

# 横桁を斜めに配置した曲線 2 主桁橋の固有振動特性と剛性評価

Natural vibration characteristics and evaluation of stiffness in curved twin I-girder bridges with diagonal cross beams

北海道大学大学院工学研究科 学生員 市川雅也 (Ichikawa Masaya)  
 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

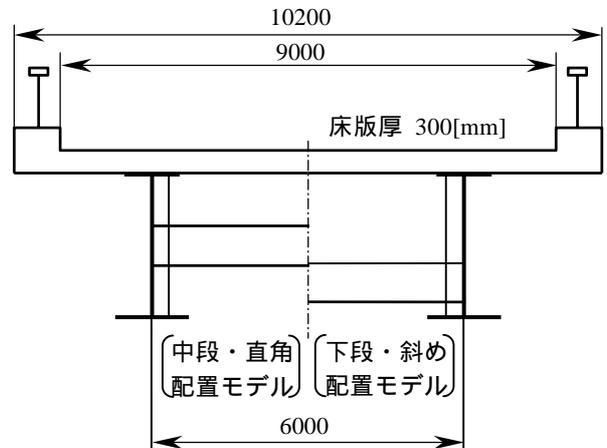
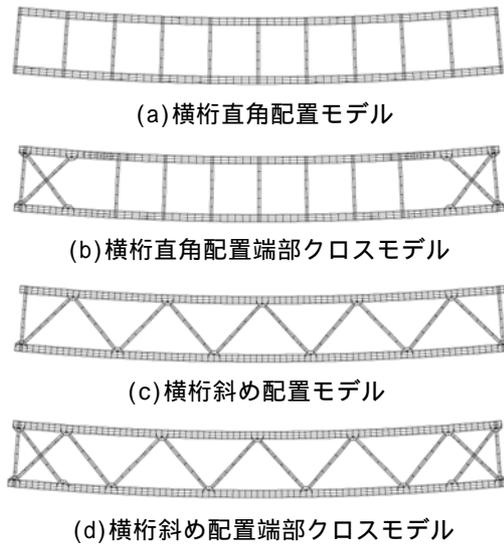
主桁本数を 2 本とし PC 床版と鋼桁の合成桁として設計された合成 2 主桁橋は部材数の少ないシンプルな構造を有しており、製作・架設の合理化・省力化を図った橋梁である。さらに、塗装面積の減少、部材交差箇所の低減による応力集中・疲労問題も解消、点検業務の容易化等、ライフサイクルコストの面においても優れていることから、今後も建設が推進されていくことが予想される。更に曲線橋にも適用範囲を広げることを目的とした研究も見られる<sup>1), 2)</sup>。

一般に、鋼桁橋は斜張橋や吊橋よりも風による振動は起きにくいとされているが、合成 2 主桁橋は従来の桁橋に比較して縦長の断面を有しているため、総幅 ( $B$ ) に対する有効高 ( $D$ ) の比 ( $B/D$ ) が 3 以下となることが多く、空気力学的特性の点で問題となる可能性がある<sup>3)</sup>。また、横構が省略され、基本的に開断面であることから、多主桁橋と比べてねじり剛性が低い構造であると言える。これまで、少数主桁橋は支間長 50[m] 程度での採用実績があり、最近では 80[m] 以上の架設事例も見られる。このような状況の中、今後も少数主桁橋の長スパン化が予想されるが、それに伴って固有振動数が低下するため、ねじり振動に関する十分な検討が必要であると考えられる。特に、ねじり渦励振については、設計基準風速以下で発生するケースや大きな応答に起因する初通過破壊・疲労破壊、自動車との共振による使用性等の問題が生じる可能性があり、ねじり剛性を向上させることが非常に重要である。

そこで、ねじり剛性を向上させる一つの手段として、既往の横桁斜め下段配置モデルに端部の横桁をクロスにしたものをモデル化した。比較検討のため既往の横桁直角配置モデルの端部をクロスにしたモデルも作成し、力学的特性の把握を行った。なお、数値計算には有限要素法汎用構造解析プログラム MSC/NASTRAN を使用する。

## 2. 解析モデル

図 - 1 は解析対象とする橋梁モデルの平面図と断面図である。平面図は横桁形式の違いを見やすくするために床版を省略した状態で表示している。断面図において、左半分は横桁を主桁の中段に直角配置させたもの、右半分は下段斜めに配置させたものを示している。支間長は 50[m]、中心角は  $10^\circ$  で、主桁と横桁の断面寸法は表 - 1 に示す。主桁の断面は通常の 2 主桁橋のように、フランジ幅を一定とし、フランジ厚のみを変化させた変断面としている。表 - 2 に材料定数を示す。



(e) 断面図

図 - 1 曲線 2 主桁橋平面図及び断面図

表 - 1 断面寸法 [mm]

	主桁	横桁
$B_u$	500	300
$t_u$	20 ~ 62	25
$H$	3000	1000
$t_w$	24	16
$B_l$	800	300
$t_l$	24 ~ 72	25

表 - 2 材料定数

	ヤング係数 $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比	単位体積重量 $w$ [kN/m <sup>3</sup> ]
PC 床版	$2.9 \times 10^{10}$	0.2	24.5
鋼部材	$2.0 \times 10^{11}$	0.3	77.0

表 - 3 固有振動数

	鉛直 1 次固有 振動数 [Hz]	ねじり 1 次固有 振動数 [Hz]
横桁直角配置	2.334	4.120
〃 端部クロス	2.435	4.840
横桁斜め配置	2.505	5.127
〃 端部クロス	2.507	5.412

### 3. 固有振動解析結果

4つの解析モデルに対して固有振動解析を実施した。結果を表-3に示す。直角配置横桁モデルと斜め配置横桁モデルを比較すると、鉛直1次振動に関しては、横桁を斜め配置にすることで若干ではあるが上昇している。これは、横桁を直角に配置すると曲げ変形が生じても横桁に軸力がほとんど働かないが、斜めに配置することで横桁に軸力が働いて抵抗し、曲げ剛性が高まったためと考えられる。ねじり1次振動に関しては、斜めに配置する効果が顕著に現れている。これは、下段に配置された斜め横桁が床版と併せて擬似箱桁断面を形成したため、ねじりに対して剛性が高まったためと考えられる。

また、それぞれのモデルの端部をクロス横桁にすることで若干ではあるが更なるねじり剛性の向上がみられる。

### 4. 鉛直荷重による主桁の変形

4つのモデルに対して、活荷重(L 荷重)を載荷し静的解析を行った。曲線橋が鉛直荷重を受けると、鉛直方向にたわむと同時に橋軸直角方向にもねじりを伴いながら変位が生じる。図-2はこれらの変位の様子を表したものである。表-4は4つの解析モデルに対して、支間中央の断面における両主桁それぞれの上端、下端の変位をまとめたものである。鉛直変位、水平変位をそれぞれ  $y, z$  で表し、添え字は a=内桁上端、b=外桁上端、c=内桁下端、d=外桁下端を意味している。

直角配置横桁モデルと斜め配置横桁モデルを比較すると、横桁を斜めに配置することで変位を大きく抑えることが出来ている。更に、内桁と外桁の変位差も小さくなっているため、ねじり変形を抑えることが出来ていることも確認できる。

また、クロス横桁の有無で変位を比較すると、直角配置横桁モデルでは、水平変位を大きく減少することができる。また、内桁の鉛直変位減少よりも外桁の鉛直変位減少の効果が大きいことが確認できる。水平方向の変位

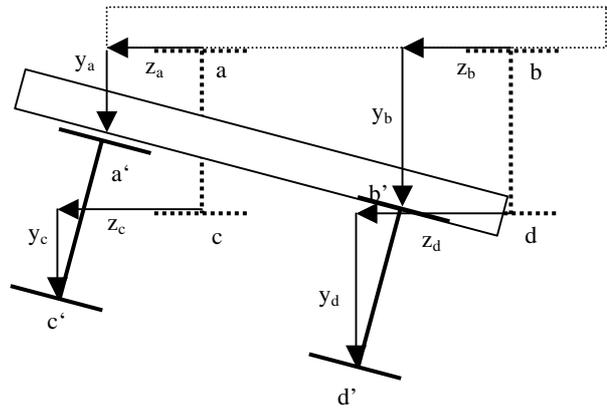


図 - 3 支間中央断面の変位

表 - 4 支間中央断面における変位 [mm]

	横桁直角配置		横桁斜め配置	
	クロス 無し	クロス 有り	クロス 無し	クロス 有り
内桁上端 鉛直変位 $y_a$	17.77	16.82	20.51	20.92
〃 水平変位 $z_a$	2.307	1.352	0.125	0.234
外桁上端 鉛直変位 $y_b$	30.06	25.51	24.80	24.59
〃 水平変位 $z_b$	2.093	1.145	-0.112	-0.002
内桁下端 鉛直変位 $y_c$	17.71	16.77	20.46	20.56
〃 水平変位 $z_c$	9.454	6.670	2.503	2.475
外桁下端 鉛直変位 $y_d$	30.03	25.48	24.76	24.55
〃 水平変位 $z_d$	10.02	7.127	3.708	3.611

が減少し、内桁と外桁の変位差が小さくなっている、このことから、横桁をクロスにしたモデルはねじり変形を抑制する効果があることが確認できる。

斜め配置横桁モデルでは、大きな変位減少は見られないが、内桁の鉛直変位が増加し外桁の鉛直変位が減少しているため、ねじり変形が抑えられていることが確認できる。水平変位に関しては特に大きな変化は見られない。鉛直荷重を受けたときの、変形の様子を図-4に示す。

### 5. 水平荷重による主桁の変形

#### 5.1 風荷重

風荷重に関しては、道路橋示方書において橋軸直角水平方向に吹く風による抗力を基本として、これに風速変動の効果を考慮した風荷重が定められている。ここでは、風荷重を橋軸に直角な水平荷重として式(1)、(2)により算出している。

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot U_d^2 \cdot C_d \cdot G \quad (1)$$

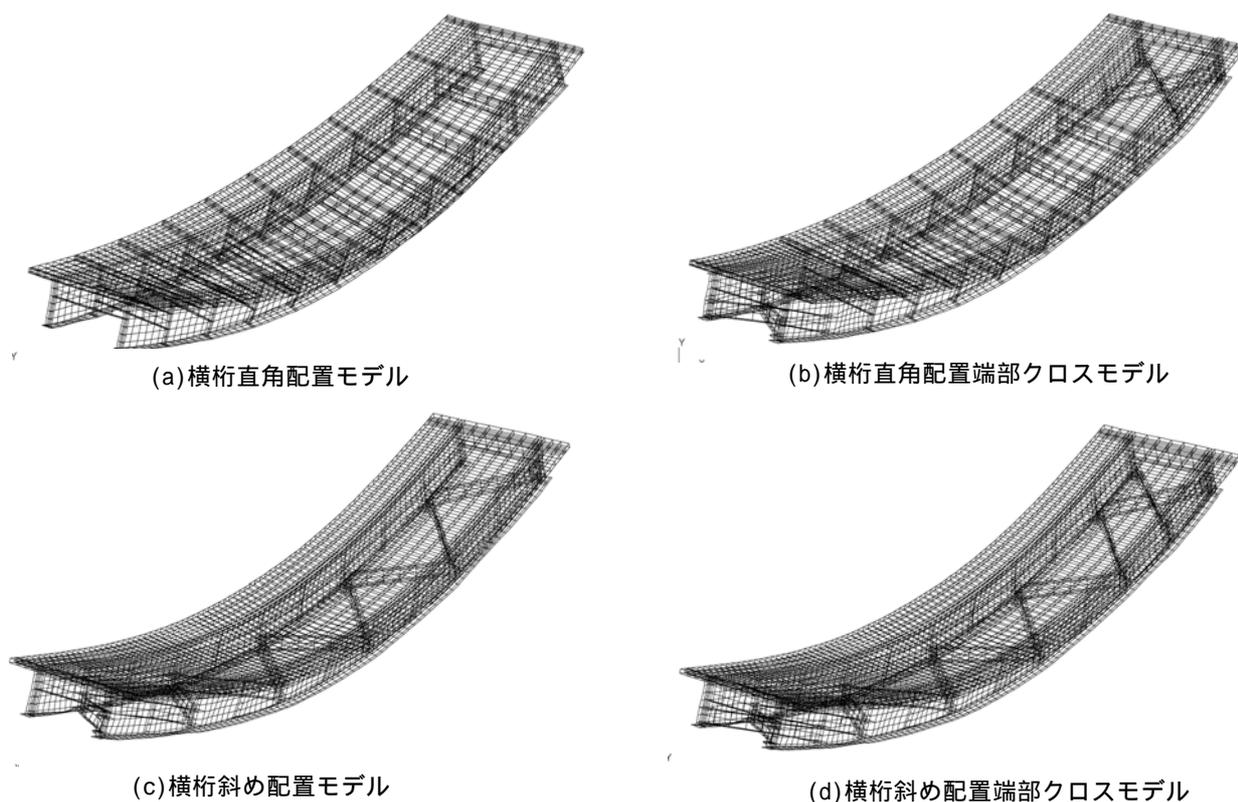


図 - 4 鉛直荷重による変形

$$P = p \cdot A_n \quad (2)$$

ここに、

$p$  : 単位面積あたりの風荷重 (kgf/m<sup>2</sup>)

: 空気密度 (0.125kgf・s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

$U_d$  : 設計基準風速 (m/s)

$C_d$  : 抗力係数

$G$  : ガスト応答係数

$P$  : 橋軸方向単位長さあたりの風荷重 (kgf/m)

$A_n$  : 橋軸方向単位長さあたりの有効鉛直投影面積 (m<sup>2</sup>/m)

本研究では、静的解析を行うので設計基準風速を40m/sとし、抗力係数はプレートガーダー橋で定められる値、ガスト応答係数は海上の風を想定した値を用いた。算出された風荷重を内桁の中央に5m間隔で集中荷重として橋軸直角方向に作用させた。

支間中央断面の変位の様子を図-5に、解析結果を表-5に示す。直角配置横桁モデルと斜め配置横桁モデルを比較すると、水平変位が減少しているだけでなく、斜め配置モデルでは鉛直変位がほとんど見られなくなっている。直角配置モデルでは、水平方向から荷重を受けてもねじりを伴いながら変位が生じていたが、斜め配置にすることで、ねじり剛性が向上したと言える。

これは、斜めに配置された横桁が水平方向からの荷重に対しては、トラス構造として機能し水平変位を減少させ、また、鉛直方向に対しても効果的に機能していると言える。

また、クロス横桁の有無で変位を比較すると、端部の横桁をクロスにすることで、支間中央の水平変位が減少している。この効果は、直角配置横桁モデルで特に効果的で、端部で斜めになっている横桁が水平方向からの荷重に対し、トラス構造として機能したため、端部において変位を抑えた結果、全体として変位が減少したと考えられる。斜め配置モデルでも、若干ではあるが変位が減少していることが確認できる。

## 5.2 地震荷重

地震の設計水平震度を  $k_h=0.25$  とする。死荷重強度及び地震荷重を表-6に示す。地震荷重は自重の慣性力が水平方向に働くと考えるので、載荷する節点に風荷重のように、分散させて5メートル毎に集中荷重として与える。床版の自重は内桁と外桁に接する節点に、鋼桁の自重は上フランジと下フランジの中央に与え解析を行った。

解析結果を表-5に示す。地震荷重を載荷させた場合も風荷重の時と同様な傾向が現れた。やはり、斜め配置横桁にすることで水平変位を抑えるだけでなく、鉛直変位に関しても大幅に減少することが出来る。つまり、ねじれ変形を抑制する効果が大きいことが確認できる。また、端部をクロス横桁とすることで水平変位を更に抑えることができる。この効果は、直角配置横桁で特に大きいものとなっている。

図-6に地震荷重を受けたときの、変形の様子を示す。

表 - 5 水平荷重による変位 [mm]

	横桁直角配置				横桁斜め配置			
	クロス無し		クロス有り		クロス無し		クロス有り	
	風荷重	地震荷重	風荷重	地震荷重	風荷重	地震荷重	風荷重	地震荷重
内桁上端鉛直変位 $y_a$	1.489	1.982	0.933	1.229	0.030	0.125	0.052	0.197
" 水平変位 $z_a$	3.412	7.283	1.905	4.363	1.437	3.836	1.168	3.053
外桁上端鉛直変位 $y_b$	2.853	3.577	1.810	2.119	0.518	0.110	0.559	0.519
" 水平変位 $z_b$	3.409	7.256	1.902	4.336	1.418	3.802	1.150	3.018
内桁下端鉛直変位 $y_c$	1.484	1.982	0.930	1.232	0.034	0.137	0.056	0.208
" 水平変位 $z_c$	5.772	10.13	3.508	6.182	2.158	3.790	1.920	3.376
外桁下端鉛直変位 $y_d$	2.853	3.582	1.810	2.125	0.526	0.121	0.567	0.529
" 水平変位 $z_d$	5.887	10.23	3.582	6.230	2.070	3.672	1.820	3.121

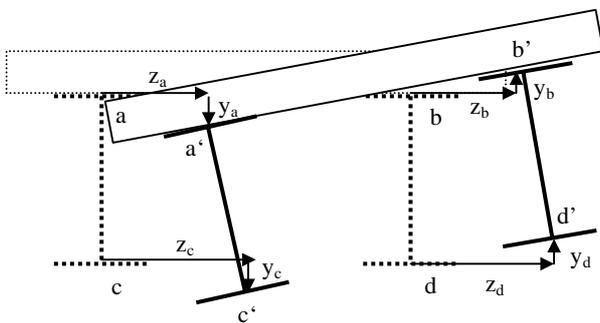


図 - 5 支間中央断面の変位

6. あとがき

本研究では、直角配置横桁、斜め配置横桁モデルの端部のみをクロス横桁にしたモデルを作成し、固有振動解析や鉛直荷重、風荷重、地震荷重を作用させ静的解析を行った。

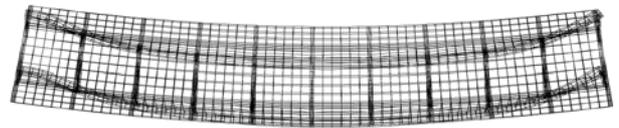
その結果、横桁斜め配置で端部をクロス横桁にしたモデルは、ねじり剛性を向上させる構造形式であり、鉛直荷重に対しては、端部をクロス横桁にすることで、ねじり変形を抑えられ、風荷重に対しても斜めに配置された横桁がトラス構造として機能し、水平変位を抑えることが出来る構造であることが確認できた。地震荷重に対しても、変位を抑えることが確認できた。

【参考文献】

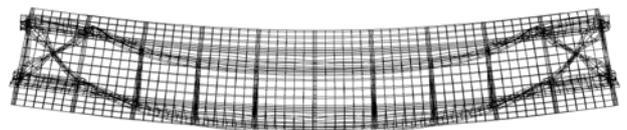
- 1) 平沢秀之, 林川俊郎, 佐藤浩一, 小山明久: 曲線2主桁橋の力学的特性に及ぼす横桁配置の影響, 鋼構造年次論文集, Vol.6, pp.349-355, 1998.
- 2) 村瀬孝典, 小沢一誠, 戸田利秋, 山田尚之, 王慶雲: 少数主桁橋の曲線橋への適用可能性に関する研究, 鋼構造年次論文集, Vol.7, pp.541-548, 1999.
- 3) 山田均, 上島秀作, 枝元勝哉, 台原直, 澤田繁樹, 篠原修二: 少数主桁橋梁の耐風性、橋梁と基礎 Vol.36, No.2, pp.37-42, 2002.

表 - 6 死荷重と地震荷重

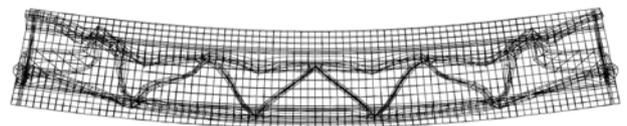
	死荷重		地震荷重	
	鋼部材	PC床版	鋼部材	PC床版
(a)	1258359N	374850N	314590N	937125N
(b)	1320014N	374850N	330004N	937125N
(c)	1359203N	374850N	339801N	937125N
(d)	1412223N	374850N	353056N	937125N



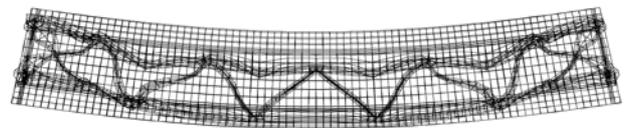
(a)横桁直角配置モデル



(b)横桁直角配置端部クロスモデル



(c)横桁斜め配置モデル



(d)横桁斜め配置端部クロスモデル

図 - 6 地震荷重による変形