

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

Static behavior of horizontally curved two-girder bridge with cross beams positioned diagonally

平沢秀之*、林川俊郎**、佐藤浩一***、田上優介****

Hirasawa Hideyuki, Hayashikawa Toshiro, Sato Koichi and Tagami Yusuke

*工修 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)

**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)

****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)

Two-girder bridges do not have strong torsional stiffness due to their open cross-section. Therefore, this kind of bridges is limited to the straight girder bridge or the curved girder bridge with large radius of curvature for now. If the two-girder bridge is applied to curved girder bridge with comparatively large center angle, it is necessary to reinforce the girder against the torsional deformation. The present study takes new positioning of cross beams as a method of reinforcing the curved girder bridge. Cross beams are installed in lower position of main girder and are connected to main girders diagonally, not at right angles. The lower position of cross beams has an effect as pseudo box cross-section. The diagonal location of cross beams can resist the torsional moment in the same way as lateral bracings. As a result of numerical calculation, it is obtained that the curved two-girder bridge presented in this study has more effects on girder displacements and stresses than that of normal two-girder bridge. In addition, load distribution of cross beams to main girders in the presented type is in good performance.

Keywords : curved girder bridge, cross beam, two-girder bridge, diagonal position

キーワード : 曲線橋、横桁、2主桁、斜め配置

1. まえがき

公共工事に対するコスト縮減の要求が、近年益々高まっており、鋼橋の分野においても省力化に対応した橋梁形式の研究開発が活発に行われている。日本道路公団等で採用実績の多い2主桁橋は、省力化、合理化を進める有効な橋梁形式の一つである¹⁾。この形式は、製作及び架設時のコスト縮減のみならず、将来的な維持管理の容易さや高耐久性を有しているものとして期待されており、今後も架設事例が増えていくことと予想される。

このような省力化、経済性向上を意図して建設された2主桁橋の実例を見ると、平面線形については直線橋、あるいは曲率半径の非常に大きい曲線橋(例えば日本道路公団北海道縦貫自動車道ホロナイ川橋²⁾で、 $R=1000[m]$ 、北海道横断自動車道千島の沢川橋³⁾では、 $R=2200[m]$)に限られている。曲率半径の小さい曲線橋には、箱桁橋や格子桁橋がねじり変形に抵抗する上で有利である。2主桁橋は断面を大きくすることで曲げ剛性を増大させることができるが、基本的に開断面構造であるためねじり剛性は極めて小さい。曲線橋に2主桁橋を採用するに当たっては、ねじり剛性の確保が重要であると考えられる。

曲線橋を対象とした2主桁橋の研究報告はこれまでのところあまりなされていない。村瀬ら⁴⁾は2主桁橋の試設

計に基づき、床版及び床版と主桁連結部に生じる応力等を検討し、曲線橋への適用性について考察している。中田ら⁵⁾は支間長を一定とした種々の解析モデルを用いて、2主桁曲線橋のたわみ性状や横桁、垂直補剛材及び床版発生応力について検討を行っている。また著者らによる既往の研究では、横桁は下段配置とすることが主桁のたわみ及び応力の面から有利であること⁶⁾、また主桁と横桁のみでねじりに抵抗するには限界があり、横構の設置が効果的であること⁷⁾を明らかにした。横桁配置に関しては、直線橋の場合は力学的観点から配置位置が設計上それほど問題にならないとする研究結果^{8,9)}とは対照的であると言える。

曲線橋に横構を設置することは、確かに有効であるものの、部材数が増加するため省力化の要求に逆行する恐れがある。また主桁間隔が大きくなると、横構部材長も大きくなり、細長比の制限及び許容軸方向圧縮応力度の制限から横構断面をかなり大きくしなければならず、鋼重増等の不利な面が生じる可能性もある。そこで本研究では、2主桁橋を比較的曲率の大きい曲線橋に適用するために、省力化を妨げない範囲でねじり剛性を高める新たな方法として、横桁を斜めに配置する構造を提案するのである。横桁を主桁に直角ではなく、斜めに配置する

ことによって、横構と同様な効果、すなわちねじりによる応力や変形を低減させる効果を期待している。更にこの横桁を曲線橋に有利な下段に配置し、床版と併せて疑似箱桁断面としての機能を持たせている⁹⁾。このような横桁配置方法を採用しても、直角な配置方法と比較して部材数は横桁が1本増加するに留まり、それに伴う小型材片数の増加も僅かである。従って、通常の2主桁橋と同程度の省力化が可能であると考えられる。

本文では曲線2主桁橋における斜め配置の横桁の効果を調べるため、種々の異なる中心角を有する曲線橋モデルを作成し、FEM解析を行った。数値計算では、まず主桁に生じる応力やたわみ及びねじり角を求め、横桁を直角に配置する一般的な2主桁橋に比べて優れた効果を発揮することを示した。次に斜めに配置した横桁が、主桁に対してどの程度の荷重分配性能を有しているかについて、影響面を作成することにより検討した。またそれぞれの横桁が、軸力や曲げ及びねじりを受けることによって生じる応力について調べ、更に横桁と主桁の連結部付近に応力集中が発生しないかどうか検討を行った。なお、数値解析には有限要素法汎用構造解析プログラムMSC/NASTRANを使用した。

2. 横桁斜め配置モデル

2.1 横桁配置と断面諸元

図-1のような横桁配置を有する3タイプの曲線2主桁橋モデルを用いて解析を行った。Type-A,Bとして横桁を下段斜めに配置し、設置方向を逆にした2つのモデルを考えた。また、横桁を中段、主桁に直角に配置した従来型の2主桁橋モデルをType-Cとし、Type-A,BとCを比較検討する。支間長は50[m]とし、横桁は主桁を10等分する5[m]間隔で主桁と連結している。断面図は図-2の通りである。床版はPC等のコンクリート系床版を使用するものとし、鋼桁とは剛に連結された合成桁として機能するものと仮定する。表-1に断面寸法を示す。FEM解析のためのモデル化に際し、床版にはソリッド要素を用い、コンクリートのヤング係数は、 $E_c = 2.857 \times 10^4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ 、ポアソン比は $\nu = 0.2$ を用いた。鋼部材にはシェル要素を用い、ヤング係数は $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ 、ポアソン比は $\nu = 0.3$ を用いた。

2.2 横桁と主桁の連結部

図-3にType-A,Bにおける横桁と主桁の連結部を示した。横桁の腹板は垂直補剛材に溶接した仕口板に連結し、横桁フランジは主桁の腹板に溶接したガセットプレートに連結している。横桁と主桁との連結は、横桁の腹板、上下フランジ共にスプラインプレートを用いた高力ボルト接合を想定している。横桁が斜め配置であることにより、主桁との連結部が複雑になるため、施工性が問題になると考えられるが、仕口板、ガセットプレートは共に工場溶接、横桁は現場で高力ボルト接合を行うことで省力化を損ねることはそれほどないと思われる。仕口板、

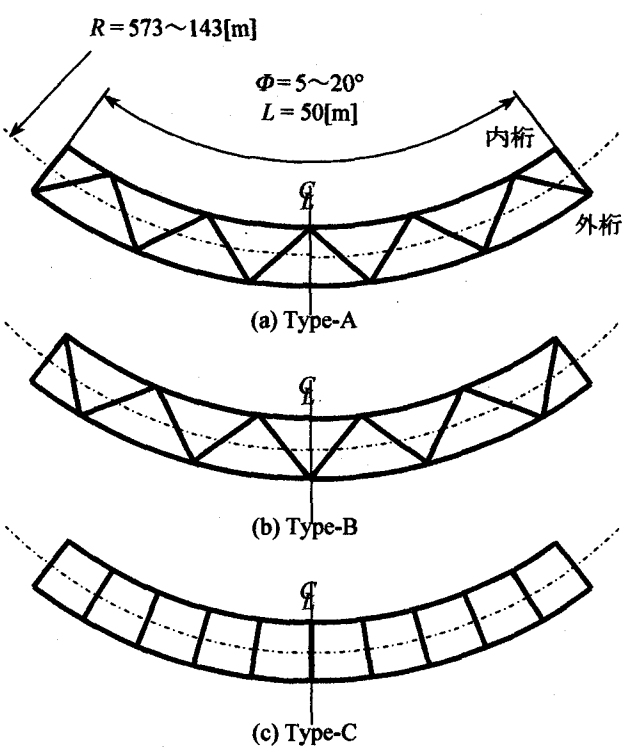


図-1 曲線2主桁橋平面図

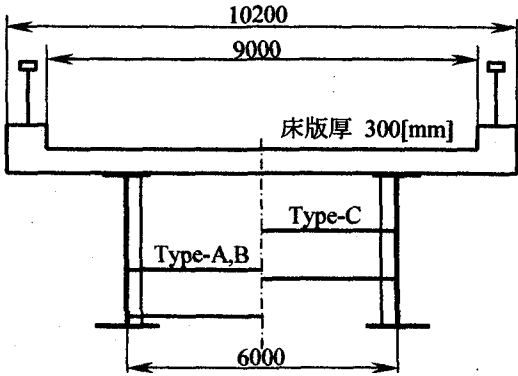
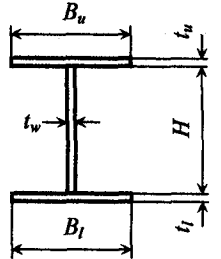


図-2 曲線2主桁橋断面図

表-1 部材断面

			主桁・横桁 断面寸法
			単位：[mm]
	主桁	中間横桁	
B_u	500	300	
t_u	30	25	
H	3000	1000	
t_w	24	16	
B_l	800	300	
t_l	50	25	

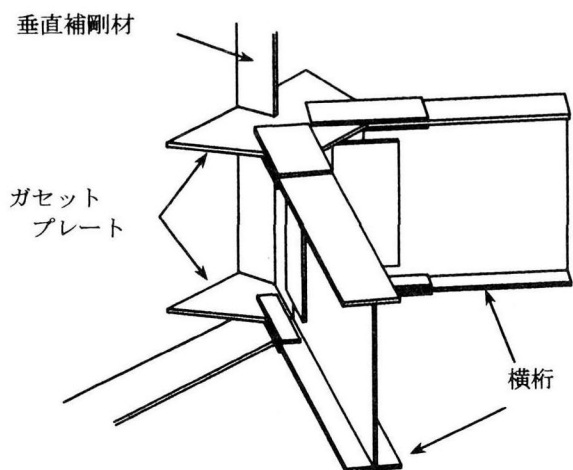


図-3 横桁連結部

ガセットプレートの板厚はそれぞれ横桁の腹板、フランジの板厚と等しくし、垂直補剛材の板厚は25[mm]とした。

2.3 FEM解析モデルと荷重載荷方法

種々の異なる曲率を有する曲線2主桁橋における横桁斜め配置効果を調べるため、中心角 $\phi = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ を有する4通りのFEMモデルを作成した。図-4 は一例として $\phi = 20^\circ$ の解析モデルを表している。図では床版と鋼桁を離して表示させているが、実際には結合し節点を共有させている。また、同図には活荷重載荷方法も載せている。活荷重はB活荷重とし、外桁に対して不利になるように偏心載荷させている。なお、本解析では衝撃係数を考慮していない。

3. 材片数、部材数の比較

図-5はType-A～Cのモデルにおける材片数と部材数を比較したものである。図中にはType-Cに横構を設置した場合についての集計結果も示してある。ここで大型材片とは主桁と端部横桁のフランジ及び腹板であり、小型材片とは垂直補剛材、スプライスプレート、フィラープレート、横桁仕口等の材片を意味する。また部材数とは、工場で組み立てる部材の数である。Type-Cについては、横桁取り付け構造としてコネクションプレートによる接合¹⁰⁾を採用したものととして小型材片数の集計を行った。Type-A,Bについても同様な接合法としたが、スプライスプレートは2面摩擦接合に必要な個数を集計した。

Type-A,Bの大型材片数はType-Cと等しく、部材数は横桁の増加が1本だけである。また小型材片数はType-A,Bでは約14%増加しているが、これは主にスプライスプレートの増加によるものである。横桁を斜めに配置することで、省力化を大きく妨げることはないものと考えられる。また、横構を設置したモデルと比較しても小型材片数と部材数が少なく済むため、Type-A,Bは有利な構造であると言える。

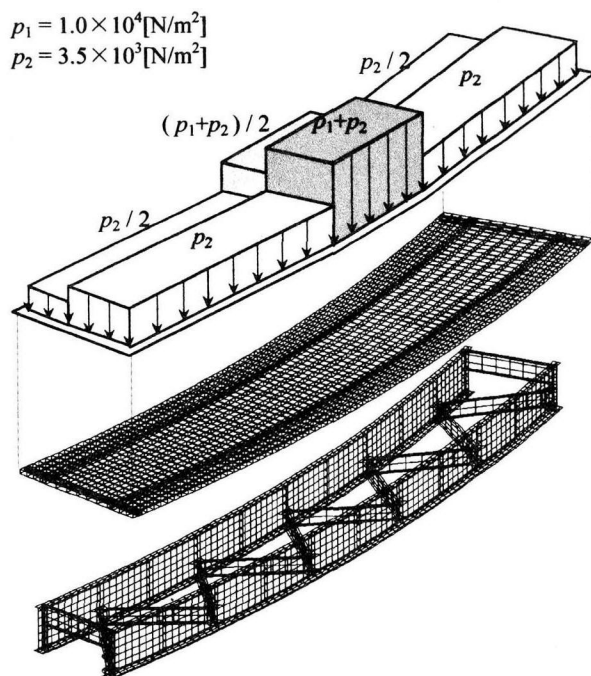


図-4 FEM メッシュ図と活荷重載荷方法

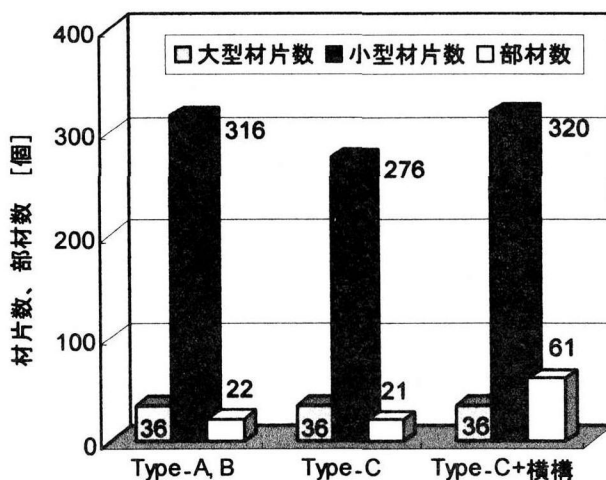


図-5 曲線2主桁橋の材片数と部材数

4. FEM解析結果

4.1 主桁の変位と応力

(1) 横桁配置方法の比較

横桁斜め配置の方法としてType-A,Bの2つの比較を行う。比較の対象には中心角 $\phi = 10^\circ$ のモデルを使用した。表-2はType-A,Bの応力、たわみ、ねじり角を表したものである。表よりたわみとねじり角にはほとんど差は見られないが、Type-Aの外桁支間中央最大応力(下フランジに発生)がわずかに小さく、支点近傍最大応力(支点上の垂直補剛材に発生)が多少小さい値となった。したがって、横桁の斜め配置の方法として、今後その他の中心角に対してはType-Aのモデルを採用することとした。

表-2 中心角 10° における Type-A,B の比較

	Type-A	Type-B
支点近傍最大応力 [N/mm ²]	53.6	65.1
外桁支間中央最大応力 [N/mm ²]	50.2	51.6
外桁たわみ[mm]	25.54	25.56
内桁たわみ[mm]	20.60	20.63
支間中央ねじり角[rad]	0.823×10^{-3}	0.823×10^{-3}

(2) 変位及び応力の中心角による影響

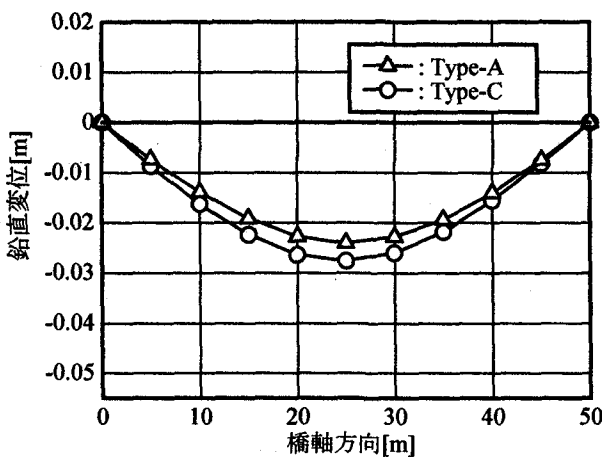
横桁を斜めに配置することで、主桁のたわみや応力、ねじり角がどの程度変化するか調べる。図-6(a)~(d)は外桁の鉛直変位をプロットし、Type-A,Cを各中心角毎に比較したものである。中心角が 5° 程度では、Type-AとType-Cの変位の違いはあまり見られないが、中心角が大きくなるほど変位の差が増大し、中心角が 20° では支間中央の変位を約3割も低減させる効果がある。

次に、支間中央のねじり角をType-A,Cで中心角毎に比較したものを図-7に示す。ねじり角は内桁と外桁の鉛直

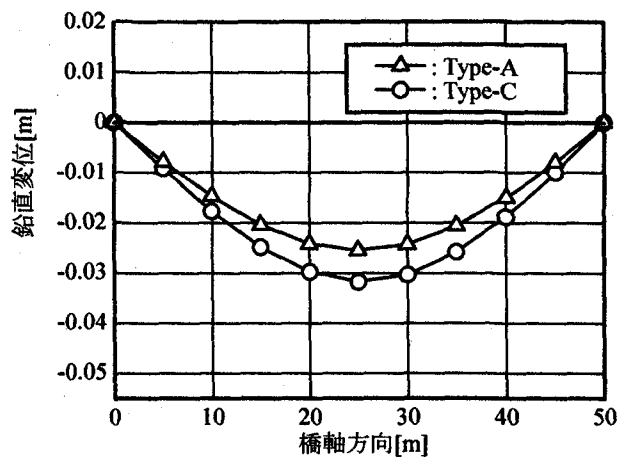
方向の相対変位から算出したものである。この図から横桁を斜めに設置することで、ねじり角を大幅に減少させることが可能であることが分かる。これは、横桁を下段斜めに配置することにより擬似箱桁断面としての効果が高まり、ねじり剛性が向上したためと考えられる。

図-8は外桁下フランジにおいて橋軸方向垂直応力の最大値を中心角毎に比較した図である。Type-A、C共に中心角が増加するにつれて垂直応力が大きくなる傾向にあるが、Type-Aの配置方法を用いると約2割応力を減少することが可能である。

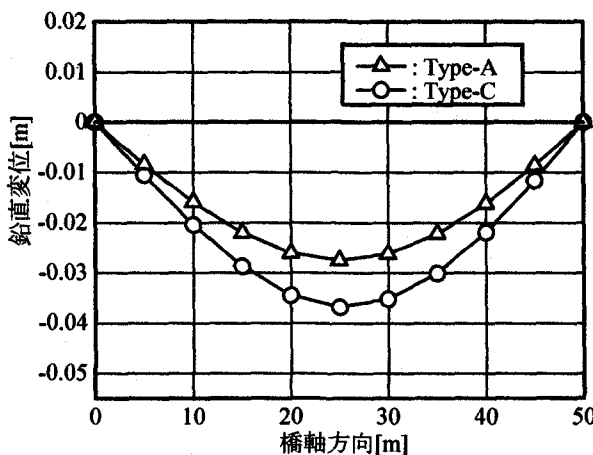
外桁下フランジの橋軸方向応力分布を調べるため、一例として中心角 $\phi = 10^\circ$ の曲線橋の解析結果を図-9に示す。図-9 (b)、(c)はそれぞれType-A,Cの外桁下フランジ(図-9(a)の灰色部)における橋軸方向の垂直応力を濃淡で表したものである。そり応力の影響でフランジ幅方向に応力が変化していることが分かる。応力の最大値は支間中央内側縁部に発生した。Type-Aでは最大値及びそれ以外の箇所についてもType-Cより応力が小さくなっており、Type-Aの応力低減効果が高いことが分かる。その他の中心角については、Type-Aでは応力の最大値がすべて



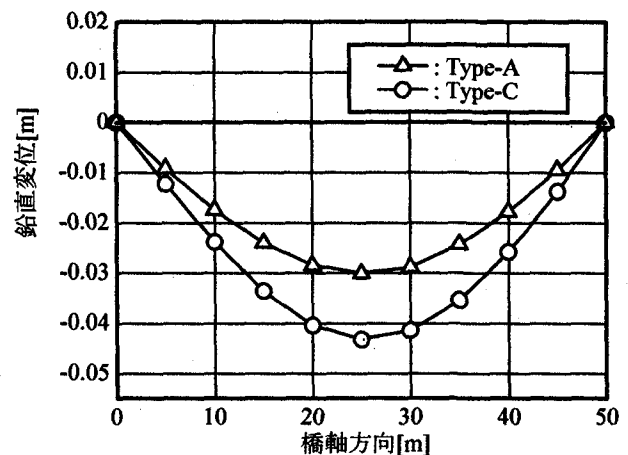
(a) 中心角 5°



(b) 中心角 10°



(c) 中心角 15°



(d) 中心角 20°

図-6 中心角毎の外桁のたわみ

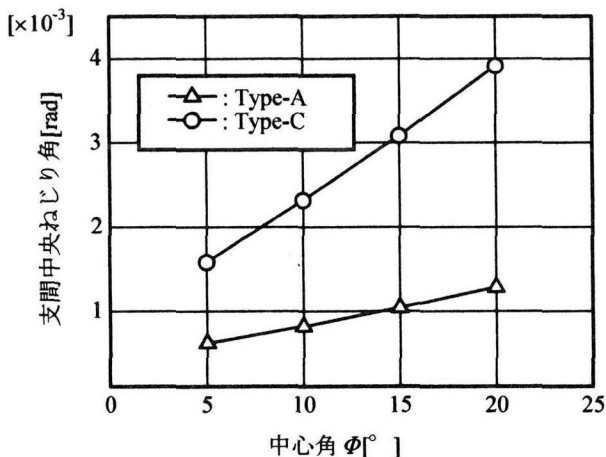


図-7 支間中央断面のねじり角

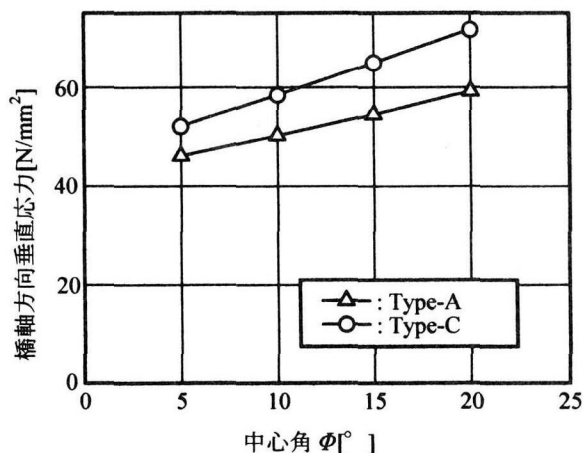


図-8 下フランジの橋軸方向垂直応力

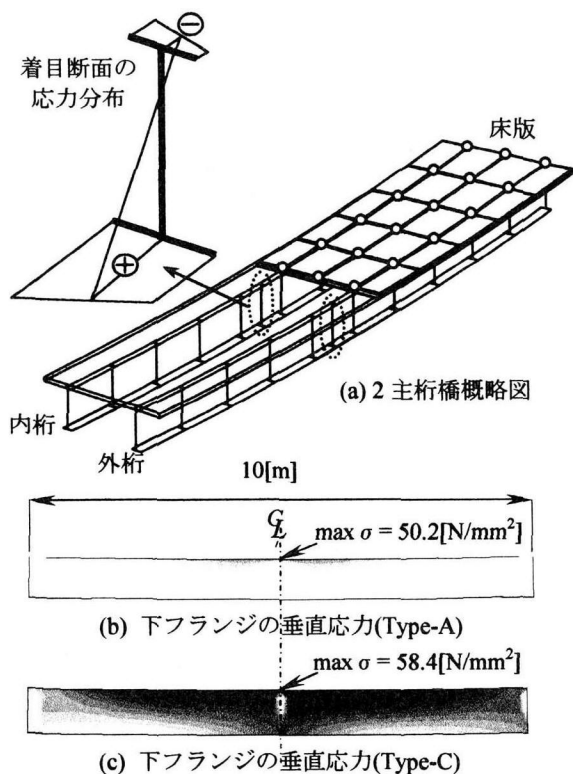


図-9 外桁下フランジ中央部の橋軸方向垂直応力

直角格子構造を対象とした算定式により得られるため、本解析モデルのような横桁が斜めに配置している場合には、そのまま適用することはできない。従ってここでは主桁に関する影響面(载荷位置が2次的に広がっているため影響線ではなく影響面)を作成し、荷重分配性能を定量的に把握することとした。

まず、図-9(a)の床版上の○印の各点に単位荷重を載荷させ、着目断面を点線で示した内桁及び外桁の各断面として曲げモーメントを算出する。曲げモーメントは、図中に示した応力分布を断面内で積分することにより得る

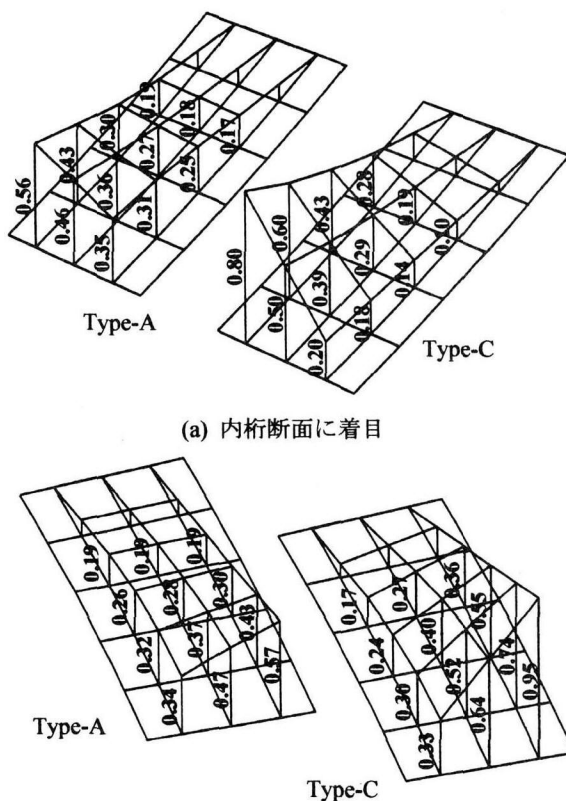


図-10 曲げモーメント影響面

支間中央内側縁部で発生しているのに対し、Type-Cでは中心角が5°と10°のモデルでは支間中央内側縁部、15°と20°のモデルでは支間中央から左右に2.5[m]離れた内側縁部に発生した。これは曲げ応力の最大値は支間中央に発生するが、そり応力の最大値は支間中央から2.5[m]離れた箇所に発生し、中心角が大きいType-Cの配置方法とした場合にはこのそり応力が非常に大きくなるためである。

4.2 横桁の荷重分配効果

主桁と横桁から構成される格子桁構造では、荷重分配性能を求めるために、曲げ格子剛度あるいはねじり格子剛度を評価する方法^{11, 12)}がある。しかしこれらの定数は

ことができる。次に横桁をすべて撤去し、荷重分配が全くない曲線2主桁橋モデルを別途作成し、支間中央の外桁または内桁に単位荷重を载荷させたときの曲げモーメントを算出した。図-10は、Type-A及びCについて得られた曲げモーメントを、荷重分配がないモデルの曲げモーメントで除して得られた無次元化量で表した影響面である。

内桁断面を着目断面としたときの曲げモーメント影響面(図-10(a))を見ると、载荷点が外桁上の場合、Type-Cでは曲げモーメントの値は小さい(0.2以下)のに対し、Type-Aでは比較的大きく、内桁への荷重分配効果が高いことが示されている。また図-10 (b)より着目断面が外桁の場合も、Type-Aのモデルでは外桁に曲げモーメントが集中することがなく、荷重が良好に分配されていると判断することができる。2主桁橋では、通常横桁による荷重分配はほとんど期待されていないが、本解析により一般的な形式のType-Cでも多少の分配効果はあり、Type-Aの配置方法を用いると荷重分配性能が高まることが明らかとなった。

4.3 横桁及び連結部の応力分布

(1) 横桁の応力分布

2主桁橋における横桁に関して、死荷重や活荷重により発生する応力は、直線橋の場合は小さいことが明らかになっている⁸⁾。従って、実際の設計では完成時の条件よりむしろ架設時の移動型枠設備等の荷重条件で断面が決定されることが多い。しかしながら曲線橋の場合は、主桁がねじれながら大きくたわむため、横桁の応力分布状態は直線橋とは異なるものと考えられる。ここでは横桁を直角に配置したType-Cと、斜めに配置したType-Aの応力分布性状を検討する。

図-11は中心角 $\phi=10^\circ$ のType-A,Cの解析モデルのうち、1径間の左半分の横桁のみを取り出して表示させたものである。図-11 (a) の①は支点より5[m]に位置する横桁、⑤は支間中央の横桁である。これらの図より、横桁には桁高方向に対称な曲げ応力が発生しており、これは横桁両端の主桁との連結部から伝達された曲げモーメントに起因していると考えられる。また、支間中央の横桁では比較的大きい応力が発生しているが、支点に近づくにつれて値が小さくなっていることが分かる。

図-11 (b) は、Type-Aにおける各横桁の軸方向応力の分布図である。図中①は支点付近の横桁、⑤は支間中央付近の横桁である。いずれの横桁もType-Cのような桁高方向の対称性はなく、腹板では圧縮または引張りの一様な応力が交互に現れている。また支間中央付近の横桁の応力は小さく、支点に近づくにつれて値が増大している。特に図中①の端部に大きな応力が発生している。

(2) 連結部の応力分布

横桁を斜めに配置すると、支点に近い横桁ほど軸方向応力が増大し、横桁の端部、すなわち横桁と主桁の連結

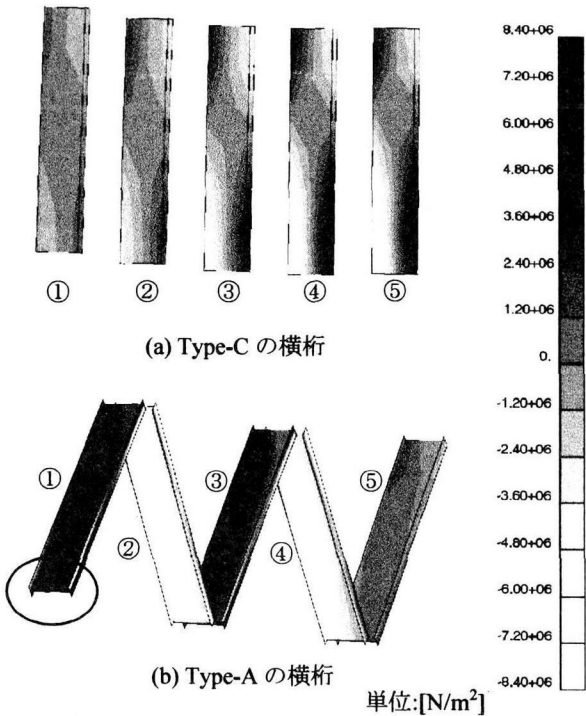


図-11 横桁の応力分布

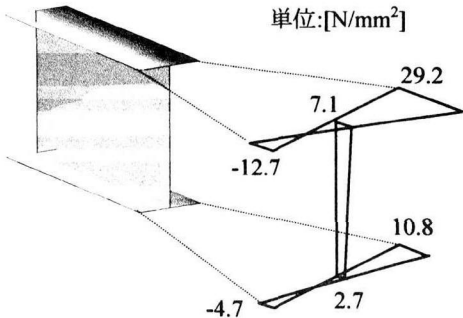


図-12 横桁端部の応力分布

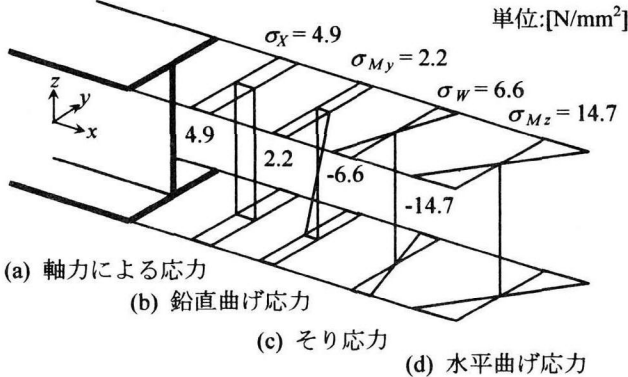


図-13 横桁端部の応力分布詳細

部に応力の大きい箇所が見られた。そこで、この連結部付近を細かくメッシュ分割した詳細モデルを作成し、FEM解析を行った。図-12は図-11 (b)の○印の横桁断面の応力分布を表している。上フランジ縁部に応力が集中しており、Type-Cにおける横桁のような単純な曲げ応力だけで表すことができない。この応力分布を以下のように個々の応力に分解し、局部的に応力が増大する要因を検討する。

まず、図-12において腹板の上下端の応力から、図-13(a)のような軸力による応力と(b)の鉛直曲げによる応力に分解できると仮定する。次に、上フランジ縁部及び下フランジ縁部の応力差から(c)のような上下逆対称のそり応力分布を得ることができる。最後に上下フランジに等しい応力分布(d)が得られ、これは水平曲げによる曲げ応力と考えることができる。これらの応力分布(a)～(d)を合成すると、図-12の応力分布にほぼ等しくなる。

ガセットプレートに発生する応力に着目してみると、図-14のような応力分布が得られた。図-14 (a) は図-11 (b) ①の横桁の上フランジと連結するガセットプレート、図-14 (b) は下フランジと連結するガセットプレートを表している。これらの応力分布はガセットプレートの面内応力をvon Misesの応力で表示させたものである。図-14 (a) の外桁端部に溶接されるガセットプレートでは、横桁上フランジとの連結部と、垂直補剛材との連結部付近で応力集中が発生している。横桁との連結は高力ボルト接合を想定しているため、応力集中による疲労破壊に対しては問題がないと思われる。垂直補剛材との連結部は溶接されているため疲労に対する耐久性確保が必要になると考えられる。一方、内桁のガセットプレートには、高い応力集中は見られなかった。図-14 (b)では、(a)とは逆に内桁のガセットプレートに大きな応力集中が発生した。特に、プレートの上端部に局部的な応力集中が発生した。したがって、これらの応力集中を緩和させるために、プレート形状を改良するなどの対策を要するものと思われる。

横桁の腹板は仕口板を通じて垂直補剛材とY字状に連結している。したがって、垂直補剛材には横桁の軸力や曲げモーメント等により、応力が発生すると考えられる。そこで、垂直補剛材の幅方向の応力分布について調べた結果、圧縮応力が最大 $4.78\text{[N/mm}^2\text{]}$ 生じていた。この値は応力レベルとしては非常に小さく、疲労の面からも特に問題はないと考えられる。

5. あとがき

直線橋や曲率半径の大きい曲線橋に採用実績の多い2主桁橋を、比較的曲率半径の小さい曲線橋にも適用させることを目的として、横桁を斜めに配置する新しい構造を提案した。この構造は横構の設置等のような部材数の増加があまりないため、省力化を損なわずに曲線橋の剛性を高めることができる。本研究では、横桁と主桁を直角に連結する従来型の構造と今回提案する構造を、FEM

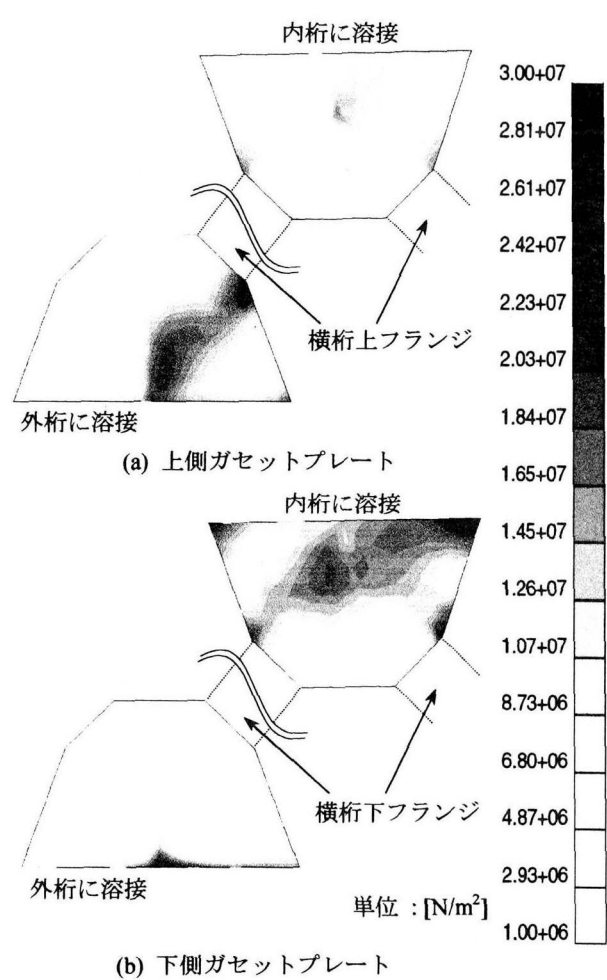


図-14 ガセットプレートの応力分布

モデルを用いた数値解析により比較検討を行った。

その結果、主桁のたわみ及びねじり角については、横桁を斜めに配置することによって大幅に減少し、中心角が大きいほど従来型の構造との差が顕著に現れた。主桁に発生する応力についても、最大となる支間中央付近の下フランジ橋軸方向応力を大幅に低減する効果が確認できた。これらより、斜めに配置された横桁は曲線2主桁構造のねじり剛性を高めるのに非常に効果的であると考えられる。また、横桁の配置方法による荷重分配性能に関しては、曲げモーメント影響面を作成して検討した。横桁を斜めに配置したモデルでは、直角に配置したモデルよりもバランス良く曲げモーメントが生じ、荷重分配効果の優れていることが示された。

一方、横桁と主桁の連結部には、横桁フランジに軸力、曲げ及びそりの合成作用により応力が局部的に増大する箇所が現れた。またガセットプレート内に一部応力集中が発生した。溶接部付近に生じた応力集中によって疲労に対する耐久性が問題になる可能性があるが、本解析ではその対策にまで踏み込めなかった。これらについては今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 鈴木裕二、池田博之、水口和之：鋼少数鉸桁橋の設計と施工、第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、pp. 39-46、1998.
- 2) 高橋昭一、志村勉、橘吉宏、小西哲司：PC床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討、橋梁と基礎、Vol. 30、pp. 23-30、1996.
- 3) 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、Vol. 32, No. 9, pp. 18-22, 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、小山明久、林川俊郎、佐藤浩一：曲線2主桁橋の力学的特性に及ぼす横桁配置の影響、鋼構造年次論文報告集、第6巻、pp. 349-356、1998.
- 7) 平沢秀之、林川俊郎、佐藤浩一、高橋宏明：曲線2主桁橋における横構の効果について、構造工学論文集、Vol. 46A、pp. 1307-1314、2000.
- 8) 坂井藤一、大垣賀津雄、八部順一、橋本靖智：合成2主桁橋の横桁配置に関する研究、橋梁と基礎、Vol. 31、pp. 31-38、1997.
- 9) 長井正嗣、吉田康治：合成2主I桁橋の横補剛材をパラメータとした2次応力に関する検討、構造工学論文集、Vol. 42A、pp. 1061-1072、1996.
- 10) 高橋昭一、橘吉宏、志村勉、森下弘行、伊藤博章、三木千壽：少数主桁橋の横桁取付構造に関する実験検討、土木学会論文集、No. 570、I-40、pp. 107-118、1997.
- 11) 渡辺昇：格子桁の理論と計算、技報堂、1965.
- 12) 宮本裕、外9名：橋梁工学、技報堂、1997.

(2001年9月14日受付)