

曲線合成 2 主桁橋架設時の立体挙動

Behaviors of horizontally curved composite twin I-girder bridges under construction

函館工業高等専門学校専攻科
函館工業高等専門学校○学生員 川嶋友士 (Kawashima Yuji)
正会員 平沢秀之 (Hirasawa Hideyuki)

1. まえがき

近年、公共工事におけるコスト削減の必要性が高まっている。鋼橋の分野においても設計・製作・施工・維持管理を含めたトータルコストを削減する必要がある。施工においては送り出し工法¹⁾が経済的である。しかし、送り出し工法は直線橋では容易だが、曲線橋では難しい。^{2),3)} 送り出し工法では、張り出し長が長いほど横倒れ座屈の可能性や過大な支点反力の発生等、構造的な不安定要因が増す。完成時には正の曲げを受ける箇所でも架設時には非常に大きな負の曲げモーメントが作用することもある。特に、前方支点上の桁断面は架設中の弱点となり得る。

合成床版を有する 2 主桁橋のコンクリート打設前の架設時において、デッキプレートと主桁は剛に結合されておらず、不完全合成であると考えられる。しかしながら、現実の橋梁において合成度がどの程度であるか、また合成度が桁のたわみや曲げモーメントに及ぼす影響についてはほとんど研究されていない。そこで、本研究では曲線 2 主桁橋を対象とし、デッキプレートの合成度と架設時の立体挙動について検討した。

2. 解析モデル

2.1 曲線 2 主桁橋の架設時諸元

解析対象とする曲線 2 主桁橋モデルは、4 径間連続桁（支間長 50[m]×4）を想定し、橋長 L を一定として曲率半径 $r = \infty$, 250[m] の 2 通りのモデルを作成した。

断面寸法は既存の 2 主桁橋の実例⁴⁾を参考にし、表 1 のようにした。横桁は主桁の中段に配置し、橋軸方向に 5m 間隔で設けられている。また主桁本体の両端と中間橋脚上となる位置には、中間横桁よりも剛性の高い端横桁を設置している。

図 1 に構造モデルの概略を示す。図(b)に示すように、送り出し方向の前方には長さ $L_N = 40$ [m] の直線の手延べ機が設置されている。桁全体は 10 の支点 S_{1L} , S_{1R} , S_{2L} , S_{2R} , S_{3L} , S_{3R} , S_{4L} , S_{4R} , S_{5L} , S_{5R} で支持されており、その前方には S_{6L} , S_{6R} がある。

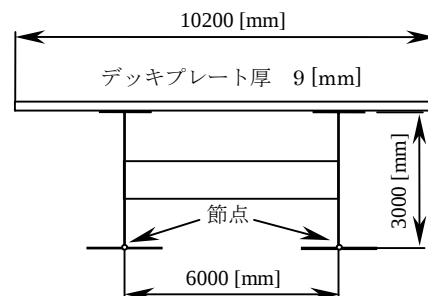
また、図(c)は送り出しのステップであり、 α を以下のようにおく。

$$\alpha = \frac{x}{l} \quad (1)$$

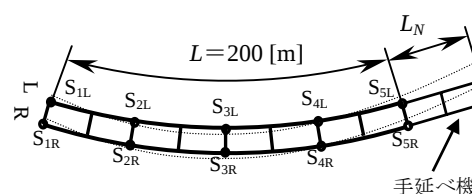
ここに、 x : 本体の張り出し長、 l : 支間長である。また、 q : 本体の単位長さ重量、 EI : 本体の曲げ剛性、 q_n : 手延べ機の単位長さ重量、 $E_n I_n$: 手延べ機の曲げ剛性、 l_n : 手延

表 1 部材断面 [mm]

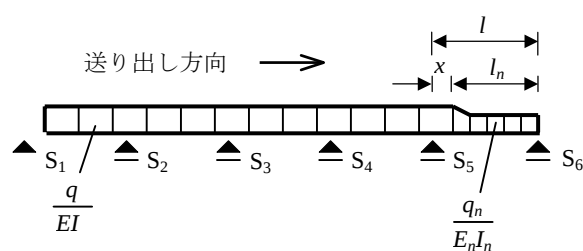
	主桁	横桁
上フランジ幅	500	250
上フランジ厚	50	19
桁高	3000	700
ウェブ厚	23	12
下フランジ幅	800	250
下フランジ厚	50	19



(a) 断面図



(b) 平面図



(c) 側面図

図 1 曲線橋 2 主桁モデル

べ機の長さである。送り出しの開始時は $x = 0$ なので $\alpha = 0$ である。桁を徐々に送り出していき、 $\alpha = 0.2$ ($x = 10$ [m]) のとき手延べ機が支点 S_6 に到達する。さらに送り出しを進めていき、 $\alpha = 1$ ($x = 50$ [m]) となったとき本体が支点 S_6 に到達し、送り出しは完了となる。

2.2 FEM 解析モデルと載荷荷重

図2はFEM 解析を行うための骨組モデルである。境界条件は S_1 がヒンジ支点、その他は全てローラー支点となるように設定している。主桁は等断面であるため図心軸は一定である。また、表2は桁に作用する荷重を計算したもので、荷重は死荷重のみ考慮し、等分布荷重として主桁腹板上に載荷した。なお、鋼材の密度は $W_s = 7850[\text{kg/m}^3]$ である。

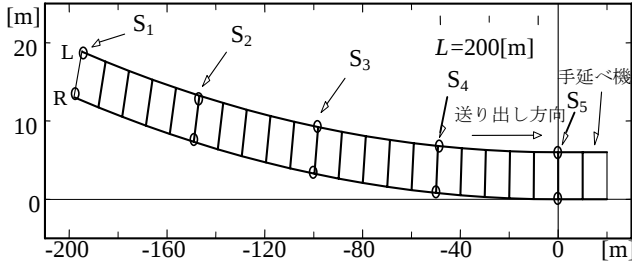


図2 FEM 解析モデル

表2 FEM 解析モデルの載荷荷重

	主桁1		主桁2		横桁		垂直補剛材	デッキプレート	
	幅	板厚	幅	板厚	幅	板厚	幅	板厚	
上フランジ[m]	0.5	0.05	0.5	0.05	0.25	0.019	0.2	0.02	10.2
腹板[m]	2.9	0.023	2.9	0.023	0.7	0.012			
下フランジ[m]	0.8	0.05	0.8	0.05	0.25	0.019			
全長[m]	200		200		6		2.9		200
断面積[m ²]	0.1317		0.1317		0.0179		0.004		0.0918
体積[m ³]	26.34		26.34		0.1074		0.0116		18.36
質量[kg]	2.068E+05		2.068E+05		8.431E+02		9.106E+01		1.441E+05
重量[N]	2.026E+06		2.026E+06		8.262E+03		8.924E+02		1.412E+06
本数	1		1		39		78		1
総重量[N]	2.026E+06		2.026E+06		3.222E+05		6.961E+04		1.412E+06

2主桁橋	
総重量合計[N]	5.857E+06
全重量[N]	6.443E+06
単位幅重量[N/m]	1.611E+04
載荷節点数	78
1節点荷重[N]	8.260E+04

手延べ機(1本当り)	
単位幅重量[N/m]	1.611E+03
全長[m]	40
重量[N]	6.443E+04
載荷節点数	7
1節点荷重[N]	9.204E+03

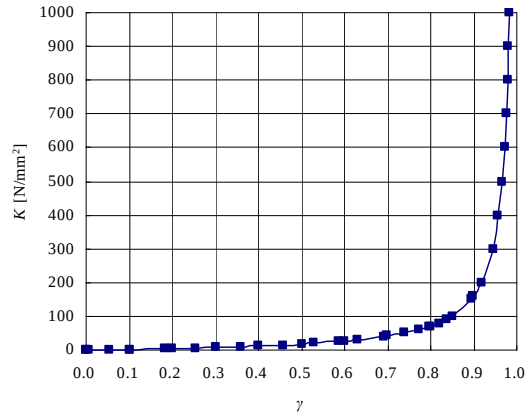


図3 K-γ 曲線

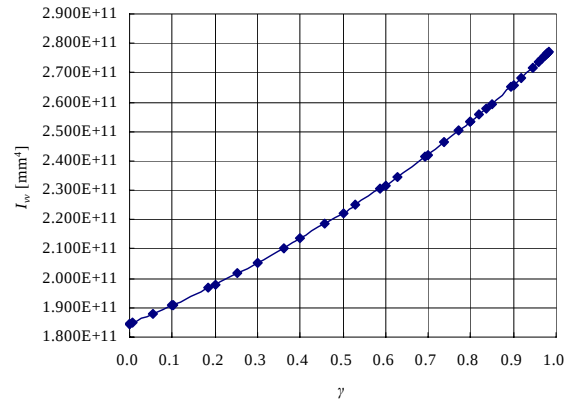


図4 Iw-γ 曲線

の断面二次モーメント、 A_d : デッキプレートの断面積、 s_d : デッキプレートの重心と合成断面の重心間の距離、 s : デッキプレートと鋼桁との重心間の距離とすると、次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} I_{ds} &= I_s + I_d \\ I_{dsv} &= A_d s_d s \\ I_v &= I_{ds} + I_{dsv} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

更に、 I_w を不完全合成桁の断面二次モーメントとすると、次式が成立する。

$$I_w = \frac{(I_{ds} + I_{dsv}) \cdot (I_{ds})}{I_{ds} + (1 - \gamma) \cdot (I_{dsv})} \quad (5)$$

したがって、 I_w は γ によって変化することがわかる。図4は本研究で使用する断面諸元を用いた場合の I_w と γ の関係を示した図であり、これらはほぼ比例関係にあるといえる。すなわち、 I_w が増加するにつれ γ は増し、完全合成桁に近づく。

$\gamma = 1.0$ の場合はデッキプレートと主桁が完全に結合されているのでずれを生じないが、 $\gamma = 0$ の場合はデッキプレートと主桁の結合力がなく、ただ主桁の上にデッキプレートが載っているだけの構造となるので、当然ずれが生じる。断面二次モーメントも鋼桁とデッキプレートの断面二次モーメントを足し合わせるだけとなり、合成度1.0の場合よりも断面二次モーメントは小さくなる。

2.3 合成度と不完全合成桁の断面二次モーメント

主桁のたわみは合成度により変化する。すなわち、完全に結合されている場合は主桁とデッキプレートとのずれが生じなく、たわみは最も小さい。デッキプレートと結合されていない場合は大きなずれが生じ、たわみも大きい。

合成度 γ は参考文献⁵⁾により、以下の式によって求められる。

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{\omega^2 L^2}} \quad (2)$$

ここに、

$$\omega^2 = \frac{I_v}{I_s + I_d} \frac{K}{E_s A_d} \frac{s}{s_d} \quad (3)$$

であり、 K は合成桁橋におけるスタッドジベルのばね定数である。本研究では、デッキプレートと主桁の合成度を考えるため、スタッドジベルは考慮していないが、デッキプレートと主桁のずれを表すパラメータとして考えることができ、これらの関係を図3に示した。

また、 I_s : 鋼桁の断面二次モーメント、 I_d : デッキプレート

3. FEM 解析結果

3.1 手延べ機の重量による M/ql^2 の比較

橋梁本体と手延べ機の重量との比 q_n/q を変化させ、前方支点上 (S_5) に作用する曲げモーメント無次元量 M/ql^2 を解析した結果を図5に示す。ここでのパラメータは $\gamma = 1.0$, $r = \infty$, $l_n/l = 0.8$, $E_n I_n/EI = 0.1$ である。また、図6は $r = 250[m]$ とした場合の解析結果である。なお、ここでは $q =$ 一定とする。

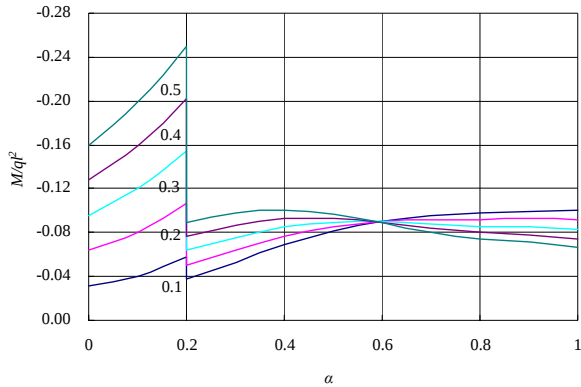
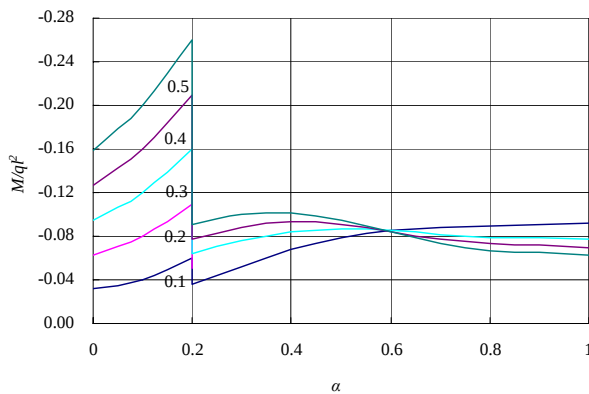
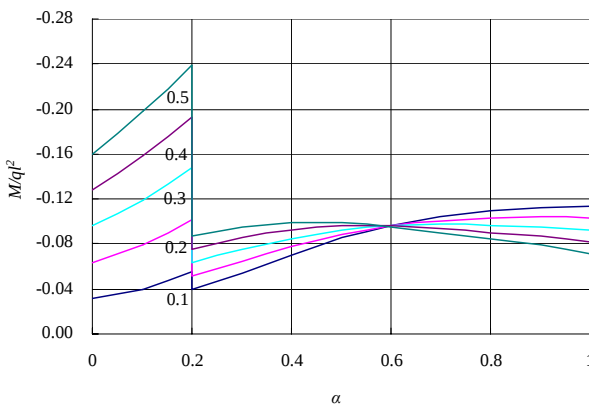


図5 前方支点上の曲げモーメント無次元量 ($r = \infty$)



(a) 内桁 ($l_n/l = 0.8$, $E_n I_n/EI = 0.1$)



(b) 外桁 ($l_n/l = 0.8$, $E_n I_n/EI = 0.1$)

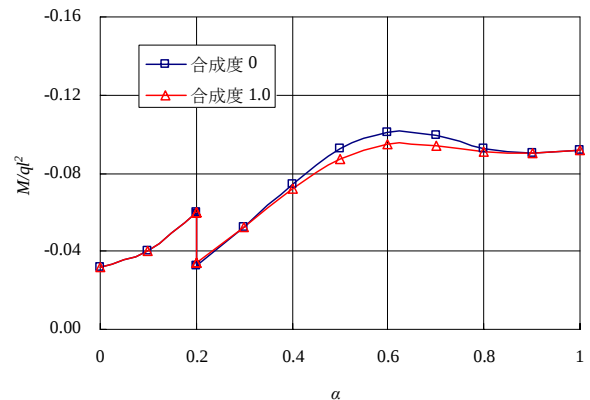
図6 前方支点上の曲げモーメント無次元量 ($r = 250[m]$)

曲線橋を送り出していくと、張り出し長が長くなっていくため徐々に M/ql^2 が増加しているのがわかる。手延べ機が最初の支点 (S_5) に到達すると、先端が支持されるため M/ql^2 が一気に減少する。ここまでの M/ql^2 の変化をみると、手延べ機の重量が増すにつれ、 M/ql^2 が著しく増加しているのがわかる。これは S_5 の支点到達するまでは片持ち状態にあるためである。さらに桁を送り出して張り出し長を長くすると、手延べ機が軽量の場合には M/ql^2 は増加傾向にあるが、重くしていくと M/ql^2 は減少していく結果となった。

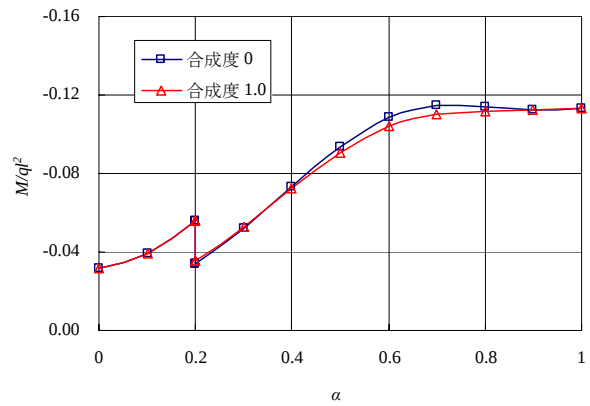
また、内桁と外桁を比較すると、最初は若干内桁の方が M/ql^2 は大きいですが、最終的には外桁の方が大きくなる結果となった。これは、桁を送り出したときに外側にねじれようとする力が働くためである。そのため、外桁の支点には内桁の支点よりも大きな負の曲げモーメントが発生するということがいえる。

3.2 合成度による M/ql^2 の比較

式(5)から得られる不完全合成桁の断面二次モーメント I_w をパラメータとして合成度を変化させ、前方支点上に作用する負の曲げモーメント無次元量 M/ql^2 を解析した結果を図7に示す。送り出し開始時は合成度による M/ql^2 の差は見られないが、 $\alpha = 0.4 \sim 0.8$ のあたりで違いが出てくる。しかしながら、それほど大きな差は見られず、 M/ql^2 はほぼ近い値となった。



(a) 内桁 ($l_n/l = 0.8$, $E_n I_n/EI = 0.1$, $q_n/q = 0.1$)



(b) 外桁 ($l_n/l = 0.8$, $E_n I_n/EI = 0.1$, $q_n/q = 0.1$)

図7 前方支点上の曲げモーメント無次元量 ($r = 250[m]$)

したがって、前方支点上に作用する負の曲げモーメントは合成度にはさほど影響されないということがいえる。

3.3 合成度によるたわみの比較

図8は、合成度を变化させたときの橋梁本体の先端のたわみ w を解析した結果である。ここでは上側の変形量を+, 下側の変形量を-とする。

桁を送り出していくと、桁先端部はわずかに上側に変形し、一旦下側にたわむが、手延べ機が支点(S_0)に到達すると再び上側の変形量は大きくなる。さらに桁を送り出していくと張り出し長が長くなるため、上側に変形していた桁が下側の変形へと移り、徐々にたわみが大きくなる。さらに送り出しを進めていくと、内桁では $\alpha = 0.6$ 、外桁では $\alpha = 0.65$ あたりでたわみは最高値となり、その後は減少していく。

合成度によるたわみ量を比較すると、完全合成桁よりも不完全合成桁の方が大きい結果となった。すなわち、完全に結合されている場合は主桁とデッキプレートとのずれが生じなく、たわみは小さくなるが、デッキプレートと結合されていない場合はずれが生じ、たわみも大きくなる。しかしながら、合成度によるたわみの差はそれほど大きなものではない。

また、内桁と外桁では図8を見るとわかるように、内桁よりも外桁の方がたわみ量は大きくなった。これについては3.1でも述べたように、桁を送り出したときに外側にねじれようとする力が働くためである。したがって、曲率半径が小さい場

合にはたわみも大きくなるので、架設時にはこれを考慮して送り出す必要がある。

4. まとめ

鋼道路橋の経済性を高めるためには、設計、工場製作、現場架設及び完成後の維持管理の各段階において省力化を進めることが重要である。現場における架設では、架設地点の様々な制約条件のために架設工法が限定されることが考えられるが、できるだけ省力化に対応した架設工法を選択することが望ましい。

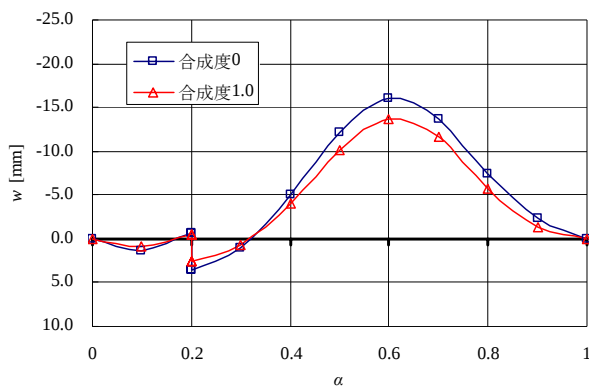
本研究では曲線2主桁橋の架設工法として、省力化工法と成り得る送り出し工法を取り上げ、架設中の橋梁本体の立体挙動についてFEM解析を実施した。その結果、得られた知見を以下に記す。

- 1) 合成度 γ はスタッドジベルのばね定数 K に依存するが、 $\gamma=1.0$ とするには計算上 $K=\infty$ としなければならない。また、不完全合成桁の断面二次モーメント I_w は合成度 γ とほぼ比例関係にある。
- 2) 前方支点上に作用する負の曲げモーメント無次元量 $M/q\ell^2$ は、手延べ機の重量が重いほど大きくなる。また、合成度が低い場合も若干大きくなるため、なるべく合成度は高い方がよい。
- 3) 橋梁本体の桁先端部のたわみは、合成度が低いとその量は増加する。
- 4) 曲率半径を有する桁を送り出す際には、外桁の方が半径が大きくなるため、外側にねじれようとする力が働く。故に、前方支点上に作用する負の曲げモーメントおよび桁先端部のたわみは、内桁よりも外桁の方が大きい値となった。しかし、曲率半径が大きくなっていくと中心角は小さくなり、直線に近づくため内桁と外桁との負の曲げモーメントおよびたわみの差は小さくなる。

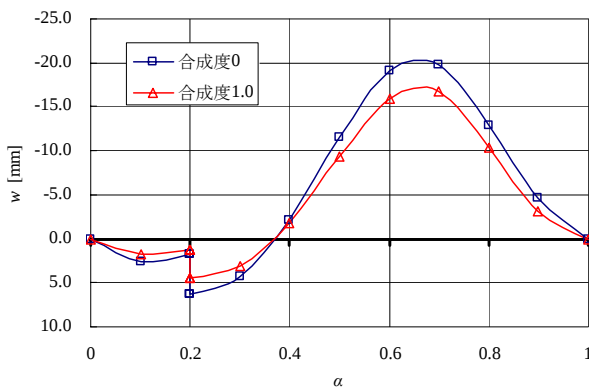
以上のことを、架設時には考慮しなければならない。

参考文献

- 1) Marco Rosignoli : Nose-deck Interaction In Launched Prestressed Concrete Bridges, J. Bridge Eng., Vol. 3, No. 1, ASCE, 1998.
- 2) 平沢秀之, 小山明久, 林川俊郎, 佐藤浩一, 及川昭夫 : 曲線2主桁橋の送り出し架設時における立体挙動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第55号(A), pp. 364-367, 1999.
- 3) H. Hirasawa, T. Hayashikawa, K. Sato : Stability of Curved Girder Bridges under Construction, Proceedings of The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, pp. 477-482, 1999.
- 4) http://www.jasbc.or.jp/technique/approach_files/kouk-you-approach2.pdf (日本橋梁建設協会)
- 5) 佐藤浩一, 井上稔康, 安念秀剛 : 合成桁の曲げ剛性に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, I-15, 1992.



(a) 内桁 ($l_r/l=0.8$, $E_r I_r/EI=0.1$, $q_n/q=0.1$)



(b) 外桁 ($l_r/l=0.8$, $E_r I_r/EI=0.1$, $q_n/q=0.1$)

図8 桁先端部のたわみ量 ($r=250[m]$)