

# 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

## STUDIES ON ADDITIONAL STRESSES OF MAIN GIRDERS AND MEMBER FORCES OF LATERAL BRACINGS IN CURVED I- AND STRAIGHT I-GIRDER BRIDGES

大塚久哲\*・吉村虎蔵\*\*

By Hisanori OTSUKA and Torazo YOSHIMURA

### 1. ま え が き

曲線桁橋の解析法およびその力学的特性の解明に関する研究は数多いが、その設計に際し問題となる構成部材間の力学的相互作用はまだ十分に把握されていないようである。並列I桁曲線橋では荷重分配作用の促進と橋全体のねじり剛性を高めるために、十分な剛性を有する横桁（または対傾構）と横構が配置される。これらの部材と主桁とは不連続に結合されるから、結合点に集中して結合力が生じ、これによって主桁フランジには付加的な橋軸方向直応力度（以下、付加応力度と略称）が、横構部材には軸力が生じる。この付加応力度と横構部材力は荷重状態によっては直線桁橋においても生じるが、その性状は十分に解明されていないようである。曲線桁橋では、さらに主桁の初期曲率の影響および曲げとねじりの連成によってその性状は一層複雑なものとなることが予想される。これらの応力算定は、並列I桁曲線橋の設計に際し重要なものであり、現在文献1)～7)などにその応力度算定のための近似式が提案されている。しかしながら、これらの近似式は必ずしも構成部材間の力学的相互作用を明確に把握しているとはいえない場合もある。

著者らは、曲線桁橋を構成する扇形床版および曲線主桁、横桁、横構相互の偏心結合を考慮した曲線桁橋の一解析法をすでに発表した<sup>8)</sup>。その解析理論によれば、上記の主桁付加応力度、横構部材力を直接算定することができる。そこで、本報告ではまず、床版のない等断面3主桁からなる鋼直線および曲線橋を取り上げ、横桁(対傾構)・横構などの構成部材を適宜組み合わせた4種類の解析モデルに2種の荷重を作用させ、主桁の変位と曲げ

応力、結合力と横構部材力、主桁付加応力度などを本法によって直接算出した。これらの解析結果から、横桁・横構の偏心結合と主桁の初期曲率の影響を調べ、従来の近似式による値と比較検討した。次に、活荷重合成曲線3主桁橋を取り上げて解析し、さらに同一断面を有する直線桁橋を解析して、近似式の考え方を検討した。また、主桁の変位、曲げ応力度については、曲線格子桁理論による結果と比較して、格子桁理論の精度を検討し、最後に曲線2主桁模型橋の静的載荷実験結果<sup>10)</sup>と本法による値とを比較検討した。

### 2. 解法の概要

有限帯板法(FSM)、フーリエ級数展開、有限要素法(FEM)をそれぞれ扇形床版、曲線主桁、横桁・横構に適用して3者の剛性方程式を求める。扇形床版と主桁(または主桁のみ)からなる構造(以下基本構と略称)は、通常のFSMにより解析することができる。また、横桁・横構を有する構造の解析手法にはいくつかの方法が考えられるが、基本構の節線剛性方程式を各調和項数ごとに独立して計算できてFSMの利点が失われないように、ここでは、基本構の節点たわみ性行列と横桁・横構の剛性行列とを用いて、つり合い式と適合条件とから基本構に作用する結合力を求めたのち、外荷重と結合力を同時に基本構に働かせて構造を解く方法を採用する<sup>9)</sup>。この方法は中間隔壁をもつ曲線箱桁橋の断面変形を考慮した解析にも適用することができる<sup>9)</sup>。

### 3. 結合力、主桁付加応力度、横構部材力の算定

主桁と横構あるいは横桁との結合点において基本構に作用する橋軸直角方向および橋軸方向結合力をそれぞれ $\bar{P}_R, P_T$ とする(FIG. 1)。本法では、これらの結合力

\* 正会員 工博 九州大学助手 工学部土木工学教室

\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学教室

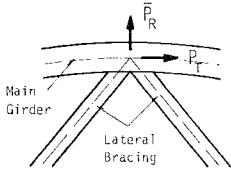


Fig. 1 Connecting Forces  $P_T, P_R$ .

を直接算定することができるが、従来の方法では、 $\bar{P}_R$  を格子桁理論により求めた曲げ応力  $\sigma_b$  の法線方向分力から、また、 $P_T$  を橋梁断面に作用する純ねじりモーメントによるせん断力からそれぞれ

求めている<sup>1)~7)</sup>。ここでまず、 $\bar{P}_R, P_T$  とそれらによって生じる主桁付加応力度、横構部材力についての従来の近似式と、その誘導法の考え方に従って新たに求めた近似式について記せば (1), (2) のようである。(3) では著者らの方法による解法を述べることにする。

(1) 結合力  $\bar{P}_R$ , 主桁付加応力度  $\sigma_{wb}$ , 横構部材力  $N_R$  算定の近似式

主桁フランジの初期曲率の影響によって、曲げによるフランジ垂直応力度  $\sigma_b$  は法線方向分力を持ち、これが主桁フランジ断面積  $A_f$  と主桁中立軸から着目フランジまでのウェブ断面積  $A_w$  の 1/3 にわたって分布していると考えれば<sup>1), 2)</sup>、開角  $d\phi$  区間の法線方向分力  $P_R$  は、 $-\sigma_b(A_f + A_w/3)d\phi$  で表わされる。 $r$  軸の向きを正とする (Fig. 2(a))。開角  $d\phi$  を主桁固定点 (主桁と横桁・横構の節点) 間の開角にとれば、 $P_R$  は式 (1) で求められ、基本構に作用する  $\bar{P}_R$  はその逆符号で与えられる (Fig. 2(b))。

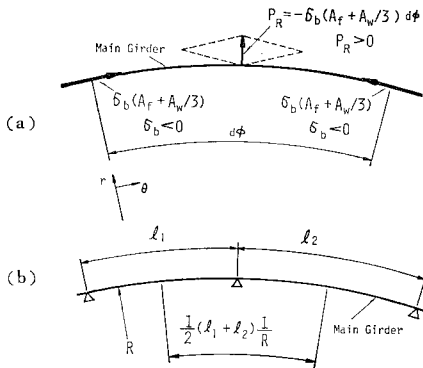


Fig. 2 Radial Component  $P_R$  due to  $\sigma_b$ .

$$P_R = -\frac{\sigma_b(A_f + A_w/3)}{R} \left(\frac{l_1 + l_2}{2}\right)^{1), 2)} \dots\dots (1)$$

$$\bar{P}_R = -P_R \dots\dots (2)$$

また、 $P_R$  によって主桁フランジには付加応力度  $\sigma_{wb}$ , 横構には軸力  $N_R$  が生じる。 $\sigma_{wb}$  の橋軸方向分布は、主桁と横桁・横構の節点を中間不動支承とする多スパン連続桁 (Fig. 2(b)) の曲率面内曲げ応力度分布に類似すると考えられるから、文献 1), 2) ではその算定式として式 (3) が提案されている (Fig. 3)。

$$\sigma_{wb} = \pm k \left[ \left( \frac{P_R}{l} \right)^2 \right]^{1), 2)} \frac{1}{W} \dots\dots (3)$$

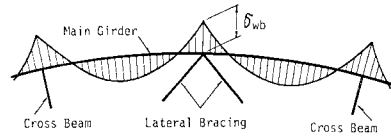


Fig. 3 Additional Stresses  $\sigma_{wb}$  of Main Girders.

ここに、 $k$  は連続桁の支点曲げモーメント係数、 $l$  はフランジ固定点間距離、 $W$  は垂直軸に関するフランジ断面係数である。

ストラットの無い横構の部材力  $N_R$  は、結合点の力のつり合いから式 (4) で求められる (Fig. 4)。

$$\left. \begin{aligned} N_{R1} &= P_R \frac{\sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \\ N_{R2} &= P_R \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

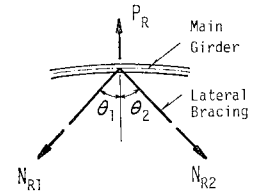


Fig. 4 Member Forces  $N_R$  of Lateral Bracing (without Strut).

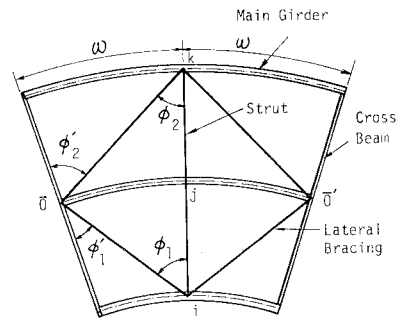


Fig. 5 Member Forces  $N_R, S$  of Lateral Bracing (with Strut).

ストラットのある構造では、Fig. 5 に示すモデルを考えて式 (5) により部材力を求めることができよう。

$$\left. \begin{aligned} N_{R1} &= -\frac{\Sigma P}{2 \cos \omega} \cdot \frac{\sin \phi_2'}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \\ N_{R2} &= -\frac{\sin \phi_1'}{\sin \phi_2'} N_{R1} \\ S_1 &= -P_i - 2 N_{R1} \cos \phi_1 \\ S_2 &= S_1 - P_j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\Sigma P = P_i + P_j + P_k$  である。

(2) 結合力  $P_T$ 、主桁付加応力度  $\sigma_s$ 、横構部材力  $N_T$  算定の近似式

曲線桁橋を 1 本の薄肉曲線桁と考えた場合に載荷荷重によって生じる純ねじりモーメント ( $T_A$ ) は、主桁・横構 (あるいは床版) によって構成される準閉断面の上下フランジにせん断力 ( $Q_A$ ) を生じさせる (Fig. 6)。このせん断力につり合う横構部材力  $N_T$  は、式 (6) によって算出される。

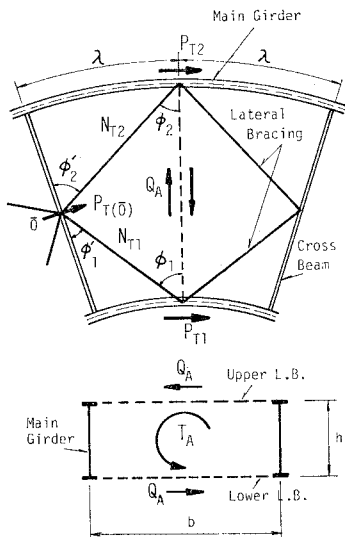


Fig. 6 Connecting Forces  $P_T$  in Tangential Direction and Member Forces  $N_T$  of Lateral Bracing.

$$\left. \begin{aligned} N_{T1} &= -\frac{Q_A \sin \phi_2}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \\ N_{T2} &= \frac{Q_A \sin \phi_1}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

横構部材力  $N_T$  の橋軸方向成分が結合点において結合力  $P_T$  として作用すると考えれば、 $P_T$  は式 (7) で算定される。

$$P_{T1} = 2 Q_A \frac{\sin \phi_1 \sin \phi_2}{\sin(\phi_1 + \phi_2)} = -P_{T2} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $Q_A = qb = T_A/2h$  ( $q$ : せん断流)  
式 (7) で  $\phi_1 = \phi_2$ 、固定点間距離を  $\lambda$  とすれば  $P_T = \pm 2q\lambda$  となり文献 4) の式と一致する。合成桁橋の場合は

床版を考慮した 2 室閉断面のせん断流より  $Q$  を求めればよい。点  $\bar{o}$  に働く  $P_{T(\bar{o})}$  は 4 個の横構部材力  $N_T$  の橋軸方向成分から式 (8) によって求められる (Fig. 7)。

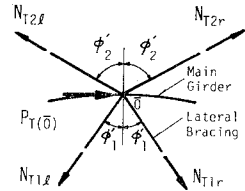


Fig. 7  $P_T$  at Point  $\bar{o}$ .

$$P_{T(\bar{o})} = (N_{1r} - N_{1l}) \sin \phi_1' + (N_{2r} - N_{2l}) \sin \phi_2' \dots\dots\dots (8)$$

$P_T$  作用点の主桁フランジには、局部的に橋軸方向直応力度 (主桁付加応力度)  $\sigma_s$  が生じ、その算定式として文献 3) には次式が提案されている。

$$\sigma_s = \frac{P_T/2}{A_f + \bar{A}_w/4} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\bar{A}_w$  はウェブ断面積である。

横構部材力  $N$  は  $N_R$  と  $N_T$  の和として求められる。

$$N = N_R + N_T \dots\dots\dots (10)$$

式 (3), (4), (9) は従来の近似式であり、式 (5)~(8) は検討のために新たに求められた式である。

(3)  $P_T$ ,  $\bar{P}_R$ ,  $\sigma_{wb}$ ,  $\sigma_s$ ,  $N$  の直接解析法

著者らの方法によれば、前述のように  $P_T$ ,  $\bar{P}_R$  は結合力として直接算定される。また、 $\sigma_{wb}$  は橋軸方向直応力度のフランジ断面内の分布から算定され、横構部材力  $N$  は横構との結合点における主桁の変位から算定される。主桁の応力はフーリエ級数展開によって求められるため、直接には  $\sigma_s$  を算定できないが、結合点近傍の  $\sigma_b$  を左右からプロットし、それを外挿することによって  $\sigma_s$  を求めることができる。

4. 非合成直線・曲線 3 主桁橋

ここでは、(1) 近似式では算定できない直線桁橋の、① 橋軸直角方向結合力  $\bar{P}_R$  とそれによる主桁付加応力度  $\sigma_{wb}$ 、横構部材力  $N_R$ 、② 曲げ荷重載荷時の橋軸方向結合力  $P_T$  とそれによる主桁付加応力度  $\sigma_s$  の発生機構とその大きさを把握する、(2) 非合成曲線桁橋の主桁付加応力度、横構部材力の大きさを把握し、かつ近似式を検討するとともに初期曲率の大きさの影響を調べるなどの目的で次に示す解析モデルと荷重ケースにより数値解析を行った。

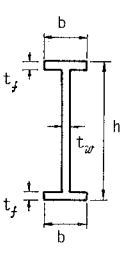
(1) 解析モデルと荷重

直橋および中心角  $\alpha = 0.2, 0.4$  ラジアン の曲線橋の主桁に横桁と横構とを組み合わせた 4 種類の Table 1 の解析モデルを解く。支間長は 20 m、主桁は 3 m 間隔、横桁は等間隔に 3 本配置され、等断面 3 主桁、その断面

Table 1 Types of Model.

Model	Structural Member
1	Main Girders
2	Main Girders+Cross Beams
3	Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (without Struts)
4	Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (with Struts)

Table 2 Particulars of Model.

Main Girder		h (cm)	170
		b (cm)	40
t <sub>f</sub> (cm)	2.5		
t <sub>w</sub> (cm)	0.9		
E <sub>L</sub> A <sub>L</sub> (kg)		7.3185 × 10 <sup>8</sup>	
E <sub>L</sub> I <sub>x</sub> (kg·cm <sup>2</sup> )		3.6536 × 10 <sup>12</sup>	
E <sub>L</sub> I <sub>y</sub> (kg·cm <sup>2</sup> )		5.6021 × 10 <sup>10</sup>	
E <sub>L</sub> C <sub>x</sub> (kg·cm <sup>3</sup> )		0	
E <sub>L</sub> C <sub>y</sub> (kg·cm <sup>3</sup> )		0	
E <sub>L</sub> C <sub>w</sub> (kg·cm <sup>3</sup> )		3.9279 × 10 <sup>16</sup>	
G <sub>L</sub> J <sub>L</sub> (kg·cm <sup>2</sup> )		3.6892 × 10 <sup>8</sup>	
E <sub>L</sub> I <sub>xx</sub> (kg·cm <sup>2</sup> )		0	
E <sub>L</sub> C <sub>xx</sub> (kg·cm <sup>3</sup> )		0	
Cross Beam	h (cm)	122.8	
	b (cm)	31	
t <sub>f</sub> (cm)	1.4		
t <sub>w</sub> (cm)	0.9		
EA (kg)		4.0908 × 10 <sup>8</sup>	
EI (kg·cm <sup>2</sup> )		9.4380 × 10 <sup>11</sup>	
GJ (kg·cm <sup>2</sup> )		6.9356 × 10 <sup>7</sup>	
Lateral Bracing	Upper L.B.	Lower L.B.	Strut
EA (kg)	6.2643 × 10 <sup>7</sup>	6.2643 × 10 <sup>7</sup>	3.0975 × 10 <sup>7</sup>

諸元と剛度は Table 2 に示すとおりである。表中 E<sub>L</sub> および G<sub>L</sub> は、それぞれヤング係数およびせん断弾性係数、A<sub>L</sub>, I<sub>x</sub>, I<sub>y</sub>, I<sub>xx</sub>, C<sub>x</sub>, C<sub>y</sub>, C<sub>w</sub> および J<sub>L</sub> はすべて断面定数で、それぞれ断面積、水平軸、鉛直軸に関する断面二次モーメント、x-z 軸に関する断面相乗モーメント、x 軸、z 軸まわりのそりに関する相乗モーメント、そりねじり定数および純ねじり定数である。Fig. 8 に示す 2 種の橋軸方向等分布荷重 p=1 t/m を載荷したときの主桁の変位および応力、結合力、横構部材力、主桁応力度を求め

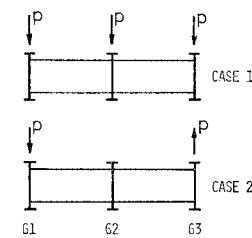
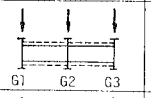
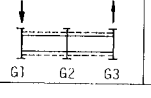


Fig. 8 Types of Loading.

Table 3 w, ψ and σ<sub>b</sub> of Main Girders at Midspan (Straight Girder).

LOADING CASE	MODEL	DEFLECTION(w)			TORSIONAL ANGLE (ψ)			TANGENTIAL STRESS (σ <sub>b</sub> )		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
	1	570	570	570	0	0	0	244	244	244
	2	570	570	570	0	0	0	244	244	244
	3	568	564	568	-3	0	3	243	241	243
	4	565	562	565	-2	0	2	242	241	242
	1	570	0	-570	0	0	0	244	0	-244
	2	569	0	-569	-190	-190	-190	244	0	-244
	3	304	0	-304	-103	-98	-103	123	0	-123
	4	304	0	-304	-103	-98	-103	123	0	-123
UNIT		10 <sup>-3</sup> cm			10 <sup>-5</sup> radian			kg/cm <sup>2</sup>		

ば、以下に示す諸結果が得られる。ただし主桁と横桁の図心軸は一致して結合され、上下横構の偏心距離は主桁の図心からとも 62.5 cm とする。

(2) 直線桁橋の解析

a) 変位と主桁曲げ応力

Table 3 は スパン 中央断面における各主桁のたわみ (w), ねじり角 (ψ), 下フランジの曲げ応力 (σ<sub>b</sub>) を示したものである。ここに w と ψ はそれぞれ鉛直下向きと主桁が外へねじれる向き (曲線桁の場合、G1 桁が曲率中心側の桁である) を正とする。モデル-2~4 の結果をモデル-1 の結果と比較して、主桁と横桁・横構間の協力作用について考察すれば次の諸点が指摘される。

3 主桁上に同時荷重 (以下曲げ荷重載荷とよぶ) の場合には、① 横桁のみを配置しても (モデル-2), モデル-1 と変位・応力に変化は生じない。② モデル-3, 4 では主桁に不等たわみが生じるが、その差は 1% にも満たない。

ねじり荷重載荷の場合には、① 横桁のみを配置したモデル-2 の変位・応力はモデル-1 とほぼ同じである。② モデル-3, 4 のたわみはモデル-1 に比べて 47% 減少しており、横桁と横構とで準閉断面を構成し、ねじり変形に抵抗することがわかる。いずれの荷重状態においてもストラットの有無はさほど大きな影響を及ぼさない。

b) 結合力と横構部材力

両荷重ケースにおけるモデル-3, 4 の上横構側の結合力と上横構部材力を Fig. 9 に示す。主桁と横桁の結合点における P<sub>R</sub> は、結合力を横構位置における法線方向力に換算して求められる。近似式では直線桁に生じる P<sub>R</sub> と曲げ荷重載荷時の P<sub>T</sub> を求めることはできないが、直線桁に横桁が配置されれば P<sub>R</sub> が生じ、曲げ荷重載荷時にも P<sub>T</sub> が生じることが Fig. 9(a) から知られる。

ねじり荷重載荷時の、近似式により算定された P<sub>T</sub> と N<sub>T</sub> を Fig. 9(b), モデル-4 中のかっこ内に示す。モデル-3, 4 ともに近似式の値は本法による値の約 2 倍であり、横桁・横構を有する構造に対し、これを一本の薄肉閉断面桁とみなす近似式の考え方は、少なくとも本例題のごときモデルにおいては P<sub>T</sub>, N<sub>T</sub> を過大に評価するといえよう。

c) 主桁付加応力度

主桁付加応力度 σ<sub>wb</sub> の橋軸方向分布を各モデルに対して求めれば Fig. 10, 11 を得る。曲げ荷重載荷時 (Fig. 10) には、中桁の σ<sub>wb</sub> は零で、G1 桁と G3 桁の σ<sub>wb</sub> は逆符号となるが、たとえばスパン中央断面 G3 桁では、σ<sub>b</sub> に対する比 σ<sub>wb</sub>/σ<sub>b</sub> がモデル-3 で 22%, モ

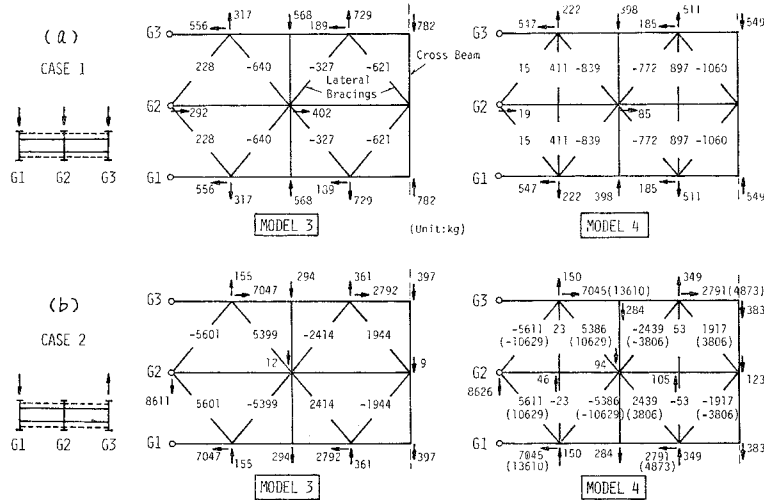


Fig. 9 Connecting Forces  $P_T$ ,  $\bar{P}_R$  and Member Forces  $N$  of Lateral Bracing (Straight Girder).

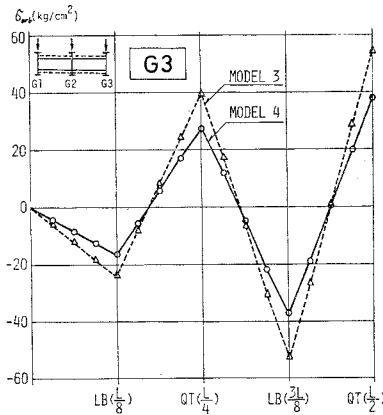


Fig. 10 Additional Stresses  $\sigma_{wb}$  of Main Girders (Loading Case 1).

モデル-4 で 16% 生じており、ストラットの有無により  $\sigma_{wb}$  の大きさは若干変化するが、いずれの場合にも  $\sigma_{wb}$  を無視することはできない。ねじり荷重載荷時 (Fig. 11) には、中桁にも  $\sigma_{wb}$  が生じ、G1 桁と G3 桁の値は等しく、たとえばスパン中央断面 G3 桁では、 $\sigma_{wb}/\sigma_b$  がモデル-2 で 7%，モデル-3，4 で 29% 生じている。結合力  $P_T$  によって生じる主桁付加応力度  $\sigma_s$  について

Table 4 Additional Stresses  $\sigma_s$  of Main Girders.

(Unit: kg/cm<sup>2</sup>)

Model	Loading	Analytical Method	Stress at Point of Upper Flange				
			1	2	3	4	5
4		(1)	-1.9	-0.7	0.4	-1.9	-0.7
		(2)	0	0	0	0	0
		(1)	-24.7	-9.8	0	24.7	9.8
		(2)	-49.6	-17.8	0	49.6	17.8

(1)=by the present method, (2)=approx. values by Eq.(9)

Point No.1,2,...are shown in Fig.12.

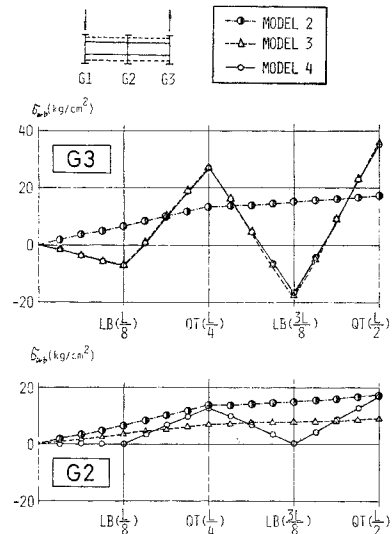


Fig. 11 Additional Stresses  $\sigma_{wb}$  of Main Girders (Loading Case 2).

て、本法による値と近似式とをモデル-4 に対して比較すれば Table 4 を得る。曲げ荷重載荷時にはねじりモーメントが零となるから、近似式では  $\sigma_s$  も零となる。本法によって求めた  $\sigma_s$  も小さく、曲げ応力  $\sigma_b$  に比較して無視できる程度である。ねじり荷重載荷時の  $\sigma_s$  は、 $\sigma_b$  と比較して無視できない大きさであり、近似式では  $P_T$  が過大評価され

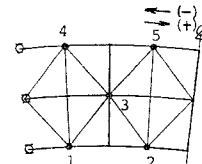
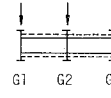


Fig. 12 Connecting Point No..

**Table 5**  $w, \psi$  and  $\sigma_b$  of Main Girders at Midspan (Curved Girder).

Loading Case	Opening Angle	Model	Deflection ( $w$ )			Torsional Angle ( $\psi$ )			Tangential Stress ( $\sigma_b$ )		
			G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
	$\alpha = 0.2$	1	5916	6961	8146	13750	15750	17960	231	245	260
		2	424	608	800	62	63	67	176	248	312
		4	481	584	695	34	36	39	212	243	274
		1	19120	26770	36650	24490	32290	41790	220	248	279
	$\alpha = 0.4$	2	343	732	1149	129	135	148	107	258	381
		4	439	653	880	71	74	80	184	250	307
Unit	radian	—	$10^{-3}$ cm			$10^{-5}$ radian			kg/cm <sup>2</sup>		

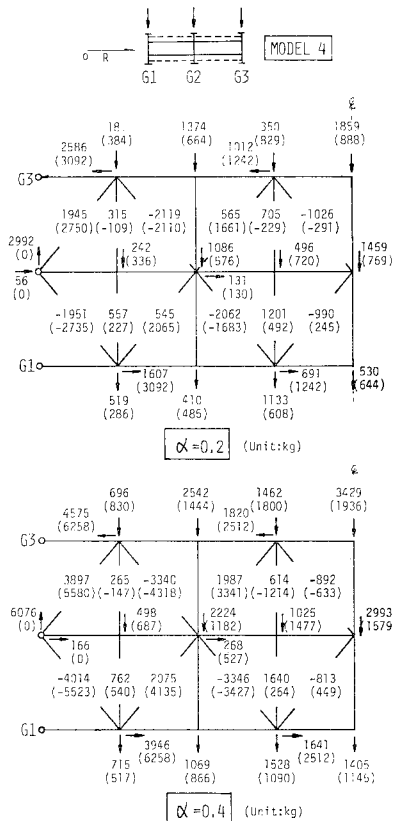
ること (b) 参照) に対応して近似式の値は本法の値の 2 倍程度である。

(3) 曲線桁橋の解析

ここでは曲げ荷重 (Fig. 8, ケース 1) を受ける曲線桁橋 (中心角  $\alpha=0.2$  および  $0.4$  ラジアン) の解析結果から、曲率半径の影響と近似式の考え方を検討する。

a) 変位と主桁応力

モデル-1, 2 および 4 の  $w, \psi, \sigma_b$  を Table 5 に示す。曲線桁の場合は曲げとねじれが連成するため、モデル-1 の変形はきわめて大きい。横桁・横構のある構造では橋梁全体としてのねじり剛性が大となるのでその



**Fig. 13** Connecting Forces  $P_T, \bar{P}_R$  and Member Forces  $N$  of Lateral Bracing (Curved Girder).

変形は小さくなることわかれる。

b) 結合力と横構部材力

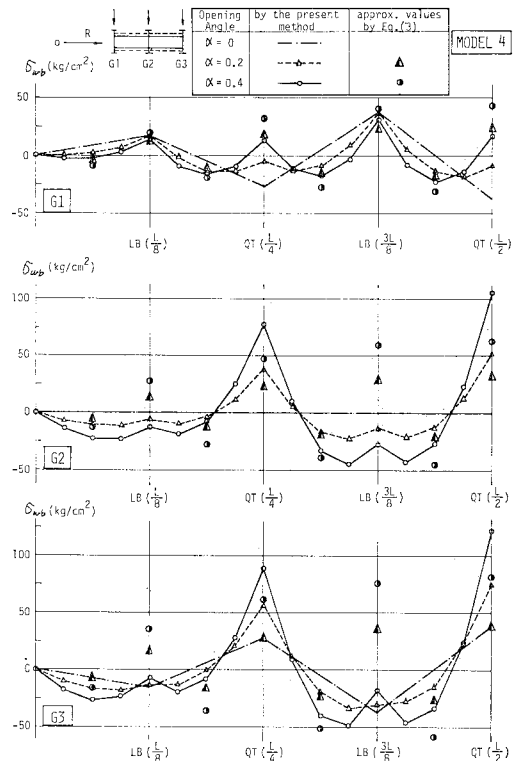
Fig. 13 に、曲げ荷重時のモデル-4 の結合力と横構部材力について、本法による値と近似式の値 (かっこ内の数字) を示す。この図から曲線桁橋における  $P_T, \bar{P}_R, N$  について次の諸

点をまとめることができる。

$P_T$  については、近似式の値の方が本法による値より大きく、結合力の大きいところで近似式の値は、本法の値の 1.6~1.9 倍となる。 $\bar{P}_R$  については、横桁断面と横構断面で近似式の値と本法による値の大小関係が入れ替るが、たとえば  $\bar{P}_R$  の最大値が生じるスパン中央断面 G3 桁では、近似値は本法の値の 48% ( $\alpha=0.2$ ), 57% ( $\alpha=0.4$ ) 程度である。 $N$  については、部材力最大の端斜材をみれば、近似式の値は本法による値の 1.4 倍程度である。

c) 主桁付加応力度

曲げ荷重時の結合力  $\bar{P}_R$  による主桁付加応力度  $\sigma_{wb}$  の橋軸方向分布をモデル-4 に対して求めれば Fig. 14 を得る。近似式では  $\sigma_{wb}$  は曲率半径に反比例するが、本法の値もほぼ同様な性質を有する。しかしながら本モ



**Fig. 14** Effect of Opening Angle on  $\sigma_{wb}$ .

**Table 6** Effect of Opening Angle on  $\sigma_s$ .

(Unit: kg/cm<sup>2</sup>)

Model	Loading	Opening Angle (radian)	Analytical Method	Stress at Point of Upper Flange				
				1	2	3	4	5
4		0.2	(1)	5.7	2.4	0.5	-9.1	-3.6
			(2)	11.3	4.5	0.5	-11.3	-4.5
		0.4	(1)	13.9	5.8	1.0	-16.1	-6.4
			(2)	22.8	9.2	1.9	-22.8	-9.2

(1)= by the present method, (2)=approx. values by Eq.(9)  
Point No. 1,2,... are shown in Fig.12.

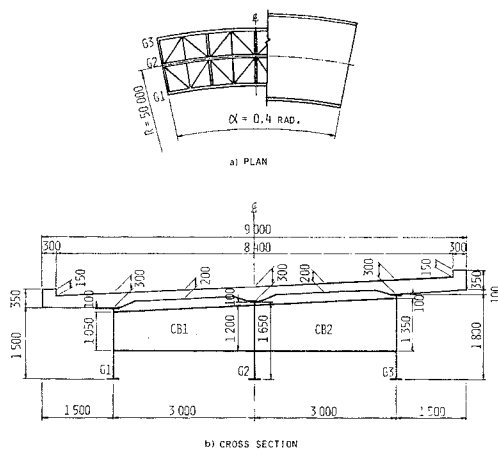
デル橋梁では横構取付点 ( $L/8, 3L/8$  断面) での、フランジの法線方向への変形に対する固定度が横桁の取付点ほどに十分でないために、G1 桁を除けば近似式の値は本法による値と逆符号となる。このため  $\sigma_{wb}$  が最大となるスパン中央断面 G3 桁で、近似値は本法の値の 49% ( $\alpha=0.2$ ), 67% ( $\alpha=0.4$ ) 程度となり、近似式は  $\sigma_{wb}$  をかなり過小に評価する結果となった。

**Table 6** は、曲げ荷重時の結合力  $P_T$  による主桁付加応力度  $\sigma_s$  について、近似式の値と本法による値を比較したものであるが、中心角にかかわらず近似式は  $\sigma_s$  を 1.2~2.0 倍程度過大に評価する。

本法による応力については、スパン中央断面における  $\sigma_{wb}/\sigma_b$  の比率の最大値は、 $\alpha=0.2$  の場合に 28%,  $\alpha=0.4$  の場合に 42% である。同様に  $\sigma_s$  とその点の  $\sigma_b$  の比率の最大値は、 $\alpha=0.2$  の場合に 8%,  $\alpha=0.4$  の場合に 17% である。このように中心角の増加とともに  $\sigma_{wb}/\sigma_b, \sigma_s/\sigma_b$  の値は増加する。

**5. 活荷重合成曲線 3 主桁橋**

ここでは、(1) 実橋断面に生じる主桁付加応力度と横構部材力の大きさを把握し、かつ近似式を検討する、(2) 主桁付加応力度、横構部材力に対する床版の剛性の影響を調べる、(3) 主桁の初期曲率の影響のみによる主



**Fig. 15** Composite Curved Girder Bridge (in mm).

桁付加応力度、横構部材力の大きさを検討するなどの目的で次に示す実橋断面を有する活荷重合成 3 主桁曲線および直線橋の数値解析を行った。

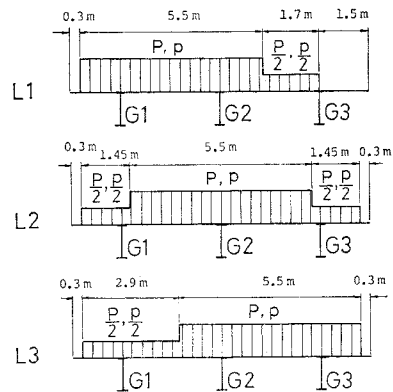
**(1) 解析モデルと荷重**

**Fig. 15** に解析の対象とする曲線橋 ( $R=50$  m) の平面および断面図を示す。**Table 7** に床版 (曲率半径の小さい方から 1,2,...6 の帯板要素に分割) の等価板厚、主桁・横桁と横構、ストラットの剛度を、**Table 8** に解析モデルの部材構成と作用荷重を示す (CGB 桁に作用する活荷重は **Fig. 16** 参照)。上横構は上フランジ上面より 17 cm 下、下横構は下フランジ下面より 23.5 cm 上の主桁ウェブに結合する。

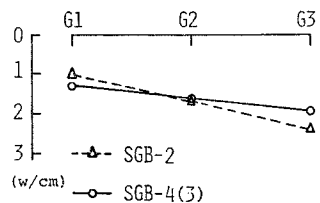
**(2) 変位と主桁応力**

**Fig. 17, 18** はそれぞれ SGB と CGB のたわみ図である。これらの図から横桁・横構による荷重分配の促進、断面変形の防止作用を知ることができる。SGB, CGB ともにストラットの有無はほとんど影響しない。

主桁には、軸力と水平軸まわりの曲げ、鉛直軸まわりの曲げ、そりねじりの 4 つによる垂直応力度 (それぞれ  $E\delta_t, Ez\kappa_t, -Ex\kappa_h, E\omega\kappa_\omega$  で示す) が作用する。SGB の場合は、**Fig. 19** に示すように、軸力と鉛直軸まわりの曲げによる垂直応力度の値は無視できるほど小さく、



**Fig. 16** Types of Live Load



**Fig. 17** Deflections of SGB Models due to Dead Load.

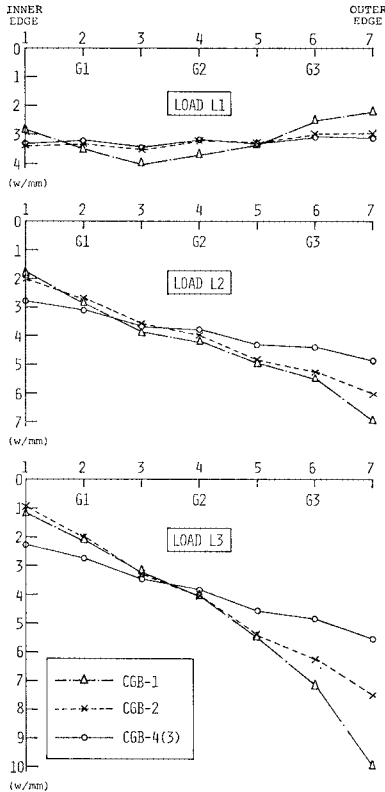


Fig. 18 Deflections of CGB Models due to Live Load.

他の2つの垂直応力度が卓越し、これらの各応力成分を加え合わせて同図の右端に示す応力分布が得られる。この応力分布の性状は Table 9 に示すように横構の有無と断面の位置により異なる(表中の I, C, O はフランジ上の点を示す。Fig. 3 参照)。いま, Fig. 19 において, SGB-4 の応力値を SGB-2 と比較すれば, スパン中央断面 G3 桁下フランジで水平軸まわりの曲げ応力 ( $\sigma_b$ ) は SGB-4 の方が 15% 減少し, そり応力 ( $\sigma_{wb}$ ) は 59% 減少している。次に CGB の場合は, Fig. 20 に示すように軸力と水平軸まわりの曲げとによる垂直応力度が大きく, CGB-1 と CGB-2, 4 とでは, 鉛直軸まわりの曲げ応力とそりねじり応力の符号が逆転する。床版はほぼ全体的に圧縮応力を受け, 主桁の上フランジ近傍のウェブに橋梁全体としての中立軸があるといえよう (Table 10, Fig. 20)。

(3) 結合力と横構部材力

Fig. 21 に, SGB-4 と CGB-4 について, 本法によって求めた下横構側の結合力  $P_T, \bar{P}_R$ ,

Table 7 Particulars of Model Bridge.

Concrete Slab	Strip No.	1	2	3	4	5	6	
	Equivalent Thickness (cm)	29.64	20.71	20.71	20.71	20.71	29.64	
Modulus of Elasticity		$E_s = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \nu_s = 1/6$						
Main Girder		G1		G2		G3		
		h (cm)	150	165	180			
		b <sub>1</sub> (cm)	35	36	38			
		b <sub>2</sub> (cm)	46	48	50			
		t <sub>r</sub> (cm)	2.0	2.0	2.0			
		t <sub>s</sub> (cm)	2.5	2.5	2.5			
		t <sub>w</sub> (cm)	0.9	0.9	0.9			
		E <sub>s</sub> A <sub>s</sub> (kg)	$6.7200 \times 10^4$	$7.1505 \times 10^4$	$7.6230 \times 10^4$			
		E <sub>s</sub> I <sub>s</sub> (kg-cm <sup>2</sup> )	$2.7068 \times 10^8$	$3.4289 \times 10^8$	$4.3095 \times 10^8$			
		E <sub>s</sub> I <sub>r</sub> (kg-cm <sup>2</sup> )	$5.7610 \times 10^{10}$	$6.4734 \times 10^{10}$	$7.3915 \times 10^{10}$			
E <sub>s</sub> C <sub>s</sub> (kg-cm <sup>3</sup> )	$1.4958 \times 10^{12}$	$1.9211 \times 10^{12}$	$2.3295 \times 10^{12}$					
E <sub>s</sub> C <sub>r</sub> (kg-cm <sup>3</sup> )	$2.5721 \times 10^{10}$	$3.4152 \times 10^{10}$	$4.7210 \times 10^{10}$					
G <sub>s</sub> J <sub>s</sub> (kg-cm <sup>2</sup> )	$2.9908 \times 10^8$	$3.1158 \times 10^8$	$3.2723 \times 10^8$					
E <sub>s</sub> I <sub>w</sub> (kg-cm <sup>2</sup> )	0	0	0					
E <sub>s</sub> C <sub>w</sub> (kg-cm <sup>3</sup> )	0	0	0					
Cross Beam			CB1		CB2			
	h (cm)		105-120		120-135			
	b <sub>v</sub> = b <sub>a</sub> (cm)		31		31			
	t <sub>v</sub> = t <sub>a</sub> (cm)		1.4		1.4			
t <sub>w</sub> (cm)		0.9		0.9				
EA (kg)		$3.9474 \times 10^7$		$4.2310 \times 10^7$				
EI (kg-cm <sup>2</sup> )		$8.4807 \times 10^{10}$		$1.1242 \times 10^{12}$				
GJ (kg-cm <sup>2</sup> )		$6.7815 \times 10^7$		$7.0757 \times 10^7$				
Lateral Bracing	Rigidity	Upper L.B.		Lower L.B.		Strut		
	EA (kg)	$6.2643 \times 10^7$		$7.2597 \times 10^7$		$3.0975 \times 10^7$		

Table 8 Types of Model and Loading.

	Structural Member	Model	Loading Conditions
Steel Girder Bridge	Main Girders+Cross Beams	SGB-2	Dead Load
	Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (without Struts)	SGB-3	
	Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (with Struts)	SGB-4	
Composite Girder Bridge	Slab+Main Girders	CGB-1	Live Load
	Slab+Main Girders+Cross Beams	CGB-2	
	Slab+Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (without Struts)	CGB-3	
	Slab+Main Girders+Cross Beams+Lateral Bracings (with Struts)	CGB-4	

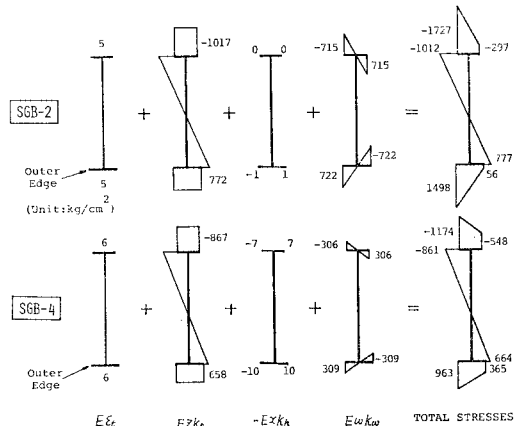


Fig. 19 Components of Normal Stresses of G3 at Midspan in SGB Models due to Dead Load.



**Table 9** Normal Stresses of Main Girders in SGB Models. (Unit : kg/cm<sup>2</sup>)

Flange	Girder	Point	Midspan	
			SGB-2	SGB-4
Upper Flange	G1	I	-128	-502
		C	-395	-597
		O	-663	-692
	G2	I	-215	-452
		C	-708	-728
		O	-1200	-1004
G3	I	-297	-548	
	C	-1012	-861	
	O	-1727	-1174	
Lower Flange	G1	I	32	331
		C	300	458
		O	568	584
	G2	I	39	243
		C	537	554
		O	1035	864
	G3	I	56	365
		C	777	664
		O	1498	963

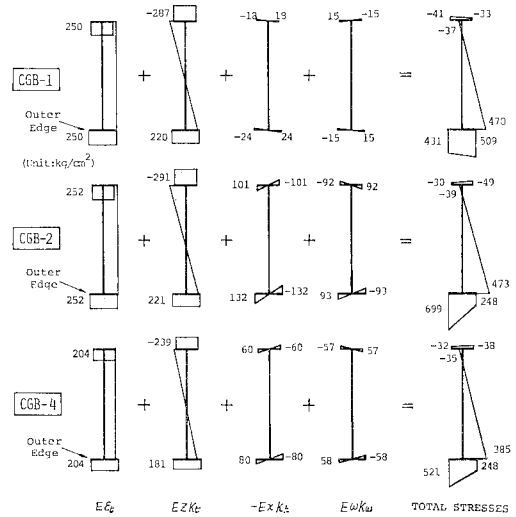
横構部材力  $N$  をそれぞれの近似値 (かっこ内の値) と比較した. この図から前述の 4. (3), b) と同様の考察が得られる. また, モデル-3 と 4 の  $P_T, \bar{P}_R, N$  を比較すれば (モデル-3 の解析結果を省略したが), ストラットがないモデル-3の方がモデル-4より5%程度大きな値となった.

(4) 主桁付加応力度

**Fig. 22** は SGB の主桁付加応力度  $\sigma_{wb}$  の橋軸方向分布を示す. SGB-2 では, 横桁位置を不動中間支点とする連続桁の曲げ応力分布に類似した  $\sigma_{wb}$  分布が生じ, 近似値とほぼ一致する. しかし, SGB-4 では, **Fig. 14**

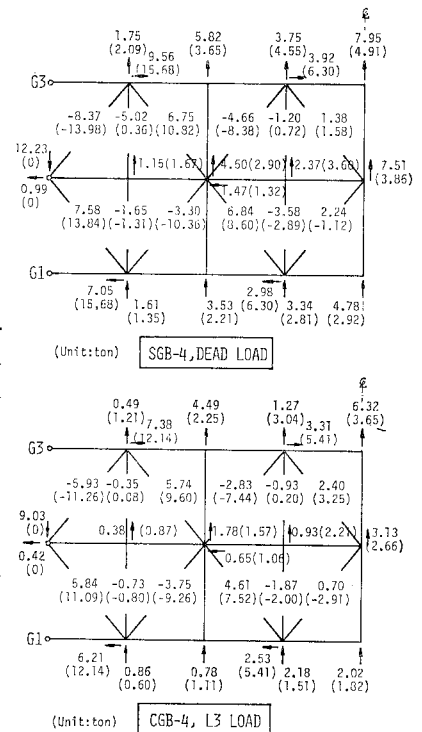
**Table 10** Normal Stresses of Main Girders and Slabs in CGB Models. (Unit : kg/cm<sup>2</sup>)

Loading		L1			L2			L3			
CGB Model No.		1	2	4	1	2	4	1	2	4	
Top Surface of Concrete Slab	1	-13	-17	-14	-6	-9	-11	-4	-4	-9	
	2 (G1)	-11	-10	-10	-8	-7	-9	-6	-5	-7	
	3	-30	-28	-28	-29	-28	-29	-22	-22	-23	
	4 (G2)	-10	-8	-8	-10	-9	-9	-9	-10	-9	
	5	-24	-23	-23	-30	-31	-30	-30	-32	-30	
	6 (G3)	-6	-8	-8	-10	-12	-11	-12	-14	-12	
	7	-7	-8	-8	-17	-15	-13	-23	-19	-17	
Bottom Flanges of Main Girders	G1	I	322	162	261	266	126	242	182	127	228
		C	297	314	305	216	215	271	152	134	228
		O	271	465	349	166	304	302	122	141	229
	G2	I	339	169	188	362	192	206	335	185	196
		C	341	290	284	343	323	319	301	314	312
		O	342	411	379	325	453	431	258	442	428
	G3	I	185	148	135	386	231	220	509	248	248
		C	218	249	253	388	407	352	470	473	385
		O	252	351	371	390	583	483	431	699	521



**Fig. 20** Components of Normal Stresses of G3 at Midspan in CGB Models due to L3 Load.

と同様に G1桁を除いて  $L/8, 3L/8$  断面における本法と近似値との符号が異なる. これは, 本モデル橋梁でも 4. (3), c) の場合と同様に横構結合点でのフランジの法線方向への変形に対する固定度が不十分であるためと思われる. このため, 近似式では SGB-4 の  $\sigma_{wb}$  が SGB-2 の値の 1/4 となるが, 本法ではたとえば G3桁での減少



**Fig. 21** Connecting Forces  $P_T, \bar{P}_R$  and Member Forces  $N$  of Lateral Bracing (Curved Girder).

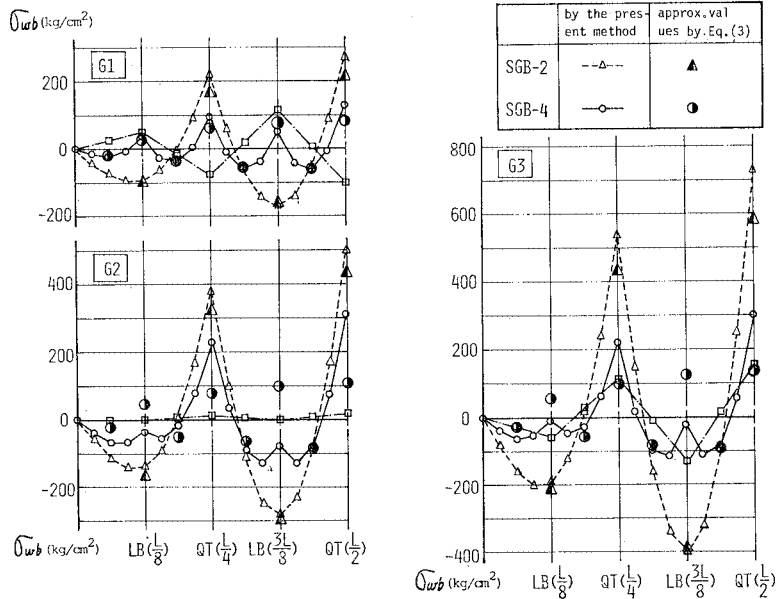


Fig. 22 Additional Stresses  $\sigma_{wb}$  of Main Girders in SGB Models.

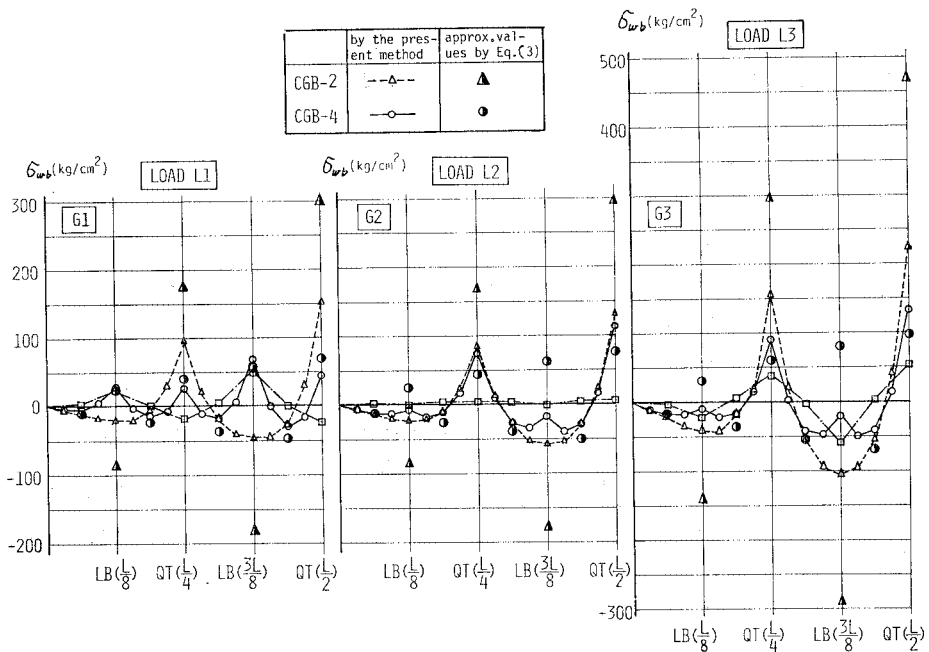


Fig. 23 Additional Stresses  $\sigma_{wb}$  of Main Girders in CGB Models.

は 40% 程度にとどまる。

Fig. 23 は CGB における G1~G3 の  $\sigma_{wb}$  の橋軸方向分布を、L 1~L 3 荷重に対して示したものである。スパン中央断面における近似式の値と本法による値の比率は、CGB-2 で 2.0~2.3 倍、CGB-4 で 0.7~1.6 倍程度となっている。CGB では  $\sigma_{wb}$  への横構の効果は、SGB-2 と 4 の差ほど顕著ではなく、曲率面内の曲げに

対して床版の効果が大きいことが CGB-2, 4 の比較によって知られよう。CGB-4 の横構取付点の  $\sigma_{wb}$  はフランジの固定度の影響を受けることは SGB-4 の場合と同じである。また、Table 9, 10 からスパン中央断面における  $\sigma_{wb}/\sigma_b$  の比率の最大値は、SGB-2 で約 56%、CGB-2 で約 47% であることが知られる。

Table 11 は、 $\sigma_s$  の値を比較したものであり、近似

**Table 11** Additional Stresses  $\sigma_s$  of Main Girders in SGB-4 and CGB-4 Models.

Model	Loading	Analytical Method	Stress at (Unit : kg/cm <sup>2</sup> )									
			Point of Upper Flange					Point of Lower Flange				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SGB-4	Dead Load	(1)	28.5	12.3	5.9	-41.4	-16.4	-23.3	-9.9	-4.8	30.6	12.2
		(2)	75.6	30.3	6.0	-67.3	-27.0	-52.7	-21.2	-4.2	47.4	19.0
CGB-4	L1	(1)	0.6	0.2	-0.1	-0.1	0.0	3.3	2.0	0.5	0.7	0.3
		(2)	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.1	3.0	3.8	0.4	-2.7	-3.4
	L2	(1)	-1.4	-0.6	-0.2	1.3	0.5	-11.0	-4.3	-0.8	13.7	6.0
		(2)	-0.4	-0.2	0.0	0.4	0.2	-22.9	-9.5	-1.8	20.6	8.5
	L3	(1)	-2.5	-1.1	-0.3	2.1	0.7	-19.2	-7.9	-1.9	20.9	9.3
		(2)	-0.8	-0.3	-0.1	0.8	0.3	-39.7	-17.7	-3.3	35.8	16.0

(1)=by the present method, (2)=approx. values by Eq. (9), Point No. 1, 2, ... are shown in Fig. 12.

値はほぼすべての点で  $\sigma_s$  を過大評価する. 本法による  $\sigma_s/\sigma_b$  の比率は, SGB-4 で最大 11%(41.4/367.4), CGB-4 で最大 26%(19.2/75.3) 程度である.

(5) 直線桁橋の解析結果

(1) に示す活荷重合成桁の解析モデルと同一断面を有する直線桁橋を本法によって解き, 結合力・横構部材力・主桁付加応力度に対する初期曲率の影響を検討する.

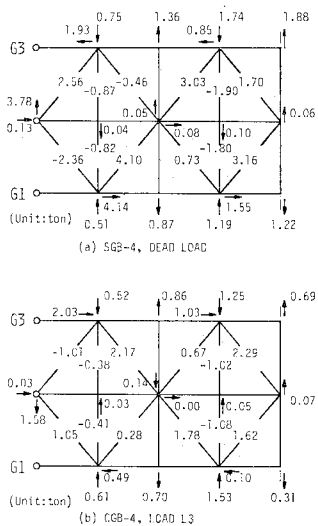
Fig. 24 は本法によって求めた直線桁橋 (SGB-4 および CGB-4) の結合力, 横構部材力であるが, これらの力を Fig. 21 の曲線桁橋の値から差し引けば, 初期曲率の影響のみが得られ, 近似式の値に近い値が得られるものと推察される. そこで Fig. 22, 23 に直線桁橋の  $\sigma_{wb}$  を  $\text{---}\square\text{---}$  でプロットして, 曲線桁橋の  $\sigma_{wb}$  の分布とともに併記した. 両者の差の値は, たとえ

ば G3 桁では近似式による値とよく一致する. しかしながら, G1 桁では逆に差が大きくなる. これより曲線桁橋における 結合力, 部材力, 主桁付加応力度の算定には, 近似式は, 初期曲率の影響を考慮しているためである程度有用であると判断されるが, 曲線桁橋に実際に生じるそれらの値をすべての断面で正しく評価するとはできないようである.

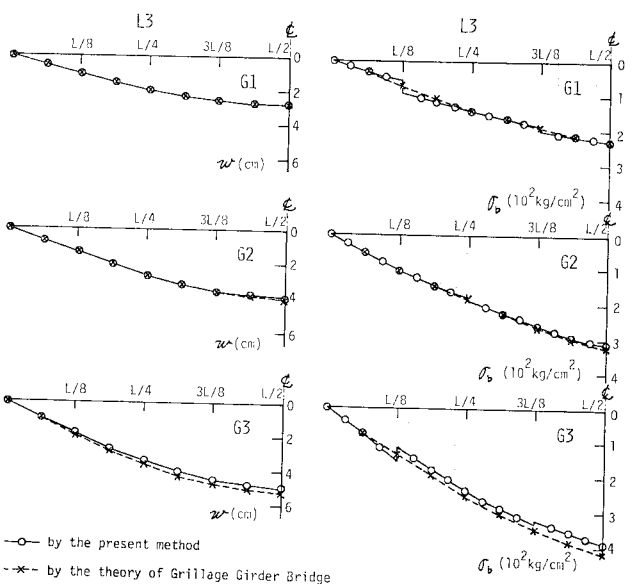
(6) 曲線格子桁理論との比較

SGB-4, CGB-4 を曲線格子桁橋に置換して解析したその結果と本法による結果とを, 主桁のたわみ  $w$ , 曲応力度  $\sigma_b$  について比較すれば, CGB-4 に対して Fig. 25 を得る.

SGB-4 についても同様の結果が得られており,  $w, \sigma$  のみについては, 曲線格子桁理論が十分な精度を有することが知られる.



**Fig. 24** Connecting Forces  $P_L, \bar{P}_R$  and Member Forces  $N$  of Lateral Bracing (Straight Girder).



**Fig. 25** Deflections and Bending Stresses in CGB Models due to L3 Load.

6. 曲線 2 主桁模型実験<sup>10)</sup>との比較

中井らによる対傾構・横構を有する曲線 2 主桁模型橋 (Fig. 26) の静的載荷実験結果<sup>10)</sup>と本法による解析結果との比較を、横構と対傾構のひずみについて行えば Table 12, 13 を得る。実験では桁端のそりを拘束し、解析ではそりを自由としていることから、支承条件の影響を受けやすい横構のひずみは、実験値と理論値の間に

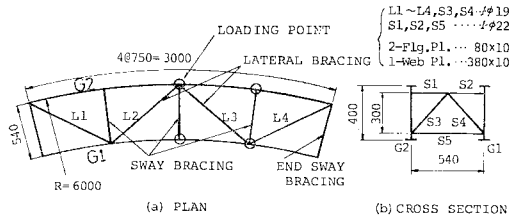


Fig. 26 Particulars of Experimental Model (by Nakai et al).

Table 12 Strains of Lateral Bracing (Unit: 10<sup>-6</sup>/t)

Location of Load	Member	Experimental (1)	Calculated		
			(2)	(3)	(4)
(G1, $\frac{l}{2}$ )	L1	-6	-3	-17	-27
	L2	-23	-20	-28	-8
(G2, $\frac{l}{2}$ )	L1	-48	-41	-45	-70
	L2	17	15	19	17
(G1, $\frac{l}{4}$ )	L1	-7	-3	-13	-12
	L2	-14	-10	-11	4
	L3	-16	-14	-22	4
	L4	-11	-9	-28	-57
(G2, $\frac{l}{4}$ )	L1	-28	-25	-28	-47
	L2	13	11	12	2
	L3	6	5	-3	2
	L4	-52	-37	-43	-76

(1), (3) & (4)=by Nakai et al. (Ref. 10)  
 (2)=by the present method  
 (4)=approx. values by Ref. 1)

Table 13 Strains of Sway Bracing. (Unit: 10<sup>-6</sup>/t)

Location of Load	Member	Experimental (1)	Calculated	
			(2)	(3)
(G1, $\frac{l}{2}$ )	S1	26	23	18
	S2	-18	-20	-24
	S3	-45	-43	-42
	S4	50	43	42
	S5	-3	-2	-3
(G2, $\frac{l}{2}$ )	S1	22	23	31
	S2	-9	-8	-13
	S3	-34	-30	-44
	S4	37	30	44
	S5	-8	-8	-9

(1) & (3)=by Nakai et al. (Ref. 10)  
 (2)=by the present method

若干の差が生じている (Table 12) が、対傾構のひずみは支承条件の影響をあまり受けず両者の値には良好な一致がみられる (Table 13).

7. 結 び

本論文はまず著者らが先に提示した曲線桁橋の一解析法<sup>9)</sup>を応用して、横桁・横構を有する並列 I 桁曲線橋 (直線橋を含む) を解析し、床版・主桁と横桁・横構の力学的相互作用による並列 I 桁橋の弾性挙動を調べ、かつ横構部材力・主桁付加応力度について従来の近似式と比較検討したものである。

ここで用いたモデル橋梁について、解析結果を近似式と比べ、得られた結果をまとめれば次のとおりである。

非合成直線桁橋モデルについて

① 直線桁橋の場合にも橋軸直角方向結合力  $\bar{P}_R$  が生じ、それによって無視できない程度の主桁付加応力度  $\sigma_{wb}$  が生じた。たとえばモデル-4 のスパン中央断面 G3 桁では、 $\sigma_{wb}/\sigma_b$  が曲げ荷重載荷時で 16%、ねじり荷重載荷時で 29% である。

② 曲げ荷重載荷時に生じる橋軸方向結合力  $P_T$  は小さく、それによる主桁付加応力度  $\sigma_s$  も小さい。

③ ねじり荷重載荷時に生じる  $P_T, N_T, \sigma_s$  を近似式は 2 倍程度過大に評価する。

非合成および合成曲線桁橋モデルについて

曲線桁橋では直線桁橋に生じる上のような付加応力のほかに、初期曲率の効果が影響してくるため、次のような性状を挙げることができる。

① 近似式は  $P_T, \sigma_s$  を 2 倍程度、横構最大部材力を 1.4~1.9 倍程度過大に評価する。

② 最大  $\bar{P}_R, \sigma_{wb}$  を 0.5~0.7 倍程度に過小評価する。これは横構による主桁フランジの法線方向への変形に対する固定度が不十分であるためと思われる。

③ 中心角の増加に伴って結合力が増加し、 $\sigma_b$  に対する  $\sigma_{wb}, \sigma_s$  の比率も増加する。たとえば、非合成曲線桁のスパン中央断面での  $\sigma_{wb}/\sigma_b$  の最大値は、 $\alpha=0.2$  で 30% 程度であるが、 $\alpha=0.4$  では 40% を超える。

④ 合成桁橋の場合、曲率面内の曲げに対する床版の効果が大きく、CGB-2 と 4 の差は、SGB-2 と 4 の差ほど顕著ではない。

⑤ 近似式は、初期曲率の影響のみによる主桁付加応力度と横構部材力の算定にはある程度有用であると判断される。

以上のように現行の近似式では、並列 I 桁曲線橋に実際に生じる主桁付加応力度、横構部材力を必ずしも正しく評価できない場合があり、これが算定のための簡単な力学モデルを考えることもいまのところ困難なようであ

る。したがって、これら応力度算定のためには、たとえばここで示したような各構成部材間の偏心結合を考慮した解析法が 1 つの解法として有用であり、実際の設計に有用な資料提供のためには、たとえばパラメトリック解析が必要であろう。

中井らによる曲線 2 主桁模型実験の結果と本法による値とはほぼ一致し、本法の妥当性を確認できたといえよう。

本研究は昭和 52 年度文部省科学研究費を受けて行ったものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 阪神高速道路公団：鋼構造物設計基準，第 4 章，1974 年 5 月。
- 2) 田井戸・山口：鋼曲線ゲタ橋を設計する際の問題点，橋梁と基礎，8 巻，11 号，pp. 27~31，1974 年 11 月。
- 3) 玉野・西山・三浦：換算箱ゲタ曲線橋の実験，土木技術，22 巻，10 号，pp. 46~50，1967 年 10 月。
- 4) 小西：鋼橋設計編 II，丸善，p. 1468，1976 年 1 月。
- 5) 小松：曲線並列桁橋の実用計算式，土木学会論文集，第 93 号，pp. 1~9，1963 年 5 月。
- 6) 小松・中井・佐伯・加藤・川上：連続曲線桁橋模型に関する実験的研究，土木技術，19 巻，8 号，pp. 33~41 および 9 号，pp. 35~45，1964 年 8，9 月。
- 7) 小松・栗村：曲線桁橋の強度計算について，土木学会第 28 回年次学術講演会概要集，I-174，pp. 374~375，1973 年 10 月。
- 8) 大塚・吉村・彦坂・平田：床版と桁の偏心結合を考慮した曲線桁橋の解析，土木学会論文報告集，No. 259，pp. 11~23，1977 年 3 月。
- 9) 大塚・吉村・彦坂：曲線箱桁橋における中間隔壁の補剛効果（上）（下），橋梁と基礎，12 巻，1 号，pp. 39~42 および 2 号，pp. 40~43，1978 年 1，2 月。
- 10) 中井・谷・塩見：曲線 I げた橋の対傾構・横構の弾性挙動について，土木学会第 31 回年次学術講演会概要集，I-62，pp. 96~97，1976 年 10 月。

(1978.5.16・受付)