

直線、曲線および斜角の合成 I 桁橋の立体解析

THREE DIMENSIONAL ANALYSIS OF STRAIGHT, CURVED OR SKEWED COMPOSITE I-GIRDER BRIDGES

尾下里治*・金子俊一**

By Satoji OSHITA and Shun-ichi KANEKO

The purpose of this paper is to describe the method of three dimensional analysis of girder bridges with arbitrary configuration, and to present the response of straight, curved or skewed composite I-girder bridges for design loads. The method is based on finite element scheme in which floor slab is idealized in bending plate elements, main girders are in beam elements and eccentric connections between floor slab and main girders are treated by that beam elements consider off-set beam elements. Applying this method to analyze straight, curved or skewed composite I-girder bridges, actual behaviours of those are investigated. Resulting deformations and stresses are compared with that obtained from the grillage analysis which has been used in the ordinary design procedures, while effects of lateral bracing on the response by primary loads are also discussed.

Keywords: curve, skew, composite girder

1. ま え が き

合成 I 桁橋は、鉄筋コンクリート床版（以下 RC 床版と略記する）と鋼桁とが一体となって外力に対して抵抗するという、合理的な設計思想に基づく構造物である。

しかし、車両の走行路となる RC 床版に非常にねじり剛度の小さな I 断面主桁が直接に偏心結合し、それを補剛するために横桁や対傾構、さらには、横構などが設けられた複雑な構造でもある。特に、曲線橋や斜橋においては、曲げとともにねじりやそり変形の影響を同時に受けるため、これら構成部材間の力学的相互作用は、さらに複雑なものとなり、次のような問題点が懸念される。

(1) RC 床版が主桁間で連続していることによって、主桁の変形、断面力に与える影響、および RC 床版に生じる付加曲げモーメント。

(2) 曲線橋における初期曲率、および横桁・横構からの結合力によって、主桁フランジに生じる付加的な垂直応力度（付加応力度）。

(3) 斜橋においては、主桁間のたわみ差により生じる主桁の回転変位、および主桁フランジの付加応力度。

(4) 活荷重によって生じる横構部材力。

(5) 下横構を受けることにより準閉断面が構成され、橋全断面のねじり剛度が高められるが、この横構の荷重分配効果の影響。

合成 I 桁橋を設計する場合は、一般的に、床版を各主桁の有効幅ごとに分割した格子桁として解析するので、上記のような点は考慮されず、わずかに曲線橋の場合のみ、(2)、(4)の問題を近似的な方法により計算しているにすぎない。

非合成の I 桁曲線橋については、著者が文献(1)、(2)において実用的な解析法を提案し、主桁フランジの付加応力度や横構部材力、さらに、横構の荷重分配効果について考察を加えている。

また、合成 I 桁橋のこのような問題に関する研究もいくつかある。まず、Heinsら^{3),4)}は、主桁の腹板をトラス構造に置き換え、その上下に床版と主桁下フランジの剛性をもつはり部材を取り付け、橋全体を立体骨組構造にモデル化して解析している。そして、直線橋に風荷重が作用した場合の主桁下フランジの水平曲げや横構の補剛効果を評価したり、曲線橋における下横構の荷重分配効果に対する推定式を提案している。しかし、床版をはり部材で置き換える点や、主桁をトラス構造にモデル化している点から、床版の連続性や主桁のそり変形などが

* 正会員 横河橋梁製作所大阪支店設計部
(〒592 堺市築港新町2丁)

** 正会員 工修 横河橋梁製作所大阪支店設計部(同上)

十分に考慮できないおそれがある。一方、大塚・吉村⁵⁾は、有限帯板法、フーリエ級数展開、有限要素法を、それぞれ、床版、主桁、横桁・横構に適用し、直線および曲線橋を解析して、主桁付加応力度や横構部材力について考察している。この中で、主桁要素のせん断中心を中立軸に一致させていると思われる点や、解法の汎用性の点で疑問が残る。

この研究において用いる解法⁶⁾の基本は有限要素法であるが、床版を板要素で、主桁を薄肉はり要素で、それぞれ表わし、両者の偏心量はオフセットビーム要素で処理するところに特徴がある。これにより、主桁の自由度がすべて床版断面の中央面に変換されるので、通常の立体解析に比較して未知数を大幅に低減でき、しかも、必要に応じて要素分割された床版の平面構造を解くことにより、主桁の偏心結合を考慮した立体的な挙動を把握できる。これが最大の利点である。オフセットビーム要素は、従来から航空機や造船の分野ではよく知られており、縦リブやフレームで補剛された外板の解析に用いられてきた。しかし、これを本格的な橋梁構造に適用し、その精度を検証した研究はほとんどない。わずかに Gustafson と Wright⁷⁾の斜橋の研究があるが、主桁のそり変形や横構の影響が無視されている。

本文では、解析法の概要をまず述べ、特に、オフセットビーム要素については、中立軸とせん断中心とが一致しない場合の変換式を示している。そして、床版と主桁とからなる構造で最も簡明な π 断面曲線桁を例にとり、曲げねじり理論による値と比較する。次に、合成 I 桁の直線、曲線、斜橋を解析し、格子解析の結果と比較することにより、前述の (1)~(5) の問題点について考察を加える。そして、特に設計上の問題となると思われる床版や横構の荷重分配効果と、横構部材力については、若干の提案を行っている。

2. 解析法

(1) 床版を表わす四辺形板要素

床版は面内力と曲げとを受ける等方性の四辺形板要素で表わす。この四辺形板要素は応力仮定のハイブリッド法に基づいて吉田ら⁸⁾により誘導されたもので、1 節点 3 自由度 (u, v, θ_z) の平面応力三角形要素と、1 節点 3 自由度 (w, θ_x, θ_y) の平板曲げ三角形要素とを合成したものである。

特に、平面応力要素においては、通常の場合は含まれていない面内の回転変位 (θ_z) が与えられている。これにより、1 節点 6 自由度 ($u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) となり、立体骨組解析における節点力 ($P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$) と完全に対応するので、本研究の対象とするような構造物の解析には非常に効果的である。

(2) 鋼桁と横構の取扱い方

主桁や横桁はそりを考慮した 1 節点 7 自由度 ($u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z, \rho$) の薄肉直線はり要素^{6),9)}に置き換える。曲線橋を取り扱う場合には多角形で近似させた折線橋として解析するが、その際の精度については文献 1), 10) 等で示されており、問題はないと思われる。

横構については、次節で述べるオフセットビーム要素によって床版からの偏心量が考慮されるので、通常のトラス部材の剛性マトリックスを用いるとよい。

(3) オフセットビーム要素

オフセットビーム要素¹¹⁾とは、はり要素の中立軸に関する剛性マトリックスを、Fig. 1 に示すような偏心した点でのものに変換するマトリックスである。

いま、Fig. 1 のような立体薄肉はり要素が、節点 P, Q の床版中央面において偏心して結合している場合を考える。中立軸とせん断中心とが一致しない場合、 x 方向変位 (u_0) と y, z 軸まわりの回転変位 (θ_{y0}, θ_{z0}) は、中立軸に対して定義され、 y, z 方向変位 (v_0, w_0) と x 軸まわりの回転変位 (θ_{x0}) は、せん断中心に対して定義される。これを xy, xz, yz 面内に分解して表わすと、Fig. 2 に示すようになる。

これより、はり要素 i 端の変位 $\{\delta_{0i}\}$ は、床版中央面の変位 $\{\delta_i\}$ を用いて次のように表わされる (添字 i は省略)。

(xy 面内)

$$u_0 = u + D_y \theta_z \dots\dots\dots (1)$$

$$v_0 = v \dots\dots\dots (2)$$

(xz 面内)

$$u_0 = u - D_z \theta_y \dots\dots\dots (3)$$

$$w_0 = w \dots\dots\dots (4)$$

(yz 面内)

$$v_0 = v + (D_z - D_{zs}) \theta_x \dots\dots\dots (5)$$

$$w_0 = w - (D_y - D_{ys}) \theta_x \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 D_y, D_z : 床版中央面と中立軸との偏心量

D_{ys}, D_{zs} : 中立軸とせん断中心との偏心量

である。また、

$$\theta_{z0} = -dw_0/dx \dots\dots\dots (7)$$

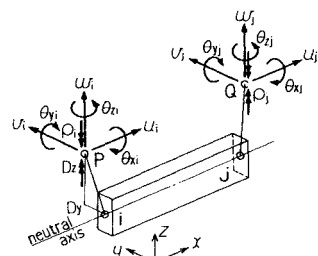


Fig. 1 Offset Beam Element.

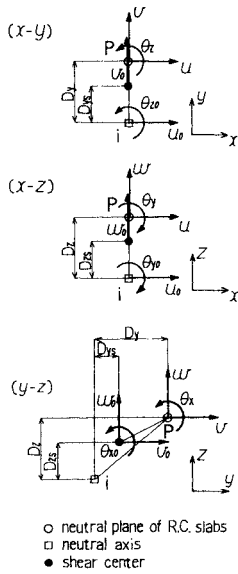


Fig. 2 Displacement Vector and Eccentric Distance.

$$\theta_{y0} = dv_0/dx \dots\dots\dots (8)$$

$$\rho_0 = -d\theta_{x0}/dx \dots\dots\dots (9)$$

の関係を用いると、式(6)と式(7)より、

$$\begin{aligned} \theta_{z0} &= -dw/dx + (D_y - D_{ys})d\theta_x/dx \\ &= \theta_x - (D_y - D_{ys})\rho \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

式(5)と式(8)より、

$$\begin{aligned} \theta_{y0} &= dv/dx + (D_z - D_{zs})d\theta_x/dx \\ &= \theta_x - (D_z - D_{zs})\rho \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

の変換式がそれぞれ得られる。さらに、x軸まわりの回転変位については、

$$\theta_{x0} = \theta_x \dots\dots\dots (12)$$

となるので¹²⁾、式(9)から次の式が得られる。

$$\rho_0 = \rho \dots\dots\dots (13)$$

以上の*i*端における変換式をまとめてマトリックス表示すると、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} u_{0i} \\ v_{0i} \\ w_{0i} \\ \theta_{x0i} \\ \theta_{y0i} \\ \theta_{z0i} \\ \rho_{0i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -D_z \\ 0 & 1 & 0 & (D_z - D_{zs}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(D_y - D_{ys}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \\ \theta_{zi} \\ \rho_i \end{Bmatrix}$$

または、

$$\{\delta_{0i}\} = [H_p] \{\delta_i\} \dots\dots\dots (14)$$

同様に、節点*j*と*Q*点における変位の関係は、

$$\{\delta_{0j}\} = [H_q] \{\delta_j\} \dots\dots\dots (15)$$

となり、式(14)と式(15)とをまとめて表わすと、式(16)のようになる。

$$\{\delta_{0i}\} = \begin{bmatrix} H_p & 0 \\ 0 & H_q \end{bmatrix} \{\delta_i\} \dots\dots\dots (16)$$

したがって、はり要素の剛性マトリックス $[K_0]$ と、節点*P*および*Q*における変位に関する剛性マトリックス $[K]$ との関係は、

$$[K] = \begin{bmatrix} H_p^T & 0 \\ 0 & H_q^T \end{bmatrix} [K_0] \begin{bmatrix} H_p & 0 \\ 0 & H_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

と表わされる。なお、西野・長谷川は、文献12)において、同様の変換式を誘導しているが、式(14)はこれと一致している。

オフセットビーム要素を用いることにより、未知数を半減させることができるが、反面、はり要素の部材力が次のようになる。

a) 軸方向力とせん断力は同一要素内で一定になり、断面力図が階段状になる。

b) 曲げモーメント、ねじりモーメント、曲げねじりモーメントは、隣接する要素間で違い、断面力図が“のこぎり歯”状になる。

したがって、オフセットビーム要素を使用する場合は、ある程度要素分割を細かくする必要があり、求められた部材力も要素の中央値のみが正しい値となる。

3. π断面曲線桁の計算例

著者の提案する解析法の精度を確認するために、π断面曲線桁を計算例として取り上げる。計算モデルは、Fig. 3の横断面形状を有する支間長8.0 m、曲率半径20.0 mの単純桁で、Fig. 4に示すように床版の要素分割を行った。荷重は、鉛直等分布荷重(39.2 kN/m)を想定し、両主桁直上の床版節点に7.85 kNの集中荷重を載荷した。この解析法では、主桁をはり要素に置き換えるが、このときの断面性能をTable 1に示す。

計算結果は、曲線桁の曲げねじり理論によるものと比較する。しかし、横桁等で補剛されていない開断面曲線桁に荷重を加えると、主桁が大きく回転して断面変形を起こし、単純には比較ができない。計算結果でも、横断面を補剛せずに計算するとFig. 5のように大きな断面変形を起こし、断面形状保持に基づく曲げねじり理論とは一致しない。そこで、計算モデルの横断分割線上に横ばりを入れて断面変形を防ぐと、理論値との比較が可能になる。

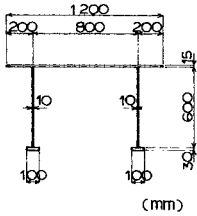


Fig. 3 Cross Section of Example Problem.

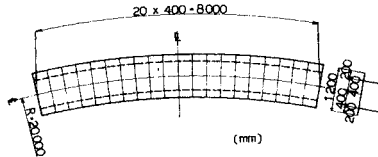


Fig. 4 Plan and Element Subdivision.

Table 1 Property of Beam Element.

Beam Section	Property	
	A (cm ²)	90
	I _y (cm ⁴)	36 000
	I _z (cm ⁴)	250
	J (cm ⁴)	110
	C _w (cm ⁶)	6 188
	D _z (cm)	40
	D _{zs} (cm)	21.5
Cross Beam	I _y (cm ⁴)	100

Fig. 5 と Fig. 6 に支間中央断面の変形と垂直応力度分布を示す。いずれも、横ばりて補剛したものは曲げねじり理論によるものとよく合う。合成 I 桁橋は、床版と主桁とからなる π 断面桁と同じ構造であり、 π 断面曲線桁において、ねじり変形や二次的な応力状態の精度が確認されれば本解析法は基本的に適用可能であると思われる。

Fig. 7 には、主桁下フランジの橋軸方向の垂直応力度

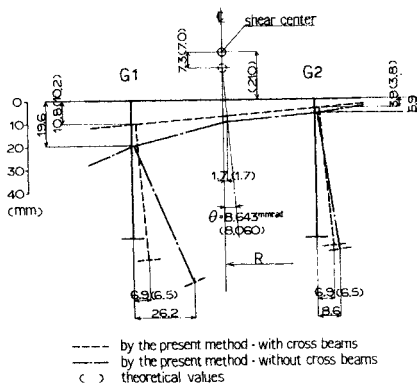


Fig. 5 Deformation of Cross Section at Midspan.

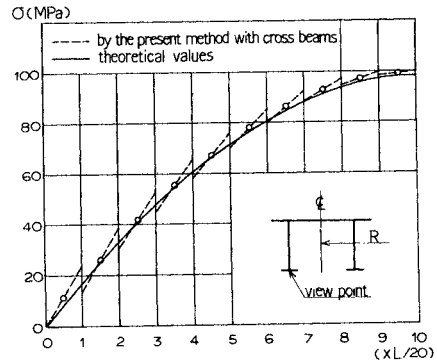


Fig. 7 Normal Stress of Lower Flange (G1).

分布を示す。前章でも述べたとおり、オフセットビーム要素の特徴としてとなり合う要素間ではりの断面力が不連続になり、要素の中央値のみが正しい値を与えることになる。したがって、Fig. 7 においてもこの解析法では“のこぎり歯”状の応力度を示すが、要素の中央値は、理論値とほぼ一致している。

4. 合成 I 桁橋の立体解析

(1) 解析モデルと仮定

この解析法を用いて単純支持の合成 I 桁橋を解析する。解析に用いるモデルは、Fig. 8 に示すような 3 主桁の直線、曲線および斜橋で、それぞれ、横構がある場合とない場合を取り扱う。特に、曲線および斜橋については、通常、合成桁としての適用限界とされる形状を選んでいる。部材諸元は、各モデルとも共通で、Table 2 に示す値を用いる。なお、横構を有する場合は、主桁腹板の下端から 25 cm 上方に取り付くものとする。床版は Fig. 9 に示すように厚さ 21 cm とし、ハンチ高さ 8 cm を考慮しており、要素分割については Fig. 16 を参照されたい。荷重は、道路橋示方書に規定されている L-20 荷重を Fig. 9 に示すように偏心配荷する。

また、解析にあたっては、以下のような仮定を設けている。

a) ずれ止めの弾性変形¹³⁾を無視した完全合成桁として扱う。

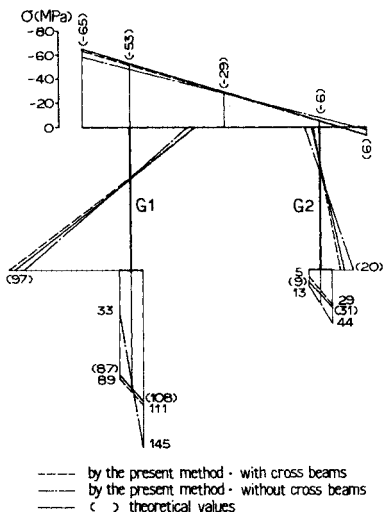


Fig. 6 Normal Stress of Cross Section at Midspan.

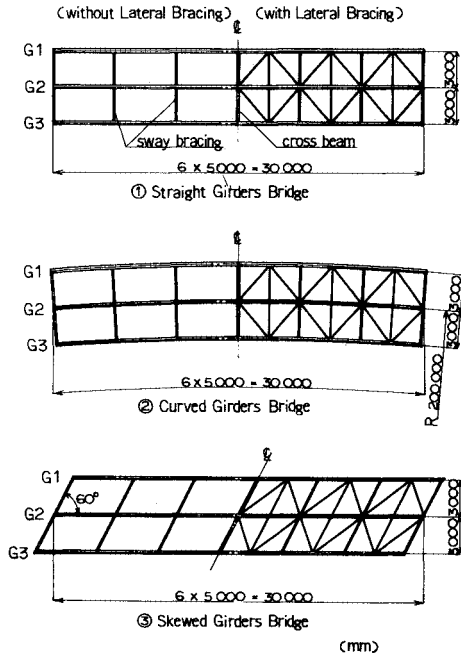


Fig. 8 Plan of Composite Girder Bridge Models.

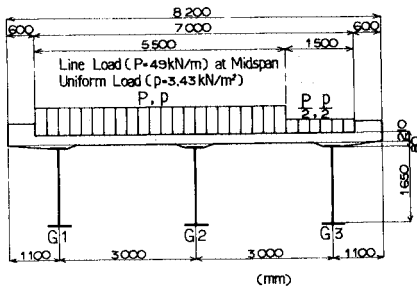


Fig. 9 Cross Section and Loading Condition.

Table 2 Dimensions and Properties.

Beam Section	Main Beam	Cross Beam	
	bu (cm)	33.0	20.0
	tu (cm)	1.6	1.0
	h (cm)	165.0	143.0
	tw (cm)	0.9	1.0
	bl (cm)	51.0	20.0
	tl (cm)	2.8	1.0
	A (cm ²)	344.1	183.0
	ly (cm ²)	1.541 × 10 ⁶	4.510 × 10 ⁵
	lz (cm ²)	3.574 × 10 ⁶	1.300 × 10 ⁶
	J (cm ⁴)	4.500 × 10 ⁸	
	Cw (cm ⁶)	1.160 × 10 ⁹	
	Dz (cm)	123.04	90.0
	Dzs (cm)	39.44	0
		Sway Bracing	Lateral Bracing
	A (cm ²)	45.5	34.8
	ly (cm ²)	8.100 × 10 ⁵	
	Dz (cm)	97.5	138.5

b) RC 床版は等方性板と考え、鋼と鉄筋コンクリートのヤング係数比は7とする。

c) 合成後の断面を想定し、荷重は活荷重のみとする。

d) 活荷重は L 荷重を主桁直上に載荷し、T 荷重に

○ by the theory of Grillage Girder Bridge
 - - - by the present method - without L.B.
 — by the present method - with L.B.

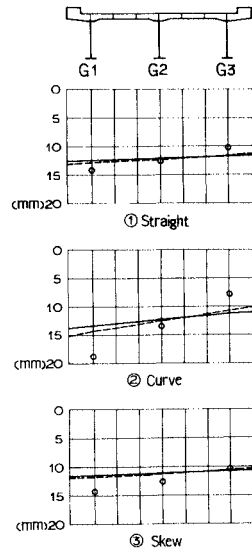


Fig. 10 Deflections of Cross Section at Midspan.

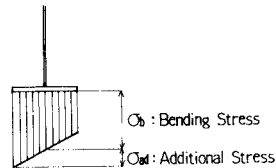


Fig. 11 Normal Stress of Main Girder Flange.

Table 3 Deflections of Main Girders at Midspan.

	deflection (mm)	ratio			
		B/A	C/A		
① Straight	G1	14.21	12.95	0.91	0.88
	G2	12.52	12.33	0.98	0.97
	G3	10.23	11.54	1.13	1.15
② Curve	G1	18.82	14.41	0.77	0.71
	G2	13.46	12.62	0.94	0.91
	G3	7.82	10.70	1.37	1.44
③ Skew	G1	14.16	11.73	0.83	0.80
	G2	12.62	11.23	0.89	0.87
	G3	10.18	10.41	1.02	1.04

A: by the theory of Grillage Girder Bridge
 B: by the present method - without L.B.
 C: by the present method - with L.B.

よる床版の床作用は検討対象外とする。

e) 上横構は、合成後断面における影響が小さいと判断し、曲線橋においても考慮しない。

なお、この解析法による計算結果は、通常的设计計算で用いられる格子解析の結果と比較している。格子解析においては、主桁のねじり剛度を無視しており、また、床版は全幅有効と考えている。

(2) 解析結果

本計算例の範囲内での結果について考察を加える。

a) 床版や横構による荷重分配効果 (Fig. 10, 11, 12, Table 3, 4)

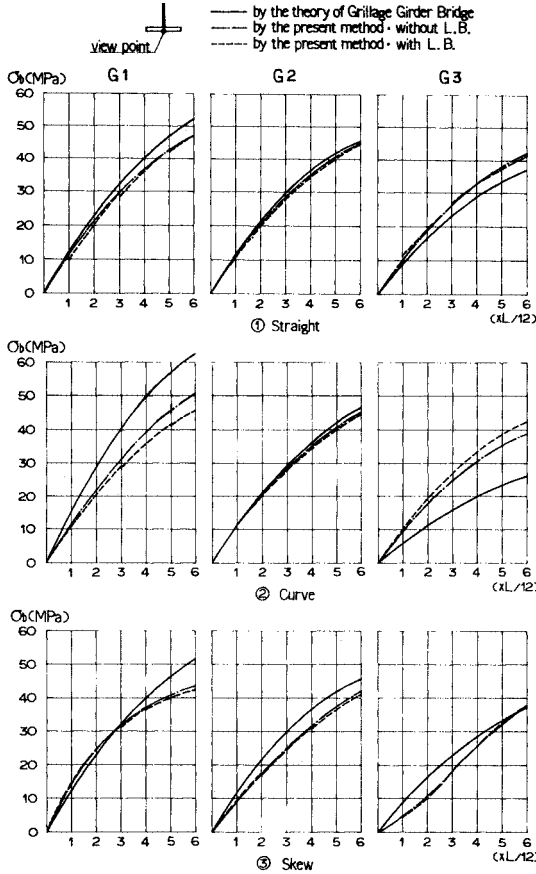


Fig. 12 Bending Stresses σ_b of Main Girders.

床版の連続性を考慮することにより、ねじり荷重に対する分配効果はかなり高まる。また、横構が設けられることにより準閉断面が形成され、分配効果がさらに促進される。その結果、床版や主桁の変位、垂直応力度は、橋断面内の左右で均等化され、格子解析の値は、直線橋や斜橋では安全側となる。しかし、曲線橋の曲線内桁は、危険側に設計されることになる。

b) 主桁フランジの付加応力度 (Fig. 13)

付加応力度は横桁や横構からの結合力などによって生じるが、その大きさは直線橋では無視し得る程度に小さい。曲線橋では、フランジの初期曲率による付加応力度がこの解法では算出できていない。これは、本解法では床版と主桁とを剛棒で連結したことになるので、いわば主桁の断面変形に相当するこうした応力度の算出には無理があることによる。よって、曲線橋の場合は、近似計算式¹⁴⁾による付加応力度を加算する必要がある。

斜橋においては、桁端部で主桁相互のたわ

Table 4 Bending Stresses σ_b of Main Girders at Midspan.

		bending stress (MPa)			ratio	
		A	B	C	B/A	C/A
① Straight	G1	51.8	46.9	45.0	0.91	0.87
	G2	45.6	44.4	43.8	0.97	0.96
	G3	37.5	41.6	42.0	1.11	1.12
② Curve	G1	62.5	49.9	46.4	0.80	0.74
	G2	46.7	44.4	43.9	0.95	0.94
	G3	26.3	38.4	40.6	1.46	1.54
③ Skew	G1	51.7	43.1	42.1	0.83	0.81
	G2	45.9	41.3	40.5	0.90	0.88
	G3	37.3	37.2	37.4	1.00	1.00

み差が大きくなり、主桁がねじられる。図中においても、これによる付加応力度 ($\sigma_{ad}/\sigma_b=0.10\sim0.13$) が確認できる。

c) 横構部材力 (Fig. 14, 15)

Fig. 15 は、Fig. 14 の格点間ごとの横構軸力をプロットし、橋軸方向の分布状態を示したものである。

横構部材力は橋断面のねじりモーメントに対しても生じるので、桁端部へ近づくにつれて値が大きくなる。

また、本計算例のように横構を組んだ場合、下横構が主桁と共同作用を起こし、支間中央に近づくにつれて引張側の部材力が増加する。

活荷重による部材力は、通常の設計で用いられる横荷重 (風、地震) による部材力よりも大きくなる場合があり、注意を要する。

d) 床版の応力度 (Fig. 16, Table 5)

床版に発生する垂直応力度については、設計上、特に問題となるような二次応力度は認められない。ただし、斜橋の桁端部において橋軸直角方向の局所的な曲げ応力度が発生する。しかし、斜橋の桁端部の床版には、補強鉄筋が十分に配置されていることや、実際には主桁のフランジと腹板取り付け点で局所的な断面変形を起こし床

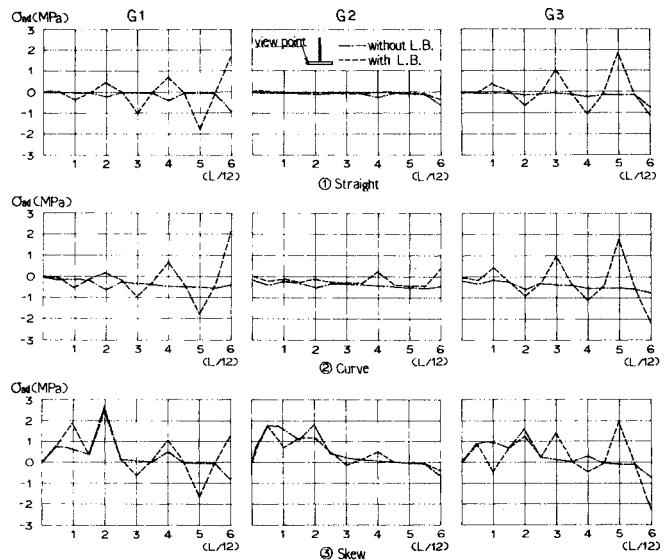


Fig. 13 Additional Stresses σ_{ad} of Main Girders.

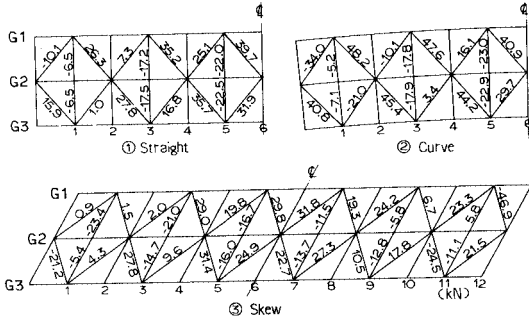


Fig. 14 Member Forces of Lateral Bracings.

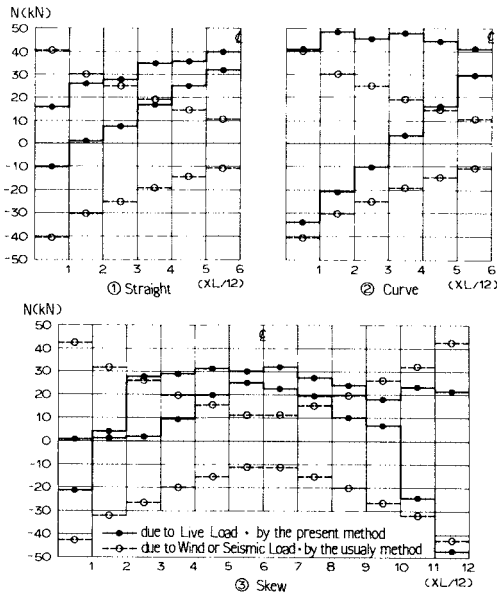


Fig. 15 Distribution of Member Forces.

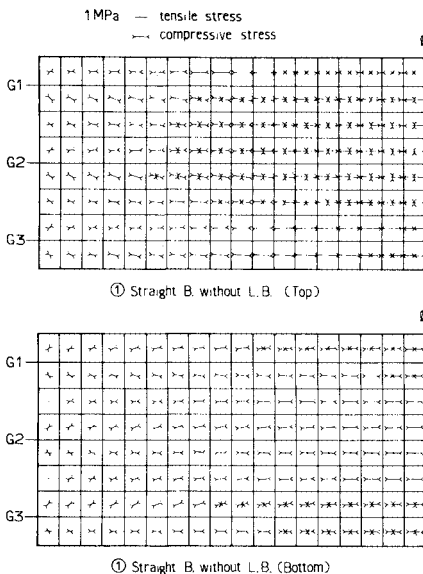


Fig. 16 Principal Stresses of R.C. Slab.

Table 5 Normal Stresses of R.C. Slab at Midspan.

		1 2 3 4 5 6 7 8								
		G1		G2		G3				
Element Number		1	2	3	4	5	6	7	8	
① Straight	Top	A	-2.40	-2.40	—	-1.90	-1.90	—	-1.74	-1.74
		B	-2.12	-2.05	-1.97	-1.96	-1.95	-1.85	-1.84	-1.81
		C	-1.98	-2.02	-1.96	-1.96	-1.96	-1.89	-1.90	-1.80
	Bottom	A	-1.35	-1.35	—	-1.01	-1.01	—	-0.98	-0.98
		B	-1.16	-1.10	-1.02	-1.03	-1.00	-0.96	-1.01	-1.00
		C	-1.11	-1.10	-1.02	-1.05	-1.03	-0.98	-1.05	-1.02
② Curve	Top	A	-2.89	-2.89	—	-1.95	-1.95	—	-1.22	-1.22
		B	-2.27	-2.17	-2.04	-2.01	-1.92	-1.78	-1.75	-1.64
		C	-2.04	-2.07	-1.98	-1.99	-1.95	-1.86	-1.85	-1.73
	Bottom	A	-1.63	-1.63	—	-1.03	-1.03	—	-0.69	-0.69
		B	-1.25	-1.18	-1.06	-1.04	-0.99	-0.92	-0.94	-0.90
		C	-1.15	-1.14	-1.04	-1.05	-1.03	-0.97	-1.01	-0.98
③ Skew	Top	A	-2.39	-2.39	—	-1.92	-1.92	—	-1.73	-1.73
		B	-1.91	-1.89	-1.83	-1.88	-1.85	-1.74	-1.72	-1.65
		C	-1.80	-1.86	-1.80	-1.85	-1.84	-1.75	-1.74	-1.74
	Bottom	A	-1.54	-1.54	—	-1.01	-1.01	—	-0.97	-0.97
		B	-1.04	-1.00	-0.93	-0.95	-0.92	-0.89	-0.93	-0.92
		C	-1.00	-1.00	-0.94	-0.96	-0.93	-0.90	-0.95	-0.92

版の曲げ応力度が低下することを考慮すると、設計上の配慮は特に必要ないと思われる。

(3) 設計上の要点

以上の数少ないデータではあるが、設計上の要点を問題提起の1つとしてまとめると次のようである。

a) 曲線橋の曲線内桁を設計する場合は、荷重分配効果の促進に伴う曲げモーメントの増加率を考慮するなどして、余裕のある設計をすべきである。

b) 活荷重による横構部材力は、通常的设计で行われる横荷重による部材力よりも大きくなる場合があるので、合理的な近似計算式による照査が望まれる。

これらの問題点については、5., 6. に若干の参考資料と提案式を示している。

また、曲線橋や斜橋における合成 I 桁橋の適用限界は、曲線橋で中心角 $5^{\circ 15'}$ 、斜橋で斜角 60° 程度とされている。

本計算例の結果からすると、斜角 60° は限界に近い値であるが、曲線橋の中心角についてはもう少し拡張できる余地がある。

5. 曲線橋における荷重分配効果

曲線橋における床版や横構の荷重分配効果を把握するために、若干の数値計算を行った。計算モデルは、前章のものと同じ断面形状を有する 3 主桁橋で、床版厚は 23 cm、各部材の断面諸元は建設省の標準設計を参考に定めた。詳細は、紙面の都合で省略する。荷重は、L-20 荷重を着目する主桁に最大の断面力が生じるように載荷した。

横軸にパラメータ L^2/RB をとり、支間中央のたわみ y (Fig. 17) と主桁曲げ応力度 σ (Fig. 18) を格子解析

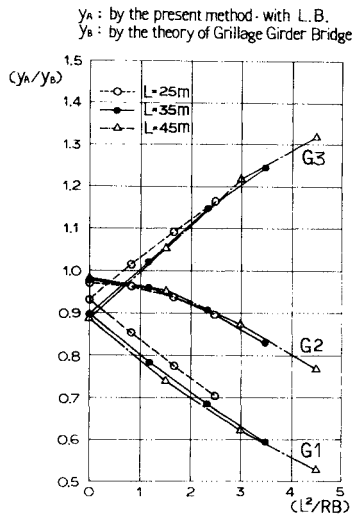


Fig. 17 Relations between Deflection (y_A/y_B) and (L^2/RB).

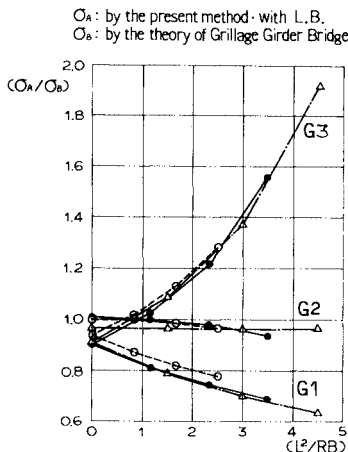


Fig. 18 Relations between Bending Stress (σ_A/σ_B) and (L^2/RB).

の結果と比較して、プロットした。ここで、 L, R, B は、それぞれ、支間長、曲率半径、主桁間隔である。これによると、支間長にはあまり左右されず、 L^2/RB の増加に伴って床版や横構の荷重分配効果の影響が大きくなるようである。

曲線橋の曲線内桁の設計においては、格子解析による主桁曲げモーメントの値に Fig. 18 における増加率を掛けて余裕をもたせるのがよいと思われる。

6. 横構部材力の近似解法

活荷重によって生じる横構部材力は一般には計算されず、曲線橋においてのみ近似計算式¹⁾を用いて算出されている。しかし、この方法も文献 1), 2), 5) など指摘されているように、実際の挙動を十分に把握できないようである。これまでの研究によると次のようなことがいえよう。

- a) 横構を等価板厚に換算して準箱桁として求めたねじりモーメントによるせん断力から算出すると、横構部材力は実際より 2 倍近く大きく算出される^{11,5)}。
- b) 横構部材力はフランジの固定点間の曲率には影響されない²⁾ことから、従来から行われているフランジの曲がりを考慮した部材力の算出は必要ないと思われる。
- c) 前章で明らかになったように、横構の組み方によっては、主桁との共同作用の影響を受け、部材力が生じる。

これらのことから、横構部材力の算出においては、橋体に働くねじりモーメントによるせん断力と、主桁との共同作用の影響を考慮すればよいと思われる。具体的な方法を次に示す。

(1) ねじりモーメントによる横構部材力

計算の便宜上、単純ねじりによるねじりモーメント T (純ねじりモーメント T_s + 二次ねじりモーメント T_w) を使用する。

横構に作用するせん断力 Q は 1/2 であると仮定する。

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{2h} \dots \dots \dots (18)$$

h : 床版中央面と下横構との距離

T : 横構の両端におけるねじりモーメントの平均値

Fig. 19 のような横構を考えた場合、横構部材力 N_2 は次のようになる。

$$N_2 = \pm Q / (2 \cdot \sin \theta) \dots \dots \dots (19)$$

(2) 主桁との共同作用

曲線橋では、Fig. 19 のようにストラットを設ける場合が多いが、これにより主桁との共同作用を受け横構部材力が生じる。Fig. 19 のようなモデルに主桁に生じた曲げ応力度による力 P が作用すると、各部材力は力のつり合い条件と弾性変形の条件から次のように求められ

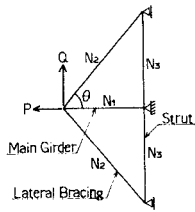


Fig. 19 Idealized Model of Lateral Bracings.

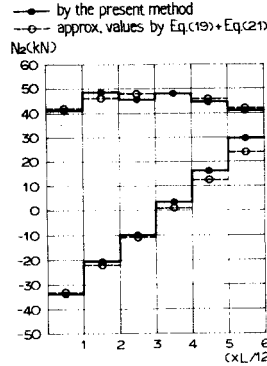


Fig. 20 Member Forces of Lateral Bracings by the Approximate Method.

る。

$$N_1 = -K_1(K_2 \sin^2 \theta + K_3) / \alpha \cdot P \dots\dots\dots (20)$$

$$N_2 = (-K_2 K_3 \cos \theta / \alpha) \cdot P \dots\dots\dots (21)$$

$$N_3 = (K_2 K_3 \sin \theta \cos \theta / \alpha) \cdot P \dots\dots\dots (22)$$

ここで、

$$\alpha = -(2 K_2 \cos^2 \theta + K_1)(K_2 \sin^2 \theta + K_3) + 2 K_2^2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta$$

$$K_i = A_i / l_i$$

l_i : 部材長

A_i : 断面積 ($A_1 = A_f + A_w / 4$)

A_f : 主桁フランジ断面積

A_w : 主桁腹板断面積

$$P = \sigma_1 A_1$$

σ_1 : 格子解析による横構取り付け位置での主桁の曲げ応力度 (格点間の平均値)

である。前章の曲線橋の場合を例にとり試算してみると、Fig. 20 のようになり、かなりよく一致しているようである。ここで Fig. 20 は、格点間ごとの横構部材力をプロットし、橋軸方向の分布状態を示したものである。

7. あとがき

合成 I 桁橋を設計する場合は、一般に、本文で述べたような問題点はあまり考慮されず、簡単に処理されてしまう場合が多い。しかし、合成 I 桁橋は、床版、主桁、横桁、横構などが相互に影響しあい、複雑な挙動を示し、特に曲線橋や斜橋においては多くの問題点を含んでいる。

こうした合成 I 桁橋の立体的な挙動を解析するにあたって、上述のオフセットビーム要素を用いた解析法は、すべての構成部材の相互作用を比較的容易に解析することができ、有効な手段であると思われる。また、新たに提案した横構部材力の近似解法も、これまでの近似解法の矛盾点を改善した実用的なものであり、本計算例にお

いては十分な精度を有することが確認された。

しかし、本文では、解析法とわずかな計算例を述べるにとどまり、多数の計算例による十分な設計上の検討がなされていない。今後は、より多くのデータを蓄積し、合成 I 桁橋の合理的な設計に役立つ資料をまとめたい。また、戦後のある時期、実橋の応力解析学的研究が盛んであったが、現在は下火のように思われる。

上記の解析結果をふまえて、模型実験や実橋の実測などを通じて、解析上の仮定が実際の構造物において適当であるかどうかを確認していく必要があると思う。

最後に、本研究をまとめるにあたり、懇切なご指導を賜った名古屋大学名誉教授 (現在、摂南大学工学部教授) の成岡昌夫先生、ならびに暖かい励ましをいただいた名古屋大学工学部教授の福本昉士先生に深く感謝します。また、(株)横河橋梁製作所の荒井利男部長をはじめ、設計部の方々には、終始、貴重なご助言とご支援をいただき、ここに厚く感謝します。

参考文献

- 1) 尾下里治：横構を有する並列 I 桁曲線橋の解析，土木学会論文報告集，第 324 号，pp.9~20，1982 年 8 月。
- 2) 尾下里治：並列 I 桁曲線橋の構造特性と解析方法，横河橋梁技報，No.12，pp.76~86，1982 年 11 月。
- 3) Heins, C. P. and Jin, J. O. : Live Load Distribution on Braced Curved I-Girders, ASCE, Vol.110, No. SE3, pp. 523~530, March, 1984.
- 4) Heins, C. P. and Kato, H. : Lateral Wind Bracing Requirements for Steel Composite Bridges, AISC Engineering Journal, Vol. 19, No. 3, 1982. (和訳，原田康夫：鋼合成桁橋に対する横構の必要性，JSSC, Vol. 20, No. 213, 1984 年 5 月)。
- 5) 大塚久哲・吉村虎蔵：並列 I 桁曲線および直線橋における主桁付加応力度と横構部材力について，土木学会論文報告集，第 290 号，pp.17~29，1979 年 10 月。
- 6) 尾下里治・金子俊一：床版と主桁との偏心結合をオフセットビーム要素により考慮した任意形桁橋の解析方法，横河橋梁技報，No.14，pp.13~18，1984 年 11 月。
- 7) Gustafson, W. C. and Wright, R. N. : Analysis of Skewed Composite Girder Bridges, ASCE, Vol. 94, No. ST4, pp. 919~941, April, 1968.
- 8) 吉田 裕・雨宮栄一郎・増田陳紀：立体構造解析のための薄板有限要素，土木学会論文報告集，第 211 号，pp.19~28，1973 年 3 月。
- 9) 渡辺 昇・稼農知徳・藤井裕司：曲げねじれ剛性をもった曲線桁橋の剛性マトリクス法による解析，土木学会論文報告集，第 218 号，pp.1~8，1973 年 10 月。
- 10) 鷹羽信勝・成岡昌夫：変形法による任意形状の薄肉断面格子桁の解析，土木学会論文報告集，第 178 号，pp.1~9，1970 年 6 月。
- 11) 川井忠彦・川島矩郎・三本木茂夫：薄板構造解析，コンピュータによる構造工学講座 II-7-A，培風館，pp.48~134，1973 年。

- 12) 西野文雄・長谷川彰夫：構造物の弾性解析，土木学会編，新体系土木工学，技報堂，pp. 319～327，1983年。
 - 13) 小松定夫・佐々木孝：不完全合成桁橋の理論と近似計算法について，土木学会論文報告集，第329号，pp. 27～37，1983年1月。
 - 14) 阪神高速道路公団：設計基準，第2部，構造物設計基準(橋梁編)，1985年4月。
 - 15) 鋼道路橋設計便覧：日本道路協会，丸善，p. 190，1979年。(1985. 9. 13・受付)
-