

## 付録 FEM 解析による鉛ダンパーの内部ひずみ分布の把握

U型鉛ダンパーの形状をパラメータとした縮小試験体による加振試験については文献1)で報告している。この結果、可撓部の直径と高さを変化させることで降伏耐力と変形能力を調整できることを確認した。しかし、ダンパー内部のひずみ分布についてはひずみゲージがその変形に追従できないこともあり、実験的には確認できていない。そこで、鉛ダンパー内部のひずみ分布を把握するために、有限要素法による解析を行った。

解析に用いる鉛の材料特性のモデル化は、通常、静的単純引張試験の結果に基づいて行われる。しかし、鉛の場合にひずみ速度依存性が顕著であるために、動的試験から得られた降伏応力度を用いることで動的の挙動を解析的に再現できることを示す。

解析によって得られた復元力特性は実験値と良い対応を示した。また、解析から得られた塑性ひずみ分布と、実際に加振した場合の鉛ダンパーの温度上昇箇所は良く対応しており、解析と実験の現象が一致すると判断された。本章では、解析結果を用いて鉛ダンパーの内部ひずみ分布について明らかにする。

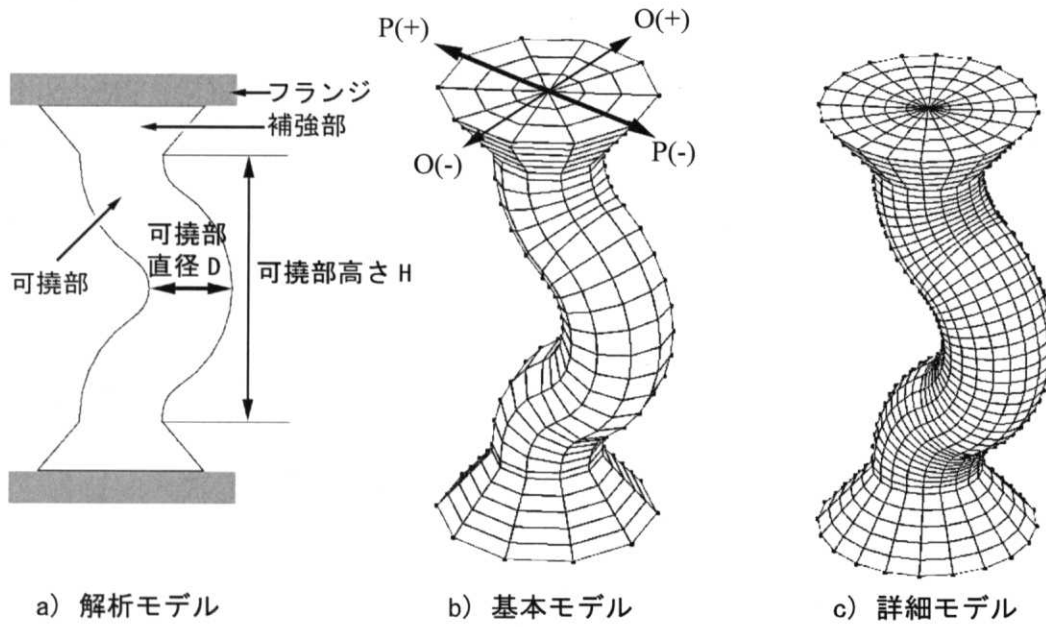
### 1. 解析方法

解析の対象としたのは、文献1)で示した縮小試験体による加振試験結果である。水平振動による慣性力の影響は無視できると考え、非線形構造解析用コード MARC (K7.2)を使用し、3次元弾塑性静的応力解析を行った。

#### 1.1 解析モデル

付図1に解析モデルを示す。解析モデルは可撓部の幅を $D(\text{mm})$ 、可撓部の高さを $H(\text{mm})$ 、可撓部の円弧と角度 $\theta(\text{度})$ とし、3次元立体モデルとする。実験を行った試験体は、付表1に示すような実大の1/4縮小試験体である。可撓部の高さ $H$ を一定とし直径 $D$ のみを変化させたもの(Hシリーズ)、可撓部の直径 $D$ と、高さ $H$ を相似的に変化させたもの(Sシリーズ)の計6種類である。可撓部長さは、S字に湾曲した部分の軸の中心の長さを示す。H18は、現在実際の建物に使用されているU180鉛ダンパーと同じプロポーションである。付写真1に各試験体の外観を示す。解析モデルは、実験で用いた試験体に対応するようにHシリーズとSシリーズの2種類を作成した。

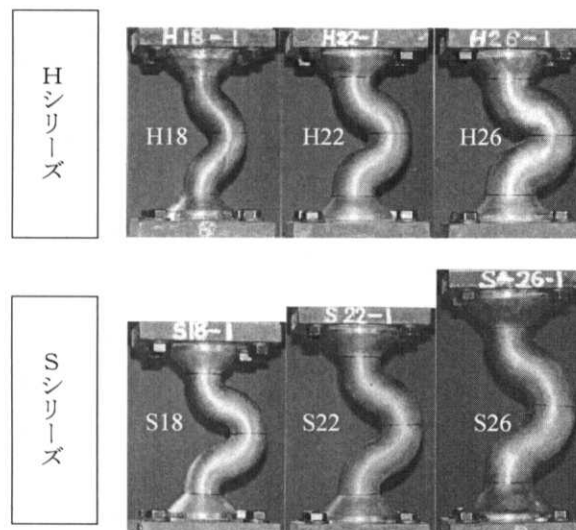
解析では、鉛で構成されている可撓部と補強部のみをモデル化し、鋼製のフランジ部分はモデル化を行っていない。解析には付図b) c)に示す基本モデルと詳細モデルを用いた。基本モデルは円周方向に10分割、直径方向に3分割、高さ方向に20分割し、詳細モデルは円周方向に20分割、直径方向に6分割、高さ方向に40分割した。全要素数は、基本モデルで960、詳細モデルで5401である。



付図1 解析モデル

付表1 試験体概要 (1/4 縮小試験体)

試験体	直径 $D$ (mm)	可撓部高さ $H$ (mm)	可撓部長さ $L$ (mm)	$L/H$
H18	45	140	165	1.18
H22	55		182	1.3
H26	65		196	1.4
S18	45	140	196	1.4
S22	55	170	221	1.3
S26	65	200	248	1.24



付写真1 1/4 縮小 U 型鉛ダンパーの外観

## 1.2 解析条件

モデル最下面の全節点は全方位を拘束、最上面の全節点は高さ方向のみを拘束した。加力は付図1に示す様に、可撓部湾曲の面内方向(P方向)と面外方向(O方向)に行った。加力は増分変形量によって制御し、正(+)方向に $\delta/H = +0.71$  (+100mm)までの強制変形を与えた後、負(-)方向に $\delta/H = -0.71$  (-100mm)まで変形させ、最後に変位0mmに戻す1サイクルの復元力特性について解析を行った。

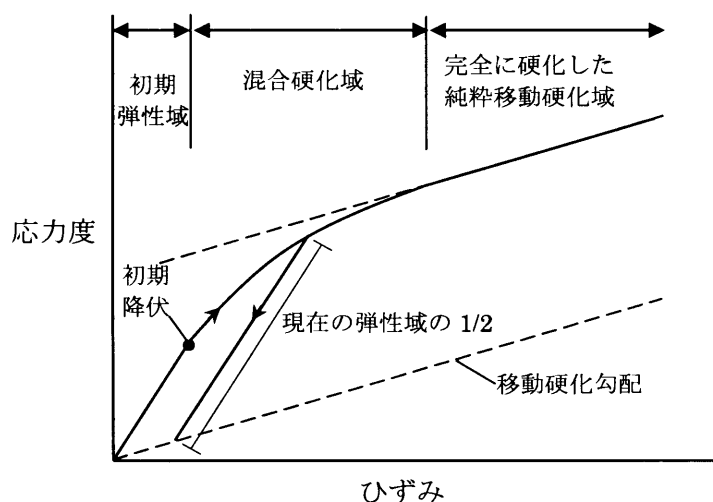
## 1.3 材料特性

本解析は静的解析とし、鉛の物理的特性として、ヤング率 $E = 17,150\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比0.44を用いた。降伏条件としては Von Mises の降伏条件式を用い、付図2に示すような混合硬化則(複合硬化則)を用いた。塑性発熱、ひずみ速度による影響は考慮していない。解析では鉛の材料特性を決定するために予備解析を行った。

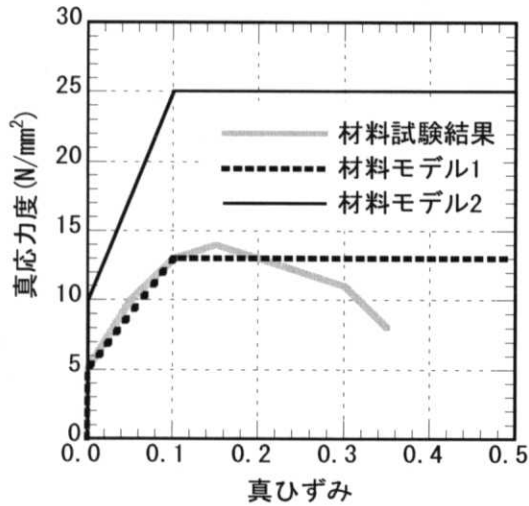
付図3には静的単純引張試験による材料試験結果と予備解析に用いた材料モデルを示す。材料モデル1は材料試験に基づいた真応力度-真ひずみ関係である。解析は静的解析を行うが、比較を行う実験結果は動的加振の結果である。そこで、材料特性の降伏応力度を動的試験から得られた降伏応力度を用いて定義したモデルが材料モデル2である。第3章(3.4.8)式に基づいて、静的試験の結果を $\alpha = 1.9$ を用いて補正し、降伏応力度 $\sigma'_y = 25.5\text{N/mm}^2$ を用いることにする。

付図4には、材料モデル2と文献2)に示された修正 Robinson 式に基づいた鉛材料の真応力-真ひずみ関係を示す。本解析における材料モデルは tri-linear モデルとしている。材料モデルの第2勾配は、この修正 Robinson 式に対応させて決定したもので、第1勾配の1/1000としている。

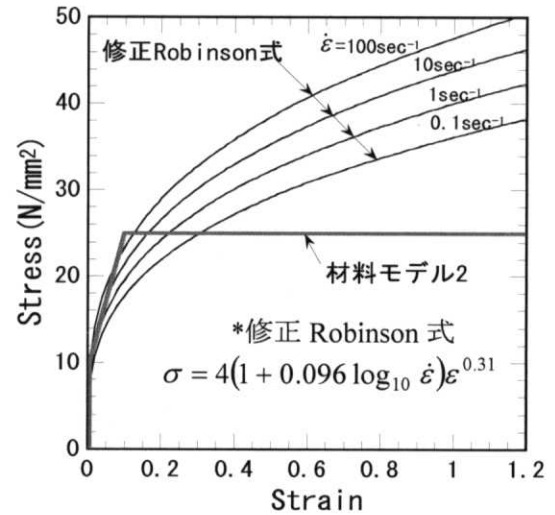
これらの2つの材料モデルを用いて解析した結果を付図5に示す。この結果、材料モデル2が実験による復元力特性に近い傾向を示したため、材料モデル2を用いることとした。



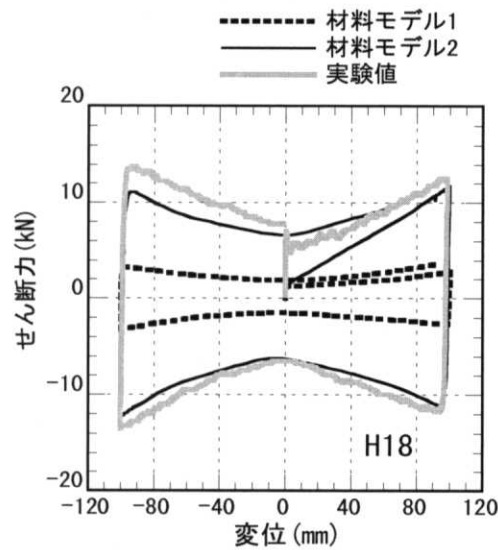
付図2 混合硬化モデルの基本的単軸引張挙動



付図3 材料モデル



付図4 鉛材料の真応力度-真ひずみ関係<sup>2)</sup>

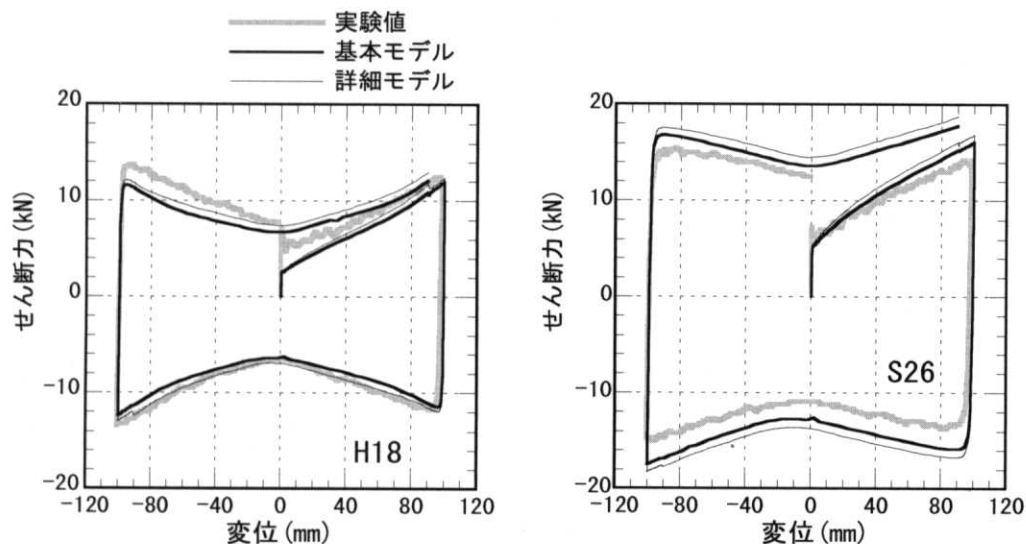


付図5 材料特性の違いによる解析結果の比較(P方向)

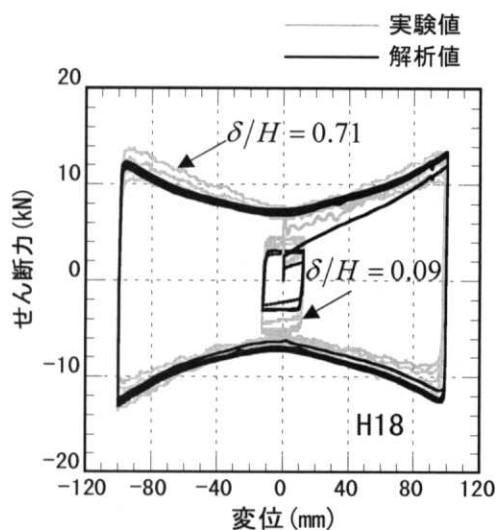
#### 1.4 モデルの精度による比較

付図6にP(面内)方向に  $\delta/H = 0.71$  ( $\pm 100\text{mm}$ )変形させた場合の実験値と解析値の比較を示す。基本モデル、詳細モデルに関してモデルの精度による違いは見られず実験値との差は少ない。詳細モデルの方が耐力は大きい値をとる傾向が見られるが、基本モデルとの違いは最大でも約7%程度である。よって、基本モデルの結果を用いて考察を行う。

付図7は振幅  $\delta/H = 0.09$  ( $\pm 12.5\text{mm}$ )と  $\delta/H = 0.71$  ( $\pm 100\text{mm}$ )で5サイクルの加力を繰り返した場合の実験値と解析値の比較である。 $\delta/H = 0.71$ 加力時には5サイクル繰り返した場合でも実験値との差異は微小である。ただし、 $\delta/H = 0.09$ 加力時において、実験値は解析値より25%程度大きくなっている。材料モデルを決定した際の初期剛性の影響を受けていると考えられる。



付図6 モデルの精度の違いによる解析結果(P方向)



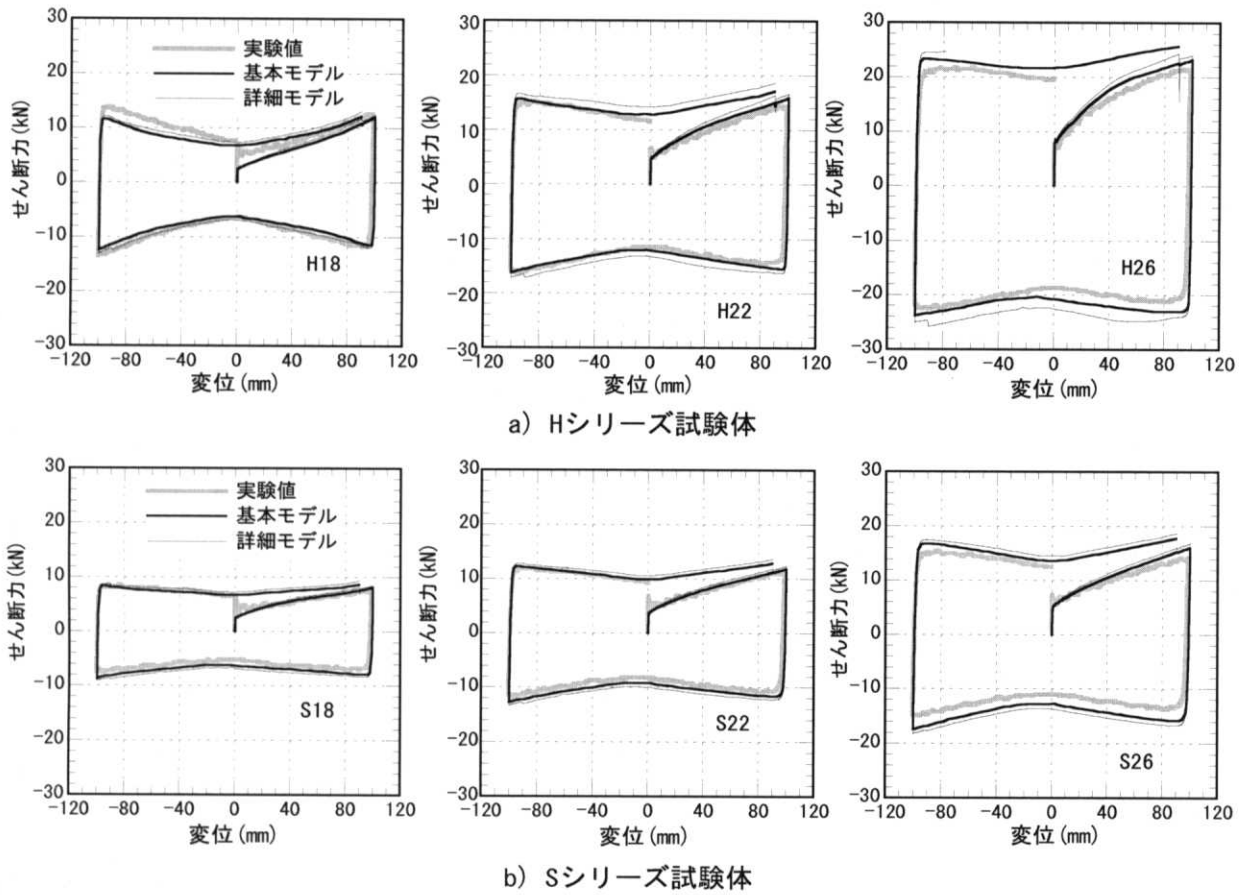
付図7 5サイクル履歴(基本モデル, P方向)

## 2. 解析結果

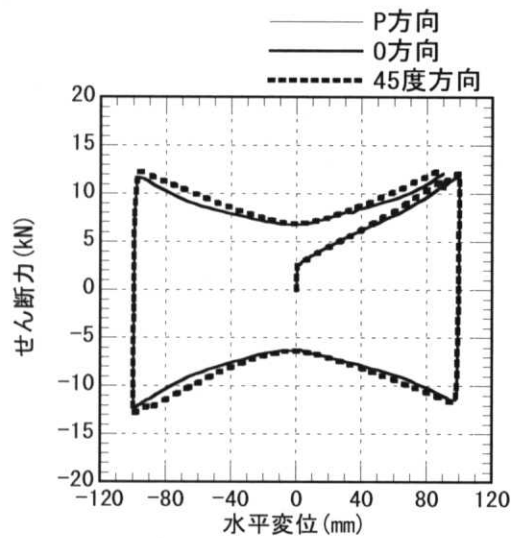
### 2.1 復元力特性

付図8にP方向に $\delta/H = 0.71$  ( $\pm 100\text{mm}$ )加力時の実験値と解析値の比較を示す。復元力特性は、鉛ダンパーの可撓部直径が大きくなるほど降伏耐力が大きくなるが、復元力特性の形状は剛塑性的な傾向を示している。Hシリーズの復元力特性は可撓部直径が大きくなるほど矩形に近づいている。これは可撓部の湾曲が大きくなっていることと、直径が大きくなり曲げ変形の集中度が変化したためと思われる。Sシリーズでは試験体が相似的に大きくなるため復元力特性もほぼ相似形である。しかし、可撓部直径が大きくなるほどハードニングの傾向が強くなる。O方向加力でも、P方向加力と、ほぼ同じ傾向を示した。

付図9に、H18型鉛ダンパーをP方向とO方向の間である45度方向で加力した場合の復元力特性を示す。45度方向加力の場合でも、復元力特性はP方向、O方向と同様な復元力特性を描いている。加振方向が鉛ダンパーの復元力特性に与える影響は小さいと考える。



付図8 実験値と解析値の比較 (P方向)



付図9 H18型の解析値 (45度方向加力との比較)

## 2.2 変形状態

付写真 2 に H18 と H22 試験体の  $\delta/H = 0.71(100\text{mm})$  変形時の変形状態を示す。実験より、H18 は  $\delta/H = 0.71$  変形に対して可撓部円弧が伸びきっているように見える。一方、H22 試験体は可撓部円弧の伸びに余裕があるものの、特に上下両端部で鉛の変形が見られた。

付図 10 に H18, H22, S26 モデルのメッシュの変形状態を示す。H18 モデルでは  $\delta/H = 0.71$  変位時に、可撓部円弧が伸びることで、変形に追随している。また、図中の丸印で囲んだ部分において可撓部上端部より、下端部にメッシュが食い込んでいる様子がわかる。H22 モデルの  $\delta/H = 0.71$  変位時のメッシュ状態より、可撓部直径が大きくなることで、丸印の部分において変形が集中していることが分かる。解析メッシュの変形状態は、実際の試験体の変形状態に対応しているといえる。

## 2.3 可撓部の塑性ひずみ度分布

付図 11 は付図 10 と同じ変形状態におけるダンパー表面の塑性ひずみ度分布図である。色が濃くなるほど塑性ひずみ度が大きい。いずれの場合も可撓部下端部に大きなひずみが発生していることが分かる。

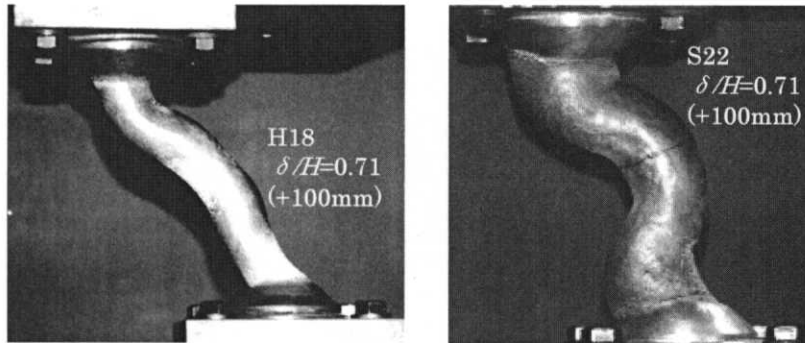
H18 モデルの変位  $\delta/H = 0.36(+50\text{mm})$  での最大ひずみは 0.57 で、 $\delta/H = 0.71(+100\text{mm})$  では 1.07 と倍増している。H18 に比べ H22 モデルは円弧内側に集中してひずみが発生しており、 $\delta/H = 0.71$  変形時の最大ひずみは 1.47 と H18 を大きく上回る。鉛軸部の可撓部と補強部の境界では、変形は直径が大きくなる補強部よりも可撓部に集中しひずみが顕著になっている。また、円弧の内側部分は、円弧の外側部分よりも要求される変形量が大きくなるためにひずみが集中している。

S シリーズは可撓部直径に対して、高さも相似的に大きくなっているため最大ひずみの値も小さい。S26 モデルに関して、ひずみの分布状態は、H18 モデルと似た傾向を示す。可撓部の曲率が小さくなる分、変形に対して追随が図れ、ひずみの最大値も 0.73 と全モデル中、最も小さな値で余裕が見られた。

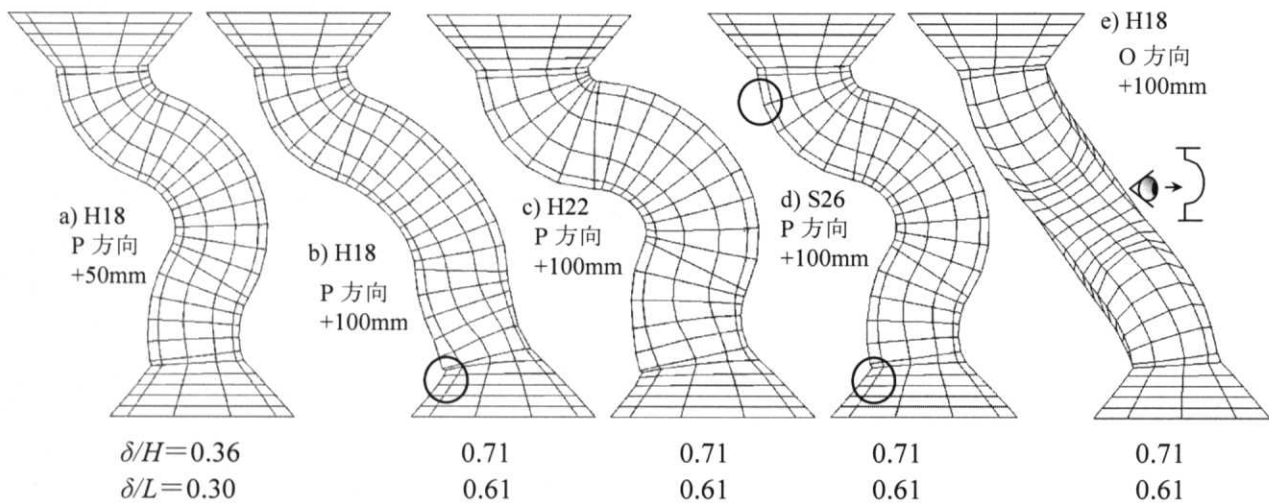
O 方向の解析結果は、円弧が奥(P(+))面に見える場合である。O 方向加力の場合、ひずみの集中は中心、可撓部上下端部の 3 箇所が発生し、ひずみが分散されていることが分かる。最大ひずみも 0.61 と P 方向よりも低い値を示す。また、円弧が手前に見える場合でもひずみの発生箇所は同じである。H22 モデルの最大ひずみは、0.83 と P 方向加力の場合と同様に大きな値を示した。解析から得られたひずみが集中した部分は、実験において鉛ダンパーの表面の温度上昇が顕著な部分と一致している。

付図 12 には加力順序の違いによるひずみ分布を示す。上段(a)は最初に  $\delta/H = +0.71(+100\text{mm})$  加力を行い、次に  $\delta/H = -0.71(-100\text{mm})$  まで加力を行った際の塑性ひずみ度分布であり、下段(b)は最初に  $\delta/H = -0.71(-100\text{mm})$  加力、その後  $\delta/H = +0.71(+100\text{mm})$  までの加力を行った解析結果である。(a)の場合、中央部分と可撓部下端部にひずみが集中しているが、(b)の場合は中央部と可撓部上部に発生している。(b)

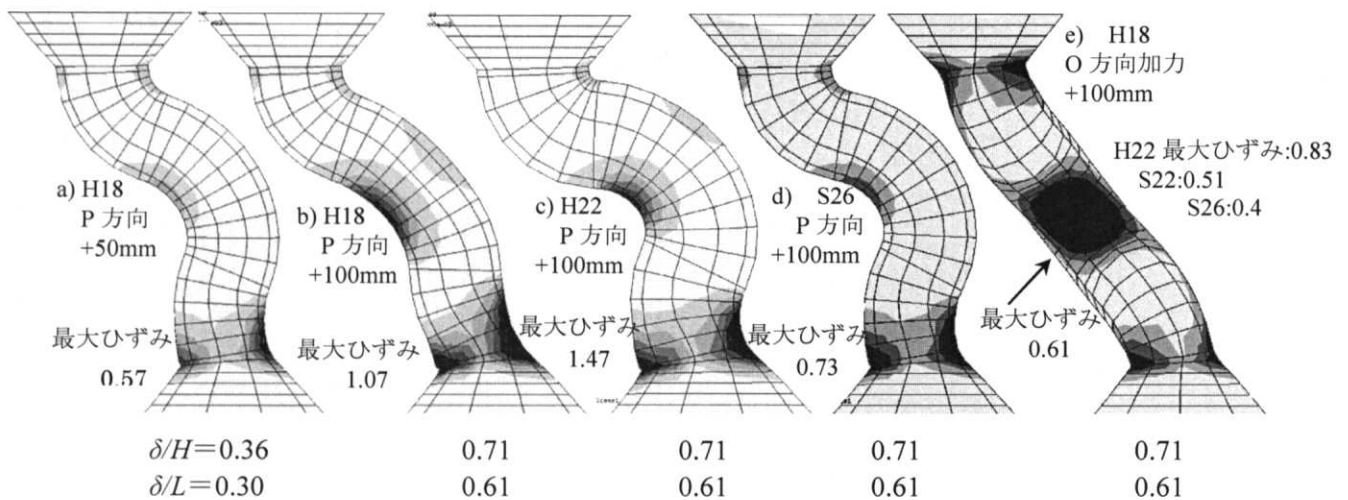
の場合、加力が0に戻った際、可撓部下端部のひずみがほとんど発生していないのに対し、(a)の解析結果では可撓部上端部にひずみの発生が見られる。(a)の解析で $\delta/H=-0.71$  (-100mm)加力時のひずみの発生は(b)の $\delta/H=+0.71$  (+100mm)の結果に比べ可撓部全体にひずみが発生している。U型鉛ダンパーのひずみ分布は円弧の影響による加力方向依存性が見られることが分かる。



付写真2 P方向加振時の1/4縮小鉛ダンパーの変形状態

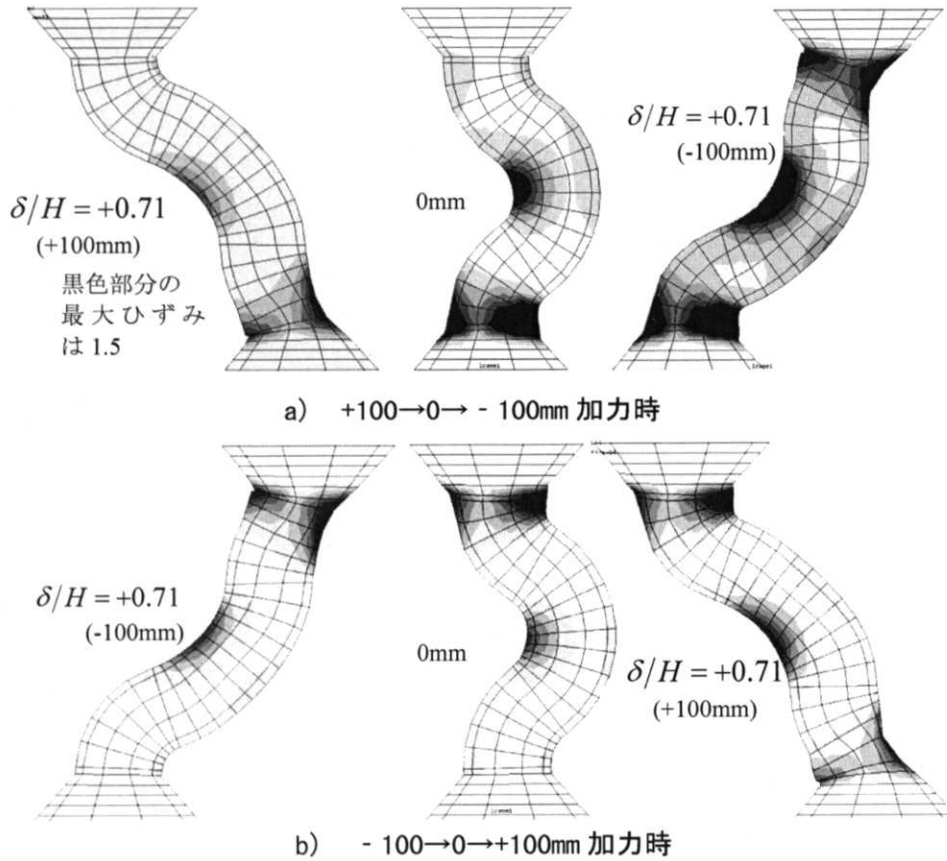


付図10 解析によるメッシュの変形状態



付図11 解析による塑性ひずみ度分布図

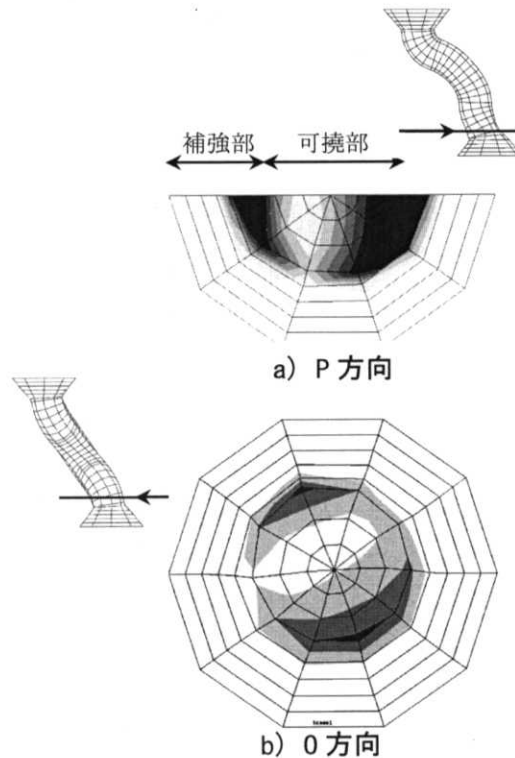




付図 12 加振方向の違いによるひずみ分布 (H18, P 方向)

#### 2.4 可撓部と補強部の境界面における塑性ひずみ度分布

付図 13 は  $\delta/H = +0.71 (+100\text{mm})$  加力時の可撓部下と補強部の境界を水平方向にスライスし塑性ひずみ度分布を示したものである。色が濃くなるほどひずみは大きい。P 方向加力の場合、ひずみは中心部が小さく、外周部に行くほどひずみの発生は大きくなっている。O 方向の場合は、右側の方がひずみは大きく、断面中央下部分でひずみが小さい。U 型鉛ダンパーの場合、ひずみは引張を受ける外周部が大きくなり、内側に行くほどひずみは小さい。



付図 13  $\delta/H = +0.71 (+100\text{mm})$  加力時の可撓部断面のひずみ分布 (H18)

### 3. まとめ

U型鉛ダンパーの有限要素解析からは、以下の知見を得た。

- 1) 解析結果から得られた鉛可撓部の高さ方向に対する塑性ひずみ分布は、可撓部端部及び中央部にひずみが集中している。解析でひずみが集中した部分は、実際の実験において鉛の温度上昇が顕著な箇所であり、解析と実験の現象の一致が確認された。
- 2) 解析に用いる鉛の材料特性のモデル化は、通常、静的単純引張試験の結果に基づいて行われる。しかし、鉛の場合にはひずみ速度依存性が顕著であるため、本論第3章(3.4.8)式を用いて補正し、解析の材料定数として用いた。推定式を用いることで動的の挙動を解析的に再現できることを確認した。
- 3) 可撓部直径を拡大することは降伏耐力を高める有力な手段であるが、単に直径を拡大しただけではひずみの集中が発生し変形能力の低下につながる。可撓部直径に併せ、高さも大きくすることが有効であると考えられる。
- 4) P方向加力の際、最初に土方向のどちら側に加力が行われるかでひずみの発生箇所が変わってきており、加力方向依存性が見られた。
- 5) O方向加力時には、可撓部の中央、上下端部にひずみが分散され、P方向加力よりひずみの集中が緩和されている。

### 4. 参考文献

- 1) 森田慶子，高山峯夫他：免震構造用鉛ダンパーの大型化に関する実験研究，日本建築学会九州支部研究報告，第38号，1998年3月
- 2) 矢川元基，幾島毅：使用済核燃料輸送容器の構造解析プログラムの調査，日本原子力研究所，JAERI-M-87-156，1987年10月