

曲線プレートガーダー腹板の疲労強度に関する実験的研究

An Experimental Study on Fatigue Strength of Web Plate
in Horizontally Curved Plate Girder

中井 博^{*}・北田俊行^{**}・石崎 浩^{***}・明橋克良^{****}

By Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Hiroshi ISHIZAKI
and Katsuyoshi AKEHASHI

This paper presents the fatigue strength of the fillet weld joints at the web and flange plates in a horizontally curved plate girder. Such a type of fillet weld joint is repeatedly subjected to not only the longitudinal flexural in-plane stress but also out-of-plane bending stress due to the curvature of web plate. Firstly, an approximate formula for estimating the maximum out-of-bending stress in the web plate is proposed for the sake of the fatigue design use. Secondly, three curved plate girder models were fabricated on the basis of the statistical survey of the horizontally curved plate girder bridges constructed in Japan. These stress distributions were examined through the tests on model girders and the analyses by means of a finite element method considering the geometrical non-linearity. Thus, the model girders were tested up to the fatigue failures. The fatigue strength of these fillet weld joints was discussed from their tests.

1. まえがき

近年、都市高迅速道路橋などにおいては、立地条件の厳しさから、曲線桁橋を使用する機会がますます増大してきている。曲線桁の静的・動的挙動や耐荷力について取り扱った研究については、これまで数多く発表されており、実際の設計にもそれらの成果が取入れられている¹⁾。しかし、鋼曲線桁の疲労強度に着目した研究は少なく、著者らの知るかぎり、米国のCURT²⁾(Consortium of University Research Teams)により耐荷力を基礎として提案された曲線桁腹板の幅厚比規定(AASHTO)³⁾を、疲労強度の面から検討した研究⁴⁾があげられるだけである。わが国の道路橋示方書⁵⁾では、直線プレートガーダー腹板の幅厚比パラメーター($\zeta = (h_w/t_w) \sqrt{\sigma_{yw}/E}$)の上限値を、板の曲げ座屈に基づいて設定しているが、曲線プレートガーダーの腹板の幅厚比や疲労強度については、全くふれられていない。

曲線桁橋特有の疲労損傷事例は、現在のところあまり報告されていないようである。しかしながら、曲線桁では、直線桁の場合と異なり、曲率の影響のため、フランジと腹板との隅肉溶接部に大きな面外曲げ応力が発生する。また、垂直・水平補剛材を持つ主桁は曲げ・ねじりの複雑な応力を受けるのみならず、横桁、対傾構あるいは横構も直線プレートガーダーと異なり、一次部材と考えられるため、大きな応力が常時発生し、疲労亀裂が生じやすいと思われる。したがって、曲線プレートガーダーの疲労強度については、わが国

^{*} 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

^{**} 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

^{***} 阪神高速道路公団 (〒541 大阪市東区北九太郎町 4-68)

^{****} 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

でも検討する必要があると考えられる。これらの数多くの課題のうち、本研究では、曲線桁腹板の面外たわみに起因する面外曲げ応力が腹板とフランジとの隅肉溶接部に及ぼす疲労強度について焦点を絞った研究を行った。

この種の研究として、Yen⁶⁾とOstapenko⁷⁾とは、直線プレートガーダーを対象にし、腹板の面外たわみの実測値を用いて、差分法で数値解析的に隅肉溶接部である腹板の上下線に生じる2次曲げ応力を求め、この応力の全振幅と疲労亀裂の発生までの繰返し回数との関係を示している。また、前田・大倉は、有限要素法を用いた有限変位解析を用い、直線プレートガーダー腹板の面外たわみ挙動と2次曲げ応力に及ぼす諸因子との影響を調べ、腹板の面外曲げに起因する疲労亀裂の研究^{8)~9)}を行っており、さらに疲労の観点から腹板幅厚比の限界値を考察している¹⁰⁾。

このような面外曲げ応力は、直線プレートガーダーの実橋においても、実測されており、相当な頻度で発生しているとの報告もある¹¹⁾。とくに、曲線桁では、腹板が曲率を有しているために、引張および圧縮フランジの隅肉溶接部で常時面外曲げ応力が発生するため、腹板とフランジとの隅肉溶接部の疲労強度に関しては、直線プレートガーダーよりも、かなり厳しい条件下にあるものと思われる。

そこで、本研究では、まず面外曲げ応力の発生メカニズムについて明らかにするため、曲線桁を簡単な梁モデルに置き換え、簡易解析法を誘導する。つぎに、曲線プレートガーダーの弾性有限変位挙動を考慮した有限要素法¹²⁾との対比を通じてパラメトリック解析を行い、腹板の形状・寸法の影響を明らかにする。また、実績調査結果¹³⁾を参考にして、厳しい面外曲げ応力を受ける実験供試体の設計を行う。さらに、この供試体を用いて、上述の静的挙動を確認ののち、疲労実験を行い、面外曲げに起因する曲線プレートガーダーの腹板とフランジとの隅肉溶接部の疲労強度について検討を試みる。

2. 腹板の面外曲げ応力とたわみとのパラメトリック解析

疲労設計を行う際に、着目点に発生する応力を、定量的に把握することは、重要な課題である。そこで、引張・圧縮フランジと腹板との隅肉溶接部に発生する腹板の面外曲げ応力の簡易的な算出法を、以下に示すような方法で誘導した。

(1) 面外曲げ挙動の発生メカニズム

まず、曲線プレートガーダーの腹板を、Fig. 1(a)に示すように、フランジと間隔 a で配置された垂直補剛材とで区切られた純曲げを受ける幅 a 、高さ h_w 、板厚 t_w で、曲率半径 R を持つ単一パネルの曲板にモデル化する。ここで、腹板の中立軸 $N-N$ から、任意点 x だけ離れた断面における垂直応力 σ_{ln} は、有限変位挙動を無視した線形の梁理論に従って、以下のように近似する。

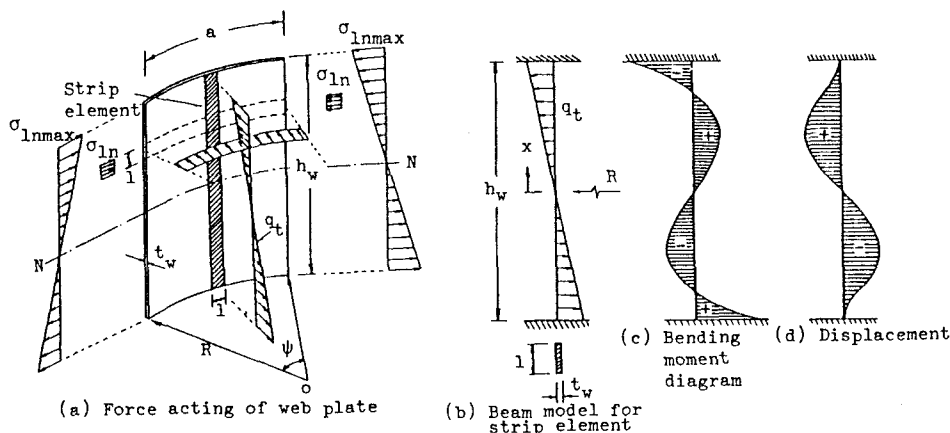


Fig. 1 Analytical model of web plate with curvature

$$\sigma_{1n} = \sigma_{1n\max} \left(\frac{2x}{h_w} \right) \quad \dots(1)$$

ここに、 $\sigma_{1n\max}$ ：初等梁理論により求められた 腹板に作用する最大垂直応力

すると、Fig. 1(a)中の点線で示した 腹板高さ方向に作用する面外力 q_t は、腹板単位幅当りの断面 ($A_w = 1 \times t_w$) に作用する橋軸方向に働く垂直応力 σ_{1n} の合力 $\sigma_{1n} A_w$ が、曲率半径 R を有するための半径方向の分力として求めることができる。すなわち、

$$q_t = \frac{\sigma_{1n} A_w}{R} \quad \dots(2)$$

つぎに、Fig. 1(a)の腹板パネル中央で斜線を施したスパン方向単位幅を持ち、フランジ辺で両端固定された梁モデルを、Fig. 1(b)に示すように取り出し、これに式(2)の q_t を作用させる。このとき、梁モデルには、Fig. 1(c)および(d)に示すように、面外の曲げ応力 σ_{tb} とたわみ δ_w とを生じ、これらは次式で求められる。

$$\sigma_{tb} = \frac{q_t t_w h_w^2}{240I} \left\{ 3 - 20 \left(\frac{x}{h_w} \right)^2 \right\}, \quad \delta_w = \frac{q_t h_w^4}{1920EI} \left\{ 4 \left(\frac{x}{h_w} \right)^2 - 1 \right\}^2 \quad \dots(3)_{a,b}$$

$$\text{ここに、} \quad I = \frac{t_w^3 \times 1}{12(1-\mu^2)} \quad : \text{腹板の曲げ剛度 (cm}^4\text{)} \quad \dots(4)$$

E ：ヤング係数 ($=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$)、 μ ：ポアソン比 ($=0.3$)

また、面外曲げ応力の最大値 $\sigma_{tb\max}$ はフランジとの取付け部 ($x = \pm h_w/2$) で、たわみの最大値 $\delta_{w\max}$ は中立軸 $N-N$ から $\sqrt{5}h_w/10$ の位置で発生し、それぞれ

$$\sigma_{tb\max} = \frac{1-\mu^2}{10} \sigma_{1n} \left(\frac{a}{R} \right) \left(\frac{h_w}{a} \right) \left(\frac{h_w}{t_w} \right), \quad \delta_{w\max} = \frac{\sqrt{5}(1-\mu^2)}{1250} \frac{\sigma_{1n} h_w}{E} \left(\frac{a}{R} \right) \left(\frac{h_w}{a} \right) \left(\frac{h_w}{t_w} \right)^2 \quad \dots(5)_{a,b}$$

で与えられ、曲線桁固有のパラメーター a/R 、 h_w/a および h_w/t_w だけで、面外最大曲げ応力と面外最大たわみを表すことができる。

(2)面外曲げ応力とたわみの変動

以上の解析では、文献12)や13)で明らかにされているような腹板の非線形挙動を無視した。また、実際の曲線プレートガーダーの腹板には、必ず初期たわみが存在し、この初期たわみが偏平シェルとしての非線形挙動を呈し、それが面外曲げ挙動に影響を及ぼす。ちなみに、わが国の道路橋示方書⁵⁾では、直線プレートガーダーにおける腹板の高さ方向の許容初期たわみ量 w_0 を、 $h_w/250$ まで許している。

これらの挙動を考慮して、面外曲げ応力やたわみをできるだけ簡単に求め、疲労解析に役立たせる必要がある。そこで、式(5)の中に上述の初期たわみ w_0 を考慮し、さらに有限変位挙動を考慮した有限要素法の解析結果を加味することとした。

実際の初期たわみ w_0 は、垂直補剛材の取付け位置によって、曲率を増加、あるいは、減少させる様々な値をもち、その分布形状も変化する¹⁴⁾。Fig. 2に示すように、中央縦距 ($=a^2/8R$) の項に、初期たわみ量 w_0 を加算することによって、これらの影響を考慮している。

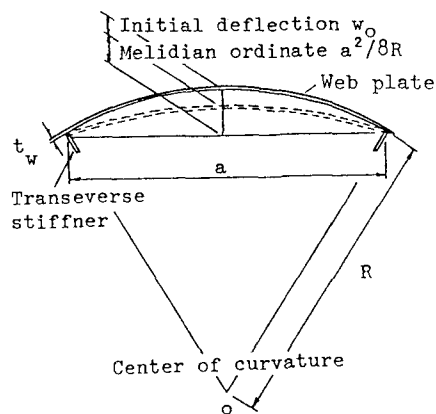


Fig. 2 Melidian ordinate $a^2/8R$ and initial deflection w_0 of curved web panel

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tb\max} &= \frac{4(1-\mu^2)}{5} \sigma_{1n\max} \left(\frac{h_w}{a} \right) \left(\frac{h_w}{t_w} \right) \left(\frac{a}{8R} + \frac{h_w}{a} \cdot \frac{w_0}{h_w} \right) \\ \delta_{w\max} &= \frac{4\sqrt{5}(1-\mu^2)}{625} \frac{\sigma_{1n\max} h_w}{E} \left(\frac{h_w}{a} \right) \left(\frac{h_w}{t_w} \right)^2 \left(\frac{a}{8R} + \frac{h_w}{a} \cdot \frac{w_0}{h_w} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots(6)_{a,b}$$

ここに、 $a/8R$ は腹板パネルの中央縦距 $a^2/8R$ に相当する項で、また $(h_w/a)(w_o/h_w)$ は初期たわみ w_o に相当する項であるが、上述のわが国の道路橋示方書に準じて桁高 h_w と関連させている。ここでは、幅厚比パラメーター $\zeta (=h_w/t_w \sqrt{\sigma_y/E})$ が、わが国の道路橋示方書の限界値（たとえばSS41材で、5.14）のとき、有限変位を考慮したF.E.M.解析（初期たわみとして、 $h_w/250$ を考慮）の結果¹²⁾と等しい $\sigma_{tb\max}$ が得られるような仮定の初期たわみ w_o を導入することとした。これらの結果の一例を、Table 1に示す。ただし、最大垂直応力 $\sigma_{1n\max}$ が降伏点 σ_y に達したときの最大面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ は σ_y で無次元化して $\sigma_{tb\max}/\sigma_y$ と表し、最大面外たわみ $\delta_{w\max}$ は腹板高さ h_w で無次元化して $\delta_{w\max}/h_w$ と表している。

このようにして、式(6)から求められた $\sigma_{tb\max}/\sigma_y$ と曲率パラメーター a/R 、および、 ζ との関係をプロットすると、Fig. 3(a)が得られる。さらに、 $h_w/\delta_{w\max}$ と a/R 、および、幅厚比パラメーター ζ との関係をプロットすると、Fig. 3(b)となる。

Table 1 Analytical results at slenderness ratio $\zeta=5.14$

Items a/R	$\sigma_{tb\max}/\sigma_y$			$h_w/\delta_{w\max}$		
	Eq. (6) _a	F. E. M.	w_o in Eq. (6) _a	Eq. (6) _b	F. E. M.	w_o in Eq. (6) _b
0.050	0.969	0.917	h_w/∞	303	319	$h_w/3000$
0.025	0.807	0.807	$h_w/700$	340	340	$h_w/500$
0.010	0.696	0.707	$h_w/450$	361	364	$h_w/325$

Note : $h_w/a=1.314$, $h_w/t_w=152$

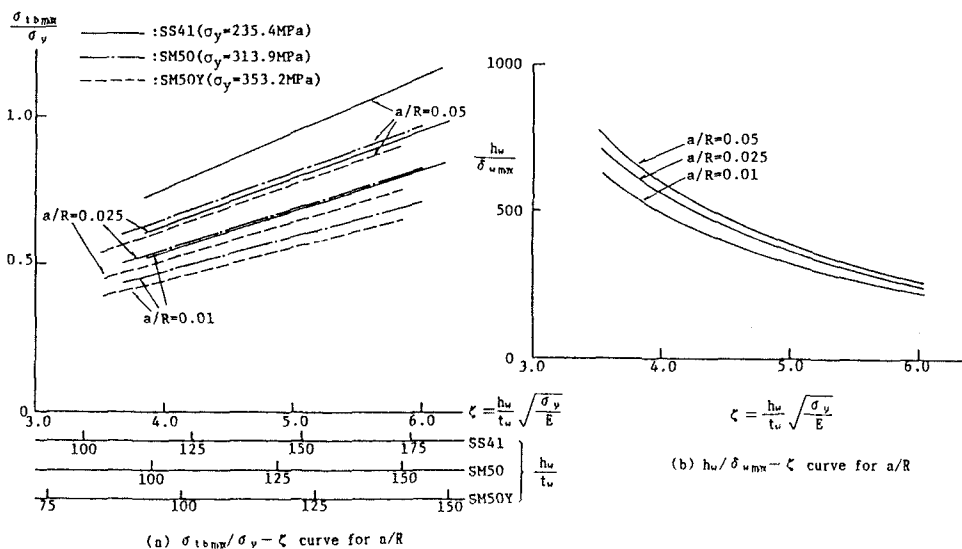


Fig. 3 Variations of out-of-plane bending stress $\sigma_{tb\max}$ and deflection $\delta_{w\max}$

同図(b) から、垂直補剛材間隔と曲率半径の比 a/R を大きくすると、面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ は大きくなるが、腹板の幅厚比パラメーター ζ を小さくすると、面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ を低減できるなど曲線桁の疲労設計に際し、腹板の面外曲げ挙動が迅速かつ定量的に判断し得る有用な資料が提供されたものと考える。

3. 実験供試体

前節で述べた簡易解析法から、各種パラメーターが最大面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ に与える影響が明らかになった。これらの結果を参考にして、実験供試体の諸寸法を決定した。

Table 2 Cross-sectional properties and parameters of test specimens

Items Specimens	Cross-sectional area (cm ²)			Moment of inertia (cm ⁴) I	Radius of gyration(cm) r	Curva- ture a/R	Aspect ratio a/h _w	Cross- sectional area ratio A _f /A _w	Web plate Slender- ness ζ
	A _f	A _w	A						
CF-1	10.723	13.883	35.329	14164	20.02	0.05	0.751	0.772	5.77
CF-2	11.140	14.371	36.651	14601	19.96		0.762	0.775	5.66
CF-3	10.017	14.544	35.884	13453	19.36		0.751	0.774	5.68

Notes : $\zeta = h_w/t_w \cdot \sqrt{\sigma_y/E}$. σ_y :Yield point, E:Young's modulus

その際、腹板の最大面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ は、最大垂直応力 $\sigma_{1n\max}$ と等しくなる状態が実橋において最も厳しい状態になると考えられる¹⁵⁾。このような状態を再現するように、実験供試体の各種パラメーターを抽出した。そして、 $\sigma_a = 137.3\text{MPa}$ (1400 kgf/cm²)となるような上限荷重が実験供試体に作用するときの腹板のせん断応力度、垂直補剛材剛度、および、垂直補剛材間隔などの照査も、わが国の道路橋示方書⁵⁾に従って行い、設計基準を満たすように実験供試体の設計を行った。ただし、腹板の板厚は、載荷荷重の制約から $t_w = 3.2\text{mm}$ とした。

実験供試体の実測寸法に基づいて求めた供試体の断面諸定数と各種パラメーターとをTable 2に、供試体製作に用いた鋼板(SS41材)の機械的性質をTable 3に示す。

4. 疲労実験

(1)実験方法

Fig. 4に示すように、両端が単純支持された曲線プレートガーダーに2点載荷して、試験パネルを純曲げの状態にセットされるようにした。フランジと腹板との隅肉溶接は、1.2mmの溶接棒を用い、脚長4mm、電圧200V、電流32A、速度450mm/min.の自動溶接で行われた。Photo 1 には、実験装置の全景を示す。

繰り返し載荷する最大面外曲げ応力の振幅は、実橋に作用する自動車荷重の大きさとその頻度を参考に決定することが最善と思われる。しかし、本研究では、腹板に発生する面外曲げ応力が腹板の疲労強度にどのような影響を与えるかについて検討することを第一の研究目的としているため、実際的な見地からは若干大きいと思われるが、最大垂直応力の振幅(正弦波、3Hz)が許容応力 $\sigma_a = 137.3\text{MPa}$ (1400kgf/cm²)に等しくなる荷重を想定して疲労実験を行うことにした。したがって、各実験供試体の中央の試験パネルでは、腹板の最大面外曲げ応力がおよそ137.3MPaになるような荷重を繰り返し荷重として作用させた。

Table 3 Material constants of test specimens

Item Specimens	E(MPa)	μ	G(MPa)	σ_{wy} (MPa)	σ_{fy} (MPa)
CF-1	2.08×10^5	0.304	8.01×10^4	294.7	322.1
CF-2				300.4	313.8
CF-3				273.6	279.5

Notes : E:Young's modulus, μ :Poisson's ratio, G:Shear modulus of elasticity, σ_{wy} , σ_{fy} :Yield stress of web and flange plate, respectively

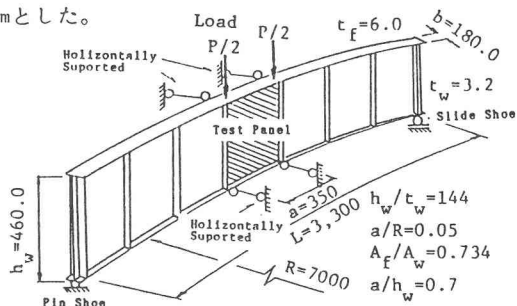


Fig. 4 Details of test specimen(Dimension:mm)

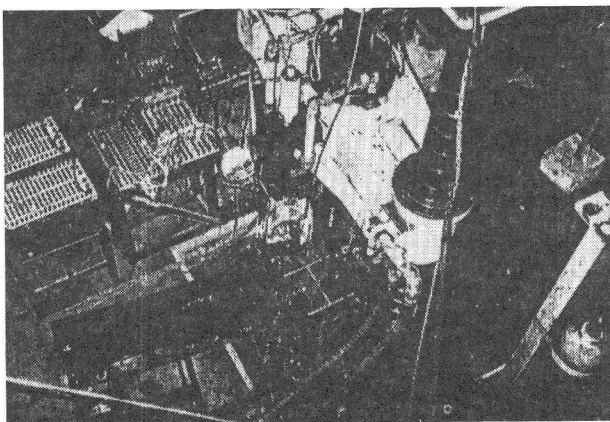


Photo. 1 General view of test apparatus

(2) 残留応力

疲労実験終了後の実験供試体 (CF-2) を利用し、残留応力を測定した。その結果を、Fig. 5に示す。

この図から、フランジ・プレート内の残留応力分布は、いままでに報告されている分布形状と類似しているが、腹板の残留応力分布はかなり乱れていることがわかる。これは、供試体製作の際、溶接によるひずみをスポット・ヒーティングにより矯正したためと思われる。また、桁深さ方向の残留応力は、フランジと腹板の取付け部でほぼ0になっており、面外曲げ応力の繰り返しは、はば片振りの状態になると思われる。

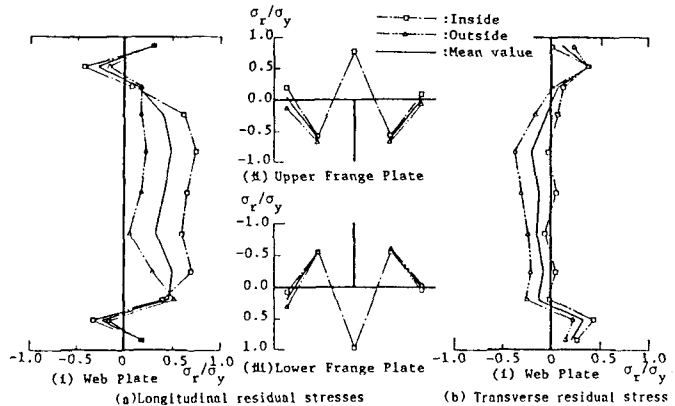


Fig. 5 Measured residual stress in test specimens

(3) 静的载荷実験

疲労実験を行う前に、静的载荷実験を行い、実験に用いた供試体の静的挙動を把握した。

a. スパン中央断面の応力分布

Fig. 6(a)および(b)には、スパン中央断面の垂直応力、および、腹板に発生する面外曲げ応力分布のF.E.M.解析値と実測値を示す。これらの図は、腹板直上のフランジにおける応力が許容応力度 $\sigma_a = 137.3 \text{ MPa}$ (1400 kgf/cm^2)に達するときの応力分布であり、応力をすべて σ_a で無次元化している。また、Fig. 6(c)には、腹板に働く面外曲げ応力を最小自乗法で整理して求めた圧縮・引張両側の最大面外曲げ応力も、式(6)で求めた値とともに示してある。

この図から、垂直応力分布が供試体CF-3では、有限要素法による解析結果とよく類似した非線形性を呈しており、供試体CF-1,2では、有限要素法で解析した結果と異なり、圧縮側と引張側とで対称な分布形を呈している。面外曲げ応力分布は各供試体で異なり、CF-2でかなり小さな値となっているが、CF-1の最大値は簡易解析法で求められた値と類似している。供試体CF-2およびCF-3で、小さな面外曲げ応力が出ているのは、解析に用いた初期形状と実際の初期形状 (腹板中央での初期たわみは、CF-1が曲率の外側に $h_w/920$ 、CF-2が内側に $h_w/3087$ 、CF-3が外側に $h_w/279$ である) とが、これらの供試体によって相違しているためである。

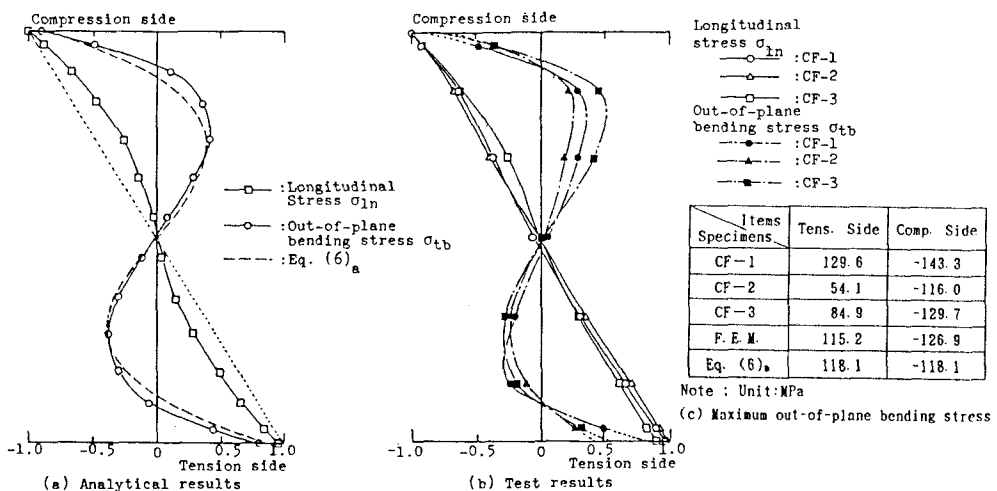


Fig. 6 Analytical and measured stress distributions σ/σ_a in cross-section at midspan

そこで、最大面外曲げ応力としては、Fig. 6(c)の実測値を最小自乗法で整理した最大値で以下整理することにした。

b. 腹板の面外たわみ

Fig. 7には、実験供試体腹板の面外たわみ δ_w と作用曲げモーメントとの関係をプロットした。縦軸は作用モーメント M を腹板直上のフランジの垂直応力が許容応力に達するときの曲げモーメント M_a で無次元化したものにとっている。横軸は、面外たわみが最大になる圧縮側の腹板とフランジの結合部から $0.23h_w$ の位置における値を示す。

また、図中には、F.E.M. 解析値と式(6)とで求めた値もプロットした。

この図から、供試体CF-1, 2の実験値は、両方とも両解析値に比べ、小さめの値を示している。これは、前述の応力分布と同様に、初期たわみ形状が大きく影響しているものと思われる。また、圧縮フランジから $0.23h_w$ 近傍の面外曲げ応力の大きさも、この面外たわみと相関している。

(3) 疲労実験

a. 破壊状況

すべての供試体に 200 万回以上の繰返し荷重を載荷したが、本研究の着目点である腹板とフランジとの隅肉溶接接合線上において疲労亀裂は確認されず、その他の箇所が発生した亀裂によって実験供試体は、破壊に至った。

供試体CF-1, 2の破壊は、それぞれ曲率の外側、および、内側における載荷荷重直下の圧縮フランジと垂直補剛材との結合部から約 160 万回で亀裂が生じ、圧縮フランジが破断し、腹板にまで進展した (Photo. 2参照)。これは、載荷荷重による応力集中現象によるものと思われる。また、ピン治具と供試体とを接合するボルト孔 (圧縮側フランジ) から、小さな亀裂が発生していた。

供試体CF-3では、引張フランジにおける面外方向変位の拘束治具の取付部から亀裂が生じ、腹板の中央付近まで急速に進展し、約 560 万回で破壊に至った (Photo. 3参照)。

b. 疲労実験結果の評価

腹板の面外曲げ応力に起因する腹板とフランジとを連結する溶接線に関する疲労実験結果を、Fig. 8に示す。この図の中には、参考のため、前田・大倉¹⁶⁾が行ったT型試験片

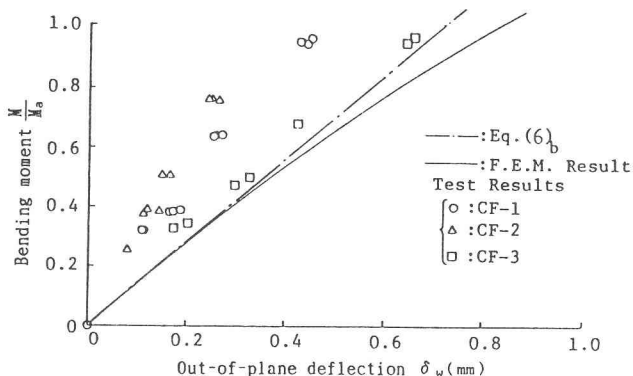


Fig. 7 Relationship between bending moment M/M_a and maximum out-of-plane deflection δ_w

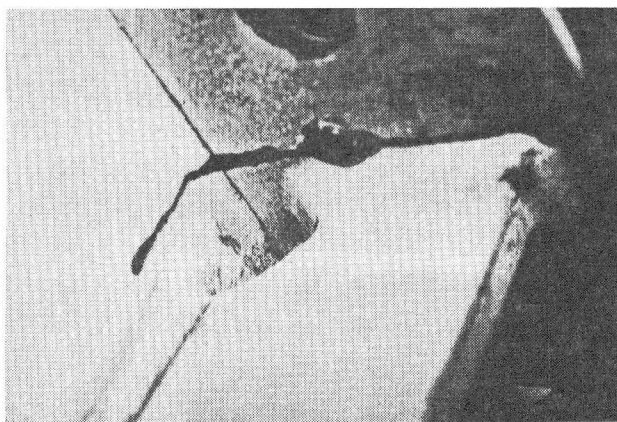


Photo. 2 Fatigue failure of test specimen CF-2

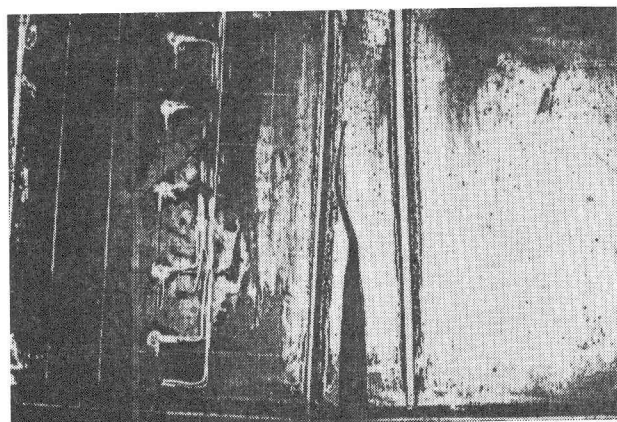


Photo. 3 Fatigue failure of test specimen CF-3

に曲げを加えた疲労実験により求めたS-N曲線もプロットしている。

この図から、本実験の供試体では、実橋において最大と思われる面外曲げ応力が腹板に作用するにもかかわらず、この面外曲げ応力は曲線プレートガーダーの200万回強度には影響を与えないことがわかる。また、実験値には面外曲げ応力と面内曲げ応力が連成しているが、曲げ応力のみによって求められたS-N曲線を満足していることがわかる。

実橋の曲線プレートガーダーの腹板とフランジとの隅肉溶接部においては、曲率と初期たわ

みによる腹板の面外たわみにより、相当に大きい面内曲げ応力の最大値と同等な面外曲げ応力が作用するものと考えられる。しかし、実橋では、必ずしも許容応力 σ_a にも達する面外曲げの繰り返し応力が発生するとは限らず、最も厳しい場合を想定して、 σ_a に達する面外曲げの繰り返しが発生するとした場合でも、この溶接部では、亀裂は発生しなかった。したがって、曲線桁の腹板とフランジとの隅肉溶接接合部は、疲労強度の面から考えると、十分な安全性を有していることがわかった。

5. まとめ

本研究は、曲線プレートガーダーの面外たわみに起因する繰り返しの面外曲げ応力が、腹板とフランジとの隅肉溶接部に及ぼす疲労強度について実験的に明らかにするため、面外曲げ応力の簡易計算法を誘導し、実橋で生じていると思われる最大の面外曲げ応力が再現でき得る曲線プレートガーダーの模型を製作し、それらの疲労実験を行ったものである。

本研究において得られた結論を要約すると、以下ようになる。

- (1) 曲線プレートガーダー腹板を単純な梁モデルに置き換え、面外方向に作用する外力から、最大面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ と最大面外たわみ $\delta_{w\max}$ との簡易計算法を誘導した。
- (2) 垂直補剛材間隔と曲率半径との比 a/R を大きくすれば、面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ は大きくなるが、腹板の幅厚比 h_w/t_w を小さくすれば、面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ を低減できることがわかった。
- (3) 実橋を対象としたパラメトリック解析の範囲内では、面内曲げによる最大垂直応力 $\sigma_{n\max}$ と同等の面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ が発生し、この状態になるような供試体を製作した。
- (4) 面外曲げ応力分布の実測値は各供試体で異なり、最大面外曲げ応力 $\sigma_{tb\max}$ も相違した値を示した。これは腹板の初期たわみの量と形状とによるものと思われ、面外たわみの挙動もこれと同様な傾向を示した。
- (5) 各供試体において、200万回以上の载荷にもかかわらず、腹板とフランジとの隅肉溶接接合線上で、亀裂は確認されなかった。しかし、荷重直下の圧縮フランジと垂直補剛材との結合部、または、引張側の面外方向支持治具の取付け部から亀裂が生じ、疲労破壊に至った。
- (6) 腹板とフランジとの結合部における疲労強度を前田・大倉らのS-N曲線上にプロットすると、実験値は、この式を満足していた。
- (7) 現行の道路橋示方書に従って設計された曲線プレートガーダーの腹板とフランジとの接合部は、疲労強度の面から考えると、安全であると思われる。
- (8) 今後、曲線桁における垂直・水平補剛材、横桁、対傾構・横構などの取付け部に作用する局部応力を把握し、これらの部材に着目した研究を行うことが、曲線桁の疲労特性を把握する上で重要な課題であることがわかった。

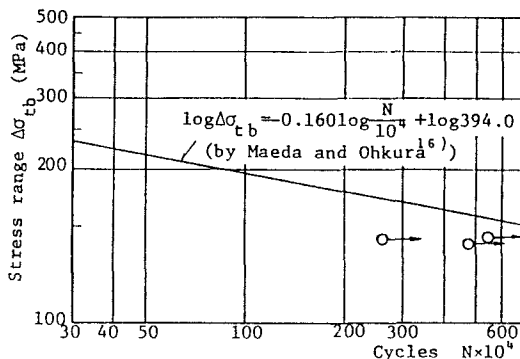


Fig. 8 S-N curve for out-of-plane bending stress

謝辞

本研究を行うに当たり、種々な御配慮およびご協力を受け賜った(株)横河橋梁製作所・技術研究所 寺田博昌所長および同 岩崎雅紀氏に厚く御礼申し上げます。

なお、本研究は、昭和63～64年度文部省科学研究費一般研究(B)：曲線プレートガーダーの疲労強度からみた限界状態設計法に関する研究(代表者 中井博)の一部として行っているものであることを付記する。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・鋼構造検討委員会：曲線桁橋設計の手引き(案)、昭和63年8月
- 2) CURT: Tentative Design Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges, Part of Final Report, Research Project HPR2-(111)"Horizontally Curved Highway Bridges," Prepared for U. S. D. O. T. by CURT, March 1975.
- 3) AASHTO: Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges, 13th ed., 1983
- 4) Federal Highway Administration: Fatigue of Curved Steel Bridge Elements -Design Recommendations for Fatigue of Curved Plate Girder and Box Girder Bridges, FHWA-RD-79-131～138, August 1980
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、丸善、昭和55年2月
- 6) Mueller, J. A. and B. T. Yen: Girder web boundary stresses and fatigue, WRC, Bull. No. 127, Jan., 1986
- 7) Parsanejad, S. and A. Ostapenko: On the fatigue strength of unsymmetrical steel plate girders, WRC, Bull. No. 156, Nov., 1970
- 8) 前田幸雄・大倉一郎：プレートガーダーウェブの初期たわみと疲労亀裂発生との相関に関する研究、土木学会論文集、第319号、pp. 1～pp. 11、1982年3月
- 9) 前田幸雄・大倉一郎：薄板の面外変形に起因する疲労亀裂に与える初期たわみの影響、土木学会論文集、第329号、pp. 1～11、1983年1月
- 10) 大倉一郎・福本秀士：疲労を考慮した薄肉プレートガーダーのウェブの使用性限界、昭和63年度 土木学会関西支部年次学術講演概要集、I-28、1988年4月
- 11) 中井・黒山・酒井・高田・栄羽：鋼橋の疲労に着目した道路橋の現場計測結果について、昭和63年度 土木学会関西支部年次学術講演概要集、I-27、1988年4月
- 12) 中井博・北田俊行・大南亮一・川井正：曲げを受ける曲線桁腹板の解析と設計に関する一研究、土木学会論文集、第368号/I-5、pp. 235～244、1986年4月
- 13) Culver, C. G., Dym, C. L. and Brogan, D. K.: Bending Behavior of Cylindrical Web Panel, Proc. of ASCE, Vol. 98 No. ST-10, pp. 2201～2308, Oct. 1972
- 14) 中井博・松村駿一郎・吉川紀・北田俊行・大南亮一：曲線桁橋の実績調査、橋梁と基礎、Vol. 15, No. 4, pp. 38～43、1981年5月
- 15) 中井博・北田俊行・大南亮一：曲線桁橋腹板の曲げ強度に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第340号、pp. 19～28、1983年12月
- 16) 前田幸雄・大倉一郎・西山六朗：T型隅肉溶接継手の横曲げ疲労に関する研究、第33回 土木学会年次学術講演会講演概要集、I-336、1978年11月

(1988年10月12日 受付)