

曲線合成2主桁橋の試設計と合理化の検討

Study on rationalization of curved composite two-girder bridges and test-designs

北海道大学大学院	正 員	平沢秀之 (Hideyuki Hirasawa)
(株)新構造	正 員	高松 潤 (Jun Takamatsu)
北海道大学工学部	○学生員	吉村晋一 (Shinichi Yoshimura)
北海道大学大学院	フェロー	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院	フェロー	佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. まえがき

最近、鋼道路橋においては、製作・架設時の経費縮減、省力化及び供用後の維持管理費の節減等の観点から部材数を大幅に減らし、構造を簡素化した少数主桁橋の建設が増えてきている。少数主桁橋、特に2主桁橋の我が国におけるこれまでの事例を見ると、直線橋あるいは曲率半径の非常に大きな曲線橋である、床版は非合成のPC床版が比較的多い、主桁は桁高が約3[m]で主桁間隔が4～6[m]程度、また水平補剛材が減少または省略されている、横桁は約5～10[m]間隔で、中段または下段配置となっている、等の構造的特徴を有している¹⁾。ヨーロッパでは2主桁橋の実績が豊富であり、主桁間隔が10[m]以上のものや、横桁が上段配置されたもの等、多様な形式が存在する²⁾。鋼橋のコスト縮減に対する要求に応じるために我が国でもこの種の橋梁形式に関する更なる研究開発が必要と思われる。

鋼桁とコンクリート床版の合成、非合成の観点から見ると、日本では1960年代以降合成桁橋の建設が大きく伸びた。ところが1975年頃から床版の耐久性不足と交通量の増大等の原因によりひび割れ損傷が多発し、非合成桁橋へと転換していった。しかし、床版の損傷機構が近年になってかなり解明されるようになり、またコンクリートの品質及び強度の向上に伴い、合成桁が再び見直されつつある³⁾。特に2主桁橋に見られる床版はPC床版または各種合成床版であり、床版厚も大きく高耐久化がなされているため、合成桁として設計の方が合理的であると考えられる。

本研究では、2主桁橋を合成桁として設計した場合に、非合成桁と比較して、更に従来の標準的な多主桁形式と比較してどの程度合理化が達成できるかを検討するものである。対象とする橋梁は中心角が20°までの曲線橋とした。曲線橋はねじりの影響が大きいため、一般に箱桁や格子桁が用いられるが、コストダウンの要求が高まれば曲線橋にも2主桁形式が採用されるものと考えられる。本研究では現行の道路橋示方書⁴⁾に従い、許容応力度設計法で各種の条件すなわち2主桁、多主桁、合成、非合成及び中心角を種々変化させて試設計を行い、合理化の検討を行っている。

2. 合成桁及び非合成桁の鋼桁断面

合成桁ではコンクリート床版が板として輪荷重に抵抗すると共に、主桁断面の一部をなす。したがって、合成桁は非合成桁より鋼桁の断面積を低減させることができ

る。ここでは鋼桁断面積をどの程度低減できるかを定量的に把握することとする。

始めに非合成桁の鋼桁断面積を求める。断面は2軸対称のI形断面と仮定し、図-1(a),(b)のような主桁の荷重分配影響線及び曲げモーメント影響線を用いて支間中央断面に作用する曲げモーメント M を求めると、

死荷重による曲げモーメント M_d ：

$$M_d = \left(\frac{b}{m} - \frac{b}{8m} \right) w_d \frac{L^2}{8} \quad (1a)$$

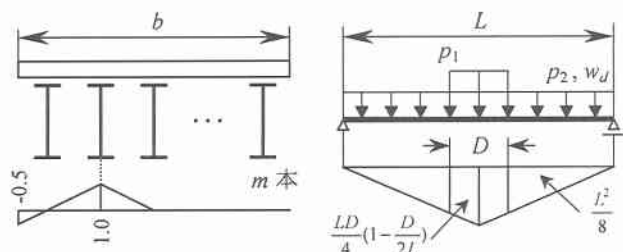
活荷重による曲げモーメント M_l ：

$$M_l = \frac{b}{m} \left\{ p_1 \frac{LD}{4} \left(1 - \frac{D}{2L} \right) + p_2 \frac{L^2}{8} \right\} \quad (1b)$$

曲げモーメント M ：

$$M = M_d + M_l = \frac{b}{m} \left\{ p_1 \frac{LD}{4} \left(1 - \frac{D}{2L} \right) + \frac{L^2}{8} \left(p_2 + \frac{7}{8} w_d \right) \right\} \\ = \frac{b}{m} F, \quad \left(F = p_1 \frac{LD}{4} \left(1 - \frac{D}{2L} \right) + \frac{L^2}{8} \left(p_2 + \frac{7}{8} w_d \right) \right) \quad (1c)$$

となる。ここで、 w_d は単位面積あたりの死荷重、 p_1, p_2 は道路橋示方書に示されたL荷重である。



(a)主桁の荷重分配影響線 (b)曲げモーメント影響線

図-1 影響線と荷重

一方、腹板厚を t_w 、許容曲げ引張応力度を σ_a とすると、プレートガーダーの経済的桁高 h は次式により求めることができる⁵⁾。

$$h = 1.1 \sqrt{\frac{M}{\sigma_a t_w}} \quad (2)$$

また桁の断面2次モーメントを I とすると、上下フランジにおける曲げ応力 σ_M は次式となる。

$$\sigma_M = \frac{M h}{I} \quad (3)$$

更にフランジの断面積を A_f とおくと、 I は次式により得ることができる。

$$I = \frac{A_f h^2}{2} + \frac{t_w h^3}{12} \tag{4}$$

式(1c)、(2)～(4)より I を消去し、 $\sigma_M = \sigma_a$ において整理すると、次式のように A_f を得ることができる。

$$A_f = 0.726 \sqrt{\frac{t_w b F}{m \sigma_a}} \tag{5}$$

ここで m 本の鋼桁の断面積がすべて等しいと仮定すると、鋼桁の断面積 A は次式となる。

$$A = m(t_w h + 2A_f) = 2.552 \sqrt{\frac{m t_w b F}{\sigma_a}} \tag{6}$$

式(6)は非合成桁の鋼桁断面積を求めたものであるが、合成桁についても同様な方法で得ることができる。非合成桁、合成桁それぞれに対し、支間長 $L=50$ [m]、総幅員 $b=10$ [m]とした場合の鋼桁断面積を比較したものを図-2に示す。図の縦軸は主桁本数が5本の非合成桁の鋼桁断面積を1としたときの比率を表している。主桁本数を減少させていくと鋼桁断面積も減少して行くが、 $m=2$ 本の場合は増加している。これは $m=2$ 本の場合を合理化橋とみなして、水平補剛材を省略することのために、腹板厚が大きくなったためである。しかしながら非合成桁と合成桁の差は $m=2$ 本の方がより大きいことが示されている。この図より主桁本数が少ないほど合成桁とした方が、鋼桁断面積が少なくて済むことが分かる。

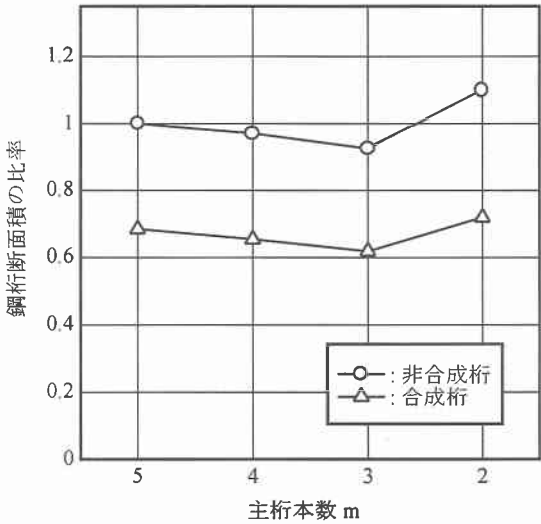


図-2 鋼桁断面積の比較

3. 曲線橋の構造モデル

3.1 設計条件

合理化の比較検討を行うために、共通の設計条件によって従来の標準的な多主I桁橋と2主桁橋の試設計を行う。本研究では多主I桁橋として4主桁橋を比較対象とした。これらの共通な設計条件として図-3に示すように中央支間長 $L=50$ [m]で一定とし、中心角は、 $\phi=0^\circ$ (直線橋)、 5° 、 10° 、 15° 、 20° の5通りとする。また、幅員構成は図-4(a),(b)の通りとし、活荷重はB活荷重とする。

3.2 主桁の鋼桁の断面諸元

主桁は図-1の5のような断面変化点⁶⁾を有する変断面桁とし、図中の断面A～Dにおいて応力度照査を行うこととする。4主桁橋は水平補剛材を2段使用するものとし、2主桁橋では水平補剛材を省略した。鋼桁断面は、表-1のようにフランジ幅および腹板高を支間長に渡って一定としフランジ厚のみを変化させて変断面とする。断面寸法の決定は道路橋示方書に基づく許容応力度設計法に従って行った。

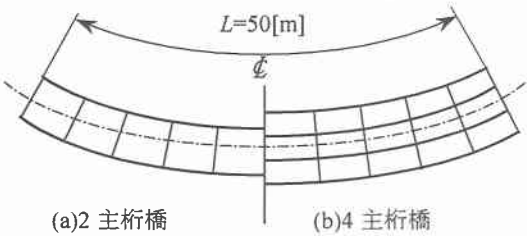
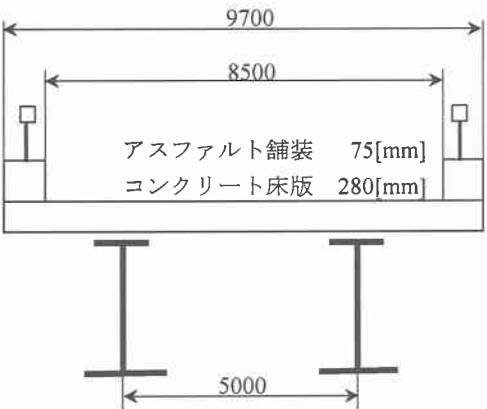
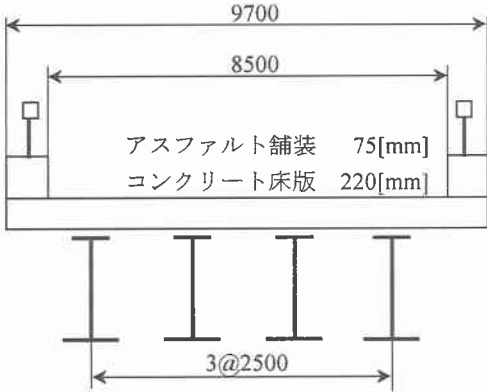


図-3 曲線橋平面図



(a) 2 主桁橋



(b) 4 主桁橋

図-4 曲線橋断面図

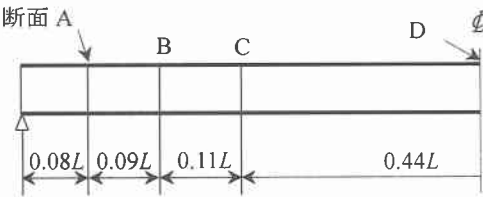
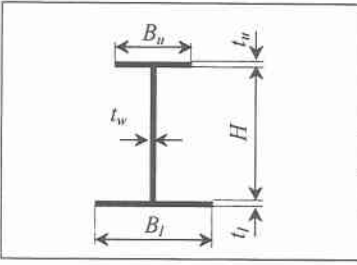


図-5 主桁の断面変化点と照査断面

表－1 鋼桁の断面諸元

[mm]

	合成桁			非合成桁		
	2 主桁橋		4 主桁橋	2 主桁橋		4 主桁橋
	外桁	内桁		外桁	内桁	
上フランジ幅 B_u	500	500	300	800	800	500
腹板高 H	3100	3000	2500	3100	3000	2500
下フランジ厚 B_l	800	800	500	800	800	500

4. 許容応力度設計法による試設計結果

4.1 曲線非合成桁の試設計

非合成桁橋の試設計結果の一例を表－2に示す。これは、中心角が $\phi=10^\circ$ の曲線2主桁橋の外桁断面に関するものである。他の中心角、及び4主桁橋の全ての鋼桁断面についても同様に許容応力度以下となる断面寸法が得られている。フランジ厚は支間中央断面で最も大きく支点に近づくにつれ小さくすることができる。しかし、幅厚比の制限によりある一定の板厚より小さくすることができず、許容応力度に対して余裕のある断面となった。

4.2 曲線合成桁の試設計

合成桁の設計においては、コンクリート床版を合成する前の架設時荷重や、コンクリート床版のクリープ、乾燥収縮、コンクリートと鋼材の温度差による応力などが生じる。主荷重とそれらの荷重の組み合わせによって許容応力度の割増しが行われる。合成桁橋の試設計結果の一例を表－3に示す。これは、中心角が $\phi=10^\circ$ の曲線2主桁橋の外桁断面に関するものである。他の中心角、及び4主桁橋の全ての鋼桁断面についても同様に許容応力度以下となる断面寸法が得られている。この結果からB、C、D断面においては荷重の組み合わせとして、乾燥収縮とクリープを加えた主荷重による発生応力が断面決定を行う際にクリティカルになると言える。フランジ厚は支間中央断面で最も大きく支点に近づくにつれ小さくすることができる。しかし断面Aでは、幅厚比の制限によりある一定の板厚より小さくすることができず、許容応力度に対して余裕のある断面となった。これは、非合成桁の試設計の場合と同じ傾向である。

表－2 非合成2主桁橋のフランジ断面

[N/mm²]

	断面 A	断面 B	断面 C	断面 D
上フランジ厚[mm]	37	37	58	79
発生応力度	93	176	194	190
許容応力度	210	210	195	190
下フランジ厚[mm]	25	31	58	79
発生応力度	107	204	194	190
許容応力度	210	210	195	190

表－3 合成2主桁橋のフランジ断面

[N/mm²]

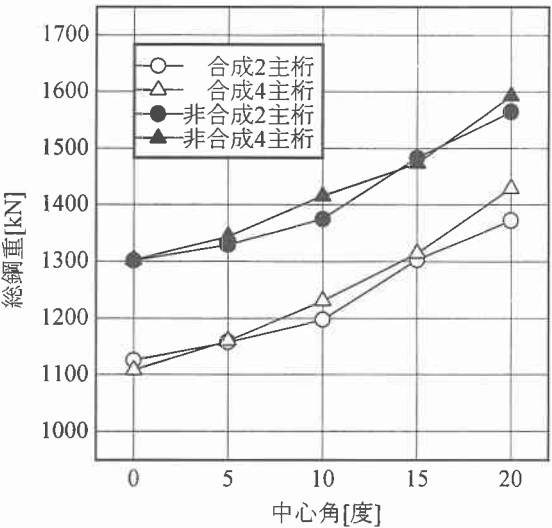
		断面 A	断面 B	断面 C	断面 D
上フランジ厚[mm]		23	23	39	63
合成前	発生	96	181	187	173
	許容	123	189	215	220
合成後	発生	103	194	205	196
	許容	210	210	210	195
+乾燥収縮 クリープ	発生	132	226	236	224
	許容	242	242	242	224
+温度差	発生	152	248	256	244
	許容	273	273	273	254
下フランジ厚[mm]		25	31	59	79
合成前	発生	72	126	116	112
	許容	263	263	244	236
合成後	発生	111	195	186	185
	許容	210	210	195	190
+乾燥収縮 クリープ	発生	121	205	193	190
	許容	210	210	195	190
+温度差	発生	127	211	198	194
	許容	242	242	224	219

5. 数量集計結果

合理化の検討項目として、鋼重、材片数、溶接延長、全体製作工数を挙げる。鋼重は材料費に材片数・溶接延長は施工性に影響を与え、全体製作工数は橋梁の製作コストに直接する影響を与える項目である。ここでは4.で試設計された結果を基にそれぞれの数量の集計を行った。

5.1 鋼重・材片数・溶接延長

図－6は中心角ごとの総鋼重を表したものである。2主桁橋でも総鋼重は4主桁橋とほとんど変わらない。これは、腹板高やフランジ厚の増加で主桁が大型化することによって主桁の一部材あたりの重量が大きくなったためである。しかしながら、合成桁と非合成桁の形式の違いから見ると、2主桁橋、4主桁橋ともに大きく総鋼重が減っている。合成桁形式にすることによって使用鋼材の総重量を大幅に減らすことができることが分かる。これは、図－2で示した鋼桁断面の比較の傾向と一致する。



図－6 総鋼重

図-7は中心角 $\phi=10^\circ$ における合成桁の4主桁橋と2主桁橋の材片数を表したものである。他の中心角の材片数についてもほぼ同様の結果が得られている。2主桁形式にすることにより、大型材片、小型材片ともに大幅に減少していることが分かる。特に小型材片数の減少が顕著である。これは腹板を厚くすることによって補剛材を減らすことができるためであり、また横桁の本数も少なくなることによって、スプラインプレート、ガセットプレート等の小型材片数を大幅に減少出来たためである。

図-8は、大型材片板継溶接延長(6mm換算長)を表したものである。2主桁橋では4主桁橋に比べ、溶接箇所も減り溶接延長を短くすることができる。また合成桁にすることにより、2主桁橋では非合成4主桁橋の溶接延長の50パーセント程度にまでとさらに短くすることができる。

5.2 全体製作工数

ここでは鋼橋の製作コストに直接結びつく全体製作工数を計算する。これは橋梁製作の経済性を表す指標となるものである。本研究では主桁、横桁等の要素ごとに数量⁷⁾を集計し、建設省の鋼橋積算基準⁸⁾に基づき算定を行った。全体製作工数は工場製作原価のうちの直接工事費の算定に用いられる。全体製作工数の算定は次式による。

$$Y = \{(Y_1 + Y_2)K + Y_3 + Y_4\}(1 + \alpha)(1 + \beta)(1 + \gamma)(1 + \delta) + Y_5 \quad (7)$$

ここで記号は以下の通りである。 Y_1 ：本体の加工組立工数、 Y_2 ：本体の溶接工数、 K ：570材相当品による影響割増、 Y_3 ：本体の仮組立工数、 Y_4 ：対傾構及び横構組立工数、 Y_5 ：付属物の製作工数、 α ：重連による補正係数、 β ：斜橋または曲線橋による補正係数、 γ ：桁高変化による補正係数、 δ ：平均支間長による補正係数

図-9は、式(7)より求めた主桁本数、設計形式(合成桁・非合成桁)別の全体製作工数を中心角ごとに表したものである。2主桁橋が4主桁橋に比べ大きく工数を減らすことができている。さらに、合成桁形式にすることにより2主桁橋において25パーセント以上の全体製作工数の減少になっている。また、この全体製作工数のグラフは、図-8の大型材片板継溶接延長のグラフと同様の傾向を示しており、全体製作工数に Y_2 (本体の溶接工数)が大きく影響を与えていると言える。

6. あとがき

本研究ではまず、主桁本数による鋼桁断面積を合成桁、非合成桁の形式別で比較し、主桁本数が少ないほど合成桁として設計することが有利であることを示した。次に曲線4主桁橋、2主桁橋を合成桁、非合成桁の設計形式を変えて試設計し、鋼重・材片数・溶接延長・全体製作工数の数値的な指標で比較検討を加えた。総鋼重に関しては、4主桁橋、2主桁橋ともその差はわずかであった。しかしながら2主桁橋では、材片数の大幅な減少により全体製作工数を減少させることができ、鋼桁部分の製作・施工に関して省力化が期待できる。また、合成桁形式とすることによって非合成桁に比べ曲線2主桁橋での全体製作工数に大きな差が見られた。これにより、合成桁設計による曲線2主桁橋は製作・施工において優位性が大きいことが示された。

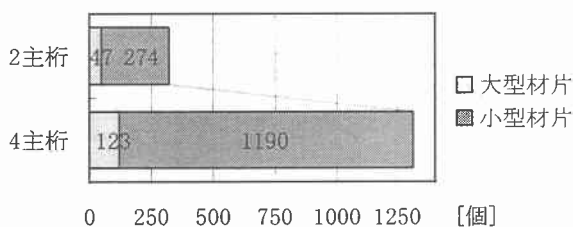


図-7 材片数

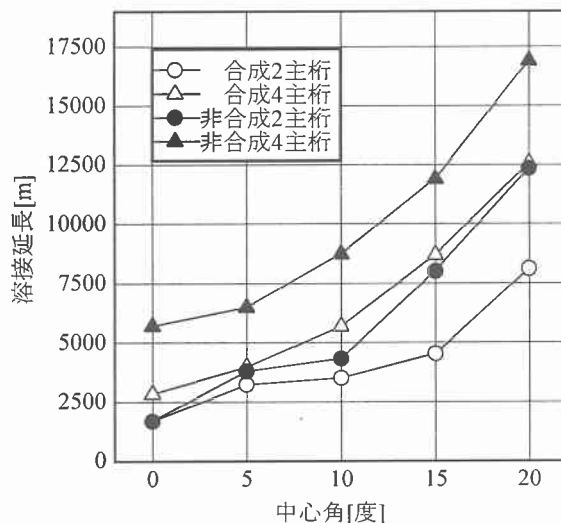


図-8 大型材片板継溶接延長

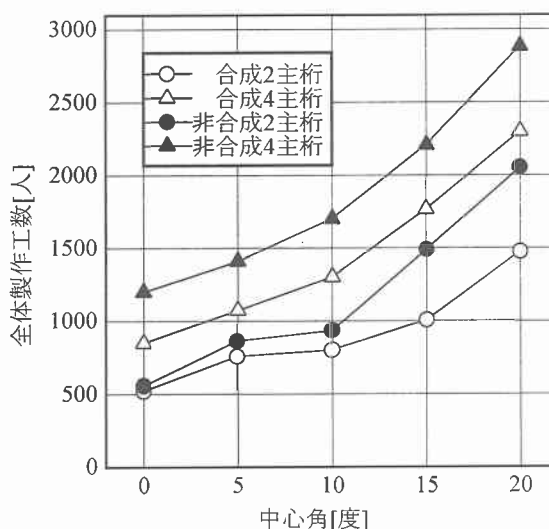


図-9 全体製作工数

参考文献

- 1) (社) 日本鋼構造協会：合理化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) 成瀬輝男：西ドイツの新しいケタ橋(1)、土木技術、25巻、11号、pp.37-45、1970。
- 3) 上阪康雄：合成桁RC床版の現状と課題、第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、pp.5-10、1998。
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋編(平成8年12月)、丸善(株)、1996。
- 5) 林川俊郎：橋梁工学、(株) 朝倉書店、2000。
- 6) (社) 日本橋梁建設協会：デザインデータブック、1993。
- 7) 建設省：鋼道路橋数量集計マニュアル(案)、1996。
- 8) 建設省都市局、道路局：鋼橋積算基準、1996。