

曲線2主桁橋の横桁斜め配置によるねじり剛性の向上について

Improvement of torsional stiffness by diagonal cross beams in curved two-girder bridge

北海道大学大学院 正 員 平沢秀之 (Hirasawa Hideyuki)
 北海道大学大学院 ○学生員 田上優介 (Tagami Yuusuke)
 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

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⁾。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。そのため、曲線橋に2主桁形式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主桁橋に関しては、村瀬ら²⁾や中田ら³⁾による研究報告がなされている。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⁴⁾、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⁵⁾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^{6),7)}とは対照的である。

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ものである。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⁴⁾。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検討を行った。

2. 曲線2主桁橋モデル

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2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として横桁を下段斜めに配置しモデルを考えた。また、横桁を中段とし主桁に直角に配置した従来型の2主桁橋モデルをType-BとしてType-AとB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。FEM解析のためのモデル化に際し、鋼桁にはシェル要素、床版にはソリッド

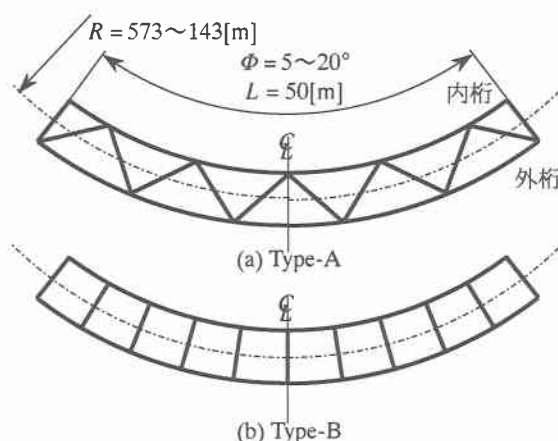


図-1 曲線2主桁橋平面図

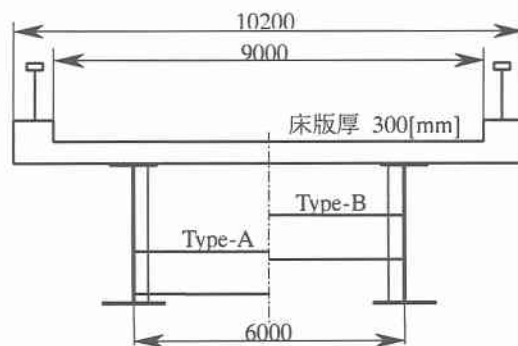


図-2 曲線2主桁橋断面図

ド要素を用いた。また、コンクリートのヤング係数は、 $E_c = 2.857 \times 10^4$ [N/mm²]、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 $E_s = 2.0 \times 10^5$ [N/mm²]、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ス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。

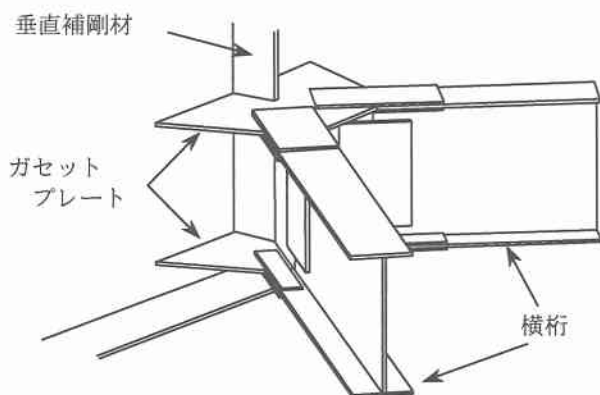


図-3 横桁連結部

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の効果を調べるため、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。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. FEM解析結果

3.1 主桁の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-4は外桁の鉛直変位をプロットし、中心角 20° の場合についてType-A,Bを比較したものである。Type-B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,Bで中心角毎に比較したものを図-5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-6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,B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

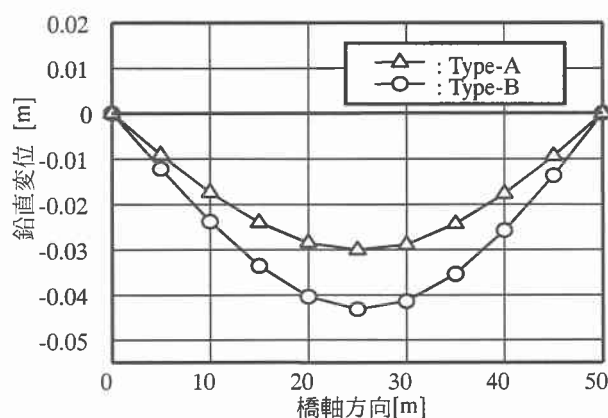


図-4 中心角毎の外桁のたわみ

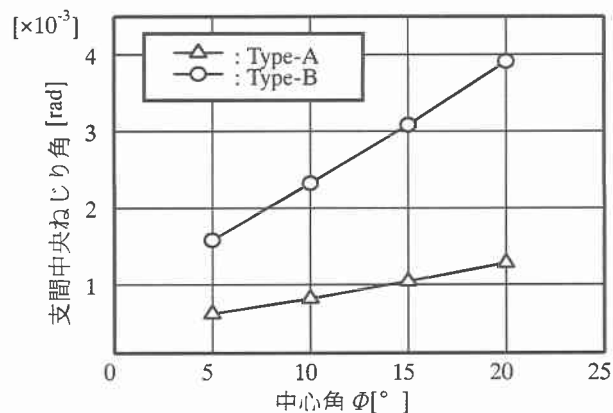


図-5 支間中央断面のねじり角

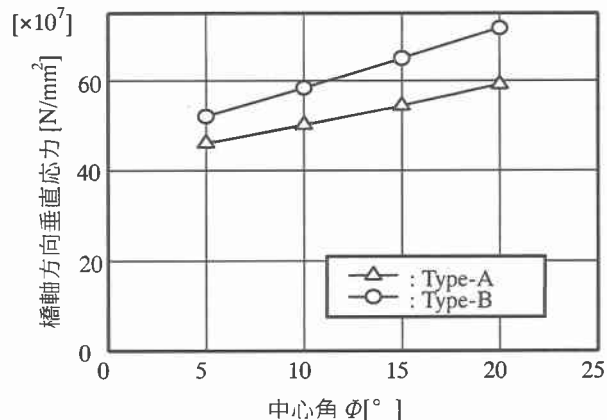


図-6 下フランジの橋軸方向垂直応力

が、Type-Aの配置方法を用いると約2割応力を減少させ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-7に示す。図-7 (b)、(c)はそれぞれType-A,Bの外桁下フランジ(図-7(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-B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支間

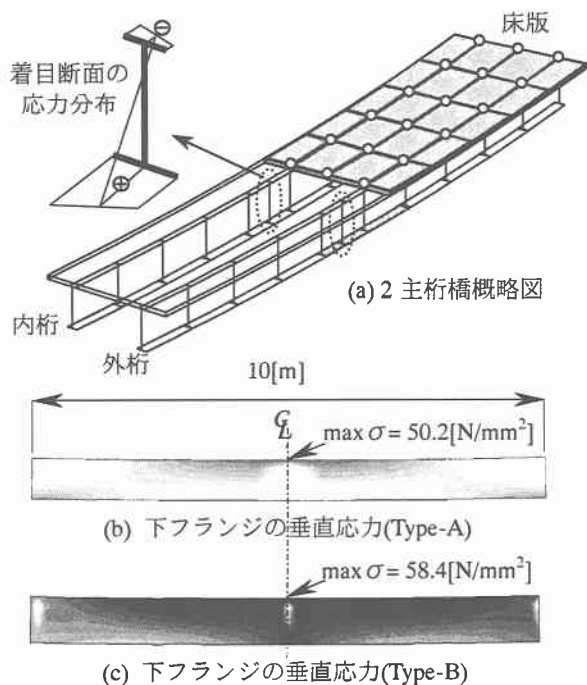


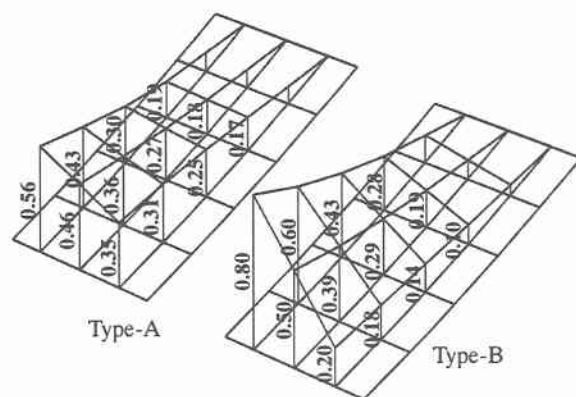
図-7 外桁下フランジ中央部の橋軸方向垂直応力

中央内側縁部で発生しているのに対し、Type-B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]離れた箇所発生し、中心角が大きいType-Bの配置方法とした場合ではこのそり応力が大きくなるためである。

3.2 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^{6),9)}がある。しかしこれらの定数は直角格子構造を対象としているため、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(載荷位置が2次元的に広がっているため影響線ではなく影響面)を作成し、荷重分配性能を把握することとした。

まず、図-7(a)の床版上の○印の各点に単位荷重を載荷させ、着目断面を点線で囲んだ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、内桁及び外桁支間中央に単位荷重を載荷させたときの曲げモーメントを算出した。図-8は、Type-A及びBについて得られた内桁支間中央曲げモーメントを、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。中心角は 10° のモデルにおける結果である。この図より、載荷点が外桁上の場合、Type-B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、着目断面が外桁の場合においても計算を



内桁断面に着目

図-8 曲げモーメント影響面

を行い、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ことを確認している。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-B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。

3.3 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⁶⁾。しかしながら曲線橋の場合は、主桁がねじれながら大きいたわむため、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Type-A,Bの横桁の応力分布性状を検討する。

図-9は中心角 $\phi=10^\circ$ のType-A,B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-9(a)はType-Bにおける各横桁の軸方向応力の分布図であり、①は支点より5[m]に位置する横桁、⑤は

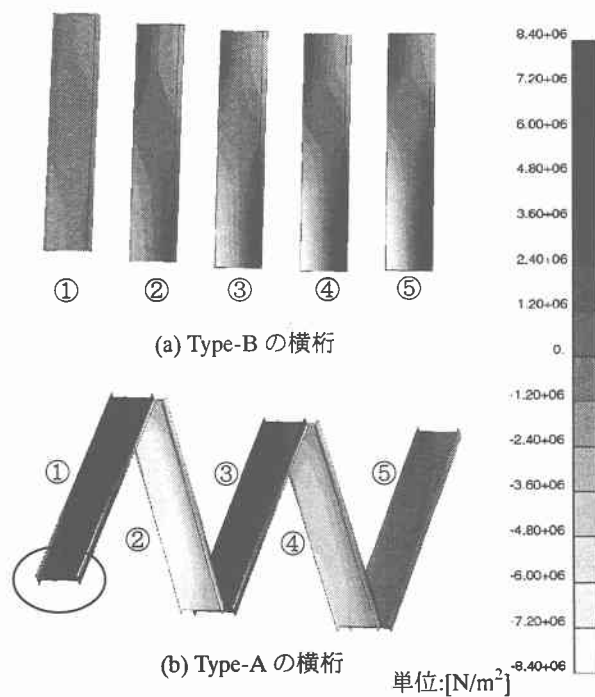


図-9 横桁の応力分布

支間中央の横桁である。この図より、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な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-9(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-B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增大し、横桁の端部すなわち横桁と主桁の連結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-10は支点に一番近い横桁端部の軸方向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-B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-10において腹板の上下端の応力から、図-11(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-10の応力分布にほぼ等しくなる。

4. 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、比較的小さい曲率半径の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。

斜め配置された横桁では直角配置とは異なる応力分布

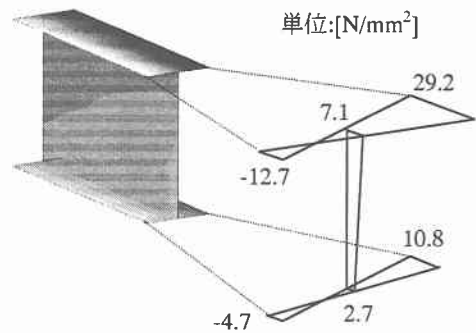


図-10 横桁端部の応力分布

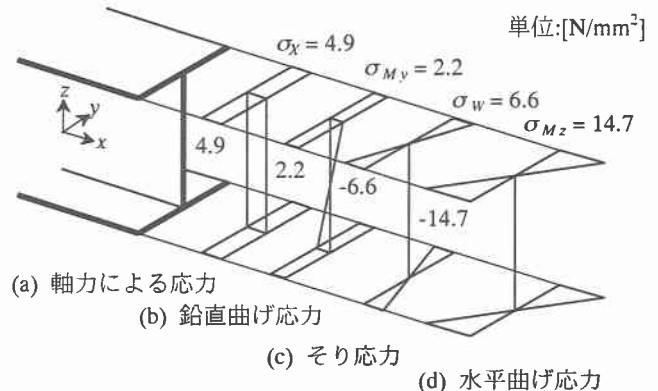


図-11 横桁端部の応力分布詳細

性状を呈したが、これは軸力、鉛直及び水平曲げモーメント、そりモーメントが同時に作用するためであることを明らかにした。

《参考文献》

- 1) 鈴木裕二、池田博之、水口和之：鋼少数縦桁橋の設計と施工、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) 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、pp.541-548、1999。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 渡辺昇：格子桁の理論と計算、技報堂、1965。
- 9) 宮本裕、外9名：橋梁工学、技報堂、1997。