

初期たわみを有する曲線桁腹板パネルの 面内曲げによる弾性非線形挙動

NONLINEAR BENDING BEHAVIOR OF CURVED GIRDER-WEB WITH INITIAL DEFLECTIONS

藤井 堅* 大村 裕**

By Katashi FUJII and Hiroshi OHMURA

Elastic bending behavior of curved girder-web with initial deflections is analyzed. The curved web panels are fixed supported along both flange-web connections and simply supported along another straight edges where bending moment acts.

The influence of initial deflections on the behavior of web panels is investigated in connection with the direction of initial deflection as well as the size of it. It is shown that the important factor for the behavior is the figure of web panel formed by the curvature and the initial deflection.

1. まえがき

曲線桁に曲げが作用すると、曲率に起因して、腹板はたとえ荷重が小さくても面外にたわみを発生する。従来、鉛直補剛材とフランジで囲まれた腹板パネルに対し、シェル理論を適用して腹板の力学性状を説明する¹⁻⁶⁾、あるいはフランジをも考慮して曲線桁の断面変形挙動を説明する⁷⁻¹²⁾といった試みがいくつかなされている。しかしこれらの諸研究のうち、桁製作上不可避ともいえる腹板の初期たわみを考慮したものは、わずかに中井・北田・大南・川井⁹⁾、藤井・大村⁶⁾の研究がある程度で、ほとんどが考慮しておらず、腹板の初期たわみが曲線桁の力学性状にどのような影響をおよぼすかという問題については、現状では十分な基礎資料は得られていない。

最近の世界的趨勢として、許容応力度設計法から鋼構造物の終局強度に基準をおく限界状態設計法へ移行しつつあるが、腹板初期たわみが曲線あるいは直線プレートガーダーの曲げ終局強度に大きく影響するのは明らかである。したがって、初期たわみを有する腹板の曲げ挙動を把握しておくことは、終局強度設計法の確立といった面からも工学的な重要課題といえる。

曲げ状態にある曲線桁の腹板は、幾何学的非線形性が顕著に現われ、初期たわみがない場合でも複雑な挙動を呈するが、さらに初期たわみがある場合にはその挙動は一層複雑である。曲線桁の腹板は曲率を持つので、いうまでもなく平面ではない。したがって直線桁とは異なり、初期たわみは大きさのみならず、その方向も重要な影響因子となり^{9, 13)}、初期たわみの大きさが同じでもその方向が異なると、腹板の挙動は全く

* 工博 広島大学助手 工学部第四類(建設系) (〒724 東広島市西条町大字下見)

** 工博 広島大学教授 工学部第四類(建設系) (〒724 東広島市西条町大字下見)

異なったものになる。

本論文は、幾何学的非線形を考慮した円筒殻の有限要素解析を行って、初期たわみを有する曲線桁腹板パネルの弾性非線形曲げ挙動の解明を試みたものである。解析には、すでに筆者らが曲線桁解析用に開発している板殻構造解析プログラム¹¹⁾を使用し、フランジと鉛直補剛材で囲まれた腹板パネルについて解析した。また、荷重増分制御と変位増分制御の両方を採用し、変位制御法については、吉田、増田、松田¹⁴⁾らの解析法を適用した。

2. 解析パラメータ

(1) 解析モデルと境界条件

解析に使用した腹板パネルは、図-1 a)に示すような曲率半径 $R=30\text{m}$ 、桁高 $h=120\text{cm}$ 、板厚 $t_w=4\text{mm}$ の曲面板で、曲率パラメータ $\gamma(=h^2\sqrt{1-\nu^2}/R/t_w)=11.45$ である。また、縦横比 $l/h=1.0$ で、両端を結ぶ弦からの中央部の膨らみ量 δ (以下ではこれをライズと呼ぶ)と板厚の比 $\delta/t_w=1.5$ である。ここに $l=\alpha R$ で、 α は腹板パネルの開角を示す。採用した腹板幅厚比 $h/t_w=300$ は実用範囲を越えてかなり大きい、これは曲面板の力学特性をより顕著にするためと、腹板は後座屈強度が期待できるので、終局強度設計法に移行した場合大きな腹板幅厚比が使用可能となることも予想され、きわめて薄い腹板の解析資料も今後必要となると考えたためである。なお、本解析は弾性解析としたが、曲面板の弾性挙動については曲率パラメータ γ および荷重係数 k をパラメータとするパラメトリック解析が可能で^{3, 11)}、腹板幅厚比の直接的な影響はなくなる。ここに荷重係数 k は座屈係数に対応するもので、

$$k = \sigma_m \cdot h^2 t_w / \pi^2 / I_w \quad \dots \dots \dots (1)$$

である。上式で、 $\sigma_m(=Mh/2I_w)$ は梁理論から得られる縁応力、 M は腹板パネル端の曲げモーメントを示し、 $I_w=t_w h^3/12$ は腹板の断面2次モーメント、 $D_w=E t_w^3/12(1-\nu^2)$ は腹板の曲げ剛度である。

図-1 a)には、寸法諸元、座標系のほかに変位および回転角について定義した正方向もあわせて示した。

腹板パネルの境界条件については、非載荷辺($z=0$ および h)では、三上・古西・米沢の研究³⁾、過去の板殻構造解析¹¹⁾から、実用範囲の曲線1形桁すなわち極端に薄いフランジでなければ、フランジの腹板回転角 ϕ_θ の拘束度は固定支持に近いことが指摘されている。したがって本研究では、非載荷辺はたわみ u に対して固定支持とし、載荷辺($\theta=0$ および α)では、たわみに対して単純支持とした。また、荷重に関しては、載荷辺では梁の変位場が成立し、周方向変位 v の鉛直分布が直線となるよう工夫された形で曲げモーメント M を与えている¹¹⁾。

(2) 初期たわみ

初期たわみ $u_0(\alpha, \theta)$ については、実際によくみられる周方向・鉛直方向ともに正弦半波形(1次モード)のやせ馬形を想定し、次式で与えた。

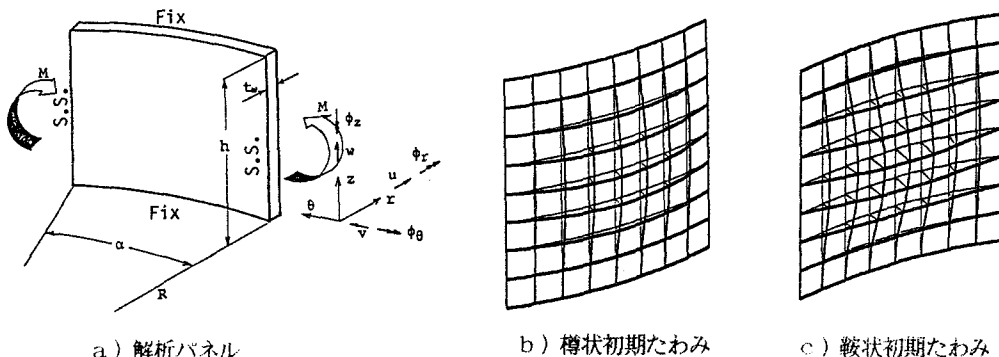


図-1 解析パネルと初期たわみ

$$u_o(\eta, \zeta) = u_{o\max} \cdot 4\pi / (4 - \pi) \cdot \sin(\pi\eta) \cdot \{\zeta^2 - \zeta + 1/\pi \cdot \sin(\pi\zeta)\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 η 、 ζ はそれぞれ $\eta = \theta/\alpha$ 、 $\zeta = z/h$ である。 $u_{o\max}$ は最大初期たわみを示し、その符号が方向を表す。すなわち、 $u_{o\max} > 0$ の場合、曲率中心と反対側の初期たわみで樽状の形状、逆に $u_{o\max} < 0$ の場合には鞍状の初期たわみ形状となる。図-1b)、c)に樽状および鞍状の初期たわみ形を示す。また、いうまでもなく $\eta = 0.5$ 、 $\zeta = 0.5$ において初期たわみは最大となる。

表-1に本研究で採用した解析ケースを示す。表中、No.1は $u_{o\max}/t_w = 1$ の樽状の初期たわみ、No.2は初期たわみがない場合、そしてNo.3～No.6は鞍状の初期たわみで、それぞれ $u_{o\max}/t_w$ が-1.0～-4.0まで変化している。曲率によるライズ δ は $\delta/t_w = 1.5$ であるから、腹板パネル中央の点(図-2、A-A、C-Cの交点)は、 $u_{o\max}/t_w \leq -2.0$ (No.4～No.6)の場合パネル両端を結ぶ弦よりも曲率中心側に位置することになる。No.4～No.6の最大初期たわみは道路橋示方書¹⁰⁾の基準($u_{o\max}/t_w \leq h/250 = 4.8\text{mm}$)を満足していないが、これらの解析ケースは、初期たわみを含めた初期の形状が、断面の位置によっては本来の曲率中心と反対側に曲率中心を有するもので、力学挙動の解明という意味では興味がある。

表-1 解析ケース

解析ケース	$u_{o\max}/t_w$
No. 1	1. 0
No. 2	0. 0
No. 3	-1. 0
No. 4	-2. 0
No. 5	-3. 0
No. 6	-4. 0

なお解析途中で不安定状態が発生したので、これを回避するため全ケースにつき表-1の初期たわみのほかに周方向および鉛直方向ともに止弦1波形(2次モード)のわずかな初期たわみ($u_{o\max}/t_w = 1/100$)を付加した。

3. 解析結果と考察

(1) 変位性状

初期たわみを考慮した弾性非線形解析を行い、得られた腹板のたわみ分布の一例を図-2に示す。図は、樽状初期たわみ(No.1)の場合であるが、図には有限要素解析に使用した要素分割と、以下で考察するために主に用いた断面あるいは点の位置をA～C、a～cを用いてあわせて示した。図から、曲げモーメントが作用すると圧縮側で腹板面外方向のたわみが大きく現われ、引張側では圧縮側ほど大きくないのがわかる。

初期たわみを有する曲線桁腹板の曲げ挙動を検討する場合、初期たわみをも含めた全たわみと、全たわみから初期たわみを差し引いたたわみ、すなわち荷重増加にともなう発生する付加たわみの両方を用いるのが、現象の把握といった面では合理的と考えられる。そこで本文では、初期たわみをも含めた腹板面外方向の全たわみを単に“たわみ”と呼ぶことにし、初期たわみを差し引いた荷重増加にともなうたわみを“付加たわみ”と呼び、両者を区別する。

曲線桁の腹板は曲率を有するために、たとえば図-2のB-B断面は、その両端を結ぶ弦に対して膨らんだ形状をしている。しかし実用範囲の曲線桁はあまり大きな曲率ではなく、中井・北田¹⁵⁾らも指摘しているように、腹板のたわみ挙動が問題となる鉛直補剛材間を基準とする場合には、両端を結ぶ弦からのライズは、

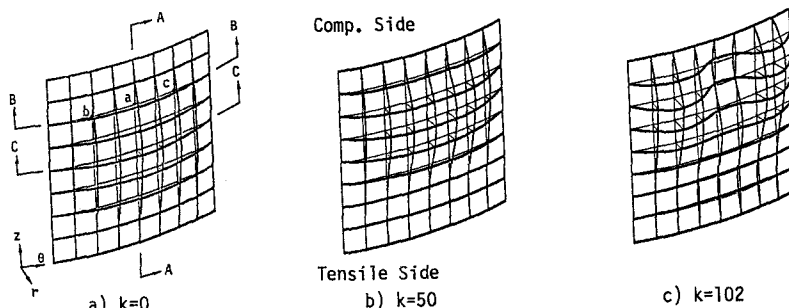


図-2 たわみ分布(No.1)

初期たわみの大きさと同程度しかない。したがって、本研究では両端を結ぶ弦を基準として、曲率によるライズ δ と初期たわみ u_0 、さらに付加たわみ u を加え合わせた量も解析結果の考察に用いる。すなわち、断面B-BあるいはC-C上の変位分布状態を表す場合には、その断面上の点は弦から $y(=\delta+u_0+u)$ だけ離れた位置へ移動することを示しており、変位後の形状を示すことになる。なお、正確にいうと、半径方向の変位(たわみ) u_0 および u 、また周方向変位 v などは円筒座標系の変位であるので、端部から x だけ離れた点において変位後の位置から弦に下した縦距 y は、 δ 、 u_0 、 u 、 v および θ を用いた三角関数で与えられる。しかし解析区間の開角 α が小さいことまた周方向変位 v はたわみ u に比べて小さいことを考慮すると、容易に $x=R\theta$ および $y=\delta+u_0+u$ が導かれる。

さて、樽状の初期たわみを持つNo.1、初期たわみのないNo.2、そして鞍状初期たわみを持つNo.4、No.6に

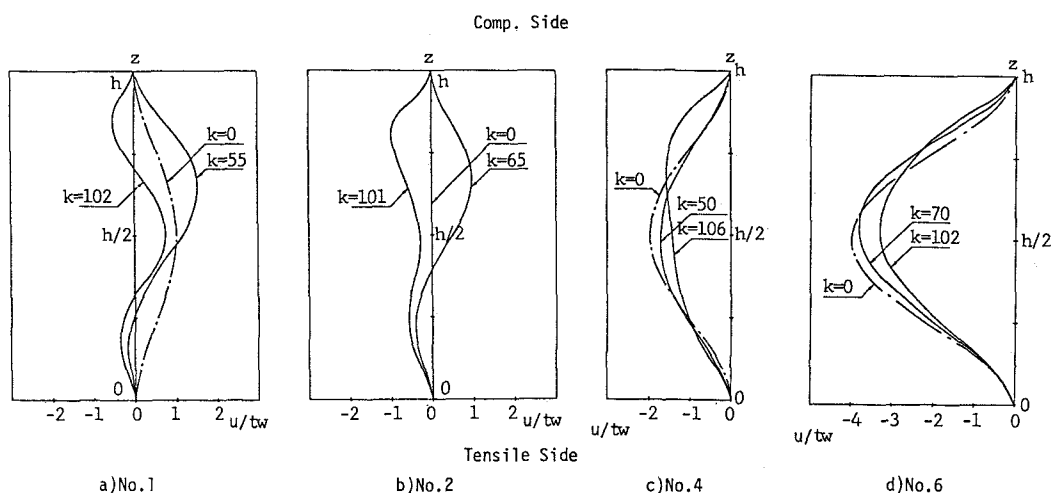


図-3 たわみの鉛直分布(断面A-A)

ついて、中央断面A-A($\theta=\alpha/2$)の鉛直方向のたわみ形状を示すと図-3 a)~d)のようになる。また図-4は、圧縮側断面B-B($z=3h/4$)の周方向のたわみ形状を示したものである。これらの図で、一点鎖線は初期形状($k=0$)を示す。

図-3から、荷重係数 $k<60$ 程度のとき、圧縮側の変位は、初期たわみが樽状の場合および初期たわみのないNo.2では、曲率中心と反対側(正方向)に付加たわみが発生する。一方、鞍状の初期たわみを持つNo.4でも、わずかではあるが正方

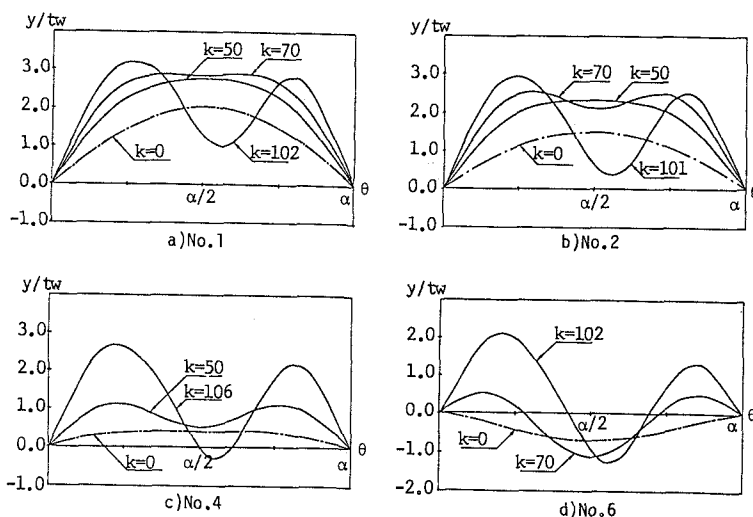


図-4 たわみの周方向分布(断面B-B)

向の付加たわみが現われているのがわかる。直線桁の場合には初期たわみの方向に付加たわみが生じるのは容易に予想されるが、このような現象は曲線桁特有の性質といえる。ところが、鞍状で初期たわみの大きいNo.6($u_{0max}/t_w=-4$)では、No.4とは異なって曲率中心側(負方向)へ付加たわみを生じている。他方、引張側の変位に注目すると、付加たわみは、圧縮側ほどは大きくないが、その発生する方向は圧縮側とは逆にNo.1～No.4は負方向、No.6では正方向であるのがわかる。また、図から樽状の初期たわみを有する場合が、引張側に発生する付加たわみは最も大きく、初期たわみ形状が鞍状のNo.4あるいはNo.6に近づくにつれてそれは小さくなる。

さらに高い荷重 $k=100$ 付近では、No.1とNo.2の圧縮側のたわみは減少する。これは、図-4に示すように、圧縮側では周方向に1次モードから正弦1.5波形(3次モード)のたわみ形へ移行するためである。そして鉛直方向のたわみ分布形は、正弦1波形のモードから正弦1.5波形モードが支配的な分布形に移行し、より高次のモードが現われる。鞍状の初期たわみの場合でもわずかながら同様な傾向がみられるが、特徴的なことは、引張側のたわみは荷重が増加してもあまり変化せずに残ること、またそれは初期状態と変わらない程度に大きいことである。

一方、図-4でも樽状と鞍状の初期たわみの違いによって、腹板の挙動にかなり大きな差異が現われている。すなわち、樽状あるいは初期たわみがない場合には、一旦は正方向に1次モードで付加たわみが生じ、 $k=70$ 程度とかなり大きい荷重になって3次モードのたわみが現われるのに対して、鞍状の場合にはすでに $k=50$ 程度で3次モードが現われている。さらに、このたわみ形状の現われ方も大きく異なっており、樽状No.1あるいはNo.2では、全体的に正方向へ変位しながら中央付近が偏平となり、その後中央付近で凹み始める。これに対して鞍状初期たわみ、たとえばNo.6では、中央付近ではほとんど変化しないでその両側($\eta=1/4$ あるいは $3/4$ 付近)が正方向へ変位する形でたわみの移行が起きる。

また、図-4から、 $k>100$ では、各ケースともたわみ形状は中央断面A-Aに関して対称でないことがわかる。これは、荷重がかなり高いレベルで分岐座屈を起こして逆対称モードが現われたためと考えられる。図-5に、樽状(No.1)および鞍状(No.4)の初期たわみを持つ腹板パネルの圧縮側の点a～cの荷重-たわみ曲線を示す。図-5からわかるように、たとえば図-5a)を例にとると、最初点aに関して対称な点bとcのたわみはほとんど一致して増加する。しかし荷重係数 $k=83.0$ で収束がきわめて悪くなり、荷重増分制御では解析不可能となった。そこで変位増分制御に変更し、さらに大きい荷重について解析すると、点bと点cのたわみに大きな差異が現われるようになる。すなわち中央断面に関して対称な点bおよび点cのたわみは、

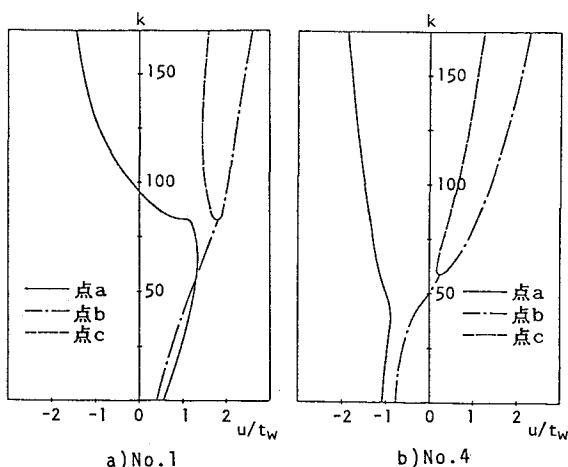


図-5 荷重-たわみ曲線

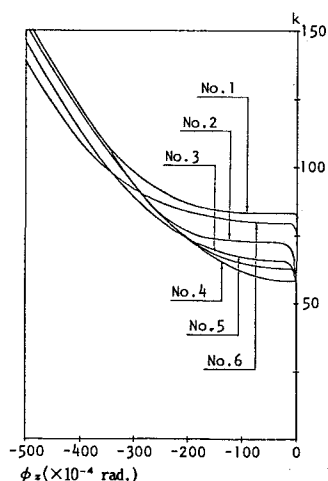


図-6 鉛直軸まわりの回転角

点bでは増加傾向を呈し、点cでは一旦減少して再び増加するという挙動が現われて、たわみの対称性が崩れる。これは、幾何学的非線形をともなった広い意味の分岐座屈と考えられるが、一旦分岐してしまうと安定となり、荷重増分制御でも解析可能となった。このような分岐現象は、他のすべての解析ケースでも、また図には示さなかったが $l/h=0.75$ の場合にも認められた。図-6は点aの鉛直軸回りの回転変位 ϕ_z を荷重とともに示したものであるが、分岐座屈荷重までは左右対称で $\phi_z=0$ であるが、分岐後は急激に ϕ_z が増加し、たわみの対称性が崩れることを示している。さらに、分岐座屈荷重が最も小さいのはNo.4で、初期たわみのないNo.2ではないことも図からわかる。また、樽状の場合、あるいは鞍状でも大きな初期たわみがある場合には、分岐座屈荷重はNo.4に比べてかなり大きくなっている。

点aの荷重-たわみ曲線を描くと図-7のようになる。図には分岐座屈荷重をあわせて示した。これらの図からも分岐荷重はNo.4付近で極小値となることがわかる。さらに付加たわみは、No.4あるいはNo.5が最も小さく、荷重が低いレベルでは、この付近の初期たわみを境として発生する付加たわみの方向が逆転することがわかる。初期たわみの大きさと方向によって付加たわみの発生する方向が異なる現象は、圧縮を受ける円筒フランジでも現われており、これについては三上・矢部¹³⁾が検討している。曲げを受ける場合におけるこの現象を明らかにするために、両端を結ぶ弦を基準としてB-B断面およびA-A断面上の初期たわみ形状を示すと図-8a)、b)のようになる。図-8b)では両端を結ぶ弦の位置を破線で示した。鞍状の初期たわみを持つNo.4、No.5は、図-8に示すように、圧縮側 $z=3h/4$ の位置(断面B-B)付近では、曲率と初期たわみをあわせた初期形状が弦(直線)に近い形状となっている。このことから、 $z=3h/4$ 付近において、曲率による形状と初期たわみを合わせた初期形状が、この弦を境としてどちら側にあるかということが、圧縮側に発生する付加たわみの方向を決定すると判断される。他方、引張側においては、No.6の付加たわみは、図-3に示すように正方向に発生している。これは図-8b)に示すように、初期形状は $z=h/4$ 付近で弦よりも曲率中心側に存在するためと考えられる。これに対して他のケースは、弦よりも曲率中心と反対側に存在するので、付加たわみが曲率中心側へ生じている。

以上のことから、荷重が比較的小さい場合($k \leq 50 \sim 60$)

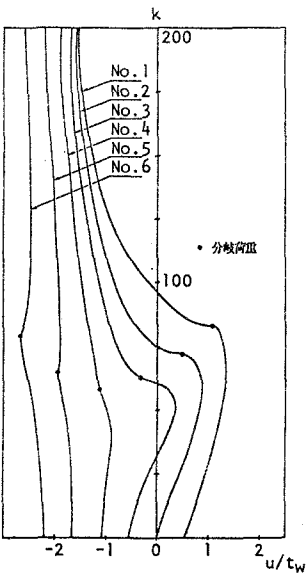
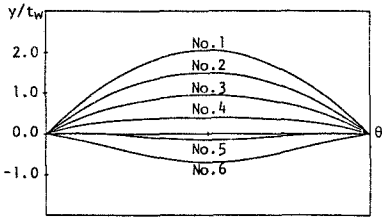
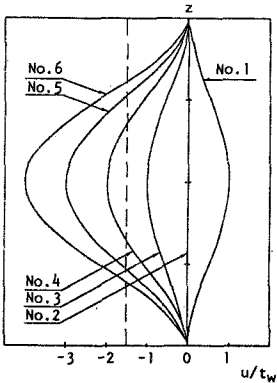


図-7 荷重-たわみ曲線(点a)



a) 断面B-B



b) 断面A-A

図-8 初期形状

曲率による形状と初期たわみからなる初期形状が、引張側圧縮側それぞれの基準位置における弦のどちら側に存在するかということが、腹板に発生する付加たわみの方向を決定し、引張側ではこの基準となる弦に近づくように変位すると考えられる。現行の道路橋示方書¹⁶⁾のプレートガーダー腹板の初期たわみの制限は、その最大値($u_{0max} \leq h/250$)が規定されているだけであるが、上記のことを考慮すると、曲線桁では初期たわみの最大値だけでは不十分で、挙動を支配する断面位置も問題となるといえる。あるいは、これを回避するために、曲率を初期たわみと同程度とみなして、両者からなる初期形状と両端を結ぶ弦を基準とするといった評価法も有効と考えられる。したがって、腹板を鉛直補剛材接合箇所適当に折りまげ、多角形の折板にした腹板を用いて曲線桁を製作する方法も、初期たわみの影響度という面からは一考する価値があると思われる。

また、図-6あるいは図-7に示すように、圧縮側で初期形状が弦に近くなるすなわち平板に近づくほど、分岐座屈荷重は小さくなる。しかし、発生する付加たわみの大きさといった観点からは、分岐座屈が小さい荷重で起こるとはいつても鞍状の初期たわみが有利といえる。

図-9は、分岐後、荷重がきわめて大きくなったとき($k=200$ 程度)のA-A断面のたわみ分布(初期たわみを含めた形状)を示したものである。図-7あるいは図-9に示すように、荷重が大きくなると圧縮側のたわみは一定値に収束する傾向を示し、初期たわみの影響は小さくなる。しかし、図-9の中央部あるいは引張側のたわみをみると、初期たわみの大きさによってかなりの差異が認められ、初期たわみの影響が残っていることがわかる。

(2) 応力性状

腹板のたわみあるいは曲率に起因して、圧縮側の周方向膜応力 σ_θ (以下では曲げ応力と呼ぶ)は直線分布にはならず、曲げ応力の欠損が起きる¹⁷⁾。この曲げ応力の分布に、初期たわみがどのように影響するかということは、きわめて興味深い問題である。腹板の曲げ応力の欠損は、腹板が分担する曲げモーメントが低下することを示しており、これが大きい場合には曲線桁の曲げ耐荷力を低下させる要因の一つとなる。

図-10(a)～(c)は、中央断面A-A($\theta=\alpha/2$)の曲げ応力の鉛直方向分布を示したものである。図で、曲げ応力は梁理論から求まる縁応力 $\sigma_m (=M/l_w \cdot h/2)$ との比 σ_θ/σ_m で表し、 $\sigma_\theta/\sigma_m = \pm 1$ を結ぶ直線は、梁理論から得られる周方向応力分布である。

図-10から、低荷重レベル($k=10$)における σ_θ 分布は、ケースNo.1(樽状)では圧縮側引張側ともに、中央付近の σ_θ は梁理論による応力分布よりも小さく、応力欠損がすでに現われているのがわかる。これに対してNo.4あるいはNo.6では、その曲げ応力分布はほとんど梁理論の応力分布と差異はなく、応力欠損は無視し得るほど小さい。しかし荷重が増加し、 $k > 100$ ではどの解析ケースも応力欠損が現われ、それは圧縮側で著しく、また中立軸が移動しているのがわかる。また、これにともなって腹板圧縮縁の応力は、梁理論に比べきわめて大きくなっている。

圧縮側中央の点a($z=3h/4$, $\theta=\alpha/2$)における曲げ応力 σ_θ を荷重とともに表したものが図-11である。図中、二点鎖線は梁理論の応力を示す。図-11では、どの解析ケースも $k \leq 40$ では、荷重の増加とともに σ_θ はほとんど直線的に増加するが、これを越えて分岐荷重に至るまで(たとえばNo.1では $50 < k < 83$)の σ_θ の増加率は逆に大きくなり、たとえばNo.2あるいはNo.3の点aの σ_θ は梁理論による応力よりも大きくなって

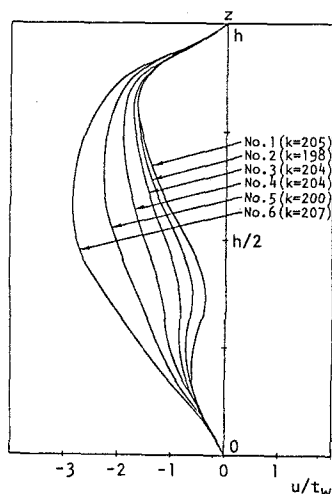


図-9 たわみの鉛直分布(断面A-A)

いる。ところが分岐荷重に達すると、荷重曲げ応力曲線は折れ曲って曲げ応力は急激な減少傾向を示す。そして分岐荷重よりも大きい荷重では、梁理論に比べきわめて小さい応力しか現われていないこと、また、各ケースともほとんど同程度の応力値となることを、図は示している。

また、荷重 $k < 50$ の場合、梁理論による曲げ応力と比較すると、No.1～No.4の順に、初期たわみが鞍状になるほど応力欠損が小さい。ところがNo.5およびNo.6では、逆に鞍状初期たわみが大きいほど応力欠損は大きくなっている。これは、変位性状とも対応するが、No.4の腹板圧縮側の初期形状が最も平板に近い挙動となるためと考えられる。以上のことから、低荷重レベルでは、初期たわみ形状と曲率による形状をあわせた初期形状が、B-B断面付近の両端を結ぶ基準となる弦から離れるほど、圧縮側断面の曲げ応力の欠損は大きいといえる。

樽状の初期たわみを持つケースNo.1および最も平板に近い挙動を呈するNo.4のケースについて、圧縮側断面B-B上の曲げ応力分布(周方向分布)を、各荷重について示したものが、それぞれ図-12、および図-13である。図には、同じ断面上の形状分布(弦を基準とした縦距 y で表した図)もあわせて示した。なお、梁理論によるこの断面の曲げ応力は $\sigma_\theta / \sigma_m = 0.5$ となる。

図-12に示すように、樽状No.1は $k=10$ ですでに2割程度の応力欠損がある。一方図-13では、同じ荷重の場合にはほとんど曲げ応力の欠損はない。

また両図から、分岐荷重までは荷重増加につれて σ_θ は減少し、その周方向分布はわずかに凹凸形状となるものの曲げ応力の周方向分布はほぼ一定値を保つ。ところが、分岐荷重を越えて大きな荷重になると、きわめて大きな凹凸分布となり、限られた局所的な位置できわめて大きな応力欠損が現われる。このように荷重が大きくなると、鉛直方向の曲げ応力分布は周方向に一定でなくなることを見せる。図には示さなかったが、いずれの解析ケースもこのような現象が認められた。

図-12あるいは図-13からわかるように、曲げ応力の周方向分布は、たわみ形状ときわめて密接な関係があり、とくに分岐荷重を越えてからはたわみ形状が極小あるいは極大となる位置で、曲げ応力の欠損は小さく、たわみの極値から極値へ移る、すなわち z 軸まわりの回転角が大きくなる位置で曲げ応力の欠損は著しく大きい。

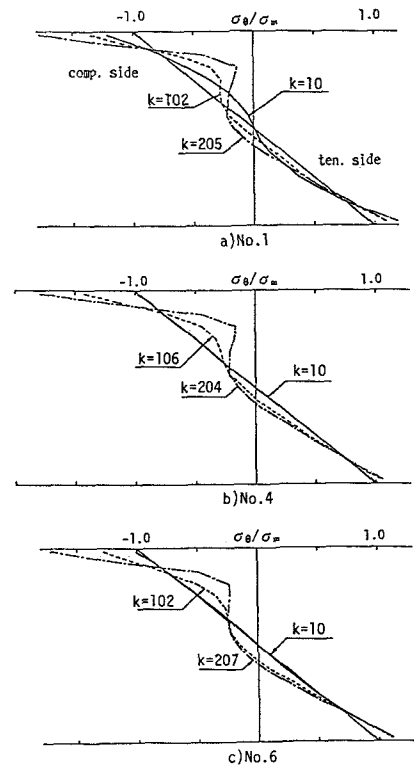


図-10 曲げ応力分布(断面A-A)

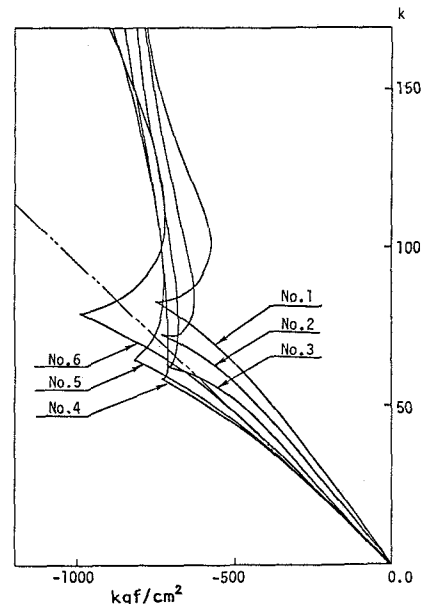


図-11 点aの曲げ応力

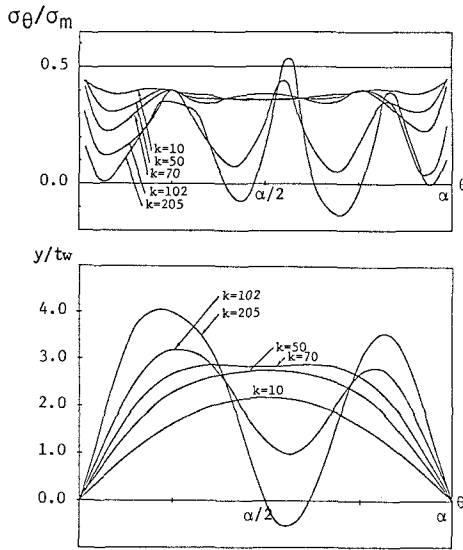


図-12 曲げ応力分布(断面B-B, No.1)

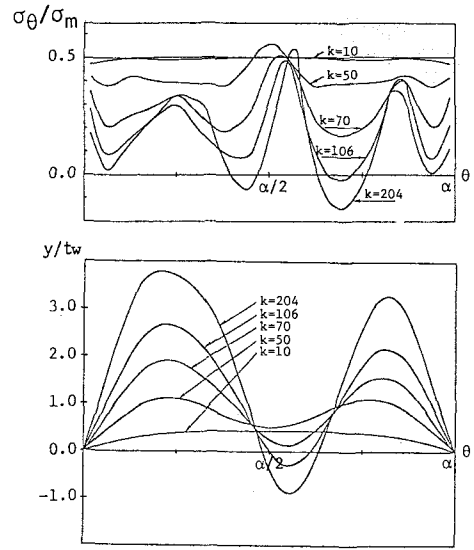


図-13 曲げ応力分布(断面B-B, No.4)

4. 結 論

本研究は、種々の初期たわみが曲げを受ける曲線桁腹板パネルの力学性状におよぼす影響を明らかにすることを試みたものである。鉛直補剛材とフランジで囲まれた腹板パネルを円筒曲板として取り出し、初期たわみを考慮した弾性非線形解析を行い、得られた結果に対して考察したことをまとめれば次のようになる。

(1) 曲線桁の腹板は、曲率に起因して最初から平板でないために、最大初期たわみの値だけでなく初期たわみの方向性が大きな問題となる。すなわち曲げを受ける曲線桁腹板の力学挙動は、曲率による形状と初期たわみ形状からなる初期形状によって支配されるといえる。

(2) 曲げモーメントが比較的小さい場合に発生する腹板圧縮側の付加たわみは、圧縮側縁から桁高の1/4付近の断面における初期形状が、両端を結ぶ弦を基準としてどちら側に存在するかということに支配される。一方、引張側に生じる付加たわみは、この基準となる弦に近づくように変位する。すなわち、曲線桁においては初期たわみの最大値だけでなく挙動を支配する断面の位置も問題となる。

(3) 解析の途中で全てのケースとも不安定状態が現われたが、これは非線形挙動をともなった分岐座屈と考えられる。変位増分制御により不安定状態を一旦回避すると、その後は安定となり荷重増分制御でも解析可能となった。また、分岐座屈後のたわみは対称性が崩れ、周方向に正弦1波形の付加たわみが現われた。

(4) 分岐座屈荷重は、圧縮側における初期形状が、両端を結ぶ弦に近いほど小さい。同じ大きさの初期たわみを有する場合、分岐荷重は鞍状初期たわみよりも樽状初期たわみの方が大きい。

(5) 曲げモーメントによって発生する圧縮側の付加たわみは、初期形状が弦に近いほど小さい。したがって、圧縮側に発生する付加たわみの大きさという点では、分岐荷重は小さくなるが、鞍状の初期たわみが有利といえる。

(6) 低荷重レベルでは、初期形状が両端を結ぶ弦から離れるほど応力欠損は大きく、逆に弦に近い初期形状のものはほとんど応力欠損がない。しかし荷重が増加すると、どのケースも圧縮側の応力欠損が顕著に現われる。

(7) 分岐荷重を越えるような高荷重レベルでは、圧縮側断面の周方向の曲げ応力分布は凹凸状となる。これはたわみ形状と密接に関係し、たわみが極値となる位置で応力の欠損は小さくなる。

参 考 文 献

- 1) Dabrowski, R. and Wachowiak, J.: STRESSES IN THIN CYLINDRICAL WEBS OF CURVED PLATE GIRDERS, Proc. of Colloquium of Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, London, 1971, IABSE, vol. 11, pp. 337-352, 1972.
- 2) Culver, C.G., Dym, C.L. and Brogan D.K.: BENDING BEHAVIOR OF CYLINDRICAL WEB PANELS, Proc. of ASCE, vol. 98 No. ST10, pp. 2291-2308, Oct. 1972.
- 3) 三上市蔵, 古西和夫, 米沢博: 曲げを受ける円筒腹板パネルの非線形挙動, 土木学会論文報告集, No. 299, pp. 23-34, Jul. 1980.
- 4) Mikami, I. and Furunishi, K.: NONLINEAR BEHAVIOR OF CYLINDRICAL WEB PANELS, Proc. of ASCE, Jour. of Eng. Mech. vol. 110 No. 2, Feb. 1984.
- 5) 倉西茂, 樋渡滋: 曲げを受ける曲線プレートガーダーのウェブプレートの弾性挙動について, 土木学会論文報告集, No. 315, pp. 1-11, Nov. 1981.
- 6) 藤井堅, 大村裕: 初期不整を有する曲線桁腹板パネルの非線形曲げ挙動について, 広島大学工学部研究報告, vol. 34 No. 1, 1985
- 7) Hiwatashi, S. and Kuranishi, S.: THE FINITE DISPLACEMENT BEHAVIOR OF HORIZONTALLY CURVED ELASTIC I-SECTION PLATE GIRDERS UNDER BENDING, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. vol. 1 No. 2, pp. 173s-183s, Oct. 1984.
- 8) 樋渡滋, 倉西茂: 曲げを受ける I 形断面曲線プレートガーダーの弾性有限変位挙動について, 構造工学論文集, vol. 31A, pp. 197-207, Mar. 1985.
- 9) 中井博, 北田俊行, 大南亮一, 川井正: 曲げを受ける曲線桁橋腹板の解析と設計に関する一研究, 土木学会論文集, No. 368 1-5, pp. 235-244, Apr. 1986.
- 10) 藤井堅, 大村裕: 曲線桁断面変形の非線形有限要素解析, 広島大学工学部研究報告, vol. 31 No. 1, pp. 39-51, 1983.
- 11) Fujii, K. and Ohmura, H.: NONLINEAR BEHAVIOUR OF CURVED GIRDER-WEB CONSIDERED FLANGE RIGIDITIES, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., vol. 2 No. 1, pp. 45s-54s, Apr. 1985.
- 12) 末武義宗, 平嶋政治, 依田照彦: 水平補剛材を考慮した I 形曲線桁の弾性変形挙動, 構造工学論文集 vol. 32A, pp. 387-397, Mar. 1986.
- 13) 三上市蔵, 矢部幸男: 初期たわみを有する弾性円筒パネルの円周方向面内力による非線形挙動, 構造工学論文集, vol. 31A, pp. 209-222, Mar. 1985.
- 14) 吉田裕, 増田陳紀, 松田隆: 薄板で構成される立体構造の弾塑性・大変位離散化要素解析法, 土木学会論文報告集, No. 288, pp. 41-56, Aug. 1979.
- 15) 中井博, 松村駿一郎, 吉川紀, 北田俊行, 大南亮一: 曲線桁橋腹板の実績調査, 橋梁と基礎, vol. 15 No. 5, pp. 38-43, May 1981.
- 16) 日本道路協会: 道路橋示方書同解説 II 鋼橋編, Dec. 1980.
- 17) Suetake, Y., Hirasima, M. and Yoda, T.: GEOMETRICAL NONLINEAR ANALYSIS OF CURVED I-GIRDERS UNDER BENDING USING MIXED FINITE ELEMENT METHOD, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng., vol. 3 No. 2, pp. 207s-214s, Oct. 1986.
- 18) 藤井堅, 大村裕: 曲げを受ける曲線 I 形桁の弾塑性断面変形挙動, 構造工学論文集, vol. 33A, pp. 83-92, Mar. 1987.
- 19) 末武義宗, 平嶋政治, 依田照彦: Herrmann の混合法を用いた I 形断面曲線桁の曲げ耐力解析, 構造工学論文集, vol. 33A, pp. 73-82, Mar. 1987.

(1988 年 10 月 12 日 受付)