— 学 術 論 文 —

熔接組立材の挫屈に関する研究 (第 1 報)*

— 熔 接 鋸 桁 の 捩 り 挫 屈 —

奥 村 敏 恵**

A Study on the Buckling of Welded Built-up Structure (Report 'I)*

— The lateral (torsional) buckling of welded plate girder —

By T. Okumura**

Abstract

In the present report, the author attempted to give a practically applicable method for the most economical design of the welded built up I-girder which is subjected to a bending moment. In the first place, he developed a theory on the lateral buckling, in which the deformation of web plate was considered, and the local buckling of flange plate.

The results of his study were as follows:

1) The formula which gives the critical value of the lateral buckling of I-girder had two more terms added to the already known one. These important corrected terms set a certain limit especially to the depth and width of flange plate. This formula was shown as (24) in this paper.

2) The local buckling strength of flange plate, in which the elastic supported condition by web plate was considered, decreased with the increase of h/b and d/t where

h : height of web plate, t : depth of web plate

b : width of flange plate and d : depth of flange plate.

は し が き

橋梁、鉄骨、ゲートその他各種の鋼構造物の骨組を形成する部材に板材を互に隅肉溶接した組立材を使用することは、鋸接構造に比し余計な材料が不要で使用材料の節約を期待することができる。特に自重に依る応力の著しいものにとっては有利な条件を示すものである。なお任意の形状を与え得る利点は市販の材料寸法に無関係に最も合理的な形状を選ぶことができる。しかも溶接施工上から見ると、先ず J.I.S に合格した SS41 の材料であれば、いわゆる溶接歪の問題以外には現在の技術水準で十分にこなし得る段階にあると考えられる。溶接歪の問題については溶接順序、治具等の適当な使用に依って解決されつゝあり、これについては別の研究にまことにする。従ってこれ等の組立材に依りできあがった部材を結合して、一つの目的に適った構造物につくりあげる最後の接合に鋸接を利用する

か、溶接を利用するかは、その構造物の性格または支配する条件に依り、技術者の適確な判断を必要とするけれども、各部の部材に設計上最も合理的と考えられる部材を溶接に依って集成して使用することは大いに望まれる次第である。唯この場合留意しなければならない重要な点は、従来の鋸接構造において添接された一見余計に思はれる部材に依る剛性の増加、または鋸接に依る振動の減衰性、ヒンジ構造の仮定の満足等が設計頭部の不知の要素に対し自然の抵抗をなしてきた点を無視してはならない点である。すなわち溶接組立材の構造上の特質を十分に理解し、生じ得るすべての場合を考慮して各部の設計の基準をつくりあげることが大切であると考えられる。

この第一の段階として、通常最も多く使用されている I 断面の溶接桁の場合について考えてみよう。なお荷重条件としては問題をわかり易くするために単純曲げモーメント M を受けた場合に制限して見る。その他の荷重条件の場合も幾分の取扱い上の複雑さはあるにしても、I 断面の桁が曲げモーメントの形で積載荷重を分担し、伝達する本来の性質を考えて見ると意味する所は同じであり、一つの修正

* 原稿受付 昭和 27 年 9 月

** 正員 東京大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Tokyo University.

された代表値と見なしてよいと考えられる。

さて I 断面の桁は通常ウェブとよばれる 1 枚の板とフランジとよばれる 2 枚の板より形成されており、フランジは主として曲げモーメントに依る縁応力に抵抗し、ウェブは剪断力をつたえる材であることはここに説明する迄もないことである。

フランジに作用する曲げ応力 σ_f は

$$\sigma_f = M/W \dots\dots\dots(1)$$

但し W : 断面係数

である。I 断面の場合には

$$W = \frac{2 \left\{ \frac{t h_{web}^3}{12} + 2 \left(\frac{h_{web} + d}{2} \right)^2 b d + \frac{b d^3}{6} \right\}}{h_{web} + 2d} \dots\dots\dots(2)$$

但し t, d はそれぞれウェブ、フランジの板厚

h_{web}, b は夫々ウェブの高さ及びフランジの幅を示す。なお $\sigma_f = \sigma_y$ (引張降伏点応力) とすると、引張フランジが降伏する限界の曲げモーメント M_t は

$$M_t = W \cdot \sigma_y \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる。 σ_y は材料によって定まる値であって、設計条件を支配する値は W である。一般に W の値は近似的にフランジの断面積とウェブの高さに比例すると考えることができから、同じフランジの断面積でもウェブの高さを大きくすればするほど、(3) 式のみについて考えれば抵抗曲げモーメントが大となり、経済的な設計が可能となる訳である。しかしウェブの高さが大となると、ウェブ自身の挫屈強度が低下し、当然その高さに制限が生ずる。

一方フランジの断面積は、鉚接構造の場合のようにアングルを使用しない為、簡単になり、その厚さと幅の 2 つの値で代表することができる。フランジの厚さは使用材料の熔接性よりあまり大きな値をとることができない。通常 1 枚の板としては 25mm 位が望ましい制限厚さである。

従ってフランジの面積を大きくするためにはその幅を大きくすることになる。この幅をあまり大きくすると、突出長が大となる結果、フランジ自身の局部的な挫屈が支配条件となり、圧縮側フランジの挫屈に依って抵抗曲げモーメントの大きさが定まることになる。

建築学会の構造基準に依ると「フランジの突出量はその厚さの 15 倍以下にする」ことを規定している。この条件は圧縮側フランジの局部挫屈値よりおさえた値と思はれるが、これについても検討をかけてみることにする。

なおフランジとウェブを別別に考えたが、これはウェブの断面は、 W の大きさにあまり寄与しないことを前提としたものである。しかしフランジの厚さとウェブの厚さがあまり不均衡になることは、フランジの横方向の剛性とウェブの横方向の剛性の不均衡の原因となり、桁が振りを受けた場合、ウェブの支持剛性の低いためフランジの負担する有効な振り剛性を十分に発揮させることができない。従

来の I 断面桁の振り挫屈に関する研究においては、桁が振りを受けた場合もウェブは常に直線を保つ仮定に基づいて計算を行っている。従ってこれより得られた結果はフランジの振り剛性を大にすればするほど、振り挫屈値が高くなる結果を示していて、この研究には十分な説明を与えることが出きない。このためにはウェブが変形する仮定の下に立って振り挫屈の理論をたてる必要がある。このようにすることに依ってウェブとフランジの断面の均衡を定める条件が与えられる訳である。

本論文は以上の見地に立って、ウェブの変形を考慮した振り挫屈 (又は横倒れ挫屈) の理論を誘導し、部材相互の有効かつ均衡のとれた寸法の関係に関する検討を試みようとしたものである。

ウェブの変形を考慮した I 断面桁の振り挫屈

§1. 基礎微分方程式の誘導

図 1 の左に示す基本的な形をした I 断面桁が、右に示す形の振り変形を生じた場合について考えてみよう。この場

図 - 1

合変形後もフランジとウェブはそのつけ根において互に直角を保つと考え、桁重心の x, y 方向の変位を u, v フランジの回転角を ϕ 、ウェブとフランジのそれぞれの重心を結ぶ線とフランジの法線となす角を ψ とする。なおウェブは曲げを受持つ性質 (曲げ剛性 $B_{web} = EI_{web}$) と振りを受持つ性質 (振り剛性 $C_{web} = GI_{Dweb}$) より成り立つものと仮定する。すなわち板構造としての曲げ変形を考えると非常に問題が複雑となるが、この厳密な取扱いは今後の取扱いに対し、次数の高い微小項を附加するものであるが、挫屈値 (分岐点) の計算に対しては従来の理論においては一応無視することができる。従って桁の長さの方向を x 軸

とすると、曲げに抵抗する単位幅の y 方向の部片と振りに抵抗する単位幅の z 方向の部片よりウェブが形成されているものと仮定しても問題の解折に矛盾を与えないと考えられる。

さて図 2 に示す dz なる要素を考え、ここに作用する振りモーメントを dM_z とする。これに対し、フランジ、ウェブにそれぞれ抵抗振りモーメント M_{zFl} , M_{zweb} フランジ剪断力 R_z が対応し、 dz をはなれた断面に図の如き状態となって均合うことになる。

図 - 2

従って均合条件としては

$$dR_z \cdot h + 2dM_{zFl} + dM_{zweb} = -dM_z$$

または

$$R_z \cdot h + 2M_{zFl} + M_{zweb} = -M_z \quad \dots\dots(1)$$

となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{但し } M_{zFl} &= C_{Fl} d\varphi/dz \\ M_{zweb} &= C_{web} (d\varphi/dz - d\Psi/dz) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

h はフランジの中心線間の距離, C_{Fl} , C_{web} はフランジ、ウェブの振り剛性を示す。

またフランジの剪断力の条件はフランジの横方向の撓の差から生ずるものであり、普通の梁の撓に関する理論より

$$R_z = -D \cdot \frac{1}{2} h (d^3\varphi/dz^3 - d^3\Psi/dz^3) \quad \dots\dots(3)$$

但し $D = EI_{Fl}$ はフランジの y 軸に関する曲げ剛性を示す。

なお Ψ の生ずる条件は、フランジとウェブのつけ根において常におのおのの中心線が直角を保つことを仮定すると、その仮定を満足するようにフランジ、ウェブの抵抗振りモーメントがウェブの曲げに抵抗すると仮定した単位幅の y 方向の細片に図-3 に示す如き曲げモーメントを作用する結果より生ずるものである。

これは簡単な梁の撓理論より計算され、

$$\begin{aligned} \Psi &= w / \frac{1}{2} h_{web} = -h / 6 B_{web} (dM_{zFl}/dz \\ &+ \frac{1}{2} dM_z/dz) \dots\dots(4) \end{aligned}$$

となる。 B_{web} は単位幅のウェブの y 軸に関する曲げ剛性を示す。

(1) 及び (4) 式に (2), (3) 式を代入すると

$$\left. \begin{aligned} -\frac{1}{2} h^2 D (d^3\varphi/dz^3 - d^3\Psi/dz^3) + C_{web} (d\varphi/dz - d\Psi/dz) + C_{Fl} d\varphi/dz &= -M_z \\ \Psi &= -h C_{Fl} / 6 B_{web} (d^2\varphi/dz^2 + \frac{1}{2} C_{Fl} dM_z/dz) \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

図-4 に示す如き両端に単純曲げモーメント M が作用し、横方向に振り撓屈を生じた場合について考えて見る。

変形前の座標軸 (x, y, z) と変形後の座標軸 (ξ, η, ζ) の間には、図-1 より表-1 に示す様な方向余弦を持つことが云える。

従って弾性曲線のみを*1考慮すると、

図 - 3

図 - 4

$$B d^2u/dz^2 = (\varphi - \Psi) M \quad \dots\dots(6)^{*2}$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} h^2 D (d^3\varphi/dz^3 - d^3\Psi/dz^3) + C_{web} (d\varphi/dz - d\Psi/dz) \\ - d\Psi/dz + 2C_{Fl} d\varphi/dz = -du/dz M \quad \dots\dots(7)^{*2} \end{aligned}$$

表 - 1

	x	y	z	
ξ	1	$-(\varphi - \Psi)$	$-du/dz$	B は桁全体 の y 軸に 関する 曲げ剛性を 示す。 $M_z = du/dz$ ・ M なること
η	$-(\varphi - \Psi)$	1	$-dv/dz$	
ζ	du/dz	dv/dz	1	

を考慮し、(5), (6), (7) 式より u を消去すると、 φ, Ψ に関する式が誘導できる。

すなわち

$$\left. \begin{aligned} d^2\varphi/dz^2 &= -6B_{web}/hC_{Fl}\Psi - M^2/2C_{Fl}B(\varphi - \Psi) \\ \frac{1}{2} h^2 D (d^4\varphi/dz^4 - d^4\Psi/dz^4) - C_{web} (d^2\varphi/dz^2 - d^2\Psi/dz^2) - 2C_{Fl} d^2\varphi/dz^2 &= M^2/B(\varphi - \Psi) \end{aligned} \right\} \dots\dots(8)$$

なお Ψ を消去し φ のみの式にすると

$$d^6\varphi/dz^6 + ad^4\varphi/dz^4 + bd^2\varphi/dz^2 + c\varphi = 0 \quad \dots\dots(9)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= -(6B_{web}/hC_{F1} - 2C_{web}/h^2D) \\ b &= -12B_{web}/h^3DC_{F1}(2C_{F1} + C_{web}) \\ c &= -12B_{web}M^2/h^3DC_{F1}B \end{aligned} \right\} \dots\dots(10)$$

となる。

一方

$$\Psi = 1/g^2(f^2\varphi + d^2\varphi/dz^2) \dots\dots(11)$$

$$\left. \begin{aligned} g^2 &= -6B_{web}/hC_{F1} + M^2/2C_{F1}B_1 \\ f^2 &= M^2/2C_{F1}B_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

となる。

§2. 両端単純支持の場合の挫屈値の誘導

$$(9) \text{ 式に } \varphi = e^{\lambda z} \dots\dots(13)$$

を代入し、 $\lambda^2 = \mu$ とおくと

$$\mu^3 + a\mu^2 + b\mu + c = 0 \dots\dots(14)$$

この三次式の 3 つの根 $\mu_1 \mu_2 \mu_3$ は

$$\left. \begin{aligned} p &= b - a^2/3 \\ q &= 2/27a^3 - 1/3ab + c \\ l &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}} \\ m &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}} \\ w_1 &= \frac{-1 + \sqrt{-3}}{2} \\ w_2 &= \frac{-1 - \sqrt{-3}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

とおくと、夫々 $(l+m-a/3)$ ($w_1l+w_2m-a/3$)

($w_2l+w_1m-a/3$) で与えられる。

従って

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1^3 &= \pm\sqrt{(l+m-a/3)} = \pm\beta_1 \\ \lambda_2^3 &= \pm\sqrt{(w_1l+w_2m-a/3)} = \pm\beta_2 \\ \lambda_3^3 &= \pm\sqrt{(w_2l+w_1m-a/3)} = \pm\beta_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

とおくと、(13) より (9) 式を満足する φ の値が与えられる。

即ち

$$\Psi = c_1 \cosh \beta_1 z + c_2 \cosh \beta_2 z + c_3 \cosh \beta_3 z + c_4 \sin \beta_1 z + c_5 \sinh \beta_2 z + c_6 \sinh \beta_3 z \dots\dots(17)$$

(11) 式より

$$\Psi = -\frac{1}{g^2} \{ c_1(\beta_1^2 + f^2) \cosh \beta_1 z + c_2(\beta_2^2 + f^2) \cosh \beta_2 z + c_3(\beta_3^2 + f^2) \cosh \beta_3 z + c_4(\beta_1^2 + f^2) \sinh \beta_1 z + c_5(\beta_2^2 + f^2) \sinh \beta_2 z + c_6(\beta_3^2 + f^2) \sinh \beta_3 z \} \dots\dots(18)$$

$c_i (i=1 \sim 6)$ は積分常数を示す。

境界条件

端部で自由な振り角を生じない様にし、かつフランジに対しては、軸に関する曲げを生じないような自由な支持をなしているものと考え、

$z=0$ において

$$\varphi = \Psi = 0 \dots\dots(19)_a, b$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{h}{2} \left(\frac{d^2 \varphi}{dz^2} - \frac{d^2 \Psi}{dz^2} \right) = 0 \dots\dots(19)_c$$

桁中央に關し対称なる条件より、中央部のフランジには剪断力が生じ得ない。かつウェブが連続であり、振りモーメントも 0 となるから

$z = \frac{l}{2}$ において

$$dy/dz = h/2(d\varphi/dz - d\Psi/dz) = 0 \dots\dots(19)_d$$

$$d\Psi/dz = 0 \dots\dots(19)_e$$

$$-\frac{1}{2}h^2D(d^3\varphi/dz^3 - d^3\Psi/dz^3) = 0 \dots\dots(19)_f$$

となる。

(17), (18) を (19)_{a-f} に代入すると

$$\left. \begin{aligned} c_1 + c_2 + c_3 &= 0 \\ (\beta_1^2 + f^2)c_1 + (\beta_2^2 + f^2)c_2 + (\beta_3^2 + f^2)c_3 &= 0 \\ \{\beta_1^2 + \beta_1^2(\beta_1^2 + f^2)/g^2\}c_1 + \{\beta_2^2 + \beta_2^2(\beta_2^2 + f^2)/g^2\}c_2 + \{\beta_3^2 + \beta_3^2(\beta_3^2 + f^2)/g^2\}c_3 &= 0 \\ \beta_1 \sinh \beta_1 l/2c_1 + \beta_2 \sinh \beta_2 l/2c_2 + \beta_3 \sinh \beta_3 l/2c_3 + \beta_1 \cosh \beta_1 l/2c_4 + \beta_2 \cosh \beta_2 l/2c_5 + \beta_3 \cosh \beta_3 l/2c_6 &= 0 \\ \beta_1(\beta_1^2 + f^2) \sinh \beta_1 l/2c_1 + \beta_2^2 + f^2 \sinh \beta_2 l/2c_2 + \beta_3(\beta_3^2 + f^2) \sinh \beta_3 l/2c_3 + \beta_1(\beta_1^2 + f^2) \cosh \beta_1 l/2c_4 + \beta_2(\beta_2^2 + f^2) \cosh \beta_2 l/2c_5 + \beta_3(\beta_3^2 + f^2) \cosh \beta_3 l/2c_6 &= 0 \\ \{\beta_1^3 + \beta_1^3(\beta_1^2 + f^2)/g^2\} \sinh \beta_1 l/2c_1 + \{\beta_2^3 + \beta_2^3(\beta_2^2 + f^2)/g^2\} \sinh \beta_2 l/2c_2 + \{\beta_3^3 + \beta_3^3(\beta_3^2 + f^2)/g^2\} \sinh \beta_3 l/2c_3 + \{\beta_1^3 + \beta_1^3(\beta_1^2 + f^2)/g^2\} \cosh \beta_1 l/2c_4 + \{\beta_2^3 + \beta_2^3(\beta_2^2 + f^2)/g^2\} \cosh \beta_2 l/2c_5 + \{\beta_3^3 + \beta_3^3(\beta_3^2 + f^2)/g^2\} \cosh \beta_3 l/2c_6 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(20)$$

$c_i (i=1 \dots 6)$ が同時に 0 となる以外の根を有するためには、各係数よりつくられた行列式が 0 となるを要する。この値は整理して計算すると

$$\frac{\beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3}{g^4} \cosh \frac{\beta_1 l}{2} \cosh \frac{\beta_2 l}{2} \cosh \frac{\beta_3 l}{2} - (\beta_2^2 - \beta_1^2)^2 (\beta_3^2 - \beta_2^2)^2 (\beta_1^2 - \beta_3^2)^2 = 0 \dots\dots(21)$$

(14) 式は明かに等根及び 0 なる根を有しないから

$$\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq 0 \quad \text{となり、}$$

(21) 式の 条件は

$$\cosh \beta_i l/2 = 0 \quad (i=1, 2, 3) \dots\dots(22)$$

となる。従って $i\beta_i l/2 = n\pi/2$, 自乗して、

$$-\beta_i^2 l^2 = n^2 \pi^2 \quad \text{となれば行列式} = 0 \text{ の条件式を満足する。}$$

これは (14) 式の根の性質より、

$$\left(\frac{a}{3} - \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right)^3 + p \left(\frac{a}{3} - \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right) + q = 0 \dots\dots(23)$$

となればよい。(23), (10), (15) を用いると 行列式 = 0 を満足する固有値 M の値は容易に計算できる。

すなわち

$$M_k = \frac{\pi}{l} \sqrt{BC \left\{ 1 + \frac{\pi^2}{l^2} \frac{Dh^2}{2C} - \left(\frac{\pi^2}{l^2} \frac{C_{Fe} C_{web} h}{6B_{web} C} + \frac{\pi^4}{l^4} \frac{C_{Fe} D h^3}{12B_{web} C} \right) \right\}} \dots\dots\dots (24)$$

$$C = 2C_{Fl} + C_{web}$$

この値の根号の中の前初の2項は従来の理論より求められた値であり、後の括弧の中にある2項がこの理論より出された補正項である。

数値計算例

フランジの幅及び厚さを b, d , ウェブの高さ及び厚さを t とすると

$$B_{web} = \frac{t^3}{12} E$$

$$D = \frac{db^3}{12} E$$

$$B = \left(\frac{ht^3}{12} + 2 \frac{db^3}{12} \right) E$$

$$C_{Fl} = \frac{bd^3}{3} (1 - 0.630d/b) G$$

$$C_{web} = ht^3/3 (1 - 0.630t/h) G$$

で与えられる。

今 $h = 160t^3$, $d = mt$, $b = nd$, $l = \gamma h$ とおくと、図-5, 6 に示す M_k-n 曲線が与えられる。

図 - 6 記号図-5 参照

§3. ウェブ及びフランジの局部屈曲

ウェブ及びフランジの局部屈曲は夫々が板材として荷重を受けたときの屈曲状態に依つて定められる。

一般に板材の屈曲は荷重を受ける辺の長さを b , 板厚を t , ポアソン比を ν とするとき

$$\sigma_k = k \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \dots\dots\dots (25)$$

で与えられる。

この式に示される k の値は荷重の性質及び周辺の支持の条件に依つて定められる値である。通常板の屈曲変形を支配する基礎微分方程式を満足する機形を境界の支持状態を表わす境界条件式に代入してつくられた特性方程式より求められる。または便宜的な方法として全変形エネルギーの変分式より求められる。

単純曲げモーメントを受けた I 桁で、フランジ及びウェブが局部的な屈曲変形の生ずる場合を想定すると、フランジでは圧縮側フランジの縁応力がフランジの板材としての屈曲値に達した時に生ずるものであり、ウェブでは相対する二辺に三角形分布の荷重を受け、その最大の応力が屈曲値に達した時に生ずる。

図 - 5

註 t の単位: cm

図-5 は $m=2.5$ とし, γ の変化に依る性質をしらべたものであり、図-6 は $\gamma=5$ とし, m の変化に依る性質をしらべたものである。

図はフランジ幅を或程度以上の大きさにすると振り抵抗を全く失うことを示している。なお γ が小なるほど、また m が大なるほど低い n の限界値を示すことが示されている。これはフランジの不均衡の振り剛性が無効となる限界を示すものと考えられる。

図 - 7

またこの場合の境界条件としてはウェブ、フランジ共に荷重を受ける辺は単純支持であり、他の二辺はフランジに対しては半分の突出部分のみを考え、一辺自由支持、他辺ウェブに依って弾性支持として取扱えばよい。またウェブに対しては二辺フランジに依って弾性支持として取扱えばよい。

この場合の弾性支持条件は図-7に示す状態を考えると、

$$M_y = -\zeta \cdot \bar{\varphi} \dots \dots \dots (26)$$

板の撓 w で書きかえると

$$\left[\frac{\partial w}{\partial y} \pm \frac{D}{\zeta} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right]_{y=\mp \frac{h}{2}} = 0 \dots \dots \dots (27)$$

で与えられる。

なお ζ の値は拘束板の周辺より M_y なる曲げモーメントを受ける場合の $\bar{\varphi}$ と M_y の関係より求むればよい。

今拘束板の撓を $\bar{w}$ とし、図示の記号を用い、 $M_y = C \sin m\pi x/l$ と仮定し、 w 軸に直角な二辺が単純支持の条件を考慮すると

$$\bar{w} = \left(\bar{c}_1 \sinh \frac{\pi y}{\lambda} + \bar{c}_2 \cosh \frac{\pi y}{\lambda} + \bar{c}_3 y \sinh \frac{\pi y}{\lambda} + \bar{c}_4 y \cosh \frac{\pi y}{\lambda} \right) \sin \frac{m\pi}{l} x$$

(但し λ は撓の y 軸方向の半波長) で与えられる。

$\bar{c}_i (i=1 \dots 4)$ を定める条件としては二枚の板の結合線が同一直径を保つと考えると、その結合辺において

$$\bar{w} = 0$$

$$M_y = -\bar{D} (\partial^2 \bar{w} / \partial y^2 + \nu \partial^2 \bar{w} / \partial x^2)$$

他の2つの条件は拘束板がフランジの場合には自由支持の条件を導入し、ウェブの場合には対称条件を導入すればよい。

(26)と同じ条件式は拘束板に対しても成立する。この条件を用いると

ウェブが拘束板の場合

$$\bar{\varphi} = -\frac{\lambda}{2D} \frac{1}{\pi} \tanh \frac{\pi h_{web}}{2\lambda} \left\{ 1 + \frac{\pi h_{web}/\lambda}{\sinh(\pi h_{web}/\lambda)} \right\} M_y \dots \dots \dots (28)$$

フランジが拘束板の場合

$$\bar{\varphi} = -\frac{\lambda}{2D} \frac{1}{2\pi} \frac{3 \cosh^2(\pi b/2\lambda) + \pi^2 b^2/4\lambda^2 + 1}{\pi b/2\lambda + 3 \sinh(\pi b/2\lambda) \cosh(\pi b/2\lambda)} M_y \dots \dots \dots (29)$$

$\bar{D}, \lambda$ は束拘板の寸法に關係する量である。

フランジの局部座屈

フランジの突出方向を y 軸、桁方向を x 軸にとると座屈変形 w を支配する微分方程式は

$$D(\partial^4/\partial x^4 + 2\partial^4/\partial x^2 \partial y^2 + \partial^4/\partial y^4)w + \sigma_c t \partial^2 w / \partial x^2 = 0$$

$$\left. \begin{aligned} \mu^2 &= \sigma_c t / D(l/m\pi)^2 \\ \theta_1 &= \frac{n\pi}{l} \sqrt{\mu+1} \\ \theta_2 &= \frac{n\pi}{l} \sqrt{\mu-1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (30)$$

とおくと

$$w = \sin n\pi x / l (c_1 \cosh \theta_1 y + c_2 \sinh \theta_1 y + c_3 \cosh \theta_2 y + c_4 \sinh \theta_2 y)$$

で与えられる。ここで前述の境界条件を導入すると、特性方程式が得られる。

すなわち

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \theta_2^2 + \nu(n\pi/l)^2 \\ k_2 &= \theta_1^2 - \nu(n\pi/l)^2 \\ k_3 &= \zeta \frac{b}{4} \frac{\theta_1^2 + \theta_2^2}{\theta_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (31)$$

とおくと

$$\frac{2k_1 k_2}{\cosh \theta_1 b / 2 \cos \theta_2 b / 2} + k_1^2 + k_2^2 - \frac{k_1^2 \theta_1^2 - k_2^2 \theta_2^2}{\theta_1 \theta_2} \tanh \theta_1 b / 2 \tan \theta_2 b / 2 + k_3 (k_2^2 \tanh \theta_1 b / 2 - k_1^2 \frac{\theta_1}{\theta_2} \tan \theta_2 b / 2) = 0 \dots \dots \dots (32)$$

μ^2 は k で表わされる故、この方程式よりの k 値が計算される。

これを図示すると図-8となる。

図-8 図-5の記号参照

座屈を調べるのに相対する荷重を受ける二辺単純支持、他の二辺は自由及び固定支持として取扱っているが、これに依ると k の値*5は $2l/b$ が十分大のとき

$$k = 0.456 + (b/2l)^2$$

となることを示しているが、この値は明かに廣フランジの場合に該当する。

ウェブの局部座屈

ウェブの方は荷重が三角形分布となるため、撓を表わす微分方程式が非線型となり、解析的に特性方程式を求めることは困難である。従来の取扱に依ると*6

四辺単純支持の場合

この図で明かのように $2h/b$ が大きい程、すなわちウェブ高さが高いほど局部座屈の危険性が増大する。しかしウェブ高さが高いことはフランジに生ずる縁応力を小にするからこの2つの互に相反する事実が重なることに注意すべきである。なお従来フランジの局部座屈を調べるのに相対

$$l/h_{web} > \frac{2}{3} \quad k=23.9 \dots\dots\dots(33)$$

二辺 (荷重辺) 単純支持. 他の二辺固定の場合

$$l/h_{web} > 1.5 \quad k=39.7 \dots\dots\dots(34)$$

フランジの場合に見られる様に固定とみなすことは高すぎる値を示すものであり, 通常用いられる (33) の値を用いても, フランジ幅のきわめて小さい場合またはきわめて大きい場合を除き適用可能と考えられる.

ウェブの挫屈は剪断に依る挫屈が問題であり, 曲げに依る挫屈は比較的軽視されている. 実用的にもスチフナー等に依る補強が比較的效果を発揮している.

§4. ま と め

以上の取扱いを主として, I 桁の寸法間の関係を考察してみよう.

最も単純な I 桁の場合でも, 各寸法間関係として h/t , l/h , d/t , b/d の4つの変数を持ち, この変数の組合せを考えねばならぬ. 実用的な立場より考えると, フランジの突出長と厚さの比 すなわち $b/2d$ 又は b/d を変数とし, 他の変数を固定した場合について調べることにする.

橋桁における横桁間の間隔等を考慮し, l/h を5にとつて見る. なお h に依る影響を調べるに際し, 有効曲げモーメントは径間の大きさに比例することを考慮し, l を一定

図 - 9

- 註 M_k 振り挫屈値……(24) 式に依る
 M_t フランジが引張降伏値に達する限界曲げモーメント……(3)式に依る
 $\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ にさる.
 M_{web} ウェブの挫屈値……(1), (25), (33)式に依る.
 (25)式 $t=t$ $b=h$ にさる
 M_{FEL} 圧縮側フランジの局部挫屈の生ずる限界曲げモーメント……(3), (25), (32)式に依る
 (25)式 $t=d$ $b=b/2$ にさる

にし, h を変化させて比較した. 図-9~12はその計算の一例である. 同じ桁高でもフランジとウェブの厚さの比 d/t が大きすぎることは, この計算の範囲内の桁高では4つの強度特性の不均衡な関係を示し, 折角1, 2の現象は防ぎ得ても他の現象より不利となることになり十分に桁断面を利用したとはいえない. 一方図-8よりも分る様に桁高をこれ以上高くすると, フランジの厚さを薄くしない限り

図 - 10

図 - 11

図 - 12

フランジの局部座屈が支配的条件となり突出長の適当な選択が重要となる。又桁高を著しく低くすることは図—12が示すように引張側フランジの降伏に依って限界があり、圧縮側フランジは十分に利用し尽されない。

突出長の限界も d/t , h/t に依って一義的に与えることが出来ないが15~20位が妥当な限界値と考えられる。全体の傾向としてこの4つの曲線が一点に交るような断面を選ぶことが好しいと考えられる。

最近欧米で盛んに使用されているコンクリート床版と圧縮側フランジを緊結させてその共同作用を利用している合成桁のようなものはこの意味の局部座屈、振り座屈は考慮しないでよい訳であって、熔接桁の持つ一つの欠点すなわち構造上の制限を除いている点、有用な構造形式と言えるようである。

なお論ずべき問題が残っているが、実験結果と共に新しく論じようと思う。

最後に本論文に関し御指導を受けた東大仲威雄教授に感

謝する次第である。

*-1 厳密には板として考えねばならないが、前に述べた理由で従来と同じ取扱いをした。厳密には

$$Bd^2u/dz^2 + Byd^2(\varphi - \Psi)/dz^2 = (\varphi - \Psi)[M - M/w(1 - 2y/h)t\{u + y(\varphi - \Psi)\}] \text{ となる。}$$

*-2 z のかわりに t と書くべきであるが、便宜上 z を用いた。

*-3 現行の設計上最も経済的と考えられる桁高。平井敦著 鋼橋 参照

*-4 圧縮側フランジに等分布に縁応力が働くと考えて取扱っているが、実際には有効幅の考え方から云って突出長を大きくとりすぎると必ずしも等分布とは考えられない。この点からも突出長に制限が生ずる。

*-5 Timoshenko: Theory of elastic stability.

*-6 長柱研究委員会: 弾性安定要覽

資 料

米 軍 規 格 の 解 説

(I)

MIL-T-5021 熔接工の技倆検定

中 村 孝*

は し が き

朝鮮事変勃発以来所謂「特需」なる形式において、種々の航空関係部品が発注せられ、敗戦後の空白に突如として、米国航空工業の一端を現わすに至った。戦後我が国熔接の発達に誠に見るべきもの多く、特に造船界においては異常な迄に熔接は発展し、量・質共に世界水準に迫ったのであるが、航空方面は兵器工業として禁止品目にあつたため、生産は勿論、研究すら全然停頓していたのである。それがナバーム弾に始まり、最近のジェット戦闘機用燃料タンクに至る各種航空関係部品に遭遇するや、忽ち種々の欠陥を露呈し、関係者は米国の技術水準に追隨するのに非常な努力を払ってきた。その内当面の問題は軍規格 (Military Specification) である。現在、空軍関係の発注品はその検査を U.S. コンサルタウントというような民間会社に請負わせており、すべて軍規格によって検査されるから

である。この規格は実に完備されており、梱包材料から製図、試験等に至るまで甚大な範囲に亘っている。我々熔接関係者としてはこれ等の規格中、熔接関係のものについて調査研究しておくことは無意味ではあるまい。

また米空軍関係の特需はうけないまでも、我国重工業界としては、好むと好まざるとに拘らず再軍備に伴う航空工業に直面せねばならず、その場合には一応米軍規格に準據またはこれが参考にされることは当然想像されることであり、他山の石として研究の価値あるものと考えられるのである。一方米軍規格にもどうかと思われる節もあり、一概にう呑みにはできず、これらに是々非々を加えることも、今後我国の工作標準確立上有効であろう。

何分熔接関係でも甚大なものであるから、緊要なものから逐次とり上げてみよう。

米 軍 規 格

試験: 航空機熔接工技倆検定

MIL-T-5021 (1949-7-29)

1. 適 用

本規格は 1944-5-5 制定せられた AN-T-38a を旧規格とするもので、AN (空海軍規格) が Federal Specification (国家規格) に統一せられてすべて MIL 規格となったものの一つで、T は Test の T である。本規格は酸素アセチレン焰、酸素素焰、原子素素アーク、炭素アーク、金属アークおよび不活性ガスアーク熔接等を含む融接法に適用され、航空機々体、機体部品および附属品の熔接に従事する熔接工の資格検定の方法を示すものである。受注契約が成立してもその契約の部品について熔接工の技倆検定

* 正員 株式会社 電元社製作所