

自動車荷重下における曲線 2 主桁橋の局部応力に関する研究

Study on Local stress in curved Twin I-girder Bridge under T-load

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 小畑潤平 (KOBATA Jumpei)
 函館工業高等専門学校 正 員 平沢秀之 (HIRASAWA Hideyuki)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川俊郎 (HAYASHIKAWA Toshiro)

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。2 主桁橋は主桁どうしの連結にシンプルな横桁が用いられており、横桁は曲線橋の場合、著者らの既往の研究で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、また横桁を斜めに設置することで、省力化を防ぐことなくねじり剛性を高めることが可能であることを明らかにした。

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、試設計と FEM 解析に基づいた研究が見られる^{1), 2)}。著者らも 2 主桁橋を曲線橋に適用するために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^{3), 4)}。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斜めに配置、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、外桁のたわみや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、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。

本研究はこのように優れた挙動特性を示す橋梁構造の自動車荷重下で発生する応力集中に着目し考察しようとするものである。自動車荷重を載荷すると床版がたわみ、その影響で腹板と同時に垂直補剛材に首振りが生じ、それによって垂直補剛材に応力集中が発生することが既往の研究から分かっている。そこで垂直補剛材に着目し、それぞれの垂直補剛材に発生する応力集中を詳細に FEM 解析し、その値が疲労に繋がるような値であれば垂直補剛材の補強案を考えることとする。

2. 曲線 2 主桁橋解析モデル

2.1 全体構造

解析基本モデルは図-1 に示すような平面形状を有する曲線 2 主桁橋とする。横桁は図に示す通り斜め方向に配置しており、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 形断面とする。モデルの対称性を考慮し、解析はモデルの片側でのみ行なう。図中の記号 CP-1~CP-5 は主桁と横桁の連結部を表しており、図中に○で示している位置に垂直補剛材が設置されている。今後は CP-1 にある垂直補剛材を CP-1 と称し、その逆側の腹板にある垂直補剛材は CP-1R とする。表-1 には部材の断面寸法を示す。本モデルでは垂直補剛材は腹板から上フランジの端まで設置されているので、横幅は 250[mm]となっている。境界条件は一端がヒンジ支持、もう一端がローラー支持と

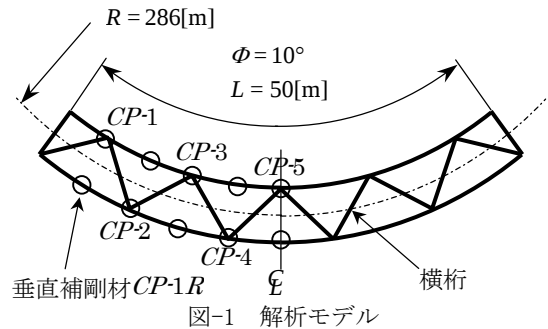


表-1 断面寸法 [mm]

	主桁	横桁	垂直補剛材
B_u	500	300	
t_u	30	25	
H	3000	1000	3000
t_w	24	16	25
B_t	800	300	
t_t	50	25	

なっている。また、このモデルはコンクリート床版と鋼桁の節点を共有させて剛結とし、合成桁としてモデル化している。モデル化に際して、鋼部材にはシェル要素を使用し、ヤング係数は $E_s=2.0 \times 10^{11}$ [N/m²] とする。コンクリート部材にはソリッド要素を使用し、ヤング係数は $E_c=2.9 \times 10^{10}$ [N/m²] とする。

2.2 荷重条件

図-2 に荷重の載荷位置を示す。荷重は T 荷重とし床版の中央、すなわち主桁支間中央部に T 荷重を 1 組載荷させた Case1 の 5 パターンと、T 荷重を 3 組載荷させた Case2 の 5 パターンの計 10 パターンを解析する。荷重は連結部の位置する橋軸直角方向の面内の床版上に T-1~T-5 としてそれぞれ載荷させる。これは各垂直補剛材にもっとも不利となる荷重載荷位置を調べるためである。また本解析では衝撃係数は考慮していない。

3. 垂直補剛材における応力集中

T-1~T-5 の T 荷重を載荷した Case1 と、T 荷重を橋軸直角方向に 3 組並べて載荷した Case2 の 2 つの条件で各モデルの解析を行なった。今回解析したモデルにはそれぞれ垂直補剛材にファインメッシュを施している。また

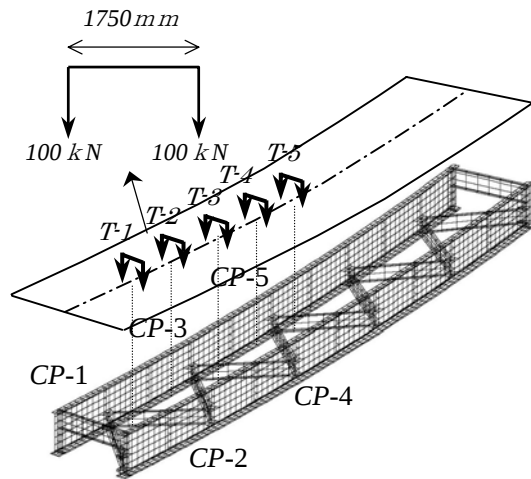


図-2 荷重載荷位置

表-2 最大応力値と発生箇所[N/mm²]

		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
Case 1	応力	29.1	37.1	28.0	39.6	26.8
	箇所	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
Case 2	応力	39.3	59.4	43.5	66.7	45.7
	箇所	CP-1	CP-2	CP-3R	CP-4	CP-5R

メッシュの切り方は数パターンを事前に解析し、最も良いと思われるものにしている。

最大応力発生位置はいずれのケースでも垂直補剛材の上部で、腹板と逆側の端部となっている。それらの値を表-2に示す。この値は von Mises 応力で表示したときの値だが、最大応力の発生位置が端部ということとせん断力は発生せず、高さ方向の応力で解析してもほとんど同じ値となった。応力集中はやはり荷重と同じ面内にある垂直補剛材で発生し、基本的には連結部が存在する側の垂直補剛材が最大応力集中発生箇所となった。しかし荷重を3組載荷しているCase2では、T-3とT-5の位置に荷重を載荷すると最大応力発生位置が連結部と逆側の垂直補剛材となった。これは表-2からも分かるように、自動車荷重を載荷すると内桁側の垂直補剛材よりも外桁側の垂直補剛材に不利に働き大きな値が発生する。Case2は荷重が中央部と外桁・内桁の上部床版上にも載荷されるので、最大応力発生箇所は荷重が不利に働く外桁側の垂直補剛材になったと思われる。

Case2では荷重を3組載荷しているのでやはりCase1よりも大きな応力が発生し、その値の増加は外桁側の垂直補剛材において大きくなっている。応力集中の最大値は66.7[N/mm²]と大きく、疲労の問題を考慮する必要がある。そこで前述したように垂直補剛材の補強を考えることとする。

4. 垂直補剛材の補強案

T 荷重を載荷した際に垂直補剛材の上部において首振りによる応力集中が生じ、値に大小はあるものの大きいものでは部材の疲労破壊を起こす可能性がある。そこでこの応力集中の対策として垂直補剛材の補強案を考えることとする。それらを図-3に、またそれぞれのモデルに

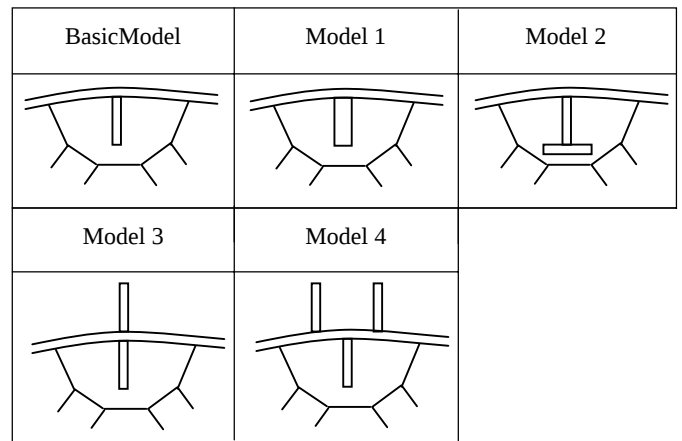


図-3 垂直補剛材の補剛案

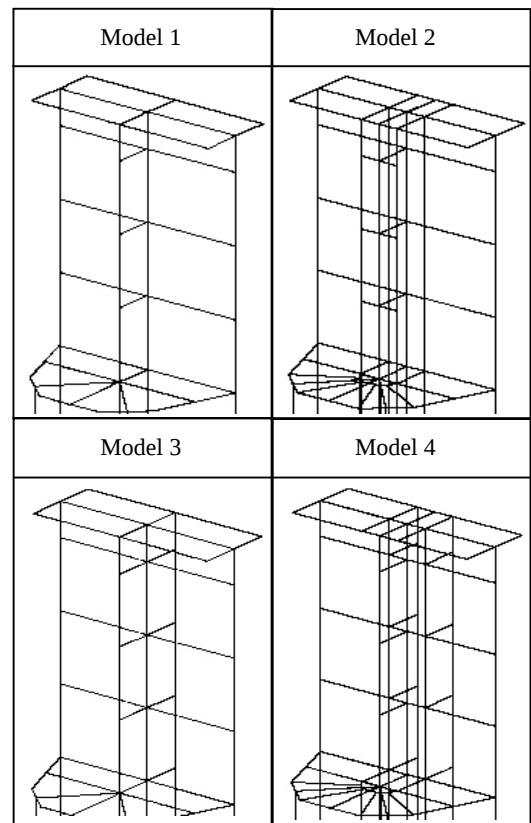


図-4 垂直補剛材付近のエレメント

おける垂直補剛材周辺のFEM図を図-4に示す。まずこれまでの垂直補剛材を有するモデルをBasicModelとし、垂直補剛材の板厚を25mmから2倍の50mmにしたモデルをModel 1、垂直補剛材に幅250mm・板厚25mmのフランジをつけたモデルをModel 2、主桁の外側にも板厚25mmの垂直補剛材をつけたモデルをModel 3、主桁の外側に板厚25mmの垂直補剛材を250mmの間隔で2枚つけたモデルをModel 4とする。それぞれ新しく設置する部材の板厚などの値はもとの垂直補剛材の値を元に決めており、暫定的な値とする。それぞれのモデルにもBasicModelと同様のファインメッシュ分割を行なっている。

表-3 補強モデルで発生した最大応力値と応力の低減率[N/mm²]

		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
Case1	Model 1	21.7 ①(CP-1) -22%	26.3 ①(CP-2) -25%	21.6 ①(CP-3) -23%	27.3 ①(CP-4) -27%	21.2 ①(CP-5) -20%
	Model 2	20.0 ②(CP-1) -29%	24.0 ②(CP-2) -32%	19.9 ②(CP-3) -29%	24.6 ②(CP-4) -34%	19.7 ②(CP-5) -26%
	Model3	23.8 ①(CP-1) -15%	28.5 ①(CP-2) -19%	23.9 ①(CP-3) -15%	29.4 ①(CP-4) -21%	23.7 ①(CP-5) -11%
	Model 4	24.2 ③(CP-1) -13%	28.5 ①(CP-2) -19%	29.4 ①(CP-3) -14%	24.2 ①(CP-4) -21%	23.9 ①(CP-5) -10%
Case2	Model 1	29.3 ①(CP-1) -22%	40.6 ①(CP-2) -27%	33.3 ①(CP-3R) -24%	44.1 ①(CP-4) -29%	33.3 ①(CP-5R) -28%
	Model 2	28.7 ③(CP-1) -24%	38.2 ②(CP-2) -31%	30.7 ②(CP-3R) -30%	40.5 ②(CP-4) -35%	31.4 ②(CP-5R) -32%
	Model3	32.9 ①(CP-1) -12%	44.6 ①(CP-2) -20%	35.6 ①(CP-3R) -19%	47.4 ①(CP-4) -24%	36.7 ①(CP-5R) -20%
	Model 4	34.3 ③(CP-1) -8%	45.6 ③(CP-2) -18%	38.9 ①(CP-3R) -11%	50.9 ③(CP-4) -18%	39.8 ①(CP-5R) -14%

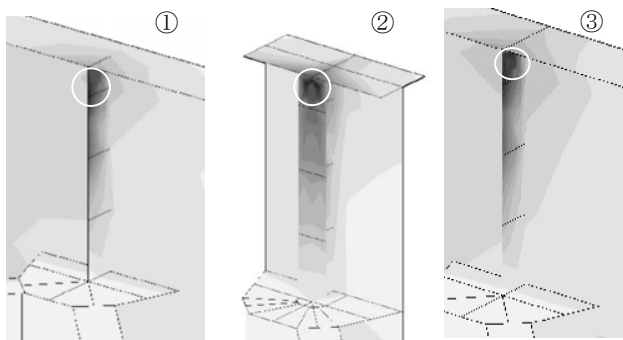


図-5 発生した応力分布のパターン

5. 補剛を施した垂直補剛材における応力集中

Model11 から Model15 を BasicModel と同様に 2 つの荷重条件で解析した。それぞれに発生した応力集中の分布の一例を図-5 に示す。最大荷重発生位置は図-5 のように 3 パターンあり、それぞれを①～③とする。この図は応力分布を von Mises で表示したもので、色が濃くなるほど応力の値が大きいことを示しており、○で囲んでいる部分が最大応力発生箇所である。BasicModel の応力分布は①となる。それぞれのモデルでの垂直補剛材に発生した応力集中の最大値を表-3 に示す。応力値の後ろにある○数字は図-5 にある応力分布の状態を表しており、()内は最大応力が発生した垂直補剛材を、そして下段には補剛部材を追加することによって BasicModel で発生した応力から低減させた割合を示している。

最大応力の発生位置はいずれのモデルでも BasicModel と同様に、荷重が Case1 の場合、T-1 のときは CP-1 で、T-2 のときは CP-2 でというように、荷重が載荷されている橋軸方向面内の連結部に存在する垂直補剛材となる。荷重が Case2 の場合は T-3 と T-5 のみ荷重と同じ面内の連結部と逆側に存在する垂直補剛材、すなわち外桁側の垂直補剛材において最大応力が発生し、他の荷重載荷位置の場合は Case1 と同様の箇所でも最大応力が発生した。また応力の値も同じ傾向にあり、応力の値は内桁よりも外桁の垂直補剛材で大きくなっている。このことから外

桁側の垂直補剛材はより荷重の影響を受け、応力集中が発生しやすく、そのためより大きな荷重のかかる Case2 では、応力集中の最大発生箇所が外桁側になったのだと考えられる。

Model11 は板厚を増したただけなので応力分布の形状も BasicModel と同じ図-5①となり、最大応力の発生箇所も同様となった。板厚を倍にしたことの補剛効果は高く、応力値を 22～29%低減することができた。また若干ではあるが、もともと大きな応力が発生していた外桁側の CP-2 と CP-4 で他の垂直補剛材よりも応力値を低減している。このことはすべてのモデルにおいても同じ傾向を示している。

Model12 は板厚 25mm のフランジを追加したモデルで、応力分布はこれまでと異なり、図-5②のような分布を示した。応力集中は BasicModel や Model11 に比べより垂直補剛材の上部に近くなった。図では垂直補剛材自体の応力分布は見えないが、フランジと同じ箇所でも最大応力は発生している。このモデルの応力低減率は-24～-35%と大きく、すべてのモデルの中でもっとも応力の低減効果の高い補剛方法となった。

Model13 は腹板の逆側に垂直補剛材をもう 1 枚追加するというモデルで、応力分布は図-5 の①となった。逆側に垂直補剛材を追加することで首振りによる垂直補剛材の変形を抑え応力を低下させることを期待したのだが、実際の応力の低減率はさほど大きくなく、-12～-24%となった。FEM 解析上で見れば Model12 と Model13 は同じ形状の部材をそれぞれ異なる場所に追加しているモデルなので、より応力の低減率の高い Model12 のほうが Model13 よりも優位性があると考えられる。

Model14 は腹板の逆側に垂直補剛材をもう 2 枚、250mm の間隔で追加するというモデルで、応力分布は図-5 の①となるモデルと③となるモデルがあった。③のように他のモデルと異なり、最大応力発生箇所が垂直補剛材の端部ではなく、中央部付近となった。しかしこれらのモデルの高さ方向の応力分布をみると、すべてのモデルで図-5 の①のような分布を示している。③となった原因と

しては大きなせん断力が垂直補剛材内部に発生したことが挙げられる。③の応力分布を示すのは Case1 での CP-1 と Case2 での CP-1・CP-2・CP-4 である。これらの垂直補剛材でせん断力が発生した原因としては斜め横桁から受ける軸力の影響が考えられる。Case2 での各垂直補剛材の共通点として、連結部側の垂直補剛材であるからである。また Case1 でも唯一 CP-1 で応力分布が③を示したのは、CP-1 が最も支端側にあり斜め横桁の影響を強く受けるのが原因であると考えられる。このモデルの応力低減率は-8～-21%と Model3 と同様にあまり高くない。Model3 よりも部材を増やしているのに、高い応力低減率が得られると予想していたが、実際はそうはならなかった。このことから補強によって垂直補剛材の首振りによる曲げを抑え応力を低減させるには、垂直補剛材と同じ橋軸直角方向断面に補剛部材を追加することで大きな効果を得られるということが言えるだろう。Model4 は Model3 と比較しても応力の低減効果が低く、他のモデルよりも追加した部材の数が多いことから、本研究で対象としている 2 主桁橋の部材を減らして経済性に優れているコンセプトに反している。

6. あとがき

曲線 2 主桁橋の床版に自動車荷重を載荷させた際に発生する応力集中を特に垂直補剛材に着目して解析し、考察した。自動車荷重は T 荷重とし、T 荷重を 1 組載荷する Case1 と T 荷重を 3 組載荷する Case2 の 2 通りの解析を行なった。まず基本となるモデルに荷重を載荷させ FEM 解析をすると床版がたわみ、それにともなって主桁服板と垂直補剛材に首振りが発生、応力集中が生じた。応力集中は基本的に荷重が載荷されている橋軸直角方向断面と同じ面内にある連結部に位置する垂直補剛材に上部で発生した。その最大値は外桁側の垂直より大きな値となり、自動車荷重に対して外桁側の垂直補剛材が不利であるということが分かった。そしてそれらの値には十分疲労に繋がる可能性のある大きなものがあつたので、垂直補剛材の補強案というものを考えた。

基本の垂直補剛材を有するモデルを BasicModel とし、垂直補剛材の板厚を 25mm から倍の 50mm にしたモデルを Model 1、垂直補剛材に幅 250mm・板厚 25mm のフランジをつけたモデルを Model 2、主桁の外側にも板厚 25mm の垂直補剛材をつけたモデルを Model 3、主桁の外側に板厚 25mm の垂直補剛材を 250mm の間隔で 2 枚つけたモデル

を Model 4 として、それぞれのモデルにファインメッシュを施し、2 通りの荷重条件のもと解析を行なった。補強をしたそれぞれのモデルにおいて垂直補剛材に発生する応力は低減され、最大ではフランジを付けた Model2 において約 35%の応力の低減効果があつた。しかし 2 主桁橋は経済性の向上を狙った橋梁形式であり、水平補剛材・垂直補剛材などもできる限り省略する設計となっている。そのため補強のために垂直補剛材の板厚を大幅に大きくすることや、フランジを付けること、垂直補剛材の枚数を増やすことは、そのコンセプトに反している。Model4 は Model3 と比較しても応力の低減効果が低く、他のモデルよりも追加した部材の数が多いので、2 主桁橋のコンセプトに反していることとなる。また Model2 と Model3 は同じ形状の部材をそれぞれ異なる場所に追加しているモデルなので、より応力の低減率の高い Model2 のほうが Model3 よりも優位性があると考えられる。Model1 は部材を増やしたのではなく板厚を増したモデルなので他のモデルと一概に比較することは出来ない。これらのことから本研究で対象としている斜め横桁を有する曲線 2 主桁橋の自動車荷重下における首振りに対する垂直補剛材の補強案としては Model1 と Model2 が有効である。

今後はこの 2 つのモデルの板厚を変化させるなどして解析を行い、出来るだけ部材の増加を抑えた補強案を考えていくこととする。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Hideyuki HIRASAWA, Atsusi FUKUSHIMA, Toshiro HAYASHIKAWA, Koichi SATO: Development of torsional strength of curved twin I-girder bridge with composite slab and diagonal cross beams Proceedings of 5th Japanese - German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, September 9-12, pp.205-210, 2003