

プレートガーダー斜め補剛腹板の座屈*

BUCKLING OF PLATE GIRDER WEBS WITH DIAGONAL STIFFENER

三上市蔵**・松下貞義***・中原久***・米沢博****
By Ichizou Mikami, Sadayoshi Matsushita, Hisashi Nakahara and Hiroshi Yonezawa

1. まえがき

設計技術の向上や鋼材および溶接技術の進歩に伴って、鋼構造物はますます軽量化と大型化の方向をたどり、その目的にかなうものとして薄板構造が多用されるようになった。その場合、高張力鋼の有効かつ積極的な使用が望まれるが、座屈の問題が障害になることがしばしば生ずる。

プレートガーダーの腹板を対象に考えると、現在慣用されている設計法における腹板の座屈強度は、鉛直補剛材と上下フランジまたは水平補剛材によって囲まれた1パネルの局部座屈に基準をとっている。腹板の補剛形式としておもに研究されているのは、鉛直補剛材を単独に用いるか、あるいは水平補剛材と一緒に用いる場合についてである。補剛形式としてここにもう一つ考えられるのは鉛直補剛材間の腹板を斜め方向に補剛する方法である。この方法は単純桁あるいは連続桁の支点付近などで、せん断力の大きいところまたはせん断力と曲げモーメントがともに大きいところに採用するととくに有効であると考えられる。

斜め補剛板の圧縮座屈、せん断座屈および圧縮とせん断の合成座屈などについての理論的研究^{1), 2), 3), 4), 5)}は若干なされているが、曲げ座屈および曲げとせん断の合成座屈についてはみあたらぬようである。また実験的研究はせん断座屈⁵⁾を除いてなされていないようである。

この論文では、斜め補剛板の弹性座屈を理論的ならびに実験的に考察する。まず、斜め補剛板の曲げ座屈および曲げせん断座屈を階差法を用いて理論的に解析し、若干の数値計算を行ない、その結果を用いて斜め補剛の効

果を研究する。次にプレートガーダー模型によって純曲げおよび曲げせん断の組合せに対する斜め補剛腹板の弹性座屈実験を行ない、実験結果および理論結果に対して比較考察を加える。

2. 斜め補剛長方形板の座屈荷重

図-1に示すように、斜め圧縮方向に補剛された長さ a 、幅 b （縦横比 $\alpha=a/b$ ）の長方形板に曲げとせん断が同時に作用する場合を考える。この平板が座屈したときのたわみ曲面の微分方程式は次のようになる⁶⁾。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{t}{D} \left[\sigma \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \tau \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \dots (1)$$

ただし $D=Et^3/12(1-\nu^2)$ であり、 t は板厚、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 σ は引張縁応力、 τ はせん断応力である。

平板は周辺で単純支持されているものとする。斜め補剛材についてはそのねじり剛さ、板に直角方向のたわみおよび補剛材の長さ方向に作用する軸力などは無視する。すなわち、腹板は斜め補剛材によって単純支持されていると仮定する。

長方形板の2辺 a, b をそれぞれ n 等分して、間隔が $a/n, b/n$ である格子を考える。図-2に示すような格点

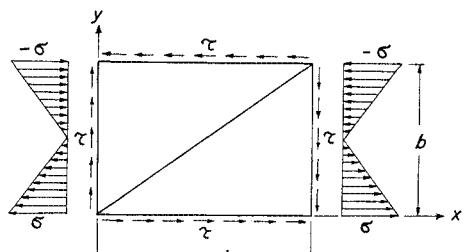


図-1 曲げとせん断を受ける斜め補剛板

* 昭和45年度土木学会関西支部年次学術講演会にて一部発表

** 正会員 関西大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 石川島播磨重工業(株) 鉄構事業部

**** 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

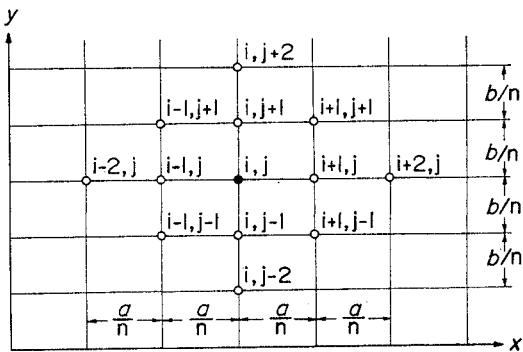


図-2 格子と格点記号

記号を用い、式(1)を階差方程式で表わすと次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & w_{i-2,j} + 2\alpha^2 w_{i-1,j-1} - 4(1+\alpha^2)w_{i-1,j} + 2\alpha^2 w_{i-1,j+1} \\
 & + \alpha^4 w_{i,j-2} - 4\alpha^2(1+\alpha^2)w_{i,j-1} + 2(3+4\alpha^2 \\
 & + 3\alpha^4)w_{i,j} - 4\alpha^2(1+\alpha^2)w_{i,j+1} + \alpha^4 w_{i,j+2} \\
 & + 2\alpha^2 w_{i+1,j-1} - 4(1+\alpha^2)w_{i+1,j} + 2\alpha^2 w_{i+1,j+1} \\
 & + w_{i+2,j} = k_o \frac{\pi^2 \alpha^2}{n^2} \left(1 - \frac{2j}{n}\right) (w_{i-1,j} - 2w_{i,j} \\
 & + w_{i+1,j}) - k_r \frac{\pi^2 \alpha^3}{2n^2} (w_{i-1,j-1} - w_{i-1,j+1} \\
 & - w_{i+1,j-1} + w_{i+1,j+1}) \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

ただし、 k_o 、 k_r は曲げとせん断が同時に作用する場合の座屈係数で、板の材料と寸法のみによって定まる基本座屈応力 $\sigma_e = \pi^2 D/b^2 t$ を用いて次のように表わされる。

$$\sigma = k_o \sigma_e, \tau = k_r \sigma_e \dots \dots \dots (3)$$

曲げおよびせん断がそれぞれ単独に作用する場合の座屈係数は*印をつけて k_o^* および k_r^* と表わし区別することにする。

周辺上の点および斜め補剛材上の点を除いた各格点について式(2)を適用し、境界条件を考慮して $(n-1)(n-2)$ 個の階差式が得られる。これをマトリックス表示すると次のようになる。

$$[S] \{w\} = k_o [F_o] \{w\} - k_r [F_r] \{w\} \dots \dots \dots (4)$$

任意の $\sigma/\tau = k_o/k_r$ の値に対して式(4)を解いて正の最小固有値 k_o または k_r を求めれば座屈応力 σ および τ が得られる。

数値計算には、京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を用いた。固有値の計算法としては最小固有値に収束させる反復法⁷⁾を用い、J.H. Wilkinson の収束を加速する方法⁸⁾を応用して固有値を座標変換し、正の最小固有値が第1根として求まるようにした。

数値計算結果を以下に示す。純曲げが作用する場合の座屈係数 k_o^* を種々の縦横比 α の値に対して分割数 $n=10$ で計算した結果を図-3 に実線で示す。また純せん断座屈係数 k_r^* を $n=16$ で計算した結果を図-4 に

実線で示す。これらの図には斜め補剛材の影響を明らかにするため、補剛しない場合と、鉛直補剛材を入れて 2 パネルに分割した場合について座屈係数 k_o^* ⁶⁾ および k_r^* の値⁹⁾がそれぞれ破線および一点鎖線で記入されている。また図-4 には分割数の影響を調べるため $n=10$ に対して計算した結果が細線で併記されている。

次に曲げとせん断が同時に作用し、かつ $\alpha=1.0$ の場合について、種々の σ/τ の値に対して $n=10$ で座屈係数 k_o および k_r を計算した結果を図-5 に示す。この結果を純曲げ座屈係数 k_o^* および純せん断座屈係数 k_r^* との比で表わしたのが図-6 である。

数値計算結果として得られた図-3~6 をもとにしても、斜め補剛の効果を検討してみよう。曲げ座屈(図-3)の場合、 $\alpha=0.4 \sim 1.6$ の範囲で、斜め補剛を施すことによって、無補剛の場合の 1.1~1.4 倍に座屈応力を向上させることができる。特に $\alpha=0.6 \sim 0.8$ の範囲では効果は大きい。しかし鉛直補剛の場合に比べて斜め補剛が有

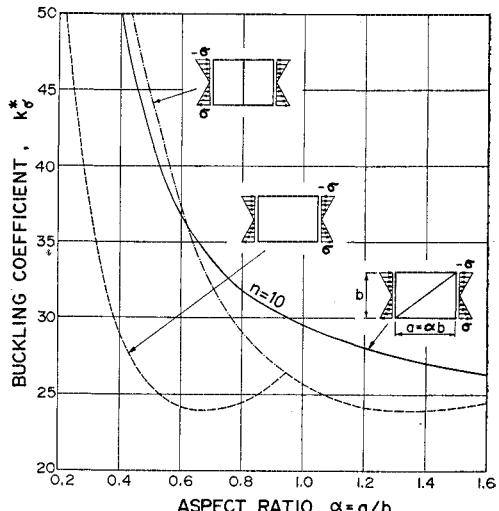


図-3 斜め補剛板の純曲げ座屈係数

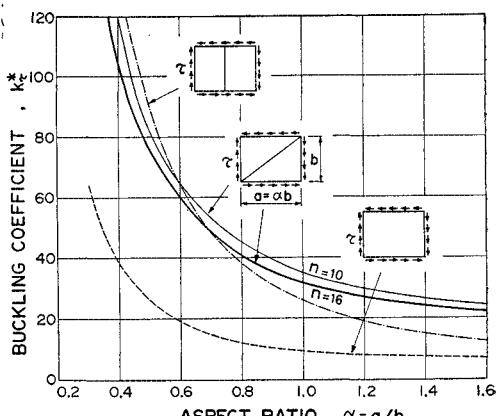


図-4 斜め補剛板の純せん断座屈係数

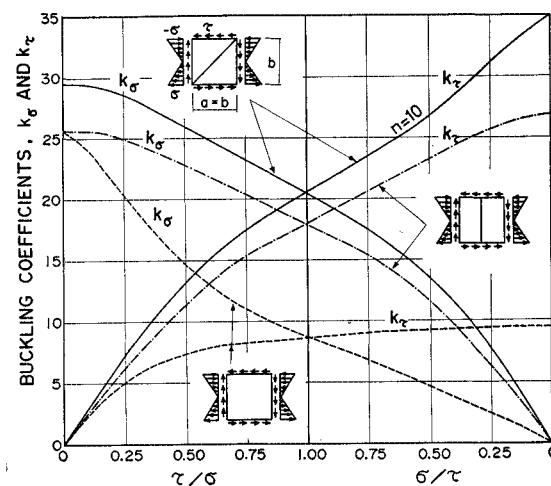


図-5 曲げとせん断を受ける斜め補剛板($\alpha=1.0$)の座屈係数
利なのは $\alpha>0.6$ の範囲である。

無補剛長方形板の曲げ座屈係数(図-3の破線)に対して DIN 4114 は次の近似式を与えている。

$$\left. \begin{array}{l} \alpha < 2/3 : k_{\sigma}^* = 15.87 + 1.87/\alpha^2 + 8.6 \alpha^2 \\ \alpha \geq 2/3 : k_{\sigma}^* = 23.9 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

斜め補剛板の曲げ座屈係数(図-3の実線)について類似の近似式を導くと次のようになる。

$$k_{\sigma}^* = 22.5 + 4.23/\alpha + 2.75/\alpha^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

せん断座屈(図-4)の場合について同様に $\alpha=0.4 \sim 1.6$ の範囲で調べると、斜め圧縮方向に補剛することによって、座屈応力は無補剛の場合の3~4倍に向上し、とくに $\alpha=0.8 \sim 1.0$ の範囲で斜め補剛の効果が大である。鉛直補剛の場合と比較して斜め補剛が有効なのは $\alpha>0.6$ の範囲で、最大2倍の座屈応力が得られる。しかし通常よく使用される $\alpha<1.0$ の範囲では1.3倍以下である。

無補剛長方形板のせん断座屈係数(図-4の破線)に対して F. Bleich¹⁰⁾ は近似式

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \leq 1 : k_{\tau}^* = 4.00 + 5.34/\alpha^2 \\ \alpha \geq 1 : k_{\tau}^* = 5.34 + 4.00/\alpha^2 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

を与えているが、斜め補剛板の場合(図-4の実線)について同様の近似式を導くと次のようになる。

$$k_{\tau}^* = 11.9 + 10.1/\alpha + 10.9/\alpha^2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

曲げせん断座屈(図-5)の場合について $\alpha=1$ を例にとって調べると、斜め補剛を施すことによって座屈応力は無補剛の場合の1.5~3.7倍に向上し、せん断応力 τ が増加するほど斜め補剛の効果が増大する。また $\alpha=1$ の場合、曲げ座屈およびせん断座屈のいずれの場合も鉛直補剛形式に比べ斜め補剛形式の方が有利であるが、この傾向は σ と τ の割合にはほとんど無関係で、両形式

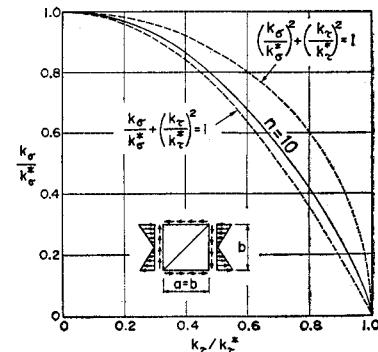


図-6 曲げとせん断を受ける斜め補剛板($\alpha=1.0$)の相関曲線

の座屈応力の比はほぼ一定である。

無補剛長方形板に曲げと同時にせん断が作用する場合、曲げが単独に作用する場合の座屈応力に比べ、せん断力が増加するとともに座屈応力は減少する¹⁰⁾が、斜め補剛板の場合も同様の傾向があることが図-5からわかる。

無補剛長方形板が曲げとせん断の組合せ応力を受ける場合の座屈係数 k_{σ} と k_{τ} の相関関係は円曲線

$$\left(\frac{k_{\sigma}}{k_{\sigma}^*} \right)^2 + \left(\frac{k_{\tau}}{k_{\tau}^*} \right)^2 = 1 \quad \dots \dots \dots (9)$$

によって近似的に表わすことができる¹⁰⁾。斜め補剛板の場合、座屈係数 k_{σ} と k_{τ} の相関関係は式(9)よりも放物線式

$$\frac{k_{\sigma}}{k_{\sigma}^*} + \left(\frac{k_{\tau}}{k_{\tau}^*} \right)^2 = 1 \quad \dots \dots \dots (10)$$

によってより近似的に表わせることが図-6からわかる。

ここで階差法を適用する際の分割数 n と解の収束の関係を検討してみる。 $\alpha=1$ の場合について分割数を変え

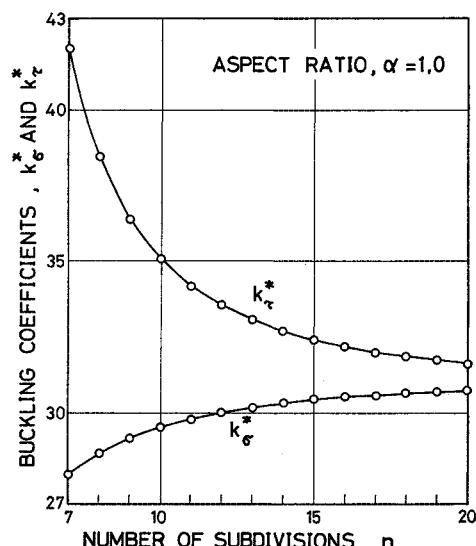


図-7 階差法の分割数と座屈係数の関係

て曲げ座屈係数 k_o^* とせん断座屈係数 k_r^* を計算したところ図-7 のようになった。 $n=20$ でほぼ収束しているとみなしてよいだろう。分割が少ないと、曲げの場合は小さ目の値が、せん断の場合は大き目の値が得られる。曲げの場合は収束が早く、 $n=10$ で誤差は 4% 以下になるが、せん断の場合は収束が遅く、4% 以下の誤差におさめるためには少なくとも $n=14$ とする必要がある。また図-4 から収束はあまり縦横比 α に影響されないことがわかる。

次に曲げせん断の場合について $\alpha=1.0$, $n=8$ として k_o/k_o^* と k_r/k_r^* の相関曲線を計算したが、その結果は図-6 に示されている放物線式とほとんど一致した。この結果を $n=10$ に対する計算結果と比較すると次のことがわかる。まず n が小さいと小さ目の値が得られる。 $\sigma > \tau$ の場合には k_o/k_o^* の誤差は k_r^* の誤差より小さく、逆に $\tau > \sigma$ の場合には k_r/k_r^* の誤差は k_o^* の誤差より小さい。したがって曲げとせん断が共存している場合には k_o/k_o^* や k_r/k_r^* を用いれば、曲げまたはせん断が単独に作用している場合より少ない分割で精度のよい値を求めることができる。

なお、ここではせん断に対して斜め圧縮方向に補剛する場合を考えているが、斜め引張方向に補剛することによっても座屈応力を向上させることができる。曲げ座屈に対してはどの方向に補剛しても同じ座屈応力が得られる。しかしせん断座屈に対しては斜め引張方向補剛の場合、 $\alpha=1.0$ に対して $k_r^*=11.4^{11}$ で、無補剛の場合の $11.4/9.34=1.22$ 倍にすぎない。したがって腹板の局部弹性座屈**を考えている限りでは斜め圧縮方向に補剛するほうが圧倒的に有利である。

3. 斜め補剛プレートガーダーの座屈実験

実験桁として SS 41 材による全溶接プレートガーダー模型

** 座屈後や張力場の発生後に対してはいずれが有利か興味ある問題ではあるが、現在のところいずれが有利か不明である。

2 本を製作し、1 本（実験桁 A）を純曲げに対する座屈実験に、ほかの 1 本（実験桁 B）を曲げとせん断の組合せに対する座屈実験にそれぞれ供した。実験は弾性領域で行なった。

(1) プレートガーダー模型

実験桁 A および B の寸法を図-8, 9 にそれぞれ示す。座屈実験の対象としたのは実験桁 A では中央の 2 パネル、実験桁 B では片側 3 パネルのうち中央よりの 2 パネルである。腹板厚は両桁とも 3.2 mm で、これは実験桁 A では腹板高の 1/188、実験桁 B では 1/219 に相当する。実験対象パネルの腹板の縦横比 α は実験桁 A ではパネル 1 が $\alpha=1.2$ 、パネル 2 が $\alpha=1.0$ 、実験桁 B ではパネル 1, パネル 2 とも $\alpha=1.0$ である。

斜め補剛材は両桁とも 70 mm × 6 mm の断面を採用し

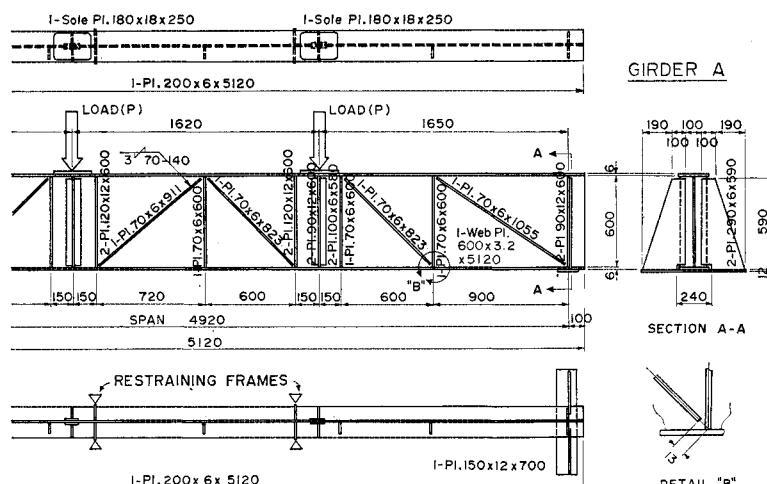


図-8 実験桁 A の寸法

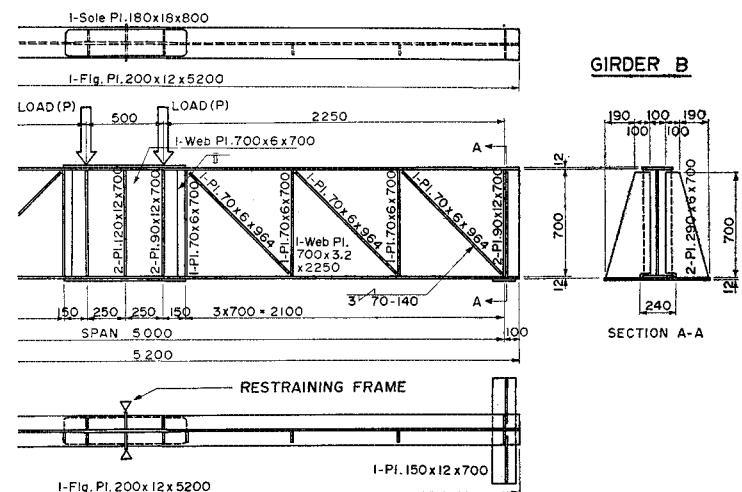


図-9 実験桁 B の寸法

た。これは、斜め補剛材の位置では腹板の水平たわみは生じないという仮定で理論解を求めたので、その仮定を満足するように斜め補剛材に十分な剛度をもたせるよう考えた結果である。斜め補剛材は片側にのみとりつけ、腹板とは千鳥溶接として溶接長を減らし、残留応力を極力おさえた。また図-8の詳細図に示すように、斜め補剛材の両端はフランジおよび鉛直補剛材と溶接せず、溶接の集中に基づく悪影響を避けた。

フランジ、鉛直補剛材および試験対象外のパネルに対しては、フランジの座屈、鉛直補剛材の座屈、腹板の曲げあるいはせん断座屈など実験対象外の座屈が生じないよう各寸法を決定した。

(2) 載荷装置

載荷装置には関西大学土木工学教室の構造物試験機を使用した(写真-1)。図-8, 9に示すように2点で載荷したが、30tおよび10t油圧ジャッキ各1個を同時に使用し、載荷用のはり(写真-2)を介して2点に等荷重が作用するようにした。電子管自動平衡式計力機(島津製作所REH-10型)に電子管式自動負荷制御装置(島津製作所)を併用して、計測中は荷重が一定となるようにした。また桁全体の横倒れを防止するため、十分強固な横倒れ防止わく(写真-2)を、実験桁Aに対しては2個所に、実験桁Bに対しては1個所に設置するとともに、実験桁の支点上にウィングを取りつけた。

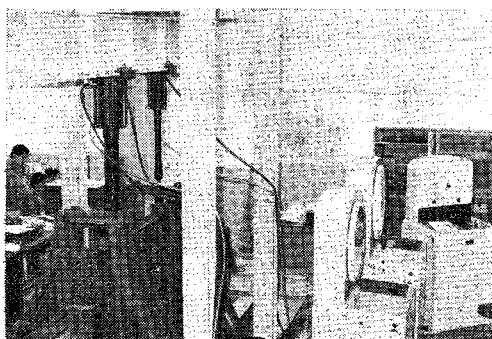


写真-1 載荷装置



写真-2 横倒れ防止わくと載荷用のはり

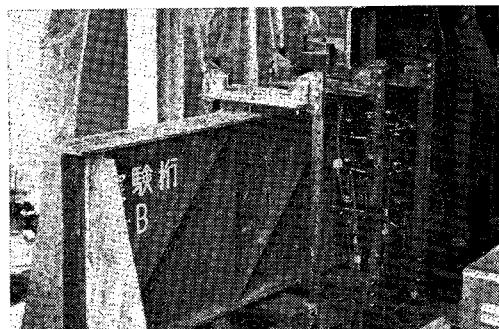


写真-3 ダイヤルゲージ取付けわく

(3) 測定装置その他

桁の鉛直たわみとしてダイヤルゲージで下フランジのたわみを測定した。試験パネルの腹板および斜め補剛材の水平たわみは、上下フランジに支点をもつダイヤルゲージ取付けわくに設置したダイヤルゲージによって測定した(写真-3)。試験パネルの腹板、上下フランジ、鉛直補剛材および斜め補剛材のひずみを単軸型および三軸ロゼット型電気抵抗線ひずみ計(東京測器・塑性域用YL-10型およびYRS-10型)を用いて測定した。腹板については桁全体の曲げによるひずみと座屈による曲げひずみとを算出できるようにその両面にひずみ計を貼付した。

4. 測定結果

かなり多数の点について測定したが、代表的な点の測定結果だけを示すことにする。以下の図の荷重 $2P$ は、ジャッキによる荷重値と実験桁、載荷ばり、ダイヤルゲージ取付けわくなどの重量を $2P$ に換算した値(実験桁Aでは0.6t、実験桁Bでは0.8t)とを加えたものを用いてある。また上フランジ、腹板などのひずみは、桁全

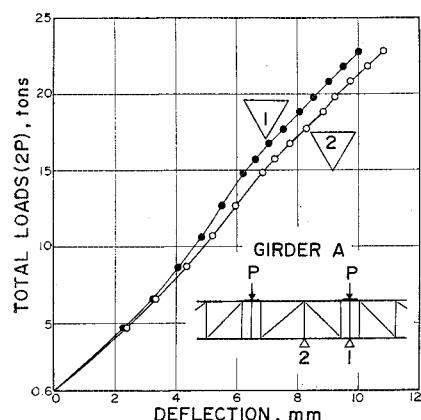


図-10 桁のたわみ(実験桁A)

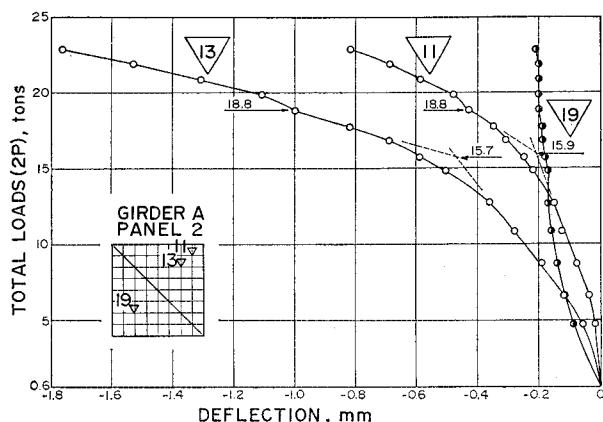


図-11 腹板の水平たわみ（実験桁A）

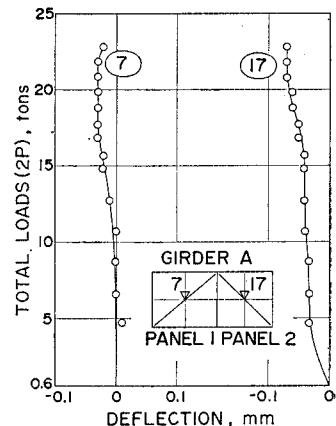


図-14 斜め補剛材の水平たわみ（実験桁A）

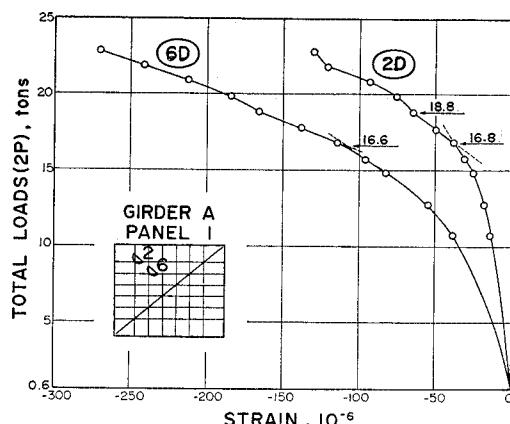


図-12 腹板の座屈による曲げひずみ（実験桁A）

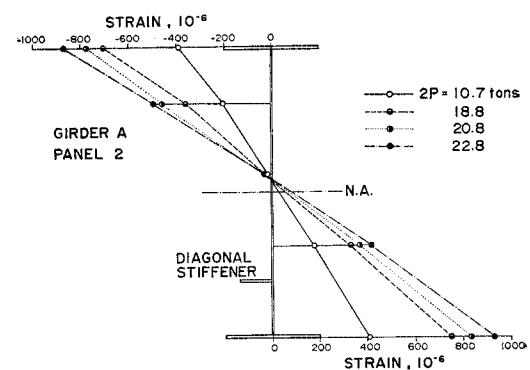


図-15 桁の曲げひずみ分布（実験桁A）

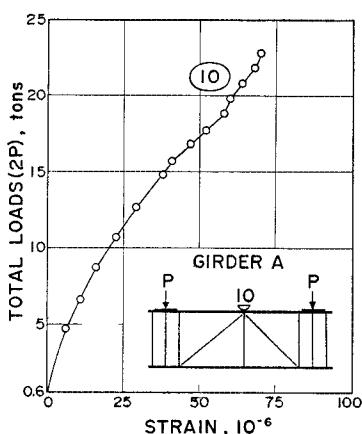


図-13 上フランジの水平曲げによるひずみ（実験桁A）

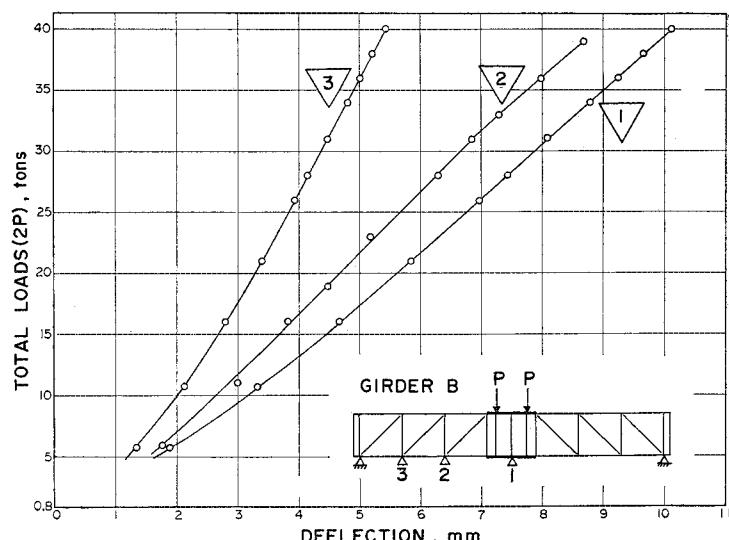


図-16 桁のたわみ（実験桁B）

体の曲げによるひずみと、腹板の初期たわみや座屈による水平方向へのたわみから生ずるひずみとを分離して記入した。図-12, 18 中の記号 D , V は三軸ロゼット型電気抵抗線ひずみ計によって測定された斜め補剛材と逆の斜め方向および鉛直方向のひずみを示す。

なお、実験桁を載荷装置に設置したのち、試験パネルの腹板の初期たわみを測定したが、最大初期たわみは実験桁Aで 2.0 mm, 実験桁Bで 4.5 mm であった。

(1) 実験桁 A

純曲げに対する実験桁Aの種々の測定値を示すと次のようである。すなわち桁の鉛直たわみを図-10 に、腹板

の水平たわみを図-11 に、腹板の座屈による曲げひずみを図-12 にそれぞれ示す。上フランジの水平曲げによるひずみを図-13 に、斜め補剛材の水平たわみを図-14 に示す。またパネル2における桁の曲げひずみ分布を示すと図-15 のようになる。

(2) 実験桁 B

曲げとせん断を同時に受ける場合の実験桁Bの測定結果は次のようになる。桁の鉛直たわみを図-16 に、腹板の水平たわみを図-17 に、腹板の座屈による曲げひずみを図-18 にそれぞれ示す。上フランジの水平曲げによるひずみを図-19 に、斜め補剛材の水平たわみを図-20 に示す。パネル1における桁の曲げひずみ分布

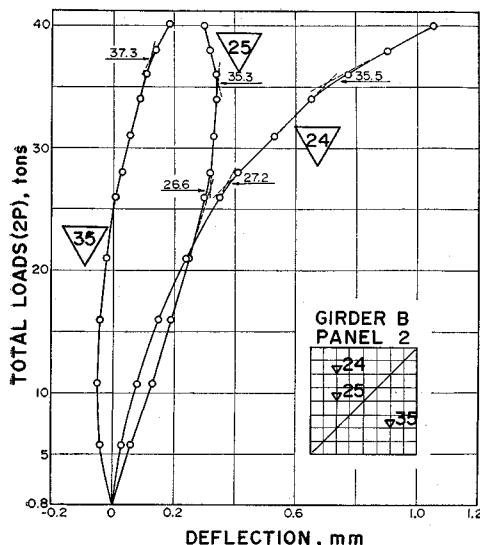


図-17 腹板の水平たわみ（実験桁B）

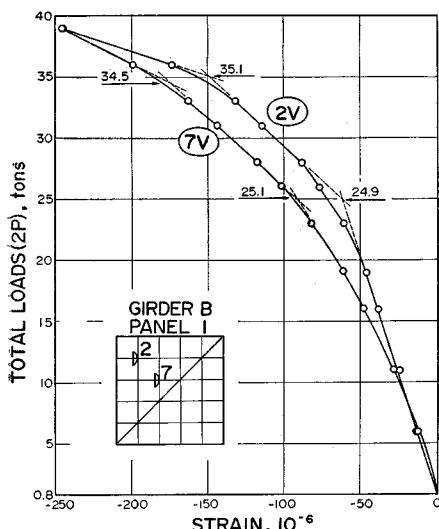


図-18 腹板の座屈による曲げひずみ（実験桁B）

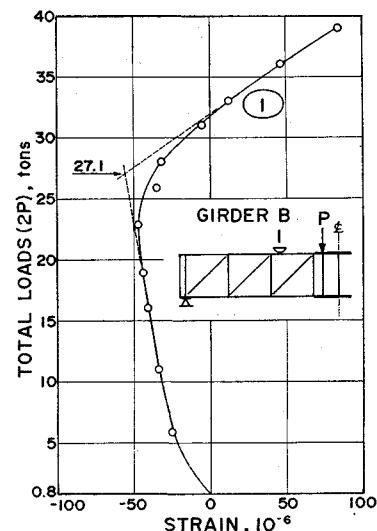


図-19 上フランジの水平曲げによるひずみ（実験桁B）

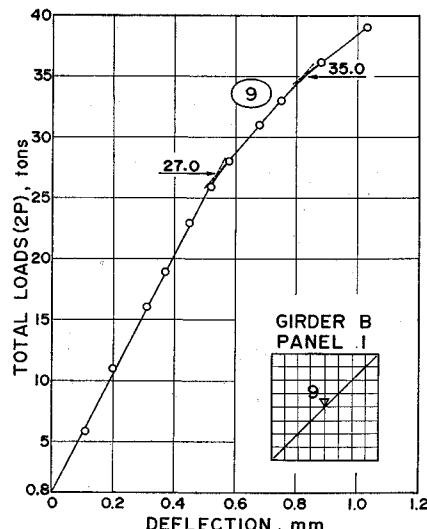


図-20 斜め補剛材の水平たわみ（実験桁B）

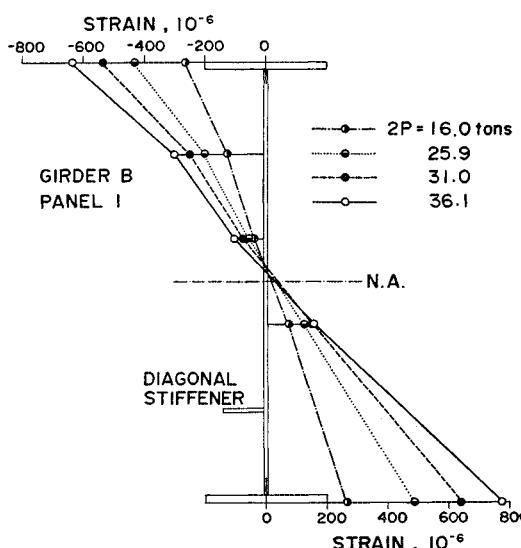


図-21 桁の曲げひずみ分布（実験桁B）

を示すと図-21 のようになる。

5. 実験結果に対する考察

実験結果について諸考察を加えるまえに、各実験桁の座屈荷重の理論値を求めてみよう。すなわち実験桁Aの腹板について、その寸法を用いて基本座屈応力を計算すると $\sigma_e = \pi^2 D/b^2 t = 54.0 \text{ kg/cm}^2$ となる。座屈係数は図-3 からパネル1 ($\alpha=1.2$) に対して $k_o=28.0$ 、パネル2 ($\alpha=1.0$) に対して $k_o=29.5$ となるから、座屈荷重は各パネルに対して表-1 のように求まる。

また実験桁Bの腹板については $\sigma_e=39.7 \text{ kg/cm}^2$ となる。ところで理論解析においては各パネル ($\alpha=1.0$) は長さ方向について曲げ応力が一定と仮定しているが、実験桁においては長さ方向に曲げモーメントが変化している。そこで理論解析の際に得られた座屈波形を調べ、最大たわみの得られる断面（各パネルの支点に近い側から $a/4$ 点）の曲げモーメントがパネル全長に一定に分布しているものとした。

計算は $n=10$ に対する結果を用いて行なう。パネル1については作用応力の比は $\tau/\sigma=k_r/k_o=0.5666$ となる。図-3, 4 から $k_o*=29.5$, $k_r*=35.1$ となるから (k_r

表-1 座屈荷重の理論値と実験値

実験桁	パネル	理論値 $2P_{th}$ (t)	実験値 (t)		$\frac{2P_{ex}}{2P_{th}}$
			変向点の範囲	平均値 $2P_{ex}$	
A	1	17.0	15.3~16.9	16.1	0.95
	2	17.9	17.4~19.8	18.8	1.05
B	1	25.4	26.4~29.8	27.4	1.08
	2	36.8	34.5~38.0	36.4	0.99

$/k_r*)/(k_o/k_o*)=0.5666 k_o*/k_r*=0.476$ 。この比を与える値 $k_o/k_o*=0.885$, $k_r/k_r*=0.407$ が図-6 から求まるから、座屈係数は $k_o=25.2$, $k_r=14.3$ となる。したがって座屈荷重は $2P=25.4 \text{ t}$ となる。同様にパネル2に対して計算すると $\sigma_e=0.9805$, $(k_o/k_o*)(/k_r/k_r*)=1.167$, $k_o/k_o*=0.689$, $k_r/k_r*=0.591$, $k_o=20.3$, $k_r=20.7$ となり, $2P=36.8 \text{ t}$ となる。

実験桁に対するこれらの理論値を参考にして測定値に対する考察を行なってみよう。図-11, 12 および図-17, 18 などからわかるように、腹板部分にはっきりした座屈現象は現われていない。これは初期たわみが存在したためと考えられる。そこでRockey¹¹⁾が行なったと同様に実験結果として得られた荷重-たわみ曲線および荷重-ひずみ曲線の変向点から座屈荷重を推定した。推定の変向点および座屈荷重は図中に記入してある。これらの図に示された荷重-たわみおよびひずみ曲線の中には当該パネルの座屈を示す変向点のほかに、隣接パネルの座屈の影響を示すと思われる変向点が表われている曲線もある。

ここに示した代表的な荷重-たわみ曲線および荷重-ひずみ曲線をはじめ、実験結果として得られたすべての曲線**から推定した座屈荷重をまとめると表-1 のようになる。

(1) 実験桁A（曲げ座屈）

図-12 などからわかるように、パネル1についての荷重-たわみおよびひずみ曲線には $2P=15.3 \sim 16.9 \text{ t}$ の付近に変向点がある。大部分の曲線においては平均値の $2P=16.1 \text{ t}$ 付近に変向点が存在し、座屈荷重は $2P=16.1 \text{ t}$ と推定できる。この値は理論値 $2P=17.0 \text{ t}$ に比べてやや低い。

パネル2についての荷重-たわみおよびひずみ曲線の変向点は $2P=17.4 \sim 19.8 \text{ t}$ にあり（図-11），その平均値は $2P=18.8 \text{ t}$ で、理論座屈荷重 $2P=17.9 \text{ t}$ に比べてやや高い。

上フランジの水平たわみは測定していないが、フランジ面内の水平曲げによって生じたひずみはきわめて小さい（図-13）から、上フランジは十分剛に腹板を支持していると考えられる。また斜め補剛材の水平たわみはほとんど生じていない（図-14）。したがって理論解析にあたって採用した、周辺および斜め補剛材の位置で水平たわみは生じないという仮定は妥当なものとみなせるであろう。

荷重-桁のたわみ曲線（図-10）には変向点と思われる

** 実験桁Aに対しては荷重-たわみ曲線が21、荷重-ひずみ曲線が58、計79の曲線、実験桁Bに対しては荷重-たわみ曲線が39、荷重-ひずみ曲線が114、計153の曲線がそれぞれ得られた。

変化はあるが微小であり、腹板の 1 パネルとしての局部弾性座屈は桁全体の耐荷力にほとんど影響を与えていないことがわかる。また桁の曲げひずみ分布（図-15）はほぼ直線分布をしており、腹板の座屈後もあまり変化はみられない。上下フランジ、鉛直補剛材および斜め補剛材はいずれも腹板部分の座屈の影響をほとんど受けておらず、十分に後座屈強度が期待できるものと考えられる。

（2）実験桁B（曲げせん断座屈）

パネル 1 の荷重-たわみおよびひずみ曲線（図-18）には $2P=26.4\sim29.8$ t の範囲に変向点がみられる。それらの平均をとると $2P=27.4$ t で、これを座屈荷重とみなすと理論値 $2P=25.4$ t より高めにでている。

パネル 2 のたわみおよびひずみはジャッキの最大容量の $2P=40$ t までしか計測しなかった。このため変向点を推定するうえに必要な、荷重-たわみ およびひずみ曲線の座屈後の部分が不十分なきらいがある。そこで曲線のなかで変向点が比較的明瞭に表われていると思われるもの（図-17）を選んで座屈荷重を推定した。変向点は $2P=34.5\sim38.0$ t 付近にみられ、その平均値は $2P=36.4$ t である。これは理論座屈荷重 $2P=36.8$ t とほぼ一致している。

上フランジ面内の曲げによるひずみの対荷重曲線（図-19）にはパネル 1 の腹板の座屈による影響と考えられる変向点が表われているが、ひずみの量は実験桁 A の場合（図-13）と同様に小さい。しかし斜め補剛材の水平たわみ（図-20）は当然の結果ではあるが、純曲げの場合（図-14）より大きく、その必要剛度に関しては今後理論的にも検討を加える必要があろう。

上下フランジ、斜め補剛材、鉛直補剛材などは、腹板の座屈による著しい影響は受けておらず、後座屈強度も十分に期待できるものと思われる。このことは桁全体のたわみ曲線（図-16）からも判断でき、腹板の座屈は桁の耐荷力にほとんど影響を与えていない。また桁の曲げひずみ分布（図-21）にも腹板の座屈の影響はあまり表われていない。

桁の曲げによる腹板のひずみの実測値を用いて、水平方向直応力 σ_x 、鉛直方向直応力 σ_y およびせん断応力 τ を計算すると 図-22 のようになる。図にはこれら実験値に対応する理論値として初等はり理論（せん断力は腹板によって負担され、せん断応力分布は桁高に沿って一定で、曲げによる直応力は各断面で直線分布している）から得られる値が実線で記入されている。せん断応力は実験値の方が 10% 低めにでているが、理論値と実験値はよく一致している。 σ_x の実験値は腹板の座屈後あまり増加せず、鉛直補剛材のみを有するプレート ガーダ

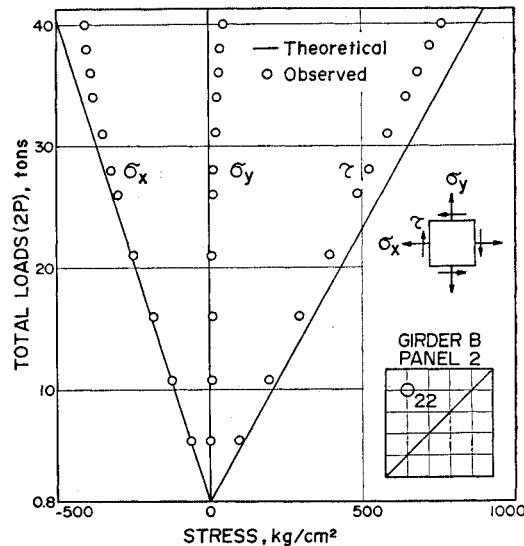


図-22 応力の理論値と実験値の比較

一に対する実験結果^{12), 13), 14), 15)}と同様な傾向を示している。

6. む す び

プレート ガーダー腹板を鉛直補剛材間で斜め圧縮方向に補剛した場合の弾性座屈について階差法を用いて理論的に解析し、その結果の妥当性を検討するためプレート ガーダー模型の座屈実験を行ない、理論結果および実験結果に対して諸考察を試みた。その結果をまとめると、理論的には次のようである。

1) 周辺および斜め補剛材の位置で単純支持された板に曲げあるいはせん断が単独に作用する場合、および曲げとせん断が同時に作用する場合の弾性座屈を階差法によって解析し、座屈係数曲線を求めた。

2) 鉛直補剛材間を補剛しない場合、斜め補剛した場合および鉛直補剛した場合について弾性座屈応力を比較し、斜め補剛の効果を検討した。

3) 曲げ座屈の場合、斜め補剛によって座屈応力は無補剛の場合の 1.1~1.4 倍に向上するとともに、板の縦横比 $\alpha > 0.6$ では鉛直補剛の場合より若干有利である。

4) せん断座屈の場合、斜め補剛材によって座屈応力は無補剛の場合の 3~4 倍になる。 $\alpha=0.6\sim1.0$ では鉛直補剛の場合にくらべ、座屈応力は最大 1.3 倍になる。

5) 曲げせん断の場合、 $\alpha=1.0$ では斜め補剛によって座屈応力は無補剛の場合の 1.15~3.7 倍に向上するとともに、鉛直補剛の場合とくらべても有利である。

実験については次のようである。

1) スパン約 5 m のプレート ガーダー模型 2 本に対

して曲げ座屈および曲げせん断座屈実験を行なった。曲げ座屈実験は $\alpha=1.0, 1.2$ の 2 パネルを、曲げせん断座屈実験は曲げ応力とせん断応力との比が異なる 2 パネル ($\alpha=1.0$) をそれぞれ対象とした。

2) 実験結果として得られた荷重-ひずみおよびたわみ曲線の変向点から座屈荷重を推定した。実験値と理論値の差は 1~8% であった。

3) 1 パネルの腹板が局部弹性座屈したのちもフランジや鉛直および斜め補剛材は健在で、後座屈強度が十分期待できる。

斜め補剛材が腹板の座屈に際して節になりうるだけ十分な剛度を有する場合について、プレート ガーダー 斜め補剛腹板の弹性座屈、特に曲げ座屈および曲げせん断座屈の理論的および実験的研究を行なった。斜め補剛材の剛度が座屈強度に与える影響や、斜め補剛腹板の後座屈強度、あるいは腹板を斜め補剛した桁の耐荷力などについては今後の研究に待たなければならない。しかし慣用の設計法に準じて腹板の局部座屈を基準にとれば、斜め圧縮方向に腹板を補剛する方法は有効な補剛形式と考えられる。

おわりに、実験に際しては関西大学助手 武田八郎・赤松洋一両氏の助力を得たことを付記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Burchard, W. : "Beulspannungen der quadratischen Platte mit Schrägstiefe unter Druck bzw. Schub," Ingenieur-Archiv, 8, 1937, S. 332-348.
- 2) Kromm, A. : "Kritische Schubspannung rechteckiger Platten mit Diagonalaussteifungen," Der Stahlbau, 21, H. 10, October, 1952, S. 177-184.
- 3) 若杉昇八：周辺回転端直角二等辺三角形板の座屈、日本機械学会論文集, Vol. 19, No. 83, 1953, pp. 59-65.
- 4) 若杉昇八：均等圧縮力を受ける直角二等辺三角形板の座屈、日本機械学会論文集, Vol. 21, No. 107, 1955, pp. 474-480.
- 5) 米沢 博・中原 久・松下貞義・加治家清史：斜方向補剛ウェブのせん断座屈に関する研究、呉造船技報, No. 15, 11月, 1967, pp. 12-37.
- 6) Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. : "Theory of Elastic Stability," 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1961.
- 7) 戸川準人：マトリックス構造解析法講座 14, JSSC, Vol. 4, No. 35, 11月, 1968, pp. 41-46.
- 8) Wilkinson, J.H. : "The Algebraic Eigenvalue Problem," Oxford, 1965.
- 9) Klöppel, K., und Scheer, J. : "Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten," Wilhelm Ernst & Sohn, 1960.
- 10) Bleich, F. : "Buckling Strength of Metal Structures," McGraw-Hill Book Co., New York, 1952.
- 11) Rockey, K.C. : "The Behavior of Webplates of Plate Girders Subjected to Pure Bending," Structural Engineer, Vol. 35, No. 5, May, 1957, pp. 176-189.
- 12) Basler, K. and Thürlmann, B. : "Strength of Plate Girders in Bending," Proc. of A.S.C.E., Vol. 87, No. ST 6, August, 1961, pp. 153-181.
- 13) 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.
- 14) 小西一郎・米沢 博・三上市蔵：プレート ガーダーの曲げ弹性座屈、土木学会論文集, No. 143, 7月, 1967, pp. 1-8.
- 15) 関西橋梁鉄骨溶接研究会：プレート ガーダーの座屈に関する調査と研究、2月, 1969.

(1970.12.25・受付)