

## 斜め横桁を有する曲線2主桁橋のガセット溶接部における応力集中について

Stress concentration of gusset welding in curved twin I-girder bridge with diagonal cross beams

平沢秀之\*、佐藤匡介\*\*、林川俊郎\*\*\*、佐藤浩一\*\*\*\*

Hirasawa Hideyuki, Sato Tadayuki, Hayashikawa Toshiro and Sato Koichi

\*博士(工学) 北海道大学助手 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\*\*工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

It is a great advantage to position cross beams lower and diagonally in the curved twin I-girder bridge. This is because the positioning of cross beams performs a role of pseudo box cross-section together with slab. This study deals with the stress concentration at the connection between a main girder and diagonal cross beams in the curved twin I-girder bridge. In the connection, gusset plates are welded to the web of main girder. Cross beams are connected by high tension bolts without splice plate. In order to examine the stress distribution around the connection, FEM models are made and analyzed. These models consider the eccentricity by single surface friction grip connection. In the web where gusset plates are connected, stress concentration occurs and the web is deformed out-of-plane, as results of analysis. This stress concentration can be relieved by means of putting fillets at the corners of the gusset plates.

*Keywords : curved girder bridge, twin I-girder bridge, diagonal position, stress concentration*

キーワード：曲線橋、2主桁橋、斜め配置、応力集中

## 1. まえがき

2主桁橋は経済性の向上を図るために、部材数を大幅に減少させており、水平補剛材及び垂直補剛材もできる限り省略する設計がなされている。その結果、従来のプレートガーダー橋の標準的な形式である、4～6本程度の主桁を対傾構や横構で相互に連結するという方式と比較して、2主桁橋はH形鋼による横桁で両主桁を連結した非常に単純な構造となっている。このような構造とすることにより鋼橋の設計、製作、架設及び維持管理の省力化やコスト縮減が可能となっている<sup>1)</sup>。

構造が単純化されている一方で、主桁は桁高を高くし、フランジに厚板を使用することによって曲げ剛性を大きくしている。床版にはPC床版や合成床版を適用し<sup>2),3)</sup>、耐久性を確保している。厚板の使用による主桁の大断面化は、曲げ剛性の向上を図ることができるものの、ねじり剛性にはそれほど効果があるとはいえない。従って、ねじりモーメントが大きく作用する曲線橋に2主桁形式を適用することは、箱桁形式や格子桁形式よりも不利であり、中心角のある程度小さい範囲に限定されるものと考えられる。

2主桁形式の曲線橋を対象とした研究報告は、これまであまりなされていないが、曲線橋への適用性に関して、村瀬ら<sup>4)</sup>や中田ら<sup>5)</sup>が試設計とFEM解析に基づいた研究を行

っている。著者らも曲線2主桁橋の適用性に関し、ねじり剛性の向上に効果的な補剛方法を提案し、その挙動特性について考察した<sup>6),7)</sup>。この方法は、2主桁橋において通常主桁に直角に配置されている横桁を、約45°の角度で連結し、且つ主桁の下段に配置する方法である。このような配置方法を採用することにより、外桁のたわみの減少、ねじり角の減少及び主桁下フランジに生じる垂直応力の減少の効果がみられ、ねじりを受ける曲線2主桁橋に有効であると考えられる。また、省力化の観点からは、部材数の増加はほとんどなく、主桁と横桁を連結するための小型材片が多少増加するだけで、通常の2主桁橋と同程度の省力化が達成できる。

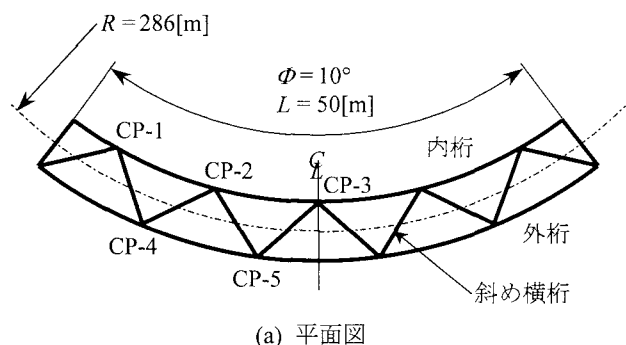
本研究はこのような優れた挙動特性を示す橋梁構造の主桁と横桁の連結部に着目し、この部位における応力分布性状について考察しようとするものである。連結部はそれほど複雑な構造ではないが、ガセットプレートが溶接されているため応力集中の発生が予想され、且つ斜め横桁には軸力に加えて曲げやそりモーメントが作用することから、連結部近傍の応力分布を詳細に検討する必要がある。また、平成14年の道路橋示方書改訂により、鋼橋の設計には鋼床版以外でも疲労の影響を考慮することとなり<sup>8)</sup>、疲労耐久性の確保が今後非常に重要となってくる。

連結部における応力集中の解析を行うため、橋梁全体のFEMモデルを作成し、連結部周辺付近を細かくメッシュ分割した。連結部周辺はガセットプレートや仕口板等の部材が存在し、溶接接合と高力ボルト接合が用いられている。連結箇所をできるだけ忠実にモデル化するため、要素にはシェル要素の他一部ソリッド要素も使用している。計算には有限要素法汎用構造解析プログラムMSC/NASTRANを使用し、弾性解析を実行した。

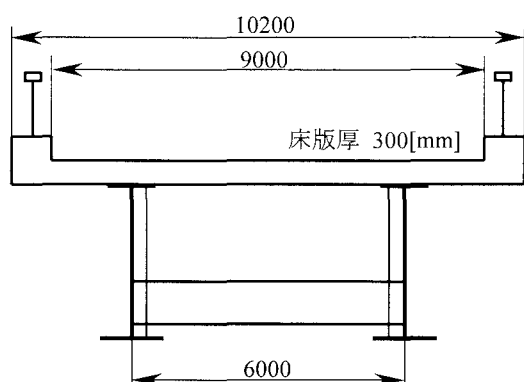
## 2. 曲線2主桁橋の解析モデル

### 2.1 全体構造

解析モデルは図-1のような平面形状及び断面を有する曲線2主桁橋とする。断面寸法を表-1に示す。横桁は図に示す通り斜め方向に配置されており、主桁の下段に連結されている。横桁の断面は、軸力のみ作用する一般的な横構とは異なり、せん断力、曲げモーメント、軸力、そりモーメントを負担するH形断面としている。図中の記号CP-1～CP-5は主桁と横桁の連結部を表し、これらの箇所における応力分布を調べることとする。



(a) 平面図



(b) 断面図

図-1 曲線2主桁橋解析モデル

図-2は解析モデルの要素分割図を表している。図(a)のコンクリート床版と図(b)または(c)の鋼桁は、実際には節点を共有させて剛結とし、合成桁と見なしている。図(b)は要素分割が粗いモデルで、橋梁の全体挙動を把握するために作成したものである。図(c)は着目する連結部を細か

表-1 断面寸法[mm]

|       | 主桁    | 横桁   |
|-------|-------|------|
| $B_u$ | 500   | 300  |
| $t_u$ | 16~50 | 25   |
| $H$   | 3000  | 1000 |
| $t_w$ | 24    | 16   |
| $B_l$ | 800   | 300  |
| $t_l$ | 24~61 | 25   |

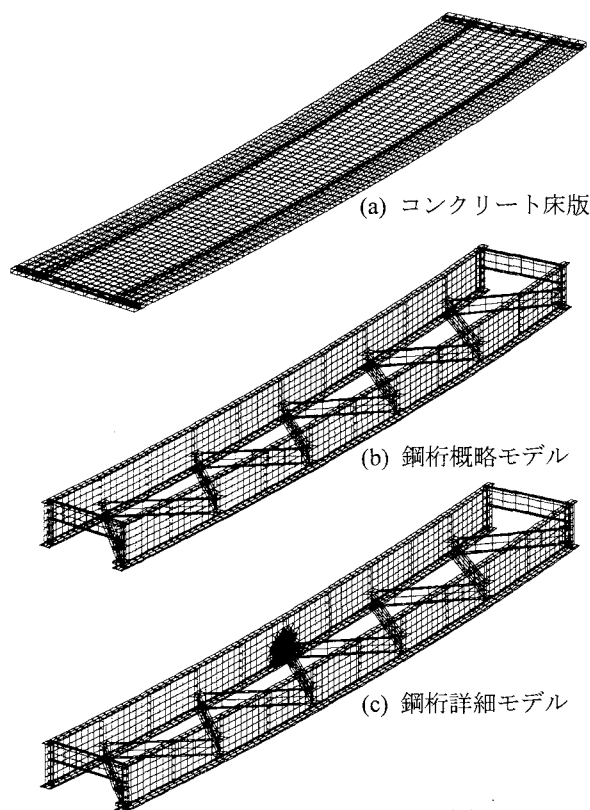


図-2 FEM メッシュ図

く要素分割したモデルで、応力集中を調べるためのものである。ここでは一例として、図-1に示したCP-3の連結部を着目するモデルを示している。モデル化に際しては、鋼部材にはシェル要素を使用し、ヤング係数は $E_s = 2.0 \times 10^{11} [\text{N/m}^2]$ としている。コンクリート部材にはソリッド要素を使用し、ヤング係数を $E_c = 2.9 \times 10^{10} [\text{N/m}^2]$ としている。

### 2.2 主桁と横桁の連結部

図-3に主桁と横桁の連結方法を示す。ガセットプレートは主桁の腹板に溶接接合されている。横桁の上下フランジはガセットプレートに高力ボルト接合されている。添接板を介せずに、直接ガセットプレートに一面摩擦接合することとしている。横桁の腹板は、垂直補剛材に溶接された仕口板に高力ボルトによる一面摩擦接合がなされている。溶接接合は工場でなされ、高力ボルト接合は現場で行なわれることを想定している。このような接合方法を用いれば、添接板が不要となり、合理化・省力化を損ねることはそれほどないものと考えられる。

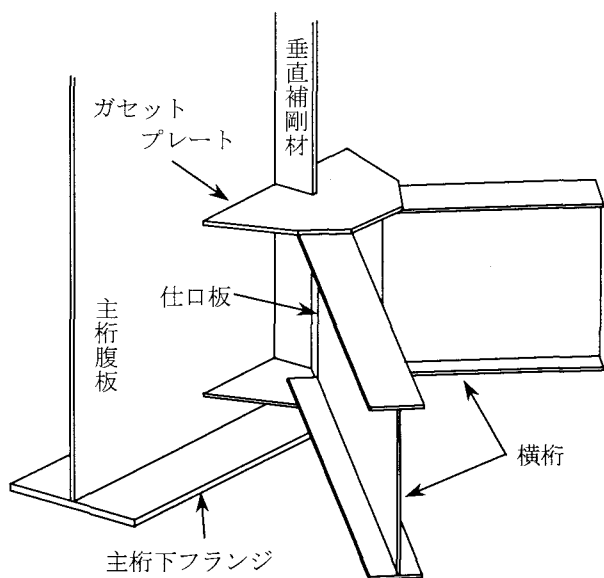


図-3 主桁と横桁の連結

活荷重載荷時は、高力ボルトの破損や摩擦接合の接合面における滑りは生じないものと仮定し、仕口板と横桁腹板及びガセットプレートと横桁フランジは一体となって挙動するものとする。従って、有限要素モデルを作成する際は、ボルトやボルト孔、摩擦面等は考慮せず、プレートのみを要素分割の対象とした。

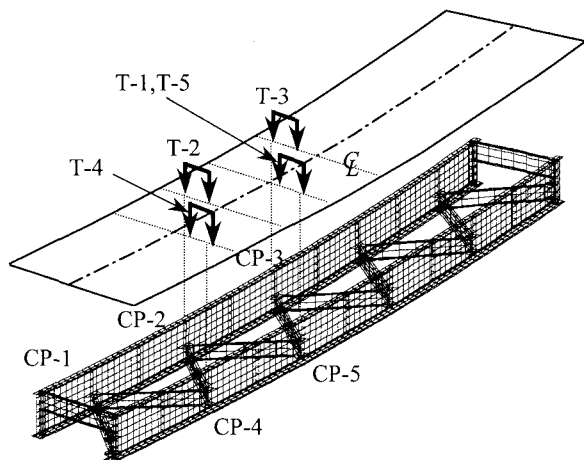


図-4 T荷重載荷位置

### 2.3 荷重条件

荷重は車線中央にT荷重を1組載荷させるものとする<sup>9)</sup>。また、衝撃係数を0.1とする。主桁横桁連結部の応力分布を調べるため、この箇所においてもっとも不利となるような載荷位置に荷重を載荷する。あらかじめ行なった予備計算の結果、CP-1～CP-5のいずれの連結部においても、下側のガセットプレートと腹板の溶接端部で高い応力集中が見られた。そこで、この溶接端部を着目点とする影響線を作成し、T荷重の載荷位置を図-4のように決定した。図中のT-1～T-5は、それぞれ連結部CP-1～CP-5の応力分布を求めるための載荷位置を示している。CP-1の応力が最大

となる載荷位置はCP-5の上部の床版上である。その他の連結部の応力が最大となる載荷位置は、着目点上部の床版上である。T荷重による応力が最小となる載荷位置は、いずれの着目点においても支点上であり、応力は0である。

### 3 シェル要素とソリッド要素によるモデル化の妥当性

ガセットプレートと横桁フランジの重なった部分、及び仕口板と横桁腹板の重なった部分には、3次元ソリッド要素を挿入してモデル化を行なった。2次元シェル要素のみでは、重なった2枚の板の板厚中心間隔を考慮できず、同一平面内にガセットプレートとフランジ、仕口板と横桁腹板を作成することになる。これら全ての部材に3次元要素を用いれば、板の重なりも考慮できるが、本研究では節点数を減らすため、鋼部材をシェル要素に分割し、2枚の板の重なっている部分にのみソリッド要素を挿入して、偏心影響を考慮することとした。

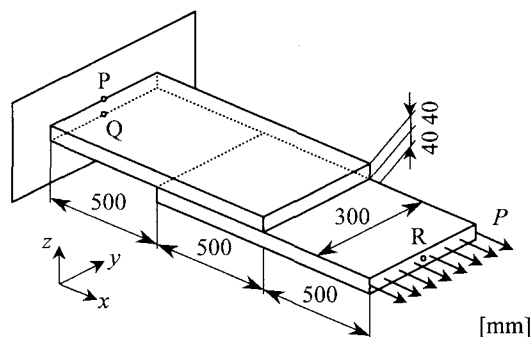


図-5 2枚のプレートが重なった片持ちばり

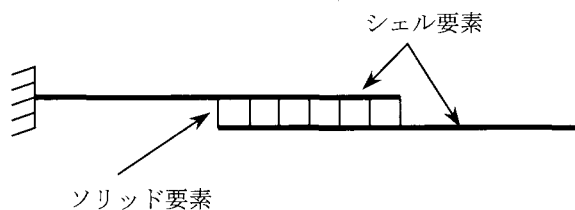


図-6 シェル要素とソリッド要素を用いたモデル

このようなモデル化が妥当であるか検証するために、図-5のような2枚の板からなる簡単な構造を解析する。一端固定、他端自由の片持ちばりで自由端に $P=150$  [kN]の引張荷重を与える。この構造を全てソリッド要素でモデル化して解析した結果を正解と見なすこととする。これに対し、図-6のように2枚の板をシェル要素でモデル化し、重なった部分のみ、板厚中心間隔に等しい高さを持つソリッド要素を挿入し、2枚の板を結合する。

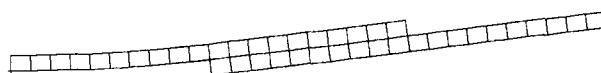


図-7 引張荷重による変形 (ソリッド要素モデル)

表-2 モデル化の違いによる解析結果の比較

|            |     | ソリッド要素のみから成るモデル            | シェル要素+ソリッド要素から成るモデル        |
|------------|-----|----------------------------|----------------------------|
| P点のx方向垂直応力 |     | -72.8 [N/mm <sup>2</sup> ] | -72.0 [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Q点のx方向垂直応力 |     | 96.6[N/mm <sup>2</sup> ]   | 95.9[N/mm <sup>2</sup> ]   |
| R点の変位      | x方向 | 0.46[mm]                   | 0.47[mm]                   |
|            | z方向 | 12.0[mm]                   | 12.3[mm]                   |

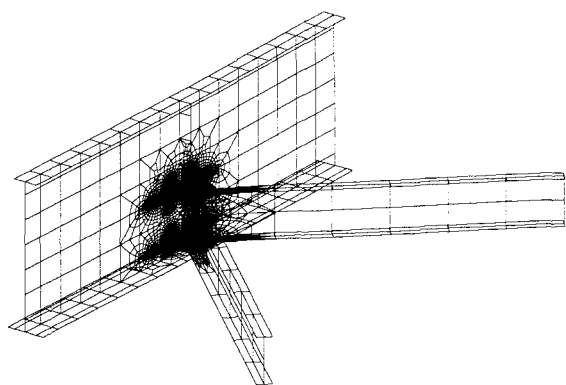


図-8 連結部付近のメッシュ図

図-7は引張荷重による変形を拡大表示させたものである。鉛直方向(z方向)には载荷していなくても、偏心の影響により鉛直変位が生じている。解析結果のうち、図-5のP, Q点のx方向垂直応力と、R点の変位を表すと表-2の通りとなった。P, Q点の応力から、固定端には曲げ応力が生じていることが分かる。応力、変位共に両モデルは非常によく一致している。このことからシェル要素+ソリッド要素から成るモデルでは、荷重の偏心が正しく考慮され、はりの伸び剛性と曲げ剛性が妥当であるものと考えることができる。従って、ガセットプレートと横桁フランジの重なり部、及び仕口板と横桁腹板の重なり部には、図-6のようなモデル化を行うものとする。

図-8は図-2(c)の主桁-横桁連結部を拡大表示させたものである。要素分割が細かいため表示が複雑であるが、板の重なり部にソリッド要素が用いられている。

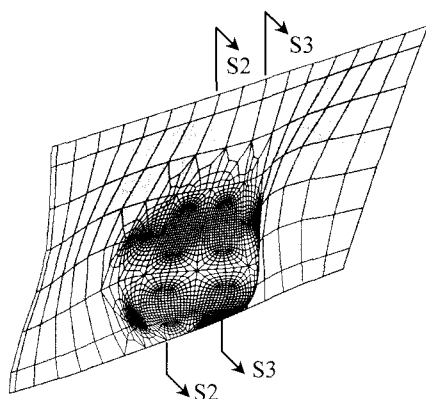
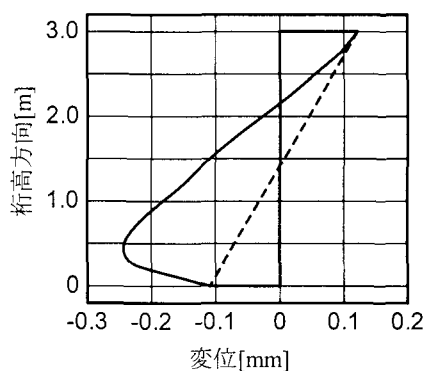
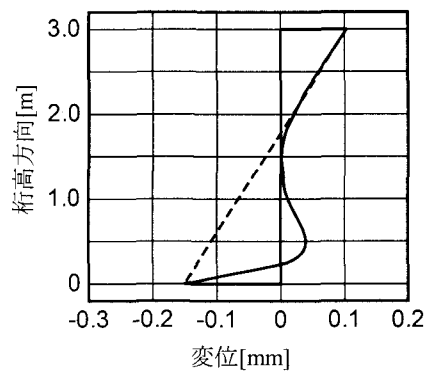


図-10 主桁腹板の面外変形



(a) 断面 S2



(b) 断面 S3

## 4. 解析結果

### 4.1 ガセットプレート・仕口板の応力分布

連結部CP-1～CP-5をそれぞれ詳細に要素分割した計5通りのFEMモデルを解析し、ガセットプレート、仕口板、主桁の腹板に生じる応力分布及び変形について検討する。ガセットプレートと仕口板については、応力が最も大きい値となったCP-1部に関して述べる。

図-9はCP-1の位置におけるガセットプレート、垂直補剛材と横桁腹板を連結する仕口板に生じる応力を濃淡で表したものである。応力は最大主応力で表示させている。応力集中は下ガセットプレートの右側端部に発生している。応力の最大値は $21.6 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ であり、その方向は図中に示した矢印の方向である。ガセットプレートのその他の部分では大きな応力集中は発生していない。また、仕口板や垂直補剛材にも際だった応力集中は発生していない。これらより、ガセットプレートと仕口板を用いて横桁と連結する構造に特に問題は無いものと考えられる。

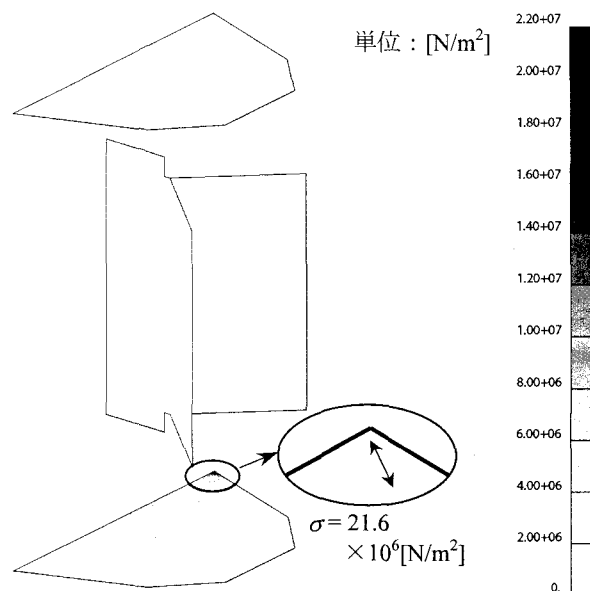


図-9 ガセットプレート・仕口板の応力分布

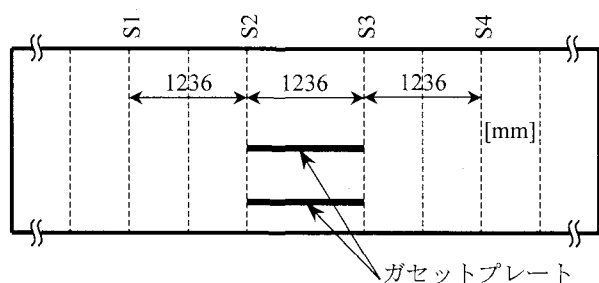


図-12 主桁腹板の断面の位置

#### 4.2 主桁腹板の面外変形

主桁の腹板には桁として挙動することによる曲げ応力に加えて、ガセットプレート連結部に局部的な応力が発生する。本研究で対象とする、横桁を斜めに配置する構造では、横桁の軸方向力が主桁の腹板に作用するため、より大きな応力集中や変形が生じるものと予想される。

図-10はCP-1の連結部における主桁腹板の面外変形の様子を拡大表示させたものである。腹板の下部において内側と外側に面外変形が大きく生じていることが分かる。図-11はガセットプレートの端部を通る断面S2及びS3における面外変位を表している。ここでS2、S3とは、図-12に示す断面の位置を表している。図-11の横軸は変位を表しており、正の値がガセット連結側(外桁側)方向への変位を表している。点線は主桁自体のねじれによる変位を表し、腹板の上端と下端の水平方向変位を直線で結んで描いた変位である。すなわち実線と点線の差が面外の変位を表している。

下ガセットプレート部に着目すると、断面S2では負の面外変位が生じており、曲率中心方向へ変位している。S3断面では正の面外変位、すなわち外桁側に変位していることが分かる。これは斜め横桁の作用によりガセットプレートが面内に回転しようとする力が働き、その結果、腹板のS2断面を押す力とS3断面を引張る力が生じたためと考えられる。

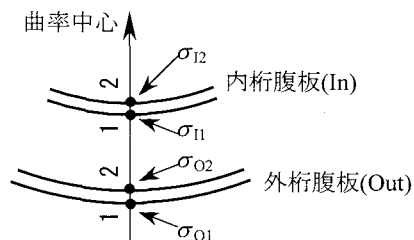


図-13 垂直応力の記号と位置

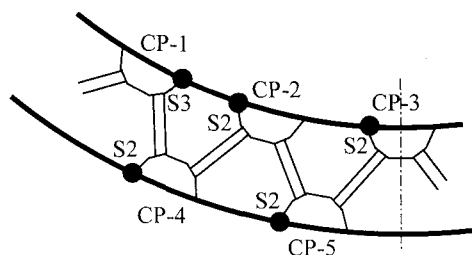
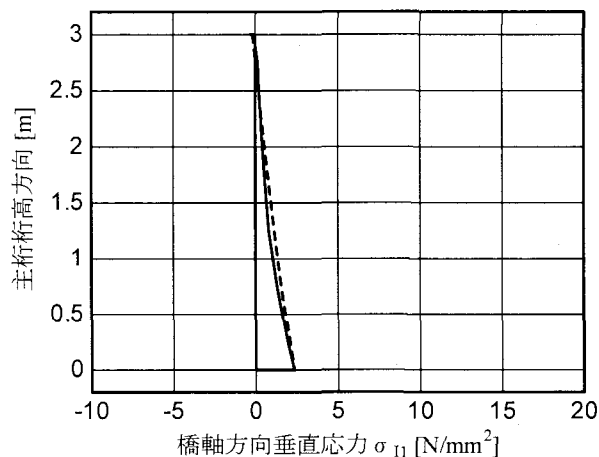


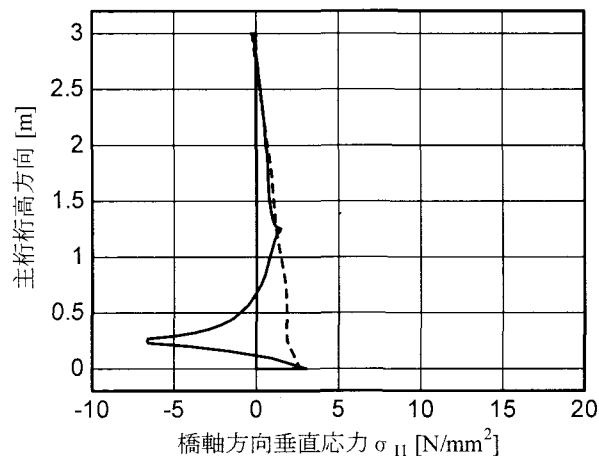
図-14 最大応力の発生箇所

#### 4.3 主桁腹板の応力分布

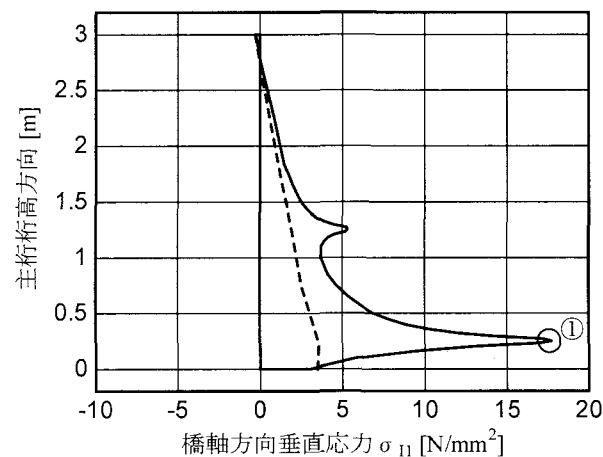
主桁腹板の応力分布について検討する。応力は図-13のように腹板の両面、すなわち1と2の面の値を調べる。添字のI、Oはそれぞれ内桁、外桁を表す。図-14に示された連結箇所CP-1～CP-5を解析した結果、応力集中の最大値はいずれも下ガセットプレートの端部、すなわち図中の黒丸の位置で発生した。



(a) 断面 S1

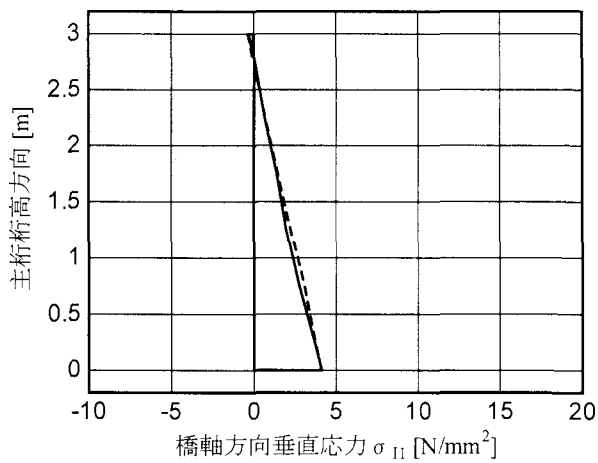


(b) 断面 S2

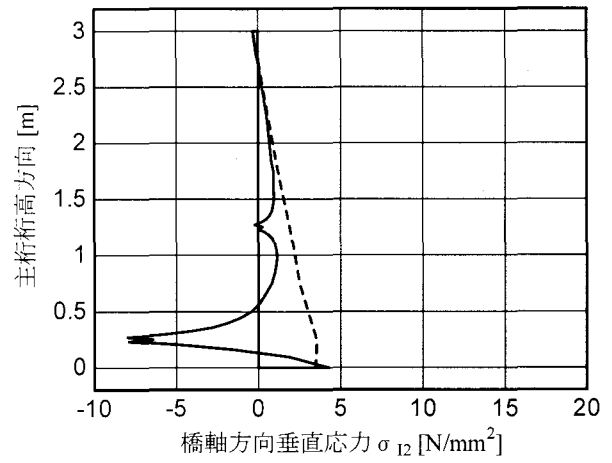


(c) 断面 S3

図-15 連結部 CP-1 の応力分布



(d) 断面 S4



(e) 断面 S3 (内側の面)

図-15(続き) 連結部 CP-1 の応力分布

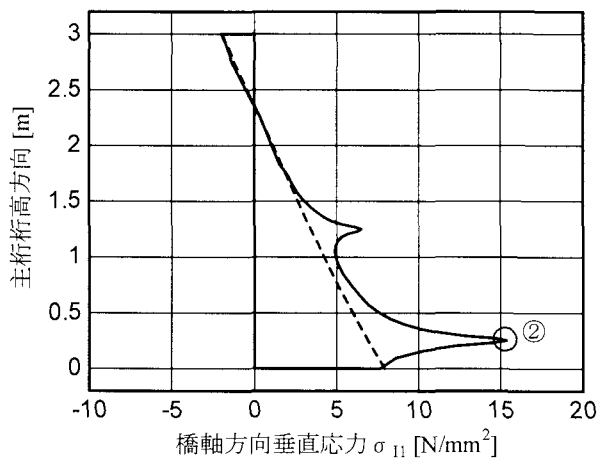


図-16 連結部 CP-2 (断面 S2) の応力分布

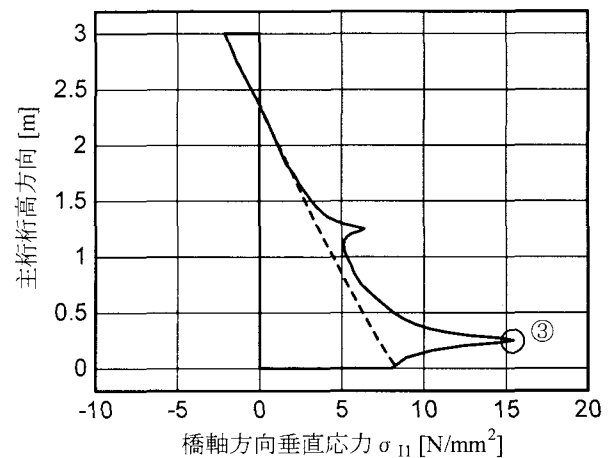


図-17 連結部 CP-3 (断面 S2) の応力分布

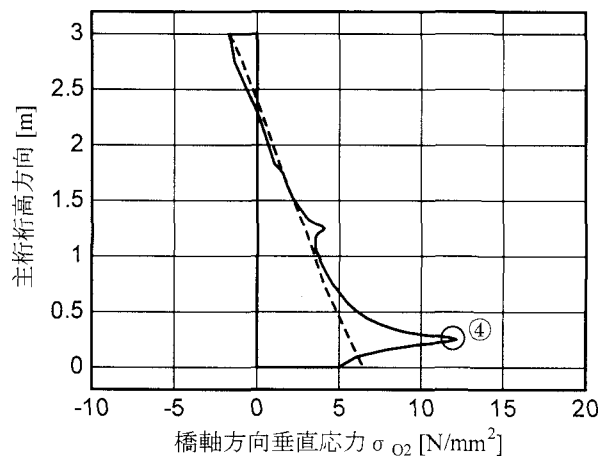


図-18 連結部 CP-4 (断面 S2) の応力分布

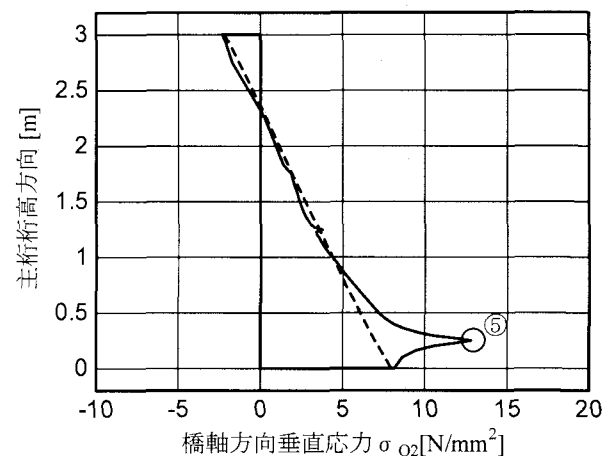


図-19 連結部 CP-5 (断面 S2) の応力分布

図-15はCP-1~CP-5のうち最も大きな応力が発生したCP-1の橋軸方向垂直応力を示したものである。点線は図-2(b)で表されたメッシュの大きいFEM解析モデルより算出した応力分布であり、公称応力にほぼ等しい。ガセットプレート溶接部から少し離れたS1、S4断面(図-12参照)では、図-15(a), (d)で表されるように公称応力とほぼ等し

く、応力集中は生じていない。一方、ガセットプレートの両端を通る断面であるS2、S3では応力の集中が見られ(図-15(b), (c))、特にS3断面の下ガセット連結部で大きな応力集中が発生している。図-15(e)は最も大きな応力集中が発生したS3断面(図-15(c))の裏面、すなわち曲率中心側の面の応力を示したものである。この面にはガセットプレ

ート溶接部付近で圧縮応力が生じている。図-15(c), (e)から得られる応力分布の傾向は、図-10に示した面外変形の結果と一致している。

図-16, 17に連結部CP-2、CP-3の応力分布をそれぞれ示す。いずれも応力が最大となる断面S2の外側の面における応力分布を表している。応力分布形状はCP-1と同様の傾向を示している。点線は応力集中を考慮できないモデルによる公称応力で、主桁の曲げ応力を表しており、支点に近いCP-1では小さく、支間中央部のCP-3では大きな値となっている。しかし、応力集中の影響は支間中央よりも支点に近い方が大きい。これは支点付近の斜め横桁に生じる軸方向力(軸力と、曲げやねじりに起因して作用する軸方向の力を含む)が、支間中央の横桁より大きいためである<sup>6)</sup>。

次に外桁と横桁の連結部に着目したCP-4及びCP-5の橋軸方向垂直応力を図-18, 19にそれぞれ示す。外桁では最大値がS2断面において生じている。支間中央に近いCP-5において公称応力が大きくなっており、ガセットプレート連結部の応力集中も、CP-5の方が大きな値となっている。

鋼道路橋の疲労設計指針<sup>9)</sup>では、応力度による疲労照査が公称応力に基づいて行うこととされている。これによると、面外ガセットプレート( $l > 100[\text{mm}]$ )を溶接した継手の疲労強度等級はFまたはGである。今仮に強度等級をGとすると、一定振幅応力に対する応力範囲の打切り限界は、 $\Delta\sigma_{ce} = 32[\text{N/mm}^2]$ ,  $\Delta\tau_{ce} = 67[\text{N/mm}^2]$ となる。一方、連結部CP-1～CP-5の中で最大となる公称応力は、CP-3における $\sigma = 7.2[\text{N/mm}^2]$ ,  $\tau = 0.4[\text{N/mm}^2]$ であった。これらを用いて疲労照査を行うと、以下の通りとなる。

$$\Delta\sigma_{max} = 3.0 \times 7.2 = 21.6 < 32 = \Delta\sigma_{ce} \times 1.0 \times 1.0 \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{max} = 3.0 \times 0.4 = 1.2 < 67 = \Delta\tau_{ce} \quad (2)$$

ここで、活荷重補正係数を3.0、平均応力に関する補正係数及び板厚に関する補正係数を1.0とおいた。

以上の疲労照査より、合格の結果を与える。しかしながら、指針は標準的な構造形式を対象としており、本研究で提案するような特殊な構造形式に対しては、実験を行うなど別途検討する必要があると考えられる。従って、上記の計算はあくまで参考値である。

#### 4.4 フィレットによる応力集中の緩和

主桁とガセットプレートの連結部に発生する応力集中を緩和させるため、図-20に示すフィレットをガセットプレートに設けて解析を行った。図-21はCP-1の主桁腹板に生じる応力分布を濃淡で表したものである。図-21(a)で示された応力集中は、図-15(c)の①点に一致する。この値は $17.7[\text{N/mm}^2]$ であるのに対し、フィレットを設置したモデルでは、 $13.3[\text{N/mm}^2]$ に低減させることができた。その他の連結箇所CP-2～CP-5における応力集中に関して、フィレットが有る場合と無い場合の比較を表-3に示す。表の①～⑤点は、それぞれ図-15～19中に示された①～⑤点に相当する。いずれの箇所においても、フィレットを設けることにより、応力が減少していることが分かる。

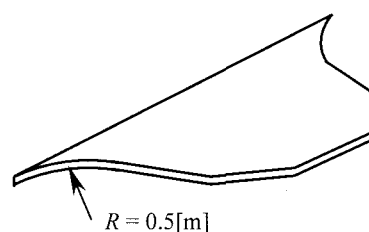


図-20 フィレットを有するガセットプレート

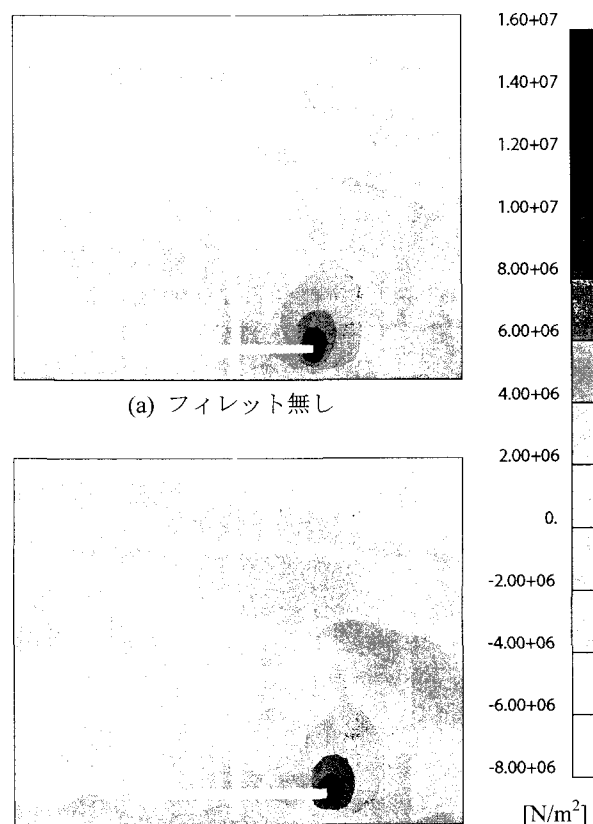


図-21 連結部 CP-1 の腹板の応力集中

表-3 フィレットの有無による最大応力の比較

|    | フィレット無<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | フィレット有<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----|--------------------------------|--------------------------------|
| ①点 | 17.7                           | 13.3                           |
| ②点 | 15.4                           | 14.7                           |
| ③点 | 15.4                           | 14.8                           |
| ④点 | 12.1                           | 10.9                           |
| ⑤点 | 13.5                           | 13.4                           |

また、文献9),10)によると、フィレットの無い場合は疲労強度等級がFまたはGであるのに対し、フィレットを有する場合は強度等級がEに上がる。以上より、ガセットプレートの溶接部における疲労耐久性を高めるためにフィレットを設けることは、本研究のような横桁を斜めに配置する構造においても有効な方法であると考えられる。

## 5. あとがき

曲線2主桁橋において、ねじりに対する補剛効果が高い横桁斜め配置構造を適用することを考え、横桁連結部の応力分布性状を把握するためにFEMによる数値解析を行った。構造のモデル化は、全体構造を比較的粗いメッシュを用いて要素分割し、横桁連結部付近のみ細かくするものとした。連結部では、ガセットプレートと横桁フランジ、及び仕口板と横桁腹板が添接板を介せずに一面摩擦接合されることを想定しており、これをできるだけ正確に再現できるモデル化を行った。すなわち、接合面にソリッド要素を挿入し2枚のプレートの板厚中心間隔を考慮することとした。

解析の結果、主桁の腹板に面外変形が生じると同時に応力集中が発生した。この面外変形は、横桁の軸方向変位によってガセットプレートが面内の回転移動を起こしたことによるものと考えられる。ガセットプレート溶接部周辺では腹板の公称応力に加えて面外変形による板曲げ応力が生じ、更にガセットプレート先端部近傍では局部的な応力集中となった。この応力集中を緩和させるために、ガセットプレートにフィレットを設けたところ、応力の値を減少させることができた。

応力集中の値そのものはそれほど大きなものではなく、疲労設計指針に従った照査によっても最大応力範囲は許容値以下である。しかしながら、本研究の橋梁構造は曲線橋であり、且つこれまでにない特殊な形式であるため、疲労安全性に関して更に詳細に調べる必要があると考えられる。

曲線2主桁橋の横桁を斜めに配置する新しい構造に関し、横桁連結部近傍の応力分布性状を検討したが、今後は実用化に向けた検討、すなわち製作性、施工性、疲労設計の観点からの検討が必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：合理化桁に関するデザインマニュアル、次世代土木鋼構造研究特別委員会合理化桁の設計法小委員会報告書、2000.
- 2) 橋吉宏，街道浩，小西哲司：鋼道路橋に適用されるPC床版の現状と課題について，第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.17-22，1998.
- 3) 阿部幸夫，久保圭吾，高木優任，武内隆文：各種合成床版の構造と適用例，第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.23-30，1998.
- 4) 村瀬孝典，小澤一誠，戸田利秋，山田尚之，王慶雲：少数主桁橋の曲線橋への適用可能性に関する研究、鋼構造年次論文報告集、第7巻、pp541-548、1999.
- 5) 中田知志，勝股徹：2主I桁橋の設計における曲線橋への適用性に関する検討、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集CD-ROM、2000.
- 6) 平沢秀之，林川俊郎，佐藤浩一，田上優介：横桁を斜めに配置した曲線2主桁橋の静的挙動に関する一考察，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1091-1098，2002.
- 7) 平沢秀之，林川俊郎，佐藤浩一，田上優介：単径間曲線2主桁橋の適用中心角に関する検討、鋼構造年次論文報告集、第10巻、pp87-94、2002.
- 8) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編(平成14年3月)，丸善，2002.
- 9) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 10) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版，1993.

(2003年9月12日受付)