

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	
著者(和文)	長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩
Authors(English)	Sho Nagayama, Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 389-392
Citation(English)	, , , pp. 389-392
発行日 / Pub. date	2016, 3

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

構造—振動

正会員 ○ 長山祥<sup>\*1</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>

〃 笠井和彦<sup>\*3</sup>

〃 松田和浩<sup>\*4</sup>

制振構造 長周期地震動 実大ダンパー

動的特性 長時間加振実験 累積エネルギー吸収量

1. はじめに

近年、東海・東南海・南海地震のような長周期地震動が発生することが想定されており、超高層建物などの周期が長い建物が大きく揺れることが懸念されている。このことから、継続時間の長い長周期地震動が発生した際の、ダンパーの性能の変化を把握することは有用である。

本報では、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を把握することを目的とし、本報その1では、これまでに行われてきた4種の実大ダンパーに対する長時間正弦波加振実験をもとに、ダンパーの特性値の推移についての報告を行う。

2. 試験体計測概要

本実験で試験体の対象となるダンパーは、E-ディフェンスにおける実大5層建物の震動台実験で用いられたダンパーから選出したものである<sup>1)</sup>。なお、それぞれのダンパーの名称は、実大5層建物の震動台実験で使用した位置である。

2.1 オイルダンパー計測概要

図1にオイルダンパー試験体図、表1にオイルダンパー諸元を示す。ひずみゲージは、ダンパー中央部に加え中央部から±100mmの位置全3断面(i=1~3)に4枚ずつ貼付している。

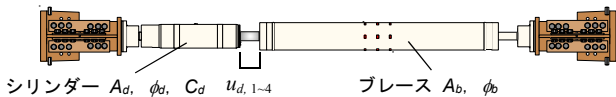


図1 オイルダンパー

表1 粘性ダンパー諸元

名称	l (mm)	ダンパー			ブレース		
		l <sub>d</sub> (mm)	A <sub>d</sub> (mm <sup>2</sup> )	φ <sub>d</sub> (mm)	l <sub>b</sub> (mm)	A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )	φ <sub>b</sub> (mm)
D2-3F	4025	777	3238	190	2005	6666	216

2.2 粘性ダンパー計測概要

図2に粘性ダンパー試験体図、表2に粘性ダンパー諸元を示す。ひずみゲージは、ダンパー中央部に加え中央部から±100mmの位置全3断面に4枚ずつ貼付している。

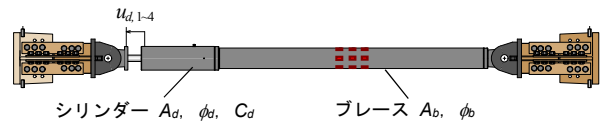


図2 粘性ダンパー

表2 粘性ダンパー諸元

名称	l (mm)	ダンパー				ブレース		
		l <sub>d</sub> (mm)	A <sub>d</sub> (mm <sup>2</sup> )	φ <sub>d</sub> (mm)	C <sub>d</sub> 規格値	l <sub>b</sub> (mm)	A <sub>b</sub> (mm <sup>2</sup> )	φ <sub>b</sub> (mm)
D1-2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159
D2-2F	3947	606	12880	184	98	2104	8320	159

※ C<sub>d</sub>の単位は kN/(mm/s)<sup>α</sup> であり、α, K<sub>d</sub>の規格値はそれぞれ 0.38, ∞である。

2.3 粘弾性ダンパー計測概要

図3に粘弾性ダンパー試験体図、表3に粘弾性ダンパー諸元を示す。ここで、Vは粘弾性体の体積を表す。ひずみはブレース部において計測しており、ひずみゲージは6枚貼付している。

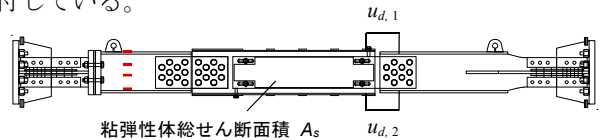


図3 粘弾性ダンパー

表3 粘弾性ダンパー諸元

名称	l (mm)	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	t <sub>d</sub> (mm)	n	A <sub>s</sub> /t (cm)	V (cm <sup>3</sup> )
D1-2F	3946.6	13120	8	8	16400	10496
D2-3F	4024.5	9120	8	6	11400	7296
D3-3F	3946.6	18112	8	8	22640	14490
D3-1F	4628.7	26000	9	10	28889	23400

2.4 鋼材ダンパー計測概要

図4に鋼材ダンパー試験体図、表4に鋼材ダンパー諸元を示す。ひずみは加力側弾性部において計測しており、ひずみゲージは8枚貼付している。

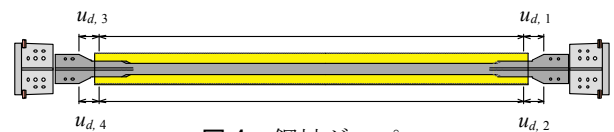


図4 鋼材ダンパー

表4 鋼材ダンパー諸元

名称	l <sub>d</sub> (mm)	l <sub>e</sub> (mm)	b <sub>d</sub> (mm)	b <sub>e</sub> (mm)	t <sub>d</sub> (mm)	F <sub>dy</sub> (kN)
D2-2F	2750	598.3	116	165/235	19	500
事後確認用	2900	562.3	88	128/235	16	306

### 3. ダンパー特性値の算出方法

ダンパーストローク  $u_d$  とダンパー力  $F_d$  を次式により算出する。

$$u_d = \frac{\sum_{j=1}^{N_u} u_{d,j}}{N_u}, \quad F_d^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} \varepsilon_j^{(i)}}{N_s} EA_i \quad (1a, b)$$

ここに、 $N_u$  はダンパーストローク計測個数、 $N_s$  は1断面におけるひずみゲージ配置個数、 $E$  はヤング係数、 $F_d^{(i)}$  は  $i$  位置におけるダンパー力、 $\varepsilon_j^{(i)}$  は  $i$  位置におけるひずみ、 $A_i$  は  $i$  位置における歪計測箇所断面面積を表している。なお、論文によってダンパーストロークの表記が異なるが、本報においては  $u_d$  で統一することとする。

最大ダンパー力およびエネルギー吸収量を次式により算出する。最大ダンパー力  $F_d$  は、計測直後の1つ目の半波を除いた半波  $2n$  と半波  $2n+1$  の平均値より算出しており、これを  $n$  サイクルの値とする(ただし  $n \geq 1$  とする)。また、エネルギー吸収量  $W_d$  は1サイクルごとの履歴の面積より算出している。図5に半波の定義、図6に定常状態での履歴を示す。

$$F_d^{[n]} = \frac{|{}_h F_{d,max}^{(2n)}| + |{}_h F_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \quad (2)$$

$$W_d^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(F_d^{(i)} + F_d^{(i+1)}) \cdot (u_d^{(i+1)} - u_d^{(i)})}{2} \quad (3)$$

ここで、 ${}_h F_{d,max}$  は、半波における最大ダンパー力、 $N_D$  は、1サイクルでのデータ数を表す。なお、 $()$  はステップ、 $\langle \rangle$  は半波、 $[\ ]$  はサイクルを意味する。

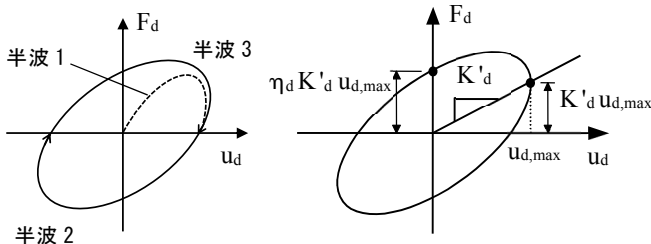


図5 半波の定義

図6 定常状態での履歴

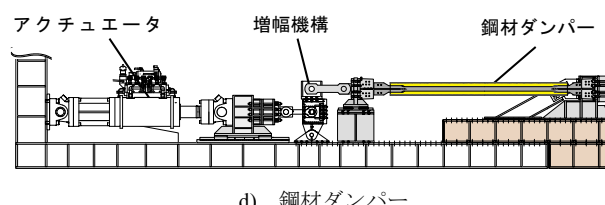
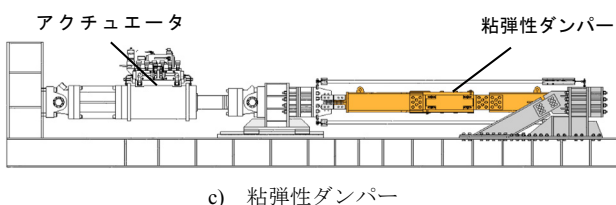
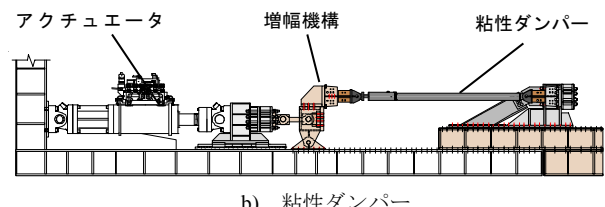
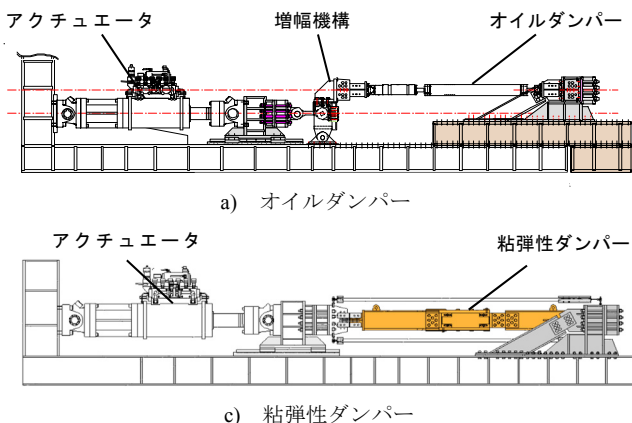


図7 長時間加振実験セットアップ図

ダンパーの特性値である貯蔵剛性  $K'_d$  は、図6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とし、また、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。

### 4. 4種のダンパーの長時間正弦波加振実験

#### 4.1 入力波概要

表5に正弦波加振実験計測条件を示す。なお、\*印がついているものに関しては、実験を途中で中止している。

表5 長時間正弦波加振実験計測条件

ダンパー	名称	周期 $T$ (s)	振幅 $u$ (mm)	継続時間 $t_0$ (s)	実験番号	参考文献
オイル(O)	D2-3F	4	20	4400	O-1	-
	D1-2F	4	20	10800	V-1	5)
粘性(V)	D2-2F	2	20	230*	V-2	6)
		4	10	1200	V-3	
		4	20	600	V-4	
		4	30	400	V-5	
		6	20	900	V-6	
		6	20	900	V-6	
粘弾性(E)	D3-1F	4	20	450	E-1	-
		2	16	300	E-2	
	D1-2F	4	8	1200	E-3	7)
		4	16	600	E-4	
		4	24	400	E-5	
		6	16	900	E-6	
	D3-3F	2	16	300	E-7	7)
		4	8	1200	E-8	
		4	16	600	E-9	
		4	24	280	E-10	
		6	16	900	E-11	
D2-3F	2.857	24.96	66	E-12	8)	
	3.610	5.66	24000	E-13		
	3.610	5.66	28800	E-14		
	7.042	5.66	32400	E-15		
	7.042	5.66	30000	E-16		
	4.348	5.66	30000	E-17		
鋼材(S)	D2-2F	0.25	20	924	S-1	9)
		事後確認用	0.25	20	1116	

#### 4.2 長時間载荷による4種のダンパーの特性値低下の傾向

本節では、オイル・粘性・粘弾性・鋼材の4種類のダンパーに対して行った長時間の正弦波加振実験よりダンパー力低下の傾向の把握を行う。本実験では、長周期地震動を考量して振動数 0.25Hz、振幅±20mm (40層程度の超高層制振建物に1/170rad程度 of 層間変形角  $\theta$  が生じていることを想定)の正弦波入力を行っている。図7に各ダンパ

一のセットアップ図を示す。実験番号は、O-1, V-1, E-1, S-2 とする。ここで、それぞれのダンパー間での計測時間が異なることから、最も計測時間の短い粘弾性ダンパーを基準として比較を行う。

図 8 に、それぞれのダンパーの履歴曲線を示す。図 8 より、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。一方、粘性、粘弾性、鋼材ダンパーではサイクル数を重ねるごとにダンパー力が低下する傾向が見られた。

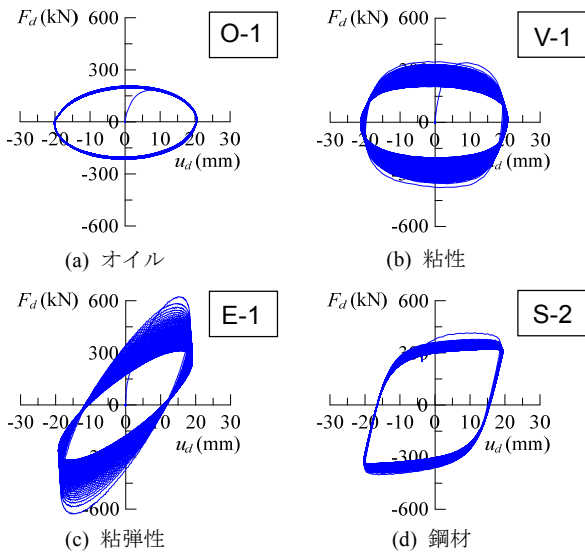


図 8  $F_d - u_d$  関係

図 9 にサイクルごとの各特性値の減少量を示す。なお図で示しているものは、10 サイクルごとに結果を間引いてプロットしたものであり、今後も同様とする。図 9 より、粘性、粘弾性ダンパーでは比較的早期の段階で特性値が減少していくのに対し、オイルダンパーでは低下量は少ない。また、鋼材ダンパーでは早期に特性値が減少するが、時間経過ごとに減少量は小さくなっていく傾向が見られた。

それぞれのダンパーにおいて、ダンパー力、エネルギー吸収量、損失剛性の低下の割合は類似した傾向を示すことが確認された。一方で、貯蔵剛性に関してオイル・粘性ダンパーで、履歴の形状により限りなく小さな値をとってしまい変化が分かりにくいことから、貯蔵剛性を除いた特性値での低下率の確認を行う。

ここで、1 サイクル目に対しての特性値の低下量を確認するために、図 10 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とダンパー温度の推移とサイクル数の関係を示す。結果より、それぞれのダンパーにおいて各特性値の低下の割合は、ほぼ同様であることが確認された。また、粘性・粘弾性ダンパーでは、110 サイクル時に 0.5 倍ほどの特性値の低下が見られたが、これは 2 つのダンパーが持つ温度依存性により、粘性体の温度が上昇し、ダンパー力が低下したと考えられる。

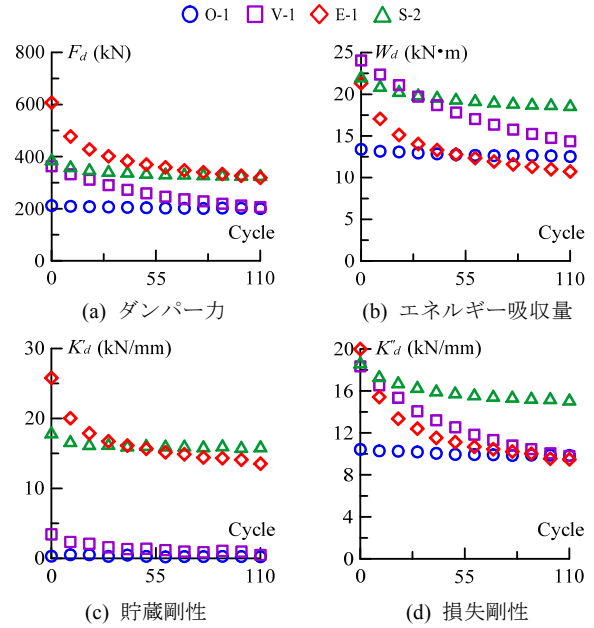


図 9 特性値の減少量

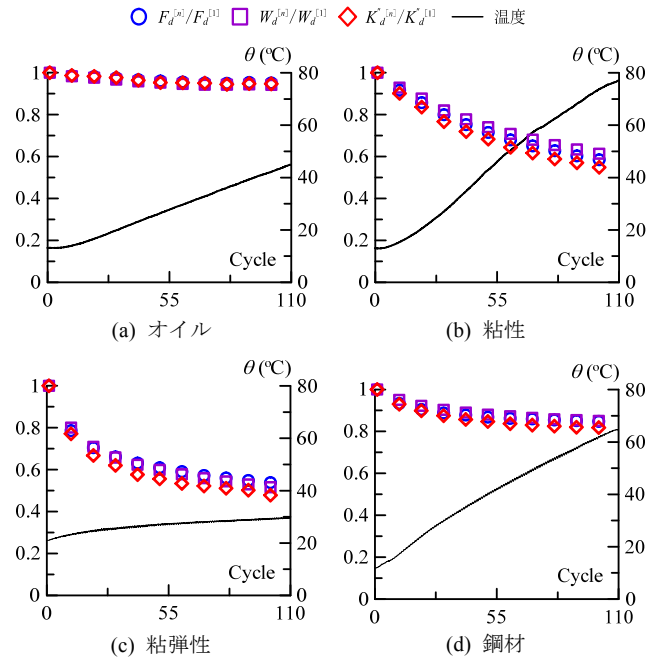


図 10 サイクル数に対する特性値の推移

### 5. 粘性ダンパーの特性値低下の傾向

前章において、粘性ダンパーでの特性値の低下が大きかったことから、異なる振幅・振動数の正弦波を入力した際の特性値低下の傾向を確認する。ダンパーのセットアップは図 7 の(b)と同様である。载荷パラメータは表 5 の通りであり、実験番号は V-2~6 とする。

図 12 に基準値に対するダンパー力の変動、ダンパー温度の推移とサイクル数の関係を示す。図 12 より、短周期・大振幅の実験において、早期にダンパー力が低下し、低振幅の実験においては緩やかに低下していく。温度は、短周期・大振幅で大きく上昇することから、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。粘性ダンパ

一のダンパー力は、最大で 0.5 倍となった。

ここで、実験によりサイクル数は異なるが、総走行距離は同じであるため累積値による比較を行う。ただし、最も高速となる V-2 に関しては、アクチュエータの油圧が急落したため 230s で実験を中止している。基準値に対するダンパー力の変動と累積エネルギー吸収量の関係を図 13 に示す。粘性ダンパーにおいて、基準値に対するダンパー力の推移は、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吸収することで内部の温度が上昇して、それに伴い特性値が低下するためである。これらより、今回用いた試験体においては、累積エネルギー吸収量に対する特性値低下の傾向は一様に評価できるといえる。

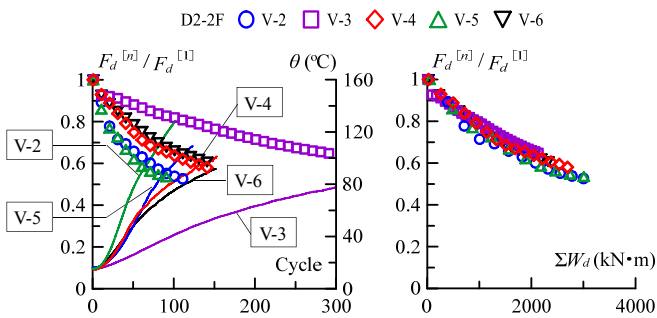


図 12 基準値に対するダンパー力の変動

図 13 累積値に対する特性値の低下率

### 6. 粘弾性ダンパーの特性値低下の傾向

前章と同様に、粘弾性ダンパーでの特性値の低下が大きかったことから、異なる振幅・振動数の正弦波を入力した際の特性値低下の傾向の確認を行う。図 14 に粘弾性ダンパーのセットアップ図を示す。載荷パラメータは表 5 の通りであり、実験番号は E-2~11 とする。

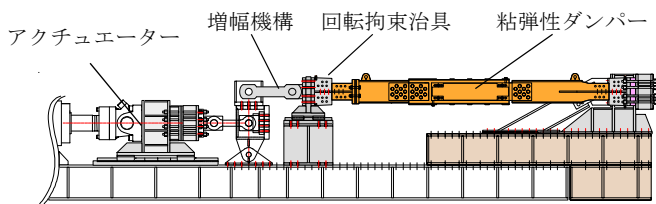


図 14 粘弾性ダンパーセットアップ図

図 15 に基準値に対するダンパー力の変動、ダンパー温度の推移とサイクル数の関係を示す。図 15(a)よりひずみ一定の際に、周期が短くなるにつれて低下率も大きくなった。同様に、図 15(b)より周期一定の際に、ひずみが大きくなるにつれて低下率も大きくなった。これは、温度の上昇量と対応していることが分かる。また、粘弾性ダンパーの総せん断面積  $A_s$  によらず同様の低下の傾向を示した。粘弾性ダンパーのダンパー力  $F_d$  は、最大で 0.4 倍となった。

図 16 に基準値に対するダンパー力の変動と累積エネルギー吸収量の関係を示す。結果より、粘弾性ダンパーの特性値の低減率は、ひずみが大きくなるほど大きく、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。また、ダンパーの総せん断面積  $A_s$  に比例して、累積エネルギー吸収量が大きくなることを確認された。

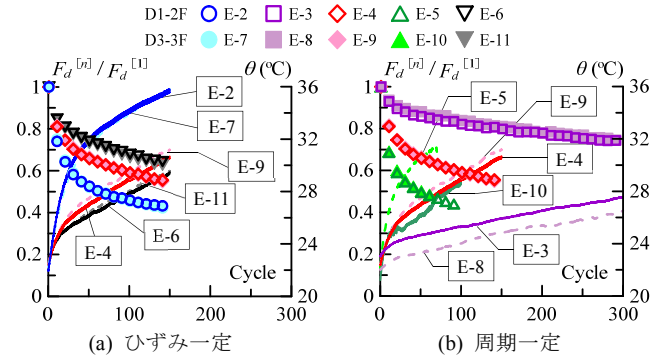


図 15 基準値に対するダンパー力の変動

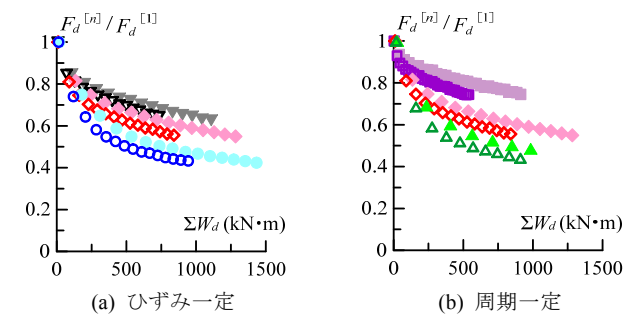


図 16 累積値に対する特性値の低下率

### 7. まとめ

本報では、4 種の実大ダンパーに対する長時間正弦波加振実験より、ダンパーの特性値の推移について報告した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 長周期地震動を考慮して振動数 0.25Hz、振幅  $\pm 20$ mm 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 サイクル目の半分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・振動数の正弦波を入力した結果、基準値に対するダンパー力の変動と累積エネルギー吸収量の関係より、振幅・振動数によらず一定の低下率を示した。これらより、累積エネルギー吸収量での比較を行うことにより特性値低下の傾向は、一様に評価できるといえる。
- (3) 同様に、粘弾性ダンパーに異なる振幅・振動数の正弦波を入力した結果、基準値に対するダンパー力の変動と累積エネルギー吸収量の関係より特性値の低下率は、ひずみが大きく、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。また、ダンパーの総せん断面積に比例して、累積エネルギー吸収量が大きくなることを確認された。

参考文献・所属はその 2 にまとめて示す。