

水平 2 方向荷重を受ける免震構造用鉛ダンパーの繰返し変形性能

東京工業大学 田仲 恵大

1. はじめに

免震構造は、アイソレータやダンパーといった免震装置で構成される。地震時にそれらが正しく機能することによって、各階応答加速度を低減することや上部構造を弾性範囲に留めることが期待される。しかし、これらの利点を享受するためには、免震装置の性能を把握していることが前提となる。これまでに U 字形鋼材ダンパーの疲労性能に関する研究が行われており、正円および楕円荷重に代表される水平 2 方向荷重と単軸による水平 1 方向荷重とでは、ダンパーの繰返し変形性能が異なることがわかった。他方、U 字型鉛ダンパーは多くの建物への導入事例があるが、水平 2 方向荷重に関する研究はほとんどされていない。

本研究では、免震構造の抵抗機構として用いられる免震構造用鉛ダンパーの水平 2 方向特性の把握を目的とした実験を行う。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体概要を図 1 に示す。本研究で用いる試験体は U2426 型（可撓部断面 260mm, 240mm）の免震構造用鉛ダンパーであり、寸法を実大の 1/4 相当に縮小した部材である。試験体の限界変形は 200mm であり、降伏耐力は 13.75kN である。また、試験体の可撓部湾曲方向に対して平行な方向を P 方向、それと直交方向を O 方向と呼ぶ（図 1 (b)）。なお、試験体は縮小率を考慮すれば実大部材との力学性能の差が小さいことが確認されている¹⁾。本実験で使用した試験体数は全部で 24 体である。

2.2 荷重装置と実験方法

実験は東京工業大学に設置されている多自由度荷重装置を用いて実験を行った。多自由度荷重装置の構成部材および立面図を図 2 に示す。

実験では、荷重装置下部に配している 2 本の水平ジャッキ（±1000kN, ±500mm）がリニア

スライダーによって支持された荷重テーブルを介して試験体に水平 2 方向変形 (δ_x , δ_y) を与える。試験体および取り付け治具は、荷重テーブルと上部反力梁に接続された十字治具の間に設置する。主要計測項目は、水平荷重 P_x , P_y および曲げモーメント M_z である。

2.3 水平 2 方向の荷重履歴

本実験では、楕円率（長径：短径）と長径の変形量をパラメータとした荷重を行った。試験体の長径の向きは、実験実績の多い P 方向に加えて、O 方向とした荷重も行った。また、荷重は U 字形鋼材ダンパーの標準荷重履歴²⁾に倣い、3 サイクル毎に回転方向を変えることを基本とし、回転方向を常に一定とした荷重も行った。

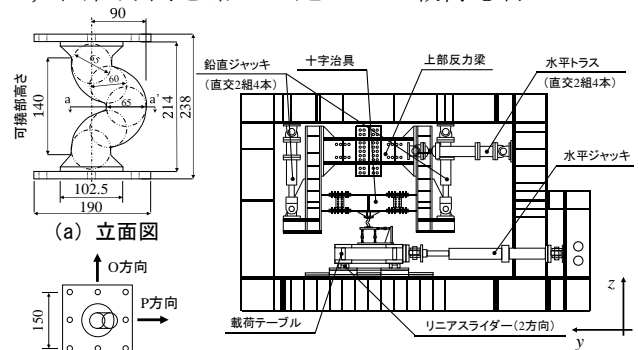


図 2 多自由度荷重装置

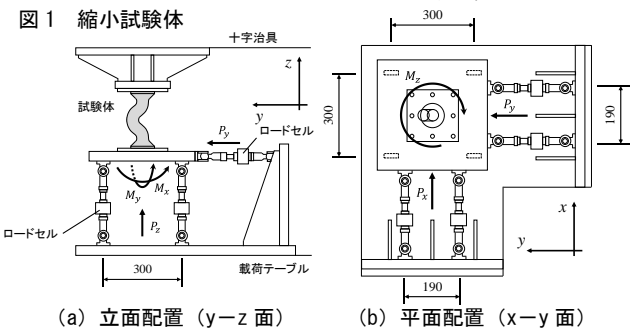
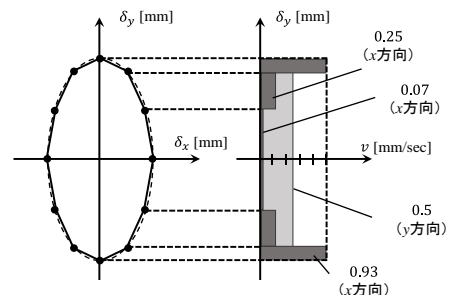


図 3 試験体取り付け治具（計測計画）



変位軌跡 (2:1 楕円) 荷重速度
図 4 多角形 (12 角形) 荷重概要, および荷重速度

さらに、楕円率は一定のまま特定のサイクル毎に振幅量を増減する荷重や長径の向きを3サイクル毎に変更する荷重も行った。

荷重速度は最大で1.17mm/secであり、準静的荷重である。楕円荷重では長径の荷重速度を0.5mm/sec（正円では0.3mm/sec）とし、短径の荷重速度を適宜調整して荷重を行った。また、荷重速度をなるべく一定に保つため、図4に示すような12角形荷重を採用した。なお、楕円および多角形（12角形）荷重の履歴と繰り返し変形性能は同等であることを確認している³⁾。

3 実験結果と考察

3.1 水平1方向荷重

まず、水平1方向荷重の実験結果について述べる。実験結果一覧を表1に示す。本実験では、既往の研究⁴⁾を参考にして、鉛ダンパーの荷重が1サイクル目y切片荷重の5割を下回ったときを破断とし、そのときの破断回数を $0.5N_u$ とする。表には完全に試験体が破断したときの破断回数 N_u も併せて示す。回転方向を固定した荷重や長径の向きを変更しながら行った荷重（No.20～24）は呼び番号に下線を付している。また、実験は2期（シリーズI, II）に分けて行っており、シリーズIIは呼び番号の背景を塗りつぶしている。

水平1方向荷重における荷重-変形関係を図5に示す。図の縦軸は両端ピン部材に組み込まれたロードセルによって計測したy方向の荷重、横軸は水平ジャッキのストロークを用いて算出した水平変形である。なお、ここでは2サイクル目の履歴を示している。片振幅50mmの履歴

表1 実験結果一覧

	No.	長径 l_1 (mm)	短径 l_2 (mm)	楕円率	長径の向き	破断回数 N_u	破断回数 $0.5N_u$	累積損傷度D	破断位置
水平1方向	1	200	-	-	P	6.25	6.25	-	C
	2	100	-	-	P	29.75	28.5	-	A
	3	50	-	-	P	115	91.5	-	A
	4	75	75	1:1	P	17.25	16	0.781	C
	5	75	75	1:1	P	26.5	21	1.025	C
	6	50	50	1:1	P	36.75	31	0.719	C
	7	200	100	2:1	P	2.5	2.5	0.473	C
	8	200	100	2:1	P	3.5	3	0.567	C
	9	200	100	2:1	O	2.25	2.25	0.425	C
	10	150	75	2:1	P	4	4	0.435	C
	11	150	75	2:1	O	9	9	1.004	C
	水平2方向	12	100	50	2:1	P	7.5	7	0.571
13		100	50	2:1	P	32.25	28	1.484	C
14		100	50	2:1	O	37.25	29	1.537	A
15		75	37.5	2:1	P	23.5	23.5	0.735	C
16		75	37.5	2:1	O	48	39	1.219	A
17		50	25	2:1	P	79	75.5	1.122	A
18		200	66.7	3:1	P	3	3	0.502	A
19		100	20	5:1	P	20.5	20	0.971	C
20		75	37.5	2:1	P	26.75	19	0.594	A
21		75	37.5	2:1	P,O	15	12	0.375	C
22		50→100→150	25→50→75	2:1	P	33	24(12, 6, 6)	1.165	A
23		100	50	2:1	P,O	10.5	9	0.477	A
24		150→100→50	75→50→25	2:1	P	15.5	15.5(6, 3.5, 6)	0.944	C

※括弧内は、左から長径半径50mm, 100mm, 150mmの破断回数を示している。
 ※荷重方法詳細：No. 20（回転方向を常に一定）、No. 21, 23（長径の向きを3サイクル毎に変更）、No. 22, 24（漸増および漸減）

は紡錘型の復元力特性を示している。これに対して、U2426型の限界変形である片振幅200mmの履歴は、限界変形まで荷重を続けると限界変形の7割付近から試験体可撓部の湾曲が見えなくなり、幾何非線形の影響により履歴曲線にハードニングが現れ、蝶型の復元力特性を示している。

水平1方向荷重時の破断回数と片振幅の関係を図6に示す。図の縦軸は破断回数 $0.5N_u$ 、横軸は片振幅 δ である。また、図中には既往の研究で提案されている疲労曲線⁵⁾を併せて示しているが、本試験体は縮小モデルであるため、片振幅 δ に1/4を乗じている。

$$\delta = 567 \cdot 0.5N_u^{-0.545} \quad \dots(1)$$

ここで、 δ ：片振幅、 $0.5N_u$ ：破断回数

図より、全ての試験体が概ね疲労曲線近傍で破断に至っており、荷重速度および寸法は鉛ダンパーの繰り返し変形性能に影響しないと言える。

3.2 水平2方向荷重

次に、水平2方向荷重の実験結果について述べる。水平2方向荷重時の荷重-変形関係を図7に示す。なお、ここでは1サイクル目の履歴を示している。200:100(y方向)の実験結果を図7(a)に示す。図より、No.1とNo.8のピーク変形時における耐力はほとんど差がないが、 $\delta_y = 0\text{mm}$ に近づくに連れて、耐力の低下度合いが異なることがわかる。200:100では全ての試験

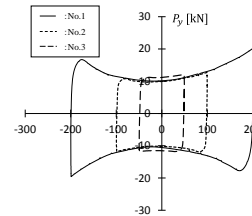


図5 荷重-変形関係

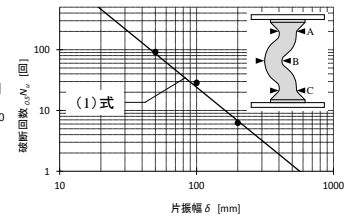
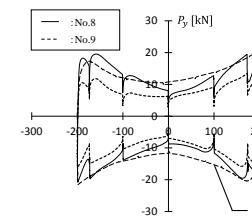
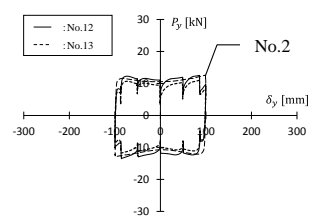


図6 破断回数-片振幅関係



(a) 200:100 (y方向)



(b) 100:50 (y方向)

図7 水平2方向荷重時の荷重-変形関係

体が水平 1 方向荷重の破断回数のおよそ半分程度で破断に至った (表 1 参照)。

100 : 50 (y 方向) の実験結果を図 7 (b) に示す。図より、100 : 50 では履歴は矩形に近づき、ハードニングは見られない。No.2 は水平 1 方向で行った実験であるが、No.12 (水平 2 方向) よりも耐力がわずかに下回った。さらに、No.2, 13 は水平 1 方向と 2 方向の違いがあるにもかかわらず、破断回数は変わらなかった。

4. 水平 2 方向荷重の疲労性能

4.1 水平 1 方向疲労曲線との対応

ここでは、水平 2 方向荷重によって生じた鉛ダンパーの疲労性能の低下について述べる。水平 2 方向荷重時の破断回数—長径半径関係を図 8 に示す。図中の (1) 式は水平 1 方向荷重時の疲労曲線である。また、点線は水平 2 方向荷重時の疲労曲線であり、以下の式⁹⁾によって求められる。図中には、累積損傷度 D_2 を 1.0 および 0.4 としたときの水平 2 方向荷重の破断回数を併せて示す。

$$D_2 = \left(\frac{1}{xN_u} + \frac{1}{yN_u} \right) \times 0.5N_{u,2D} \quad \dots (2)$$

ここで、 $0.5N_{u,2D}$: 水平 2 方向の破断回数
 x および y 方向の破断回数 xN_u , yN_u は (1) 式によって求める。

図 8 (a) より、長径半径 100, 150mm は破断回数に差が見られるが、200mm では、いずれの試験体も 3 サイクル前後で破断に至った。長径半径 50mm のような小振幅荷重時には、水平 1 方向の疲労曲線との差がほとんどないが、長径半径 100~200mm のような大振幅荷重では、その曲線と乖離していることがわかる。これは、試験体が受ける振幅の大きさに加え、水平 2 方向荷重特有の振れが要因として考えられる。

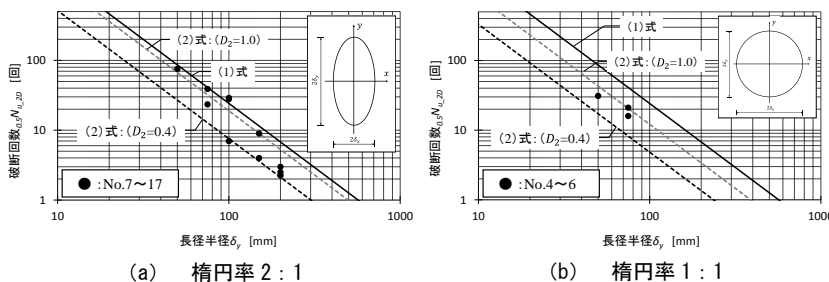


図 8 水平 2 方向荷重時の破断回数—長径半径関係

4.2 疲労性能低下要因の考察

ここでは、鉛ダンパーを破壊に至らしめる要因の一つとして考えられる振れモーメントについて考察する。本実験では、取り付け治具の水平両端ピン部材で計測される軸力によって、 z 軸周りの振れモーメント M_z を計測できる (図 3)。1 サイクル目の振れモーメント (平均値) —長径半径関係を図 9 に示す。図中には、No.4~19 の結果を示している。図より、概ね振幅が大きくなるほど、振れモーメントが大きくなることがわかる。また、本実験で行った水平 2 方向荷重の 1 サイクルの回転量は振幅の大きさに依らず、およそ 2π である。振れモーメントによる仕事量 W は、振れモーメントに回転量を乗じたものである。

したがって、大振幅を経験する試験体の方が、水平 2 方向変形に伴う振れによって、1 サイクル毎に蓄積する損傷量は相対的に大きくなると考える。水平 2 方向荷重を受ける鉛ダンパーは、特に大振幅域において、振れの影響を強く受けており、小振幅時よりも繰り返し変形性能の低下が著しいものと考えられる。

5 水平 2 方向荷重における繰り返し変形性能

5.1 水平 2 方向荷重における評価法の提案

ここでは、水平 2 方向荷重を受ける鉛ダンパーの繰り返し変形性能を評価する。図 8 (a) より、長径半径 50mm のような小振幅では、累積損傷度を 1.0 とした疲労曲線と差はないが、長径半径 100mm 以上の大振幅域では振れによる繰り返し変形性能の低下により、その曲線を大きく下回っている。ここで、長径半径 100~200mm の結果と対応するような曲線を求めると図に示す下限値が得られる。このときの累積損傷度は 0.4 である。長径半径 50~100mm 付近

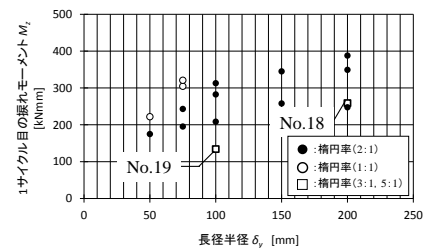


図 9 振れモーメント—長径半径

の結果を包絡するように曲線を描くと (3) 式が導ける。楕円率 1 : 1 (図 8 (b)) についても同様に累積損傷度が 1.0 となる曲線を基準として下限値 0.4 を定めると (4) 式が導ける。

楕円率 2 : 1

$$\delta_y = \begin{cases} 497.0 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.545} & (10 \leq \delta_y < 32.25) \\ 224.8 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.387} & (32.25 \leq \delta_y < 110) \dots (3) \\ 300.9 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.545} & (110 \leq \delta_y < 300) \end{cases}$$

楕円率 1 : 1

$$\delta_y = \begin{cases} 388.8 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.545} & (10 \leq \delta_y < 20) \\ 166.9 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.390} & (20 \leq \delta_y < 70) \dots (4) \\ 236.0 \cdot 0.5N_{u,2D}^{-0.545} & (70 \leq \delta_y < 250) \end{cases}$$

本損傷評価法は、長径半径と楕円率が決まれば、累積損傷度を求めることができる。

5.2 ランダム載荷における評価法の検証

前節で提案した評価法の検証をランダム載荷下においても行う。ここでは No.21, 23 の検証を行う。ランダム載荷における検証結果を表 2 に示す。累積損傷度 D_y は上式で求めた破断回数の逆数にサイクル数を乗じたものである。表より、楕円率 2 : 1 指標より求めた No.21 の D_y は 0.687 となり、過小評価していることがわかる。そこで、図 10 のように軌跡を分解して考える。図のように y および x 方向を長径とした楕円載荷の長径半径成分 (長破線) と短径半径成分 (点線) を抜き出すと正円載荷を受けているものとみなすことができる。12 サイクルで破断に至った No.21 を 75mm, 37.5mm の正円載荷を 6 サイクル経験したと考えると D_y は 0.855 であった。

これより、載荷方法が特殊な場合でも、本評価法は水平 2 方向載荷における鉛ダンパーの繰り返し変形性能を評価できると言える。また、

表 2 ランダム載荷の実験結果

No.	長径 δ_x (mm)	短径 δ_y (mm)	楕円率	長径の向き	破断回数 N_u	破断回数 $n_u N_u$	累積損傷度 D_y	
							楕円率 2:1	楕円率 1:1
20	75	37.5	2:1	P	26.75	19	1.188	-
22	50-100-150	25-50-75	2:1	P	33	24(12, 6, 6)	2.461	-
24	150-100-50	75-50-25	2:1	P	15.5	15.5(6, 3.5, 6)	2.229	-
21	75	37.5	2:1	P, O	15	12	0.687	0.855
23	100	50	2:1	P, O	10.5	9	1.127	1.127

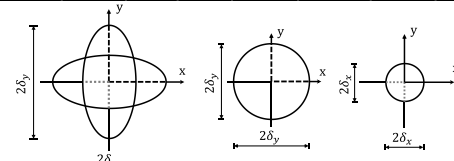


図 10 軌跡分解

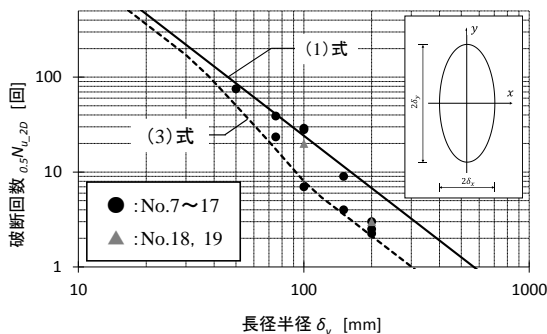
評価法は楕円と正円に区分し、別指標上で評価することが適切である (図 11)。

6. まとめ

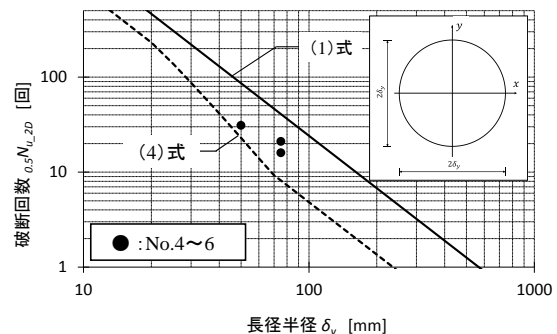
- 1) 水平 2 方向載荷を受ける鉛ダンパーは、小振幅時は水平 1 方向載荷と比較して繰り返し変形性能の低下は小さいが、大振幅時はその低下度合が大きくなる。また、その要因の一つとして下記 2) で述べる振れモーメントの増大が関係していると言える。
- 2) 水平 2 方向載荷を受ける鉛ダンパーは、振幅が大きくなるほど、試験体に作用する振れモーメントが大きくなる。
- 3) 水平 2 方向載荷を受ける鉛ダンパーの繰り返し変形性能を長径半径と楕円率によって、評価する方法を示した。

参考文献

- 1) 高山峯夫, 森田慶子: 免震構造用 U180 型鉛ダンパーの限界性能, 日本建築学会技術報告集, 第 3 号, pp.48-52, 1996.12
- 2) 山田哲ほか: 免震構造用 U 型鋼材ダンパーの水平 2 方向載荷実験に用いる標準載荷履歴の提案, 日本建築学会技術報告集, 第 22 巻 第 50 号, pp.127-132, 2016.2
- 3) 吉敷祥一ほか: 免震構造用鉛ダンパーの水平 2 方向特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 2016.8
- 4) 森田慶子, 高山峯夫: 免震構造用鉛ダンパーに関する実験研究 (その 2 復元力モデルと繰り返し特性の評価について), 日本建築学会九州支部研究報告 第 42 号, 2003.3
- 5) 安永亮, 高山峯夫ほか: 鉛ダンパーの風応答に関する研究 (その 2 微小変位での高サイクル疲労特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) B-2 分冊, pp.289-290, 2010.9
- 6) 吉敷祥一ほか: ランダムな水平 2 方向変形に対する繰り返し変形性能 (免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの水平 2 方向特性 その 2), 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻 第 704 号, pp.1457-1467, 2014.10



(a) 楕円率 2 : 1



(b) 楕円率 1 : 1

図 11 水平 2 方向載荷時の破断回数-長径半径関係