

# 本庁舎建設時の振動解析概要書 (ブレース実験報告)

# 熊本市庁舎新築工事

## 4. 振動解析概要書

1978年10月

YAMASHITA ARCHITECTS&ENGINEERS, INC.

株式会社 山下設計



抜粋したページ

## 第 4 章 振動解析概要書

## 目 次

|      |              |    |
|------|--------------|----|
| § 1. | 振動解析の方針      | 1  |
| 1-1  | 解析の方針        | 1  |
| 1-2  | 評価方針         | 2  |
| § 2. | 振動の諸元        | 3  |
| 2-1  | 質点数          | 3  |
| 2-2  | 質点の諸定数       | 4  |
| 2-3  | 減衰定数         | 4  |
| § 3. | 復元力特性        | 9  |
| § 4. | 採用地震波及び入力加速度 | 17 |
| § 5. | 固有周期及び応答結果   | 33 |
| § 6. | 応答結果の検討      | 53 |
| § 7. | 参 考 資 料      | 57 |
|      | ブレース実験報告     |    |

§ 7 参考資料

ブレース架構実験報告

実験目的

ブレースにパイプを使用した架構(  型) が、ブレースの座屈後、繰返し荷重を受けても安定した復元力特性を維持できるかどうかを確認することを目的とする。

又、塑性ヒンジ理論による復元力の理論値と実験値との比較を行う。

実験方法

試験体

試験体は実物模型のもの2体である。これらは加力方法の都合上、連層型のモデルを選んだ。その形状寸法を図-1、2に示す。図-1の試験体は柱に軸力を導入しないもの(以下版1試験体)。図-2の試験体は、塑性域での軸力の影響を検討するため、柱に軸力を導入した試験体(以下版2試験体)である。軸力の導入はオイルジャッキにより図-2に示すように配置した柱1本当り4本のPC鋼棒( $\phi=29$ )に所定の軸力(PC鋼棒1本当り37.5t)を与える方法によった。柱1本当りでは $N=150t$ ( $\sigma_n=1.62t/cm^2$ )である。PC鋼棒に導入された軸力は、実験の際の加力で試験体に変形することにより変動する。本来はこの変動を防ぐため、オイルジャッキをPC鋼棒端部にセットした状態にしておき、実験中も所定の軸力を確保するよう作動させる方法がとられるが、オイルジャッキと試験体の寸法のかわあいからこの方法がとれなかったため、PC鋼棒の軸力は加力中変動してもやむを得ないとした。ただその変動量は、PC鋼棒に貼付した電気抵抗線ひずみゲージにより測定を行った。軸力の算定は次式によった。

$$N = EA\epsilon$$

E: ヤング係数  $2.0 \times 10^4 t/cm^2$  (建築学会PC計算規準による)

A:  $\phi-29$  公称断面積  $6605 cm^2$

$\epsilon$ : 測定ひずみ

使用鋼材は、フレーム部分がSM50A、ブレースがSTK41である。

素材の試験結果を、表-1に $\sigma-\epsilon$ カーブを図-3、4に示す。

加力方法

加力は、東大大型構造物試験室2000t万能型試験機により、図-1に示すように試験体層間に曲げ、およびせん断力を与える形式で行った。正負繰り返し加力は、試験機の加力ヘッドに取りつけた載荷ばりからの加力点と支点の移動によって行った。図-1に示した▲印が正加力、△印が負加力の支点である。試験体の支持条件は、加力点、支点のうち一点をローラー支持とした。繰り返しは弾性範囲内で正負1回行い、しかるのち、塑性域で正負2~3回の繰り返しを行ったあと破壊に至らしめた。

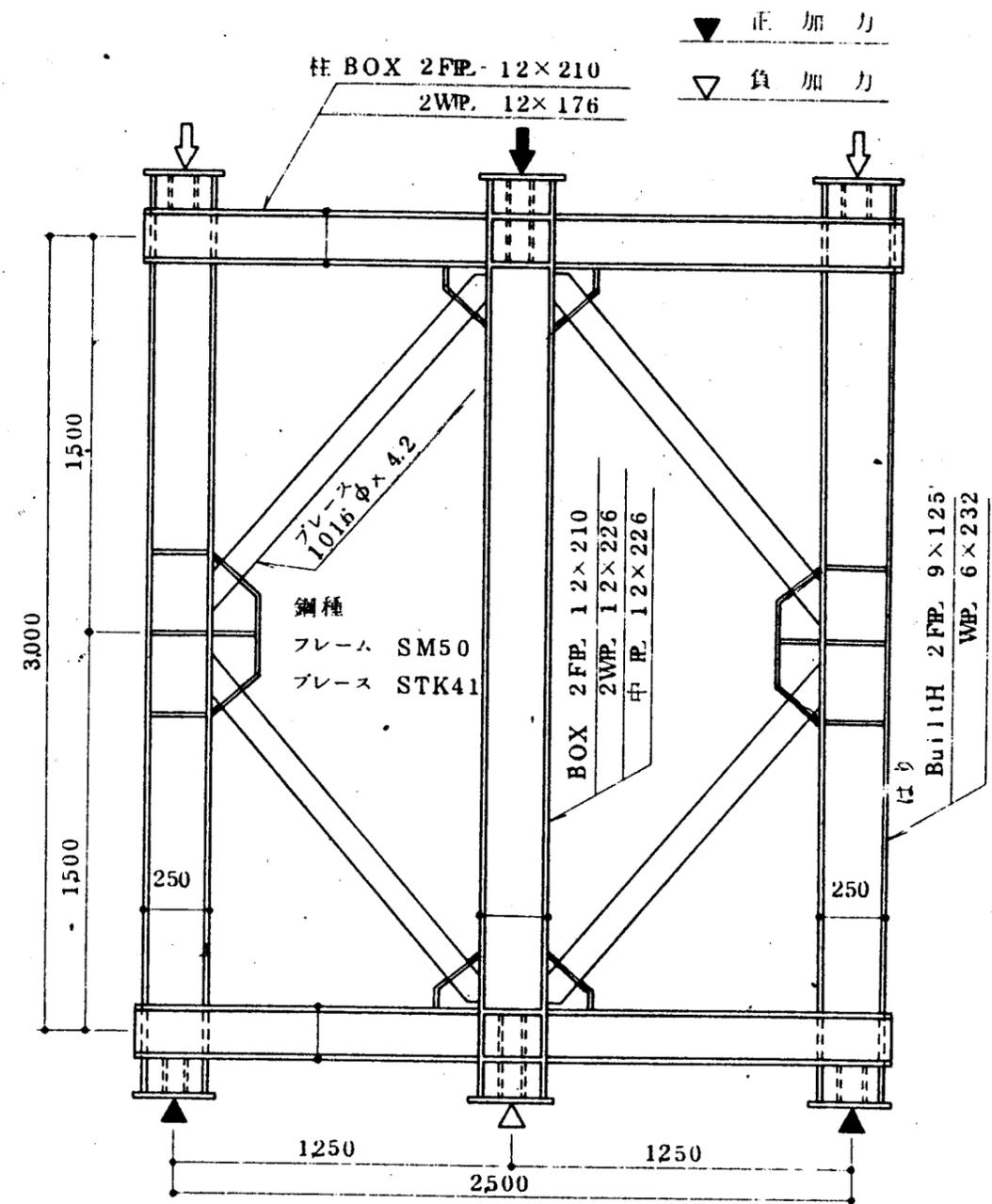


図-1. 版1. 試験体

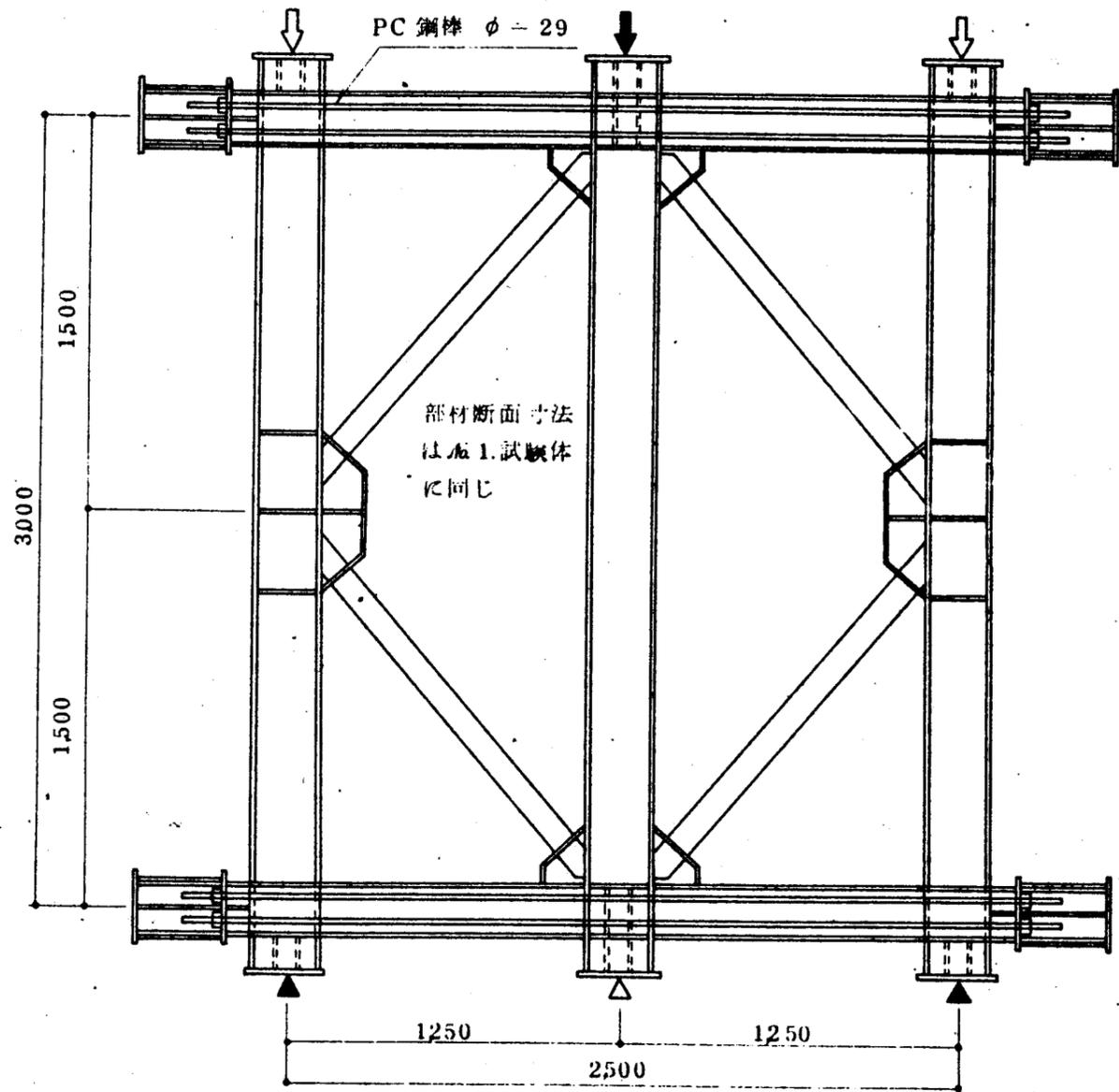
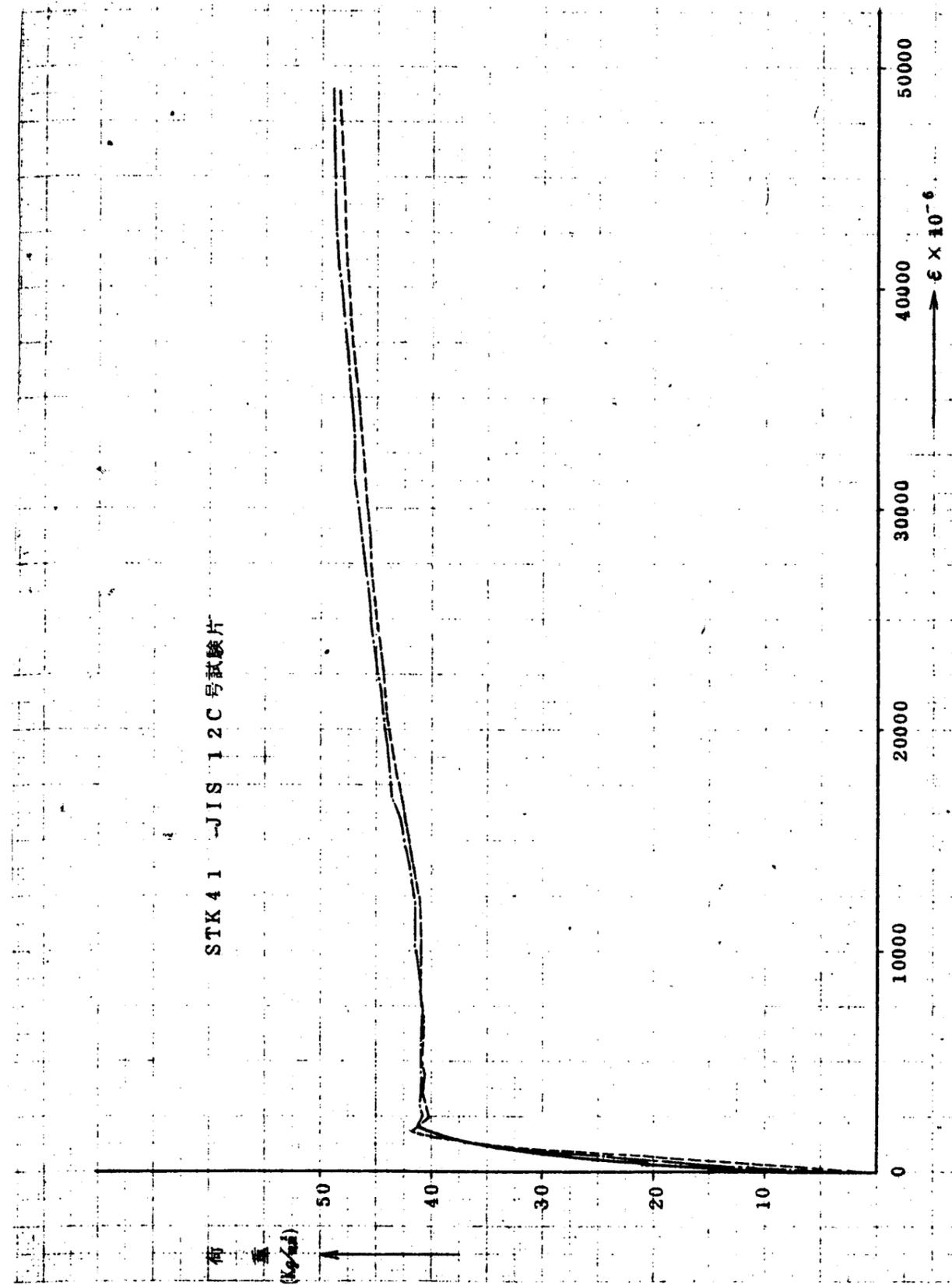
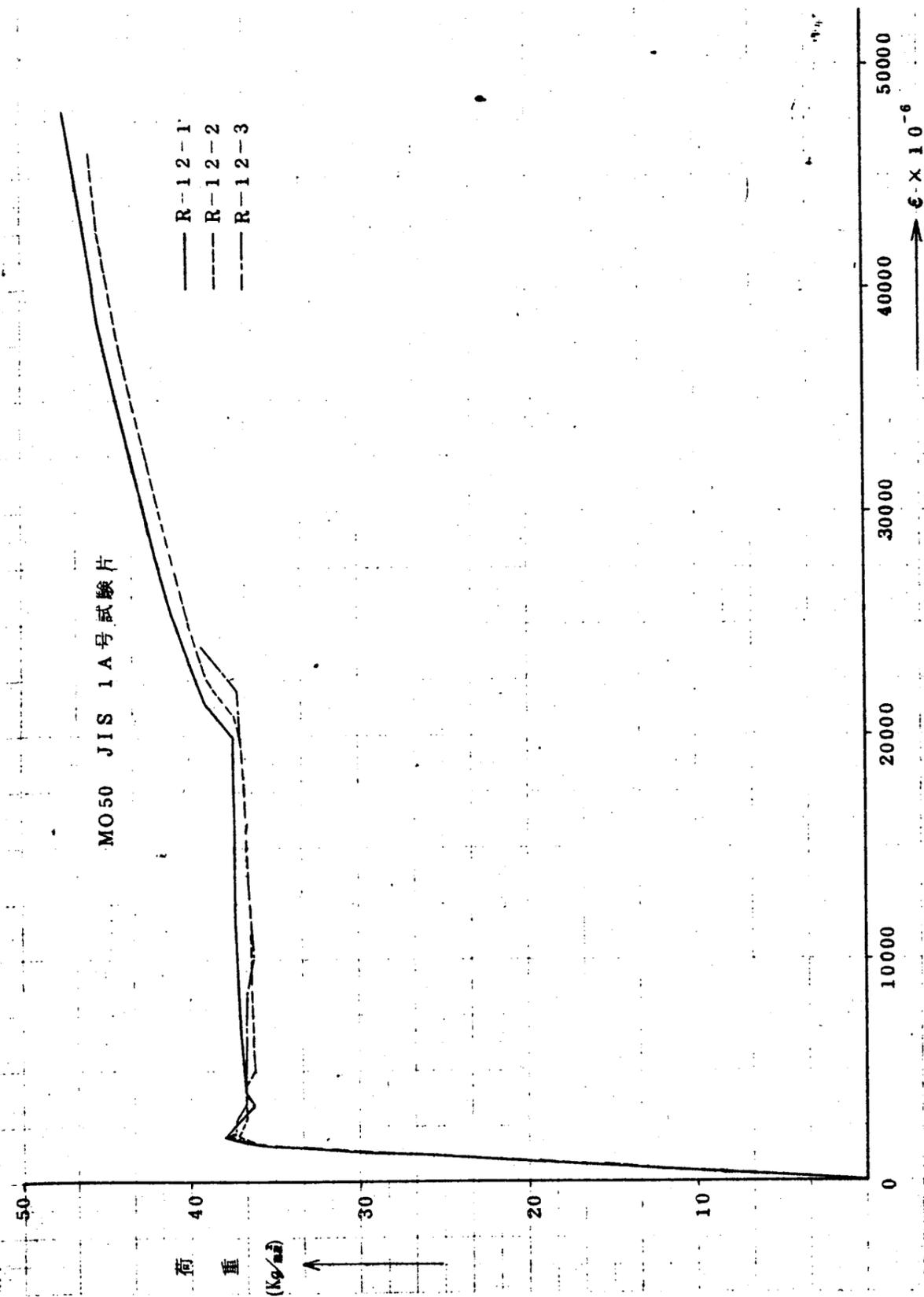


図-2 No.2試験体



STK41 ①①-ε 曲線



SM50のσ-ε曲線

### 実験結果

#### 実験経過

##### 1) 板1試験体(軸力なし)

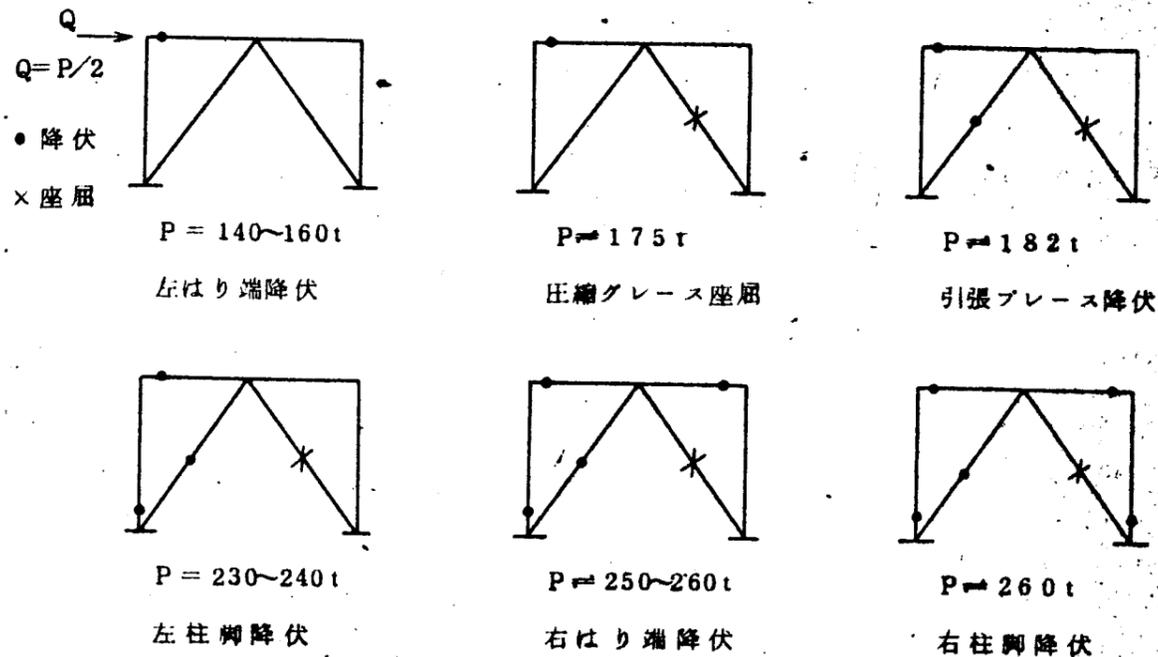
正負1回目の加力 ( $P = \pm 120t$ まで、 $P$ は試験機から与えた荷重で層せん断力 $Q$ と $Q = 2P$ の関係にある。)は、弾性的な挙動であった。正加力2回目 ( $P = 230t$ まで)において、ひずみの測定結果によると  $P = 140 \sim 160t$  の範囲で軸力の大きい梁の圧縮フランジが降伏ひずみ度(素材試験結果による)に達した。そのため剛性がやや落ちてきている。圧縮ブレースが降伏ひずみ度に達したのは  $P = 175t$ 、引張ブレースでは  $P = 182t$ であった。ブレース座屈、降伏後、剛性はしだいに落ちてきたが、荷重の低下はなく漸次増加していった。 $P = 230t$ で目視により、ブレースに若干の曲りが観察された。負加力2回目 ( $P = -250t$ まで)の最大荷重時には、はりウェブに明らかな局部座屈が観察された。

正加力3回目 ( $P = +269t$ まで、部材角  $\frac{1}{100}$ )の  $P = 230 \sim 240t$  で片側柱脚部分が降伏ひずみ度に達した。 $P = 250t$ では、はりのウェブおよびフランジの局部座屈が進行し、横座屈を生じてきた。同時にブレースの座屈も目視により顕著となった。負加力3回目で最大荷重 ( $P = -273t$ )に達したが、ブレースの面外座屈とともに、はりの局部座屈、横座屈が次第に大きくなった。

正加力4回目は、正加力3回目と同じ層間変位まで加力したが横座屈の進行が著しくなり、3回目よりも耐力低下が見られた。その影響により負加力4回目では、 $P = -235t$ に達した後、負勾配の剛性を示し崩壊に至った。

ひずみの測定結果より推察した各部材の降伏順序を以下に示す。

6.1 試験体

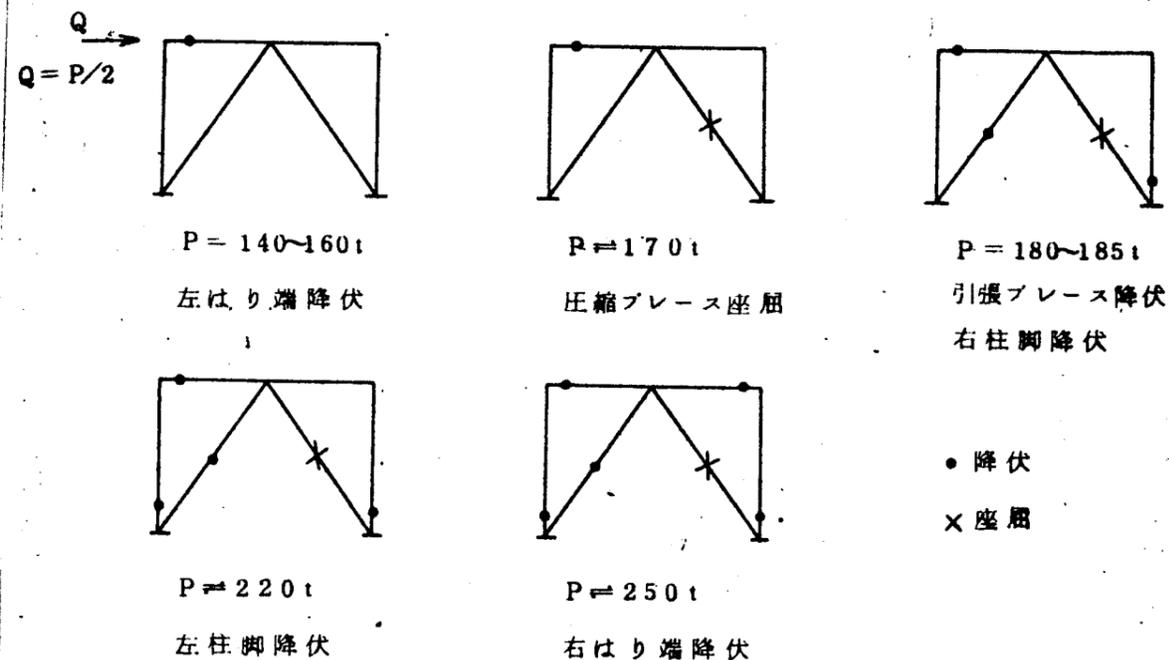


2) 6.2 試験体 (軸力あり)

正負1回目 ( $P = \pm 120t$ まで)では、6.1 試験体と同様に弾性的な挙動を示し、剛性もほぼ同じであった。正加力2回目 ( $P = 230t$ まで)の  $P = 140 \sim 160t$  ではり端が降伏、 $P = 170t$  で6.1 試験体よりもやや早く圧縮ブレースに座屈を生じた。 $P = 180 \sim 185t$  ではほぼ同時に引張ブレースと右柱脚が降伏した。6.1 試験体と比較すると導入軸力の影響により柱の降伏が、かなり早期に生じている。 $P = 220t$  で左柱脚も降伏したが層間変形はそれほど進まず、 $P = 230t$  で、6.1 試験体より4%大きい程度であった。負加力2回目 ( $P = -250t$ まで)の  $P = -240t$  ではりフランジ、ウェブの局部座屈、およびブレースの座屈が目視により観察された。正加力3回目に最大荷重 ( $P = 267t$ ) に達したが、やはり、ブレースの座屈とともに  $P = 260t$  を越したあたりから横座屈を生じてきた。負加力3回目の最大荷重 ( $P = 264t$ ) で横座屈が急速に進行し部材角  $\frac{1}{100}$  よりやや前で、若干ながら負勾配の剛性となった。正加

力4回目で  $P = 251t$  に達した後耐力低下を生じ崩壊に至った。ひずみの測定結果より推察した各部材の降伏順序を以下に示す。

6.2 試験体



実験結果

実験結果のうち初期剛性、最大耐力等を表-2に示す。

表-2 初期剛性、最大耐力

|         | 初期剛性 <sup>1)</sup><br>(t/cm) | 部材角 $\frac{1}{100}$ ( $\theta = 12.5m$ )の時の耐力(t) | 正側最大耐力<br>(t) | 負側最大耐力<br>(t) |
|---------|------------------------------|--|---------------|---------------|
| 6.1 試験体 | 495                          | 269  | 269           | 273           |
| 6.2 試験体 | 476                          | 264  | 267           | 264           |

1) 正加力1回目  $P = 100t$  の時のセカントモデュラス

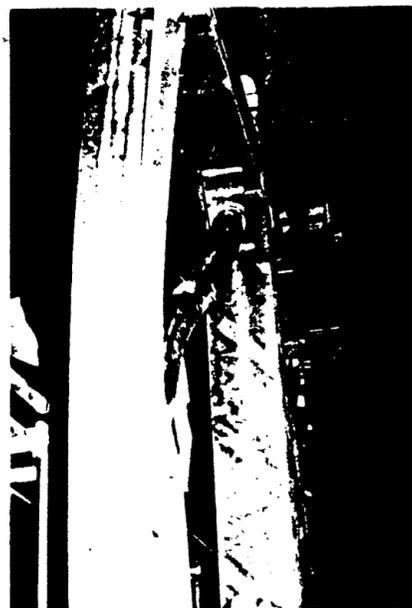
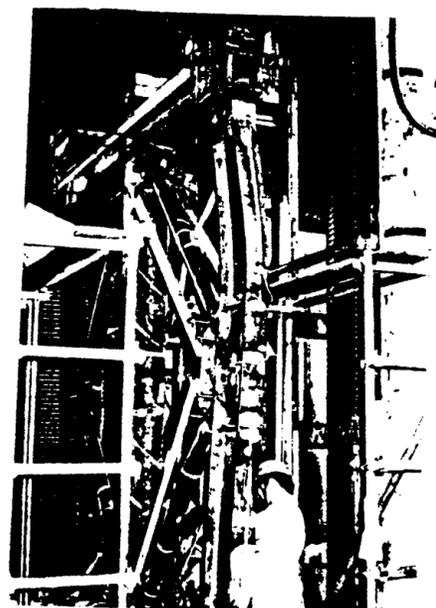


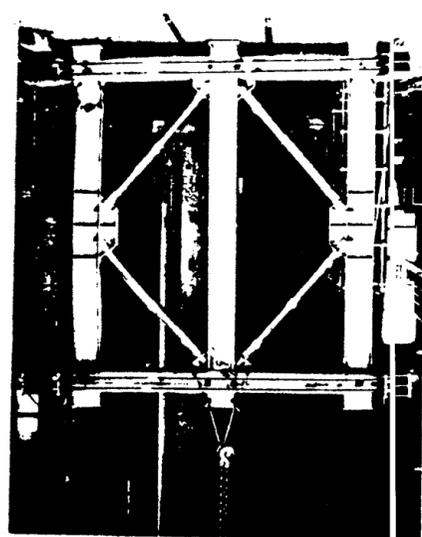
写真-5 ブレースの座屈  
(No.2 試験体)



はりの横座屈  
(No.1 試験体)



写真-7  
はりの局部座屈 (No.2 試験体)



実験終了後のNo.2 試験体  
(構造計算用)

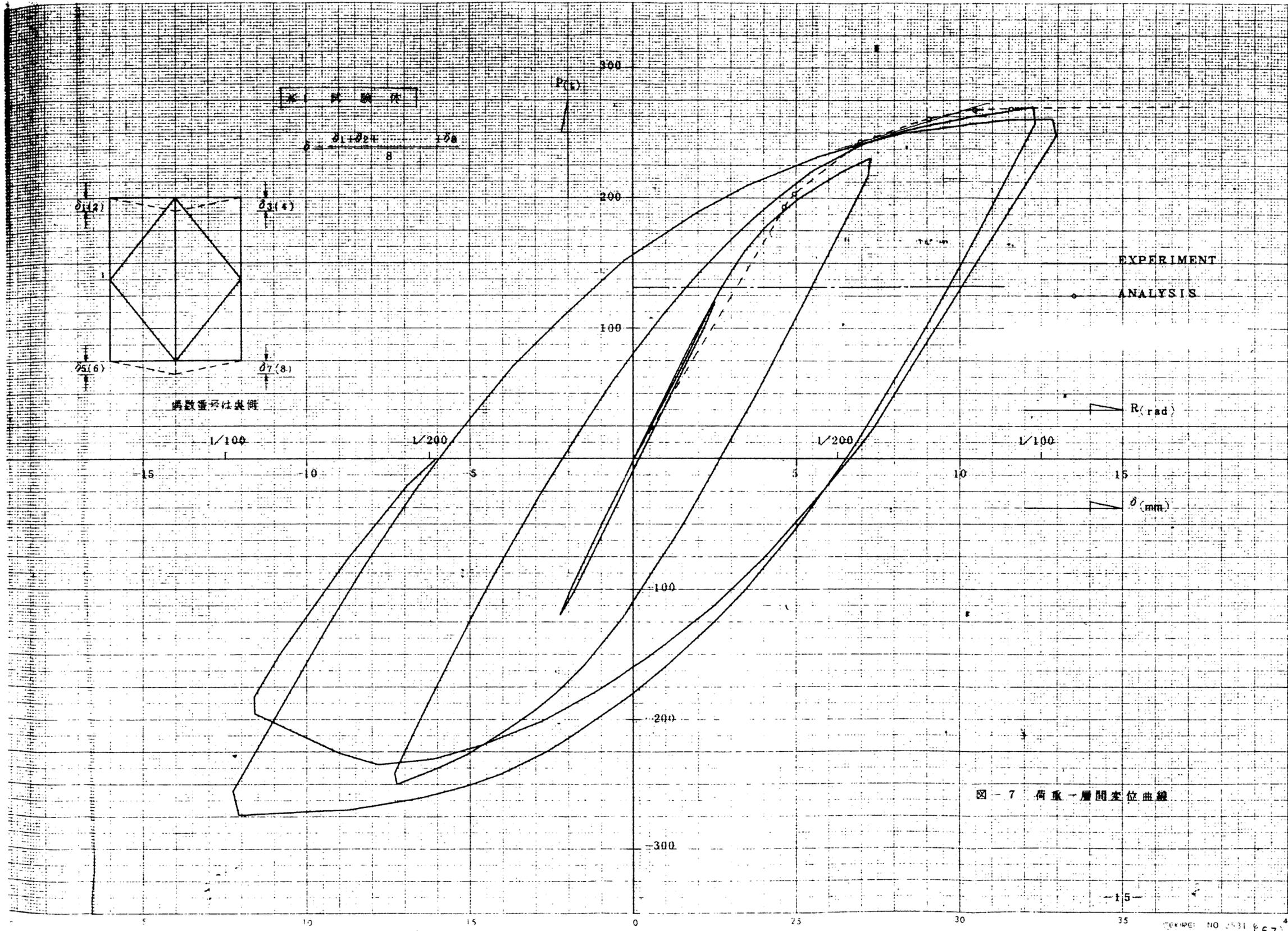


図-7 荷重-層間変位曲線

圖 2 試驗體

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_8}{8}$$

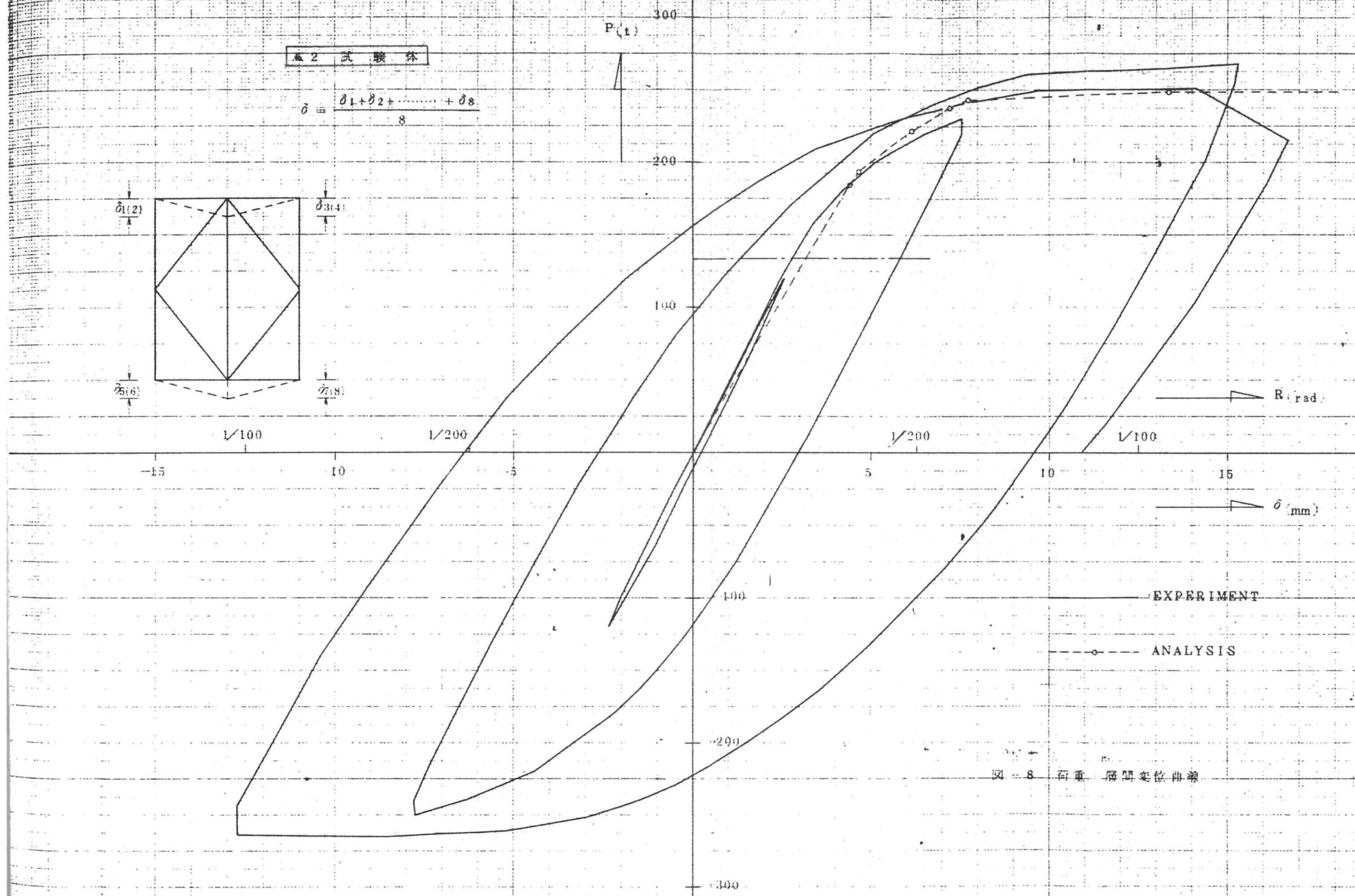
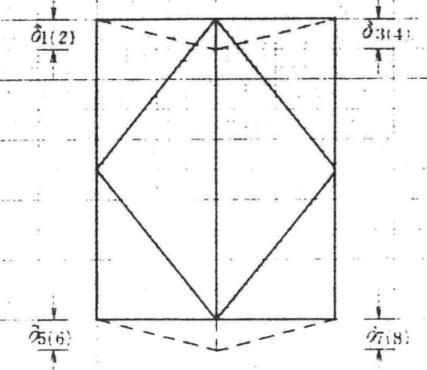


圖 8 荷重 層間變位曲線

## 数値計算

## 塑性ヒンジ理論による解析

ブレース付加構の弾塑性解析においては、圧縮ブレースの座屈後の耐力低下が大きい影響を及ぼす。ここではその低下が引張ブレースおよびフレームのひずみ硬化による耐力上昇と見合うものとして圧縮ブレースが座屈後も座屈耐力を保持すると考え、単純塑性理論にもとづくヒンジ理論による解析を行った。

## 計算仮定

1. 部材は線材として扱い、柱-はり接合部は剛接、ブレースはピン接合とする。
2. 軸力と曲げによる変形を考慮し、せん断力による変形は無視する。
3. 柱、はりの降伏条件は断面が全塑性モーメントに達した時とする。このとき軸力の影響を考慮してM-N interaction curveは鋼構造塑性設計規準案に示される次式による。なお、ひずみ硬化は無視する。

中立軸がウェブ内にある時  $(\frac{N}{N_r} < \frac{A_w}{A_w + 2A_f})$  のとき)

$$\left(\frac{M_{rc}}{M_r}\right) + \frac{\left(1 + \frac{2A_f}{A_w}\right)^2}{1 + \frac{4A_f}{A_w}} \left(\frac{N}{N_r}\right)^2 = 1$$

中立軸がフランジ内にある時  $(\frac{N}{N_r} > \frac{A_w}{A_w + 2A_f})$  のとき)

$$\frac{1 + \frac{4A_f}{A_w}}{2\left(1 + \frac{2A_f}{A_w}\right)} \left(\frac{M_{rc}}{M_r}\right) + \left(\frac{N}{N_r}\right) = 1$$

ここに

N : 作用軸方向力

N<sub>y</sub> : 降伏軸方向力M<sub>rc</sub> : 軸力を考慮した全塑性モーメントM<sub>r</sub> : 全塑性モーメントA<sub>f</sub> : 片側フランジの全断面積A<sub>w</sub> : ウェブプレートの全断面積

4. 圧縮ブレースは座屈後も耐力を保持する。座屈耐力は鋼構造設計規程に示される算定式において安全率 1.0、 $F = \sigma_y$ 、限界細長比

$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_y}}$ 、座屈長さ  $\ell_k = 0.7\ell$  とした次式による。

$$\sigma_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\lambda_1} \right)^2 \right\} \sigma_y$$

$\sigma_y$  : 素材試験結果による降伏応力度

5. 引張ブレースは  $\sigma_y$  で降伏し、ひずみ硬化を無視した完全弾塑性とする。

6. 1 試験体計算結果

- (1) ブレース引張耐力

$$N_y = \sigma_y \cdot A_w = 4.17 \times 12.85 = 53.58 \text{ t}$$

$$\sigma_y = 4.17 \text{ t/cm}^2 \quad (\text{素材試験結果})$$

- (2) ブレース座屈耐力

$$N_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\lambda_1} \right)^2 \right\} \sigma_y \cdot A_w$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_y}} = 70.46$$

$$\lambda = \frac{\ell_k}{r} = \frac{0.7 \sqrt{150^2 + 125^2}}{3.45} = 39.56$$

$$N_{cr} = \left\{ 1 - 0.4 \times \left( \frac{39.56}{74.24} \right)^2 \right\} \times 4.17 \times 12.85 = 46.83 \text{ t}$$

- (3) はりの全塑性モーメント

$$N_y = \sigma_y \cdot A_c = 3.76 \times 36.42 = 136.94 \text{ t}$$

$$M_r = \sigma_y \left( \frac{A_w}{4} + A_f \right) h = 3.76 (13.92/4 + 11.25) \times 25 = 138.4 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$\sigma_y = 3.76 \text{ t/cm}^2 \quad (\text{素材試験結果})$$

軸力を考慮した全塑性モーメント

i) 中立軸がウェブ内  $\left( \frac{N}{N_y} < \frac{A_w}{A} \right) \quad A = A_w + 2A_f$

$$\frac{M_{rc}}{M_r} + 1.617 \left( \frac{N}{N_y} \right)^2 = 1$$

ii) 中立軸がフランジ内  $\left( \frac{N}{N_y} > \frac{A_w}{A} \right)$

$$0.809 \left( \frac{M_{rc}}{M_r} \right) + \left( \frac{N}{N_y} \right) = 1$$

- (4) 柱の全塑性モーメント

$$N_y = \sigma_y \cdot A_c = 3.76 \times 92.64 = 348.33 \text{ t}$$

$$M_r = \sigma_y \left( \frac{A_w}{4} + A_f \right) h = 3.76 \times (4.224/4 + 25.2) \times 20$$

$$= 268.9 \text{ t}\cdot\text{m}$$

軸力を考慮した全塑性モーメント

i) 中立軸ウェブ内  $\left( \frac{N}{N_y} < \frac{A_w}{A} \right)$

$$\frac{M_{rc}}{M_r} + 1.420 \left( \frac{N}{N_y} \right)^2 = 1$$

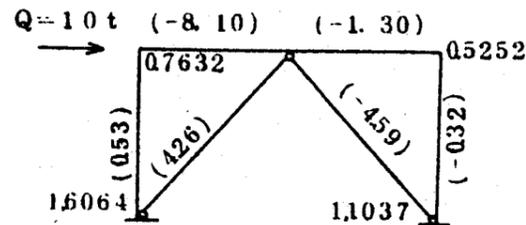
ii) 中立軸フランジ内  $\left( \frac{N}{N_y} \geq \frac{A_w}{A} \right)$

$$0.722 \left( \frac{M_{rc}}{M_r} \right) + \left( \frac{N}{N_y} \right) = 1$$

なお上記の  $\frac{M_{rc}}{M_r}$ 、 $\frac{N}{N_y}$  の interaction curve を図-20 に示した。

以下に第1試験体の降伏過程を追った計算結果を示す。

(1) STATE - 1



$$\bar{\delta}_1 = 0.04798 \text{ (cm)}$$

$$\bar{k}_1 = 20842 \text{ (t/cm)}$$

STATE - 1 の応力状態で各部材の降伏までの安全率 ( $\psi$ ) を計算すると次のようになる。

(a) プレース

圧縮  $\psi_c = N_c / 4.59 = 4.683 / 4.59 = 1.0203$

引張  $\psi_t = N_t / 4.26 = 5.358 / 4.26 = 1.2577$

(b) はり

左端  $N_t = 8.10t$   $M = 0.763t \cdot m$  よりこの応力状態では

$N = 10.613M$  の関係式が得られる。この直線と軸力を考慮した  $M-N$  interaction curve の交点が  $M_{rc}$  となる。

この場合は中立軸がフランジ内であるので

$$\begin{cases} N = 10.616 M_{rc} \\ 0.809 \left( \frac{M_{rc}}{M_p} \right) + \left( \frac{N}{N_p} \right) = 1 \end{cases}$$

の連立方程式を解いて、 $M_{rc} = 7.40t \cdot m$  が得られる。したがって

$$\psi_c = M_{rc} / 0.7632 = 7.35 / 0.7632 = 9.696$$

右端 以下同様の方法により  $M_{rc} = 12.75t \cdot m$

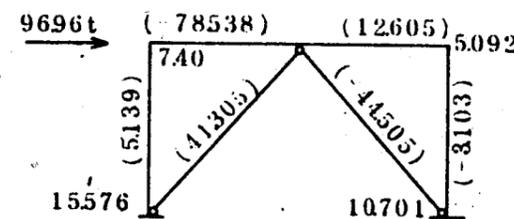
$$\psi_t = 12.75 / 0.5252 = 24.276$$

(c) 柱

左柱脚  $\psi_c = 25.95 / 1.6064 = 16.154$

右柱脚  $\psi_t = 25.95 / 1.1037 = 23.421$

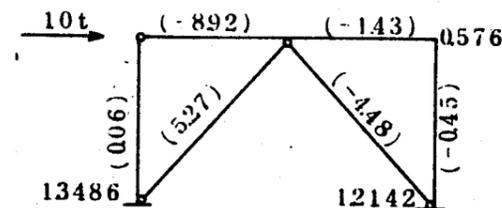
したがって左はり端が降伏する。降伏時の応力状態は次のようになる。



$$Q = 10 \times 9696 = 9696 \text{ (t)}$$

$$\delta_1 = 0.04798 \times 9696 = 0.4652 \text{ (cm)}$$

(2) STATE - 2



$$\bar{\delta}_2 = 0.05283 \text{ (cm)}$$

$$\bar{k}_2 = 18930 \text{ (t/cm)}$$

(a) プレース

圧縮  $\psi_c = (4.683 - 4.4505) / 4.48 = 0.5190$

引張  $\psi_t = (5.358 - 4.1305) / 5.27 = 2.3292$

(b) はり

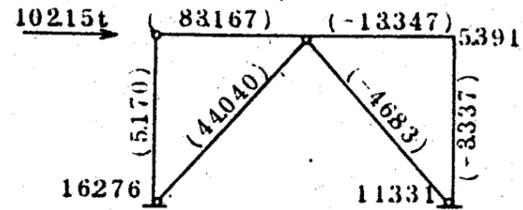
右端  $\psi_c = (1.27 - 5.09) / 0.576 = 13.2118$

(c) 柱

左柱脚  $\psi_c = (25.97 - 15.576) / 13.484 = 7.7084$

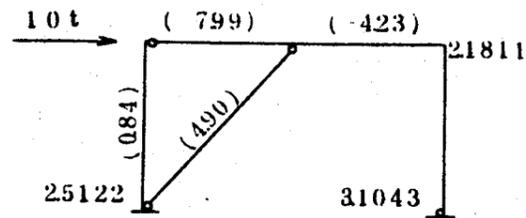
右柱脚  $\psi_t = (25.95 - 10.701) / 12.142 = 12.5589$

したがって圧縮プレースが座屈する。



$Q_2 = 10 \times 0.5190 = 5.19 \text{ (t)}$   
 $\delta_2 = 0.05283 \times 0.519 = 0.0274 \text{ (cm)}$

(3) STATE - 3



$\bar{\delta}_3 = 0.1051 \text{ (cm)}$   
 $\bar{K}_3 = 95.145 \text{ (t/cm)}$

(a) ブレース

引張  $\epsilon \gamma_1 = (5358 - 4404) / 490 = 1.9469$

(b) はり

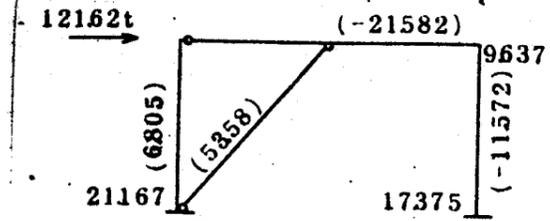
右端  $\epsilon \gamma_2 = (1290 - 5391) / 21811 = 3.4428$

(c) 柱

左柱脚  $\epsilon \gamma_3 = (2595 - 16276) / 25122 = 3.8508$

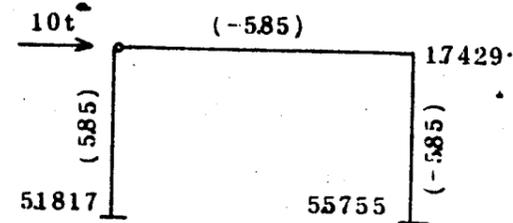
右柱脚  $\epsilon \gamma_4 = (2580 - 11331) / 31043 = 4.6610$

したがって引張ブレースが降伏



$Q_4 = 10 \times 1.9469 = 19.469 \text{ (t)}$   
 $\delta_4 = 0.1051 \times 1.9469 = 0.2046 \text{ (cm)}$

(4) STATE - 4



$\bar{\delta}_1 = 0.2296 \text{ (cm)}$   
 $\bar{K}_1 = 43560 \text{ (t/cm)}$

(b) はり

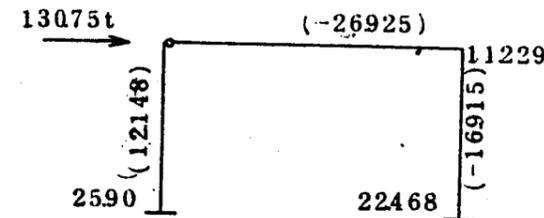
右端  $\epsilon \gamma_2 = (1265 - 9637) / 17429 = 1.7287$

(c) 柱

左柱脚  $\epsilon \gamma_3 = (2590 - 21167) / 51817 = 0.9134$

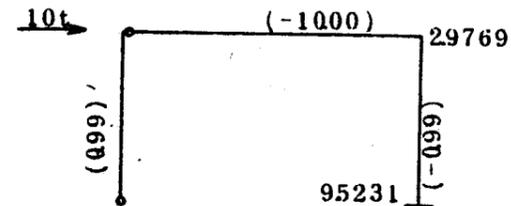
右柱脚  $\epsilon \gamma_4 = (2575 - 17375) / 55755 = 1.5021$

したがって左柱脚が降伏する。



$Q_5 = 10 \times 0.9134 = 9.134 \text{ (t)}$   
 $\delta_5 = 0.2296 \times 0.9134 = 0.2097 \text{ (cm)}$

(5) STATE - 5



$\bar{\delta}_2 = 0.3921 \text{ (cm)}$   
 $\bar{K}_2 = 25.03 \text{ (t/cm)}$

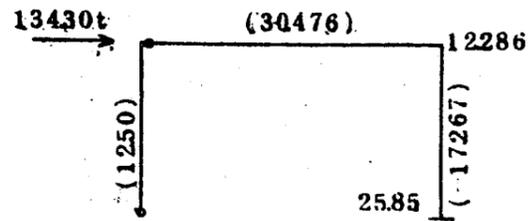
(b) はり

右端  $\epsilon \gamma_2 = (1270 - 11229) / 29769 = 0.4941$

(c) 柱

右柱脚  $\delta_v = (25.85 - 22.468) / 9.5231 = 0.3551$

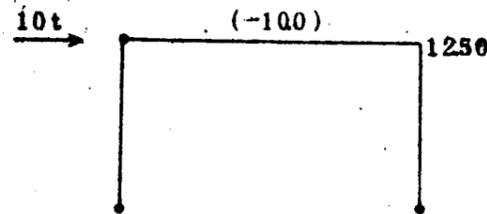
したがって右柱脚が降伏する。



$Q_s = 10 \times 0.3551 = 8.551 (t)$

$\delta_s = 0.3921 \times 0.3551 = 0.1392 (cm)$

(6) STATE - 6



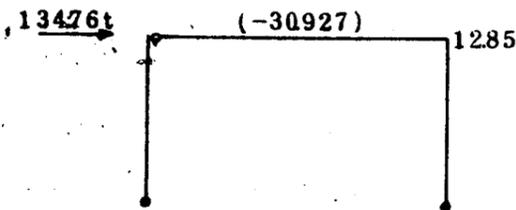
$\bar{\delta}_s = 25.145 (cm)$

$\bar{K}_s = 3.977 (t/cm)$

(b) はり

右端  $\delta_v = (12.85 - 12.286) / 12.50 = 0.0451$

はり右端降伏後、架構はメカニズムを形成する。



$Q_s = 10 \times 0.0451 = 0.451 (t)$

$\delta_s = 25.145 \times 0.0451 = 0.1134 (cm)$

したがって架構の最大荷重およびその時の変形は次のように求められる。

$\sum_{i=1}^n Q_i = 134.76 (t)$

$\sum_{i=1}^n \delta_i = 11.60 (cm)$

結果の検討

1. ブレースの細長比は、 $\ell_k = 0.7 \ell$ としたとき、 $\lambda = 39.5$ であったが、ブレースの座屈後も層間変位  $1/100$  までは安定した復元力を示した。
2. 梁フランジ及びウェブに生じた局部座屈が進行し、さらに梁の横座屈が生じて最終耐力に達した。  
この時、ブレースの横座屈も目立った。  
なお、ブレースの局部座屈は生じていない。
3. 復元力の計算値と実験値は比較的良く一致している。
4. 柱の軸力の有無による影響は少ない。

以上の結果を参考にして実施設計に於いては以下の点に注意した。

1. 梁の局部座屈に対しては「高層建築技術指針」による巾厚比の制限を採用する。
2. 梁の横座屈に対しては「鋼構造塑性設計指針」により補助材等を配置する。
3. ブレース端部の固定度を高めるため、ブレースの交点には直交方向に小梁を配置する。
4. 実験ではブレースの局部座屈は生じていなかったが、パイプの巾厚比は「高層建築技術指針」を目標とする。

5. 復元力特性は一つの部材が降伏後も初期剛性の約50%の勾配を有している。