

プレート ガーダーの最小腹板厚に関する研究

A STUDY ON THE MINIMUM THICKNESS-TO-DEPTH RATIO OF PLATE GIRDER WEBS

米 沢 博*・三 上 市 蔵**

By Hiroshi Yonezawa and Ichizo Mikami

1. ま え が き

近年、構造用鋼材、溶接技術などの著しい進歩とともに、プレート ガーダー、合成桁、箱桁など板を主として用いた溶接構造が多用されるようになった。しかしこれらの構造の腹板、鋼床板など曲げあるいは圧縮が作用する板要素は、座屈による板厚の制限を受けるため、高張力鋼の使用によってただちに経済的になるとは限らない。

ところで、現行の鋼道路橋設計示方書、溶接鋼道路橋設計示方書、鋼鉄道橋設計示方書、合成桁設計施工指針などの最小腹板厚の規定は、周辺単純支持された等方性長方形板の座屈荷重を基礎として決定されている。この規定は簡単かつ明瞭な点では便利な規定といえるが、かならずしも腹板などの実際の状態を的確に把握しているとはいえない。

たとえばプレート ガーダーの腹板は上下フランジによって自由な回転を拘束されており、周辺単純支持よりさらに有利な境界条件を期待できるであろう。とくに合成桁においては、圧縮フランジはコンクリート床板に固定され、また合成断面の重心が腹板の重心軸よりかなり高いので腹板の座屈強度を相当大きく見積ることができるはずである。こうした諸点を考慮すれば、腹板厚をさらに薄くすることが可能であり、高張力鋼の使用も有意義になると考えられる。

曲げあるいは曲げと軸力を受ける腹板の座屈に関しては補剛された場合をも含めて、これまで数多くの研究^{1),2),3)}がなされているが、その大部分は周辺単純支持あるいは固定された長方形板として取り扱っている。著者らはさきに直交異方性長方形板理論を用いて、箱桁の弾性座屈⁴⁾を補剛材を有する腹板と鋼床板の連成座屈として、またプレート ガーダーについては、圧縮フランジの水平曲げおよびねじり剛さと鉛直補剛材の影響を考慮に入れた直交異方性板の曲げ弾性座屈⁵⁾として理論的に解析するとともに、実験的検討を加えた。

ここでは、鉛直補剛材のみを有する単純桁を対象に、慣用されている設計法に基づいてプレート ガーダーあ

るいは合成桁の腹板1パネルに注目し、圧縮フランジによる拘束および断面中立軸の位置を考慮に入れた等方性長方形板の曲げ弾性座屈を理論的に解析した。さらに解析結果を用いて数値計算を行ない、圧縮フランジのねじり剛さの影響を考慮した座屈荷重を簡単に計算できる実用公式を作製した。またプレート ガーダーおよび合成桁の腹板に対して、圧縮フランジによる拘束および断面中立軸の位置を考慮に入れた場合の合理的な最小板厚を、実用公式を用いて試算し、現行示方書の規定と比較検討した。最後に理論値と若干の実験値との比較を行なった。

2. 曲げを受ける等方性板の微分方程式の解

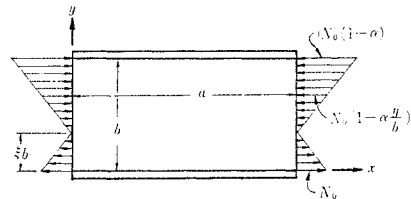
鉛直補剛材間隔 a 、腹板高さ b なるプレート ガーダーが図-1に示すように曲げを受けた場合を考える。腹板は補剛材の位置 $x=0, a$ で単純支持され、圧縮フランジで弾性固定されているとする*。圧縮フランジの水平曲げ剛さは十分に大きいか、あるいは床板に固定されていると考え、その水平方向のたわみは無視する。引張フランジによる腹板の拘束は単純支持としても固定としても座屈荷重にはほとんど差を生じないことが判明したので、ここでは固定として解析する。

腹板が座屈したときのたわみ曲面の微分方程式はつぎのようになる。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{N_0}{D} \left(1 - \alpha \frac{y}{b}\right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、腹板の曲げ剛さ $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ であり、 E ,

図-1 曲げを受ける腹板



注)* フランジと腹板の溶接残留応力の影響はここでは無視するが、上フランジと腹板の境界では残留応力は引張であるから、弾性固定条件には有利に作用すると考えてさしつかえないであろう。逆に下フランジの境界では極端な場合残留応力で降伏しているようなときは単純支持に近くなるであろう。

* 正会員 工博 京都大学教授 工業教員養成所土木工学科
** 正会員 京都大学助手 工業教員養成所土木工学科

ν, h はそれぞれ腹板の弾性係数, ポアソン比, 腹板厚, N_0 は $y=0$ における単位長さあたりの最大軸方向力, α は中立軸の位置によって決まる定数である。

微分方程式(1)の解は, より一般的な境界条件のもとで直交異方性板の場合⁵⁾について著者らが誘導している。ここではその結果に $D_x=D_y, H/\sqrt{D_x D_y}=1$ その他の等方性板の条件および圧縮フランジの水平曲げ剛さ $B_0=\infty$ を代入すればよいわけであるが, 結果としてかなり簡単になる。その概略を述べると以下のようである。

境界条件として $x=0, a$ において単純支持, $y=0$ において固定, $y=b$ において

$$w=0, C \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

と仮定する。式(2)は弾性固定の条件で, C は圧縮フランジのねじり剛さである。

いま式(1)の解を

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} a_n (y/b)^n \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \dots\dots\dots(3)$$

とおき式(1)に代入すると, 積分定数 a_0, a_1, a_2, a_3 を除いたすべての定数 a_n は $a_0 \sim a_3$ でつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} a_4 &= \sqrt{\phi_m} a_2 / 6 - (\phi_m + \mu_m) a_0 / 24, \\ a_5 &= \sqrt{\phi_m} a_3 / 10 - [(\phi_m + \mu_m) a_1 - \alpha \mu_m a_0] / 120, \\ a_6 &= \sqrt{\phi_m} a_4 / 15 - [(\phi_m + \mu_m) a_2 - \alpha \mu_m a_1] / 360, \\ &\dots\dots\dots \\ a_n &= \frac{2\sqrt{\phi_m} a_{n-2}}{n(n-1)} - \frac{(\phi_m + \mu_m) a_{n-4} - \alpha \mu_m a_{n-5}}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ただし, $\phi_m = (m\pi b/a)^4, \mu_m = (m\pi b/a)^2 N_0 b^2 / D$ である。

さらに $y=0, b$ における境界条件からつぎの関係が得られる。

$$a_0 = a_1 = 0 \dots\dots\dots(5)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$r\sqrt{\phi_m} \sum_{n=1}^{\infty} n a_n + \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n = 0 \dots\dots\dots(7)$$

ここに, $r=C/bD$ は圧縮フランジのねじり剛さを表わすパラメーターで, 一般に固定係数とよばれているものである。

式(4),(5)を式(6),(7)に代入して, 積分定数 a_2, a_3 の係数行列式を0とおくと, つぎのような座屈荷重方程式が得られる。

$$\left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} (n+1)(n+r\sqrt{\phi_m}) B_n \right] = \left[\sum_{n=1}^{\infty} B_n \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} (n+1)(n+r\sqrt{\phi_m}) A_n \right] \dots\dots\dots(8)$$

ただし, $A_1=1, A_2=0, A_3=\sqrt{\phi_m}/6, A_4=0,$
 $A_5=(3\phi_m-\mu_m)/360, \dots\dots\dots,$
 $A_n = \frac{2\sqrt{\phi_m} A_{n-2}}{n(n+1)} - \frac{(\phi_m + \mu_m) A_{n-4} - \alpha \mu_m A_{n-5}}{(n-2)(n-1)n(n+1)},$

$$B_1=0, B_2=1, B_3=0, B_4=\sqrt{\phi_m}/10, B_5=0, \dots\dots\dots,$$

$$B_n = \frac{2\sqrt{\phi_m} B_{n-2}}{n(n+1)} - \frac{(\phi_m + \mu_m) B_{n-4} - \alpha \mu_m B_{n-5}}{(n-2)(n-1)n(n+1)}.$$

式(8)の両辺は固有値 μ_m の無限べき級数であり, この式を満足する μ_m の値を求めれば座屈荷重 N_0 が決定される。

3. 座屈荷重の数値計算

座屈荷重方程式(8)を解析的に解くことは不可能なので, 電子計算機(Burroughs B 5500)を使用して数値計算を行なった。座屈荷重として最大圧縮座屈応力 σ_k を考えると, 座屈係数 k を用いて一般的に

$$\sigma_k = \frac{N_0(\alpha-1)}{h} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 h} \dots\dots\dots(9)$$

と表わされるので, 計算結果はすべて座屈係数 k を用いて示すことにする。また中立軸の位置を示すパラメーターとして図-1に示す ξ を用いることにする。

数値計算は, プレート ガーダー および 合成桁の種々の状態に適用できるように, つぎの4つの場合について行なった。

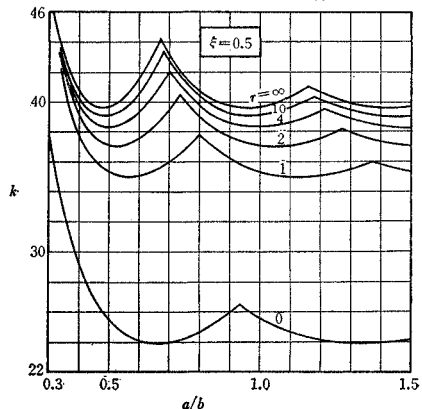
(1) 床板による拘束が全く, あるいはほとんど期待できないプレート ガーダー

床板と圧縮フランジとがほとんど絶縁されているとみなせるような上路プレート ガーダー, あるいは中路および下路プレート ガーダーの腹板は, 圧縮フランジのねじり剛さによってのみ上縁における回転が拘束されている。このような場合の座屈荷重を求めるために, 中立軸が腹板の重心軸と一致する場合, すなわち, $\xi=0.5$ とし, 圧縮フランジの固定係数 r の値を0から ∞ まで種々変化させて式(8)を解いた。その結果を図-2に示す。ここに $r=0, \infty$ はそれぞれ圧縮フランジで単純支持および固定された場合に相当する。

(2) 圧縮フランジがスラブ止めで床板に固定されている非合成上路プレート ガーダー

この場合, 腹板は上縁で固定されているとみなして

図-2 座屈荷重曲線



$r=\infty$ とし、 $\xi=0.5$ の場合について計算した。結果は図-2 の $r=\infty$ の曲線になる。

(3) 活荷重合成前のプレート ガーダー (架設時)

合成桁の圧縮フランジの鋼断面は非合成プレート ガーダーのそれに比べてかなり小さく、鋼桁のみの中立軸は腹板の重心軸より低くなる。そのため、活荷重合成桁の架設時を考えると、その腹板は座屈に対してかなり不利な状態に置かれていることになる。いいかえると、腹板は小断面の圧縮フランジによって拘束されているにすぎず、そのうえかなり広い部分に圧縮応力を受けているため、座屈強度が著しく低下することが予想される。この場合に対応するものとして、中立軸が $\xi=0.3, 0.4$ の2種類の場合について $r=0\sim\infty$ まで変化させて数値計算した結果を示すと、図-3 および 図-4 のようになる。

(4) 合成後のプレート ガーダー

圧縮フランジは床板に固定されており、しかも合成断面の中立軸が腹板重心軸より高くなるので、かなり大きい座屈荷重を期待することができる。このような場合に対する座屈荷重として、 $r=\infty$ で $\xi=3/4, 2/3, 1/2$ の3種類の場合について数値計算した結果は図-5 のようになる。なお図には比較のため $\xi=0, 0.3, 0.4$ に対する座屈曲線を示しておいた。

4. 座屈荷重に対する考察

3. に示した数値計算結果を用いて、腹板の座屈荷重に対する圧縮フランジのねじり剛さおよび中立軸の位置の影響を考察してみよう。

(1) 圧縮フランジのねじり剛さ*の影響

図-2,3,4 からわかるように、圧縮フランジのねじり剛さが大きくなるにしたがって、座屈荷重は増加する。とくに、圧縮フランジのねじり剛さすなわち $r=C/bD$ の値が小さい範囲ではその影響が著しい。しかしある程度以上にねじり剛さが大きくなると、あまり効果は表われない。

この間の関係をより明らかにするために、座屈荷重の最小値 k_{min} をとり、 $\sqrt{k_{min}^{**}}$ と r の関係を求めると図-6 のようになる。すなわちほぼ $r=0\sim 2$ の範囲では r の増加にともなって座屈荷重は急激に増加し、 $r\approx 2$ で固定 ($r=\infty$) の場合の座屈荷重の約 90% 以上に達する。 $r>2$ の範囲では座屈荷重の増加は緩慢になり、 $r\approx 3$ では固定の場合のおよそ 95%、 $r\approx 10$ では 98% になる。

注)* 曲げ垂直応力の影響で圧縮フランジに見かけのねじり剛性の低下が生ずる。実際のプレートガーダーの断面寸法では $r=C/bD$ の値がほとんどの場合に 5 以上になることを考慮すると、図-6 からわかるように、かなり極端な剛性低下を仮定してもその影響はきわめて小さいと考えられるので、ここでは見かけの剛性低下は考慮しないことにする。

注)** 最小腹板厚と直結させるために k_{min} の代りに $\sqrt{k_{min}^{**}}$ を用いた。

図-3 座屈荷重曲線

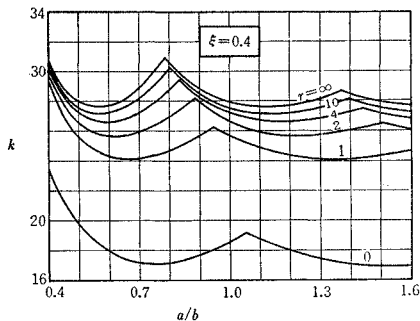


図-4 座屈荷重曲線

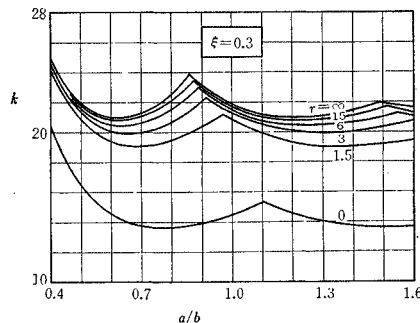
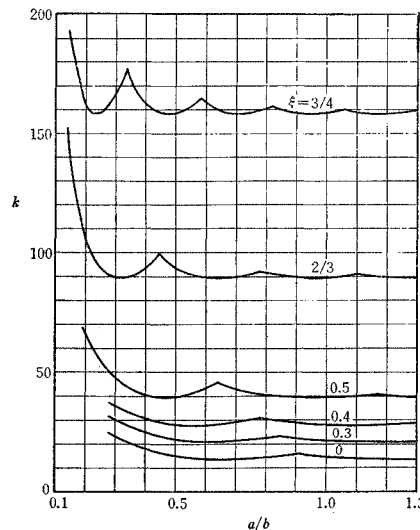


図-5 座屈荷重曲線



またこの傾向は中立軸の位置すなわち ξ の値にほとんど関係しない。

図-6 に示された曲線は、つぎのような式で誤差 1% 以内の精度で近似させることができる。

$$\sqrt{k_{min}} = A_1 - A_2 / (r + A_3) \dots\dots\dots(10)$$

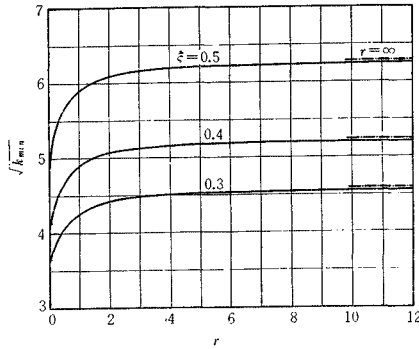
ただし、 $A_1 = 13.9 \xi^3 + 1.73 \xi + 3.69$

$$A_2 = 0.050 \xi^2 + 0.200 \xi + 0.381$$

$$A_3 = 0.165 \xi^2 - 0.826 \xi + 0.723$$

である。この式は $\xi=0.3\sim 0.5$ の範囲で、 $r=0\sim\infty$ のすべての値に対して適用できる。

図-6 圧縮フランジのねじり剛さと座屈荷重との関係



ξ の代わりに DIN 流に、腹板の引張縁の作用応力 σ_t と圧縮縁の作用応力 σ_c との比 $\psi = \sigma_t / \sigma_c$ を用いて 図-6 の曲線の近似式を作ると、 $\psi = -0.4 \sim -1.0$, $r = 0 \sim \infty$ の範囲に対してつぎようになる。

$$\sqrt{k_{\min}} = A_1 - A_2 / (r + A_3) \dots\dots\dots(10')$$

ただし、 $A_1 = 0.90 \psi^2 - 1.70 \psi + 3.69$

$$A_2 = -0.044 \psi^2 - 0.147 \psi + 0.391$$

$$A_3 = 0.166 \psi^2 + 0.480 \psi + 0.666$$

なお、 $\xi = \psi / (\psi - 1)$ なる関係がある。

したがって式 (10) もしくは (10') を用いることによって、載荷辺単純支持、非載荷辺の1辺が固定、他の1辺が弾性固定されている等方性長方形板が曲げと圧縮を受ける場合の座屈荷重の最小値が簡単かつ高精度で計算できる。

(2) 中立軸の位置の影響

中立軸が下がるにしたがって座屈荷重が減少する。このことは 図 2~6 からわかるが、 $\sqrt{k_{\min}}$ と ξ の関係を示した 図-7 にさらにはっきりと示されている。図には周辺単純支持の場合の曲線を比較のために示しておいた。この図の $r = \infty$ (両辺固定) に対する曲線はつぎのような簡単な式で近似させることができる。

$$0 \leq \xi \leq 0.5 : \sqrt{k_{\min}} = 13.9 \xi^3 + 1.73 \xi + 3.69 \dots\dots\dots(11)$$

$$0.5 \leq \xi \leq 0.75 : \sqrt{k_{\min}} = 74.8 \xi^2 - 68.4 \xi + 21.79 \dots\dots\dots(12)$$

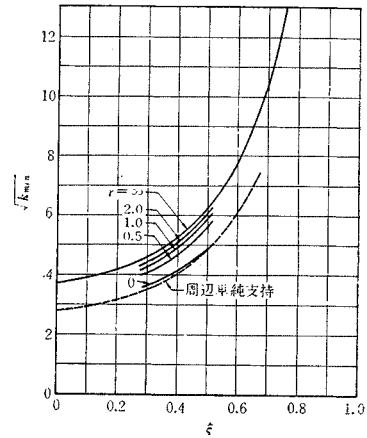
また ξ の代わりに ψ を用いた近似式を作るとつぎのようになる。

$$0 \geq \psi \geq -1 : \sqrt{k_{\min}} = 0.90 \psi^2 - 1.70 \psi + 3.69 \dots\dots\dots(11')$$

$$-1 \geq \psi \geq -3 : \sqrt{k_{\min}} = 3.14(1 - \psi) \dots\dots\dots(12')$$

したがって、2辺単純支持、2辺固定の等方性長方形板が単純支持辺に曲げと圧縮を受ける場合の座屈荷重の最小値は式 (11) もしくは (11') から、曲げと引張を受ける場合については式 (12) もしくは (12') から、それぞれ簡単に計算できる。

図-7 中立軸の位置と座屈荷重との関係



ここで解析に使用した境界条件について検討してみよう。2. で述べたように腹板は引張フランジで固定されていると仮定したが、現実のプレート ガーダーおよび合成桁の腹板は引張フランジによって弾性支持されかつ弾性固定されている。引張フランジの水平曲げ剛さはかなり大きく、しかも引張応力を受けていることから、引張フランジの水平たわみは無視できるであろう。これに対して、腹板の回転は引張フランジのねじり剛性のみによって拘束されているから、回転しないと仮定することには疑問が残るかもしれない。この点に関して、数値計算結果を用いて検討してみよう。

図-7 に示された周辺単純支持の場合(点線)と上辺単純支持、下辺固定の場合($r=0$ の実線)との座屈係数を、 $\xi = 0.3, 0.4, 0.5$ について比較すると表-1 のようになる。表からわかるように、中立軸が腹板重心軸と一致する場合($\xi = 0.5$)には両者はほとんど一致しており、中立軸が下がるにしたがって少しずつ差が生ずる。しかし差が大きい $\xi = 0.3$ の場合でも 11% であり、最小腹板厚に換算すると約 4% にすぎない。すなわち下辺の拘束条件は単純支持あるいは固定のいずれを採用しても、結果に大差のないことが判断される。また 4.(1) で述べたように、圧縮フランジのねじり剛さはそれがきわめて小さい場合にのみ座屈荷重に影響を与える。この傾向は同様に引張フランジのねじり剛さに対してもなりたつと考えられるから、引張フランジのねじり剛さがかなり大きい現実のプレート ガーダーおよび合成桁に対しては、引張フランジによる拘束はほとんど固定と見なしてさしつかえなからう。

表-1 境界条件と座屈係数との比較

ξ	上下辺単純支持	上辺単純支持 下辺固定	$\frac{k_2}{k_1}$
	k_1	k_2	
0.5	23.9	23.9	1.00
0.4	16.4	17.1	1.04
0.3	12.2	13.5	1.11

5. 最小腹板厚に対する考察

以上の結果を用いて, 3. (1)~(4) に述べたプレート ガーダーおよび合成桁に対して, 腹板の曲げ弾性座屈荷重を求め, さらに曲げ座屈を生じないための最小腹板厚を試算してみよう。

(1) 床板による拘束が全く, あるいはほとんど期待できないプレート ガーダー

式 (10) において $\xi=0.5$ とおくとつぎの式が得られる。

$$\sqrt{k} = 6.29 - 0.494/(r+0.351) \dots\dots\dots(13)$$

したがってこの場合の腹板の弾性座屈荷重は, 式 (13) を用いれば任意の圧縮フランジのねじり剛さに対して計算できる。

いま非合成のプレート ガーダーの実橋 35 例について r の値を調べてみると, 最大値 $r_{max} \approx 29$, 最小値 $r_{min} \approx 2$ であるが, 平均値 $r=11.7$ で, 全体の 85% 以上は $r \geq 5$ となり, $r < 5$ は特殊な例と考えられる。図-6 の $\xi=0.5$ の曲線を見ればわかるように, この $r \geq 5$ の範囲では座屈荷重は固定の場合のそれとほとんど差がみとめられない。さらに最小値 $r=2$ を例にとりて考えてみても, 座屈荷重は $k=37.0$ となり, 現行示方書が使用している単純支持の場合 ($k=23.9$) の 1.55 倍におよぶ。

ところで座屈に対する安全率を n , 腹板の圧縮縁の作用応力を σ_c とすると, 弾性曲げ座屈を防ぐための最小腹板厚は式 (9) からつぎのように求められる。

$$\frac{b}{h} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)n\sigma_c}} \sqrt{k} \dots\dots\dots(14)$$

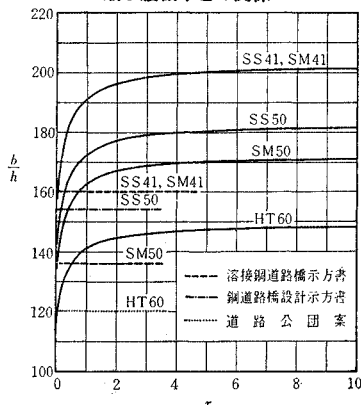
式 (13) を式 (14) に代入し, $n=1.4$, 作用応力を表-2 のように仮定して

表-2 作用 応力

鋼 材	降伏点 (kg/cm ²)	作用応力 (kg/cm ²)
SS 41, SM 41	2300	1300
SS 50	2800	1600
SM 50	3200	1800
HT 60	4600	2400

計算すると, 各鋼材に対する最小腹板厚は図-8 のようになる。実橋ではほとんどが $r \geq 5$

図-8 圧縮フランジのねじり剛さと最小腹板厚との関係



であることを考えると, かなり腹板を薄くできることがわかる。

(2) 圧縮フランジがスラブ止めで床板に固定されている非合成上路プレート ガーダー

腹板の座屈荷重は式 (11) において $\xi=0.5$ とおけば $k=39.6$ となり,

表-3 最小腹板厚

鋼 材	計算値	示方書
SS 41, SM 41	$b/203$	$b/160$
SS 50	$b/183$	$b/154$
SM 50	$b/172$	$b/136$
HT 60	$b/149$	$b/120$

周辺単純支持の場合の 1.66 倍になる。最小腹板厚は (1) の場合と同様に計算すると

表-3 のようになる。

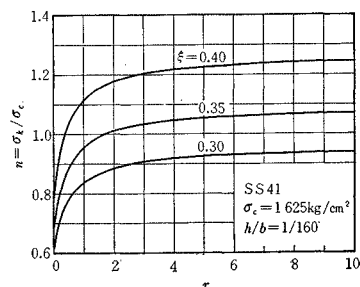
(3) 活荷重合成前のプレート ガーダー (架設時)

鋼桁のみの中立軸の位置と圧縮フランジのねじり剛さ, すなわち ξ, r の値を求めれば, 式 (10) から腹板の座屈荷重が得られる。また (1) の場合と同様にして, 座屈に対する安全率および作用応力を仮定し, 式 (10) を用いれば, 任意の中立軸の位置および圧縮フランジのねじり剛さに対して容易に最小腹板厚を求めることができる。

活荷重合成桁の実橋 21 例について調べた結果, 鋼桁のみの中立軸はかなり低い位置にあり, 平均値 $\xi=0.36$ で, すべて $\xi=0.3 \sim 0.4$ の範囲に含まれていた。また圧縮フランジのねじり剛さは, 平均値 $r=1.5$ で, ほとんどが $r \leq 3.5$, とくに 6 例 (29%) が $r=0.5$ 前後の小さい値を示している。この点から圧縮フランジによる拘束は (1) の場合ほど期待できないと考えられる。また合成前の鋼桁は 25% 割増しされた許容応力に対して設計されるので, 作用応力が 25% 増加していることになる。そのうえ中立軸の低下のために座屈応力が減少していることを考えあわせると, 架設時の活荷重合成桁の腹板はきわめて危険な状態に置かれているといえよう。

たとえば SS 41 を例にとりて割増しされた作用応力 σ_c に対し, $h/b=1/160$ の腹板の座屈応力 σ_b の安全率 n を計算してみると, 図-9 のようになる。圧縮フランジのねじり剛さが小さい場合はもちろんであるが, かなり大きい場合でも中立軸が低いときは 1 パネルの腹板の弾性座屈が生ずる可能性が十分にあることがわかる。

図-9 活荷重合成桁 (架設時) の腹板の曲げ座屈に対する安全率



現行示方書ではこの状態に対する安全率の照査を規定していない。もちろん1パネルの腹板の座屈がそのまま桁の耐荷力に重大な影響を与えないことは、これまでの研究^{5),6),7)}によって明らかにされている。しかし現行の設計法を基準にして論ずれば、1パネルの腹板が弾性座屈するという事は問題になるであろう。

ところで圧縮フランジのねじり剛さおよび中立軸の位置として平均値をとり、 $r=1.5$ 、 $\xi=0.36$ の場合に対して最小腹板厚を計算すると表-4のようになる。ただし安全率は架設時であることを考慮して1.2とし、作用

表-4 最小腹板厚

鋼材	計算値	示方書
SS 41, SM 41	b/147	b/160
SS 50	b/133	b/154
SM 50	b/125	b/136
HT 60	b/108	b/120

用縁応力は25%の割増しを考えた。表からわかるように、座屈を生じないための腹板厚は現行規定より相当厚くなる。しかし、後に述べるように合成後の断面に対しては腹板は相当薄くてもよいので、一時的な架設時応力を対象に腹板を厚くするのは不経済である。むしろstayを設けるなどの措置を講じて、合成断面として許容される範囲で腹板を薄くするほうが得策であろう。

(4) 合成後のプレート ガーダー
合成断面の中立軸の位置すなわち ξ の値がわかれば、腹板の座屈荷重は式(12)から簡単に求めることができる。また、座屈に対する安全率および圧縮縁の作用応力を適当に仮定し、式(12)を式(14)に代入すれば、最小腹板厚を求めるための ξ に関する2次式が得られる。

合成桁の実橋15例について調べた結果では、合成断面の中立軸の位置はかなり高く、平均値 $\xi=0.83$ で、ほとんどが $\xi=0.7\sim 0.9$ の範囲にあり、最も低い例でも $\xi=0.67$ であった。

この最も低い例 $\xi=0.67$ に対して座屈荷重を計算すると $k=89.3$ で、これは単純支持の場合の3.7倍にもなる。また $\xi=0.67$

表-5 最小腹板厚

鋼材	計算値	示方書
SS 41, SM 41	b/305	b/160
SS 50	b/275	b/154
SM 50	b/259	b/136
HT 60	b/225	b/120

に対して最小腹板厚を計算すると表-5のようになり現行規定のおよそ1/2まで薄くすることが可能である。したがって合成桁の場合には、架設時にstayを設けるなど腹板の座屈に対する安全措置を

講じておけば、相当薄い腹板を使用することができる。

6. 理論値と実験値の比較

圧縮フランジが弾性固定されたプレート ガーダーの腹板が曲げを受ける場合の座屈荷重を理論的に解析し、数値計算結果から実用公式を導いたが、ここではこの理論値と若干の実験値とを比較してみよう。

実験値としては、著者らがさきに行なったプレート ガーダー模型実験⁵⁾および関西橋梁鉄骨溶接研究会(第4部会)が実施した模型実験⁷⁾の結果を用いた。前者に使用した模型はスパン6.12m、腹板高0.8mで、2点載荷によって純曲げを与えた。模型桁中央の、鉛直補剛材を有する腹板3パネル(3×0.56m)を試験対象区間とし、腹板、上下フランジのたわみおよびひずみなどを測定した。1パネルの腹板の座屈荷重は、荷重一桁のたわみ、荷重一桁の曲げひずみ、あるいは荷重一腹板の水平たわみなどの曲線の変向点から推定した。

これに対して後者の実験では、スパン10m、腹板高1.2mのプレート ガーダー模型を腹板厚と鋼材を変えて3本製作し、2点載荷によって純曲げを与えている。試験対象区間は、鉛直補剛材にはさまれた1パネル(1.2m)のみである。腹板の座屈荷重は前者と同様に曲線の変向点から著者が推定した。

この2つの実験から得られる腹板の座屈荷重の推定値と、模型桁の断面に対して式(13)から計算した理論値とを比較すると表-6のようになる。表には、周辺単純支持および上下辺固定と考えた場合の理論値を比較のため示しておいた。実験値は周辺単純支持の場合の理論値よりかなり大きく、上下辺固定の場合にやや近いが、圧縮フランジのねじり剛さを考慮した著者の計算値に最も近い値を示しており、圧縮フランジのねじり剛さを十分に期待できることがわかる。また $h=b/250$ 程度の腹板厚で使用に耐え、さらに後座屈強度も十分期待できることが実験結果^{5),7)}から判明している。

7. むすび

溶接プレート ガーダーおよび合成桁の腹板の曲げ弾性座屈を、圧縮フランジによる拘束および断面中立軸の位置の影響を考慮に入れて理論的に解析した。さらに数値計算を行ない、実用公式を提案し、最後に実験値と比較考察した。その結果をまとめるとつぎのようである。

表-6 座屈荷重の計算と実験値の比較

番号	腹板鋼材	$\frac{a}{b}$	$\frac{h}{b}$	r	計算値 (著者) k_{lh}	推定値 k_{ex}	周辺単純 支持 k_s	上下辺 固定 k_c	$\frac{k_{ex}}{k_{lh}}$	実験者
1	SS 41	0.7	1/250	2.275	37.2	36.4	24.0	43.1	0.98	著者
2	SS 41	0.7	1/250	3.369	37.9	35.9	24.0	43.1	0.95	" (未発表)
3	SS 41	1.0	1/267	5.325	38.5	38.6	25.6	39.7	1.00	研究会
4	HT 60	1.0	1/267	5.325	38.5	44.7	25.6	39.7	1.16	"
5	HT 60	1.0	1/200	2.246	37.2	34.0	25.6	39.7	0.91	"

(1) 腹板の曲げ弾性座屈荷重の理論式を、圧縮フランジのねじり剛さおよび断面中立軸の位置を考慮して誘導した。

(2) 数値計算を行なって、圧縮フランジのねじり剛さおよび中立軸の位置を種々変化させた場合の座屈荷重曲線を求めた。

(3) 座屈荷重に対する圧縮フランジのねじり剛さおよび断面中立軸の位置の影響を明らかにした。

(4) 圧縮フランジのねじり剛さおよび中立軸の位置を考慮した座屈荷重の最小値が簡単に計算できる実用公式を作製した。

(5) プレート ガーダーおよび合成桁の腹板に対して、実用公式を適用して最小座屈荷重を求めた。

また、プレート ガーダーおよび合成桁の腹板に対して、圧縮フランジによる拘束および断面中立軸の位置を考慮に入れた場合の合理的な最小板厚を、実用公式を用いて試算し、現行示方書の規定と比較検討した。その結果はつぎのようである。

(6) 床板による拘束が全く、あるいはほとんど期待できないようなプレート ガーダーにおいても、現行示方書の規定よりかなり薄い腹板の使用が可能である。

(7) 圧縮フランジがスラブ止めで床板に固定されている非合成プレート ガーダーにおいては、現行のおよそ $5/6 \sim 4/5$ 程度まで薄くできる。

(8) 活荷重合成桁の腹板は架設時においてきわめて危険な状態におかれており、曲げ座屈に対する照査を行なう必要がある。

(9) 合成桁の腹板は現行のおよそ $1/2$ 程度にまで薄くすることが可能である。

(10) 理論値と若干の実験値との比較を行なったが、

両者は 10% 程度の差で一致し、満足すべきものと考えられる。

以上の研究の結果では、圧縮フランジの拘束を考慮に入れることによって相当薄い腹板の使用が可能となる。このことはとくに高張力鋼の使用を考えると有意義なことと思われる。もちろんむやみに腹板を薄くすることを合理的な設計と考えるわけではないが、著者らの行なった研究結果の程度までは腹板を薄くすることが可能であり、かつその程度の腹板厚でも十分に後座屈強度が期待できることが実験結果からも判断される。さらに曲げとせん断が同時に作用した場合、残留応力の影響など理論的実験的検討を加えなければならない点もあるが、この研究によって単純桁のプレート ガーダーおよび合成桁の腹板厚の設計法として、合理的かつ経済的な方向に一歩前進したものとする次第である。

参 考 文 献

- 1) Timoshenko, S. and Gere, J.: "Theory of Elastic Stability", 2nd ed., McGraw-Hill, 1961.
- 2) Bleich, F.: "Buckling Strength of Metal Structures", McGraw-Hill, 1952.
- 3) Klöppel, K. und Scheer, J.: "Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten", Wilhelm Ernst & Sohn, 1960.
- 4) 米沢 博・三上市蔵: 箱桁の弾性座屈について, 土木学会論文集, 第120号, 8月, 1965, pp. 8~13.
- 5) 小西一郎・米沢 博・三上市蔵: プレート ガーダーの曲げ弾性座屈, 土木学会論文集, 第143号, 7月, 1967, pp. 1~8.
- 6) Basler, K. and Thürlimann, B.: "Strength of Plate Girders in Bending", Proc. of A.S.C.E., Vol. 87, No. ST 6, August, 1961, pp. 153~181.
- 7) 関西橋梁鉄骨溶接研究会: プレート ガーダーの耐荷力に関する理論と実験, 7月, 1965, pp. 60~118.

(1967.6.30・受付)