

## 4. 亜鉛めっき橋実験Ⅱの解析

### 4. 1 はじめに

亜鉛めっき橋実験Ⅱおよび解析の目的は、溶融亜鉛めっき中におけるI桁のねじれ変形の性状と応力状態を調べることであった。I桁を溶融亜鉛めっきすると、腹板とフランジの熱容量の差(温度差)に起因する温度応力により、腹板が局部的に座屈する。この結果腹板が局部的に面外変形すると共に、I桁全体がねじれ変形を起こす。この変形は、昇温が進行しフランジと腹板の温度差がなくなっても残留する。この状態におけるI桁各部の応力は、座屈している部分を除くと、外力により変形に相当する強制変位を与えた場合の応力と同等であると考えることができる。実験によりこのねじれ変形を測定し、測定結果を基に解析により応力状態を調べるものとした。

実験では、フランジと腹板の熱容量の差を大きくすることにより変形を大きく生じさせるために、フランジ厚( $t=40$ )と腹板厚( $t=9$ )の差を通常より大きくした。桁の両端に取り付けた鉛直ボールの相対的な傾きを測定し、ねじり角とするものとした。解析は、I桁の有限要素モデルに実験で得られるねじり角を強制変位として与え、溶融亜鉛めっき時の $\sigma-\varepsilon$ 曲線を用いた弾塑性解析を行うことにより、各要素に発生する応力を求めるものとした。

ところが、溶融亜鉛めっき実験においては、実験中に特に目立った変形は発生せず、ねじれ角は測定できなかった。ただし、冷却の過程において面外変形が発生した。結局、実験データとして得られたのは、実験前後の腹板の平面度とフランジの角度および、それらから計算で求められた腹板とフランジの相対変位量であった。

相対ねじり角が測定できなかったことから、当初の解析方針を変更する必要性が生じた。亜鉛めっき中の熱応力を解析する方法としては、亜鉛浸せきから引き上げまで時間間隔を区切って段階的に解析する方法があるが、残留応力の評価方法など困難な問題があり、必ずしも今回の実験が正確に再現されるとは限らない。計算量も膨大となる。今回の実験の目的は基本的なデータを得ることにあり、亜鉛めっき中に発生する応力度が如何ほどであるかが把握できれば良いものと考えられた。そこで、実験中の応力を解析することにはならないが、実験前後の相対変位を実験中における塑性変位の結果生じたものと見なして、実験中の発生応力度を計算するものとした。

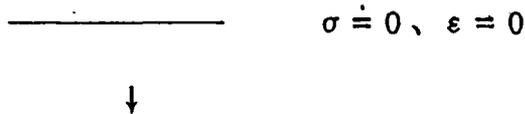
#### 4. 2 解析方針

解析ケースは2ケース（No. A-水冷，No. C-水冷）とする。解析手法は3次元の有限要素法とする。

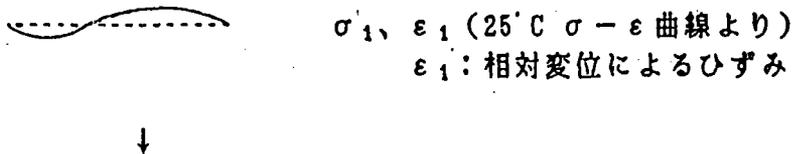
解析手順は以下に示すとおりであるが、相対変位は全て亜鉛めっき中の塑性変形による残留ひずみであると仮定する。つまり、亜鉛めっき中に塑性ひずみ ( $\epsilon_2$ ) が発生し、それが冷却過程を経て残留ひずみ ( $\epsilon_1$  = 相対変位) として残ったものとする。

亜鉛めっき中に発生する応力度は  $\sigma_2$  とする。

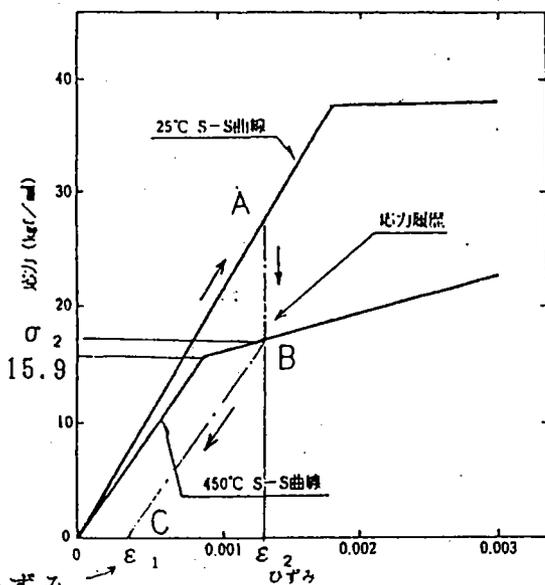
##### ① めっき前モデル



##### ② 冷却後の相対変位を強制変位として与える



③  $\epsilon_1$  はすべて塑性ひずみと仮定し、( $\sigma = 0, \epsilon = \epsilon_1$ ) から450°Cの  $\sigma - \epsilon$  曲線に平行線を引き、塑性域線との交点 ( $\sigma_2, \epsilon_2$ ) を溶融亜鉛めっき中の応力とひずみとする。めっき時の応力とひずみの履歴は  $O \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$  と考える。



残留ひずみ  $\rightarrow$

450°Cに加熱した場合の応力履歴曲線の一例

使用したSM50B材の機械的性質

温 度	機 械 的 性 質 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	ヤング率	降伏点	N値(≤0.003)
25°C	21,000	37.8	190
450°C	17,700	15.9	3,300

歪み応力基本式

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x)$$

NASTRAN 解析結果より STRAIN  $\epsilon_x, \epsilon_y$  を取りだし,  $e_{xn}, e_{yn}$  を次式より求める.

$$e_{xn} = \frac{1}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y)$$

$$e_{yn} = \frac{1}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x)$$

同様に, NASTRAN 解析結果より CURVATURE  $\phi_x, \phi_y$  を取りだし,  $e_{xm}, e_{ym}$  を次式より求める. ( $t$  は板厚)

$$e_{xm} = \frac{1}{1 - \nu^2} (\phi_x + \nu \phi_y) \frac{t}{2}$$

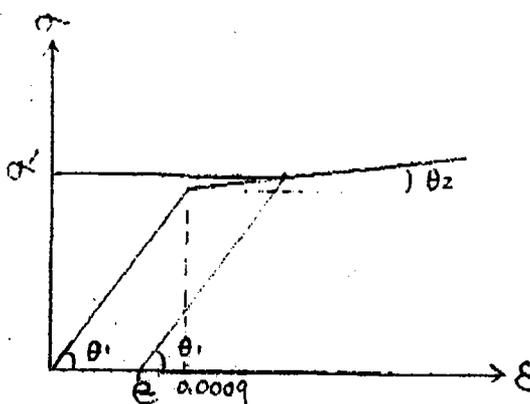
$$e_{ym} = \frac{1}{1 - \nu^2} (\phi_y + \nu \phi_x) \frac{t}{2}$$

板の上下縁の歪み  $e_{xu}, e_{xl}, e_{yu}, e_{yl}$  を求める.

$$e_{xu} = e_{xn} + e_{xm} \quad e_{xl} = e_{xn} - e_{xm}$$

$$e_{yu} = e_{yn} + e_{ym} \quad e_{yl} = e_{yn} - e_{ym}$$

この  $e_{xu}, e_{xl}, e_{yu}, e_{yl}$  に対応する  $\sigma_{xu}', \sigma_{xl}', \sigma_{yu}', \sigma_{yl}'$  を応力履歴曲線より求める.



$$\tan(\theta_1) = 1.77 \times 10^6$$

$$\tan(\theta_2) = 3.3 \times 10^5$$

せん断の歪み応力基本式

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \gamma_{xy}$$

NASTRAN 解析結果より  $\gamma_{xy}$  を取りだし、 $e_{xy}$  を求める。

$$e_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2(1+\nu)}$$

同様に、NASTRAN 解析結果より CURVATURE  $\phi_{xy}$  を取りだし、 $e_{xym}$  を次式より求める。(tは板厚)

$$e_{xym} = \frac{1}{2(1+\nu)} \left( \phi_{xy} \cdot \frac{t}{2} \right)$$

板の上下縁の歪み  $e_{xyu}$ ,  $e_{xyl}$  を求める。

$$e_{xyu} = e_{xy} + e_{xym} \quad e_{xyl} = e_{xy} - e_{xym}$$

この  $e_{xyu}$ ,  $e_{xyl}$  に対応する  $\sigma_{xyu} (= \tau_{xy}'u)$ ,  $\sigma_{xyl}' (= \tau_{xy}'u)$  を応力履歴曲線より求める。

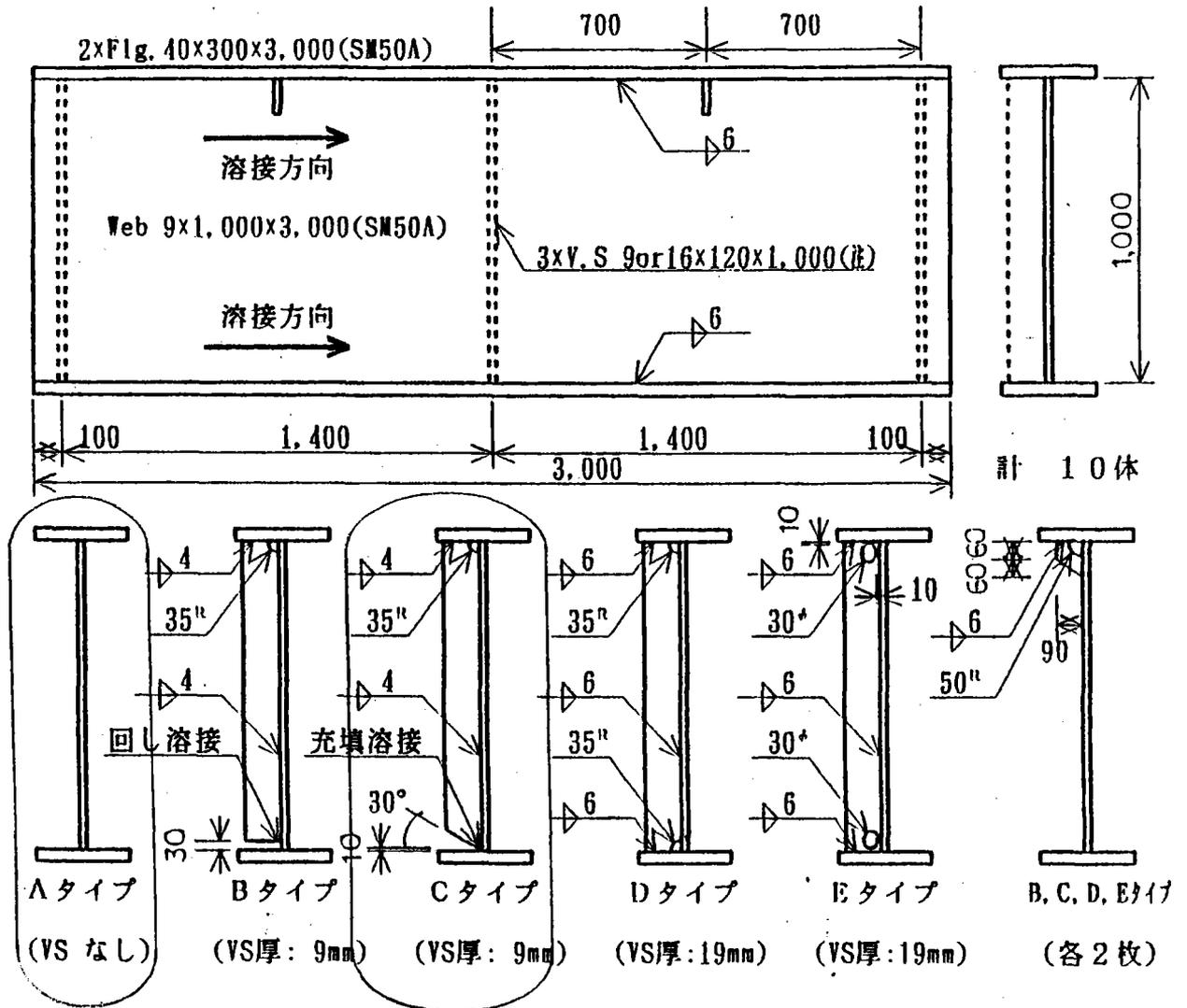
主応力  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_2'$  次式による。

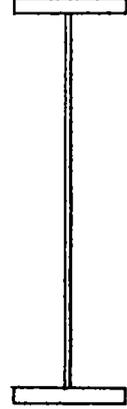
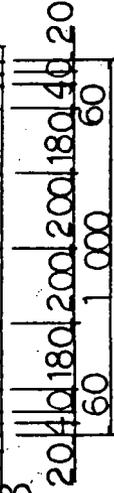
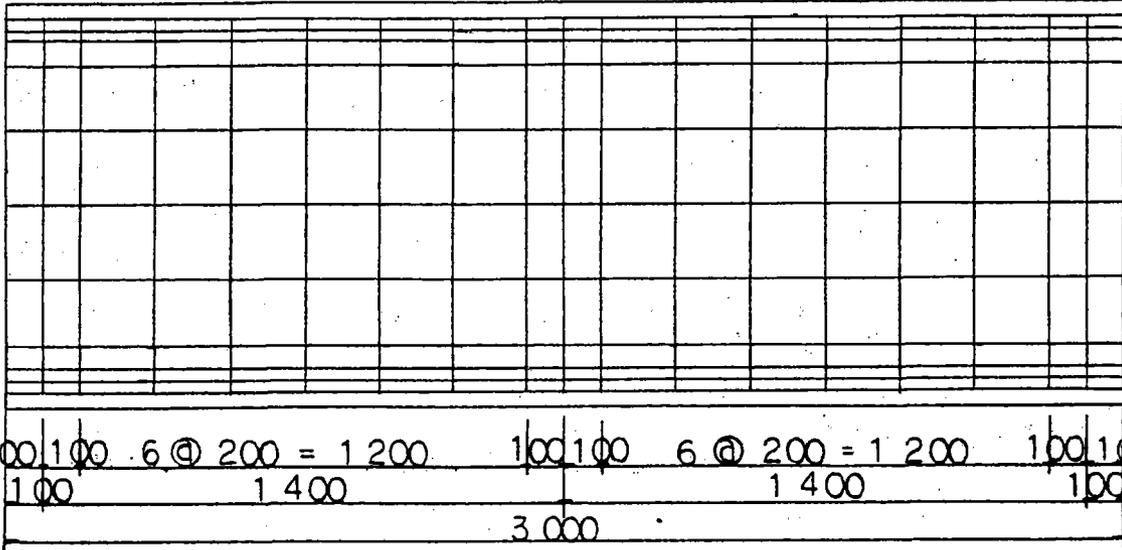
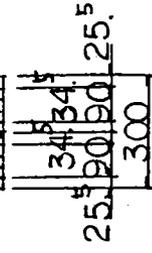
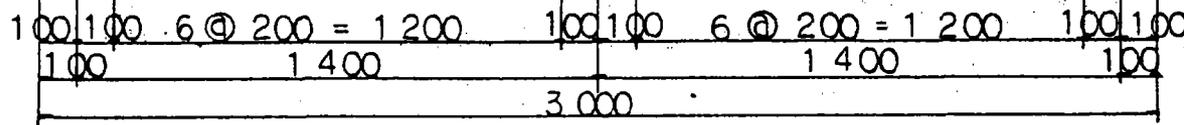
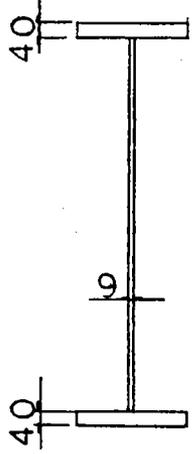
$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \end{aligned} \right\}$$

### 4.3 解析モデルと強制変位量

溶融垂鉛メッキ試験体のうち次の2つについて発生応力を検討した。

- No. A - 水冷
- No. C - 水冷

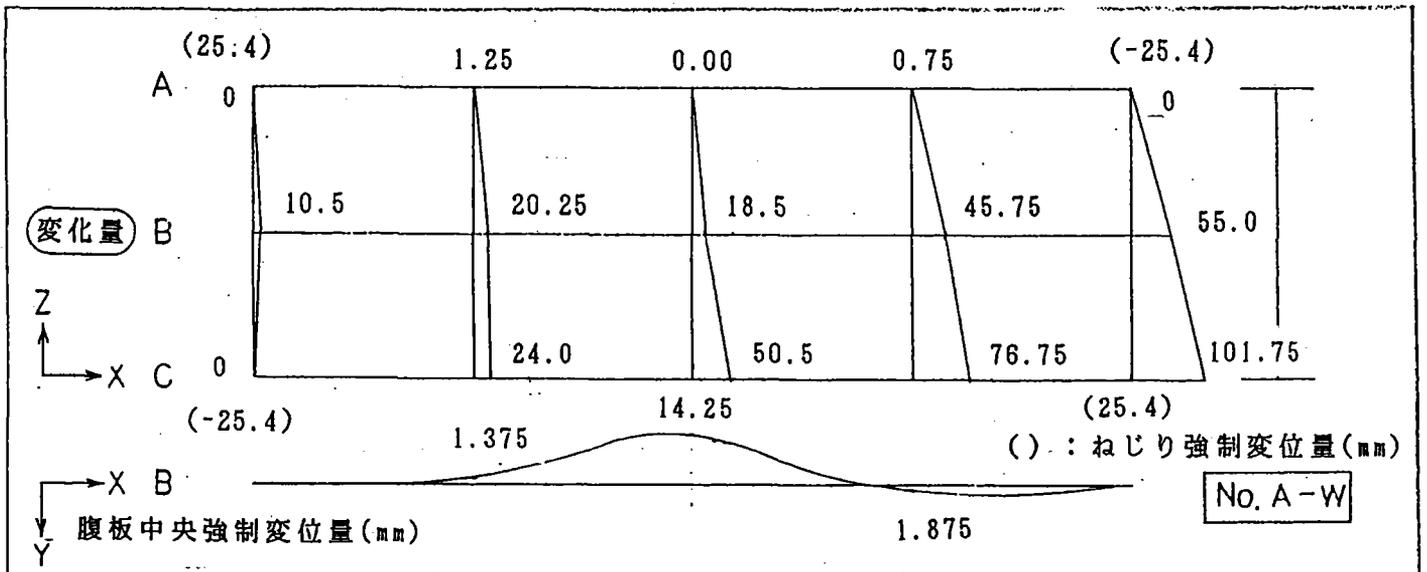
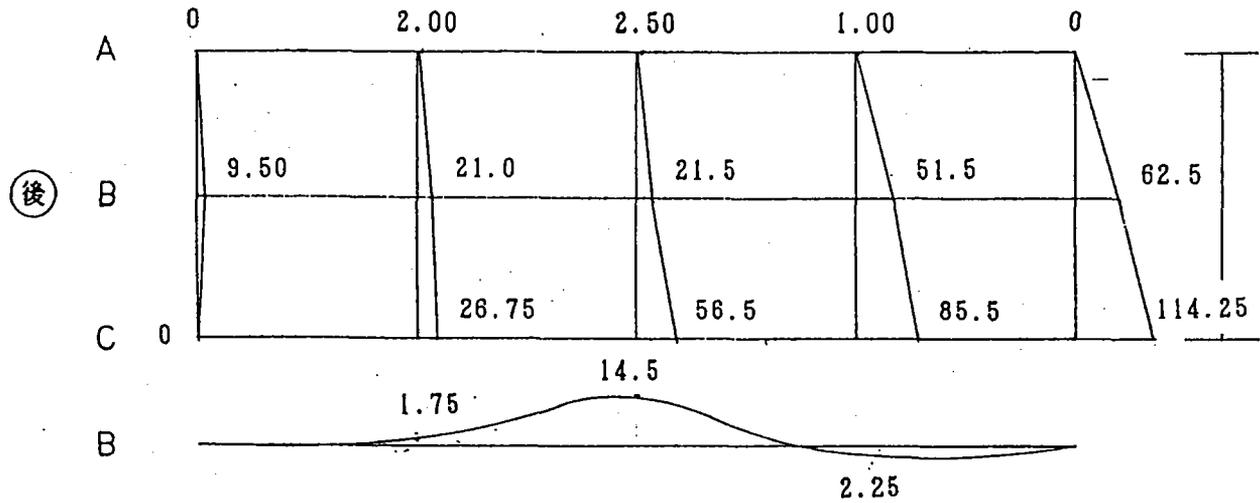
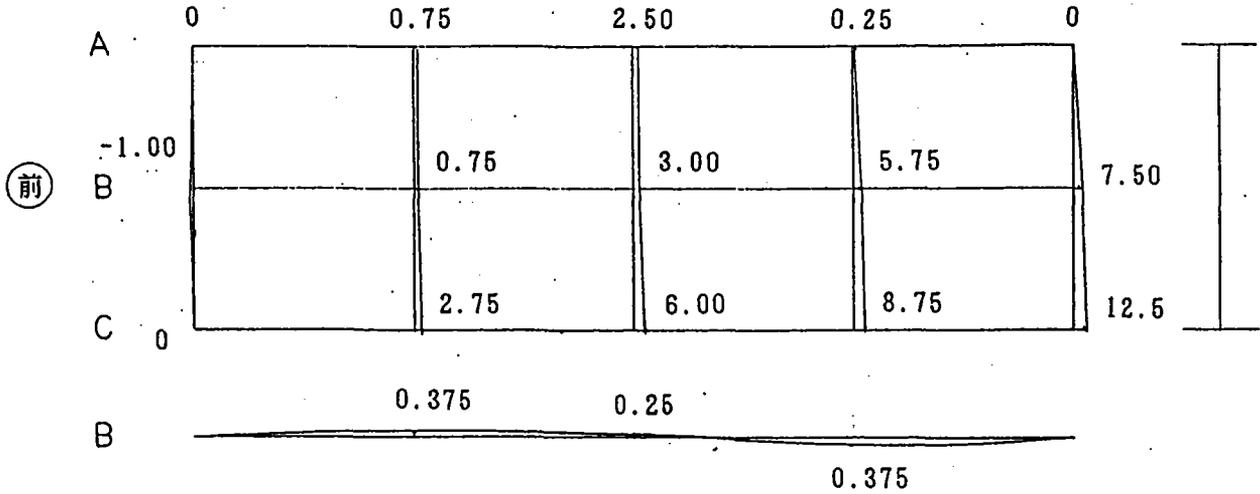


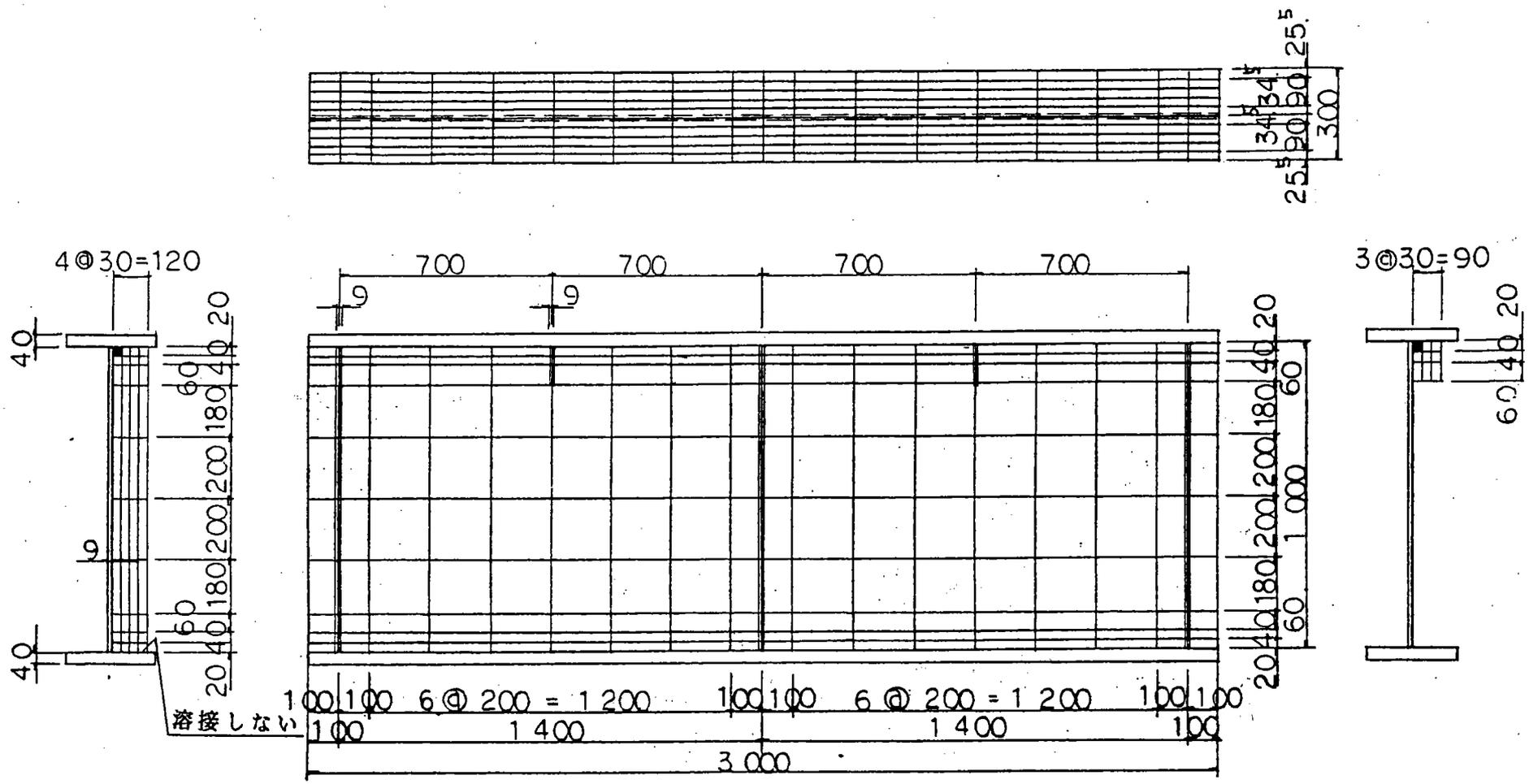


A-W

面外変形量

①                      ②                      ③                      ④                      ⑤

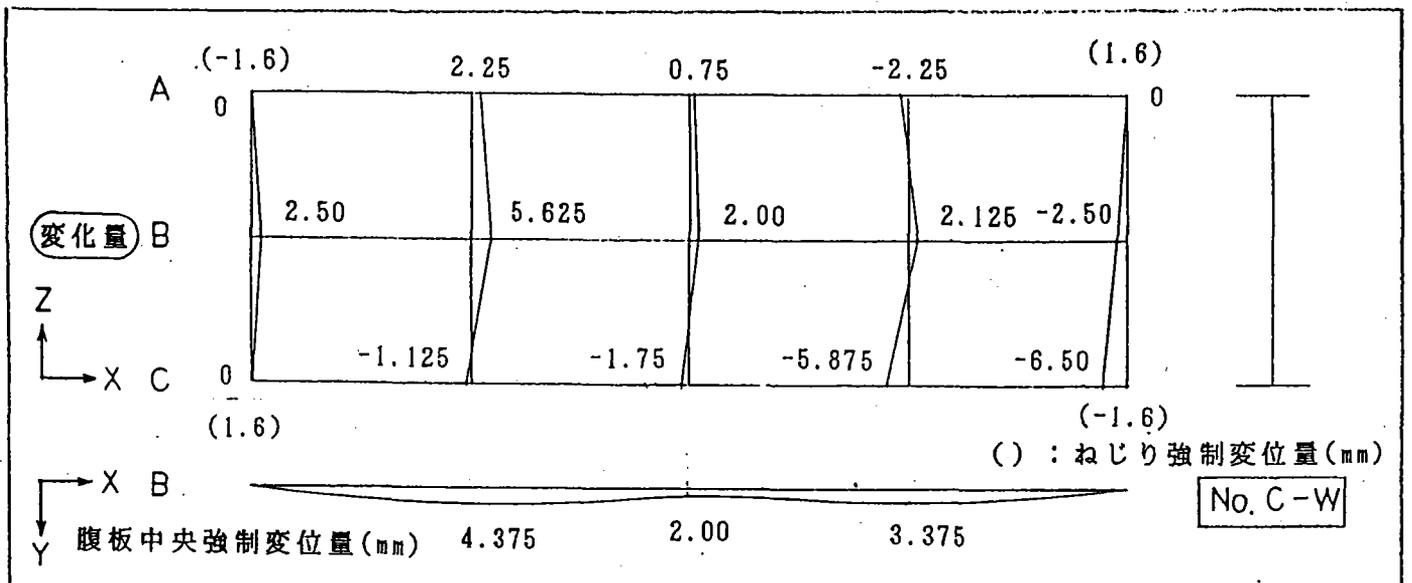
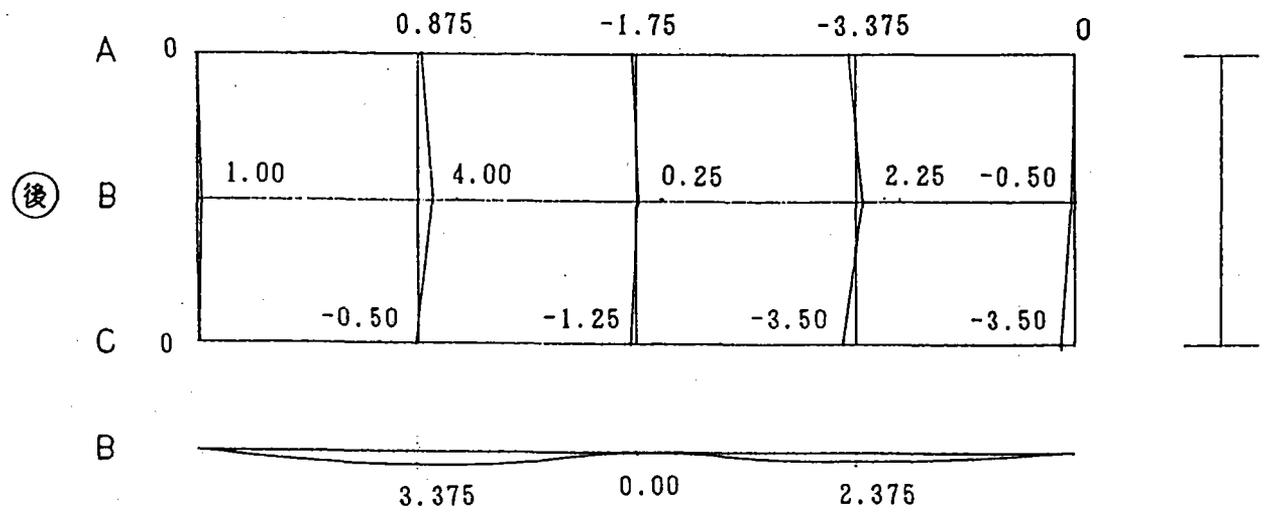
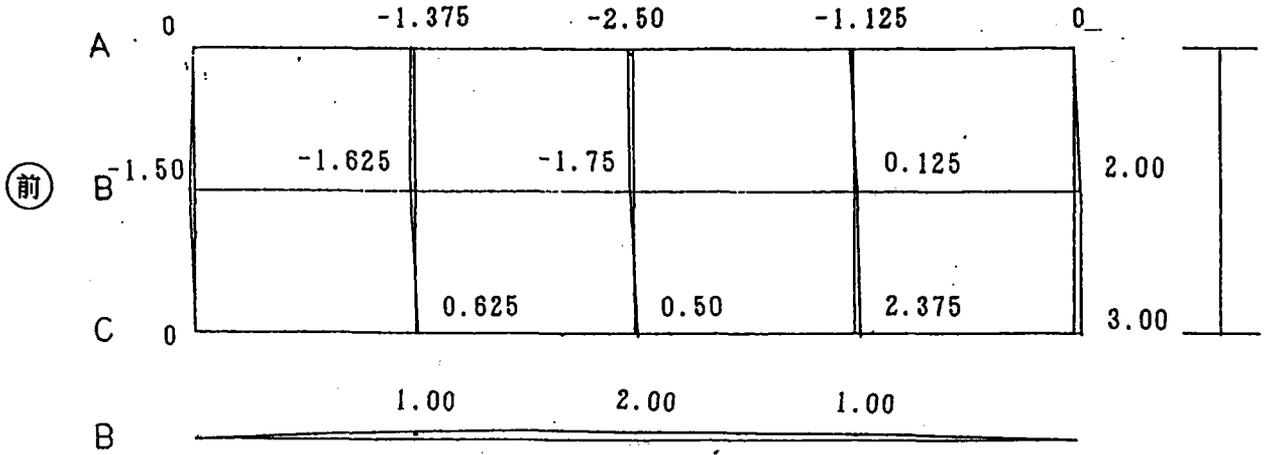




C-W

面外変形量

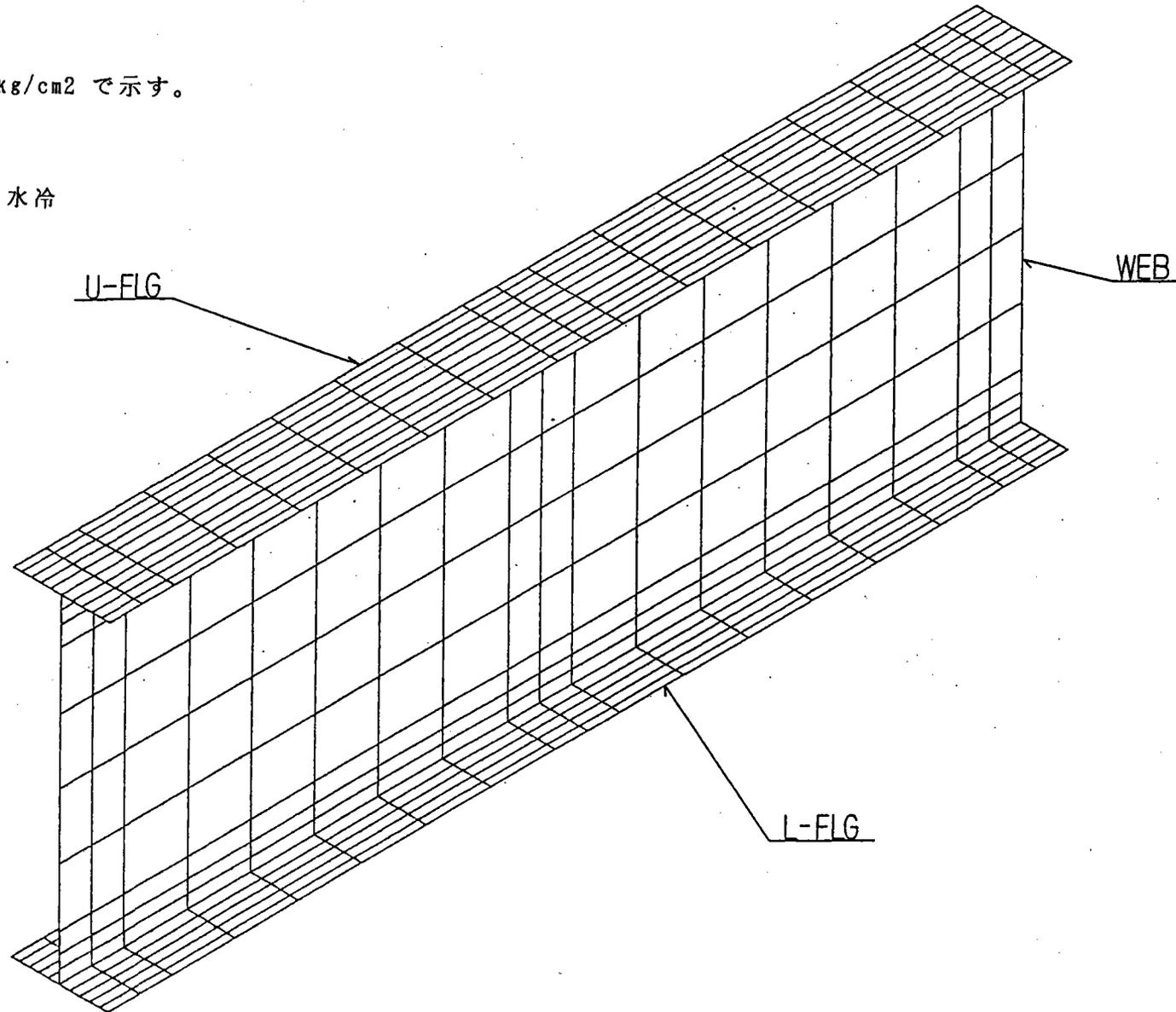
①                      ②                      ③                      ④                      ⑤



4. 4 解析結果

応力度の単位は全て kg/cm<sup>2</sup> で示す。

4. 4. 1 No. A - 水冷



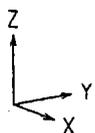
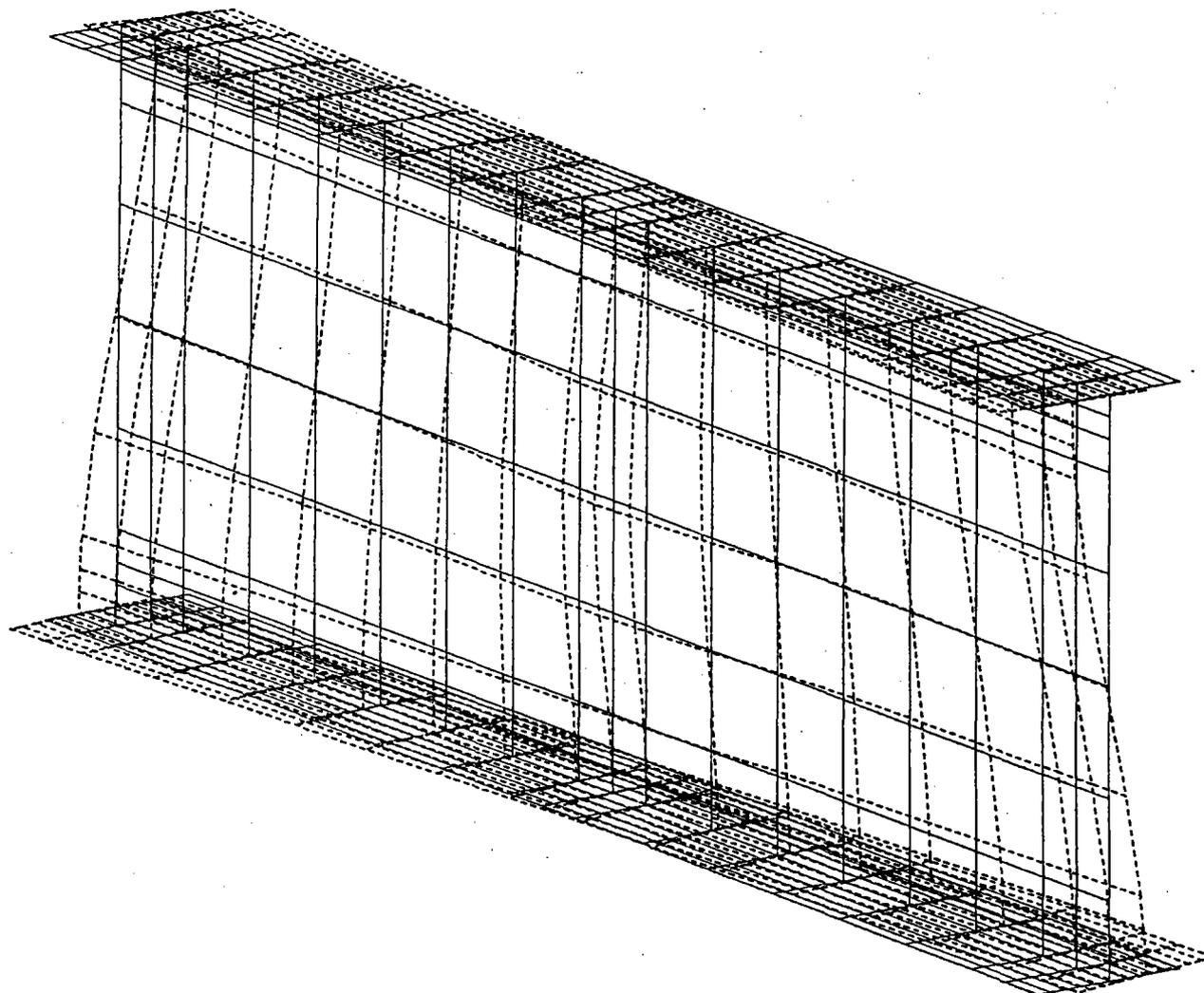
LOAD CASE NO. 3

\* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

DISPLACEMENT

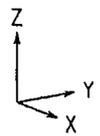
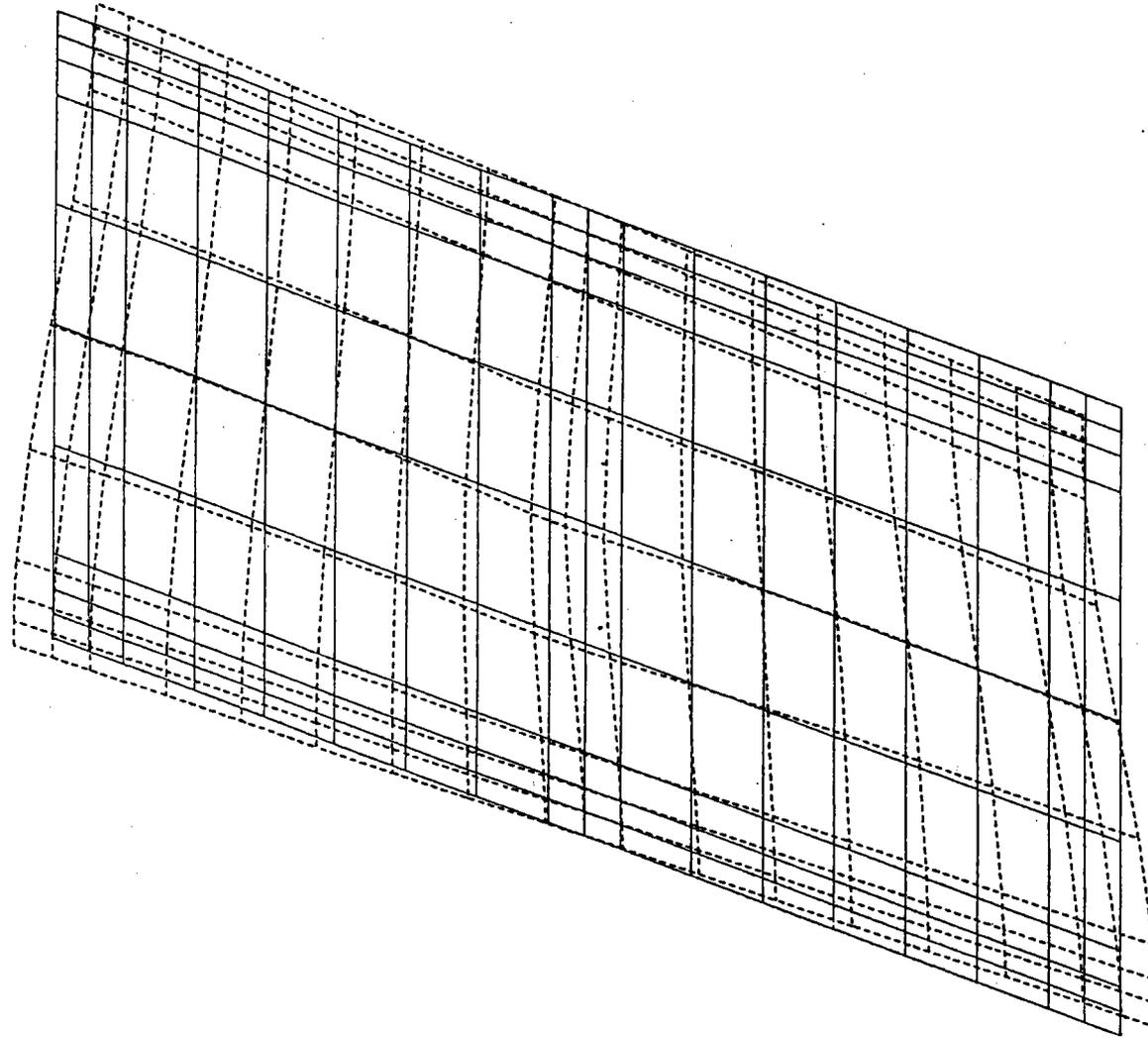
(1) 変形図



LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MØDEL 1 ( NØ.A-W ) ++

DISPLACEMENT

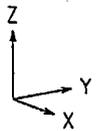
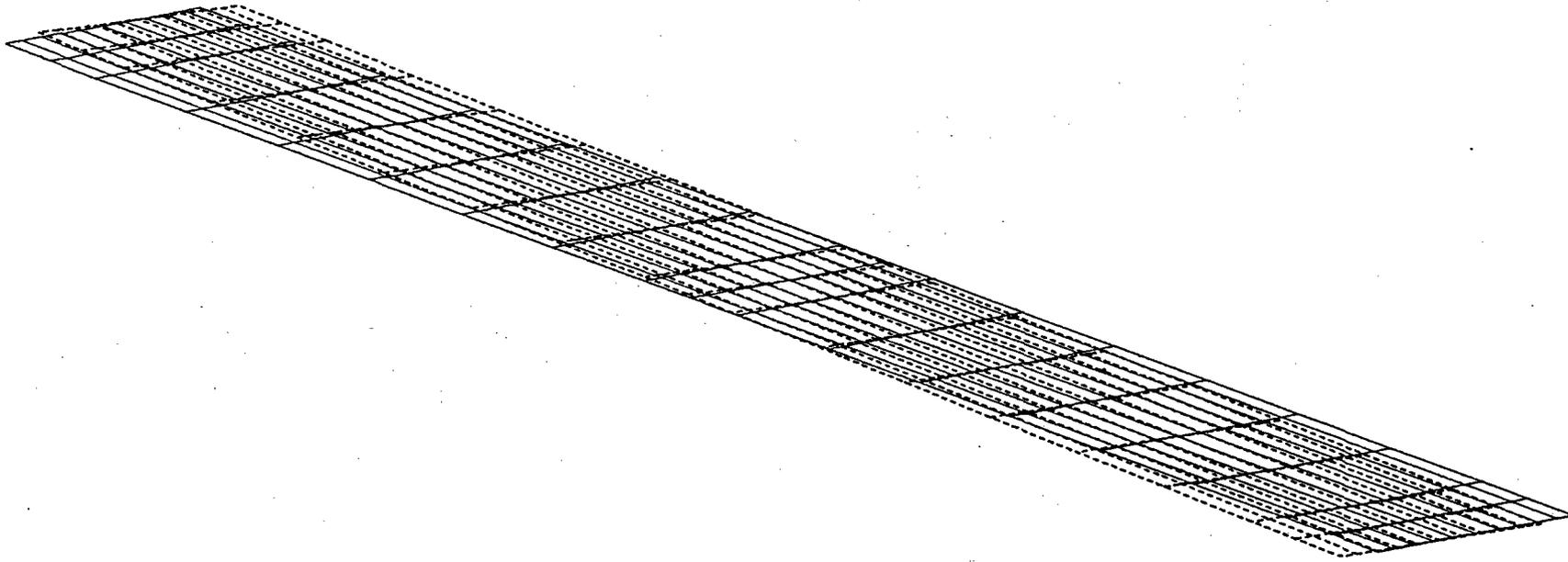


( WEB )

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MØDEL 1 ( NØ.A-W ) ++

DISPLACEMENT

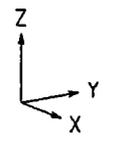
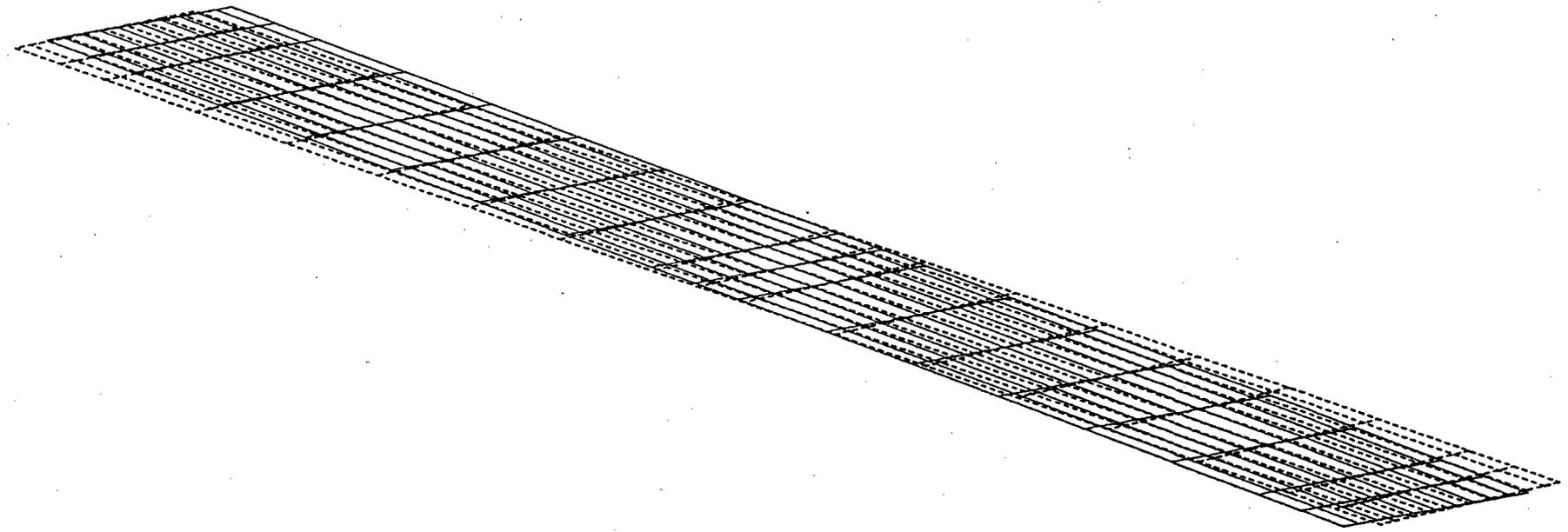


( U-FLG )

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MØDEL 1 ( NØ.A-W ) ++

DISPLACEMENT



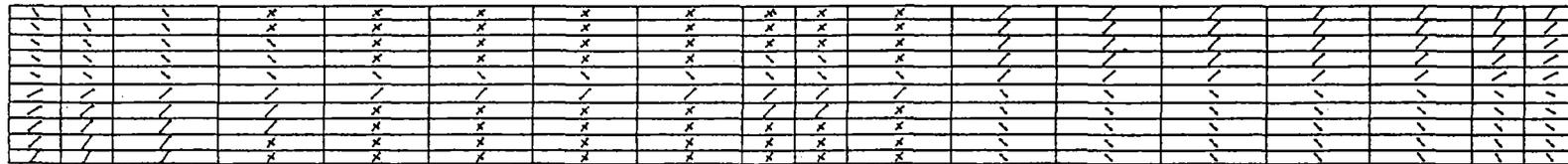
( L-FLG )

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

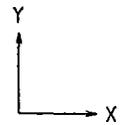
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)

(2) 主応力図



-67-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

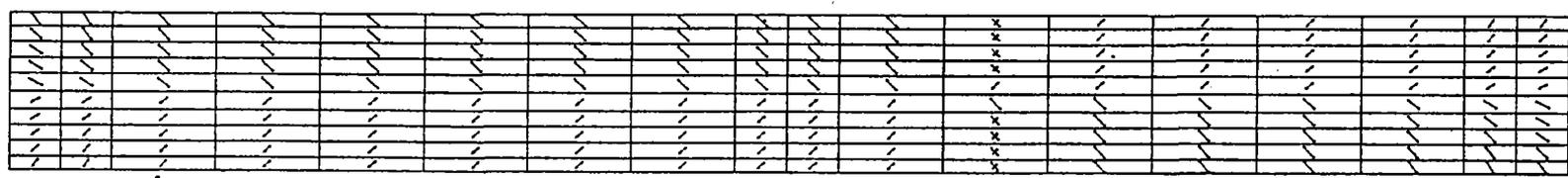
MAX = 3234.1  
MIN = -3234.1

( U-FLG )  
H 10000.0

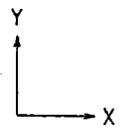
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



-88-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

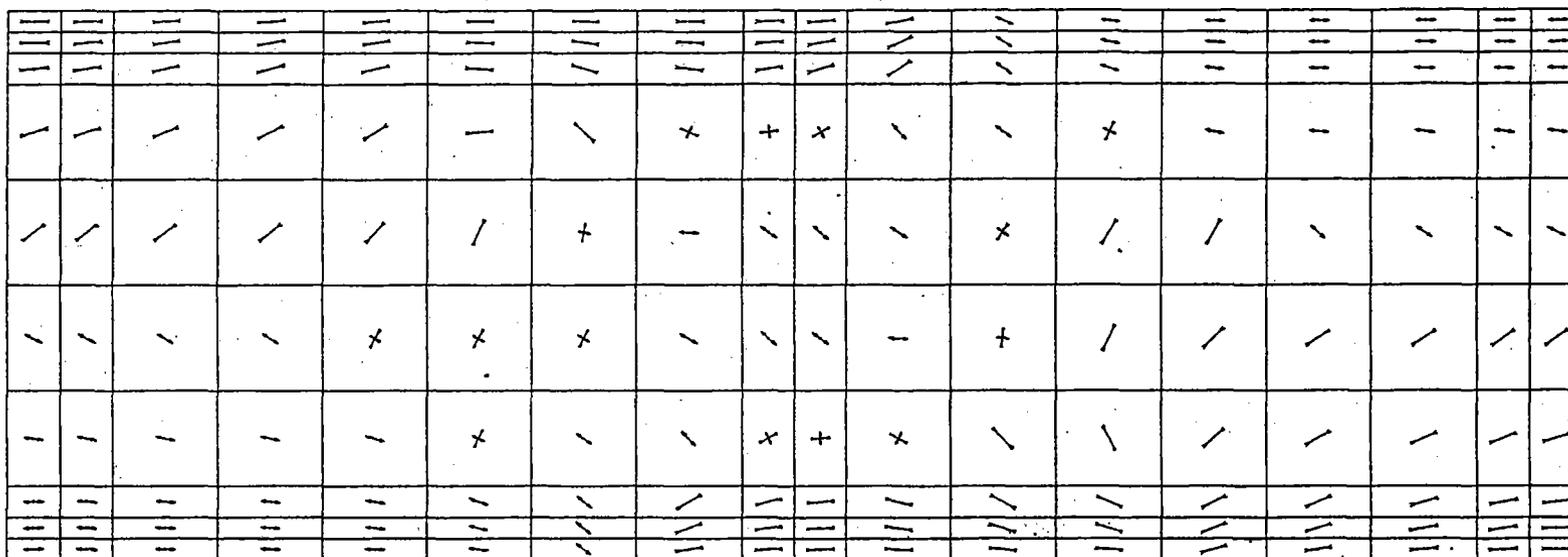
MAX = 3235.2  
MIN = -3235.2

( U-FLG )  
H 10000.0

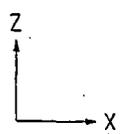
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



-69-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

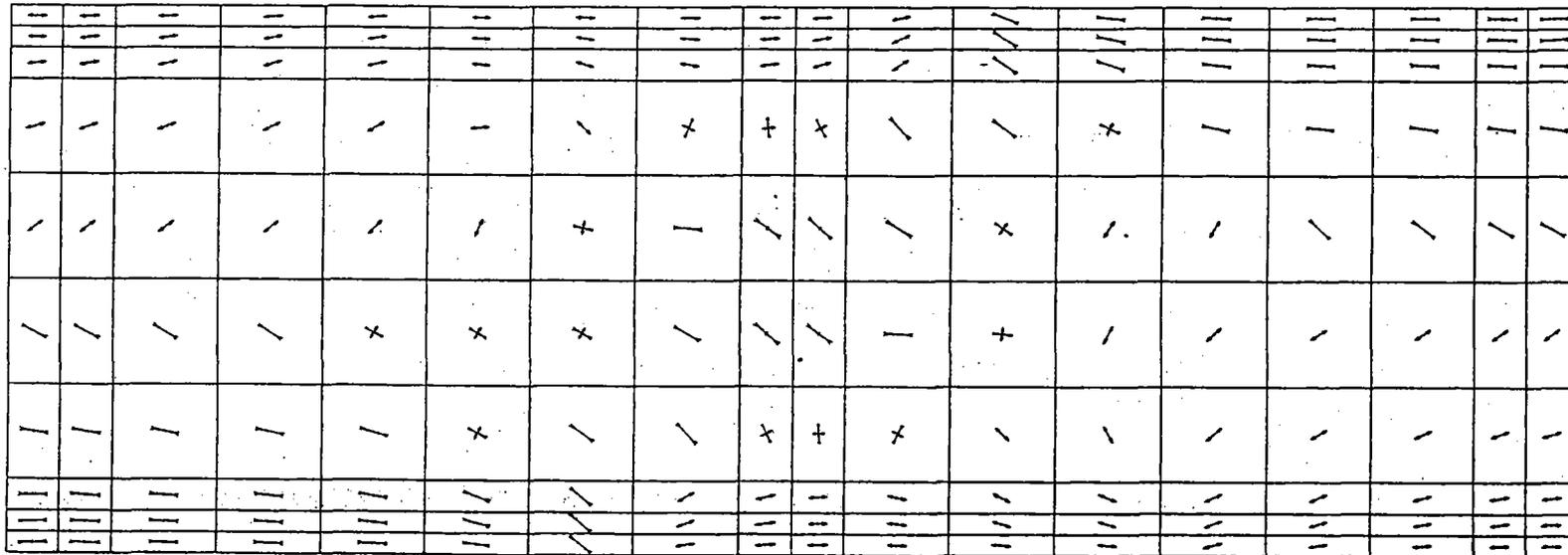
MAX = 3738.6  
MIN = -3504.4

( WEB )  
H 10000.0

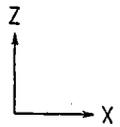
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



-70-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

MAX = 3504.4  
MIN = -3738.6

( WEB )  
H 10000.0

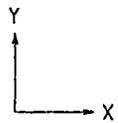
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



-71-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

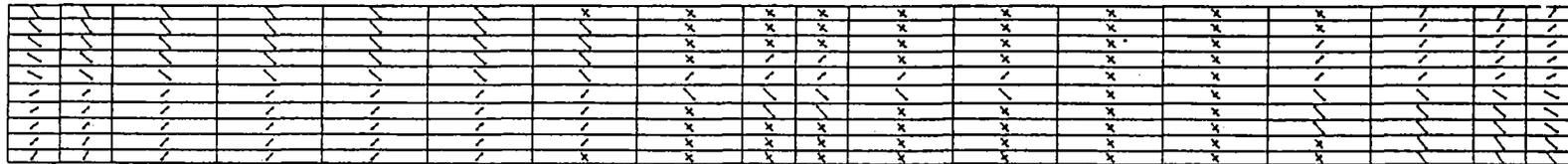
MAX = 3228.1  
MIN = -3228.1

( L-FLG )  
H 10000.0

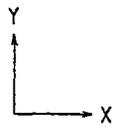
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



-72-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

MAX = 3227.1  
MIN = -3227.1

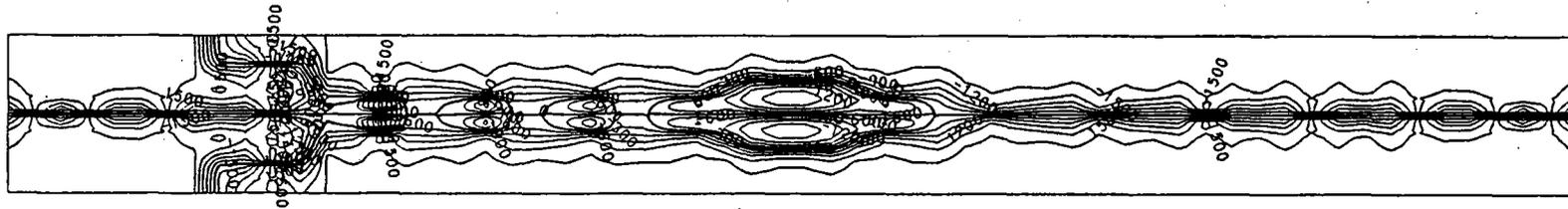
( L-FLG )  
H 10000.0

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)

(3) 直応力図 ( $\sigma_x$ )



-73-

Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

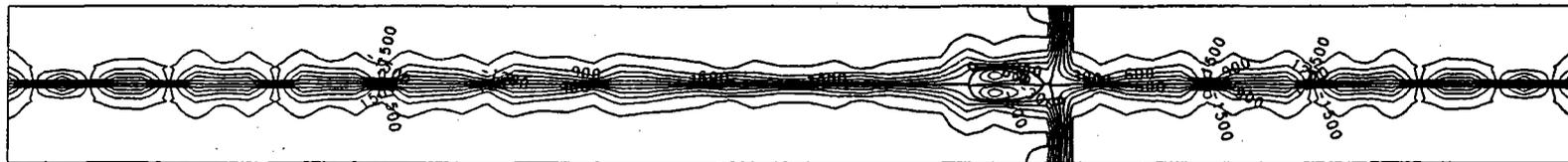
MAX = 1601.3  
MIN = -1601.3

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



- 74 -

Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

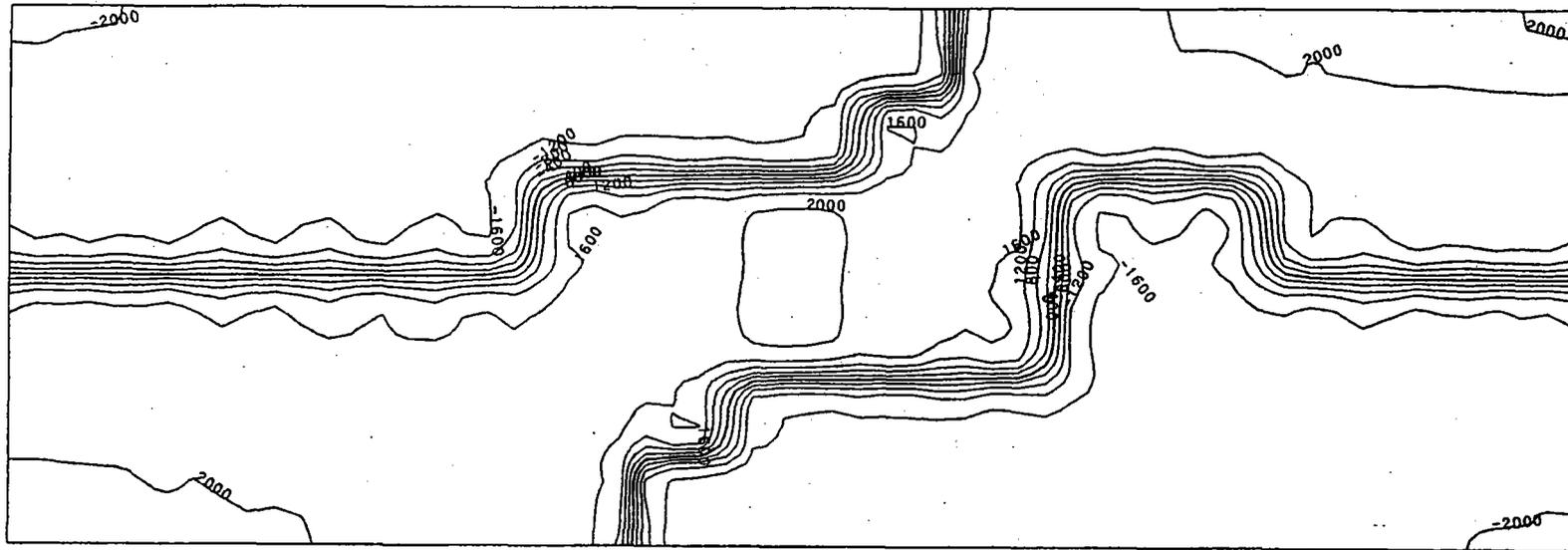
MAX = 1612.9  
MIN = -1612.9

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



-75-

Z  
↑  
X →

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

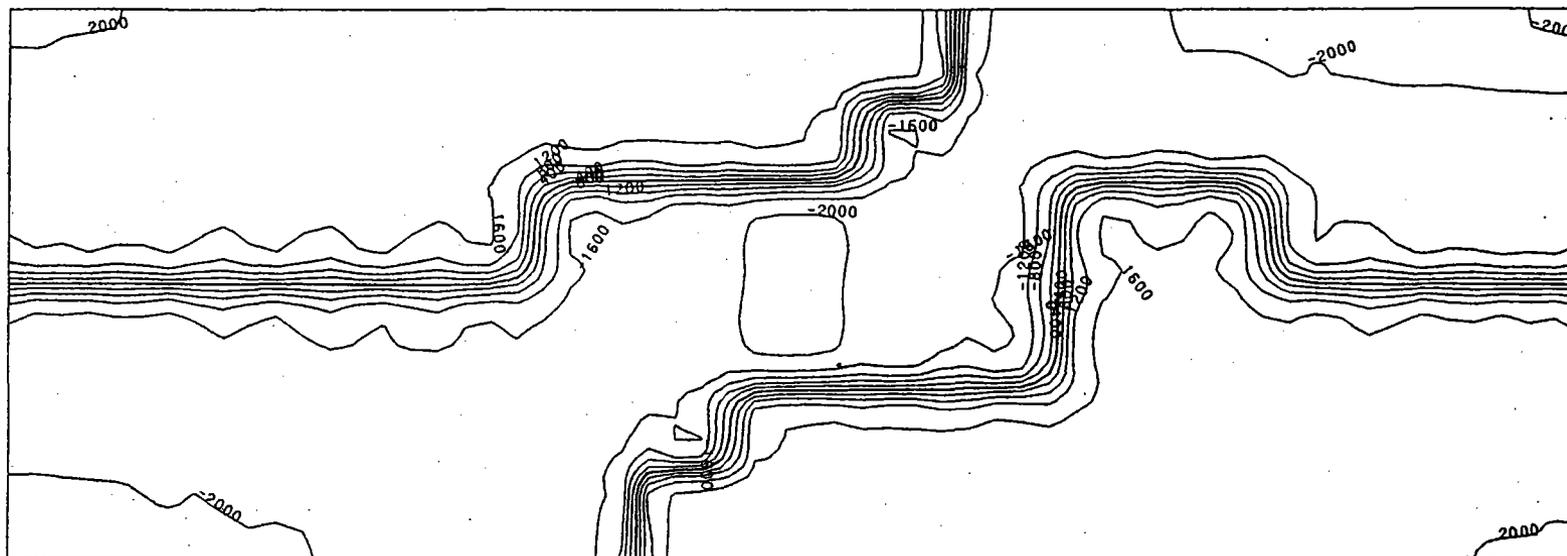
MAX = 2163.7  
MIN = -2056.3

( WEB )  
INTERVAL = 400

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



-76-

Z  
↑  
X →

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

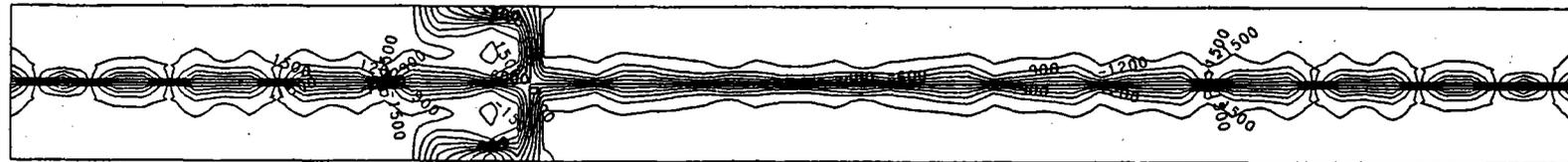
MAX = 2056.3  
MIN = -2163.7

( WEB )  
INTERVAL = 400

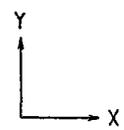
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



-77-



$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

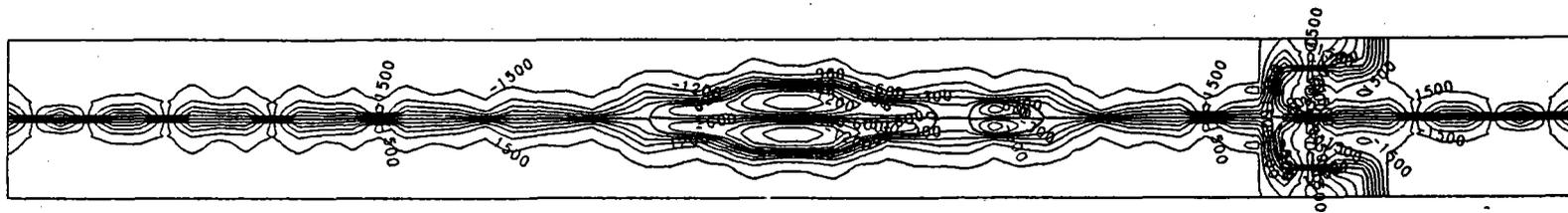
MAX = 1612.5  
MIN = -1612.5

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



-78-

Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

MAX = 1601.3  
MIN = -1601.3

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

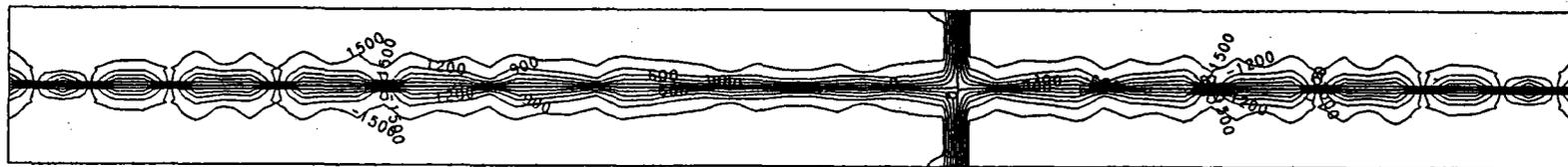
JIP DRAFTED BY J. T. P.

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

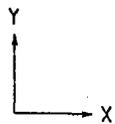
++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)

(4) 直応力図 ( $\sigma_y$ )



-79-



$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

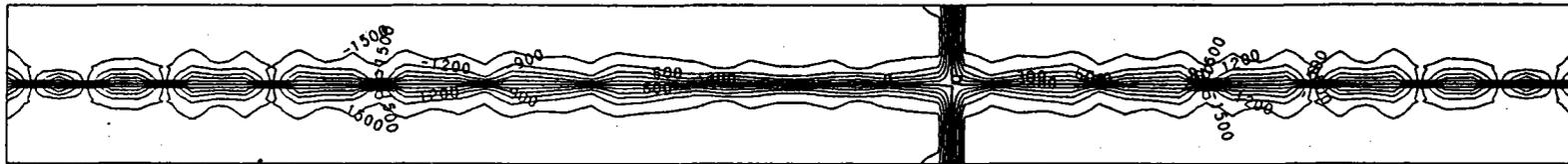
MAX = 1606.4  
MIN = -1606.4

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



- 80 -

Y  
X

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

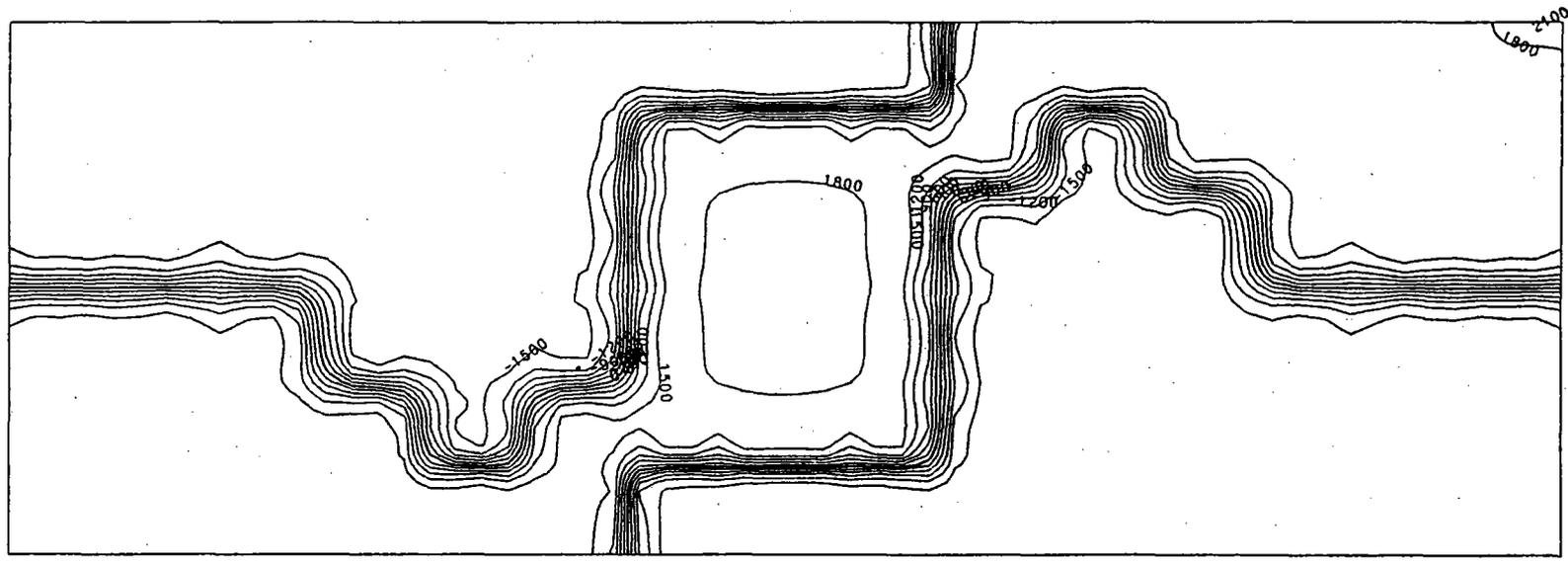
MAX = 1606.5  
MIN = -1606.5

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

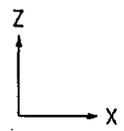
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



-18-



$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

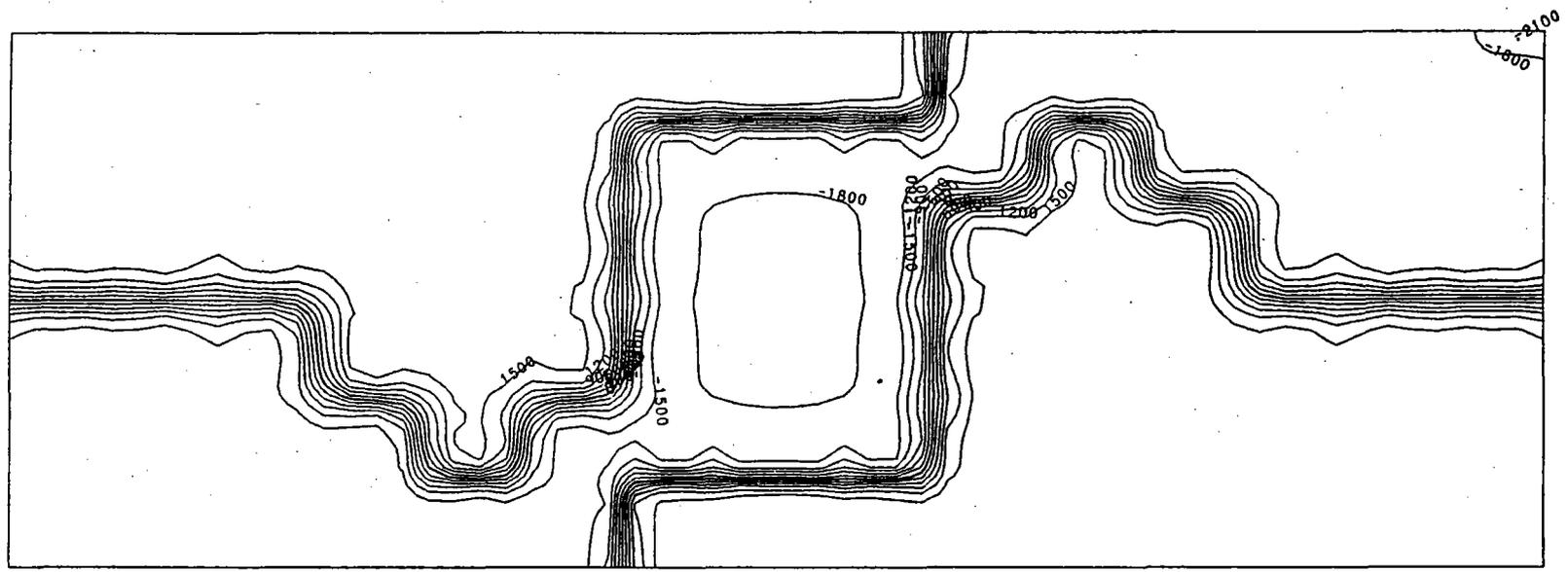
MAX = 2107.6  
MIN = -1774.1

( WEB )  
INTERVAL = 300

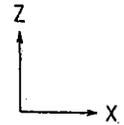
++ MØDEL 1 ( NØ.A-W ) ++

LOAD CASE NØ. 3 \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



- 82 -



$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

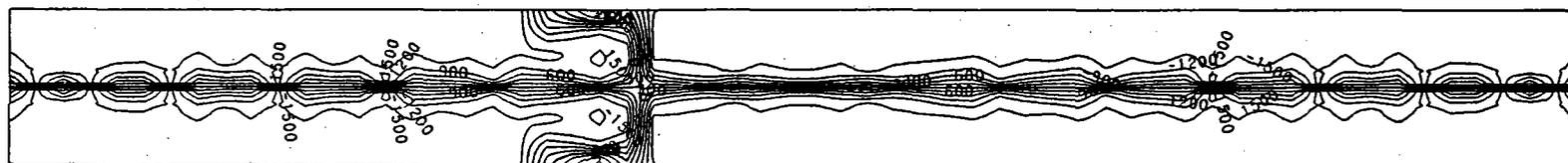
MAX = 1774.1  
MIN = -2107.6

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



Y  
↑  
X →

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

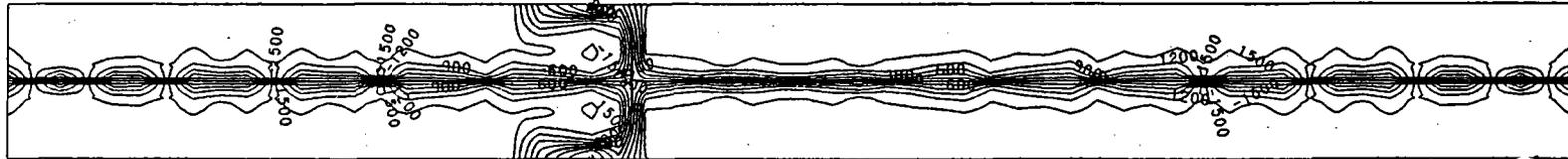
MAX = 1606.0  
MIN = -1606.0

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



-84-

Y  
X

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

MAX = 1606.3  
MIN = -1606.3

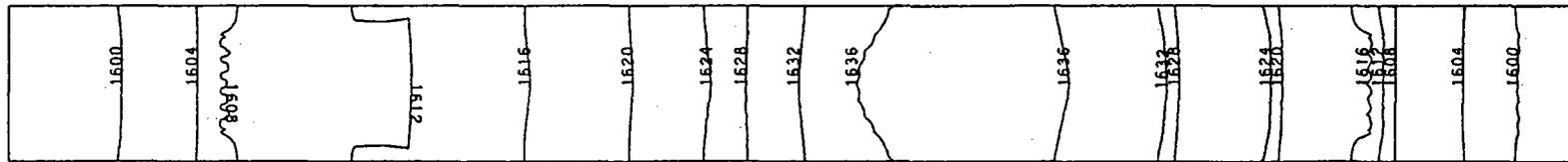
( L-FLG )  
INTERVAL = 300

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)

(5) せん断応力図 ( $\tau_{xy}$ )



Y  
↑  
X →

$T_{xy}$   
SCALE 1/1000

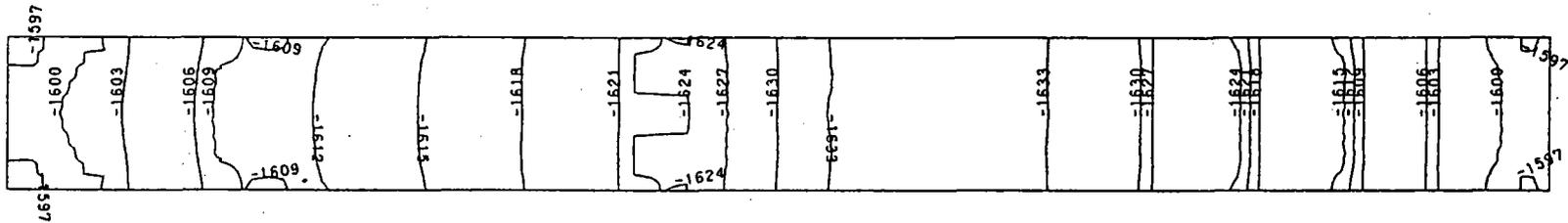
MAX = 1639.1  
MIN = 1596.2

( U-FLG )  
INTERVAL = 4

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

SHEARING STRESS (LOWER)



Y  
X

Txy  
SCALE 1/1000

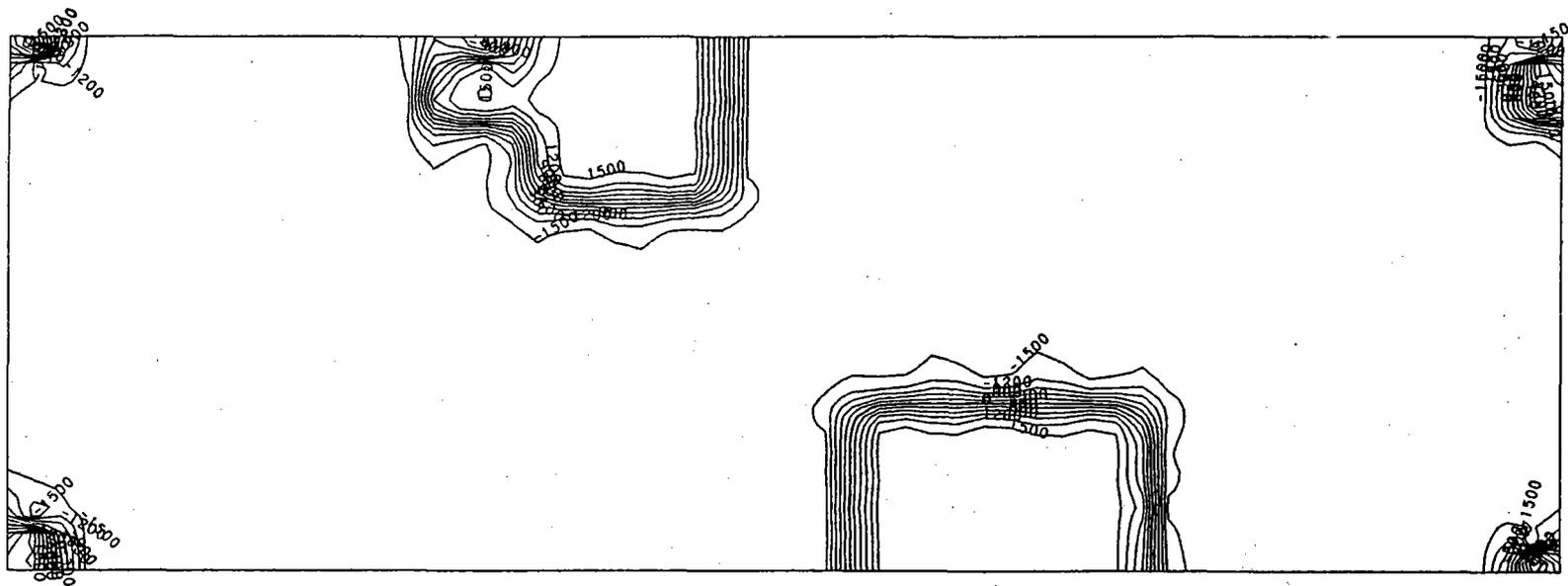
MAX = -1596.2  
MIN = -1636.2

( U-FLG )  
INTERVAL = 3

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

SHEARING STRESS (UPPER)



Z  
↑  
X →

$\tau_{xy}$   
SCALE 1/1000

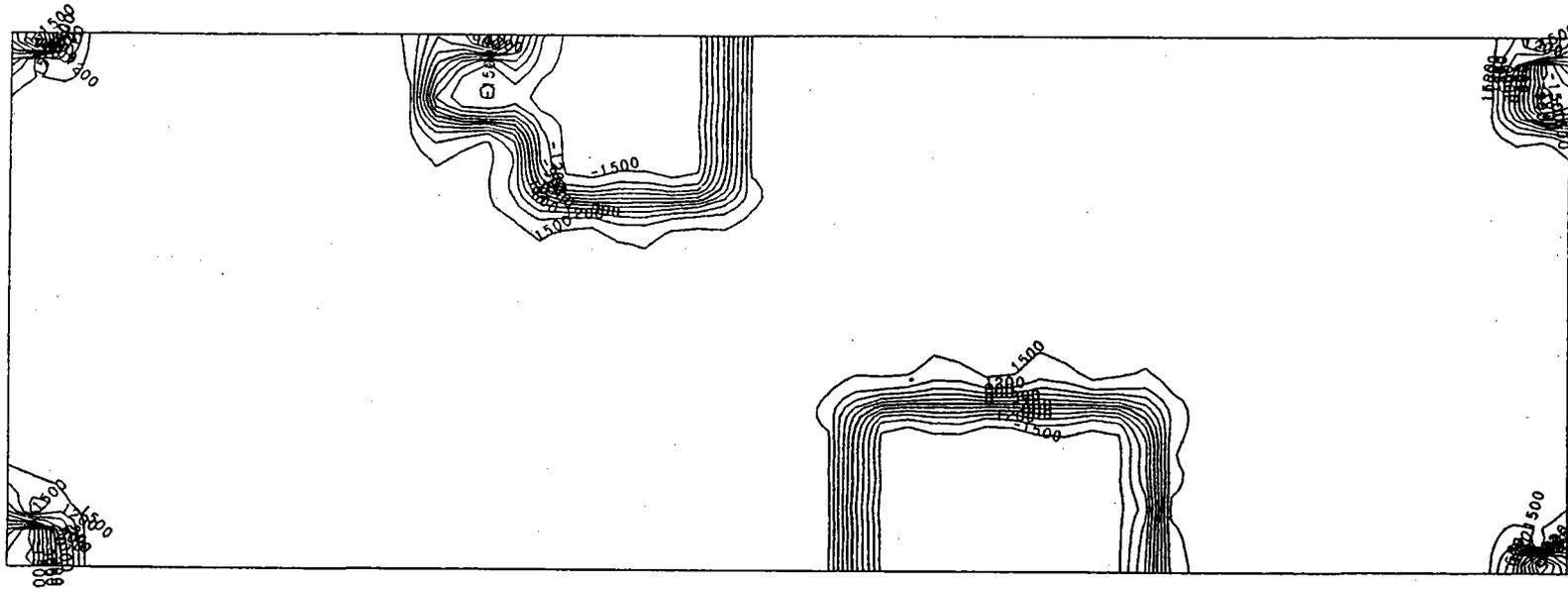
MAX = 1649.8  
MIN = -1747.6

( WEB )  
INTERVAL = 300

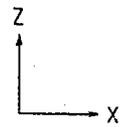
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

SHEARING STRESS (LOWER)



- 88 -



Txy  
SCALE 1/1000

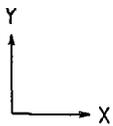
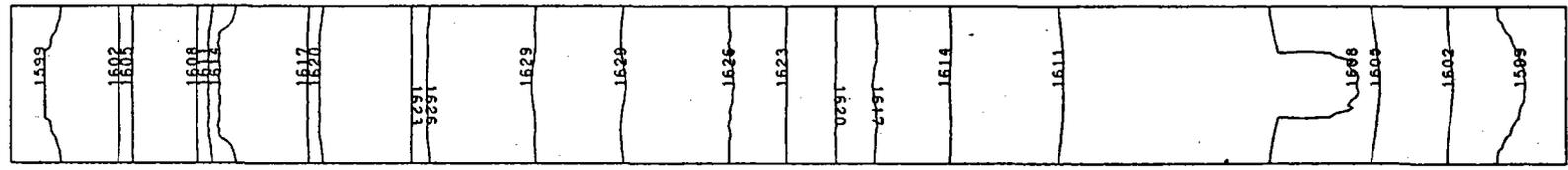
MAX = 1747.6  
MIN = -1649.8

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

SHEARING STRESS (UPPER)



T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/1000

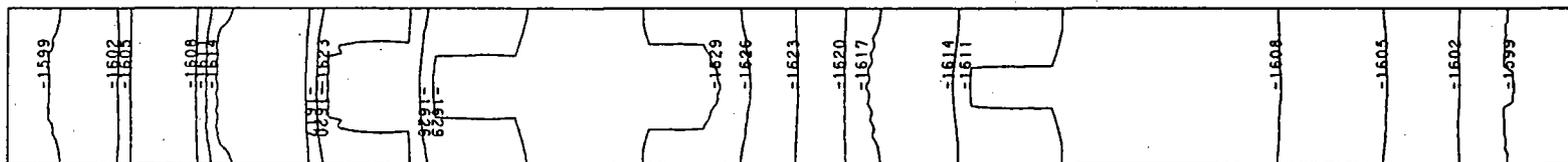
MAX = 1629.7  
MIN = 1596.2

( L-FLG )  
INTERVAL - 3

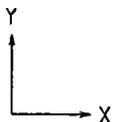
++ MODEL 1 ( NO.A-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



-06-



Txy  
SCALE 1/1000

MAX = -1596.2  
MIN = -1632.1

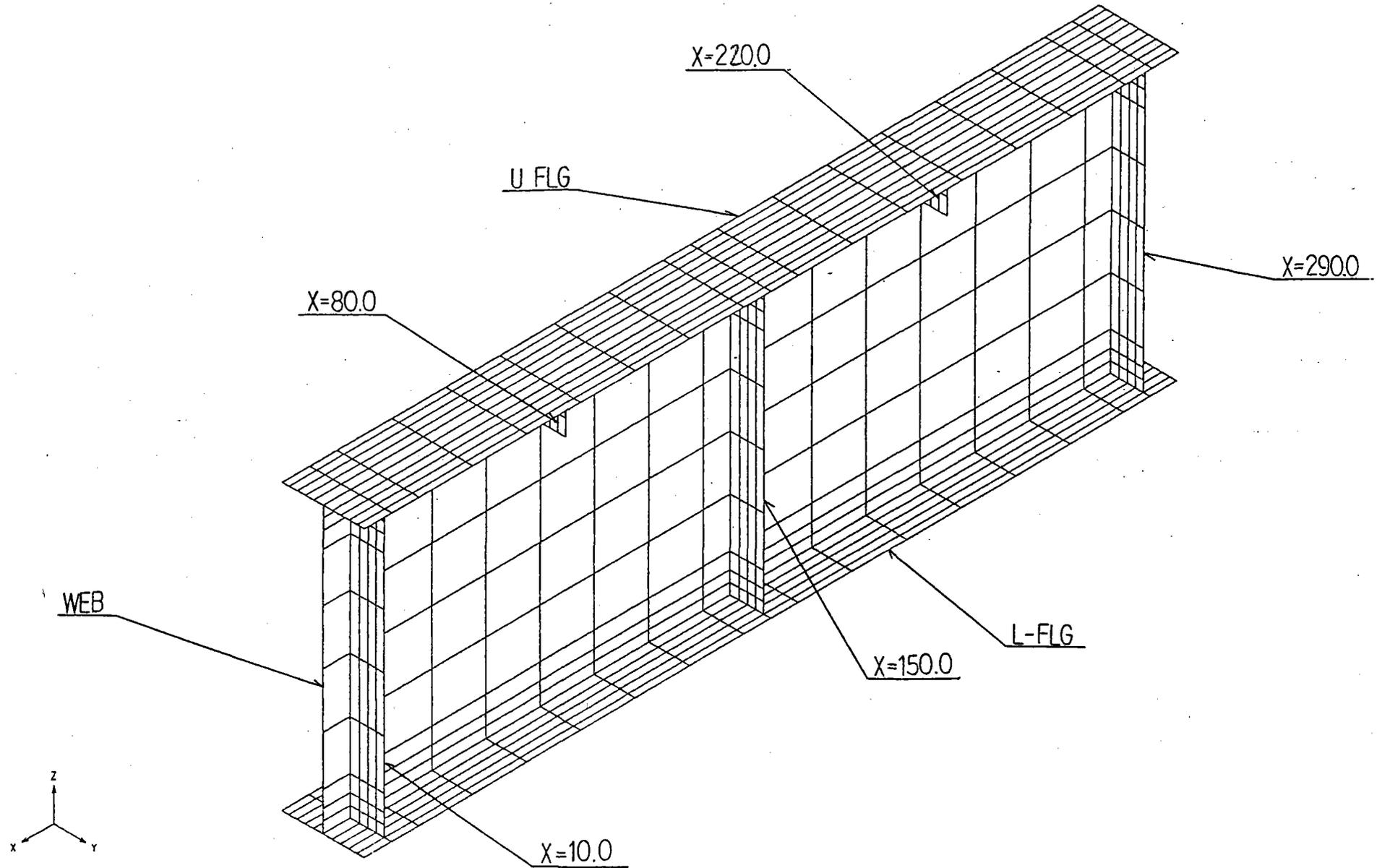
( L-FLG )  
INTERVAL = 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PERSPECTIVE

4. 4. 2 No. C - 水冷

- 91 -



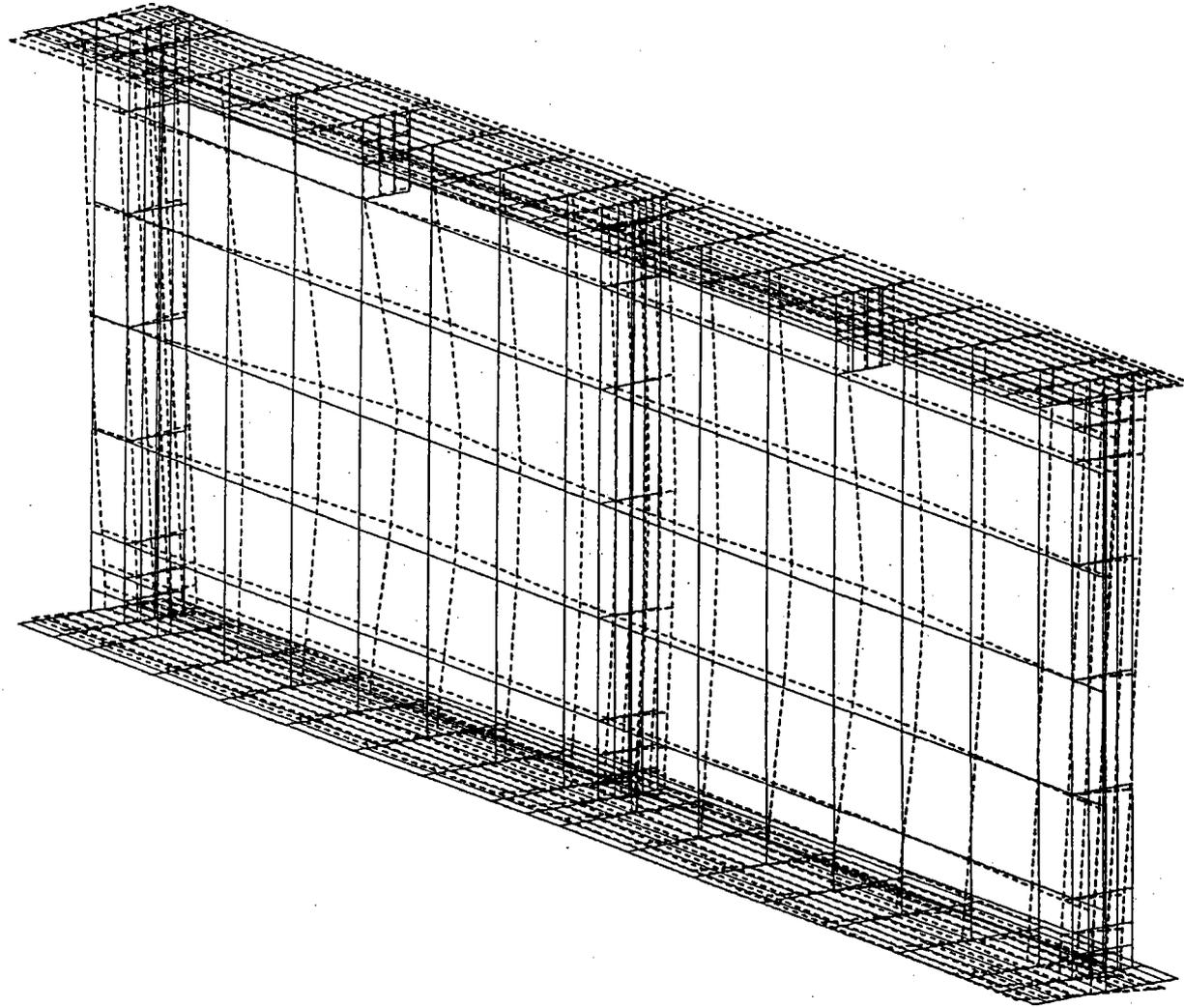
LOAD CASE NO. 3

\* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

DISPLACEMENT

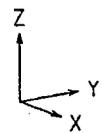
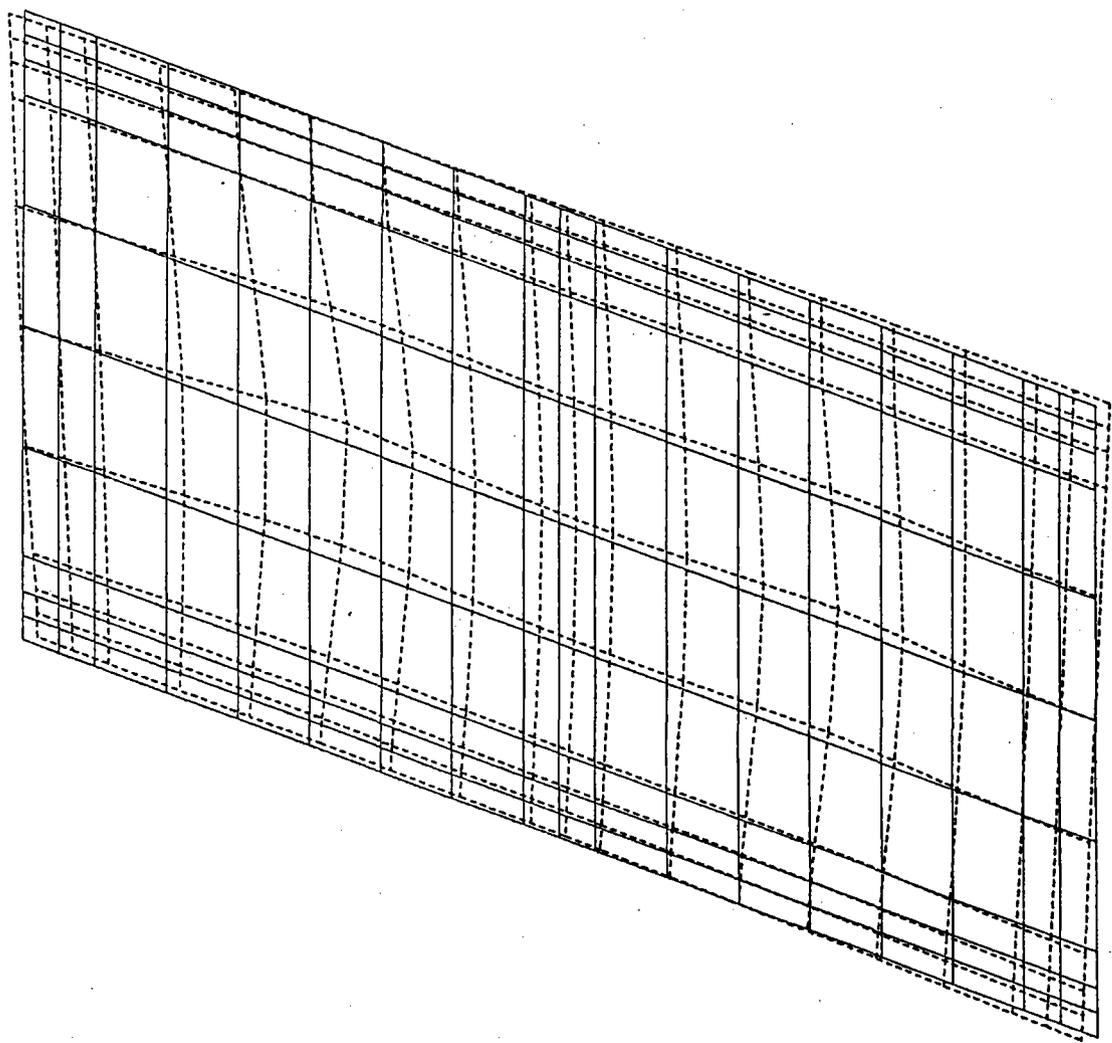
(1) 変形図



LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

DISPLACEMENT

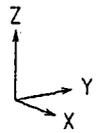
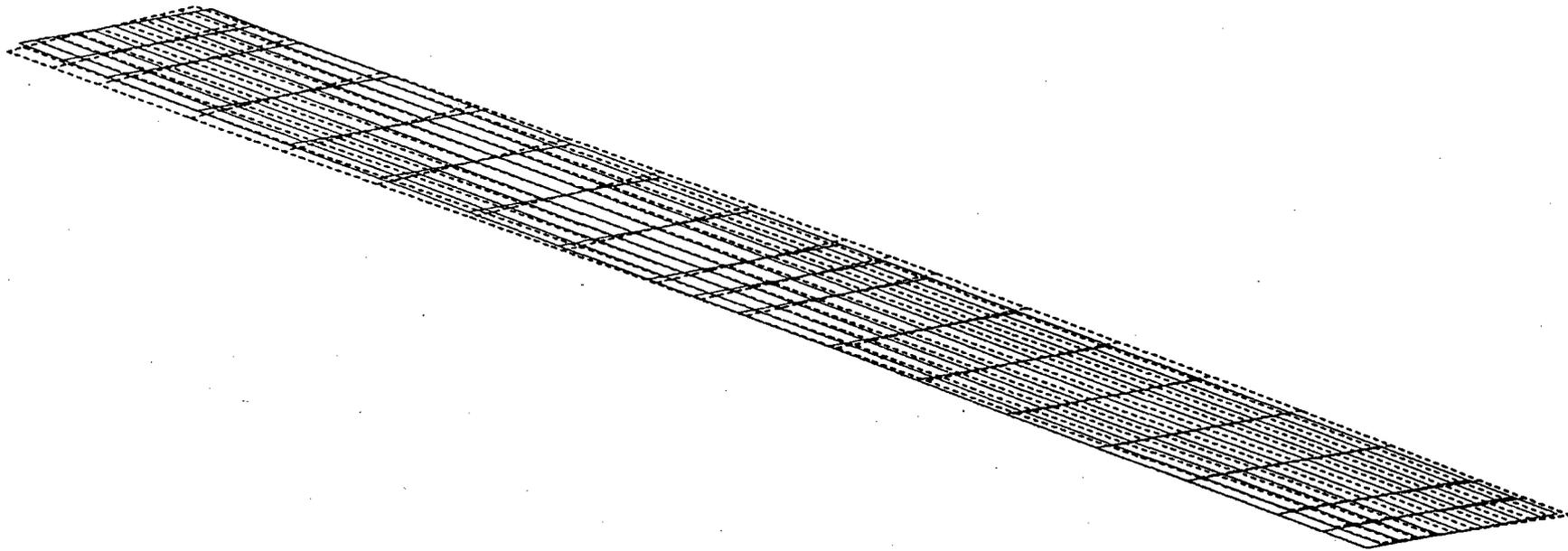


( WEB )

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

DISPLACEMENT

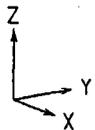
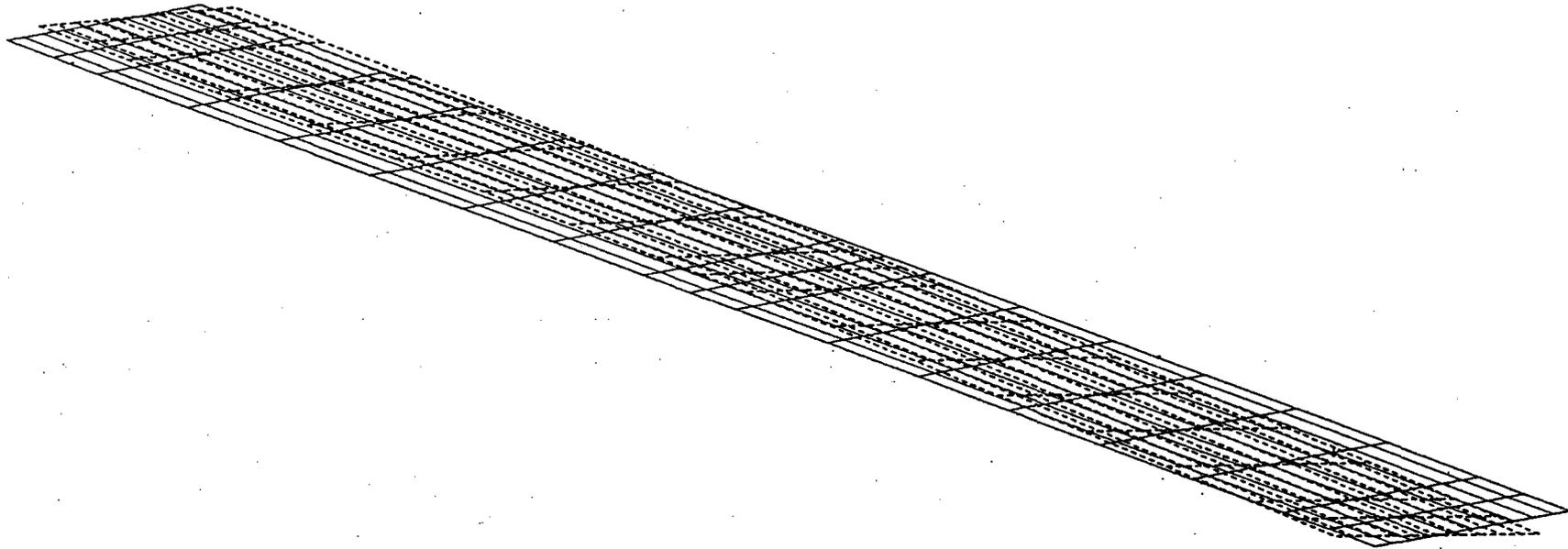


( U-FLG )

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

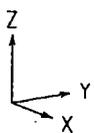
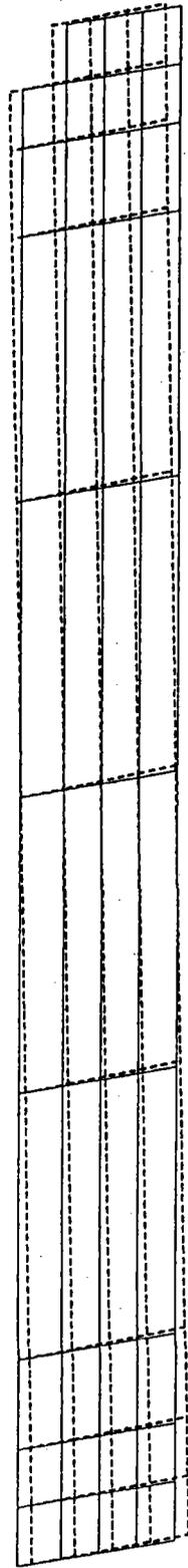
DISPLACEMENT



( L-FLG )

LOAD CASE NO. 3    ++    MODEL 2    ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

DISPLACEMENT



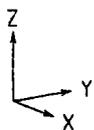
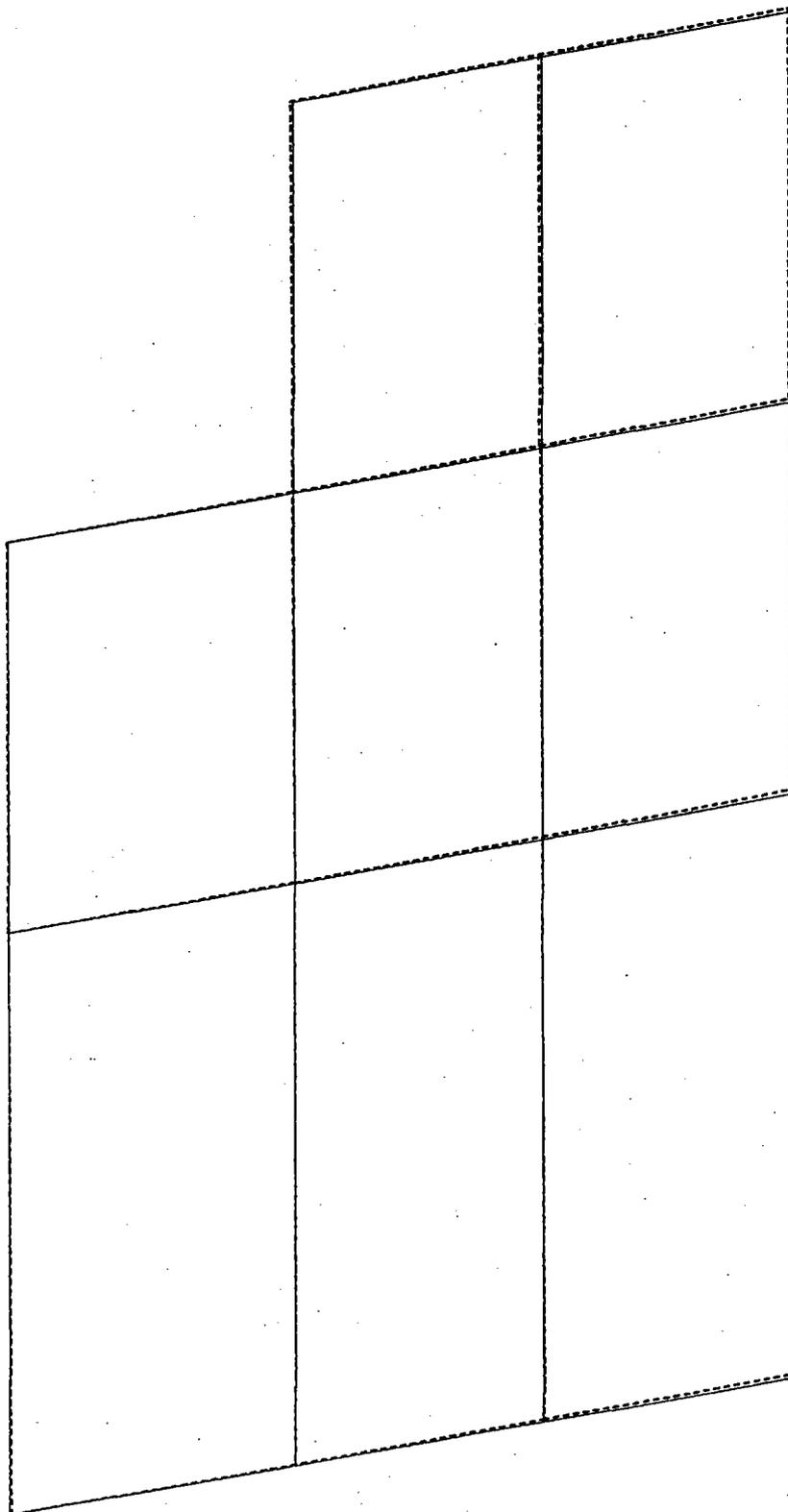
( X = 10.0 )

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

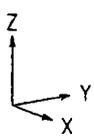
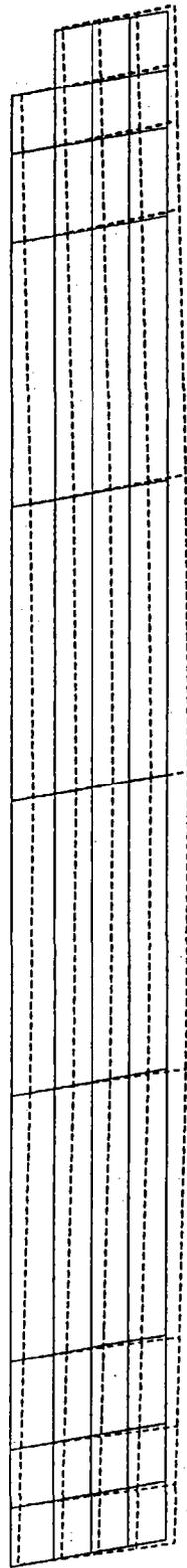
DISPLACEMENT



( X = 80.0 )

LOAD CASE NO. 3    ++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
                          \* CASE 3 \*

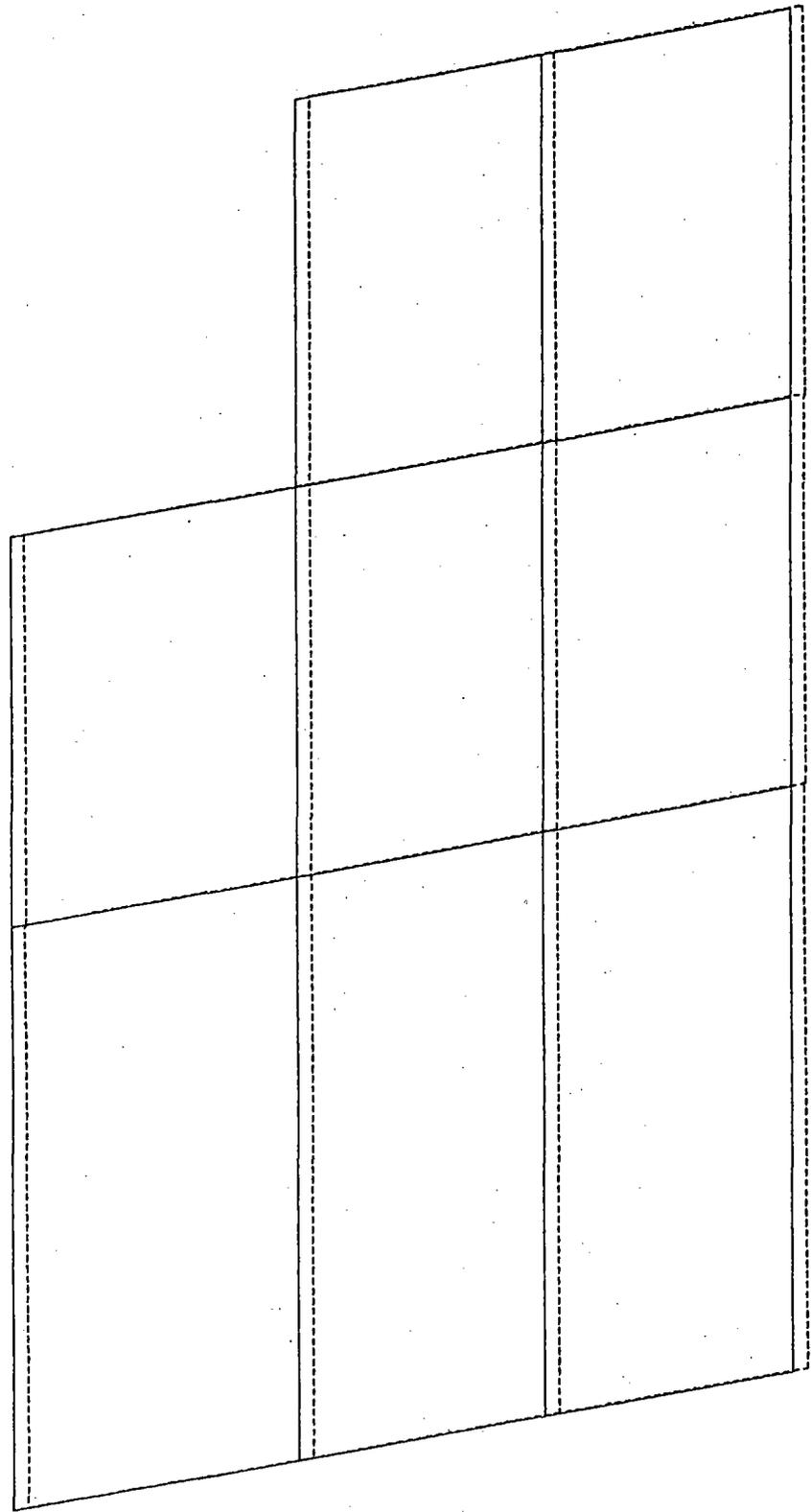
DISPLACEMENT



( X = 150.0 )

LOAD CASE NO. 3    ++    MODEL 2    ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

DISPLACEMENT

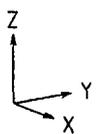
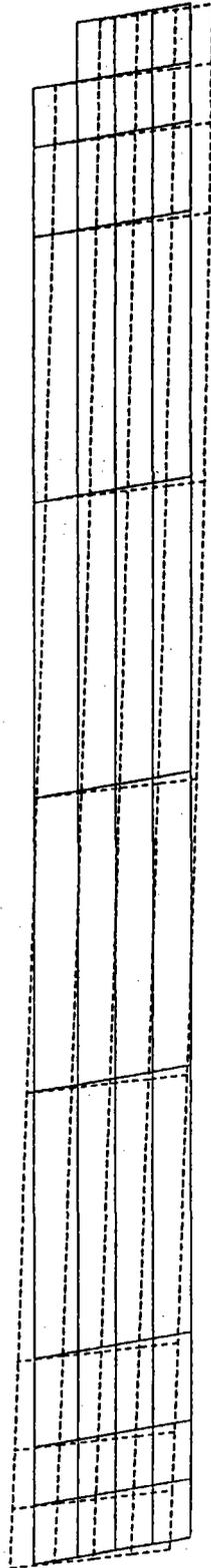


( X - 220.0 )

LOAD CASE NO. 3

++ MØDEL 2 ( NØ.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

- DISPLACEMENT



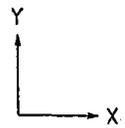
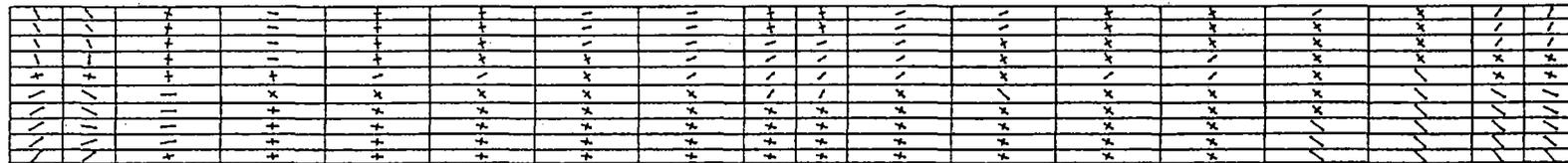
( X = 290.0 )

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)

(2) 主応力図



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

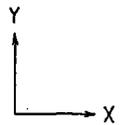
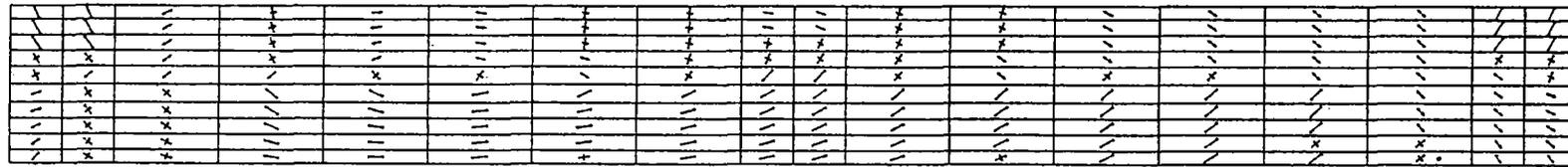
MAX = 3232.6  
MIN = -3224.5

( U-FLG )  
H 10000.0

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

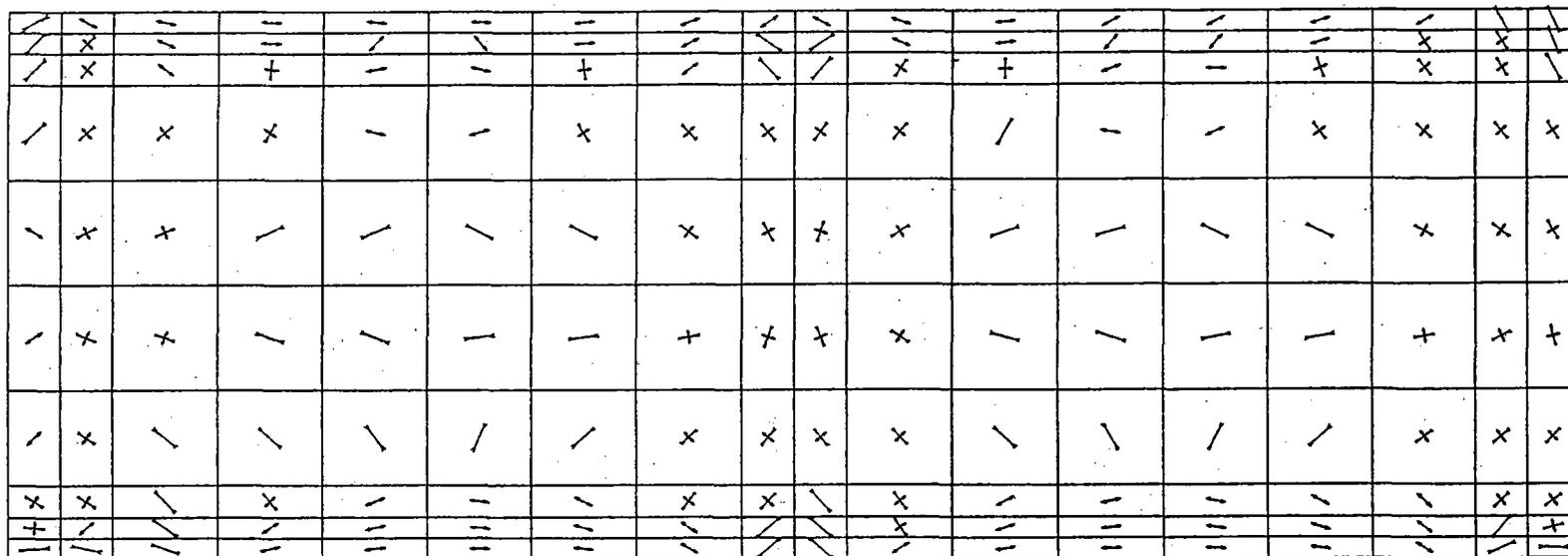
MAX = 3234.8  
MIN = -3236.8

( U-FLG )  
H 10000.0

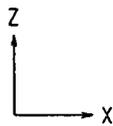
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



- 103 -



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

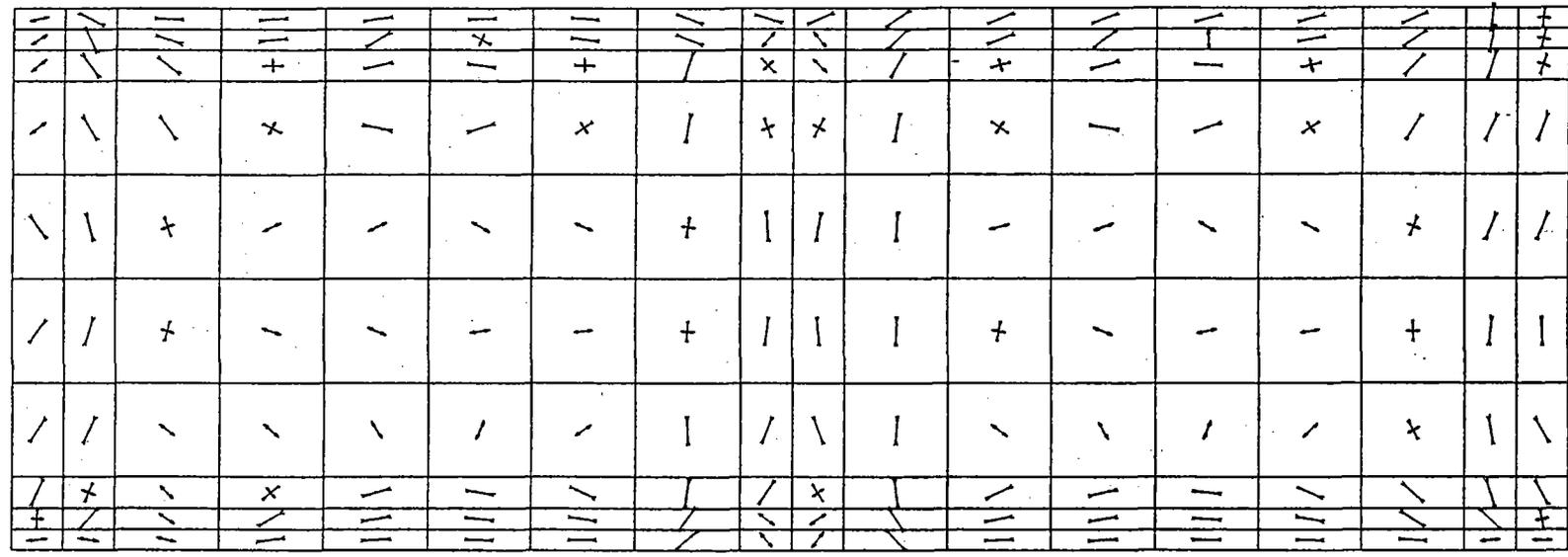
MAX = 3253.1  
MIN = -3370.2

( WEB )  
10000.0

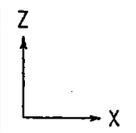
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



-104-



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

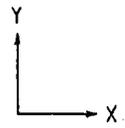
MAX = 3368.6  
MIN = -3248.3

( WEB )  
| 10000.0

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

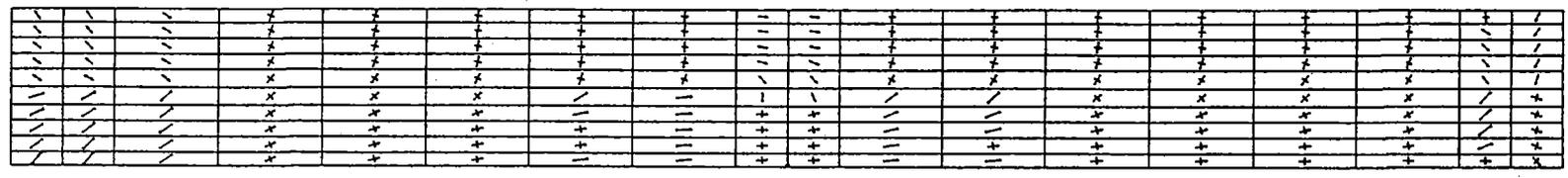
MAX = 3214.6  
MIN = -3222.6

( L-FLG )  
H 10000.0

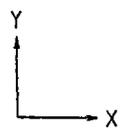
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



- 106 -



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/1000

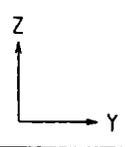
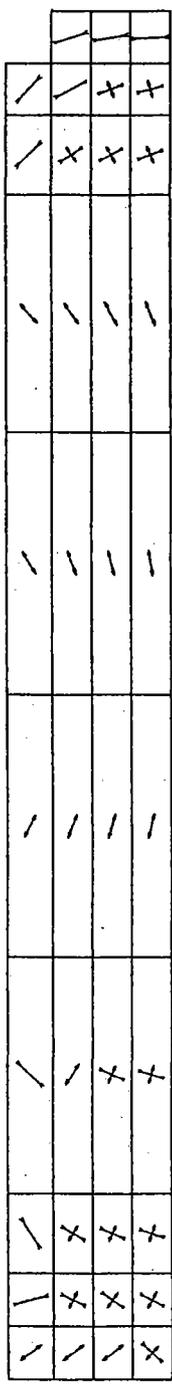
MAX = 3221.8  
MIN = -3215.4

( L-FLG )  
H 10000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
 SCALE 1/400

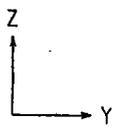
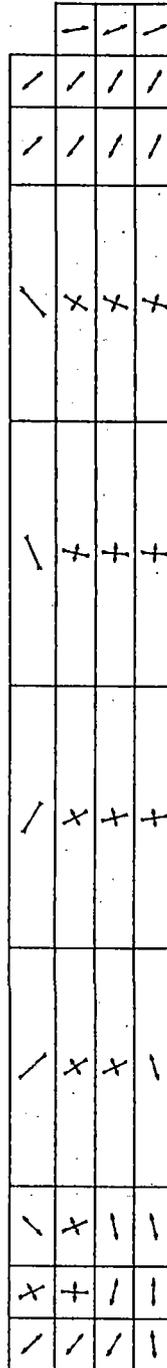
MAX - 3249.6  
 MIN - -3263.4

( X = 10.0 )  
 10000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



$\sigma_1, \sigma_2$  :  
SCALE 1/400

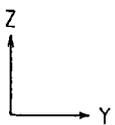
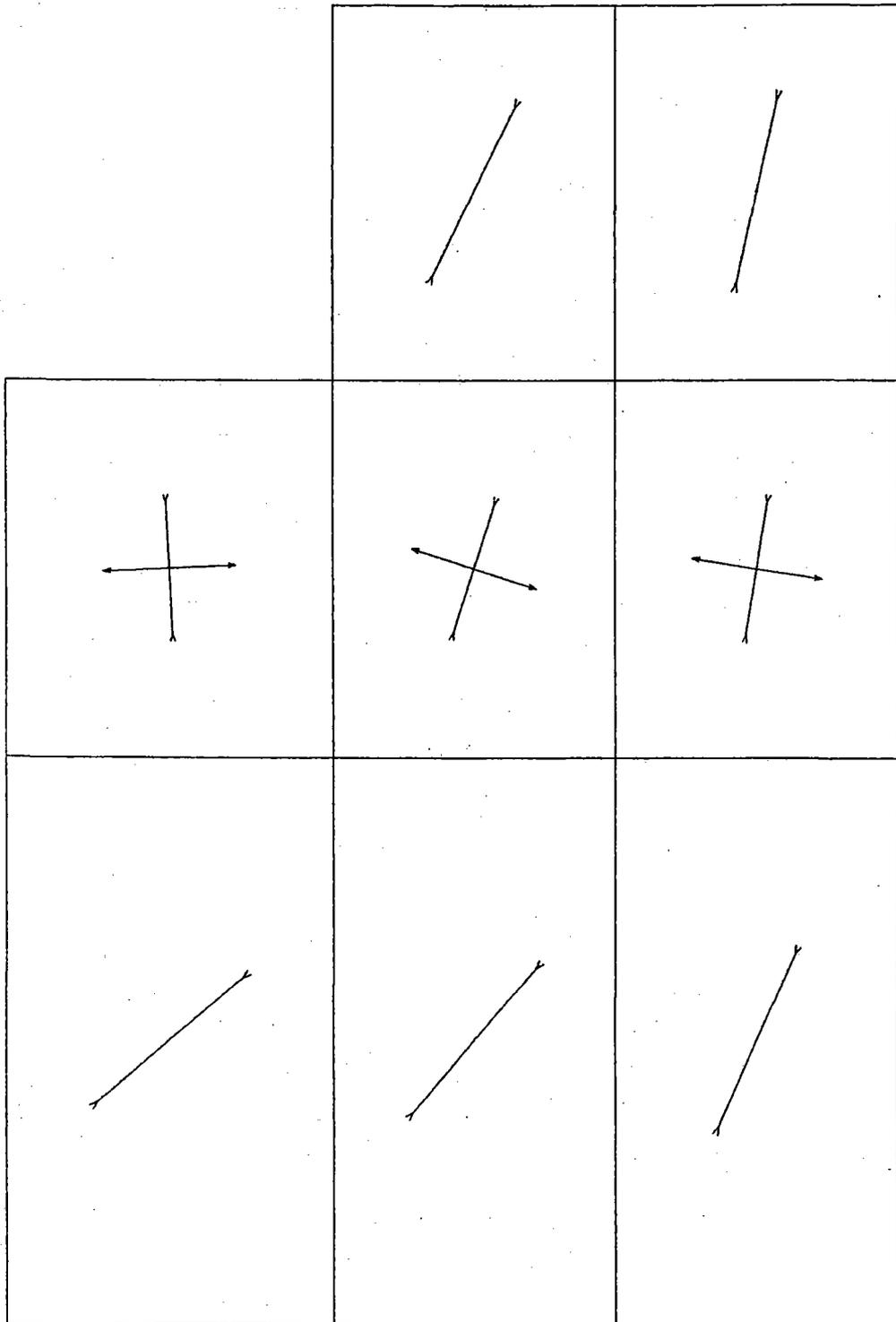
MAX = 3334.4  
MIN = -3199.9

( X = 10.0 )  
10000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NØ.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/50

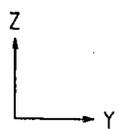
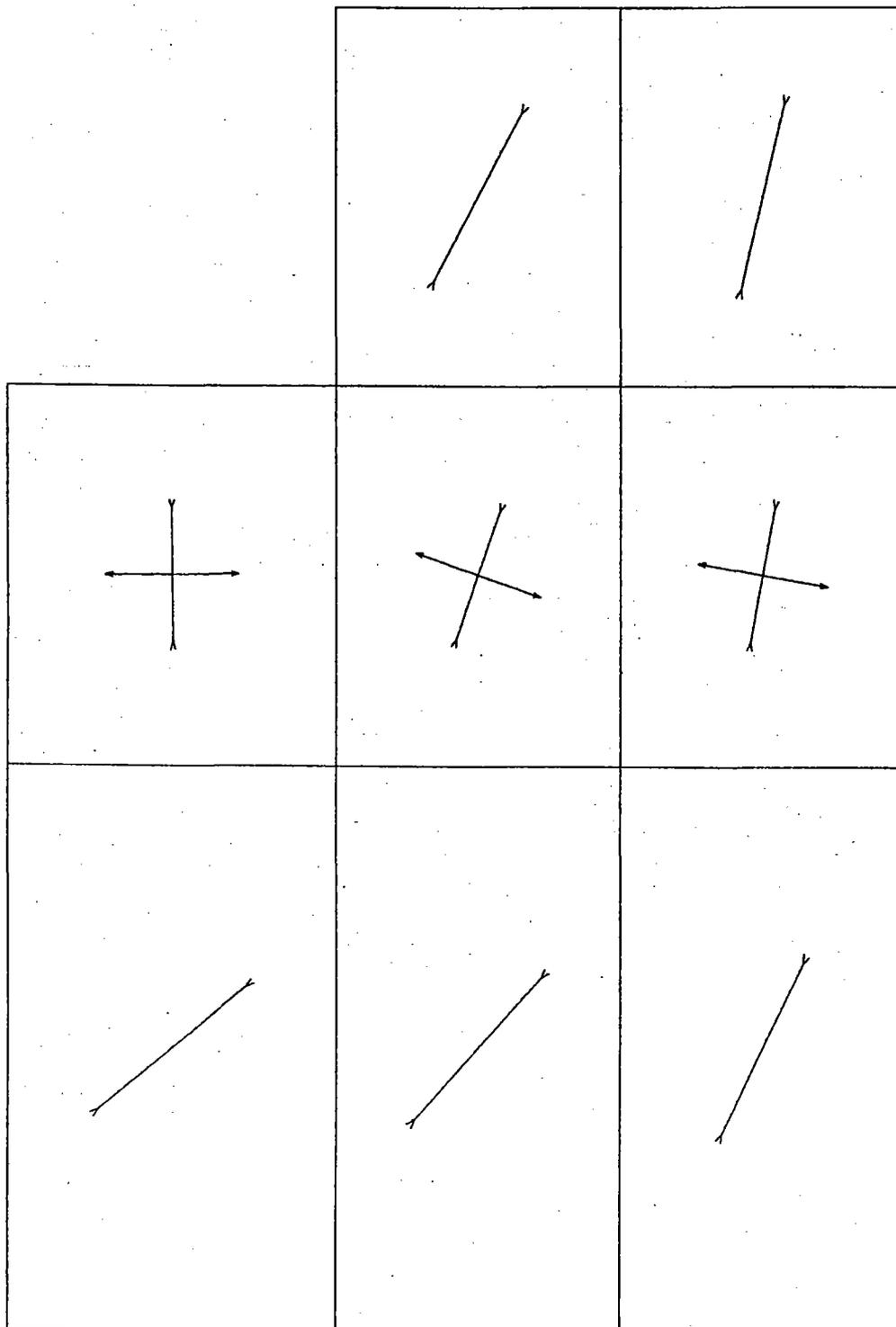
MAX = 2265.7  
MIN = -3235.5

( - X = 80.0 )  
H 1000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/50

MAX = 2267.7  
MIN = -3232.6

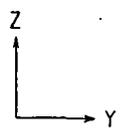
( X = 80.0 )  
H 1000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)

	x	x	/
x	x	x	\
x	x	x	+
\	\	+	+
/	+	+	
\	+	+	
/	/	+	+
x	x	x	+
x	/	/	/
/	/	/	/



$\sigma_1, \sigma_2$   
 SCALE 1/400

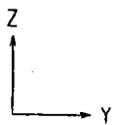
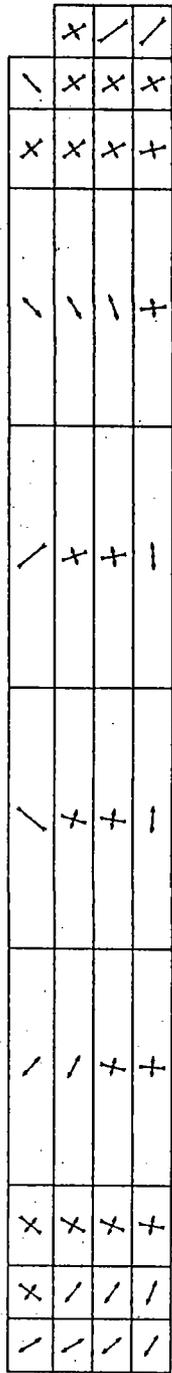
MAX = 3421.4  
 MIN = -3266.1

( X = 150.0 )  
 10000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



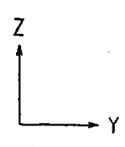
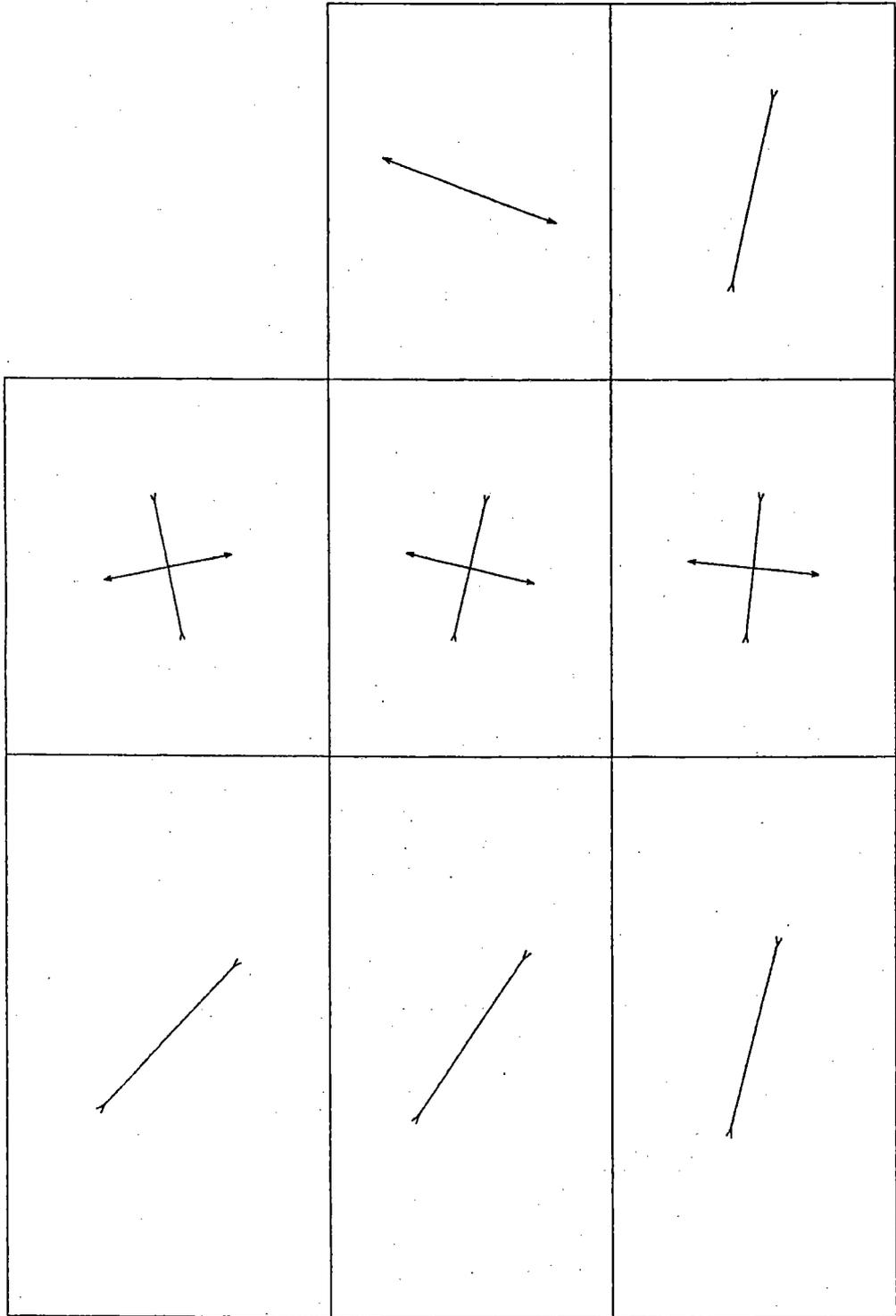
$\sigma_1, \sigma_2$   
 SCALE 1/400

MAX = 3424.2  
 MIN = -3265.5

( X = 150.0 )  
 10000.0

LOAD CASE NO. 3    ++    MODEL 2    ( NO.C-W )    ++  
                                 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/50

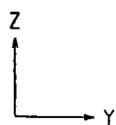
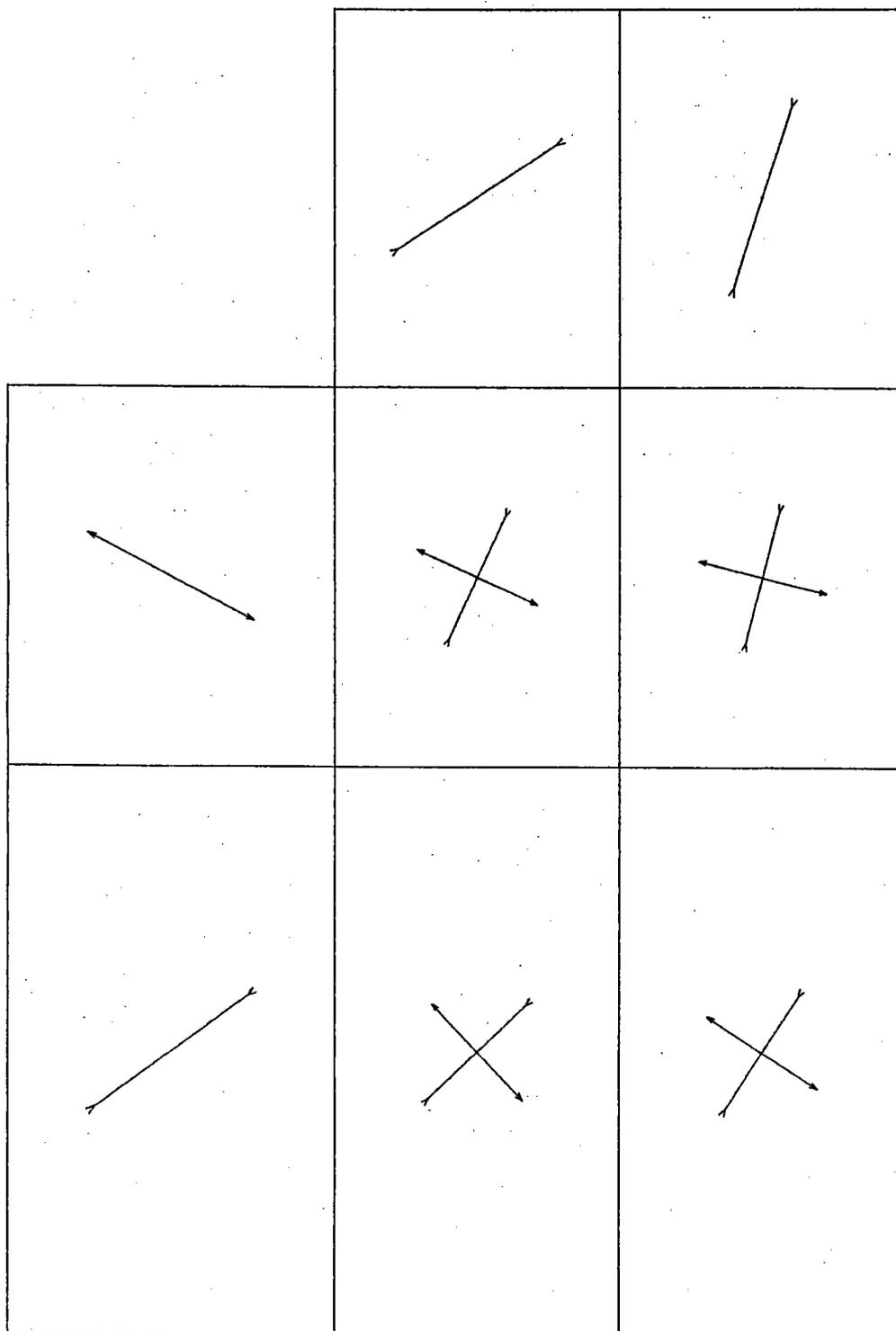
MAX = 3190.6  
MIN = -3230.4

( X = 220.0 )  
H = 1000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/50

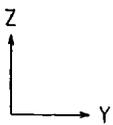
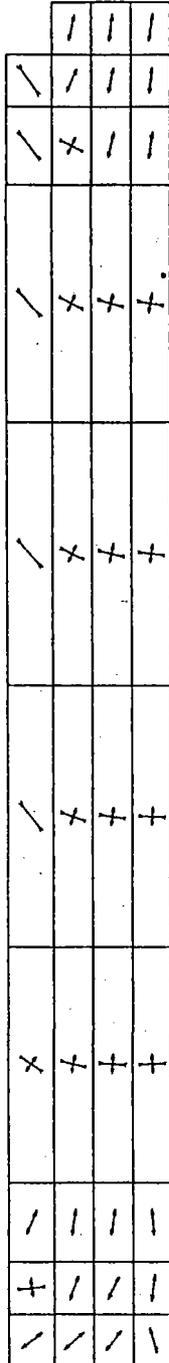
MAX = 3200.2  
MIN = -3228.5

( X = 220.0 )  
1000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
 \* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
 SCALE 1/400

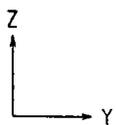
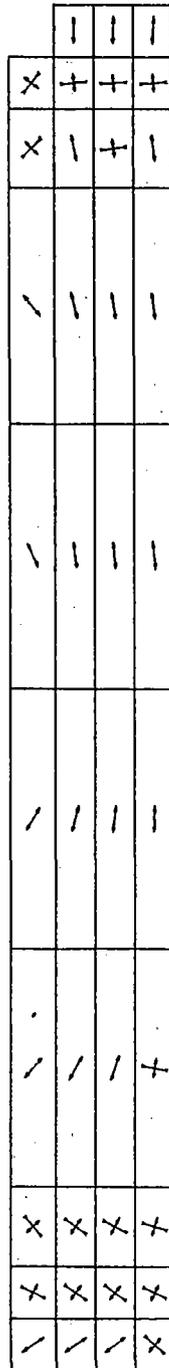
MAX = 3264.6  
 MIN = -3196.6

( X = 290.0 )  
 10000.0

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

PRINCIPAL STRESS (LOWER)



$\sigma_1, \sigma_2$   
SCALE 1/400

MAX - 3235.7  
MIN - -2266.7

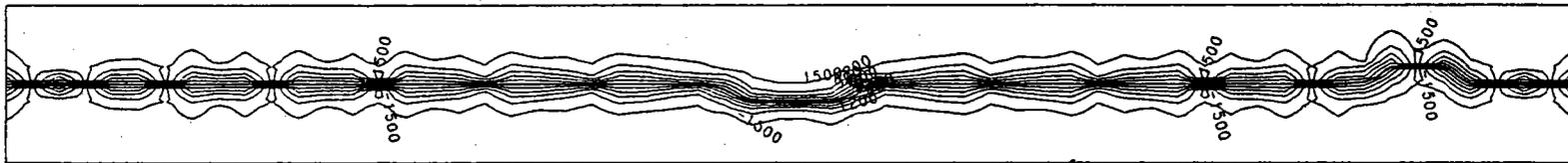
( X = 290.0 )  
10000.0

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)

(3) 直応力図 ( $\sigma_x$ )



Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

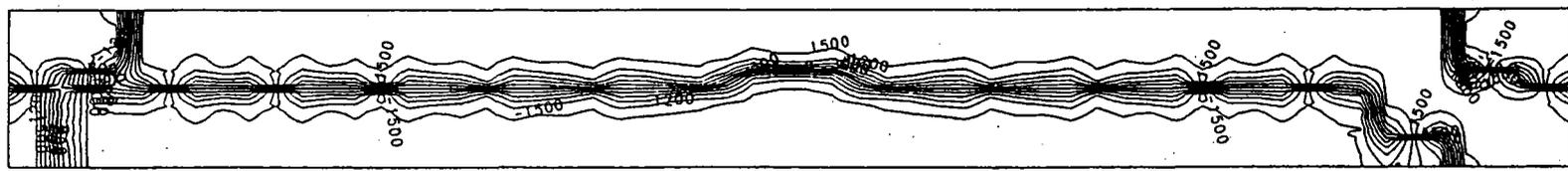
MAX = 1647.4  
MIN = -1643.6

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

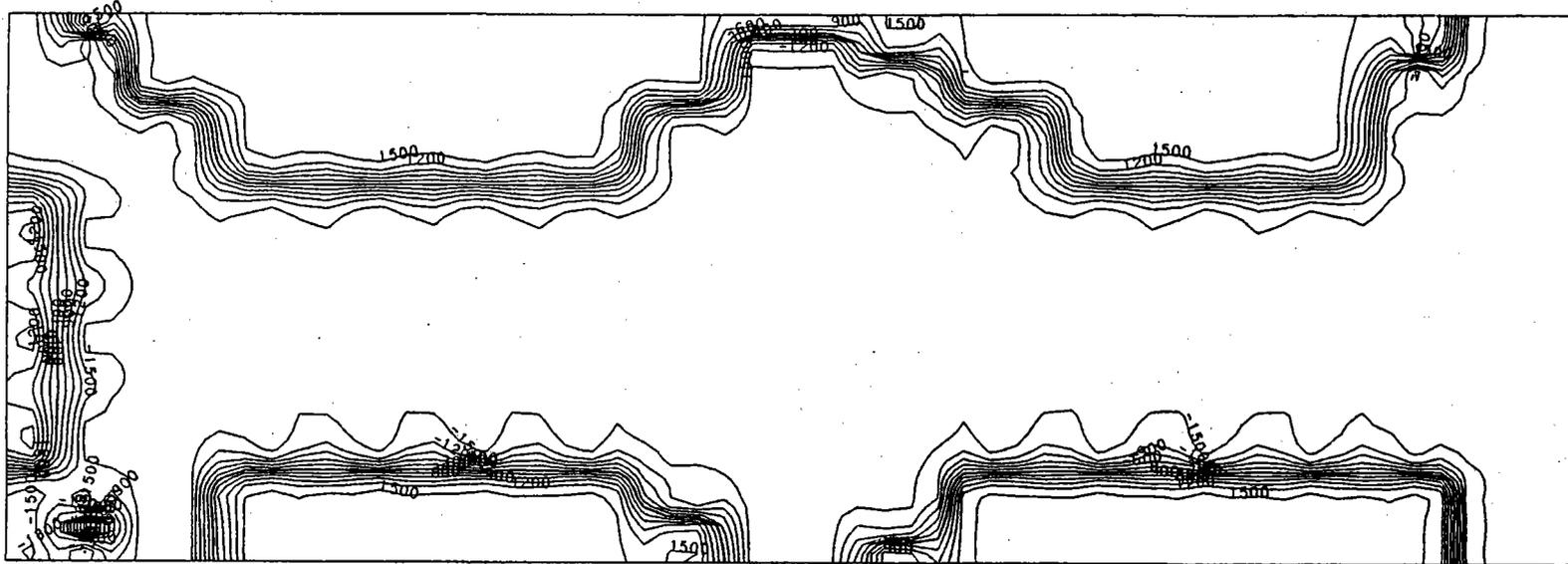
MAX = 1656.6  
MIN = -1663.8

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



- 119 -

Z  
↑  
X →

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

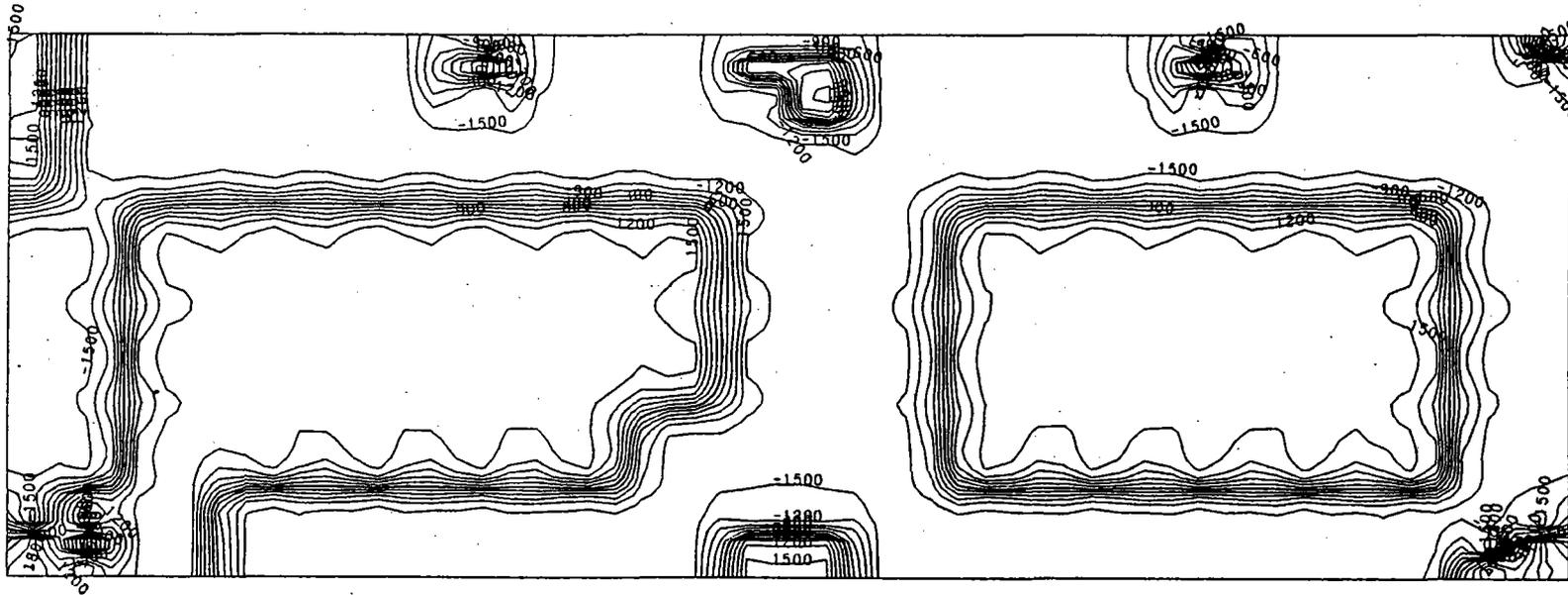
MAX = 1682.1  
MIN = -1855.4

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NØ.C-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



- 120 -

Z  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

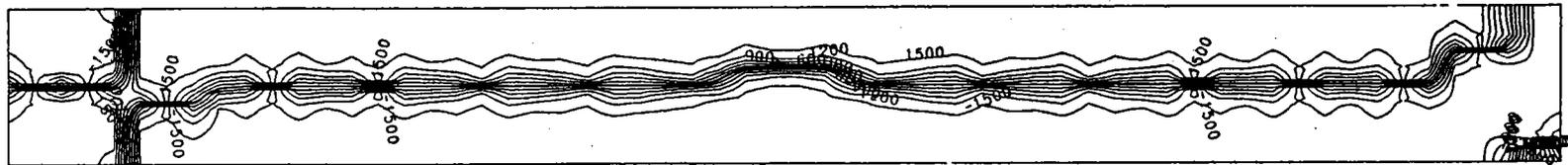
MAX = 1840.6  
MIN = -1681.8

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



- 121 -

Y  
↑  
X →

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

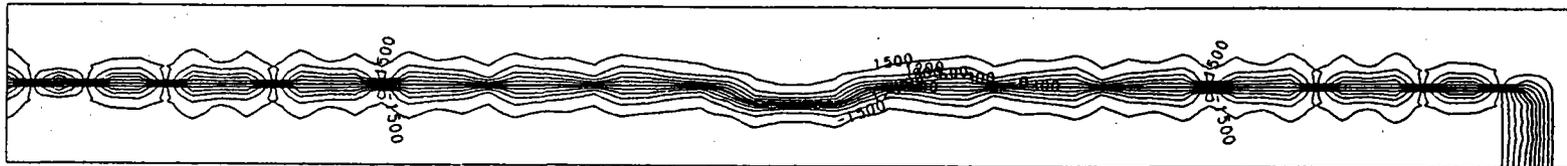
MAX = 1641.4  
MIN = -1655.7

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



-122-

Y  
X

$\sigma_x$   
SCALE 1/1000

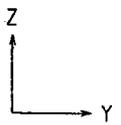
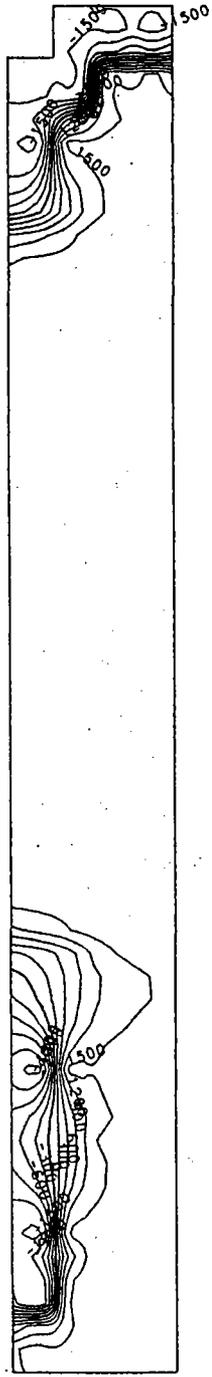
MAX = 1653.7  
MIN = -1641.0

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



$\sigma_x$   
SCALE 1/400

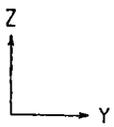
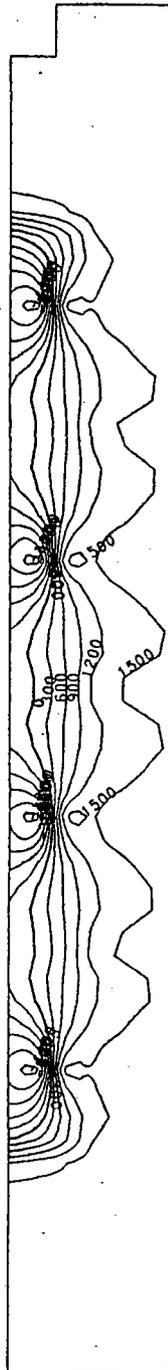
MAX = 1626.9  
MIN = -1599.7

( X = 10.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_x$   $\mu$   
SCALE 1/400

MAX = 1626.6  
MIN = -1596.8

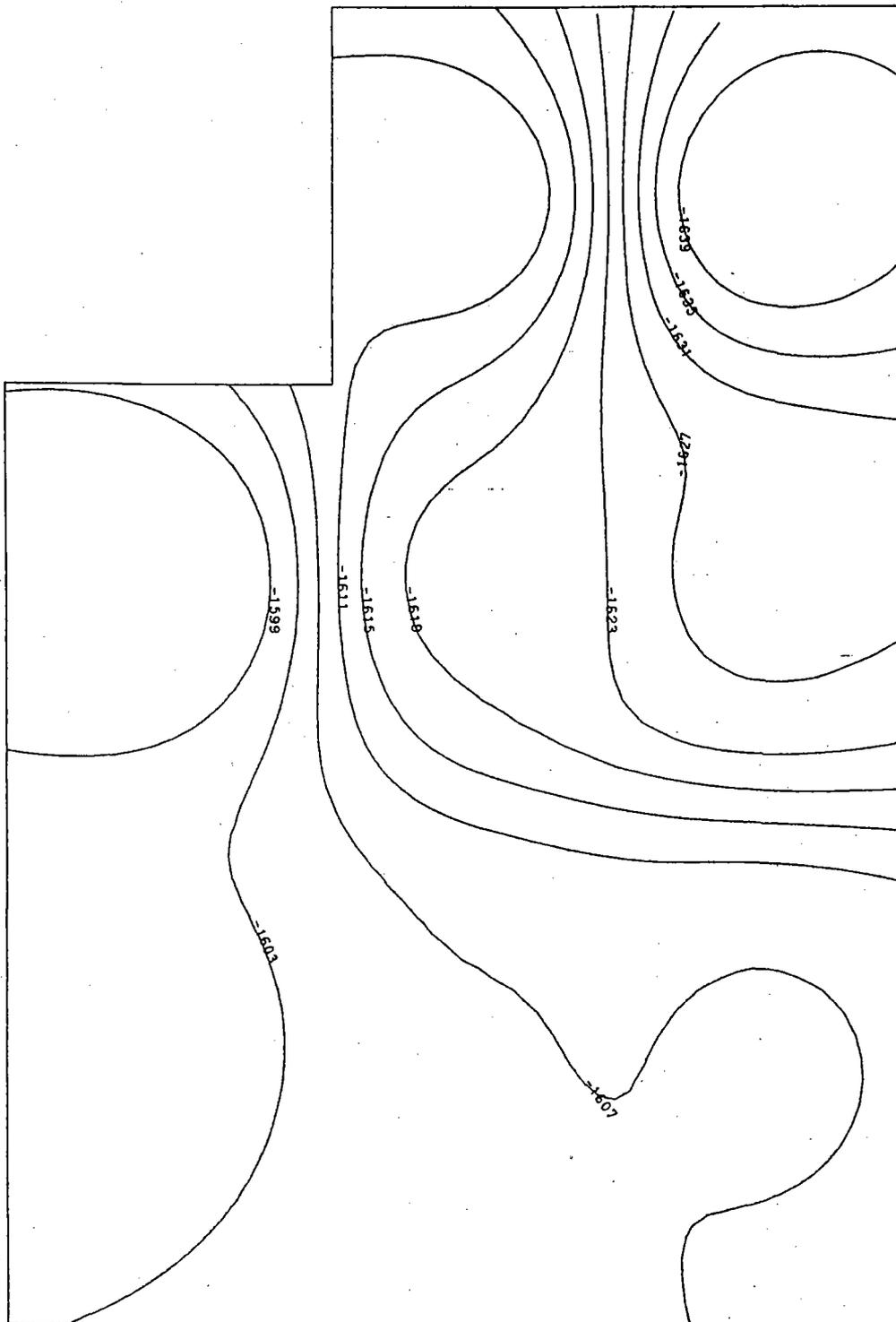
( X = -10.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

++

NORMAL STRESS (UPPER)



Z  
Y

$\sigma_x$   
SCALE 1/50

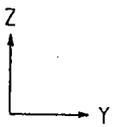
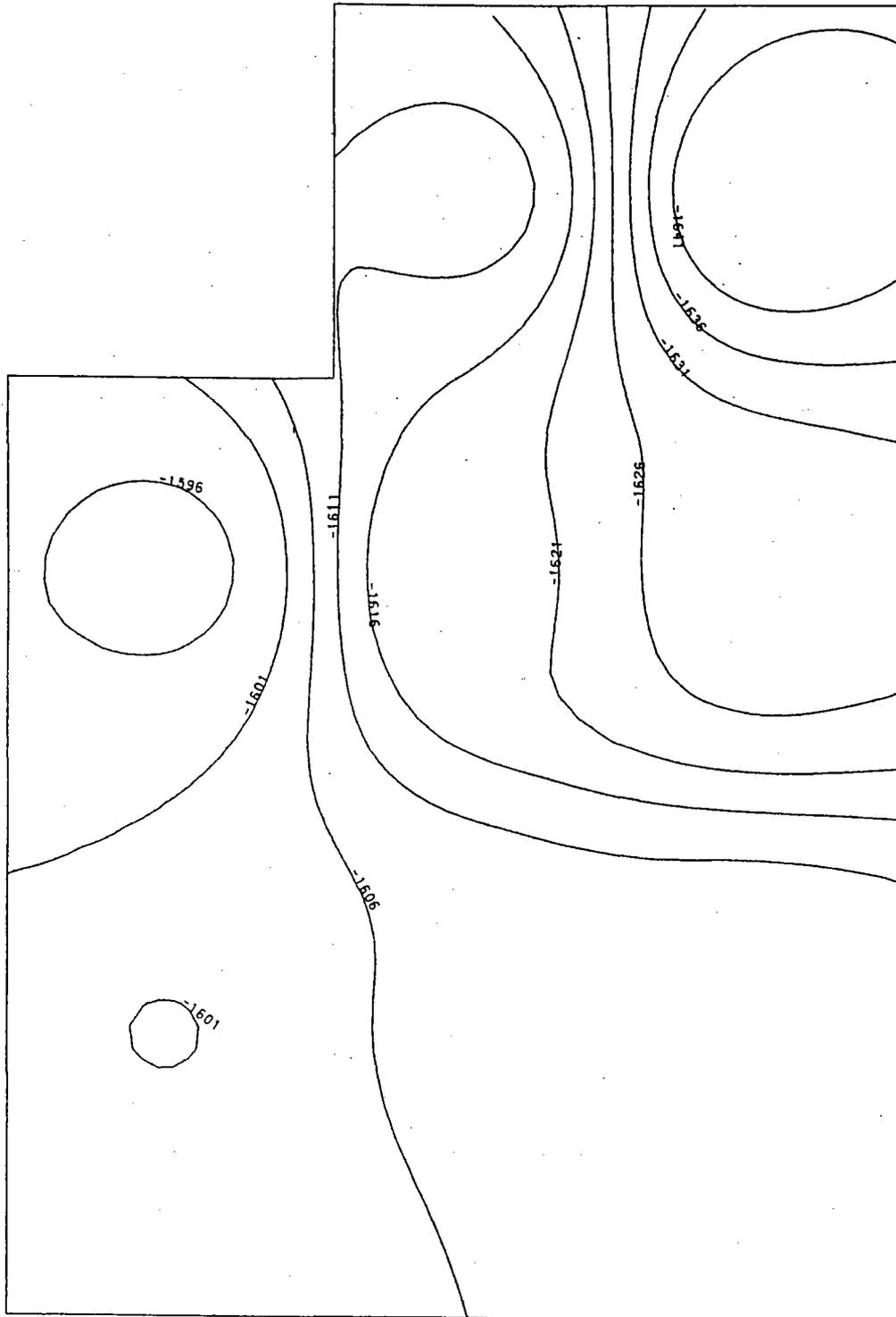
MAX = -1595.3  
MIN = -1643.4

( X = 80.0 )  
INTERVAL = 4

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_x$   
SCALE 1/50

MAX = -1595.0  
MIN = -1646.6

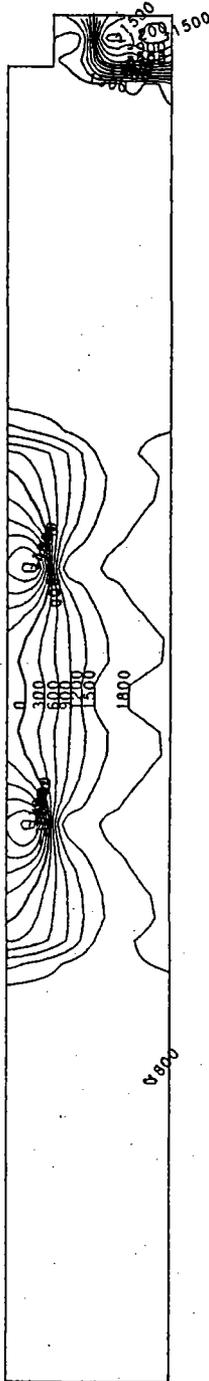
( X = 80.0 )  
INTERVAL = 5



LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



Z  
Y

$\sigma_x$   
SCALE 1/400

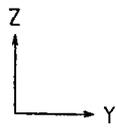
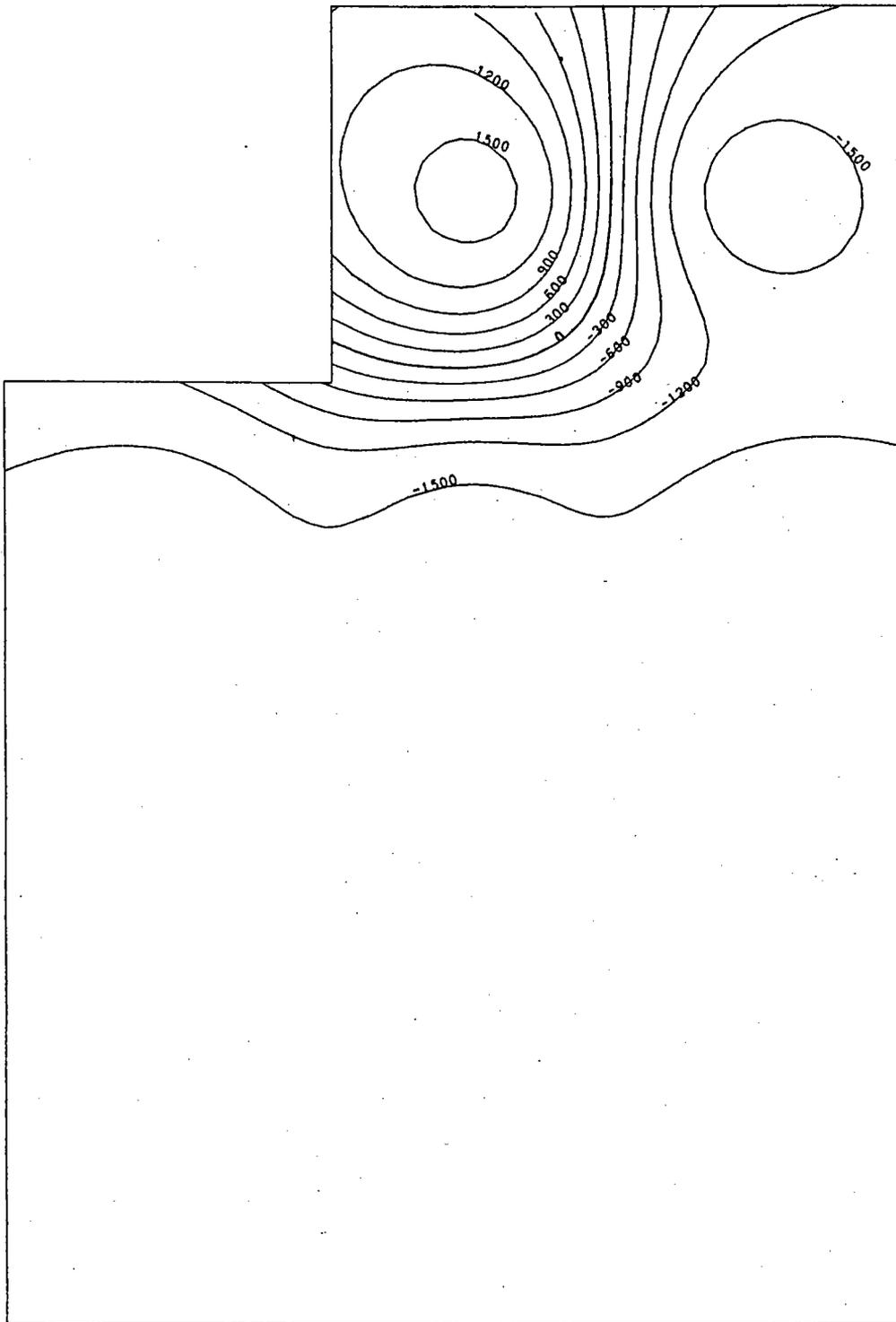
MAX = 1995.7  
MIN = -1652.7

( X = 150.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



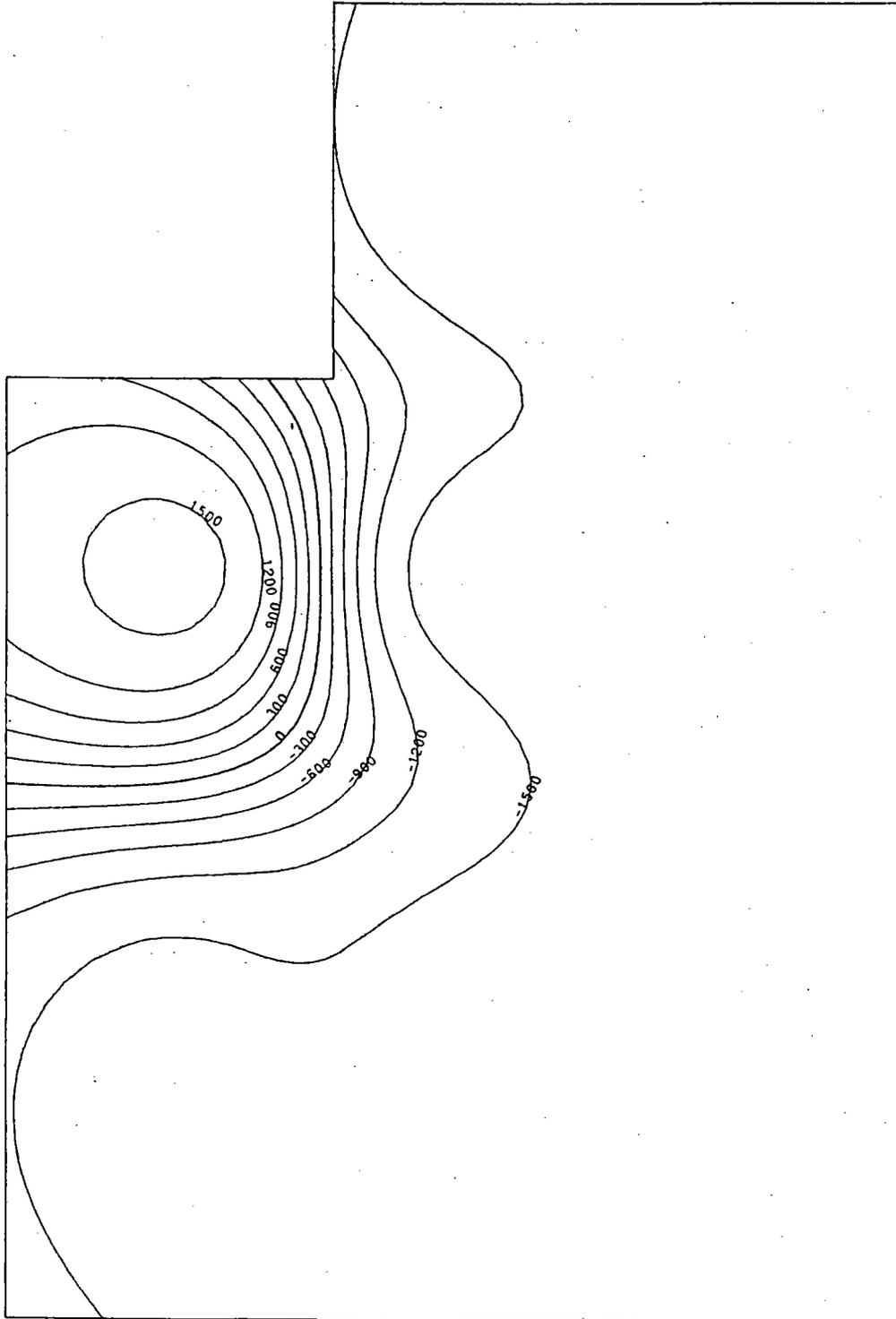
$\sigma_x$   
SCALE 1/50

MAX = 1595.9  
MIN = -1612.4

( X = 220.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3    ++    MODEL 2    ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



Z  
↑  
Y  
→

$\sigma_x$   
SCALE 1/50

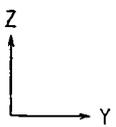
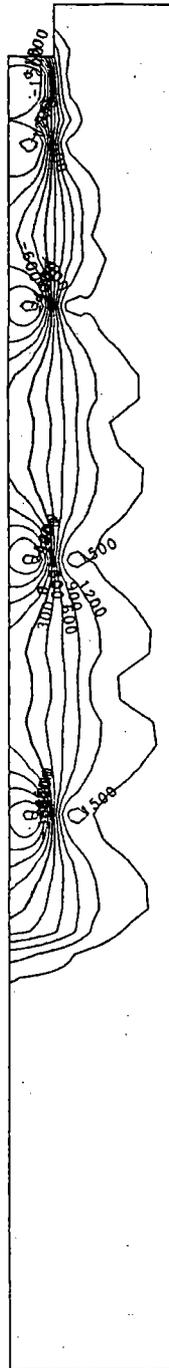
MAX - 1593.7  
MIN - -1646.9

( X = 220.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NØ.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



$\sigma_x$   
SCALE 1/400

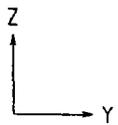
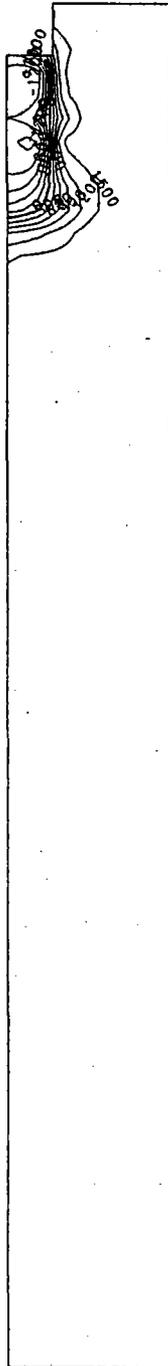
MAX = 1716.6  
MIN = -1598.5

( X = 290.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_x$   
SCALE 1/400

MAX = 1667.9  
MIN = -1599.1

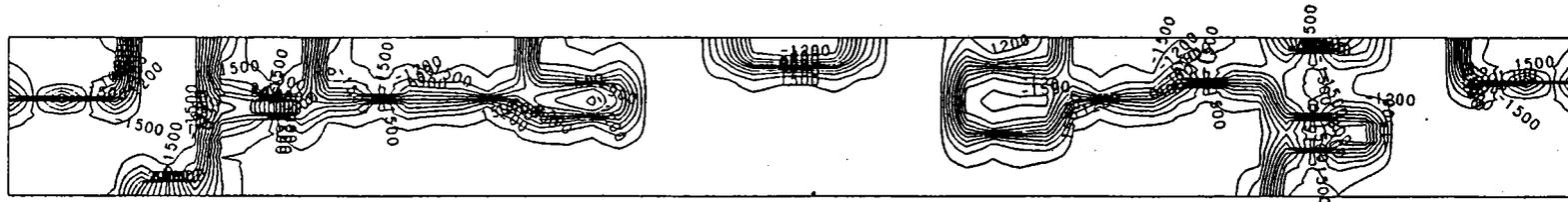
( X = 290.0 )  
INTERVAL = 300

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)

(4) 直応力図 ( $\sigma_y$ )



Y  
X

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

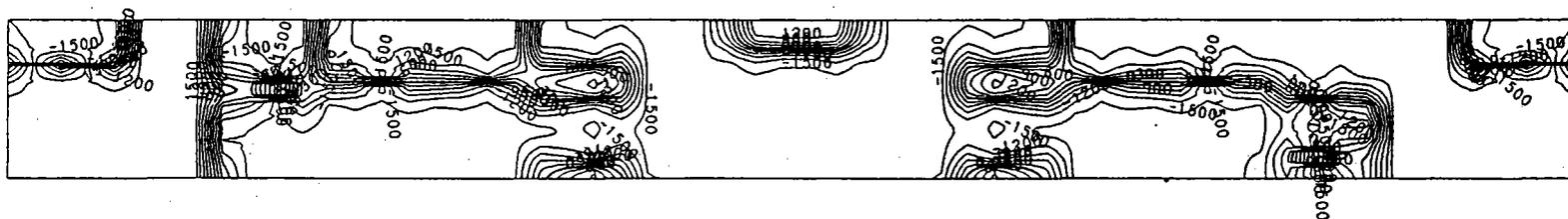
MAX = 1607.4  
MIN = -1622.6

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



-184-

Y  
X

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

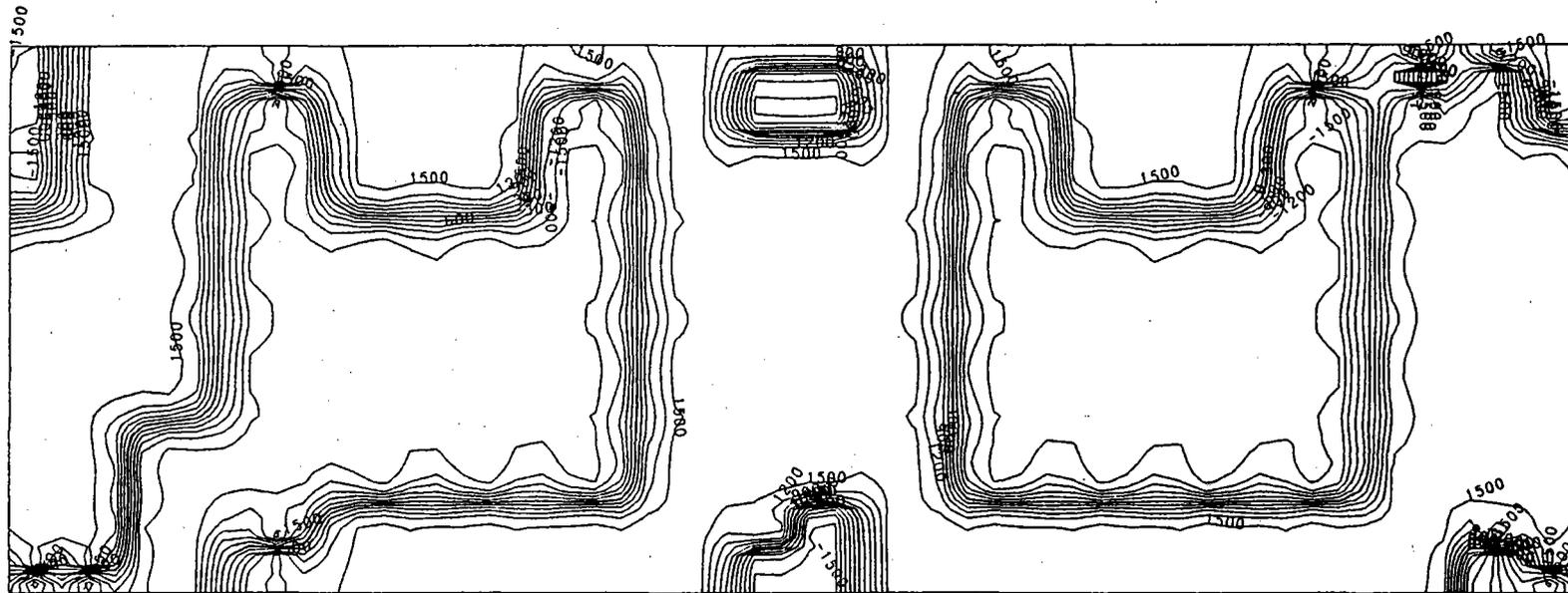
MAX = 1620.2  
MIN = -1602.3

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



- 135 -

Z  
↑  
X →

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

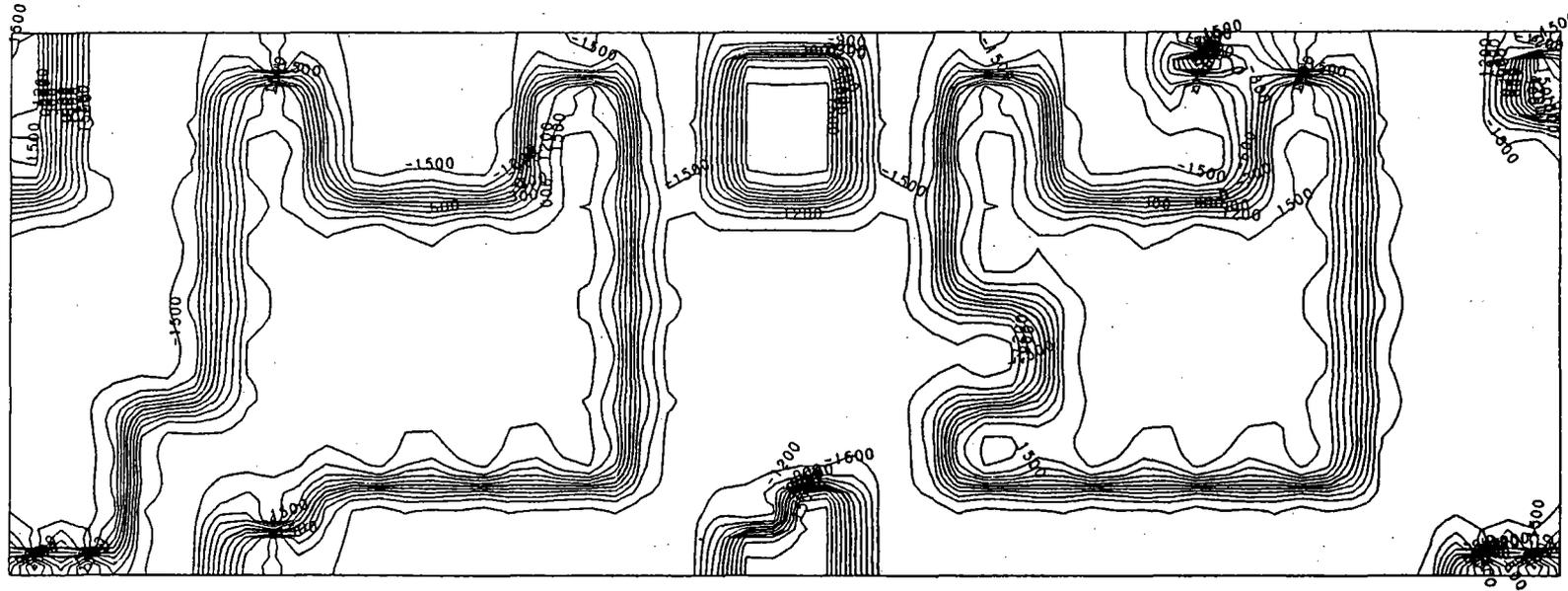
MAX = 1644.2  
MIN = -1689.1

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (LOWER)



- 136 -

Z  
↑  
X →

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

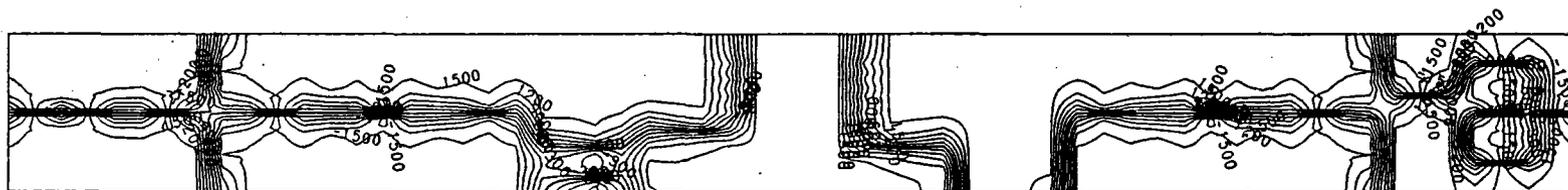
MAX = 1681.3  
MIN = -1643.8

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

NORMAL STRESS (UPPER)



- 137 -

Y  
X

$\sigma_y$   
SCALE 1/1000

MAX = 1602.3  
MIN = -1602.9

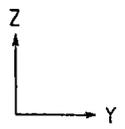
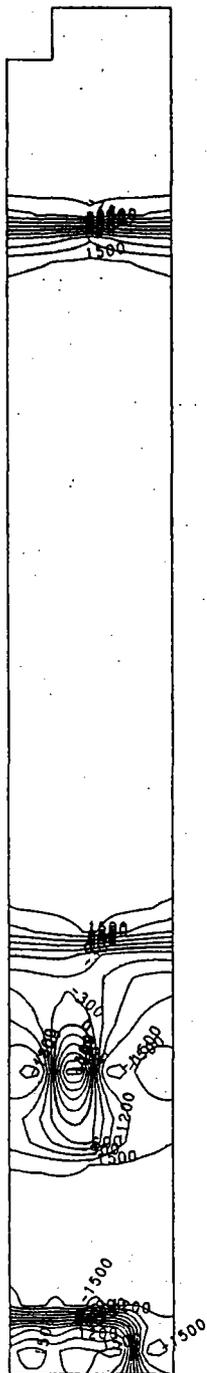
( L-FLG )  
INTERVAL = 300



LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/400

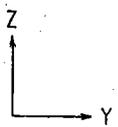
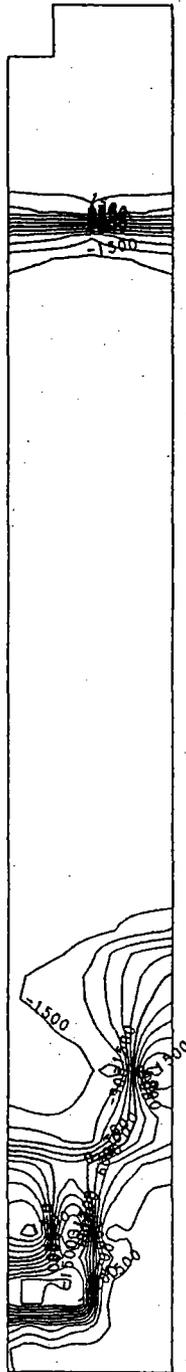
MAX - 1612.1  
MIN - -1662.6

( X = 10.0 )  
INTERVAL - 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/400

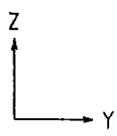
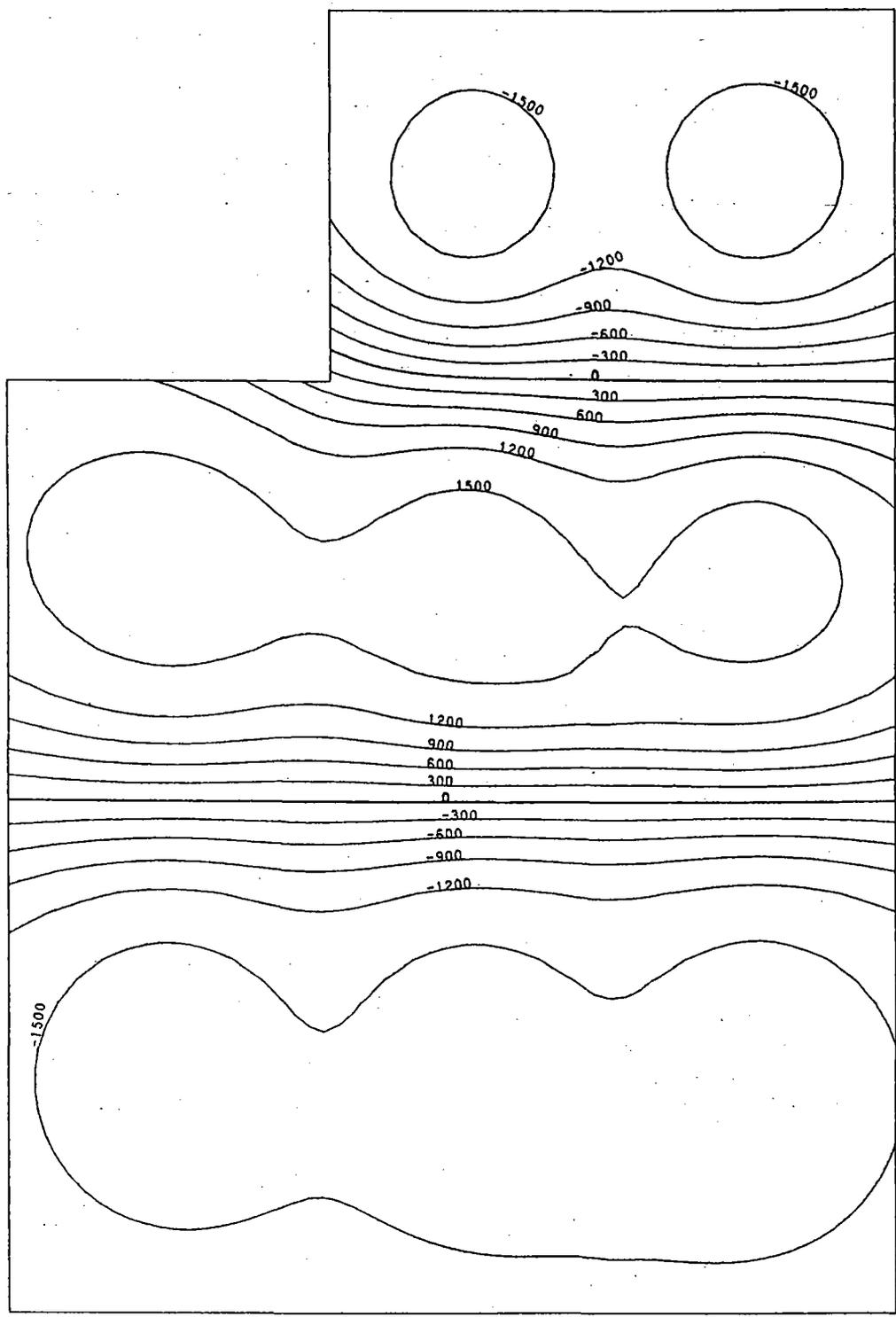
MAX - 1685.8  
MIN - -1642.8

( X = 10.0 )  
INTERVAL - 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/50

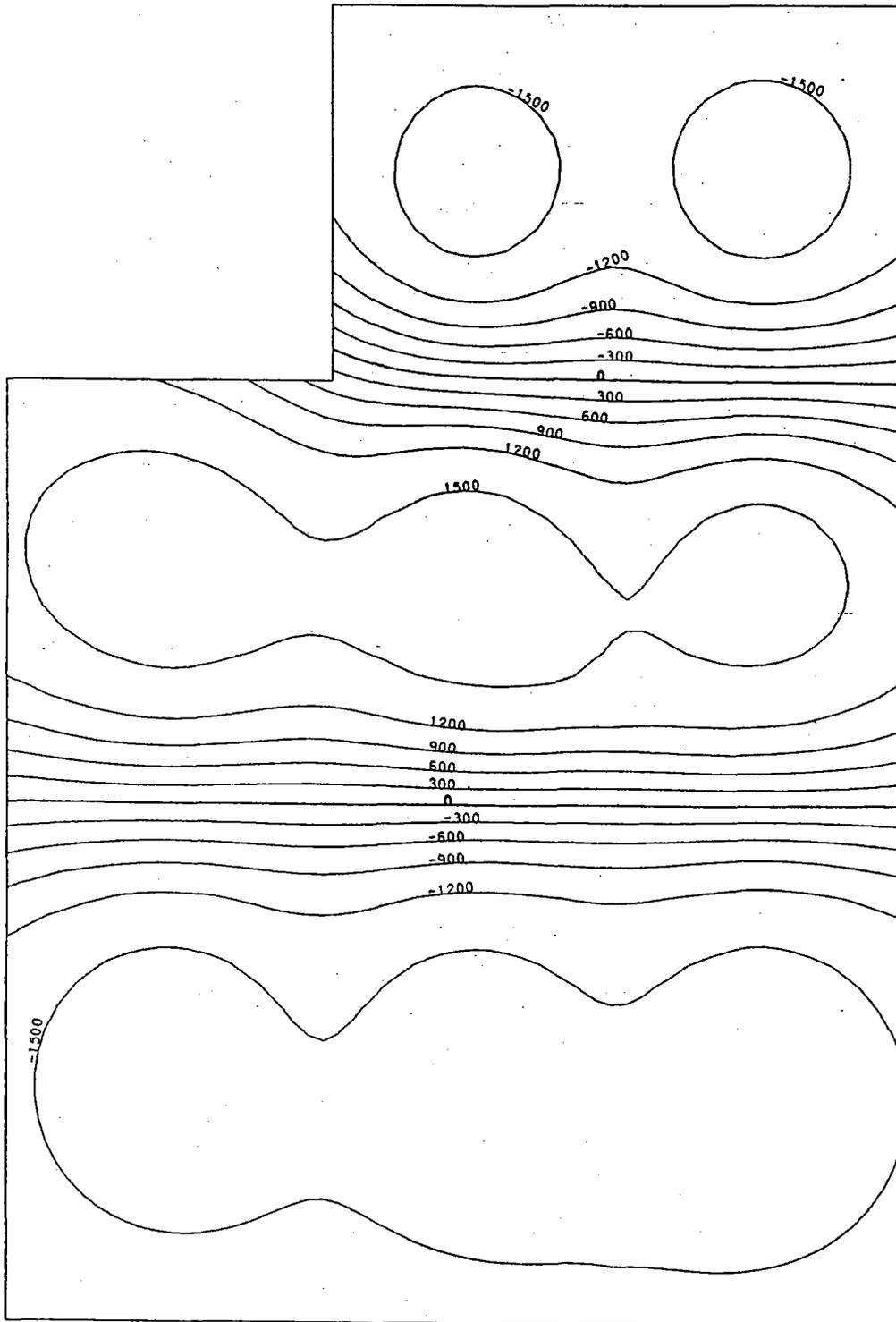
MAX = 1608.3  
MIN = -1614.0

( X = 80.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



Z  
Y

$\sigma_y$   
SCALE 1/50

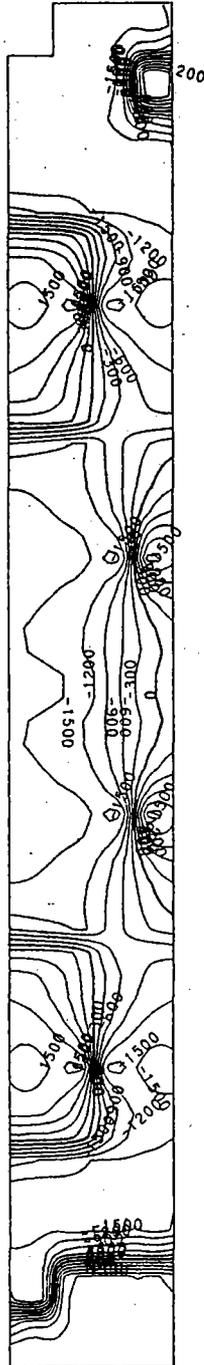
MAX = 1610.0  
MIN = -1611.2

( X = 80.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



Z  
↑  
Y  
→

$\sigma_y$   
SCALE 1/400

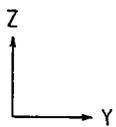
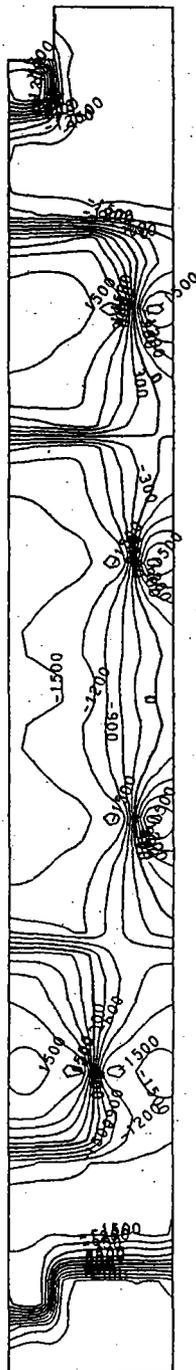
MAX = 1712.3  
MIN = -1623.1

( X = 150.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MØDEL 2 ( NØ.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/400

MAX - 1715.6  
MIN - -1619.6

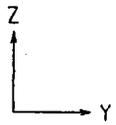
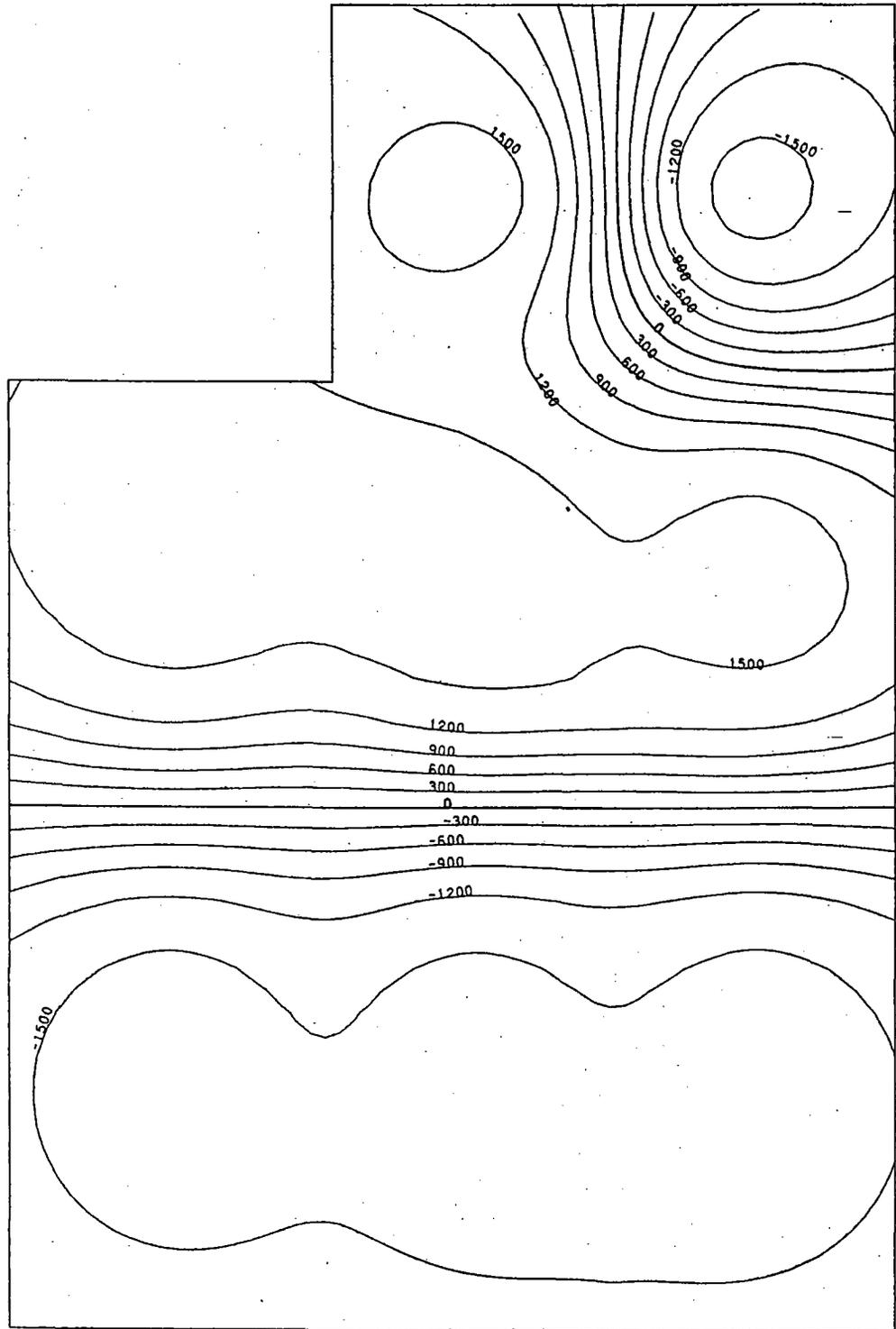
( X = 150.0 )  
INTERVAL - 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/50

MAX = 1594.8  
MIN = -1618.9

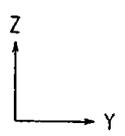
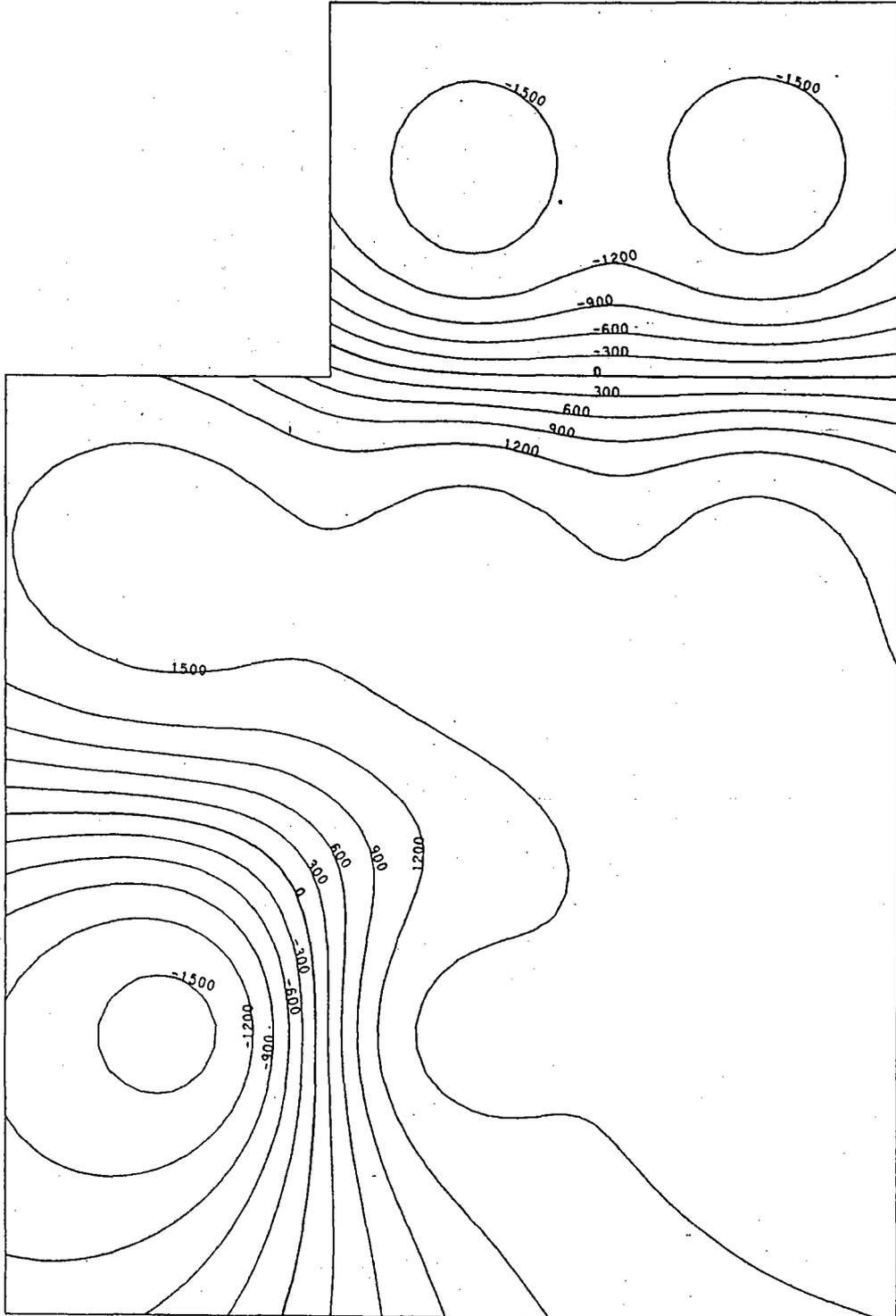
( X = 220.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/50

MAX = 1612.7  
MIN = -1604.5

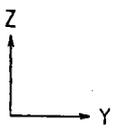
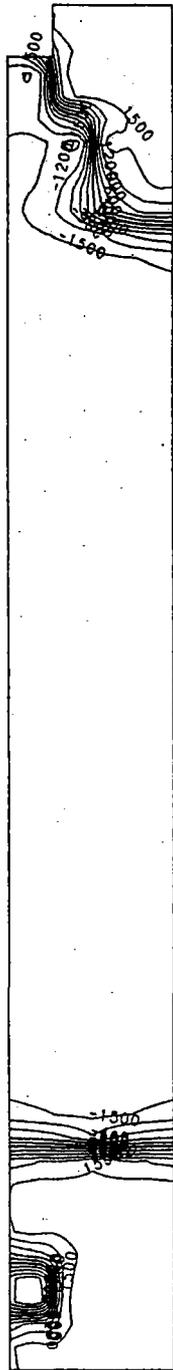
( X = 220.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (UPPER)



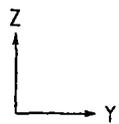
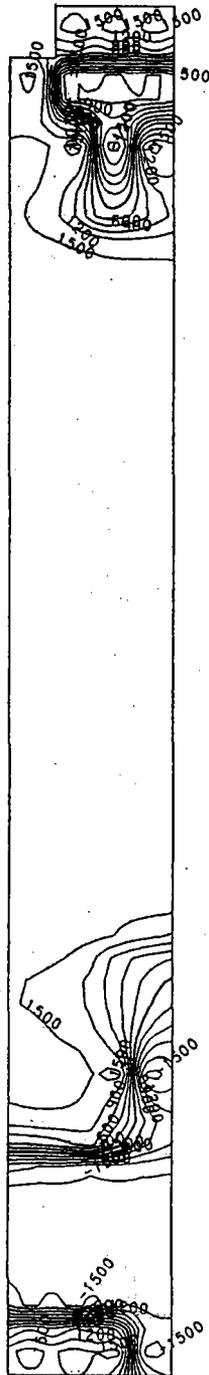
$\sigma_y$   
SCALE 1/400

MAX = 1618.5  
MIN = -1600.4

( X = 290.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3    ++    MODEL 2    ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

NORMAL STRESS (LOWER)



$\sigma_y$   
SCALE 1/400

MAX = 1603.3  
MIN = -1606.6

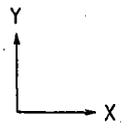
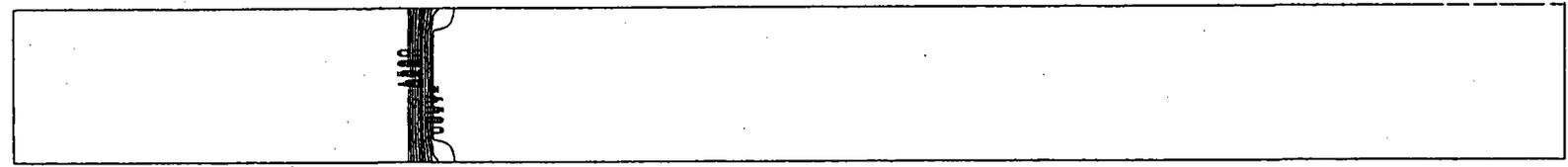
( X = 290.0 )  
INTERVAL = 300

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)

(5) せん断応力図 (  $\tau_{xy}$  )



$\tau_{xy}$   
SCALE 1/1000

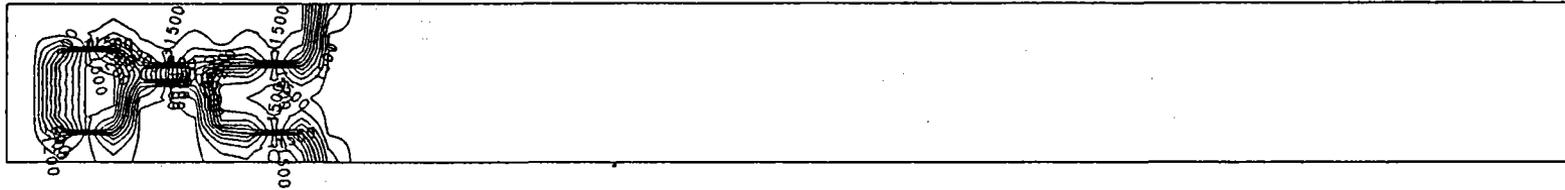
MAX = 1600.8  
MIN = -1624.8

( U-FLG )  
INTERVAL = 300

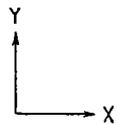
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

SHEARING STRESS (LOWER)



-150-



Txy  
SCALE 1/1000

MAX = 1621.0  
MIN = -1596.4

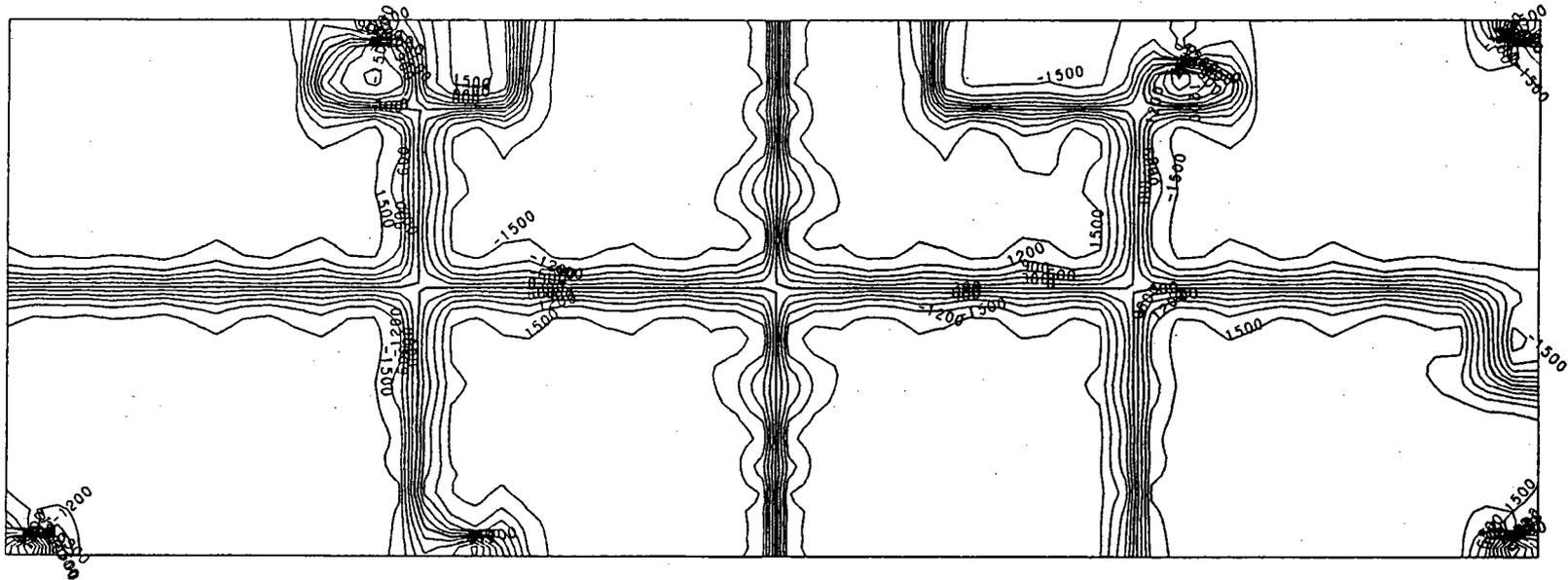
( U-FLG )  
INTERVAL = 300



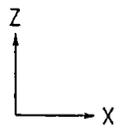
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

SHEARING STRESS (LOWER)



-152-



T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/1000

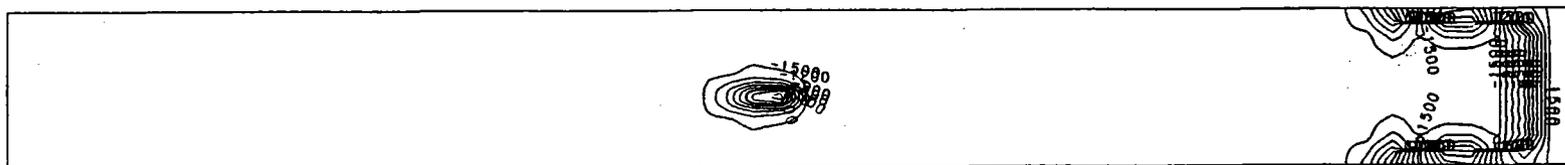
MAX = 1616.5  
MIN = -1627.3

( WEB )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

SHEARING STRESS (UPPER)



-153-

Y  
↑  
X →

T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/1000

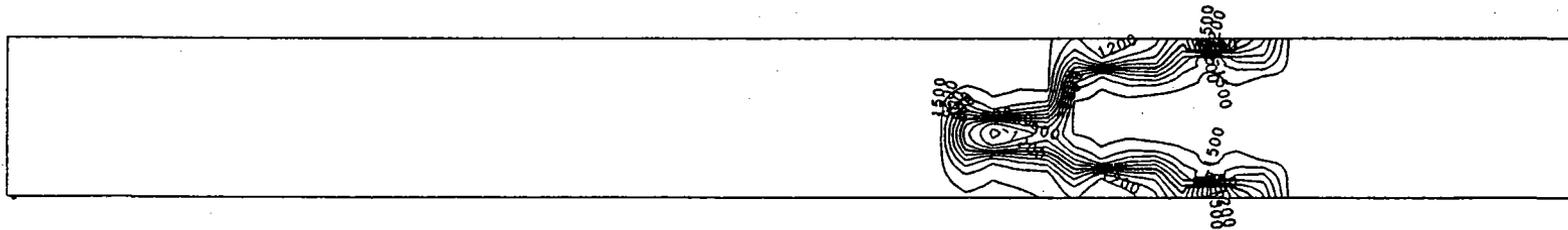
MAX = 1593.8  
MIN = -1601.4

( L-FLG )  
INTERVAL = 300

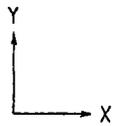
LOAD CASE NO. 3 \* CASE 3 \*

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

SHEARING STRESS (LOWER)



-154-



T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/1000

MAX = 1605.7  
MIN = -1597.7

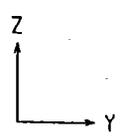
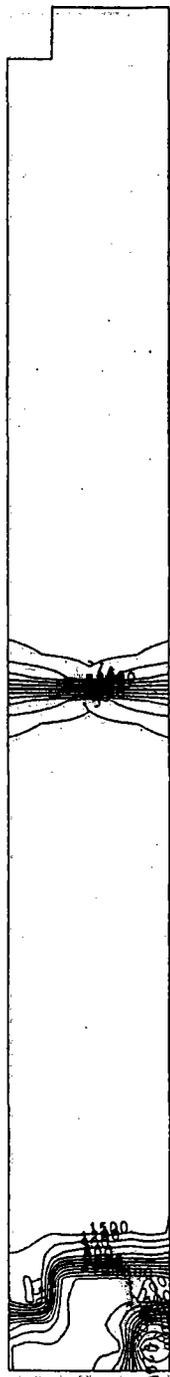
( L-FLG )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)



$\tau_{xy}$   
SCALE 1/400

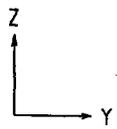
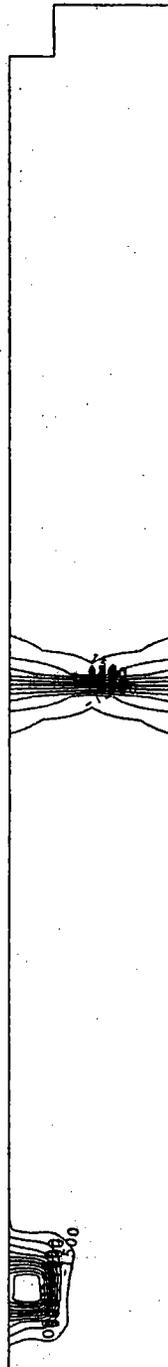
MAX = 1634.4  
MIN = -1641.0

( X = 10.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



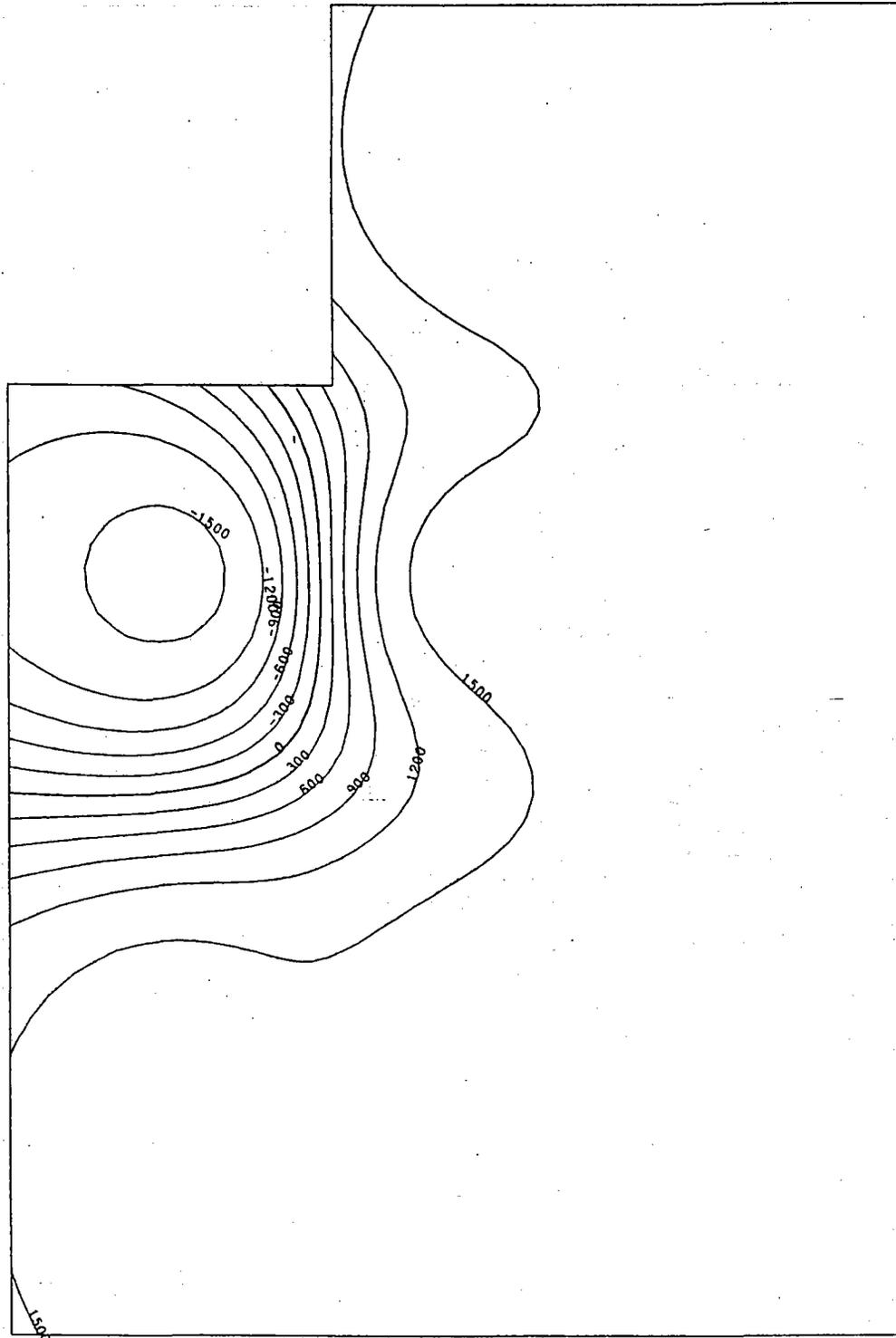
$T_{xy}$   
SCALE 1/400

MAX = 1607.4  
MIN = -1680.4

( X = 10.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3    ++ MODEL 2 ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)



Z  
↑  
Y →

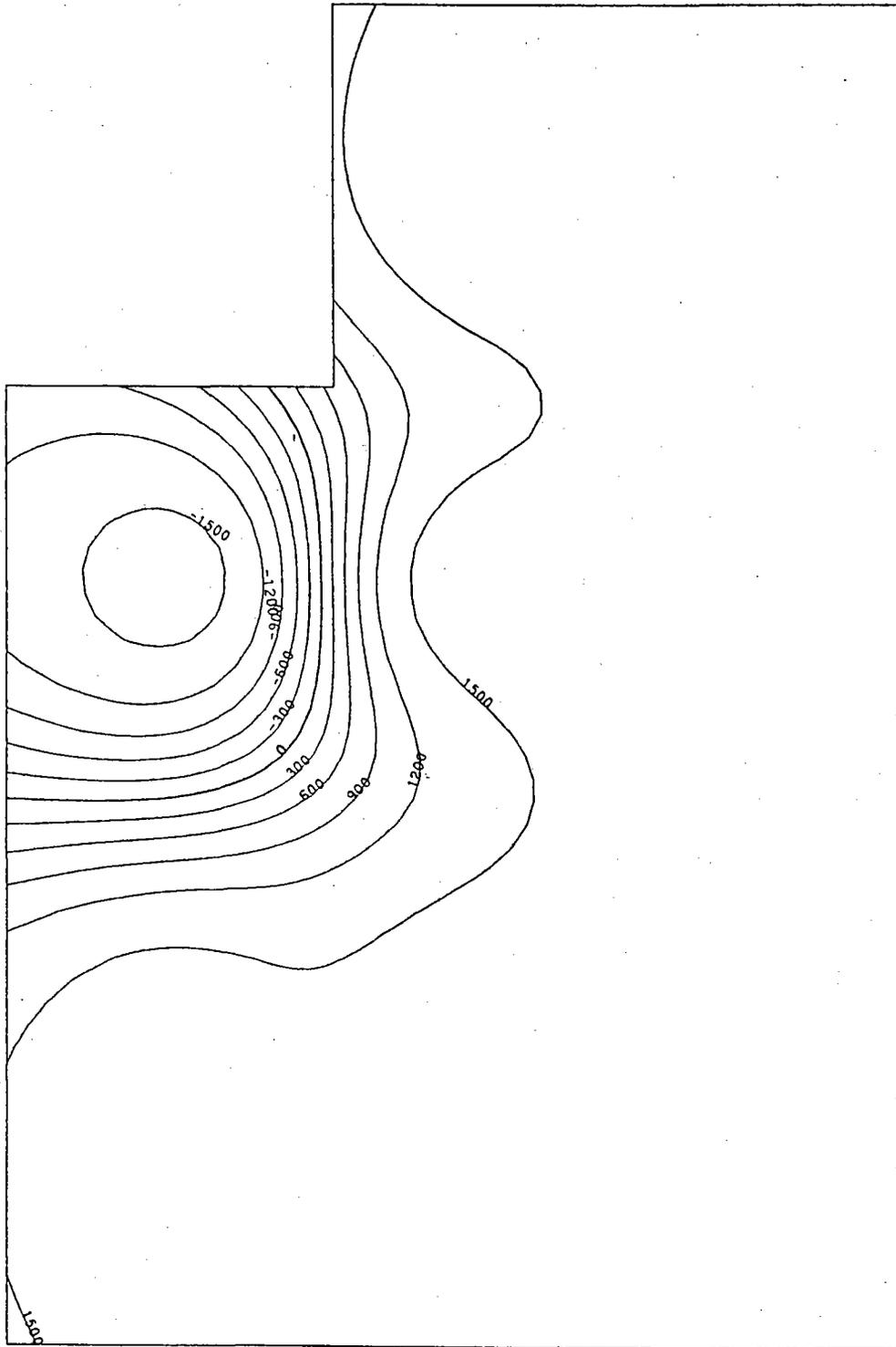
T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/50

MAX = 1627.7  
MIN = -1593.2

( X = 80.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3    ++ MODEL 2 ( NO.C-W )    ++  
                         \* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



Z  
↑  
Y  
→

$\tau_{xy}$   
SCALE 1/50

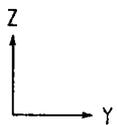
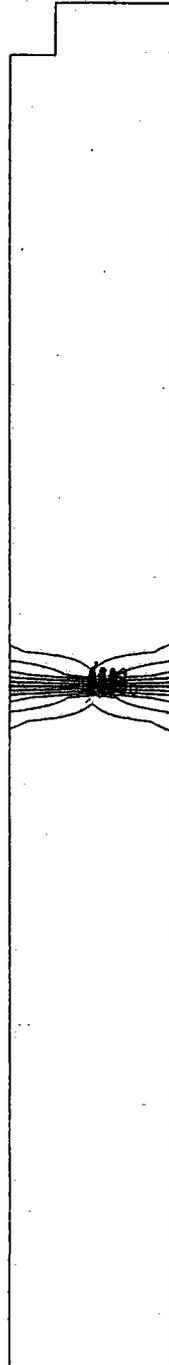
MAX = 1626.5  
MIN = -1593.9

( X = 80.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)



Txy  
SCALE 1/400

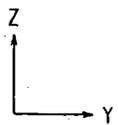
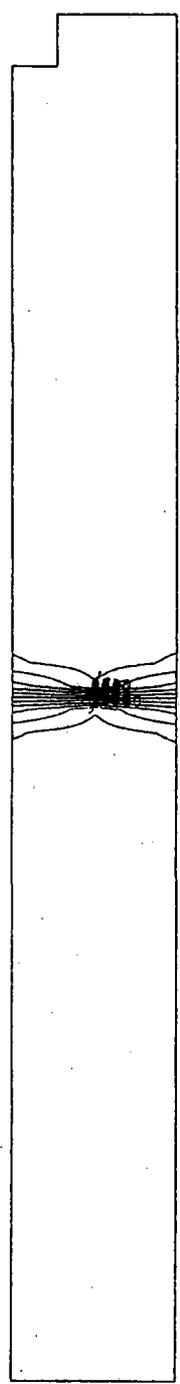
MAX = 1665.8  
MIN = -1670.3

( X = 150.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



T<sub>xy</sub>  
SCALE 1/400

MAX - 1658.6  
MIN - -1671.5

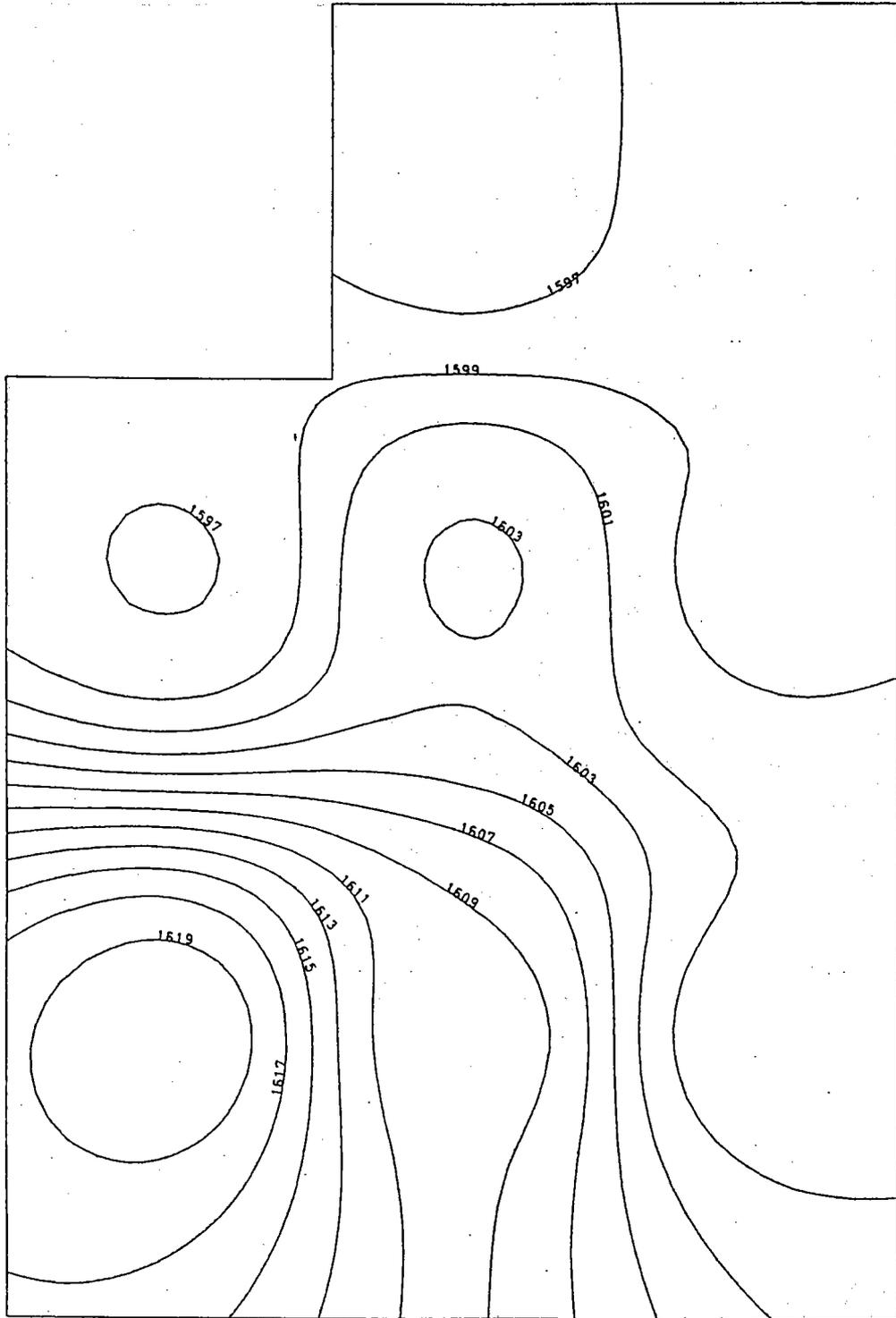
( X = 150.0 )  
INTERVAL - 300 -

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++

\* CASE 3 \*

Shearing Stress (Upper)



Z  
Y

$T_{xy}$   
SCALE 1/50

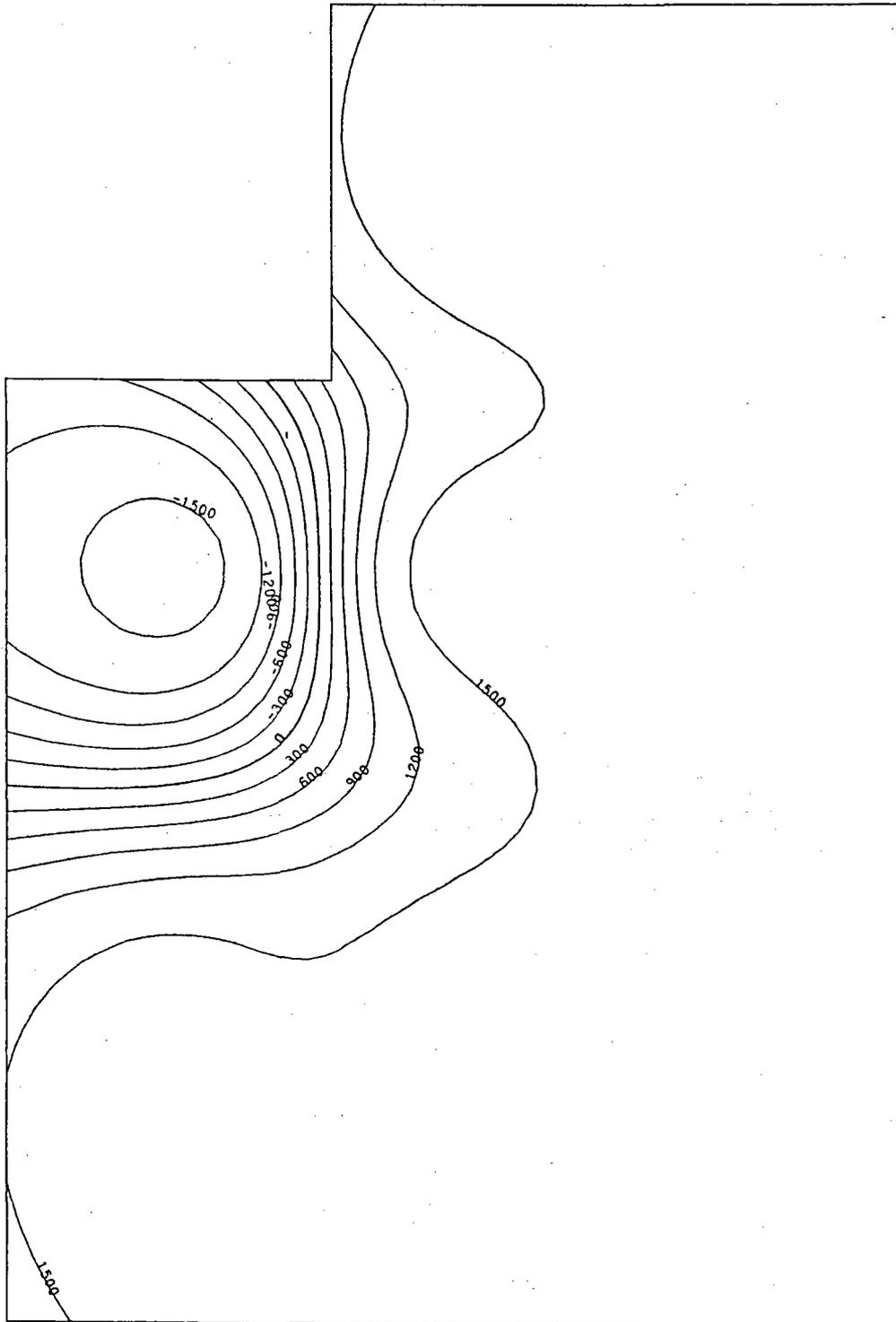
MAX - 1620.4  
MIN - 1596.0

( X = 220.0 )  
INTERVAL - 2

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



Z  
Y

Txy  
SCALE 1/50

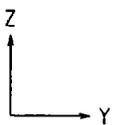
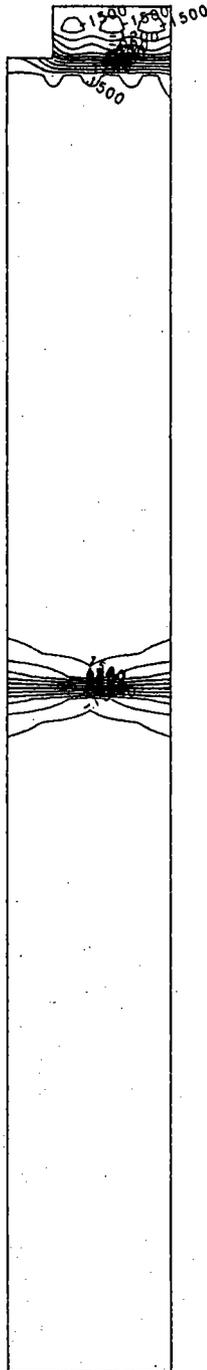
MAX = 1611.3  
MIN = -1596.9

( X = 220.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (UPPER)



Txy  
SCALE 1/400

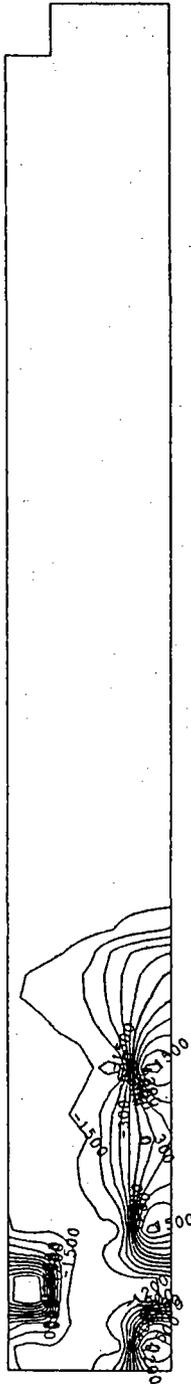
MAX - 1603.0  
MIN - -1611.8

( X = 290.0 )  
INTERVAL = 300

LOAD CASE NO. 3

++ MODEL 2 ( NO.C-W ) ++  
\* CASE 3 \*

SHEARING STRESS (LOWER)



Z  
↑  
Y →

$T_{xy}$   
SCALE 1/400

MAX - 1594.7  
MIN - -1608.4

( X = 290.0 )  
INTERVAL - 300

## 4. 5 考察

### (1) 強制変位を受ける I 桁の応力性状

I 桁は、桁全体がねじれるような面外方向の強制変位と、腹板中心に面外曲げの強制変位を受ける。ねじりの強制変位は、腹板の四隅のフランジとの交点の座標を、対角点となる 2 つの交点を一組として同じ量だけ変位させ、別の組を同じ量だけ逆向きに変位させることにより与えている。腹板中心の面外変位は、腹板中心の四分割点のうちの中間の三点の座標を、面外方向に変位させることにより与えている。この結果、桁全体としては変形図に示すような形状となる。

このような状態における I 桁の応力性状は、I 桁がねじりを受けた状態と、腹板が横荷重を受けた状態が合成されたものと考えられる。

I 桁が、全体として断面形状を保持したまま、端部からねじり荷重を受けると、フランジおよび腹板にせん断応力が生ずる。但し今回は、四隅の強制変位により、結果的にねじり荷重を受けたのと同じ状態となっている。そのため、断面形状が、変形図に示すように変形し、それに伴う応力が発生する。また、桁の拘束条件によっては、フランジにそり応力が発生するが、今回は桁の両端にそり拘束を受けないので、そり応力は発生しない。

以下に、それぞれ部材毎に発生応力の傾向を考察する。

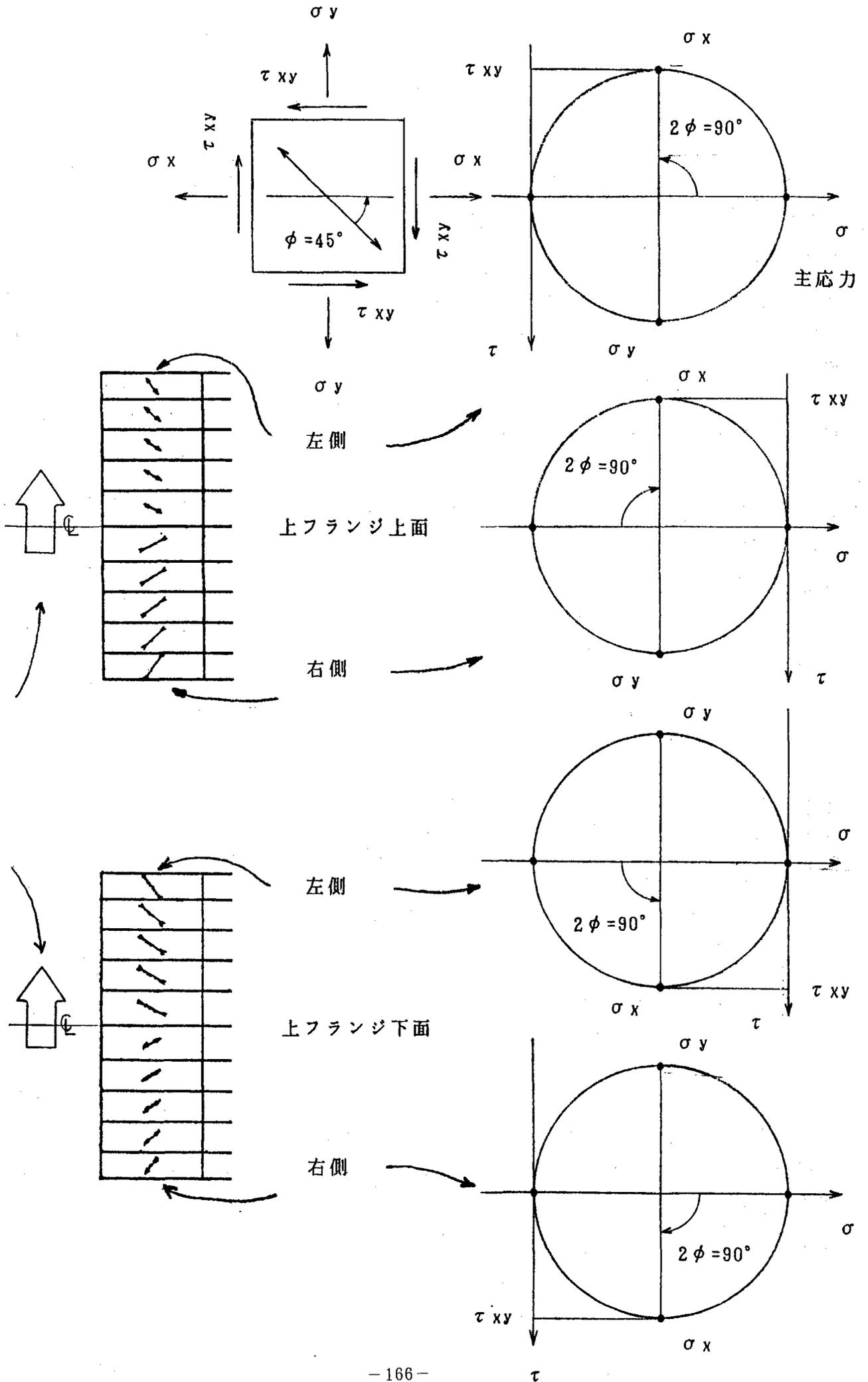
#### a) フランジ

No. A のフランジの応力分布には次のような特徴がある。

- ①主応力が一方向のみで直交する主応力がみられない要素が多い。
- ②主応力が水平線（桁軸線）となす角度はほぼ  $45^\circ$  である。
- ③主応力の符号は腹板を境にして逆転している。また、フランジの中央に対しても逆転している。つまり、フランジ中心点に関して点対称となっている。
- ④上面と下面とでは、主応力の大きさと方向が同じで、符号が逆となっている。
- ⑤上フランジと下フランジとでは、対応する各要素における主応力の大きさ、方向、符号が上面、下面ともほぼ同じである。

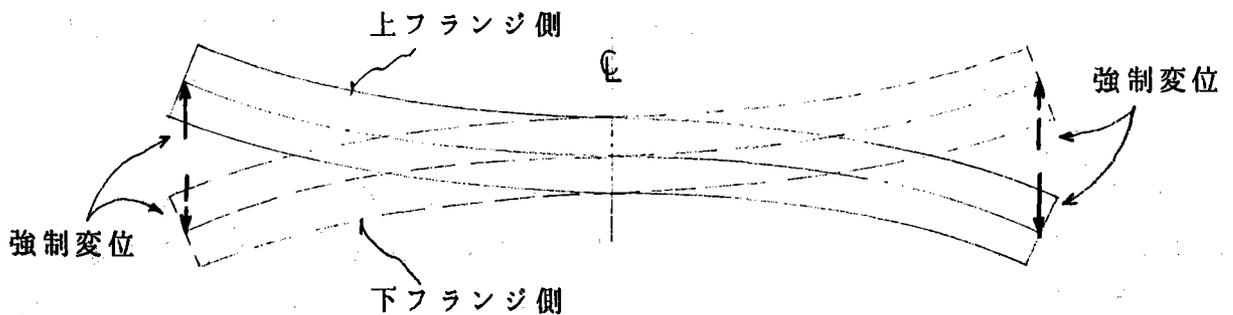
これらの内の①②および④について、その特徴が良く現れている上フランジの左側端部の主応力分布を例にとり考察する。上フランジの上面と下面の主応力分布から、要素方向の応力状態をモールの応力円を用いて調べる。左側端部断面において、上面の左右縁端の要素と、その裏面にあたる下面の左右縁端の要素について応力円を描くと次ページのようになる。

強制変位方向

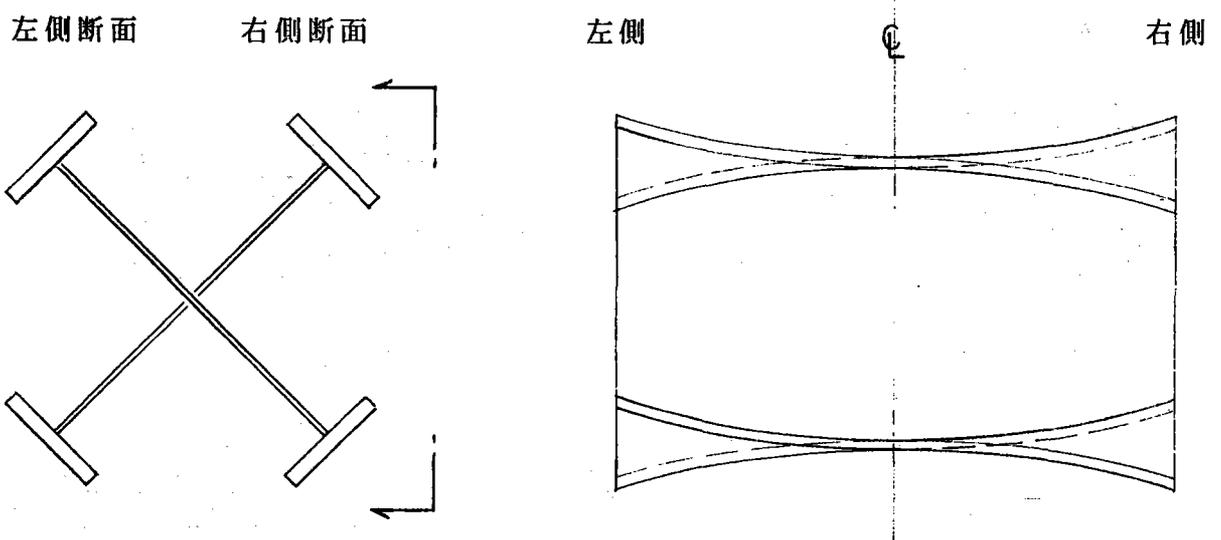


主応力が一方向のみであり、もう一方の主応力は零であるから、円は $\tau$ 軸に接する。主応力の方向を $\phi=45^\circ$ とすると $\sigma_x$ 、 $\tau_{xy}$ は $\sigma$ 軸から $2\phi=90^\circ$ 回転した円上の座標で表される。 $\sigma_y$ は $\sigma_x$ の対極点の座標で表される。以上のことから $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ はその大きさが等しく、主応力の大きさの1/2となる。 $\sigma_x$ と $\sigma_y$ の符号は同じとなる。また、上面と下面では符号が逆転する。これらは直応力図からも確認され、フランジが板曲げの状態にあることを示している。これは、次のような理由によるものと考えられる。

- a. 桁全体のねじれ変形に伴い、フランジはねじられる。
- b. 腹板上縁（フランジ中心）の桁軸方向の変形形状は、上下のフランジが腹板を介して互いに変形を拘束するので、下図のようになると考えられる。



- c. フランジのねじり角は、フランジ中心が直線の場合は一定となるが、曲線の場合は桁軸方向に変化する。上の曲線の場合は、桁端から中央部に向かうにつれてねじり角が急速に減少するため、フランジの変形モードは下図のようになると考えられる。



- d. 変形モード図から、フランジは板曲げの状態となる。これはフランジの応力の符号と一致する。また、この変形モードから前ページの③⑤の理由が明きらかとなる。

直応力図およびせん断応力図より、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ の値は1600kg/cm<sup>2</sup>程度となっている。これは、計算の仮定から最低応力度が1590kg/cm<sup>2</sup>であることから、ひずみが非常に小さいことを示している。

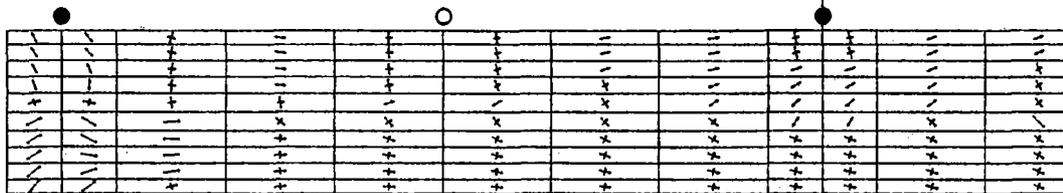
フランジのせん断応力は、ねじりに抵抗する応力であるから、上面と下面に生じそれぞれ向きは逆となる。

N o. Cのフランジでは、主応力の発生傾向にN o. Aの様な規則性はみられないが、大体次のことが言える。

- ①桁軸方向の主応力の符号は、腹板を境にして上側（+Y, 補剛材のある側）がプラス、下側がマイナスとなっている。これは上フランジと下フランジ、および板の上面と下面の別なくこの傾向となっている（両端付近を除く）。
- ②上面と下面で主応力の符号が逆転するのは、上下フランジともに両端付近の要素のみである。

N o. Cでは垂直補剛材が腹板の両端と中央部に設けられている。桁全体のねじり変形と腹板の面外変形はN o. Aに比べてかなり小さいが、腹板の面外変形の影響は垂直補剛材に伝達されてフランジに及ぶ。すなわち、腹板の面外変形はフランジに伝達されてフランジの面内曲げ変形を引き起こす。このためフランジ応力は腹板を境にして引張域と圧縮域に分かれることになる。フランジの両端付近で上面と下面で符号が逆転する要素は板曲げの状態にあることを示しているが、その符号はN o. Aの傾向とは一致しない。これは、上記の面内曲げによる応力の方が、影響が大きいためと考えられる。

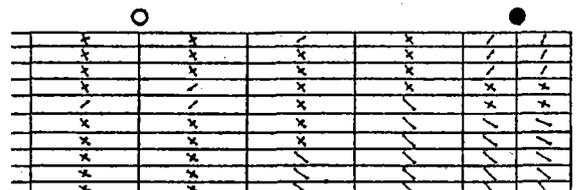
++ MODEL 2 ( N O . C - W ) ++



PRINCIPAL STRESS (UPPER)

● : 垂直補剛材

○ : 吊金具



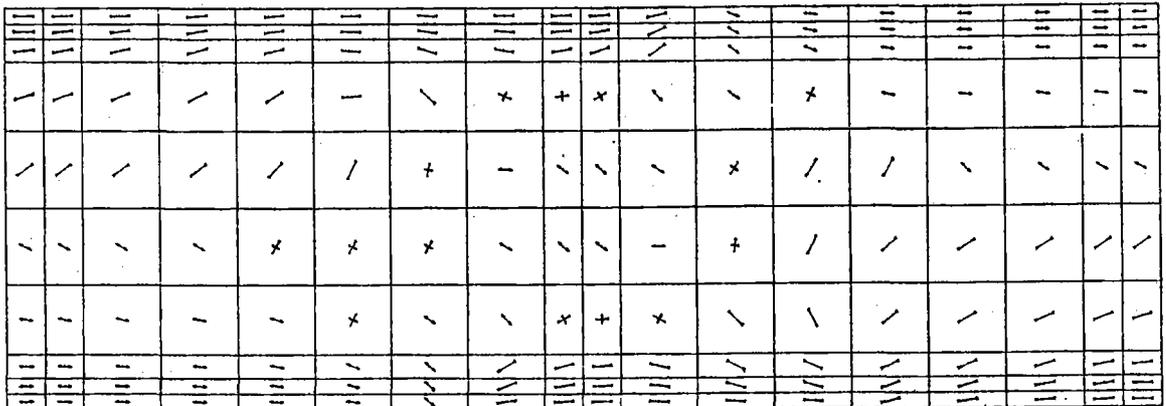
b) 腹板

腹板には、ねじりによりせん断応力と、腹板中心の強制変位による面外曲げ応力が生ずる。また No. A では、フランジの変形で示したように、腹板上縁が曲線となることに伴う板曲げ応力が生ずる。この板曲げ応力は、変形モード図から明らかなように、その符号が、フランジと同じく腹板の中心に関して点対称となる。これに腹板中心の強制変位による板曲げの影響が加わる。従って、No. A の主応力図では、フランジ付近で桁軸方向の主応力が生じており、腹板中心付近では桁軸方向の応力と上下方向の応力が生じるために主応力が傾きをもつ。応力の符号は腹板中心点に関しほぼ点対称となっている。また、上面と下面では逆となっている。せん断応力の方向は、フランジの場合と同じく板の両面で逆向きとなる。

No. C の主応力図は応力の符号が腹板中心点に関して点対称となっておらず、ねじりよりも面外曲げの影響の方が支配的であることを示している。また、垂直補剛材と吊金具の付近の要素に応力の乱れが認められる。これは垂直補剛材による拘束の影響と考えられる。

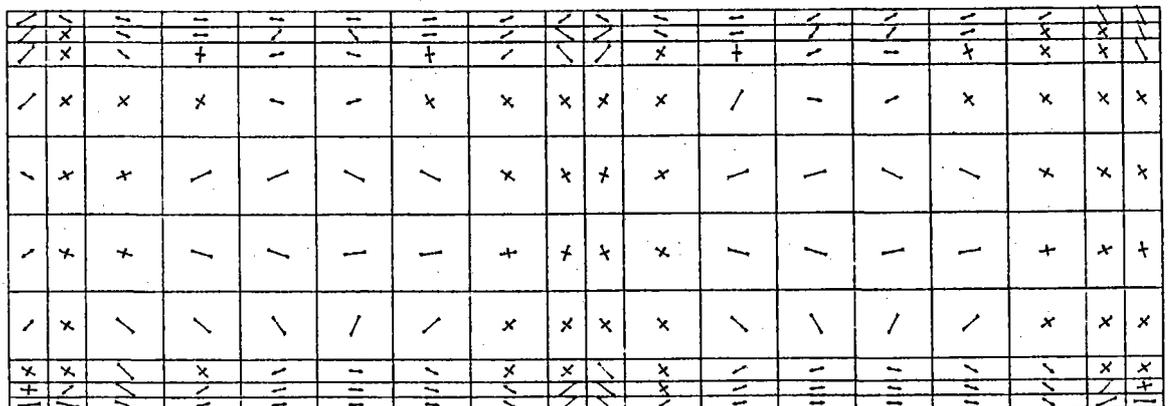
++ MODEL 1 ( NO. A-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



++ MODEL 2 ( NO. C-W ) ++

PRINCIPAL STRESS (UPPER)



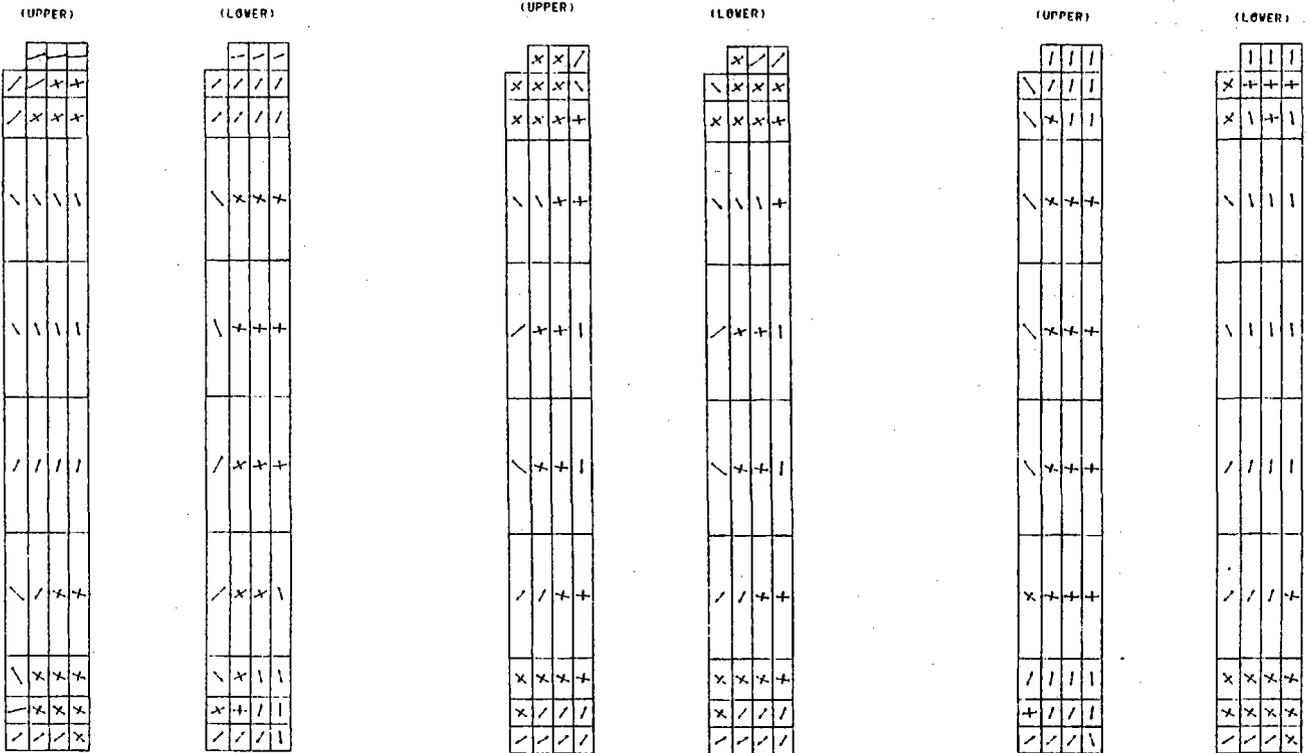
c) 補剛材

両端 (X = 10, 290) の補剛材は、フランジと腹板に連結する要素が板曲げの状態となっている。これは、ねじりによる腹板の板曲げ応力が小となる中央 (X = 150) の補剛材にはみられないことから、ねじりの影響と考えられる。腹板の反対側の自由端は、引張りとなっている。これは、腹板の面外変形が補剛材側に凸となっているためである。ただし、桁の両端の補剛材の自由端には板曲げの影響が残っており、板の両面の応力が等しくならない。下フランジ側の自由端は下フランジと溶接していないため引張りとなっている。

( X = 10.0 )

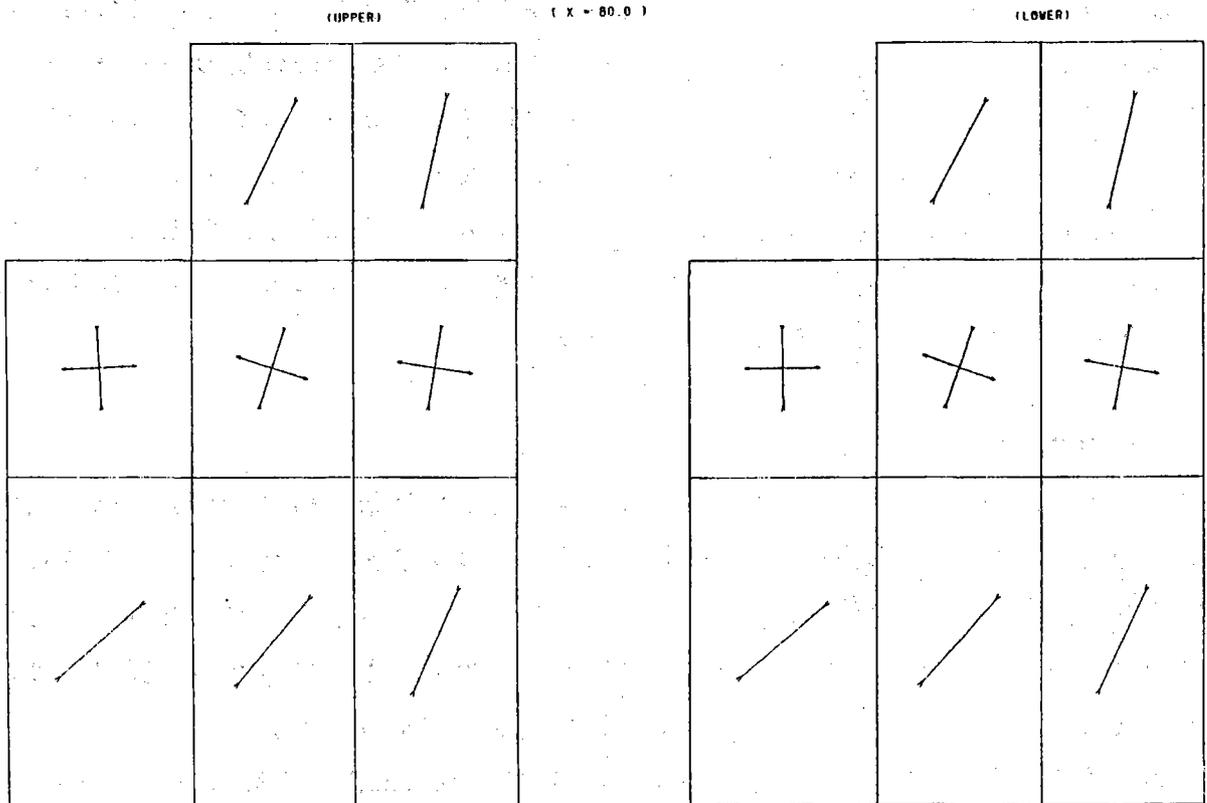
( X = 150.0 )

( X = 290.0 )



d) 吊金具

吊金具の応力分布は板の両面ではほぼ等しい。全体的に圧縮応力が支配的であるのは、腹板の面外変形により、腹板と上フランジから圧縮力を受けるためと考えられる。



(2) 主応力の大きさ

No. A, No. Cともに主応力の大きさは 3000kg/cm<sup>2</sup> 程度となっている。これは次のように説明できる。

計算の仮定から、直ひずみの値が僅かであっても直応力の値は、 $\sigma_x$  &  $\sigma_y \cong 1590\text{kg/cm}^2$  となる。せん断応力についても、直応力と同じ応力履歴曲線を用いるので、

$$\tau = G \cdot \gamma = E / 2 (1 + \nu) \cdot \gamma = E \cdot \gamma / 2 (1 + \nu)$$

から、やはり  $\tau_{xy} \cong 1590\text{kg/cm}^2$  となる。ここで、 $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = 1590\text{kg/cm}^2$ として主応力を求めると以下のようなになる。

$$\sigma_1 = 0.5 (\sigma_x + \sigma_y) + 0.5 \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau_{xy}^2} = 3180\text{kg/cm}^2$$

以上から、ひずみが僅かであっても  $\sigma_x$ と $\sigma_y$ の符号が同じであれば 3000kg/cm<sup>2</sup> 程度の主応力が発生することになる。 $\sigma_x$ と $\sigma_y$ の符号が逆の場合の主応力は 2249kg/cm<sup>2</sup>となる。

### (3) No. AとNo. C の比較

No. AはNo. Cよりも腹板の面外変形、桁全体のねじれ変形ともに大きい。これを発生応力で確認する。No. Aの腹板の応力度は最大値で  $\sigma_x=2164\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma_y=2108\text{kg/cm}^2$  であり、No. Cの  $\sigma_x=1855\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma_y=1689\text{kg/cm}^2$  より大となっている。最大応力の発生箇所は、No. Aでは腹板の四隅と中央部となっている。また応力の符号は、腹板中心点に関して点対称となっている。これは、腹板の面外変形が中央部付近で最大となっていることと、既述のように、ねじれの影響が大きいことを示している。

これに対してNo. Cでは、左下の隅で局部的に最大応力が発生しているが、全体的にみると、腹板の中央部と上下に分かれており、上下の  $h/4$  点付近が変曲点となっている。応力の符号は腹板中心の水平線に対して線対称である。これはねじりよりも腹板の面外変形の影響の方が支配的であることを示している。

### (4) 応力度の大きさ

No. AおよびNo. Cともに応力度の大きさとしては最大値で  $2100\text{kg/cm}^2$  程度でありこれを  $25^\circ\text{C}$  の  $\sigma-\varepsilon$  曲線に引き戻すと降伏応力度を超える。従って、この解析の仮定のような状況が垂鉛めっき中に生じれば、かなり大きな塑性変形が現れるものと考えられる（今回の解析は、既述のように、実験の経過を再現したものではない。実験では、めっき槽に浸せきした状態では、目立った変形は観測されていない）。

なお、直応力図において、応力度の大きさが  $1590\text{kg/cm}^2$ 以下の線（コンター）が示されているが、これは異符号の応力度の間を補間しているためである。

### (5) 垂直補剛材の変形抑制効果

No. AとNo. Cの変形を比較すると、明らかにNo. Cの方が小さい。これは、めっきの浸せき速度、冷却方法（水冷）等の条件が同じであることを考えると、垂直補剛材が、腹板の面外変形の抑制に対して有効であることを示している。