

2016年度（第8回）免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

水平2方向変形を受ける免震構造用鉛ダンパーの変形性能評価法の構築

吉敷 祥一（東京工業大学）

1 はじめに

免震構造は、外乱に対する抵抗機構が明確であり、外力を定めれば応答予測に基づく目標性能の実現が比較的容易な構造形式である。しかしながら、免震構造の利点の享受には、免震部材の詳細な性能把握が前提条件にあり、性能検証が網羅していない外乱に対してはロバスト性に欠ける一面を有している。著者らは、従来の性能検証が水平1方向载荷によって行われていることを受け、免震構造用U字形鋼材ダンパーの水平2方向特性に着目した一連の研究を行ってきた^{1), 2)}など。本報では、免震構造用鉛ダンパーにおける水平2方向特性、特に繰り返し変形性能の把握を目的とした研究の成果を報告する。なお、本研究成果は2016年度（第8回）「免震構造・制振構造に関わる研究助成」の支援を受けたものである。

2 実験計画

2.1 試験体

試験体概要を図1に示す。試験体は、免震構造用鉛ダンパーであり、実用に供されているU180型（可撓部断面φ180）とU2426型（可撓部断面φ260、φ240）の寸法を1/4に縮小した部材を用いる。

2種の鉛ダンパーの高さはほぼ等しいが、U2426型は可撓部の直径がU180型の1.3～1.4倍大きく、初期剛性と降伏耐力はともに2.5倍大きい。また、U2426型の可撓部の湾曲長さはU180型の1.5倍長くなっており、限界変形は1.3倍大きく設定されている。なお、ここで用いる縮小試験体は、縮小率を考慮すれば実大部材との力学性能の差は小さいことが確認されている³⁾。したがって、U180型とU2426型の縮小試験体における限界変形は、それぞれ150mmと200mmとなる。実験は2種類の鉛ダンパーに対して载荷履歴をパラメータとし、U180型を2体、U2426型を24体用意した。

2.2 载荷装置と実験方法

実験は、東京工業大学 すすかけ台キャンパスに設置されている多自由度载荷装置を用いて行った。载荷装置の概要を図2に示す。载荷装置は、自己釣合型反力フレームの下部に直交2本の水平ジャッキを配し、リニアスライダに支持された载荷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

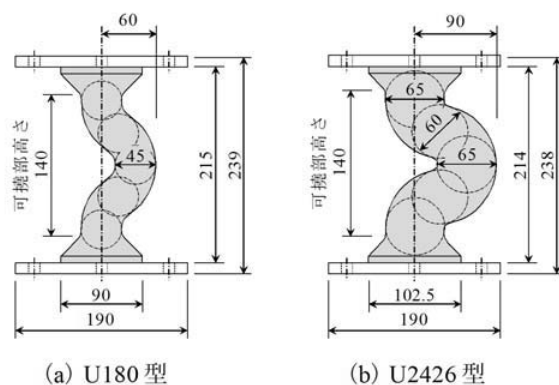


図1 試験体概要

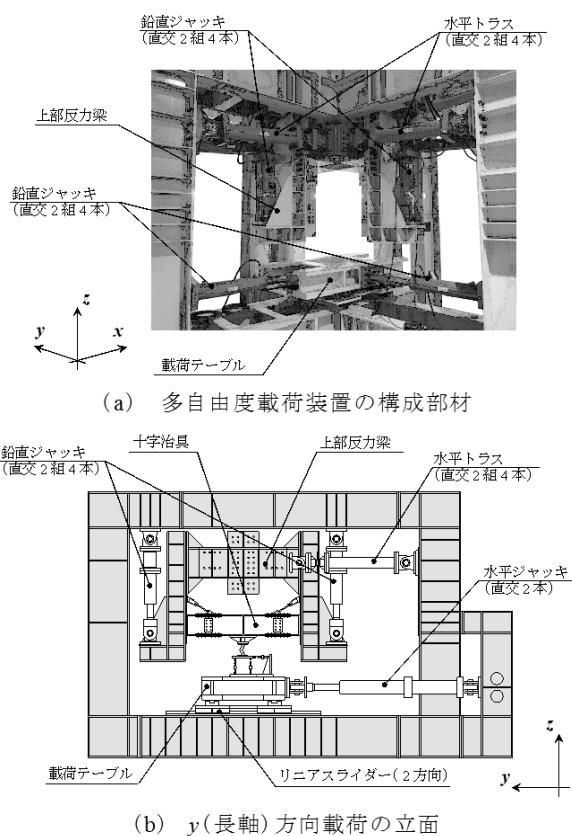


図2 多自由度载荷装置

ものである。試験体は载荷テーブルと上部反力梁の間に設置し、上部では直交2組4本の水平トラス部材によって水平2方向変位 δ_x 、 δ_y と回転 θ_z を固定するとともに、四方に配した鉛直ジャッキによって試験体の鉛直変位 δ_z と回転 θ_x 、 θ_y を制御する。

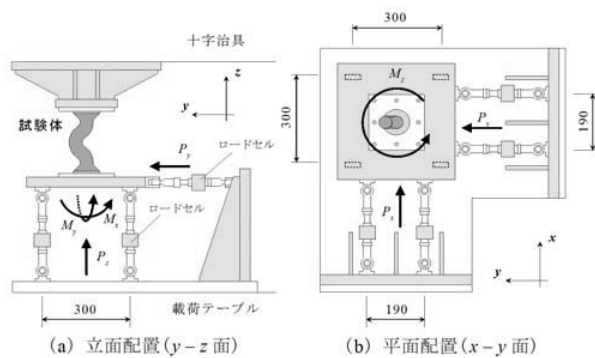


図3 試験体取り付け治具（計測計画）

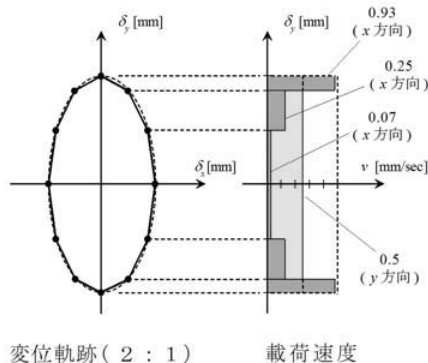


図4 楕円と12角形の軌跡比較、および荷重速度

本実験では、試験体上部の鉛直・水平変位と回転を固定した状態で水平2方向変形を与えて荷重を行った。また、大型装置においても縮小試験体に作用する応力をより精確に計測するため、図3に示す取り付け治具を介して試験体を荷重テーブルに固定した。取り付け治具は、ロードセルを組み込んだ複数の両端ピンのトラス部材によって支持され、水平・鉛直荷重 P_x 、 P_y 、 P_z 、および曲げモーメント M_x 、 M_y 、 M_z を計測できる。

2.3 水平2方向の荷重履歴

実験パラメータは、水平2方向の荷重履歴である。荷重履歴は、(I) 限界変形における直交方向変形の影響把握と、(II) 水平2方向変形下における繰り返し変形性能の評価法構築を目的とした2シリーズに大別される。(I) ではU180型とU2426型のそれぞれに対して長径半径を限界変形とした2:1の楕円荷重を行った。一方、(II) ではU2426型のみを対象として楕円率（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。なお、水平2方向の長径方向は、実験実績の多いP方向（湾曲方向）を基本とした。また、楕円荷重は、U字形鋼材ダンパー

に対して提案している標準荷重履歴²⁾に倣い、基本的に3周毎に回転方向を変えることとした。

鉛は荷重速度の影響が大きい材料であるが、本実験は油圧ジャッキを用いているため、荷重速度が最大1.0mm/sec以下の準静的荷重となっている。楕円軌跡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行った。また、(II)の実験では、油圧ジャッキによる荷重速度をなるべく一定に保つため、楕円にほぼ等しい12角形荷重を採用した。12角形と楕円の比較、および荷重速度を図4に例示する。

3 実験結果と考察

3.2 実験結果一覧と水平1方向荷重の結果概要

U2426型の実験結果一覧を表1に示す。本研究では既往の研究⁴⁾を参考に、鉛ダンパーのy切片荷重が、1サイクル目の50%にまで低下した時点を終局状態と定義し、そのときの破断回数を $0.5N_u$ とする。表中には試験体の断面が完全に破断したときの破断回数 N_u も併せて示している。試験体は、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～No.24）もあり、これらの試験体番号には下線を付している。また、実験は2期（シリーズA、B）に分けて行っており、シリーズBは表中の試験体番号の背景を塗りつぶしている。

表1 実験結果一覧（U2426型のみ）

	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 $0.5N_u$
水平1方向	1	200	-	-	P	6.25	6.25
	2	100	-	-	P	29.75	28.5
	3	50	-	-	P	115	91.5
	4	75	75	1:1	P	17.25	16
水平2方向	5	75	75	1:1	P	26.5	21
	6	50	50	1:1	P	36.75	31
	7	200	100	2:1	P	2.5	2.5
	8	200	100	2:1	P	3.5	3
	9	200	100	2:1	O	2.25	2.25
	10	150	75	2:1	P	4	4
	11	150	75	2:1	O	9	9
	12	100	50	2:1	P	7.5	7
	13	100	50	2:1	P	32.25	28
	14	100	50	2:1	O	37.25	29
	15	75	37.5	2:1	P	23.5	23.5
	16	75	37.5	2:1	O	48	39
	17	50	25	2:1	P	79	75.5
	18	200	66.7	3:1	P	3	3
	19	100	20	5:1	P	20.5	20
	20	75	37.5	2:1	P	26.75	19
	21	75	37.5	2:1	P, O	15	12
	22	50→100→150	25→50→75	2:1	P	33	24(12, 6, 6)
	23	100	50	2:1	P, O	10.5	9
	24	150→100→50	75→50→25	2:1	P	15.5	15.5(6, 3.5, 6)

※ No.20は回転方向を常に一定とし、No.21とNo.23では長径の向きを3サイクル毎に変更している。また、No.22とNo.24はそれぞれ漸増および漸減振幅である。

本研究では、まず既往の実験結果との対応を確認するため、水平1方向荷重を行っている。片振幅50mmでは紡錘型の復元力特性を示し、U2426型の限界変形である片振幅200mmでは限界変形の70%

程度から試験体可撓部の湾曲がなくなり、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、繰り返し変形に対して蝶型の復元力特性を示した。また、片振幅に対する破断回数 $0.5N_u$ の傾向は、既往の研究⁵⁾で提案されている疲労曲線 (I) 式) とよく対応することが確認できている。

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

ここで、 δ : 片振幅 (ただし、実大の 1/4 倍)

3.2 限界変形における直交方向変形の影響

まず、(I) 限界変形における直交方向変形の影響を考察する。(I) シリーズの水平 2 方向载荷における U2426 型の荷重-変形関係を図 5 に示す。図の縦軸は図 3 の取り付け治具により計測した水平荷重 P_x 、 P_y 、横軸は水平ジャッキのストローク値より換算した水平変形 δ_x 、 δ_y であり、1 サイクル目 (初期 1/4 サイクル部分を除く) を代表して示している。また、それぞれの履歴には水平 1 方向の履歴曲線を併せて示している。

長径 (y) 方向では水平 1 方向载荷に比べて耐力は僅かに低いだけであるが、短径 (x) 方向の耐力は水平 1 方向の半分以下にまで低下しており、水平 2 方向変形の影響が確認できる。また、U180 型と U2426 型の破断回数 $0.5N_u$ は、いずれも 2.5 サイクルであった。水平 1 方向の限界変形時の破断回数は、それぞれ 20.25、6.25 サイクルであったため、直交方向の変形による影響は長径方向の変形量によって異なると言える。ただし、限界変形と同時にその半分の変形を直交方向に受ける楕円軌跡に対して、鉛ダンパーは 2 サイクル以上の繰り返し変形に耐えうる性能を有していることが確認できたと言える。

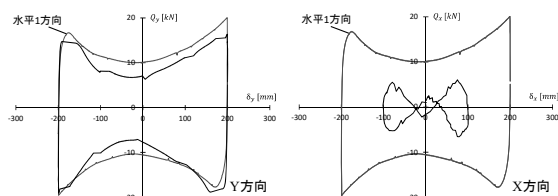


図 5 (I) シリーズの履歴挙動

3.3 水平 2 方向変形の影響

次いで、その他に行った水平 2 方向载荷の実験結果について述べる。200 : 100 の楕円履歴下における実験結果について、長径方向 (Y 方向) を代表して図 6 に示す。水平 1 方向载荷 (No.1) と楕円载荷 (No.8)

では、ピーク変形時における耐力にほとんど差はないが、短径方向が最大変形に近づく $\delta_y=0$ mm 付近では耐力の差が大きいことが分かる。また、200 : 100 の履歴を与えた全ての試験体は、水平 1 方向载荷のおおよそ半分のサイクル数で破断に至った。

100 : 50 の楕円履歴下における実験結果について、長径方向 (Y 方向) を代表して図 6 右に示す。履歴曲線はほぼ矩形のハードニングが小さい範囲であり、水平 1 方向 (No.2) と楕円载荷 (No.12、No.13) の耐力はほぼ等しいことが分かる。破断回数 $0.5N_u$ についてみると、No.12 は水平 1 方向载荷時の半分程度に低下しているが、No.13 ではほぼ同程度であった。また、75 : 37.5 や 50 : 25 など、長径方向の変形量が小さいほど、水平 1 方向载荷時の破断回数 $0.5N_u$ との差が小さく、水平 2 方向変形の影響が小さかった。

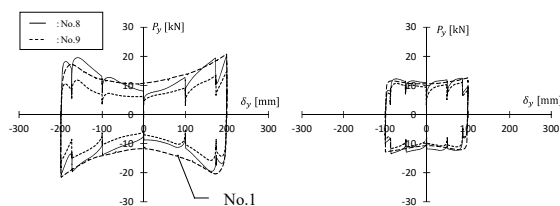


図 6 (II) シリーズの履歴挙動

3 水平 2 方向変形下における変形性能

最後に、本実験の結果を踏まえ、免震構造用鉛ダンパーを対象とした水平 2 方向変形下の繰り返し変形性能の評価方法を検討する。水平 2 方向変形下における破断回数 $0.5N_u$ と長径半径の関係を、楕円率 2 : 1 の場合を図 7 に、正円の場合を図 8 に示す。図中の破線は、U 字形鋼材ダンパーと同様の考え¹⁾に基づいた場合に、水平 2 方向変形下で想定される疲労曲線であり、次式より求める。すなわち、水平 2 方向の変位軌跡を x 方向と y 方向の変形成分に分離し、それぞれの振幅に応じた損傷度を加算したものを累積損傷度 D_2 として、これを水平 2 方向変形下における損傷指標とする考えである。

$$D_2 = \left(\frac{1}{xN_u} + \frac{1}{yN_u} \right) \cdot {}_{0.5}N_u \dots (2)$$

ここで、 xN_u 、 yN_u : それぞれの方向に分離した変位振幅に対する水平 1 方向载荷時の破断回数

図中には累積損傷度 $D_2=1.0$ 、および 0.4 を限界とした計算結果を示している。まず楕円率 2 : 1 の実験

結果についてみると、長径半径 100~200mm における破断回数は、試験体によって差が見られるものの、短径方向の変形による損傷度を単純に加算した累積損傷度 $D_2=1.0$ より小さく、 $D_2=0.4$ 程度まで繰り返し変形性能が低下している。一方、長径半径 50mm では、水平 1 方向変形下の疲労曲線との差は小さく、短径方向の変形を単純に加算した累積損傷度 $D_2=1.0$ とほぼ対応する。また、長径半径 75mm では $D_2=1.0$ と 0.4 の中間 (0.74) ほどまでに変形性能が低下している。したがって、水平 2 方向変形下の繰り返し変形性能に対しては、振幅が大きいほど、水平 2 方向変形による影響が大きい。

次いで、楕円率 1:1、すなわち正円軌跡の実験結果 (図 8) についてみると、半径 50mm、75mm では $D_2=1.0$ 程度 (具体的には 0.72、0.78) であることが分かる。本実験結果の範囲においては、正円軌跡においても繰り返し変形性能の低下は、楕円载荷と同程度であると言える。

以上より、鉛ダンパーの水平 2 方向変形下における繰り返し変形性能は、 x 方向と y 方向の損傷度を単純に加算した累積損傷度 D_2 を用い、長径半径 50mm (実大で 200mm) 以下では 1.0、長径半径 100mm (実大で 400mm) 以上では 0.4 を破断限界として設定すれば、おおよそ評価できると言える。

4 まとめ

本報では、免震構造用鉛ダンパーにおける水平 2 方向特性、特に繰り返し変形性能を把握するための実験を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- [1] 楕円率 2:1 の変位軌跡に対する耐力は、長径半径が 100mm (実大で 400mm) を超える範囲において、長径方向では水平 1 方向変形下と比べて原点近傍で特に低くなり、短径方向では終止半分以下となった。一方、長径半径が 100mm 以下であれば耐力は水平 1 方向変形下とほぼ等しい結果であった。
- [2] 限界変形と同時にその半分の変形を直交方向に受ける楕円軌跡に対しても、鉛ダンパーは 2 サイクル以上の繰り返し変形に耐えうる性能を有していることが確認できた。
- [3] 鉛ダンパーの水平 2 方向変形下における繰り返し変形性能について、 x 方向と y 方向の損傷度を単純に加算した累積損傷度 D_2 による限界値の設定による評価方法を示した。

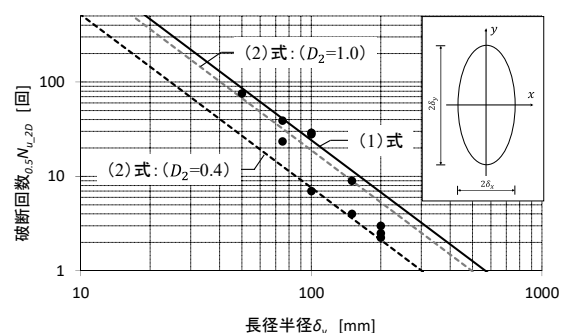


図 7 破断回数と長径半径の関係 (楕円率 2:1)

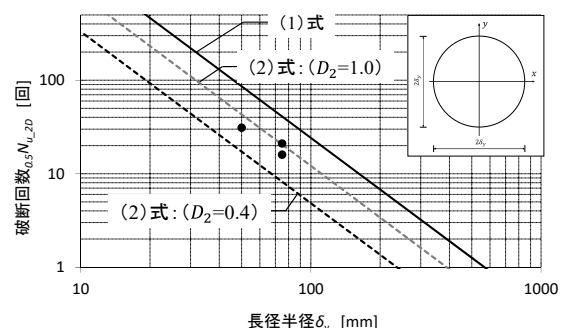


図 8 破断回数と長径半径の関係 (楕円率 1:1)

謝辞

実験計画の立案において、福岡大学 森田慶子先生、高山峯夫先生に貴重なご意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉敷祥一ほか: 免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの水平 2 方向特性 その 1、日本建築学会構造系論文集、第 77 巻 第 680 号、pp.1579-1588、2012.10
- 2) 山田 哲ほか: 免震構造用 U 型ダンパーの水平 2 方向载荷実験に用いる標準载荷履歴の提案、日本建築学会技術報告集、第 22 巻 第 50 号、pp.127-132、2016.2
- 3) 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
- 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、日本建築学会九州支部研究報告 第 42 号、pp.269-272、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、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2 分冊、pp.289-290、2010.9