

## 圧縮を受ける補剛された板の座屈強度

BUCKLING STRENGTH OF STIFFENED PLATES  
UNDER COMPRESSION長谷川 彰夫\*・長 浜 正 孝\*\*・西 野 文 雄\*\*\*  
By Akio HASEGAWA, Masataka NAGAHAMA and Fumio NISHINO

## 1. ま え が き

ボックス・ガーダーの圧縮フランジや吊橋の塔柱の断面ではその板要素の幅が大きいために、圧縮方向に多くのたてリブ（以下、リブとよぶ）を配置した構造（以下、リブ付板とよぶ）が一般に採用される。そのような純圧縮を受けるリブ付板に対し、現行の鋼橋の設計示方書<sup>1),2)</sup>ではリブ線に単純支持の境界条件を与えたときの板パネルの座屈強度が期待できるための、リブの最小剛性を所要剛性として規定している。その所要剛性の規定に対し、リブのねじれ剛性の効果を見逃した弾性座屈理論に基づく DIN 4114 の規定<sup>3)</sup>と指針<sup>4)</sup>が大きな影響を与えている。

しかし溶接集成によるリブ付板の座屈強度の立場から考えるとすでに指摘しているように<sup>5)</sup> 一つの大きな問題点がある。すなわち、リブ付板に対する現行の設計規定は基本的には無補剛板の座屈に対する規定を拡張したものである。その結果板パネルの残留応力による座屈強度の低下は考慮されているが、リブ内部に存在する残留応力によるリブの剛性低下に起因する座屈強度の低下は考慮されていないことになっている。

吉識と藤田<sup>6)</sup>や楠田<sup>7)</sup>は板パネルの有効幅を含むリブの断面を柱の断面と考へ、そのリブに対し柱の非弾性座屈理論を適用することでリブ付板の非弾性座屈強度を解析した。Skaloud<sup>8),9)</sup>は板の有限変位理論を用いて、リブ付板の後座屈強度を解析した。最近のボックス・ガーダーの落橋事故を契機にボックス・ガーダーの多くのリブを持つ圧縮フランジの挙動が注目を集め<sup>10),11)</sup>、Maquoi と Massonnet<sup>12)</sup>はその耐荷力を直交異方性板の有限変位理論を用いて解析し、Dubas<sup>10)</sup>による実験の結

果を検討した。Skaloud や Maquoi と Massonnet はその解析で、主に幾何学的な初期不整が後座屈挙動や耐荷力に与える影響に注目し、残留応力の影響を考慮していない。イギリスでは Melford Haven 橋の落橋の原因を究明するための Marrison 委員会が最近の研究成果に基づいてボックス・ガーダーの設計を再検討し、その報告書<sup>13)</sup>の中でリブ付板の設計規準を提案している。

本報告では、リブの内部に存在する残留応力によってその有効な剛性が低下することに注目し、任意の数のリブを持つ長方形板が残留応力も含め、一方向に任意に分布する圧縮力を受ける場合の非弾性座屈強度を差分法を用いて解析した結果について報告する。

一般に座屈強度は、残留応力や初期たわみなどの解析的に評価することの困難な不確定性の強い因子によって影響される。したがって実験的な検討が常に重要である。リブ付板の座屈強度に関する実験に、わが国で伊藤と田島の実験<sup>16),17)</sup>、小松・吉川と牛尾の実験<sup>18)</sup>があり、イギリスで Dorman と Dwight の実験<sup>13)</sup>がある。しかし、実験の数が少ない上に、これらの実験ではリブ内部に存在する残留応力の座屈強度に与える影響に必ずしも注目していない。本報告では、板パネルとリブに存在する残留応力がリブ付板の座屈強度に与える影響のほか、リブ付板の座屈強度に対する荷重の偏心の影響、リブのねじれ剛性の効果および板パネルとリブで異種の鋼材を用いた場合の効果に注目して実施した実験の結果を検討する。それとともに、計算によって得られた結果と実験の結果を比較、検討する。

## 2. リブ付板の非弾性座屈強度の解析

Fig. 1 に示す座標で  $x$  方向にのみ圧縮を受ける無補剛板の非弾性座屈に対する基礎方程式は次のように与えられる<sup>19)</sup>。

\* 正会員 工博 名古屋工業大学講師 土木工学科

\*\* 正会員 工修 日本国有鉄道

\*\*\* 正会員 Ph. D 東京大学助教授 工学部総合試験所

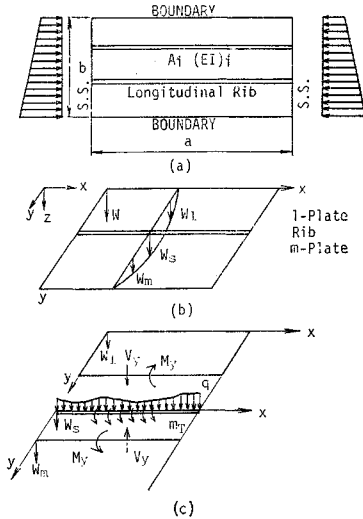


Fig. 1 Analytical Model

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D_0 k_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_0 k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + 4 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( D_0 k_4 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y^2} \left( D_0 k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_0 k_3 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

ここで  $D_0 = Et^3/12$  である。 $E$  は弾性係数、 $t$  は板の厚さを示す。 $N_x$  は板の単位幅あたりの  $x$  方向の圧縮力、 $w$  は板のたわみである。 $k_j (j=1\sim 4)$  は板の単位幅あたりの曲げモーメント  $M_x, M_y$ , ねじれモーメント  $M_{xy}$ , と曲率の関係を与える係数で次のように定義される。

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = D_0 \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 \\ k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

載荷辺の境界条件を単純支持とし、 $x$  方向のたわみをこの条件を満たす半波の正弦曲線で仮定する。

$$w = Y(y) \sin \frac{\pi}{a} x \quad (3)$$

板厚を一定とし式 (3) を式 (1) に代入して得られる  $Y(y)$  に関する常微分方程式を 1 次差分により差分表示すると差分点  $i$  における差分方程式は次のように与えられる<sup>19)</sup>。

$$C_{1,i} Y_{i+2} + C_{2,i} Y_{i+1} + C_{3,i} Y_i + C_{4,i} Y_{i-1} + C_{5,i} Y_{i-2} = C_i I^2 Y_i \quad (4)$$

式 (4) 中の差分点でのたわみ  $Y_i$  の係数は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} C_{1,i} &= \frac{1}{2} k_{3,i+1} + k_{3,i} - \frac{1}{2} k_{3,i-1} \\ C_{2,i} &= -2(3 k_{2,i} - k_{3,i-1}) - \left( \frac{\pi}{n} \right)^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} &\left( \frac{1}{2} k_{2,i+1} + 2 k_{2,i} - \frac{1}{2} k_{2,i-1} + k_{4,i+1} + 4 k_{4,i} - k_{4,i-1} \right) \\ C_{3,i} &= -2(k_{3,i+1} - 5 k_{3,i} + k_{3,i+1}) + \left( \frac{\pi}{n} \right)^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 \\ &\left\{ -k_{2,i+1} + 6 k_{2,i} - k_{2,i-1} + 8 k_{4,i} + \left( \frac{\pi}{n} \right)^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 k_{1,i} \right\} \\ C_{4,i} &= 2(k_{3,i+1} - 3 k_{3,i}) - \left( \frac{\pi}{n} \right)^2 \left( \frac{b}{a} \right)^2 \\ &\left( -\frac{1}{2} k_{2,i+1} + 2 k_{2,i} + \frac{1}{2} k_{2,i-1} - k_{4,i+1} + 4 k_{4,i} + k_{4,i-1} \right) \\ C_{5,i} &= -\frac{1}{2} k_{3,i+1} + k_{3,i} + \frac{1}{2} k_{3,i-1} \\ C_i &= \frac{12 \pi^2}{n^4} \left( \frac{b}{a} \right)^2 \left( \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right)_i \\ \lambda &= \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5. a \sim g)$$

ここで  $Y, C_j (j=1\sim 5), C, k_j (j=1\sim 4)$  および  $\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right)$  の下添字は差分点を示す。 $a$  は板の非載荷辺の長さ、 $b$  は載荷辺の幅、 $n$  は幅方向の分割数を示す。 $\sigma_x$  は  $x$  方向の圧縮応力、 $\sigma_y$  は板の降伏応力である。

板のたわみを式 (3) で仮定すると板のモーメントと等価せん断力は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} M_y &= -D_0 \sin \frac{\pi}{a} x \left\{ -k_2 \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 Y + k_3 Y'' \right\} \\ V_y &= -D_0 \sin \frac{\pi}{a} x \left\{ -\left( \frac{\pi}{a} \right)^2 k_2 Y - \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 (k_2 + 4 k_4) Y' + k_3 Y'' + k_3 Y''' \right\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6. a, b)$$

ここで ( )' は  $y$  に関する微分を示す。式 (6) を差分表示すれば、変位に対する境界条件と合わせて板の座屈を差分法で解析する場合の境界条件が得られる。

Fig. 1 a に示すように、任意の位置、任意の個数のリブを持つ板が、載荷辺が単純支持、非載荷辺が任意の境界条件のもとで、 $x$  方向に任意の分布をする圧縮力を受けている場合の非弾性座屈を扱う。Fig. 1 b に示すように 1 本のリブを境に板パネルを  $l$ -パネルと  $m$ -パネルに分け、両方のパネルからのモーメントと等価せん断力の合力をそのリブが受けるものとする。この場合、リブと板パネルの結合連続条件は次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} w_s = w_l = w_m, \quad \varphi_s = \frac{\partial w_l}{\partial y} = \frac{\partial w_m}{\partial y} \dots (7. a, b) \\ (EI)_l \frac{d^4 w_s}{dx^4} + A \bar{\sigma}_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} = q, \quad (EI)_l \frac{d^4 \varphi_s}{dx^4} + \{ A \bar{\sigma}_s \cdot r_s^2 - (GK)_l \} \frac{d^2 \varphi_s}{dx^2} = m_T \dots (7. c, d) \end{aligned} \right\}$$

ここで添字  $l, m, s$  は、 $l$ -パネル、 $m$ -パネル、リブに対する量であることを示し、 $\varphi_s$  はリブのねじれ角を示す。 $EI, EI_m, GK, r_s, A$  はそれぞれリブをはり柱と評価したときの等価な  $z$  方向への曲げ剛性、曲げねじれ剛性、サンブナンのねじれ剛性、極2次半径、断面積を示し、 $\bar{\sigma}_s$  はリブに作用する平均軸圧縮応力を示す。下添字  $t$  は  $\bar{\sigma}_s$  がリブに作用しているときのそれぞれの接線係数であることを示す。

Fig. 1c に示すようにリブを軸圧縮力  $P=A\bar{\sigma}_s$  と分布横力  $q$ 、分布トルク  $m_T$  を受けるはり柱と取扱う。このはり柱に作用する分布横力とトルクはそれぞれ板パネルからのモーメントと等価せん断力の差により与えられる。

$$q = (V_y)_m - (V_y)_l, \quad m_T = (M_y)_l - (M_y)_m \quad \dots\dots\dots(8. a, b)$$

式(4)を導いた場合と同様にして  $l$ -パネル、 $m$ -パネル、リブともに  $x$  方向のたわみを半波の正弦曲線で仮定する。

$$w_l = f(y) \sin \frac{\pi}{a} x, \quad w_m = g(y) \sin \frac{\pi}{a} x, \\ w_s = \delta_s \sin \frac{\pi}{a} x \quad \dots\dots\dots(9. a \sim c)$$

リブのねじれに関する成分を無視し、式(7.d)で  $m_T=0$  とおくと式(6),(8),および式(9)により、リブと板パネルの結合連続条件式(7)は未知関数  $f(y), g(y), \delta_s$  を用いて次のように表わせる。

$$f(s) = g(s) = \delta_s, \quad f'(s) = g'(s) \quad \dots\dots(10. a, b) \\ \left\{ (EI)_t \left( \frac{\pi}{a} \right)^4 - A\bar{\sigma}_s \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 \right\} f(s) = k_3 D_0 \{ f''(s) - g''(s) \}, \quad f''(s) = g''(s) \quad \dots\dots(10. c, d)$$

ここで  $s$  はリブの位置の  $y$  座標である。

$l$ -パネルの  $f(y)$  と  $m$ -パネルの  $g(y)$  に関し無補剛板に対する差分方程式(4)が成立し、それぞれの板パネルのリブと接する非載荷辺での境界条件が式(10)で与えられる。式(10)を差分表示し式(4)と連立させて解くとリブの位置する差分点  $i$  における差分方程式だけが式(4)と異なり、次のように与えられる。

$$C_{3,i} \cdot Y_{i-2} + C_{4,i} \cdot Y_{i-1} + D_{3,i} \cdot Y_i + C_{2,i} \cdot Y_{i+1} + C_{1,i} \cdot Y_{i+2} = D_i \cdot \lambda^2 \cdot Y_i \quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし  $D_{3,i}, D_i$  は次のように与えられる。

$$D_{3,i} = C_{3,i} + \frac{1}{k_{2,i}^2} \cdot S_1 \cdot C_{1,i} \cdot C_{5,i}, \\ D_i = C_i + \frac{1}{k_{3,i}^2} \cdot S_2 \cdot C_{1,i} \cdot C_{5,i} \quad \dots\dots\dots(12. a, b)$$

ここで、 $C_{j,i} (j=1 \sim 5), C_i$  および  $\lambda$  は式(5)で与えられる。 $S_1, S_2$  はリブの影響を表す係数で次式で与えられる。

$$S_1 = \frac{1}{1-\nu^2} \left( \frac{b}{a} \right)^4 \frac{\pi^4}{n^3} \cdot \eta \cdot r,$$

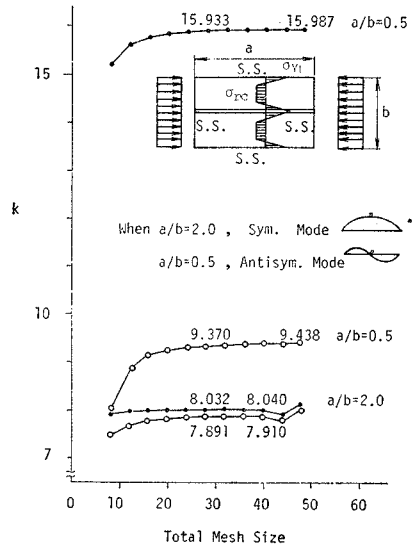


Fig. 2 Convergence of Finite Difference Analysis;  $\delta=0.2, \gamma=10.0$ ;  $\bullet-\bullet-\bullet$ : free of residual stress,  $\circ-\circ-\circ$ : with residual stress,  $\sigma_{cr}/\sigma_\gamma=0.5$  and  $\sigma_{cr}/\sigma_\gamma=0.5$

$$S_2 = 12 \left( \frac{b}{a} \right)^2 \frac{\pi^2}{n^2} \xi \cdot \delta \quad \dots\dots\dots(13. a, b)$$

ここで  $\nu$  はポアソン比である。 $r, \delta$  は弾性時のリブの剛比、面積比、 $\eta$  はリブの接線剛性を弾性時の剛性に割った値、 $\xi$  はリブの平均圧縮応力を降伏応力に割った値で次のように与えられる。

$$r = \frac{EI}{bD}, \quad \delta = \frac{A}{bt}, \quad \eta = \frac{(EI)_t}{EI}, \quad \xi = \frac{\bar{\sigma}_s}{\sigma_Y} \quad \dots\dots\dots(14. a \sim d)$$

ここで  $D$  は板の曲げ剛性で、 $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  で与えられる。リブがない場合には  $S_1=S_2=0$  となり式(11)は式(4)と一致する。

式(4)と式(11)を用いて残留応力を有するリブ付板の非弾性座屈問題を解くことができる。純圧縮を受ける中央に一本のリブを持つリブ付板の弾性座屈強度についての数値計算の精度を調べた結果を Fig. 2 に示す。この図で横軸はリブ付板の幅方向の全体の分割数、たて軸は座屈係数  $k$  で次のように定義する。

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

板パネルに発生している残留応力として Fig. 2 の挿入図に示すように非載荷辺とリブ軸の位置で降伏応力に等しい値の引張残留応力が生じ、その中間部で一定の圧縮残留応力が生じている分布形を仮定した。残留応力を有する場合の結果は圧縮残留応力  $\sigma_{rc}$  の値が降伏応力の  $\frac{1}{2}$ 、座屈応力が降伏応力の  $\frac{1}{2}$  のときでの値でリブ内に存在する残留応力の影響は考慮されていない。

### 3. 実験概要

#### (1) 実験計画

リブを持つ板要素で構成された正方形箱型断面短柱の純圧縮耐荷力実験を中央に1本のリブを持つ板要素（以下、1-リブ付板とよぶ）について20体、等間隔に2本のリブを持つ板要素（以下、2-リブ付板とよぶ）について5体、それぞれ実施した。

リブ付板の辺長比  $a/b$  は 4.0 で統一し、幅厚比は限界幅厚比  $\lambda_{cr}$ （板パネルに存在する残留応力の影響のみを考慮したときの降伏荷重まで座屈しない最大の幅厚比で、現行の設計示方書<sup>1),2)</sup> で許しているリブ付板の最大の幅厚比である）の 0.75, 1.0, 1.25 倍の値を選んだ。圧縮する際の端部支承は平押しとした。リブ端面に対する直接荷の有無は実験値に大きく影響を与えるものと考えられるので、本実験ではその影響を明らかにするために両方の条件で実験した。

リブの剛性は、主として DIN 4114 に定める最小剛比<sup>3)</sup>  $r^*$  前後を選んだが、リブの剛性の座屈荷重と耐荷力に与える影響を明らかにするために  $r^*$  の 2~5 倍の剛性を持つリブ付板に関しても実験を行った。残留応力がリブ付板の耐荷力に与える影響を調べるために焼鈍処理を行った試験体について、1-リブ付板を2体、2-リブ付板を1体実験した。板パネルに存在する残留応力のみが実験値に与える影響を明らかにするために、リブに高強度鋼を用いた試験体を2-リブ付板について1体製作し、等質のリブ付板に関する結果と比較することにより、リブ内部に存在する残留応力の影響を明らかにできるよ

うにした。リブは片側配置とし、その断面は長方形断面を用いたが、リブのねじれ剛性の効果を調べるために T 型のリブの断面を持つリブ付板に関しても2体実験した。実験計画を **Table 1** に示す。すべての試験体は4片のリブ付板の変形に対する同一性と計測の便宜のために **Table 1** 下図に示すように片側リブを隣接する板要素で逆になるように配置した。リブ付板の残留応力の計測結果<sup>1),2)</sup> が少ないことを考え、リブ付板の残留応力の計測を実施した。

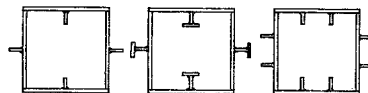
#### (2) 1-リブ付板の耐荷力実験

1-リブ付板の純圧縮耐荷力実験を20体について実施した。限界幅厚比より小さい幅厚比（62 シリーズ）、限界幅厚比（76 シリーズ）、限界幅厚比より大きい幅厚比（93 シリーズ）の3種類の幅厚比のリブ付板からなる正方形箱型断面の試験体を準備した。93 シリーズにおいて焼鈍された試験体（A シリーズ）、T 型のリブを持つ試験体（T シリーズ）、リブの端面にも直接載荷するための試験体（P シリーズ）の比較試験体を準備した。1-リブ付板の場合、P シリーズに対する実験を除くすべての実験はリブの端面に直接に載荷をせず、板パネルの端面にのみ載荷する方法で加力を行った。補剛材の剛性は主として最小剛比  $r^*$  前後の値を与えたが、93 シリーズについては 2~5  $r^*$  の剛性のリブを持つリブ付板の試験体を準備した。試験体の製作に使用した鋼板の鋼種はすべて構造用炭素鋼 SM 41 であり板パネルの厚さは 6 mm である。溶接はすべて連続すみ肉溶接を採用し、T 型のリブは板片を用いて溶接により製作しそれを焼鈍した後、板パネルにすみ肉溶接をした。1-リブ付板の試験体の寸法を **Table 2** に示す。ここで  $r$  はリブの断面 2 次

Table 1 Test Plan

Material : SM41

Series	Nrs.	$\lambda/\lambda_{cr}$	$a/b$	End of Rib	$\gamma/\gamma^*$	Weld	Type of Rib	Remarks	
1-Rib	62-	3	0.75	4.0	Unloaded	0.5~1.5	As-Weld	Flat	
	76-	3	1.0	4.0	Unloaded	0.5~1.5	As-Weld	Flat	
	93-	—	6	1.25	4.0	Unloaded	0.5~5.0	As-Weld	Flat
		-A	2	1.25	4.0	Unloaded	0.5~1.5	Annealed	Flat
		-T	2	1.25	4.0	Unloaded	0.5~1.5	As-Weld	T-Type
		-P	4	1.25	4.0	Loaded	0.5~2.5	As-Weld	Flat
2-Ribs	C2- 90-1	1	0.75	4.0	Loaded	1.0	As-Weld	Flat	
	C2-120-1	1	1.0	4.0	Loaded	1.0	As-Weld	Flat	
	C2-120-1A	1	1.0	4.0	Loaded	1.0	Annealed	Flat	
	C2-120-1H	1	1.0	4.0	Loaded	1.0	As-Weld	Flat	
	C2-150-1	1	1.25	4.0	Loaded	1.0	As-Weld	Flat	

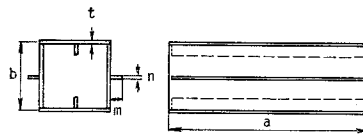


Rib Arrangement

**Table 2** Dimension of Specimens with One Rib

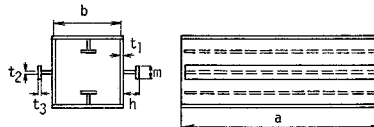
(a) Specimens with Flat Plate Rib

Specimen Name	Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness t (mm)	Rib Width m (mm)	Rib Thick n (mm)	a/b	b/t	$\gamma$ EI/bD	$\delta$ mn/bt
62- 20	1480.5	364.1	5.95	43.3	5.91	4.07	61.2	22.8	0.118
62- 44	1481.0	364.0	6.00	55.8	6.00	4.07	60.7	48.3	0.153
62- 70	1481.0	364.0	6.01	58.8	8.06	4.07	60.6	75.0	0.217
76- 30	1840.2	454.1	5.90	52.0	5.60	4.05	77.0	30.4	0.109
76- 42	1840.3	453.8	5.96	51.0	8.12	4.06	76.1	40.8	0.153
76- 63	1840.5	454.0	5.96	60.3	8.12	4.05	76.2	67.4	0.181
93- 30	2240.9	554.3	5.74	51.7	8.07	4.04	96.6	38.7	0.131
93- 39	2240.7	554.3	5.68	56.3	8.06	4.04	97.6	51.1	0.144
93- 59	2241.0	554.6	5.63	62.7	8.00	4.04	98.5	72.5	0.161
93-117	2239.9	557.1	6.05	79.8	8.20	4.02	92.1	122.9	0.194
93-196	2240.3	557.4	6.05	94.1	8.08	4.02	92.1	198.5	0.225
93-273	2240.8	556.5	6.03	104.5	8.13	4.03	92.3	276.8	0.253
93- 39-A	2240.5	554.4	5.61	55.9	7.91	4.04	98.8	51.4	0.142
93- 59-A	2240.3	553.4	5.59	63.0	7.96	4.05	99.0	75.0	0.162
93- 30-P	2240.4	556.7	6.04	50.6	8.17	4.02	92.0	31.3	0.123
93- 39-P	2240.3	554.3	5.59	55.5	7.87	4.05	99.2	50.6	0.141
93- 59-P	2240.2	554.4	5.89	63.3	7.85	4.04	94.1	64.9	0.153
93-117-P	2240.1	558.0	6.04	80.6	8.19	4.01	92.4	126.9	0.196



(b) Specimens with T-typed Rib

Specimen Name	Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness t (cm <sup>2</sup> )	h (mm)	m (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	t <sub>3</sub> (mm)	a/b	b/t	$\gamma$ EI/bD	$\delta$ mn/bt
93-39-T	2241.0	554.6	5.84	43.4	37.3	5.66	5.65	4.04	95.0	34.7	0.131
93-59-T	2240.8	554.8	5.86	50.4	43.9	5.94	5.94	4.04	94.7	57.8	0.161



**Table 3** Summary of Test Results (Plates with One Rib)

Specimen Name	$\gamma/\gamma^*$	b/t	$\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	$P_{cr}$ tons	$P_u$ tons	$P_{cr}/P_y$	$P_u/P_y$
62- 20	0.57	61.2	2.21	---	256.5	---	0.855
62- 44	1.07	60.7	2.19	---	273.5	---	0.875
62- 70	1.36	60.6	2.19	---	282.0	---	0.819
76- 30	0.78	77.0	2.78	---	295.5	---	0.786
76- 42	0.90	76.1	2.74	---	304.0	---	0.804
76- 63	1.36	76.2	2.74	---	302.5	---	0.784
93- 30	0.92	96.6	3.56	---	303.0	---	0.691
93- 39	1.16	97.6	3.59	---	277.0	---	0.632
93- 59	1.56	98.5	3.63	---	287.5	---	0.661
93-117	2.38	92.1	3.42	---	385.5	---	0.758
93-196	3.49	92.1	3.42	---	397.5	---	0.764
93-273	4.48	92.3	3.44	---	404.0	---	0.766
93- 39-A	1.18	98.8	3.52	---	340.0	---	0.805
93- 59-A	1.61	99.0	3.52	---	345.3	---	0.810
93- 39-T	0.83	95.0	3.42	---	320.0	---	0.726
93- 59-T	1.24	94.7	3.40	---	322.0	---	0.754
93- 30-P	0.77	92.2	3.84	390.0	399.5	0.705	0.723
93- 39-P	1.16	99.2	3.52	277.0	300.5	0.859	0.715
93- 59-P	1.43	94.2	3.39	310.0	335.5	0.898	0.755
93-117-P	2.44	92.4	3.84	400.0	424.5	0.889	0.731

Remarks: i)  $\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$  computed using  $\sigma_y$  and E of Plate Panels

ii)  $P_y$  computed using  $\sigma_{yst}$  of Plate Panels and Ribs given in Table 6

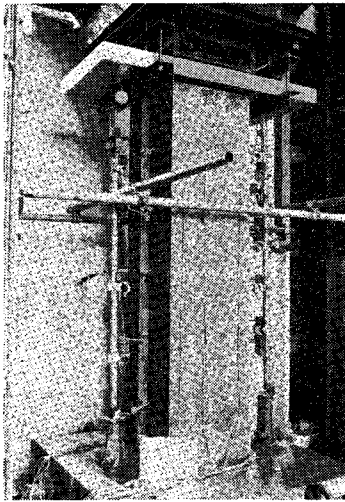


Fig. 3 Test Arrangement

モーメントを、リブを配置した板パネルの表面に関して計算した場合の試験体のリブの剛比、 $\delta$  は 1 本のリブと板パネルの面積の比である。

変形、ひずみおよび荷重の測定値はすべて加力後、数分経た静的な状態での値である。リブに対して非載荷条件の試験体はリブ付板要素の重心に載荷していないので偏心圧縮の形となり、座屈荷重の実験値を決定し得なかったが、板とリブとに同時に載荷する条件の試験体（P シリーズ）については、横変位の急激に増大する荷重を座屈荷重  $P_{cr}$  とした。耐荷力に関する実験結果を Table 3 に示す。この表で  $P_u$  は静的最高荷重、 $P_Y$  は断面の降伏荷重である。各荷重段階で板要素の面外付加たわみ、リブの面内と面外変位、試験体の縮みをダイヤル・ゲージによって測定し、板要素とリブの軸方向圧縮ひずみを抵抗線ひずみゲージによって測定した。耐荷力実験のようすを Fig. 3 に示す。

### (3) 2-リブ付板の耐荷力実験

2-リブ付板の純圧縮耐荷力実験を 5 体について実施し

Table 4 Dimension of Specimens with Two Ribs

Specimen Name	Length a (mm)	Width b (mm)	Thickness t (mm)	Rib Width m (mm)	Rib Thick n (mm)	a/b	b/t	Y EI bD	$\delta$ mn bt	Remarks
C2-90-1	1620.7	409.7	4.57	76.0	8.11	4.04	88.5	337.6	0.333	
C2-120-1	2160.6	544.4	4.50	75.2	7.98	3.98	117.3	246.4	0.245	
C2-120-1A	2161.8	544.2	4.50	76.3	7.93	3.98	119.5	263.5	0.250	Annealed
C2-120-1H	2160.2	544.0	4.49	76.2	8.62	3.98	120.2	286.3	0.271	Rib SM53
C2-150-1	1921.1	481.2	3.26	55.9	6.41	4.00	146.6	248.0	0.230	

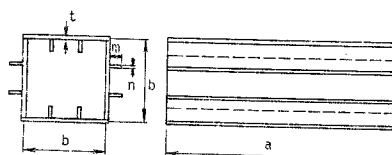


Table 5 Summary of Test Results (Plates with Two Ribs)

Specimen Name	$\gamma/\gamma^*$	b/t	$\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$	$P_{cr}$ tons	$P_u$ tons	$P_{cr}/P_Y$	$P_u/P_Y$
C2-90-1	1.17	88.6	3.048	310.0	326.0	1.005	1.057
C2-120-1	1.04	117.3	4.035	320.0	342.0	0.863	0.923
C2-120-1A	1.10	119.5	4.111	370.0	380.0	1.018	1.046
C2-120-1H	1.13	120.2	4.375	420.0	428.0	1.004	1.023
C2-150-1	1.08	146.6	4.999	187.0	202.0	0.802	0.866

Remarks: i)  $P_Y$  computed using  $\sigma_{yst}$  of Plate Panels and Ribs given in Table 6

ii)  $\bar{\sigma}_y$  in  $\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$  being  $P_Y$  divided by Sectional Area

た。1-リブ付板の場合と同様に、限界幅厚比およびその前後の幅厚比のリブ付板からなる正方形箱型断面の試験体を 1 体ずつ準備した。限界幅厚比を持つ試験体について、比較試験体として焼純された試験体、板パネルに構造用炭素鋼 SM 41、リブに高強度鋼 SM 53 を使用したハイブリッド試験体をそれぞれ 1 体ずつ準備した。

リブの剛性にはすべて最小剛比  $r^*$  を与えた。リブに対する載荷条件はすべて直接載荷とし、1-リブ付板の場合の P シリーズとリブの端面の載荷条件が同一である。試験体の製作に用いた鋼種はハイブリッド試験体のリブを除き SM 41 であり、板要素部分の板厚は 3.2 mm と 4.5 mm である。溶接はすべて連続すみ肉手溶接とした。試験体の寸法を Table 4 に、耐荷力に関する実験結果を Table 5 に示す。本実験では試験体の製作に薄板を使用したため、初期たわみの計測を行った。

### (4) 素材試験と残留応力の測定

試験体の製作に使用した鋼板の材料定数を得るために、JIS 1 号引張試験片による素材試験を実施した。使用した試験機はスクルー型の万能試験機でひずみの計測には差動トランスによる変位計を使用した。試験結果を、Table 6 に示す。ここで  $\sigma_{dy}$ 、 $\sigma_{yst}$  および  $\sigma_u$  はそれぞれ上降伏点応力、静的降伏点応力および引張強さである。耐荷力実験の実験値の整理に用いた降伏点応力はすべて静的降伏点応力である。

溶接集成のリブ付板の残留応力の計測を 1-リブ付板片、2-リブ付板片のリブと平行な端辺に溶接ビードを盛ったものを用いて実施した。測定片の鋼種は SM 41 である。溶接による残留ひずみの計測は抵抗線ひずみゲージを使用し、機械的切断による応力弛緩法を採用した。溶接条件は試験体製作の条件と同一とし、連続すみ肉手溶接でこの程度の断面、鋼種に採用されてい

Table 6 Tensile Coupon Test Results

Specimen	Flange, Web				Rib			
	t (mm)	$\sigma_{ydy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{yst}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	t (mm)	$\sigma_{ydy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{yst}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
62-20 62-44 76-30	6.0	3310	3100	4750	6.0	3310	3100	
62-70 76-42 76-63	6.0	3310	3100	4750	8.0	2800	2560	
93-30 93-39 93-59	5.7	3400	3110	4850	8.0	2800	2560	
93-117 93-196 93-273	6.0	3620	3250	4870	8.1	2870	2690	
93-39-A 93-59-A 93-39-P	5.6	3260	3030	4750	8.0	2800	2560	
93-59-P 93-30-P 93-117-P	5.9	3200	3010	4620	8.0	2800	2560	
93-39-T 93-59-T	6.0	4140	3780	5010	8.2	2870	2690	
	5.9	3200	3010	4620	5.9	3200	3010	
C2-90-1	4.57	2648	2490	4253	8.11	2690	2515	4614
C2-120-1	4.60	2648	2490	4253	7.98	2764	2535	4676
C2-120-1A	4.50	2648	2490	4253	7.93	2730	2525	4645
C2-120-1H	4.49	2648	2490	4253	8.62	3627	3367	5293
C2-150-1	3.26	2707	2474	3978	6.41	2983	2757	4301

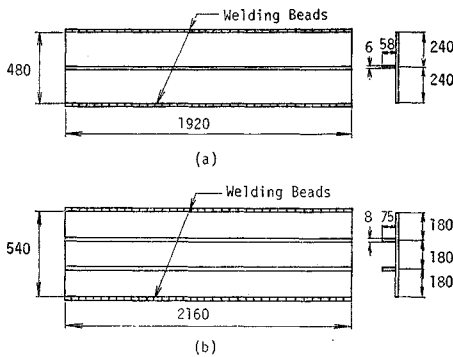


Fig. 4 Stiffened Plate for Residual Stress Measurement; Material SM 41, unit: mm, (a) Plate with One Rib, (b) Plate with Two Ribs

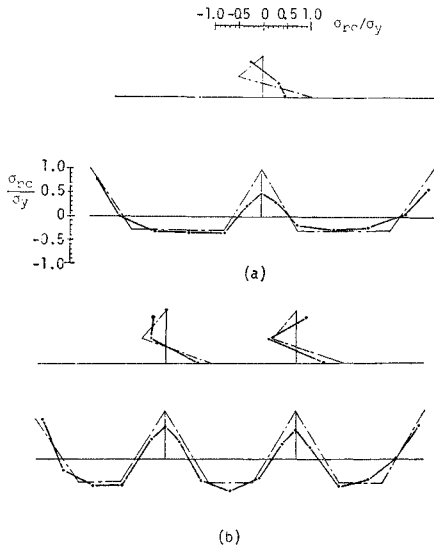


Fig. 5 Residual Stress Distributions  
 —: Tests, - - - : Idealized distribution  
 + : Tension, - : Compression; (a) Plate with One Rib, (b) Plate with Two Ribs

標準的な条件と考えてよい。1つの測定片に対して2断面で板面表裏について残留ひずみの計測を行い、4点の計測点のひずみの平均値を求めて残留ひずみとした。残留応力測定用板片の寸法を Fig. 4 に示す。残留ひずみの計測結果は弾性係数  $E=2.1 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup> を乗じて残留応力に換算し、実測された材料の静的降伏応力で無次元化して Fig. 5 に示す。この図で太い一点鎖線は実測値を示し、細い一点鎖線は板パネルとリブがそれぞれ単独でモーメントと軸力が零となるように、実測値をもとに理想化したものである。

#### 4. 実験結果の検討と計算値との比較

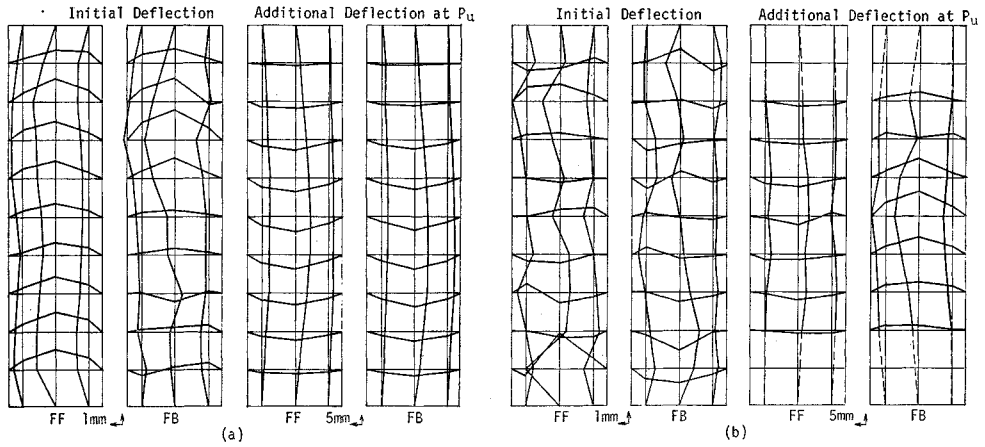
1-リブ付板と 2-リブ付板の純圧縮耐荷力実験の結果に関し、変形特性と耐荷力特性について考察し、計算により求めた座屈曲線と比較、検討する。変形特性と耐荷力特性は互いに因果関係を有するものであり分離して考察するのは好ましくないため、変形特性に関しては単に客観的なデータの考察にとどめ、耐荷力特性の項で総合的な検討を行う。

##### (1) 変形特性

試験体載荷時の圧縮ひずみと変位の挙動は、1-リブ付板と 2-リブ付板の試験体でどちらも同様の性状を示した。1-リブ付板の試験体はリブに対して非載荷条件の試験体が多く、そのためにリブ付板要素に対し荷重の偏心が存在することになり、板要素はリブ取り付け面方向に面外変形する挙動を示した。リブに対して直接載荷条件の試験体でも程度の差はあったが同様の変形性状を示した。荷重偏心の影響やリブの変形性状は板要素の幅厚比によりその挙動が異なり、幅厚比に無関係に一義的に論じ得ないことがわかった。

2-リブ付板の板要素の初期たわみと静的最高荷重時における板パネルの面外付加たわみの分布の例を Fig. 6 に示す。この図で板要素に対して変位を示す矢印はその方向への変位がリブのついていない面の方向への変位であることを示す。板要素の幅厚比が限界幅厚比より小さい試験体 C2-90-1 についての結果を Fig. 6a に示す。この結果にあらわれているように最高荷重時の付加たわみがリブの取り付け面の方向にパネル全体として変位する傾向はほとんどの試験体で観察された。

この傾向はリブに対して非載荷条件での試験体の結果において特に著しく、同じ載荷条件のもとでは板要素の



**Fig. 6** Initial and Maximum additional Deflections (a) Specimen C2-90-1, (b) Specimen C2-150-1

幅厚比が限界幅厚比より小さな試験体の結果にその傾向が顕著である。板要素の幅厚比が限界幅厚比より大きい試験体 C2-150-1 についての結果を **Fig. 6b** に示す。限界幅厚比より幅厚比の大きな板要素を持つ試験体ではパネル全体としての変形は比較的少なくいわゆる局部座屈変形が卓越する傾向を示す。試験体 C2-90-1 と C2-150-1 の崩壊後のようすを **Fig. 7** に示す。

**Fig. 6** に示した結果によれば初期たわみと最高荷重時の付加たわみの分布性状は必ずしも一致せず初期たわみの分布性状は、崩壊時の変形にほとんど影響を与えないと判断される。2-リブ付板の板要素の初期たわみと最高荷重時の付加たわみの測定値の最大値を **Table 7** に示す。測定された初期たわみの最大値は 3.2, 4.5 mm

**Table 7** Maximum Values of Initial and additional Deflections

	$(\delta_0)_{\max.}$ (mm)	$(\delta)_{\max.}$ (mm)	$(\delta_0)_{\max.}$ t	$(\delta)_{\max.}$ t	$(\delta_0)_{\max.}$ b	$(\delta)_{\max.}$ b
C2-90-1	2.54	6.36	0.556	1.392	0.0063	0.016
C2-120-1	1.95	11.43	0.424	2.458	0.0036	0.021
C2-120-1A	3.49	1.46	0.776	0.324	0.0065	0.0027
C2-120-1H	1.57	2.99	0.350	0.666	0.0029	0.0055
C2-150-1	2.93	10.57	0.899	3.242	0.0061	0.022

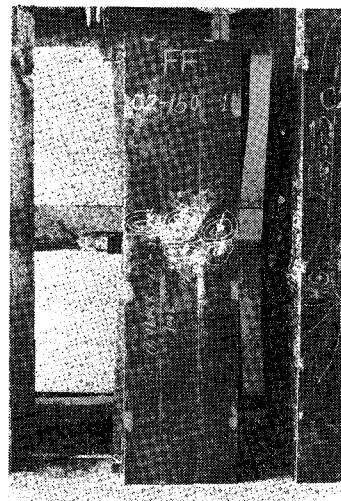
Remarks : i)  $\delta_0$ =initial deflection ;  $\delta$ =additional deflection:

ii) b,t being width and thickness of plate panels respectively

という薄板を使用しているにもかかわらず板厚以下、パネル幅の 1/200 前後にとどまっておき、溶接による初期たわみに起因するリブ付板の耐荷力の低下は局部座屈に関する限りほとんどないと思われる。最高荷重時の付加たわみの最大値で、焼鈍された試験体 C2-120-1A とハイブリッド試験体 C2-120-1H のその値が特に小さ



(a)



(b)

**Fig. 7** Collapse Mode of Specimens (a) Specimen C2-90-1, (b) Specimen C2-150-1



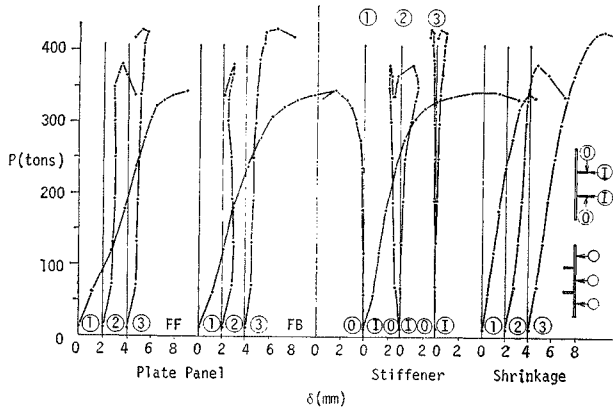


Fig. 8 Load-Deflection Relations

いことが注目される。これはそれらの試験体の崩壊時の変形が小さく、剛性が崩壊直前まで失われないことを示す。

荷重と変位の関係を等質非焼鈍試験体と焼鈍試験体、ハイブリッド試験体について考察する。同一の幾何学的寸法を持つ 2-リブ付板の試験体、C 2-120-1 (等質非焼鈍)、C 2-120-1 A (等質焼鈍)、C 2-120-1 H (ハイブリッド非焼鈍) の荷重に対する板パネルの面外付加変位、リブの内面と面外変位、および試験体の縮みの関係を Fig. 8 に示す。この図から焼鈍試験体とハイブリッド試験体は変形の進行が徐々であり、断面の剛性は崩壊直前まで初期の値を維持していることがわかる。このことは実験的な立場から座屈荷重と最高荷重の差が小さいことを示し、耐荷力より断面の剛性が重要な役割をする板要素の局部座屈特性の観点からみると、非常に有効な特性を持つといえる。

非焼鈍試験体 C 2-120-1 と焼鈍試験体 C 2-120-1 A

の崩壊時のようすを Fig. 9 に示す。非焼鈍試験体はパネル全体の変形が卓越した崩壊を示すのに対し、焼鈍試験体はリブ線を節線とする完全な局部座屈崩壊となっている。このことは板要素だけでなく、リブに存在する残留応力が変形特性に大きな影響を与えることを示す。

試験体のリブの剛比  $r$  と最小剛比  $r^*$  の比  $r/r^*$  が 0.77 と 2.44 であり、リブに対して載荷条件の試験体 93-30-P, 93-117-P についての板パネルの面外変位特性の相違を、Fig. 10 に示す。この図より、リブの剛性の大小による板パネルの変形特性の相違が明らかである。

リブに対して非載荷条件の試験体においてもその試験体の幅厚比が限界幅厚比より大きい場合には、局部変形性が卓越し Fig. 10 の場合と同様の傾向を示した。このことは、この付近の幅厚比ではリブに対する載荷条件が耐荷力に必ずしも大きな影響を与えないことを示す。

板パネルとリブのひずみ分布の増大のようすはリブに対する載荷条件のほかに板パネルの幅厚比、焼鈍の有無および板要素とリブの鋼種の組み合わせにより異なる。リブに対して直接載荷の条件で実験した 2-リブ付板について試験体の中央断面での板パネルとリブの圧縮ひずみの増大のようすを Fig. 11 に示す。ここでリブ突出端の圧縮ひずみは板面表裏の平均ひずみであり、板パネルの圧縮ひずみはリブの付いていない表面での値である。

限界幅厚比とそれ以下の幅厚比を持つ試験体 C 2-120-1, C 2-90-1 と限界幅厚比より大きい幅厚比を持つ試

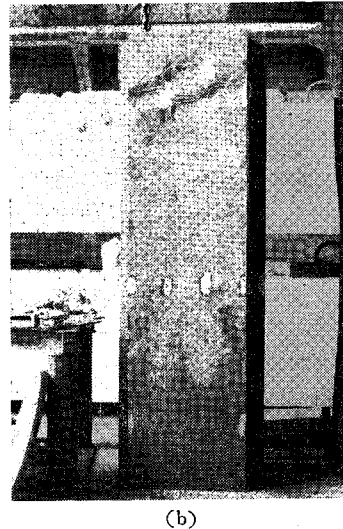
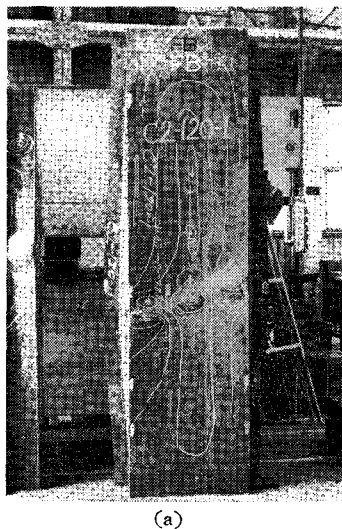


Fig. 9 Collapse Mode of Specimens (a) Specimen C 2-120-1, (b) Specimen C 2-120-1 A

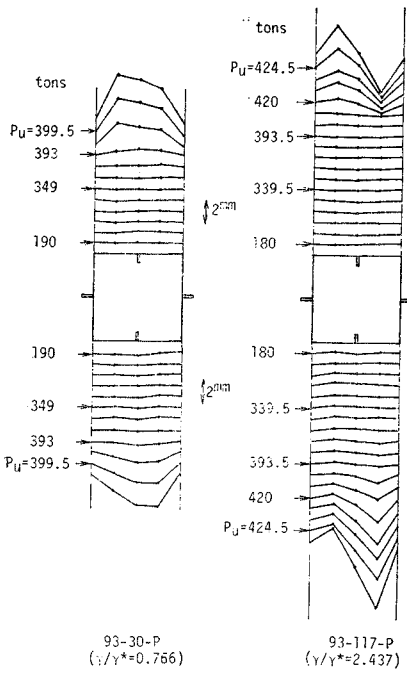


Fig. 10 Influence of Rigidity of Ribs on additional Deflections

験体, C 2-150-1 の圧縮ひずみ分布は, 大きく傾向を異にする。幅厚比の小さな試験体 C 2-90-1, C 2-120-1 は 載荷とともにリブ取り付け面方向に徐々に面外変形を生ずるため, リブ突出端の圧縮ひずみはその曲げひずみに相殺されて板パネルのひずみより小さい。幅厚比の大きな試験体 C 2-150-1 は, パネル全体の面外変位が比較的少ないために圧縮ひずみが一様に分布している。この原因を次のように考えることができる。

幅厚比の小さなリブ付板の断面は最高荷重よりかなり低い荷重でリブの突出端の部分降伏が始まる。そのためリブ付板の断面に一樣に作用していた荷重が板要素側に移動して加わるようになり, リブ付板に対しては偏心荷重となってリブを有する面外方向にパネル全体で変位する。それに対し幅厚比の大きなリブ付板の断面では, リブの突出端が部分降伏する荷重と最高荷重がほとんど等しく, パネル全体としての変位を生ずる前に断面の局部座屈崩壊が生ずると判断される。このような現象は, 1-リブ付板の場合でもほぼ同様に観察された。

焼鈍試験体 C 2-120-1 A, ハイブリッド試験体 C 2-120-1 H について考察する。試験体 C 2-120-1 はリブ付板要素の面外変位によって板パネルとリブでのひずみの相違を示したのに対し, それと同一の幾何学的形状を

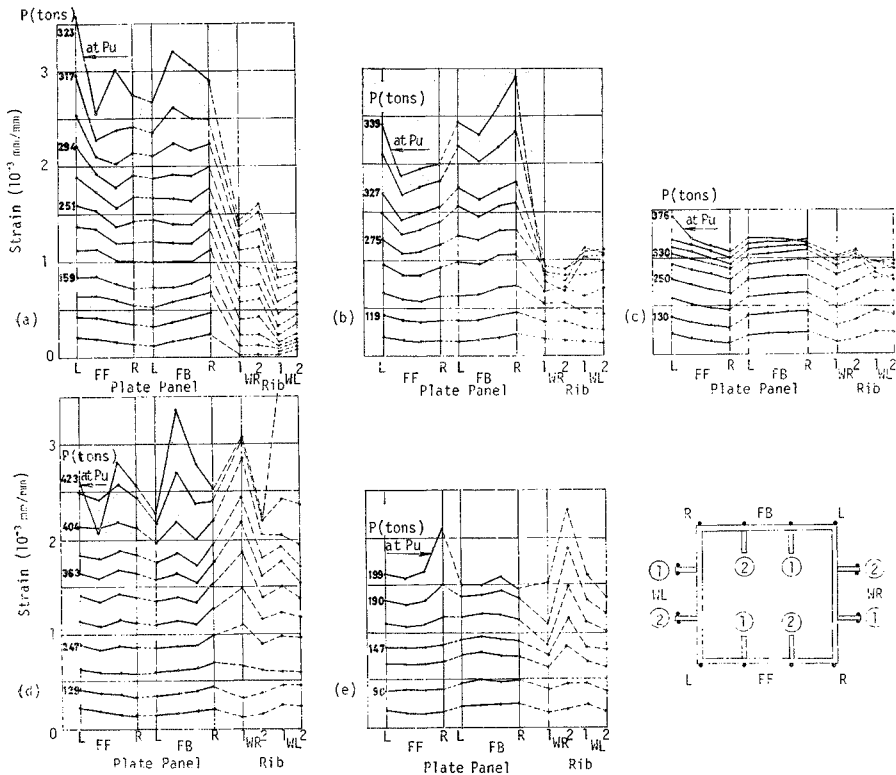


Fig. 11 Strain Distributions of Specimens  
 (a) Specimen C 2-90-1, (b) Specimen C 2-120-1, (c) Specimen C 2-120-1 A,  
 (d) Specimen C 2-120-1 H, (e) Specimen C 2-150-1

持つ両試験体ともに板パネルとリブではほぼ様なひずみ分布のまま崩壊に到っている。焼鈍試験体は残留応力が除去されているために様なひずみ特性を示すと思われる。ハイブリッド試験体では残留応力は他の試験体と同様な分布を示すが、板パネルが部分降伏から全降伏に進行した後も、リブは降伏応力が高いため弾性状態を保つ。その結果、リブはその断面全体で荷重を負担する中心圧縮を受ける柱としての挙動を示し、様なひずみ特性を与えるものと思われる。このように焼鈍試験体とハイブリッド試験体は同様のひずみ特性を示すが、ハイブリッド試験体のひずみは焼鈍試験体のひずみに比較して非常に大きくその本質が異なることは注意する必要がある。

T型のリブを持つリブ付板に関しては長方形断面のリブを持つリブ付板の場合と特に異なる変形特性は得られなかった。

(2) 耐荷力特性

実験より得られた各試験体の静的最高荷重を計算により求めた座屈曲線とともに Fig. 12 に示す。座屈曲線は無限板に対する計算曲線である。計算では板パネルを完全弾塑性体とし、非弾性域での板のモーメントと曲率の関係を与える式 (2) の  $k_j$  ( $j=1\sim 4$ ) に対して塑性変形理論で座屈時のひずみの逆転はないものとした Bijlaard の理論<sup>20)</sup>を適用した。Fig. 12 に示す曲線は板パネルとリブに存在する圧縮残留応力の最大値が降伏応力の  $\frac{1}{2}$  とし、板パネルでの残留応力の分布と荷重を受けたときのリブの剛性の評価は文献 5) に与えた仮定をそのまま採用して計算したものである。したがって実験値と比較する場合、この仮定は実際の残留応力の分布と必ずしも一致していないことに注意する必要がある。計算に採用した座屈強度に不利な影響を与える圧縮残留応力の値は本実験で計測した圧縮残留応力の値に比べると大きめの評価をしている。

図で曲線①は板パネル、リブともに内部に残留応力がない場合でリブ線が分割された板パネルを単純支持するとみなしたときの座屈曲線である。曲線②は板パネルにのみ残留応力が存在し、リブには存在しない場合でリブ線を単純支持の境界線とみなしたときの座屈曲線である。この曲線②が、現行の鋼橋の設計示方書<sup>1),2)</sup>で与えている標準座屈曲線である。曲線②にそって示した数値はリブ内部に存在する残留応力を考慮した場合にリブ線を単純支持の境界線とみなし得るための最小の剛比である。曲線③は DIN 4114 に定める最小

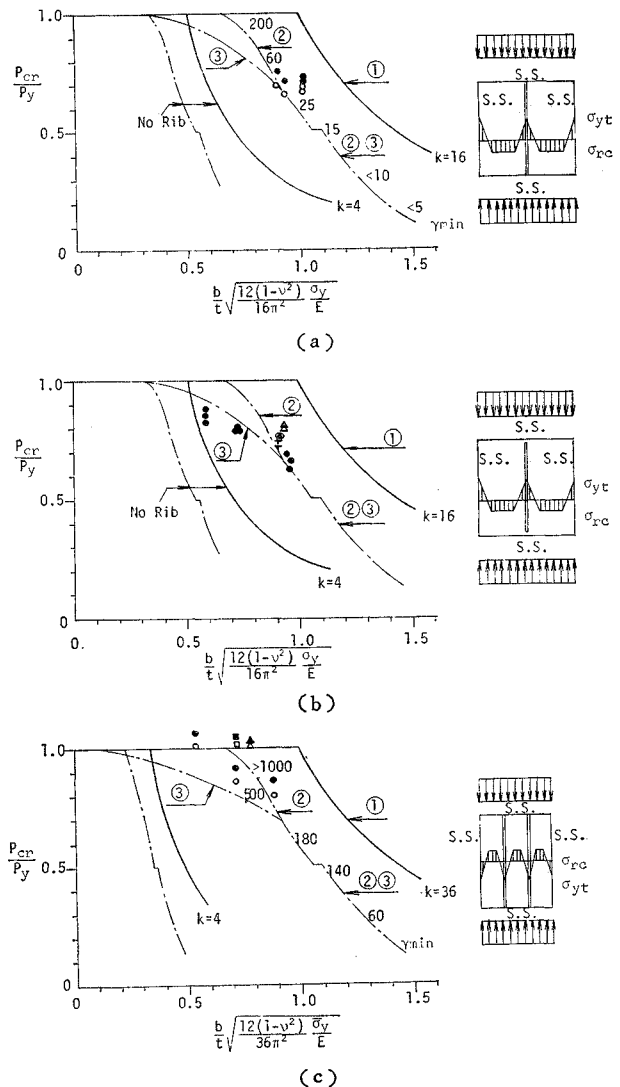


Fig. 12 Comparison of Test Results with Numerical Calculations; Numerical Results; —: free of Residual Stress, - - - : with Residual Stress ( $\sigma_{rc}/\sigma_y=0.5$ ); Area of One Rib,  $\delta$ : (a) 0.2, (b) 0.2, (c) 0.25; Test Results, (a)  $\circ$ :  $P_{cr}/P_y$ ,  $\bullet$ :  $P_u/P_y$ , (b)  $P_u/P_y$ ;  $\bullet$ :  $0.5 < \gamma/r^* < 1.5$ ,  $\circ$ :  $2.0 < \gamma/r^* < 5.0$ ,  $\nabla$ :  $\gamma/r^*=1$ , T-typed Rib,  $\triangle$ :  $\gamma/r^*=1$ , Annealed, (c)  $\circ$ ,  $\square$ ,  $\triangle$ :  $P_{cr}/P_y$ ;  $\bullet$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$ :  $P_u/P_y$ ;  $\square$ ,  $\blacksquare$ : Annealed;  $\triangle$ ,  $\blacktriangle$ : Hybrid; (a), (b): Stiffened Plates with One Rib, (c): Stiffened Plates with Two Ribs

剛比  $\gamma^*$  の剛性をリブが持つときに、板パネルとリブの両者に存在する残留応力を考慮した場合の座屈曲線である。リブの剛性として  $\gamma^*$  を用いてリブ付板を設計する場合には、曲線③が標準座屈曲線となる。現行の示方書では板パネルの幅厚比が限界幅厚比より小さい場合には補剛材の最小剛比  $\gamma^*$  に対して設計所要剛比の低減規定を定めている。したがって現行の示方書に定めるリブの

規定剛性を用いてリブ付板を設計する場合には本計算によればこのときの標準座屈曲線は曲線③を下回る。

**Fig. 12 a, b** は 1-リブ付板の場合の座屈曲線と実験値で **Fig. 12 a** の実験値はリブに対して直接載荷したもので、**Fig. 12 b** は板パネルにのみ載荷し、リブに対して非載荷条件で実験したものである。**Fig. 12 c** は 2-リブ付板の座屈曲線と実験値で、この実験値はリブに対して直接載荷の条件で実験したものである。

限界幅厚比付近とそれより幅厚比の小さい領域で 1-リブ付板の実験値の低いことが注目される。これは座屈曲線③の傾向と一致し、リブ内部に存在する残留応力によるリブの剛性低下のために耐荷力が低下することが実験的に明らかにされたものと考えてよいであろう。**Fig. 12 c** に示した 2-リブ付板の場合はやや高目の実験値が得られ、実験値の変動の大きい領域であることを示す。**Fig. 12 b** に示した 1-リブ付板のこの領域での実験値が非常に低くなった原因として、リブに対して非載荷の条件がある程度影響していると思われる。幅厚比の小さなリブ付板要素では、リブの取り付け面方向へのパネル全体の面外変位が最終崩壊を決定する 경우가多く、リブに対する非載荷条件による荷重偏心性は崩壊に対し不整合として影響すると考えられる。

本実験結果からは限界幅厚比付近での、リブ内部の残留応力による耐荷力の低下の程度は、必ずしも明らかではない。しかし少なくとも降伏荷重の 10% 程度は低下すると考えてよく、伊藤と田島<sup>16),17)</sup>、Dorman と Dwight<sup>19)</sup> らの実験にもその傾向が現われている。小松・吉川と牛尾の実験<sup>18)</sup> で比較的高目の実験値が得られたのは 80 キロ鋼を使用した試験体に対する実験で、残留応力の影響が少なかったためと判断される。

2-リブ付板で限界幅厚比を持つ焼鈍試験体とハイブリッド試験体の実験値が降伏荷重に達していることが注目される。リブ付板についても焼鈍して残留応力を除去するとこのように高い耐荷力を示すのは、伊藤と田島の実験<sup>16),17)</sup> でも実証されており、本実験結果からもそれが裏付けられた。ハイブリッド試験体の実験値は板パネルとリブのそれぞれの実測降伏応力を用いた全断面の降伏荷重で無次元化したのが、それでも耐荷力は降伏荷重を上回っている。この試験体では板パネルでの残留応力がほかの試験体と同様に存在することを考えると、高い荷重が作用した状態でリブの初期の剛性が保持されることが、リブ付板に対しきわめて有効な耐荷力特性を与えることがわかる。このことは逆に、残留応力の存在によるリブの剛性低下がリブ付板の耐荷力を低下させる原因となることを示す。

限界幅厚比より大きな幅厚比を持つ試験体の実験値について考察する。この実験値は 1-リブ付板の場合、93

シリーズの試験体に対する値である。リブに対する直接載荷の条件による耐荷力の相違に注目するとリブに対して載荷条件での実験値が非載荷条件での場合の値に対し 5% 程度高い。しかし実験値のばらつきを考えるとその相違は必ずしも大きなものではない。これは幅厚比が大きく、局部座屈変形が卓越するため、幅厚比の小さな板の場合にはその相違が大きくなると予想される。

リブの剛性による耐荷力の実験値の相違に注目すると **Fig. 12 b** に示すように試験体のリブの剛比  $r$  と最小剛比  $r^*$  の比  $r/r^*$  で 1 前後と 2~5 の場合では耐荷力は最大 10% 程度後者が上回る。たてリブは一般に軸力を負担するものとして設計されることを考えると、リブの剛性を高めることが設計上有利であることを示す。この実験値はリブに対して非載荷条件での実験値であるが、リブに対して載荷条件のもとでも同様のことがいえると思われる。

T 型のリブを持つ試験体の実験値を同一剛性の長方形断面のリブを持つ試験体の実験値と比較すると、変形特性では大きな相違はなかったが、耐荷力は T 型のリブを持つリブ付板のほうが 5% 程度高い。これは T 型のリブを加工後にそれを焼鈍したことにある程度起因するものと思われるが、ねじれ剛性（この場合、特に曲げねじれ剛性）の効果と考えるとよいであろう<sup>9)</sup>。

93 シリーズの試験体のように限界幅厚比より大きな幅厚比を持つ試験体でも、**Fig. 12 b** に示すように焼鈍による残留応力除去によって耐荷力が 10~15% 上昇する結果が得られた。

### (3) リブ付板の溶接残留応力

1-リブ付板と 2-リブ付板の溶接残留応力の実測結果を示した **Fig. 5** からリブにより仕切られた板パネルの残留応力分布がほぼ無補剛板のそれと一致することがわかる。座屈強度におよぼす影響として、最も問題となるのは圧縮残留応力の大きさである。これは無補剛板の溶接残留応力の実測結果<sup>21)</sup> から明らかなように、標準的な溶接条件のもとでは一般に溶接線間隔により異なる。リブ付板の計測結果からは溶接線間隔  $b_0=180$  mm に対し圧縮残留応力と降伏応力の比  $\sigma_{rc}/\sigma_Y=0.5$ 、 $b_0=240$  mm に対し  $\sigma_{rc}/\sigma_Y=0.3$  が得られ、無補剛板の圧縮残留応力<sup>21)</sup> より大きな値を示していることが注目される。これは板片の板厚に対し、リブの取り付け部のすみ肉溶接の入熱量が相対的に大きかったためであろう。

リブの残留応力分布の実測結果によればリブ取り付け部で降伏応力に近い引張残留応力、中央部で圧縮残留応力が発生し、突出端ではほぼ 0 になる。突出端で残留応力が小さくなるのはガス切断の影響である。中央部の圧縮残留応力は  $\sigma_{rc}/\sigma_Y$  で 0.5 に近い値を示した。リブ内

部での残留応力分布は板パネルとリブの断面の大きさの相対的な関係により異なるが、この実測結果が限界幅厚比とリブの剛性  $r/r^*=1$  の値を持つリブ付板に対するものであることから、この程度の大きさの残留応力はリブ付板の設計を考える場合に考慮すべきであろう。ここでの数値は構造用炭素鋼 SM 41 のリブ付板に対して得られたものであり、高強度鋼の場合は、降伏応力で無次元した場合より低目の数値が得られることが予想される<sup>(18), (21)</sup>。

## 5. 結 論

1-リブ付板と 2-リブ付板の純圧縮耐荷力実験を実施し、計算で求めた座屈強度と比較、検討した結果、次の結論を得た。

(1) リブ付板要素の幅厚比が限界幅厚比より大きい場合と小さい場合とでその座屈特性は大きく異なる。これは弾性座屈と非弾性座屈としての挙動の相違として説明される。幅厚比が小さい場合、パネル全体の変形が卓越し、大きい場合には局部座屈変形が卓越する変形特性を示す。このことは、幅厚比が小さい場合にリブに対する載荷条件が大きく影響することを示す。

(2) 限界幅厚比より大きい幅厚比の領域では、無補剛板に対する座屈曲線を拡張した結果で、板要素にのみ残留応力の存在を考慮した座屈曲線がリブ付板の耐荷力についても、実験値とよい一致を示す。焼鈍による残留応力の除去、T型のリブの採用、リブの剛性の増加によりその耐荷力の実験値は 5~15% 増加し、それらの効果の有効なことがわかった。したがってこの領域ではそれらは現行の座屈曲線に対して余剰強度を与える。

(3) 限界幅厚比付近の幅厚比を持つリブ付板の耐荷力は降伏荷重に達せず、実験によれば降伏荷重を少なくとも 10% 程度下回る。この領域では残留応力や荷重偏心などの不整に敏感で耐荷力のばらつきも大きい。

(4) 実験で得た耐荷力は、板パネルとともにリブ内部に存在する残留応力の影響を考慮した計算結果とよい一致を示した。このことは現行のリブ付板の設計規準が危険側の評価をしていることを示す。

(5) たてリブは軸力を負担するものとして設計されることから、その断面を増やしても設計計算上、不経済となることはなく、たてリブの剛性は現行の規定より高めたほうがよい。

(6) リブに板要素より高強度鋼を使用したハイブリッド断面の試験体は、焼鈍された試験体と同じような変形、耐荷力特性を示し、残留応力による耐荷力の低下を防止する意味で、きわめて有効な断面となることがわかった。

(7) 溶接による初期たわみは、耐荷力にほとんど影響を与えず、板要素の局部座屈に関する限り問題にする必要がないと思われる。

(8) 溶接集成のリブ付板のリブの残留応力は、部分的にかなりの圧縮残留応力を発生し、リブ付板の耐荷力に不利な影響を与える。

謝 辞：本研究は本州四国連絡橋公団から東京大学への委託研究の一部として実施されたものである。本研究は委託研究全体の責任者である東京大学 奥村敏恵教授の助言とご指導のもとに行われたものである。試験体の製作は横河橋梁(株)に依頼した。実験に際し、秋山晴樹氏(現、本州四国連絡橋公団)に東京大学の卒業研究の一部として協力頂いた。数値計算には東京大学工学部の FACOM 230-25 を使用した。関係各位に深く感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、昭和48年。
- 2) 土木学会：鋼鉄道橋設計標準解説、昭和45年。
- 3) DIN 4114 Blatt 1: Stahlbau, Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Berechnungsgrundlagen, Vorschriften, Juli, 1952.
- 4) DIN 4114 Blatt 2: Stahlbau, Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Beulung), Berechnungsgrundlagen, Richtlinien, Februar, 1953.
- 5) 長谷川彰夫・大田孝二・西野文雄：補剛された板要素の座屈強度に関する二、三の考察，土木学会論文報告集，第232号，1974年12月，pp. 1~15.
- 6) 吉識雅夫・藤田 諒：圧縮力を受ける補強板の最高荷重について，造船協会論文集，Vol. 104, 1958, pp. 149~155.
- 7) 楠田忠雄：圧縮力を受ける補強板の塑性座屈について一第1報，軸対称型防焼材を有する場合一，造船協会論文集，Vol. 105, 1959, pp. 137~146.
- 8) Skalond, M.: Post critical behaviour of compressed webs uniformly reinforced by longitudinal stiffeners, Acier-Stahl-Steel, No. 4, 1964, pp. 187~192.
- 9) Skaloud, M.: The effect of an initial curvature on the postcritical behaviour of a uniformly compressed web reinforced by a longitudinal stiffener, Acier-Stahl-Steel, No. 5, 1965, pp. 241~246.
- 10) Dubas, P: Tests about post-critical behaviour of stiffened box girders, Proc. of Colloquium on Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, IABSE Report, Vol. 11, Mar. 1971, pp. 367~379 (in French).
- 11) Maquoi, R. and Ch. Massonnet: Non-linear theory of post-buckling resistance of large stiffened box girders, IABSE Publications, Vol. 31-II, 1971, pp. 91~140.
- 12) Murry, N.W.: The behaviour of thin stiffened steel plates, IABSE Publications, Vol. 33-I, 1973, pp. 191~201.
- 13) Dorman, A.P. and J.B. Dwight: Tests on stiffened compression plates and plate panels, Proc. of International Conference on Steel Box Girder Bridges, ICE, London, Feb. 1973, pp. 63~75.

- 14) Dowling, P.J., S. Chatterjee, P.A. Frieze, and F.M. Moolani: Experimental and predicted collapse behaviour of rectangular steel box girders, Proc. of International Conference on Steel Box Girder Bridges, ICE, London, Feb. 1973, pp. 77~94.
- 15) Merrison Committee: Inquiry Into the Basis of Design and Method of Erection of Steel Box Girder Bridges, Her Majesty's stationary office, London, 1973.
- 16) 伊藤文人・田島二郎: 補剛材を持った高張力鋼板による溶接角型短柱の圧縮試験, 鉄道技術研究所報告, No. 313, 1962年6月.
- 17) 日本鉄道建設公団: 本州四国連絡鉄道吊橋技術調査委員会中間報告書一橋梁専門部会報告一, 1970年6月, pp. 238~241.
- 18) 小松定夫・吉川 紀・牛尾正之: 80キロ鋼の補剛板の極限強度に関する実験, 土木学会論文報告集, 第218号, 1973年10月, pp. 31~38.
- 19) Nishino, F and L. Tall: Residual stress and local buckling strength of steel columns, Proc. of JSCE, No. 172, Dec. 1969, pp. 79~96.
- 20) Bijlaad, P.P.: Theory and tests on plastic stability of plates and shells, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 16, Sept. 1949 pp.529~541.
- 21) 奥村敏恵・西野文雄・長谷川彰夫: 箱型断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, 第205号, 1972年9月, pp. 19~30.

(1974. 8. 23・受付)