I-83　差分法によるリブ付板の弾塑性座屈解析

東京大学工学部　正員　奥村敏恵　　　東京大学工学部　学生員〇長谷川彰夫
〃　　〃　西野文雄　　　日本国有鉄道　正員　長浜正孝

1. 序　最近世界各国においてボックス・ガーダー系の落橋事故が頻発しており、その原因解明の中で圧縮フランジ及びウェブの座屈崩壊に関連して縦リブの所要剛性が問題となっている。DINで規定するいわゆる最小剛比 γ^{*} に関しても残留応力，初期たわみ等の初期不整を考慮すると、実際に縦リブ線が節線となる為には $5\gamma^{*}$ 程度の剛性が必要であるとの議論もある。[1] 筆者等は従来より残留応力を有する板系構造の弾塑性座屈の問題を差分法により解析してきた。本論文はその差分手法を発展させ、縦リブを有する板の弾塑性座屈を残留応力を考慮して計算出来る事を論じ、その計算例を示したものである。

2. 差分計算式の誘導

2-1 無補剛の板の弾塑性座屈の差分評価式

リブ付板の弾塑性座屈差分評価式を導く前に、その式の誘導に必要とされるリブを有しない一般の板の差分評価式を与えておく。[2] 一般に弾塑性座屈を考える時に、板のモーメント－曲率関係は面内せん断力がない場合、(2-1)式で与えられる。このDマトリクスを用いると平板座屈の基礎方程式は(2-2)式のように表現出来る。

$$M = D\varphi \quad ; \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = D_0 \cdot \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 \\ k_2 & k_3 & 0 \\ 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -w_{xx} \\ -w_{yy} \\ 2w_{xy} \end{Bmatrix} \qquad \text{但し} \quad D_0 = \frac{Et^3}{12} \qquad (2\text{-}1)$$

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

今、一方向圧縮状態を考え、($N_y=0$)、板厚一定($D_0=Const$)、圧縮方向のたわみ波形をsinと仮定($w=Y(y)\sin\frac{\pi}{L}x$; 載荷辺単純支持)する事により(2-2)式を常微分方程式に変換して、一次差分による差分評価式を導くと(2-3)，(2-4)式のように表現出来る。(差分点 i における差分評価式)

$$C_{1,i}Y_{i+2} + C_{2,i}Y_{i+1} + C_{3,i}Y_i + C_{4,i}Y_{i-1} + C_{5,i}Y_{i-2} = C_i \cdot \lambda^2 Y_i \qquad (2\text{-}3)$$

但し、

$$\begin{aligned}
C_{1,i} &= \tfrac{1}{2}k_{3,i+1} + k_{3,i} - \tfrac{1}{2}k_{3,i-1} \\
C_{2,i} &= -2(3k_{3,i} - k_{3,i-1}) - \left(\tfrac{\pi}{n}\right)^2\left(\tfrac{b}{L}\right)^2\left(\tfrac{1}{2}k_{2,i+1} + 2k_{2,i} - \tfrac{1}{2}k_{2,i-1} + k_{4,i+1} + 4k_{4,i} - k_{4,i-1}\right) \\
C_{3,i} &= -2(k_{3,i+1} - 5k_{3,i} + k_{3,i-1}) + \left(\tfrac{\pi}{n}\right)^2\left(\tfrac{b}{L}\right)^2\left(-k_{2,i+1} + 6k_{2,i} - k_{2,i-1} + 8k_{4,i} + \left(\tfrac{\pi}{n}\right)^2\left(\tfrac{b}{L}\right)^2 k_{1,i}\right) \qquad (2\text{-}4) \\
C_{4,i} &= 2(k_{3,i+1} - 3k_{3,i}) - \left(\tfrac{\pi}{n}\right)^2\left(\tfrac{b}{L}\right)^2\left(-\tfrac{1}{2}k_{2,i+1} + 2k_{2,i} + \tfrac{1}{2}k_{2,i-1} - k_{4,i+1} + 4k_{4,i} + k_{4,i-1}\right) \\
C_{5,i} &= -\tfrac{1}{2}k_{3,i+1} + k_{3,i} + \tfrac{1}{2}k_{3,i-1} \\
C_i &= \frac{12\pi^2}{n^4}\left(\frac{b}{L}\right)^2\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)_i \quad , \quad \lambda = \frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}
\end{aligned}$$

ここで板巾 b は n 区間に分割

次節に使用するモーメント，等価せん断力は同様の仮定のもとにおいて計算すると(2-5)式のように表示する事が出来る。

$$M_y = -D_0 \sin\frac{\pi}{L}x\left\{-k_2\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 Y + k_3 Y''\right\} \quad , \quad V_y = -D_0 \sin\frac{\pi}{L}x\left\{-\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 k_2' Y - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 (k_2 + 4k_4) Y' + k_3' Y'' + k_3 Y'''\right\} \qquad (2\text{-}5)$$

上式を差分表示すれば、板座屈を差分計算する場合の境界条件が得られる訳であり、以上を用いて残留応力を有する無補剛板の弾塑性座屈解析が実行出来る。

2-2 縦リブを有する板の弾塑性座屈の差分評価式

ここでは図1-a)に示すように、任意の縦リブを有する板が一方向に任意の分布をする圧縮力を受けている場合の弾塑性座屈を取り扱う。今、図1-b)に示すように1本の縦リブと隣接する板部分を取り上げ、図1-c)に示すように縦リブを境に板部分を l-plate, m-plate に分け、両方の板からのモーメントM，等価せん断力Vの合力をそのリブが受けているものと考える。このように考える時、リブと板の結合連続条件は(2-6)式のように与える事が出来る。

変位境界条件　　　　力学境界条件

$$\begin{aligned}
&w_l = w_m = w_s && a) && EtI\frac{d^4 w_s}{dx^4} + A\bar{\sigma}_s \frac{d^2 w_s}{dx^2} = q && c) \\
&\varphi_s = \frac{\partial w_l}{\partial y} = \frac{\partial w_m}{\partial y} && b) && EI_\omega \frac{d^4 \varphi_s}{dx^4} + (A\bar{\sigma}_s \cdot r_s^2 - GK)\frac{d^2 \varphi_s}{dx^2} = m_T && d)
\end{aligned} \qquad (2\text{-}6)$$

ここでリブに作用する分布横力 q，分布トルク m_T は(2-7)式で与えられる。

$$q = (V_y)_m - (V_y)_l \quad , \quad m_T = (M_y)_l - (M_y)_m \qquad (2\text{-}7)$$

差分化を行うにあたっては、2-1と同様にして l-plate, m-plate，リブ共に x 方向(圧縮方向)を半波のsinで仮定し、(2-8)式のように表示する。今簡単の為に、リブの振れに対する抵抗を無視し、(即ち，$EI_\omega \varphi^{IV} + (Pr_s^2 - GK)\varphi^{II} = 0$)

$$w_l = f(y)\cdot\sin\frac{\pi}{L}x \quad , \quad w_m = g(y)\sin\frac{\pi}{L}x \quad , \quad w_s = \delta_s \cdot \sin\frac{\pi}{L}x \qquad (2\text{-}8)$$

とおくもので一般にリブ付板の弾性解析に用いられている仮定である。[3)4)]）(2-6d)式で $m_T=0$ とおくと(2-5),(2-6),(2-7),(2-8)式を用いて、リブと板の結合連続条件は未知函数 $f(y)$, $g(y)$, δ_s を用いて(2-9)式のように表示される。

$$f(a)=g(a)=\delta_s \quad a),\quad f'(a)=g'(a) \quad b),\quad f''(a)=g''(a) \quad d),$$

但し、aはリブ
$$\left[EtI\left(\frac{\pi}{L}\right)^4-A\cdot\bar{\sigma}_s\left(\frac{\pi}{L}\right)^2\right]f(a)=k_3D_0\left[f'''(a)-g'''(a)\right] \quad c) \qquad (2\text{-}9)$$

の点のy座標である。図2に示すようにy座標a点をℓ-plate ($f(y)$), m-plate ($g(y)$)共に差分点 i とすると(2-9) a), b), d)式より(2-10)式のような差分関係式が得られる。この関係により、ℓ-plate, リブ, m-plate を一体として差分方程式(Y)

$$f_i=g_i=\delta_s,\quad f_{i-1}=g_{i-1},\quad f_{i+1}=g_{i+1} \qquad (2\text{-}10)$$

で取り扱う場合には、リブを有する点 i の前後の $i-1$, $i+1$ における差分評価式は(2-3)式に一致する事がわかる。従って差分方程式におけるリブの影響の考慮はリブを有する点 i での差分評価式を求める事に帰着される。それには、(2-9) c)式を差分評価し、ℓ-plate, m-plate 共に共通点 i において(2-3)式が成立する事を用いて図-2に示す仮想節点 g_{i-2}, g_{i-1}, f_{i+1}, f_{i+2} を消去し、有効節点 f_{i-2}, f_{i-1}, f_i ; g_{i+1}, g_{i+2} により差分評価式を表示すればよい。(2-9c)式は(2-10)式を用いて変形し、整理して(2-3)式と共通の符号を用いて表わすと(2-11)(2-12)式のようになる。ここで、γ, δ は弾性時のリブの剛比、面積比であり、リブの塑性化、残留応力

$$S\cdot f_i=\left[S_1-S_2\lambda^2\right]\cdot f_i=\frac{k_2}{2}\left(f_{i+2}-f_{i-2}-g_{i+2}+g_{i-2}\right) \quad 但し、\ S=S_1-S_2\cdot\lambda^2,\quad \lambda=\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \qquad (2\text{-}11)$$

$$S_1=\frac{1}{1-\nu^2}\left(\frac{b}{L}\right)\frac{\pi^4}{n^3}\cdot\eta\cdot\gamma,\quad S_2=12\left(\frac{b}{L}\right)^2\frac{\pi^2}{n^3}\xi\cdot\delta \quad 但し、\ \gamma=\frac{EI}{bD}\ \left(D=\frac{Et^3}{12\cdot(1-\nu^2)}\right):剛比,\ \delta=\frac{A}{bt}:面積比$$

$$\eta=\frac{E_t}{E}\ (リブの接線係数比),\quad \xi=\frac{\bar{\sigma}_s}{\sigma_Y}\ (リブの平均圧縮応力比) \qquad (2\text{-}12)$$

の影響は η, ξ で評価される。次に ℓ-plate, m-plate に関して i 点の差分方程式を(2-3)式により表示し、(2-10)式を用いると(2-13)式のような条件が成立する。(2-11), (2-13)式を連立させて解くと仮想節点 f_{i+2}, g_{i-2} は有効節点 f_{i-2}, g_{i+2}

$$C_{5,i}\cdot f_{i-2}+C_{1,i}\cdot f_{i+2}=C_{5,i}\cdot g_{i-2}+C_{1,i}\cdot g_{i+2} \qquad (2\text{-}13)$$

を用いて(2-14)式のように表示される。i点における ℓ-plate (又は m-plate)の差分評価式(2-3)で(2-10)(2-14)

$$f_{i+2}=\frac{1}{k_{3,i}^2}\cdot C_{5,i}\cdot A\cdot f_i+g_{i+2},\quad g_{i-2}=\frac{1}{k_{3,i}^2}C_{1,i}\cdot A\cdot f_i+f_{i-2} \qquad (2\text{-}14)$$

式を用いて仮想節点 f_{i+2}, f_{i+1} (又は g_{i-2}, g_{i-1})を消去し、共通節点 Y_i により表示すると結局リブを有する点 i における差分評価式は(2-15), (2-16)式のように求められる。ここで $C_{k,i}$ ($k=1\sim5$), C_i は(2-4)式で与えられる。従って、リブがない場合は $S_1=0$ ($\gamma=0$), $S_2=0$ ($\delta=0$) となり、(2-3)式に一致する。

$$C_{1,i}Y_{i+2}+C_{2,i}Y_{i+1}+D_{3,i}Y_i+C_{4,i}Y_{i-1}+C_{5,i}Y_{i-2}=D_i\cdot\lambda^2Y_i \qquad (2\text{-}15)$$

$$但し、\ D_{3,i}=C_{3,i}+\frac{1}{k_{3,i}^2}\cdot S_1C_{1,i}\cdot C_{5,i},\quad D_i=C_i+\frac{1}{k_{3,i}^2}S_2\cdot C_{1,i}\cdot C_{5,i} \qquad (2\text{-}16)$$

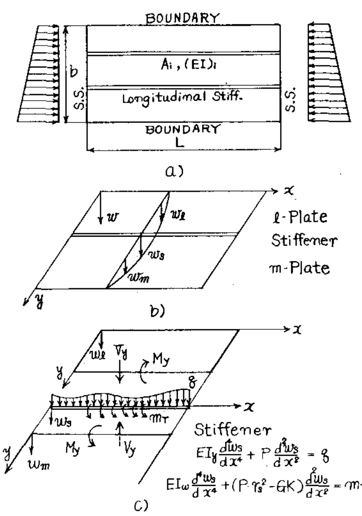

Fig.1 Presentation of the Problem

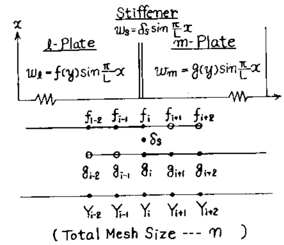

Fig.2. Points of Finite Differences near the Stiffener

3. 残留応力を有するリブ付板の弾塑性座屈計算に対する適用

3-1. 計算手順

(2-15)式で求めた差分方程式を用いて残留応力を有するリブ付板の弾塑性座屈をマトリクス固有値方程式を構成する事により解く事が出来る。即ち、残留歪、外力による変形歪を与えて差分点における剛性を決定し、それらにより表示される(2-15)式の係数 $C_{k,i}$ ($k=1\sim5$), $D_{3,i}$, C_i, D_i を求めてマトリクスを構成し、巾厚比相当量 λ を固有値として求める計算方法をとる。ここではその詳細については触れないが本論文の主題であるリブの影響に関し、留意すべき事柄を述べる。

3-2 残留応力を有するリブの接線係数, 平均圧縮応力の評価

本解析においてはリブは弾塑性 Beam-Column と考える。(2-15)式の差分評価において与えられた歪に対する S_1, S_2 を定める為にリブの接線係数比 $\eta=E_t/E$, 平均圧縮応力比 $\xi=\bar{\sigma}_s/\sigma_Y$ を歪の函数として表示しなければならない。これを与えるには例えば残留応力を有する中心圧縮柱の平均応力-歪関係を解析的に求める一般手法(C.R.C. Guide 2nd Ed. 1966 P20)を用いればよい。(実験的には短柱試験の平均応力-歪関係)しかし、本解析においては図-3に示すように素材を完全弾塑性体とし、残留応力を有する場合には、柱断面

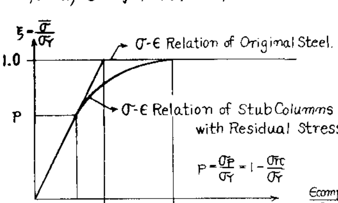

Fig.3 σ-ε Relation of Stub Columns

が弾塑性領域にある時，応力-歪関係が弾性域，塑性流れ域と滑らかな連続性を保つ事を条件に3次曲線で近似する。弾塑性域の範囲については一定の残留圧縮応力σ_{rc}がリブに存在すると考えて，比例限界σ_pを$\sigma_p=\sigma_Y-\sigma_{rc}$とおき，引張残留歪が降伏に達しているとして外力歪が$2\epsilon_Y$になった時全塑性になると考える。以上の仮定のもとに弾塑性域における平均応力 $y=\overline{\sigma_s}/\sigma_Y$，外力歪 $x=\epsilon_{comp}/\epsilon_Y$ の関係は(3-1)式のように求められる。

$$y=ax^3+bx^2+cx+d \quad (p\le x\le 2.0) \quad 但し，\quad p=1-\frac{\epsilon_{rc}}{\epsilon_Y}=1-\frac{\sigma_{rc}}{\sigma_Y} \tag{3-1}$$

$$a=-\frac{p}{(p-2)^3},\quad b=\frac{2p^2+p+2}{(p-2)^3},\quad c=-\frac{8(p^2-p+1)}{(p-2)^3},\quad d=\frac{4(2p^2-3p+2)}{(p-2)^3}+1$$

以上により仮定された平均応力-歪関係のもとにおける接線係数比 $\eta=E_t/E$，平均圧縮応力比 $\xi=\overline{\sigma_s}/\sigma_Y$ は(3-2)式のように表示される。

$$\text{i) 弾性域 } 0<\frac{\epsilon_{comp}}{\epsilon_Y}\le p;\ \eta=1,\ \xi=\frac{\epsilon_{comp}}{\epsilon_Y}\quad \text{ii) 弾塑性域 } p<\frac{\epsilon_{comp}}{\epsilon_Y}\le 2;\ \eta=\frac{dy}{dx},\ \xi=y\quad \text{iii) 塑性域 } \frac{\epsilon_{comp}}{\epsilon_Y}>2;\ \eta=0,\ \xi=1 \tag{3-2}$$

3-3. リブ付板の座屈応力に関する注意

本解析によれば，面内歪を与えて，巾厚比相当量$\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}$を固有値として求める方法をとっている為，座屈応力$\sigma_{cr}/\sigma_Y$は面内歪をもとに別に計算しなければならない。今，図1-a)に示す矩形板にk個の縦リブがあると考え，それぞれの面積，面積比をA_j，$\delta_j\ (=A_j/bt)\ (j=1\sim k)$とする。その時板面積，$j$-リブ面積の全面積に対して占める割合$a_p$，$a_{sj}$は(3-3)式のように表示される。又，板のみの時の平均圧縮応力は(3-4)式で与えられる。(但し，板巾は全体をn分割され，両非載荷辺の差分点を1，$n+1$とする。) (3-3)(3-4)式を用いるとリブ付板全体に作用する平均圧縮応力(圧縮座屈応力)は(3-5)式のように求められる。

$$a_p=\frac{bt}{\Sigma A_j+bt}=\frac{1}{1+\Sigma\delta_j},\qquad a_{sj}=\frac{A_j}{\Sigma A_j+bt}=\frac{\delta_j}{1+\Sigma\delta_j} \tag{3-3}$$

$$\left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}\right)_0=\frac{1}{n}\left[\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)_1+\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)_{n+1}\right\}+\sum_{i=2}^{n}\left(\frac{\sigma_x}{\sigma_Y}\right)_i\right] \tag{3-4}$$

$$\left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}\right)=\frac{(\sigma_{cr}/\sigma_Y)_0\cdot bt+\sum_{j=1}^{k}(\overline{\sigma_s}/\sigma_Y)_j\cdot A_j}{\Sigma A_j+bt}=\left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}\right)_0\cdot a_p+\sum_{j=1}^{k}\left(\frac{\overline{\sigma_s}}{\sigma_Y}\right)_j\cdot a_{sj} \tag{3-5}$$

4. 数値計算例と結果の検討

以上に述べたリブ付板の弾塑性差分解析手法を用いて図-4に示すような中央に1本の縦リブを有する残留応力を含む純圧縮板の弾塑性座屈を取り扱う。本計算における基本的仮定として i)材料は完全弾塑性体とし ii)(2-1)式の板のモーメント-曲率関係を規定するDマトリクスには塑性変形理論，歪の逆転なしとするBijlaardの理論を適用する。残留応力分布は非載荷辺及びリブ取り付け部で溶接により降伏引張応力σ_Y，その中間部で一定圧縮応力が発生していると考え，図-4に示すような自己平衡初期応力分布を仮定する。図-4に示す条件のもとに精度解析を行うと図-4の結果になりTimoshenkoのEnergy解[3]と比較しても，極めて収束性がよい事がわかる。図-5は従来，多くの文献[4]に記載されている残留応力がない場合のリブの影響による座屈係数k[*)]の変化を$a/b\sim k$の関係として本解析法により求めたもので極めてよい精度で解が得られる事を示すものである。又，本解析法によれば，従来のEnergy法[3]，微分方程式法[4]と異なり，座屈波形を仮定する必要がなく，自動的に最小固有値，その時の座屈波形をマトリクス解析により求める事が出来る。残留応力を有する場合の$a/b\sim k$の関係を示したものが図6-1~4である。残留応力を有する場合にはこの関係が外力歪(従って結果的には座屈応力)により変化する事に注意しなければならない。図6-1~4は残留圧縮応力比$\sigma_{rc}/\sigma_Y=0.5$，中央リブの面積比$\delta=0.2$で4辺単純支持の場合について座屈応力(降伏応力で無次元化してσ_{cr}/σ_Yで表示)を変化させた4つの例を示したものである。これによれば，残留応力がない場合の逆対称座屈時の座屈係数($k=16$)は残留応力の存在により，著しく低下し，又，いわゆる最小剛比γ^*が座屈応力によって変化するものである事ものである事がわかる。図-7は図6-1~4のような$a/b\sim k$関係を多くの座屈応力段階で求める事により，その結果を用いて求められた，いわゆるリブ付板の局部座屈曲線を示したものである。この結果によれば，残留応力を有する場合に，リブ取り付け線が節線となる(逆対称座屈波形)為に必要な最小剛比γ^*が座屈応力により変化する事が明らかになる。

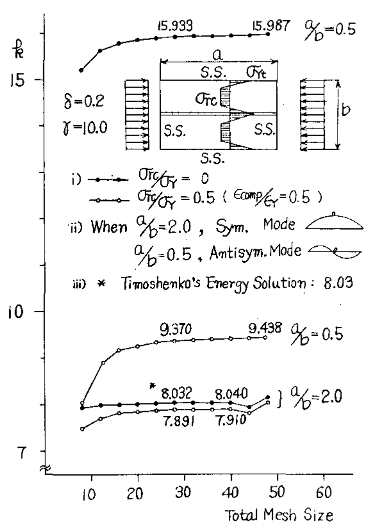

Fig.4. Accuracy of Buckimg Coefficient; k

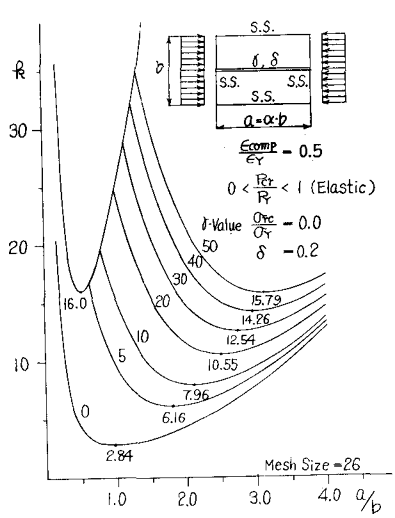

Fig.5. $a/b\sim k$ Relations of Stiffened Plates free of Residual Stresses

*) $\sigma_{cr}=k\dfrac{\pi^2D}{b^2t}=k\dfrac{\pi^2E}{12\cdot(1-\nu^2)}\dfrac{1}{(b/t)^2}=1.9\times10^6\cdot k\dfrac{1}{(b/t)^2}\ (E=2.1\times10^6\,kg/cm^2)$；$\dfrac{\sigma_{cr}}{\sigma_Y}=k\dfrac{\pi^2}{12\cdot(1-\nu^2)}\dfrac{1}{\left(\frac{b}{t}\sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}}\right)^2}=0.90\,k\dfrac{1}{\lambda^2}$ (無次元表示)

即ち，残留応力がない場合の線型γ^*値はこの場合約52（DIN4114 γ^*）であるが，残留応力が存在する場合には，低い座屈応力段階においては，それより小さく，降伏応力に近い高い座屈応力段階においてはγ^*は残留応力を考慮しない線型γ^*値の数倍に達するようになる。これは主として残留応力によりリブ自身の剛性低下（リブの接線係数E_tの低下）に起因するものと考えられる。又，γ^*のもとにおいても，残留応力の存在により，残留応力がない場合に比較して，座屈応力が低下するのは図に示すように明らかである。以上より，中央リブ取り付けにより，板中にリブがない場合の2倍にとってよい為のリブの剛比を座屈応力に応じて変化させて設計すれば問題ないと考えられるが，現在の設計の考え方のように例えばDIN4114の線型γ^*値で固定させて考えると高い座屈応力段階では，危険になる場合が生じ得ると思われる。これは図-7に示すように，$\gamma=40$の時の座屈曲線を求めると高い座屈応力のもとにおいては，γ^*の場合の座屈応力に比較して大きく低下している事より明らかである。

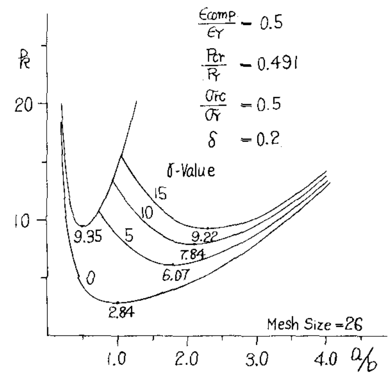

Fig. 6-2 $a/b \sim k$ Relations of Stiffened Plates with Residual Stresses (2)

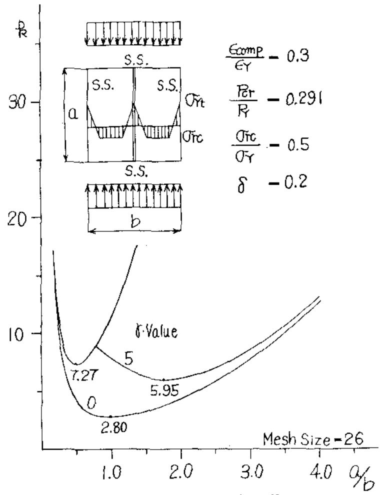

Fig. 6-1 $a/b \sim k$ Relations of Stiffened Plates with Residual Stresses (1)

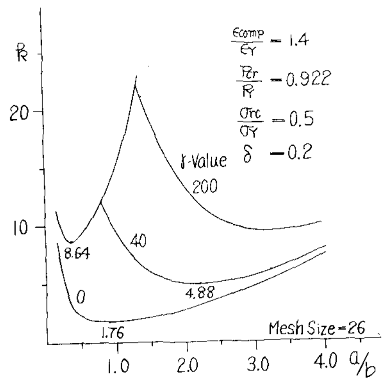

Fig. 6-4 $a/b \sim k$ Relations of Stiffened Plates with Residual Stresses (4)

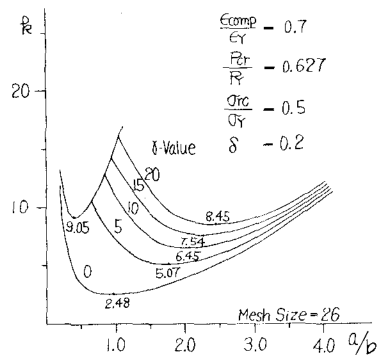

Fig. 6-3 $a/b \sim k$ Relations of Stiffened Plates with Residual Stresses (3)

5. 結語

本論文により得られた結論は次の2点である。

i) 残留応力を有するリブ付板の弾塑性座屈解析を摂動法を採用する事により，極めて簡単に解析する事が出来，仮定の範囲内において，多く縦リブを有したり種々の境界条件，箱型，I型等の板構造の圧縮あるいは曲げ座屈解析に適用する事が可能である。又，精度も比較的良く，次数の少いマトリクス計算で解析が可能の為，経済的にも有利であると考えられる。

ii) 本解析法の一例として最も基本的な場合として中央に一本の縦リブを有する純圧縮板の弾塑性座屈を残留応力を考慮して取り扱ったが，その結果，次のような事が言える。即ち残留応力を考慮した場合にはリブ線が節線となる為の最小剛比γ^*は座屈応力の函数となり，いわゆる線型γ^*値を基準に考えると低座屈応力段階では，それより小さく，降伏応力に近い高座屈応力段階においてはリブ自身の剛性低下により線型γ^*値の数倍にまで達する。

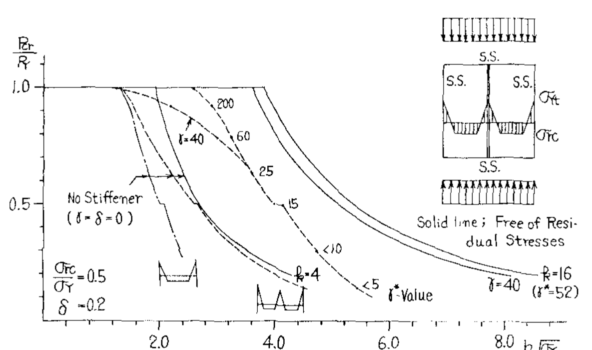

Fig. 7 Local Buckling Curves of Stiffened Plates with Residual Stresses

6. 参考文献

1) Seminary London, April 1971, - Ultimate Resistance of Plate Girders with Stiffened Webs - Summary Report, Bulltetin IABSE No.27 1971.
2) Nishino, F. and Tall, L., "Residual Stress and Local Buckling Strength of Steel Columns," Proc. of JSCE No 172 1969-12
3) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. "Theory of Elastic Stability" 2nd Ed. McGraw-Hill, NewYork, 1961
4) Kollbrunner, C.F. and Meister, M. "Ausbeulen, Theorie und Berechnung von Blechen", Springer, 1958