免震構造用鉛ダンパーの実験的研究

—別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の評価について—

EXPERIMENTAL STUDY OF LEAD DAMPER FOR SEISMIC ISOLATION SYSTEM

Hysteresis model and repetition performance of lead damper

森田 慶子*, 高山 峯夫**

Keiko MORITA and Mineo TAKAYAMA

The lead material is used as an energy dissipation device. The pure lead shows the characteristics of which the yield stress is low and the ductility is very high. The U-shaped lead damper is a one of dampers for the seismic isolation system. The performance of U-shaped damper has been confirmed by the experiments using the full-scaled damper and the scaled model. It is difficult to decide the model of restoring force characteristics of the lead damper only from the lead material testing, because the yield condition receives the effect of the bending deformation. In this paper, the basic parameters, which are necessary for the modeling of the U-shaped damper, are specified based on the experimental results of damper and the lead material testing results.

Keywords : Seismic Isolation System, Lead Damper, Hysteresis Model, Energy Absorption

免震構造, 鉛ダンパー, 履歴モデル, エネルギー吸収

1. はじめに

鉛は、免震構造や制震構造において減衰材として利用されている。純度の高い鉛は、降伏応力度が低く、極めて延性に富んだ特性を示し、大変形領域で優れた繰返し塑性変形能力を発揮する。履歴特性は、矩形に近い形状となり、大きな減衰性能を持つことが期待できる。鉛は塑性変形により生じた結晶格子の欠陥が、常温での再結晶により解消されるという性質を持っており、ひずみが蓄積されることがない。また、鋼材ダンパーに比べて早期に降伏を促すことができ、比較的小変形時から減衰性能を発揮することも期待できる。常温で同じような性質を示す金属には、錫や金等があるが、建築部材として安価に供給できるものとしては鉛が最適である。

鉛を免震構造用減衰材として利用する場合、どのようにして鉛を固定しておいて、どのようにして地震のエネルギーを鉛に吸収させるかが問題になる。大きく分けると2種類に分類することができる。鉛を封緘して使用する方法(封緘型)と、鉛を鋼材ダンパーのように独立させて使用する方法(別置型)である。封緘型には、鉛押しダンパー(LED)や鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)がある。鉛押しダンパーは、鋼管の中に鉛を充填し、ピストンによって押された鉛がオリフィスを通過することによってエネルギーを吸収する機構となっている。鉛プラグ入り積層ゴム支承は、天然ゴム系積層ゴムアイソレータの中央部に鉛

プラグを封緘して鉛に地震エネルギーを吸収させている。いずれの場合も、地震時にその変形に追従させ、且つ、エネルギーを鉛に有効に吸収させるための工夫が凝らされている。封緘型は、意図した変形しか許容しないため、塑性変形中も鉛の形状がある程度保たれるという利点をもつ。しかし、これらの方法では鉛の形状に制限があり、エネルギー吸収の容量等を自由に変更できない欠点がある。一方、鉛を1つのダンパーとして独立させた別置型鉛ダンパーは、鉛材料を塑性域で繰返しせん断変形させることで、エネルギーの吸収を行なう機構となっており、任意の形状・寸法が選択可能であり、アイソレータとの組合せによって自由な設計が可能となる。

本論は別置型鉛ダンパーであるU型鉛ダンパーを取り扱う。U型鉛ダンパーについては、各種の実大実験及び縮小試験体を用いた実験によってその性能の確認を行ってきた^{12)ほか}。U型鉛ダンパーは大変形に対する追従能力を発揮させるために、可撓部直径(D)に対して高さ(H)が大きく、その復元力特性の降伏条件が、曲げの影響を受ける形状となっている。そのため、鉛材料の引張材料試験・せん断材料試験のみから、鉛ダンパーの復元力特性の数値化を行なうことは困難である。このため、本論は、現在までのU型鉛ダンパーの実験結果を集約し、材料試験結果との対比により、免震構造の設計に必要なモデル化のパラメータを特定する事を目的とする。

* 福岡大学工学部建築学科 助手

** 福岡大学工学部建築学科 助教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka University
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Fukuoka University, Dr. Eng.

2. 試験体及び実験概要

2.1 試験体

試験体は、別置型鉛ダンパーである U 型鉛ダンパーを用いる。試験体の概要を図 2.1、表 2.1 に示す。U 型鉛ダンパーは、円形断面を持ち、せん断変形を受けて自由に変形可能な部分(可撓部)と、この可撓部の変形能力を確保するための円錐状の補強部、更にダンパー取り付けのための鋼プレートにより構成されている。鉛部がせん断方向に変形することにより復元力特性を示し、地震のエネルギーを吸収する機構となっている。補強部の直径は可撓部直径の 2 倍で、鋼板と補強部との接合にはホモゲン溶着法を採用している。この接合法により、鉛と鋼板との境界での剥離を防止する事が可能となる¹²⁾。

試験体は実大と 1/4 縮小試験体の 2 種類である。

実大試験体では可撓部の高さ(一定として)直径を変化させ、直径が耐力に与える影響を検討した。U50, U75, U100, U250 は実建物には使用されておらず、U140 型は 5 棟の免震建物に使用されている。現在、U180 型が免震構造に多用されている。

1/4 縮小試験体を用いて、可撓部直径(D)と可撓部高さ(H)、U 字形に湾曲している可撓部に沿った長さ(L)を変化させ、形状が耐力や変形能力に与える影響を検討した。H18, H22, H26 試験体は、高さ H を一定にして直径 D を変化させた。S18, S22, S26 試験体は高さ H と直径 D を相似的に変化させた縮小試験体である。フランジ厚さは、相似的に形状を変化させた場合においても一定とした。可撓部長さ L は、 $L/H=1.18\sim 1.4$ の範囲で変化させた。H18 試験体は、U180 型ダンパーと同じプロポーシヨンの縮小試験体である。

変形を受けた鉛は発熱により回復および再結晶という過程をたどる。この回復、再結晶は試験体の不純物により強い影響を受ける。鉛合金を使った場合、純鉛以上の引張強度を示す³⁴⁾が、その反面、鉛の優れた延性が低下し、大変形での変形追随性が低下する。純度 99.99% 以上の純鉛であれば、そのような性能低下は見られない。ホモゲン溶着部の合金層を除いては、純鉛を使用している。従って、本研究結果は、純鉛を用いた鉛ダンパーに対して適用できるものと考えられる。

2.2 スケール効果

文献 12)~13)では、U 型鉛ダンパーの実大試験体と縮小試験体を用いた試験結果について比較を行なっている。実大試験体と縮小試験体の復元力特性は良く一致しており、1/4 縮小試験体で実大試験体の履歴特性をほぼ把握できることを確認している。

2.3 実験概要

2.3.1 材料試験

鉛の材料特性を把握するために、単調引張による材料試験を実施した。単調引張試験体は、純度 99.99% 以上の純鉛で、JIS Z2241 14A 号試験片に準ずるものを用いた。5, 10, 50, 200mm/min の 4 種類の载荷速度で引張試験を行ない、公称応力度-公称ひずみの関係を得た。

2.3.2 部材試験

材料試験の他に、鉛の軸方向の引張・圧縮に対する動的繰返し特性、及びせん断方向動的繰返し特性を確認する目的で、部材試験を実施した。図 2.2~図 2.3 に試験体概要を示す。直方体の鉛ブロック(鉛純度 99.99% 以上)を加力用の鋼板にホモゲン溶着している。接合部は変形

時の応力集中を緩和させるためにハンチを設けた形状となっている。

軸方向試験体は、一辺の長さが W の正方形断面で長さ L の形状を持った鉛ブロックである。W=75mm, 100mm, 150mm の 3 種とし、 $L/W=1\sim 4$ の範囲で変化させた。 $\pm 2\sim 20\%$ の引張・圧縮ひずみを 0.1Hz~2Hz の正弦波により繰返し加振を行い、公称応力度-公称ひずみの関係を得た。

せん断試験体は、 $t=25\text{mm}, 50\text{mm}, 100\text{mm}$ の 3 種とし、 $L/t=2\sim 8$ の範囲で変化させた。奥行きは 100mm である。 $\pm 4\sim 40\%$ のせん断ひずみを 0.1Hz~1Hz の正弦波により繰返し加振を行い、公称応力度-公称ひずみの関係を得た。

2.3.3 U 型鉛ダンパーのせん断繰返し試験

地震時のダンパーの復元力特性を把握する目的で、ダンパーにせん断変形を与える。基本的载荷は正弦波による繰返し加振とし、周波数 0.01Hz~2Hz の範囲で加振した。

U 型試験体の場合、加力方向により復元力特性に若干差が出る。加力方向の違いによる履歴特性の変化を検討するために、試験体の屈曲部が加振方向に平行な場合(P 方向)と、直交している場合(O 方向)の 2 通りの加力を行なっている。(図 2.1)

実大試験体では可撓部の高さと長さを一定とし、直径を変化させることによって、耐力に与える影響を把握するための試験を行なった。また、U180 型鉛ダンパーを用いて、限界性能を把握する為に静的・

図 2.1 試験体概要

表 2.1 試験体概要

試験体	直径 D (mm)	可撓部高さ H (mm)	可撓部長さ L (mm)	L/H
実大	U50	50	660	1.18
	U75	75		
	U100	100		
	U140*	140		
	U180*	180		
	U250	250		
1/4 縮小	H18	45	165	1.18
	H22	55	182	1.3
	H26	65	196	1.4
	S18	45	196	1.4
	S22	55	221	1.3
	S26	65	248	1.24

*実建物に使用されている鉛ダンパー

図 2.2 軸方向加力試験体

図 2.3 せん断試験体

図 3.1 U型鉛ダンパーの復元力特性の概要

動的大変形試験、及び破断までの動的繰返し試験を行なった。

1/4 縮小試験体では、形状が与える影響を検討するために、可撓部直径(D)と可撓部高さ(H)、可撓部長さ(L)を変化させ、正弦波による動的加振を行なった。試験結果から、免震構造の設計に必要な復元力特性を定義し、実大試験体との比較を行なった。

3. U型鉛ダンパーの復元力特性の概要

図 3.1 に U 型鉛ダンパーの復元力特性の概要を示す。図中の矢印は変形経路を示す。U 型鉛ダンパーの復元力特性は、定常波加振における小変形領域と大変形領域とで分類する。

小変形領域で定常波加振を行なった場合、鉛ダンパーの軸方向変形は小さいため、復元力特性は剛塑性に近い形状を示す。鉛は加工前の弾性限が加工後の弾性限より低い値を示すため、まず低い耐力で降伏する。以降、復元力特性の y 切片荷重は経験した振幅に伴って変化する。振幅が漸増すると y 切片荷重も漸増する。ある一定の振幅に達した後は、y 切片荷重は最大値 Q_e を示し、更に振幅が大きくなっても y 切片荷重はほぼ一定の値を示す。この変位振幅を本論では最大降伏荷重変位 δ_e と呼称し、最大降伏荷重変位 δ_e の加振振幅から得られる復元力特性の y 切片荷重の最大値 Q_e を U 型鉛ダンパーの降伏耐力と定義する。

最大降伏荷重変位 δ_e を超えた振幅領域を大変形領域とする。大変形領域では鉛ダンパーに軸方向の変形が現れ始めるため、塑性後の勾配はハードニングを示し始める。

履歴曲線をモデル化する際の剛性は、初期剛性 K_1 、降伏後の剛性 K_2 、ハードニング領域の剛性 K_3 の 3 種類とする。実験から得られる降伏後の剛性 K_2 は初期剛性 K_1 と比較すると、極めて小さな値となり、その復元力特性は完全弾塑性型の bi-linear 型と見なすことができる。 $(K_2 \approx 0)$

鉛は加工前の弾性限が加工後の弾性限より低い値を示す。加工前の降伏荷重を $\beta \cdot Q_e$ で表し、下式の関係で示す。

$$\beta \cdot Q_e = K_1 \cdot \delta_{y1} = K_1 \cdot \gamma_{y1} \cdot H \quad (3.1)$$

$$Q_e = K_1 \cdot \delta_{y2} = K_1 \cdot \gamma_{y2} \cdot H \quad (3.2)$$

$\beta, \gamma_{y1}, \gamma_{y2}$: 実験より得られる係数

H : 鉛ダンパーの可撓部高さ

Q_e : 鉛ダンパーの降伏耐力

表 4.1 載荷速度と最大応力度

載荷速度 (mm/min)	平均歪み速度 (1/sec)	最大公称応力度 (N/mm ²)
5	0.000775	12.0
10	0.001550	12.9
50	0.00775	13.9
200	0.03100	15.4

図 4.1 単調引張試験による応力度と歪みの関係

δ_{y1} を初期降伏変位、 δ_{y2} を降伏変位と定義する。降伏変位 δ_{y2} は、図中灰色線のように初期剛性 K_1 を原点から延ばし、降伏耐力 Q_e の交点から求める。初期降伏変位 δ_{y1} は初期剛性 K_1 と加工前の降伏荷重 $\beta \cdot Q_e$ の交点から求める。最大降伏荷重変位 δ_e は、(3.3)式で示す。

$$\delta_e = \gamma_e \cdot H \quad (3.3)$$

γ_e : 実験より得られる係数

変形が最大降伏荷重変位 δ_e を超えた場合には、その復元力特性は次第にハードニングを呈し始める。実験より得られる結果より、大変形領域で示されるハードニングは、(3.4)式で示される。

$$K_3 = \gamma_k \cdot K_1 \quad (3.4)$$

γ_k : 実験より得られる係数

部材試験から得られる復元力特性の概要もほぼ同様に説明することができる。但し、最大降伏荷重変位 δ_e を超えた場合には、復元力特性はハードニングではなくソフトニングを示し始める傾向がある。

4. 材料試験及び部材試験結果

4.1 単調引張試験

表 4.1、図 4.1 に、引張速度を 5～200mm/min (平均ひずみ速度 0.000775～0.03100/sec) の範囲で変化させた場合の単調引張試験結果を示す。

鉛は、ひずみ速度によって引張強さが変化する。一般にひずみ速度が大きくなると引張強さは大きくなる傾向を有する。局部収縮が始まると、その部分のひずみ速度が増加するため変形抵抗が増して変形しにくくなる。変形はひずみ速度の低い隣接部へ移ってゆき、変形を一様化させる傾向がある¹⁰⁾。この特徴により、局部収縮の進行が遅れるので、応力度-ひずみ曲線において引張速度が大きくなるほど最大応力度を示すひずみが大きくなる傾向を示す³⁾。本試験結果においても同様の傾向を示しており、ひずみ 20～40% の範囲で、12.0～15.4N/mm² の最大公称応力度が示されている。

4.2 軸方向動的繰返し試験

図 4.2 に $L/W=3$ の試験体の応力度-ひずみ曲線を示す。加振内容は $0.1\text{Hz} \pm 2\%$, $0.5\text{Hz} \pm 5\%$ の場合である。軸方向の繰返し载荷に対して、bi-linear 型の安定した履歴を示している。引張、圧縮共にほぼ同じ応力度を示しており、試験を行なった加振振幅 $\pm 20\%$ までのひずみの範囲では鉛が等方硬化の性質を有することを確認した。履歴曲線は、試験体の形状係数 L/W にかかわらずほぼ同じ形状を示す。

図 4.3 に最大応力度と加振振幅の関係を示す。横軸は、正弦波加振の加振振幅をひずみで示し、縦軸は応力度-ひずみ曲線の y 切片での応力度の平均値 ($\sigma_n = (\sigma^+ + \sigma^-)/2$) とする。単調引張载荷と異なり、動的に繰返し载荷を与えたために、 y 切片での応力度は加振振幅が $\pm 5 \sim 10\%$ の時に最大値を示している。形状係数 L/W が大きくなるほど、 y 切片の応力度は小さくなる傾向が見られる。加振ひずみ振幅 $\pm 10\%$ における応力度の平均値 $\bar{\sigma}_n$ は、 L/W が 2 以下の場合 19.1N/mm^2 、 L/W が 3 以上の場合 16.8N/mm^2 であった。単調引張試験結果と比較すると、応力度は大きめの値を示している。軸方向加振では正弦波による動的繰返し加振であり、更に単調引張試験の 2 倍以上の平均ひずみ速度で加振を行なっている為、ひずみ速度に比例した応力度を示していると考えられる。

4.3 セン断動的繰返し試験

図 4.4 に $L/t=2$ の試験体の応力度-ひずみ曲線を示す。図 4.4(a) に $0.1\text{Hz} \pm 3\%$, $\pm 8\%$ の場合の応力度-ひずみ曲線を示す。復元力特性は、せん断方向の繰返し载荷に対して bi-linear 型の安定した履歴を示している。鉛は加工前の弾性限は、加工後の弾性限より低い値を示す性質を持つ。加振振幅 $\pm 3\%$ の応力度-ひずみ曲線には、加工前の降伏応力度が示されている。加振振幅にかかわらず、初期勾配は同じ傾きを示している。

図 4.4(b) に、ひずみ振幅 $\pm 3\%$ の初期降伏の部分と $\pm 8\%$ の降伏耐力 Q_e から算出して得られる応力度 τ_e を示す。試験結果より得られた初期勾配を τ_e まで延長し灰色線で示す。 $\pm 3\%$ 加振において、最初に降伏しているひずみは 0.35% で、この点を初期せん断降伏ひずみとし、初期勾配と $\pm 8\%$ ひずみの履歴曲線が交わる 0.85% をせん断降伏ひずみとする。(3.1)~(3.2)式を用いて復元力特性の概要を表せば、実験より得られる係数 β , γ_{y1} , γ_{y2} は、 $\beta=0.4145$, $\gamma_{y1}=0.0035$, $\gamma_{y2}=0.0085$ となる。

図 4.5 に最大応力度と加振振幅の関係を示す。横軸は、正弦波加振の加振振幅をひずみで示し、縦軸は応力度-ひずみ曲線の y 切片での応力度の平均値 ($\tau_n = (\tau^+ + \tau^-)/2$) とする。図中には回帰曲線も示す。 10% のせん断ひずみで 9.55N/mm^2 のせん断応力度が示されている。相当応力度を $\sqrt{3}$ 倍することで求めれば、 16.54N/mm^2 となり、低めの値であるが、軸方向部材試験の結果とほぼ同じ値を示している。

5. U 型鉛ダンパーの実験結果

5.1 復元力特性

図 5.1 に U180 型鉛ダンパーの基本的な復元力特性を示す。いずれも bi-linear 型に近い形状を示している。加振振幅が大きくなるにつれて y 切片での荷重値が増加している。

図 5.2 に $1/4$ 縮小試験体のせん断力比と部材角の関係を示す。せん断力比は、降伏耐力 Q_e で基準化したものである。 0.1Hz の漸増载荷を

図 4.2 軸方向加力による応力度と歪みの関係 ($L/W=3$)

図 4.3 軸方向加力による応力度と加振振幅の関係

図 4.4 セン断応力度とせん断歪みの関係 ($0.1\text{Hz} \pm 3\%$, $\pm 8\%$)

図 4.5 応力度とせん断歪みの関係

図 5.1 U180 型鉛ダンパーの復元力特性 (0.33Hz)

行なった場合の復元力特性を灰色線で示し、5.2～5.3 項で説明する初期剛性 K_1 、降伏後の剛性 K_2 、ハードニング領域の剛性 K_3 もあわせて示す。小振幅領域の復元力特性は、部材角の増大に伴って、せん断力比も大きくなっている。部材角 $\delta/H=0.27$ 程度を超えたあたりから、 y 切片のせん断力比はほぼ一定値を示す傾向が見られる。本論では、せん断力比が一定値を示し始める部材角 $\delta/H=0.27$ の復元力特性から決定した y 切片荷重を U 型鉛ダンパーの降伏耐力 Q_e と定義し、この Q_e を bi-linear 型にモデル化する際の降伏荷重の基準とする。従って、(3.3)式を用いて復元力特性の概要を示せば、実験より得られる係数 γ_e は、 $\gamma_e=0.27$ となる。U180 型鉛ダンパーの場合、最大降伏荷重変位 δ_e は 15cm となる。

図 5.2 1/4 縮小試験体 (H18) のせん断力と部材角の関係 (0.1Hz)

5.2 降伏耐力と降伏応力度

U 型鉛ダンパーの降伏応力度を決定する場合、可撓部直径 (D) に対して高さ (H) が大きく、曲げの影響を受ける形状となっているために、単純にせん断応力度として算出することはできない。また、鉛材が既に塑性領域に入っているために、鉛ダンパーの降伏耐力の評価については、厳密には弾性理論は適用できない。しかし、試験結果を理解する上で有効であると考えられるため、弾性論に基づいて鉛ダンパーを両端固定の曲げ部材と考え、U 型鉛ダンパーのせん断実験から得られる降伏耐力と降伏応力度を対応づける。

$$P_y = \frac{2Z_p \sigma_y}{H} = \frac{D^3 \sigma_y}{3 \cdot H} \quad (5.1)$$

ここで、 P_y : 降伏耐力 (N),

Z_p : 円形断面の塑性断面係数 (mm^3) ($Z_p = D^3/6$),

σ_y : 実験から得られる降伏応力度 (N/mm^2)

H : 可撓部高さ (mm), D : 可撓部直径 (mm)

(5.1)式より、鉛ダンパーの降伏耐力は可撓部直径の 3 乗にほぼ比例し、可撓部高さに反比例する事が分かる。鉛ダンパーの降伏耐力を変化させる為には、直径 D と高さ H を変化させることで実現できる。降伏応力度は材料によってほぼ決定される値である。従って、降伏耐力を高くするためには、鉛ダンパーの可撓部直径 D のみを大きくするのが効果的である。また、bi-linear 型の履歴特性を損なわずに変形能力を増大させるためには可撓部の長さ L を大きくする方法が有効である。可撓部の直径 D と高さ H を相似的に拡大させて、実質的に長さ L を

(a) 1/4 縮小試験体

(b) 実大試験体

図 5.3 鉛ダンパーの降伏応力度と部材角の関係

図 5.4 U 型ダンパーの直径と降伏耐力

拡大させれば、降伏耐力と変形能力を同時に増加させる事が可能である事が分かる。

1/4 縮小試験体を用いて、可撓部直径(D)と可撓部高さ(H), U 字形に湾曲している可撓部に沿った長さ(L)を変化させ、形状が耐力や変形能力に与える影響を検討している。(5.1)式を用いて算出した 1/4 縮小試験体の降伏応力度 σ_y と部材角 δ/H の関係を図 5.3(a)に示す。降伏応力度は試験体の種類に関係なく、部材角 δ/H に伴って変化している。部材角 δ/H が 0.27 より小さい場合には部材角の増加に伴って、降伏応力度が増大している。部材角 $\delta/H = 0.27$ を越えると、降伏応力度がほぼ一定の値を示している。部材角 $\delta/H \geq 0.27$ の範囲の降伏応力度の平均 $\bar{\sigma}_y$ は、27.8N/mm²である。

(5.1)式に基づいて算出した実大 U180 型ダンパーの降伏応力度と部材角 δ/H の関係を図 5.3(b)に示す。1/4 縮小試験体の結果と同様に、降伏応力度は部材角 δ/H に伴って変化している。図中には 1/4 縮小試験体の実験結果から得られた降伏応力度の平均値 $\bar{\sigma}_y = 27.8\text{N/mm}^2$ の値も示す。実大試験体の降伏応力度と $\bar{\sigma}_y$ は $\delta/H \geq 0.27$ の範囲で良く一致している。

図 5.4 に(5.1)式より求めた降伏耐力と、実大 U 型鉛ダンパーの降伏耐力⁹⁾の比較を示す。(5.1)式は、実験結果と良く対応している。ダンパーの降伏耐力をモデル化するには、可撓部長さと高さの比 $L/H = 1.18 \sim 1.4$ の範囲であれば、降伏応力度の平均値 $\bar{\sigma}_y = 27.8\text{N/mm}^2$ と(5.1)式を用いて推定することができると考える。

5.3 弾性剛性

鉛ダンパーの初期剛性(弾性剛性) K_1 は剛な値を示し、履歴の初期剛

図 5.5 静的試験・動的試験の履歴曲線の比較

性から算出するのは困難である。そのため、履歴の戻り勾配より算出する方法を採用する。鉛ダンパーのせん断弾性係数は次式で示すことができる。

$$G = \frac{K_1 \cdot H}{A} \quad (5.2)$$

ここで、 A : 可撓部断面積 (mm²),

G : U 型鉛ダンパーのせん断弾性係数 (N/mm²),

H : 可撓部高さ (mm)

実大試験体の定常波加振の試験結果より、(5.2)式を用いて求めた U 型鉛ダンパーのせん断弾性係数 G は、 $G = 330 \sim 453\text{N/mm}^2$ の範囲となった。平均値 $\bar{G} = 376\text{N/mm}^2$ である。

降伏変位を初期剛性 K_1 と降伏耐力 Q_e から算出し、(3.2)式を用いて示せば、平均値は $0.0096H$ (0.96%)となる。せん断方向の部材試験から得られたせん断降伏ひずみとほぼ同じ値を示している。微小変位の範囲では曲げの影響が少なく、純せん断の試験結果と同等の性質を示すものと考えられる。

5.4 塑性域の剛性

小振幅領域の鉛ダンパーの復元力特性は完全弾塑性型でモデル化できると考えるが、ここでは実験より得られた勾配がどのくらいであるかを示す。降伏後の剛性 K_2 は、その大部分が軸方向変形によるものと考えられる。従って、ダンパーの軸方向剛性が履歴曲線の勾配 K_2 に等しいと考えれば、(5.2)式と同様に

図 5.6 繰返し加力試験 (U180 型 0.33Hz 15cm)

図 5.7 サイクル数とエネルギー吸収量 図 5.8 サイクル数と降伏耐力比

図 5.9 破断までの繰返し回数と部材角

$$K_2 = \frac{E_p A}{H} \quad (5.3)$$

ここで A : 可撓部断面積 (mm^2),
 E_p : 軸方向変形時の弾性係数 (N/mm^2)

と示すことができる。小振幅領域で U180 型鉛ダンパーの動的加力実験結果から得られた剛性 K_2 を用いて算出した E_p は、 $E_p = 0.53 \sim 1.06 \text{N/mm}^2$ の範囲となり、平均値は $\bar{E}_p = 0.822 \text{N/mm}^2$ となった。

ハードニング領域の剛性 K_3 は、(3.4)式を用いて示す。U180 型鉛ダンパー動的加力実験結果から得られる係数 γ_k の平均値は、 $\gamma_k = 0.0015$ となった。

5.5 最大変形能力

図 5.5 に U180 型試験体の静的及び動的大変形試験結果を部材角 δ/H とせん断力比の関係で示す。せん断力比は、降伏耐力 Q_e で基準化したものである。せん断力比は、静的試験の結果より動的試験の結果の方が大きな値を示している。これは、耐力のひずみ速度依存性の影響が表れる範囲で比較したためである。部材角 $\delta/H \geq 0.27$ の範囲で静的と動的のせん断力比は、ほぼ同じ勾配で上昇している。

U 型試験体の最大変形能力を、限界変位と破断変位で定義する。最大応力度(最大耐力)に達したときの変位を限界変位とし、鉛軸部に絞りが発生して破断に至った変位を破断変位とする。静的試験結果から、限界変位は部材角 $\delta/H = 1.16 \sim 1.25$ の範囲であると判断できる。このときの試験体可撓部の伸びは 30%程度と推定され、単調引張試験結果において最大応力度を示す伸び量とほぼ対応する結果が得られた。

動的に加振した場合は、速度依存性の影響で応力度の大きさに違いが現れる。単調引張試験で示した様に、引張速度が大きくなるほど最大応力度を示すひずみが大きくなる傾向があるため、限界変位は静的試験の結果から決定できると考える。静的試験から得られた限界変位は部材角 $\delta/H = 1.16 \sim 1.25$ であることから、多少安全を見込んで $\delta/L = 1$ (L : 可撓部長さ)となる部材角 δ/H を限界変位とする。表 2.1 より、 $L/H = 1.18$ の U180 型鉛ダンパーは、部材角 $\delta/H = 1.18$ である 660mm 程度が限界変位となる。

実大試験体を用いた場合の破断変位は正確には確認できていないが、大変形試験時における U180 型鉛ダンパーの復元力特性と目視による観察により、部材角 $\delta/H = 1.42$ 以上であろうと判断している。1/4 縮小試験体を用いた静的大変形試験では、部材角 $\delta/H = 1.45$ でほぼ破断したためである。しかし、実大 U180 型を用いて 900mm ($\delta/H = 1.6$) までの静的載荷を行なった場合でも、破断には至っておらず¹³⁾、この値には多少余裕があると考えられる。

5.6 部材角と破断までの繰返し回数

鉛ダンパーは、鉛の融点が低いために、通常の使用温度では簡単に疲労しない。変形中やその後に、鉛は、復元、再結晶、組織形成を起こし、疲労を蓄積させることはない。しかし、地震の際に履歴吸収されたエネルギーは即座に熱に変換される。このため、連続した加振が行なわれた際の鉛ダンパーの累積エネルギー吸収能力を把握しておく必要がある。連続加振に対する評価は定常波加振の繰返し実験結果を用いて行なう。

図 5.6 に U180 型鉛ダンパーの繰返し加振を行なった場合の履歴曲

線を示す。P 方向に $0.33\text{Hz} \pm 15\text{cm}$ を 150 サイクル加振したものである。加振を繰り返す毎に耐力が低下している。

図 5.7 に U180 型鉛ダンパーの累積ひずみエネルギーとサイクル数の関係を示す。 $0.33\text{Hz} \pm 15\text{cm}$ を 150 サイクル加振したものである。実験結果より得られる履歴面積をひずみエネルギーとして評価している。鉛ダンパーはサイクル数の増加に伴って、安定したエネルギー吸収性状を示している。

図 5.8 に降伏耐力比とサイクル数の関係を示す。降伏耐力は 3 サイクル目の耐力で基準化した。定振幅加力の耐力は初期の段階で最大値を示し、その後加振を繰り返す毎に徐々に低下しているのが分る。150 サイクルの繰返し加振に対しても、鉛は完全に破断には至っていない。ここでは、完全に破断に至らなかった場合でも基準降伏耐力の 1/2 に達した時点を破断と仮定する。降伏耐力が基準降伏耐力の 1/2 となった場合、繰返し加振試験後の計測により、ひずみの集中する部分の表面温度が 100°C 近くまで上昇していることを確認している。ひずみが集中する部分の内部中心温度を推定した場合、 200°C 以上に上昇していることが見込まれる⁷⁾⁸⁾ため基準降伏耐力の 1/2 で破断に至ったと仮定する。

図 5.9 に、U 型鉛ダンパーの破断までの繰返し回数と部材角 δ/H の関係を示す。鉛ダンパーが破壊に至るまでに耐えうる繰返し回数は、鋼製履歴ダンパーと同様に、応力度が増大するに従い、低下する。地震時において、ダンパーに要求されるエネルギー吸収能力は、累積ひずみエネルギー W_p として示すことができ、ダンパーの弾性挙動を無視すると次式で表すことができる⁹⁾。

$$W_p \geq 8 \cdot Q_e \cdot \delta_{\max} \quad (5.4)$$

ここで、 Q_e : ダンパーの降伏耐力、
 $\delta_{\max}$: ダンパーの最大変形

(5.4)式は、ダンパーに要求される吸収エネルギーが地震時の最大変形を振幅とする閉ループの 2 サイクル分以上であることを示している。同図より得られる繰返し回数からは、部材角 $\delta/H = 1.0$ の場合でも 12 回まで繰返しに耐えうることが示されており、充分なエネルギー吸収能力を保有していることが分かる。

図 5.9 に示される結果より、部材角 δ/H の加振レベルに対してダンパーは N_x 回の繰返し能力を持つとする。 m 回の繰返しを与えることによりダンパーのエネルギー吸収能力の m/N_x を消費すると仮定する。U180 型鉛ダンパーにおいて、加振振幅 $\delta = 560\text{mm}$ にあたる $\delta/H = 1$ の場合で、12 サイクル程度の繰返しに耐えることが期待できる。 $\delta/H = 1.0$ の振幅レベル($N_x = 12$)が 1 回、 $\delta/H = 0.6$ ($N_x = 32$)が 2 回、 $\delta/H = 0.27$ ($N_x = 148$)が 3 回、 $\delta/H = 0.1$ ($N_x = 991$)が 10 回含まれるような地震波を鉛ダンパーが経験したとする。このとき鉛ダンパーは、エネルギー吸収能力の $1/12 + 2/32 + 3/148 + 10/991 = 0.18$ を消費することになり、このような地震波であれば連続 5 回程度の繰返しに耐えられることとなる。

6. まとめ

別置型鉛ダンパーである U 型鉛ダンパーの試験を総合することにより、下記の知見を得た。

1. 鉛ダンパーの降伏耐力を、(5.1)式に基づいて求めることができる

ことを示した。

2. 新しい形状のダンパーのモデル化の際には、可撓部長さ L が $L/H = 1.18 \sim 1.4$ の範囲であれば、(5.1)式と降伏応力度の平均 $\bar{\sigma}_y = 27.8 \text{ N/mm}^2$ を用いて降伏耐力を推定することができる。
3. 鉛ダンパーの復元力特性は、初期剛性 K_1 、降伏後の剛性 K_2 、ハーディング領域の剛性 K_3 の3種類で示すことができる。それぞれの関係は、(3.1)～(3.4)式で表されることを示した。
4. 部材試験から得られた結果は、10%ひずみ時の軸方向部材試験の応力度 $16.8 \sim 19.1 \text{ N/mm}^2$ とせん断部材試験の相当応力度がほぼ対応することを確認した。
5. 鉛ダンパーの降伏ひずみは、微小変位の範囲では曲げの影響が少ないため、純せん断の部材試験結果とほぼ同じ結果を示した。U180 型鉛ダンパーの平均値は可撓部の高さの 0.96% である。
6. 最大応力度(最大耐力)に達したときの変位を限界変位と仮定した場合、静的に加振した場合の試験結果から、限界変位は部材角 $\delta/H = 1.16 \sim 1.25$ の範囲と判断できる。このときの試験体可撓部の伸びは 30% 程度と推定され、単調引張試験結果において最大応力度を示す伸び量とほぼ対応する結果が得られた。
7. 破断までの繰返し回数と部材角 δ/H の関係から、U 型鉛ダンパーは十分なエネルギー吸収能力を保有していることを示した。

参考文献

- 1) 宮崎義隆, 川端六郎 : 鉄鋼材に対する鉛溶着機構, 溶接学会誌, 第 29 巻, 第 8 号, pp.629-632, 1960.8
- 2) 柏木栄介 : 鉛ダンパーのホモゲン溶着部強度確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp.655-656, 2001.9
- 3) 小野健二 : 鉛及鉛合金, 山海堂, 1942.
- 4) 柏木栄介他 : 鉛ダンパー合金接合法の開発(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp.517-518, 2002.8
- 5) 森田慶子, 柏木栄介他 : 鉛ダンパーの大型化に関する実験研究(その 1)～(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp.669-672, 1999.9
- 6) 森田慶子, 高山峯夫他 : U 型鉛ダンパーの降伏耐力に関する考察(その 1)～(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2 構造 II, pp.729-732, 1996.9
- 7) Mineo Takayama 他 : A Practical Study of Lead Damper for Base Isolation System (Part 2), 福岡大学工学集報, 第 45 号, pp.97-118, 1990.9
- 8) J.A. Bailey et al. : Effect of Strain Rate and Temperature on the Resistance to Deformation of Aluminium, Two Aluminium Alloys, and Lead, Journal of the Institute of Metals, Vol.92, pp.404-408, 1963-1964
- 9) 秋山宏 : エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.
- 10) 鉛ハンドブック 改訂版, 日本鉛亜鉛需要研究会, 1992.
- 11) W.H. Robinson : Lead-Rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures During Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp.593-604, 1982.
- 12) 高山峯夫他 : 鉛ダンパーのエネルギー吸収能力に関する実大実験(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, pp.727-728, 1996.9
- 13) 岡本修司他 : U180 型鉛ダンパーの履歴特性に関する研究(その 1)～(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, pp.675-677, 2000.9
- 14) 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

(2002年12月10日原稿受理, 2003年5月9日採用決定)