# 鉛直局部荷重を受ける合理化桁腹板のクリップリングとその補強方法

The stability verification and the stiffening method of web panel of I-girder bridges subjected to patch loadings

宮下健治\*,野上邦栄\*\*,山沢哲也\*\*\* Kenji Miyashita, Kuniei Nogami, Tetsuya Yamasawa

\*工修,(株)長大,東京支社東日本構造事業部(〒114-0013 東京都北区東田端 2-1-3) \*\*工博,首都大学東京大学院准教授,都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) \*\*\*工修,鹿島建設(株),土木設計本部設計技術部解析技術グループ(〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

Recently, a number of two I-girder bridges are gradually constructed in Japan. During construction especially incremental launching, it is important to ensure the safety for buckling due to patch loading because two I-girder bridges have the structural characteristics compared with traditional plate girder bridges. In Japan, there are two different specifications generally applied in bridge design, which lead to the different result each other. In this study, the actual difference in the design due to the specifications is evaluated. The parameter study is demonstrated varying the loading width of applied patch loading and the property of the web. The structural analysis is based on finite element method considering the local geometry. Moreover, for the case the examination is not satisfied, appropriate structural details are hereby proposed.

Key Words: launching method, patch loading, two I-girder bridge キーワード:手延式送り出し工法,鉛直局部荷重,少数主桁橋

### 1. はじめに

鋼橋の架設工法は、構造物の形式・規模・現場の状況 などの様々な制約条件によって決定される.その中で手 延式送り出し工法によって架設する場合には、送り出し 装置上で生じる鉛直反力のほかに、曲げモーメント、せ ん断力などの断面力の作用を考慮して、腹板座屈および 局所崩壊(クリップリング)に対して安全性を確保する 必要がある.現在、送り出し装置による鉛直局部荷重を 受ける腹板の座屈安全性に対する照査は、「鋼道路橋施 工便覧<sup>11</sup>(日本道路協会)」あるいは、「鋼構造架設設計施 工指針<sup>2</sup>(土木学会)」に基づいて行われている.しかし、 両基準間には軸圧縮力・曲げモーメント・せん断力およ び局部圧縮力の組合せ荷重を受ける腹板の座屈照査式 に相違が存在している.

また,照査式を満足しない場合には腹板の補剛が必要 となる.その方法としては、①送り出し装置の受け幅を 広くする、②水平補剛材を配置する、③鉛直リブを配置 するなどの補強方法が考えられるが、その具体的な規定 については明確にされていないのが現状である.

ところで,近年,鋼橋の設計においては少数主桁橋を はじめとした合理化された橋梁形式が高速道路橋を中 心に採用されるようになった.このような少数主桁橋は 腹板の少補剛設計などの点で従来橋梁と断面形状が異 なるため,鉛直局部荷重を受ける状態に対して前述の基 準をそのまま適用できるかは疑問が残るところである. さらに,限界状態設計の導入や性能照査型設計法への移 行という観点から,鋼橋の新たな構造,施工方法の見直 しが求められている.

そこで、本研究では、鉛直局部荷重を受ける少数主桁 橋腹板に着目して、2 つの基準による座屈安全性評価を 行い照査式の相違による照査結果への影響を検証する. また、所要の座屈安全率を満たさない腹板の適切な補強 方法を解析によって明らかにし、腹板の安全性評価方法 の妥当性について検討する<sup>3</sup>.

# 2. 鉛直局部荷重を受ける腹板の座屈安全性照査

わが国では鉛直局部荷重を受ける腹板の座屈安全性照 査方法として、日本道路協会刊行の鋼道路橋施工便覧や 土木学会刊行の鋼構造架設設計施工指針、あるいは、ド イツの DASt 指針 012<sup>4</sup>が適用されている.

ここでは、鋼道路橋施工便覧と鋼構造架設設計施工指 針を対象として、その照査方法について述べる.

# 2.1 鋼道路橋施工便覧による照査

鋼道路橋施工便覧(以下,便覧と呼ぶ)は昭和47(1972) 年に日本道路協会から刊行され,鋼橋の製作・架設に関 する手引書として利用されてきた.昭和60(1985)年の改 訂を経て現在に至っている.

「付録2.送り出し工法による腹板の照査」によれば、 図1に示すような純曲げ応力度・圧縮応力度・せん断応 力度,および,送り出し装置ジャッキによる鉛直方向の 圧縮応力の組合せ荷重が作用する腹板パネルに対して, 式(1)によって座屈に対する安全性を照査するものとし ている.

 $\sigma_{xb}$ ,  $\sigma_{xc}$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_{p}$  は腹板に作用する純曲げ応力,軸方向応力, せん断応力,鉛直方向応力で,鉛直局部荷重の載荷幅中央にあたる断面での値を用いる.軸方向応力は圧縮を正とする.ここに,

- F<sub>s</sub> : 合成座屈安全率で 1.36 とする
- γ : 不均等荷重による割増係数で1.3 とする
- $\sigma_{xbcr}$ :純曲げによる座屈応力度  $\sigma_{xbcr}=k_{xb}\sigma_{e}$
- $\sigma_{xccr}$ :軸方向圧縮による座屈応力度  $\sigma_{xccr}=k_{xc}\sigma_{e}$
- $\tau_{cr}$ : せん断による座屈応力度  $\tau_{cr}=k_{\tau}\sigma_{e}$
- $\sigma_{pcr}$ :鉛直局部圧縮による座屈応力度  $\sigma_{pcr}=k_p\sigma_e$ また,座屈応力度の算出に用いる値として,

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{11} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \qquad (2)$$

*k*<sub>τ</sub>: せん断に対する座屈係数で式(3)による

$$k_{\tau} = 5.34 + \frac{4.00}{\alpha^2}$$
 ( $\alpha \ge 1.0$ ) · · · · · · · · (3-a)

$$k_{\tau} = 4.00 + \frac{5.34}{\alpha^2}$$
 ( $\alpha < 1.0$ ) ..... (3-b)

$$k_p$$
 :局部圧縮に対する座屈係数で式(4)による  
 $k_p = \left(0.8 + \frac{2.4}{\alpha^2}\right) \left(\frac{c}{a} + \frac{a}{c}\right)$  (4)

ただし、tは着目パネルの腹板厚、Eはヤング係数、 $\mu$ はポアソン比を示す.また、 $\alpha$ は腹板のアスペクト比で  $\alpha=a/b$ である.

ここで、局部圧縮に対する座屈係数 $k_p$ の算出には式(4) を用いるものとした.この評価式は指針に明記されているものである.便覧では支承幅パネル間隔比 cla が 0.33 と 0.50 の場合について、着目パネルのアスペクト比aが 0.5~1.0、3.0~5.0 という限られた条件に対してのみ座屈 係数を与えている.便覧の座屈係数と指針の座屈係数を 比較すると大きな差異が見られないことから、本研究で は座屈係数 $k_p$ の算出には式(4)を用いる.

### 2.2 鋼構造架設設計施工指針による照査

鋼構造架設設計施工指針(以下,指針と呼ぶ)は平成 13(2001)年に土木学会から刊行され,それまで「鋼構造 架設設計指針(1978)」と「鋼構造架設施工指針(1983)」 として独立して存在していたものを,より体系的な情報 を与えるようにするために一つの指針としてまとめら れたものである.

「4.4. 送出し架設時の腹板」によれば、図1に示すような曲げモーメント・せん断力、および、送り出し装置ジャッキによる局部圧縮力の組合せ荷重に対する腹板の座屈強度について式(5)によって照査するものとしている.

$$F_{s}\left\{\left(\frac{\sigma_{b}}{\sigma_{bcr}}\right)^{2}+\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)+\left(\frac{\sigma_{p}}{\sigma_{pcr}}\right)\right\}\leq1.0$$
(5)

 $\sigma_b$ ,  $\tau$ ,  $\sigma_p$ は腹板に作用する曲げ応力, せん断応力, 鉛 直方向応力で, 鉛直局部荷重の載荷幅中央にあたる断面 での値を用いる.



-81-

ここに,

F<sub>s</sub>: 合成座屈安全率で1.36とする

 $\sigma_{bcr}$ :曲げによる座屈応力度  $\sigma_{bcr}=k_b\sigma_e$ 

 $\tau_{cr}$ : せん断による座屈応力度  $\tau_{cr}=k_{\tau}\sigma_{e}$ 

 $\sigma_{pcr}$ :鉛直局部圧縮による座屈応力度  $\sigma_{pcr}=k_p\sigma_e$ また,座屈応力度の算出に用いる値として,

 $k_b$  :曲げに対する座屈係数で式(6)による  $k_b = \frac{8.4}{11}$  (0< $\psi$ <1)・・・・・・(6-a)

 $\psi + 1.1$  $k_b = 7.63 - 6.27\psi + 10\psi^2$  (-1 <  $\psi$  < 0) · · · · (6-b)

ただし、 $\psi$ は曲げ荷重の荷重勾配で、 $|\sigma_{bl}|>|\sigma_{bd}$ ならば  $\psi=\sigma_{bd}/\sigma_{bl}$ である.また、 $\sigma_e$ 、 $k_p$ については、便覧の場 合と同様とする.

# 2.3 2つの照査式の相違点

今回対象とした便覧と指針の照査式には、次の2つの 大きな相違点が存在する.

・強度相関式が異なる

・安全率の適用方法が異なる

便覧の照査式は、着目パネルに作用する曲げ応力を純 曲げ成分と一様圧縮成分に分け、純曲げ・一様圧縮・せ ん断・鉛直局部圧縮の4成分の相関式で与えている.こ の照査式では、純曲げ・せん断・鉛直局部圧縮について は作用応力度と座屈応力度の比を2乗したものによって 評価している.一方で、指針の照査式は、着目パネルに 作用する曲げ・せん断・鉛直局部圧縮の3成分に関する 相関式で与えており、曲げについてのみ作用応力度と座 屈応力度の比を2乗した評価方法を用いている.特に、 曲げ応力は純曲げ応力と圧縮応力に分離しておらず、よ り実用的な応力値を用いている. また,便覧では合成座屈安全率*F*<sub>s</sub>を強度相関式の2次 および1次の成分項にそれぞれ対応して乗じているのに 対して,指針では*F*<sub>s</sub>を相関式全体に対して乗じている. 前者は,純曲げ・一様圧縮・せん断,および鉛直局部圧 縮の各限界応力度に対して所要の安全率を考慮してい るのに対して,後者は部材全体の強度相関に対して安全 率を確保する式になっている.

#### 2.4 本研究における座屈安全率の照査

本研究では、解析により得られた作用応力度を式(1)、 式(5)に代入して、合成座屈安全率 $F_s$ に関する方程式を つくる.そして、その解として得られた $F_s$ の値が必要安 全率である1.36より上回る場合には照査を満足している と判断する.したがって、得られる合成座屈安全率 $F_s$ の値は各照査式の作用応力度に対する余裕度を評価し ていることになる.ここで、必要安全率は道路橋示方書 II鋼橋編<sup>5</sup>(以下、道示と呼ぶ)では、施工時荷重に対し て許容応力度の割り増し係数を1.25としており、 $F_s$ =1.36 (=1.7/1.25)が許容値となる.

## 3. 数值解析手法

## 3.1 対象とする少数主桁橋と解析モデル

本研究では千鳥の沢川橋(4 径間連続合成2 主桁橋)<sup>の7)</sup> を参考にして,支間 54m の2 径間連続2 主 I 桁橋を解析 モデルとする. この2 主桁橋を手延式送り出し工法によ って架設する場合を考える.

解析モデルの作成にあたって、図2に示すように、2 径間連続桁のうちの1径間目が中間支点位置に到達する 直前の状態、すなわち、送り出し時張出長が最大になっ





たときを想定する. このときに送り出し装置上にある腹 板パネルを本研究における着目パネルとする. モデルの 断面は2径間連続合成2 主桁橋における支間中央部のも のとして図3に示すI型断面を有するものとし,使用鋼 材は腹板・上フランジ・下フランジを SM570 材(降伏応 力度  $\sigma_y$ =450 N/mm<sup>2</sup>)、垂直補剛材を SM490Y( $\sigma_y$ =355 N/mm<sup>2</sup>)材とする. また,材料特性はヤング係数を E=2.0 ×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比を $\mu$ =0.3 とする。

本研究では、図4に示すように、送り出し装置上にある腹板パネルとその両端に隣接するパネルを合わせた3 パネルについて4節点シェル要素を用いて作成し、それ 以外の部分については2節点はり要素(7自由度)を用い て作成する.数値解析には汎用有限要素法解析ソフトウ ェア MSC.MARC 2005r2を用いる<sup>8</sup>.

#### 3.2 境界条件

境界条件については、鋼桁部の端支点をローラー支持、 中間支点をピン支持とする.また、横桁は十分な剛度を 有するものとし、横桁位置では橋軸直角方向の変位を拘 束し、面内変形問題として扱う.横桁は支点に隣接する 領域では 3m 間隔、支間中央部では 9m 間隔での配置を 基本とした.

解析モデルの2節点はり要素と4節点シェル要素の境 界部では変位や応力の連続性を確保するために剛体要 素( $E=1.0 \times 10^{10}$ N/mm<sup>2</sup>,  $\mu=0.1$ )を配置する.剛体要素とそ れぞれの要素については MARC のタイイング機能によ って接合し、節点間の自由度に線形の拘束条件を与えた.

送り出し装置については、ばね要素を用いてモデル化 を行う.今回の検討では、送り出し装置支承上では面外 方向に変位しないという条件をもとに、x軸(橋軸方向)、 および z 軸(鉛直方向)に剛性  $k_x=k_z=2.0\times10^5$  N/mm<sup>2</sup>, y 軸 (橋軸直角方向)に  $k_y=1.0\times10^{13}$  N/mm<sup>2</sup>の線形ばねを導入 した.また、送り出し装置の支承幅 c については、I 型 断面の下フランジ幅が 800 mm であることから、それに 対応する支承幅として c=600 mm を基準値とした.

# 3.3 荷重条件

設計荷重として、鋼桁死荷重と手延機重量を考慮する. 鋼桁死荷重については、集中荷重に換算したものを橋 軸方向図心位置の節点に載荷する.また、手延機につい ては、単位長さ当たりの重量を2.0 kN/mとし、重心位置 (端部から19.2m)に集中荷重として載荷する<sup>9</sup>.

架設時の荷重条件としては、これ以外にも風荷重や地 震・雪といった自然条件に関するものを考慮する必要が あるが、今回の検討では考慮しない方針とする.

## 3.4 解析条件

少数主桁橋は部材数を低減した厚肉無補剛断面が採用 されており、正曲げを受ける支間中央部では腹板のアス ペクト比はα=3.0まで採用されている<sup>10,11</sup>.本研究では 着目パネルのアスペクト比αをパラメータとして, 1.0 から 3.0 まで変化させた 3 種類のモデルを作成した.

はじめに、それぞれのモデルについて設計荷重の載荷 による線形弾性解析を行い、座屈安全率の照査を行う.

また、「5. 所要の座屈安全率を満足しない腹板の補強」 では、送り出し装置支承幅 c、水平補剛材の取付位置 h、 および鉛直リブの取付位置 b<sub>rb</sub>について、c/a、h/b、b<sub>rd</sub>/b をパラメータとした線形弾性解析を行い、最適な腹板の 補強方法に関する検討を行う.ここで、水平補剛材、鉛 直リブについては、道示で定める必要剛度を有する断面 とし、材質については SM490Y 材を用いた.

さらに、「6. 鉛直局部荷重を受ける腹板の終局強度」 では、設計荷重(鋼桁死荷重と手延機重量)を一律に漸増 載荷させて弾塑性解析を行う.ただし、終局強度に影響 を及ぼす初期不整については今回は考慮していない.

#### 4. 設計荷重時における座屈安全率の照査

送り出し装置支承幅を c=600 mm としたときのアスペ クト比 $\alpha=1.0$ , 2.0, 3.0 のモデルにおける座屈安全性につ いて便覧,指針の照査式を用いた照査結果を図5 に示す. 図中の横軸は着目パネルのアスペクト比 $\alpha$ ,縦軸は合成 座屈安全率  $F_s$ である. c=600 mm とした場合は,便覧に よって照査した場合は全てのモデルにおいて所要の座 屈安全率を満足する結果となり,指針によって照査した 場合は $\alpha=1.0$ のときのみが所要の座屈安全率を満たし, それ以外の条件では照査式を満足しない結果となった.

図 5 から、両基準ともアスペクト比 $\alpha$ が大きくなると 合成座屈安全率 $F_s$ が低下していることがわかる.これは 各モデルの支承幅パネル間隔比 c/a が $\alpha$ =1.0 のモデルは c/a=0.2,  $\alpha=2.0$  のモデルは c/a=0.1,  $\alpha=3.0$  のモデルは c/a=0.06 であることから、c/a の値が小さくなるにつれて 座屈安全率が低下する傾向にあると言い換えることが できる.これは鉛直局部圧縮に対する座屈係数の変化に



よるものと考えられる. 座屈係数  $k_p$ の値に着目すると,  $\alpha$ =1.0 では  $k_p$ =16.64,  $\alpha$ =2.0 では  $k_p$ =11.51,  $\alpha$ =3.0 では  $k_p$ =8.77 であり,各モデルで大きく変化しており, $\alpha$ が大 きくなると座屈応力度 $\sigma_{per}$ が小さくなる. つまり,支承 幅パネル間隔比 c/aが小さくなると,鉛直局部圧縮が作 用する領域がせまく集中したものとなり座屈安全性の 低下を招いている.

また,同一条件下での便覧と指針の照査結果を比較す ると,指針による照査結果が安全側となる傾向にあるこ とがわかる.これは,両基準における照査式そのものに 存在する相違によって生じたものである.着目する腹板 のアスペクト比αが小さくなるほど便覧と指針の照査結 果が大きく離れている.つまり,便覧による照査はαが 小さくなると座屈安全率を大きく評価する傾向にある.

## 5. 所要の座屈安全率を満足しない腹板の補強

ここでは、「4.設計荷重時における座屈安全率の照査」 で指針によって評価した場合に所要の座屈安全率を満 足しなかった a=2.0 の場合を例に、腹板の補強による座 屈安全率への影響を検証する.本研究では補強方法とし て、①送り出し装置の支承幅の変更、②水平補剛材の配



図7: c/a の変化による F<sub>s</sub>への影響(α=2.0 の場合)

置,③鉛直リブの配置の3種類を想定する.

#### 5.1 送り出し装置支承幅の変更による補強

a=2.0のモデルについて、図6に示すように送り出し 装置の支承幅を変化させる.支承幅パネル間隔比を  $c/a=0.1\sim0.5$ と変化させた場合の合成座屈安全率への影 響を図7に示す.図中の横軸は送り出し装置の支承幅cと着目する腹板の垂直補剛材間隔aとの比c/a,縦軸は合 成座屈安全率 $F_s$ である.

この結果から,便覧・指針ともに c/a が大きくなると 合成座屈安全率 F<sub>s</sub>も大きくなる傾向にあり,指針の照査 結果では c/a=0.5 としたときに,所要の座屈安全率を満 足することがわかる.また,どの支承幅においても指針 の方が便覧よりも安全側の結果を与えている.

送り出し装置の支承幅を広くしたことによって,着目 パネルに作用する鉛直局部荷重の分布幅が大きくなり, 座屈安全率に変化が生じたものと考えられる.

#### 5.2 水平補剛材の配置による補強

*α*=2.0 のモデルについて, 図8 に示すように水平補剛 材を配置する.水平補剛材の取付位置を *hb*=0.1~0.5 ま で変化させた場合の合成座屈安全率への影響を図9 に示



す. 図中の横軸は下フランジから水平補剛材取付位置ま での高さhと腹板高bとの比h/b,縦軸は合成座屈安全 率 $F_s$ である.水平補剛材で区切られる2つの腹板パネル のうち,鉛直局部荷重を直接受ける補剛材より下側のパ ネルに着目して照査を行う.

この図より、便覧・指針ともに h/b が大きくなると合





成座屈安全率 F<sub>s</sub>は低下する傾向にあるものの,今回の検討の範囲内ではどの条件においても所要の座屈安全率を満足することがわかる.また,便覧と指針の照査結果はほぼ同等のものとなった.

照査において着目した水平補剛材より下側のパネルは 腹板高が低いため、照査式中に代入されるオイラーの座 屈応力度 $\sigma$ が非常に大きなものとなる.そのため、作用 応力度と座屈応力度の比が限りなく0に近いものとなり、 便覧・指針ともに同等の照査結果となったものである.

# 5.3 鉛直リブの配置による補強

鉛直リブの配置による腹板の補強を考えるにあたって、 配置するリブの高さ  $b_{rb}$ の変更に加えて、リブの本数に ついても変化させて合成座屈安全率への影響を検証し た.  $\alpha$ =2.0 のモデルについて、図 10 に示すように鉛直リ ブを配置する. 鉛直リブの取付位置を  $b_{rb}/b=0.1\sim1.0$  ま で変化させた場合の合成座屈安全率への影響について、 配置するリブの本数を 1 本とした場合を図 11 (a) に、2 本とした場合を図 11 (b) にそれぞれ示す. リブは着目パ ネルの垂直補剛材間を等分割する位置に配置した. 図中 の横軸は鉛直リブ高  $b_{rb}$ と腹板高 b との比  $b_{rb}/b$ ,縦軸は 合成座屈安全率  $F_s$ である.

この図より、便覧・指針ともに*b<sub>rit</sub>/b*を変化させても合成座屈安全率*F<sub>s</sub>*の値に変化は見られず、どの取付位置においても所要の座屈安全率を満足することがわかる.また、どの取付位置においても指針の方が便覧よりも安全側の結果を与えている.配置する本数を変化させたことによって、便覧の照査結果には変化が見られるが、指針の照査結果はほぼ同等のものとなっている.

今回の検討では、鉛直リブの高さを変化させても着目 パネルのアスペクト比は一定としているため、配置する リブの高さ  $b_{rb}$ を変化させても合成座屈安全率に変化が 生じなかった.このため、設計荷重時の作用応力度によ る座屈安全性の評価という観点からは、鉛直リブの適切 な配置方法を決定することはできない.

# 5.4 補強効果のまとめ

上記の3種類の方法による腹板の補強効果をまとめる と以下のようになる.

- 1) どの条件においても、常に指針の照査結果の方が便 覧の結果よりも安全側となる.
- 2) 送り出し装置の支承幅に関するパラメータ *c*/*a* を高くすると,合成座屈安全率 *F*<sub>s</sub>は大きくなる.
- 3) 水平補剛材の取付位置に関するパラメータ *h/b* を高 くすると,合成座屈安全率 *F*<sub>s</sub> は小さくなる.
- 4) 鉛直リブの取付位置に関するパラメータ b<sub>rit</sub>/b を高 くしても合成座屈安全率 F<sub>s</sub>に変化は見られない.

以上の設計荷重作用時の座屈安全性照査から、合成座 屈安全率  $F_s$ の変化に支配的なパラメータは着目パネル の桁高bであると言える.

## 6. 鉛直局部荷重を受ける腹板の終局強度

「5. 所要の座屈安全率を満足しない腹板の補強」では、α=2.0のモデルについて設計荷重作用時の座屈安全性に関する評価を行った.ここでは、鉛直局部荷重を受ける腹板について、水平補剛材の配置による補強を行った場合と鉛直リブの配置による補強を行った場合と鉛直リブの配置による補強を行った場合について弾塑性解析を行い、終局限界状態を明らかにするのと同時に、腹板の補強効果を終局強度の立場から評価を行う.なお、解析モデルの構成則は降伏条件に von-Misesの降伏条件を適用し、完全弾塑性体を想定した.荷重条件については、設計荷重である鋼桁死荷重と手延機重量をその比を保ちながら増加させるものとし、増分計算には弧長増分法を用いる.

#### 6.1 水平補剛材取付位置と終局強度の関係

α=2.0 のモデルについて,水平補剛材の取付位置を h/b=0.1~0.5 まで変化させた場合の終局強度を図12 に示 す. 図中の横軸は水平補剛材取付位置 h/b,縦軸は終局 時の設計荷重に対する荷重倍率βである. この図から,

水平補剛材取付位置を上げていくと終局強度が高くなり, h/b=0.30 付近を境に減少する傾向にあることがわかる. また, h/b=0.30 のモデルの終局に至る荷重変位経路を図 13 に示す. 荷重変位経路は他の水平補剛材取付位置においても同様の傾向となった.

続いて、補剛材を配置しないモデルと h/b=0.30 のモデルにおける終局時の変形図を図 14 に、応力図を図 15 に示す.この図から、終局時の着目パネルの変形形状は、水平補剛材取付位置を境に面外方向変位の生じる方向が変化していることがわかる.つまり、水平補剛材が節になっている.また、終局時の応力状態を見ると、送り出し装置支承板近傍の下フランジと着目パネル上フランジに高い応力が生じていることがわかる.しかし、終局時に塑性化した箇所はみられず、腹板の面外方向変位の大きい箇所での座屈によって終局を迎えた.

設計荷重時の座屈安全率の照査結果と合わせると,着 目パネルにおいて水平補剛材を h/b=0.20~0.30 付近に配 置した場合が最も安全性に優れていると言える.

## 6.2 鉛直リブ取付位置と終局強度の関係

 $\alpha$ =2.0 のモデルについて、鉛直リブの取付位置を  $b_{nb}/b=0.1\sim1.0$ まで変化させた場合の終局強度を図 16 に 示す. 図中の横軸は鉛直リブ取付位置 $b_{nb}/b$ ,縦軸は終局 時の設計荷重に対する荷重倍率 $\beta$ である. この図から、  $b_{nb}/b=0.30$ の時に終局強度の上昇はほぼ頭打ちとなり、 それ以上リブ高さを上げても終局強度に変化は見られ ないことがわかる. この傾向はリブ本数が1本の場合と 2本の場合で共通である.また、 $b_{nb}/b=0.30$ のモデルの終 局に至る荷重変位経路を図 17 に示す.荷重変位経路は 他の鉛直リブ取付位置においても同様の傾向となった. 続いて、*b<sub>nb</sub>/b=*0.30のモデルに鉛直リブを1本配置した 場合と2本配置した場合の終局時の変形図を図 18 に, 応力図を図 19 に示す.この図から,リブを1本配置し た場合,2本配置した場合ともに鉛直リブの配置によっ て着目パネルの変形形状が変化していることがわかる. また,リブを1本配置した場合の応力図を見ると,鉛直 リブ周辺で大きな応力値を示しており,塑性化している 要素が見られる.この付近の要素の降伏と,面外方向変 位の大きな箇所の座屈によって終局を迎えた.一方で, リブを2本配置したモデルでは,送り出し装置支承板近 傍の下フランジと着目パネル上フランジに高い応力が 生じているものの,終局時に塑性化した箇所はみられず, 腹板の面外方向変位の大きい箇所での座屈によって終 局を迎えた.

設計荷重時の座屈安全率の照査結果では、*b<sub>rit</sub>/b*を変化 させたことの影響は見られなかったが、終局強度の立場 から見ると取付位置の変化による影響が見られた.この 点から、鉛直局部荷重を受ける腹板の補強策として鉛直 リブの配置を行う場合には、*b<sub>rit</sub>/b=0.30* が確保されてい れば十分である.

#### 6.3 弾塑性解析のまとめ

上記の2種類の補剛方法に関する弾塑性解析の結果を まとめると以下のようになる.

- 1) 腹板に補剛材を取り付けない場合でも、終局強度は 設計荷重の8倍程度を確保している.
- 2) 水平補剛材の配置を行った場合には、h/b=0.30 付近 で最も終局強度が高くなる.設計荷重時の照査結果 と合わせて考えても、この付近への配置が好ましい.
- 3) 鉛直リブの配置を行った場合には、1本配置した場合、2本配置した場合ともに b<sub>rb</sub>/b=0.30 付近で最も 終局強度が高くなる.設計荷重時の照査結果では、 取付方法の違いによる影響は見られなかったが、終 局強度の立場から考えて、鉛直リブは b<sub>rb</sub>/b=0.30 を 確保していれば十分である.

## 7. 結論

鉛直局部荷重を受ける合理化桁腹板の座屈安全性について,送り出し装置上にある腹板のアスペクト比αを1.0から3.0まで変化させた解析を行った.また,所要の座 屈安全率を満足しない場合の具体的な補強方法を検討した.設計荷重時および終局時に関する解析結果から得られた成果をまとめると以下のようになる.

- 設計荷重時の座屈安全性照査においては、同一条件下では、常に指針の方が便覧よりも安全側の照査結果を与える。
- 2) 設計荷重時の座屈安全性照査から、アスペクト比α が小さくなると、便覧と指針の照査結果の相違が顕 著になり、便覧の方が過大評価となる.



![](_page_7_Figure_1.jpeg)

![](_page_8_Figure_0.jpeg)

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

- 3)本研究での条件下において、所要の座屈安全率を満足しない腹板パネルに対して補強を行う場合は、水平補剛材・鉛直リブともに座屈安全性の向上が期待できる.
- 4)本研究での条件下において、鉛直局部荷重を受ける 少数主桁橋腹板の終局強度は設計荷重の8倍程度が 確保できる。
- 5) 補強方法として,水平補剛材を配置した場合には, その取付位置の変化によって終局強度に影響が生 じ, h/b=0.30 付近が最も終局強度が高くなる.
- 6)補強方法として、鉛直リブを配置した場合には、その高さの変化によって終局強度に影響が生じ、 b<sub>nb</sub>/b=0.30付近で終局強度の上昇はほぼ頭打ちとなり、それ以上取付位置を高くしても終局強度に大きな変化は生じない。

# 参考文献

- 1) 日本道路協会:鋼道路橋施工便覧,丸善,1985
- 2) 土木学会:鋼構造架設設計施工指針, 2001
- 3) 宮下健治,野上邦栄,山沢哲也:鉛直局部荷重を 受ける合理化桁腹板のクリッピングとその補強

方法, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 2007

- 4)伊藤紘一:鉛直局部荷重を受けるプレートガーダ 一腹板の DASt 指針 012 による座屈照査例,橋梁 と基礎, 1984.3
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(I)共通編 (II)鋼橋編,丸善,2003
- 6)田村陽司,大垣賀津雄,川尻克利,作川孝一:PC 床版連続合成2 主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計, 橋梁と基礎,1998.9
- 7) 馬場敦美,森隆行,福岡一幸,伊藤聡哉: PC 床版 連続合成2 主桁橋「千鳥の沢川橋」の施工,橋梁 と基礎, 1998.10
- 8) MSC.MARC: MARCC編 Program Input, 1998
- 9) 日本橋梁建設協会:鋼橋のQ&A 架設編, 2006.9
- 10) 大垣賀津雄,川口喜文,礒江暁,高橋昭一,川尻 克利,長井正嗣:合成2 主桁橋の鋼主桁補剛設計 に関する実験的研究,構造工学論文集, Vol.44A, 1998
- 太田哲司、川尻克利、長井正嗣、大垣賀津雄、礒 江暁、作川孝一:少補剛設計した合成2主桁橋の 施工時安定性に関する解析的研究、構造工学論文 集, Vol.45A, 1999

(2007年9月18日受付)