

# フレームに組み込まれたアンボンドブレースの弾塑性挙動解析

## ANALYTICAL STUDY ON UNBONDED BRACES FIXED IN A FLAME

佐伯 英一郎\*, 前田 泰史\*\*, 岩松 浩一\*\*\*, 和田 章\*\*\*\*  
*Eiichiro SAEKI, Yasushi MAEDA, Kouichi IWAMATSU*  
*and Akira WADA*

Numerical analyses on buckling-restrained unbonded braces fixed in a frame were made using the non-linear finite element method and the following conclusions were obtained.

- 1) The hysteresis characteristics and strain distributions of core steels on "frame model" are almost same as those on "basic model (non-eccentricity and no-moment model)."
- 2) The hysteresis characteristics on "obliquely loaded model" are almost same as those of "basic model" although the strain distributions of core steels on "obliquely loaded model" are slightly larger at the end parts than those on "basic model."
- 3) Locally concentrated cumulative plastic strains of core steels due to earthquake are much small in comparison with cumulative plastic strain of steel to low cycle fatigue failure.
- 4) The hysteresis characteristics and strain distribution of extremely long unbonded braces are almost same as those of "basic model."

**Keywords :** *unbond, brace, finite element method, hysteresis characteristics, low cycle fatigue*

アンボンド, ブレース, 有限要素法, 復元力特性, 低サイクル疲労

### 1. まえがき

「ブレース」は建築構造物の耐震要素として効果的であり、低層から高層建築物まで幅広く使用されている。しかしながらブレースは圧縮力が作用すると座屈現象を起こし耐力低下を生じる欠点がある。「アンボンドブレース」はこの欠点を解決するブレースとして考案され<sup>1)</sup>、現在多くの建築物に使用されている。

近年、アンボンドブレースの利用のされ方は単に耐震要素という受動的な使用方法のみではなく、積極的に振動性状をコントロールするためのツールとして使用されている。従って、従来以上の精緻な弾塑性挙動の分析と安全性の確認が必要となり、特に芯材の塑性ひずみの分布及び累積量の研究が必要となってきた。

このような背景の中で、大型実大のアンボンドブレースの加力実験を実施し、復元力特性に関する小型モデルとの相違点の有無及びブレースに作用するモーメントの影響について分析を試みた<sup>2)</sup>。さらに、この実大実験結果

と有限要素法による解析結果の比較検討を行うことにより、アンボンドブレースの実挙動が再現できる解析モデルを提案し、弾塑性挙動を分析した<sup>3)</sup>。

本研究は、この解析モデルを使用して、実際に建物に装着されたアンボンドブレースの数値解析を行うことにより、実挙動の分析と安全性の確認を行うことを目的とする。

### 2. アンボンドブレースの概要と本研究の目的

#### 2.1 アンボンドブレースの概要

アンボンドブレースとは、図2-1に示すように、軸方向力を伝達する鋼板（以下、芯材と称す）を鋼管とモルタルによって拘束することによって座屈を起こさないようにしたブレースであり、詳細は文献6, 8を参照されたい。

本研究で対象とするアンボンドブレースには、芯材が平板断面、十字断面の2種類があり、それぞれ「タイプ、+タイプ」と称すことにする。

\* 新日本製鐵株式会社建築事業部 室長・工修  
 \*\* 新日本製鐵株式会社建築事業部 工修  
 \*\*\* 日鐵プラント設計株式会社 C. A.グループ  
 \*\*\*\* 東京工業大学 教授・工博

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

Nippon Steel Corporation, M. Eng.

Nittetsu Plant Designing Corporation

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

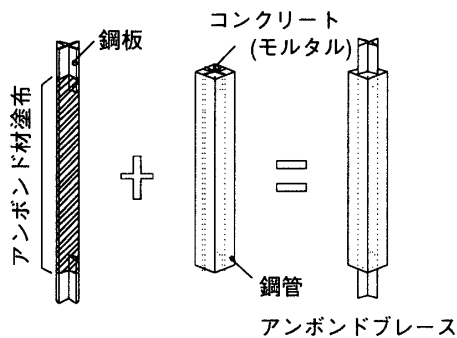


図2-1 アンボンドブレースの構成

2.2 本研究の目的

筆者らは、文献9に示すようなアンボンドブレースの有限要素モデルを提案し、解析結果と実大実験結果を比較検討することにより、数値解析モデルの妥当性を検証した。本研究では、この数値解析モデルを用いて、アンボンドブレースが柱、梁フレームに組み込まれた「フレームモデル」及び端部の回転を拘束して斜め方向に加力する「斜め加力モデル」の挙動を解析することにより、(1)フレームに組み込まれたアンボンドブレースのブレース角度、長さ等が履歴特性に及ぼす影響、(2)ひずみ分布に及ぼす端部拘束の影響と累積塑性ひずみ量の関係、(3)累積塑性ひずみ量と低サイクル疲労強度の関係を明らかにすることを目的とする。併せて、実プロジェクトの長尺アンボンドブレースの数値解析を行うことにより、弾塑性挙動解析の分析と安全性を検討する。

3. 解析方法

3.1 解析プログラム

解析には有限要素法による汎用非線形構造解析プログラムを使用し、その詳細は文献9にゆずる。

3.2 構成材料のモデル化 (文献9参照)

3.2.1 芯材及び鋼管

芯材および鋼管は図3-1に示すように、処女載荷時に発生する降伏棚及びバウシinger効果を見無視したバイリニア型応力-ひずみ関係を有するものと仮定し、混合硬化則を用いてモデル化する。混合硬化則の移動勾配は、正負対称に増加する繰返し荷重下において一定の応力( $\sigma_1$ )で降伏するように与えた。表3-1に解析用物性値を示す。

3.2.2 モルタル

モルタルは図3-2に示す材料特性を有するものと仮定する。材料は引張応力がクラック発生応力( $\sigma_1=0.1F_c$ )に達するとクラックが発生しその後一定の勾配( $E_s$ )で応力がゼロになるまで軟化する。圧縮側では応力が降伏応力( $\sigma_2=1/3F_c$ )に達すると降伏する。降伏後は一定の勾配( $E_2$ )で応力は増加し塑性ひずみが圧壊ひずみ  $\epsilon_{crush}$

に達する(応力は  $F_c$  に達する)と圧壊し、剛性はゼロとなる。表3-2に解析用物性値を示す。

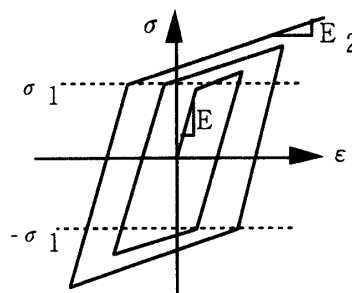


図3-1 鋼材の応力-ひずみ関係

表3-1 鋼材の物性値

ヤング率(E)	21000kg/mm <sup>2</sup>
降伏応力( $\sigma_1$ )	25kg/mm <sup>2</sup>
第二勾配( $E_2$ )	0.02E
加工硬化係数	428kg/mm <sup>2</sup>
移動勾配	350kg/mm <sup>2</sup>
ポアソン比	0.3

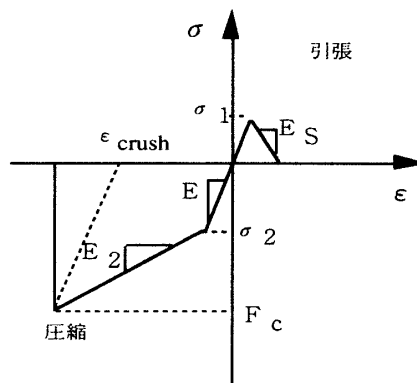


図3-2 モルタルの応力-ひずみ関係

表3-2 モルタルの物性値

$F_c$	3kg/mm <sup>2</sup>
クラック発生応力( $\sigma_1$ )	0.3kg/mm <sup>2</sup>
降伏応力( $\sigma_2$ )	1kg/mm <sup>2</sup>
ヤング率(E)	1500kg/mm <sup>2</sup>
第二勾配( $E_2$ )	706kg/mm <sup>2</sup>
ソフトニング係数( $E_s$ )	5000kg/mm <sup>2</sup>
加工硬化係数	1333.3kg/mm <sup>2</sup>
圧壊ひずみ( $\epsilon_{crush}$ )	0.15%
ポアソン比	0.15
せん断力保持率	0.05

#### 4. 解析の種類と解析モデル

文献9に示す「基本モデル（無偏芯単純交番载荷モデル）」を参考にして、以下に示す「フレームモデル」と「斜め加力モデル」の解析を行う。

##### 4.1 フレームモデル

###### 4.1.1 解析モデル

フレームに組み込まれたブレースの挙動を把握するため図4-1に示すフレームモデルを考える。解析を行うブレースは、表4-1に示すように400-36, 400+28とそれぞれのブレース材長を約2分の1とした400-36L2, 400+28L2および400+28の鋼管板厚を1.6mmとした400+28T16の5種類とする。材長1/2モデルは梁サイズ、ブレース角度等の制約から短くせざるを得ない「短尺アンボンドブレース」の挙動分析を目的とし、薄肉鋼管モデルは鋼管の座屈拘束効果の影響の分析を目的とする。

###### 4.1.2 フレームのモデル化

フレーム（柱、梁）は弾性体とし梁要素でモデル化する。継手部も梁要素でモデル化し、剛性を柱の100倍とすることにより、剛域として扱う。図4-2にフレームのモデル図（メッシュ分割図）を示す。

###### 4.1.3 ブレースのモデル化

図4-3にブレースのメッシュ分割図を示す。芯材はシェル要素、鋼管及びモルタルはソリッド要素でモデル化している。モデルは対称性を利用して材軸方向に2分割した1/2モデルとした。

###### 4.1.4 タイピング及び境界条件

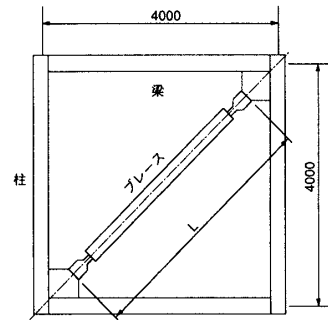
境界条件を図4-4に示す。フレームの下部両端はヒンジ支点とし、フレームの上部一端に载荷のための強制変位を与える。ブレースとフレームは、継手部先端で梁要素とシェル要素をタイピングすることにより接続する。モデル全体はy-z面対称であり、芯材とモルタルは文献9と同様に材軸と直角な方向(z<sub>L</sub>)の変位をタイピングすることにより、アンボンド効果をモデル化している。材軸方向(y<sub>L</sub>)の変位はアンボンドブレースの中央で芯材とモルタルをタイピングしている。

###### 4.1.5 载荷方法

図4-5に示す载荷パターンに従ってフレームに水平変形を与える。( )内は増分ステップ数を示す。なお、基本モデルと比較するために、ブレースの軸方向変形量が一変するようなフレームの変形量を与えている。

表4-1 解析ケース（フレームモデル）

解析ケース	L(mm)	備考
400-36	4340	————
400+28	4140	————
400+28T16	4140	薄肉鋼管モデル
400-36L2	2100	材長1/2モデル
400+28L2	2021	材長1/2モデル



梁：H-700×300×15×28 柱：□-500×500×20

図4-1 解析モデル（フレームモデル）

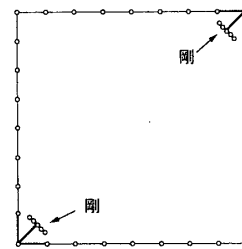


図4-2 フレームのモデル化

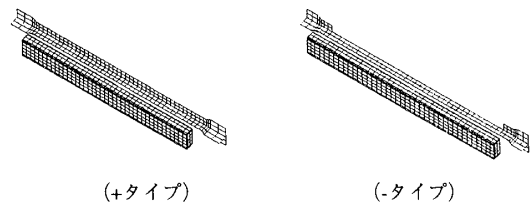


図4-3 ブレースのメッシュ分割図

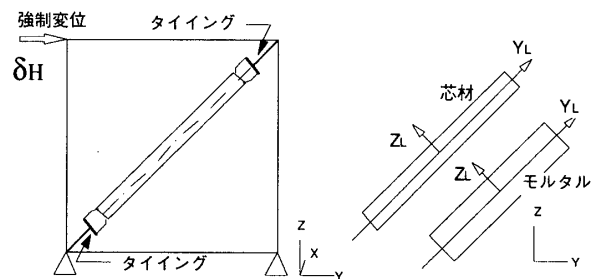


図4-4 境界条件

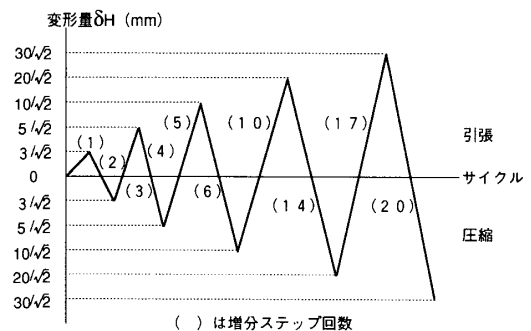


図4-5 载荷パターン

## 4.2 斜め加力モデル

### 4.2.1 解析モデル

フレーム内に装着されたブレースには、軸方向変形と図4-6に示すモーメントを発生させる端部回転が生じる。図4-7に示す斜め加力モデルはブレースが梁に取りついていると仮定した場合に梁の剛性が無限大の場合のブレースの変形に対応し、フレームモデルよりも過大なモーメントをブレース端部に与える。

モーメントの対称性を利用して、図4-6に示すブレースの材長の1/2をモデル化し、角度 $\theta$ をパラメータとして、表4-2に示すような6種類の解析を行う。

### 4.2.2 荷重方法

図4-8に示す荷重パターンに従ってブレース端部に材軸と $\theta$ の角度に変形を与える。なお、基本モデルと比較するために、ブレースの軸方向変形が一致するような変形を与えている。

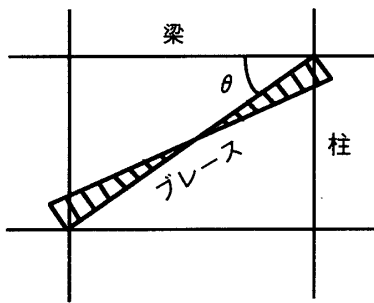


図4-6 ブレースに発生するモーメント

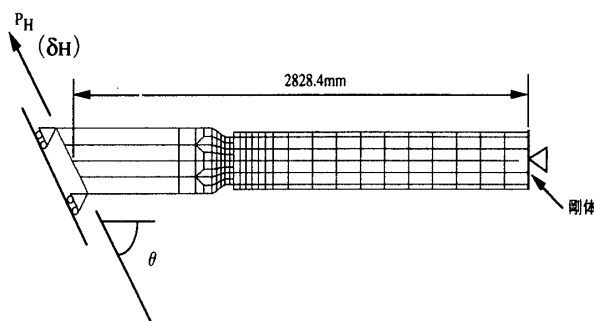


図4-7 解析モデル (斜め加力モデル)

表4-2 解析ケース (斜め加力モデル)

解析ケース	$\theta$	タイプ
400-36 $\theta$ 30	30	-
400-36 $\theta$ 45	45	-
400-36 $\theta$ 60	60	-
400+28 $\theta$ 30	30	+
400+28 $\theta$ 45	45	+
400+28 $\theta$ 60	60	+

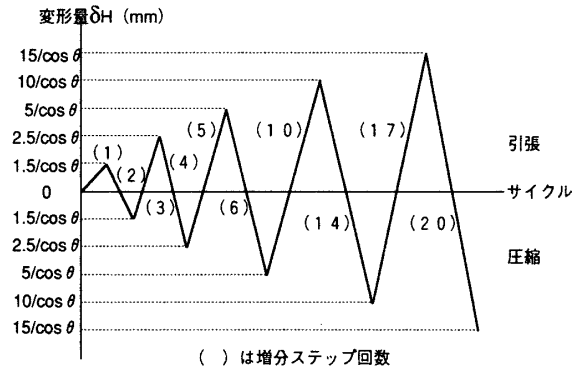


図4-8 荷重パターン

## 5. 解析結果 (フレームモデル)

解析結果と考察を以下に示す。なお、荷重の+側は引張加力、-側は圧縮加力を示す。

### 5.1 復元力特性

(フレーム)

400-36, 400+28, 400-36L2, 400+28L2及び400+28 T16について、フレームの水平荷重( $P_H$ )と水平変形( $\delta_H$ )の関係を図5-1(a)~(e)に示す。

いずれのケースにおいても座屈現象は生じておらず、安定した復元力特性を示している。

(ブレース)

400-36, 400+28, 400-36L2, 400+28L2及び400+28 T16について、ブレースにかかる軸方向荷重( $P_A$ )と軸方向変形( $\delta_A$ )の関係を図5-2(a)~(e)に示す。なお、 $P_A$ はブレースを含めたフレームの $P$ - $\delta$ 関係からフレームのみの $P$ - $\delta$ 関係を差し引いて求めた。 $\delta_A$ は芯材両端中心の2点の変位から求めた変形量とした。

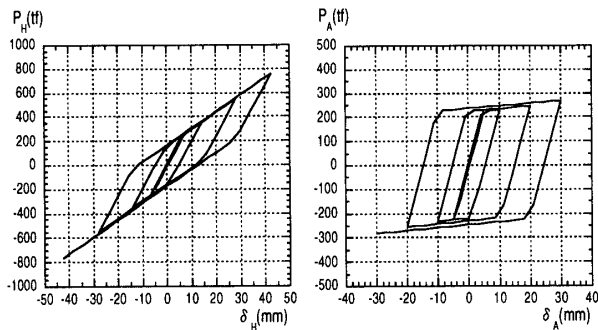
フレームの場合と同様に、安定した復元力を有し、短柱の圧縮引張試験と同様の復元力特性をもっていることがわかる。

### 5.2 芯材の軸方向ひずみ

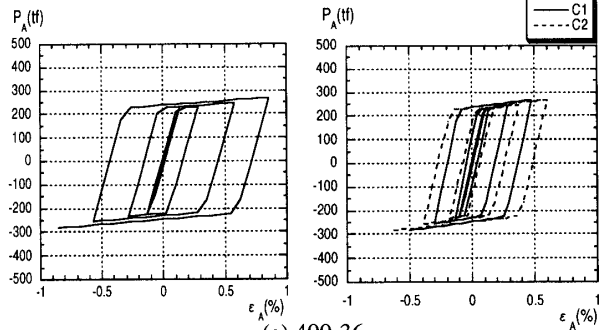
(中央部, 端部)

400-36, 400+28, 400-36L2, 400+28L2及び400+28 T16について、図5-5に示すB点(中央部),  $C_1$ ,  $C_2$ 点(鋼管内の芯材端部)における荷重( $P_A$ )と軸方向ひずみ( $\epsilon_A$ )の関係をそれぞれ図5-3(a)~(e), 図5-4(a)~(e)にそれぞれ示す。

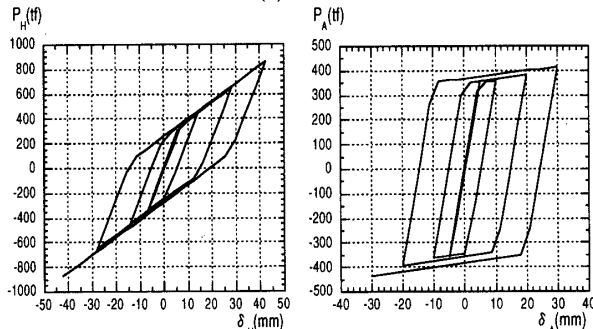
図5-3, 図5-4をみると、-タイプにおいて、(1)端部のリブプレートの影響により $C_1$ ,  $C_2$ 点のひずみが中央部(B点)と比較してやや小さい値になっていること、(2)曲げモーメントの影響により $C_1$ ,  $C_2$ 点のひずみに差があることがわかる。しかし、いずれのケースにおいても引張側, 圧縮側のどちらかにひずみが累積している傾向はなく、原点を基準に正負バランス良く塑性ひずみが発生している。



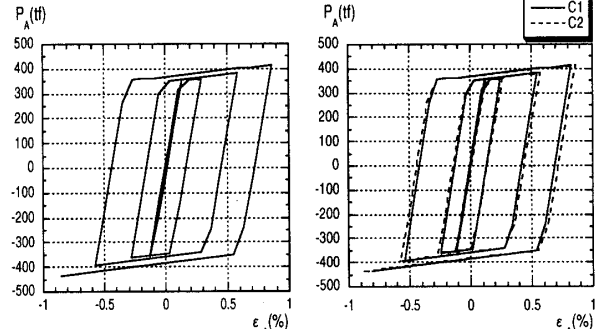
(a) 400-36



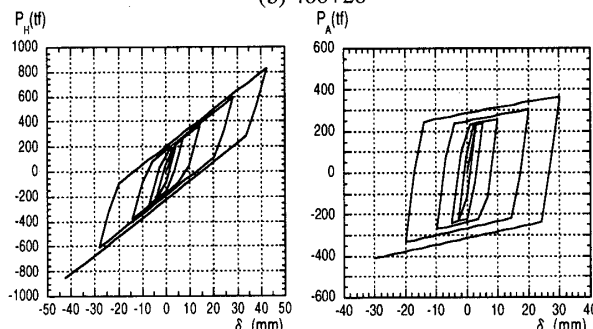
(a) 400-36



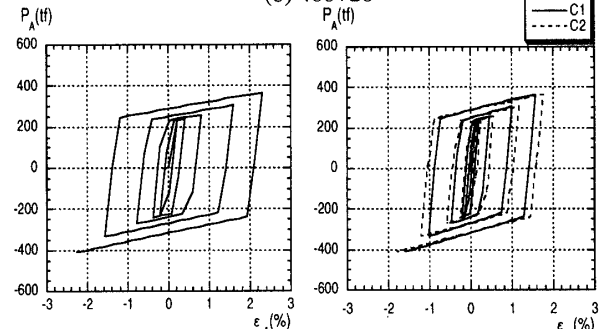
(b) 400+28



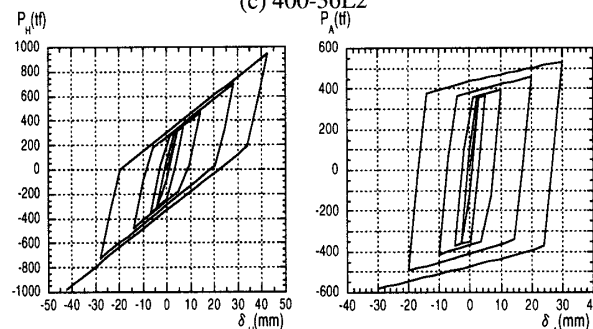
(b) 400+28



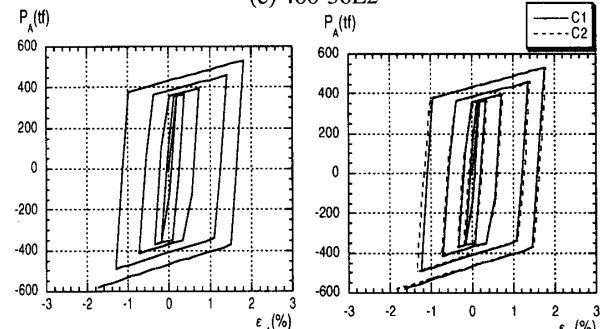
(c) 400-36L2



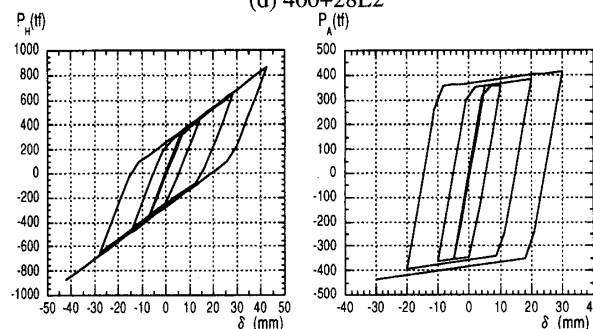
(c) 400-36L2



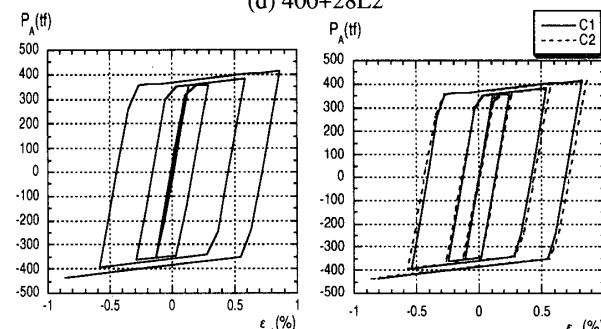
(d) 400+28L2



(d) 400+28L2



(e) 400+28T16



(e) 400+28T16

左列：図5-1 水平荷重 ( $P_H$ )—水平変形 ( $\delta_H$ ) 関係  
 右列：図5-2 荷重 ( $P_A$ )—軸方向変形 ( $\delta_A$ ) 関係

左列：図5-3 荷重 ( $P_A$ )—軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) 関係 (中央部)  
 右列：図5-4 荷重 ( $P_A$ )—軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) 関係 (端部)

(軸方向ひずみ分布)

400-36, 400+28, 400-36L2, 400+28L2及び400+28 T16について、変形( $\delta_A$ )が±10, 20, 30のときのA~A'線上(図5-5参照)における軸方向ひずみ( $\epsilon_A$ )の値を図5-6(a)~(e)に示す。

-タイプ(400-36, 400-36L2)において、A, A'点付近でひずみの値が小さくなっているのは、芯材中央部と比較して端部の断面積が大きいためである。一方、+タイプにおいては、モーメントの影響により端部の塑性化が進行しており、両端に大きな曲げひずみが発生しており、その傾向は短尺ブレースにおいてより顕著である。

5.3 芯材の相当塑性ひずみ分布

図5-7に400-36, 400+28の $\delta_A = -30\text{mm}$ における芯材の相当塑性ひずみ分布図を示す。

+タイプは-タイプと比較して芯材端部のひずみ集中が激しいことがわかる。

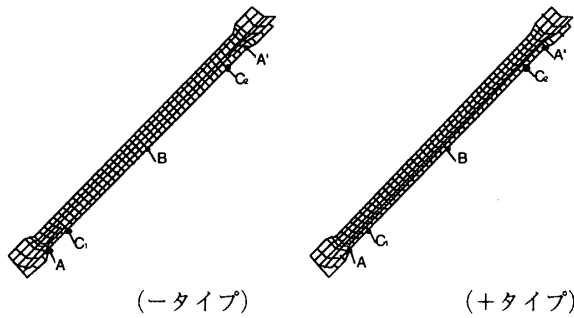


図5-5 ひずみ測定点(フレームモデル)

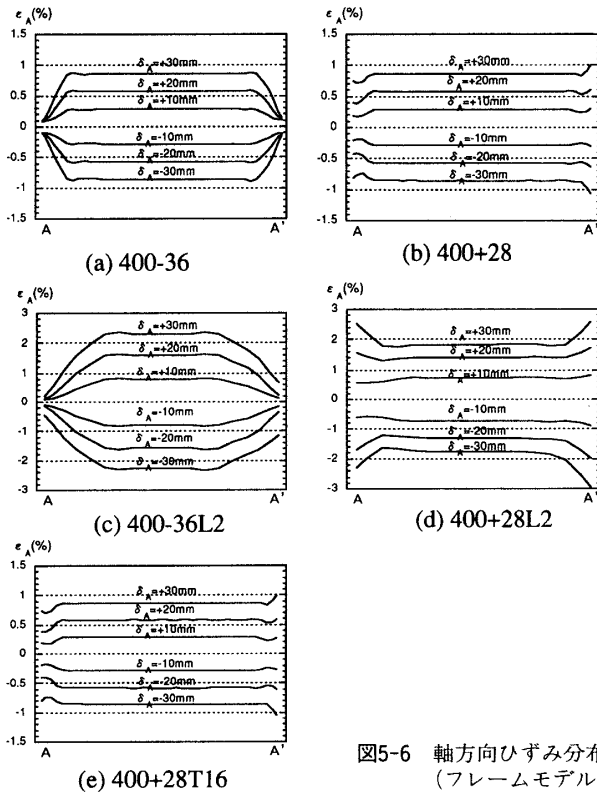


図5-6 軸方向ひずみ分布 (フレームモデル)

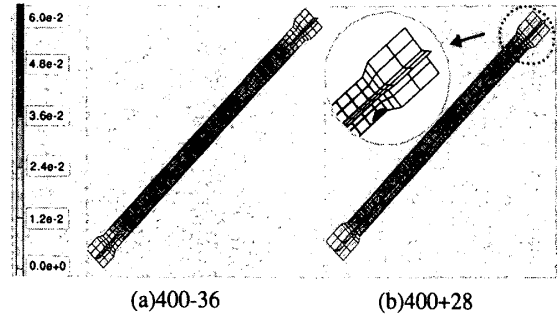


図5-7 芯材の相当塑性ひずみ分布図 (+30mm)

6. 解析結果(斜め加力モデル)

6.1 復元力特性

400-36 $\theta$ 30, 400-36 $\theta$ 45, 400-36 $\theta$ 60, 400+28 $\theta$ 30, 400+28 $\theta$ 45及び400+28 $\theta$ 60について、ブレースにかかる荷重( $P_A$ )と軸方向変形( $\delta_A$ )の関係を図6-1(a)~(f)に示す。

フレームモデルと同様に、いずれも安定した復元力を有していることがわかる。また、載荷角度による相違はほとんどみられなく、通常、フレーム内において装着されるブレース角度の範囲においては、端部に作用する曲げモーメントが復元力特性に与える影響はほとんどないといつてよい。

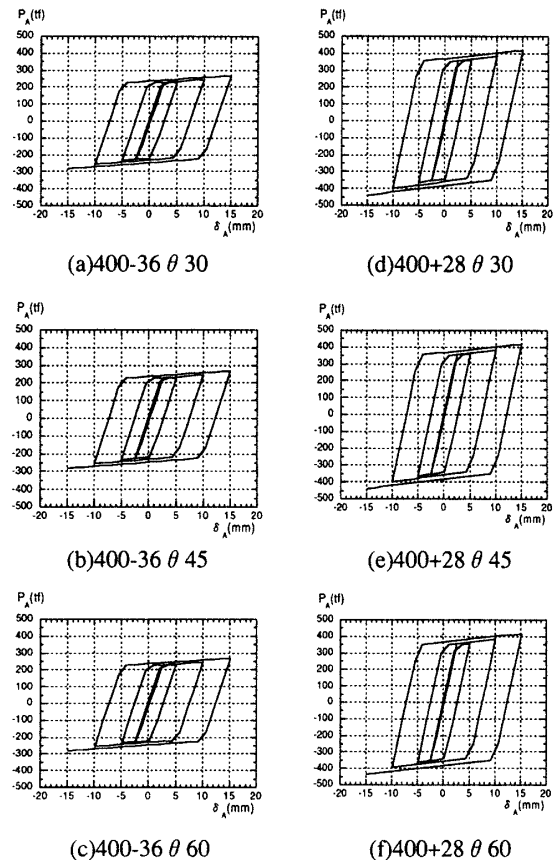
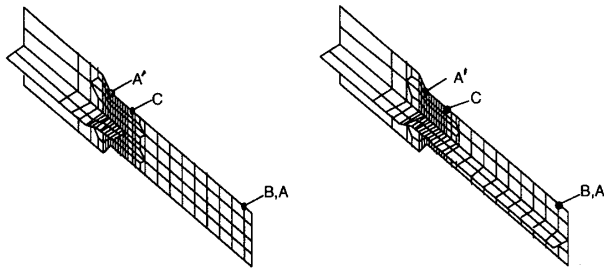


図6-1 荷重( $P_A$ )—軸方向変形( $\delta_A$ )関係



(-タイプ) (＋タイプ)

図6-2 ひずみ測定点 (斜め加力モデル)

## 6.2 芯材の軸方向ひずみ

(中央部, 端部)

400-36 $\theta$ 30, 400-36 $\theta$ 45, 400-36 $\theta$ 60, 400+28 $\theta$ 30, 400+28 $\theta$ 45及び400+28 $\theta$ 60について, 図6-2に示す  $B$  点 (中央部),  $C$  点 (鋼管内の芯材端部) における荷重 ( $P_A$ ) と軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) の関係を図6-3(a)~(f), 図6-4(a)~(f) に示す。

基本モデル, フレームモデルと異なり, 強制変形による曲げモーメントの影響により, 鋼管内の芯材端部のひずみの値が中央部よりもやや大きくなっていることがわかる。しかしながら, 引張側, 圧縮側のどちらかにひずみが集中的に累積することはなく, 点対称型のカーブを描いている。

(軸方向ひずみ分布)

400-36 $\theta$ 30, 400-36 $\theta$ 45, 400-36 $\theta$ 60, 400+28 $\theta$ 30, 400+28 $\theta$ 45及び400+28 $\theta$ 60について, 変形 ( $\delta_A$ ) が  $\pm 5, 10, 15\text{mm}$  のときの  $A \sim A'$  線上 (図6-2参照) における軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) の値を図6-5(a)~(f) に示す。

-タイプの場合は端部のリブプレートの取りつく断面の付近, +タイプの場合は  $A'$  点の付近で急激にひずみの値が大きくなっている。この傾向は,  $\theta$  の値が大きいほど, 即ち, プレースが立っているほど顕著になっている。特に, +タイプは座屈拘束モルタルの外部の芯材に塑性ひずみの集中が激しい。これは, プレースの回転角が大きく, その回転を拘束している端部に大きな曲げひずみが発生するためである。

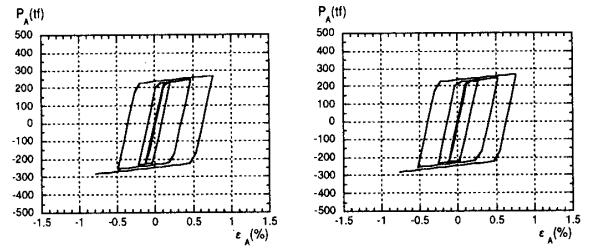
## 6.3 芯材の相当塑性ひずみ

図6-6に400-36 $\theta$ 45, 400+28 $\theta$ 45の  $\delta_A = -15\text{mm}$  における芯材の相当塑性ひずみ分布図を示す。

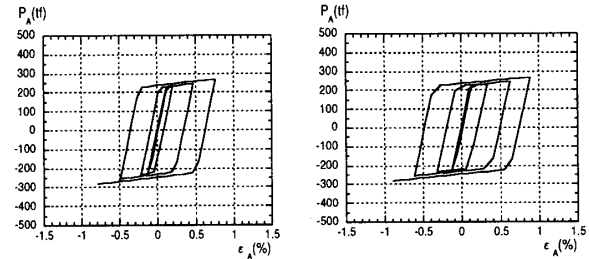
フレームモデルと同様に+タイプは-タイプと比較して, 芯材端部への塑性ひずみの集中が激しくその傾向はより顕著である。

## 7. 材端条件の違いと復元力特性

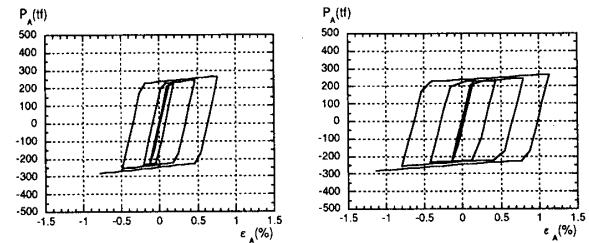
「フレームモデル」, 「斜め加力モデル」の解析結果を文



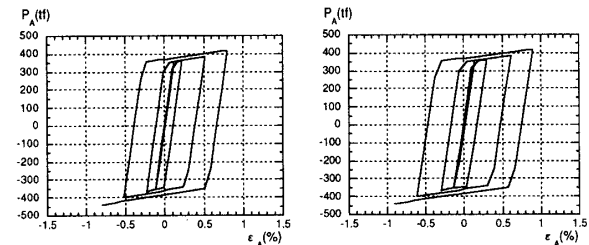
(a) 400-36  $\theta$  30



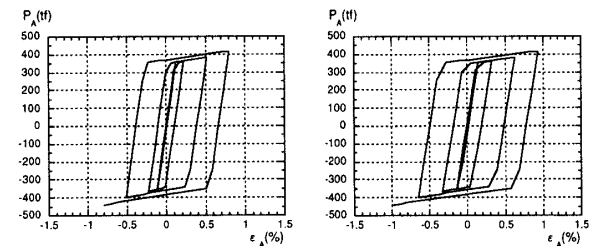
(b) 400-36  $\theta$  45



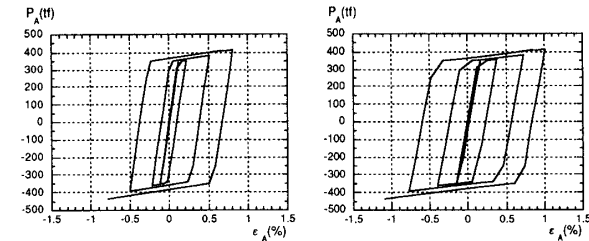
(c) 400-36  $\theta$  60



(d) 400+28  $\theta$  30



(e) 400+28  $\theta$  45



(f) 400+28  $\theta$  60

左列：図6-3 荷重 ( $P_A$ ) - 軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) 関係 (中央部)

右列：図6-4 荷重 ( $P_A$ ) - 軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) 関係 (端部)

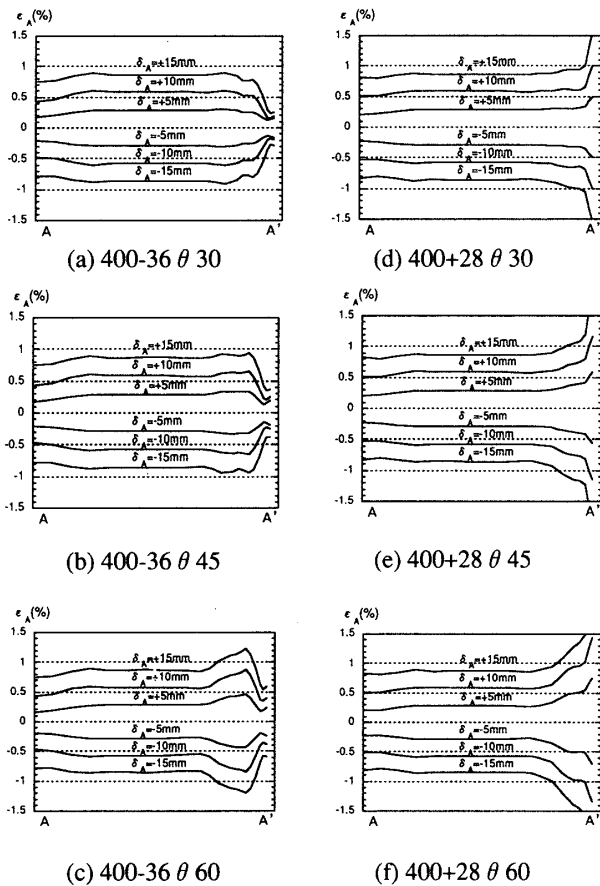


図6-5 軸方向ひずみ分布 (斜め加力モデル)

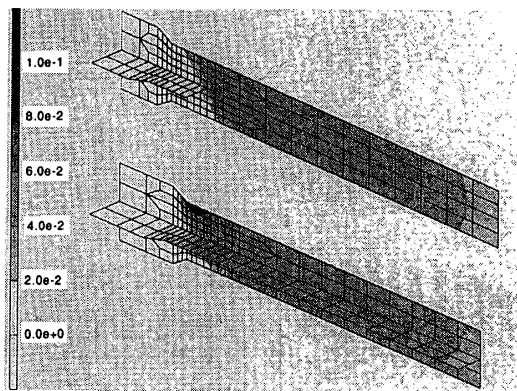


図6-6 芯材の相当塑性ひずみ分布図 (+15mm)  
(上段: 400-36θ45 下段: 400+28θ45)

献9に示す「基本モデル」の解析結果と比較することにより、材端条件の及ぼす復元力特性への影響を考える。なお、斜め加力モデルについては、フレームモデルと対応させるため、 $\theta=45^\circ$ の結果を用いる。また、基本モデル、斜め加力モデルは材長を半分にした1/2モデルであるため、軸方向変形の値を2倍している。

### 7.1 復元力特性

-タイプ、+タイプにおいて、各モデルのブレースにかかる荷重 ( $P_A$ ) と軸方向変形 ( $\delta_A$ ) の関係を図7-1(a), (b)に示す。なお、基本モデル、フレームモデルについては、

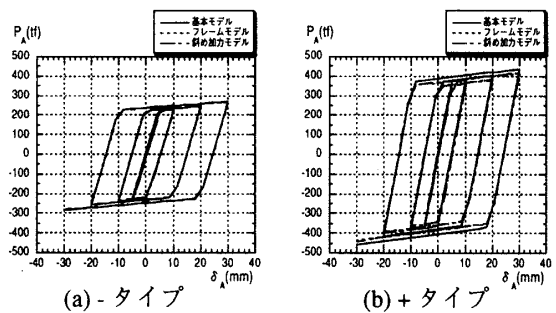


図7-1 各モデルの復元力特性

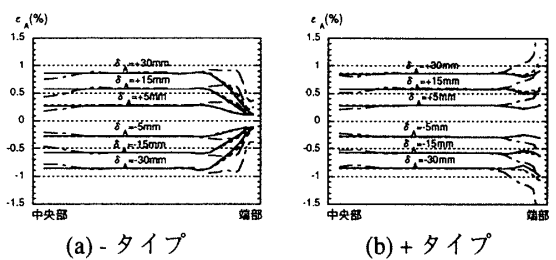


図7-2 各モデルの軸方向ひずみ分布  
(凡例は図7-1を参照)

400-36, 400+28の解析結果であり、斜め加力モデルについては、400-36θ45, 400+28θ45の解析結果である。

この図からわかるように、-タイプについては復元力の差異は全くないが、+タイプについては端部の塑性化の違いによりやや各モデルの復元力に差異が発生していることがわかる。

### 7.2 軸方向ひずみ分布

-タイプ、+タイプについて、軸方向変形 ( $\delta_A$ ) が±10, 20, 30mmのときの芯材中央部から鋼管内の端部にかけての軸方向ひずみ ( $\epsilon_A$ ) の値を図7-2(a), (b)に示す。

+タイプ、-タイプ共に、基本モデルとフレームモデルの軸方向ひずみ分布にはほとんど差がないことがわかる。一方、斜め加力モデルは端部拘束による過大な付加曲げモーメントが生じるため、他のモデルと比較して端部のひずみの値が大きい。しかし、7.1で述べたように履歴特性に及ぼす影響は非常に小さい。

## 8. 累積塑性ひずみと低サイクル疲労強度

### 8.1 地震時に発生する累積塑性ひずみ

フレームに装着されたブレースの最大変形 (±30mm) は、ほぼ層間変形1/100に対応し、その際のブレース端部の最大軸方向ひずみは、400+28L2において2~3%である。斜め加力モデルの結果より、400+28θ30の端部軸方向ひずみは、400+28θ45の端部軸方向ひずみより約15%大きく、ブレース角度によりさらに大きな軸方向ひずみが発生することが推定できる。



一方、原田、秋山は地震による累積塑性変形倍率は最大塑性変形倍率の4~5倍程度であると報告している<sup>7)</sup>。従って、アンボンドブレース端部に発生する最大塑性ひずみ ( $\epsilon_p$ ) 及び累積塑性ひずみ ( $\sum \epsilon_p$ ) の範囲は、図8-1に示す範囲を想定しておけば十分に安全サイドである。

8.2 低サイクル疲労強度と安全性の検討

鋼の低サイクル疲労特性については多くの研究があり、いずれの研究においても、塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_p$ ) と破壊に至る繰り返し回数 ( $N_f$ ) の間に次のような関係が導いている。

$$\epsilon_p = C_1 N_f^{m_1} \dots\dots\dots(1)$$

Manson<sup>1)</sup>は  $C_1 = \epsilon_f^{0.6}$   $m_1 = -0.6$

Martin<sup>2)</sup>は  $C_1 = 1/\sqrt{2}\epsilon_f^{0.6}$   $m_1 = -0.5$

Coffin<sup>3)</sup>は  $C_1 = 2\epsilon_f$   $m_1 = -0.5$

を提案しており、いずれの提案式も静破壊延性 ( $\epsilon_f$ ) の関数として与えられている。40kg 鋼~60kg 鋼では、 $\epsilon_f$  の値は鋼種によって明瞭な傾向はなく、成分等のばらつきによって0.8~1.4の値となる。

破断に至るまでの累積塑性ひずみ ( $\sum \epsilon_p$ ) は

$$\sum \epsilon_p = 2\epsilon_p N_f = 2C_1 N_f^{(1+m_1)} \dots\dots\dots(2)$$

で表わすことができる。

図8-1は Manson と Martin の提案式を用いて、 $\epsilon_f = 0.8, 1.4$  の場合の  $\sum \epsilon_p$  と  $\epsilon_p$  の関係を示している。これを見ると、鋼の破壊に至るまでの累積塑性ひずみ量は、地震によるアンボンドブレース端部の累積塑性ひずみ量と比較して一般的には十分に大きく安全であることがわかる。しかしながら、鋼材にノッチ等が存在した場合の低サイクル疲労強度については十分なデータが無く、ブレース端部のひずみ集中は極力少なくなるように努力することが望ましい。

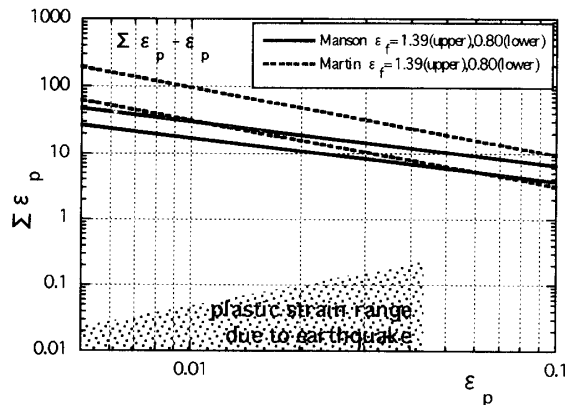


図8-1 累積塑性ひずみ ( $\sum \epsilon_p$ ) と塑性ひずみ振幅 ( $\epsilon_p$ ) の関係

9. 長尺アンボンドブレースの解析

大スパン重層建築物の最も好ましい構造形式としてメガストラクチャーが挙げられる。その耐震要素として長尺のアンボンドブレースを採用することが検討され、その一例として材長約20mのアンボンドブレースの数値解析結果の概要を紹介する。

9.1 解析モデルと解析方法

解析ケースの概要を表9-1に、解析モデル及び境界条件を図9-1に示す。解析方法については、3.に示した方法と同様である。載荷パターンを図9-2に示す。なお、水平変位300mmは層間変形角にして約1/50に相当する。また、自重による曲げモーメントの影響を安全側に評価するため、実際の自重の2倍の値を与える。

表9-1 解析ケースの概要

フレーム	B(mm)	22500
	H(mm)	11000
芯材	タイプ	+
	断面(mm)	40×550
	材質	SM520
	L(mm)	21234
鋼管	断面(mm)	□-750×750×28
	材質	SS400

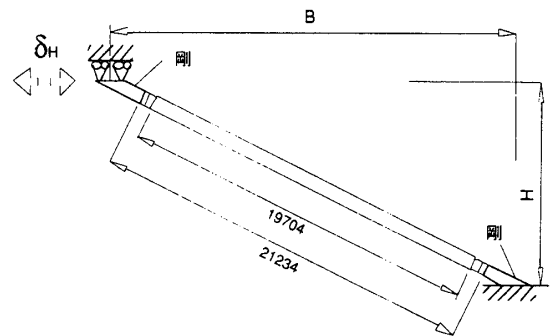


図9-1 解析モデル及び境界条件

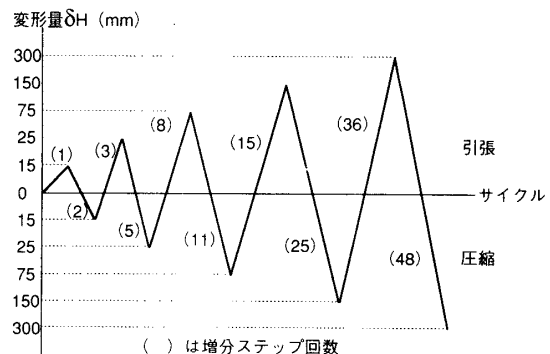
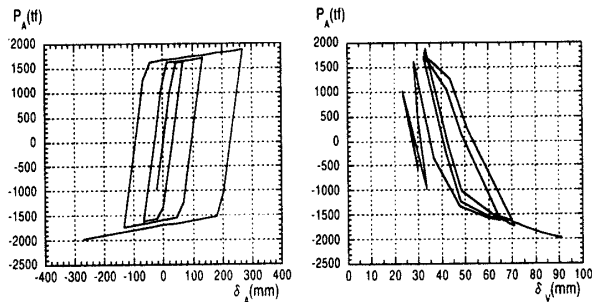


図9-2 載荷パターン

左：図9-3 荷重( $P_A$ )と軸方向変形( $\delta_A$ )の関係右：図9-4 荷重( $P_A$ )と軸外方向変形( $\delta_v$ )の関係

## 9.2 解析結果

### (復元力特性)

ブレースにかかる荷重 ( $P_A$ ) と軸方向変形 ( $\delta_A$ ), 軸外方向変形 ( $\delta_v$ ), の関係を図9-3, 図9-4にそれぞれ示す。なお, 軸外方向変形とは, ブレース中央部における, 材軸と直角方向の変形である。

図9-3をみると, 自重を本来の2倍与えるという厳しい条件下においても, 座屈現象は生じておらず安定した復元力を有している。約20mの長尺の鋼管コンクリートにおいても, 鋼管に発生している応力には余裕があり, 座屈拘束効果は充分であることがわかる。図9-4より, 軸外方向の変形は, 自重のみの場合で約30mm, また, 層間変形角1/100の場合で約70mmであり, 材長の約1/300の変形に相当する。

## 10. 結論

本研究より得られた結論を以下に示す。

- 1) フレームに装着されたアンボンドブレースの挙動について数値解析を行った結果, 復元力特性及びブレース芯材のひずみ分布は「基本モデル (無偏心単純交番載荷モデル)」とほとんど差異はない。

- 2) 端部回転を拘束した斜め加力モデルは, ブレース端部のひずみがやや大きくなるが, 復元力特性は「基本モデル」とほぼ等しく, 端部に発生する曲げモーメントが復元力特性に与える影響は少ない。
- 3) 地震によるアンボンドブレース端部の累積塑性ひずみ量は, 鋼の破壊に至るまでの累積塑性ひずみ量と比較して十分に小さい。
- 4) 約20mの長尺アンボンドブレースについても, 座屈現象は生じず安定した復元力特性を有する。

### 参考文献リスト

- 1) S.S. Manson: Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, McGrawHill, 1966
- 2) D.E. Martin: An Energy Criterion for Low Cycle Fatigue, Trans. ASME (Series D), April (1921), pp.565-571
- 3) L.F. Coffin, Jr.: Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue, Journal of Basic Engineering, Trans. ASME (Series D), December (1962), pp.533-537
- 4) 佐伯, 杉沢他: 低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 1995年6月, pp.139-148
- 5) 佐伯, 杉沢他: 低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 1995年7月, pp.159-168
- 6) 藤本, 和田, 佐伯他: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 構造工学論文集 Vol.34B, 1988年3月, pp.249~257
- 7) 原田, 秋山: エネルギー集中型混合骨組の耐震設計, 日本建築学会論文報告集, 第472号, 1995年6月, pp.57-66
- 8) 佐伯, 前田他: 実大アンボンドブレースに関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第476号, 1995年10月, pp.149-158
- 9) 佐伯, 前田他: 有限要素法によるアンボンドブレースの弾塑性解析と実験結果との比較, 日本建築学会論文報告集, 第484号, 1996年6月 (掲載予定)

(1996年3月5日原稿受理, 1996年6月20日採用決定)