	3.13	0.21	75	2410	3889	140	200
	3F	4025	777	3238	190	6.25	0.42	140	2005	6666	216	400
	2F	3947	777	3238	190	6.25	0.42	140	1813	6666	216	400
	1F	4706	856	4927	274	12.50	0.85	300	2292	10162	267	800
D3	4F	3947	777	3238	190	6.25	0.42	140	1813	6666	216	400
	3F	3947	856	4927	274	12.50	0.85	300	1533	10162	267	800
	2F	3849	856	4927	274	12.50	0.85	300	1399	10162	267	800
	1F	4629	954	8639	310	18.75	1.27	430	2059	16459	319	1200

※ C_d, K_d の単位はそれぞれ kN/(mm/s) , kN/mm であり，$\dot{u}_{dy}$ の規格値は 64 mm/s である。

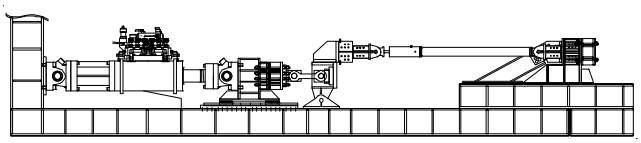
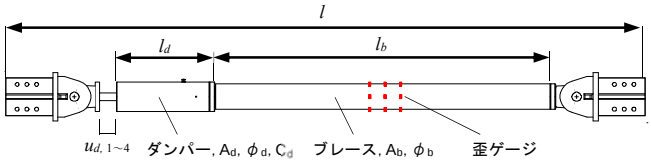
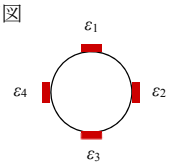


図 3　粘性ダンパーセットアップ



(a) 粘性ダンパー側面図

(b) 温度計測位置



(c) 歪ゲージ添付位置

図 4　粘性ダンパー計測

表 2　粘性ダンパー諸元

	階	l (mm)	ダンパー				ブレース			$F_{d,max}$ (kN)	
			l_d (mm)	A_d (mm²)	ϕ_d (mm)	C_d 規格値	l_b (mm)	A_b (mm²)	ϕ_b (mm)	$\dot{u}_{d,max}$ 15kine	$\dot{u}_{d,max}$ 30kine
D1 D2	4F	4025	535	8034	152	49	2429	9121	140	329	428
	3F	4025	535	8034	152	49	2429	9121	140	329	428
	2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159	658	856
	1F	4706	606	12880	184	98	2864	8320	159	658	856
D3	4F	3947	606	12880	184	98	2104	8380	159	658	856
	3F	3947	606	12880	184	98	2104	8380	159	658	856
	2F	3849	689	28124	286	196	1542	15323	236	1316	1712
	1F	4629	689	28124	286	196	2322	15323	236	1316	1712

※ C_d の単位は kN/(mm/s)$^{\alpha}$ であり，α, K_d の規格値はそれぞれ 0.38，∞である。

により，シリンダー内部に封入された粘性体（シリコンオイル）の流動が起こり，流動抵抗力が発生する。ダンパー力は速度の指数乗に比例し，指数が 1 未満であるため高速度でダンパー力の増加を抑制する特性を有する。また，ピストンの曲げを避けるために端部はピン接合となっている。

図 3 にセットアップ図の一例，図 4 に計測図を示す。ダンパーストローク u_d はストローク部上下左右 4 点で計測する。ダンパー内部の温度はオイルダンパーと同様に，直接計測することができないため表面温度を粘性ダンパーの温度として，シリンダー中心位置を基準に±40mm，±80mm，+100mm，ピストンロッドにシリンダー端から+50mm（左方向を正とする）の計 7 ヶ所に熱電対を添付し温度を計測する。また，歪ゲージは，ブレース中央部と中央部から±100mm の位置全 3 断面（i=1~3）に 4 枚ずつ添付する。表 2 に粘性ダンパーの諸元を示す。表中の α はべき乗指数である。

2.3　粘弾性ダンパー

粘弾性ダンパー（アクリル系）は，複数の鋼板を介して粘弾性体を積層して構成され，粘弾性体がせん断変形することによりエネルギーが吸収される。また，温度，振動数に依存するという特性を有する。

図 5 にセットアップ図の一例，図 6 に計測図を示す。ダンパーストローク u_d はストローク部上下 2 点で計測する。ダンパー内部の粘弾性体温度の計測個数は実験によって異なるが，粘弾性体内部の断面に熱電対を設置し，厚さ方向の温度変化を計測している。また，歪ゲージは，ブレース部に 6 枚添付する。表 3 に粘弾性ダンパーの諸元を示す。表中の d は粘弾性体厚さ，n は積層数である。

2.4　鋼材ダンパー

用いた鋼材ダンパーは，軸力を伝達する鋼板をモルタルと角型鋼管が拘束することで座屈を防ぐ座屈拘束ブレースである。また，鋼板とモルタルの間に充填材（ブチルゴム）が貼られている。

図 7 にセットアップ図，図 8 に計測図を示す。ダンパーストローク u_d は加力側，反力側各上下 2 点の計 4 点で計測する。建物実験で用いたダンパーには熱電対が無いが，同サイズで同ロットの鋼材を用い，かつ熱電対を装填したダンパー（以後，事後解析用ダンパー）を追加で作成し，温度計測を行った。温度は，塑性部中央および塑性部両端から 700mm の計 3 ヶ所で計測しており，熱電対はモルタルと充填材の間に装填されている。歪ゲージは，加力側弾性部に 8 枚添付する。表 4 に鋼材ダンパーの諸元を示す。表中の l_d は弾性部長さ，l_e は塑性部長さ，b_d は弾性部幅，b_e は塑性部幅，t_d は弾性部厚さである。

3　加振計画および特性値の抽出法

3.1　加振計画

上記のダンパーを用いて行った合計 35 の長時間正弦波加振実験の入力条件を表 5 にまとめる。オイル，粘性，粘弾性ダンパー，いわゆる速度依存ダンパーでは，材料疲労の問題がなく繰り返し実験できるため，同一ダンパーを複数の加振実験に用いた。鋼材ダンパーの場合，建物実験での材料疲労が僅かである試験体，前述した事後解析用ダンパーを用い，周期依存性が無いことからも，加振条件

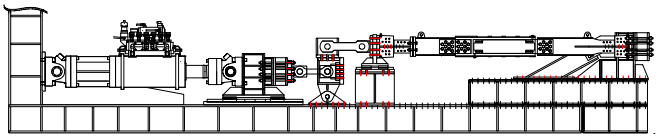
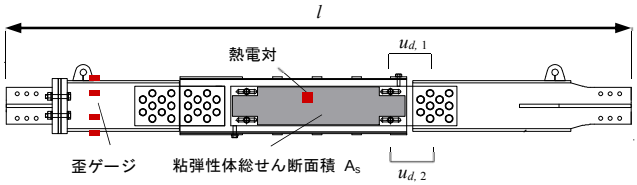
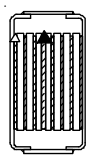


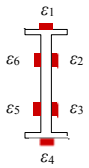
図 5　粘弾性ダンパーセットアップ



(a) 粘弾性ダンパー側面図



(b) 温度計測位置



(c) 歪ゲージ添付位置

図 6　粘弾性ダンパー計測

表 3　粘弾性ダンパー諸元

	階	l (mm)	As (cm^2)	d (mm)	n	As/d (cm)	接続部材鉄骨寸法 (BH) h-b-t_w-t_f	$\hat{F}_d$ (kN)
D1 D2	4F	4024.5	9120	8	6	11400	BH322-160-19-16	799
	3F	4024.5	9120	8	6	11400	BH322-160-19-16	799
	2F	3946.6	13120	8	8	16400	BH322-160-22-16	1149
	1F	4706.1	13120	9	8	14578	BH322-160-22-16	1212
D3	4F	3946.6	18112	8	8	22640	BH322-150-19-16	1587
	3F	3946.6	18112	8	8	22640	BH322-150-22-16	1587
	2F	3848.9	26000	8	10	32500	BH322-125-32-16	2278
	1F	4628.7	26000	9	10	28889	BH322-150-32-16	2401

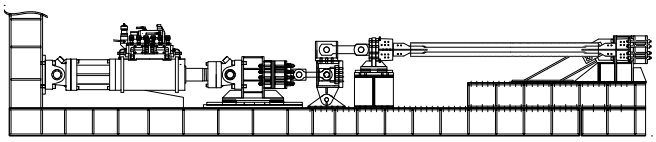
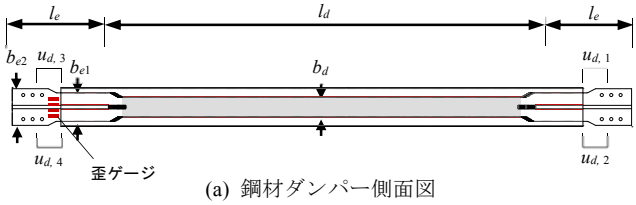
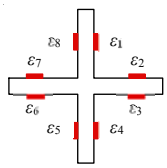


図 7　鋼材ダンパーセットアップ



(a) 鋼材ダンパー側面図

(b) 温度計測位置



(c) 歪ゲージ添付位置

図 8　鋼材ダンパー計測

表 4　鋼材ダンパー諸元

	階	l_d (mm)	l_e (mm)	b_d (mm)	b_e (mm)	t_d (mm)	σ_y (MPa)	$\hat{F}_{dy}$ (kN)	$\hat{u}_{dy}$ (mm)
D1 D2	4F	2900	562.3	88	128/235	16	217	306	3.05
	3F	2900	562.3	88	128/235	16	217	306	3.05
	2F	2750	598.3	116	165/235	19	227	500	3.03
	1F	3600	553.1	116	165/235	19	227	500	3.97
D3	4F	2600	673.3	127	183/235	22	220	615	2.78
	3F	2600	673.3	127	183/235	22	220	615	2.78
	2F	2450	699.5	200	290	22	220	968	2.62
	1F	3300	664.4	200	290	22	220	968	3.52
事後解析用	-	2900	562.3	88	128/235	16	217	306	3.05

は限られている。

加振条件として，40 層程度の超高層建物に層間変形角 1/170rad.程度の変形が生じると仮定し，ダンパーストローク u_d = 20mm，周期 T = 4s を基本として加振を行っている [8]。周期は，3 種の速度依存ダンパーで概ね 2～6s の 3 種の値としており，鋼材ダンパーでは振動数依存性が少ないため 4s としている。振幅は，3 種の速度依存ダンパーで概ね 10～30mm，鋼材ダンパーでは 20mm と限定している。また，周期 4s での加振時間は，オイル，粘性，粘弾性，鋼材ダンパーの順に，400～4,400s，400～10,800s，280～1,200s，約 1,000s であった。初期温度は，実験時の気候により，上の順に 10~15ºC，10～26ºC，21～22ºC，14ºC である。温度依存性が大きい粘弾性ダンパーには，追加として低温での検討を予定している。

載荷後にダンパーの温度が初期温度に戻ったことを確認してから，ダンパーの損傷確認の載荷を行い，損傷が無いことを確認した後に次の載荷を行っている。なお，O-3, 4，V-3, 4 は計測機器の都合上，連続での計測が行えないため 30 分ごとに載荷を区切り加振を行っている。

3.2 ダンパー特性値の算出方法

オイル，粘性，粘弾性ダンパーのストローク u_d を式(1a)，鋼材ダンパーは式(1b)より算出し，ダンパー力 F_d を式(2) より算出する。

$$u_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_u} u_{d,j}}{N_u}, \quad u_d = \frac{u_{d,1}+u_{d,2}}{2} + \frac{u_{d,3}+u_{d,4}}{2} \tag{1a, b}$$

表 5　正弦波加振実験パラメータ

ダンパー	実験番号	周期 T (s)	振幅 u_d (mm)	加振時間 t_0 (s)	サイクル数	初期温度 θ_0 (ºC)	試験体	参考文献
オイル (O)	O-1	4.0	20	600	150	10	D2-3F	19)
	O-2	4.0	20	1800	450	14		
	O-3	4.0	20	3600	900	10		
	O-4	4.0	20	4400	1100	13		
	O-5	2.0	20	230	115	15	D3-3F	21)
	O-6	4.0	10	1200	300	15		
	O-7	4.0	20	600	150	15		
	O-8	4.0	30	400	100	15		
	O-9	6.0	20	900	150	15		
粘性 (V)	V-1	4.0	20	600	150	10	D1-2F	20)
	V-2	4.0	20	1800	450	15		
	V-3	4.0	20	3600	900	15		
	V-4	4.0	20	10800	2700	13		
	V-5	2.0	20	230	115	15	D2-2F	21)
	V-6	4.0	10	1200	300	15		
	V-7	4.0	20	600	150	15		
	V-8	4.0	30	400	100	15		
	V-9	6.0	20	900	150	15		
	V-10	4.0	20	1800	450	26	D3-2F	-
粘弾性 (E)	E-1	4.0	20	450	112	21	D3-1F	18)
	E-2	2.0	16	300	150	22	D1-2F	22)
	E-3	4.0	8	1200	300	22		
	E-4	4.0	16	600	150	22		
	E-5	4.0	24	400	100	22		
	E-6	6.0	16	900	150	22		
	E-7	2.0	16	300	150	22	D3-3F	
	E-8	4.0	8	1200	300	22		
	E-9	4.0	16	600	150	22		
	E-10	4.0	24	280	70	22		
	E-11	6.0	16	900	150	22		
	E-12	4.0	16	600	150	22	D3-2F	
	E-13	2.86	24.96	66	23	22	D2-3F	24)
鋼材 (S)	S-1	4.0	20	924	231	-	D2-2F	23)
	S-2	4.0	20	1116	279	14	事後解析用	

$$F_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_u} \varepsilon_j}{N_s} EA \tag{2}$$

ここに，N_u はダンパーストローク計測個数, N_s は 1 断面における歪ゲージ配置枚数, ε_j は計測位置での歪, E はヤング係数（=206 GPa）, A は歪計測位置における断面積である。なお，オイル，粘性ダンパーのダンパー力はブレース中心部における歪より算出を行う。また，鋼材ダンパーの場合，歪が概ね均一と思われる位置にゲージを添付したが, 加振実験において, ロードセル値と比較することで，ダンパーごとに式(2)右辺に最大で 1.2 の修正係数をかけている [14]。

1 サイクルごとのダンパー力およびエネルギー吸収量を式(3), (4) により算出する。n サイクルの最大ダンパー力 $F_d^{[n]}$ は，図 9 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している（ただし n≧1 とする）。また，エネルギー吸収量 $W_d^{[n]}$ は 1 サイクルごとの履歴の面積より算出している。ここに，${}_hF_{d,max}$ は半波ごとの最大ダンパー力，N_D は 1 サイクルのデータ数である。なお，() はステップ，〈〉は半波，[] はサイクルを意味する。

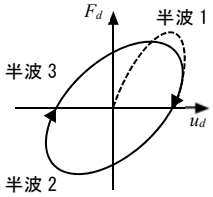


図 9　半波の定義

$$F_d^{[n]} = \frac{\left|{}_hF_{d,\max}^{\langle 2n\rangle}\right| + \left|{}_hF_{d,\max}^{\langle 2n+1\rangle}\right|}{2} \tag{3}$$

$$W_d^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{\left(F_d^{(i)} + F_d^{(i+1)}\right)\cdot\left(u_d^{(i+1)} - u_d^{(i)}\right)}{2} \tag{4}$$

図 10 に 4 種のダンパーの定常状態での履歴（概念図）を示す。貯蔵剛性 K'_d は，図 10 に示すように最大変形時の荷重を最大変位で除したもの，損失剛性 K''_d は，y 切片（変位=0）での荷重を最大変位で除したものと定義する [8]。本論文では，ダンパー力，エネルギー吸収量，貯蔵剛性，損失剛性をダンパーの特性値と呼び，長時間の繰り返しによる変化について検討を行う。

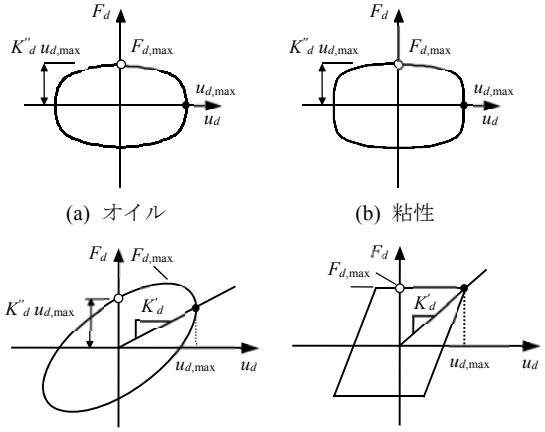


図 10　定常状態での履歴（概念図）

4. 4 種の制振ダンパーの長時間正弦波加振実験

オイル・粘性・粘弾性・鋼材の 4 種の制振ダンパーに対して行った長時間の正弦波加振実験より特性値低下の傾向の把握を行う。本

章では，長周期地震動を考慮して周期 4s，振幅±20mm，加振時間 600s（150 サイクル）の正弦波入力を行った実験を対象に検討を行う。実験番号は，O-1，V-1，E-1，S-2（表 5）とする。なお，E-1 実験では載荷装置の都合上，450s の時点でアクチュエーターが停止したため，そこで加振を終了している。

図 11(a)～(d)にそれぞれのダンパーの履歴曲線を示す。オイルダンパーでは，ダンパー力に大きな減少も見られず安定した結果となった。鋼材ダンパーでは，サイクル数を重ねるごとに程度は小さいもののダンパー力の低下が若干見られる。これは，充填材がもつ温度依存性により温度が高くなるにつれて軟化することで充填材の粘性要素による荷重が低下するためである[23]。一方，粘性，粘弾性ダンパーでは，著しくダンパー力が低下する傾向が見られた。これは，粘性，粘弾性ダンパーが持つ温度依存性により粘性体，粘弾性体が軟化することによりダンパー力が低下するためである。

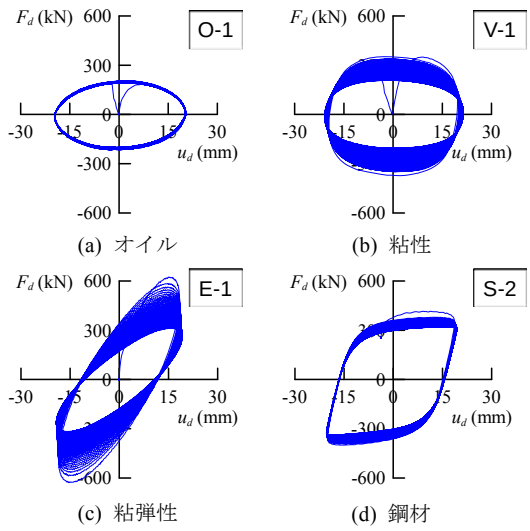
図 12(a)～ (d)にサイクル数に対する各ダンパー特性値の変化をそれぞれ示す。なお，図は 10 サイクルごとに結果をプロットしたものであり，以降は同様の方法で結果を示すこととする。図 12(a)より，オイルダンパーでは，最大ダンパー力の減少量は少なくほぼ一定である。鋼材ダンパーでは，早期にダンパー力が減少するものの，時間経過ごとに減少量は小さくなっていく。粘性ダンパーでは，緩やかにダンパー力が減少していく。粘弾性ダンパーでは，鋼材ダンパーと同様に，早期にダンパー力が低下し，載荷終了時まで低下し続ける傾向が見られた。図 12(b), (d)より，エネルギー吸収量，損失剛性の減少量は全てのダンパーで最大ダンパー力と類似した傾向を示すことが確認された。なお，図 12(c)の貯蔵剛性に関しては，オイル，粘性ダンパーの履歴の形状により限りなく小さな値をとり鋼材，粘弾性ダンパーとの共通の指標にはならないため（図 10），貯蔵剛性を除いたダンパー特性値の確認を行う。

1 サイクル目に対しての特性値の変化を確認するために，図 13 に n サイクルでのダンパー力，エネルギー吸収量，損失剛性を 1 サイクル目の値でそれぞれ基準化したもの（以下，低下率）とサイクル数の関係およびダンパー温度の変化とサイクル数の関係を示す。なお温度は，計測点の中での最高温度を示している（図 2, 4, 6, 8 の▲）。結果より，オイル・鋼材ダンパーでの各特性値の低下率は，ほぼ同様であることが確認された。粘性・粘弾性ダンパーでは，サイクルごとの損失剛性の低下率がわずかに大きくなる。これは，粘性・粘弾性体が軟化することでダンパーの剛性が低下したことにより入力される変形が大きくなったためと考えられる。ただし，誤差は粘性ダンパーで 3%，粘弾性ダンパーで 5%と小さい。粘性，粘弾性ダンパーは，材料の違いにより温度の上昇量は違うものの温度が上昇するにつれてダンパー特性値が低下し，150 サイクル時に 1 サイクル目のおよそ 0.5 倍まで低下した。

次章以降では，貯蔵剛性を除く各特性値の低下率がほぼ同様であることから，ダンパー特性値は最大ダンパー力を表すこととし，特性値低下の大きい粘性，粘弾性ダンパーを対象に定量的な評価を行う。

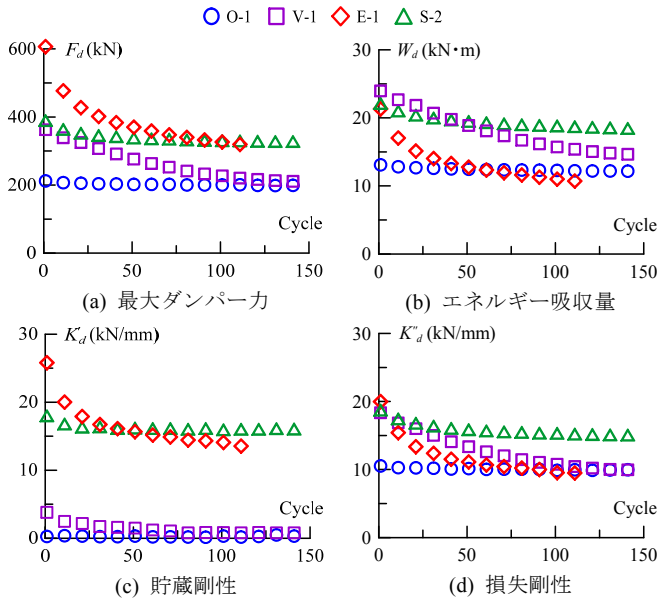
5. 粘性ダンパーの特性値低下の傾向

粘性ダンパーでの異なる振幅・周期の正弦波を入力した際の特性値低下の傾向を確認する。載荷パラメータは表 5 の通りであり，実



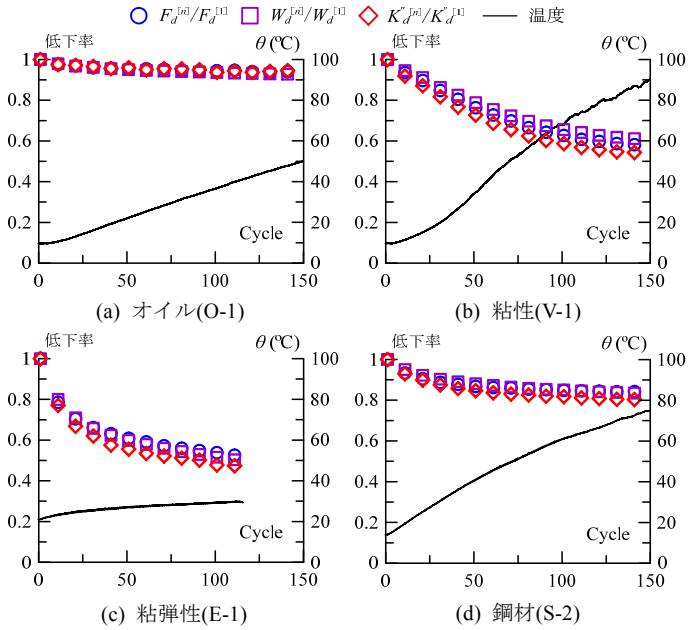
(a) オイル　(b) 粘性　(c) 粘弾性　(d) 鋼材

図 11　F_d-u_d関係（T = 4s，u_d = 20mm）



(a) 最大ダンパー力　(b) エネルギー吸収量　(c) 貯蔵剛性　(d) 損失剛性

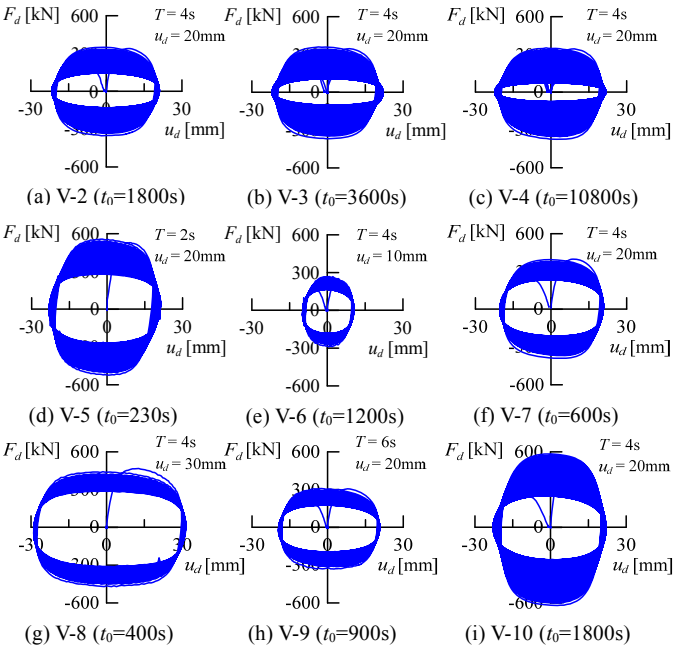
図 12　サイクル数に対する各ダンパーの特性値の変化



(a) オイル(O-1)　(b) 粘性(V-1)　(c) 粘弾性(E-1)　(d) 鋼材(S-2)

図 13　サイクル数に対する特性値の低下率および温度の変化

験番号は V-1~10 とする。図 14 に粘性ダンパーの履歴曲線を示す。V-2～4 を比較すると，初期温度に戻り次第 V-4 まで連続的に加振を行っているが，ダンパーが初期温度に戻ることで初期と同様の履歴性状を示し，損傷が発生していないことが分かる。このため，本粘性体は回復性に優れ疲労が起こりにくいという利点がある。比較的速度の速い V-5（6.3cm/s^2）において高いダンパー力を発揮していることが分かる。V-2, 10 を比較すると大容量ダンパーを用いた V-10 では，中容量ダンパー対しておよそ 2 倍のダンパー力が生じている。全体的な傾向として，加振パラメータによらず著しいダンパー力の低下が見られる。



(a) V-2 (t_0=1800s)　(b) V-3 (t_0=3600s)　(c) V-4 (t_0=10800s)

(d) V-5 (t_0=230s)　(e) V-6 (t_0=1200s)　(f) V-7 (t_0=600s)

(g) V-8 (t_0=400s)　(h) V-9 (t_0=900s)　(i) V-10 (t_0=1800s)

図 14　F_d–u_d関係

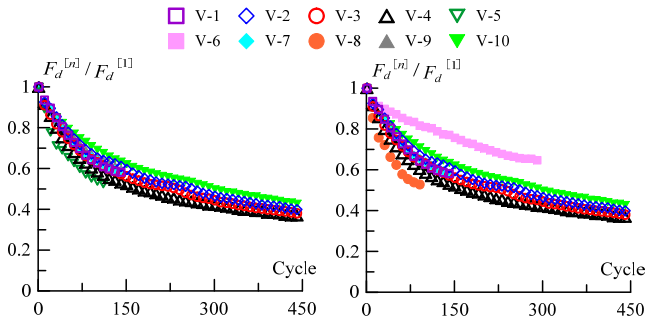
図 15 に，サイクル数に対する最大ダンパー力の低下率の変化，図 16 にサイクル数に対する温度の変化を示す。図中(a)は，周期の影響を把握するために加振パラメータが振幅 20mm での比較，(b)は振幅の影響を把握するために周期 4s での比較を示している。ダンパーの初期温度については，表 5 に示す通りである。なお，V-3, 4 に関しては加振時間が長いため 450 サイクル（1800s）までの結果を示している。図 15(a)より振幅一定の際，ほぼ同様の低下の傾向が見られる。図 15(b)より周期一定の際，大振幅の V-8 において最大ダンパー力が早期に低下し，小振幅の V-6 においては緩やかに低下し，低下率は小さいことが分かる。また，大きな容量のダンパーを使用した V-10 での最大ダンパー力の低下率は，他のダンパーと比べて小さい。図 16 より，本試験体は内部に発生した熱をシリンダー表面より発散させる構造となっているが，V-3 において 450 サイクル（1800s）までの時点でシリンダー表面の温度が 160ºC 近くまで上昇しており，900 サイクル（3600s）では 200ºC まで温度が上昇した。なお，温度が定常状態に戻るまでに，9 時間近く有している。V-1 でも，4 時間ほどの時間を有した。図 16(a)より，短周期の V-5 においてわずかに上昇量が大きいが，おおむね同様の傾向を示している。図 16(b)より，大振幅の V-8 において大きく上昇し，小振幅の V-6 では上昇量は比較的小さい結果となった。図 15, 16 を比較すると温度の上昇にしたがって最大ダンパー力が低下していることから，最大ダンパー力の低下率は温度上昇量に依存することが確認された。最大ダンパー力は，最大で 0.4 倍近くまで低下した。これらの結果より，長周期地震動を受ける場合，粘性体の温度上昇とともにダンパーの特性値が低下することで，制振性能が低下し想定以上の応答となる危険性がある。

制振ダンパーを長周期地震動対策として用いる場合，これまでの最大値による評価だけでなく繰り返し変形を受けて吸収するエネルギー量の累積値による評価が重要となる。図 17(a)に累積エネルギー吸収量 ΣW_d に対する最大ダンパー力の低下率の変化を示す。同容量のダンパーを用いた V-1～V-9 では，周期・振幅によらず同様の低下の傾向を示した。これは，粘性体がエネルギーを吸収することでシリンダー内部の粘性体の温度が上昇し，それに伴い特性値が低下するためと考えられる。しかし，容量の大きいダンパーを使用した V-10 では，他の容量の結果（V-1～V-9）と比較すると低下の傾向が異なっていることが分かる。

そこで，異なるダンパー容量での統一的な評価を行うために，累積エネルギー吸収量を粘性ダンパーの容積 ${}_VV$ 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。

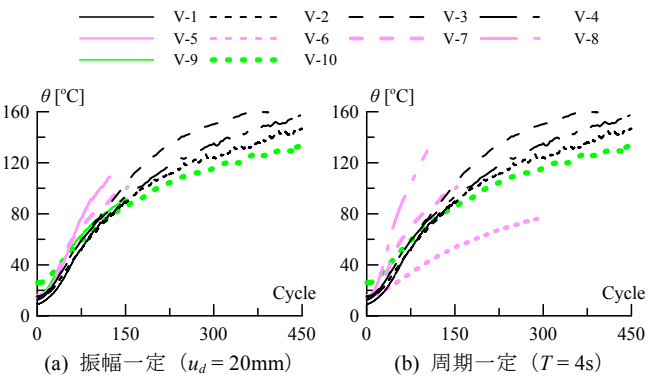
$$\Omega = \frac{\sum W_d}{{}_VV} \tag{5}$$

ここで，${}_VV$ は粘性ダンパー内に封入されている粘性体の容量である。エネルギー密度 Ω は，単位体積あたりで吸収した累積エネルギーを意味し，粘性体による発熱と直接関連する値である [11]。本論文では簡便のために，ダンパー部の長さと内部の断面積より算出した粘性ダンパーの容積を，内部粘性量と仮定して検討を行った。エネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率の変化を図 17(b)に示す。図 17(b)より，粘性ダンパーにおいてエネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率の変化は，周期・振幅・ダンパー容量



(a) 振幅一定（u_d = 20mm）　(b) 周期一定（T = 4s）

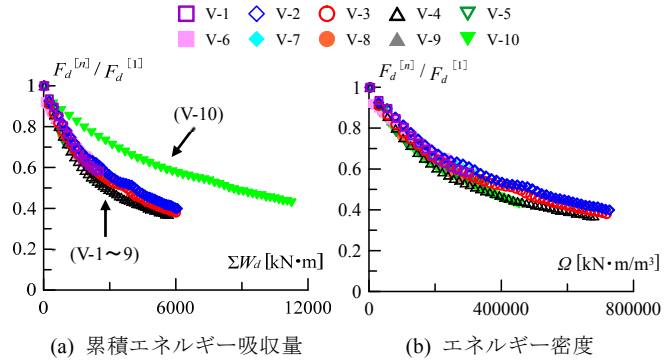
図 15　サイクル数に対する最大ダンパー力の低下率の変化



(a) 振幅一定（u_d = 20mm）　(b) 周期一定（T = 4s）

図 16　サイクル数に対する温度の変化

によらずおおむね同様の傾向を示した。なお，初期温度の違いによる影響については，粘性ダンパーの温度上昇量が大きいため今回対象とした範囲内（10ºC～26ºC）では影響が小さいと考えられる。この関係から，エネルギー密度 Ω を用いることで長時間の繰り返しによる粘性ダンパーの特性値低下の傾向を簡易的に評価できると考える。ただし，封入されている粘性体の性質や大きく形状の異なるダンパーに対しては低下の傾向が変わると考えられる。しかし，その場合，長時間の加振実験を一回行うことで振幅や周期によらず長時間の繰り返し加振時におけるダンパーの特性低下を評価できるという利点を有する。



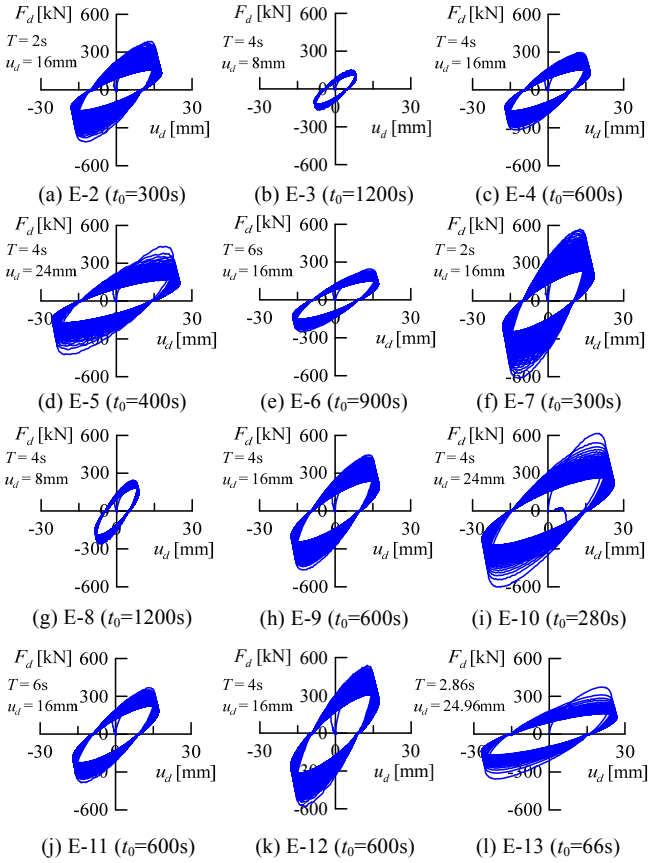
(a) 累積エネルギー吸収量　(b) エネルギー密度

図 17　最大ダンパー力の低下率の変化

6. 粘弾性ダンパーの特性値低下の傾向

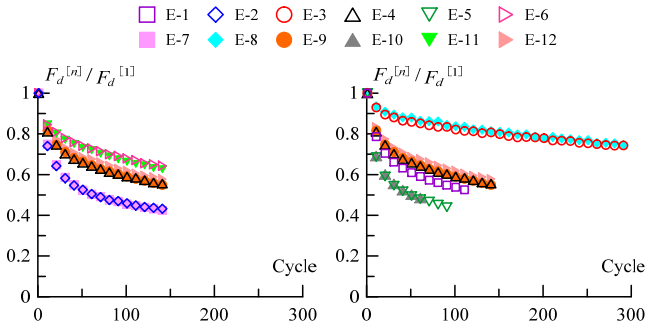
粘弾性ダンパーでの異なる振幅・周期の正弦波を入力した際の特性値低下の傾向を確認する。載荷パラメータは表 5 の通りであり，実験番号は E-1~13 とする。図 18 に粘弾性ダンパーの履歴曲線を示す。周期の短い E-2, 7 では楕円の傾きが大きく，周期が長くなるにつれて小さくなっていく。ダンパー力の低下に着目すると，振幅の小さい E-3, 8 では加振時間は比較的長いもののあまり低下は見られない。一方でその他の実験では，著しいダンパー力の低下が見られる。

図 19 にサイクル数に対する最大ダンパー力の低下率の変化，図 20 にサイクル数に対する温度の変化を示す。図中(a)は，周期の影響を把握するために加振パラメータが振幅 16mm での比較，(b)は振幅の影響を把握するために周期 4s での比較を示している。ダンパーの初期温度については，表 5 に示す通りである。図 19(a)より振幅一定の際，短周期の E-2, 7 において早期に最大ダンパー力が低下し，長周期の E-6, 11 においては緩やかに低下していく傾向が確認できる。図 19(b)より周期一定の際，大振幅の E-5, 10 において大きな低下が見られ，低振幅の E-3, 8 においては低下率が小さいことが分かる。また，粘弾性ダンパーの総せん断面積 As によらずほぼ同様の低下の傾向を示している。図 20 より加振開始直後は粘弾性体が硬い状態であるためエネルギー吸収量が多く，粘弾性体からの発熱量も多いことから温度の上昇量が大きい。その後，30 サイクル付近から徐々に，鋼板を通して外部に放出される放熱の影響により勾配が緩やかになっていく。図 19 よりダンパー力の低下も 30 サイクル付近から緩やかになっていくことが分かる。温度は，周期が短く（E-2, 7）振幅が大きい（E-5, 10）ほど上昇量が大きくなる。E-2, 7 では最大で 35ºC まで上昇した。図 19, 20 より，最大ダンパー力の低下率は粘性ダンパーと同様，温度が大きく上昇するにつれて大きく低下していることが分かる。粘弾性ダンパーの最大ダンパー力は，最大で 0.4 倍近くまで低下した。



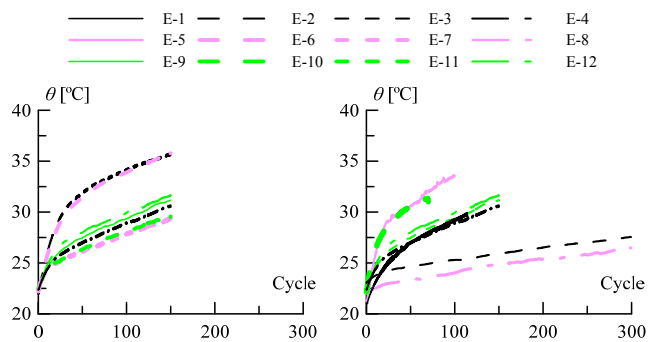
(a) E-2 (t_0=300s)　(b) E-3 (t_0=1200s)　(c) E-4 (t_0=600s)
(d) E-5 (t_0=400s)　(e) E-6 (t_0=900s)　(f) E-7 (t_0=300s)
(g) E-8 (t_0=1200s)　(h) E-9 (t_0=600s)　(i) E-10 (t_0=280s)
(j) E-11 (t_0=600s)　(k) E-12 (t_0=600s)　(l) E-13 (t_0=66s)

図 18　F_d–u_d関係



(a) 振幅一定（u_d = 16mm）　(b) 周期一定（T = 4s）

図 19　サイクル数に対する最大ダンパー力の低下率の変化



(a) 振幅一定（u_d = 16mm）　(b) 周期一定（T = 4s）

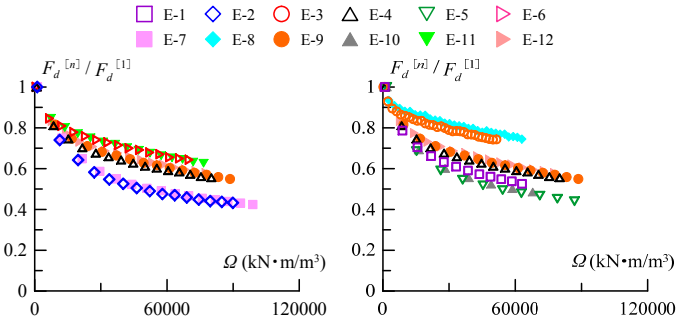
図 20　サイクル数に対する温度の変化

図 21 にエネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率の変化を示す。ここに，V は粘弾性体の体積である。図 21(a)より振幅一定の際，周期が短くなるにつれて大きく低下することが確認された。図 21(b)より周期一定の際，振幅が大きくなるにつれて大きく低下することが確認された。粘性ダンパーの結果と比較すると（図 17(b)），エネルギー密度 Ω に対する最大ダンパー力の低下率は大きい。また，低下の傾向に大きなばらつきが見られる。

そこで，粘弾性ダンパーの特性値の低下率は，振幅に比例し，周期に反比例する特徴であることから，これらを考慮して基準化したものを，歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' と呼び，以下のように定義する。

$$\Omega' = \frac{\sum W_d}{V} \cdot \frac{\gamma}{T} \tag{6}$$

ここに，γ はせん断歪，歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' は，単位時間，単位歪あたりのエネルギー密度を意味する。これらより得られた歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' に対する特性値低下の傾向を図 22 に示す。粘性ダンパーにおいて，歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' を用いることで，振幅，周期，試験体の体積によらず統一的に特性値低下の評価が可能となる。ただし，3.1 節で述べたように，今回対象としている実験の範囲では（21°C～22°C），粘弾性ダンパーの初期温度がほぼ等しいため，初期温度が大きく異なる場合での検討は今後の課題とする。また，粘弾性体の材質が異なった場合や形状が大きく異なるダンパーに対しては低下の傾向が変わると考えられる。しかし，一つの実験で様々な歪，周期によらず長時間振動時におけるダンパー特性の低下を簡便に評価ができる点で有用な手法である。



(a) 振幅一定（$u_d = 16$mm）　(b) 周期一定（$T = 4$s）

図 21　エネルギー密度に対する最大ダンパー力の低下率の変化

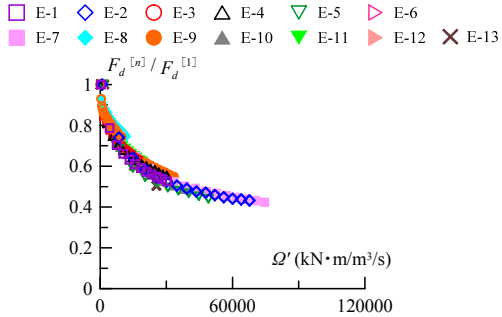


図 22　歪・周期基準化エネルギー密度に対する最大ダンパー力の低下率の変化

7.　まとめ

本論文では，代表的な 4 種の実大制振ダンパーに対して行われた数々のパラメータの正弦波加振実験結果をもとに，動的特性の変化の把握および粘性，粘弾性ダンパーに対する特性値低下の簡易的な評価手法の提案を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 周期 4s，振幅±20mm，加振時間 600s の正弦波加振実験を行った結果，粘性・粘弾性ダンパーでは，2 つのダンパーが持つ温度依存性により特性値が 1 サイクル目のおよそ 0.5 倍まで低下することが確認された。一方で，オイルダンパーでは低下率が小さく，鋼材ダンパーでは早期に特性値が減少するが，時間経過ごとの減少量は小さくなっていく傾向が見られた。

(2) 粘性ダンパーに異なる振幅・周期の正弦波を入力した結果，累積エネルギー吸収量に対する最大ダンパー力の低下率の変化の関係より，同容量のサイズでは振幅・周期によらず一定の低下率を示した。また，異なるダンパー容量での統一的な評価が行えるようにエネルギー密度 Ω を提案した。エネルギー密度 Ω に対する特性値低下の傾向は振幅・周期・ダンパー容量によらず一様に評価できることを確認した。

(3) 粘弾性ダンパーに異なる振幅・周期の正弦波を入力した結果，エネルギー密度に対する最大ダンパー力の低下率の変化の関係より，特性値の低下率は，振幅が大きく周期が短くなるにつれて大きくなることが確認された。これらの関係を考慮し，歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' を提案した。歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' に対する特性値低下の傾向は，振幅，周期，ダンパーの体積によらず一様に評価できることを確認した。

今後は，本実験結果とエネルギー密度 Ω，歪・周期基準化エネルギー密度 Ω' を用いて，制振ダンパーの長時間の繰り返しによる動的特性の変化を考慮した制振構造の設計法 [12), 13), 25), 26)] を提案する予定である。

謝辞

本研究は，元東京工業大学笠井研究室の後藤尚哉氏，小松祐樹氏，西島正人氏，境原直紀氏，茶谷友輔氏，山本英和氏，杉山暢方氏の研究成果の一部を用いたものです。ここに記して謝意を表します。

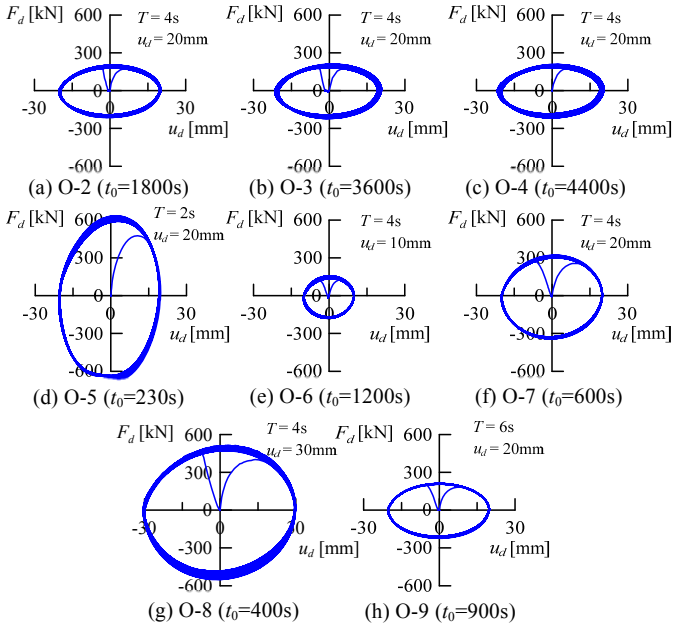
参考文献

1) 土木学会，日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言, 2006.11
2) 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
3) 島田侑，佐藤大樹，長江拓也，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，福和伸夫，日高桃子：超高層建物の下層階に部分配置する履歴型ダンパーの効果と影響に関する検討 －長周期地震動を想定した耐震改修－，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 649 号，pp.549-557, 2010.3
4) 加藤翼，佐藤大樹，佐藤利昭，北村春幸，長江拓也，石井正人，吉江慶祐：オイル・鋼製ダンパーを用いた下層部分制振補強の効果と影響に関する検討，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 48 号, pp.533-538, 2015.6
5) 長江拓也，鍾 育霖，島田侑，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，北村春幸，福和伸夫，日高桃子：超高層建物の耐震性能を検証する実架構実験システムの構築 －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 74 巻，第 640 号, pp.1163-1171, 2009.6
6) 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 667 号，pp.1217-1226, 2010.7
7) 佐藤大樹，長江拓也，大内隼人，島田侑，北村春幸，福山國夫，梶原浩一，井上貴仁，中島正愛，斉藤大樹，福和伸夫：長周期地震動を受ける超高層建物の鋼製ダンパーによる制振改修に関する 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 76 巻，第 667 号，pp.1639-1648, 2011.9
8) 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
9) 竹中康雄，近藤明洋，高岡栄治，引田真規子，北村春幸，仲村崇仁：積層ゴムの熱･力学的連成挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 646 号，pp.2245-2253, 2009.12
10) 北村春幸，早川修平，竹中康雄，高岡栄治，室田伸夫：高減衰積層ゴムの熱･力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 655 号，pp.1635-1644, 2010.9
11) 笠井和彦，佐藤大樹，黄一華：継続時間の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，pp.61-69, 2006.1
12) 長山祥，佐藤大樹，笠井和彦，松田和浩：長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その 1 4 種のダンパーの長時間正弦波加振実験による動的特性の推移，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.389-392, 2016.3
13) 長山祥，佐藤大樹，笠井和彦，松田和浩：長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その 2 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向および基準化エネルギー密度の提案，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.393-396, 2016.3
14) 笠井和彦，馬場勇輝，西澤恵二，引野剛，伊藤浩資，大木洋司，元結正次郎：鋼材ダンパーを有する試験体の実験結果 3 次元震動台による実大 5 層制振鋼構造建物の実験研究 その 2，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 673 号，pp.499-508, 2012.3
15) 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，日本建築学会構造系論文集，第 77 巻，第 676 号，pp.985-994, 2012.6
16) 笠井和彦，山際創，馬場勇輝，伊藤浩資，引野剛，大木洋司：オイルダンパーをもつ実大 5 層鉄骨建物の 3 次元震動台実験，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 693 号，pp.1999-2008, 2013.11
17) 笠井和彦，山際創，西島正人，馬場勇輝，伊藤浩資，引野剛，大木洋司：粘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，日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 695 号，pp.47-56, 2014.1
18) 後藤尚哉：極大地震を想定した鋼材･粘弾性ダンパーの材料解析モデル構築と制御型ロッキング架構の応答解析，2012 年度東京工業大学修士論文，2013.3
19) 小松祐樹：実大 5 層建物実験に用いられたオイルダンパーの制振効果および破壊機構に関する研究，2012 年度東京工業大学修士論文，2013.3
20) 山本英和，西島正人，笠井和彦：粘性ダンパーの限界性能試験 （E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 97），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1, pp.1343-1344, 2013.8
21) 杉山暢方，山本英和，笠井和彦：実大粘性・オイルダンパーの載荷実験とそれらの解析手法の構築 その 2 （E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 107），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1, pp.1015-1016, 2014.9
22) 佐藤大樹，笠井和彦，境原直紀：長周期地震動を想定した実大粘弾性ダンパー実験と動的特性の変化を再現した解析- その 1 （E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 104），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1, pp.1009-1010, 2014.9
23) 茶谷友輔，笠井和彦：長周期地震動における鋼材ダンパーの限界性能評価 （E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 103），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1, pp.1007-1008, 2014.9
24) 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，pp.2-10, 2015.11
25) 中井亜里沙，長山祥，佐藤大樹，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を有する制振構造建物の簡易応答評価 その 1 建物モデル概要とダンパー配置計画，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, pp.163-164, 2016.8
26) 長山祥，佐藤大樹，笠井和彦，松田和浩：長周期・長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その 2 粘性ダンパーの動的特性の変化を考慮した応答評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2, pp.165-166, 2016.8

付録：オイルダンパーの実験結果

付図 1 に，オイルダンパーの履歴曲線を示す。全ての結果においてダンパー力の低下は小さく，安定した性能を示している。



(a) O-2 (t_0=1800s) (b) O-3 (t_0=3600s) (c) O-4 (t_0=4400s)

(d) O-5 (t_0=230s) (e) O-6 (t_0=1200s) (f) O-7 (t_0=600s)

(g) O-8 (t_0=400s) (h) O-9 (t_0=900s)

付図 1 F_d-u_d 関係