

曲線2主桁橋の主桁－横桁連結部の有限要素解析

Finite element analysis of the connection between main girder and cross beam on curved twin I-girder bridge

北海道大学大学院 正員 平沢秀之 (Hirasawa Hideyuki)
 北海道大学工学部 ○学生員 佐藤匡介 (Sato Tadayuki)
 北海道大学大学院 フェロー 林川俊郎 (Hayashikawa Toshiro)
 北海道大学大学院 フェロー 佐藤浩一 (Sato Koichi)

1. まえがき

鋼橋建設に関わるコスト削減を果たすため、近年2主桁橋の施工例が増えてきている。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おり、従来のプレートガーダー橋と比較して、大幅な省力化がなされている。このような構造とすることにより鋼橋の製作のみならず、架設や維持管理においてもコスト削減が可能となっている¹⁾。

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^{2),3)}、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。

曲線2主桁橋のねじり剛性を高める方法として著者らは、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を提案した⁴⁾。この方法によれば、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見られた。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可能となる。

本研究では、横桁の斜め配置構造について更に詳細な検討を行うため、主桁と横桁の連結部に着目し、この箇所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。連結部に関しては、横桁の上下フランジはガセットプレートに直接、高力ボルト接合することによって添接板の省略を図った。上ガセットプレートは主桁腹板に溶接接合し、下ガセットプレートは主桁の下フランジに直接、溶接接合するものとする。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、且つ斜め横桁には大きな軸力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⁵⁾、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に先立ち、はり要素を用いた橋梁全体モデルによる骨組解析を行い、部材断面力と

変位を算出する。薄肉開断面構造であるため、1節点7自由度を持つはり要素を使用し立体解析を行う。次に連結部周辺の部分モデルをシェル要素及び一部ソリッド要素を使用して作成する。ガセットプレート溶接部付近は特に詳細な要素分割を行う。部分モデルの境界条件は全体解析から得られた変位、断面力から算出する。なお、部分モデルの解析には有限要素法汎用構造解析プログラムMSC/NASTRANを使用する。

2. 曲線2主桁橋の全体解析

2.1 解析モデル

全体解析モデルは図-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。断面諸元は表-1の通りである。鋼部材のヤング係数は $E_s = 2.0 \times 10^{11} [\text{N/m}^2]$ 、コンクリート床版とのヤング係数比は $n = 7$ とし、合成桁と見なした。図-1(a)の①、②、③は内桁及び外桁の断面の番号であり、それらの断面諸元は表-1の通りである。断面諸元を計算するに当たり、コンクリート床版については鋼に換算して

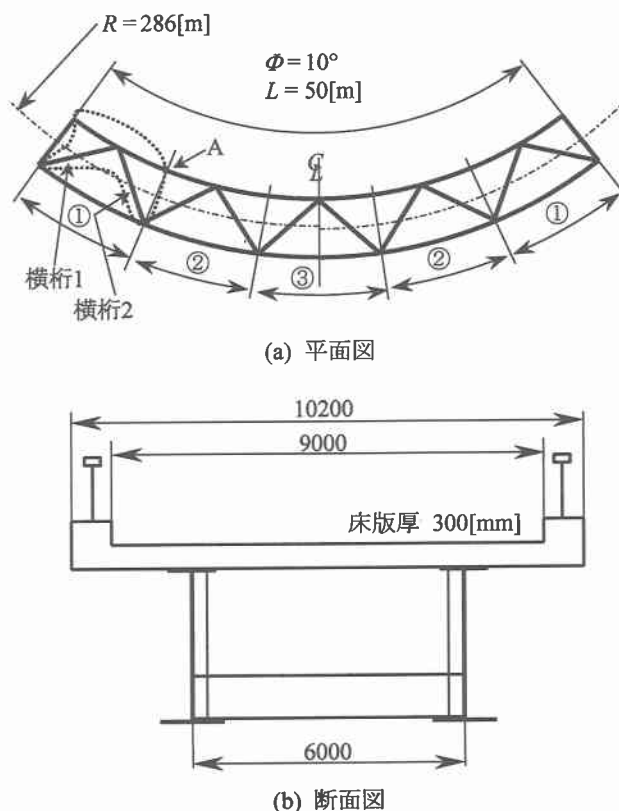


図-1 曲線2主桁橋全体解析モデル

表－1 全体解析に用いる断面諸元

	断面積 $A[\text{m}^2]$	断面2次 モーメント		純ねじり 定数 J_T $\times 10^{-3}[\text{m}^4]$	そりねじり 定数 C_W $\times 10^{-1}[\text{m}^6]$
		$I_y [\text{m}^4]$	$I_z [\text{m}^4]$		
内桁	①	0.3219	0.3404	0.4824	0.1772
	②	0.3367	0.4003	0.4843	0.2120
	③	0.3497	0.4527	0.4858	0.2553
外桁	①	0.3287	0.3729	0.4833	0.1887
	②	0.3547	0.4776	0.4864	0.2714
	③	0.3683	0.5364	0.4879	0.3333
横桁	3.1×10^{-2}	5.1×10^{-3}	1.1×10^{-4}	4.5×10^{-6}	2.8×10^{-5}

有効幅の範囲を考慮するものとした。主桁断面は許容応力度を満たすように諸元を決定した。横桁は全て同じ寸法を有するH形断面部材を用いた。荷重はねじり変形が大きくなるようにB活荷重を偏心載荷することとした。

表－2 横桁に作用する外力

	横桁1	横桁2
$F_x [\text{N}]$	-0.2304×10^6	0.1904×10^6
$F_y [\text{N}]$	0.4397×10^3	-0.1158×10^3
$F_z [\text{N}]$	-0.6961×10^4	-0.1049×10^5
$M_x [\text{Nm}]$	0.1485×10^3	0.4291×10^2
$M_y [\text{Nm}]$	0.9699×10^5	0.1262×10^6
$M_z [\text{Nm}]$	0.1627×10^4	-0.6309×10^3
$W_x [\text{Nm}^2]$	0.5605×10^3	0.2651×10^3

2.2 全体解析から得られる断面力と変位

曲線2主桁橋の全体構造解析を実行した結果、横桁に作用する軸力は支間中央の横桁で最小となり、端部の横桁で最大となった。そこで図－1(a)の横桁1と横桁2の連結部で大きな応力集中が発生すると考えられるため、これらの横桁を含む点線で囲まれた範囲内の部分モデルを作成し、解析を行うこととする。横桁1と横桁2に作用する断面力は表－2の通りとなった。横桁1には引張力、横桁2には圧縮力が作用している。

部分モデルを作成する際、主桁は図－1(a)の断面Aで切

表－3 主桁の変位

断面A の変位	$u = 0.967 \times 10^{-4} [\text{m}]$	$\theta_u = 0.726 \times 10^{-3} [\text{rad}]$
	$v = -0.135 \times 10^{-2} [\text{m}]$	$\theta_v = 0.973 \times 10^{-3} [\text{rad}]$
	$w = -0.114 \times 10^{-1} [\text{m}]$	$\theta_w = -0.129 \times 10^{-3} [\text{rad}]$

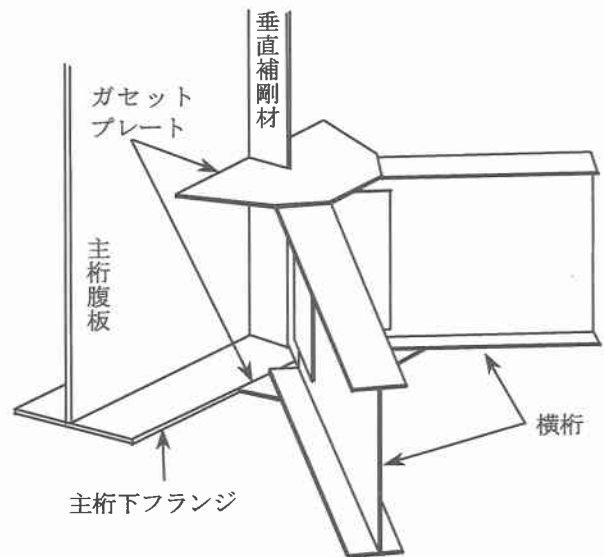
断され、この断面に境界条件を設定する必要がある。そこで全体解析における点Aでの変位を算出し、表－3のような結果を得た。

3. 主桁－横桁連結部の部分モデル

3.1 主桁と横桁の連結方法

図－2に主桁と横桁の連結方法を示した。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。上ガセットプレートは主桁腹板に溶接接合し、下ガセットプレートは主桁の下フランジに溶接接合されている。横桁の腹板は、垂直補剛材に溶接された仕口板に添接板を介して高力ボルト接合されている。

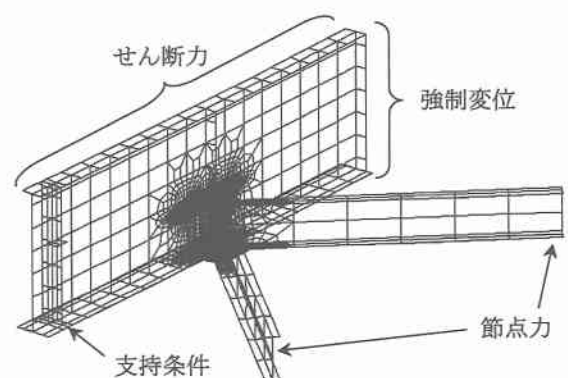
活荷重載荷時は、高力ボルトの破損や摩擦接合の接合面における滑りは生じないものと仮定し、仕口板と横桁腹板及びガセットプレートと横桁フランジは一体となって挙動するものと仮定する。従って、有限要素モデルを作成する際は、ボルトやボルト孔、摩擦面等は考慮せず、プレートのみを要素分割の対象とした。



図－2 主桁と横桁の連結部

3.2 FEM部分モデルのモデル化

解析モデルを図－3に示す。全体モデル解析の結果、応力集中が発生すると考えられる端部の横桁連結部分(図－1(a))



図－3 FEM解析モデル

の点線で囲まれた範囲内)を取り出した詳細モデルであり、ガセットプレートを接合している主桁部分近傍と横桁を含めたモデルである。

ガセットプレートと横桁フランジ連結部分には3次元立体要素であるソリッド要素を用いている。これは2次元シェル要素では、重なった2枚の板の板厚中心間隔を考慮できず、同じ平面内にガセットプレートとフランジを作成することになってしまうためである。それ以外の部分はすべて2次元シェル要素を用いて作成している。また、ガセットプレートとその付近は特に応力集中の可能性があるためメッシュ分割を周辺よりも細かくしてある。

3.3 外力と境界条件

外力と境界条件は図-3で示された箇所を設定する。部分モデルの主桁の端部には、全体モデルと同じくローラー支承となる条件を与える。主桁の切断面には、全体解析で得られた表-3の節点変位に等しくなるような変位を与える。横桁の端部には、表-2の節点力と等価となるような外力を与える。主桁の上フランジには、B活荷重に相当する外力と床版によって橋軸方向に作用するせん断力が作用する。このせん断力は合成桁の断面について、床版と鋼桁に作用する力の釣合の式を解くことによって算出した値を部分モデルに外力として与えている。

4. 部分モデルによる解析結果

4.1 部分モデルに与える境界条件の妥当性

図-4は部分モデルの主桁腹板の側面図である。S1～S4は応力分布を調べる断面の位置を表している。ガセットプ

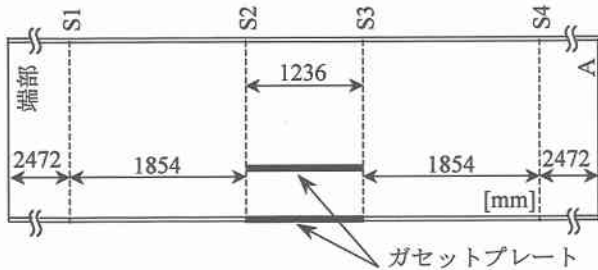


図-4 主桁腹板の断面の位置

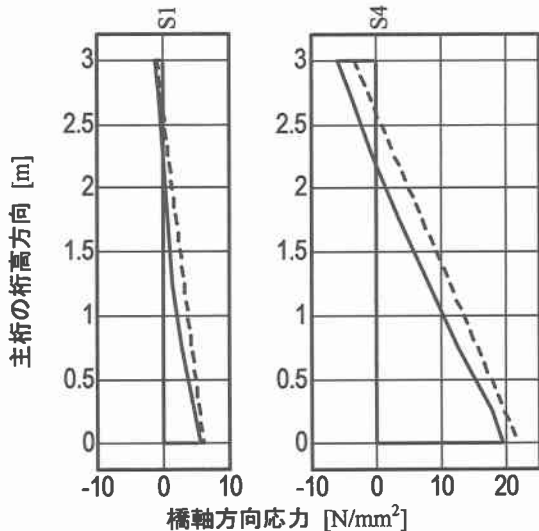


図-5 S1、S4断面の垂直応力分布

レートから十分離れており、応力集中の影響がほとんど無いと考えられるS1、S4の断面における応力分布を図-5に示す。実線は部分モデルによる解析結果であり、点線は全体モデルによる骨組解析結果の曲げモーメントから求めた曲げ応力(公称応力)分布である。合成断面の図心は下フランジの板厚中心から2.59[m]の点にあるが、中立軸はこの付近であることが分かる。また部分モデルと全体モデルの応力分布は、ほぼ等しいと考えることができる。これらのことから、部分モデルの主桁に与えた境界条件は妥当であると判断した。

4.2 ガセットプレート・仕口板の応力分布

図-6はガセットプレート、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von Misesの応力で表示させている。応力集中は横桁フランジとガセットプレートの重なった部分に生じており、応力の最大値は83.0[N/mm²]となっている。この箇所は溶接接合ではなく、高力ボルト接合が用いられるため、疲労破壊が生じる可能性は低いものと考えられる。また、仕口板には際だった応力集中は発生しておらず、応力の最大値は20.0[N/mm²]となっている。

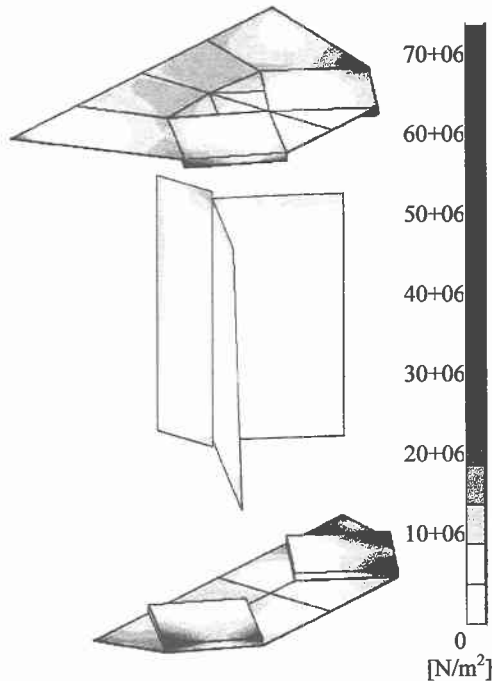


図-6 ガセットプレート、仕口板の応力分布

4.3 主桁の応力分布

図-7、図-8は主桁腹板におけるS2及びS3の各断面における橋軸方向の垂直応力分布を表したものである。これは腹板の外桁側の面における応力を表示している。点線は全体モデルから得られる曲げ応力であり、直線分布をなす。S2及びS3断面はガセットプレートの端部を通る断面であり、ガセットプレートの連結部分である桁高が0[m]と1[m]の位置で応力集中が発生している。S2断面の桁高1[m]の位置における応力の値は35.1[N/mm²]である。S3断面の桁高1[m]の位置では圧縮応力が発生しており、応力の値は-1.75[N/mm²]である。これは横桁1(図-1参照)では引張力、

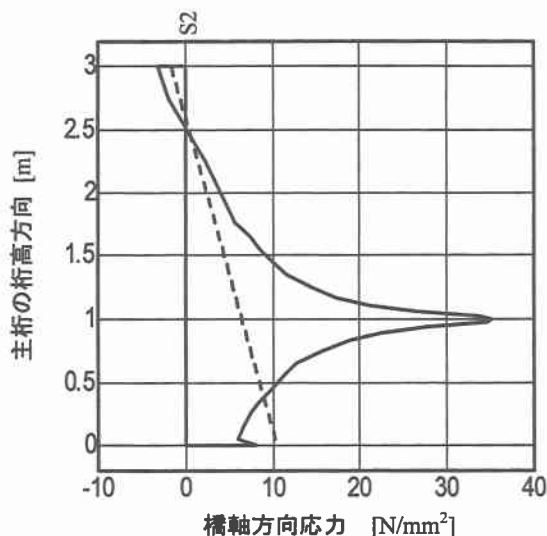


図-7 S2断面の垂直応力分布

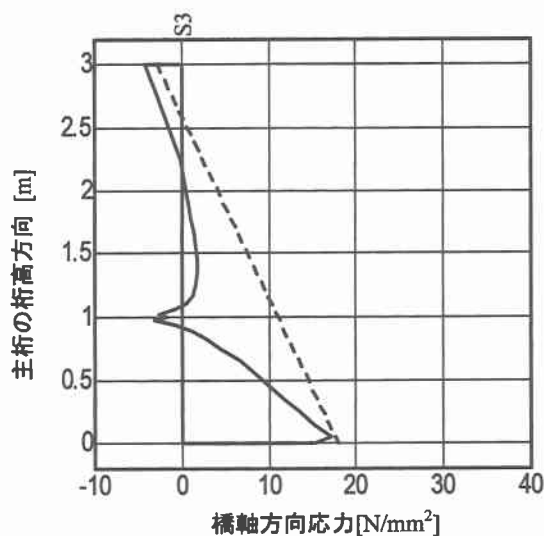


図-8 S3断面の垂直応力分布

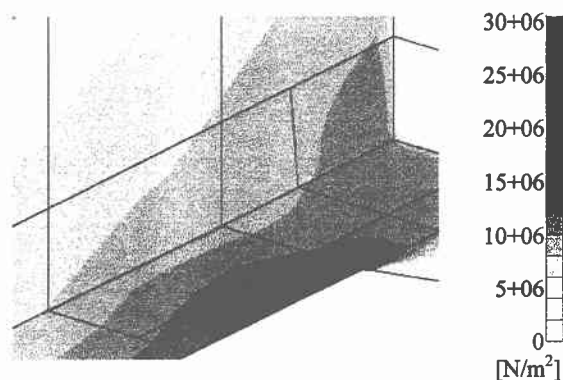


図-9 下ガセットプレートと主桁下フランジ
連結部分の応力分布

横桁2では圧縮力が作用し、これらの力がガセットプレートを面内に回転させ、その結果ガセットプレートの左端では主桁腹板が外桁側へ向かう力、右端では主桁腹板が中心方向へ向かう力が生じ、主桁腹板の面外変形が起こっているためであると考えられる。

図-9は下ガセットプレートと主桁下フランジの連結部分の端部における応力分布を表している。応力は橋軸方向の応力を示している。この部分は、フランジにガセットプレートが溶接接合されており、鋼道路橋の疲労設計指針⁶⁾によると面内ガセット継手の強度等級はG(50)である。FEM解析結果より、この箇所の応力は $24.1[\text{N}/\text{mm}^2]$ であるので問題はないと考えられる。

5. あとがき

近年のコスト縮減に対する強い要求から、曲線橋に2主桁橋を適用するに当たり、通常は主桁に対して垂直に配置されている横桁を斜め配置とする構造を提案し、主桁と横桁の連結部の応力性状を把握することを目的として、FEM解析を行った。

まず、はり要素による全体モデルの骨組構造解析を行い、断面力と変位の算出を行った。次に、主桁と横桁の連結部に着目した部分モデルを作成した。ここでは、ガセットプレートと横桁フランジの連結部分が添接版を介せず一面

摩擦接合することを想定しているため、3次元立体要素であるソリッド要素を用いてモデル化を行った。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。それ以外の部分はすべて2次元シェル要素を用いて作成し、部分モデルの境界には、全体解析から得られた断面力及び変位と等価となるような境界条件と外力を設定した。

部分モデルによるFEM解析の結果、ガセットプレートと横桁フランジの接合部分に応力集中が発生した。しかし、応力の最大値は $83.0[\text{N}/\text{mm}^2]$ であり、疲労破壊が生じる可能性は低いと考えられる。垂直補剛材と横桁腹板を連結する仕口板には際だった応力集中は発生しなかった。主桁の橋軸方向応力は、ガセットプレートが連結した部分で多少の応力集中が発生したものの、それほど顕著な値ではなく、疲労安全性に関しても問題ない範囲であると考えられる。

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) 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.
- (5) (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.
- (6) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.