

斜支承を有する曲線格子桁橋の解析*

ANALYSIS OF CURVED GRILLAGE GIRDER BRIDGE WITH SKEWED SUPPORTS

小松 定夫**・林 正***
By Sadao Komatsu and Masa Hayashi

1. 緒 言

本研究では、斜支承を有する連続曲線格子桁橋の解析を行なった。任意形状の格子桁の解法はすでに著者の1人によって発表されているが²⁾、この論文では各横桁がすべての主桁間を貫通している場合に制約されている。そこで、本文ではこの理論をさらに拡張して、斜めに配置された支承を有する格子桁のように、主桁が相互にずれて配置された曲線斜格子桁の解析を行なった。したがって、横桁は主桁間を貫通している必要はなく、また中間で一部欠けている場合でもこの解法は適用できる。ただし、横桁は主桁にほぼ直交している場合に限定した。

さらに、実用法を考えて実際によく用いられている梯子型曲線格子箱桁橋の実用計算式もあわせて導いた。

この計算式と、先に発表した曲線箱桁の実用計算式³⁾とを用いて、主桁は2本の曲線箱桁からなり、かつ斜支承を有する3径間連続曲線格子桁の数値解析を行ない、さらに模型実験によって解式の合理性を確認した。これにより曲線箱桁の実用計算式および曲線斜格子桁橋の計算式の妥当性が実証された。

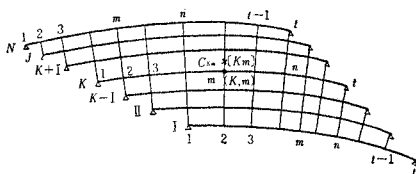
2. 曲線斜格子桁橋

(1) 格子構造形式

本論文で扱う格子桁の構造形式は、つぎの仮定を満足するものとする。

- 1) 横桁は全部材とも直線材である。
- 2) 横桁は主桁とほぼ直角に交わり、かつ主桁と剛結

図一 主桁・横桁・格点などの番号



主桁番号: $K, J = I, II, \dots, N$
主桁断面番号: $m, n = 1, 2, \dots, t$
横桁番号: $[K, m]$
格点番号: (K, m)

* 昭和42年11月 土木学会関西支部年次学術講演会にて発表済

** 正会員 工博 大阪大学教授 土木工学科

*** 正会員 大阪大学助手 土木工学科

されている。

- 3) 横桁のねじり剛性は無視する。
- 4) 横桁は各主桁間の同数ある必要はなく、一部欠けていてもよい。したがって、両端での支承が同じ形に配置されている必要はない。

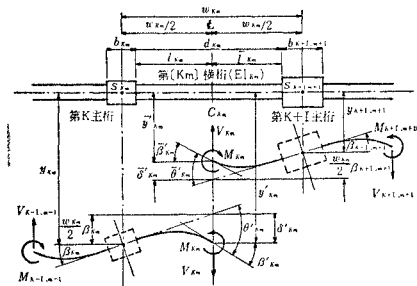
ここで述べる理論は、曲線格子桁に限定されるものではないことを付け加えておく。

(2) 弾性方程式

a) 横桁中央断面での変形量

図一2に示すごとく、第 K 主桁と第 $K+I$ 主桁とはさまれた第 $[K, m]$ 横桁を両主桁のせん断中心 $S_{K,m}$, $S_{K+I,m+1}$ の間隔を2等分する断面 $C_{K,m}$ で切断し、横桁を片持ばりと考えたときのその自由端の変形量を求める。

図一2 主桁と横桁の変形図



ここに

$\gamma_{K,m}, \beta_{K,m}$: 第 K 主桁のせん断中心 $S_{K,m}$ のたわみおよび回転角

$\gamma_{K+I,m+1}, \beta_{K+I,m+1}$: 第 $K+I$ 主桁のせん断中心 $S_{K+I,m+1}$ のたわみおよび回転角

$V_{K,m}, M_{K,m}$: 断面 $C_{K,m}$ での不静定せん断力および不静定曲げモーメント

$EI_{K,m}$: 第 $[K, m]$ 横桁の曲げ剛性

荷重が主桁に載荷された場合の変形量

$$\delta'_{K,m} = \frac{l^3_{K,m}}{3EI_{K,m}} V_{K,m} - \frac{l^2_{K,m}}{2EI_{K,m}} M_{K,m}$$

$$\delta''_{K,m} = \frac{l^3_{K,m}}{3EI_{K,m}} V_{K,m} + \frac{l^2_{K,m}}{2EI_{K,m}} M_{K,m}$$

$$\theta'_{K,m} = \frac{l^2_{K,m}}{2EI_{K,m}} V_{K,m} - \frac{l_{K,m}}{EI_{K,m}} M_{K,m}$$

$$\bar{\theta}'_{K,m} = \frac{\bar{l}^2_{K,m}}{2EI_{K,m}} V_{K,m} + \frac{\bar{l}_{K,m}}{EI_{K,m}} M_{K,m}$$

ここに、

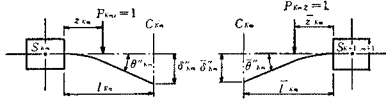
$$l_{K,m} = \frac{1}{2} (\omega_{K,m} - b_{K,m})$$

$$\bar{l}_{K,m} = \frac{1}{2} (\omega_{K,m} - b_{K+I,m+1})$$

.....(1)

荷重が横桁に載荷された場合の付加変形量

図-3 横桁に荷重が載荷された場合の横桁の変形量



$$\delta''_{K,m} = \frac{z^2_{K,m}(3l_{K,m} - z_{K,m})}{6EI_{K,m}}$$

$$\bar{\delta}''_{K,m} = \frac{\bar{z}^2_{K,m}(3\bar{l}_{K,m} - \bar{z}_{K,m})}{6EI_{K,m}}$$

$$\theta''_{K,m} = \frac{z^2_{K,m}}{2EI_{K,m}}, \quad \bar{\theta}''_{K,m} = \frac{\bar{z}^2_{K,m}}{2EI_{K,m}}$$

.....(2)

したがって、切断面 $C_{K,m}$ でのそれぞれの変形量はつぎのようになる。

$$y'_{K,m} = y_{K,m} - \frac{\omega_{K,m}}{2} \beta_{K,m} + \delta'_{K,m} + \delta''_{K,m}$$

$$\bar{y}'_{K,m} = y_{K+I,m+1} + \frac{\omega_{K,m}}{2} \beta_{K+I,m+1} - \bar{\delta}'_{K,m} + \bar{\delta}''_{K,m}$$

$$\beta'_{K,m} = -\beta_{K,m} + \theta'_{K,m} + \theta''_{K,m}$$

$$\bar{\beta}'_{K,m} = -\beta_{K+I,m+1} + \bar{\theta}'_{K,m} - \bar{\theta}''_{K,m}$$

.....(3)

b) 横桁断面での連続条件

断面 $C_{K,m}$ での連続条件は、たわみおよび回転角が等しいことから、

$$\left. \begin{aligned} y'_{K,m} &= \bar{y}'_{K,m} \quad (K = I, II, \dots, N-I) \\ \beta'_{K,m} &= \bar{\beta}'_{K,m} \quad (m = 1, 2, \dots, t-1) \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

式(1), (2)を用いた式(3)を式(4)に代入して、

$$\begin{aligned} y_{K+I,m+1} - y_{K,m} + \frac{\omega_{K,m}}{2} (\beta_{K+I,m+1} + \beta_{K,m}) &= \frac{V_{K,m}}{3EI_{K,m}} (\bar{l}^3_{K,m} + l^3_{K,m}) \\ &+ \frac{M_{K,m}}{2EI_{K,m}} (\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m}) \\ &+ \frac{z^2_{K,m}(3l_{K,m} - z_{K,m})}{6EI_{K,m}} - \frac{\bar{z}^2_{K,m}(3\bar{l}_{K,m} - \bar{z}_{K,m})}{6EI_{K,m}} \end{aligned} \dots(5)$$

$$\beta_{K+I,m+1} - \beta_{K,m}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{V_{K,m}}{2EI_{K,m}} (\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m}) \\ &+ \frac{M_{K,m}}{EI_{K,m}} (l_{K,m} + \bar{l}_{K,m}) - \frac{z^2_{K,m} + \bar{z}^2_{K,m}}{2EI_{K,m}} \end{aligned} \dots(6)$$

式(5)の代りに、式(5)に式(6)の $\beta_{K+I,m+1}$ を代入した式(7)を用いる。

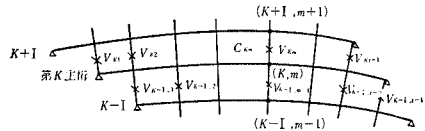
すなわち、

$$\begin{aligned} y_{K+I,m+1} - y_{K,m} + \omega_{K,m} \beta_{K,m} &= \frac{V_{K,m}}{EI_{K,m}} \left[\frac{\bar{l}^3_{K,m} + l^3_{K,m}}{3} - \frac{\omega_{K,m}(\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m})}{4} \right] \\ &+ \frac{M_{K,m}}{2EI_{K,m}} [(\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m}) \\ &- \omega_{K,m}(\bar{l}_{K,m} + l_{K,m})] \\ &+ \frac{1}{6EI_{K,m}} \left[z^2_{K,m}(3l_{K,m} - z_{K,m}) \right. \\ &- \bar{z}^2_{K,m}(3\bar{l}_{K,m} - \bar{z}_{K,m}) \\ &\left. + \frac{3}{2} \omega_{K,m}(z^2_{K,m} + \bar{z}^2_{K,m}) \right] \dots(7) \end{aligned}$$

c) 第 K 主桁上の断面 x における変形量

各横桁が切断され単一化された主桁には、外力荷重のほかに外力として横桁不静定せん断力 V および曲げモーメント M が作用する。したがって、第 K 主桁の任意断面 x における変形量はつぎのようになる。

図-4 第 K 主桁に作用する不静定断面力



たわみ：

$$\begin{aligned} y_{K,x} &= y_{K,x_0} + \sum_{n=1}^t (V_{K,n} - V_{K-I,n-1}) \xi_{K,xn} \\ &+ \sum_{n=1}^t \left[M_{K,n} - M_{K-I,n-1} - \left(\frac{\omega_{K,n}}{2} V_{K,n} \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{\omega_{K-I,n-1}}{2} V_{K-I,n-1} \right) \right] \eta_{K,xn} \dots(8) \end{aligned}$$

回転角：

$$\begin{aligned} \beta_{K,x} &= \beta_{K,x_0} + \sum_{n=1}^t (V_{K,n} - V_{K-I,n-1}) \phi_{K,xn} \\ &+ \sum_{n=1}^t \left[M_{K,n} - M_{K-I,n-1} - \left(\frac{\omega_{K,n}}{2} V_{K,n} \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{\omega_{K-I,n-1}}{2} V_{K-I,n-1} \right) \right] \psi_{K,xn} \dots(9) \end{aligned}$$

ここに、

$$V_0, V_t, M_0, M_t = 0$$

y_{K,x_0}, β_{K,x_0} : 第 K 主桁を単一連続曲線桁とした場合に、主桁および横桁に作用している外力荷重による任意断面 x のたわみおよび回転角

$\xi_{K,xn}, \phi_{K,xn}$: 第 K 主桁を単一連続曲線桁とした場合に、格点 n に作用する単位集中荷重 $P_{K,n}=1$ による任意断面 x のたわみおよび回転角

$\eta_{K,xn}, \psi_{K,xn}$: 第 K 主桁を単一連続曲線桁とした場合に、格点 n に作用する単位集中トル

ク $T_{K,n}=1$ による任意断面 x のたわみおよび回転角

d) 弾性方程式

弾性方程式は横桁断面 $C_{K,m}$ における連続条件式(6), (7) に式(8), (9) より導かれる変形量 $y_{K+I,m+1}$, $\beta_{K+I,m+1}$ を代入して得られる。

まず, 式(8), (9) より

$$y_{K+I,m+1} = y_{K+I,m+1,0} + \sum_{n=1}^t (V_{K+I,n} - V_{K,n-1}) \xi_{K+I,m+1,n} + \sum_{n=1}^t \left[M_{K+I,n} - M_{K,n-1} - \left(\frac{\omega_{K+I,n}}{2} V_{K+I,n} + \frac{\omega_{K,n-1}}{2} V_{K,n-1} \right) \right] \eta_{K+I,m+1,n}$$

$$\beta_{K+I,m+1} = \beta_{K+I,m+1,0} + \sum_{n=1}^t (V_{K+I,n} - V_{K,n-1}) \phi_{K+I,m+1,n} + \sum_{n=1}^t \left[M_{K+I,n} - M_{K,n-1} - \left(\frac{\omega_{K+I,n}}{2} V_{K+I,n} + \frac{\omega_{K,n-1}}{2} V_{K,n-1} \right) \right] \psi_{K+I,m+1,n}$$

$$\left. \begin{aligned} a_{K,K-I,m,n} &= -\left(\xi_{K,m,n+1} + \frac{\omega_{K-I,n}}{2} \eta_{K,m,n+1} \right) + \omega_{K,m} \left(\phi_{K,m,n+1} + \frac{\omega_{K-I,n}}{2} \psi_{K,m,n+1} \right) \\ a_{K,K,m,n} &= (\xi_{K+I,m+1,n+1} + \xi_{K,m,n}) + \frac{\omega_{K,n}}{2} (\eta_{K+I,m+1,n+1} - \eta_{K,m,n}) - \omega_{K,m} \left(\phi_{K,m,n} - \frac{\omega_{K,n}}{2} \psi_{K,m,n} \right) \\ &\quad + \frac{\mu_{m,n}}{EI_{K,m}} \left(\frac{\bar{l}^3_{K,m} + l^3_{K,m}}{3} - \frac{\omega_{K,m} (l^2_{K,m} - \bar{l}^2_{K,m})}{4} \right) \\ a_{K,K+I,m,n} &= -\xi_{K+I,m+1,n} + \frac{\omega_{K+I,n}}{2} \eta_{K+I,m+1,n} \\ b_{K,K-I,m,n} &= -\eta_{K,m,n+1} + \omega_{K,m} \psi_{K,m,n+1} \\ b_{K,K,m,n} &= (\eta_{K+I,m+1,n+1} + \eta_{K,m,n}) - \omega_{K,m} \psi_{K,m,n} + \frac{\mu_{m,n}}{2EI_{K,m}} [(\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m}) - \omega_{K,m} (\bar{l}_{K,m} + l_{K,m})] \\ b_{K,K+I,m,n} &= -\eta_{K+I,m+1,n} \\ c_{K,K-I,m,n} &= -\phi_{K,m,n+1} - \frac{\omega_{K-I,n}}{2} \psi_{K,m,n+1} \\ c_{K,K,m,n} &= (\phi_{K+I,m+1,n+1} + \phi_{K,m,n}) + \frac{\omega_{K,n}}{2} (\psi_{K+I,m+1,n+1} - \psi_{K,m,n}) + \frac{\mu_{m,n}}{2EI_{K,m}} (\bar{l}^2_{K,m} - l^2_{K,m}) \\ c_{K,K+I,m,n} &= -\phi_{K+I,m+1,n} + \frac{\omega_{K+I,n}}{2} \psi_{K+I,m+1,n} \\ d_{K,K-I,m,n} &= -\psi_{K,m,n+1} \\ d_{K,K,m,n} &= (\psi_{K+I,m+1,n+1} + \psi_{K,m,n}) + \frac{\mu_{m,n}}{EI_{K,m}} (\bar{l}_{K,m} + l_{K,m}) \\ d_{K,K+I,m,n} &= -\psi_{K+I,m+1,n} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{ここに,} \\ \dots\dots\dots(12) \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{K,m} &= (y_{K+I,m+1,0} - y_{K,m,0}) + \omega_{K,m} \beta_{K,m,0} - \frac{1}{6EI_{K,m}} \left[z^2_{K,m} (3l_{K,m} - z_{K,m}) - \bar{z}^2_{K,m} (3\bar{l}_{K,m} - \bar{z}_{K,m}) \right] \\ &\quad + \frac{3}{2} \omega_{K,m} (z^2_{K,m} + \bar{z}^2_{K,m}) \\ S_{K,m} &= (\beta_{K+I,m+1,0} - \beta_{K,m,0}) + \frac{1}{2EI_{K,m}} (z^2_{K,m} + \bar{z}^2_{K,m}) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (0 \leq z_{K,m} \leq l_{K,m}, \quad 0 \leq \bar{z}_{K,m} < \bar{l}_{K,m}) \\ \dots\dots\dots(13) \end{array}$$

$y_{K,m}$, $\beta_{K,m}$ は式(8), (9) において $x=m$ とおけばよい。したがって, 弾性方程式はつぎのようになる。

$$\sum_{n=1}^{t-1} a_{K,K-I,m,n} V_{K-I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} a_{K,K,m,n} V_{K,n} + \sum_{n=1}^{t-1} a_{K,K+I,m,n} V_{K+I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} b_{K,K-I,m,n} M_{K-I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} b_{K,K,m,n} M_{K,n} + \sum_{n=1}^{t-1} b_{K,K+I,m,n} M_{K+I,n} = Q_{K,m} \dots\dots\dots(10)$$

$$\sum_{n=1}^{t-1} c_{K,K-I,m,n} V_{K-I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} c_{K,K,m,n} V_{K,n} + \sum_{n=1}^{t-1} c_{K,K+I,m,n} V_{K+I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} d_{K,K-I,m,n} M_{K-I,n} + \sum_{n=1}^{t-1} d_{K,K,m,n} M_{K,n} + \sum_{n=1}^{t-1} d_{K,K+I,m,n} M_{K+I,n} = S_{K,m} \dots\dots\dots(11)$$

($K = I, II, \dots, N-I; m = 1, 2, \dots, t-1$.)

第 J 主桁上の断面 y (これを断面 (J, y) と表わす) に単位集中荷重 $P_{Jy}=1$ または単位集中トルク $T_{Jy}=1$ が作用するとき生ずる横桁 $[K, m]$ の中点の断面力を V_{KJmy}, M_{KJmy} で表わすことにする。

しかるとき、式 (14) は

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Jy} \\ M_{Jy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{Jy} \\ S_{Jy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(22)$$

となる。ここに V_{Jy}, M_{Jy} は式 (18), (19) より

$$V_{Jy} = \begin{bmatrix} V_{I Jy} \\ V_{II Jy} \\ \vdots \\ V_{K Jy} \\ \vdots \\ V_{N-1, Jy} \end{bmatrix}, \quad M_{Jy} = \begin{bmatrix} M_{I Jy} \\ M_{II Jy} \\ \vdots \\ M_{K Jy} \\ \vdots \\ M_{N-1, Jy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(23)$$

さらに、

$$V_{KJ,y} = \begin{bmatrix} V_{KJ,1y} \\ V_{KJ,2y} \\ \vdots \\ V_{KJ,my} \\ \vdots \\ V_{KJ,t-1,y} \end{bmatrix}, \quad M_{KJ,y} = \begin{bmatrix} M_{KJ,1y} \\ M_{KJ,2y} \\ \vdots \\ M_{KJ,my} \\ \vdots \\ M_{KJ,t-1,y} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

($K = I, II, \dots, N-I$)

また、荷重項 Q_{Jy}, S_{Jy} は式 (20), (21) より

$$Q_{Jy} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{J-1, J, y} \\ Q_{J, J, y} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad S_{Jy} = \begin{bmatrix} 0 \\ S_{J-1, J, y} \\ S_{J, J, y} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(25)$$

0 は、第 $J-1, J$ 行以外の成分が 0 であることを示す。

すなわち、

$$Q_{K, J, y} = S_{K, J, y} = 0 \quad (K \neq J-1, J)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{J-1, J, y} &= \begin{bmatrix} Q_{J-1, J, 1y} \\ Q_{J-1, J, 2y} \\ \vdots \\ Q_{J-1, J, t-1, y} \end{bmatrix}, & Q_{J, J, y} &= \begin{bmatrix} Q_{JJ, 1y} \\ Q_{JJ, 2y} \\ \vdots \\ Q_{JJ, t-1, y} \end{bmatrix} \\ S_{J-1, J, y} &= \begin{bmatrix} S_{J-1, J, 1y} \\ S_{J-1, J, 2y} \\ \vdots \\ S_{J-1, J, t-1, y} \end{bmatrix}, & S_{J, J, y} &= \begin{bmatrix} S_{JJ, 1y} \\ S_{JJ, 2y} \\ \vdots \\ S_{JJ, t-1, y} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(26)$$

$Q_{JJ, my}, S_{JJ, my}$ を式 (13) より求める。

単位集中荷重 $P_{Jy}=1$ に対して

$$\left. \begin{aligned} Q_{J-1, J, mnz} &= \xi_{J, m+1, n} - \left(z_{Jn} + \frac{b_{Jn}}{2} \right) \eta_{J, m+1, n} \\ Q_{JJ, mnz} &= -\xi_{Jmn} + \omega_{Jm} \phi_{Jmn} + \left(z_{Jn} + \frac{b_{Jn}}{2} \right) (\eta_{Jmn} - \omega_{Jm} \psi_{Jmn}) - \frac{\mu_{mn}}{6 EI_{Jn}} \left[z_{Jn}^2 (3 l_{Jn} - z_{Jn}) + \frac{3}{2} \omega_{Jn} z_{Jn}^2 \right] \\ S_{J-1, J, mnz} &= \phi_{J, m+1, n} - \left(z_{Jn} + \frac{b_{Jn}}{2} \right) \psi_{J, m+1, n} \\ S_{JJ, mnz} &= -\phi_{Jmn} + \left(z_{Jn} + \frac{b_{Jn}}{2} \right) \psi_{Jmn} + \frac{\mu_{mn}}{2 EI_{Jn}} z_{Jn}^2 \end{aligned} \right\} \quad (0 \leq z_{Jn} \leq l_{Jn}) \dots\dots\dots(32)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{J-1, J, my} &= y_{J, m+1, y} = \xi_{J, m+1, y} \\ Q_{JJ, my} &= -y_{J, my} + \omega_{Jm} \beta_{J, my} \\ &= -\xi_{J, my} + \omega_{Jm} \phi_{J, my} \\ S_{J-1, J, my} &= \beta_{J, m+1, y} = \phi_{J, m+1, y} \\ S_{JJ, my} &= -\beta_{J, my} = -\phi_{J, my} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(27)$$

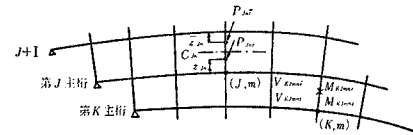
単位集中トルク $T_{Jy}=1$ に対して

$$\left. \begin{aligned} Q_{J-1, J, my} &= y_{J, m+1, y} = \eta_{J, m+1, y} \\ Q_{JJ, my} &= -y_{J, my} + \omega_{Jm} \beta_{J, my} \\ &= -\eta_{J, my} + \omega_{Jm} \psi_{J, my} \\ S_{J-1, J, my} &= \beta_{J, m+1, y} = \psi_{J, m+1, y} \\ S_{JJ, my} &= -\beta_{J, my} = -\psi_{J, my} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(28)$$

b) 荷重が横桁上に載荷された場合

図-5 に示すように、第 $[J, n]$ 横桁上に単位荷重 $P_{Jnz}, P_{Jn\bar{z}}$ が載荷された場合に、第 $[K, m]$ 横桁中央断面に生ずる断面力を V_{KJmnz}, M_{KJmnz} および $V_{KJm\bar{z}}, M_{KJm\bar{z}}$ で表わすことにする。

図-5 荷重が横桁上に載荷された場合の横桁断面力



すると式 (14) は、 P_{Jnz} に対しては、

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Jnz} \\ M_{Jnz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{Jnz} \\ S_{Jnz} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(29)$$

$P_{Jn\bar{z}}$ に対しては、

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Jn\bar{z}} \\ M_{Jn\bar{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{Jn\bar{z}} \\ S_{Jn\bar{z}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(30)$$

ここに、不定断面力 $V_{Jnz}, M_{Jnz}, V_{Jn\bar{z}}, M_{Jn\bar{z}}$ は式 (23), (24) に準ずる。

また、荷重項はつぎのようになる。

単位集中荷重 $P_{Jnz}=1$ に対して

$$Q_{Jnz} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{J-1, J, nz} \\ Q_{JJnz} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad S_{Jnz} = \begin{bmatrix} 0 \\ S_{J-1, J, nz} \\ S_{JJnz} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(31)$$

小行列は、式 (26) において $y=nz$ とおけば得られる。

小行列の成分は、

単位集中荷重 $P_{Jn\bar{z}}=1$ に対して

$$Q_{Jn\bar{z}} = \begin{pmatrix} 0 \\ Q_{JJn\bar{z}} \\ Q_{J+1,Jn\bar{z}} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad S_{Jn\bar{z}} = \begin{pmatrix} 0 \\ S_{JJn\bar{z}} \\ S_{J+1,Jn\bar{z}} \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(33)$$

小行列は式(26)において、 $y=n\bar{z}$ とおけばよい。また、その成分は、

$$\left. \begin{aligned} Q_{JJmn\bar{z}} &= \xi_{J+1,m+1,n} + \left(\bar{z}_{Jn} + \frac{b_{J+1,n+1}}{2} \right) \eta_{J+1,m+1,n} + \frac{\mu_{m+1,n}}{6EI_{Jn}} \left[\bar{z}_{Jn}^2 (3\bar{l}_{Jn} - \bar{z}_{Jn}) - \frac{3}{2} \omega_{Jn} \bar{z}_{Jn}^2 \right] \\ Q_{J+1,Jmn\bar{z}} &= -\xi_{J+1,mn} + \omega_{J+1,m} \phi_{J+1,mn} - \left(\bar{z}_{Jn} + \frac{b_{J+1,n+1}}{2} \right) (\eta_{J+1,mn} - \omega_{J+1,m} \psi_{J+1,mn}) \\ S_{JJmn\bar{z}} &= \phi_{J+1,m+1,n} + \left(\bar{z}_{Jn} + \frac{b_{J+1,n+1}}{2} \right) \psi_{J+1,mn} + \frac{\mu_{m+1,n}}{2EI_{Jn}} \bar{z}_{Jn}^2 \\ S_{J+1,Jmn\bar{z}} &= -\phi_{J+1,mn} - \left(\bar{z}_{Jn} + \frac{b_{J+1,n+1}}{2} \right) \psi_{J+1,mn} \end{aligned} \right\} \dots\dots(34)$$

$(0 \leq \bar{z}_{Jn} < \bar{l}_{Jn})$

(5) 横桁が欠けている場合

いま、第 $[K, m]$ 横桁が存在しないとすると、行列式(14)または(22)または(29)、(30)の各式は、次数が2だけ下がる。

次数を下げるには、つぎのようにする。 ↗

$$A = \begin{pmatrix} & & & & 0 \\ & & & & \\ & & & & \\ & & a_{K-1,K} & & \\ a_{K,K-1} & a_{K,K} & a_{K,K+1} & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & a_{K+1,K} & \\ & & & & \\ 0 & & & & \end{pmatrix}, \quad a_{KK} = \begin{pmatrix} a_{KK11} & a_{KK12} & \dots & a_{KK1m} & \dots & a_{KK1,t-1} \\ a_{KK21} & a_{KK22} & \dots & a_{KK2m} & \dots & a_{KK2,t-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{KKm1} & a_{KKm2} & \dots & a_{KKmm} & \dots & a_{KK,m,t-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{KKt-1,1} & a_{KKt-1,2} & \dots & a_{KKt-1,m} & \dots & a_{KKt-1,t-1} \end{pmatrix} \dots\dots(35)$$

B, C, D に対しても同様なことを行なう。
不静定断面力 V, M および荷重項 Q, S に対しては、添数 K を含む小行列、式(19)、(21)の第 m 行の成分 V_{Km}, M_{Km} および Q_{Km}, S_{Km} を消去して $(t-2)$ 次の列ベクトルとする。

$$\left. \begin{aligned} V_K &= \begin{pmatrix} V_{K1} \\ V_{K2} \\ \vdots \\ V_{Km} \\ \vdots \\ V_{Kt-1} \end{pmatrix}, \quad M_K = \begin{pmatrix} M_{K1} \\ M_{K2} \\ \vdots \\ M_{Km} \\ \vdots \\ M_{Kt-1} \end{pmatrix} \\ Q_K &= \begin{pmatrix} Q_{K1} \\ Q_{K2} \\ \vdots \\ Q_{Km} \\ \vdots \\ Q_{K,t-1} \end{pmatrix}, \quad S_K = \begin{pmatrix} S_{K1} \\ S_{K2} \\ \vdots \\ S_{Km} \\ \vdots \\ S_{K,t-1} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots(36)$$

影響線を求める場合にも、上と同様な操作を、式(24)、(26)に対して行なえばよい。

(6) 主桁の断面力および変形量

第 K 主桁の断面 x における断面力または変形量

係数行列、式(15)の A, B, C, D に対しては、添数 K を含む小行列、たとえば A については、 $a_{K,K-1}, a_{K,K+1}, a_{K,K}, a_{K-1,K}, a_{K+1,K}$ の5つの小行列の第 m 行と第 m 列を消去して、それらを $(t-2)$ 次の正方行列にする。

U_{Kx} 、単一化された第 K 主桁の断面 x での外力荷重による断面力または変形量を U_{Kx_0} とする。
しかるとき、 U_{Kx} は次式にて求められる。

$$U_{Kx} = U_{Kx_0} + \sum_{n=1}^t (V_{Kn} - V_{K-1,n-1}) \zeta_{K,xn} + \sum_{n=1}^t \left[(M_{Kn} - M_{K-1,n-1}) - \left(\frac{\omega_{Kn}}{2} V_{Kn} + \frac{\omega_{K-1,n-1}}{2} V_{K-1,n-1} \right) \right] \chi_{K,xn} \dots\dots(37)$$

ここに、
 $V_{Kt}, V_{K-1,0}, M_{Kt}, M_{K-1,0} = 0$
 ζ_{Kxn} : 第 K 主桁を単一連続曲線桁とした場合に、格点 n に作用する単位集中荷重 $P_{Kn}=1$ による任意断面 x における断面力または変形量
 χ_{Kxn} : 第 K 主桁を単一連続曲線桁とした場合に、格点 n に作用する単位集中トルク $T_{Kn}=1$ による任意断面 x における断面力または変形量
a) 主桁上に載荷された単位荷重による影響線 U_{KJxy} を第 J 主桁の断面 (J, y) に作用する単位荷

重により、第 K 主桁の断面 (K, x) に生ずる断面力または変形量とする。

単位集中荷重 $P_{Jy}=1$ に対して

$$U_{KJxy} = \mu_{KJ} \zeta_{Kxy} + \sum_{n=1}^t (V_{KJny} - V_{K-1, J, n-1, y}) \zeta_{Kxn} + \sum_{n=1}^t [(M_{KJny} - M_{K-1, J, n-1, y}) - (\frac{\omega_{Kn}}{2} V_{KJny} + \frac{\omega_{K-1, n-1}}{2} V_{K-1, J, n-1, y})] \times \chi_{Kxn} \dots\dots\dots(38)$$

単位集中トルク $T_{Jy}=1$ に対して

$$U_{KJxy} = \mu_{KJ} \chi_{Kxy} + \sum_{n=1}^t [(M_{KJny} - M_{K-1, J, n-1, y}) - (\frac{\omega_{Kn}}{2} V_{KJny} + \frac{\omega_{K-1, n-1}}{2} V_{K-1, J, n-1, y})] \times \chi_{Kxn} \dots\dots\dots(39)$$

ここに、

$$\mu_{KJ} = \begin{cases} 1 & (K=J) \\ 0 & (K \neq J) \end{cases}$$

b) 横桁上に荷重された単位荷重による影響線

U_{KJxnz} , $U_{KJxn\bar{z}}$ をそれぞれ P_{Jnz} , $P_{Jn\bar{z}}$ による第 K 主桁の断面 (K, x) に生ずる断面力または変形量とする。

単位集中荷重 $P_{Jnz}=1$ に対して

$$U_{KJxnz} = \mu_{KJ} \zeta_{Kxn} + \sum_{m=1}^t (V_{KJmnz} - V_{K-1, J, m-1, nz}) \zeta_{Kxm} - \mu_{KJ} (z_{Jn} + \frac{b_{Jn}}{2}) \chi_{Kxn} + \sum_{m=1}^t [(M_{KJmnz} - M_{K-1, J, m-1, nz}) - (\frac{\omega_{Km}}{2} V_{KJmnz} + \frac{\omega_{K-1, m-1}}{2} V_{K-1, J, m-1, nz})] \times \chi_{Kxm} \dots\dots\dots(40)$$

単位集中荷重 $P_{Jn\bar{z}}=1$ に対して

$$U_{KJxn\bar{z}} = \mu_{K, J+1} \zeta_{K, x, n+1} + \sum_{m=1}^t (V_{KJm\bar{n}z} - V_{K-1, J, m-1, n\bar{z}})$$

$$\times \zeta_{Kxm} + \mu_{K, J+1} (\bar{z}_{Jn} + \frac{b_{J+1, n+1}}{2}) \chi_{K, xn+1} + \sum_{m=1}^t [(M_{KJm\bar{n}z} - M_{K-1, J, m-1, n\bar{z}}) - (\frac{\omega_{Km}}{2} V_{KJm\bar{n}z} + \frac{\omega_{K-1, m-1}}{2} V_{K-1, J, m-1, n\bar{z}})] \times \chi_{Kxm} \dots\dots\dots(41)$$

3. 梯子型曲線格子箱桁橋

閉断面を有する主桁が等間隔に配列され、桁間隔に比し曲率半径が十分大きいと各主桁の曲率半径および支間長がほぼ等しいとみなされる場合の、曲線斜格子箱桁橋の計算式を導く。

a) 主桁間の断面力および変形量の関係

各主桁せん断中心軸上に荷重する集中荷重に対して、第 K, J 主桁の断面力および変形量を U_K, U_J とすると、曲線箱桁の実用計算式³⁾の表-1, 2 より a を比例定数として式 (42) のごとき関係式が成立する。

$$U_K = a U_J \dots\dots\dots(42)$$

この比例定数 a は主桁断面諸量で表わされ、表-1 のようになる。

ここで、 $\bar{R}=R$ とした。

b) 梯子型曲線格子箱桁橋

各主桁の変形量影響線の値が相互の間で式 (42) のごとき関係があるとき、格子桁の解析には 1 本の主桁の影響線のみを知らばよい。

本節では、一般に一番断面諸量の小さい最内側の主桁を基準にとり、つぎのパラメーターを用いる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_K &= \frac{R_K}{R_I}, \quad \nu_K = \frac{J_J}{J_K}, \\ \tau_K &= \left(\frac{1}{GJ_K} + \frac{1}{EI_{yK}} \right) / \left(\frac{1}{GJ_I} + \frac{1}{EI_{yI}} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(43)$$

各主桁の最内主桁に対する変形量影響線の比は、

表-1 主桁間の断面力および変形量

U	集 中 荷 重	集 中 ト ル ク
M_y	R_K/R_J	1
M_w	$[R^2/\alpha^2]_K/[R^2/\alpha^2]_J$	$[R/\alpha^2]_K/[R/\alpha^2]_J$
θ	$[R^3/GJ]_K/[R^3/GJ]_J$	$[R/GJ]_K/[R/GJ]_J$
β	$[R^3(\frac{1}{GJ} + \frac{1}{EI_y})]_K/[R^3(\frac{1}{GJ} + \frac{1}{EI_y})]_J$	$[R/GJ]_K/[R/GJ]_J$
δ	$[R^3/GJ]_K/[R^3/GJ]_J$	$[R^3(\frac{1}{GJ} + \frac{1}{EI_y})]_K/[R^3(\frac{1}{GJ} + \frac{1}{EI_y})]_J$
T_s	R_K/R_J	1
T_w	$[R/\alpha^2]_K/[R/\alpha^2]_J$	$[1/\alpha^2]_K/[1/\alpha^2]_J$
T	R_K/R_J	1
Q	1	0
\bar{Q}	1	$[1/R]_K/[1/R]_J$

$$\left. \begin{aligned} \xi_{Kmn}/\xi_{Imn} &= \rho^2 K \nu K, & \phi_{Kmn}/\phi_{Imn} &= \rho^2 K \gamma K \\ \eta_{Kmn}/\eta_{Imn} &= \rho^2 K \gamma K, & \psi_{Kmn}/\psi_{Imn} &= \rho K \nu K \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \text{主桁間隔と主桁フランジ幅が一定であるとする,} \\ & w_{Km} = w, \quad l_{Km} = \bar{l}_{Km} = d/2 \end{aligned} \quad (44)$$

となる。さらに最内主桁の影響線について、

となる。

$$\left. \begin{aligned} \xi_{Imn} &\equiv \xi_{mn}, & \phi_{Imn} &\equiv \phi_{mn}, \\ \eta_{Imn} &\equiv \eta_{mn}, & \psi_{Imn} &\equiv \psi_{mn} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} & \text{係数行列の各要素は式(12)に式(44), (45)を代入} \\ & \text{して次式をうる。} \end{aligned}$$

係数行列の各要素は式(12)に式(44), (45)を代入して次式をうる。

$$\left. \begin{aligned} a_{K,K-I,mn} &= -\rho K \nu K \left(\rho^2 K \xi_{m,n+1} - \frac{w^2}{2} \psi_{m,n+1} \right) + w \rho^2 K \gamma K \left(\phi_{m,n+1} - \frac{1}{2} \eta_{m,n+1} \right) \\ a_{KKmn} &= \rho^2 K + I \left(\rho_{K+I} \nu_{K+I} \xi_{m+1,n+1} + \frac{w}{2} \gamma_{K+I} \eta_{m+1,n+1} \right) + \rho K \nu K \left(\rho^2 K \xi_{mn} + \frac{w^2}{2} \psi_{mn} \right) \\ &\quad - w \rho^2 K \gamma K \left(\frac{1}{2} \eta_{mn} + \phi_{mn} \right) + \mu_{mn} \frac{d^3}{12 EI_{Km}} \\ a_{K,K+I,mn} &= -\rho^2 K + I \left(\rho_{K+I} \nu_{K+I} \xi_{m+1,n} - \frac{w}{2} \gamma_{K+I} \eta_{m+1,n} \right) \\ b_{K,K-I,mn} &= -\rho K (\rho K \gamma K \eta_{m,n+1} - w \nu K \psi_{m,n+1}) \\ b_{KKmn} &= \rho^2 K + I \gamma_{K+I} \eta_{m+1,n+1} + \rho K (\rho K \gamma K \eta_{mn} - w \nu K \psi_{mn}) - \mu_{mn} \frac{dw}{2 EI_{Km}} \\ b_{K,K+I,mn} &= -\rho^2 K + I \gamma_{K+I} \eta_{m+1,n} \\ c_{K,K-I,mn} &= -\rho K \left(\rho K \gamma K \phi_{m,n+1} + \frac{w}{2} \nu K \psi_{m,n+1} \right) \\ c_{KKmn} &= \rho K + I \left(\rho_{K+I} \gamma_{K+I} \phi_{m+1,n+1} + \frac{w}{2} \nu_{K+I} \psi_{m+1,n+1} \right) + \rho K \left(\rho K \gamma K \phi_{mn} - \frac{w}{2} \nu K \psi_{mn} \right) \\ c_{K,K+I,mn} &= -\rho K + I \left(\rho_{K+I} \gamma_{K+I} \phi_{m+1,n} - \frac{w}{2} \nu_{K+I} \psi_{m+1,n} \right) \\ d_{K,K-I,mn} &= -\rho K \nu K \psi_{m,n+1} \\ d_{KKmn} &= \rho_{K+I} \nu_{K+I} \psi_{m+1,n+1} + \rho K \nu K \psi_{mn} + \mu_{mn} \frac{d}{EI_{Km}} \\ d_{K,K+I,mn} &= -\rho_{K+I} \nu_{K+I} \psi_{m+1,n} \end{aligned} \right\} \quad (K = I, II, \dots, N-I; m, n = 1, 2, \dots, t-1) \quad (46)$$

4. 数値計算例

(1) 形状と寸法

図-6に示すような主桁が2本の箱桁からなる3径間連続曲線斜格子桁について、断面力と変形量の影響線を求めた。3つのスパンは、内桁、外桁ともその断面中心線(断面の図心をつらねた線)は同じ円弧をなしてお

り、それらは同じ中心角φを有している。

主桁断面形状および寸法は図-7に示すとおりである。

断面諸係数を、表-2に示す。

表-2 主桁断面諸係数

	内 桁	外 桁
断面2次モーメント	$I_y = 1.39477 \times 10 \text{ cm}^4$	$3.46297 \times 10 \text{ cm}^4$
ねじり抵抗	$J = 2.29858 \times 10 \text{ cm}^4$	$4.27467 \times 10 \text{ cm}^4$
曲げねじり抵抗	$C_w = 2.36145 \times 10^{-1} \text{ cm}^6$	4.43204 cm^6
$\alpha = R \sqrt{GJ/EC_w}$	2.00589×10^3	6.97880×10^2
縦弾性係数	$E = 4.52 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	内桁に同じ
せん断弾性係数	$G = 1.69 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	内桁に同じ

図-6 形状と格点・断面番号

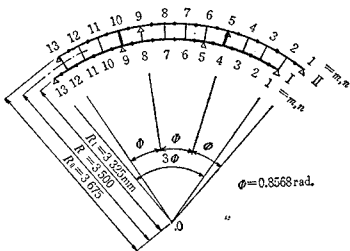
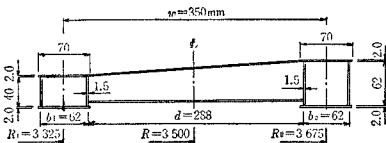


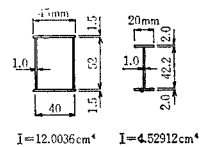
図-7 主桁断面寸法



横桁の断面は、第[I, 4], [I, 9]

横桁では箱型断面、他の横桁ではI型断面をなしている。その形状を図-8に示す。断面2次モーメントは中央断面での値である。

図-8 横桁断面寸法



支点での支持形式は、ボール支承を用いて両端支点では2点支持としてねじりに対して固定、中間支点では1点支持としてねじりに対して自由とした。

(2) 電子計算機による数値計算

数値計算には、電子計算機 Burroughs B-5500 を用

図-9 Flow Chart

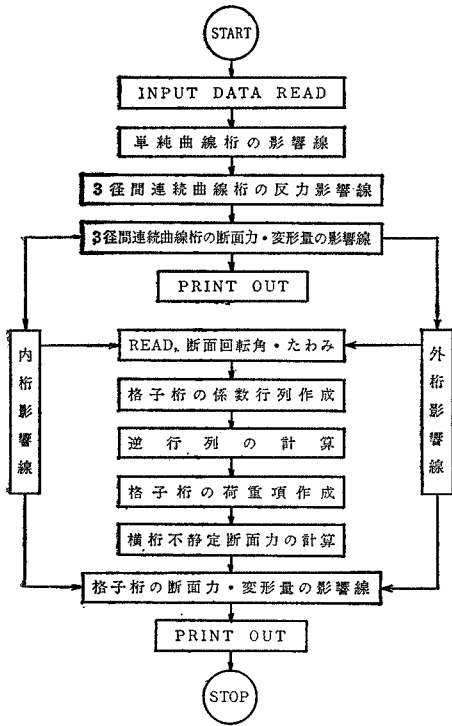


図-11 支点 B の曲げモーメント影響線

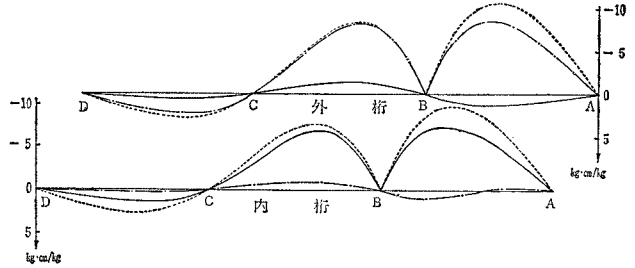


図-12 断面 E の曲げモーメント影響線

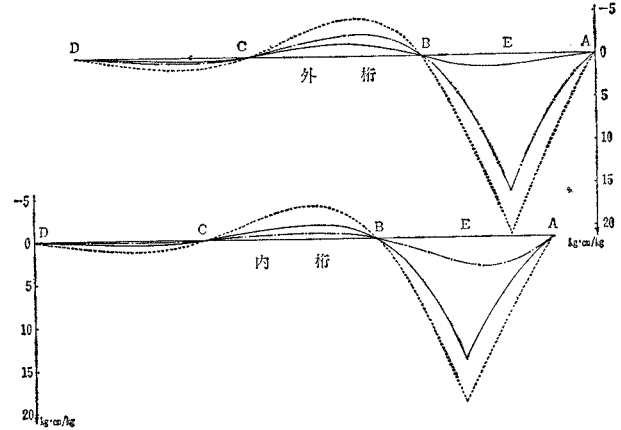


図-13 断面 F の曲げモーメント影響線

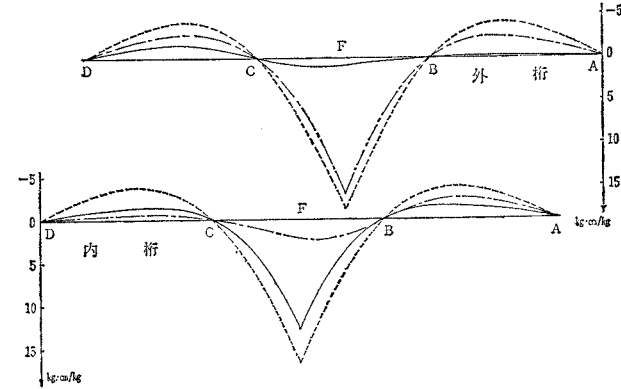
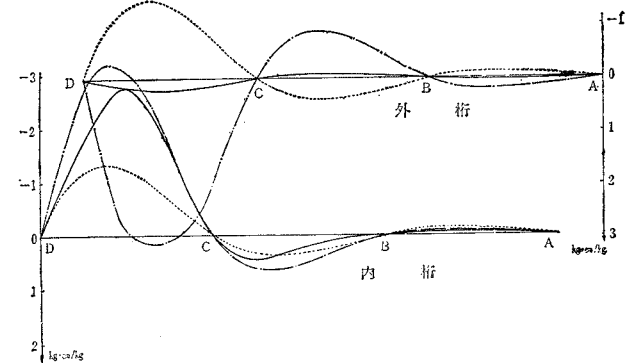


図-14 支点 D のねじりモーメント影響線



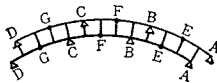
いた。Flow Chart は、つぎに示すとおりである。

(3) 計算結果

数値計算により、全格点の断面力および変形量の影響線と垂直応力分布図を求めたが、ここでは主要な断面力の影響線のみを図示する。反力と変形量の影響線および垂直応力分布図は実験値と比較するために次節で示す。

なお、図中に用いた記号は、つぎのとおりである。

図-10 断面の記号



- 主桁を単一連続曲線桁とした場合の単位集中荷重による影響線
- 単位集中荷重による格子桁内桁断面の影響線
- - - 単位集中荷重による格子桁外桁断面の影響線

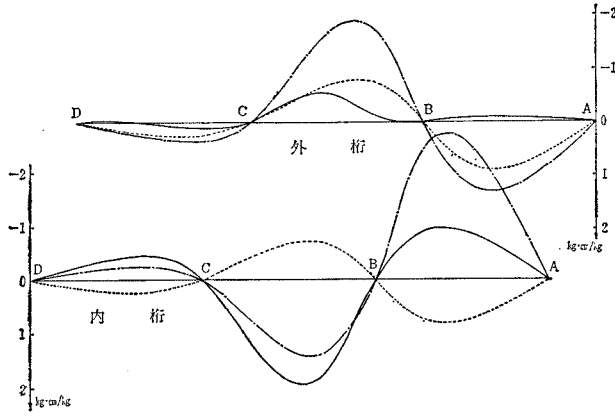


図-15 支点 B のねじりモーメント影響線

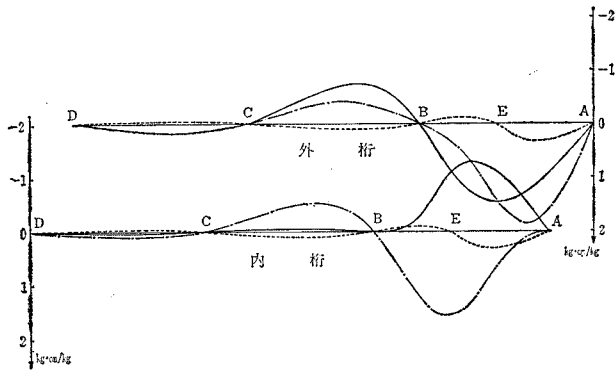


図-16 断面 E のねじりモーメント影響線

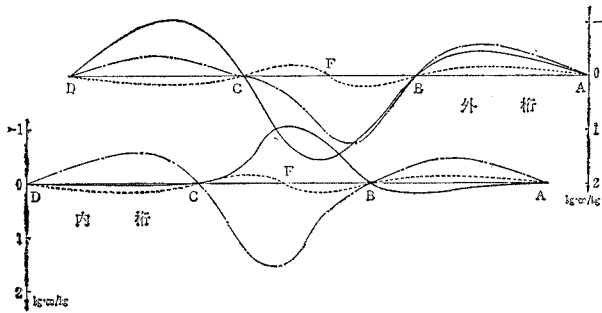


図-17 断面 F のねじりモーメント影響線

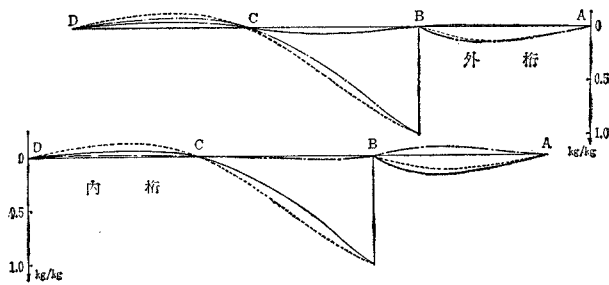


図-18 支点 B のせん断力影響線

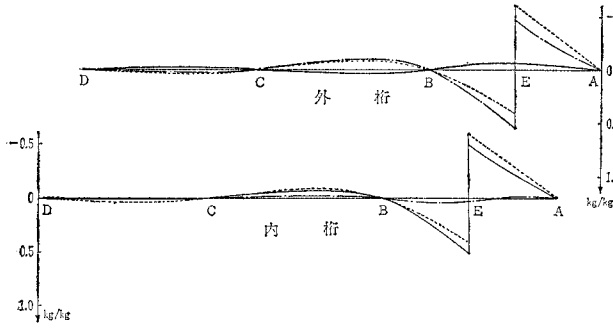


図-19 断面 E のせん断力影響線

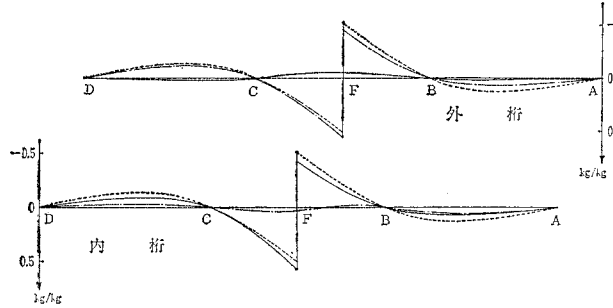


図-20 断面 F のせん断力影響線

5. 実験的研究

いままで述べてきた理論の妥当性を確認するために、モデルによる実験を行なった。

(1) 実験装置と実験手順

a) 試験体

試験体の形状および寸法は、前節の数値計算で扱ったモデルと同一である。材質はアクリライト樹脂を用いた。材料の機械的性質を知るために母材から試験片を製作し、材料試験を行なった。この種の高分子材料は温度に敏感なので、模型実験時の温度 14°C に温度補正を行なって、つぎの値を得た。

縦弾性係数 $E=4.52 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
 せん断弾性係数 $G=1.69 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

b) 支点構造

支点反力の測定には、圧縮型ロードセルを用いた。端支点では2個のロードセルを用いて2点支持とし、橋軸回りの回転を防いだ。中間支点では、どの方向に対しても回転できるように1点支持とした。

c) 試験体のすえつけ

12個のロードセルを同一水平面に設置することはきわめて困難なことから、ロードセルの下にモルタルを敷き、試験体をすえつけたあと全支点上に重量を付加して押え付けておいた。桁自重による自然沈下後、各支点到浮き上がりが生じなかったことは、モルタル硬化後の検査により確かめられた。連続桁においては、支点支持の良否が実験結果にきわめて大なる影響をおよぼすので、すえつけには慎重を期した。支点上に載荷した荷重

は逆反力を測定するためにも用いるので、実験中もそのまま載荷しておいた。

d) 荷重載荷方法

荷重はほぼ曲率半径方向のフランジ全幅にわたる線荷重とし、支点を除く全格点に載荷した。荷重の大きさは 20 kg とした。

e) 変形と垂直ひずみの測定

鉛直変化の測定にはダイヤルゲージを用い、各格点において両ウェブ真下のたわみを測定できるように設置した。一对の測定値の平均値をとってせん断中心（厳密には図心）のたわみを求めた。

垂直ひずみの測定は、ワイヤストレーンゲージによった。ゲージに発生するわずかな熱が試験体の不良熱伝導性のためになかなか発散せず、ダミーゲージとバランスするまでにかなりの時間を要した。また、クリープの影響も大きいので、載荷3分後から測定を行なった。

(2) 実験結果

実験から得た値を理論値と比較するために、前節で求めた影響線図および垂直応力分布図にプロットした。

a) 反力・たわみ影響線

図中に用いた記号は、前節と同じである。実験値は、内桁の値を○で、外桁の値を×で表わす。

b) 垂直応力分布図

記号は、荷重位置によって区別する。

すなわち、

- ……… 主桁を単一連続曲線桁とした場合の単位集中荷重による断面応力分布図
- 内桁に載荷された単位集中荷重による断面応

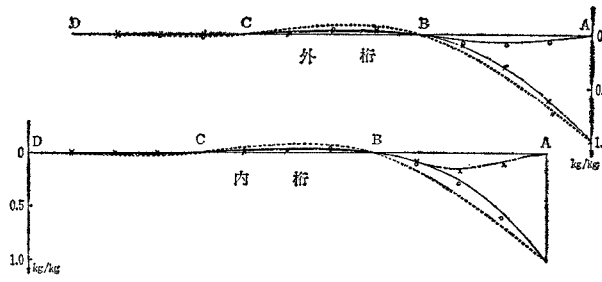


図-21 支点 A の反力影響線

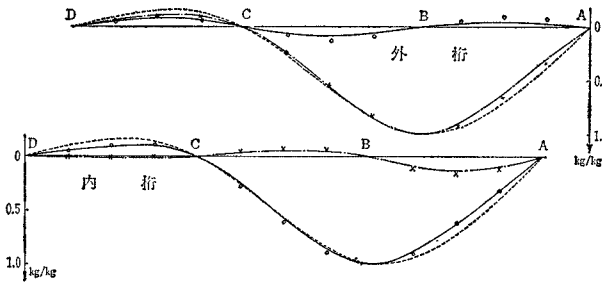


図-22 支点 B の反力影響線

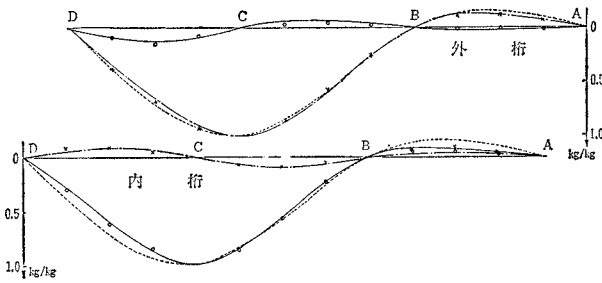


図-23 支点 C の反力影響線

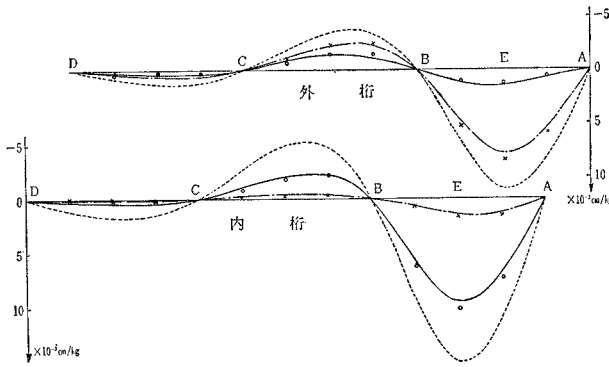


図-24 断面 E のたわみ影響線

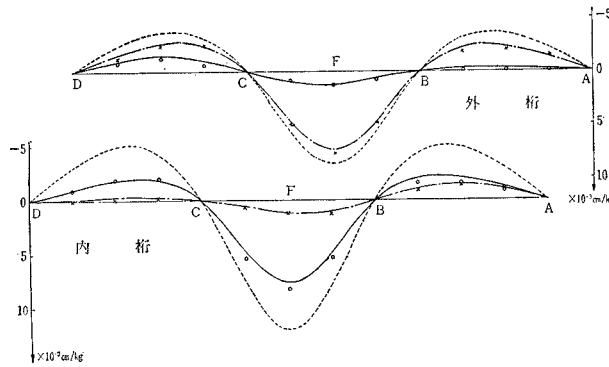


図-25 断面 F のたわみ影響線

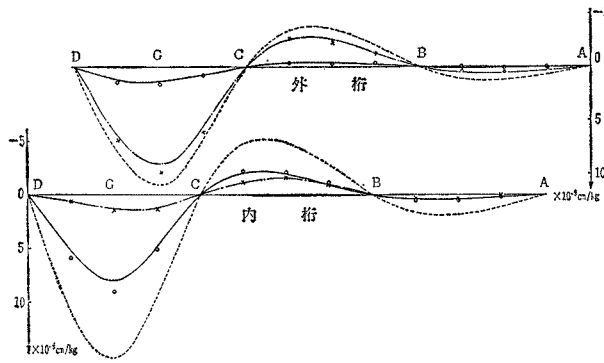


図-26 断面 G のたわみ影響線

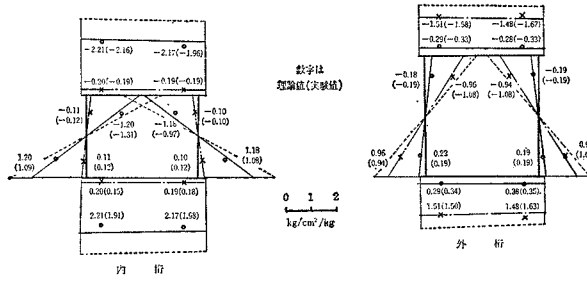


図-27 単位集中荷重が断面 E に載荷した場合の断面 E の垂直応力分布図

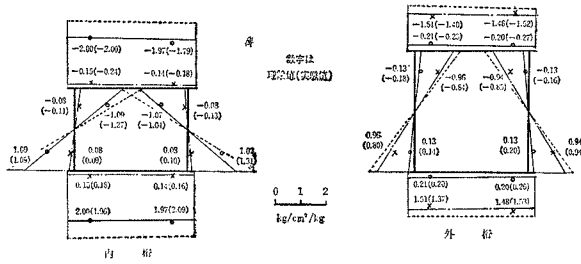


図-28 単位集中荷重が断面 F に載荷した場合の断面 F の垂直応力分布図

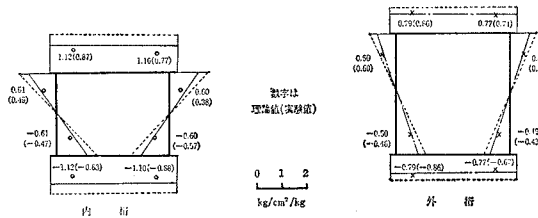


図-29 単位集中荷重が断面 E に載荷した場合の断面 B の垂直応力分布図

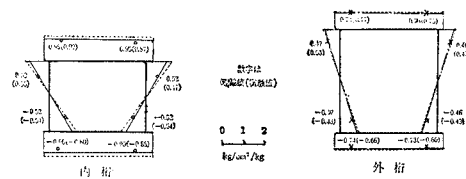


図-30 単位集中荷重が断面 F に載荷した場合の断面 B の垂直応力分布図

力の実験値と理論曲線
 ×—×— 外桁に載荷された単位集中荷重による断面応力の実験値と理論曲線

6. 結 言

以上の理論計算および実験結果から、斜支承を有する梯子型曲線格子桁では、つぎのことがいえる。

① 格子作用の影響は、内桁載荷の場合に大きく現われ、垂直応力度 σ およびたわみ δ では単一桁にくらべ最大 3~4 割減少する。

② 斜支承による影響は、載荷桁より非載荷桁において現われ、とくに、曲げモーメント M およびたわみ δ において著しく認められる。

③ 実験値は理論値とよく一致している。したがって、曲線桁の実用計算式は、実用上十分な精度を有するといえる。

④ この程度の格子桁橋の試算設計を行なう場合には、主桁を単一桁として計算すれば 2 割程度の余裕がある。

おわりに、本数値計算および実験は、川崎重工業杉野伊久男君（当時大学院学生）と、当時学生として卒業論文の研究にたずさわった現大阪市役所石岡英男君のご尽力に負うところ大であって、両君に対し感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 小松定夫・中井博・佐伯章美・加藤隆夫・川上博夫：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，昭和 39 年 8 月。
- 2) 小松定夫・大山 峰：主桁のねじり剛性を考慮した任意形状の格子桁の解法，土木学会論文集，第 134 号，昭和 41 年 10 月。
- 3) 小松定夫・林 正：曲線箱桁の実用計算式，土木学会論文集，第 152 号（研究ノート），昭和 43 年 4 月。

(1967.11.8・受付)