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)	
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

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

Graduate Student, Faculty of Science and Eng., Tokyo Institute of Technology

^{*} 東京工業大学未来産業技術研究所 教授・Ph.D.

^{**} 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)

^{***} 東京工業大学未来産業技術研究所 助教・博士(工学)

^{****} 東京工業大学大学院総合理工学研究科 大学院生

Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

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

種ダンパーの最大ダンパーカ,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。



		階	(mm)	l_d	A_d	ϕ_d	C_d	pC_d	K_d	l _b	A_b	ϕ_b	
			(11111)	(mm)	(mm^2)	(mm)	規格値	規格値	規格値	(mm)	(mm^2)	(mm)	(KIN)
D D		4F	4025	611	2522	140	3.13	0.21	75	2410	3889	140	200
	D1	3F	4025	777	3238	190	6.25	0.42	140	2005	6666	216	400
	D2	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
	D2	3F	3947	856	4927	274	12.50	0.85	300	1533	10162	267	800
	5	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, u_{dy}の規格値は 64 mm/s である。 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($i=1\sim3$)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



	階	(mm)	l_d	A_d	ϕ_d	C_d	l _b	A_b	ϕ_b	u _{d, max}	u _{d, max}
		()	(mm)	(mm^2)	(mm)	規格値	(mm)	(mm^2)	(mm)	15kine	30kine
	4F	4025	535	8034	152	49	2429	9121	140	329	428
D1	3F	4025	535	8034	152	49	2429	9121	140	329	428
D2	2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159	658	856
	1F	4706	606	12880	184	98	2864	8320	159	658	856
	4F	3947	606	12880	184	98	2104	8380	159	658	856
D2	3F	3947	606	12880	184	98	2104	8380	159	658	856
05	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)^a 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 ud 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

図 5

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





(mm) (cm²) (mm (cm) $(\mathrm{BH})\,h\,{\textbf{-}}b\,{\textbf{-}}t_w{\textbf{-}}t_f$ (kN) BH322-160-19-16 4F 4024.5 9120 8 6 11400 799 D1 3F 4024.5 BH322-160-19-16 799 9120 8 6 11400 D2 2F 3946.6 8 16400 BH322-160-22-16 1149 13120 8 BH322-160-22-16 9 1F 4706.1 8 14578 13120 3946.6 8 22640 BH322-150-19-16 1587 4F 18112 8 3F 3946.6 8 22640 BH322-150-22-16 1587 18112 8 D 3848.9 10 32500 2F 26000 8 BH322-125-32-16 9 BH322-150-32-16 1F 4628.7 26000 10 28889 2401 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 ud 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 一)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 la 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 一の場合,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 7 鋼材ダンパーセットアップ





(b) 温度計測位置



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)	<i>b</i> _{<i>d</i>} (mm)	b _e (mm)	t _d (mm)	σ _y (MPa)	\hat{F}_{dy} (kN)	\hat{u}_{dy} (mm)		
	4F	2900	562.3	88	128/235	16	217	306	3.05		
D1	3F	2900	562.3	88	128/235	16	217	306	3.05		
D2	2F	2750	598.3	116	165/235	19	227	500	3.03		
	1F	3600	553.1	116	165/235	19	227	500	3.97		
	4F	2600	673.3	127	183/235	22	220	615	2.78		
D2	3F	2600	673.3	127	183/235	22	220	615	2.78		
D3	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 10~15°C、10~ 26°C、21~22°C、14°C 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。

$$u_{d} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{u}} u_{d,j}}{N_{u}}, \quad u_{d} = \frac{u_{d,1} + u_{d,2}}{2} + \frac{u_{d,3} + u_{d,4}}{2}$$
(1a, b)

ダンパー	実験番号	同 <u></u> 明 T (s)	加幅 u (mm)	加振時间 t ₀ (s)	サイクル数	初朔温度 θ₀(°C)	試験体	参考 文献
	0-1	4.0	20	600	150	10		
	O-2	4.0	20	1800	450	14	D2 2E	10)
	O-3	4.0	20	3600	900	10	D2-3F	19)
	O-4	4.0	20	4400	1100	13		
オイル (0)	O-5	2.0	20	230	115	15		
(0)	O-6	4.0	10	1200	300	15		
	0-7	4.0	20	600	150	15	D3-3F	21)
	O-8	4.0	30	400	100	15		
	O-9	6.0	20	900	150	15		
	V-1	4.0	20	600	150	10		
	V-2	4.0	20	1800	450	15	D1.2E	20)
	V-3	4.0	20	3600	900	15	D1-2F	20)
	V-4	4.0	20	10800	2700	13		
粘性	V-5	2.0	20	230	115	15		
(V)	V-6	4.0	10	1200	300	15		
	V-7	4.0	20	600	150	15	D2-2F	21)
	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	-
	E-1	4.0	20	450	112	21	D3-1F	18)
	E-2	2.0	16	300	150	22		
	E-3	4.0	8	1200	300	22		
	E-4	4.0	16	600	150	22	D1-2F	
	E-5	4.0	24	400	100	22		
41.707.14	E-6	6.0	16	900	150	22		
粘弾性 (E)	E-7	2.0	16	300	150	22		22)
(12)	E-8	4.0	8	1200	300	22		
	E-9	4.0	16	600	150	22	D3-3F	
	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-1	4.0	20	924	231	-	D2-2F	22)
(S)	S-2	4.0	20	1116	279	14	 本 谷 解 析 用	23)

表5 正弦波加振実験パラメータ

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

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, E_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^{In} 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 $n \ge 1$ 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、 ${}_{h}F_{dmax}$ は半波 ごとの最大ダンパーカ, 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。



$$F_{d}^{[n]} = \frac{\left|{}_{h}F_{d,\max}^{(2n)}\right| + \left|{}_{h}F_{d,\max}^{(2n+1)}\right|}{2}$$
(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'_a 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'_a 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、ダンパーカ、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。



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カ,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



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 (6.3 cm/s²) 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。



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160℃近くまで上昇しており,900 サイクル(3600s)では200℃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。

$$\Omega = \frac{\sum W_d}{_{\nu}V} \tag{5}$$

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



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(10°C~26°C)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。



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。ダンパーカ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,著しいダンパーカの低下が見られ 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 35℃ 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。

図21にエネルギー密度 Ωに対する最大ダンパーカの低下率の変 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カの低下率は大きい。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 *Q'* と呼び、以下のように 定義する。

Ω'	$= \frac{\sum W_d}{\sum W_d}$. <u>γ</u>		(6)
	V	Т	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	(-)

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。



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カ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 *Q*, 歪・周期基準化エネル ギー密度 *Q* 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

- 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 一吸収と分担率 一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14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 一力の低下は小さく、安定した性能を示している。

