報　　告

黄 金 橋 の 設 計 に つ い て

——箱桁の曲げねじりによる垂直応力度の計算その他——

佐　藤　本　次　郎*
河　島　良　秀**

1. まえがき

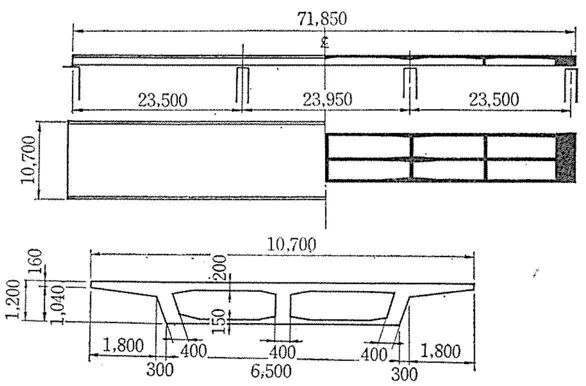
本橋は，新広島国道（国道2号線の広島市内のバイパス）に架設されたプレストレスト コンクリートの3径間連続箱桁橋である。

従来，箱桁を設計するうえで問題となっている内容のうち，本橋の設計ではつぎの項目について二，三の検討を加えてみたので，その結果についてのべてみたい。

1)　箱桁に荷重が偏心して作用するとき，桁には曲げと同時にねじりが生ずるが，このねじりにともなって垂直応力度とせん断応力度が新たに発生する。とくにこの垂直応力度は桁の構造形式，スパン，断面形状などによってかなり大きくなることもあるので，本橋の設計ではおおよその目安をつける程度の検討をしてみた。

2)　箱断面について横方向の検討をしたが，現場で簡単な応力測定を行なって計算値との比較をしてみた（図—1)。

図—1　橋 体 形 状 図



2. 偏心載荷による曲げねじりにともなう垂直応力度について

前述したように，曲げねじりにともなう垂直応力度は設計上無視できない場合がある。とくに，多室箱桁のような横方向に大きな断面の桁では，単純な曲げ応力度の20%に近いものとなる。本橋の設計では，偏心のない荷重による単純な曲げ応力度に対して，曲げねじりを考慮したときの合成応力度の増加率を求めた。

（1） 計 算 式

a)　基本方程式とその解　　単純ねじりおよび曲げねじりに関する基本方程式はつぎのようになる。

$$K\frac{d\varphi}{dx}-EC_w\frac{d^3\varphi}{dx^3}=m\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

φ：箱桁の断面xにおけるねじり角

m：荷重によるねじりモーメント

K：ねじり剛性

EC_w：曲げねじり剛性

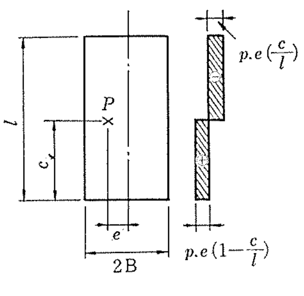
$$C_w=\int_F W^2\cdot t\cdot ds \qquad W_s;\ t;\ s \text{ は後述}$$

①　単純桁の場合

偏心した集中荷重pが支点からcの点に作用するとき（図—2）;

図—2

mの分布：



m の分布

$$0\leq x\leq c\cdots\cdots\cdots\cdots m=p\cdot e\left(1-\frac{c}{l}\right)$$

$$c<x<l\cdots\cdots\cdots\cdots m=p\cdot e\left(\frac{c}{l}\right)$$

ここで　$\dfrac{p\cdot e}{E\cdot C_w}=n\cdot\dfrac{K}{E\cdot C_w}=\alpha^2$ とおくと

境界条件　$(x=0\cdot x=l)$ で　$\varphi=0,\ \dfrac{d^2\varphi}{dx^2}=0$

を満足する解 φ および $\dfrac{d\varphi}{dx}\cdot\dfrac{d^2\varphi}{dx^2}$ は，つぎのようになる。

* 建設省中国地建広島国道工事事務所調査設計課長
** ピー・エス・コンクリート（株）大阪営業所

$0 \leq x \leq c$

$$\varphi=-\frac{n\sinh\alpha(l-c)}{\alpha^3\cdot\sinh\alpha l}\cdot\sinh\alpha\cdot x+\frac{n}{\alpha^2}x\left(1-\frac{c}{l}\right) \quad \cdots\cdots(2)$$

$$\frac{d\varphi}{dx}=-\frac{n\cdot\sinh\alpha(l-c)}{\alpha^2\sinh\alpha\cdot l}\cdot\cosh\alpha x+\frac{n(l-c)}{\alpha^2\cdot l} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=-\frac{n\cdot\sinh\alpha(l-c)}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}\cdot\sinh\alpha x \quad \cdots\cdots(4)$$

$c < x < l$

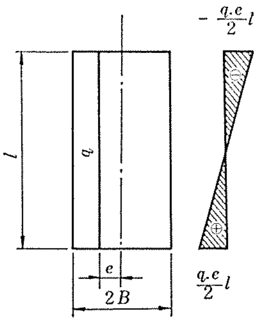
$$\varphi=\frac{n\cdot\sinh\alpha(l-x)}{\alpha^3\sinh\alpha\cdot l}\cdot\sinh\alpha c+\frac{n}{\alpha^2}c\left(1-\frac{x}{l}\right) \quad \cdots\cdots(5)$$

$$\frac{d\varphi}{dx}=\frac{n\sinh\alpha\cdot c}{\alpha^2\cdot\sinh\alpha\cdot l}\cdot\cosh\alpha(l-x)-\frac{nc}{\alpha^2\cdot l} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{n\sinh\alpha\cdot c}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}\sinh\alpha(l-x) \quad \cdots\cdots(7)$$

偏心線荷重 q が全径間にわたって作用するとき（図—3）;

図—3



m の分布

$$0 < x < \frac{l}{2} \cdots\cdots m=\frac{q\cdot e}{2}l\left(1-\frac{2x}{l}\right)$$

$$\frac{l}{2} < x \leq l \cdots\cdots m=\frac{q\cdot e}{2}l\left(1-\frac{2x}{l}\right)$$

ここで $\dfrac{\frac{q\cdot e}{2}\cdot l}{EC_w}=\eta \quad \dfrac{K}{E\cdot C_w}=\alpha^2$ とおいて

境界条件を満足する解 φ および $\dfrac{d\varphi}{dx}\ \dfrac{d^2\varphi}{dx^2}$ を求める。

$$\varphi=\frac{2\cdot\eta}{\alpha^4 l\sinh\alpha\cdot l}[\sinh\alpha x+\sinh\alpha(l-x)-\sinh\alpha\cdot l]+\frac{\eta}{\alpha^2}\left(x-\frac{x^2}{l}\right) \quad \cdots\cdots(8)$$

$$\frac{d\varphi}{dx}=\frac{2\eta}{\alpha^3 l\sinh\alpha\cdot l}[\cosh x-\cosh\alpha(l-x)]+\frac{\eta}{\alpha^2}\left(1-\frac{2x}{l}\right) \quad \cdots\cdots(9)$$

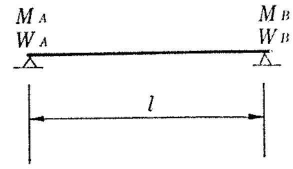
$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{2\eta}{\alpha^2 l\sinh\alpha\cdot l}[\sinh\alpha\cdot x+\sinh\alpha(l-x)] \quad \cdots\cdots(10)$$

② 連続桁の場合

中間支点上で桁を切断し，この断面で支点モーメント（M_A, M_B）とそり（W_A, W_B）を作用させる。M_A・M_B ではねじりモーメントが生じないので，曲げについては，桁理論が適用される。

また，W_A・W_B とつり合うような静定基本系の支点ねじりモーメント m_B が作用するときの解はつぎのようになる（図—4）。

図—4



$$\varphi=T+U\sinh\alpha\cdot x+V\cosh\alpha\cdot x+\frac{m_B}{\alpha^2\cdot EC_w}x \quad \cdots\cdots(11)$$

境界条件

$$\left[x=0\cdot x=l \text{ において } \varphi=0,\ \frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{W_A}{E\cdot C_w},\ \frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{W_B}{E\cdot C_w}\right]$$

から W_A, W_B で φ, $\dfrac{d\varphi}{dx}$, $\dfrac{d^2\varphi}{dx^2}$ を表わすとつぎのようになる。

$$\varphi=\frac{1}{\alpha^2 EC_w}\left[W_A\left\{\frac{\sinh\alpha\cdot x}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l-x}{l}\right\}+W_B\left(\frac{\sinh\alpha\cdot x}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{x}{l}\right)\right] \quad \cdots\cdots(12)$$

$$\frac{d\varphi}{dx}=\frac{1}{\alpha^2 EC_w}\left[W_A\left\{-\alpha\frac{\cosh\alpha(l-x)}{\sinh\alpha\cdot l}+\frac{1}{l}\right\}+W_B\left\{\alpha\frac{\cosh\alpha x}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right\}\right] \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2}=\frac{1}{\alpha^2 EC_w}\cdot\left[W_A\cdot\frac{\alpha^2\sinh\alpha(l-x)}{\sinh\alpha\cdot l}+W_B\cdot\frac{\alpha^2\sinh\alpha x}{\sinh\alpha\cdot l}\right] \quad \cdots\cdots(14)$$

おのおのの荷重による部材端のそりは，つぎのようになる。

偏心集中荷重による；

$$w_{pA}=\frac{W_s}{K}p\cdot e\left[-\frac{\sinh\alpha(l-c)}{\sinh\alpha\cdot l}+\left(1-\frac{c}{l}\right)\right] \quad \cdots\cdots(15)$$

$$w_{pB}=\frac{W_s}{K}p\cdot e\left[\frac{\sinh\alpha\cdot c}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{c}{l}\right] \quad \cdots\cdots(16)$$

偏心線荷重による；

$$w_{q\cdot A}=\frac{W_s}{K}q\cdot e\left[\frac{1-\cosh\alpha\cdot l}{\alpha\cdot\sinh\alpha\cdot l}+\frac{l}{2}\right] \quad \cdots\cdots(17)$$

$$w_{qB}=\frac{W_s}{K}q\cdot e\left[\frac{\cosh\cdot\alpha l-1}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right] \quad \cdots\cdots(18)$$

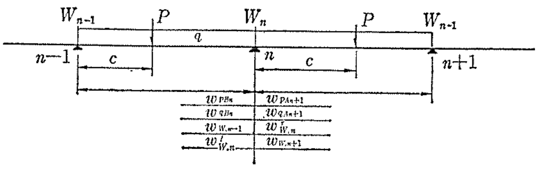
不静定そり W_A, W_B によるもの；

$$w_{WA}=\frac{W_s}{K}\left[-W_A\left(\alpha\frac{\cosh\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right)+W_B\left(\alpha\frac{1}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right)\right]\cdots\cdots(19)$$

$$w_{WB}=\frac{W_s}{K}\left[-W_B\left(\alpha\frac{1}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right)+W_B\left(\alpha\frac{\cosh\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right)\right]\cdots\cdots(20)$$

サフィックスを 図―5 のように書きかえると，各荷重によるn点のそりは，つぎのようになる。

図―5



$$w_{pBn}=\frac{W_s}{K_n}p\cdot e\left[-\frac{\sinh\alpha_n\cdot c}{\sinh\alpha_n\cdot l_n}-\frac{c}{l_n}\right]\cdots\cdots(21)$$

$$w_{qBn}=\frac{W_s}{K_n}\,q\cdot e\left[\frac{\cosh\alpha_n\cdot l_n}{\alpha_n\cdot\sinh\alpha_n\cdot l_n}+\frac{l_n}{2}\right]\cdots\cdots(22)$$

$$w_{pA\cdot n+1}=\frac{W_s}{K_{n+1}}p\cdot e\left[-\frac{\sinh\alpha_{n+1}\cdot(l_{n+1}-c)}{\sinh\alpha_{n+1}\cdot l_{n+1}}+\left(1-\frac{c}{l_{n+1}}\right)\right]\cdots(23)$$

$$wq_{A\cdot n+1}=\frac{W_s}{K_{n+1}}\cdot q\cdot e\left[\frac{\cosh l_{n+1}-1}{\alpha_{n+1}\cdot\sinh\alpha_{n+1}\cdot l_{n+1}}-\frac{l_{n+1}}{2}\right]\cdots\cdots(24)$$

$$w_{Wn-1}=\frac{W_s}{K_n}\left[-W_{n-1}\left(\alpha_n\cdot\frac{1}{\sinh\alpha_n\cdot l_n}-\frac{1}{l_n}\right)\right]\cdots\cdots(25)$$

$$w_{Wn}{}^r=\frac{W_s}{K_n}\left[W_n\left(\alpha_n\cdot\frac{\cosh\alpha_n\cdot l_n}{\sinh\alpha_n\cdot l_n}-\frac{1}{l_n}\right)\right]\cdots\cdots(26)$$

$$w_{Wn}{}^l=\frac{W_s}{K_{n+1}}\left[W_n\left(\alpha_{n+1}\cdot\frac{\cosh\alpha_{n+1}\cdot l_{n+1}}{\sinh\alpha_{n+1}\cdot l_{n+1}}-\frac{1}{l_{n+1}}\right)\right]\cdots\cdots(27)$$

$$w_{Wn+1}=\frac{W_s}{K_{n+1}}\left[W_{n+1}\cdot\left(\alpha_{n+1}\cdot\frac{1}{\sinh\alpha_{n+1}\cdot l_{n+1}}-\frac{1}{l_{n+1}}\right)\right]\cdots\cdots(28)$$

ここで

$$\left.\begin{aligned}w_{Wn-1}&=W_sW_{n-1}\cdot\mu_{n\cdot n+1}\\ w_{Wn}{}^r+w_{Wn}{}^l&=W_sW_n\mu_{n\cdot n}\\ w_{Wn-1}&=W_sW_{n+1}\mu_{n\cdot n+1}\end{aligned}\right\}\text{とする}\cdots\cdots(29)$$

n支点上の左右のそりが等しくなる条件から次式を得る。

$$W_s(W_{n-1}\cdot\mu_{n\cdot n-1}+W_n\cdot\mu_{n\cdot n}+W_{n+1}\mu_{n\cdot n+1})+(w_{pBn}+w_{qBn})-(w_{pAn+1}+w_{qAn+1})=0$$

いま

$$(w_{pBn}+w_{qBn})-(w_{pAn+1}+w_{qAn+1})/W_s=\mu_{sn}\cdots\cdots(30)$$

とおけば

$$W_{n-1}\mu_{n-1}+W_n\mu_{n\cdot n}+W_{n+1}\cdot\mu_{n\cdot n+1}+\mu_{sn}=0\cdots\cdots(31)$$

これは支点上のそり W_n を求める3連方程式で，3連モーメントの式と同一形式である。

W_{n-1}, W_n が求まれば，$n-1$, n 支点間の任意断面における φ, $\frac{d\varphi}{dx}$, $\frac{d^2\varphi}{dx^2}$ を求めることができる。

b) 曲げねじりによる垂直応力の計算　断面内の一点 (s) のそり w_s のスパン方向の変化により生ずる垂直応力 σ_w はつぎのようになる。

$$\sigma_w=E\frac{\partial w_s}{\partial x}=EW_s\frac{d^2\varphi}{dx^2}\cdots\cdots(32)$$

$$W_s=\frac{w_s}{\dfrac{d\varphi}{dx}}=-\int_0^s r_sd_s+\int_0^s\frac{\tilde{q}}{t}ds$$

s：薄肉断面の薄肉中心線に沿う曲線座標

w_s：薄肉断面内の一点 (s) のそり

W_s：薄肉断面内の一点 (s) のそり関数

r_s：ねじり中心から断面肉厚中心線に下した垂線の長さ

$\tilde{q}$：ねじり関数$\left(=\dfrac{q}{\dfrac{d\varphi}{dx}G},\ q:\text{St Venant のねじりせん断流}\right)$

断面のそり関数 W_s が求められておれば，断面の一点のそり W と組合せて σ_w は求められる。

$$W=EC_w\frac{d^2\varphi}{dx^2}\cdots\cdots(33)$$

$$\therefore\quad\sigma_w=EW_s\frac{d^2\varphi}{dx^2}=EW_s\frac{W}{EC_w}=W_s\cdot\frac{W}{C_w}\cdots(34)$$

① 単純桁について

偏心集中荷重の場合

$0<x\leq c$ の場合式 (4) から

$$W=-\frac{p\cdot e\sinh\alpha(l-c)}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}\cdot\sinh\alpha\cdot x\cdots\cdots(35)$$

$c<x\leq l$ の場合式 (7) から

$$W=-\frac{p\cdot e\sinh\alpha\cdot c}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}\cdot\sinh\alpha(l-x)\cdots\cdots(36)$$

偏心線荷重の場合，式 (10) から，

$$W=\frac{q\cdot e}{\alpha^2\sinh\alpha\cdot l}\{\sin\alpha\cdot x+\sinh\alpha(l-x)\}-\frac{q\cdot e}{\alpha^2}\cdots\cdots(37)$$

② 連続桁について

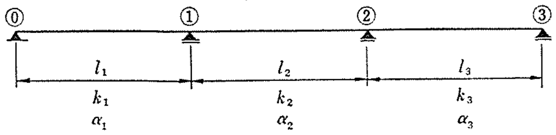
式 (14) から，

$$W=W_{n-1}\frac{\sinh\alpha_n(l_n-x)}{\sinh\alpha_n\cdot l_n}+W_n\cdot\frac{\sinh\alpha_n\cdot x}{\sinh\alpha_n\cdot l_n}\cdots\cdots(38)$$

（2） 3 径間連続桁についての計算例

等径間で等断面であると仮定する（図—6)。

図—6



$$K_1=K_2=K_3=K \qquad l_1=l_2=l_3=l$$

$$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha$$

よって

$$\mu_{1.0}=\frac{1}{K}\left[\frac{1}{l}-\frac{\alpha}{\sinh\alpha\cdot l}\right]$$

$$\mu_{1.1}=\frac{2}{K}\left[\frac{\alpha\cos\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-\frac{1}{l}\right]=\mu_{2.2}$$

$$\mu_{1.2}=\frac{1}{K}\left[\frac{1}{l}-\frac{\alpha}{\sinh\alpha\cdot l}\right]=\mu_{2.1}=\mu_{2.3}$$

両端支点（0, 3）においてそりは自由であるから，$W_0=W_3\equiv 0$ である。よって式（31）は，

$$\left.\begin{aligned}W_1\cdot\mu_{1.1}+W_2\cdot\mu_{1.2}+\mu_{s1}=0\\ W_1\cdot\mu_{2.1}+W_2\cdot\mu_{2.2}+\mu_{s2}=0\end{aligned}\right\}$$

上式より

$$W_1=\frac{\mu_{s1}\cdot\mu_{2.2}+\mu_{s2}\cdot\mu_{1.2}}{\mu_{1.1}\cdot\mu_{2.2}-\mu_{2.1}\cdot\mu_{1.2}}$$

$$W_2=\frac{\mu_{s1}\cdot\mu_{2.1}-\mu_{s2}\cdot\mu_{1.1}}{\mu_{1.1}\cdot\mu_{2.2}-\mu_{2.1}\cdot\mu_{1.2}}$$

第1径間任意点のそり。

$$W=W_1\frac{\sinh\alpha\cdot x}{\sinh\alpha\cdot l}$$

第2径間任意点のそり

$$W=W_1\frac{\sinh\alpha(l-x)}{\sinh\alpha\cdot l}+W_2\frac{\sinh\alpha\cdot x}{\sinh\alpha\cdot l}$$

a） 中間支点断面

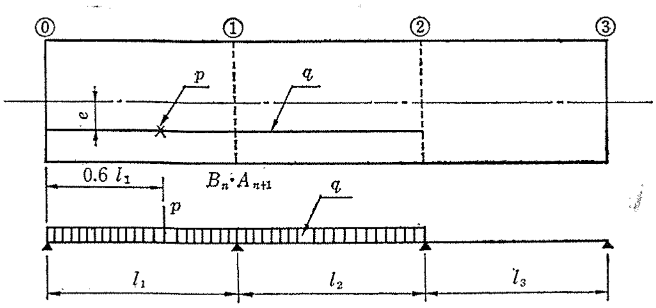
中間支点断面に最大曲げモーメントを与える載荷状態として，第1，第2径間に載荷する（図—7)。

μ_{s1}, μ_{s2} を計算する。

p－荷重； $$w_{pB.1}=\frac{W_s}{K}p\cdot e\left(\frac{\sinh 0.6\,\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-0.6\right)$$

q－荷重； $$w_{qB.1}=\frac{W_s}{K}q\cdot e\left(\frac{\cosh\alpha\cdot l-1}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right)$$

図—7



$$w_{qA.2}=\frac{W_s}{K}q\cdot e\left(\frac{1-\cosh l}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}+\frac{l}{2}\right)$$

$$w_{qB.2}=\frac{W_s}{K}q\cdot e\left(\frac{\cosh\alpha\cdot l-1}{\alpha\cdot\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right)$$

よって式（30）より

$$\begin{aligned}\mu_{s1}&=\frac{p\cdot e}{K}\left(\frac{\sinh 0.6\,\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-0.6\right)\\&\quad+\frac{p\cdot e}{K}\left(\frac{\cosh\alpha\cdot l-1}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right)\\&\quad-\frac{q\cdot e}{K}\left(\frac{1-\cosh\alpha\cdot l}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}+\frac{l}{2}\right)\\&=\frac{p\cdot e}{K}\left(\frac{\sinh 0.6\,\alpha\cdot l}{\sinh\alpha\cdot l}-0.6\right)\\&\quad+\frac{2\,pe}{K}\left(\frac{\cosh\alpha\cdot l-1}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right)\end{aligned}$$

$$\mu_{s2}=\frac{q\cdot e}{K}\left(\frac{\cosh\alpha\cdot l-1}{\alpha\sinh\alpha\cdot l}-\frac{l}{2}\right)$$

$l=23.50$ m, $\alpha=0.418$, $\alpha l=9.84$, $e^{\alpha\cdot l}=18\,769.98$, $e^{-\alpha\cdot l}=0.000\,053\,75$, $\sinh\alpha\cdot l=\cosh\alpha\cdot l=9\,384.99$

$$\mu_{11}=\mu_{22}=\frac{2}{K}\left[\frac{0.418\times 9\,384.99}{9\,384.99}-\frac{1}{23.50}\right]=\frac{0.751}{K}$$

$$\mu_{12}=\mu_{21}=\frac{1}{K}\left[\frac{1}{23.50}-\frac{0.418}{9\,384.99}\right]=\frac{0.04251}{K}$$

$$\sinh 0.6\,\alpha\cdot l=\sinh 5.90=182.52$$

$$\begin{aligned}\mu_{s1}&=\frac{p\cdot e}{K}\left(\frac{182.52}{9\,384.99}-0.6\right)\\&\quad+\frac{2\,p\cdot e}{K}\left(\frac{9\,384.99-1}{0.418=9\,384.99}-\frac{23.50}{2}\right)\\&=\frac{e}{K}[-0.58055\,p-18.716\,q]\end{aligned}$$

$$\mu_{s2}=\frac{q\cdot e}{K}(2.392-11.750)=\frac{e}{K}[-9.358\,p]$$

$$\mu_{11}\cdot\mu_{22}-\mu_{12}\cdot\mu_{21}=\frac{1}{K^2}(0.5640-0.0018)=\frac{0.5622}{K^2}$$

$q=p\times 0.07$ とすると，

$$\mu_{s1}=-\frac{e}{K}(0.51944+1.3571)p=-1.8765\frac{p\cdot e}{K}$$

$$\mu_{s2}=-0.6551\frac{p\cdot e}{K}$$

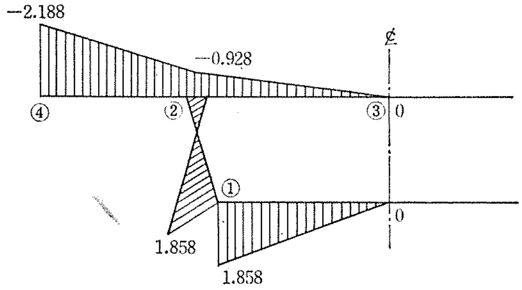
$$\begin{aligned}-\mu_{s1}\cdot\mu_{22}+\mu_{s2}\cdot\mu_{12}&=1.8765\frac{p\cdot e}{K}\cdot\frac{0.751}{K}\\&\quad-0.6551\frac{p\cdot e}{K}\cdot\frac{0.04251}{K}=1.3815\frac{p\cdot e}{K^2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_{s1}\cdot\mu_{21}-\mu_{s2}\cdot\mu_{11}&=-1.8765\frac{p\cdot e}{K}\cdot\frac{0.04251}{K}\\&\quad+0.6551\frac{p\cdot e}{K}\cdot\frac{0.751}{K}=0.41122\frac{p\cdot e}{K^2}\end{aligned}$$

$$W_1=\frac{1.3815}{0.5622}\cdot p\cdot e=2.455\,p\cdot e,$$

$$W_2=\frac{0.4112}{0.5622}\cdot p\cdot e=0.7325\,p\cdot e$$

図—8　W_s（そり関数）の分布



曲げねじりによる軸方向応力度

$C_w=4.868$ とすると（スパン中央と同一値）第1中間支点断面で σ_w は

$$\sigma_w=W_s\frac{2.455}{4.868}p\cdot e=0.5044\,p\cdot e\cdot W_s$$

上縁張出部端について　$W_s=2.188$

$$\sigma_w{}^0=\pm 0.5044\times 2.188\,p\cdot e=\pm 1.104\,p\cdot e$$

下縁隅角部について　$W_s=1.858$

$$\sigma_w{}^u=\pm 0.5044\times 1.858\,p\cdot e=\pm 0.935\,p\cdot e$$

また，桁理論による単純な曲げ応力度はつぎのようになる。

$$M=-0.1624\,l_1-0.1167\,pl_1{}^2=-6.923\,p$$

$$\sigma_0{}^0=\frac{M}{Z^0}=\frac{-6.923\,p}{1.76}=-3.93\,p,$$

$$\sigma_0{}^u=\frac{M}{Z^u}=\frac{-6.923\,p}{1.12}=+6.18\,p$$

よって合成応力度の横方向の分布はつぎのようになる。

上縁張出端　$\sigma_e{}^0=(-3.93\pm 1.104\cdot e)p$

下縁隅角部　$\sigma_e{}^u=(6.18\pm 0.935\cdot e)p$

単純な曲げ応力度に対する増加率（η）はつぎのようになる。

$$\eta=\Sigma A_{①}/\Sigma A_{②}$$

ここで $\Sigma A_{①}$ は 図—**9**（**a**）に示すようにねじりを考慮したときの合成応力度を表わすものであり，$\Sigma A_{②}$ は単純な曲げだけを考慮したときの応力度を表わす。この例では，支点上断面の上縁張出部で $\eta=1.183$，すなわち，曲げだけの応力度の 18.3% 増しとなる。図—**9**（**b**）で支点上断面の下縁隅角部については 12.3% 増しとなる。

同じ方法で各径間の中央で計算したが，その結果は 表—**1** に示すとうりである。

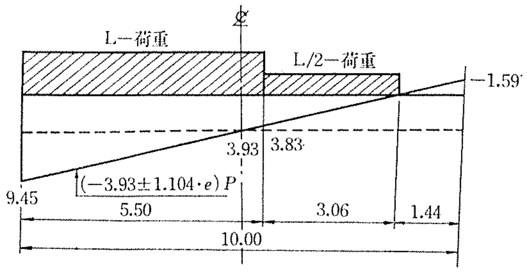
3．断面の横方向の検討について

箱桁では，横方向についても断面検討をしなければならない。上スラブについては版としての断面力の算定方法があるが，上スラブ以外の部材の断面力を算出するには，いろいろと不明確な問題がある。

表—1　単純曲げ応力度に対する増加率（%）

	第1径間 $0.4\,l_1$	中間支点	第2径間 $0.5\,l_2$
上縁張出端部	11.6	18.3	14.4
下縁隅角部	6.4	12.3	7.6

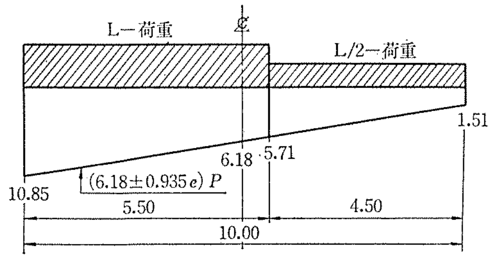
図—9（a）　上縁張出部に関する合成応力度の影響線



$$\Sigma A_{①}=\frac{5.50}{2}\times(9.45+2.88)+\frac{1}{2}\times 3.06\times 2.88\times\frac{1}{2}$$
$$=36.1$$

$$\Sigma A_{②}=5.50\times 3.93+\frac{4.50}{2}\times 3.93=30.5$$

図—9（b）　下縁隅角部に関する合成応力度の分布



$$\Sigma A_{①}=\frac{5.50}{2}(10.85+5.71)+\frac{1}{2}\times\frac{4.50}{2}\times(5.71+1.51)$$
$$=53.7$$

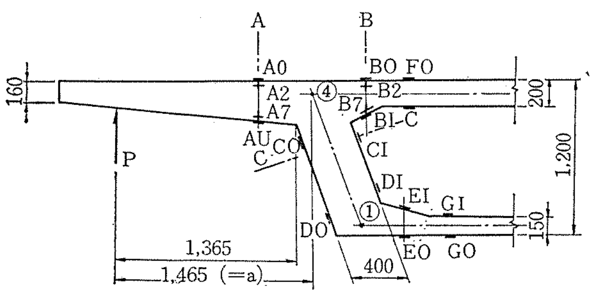
$$\Sigma A_{②}=5.50\times 6.18+\frac{4.50}{2}\times 6.18=47.8$$

一般的に，スラブ以外の部材で，どうしても検討をしておかなければならないのが，ウェブの上部断面（上スラブとの取付部（図—**10**　C-断面）である。

そして，その断面力は張出しスラブ上の荷重による影響が最も大きくなる場合が多い。

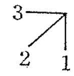
そこで，本橋の設計では，断面を各ウェブの直下で単純に支持した一様な幅をもつラーメンとみなし，張出しスラブによる曲げモーメントを取付部の節点に作用させ

図—10



— ポリエステルゲージ
+ モールドゲージ

平面には，3軸として｛A0．B0に各6組（載荷中心線から50cm間隔）
C1．C0に各3組
他は3軸1組　1軸2組｝
を配置した。



で各部材に生ずる断面力を求めた。しかし，同一断面内でも荷重の分布状態が異なるので，一様な幅をもつラーメンとみなすことはできず，さらにラーメンの拘束状態も，この仮定のように単純なものとは考えられない。

そこでこのような仮定で算出した断面力と実際に生ずる断面力を比べるための実験をしてみた。実験では，上スラブとウェブの取付部に主眼をおいて，張出しスラブの曲げモーメントの伝達状態を調べた。

（1）計 算 方 法

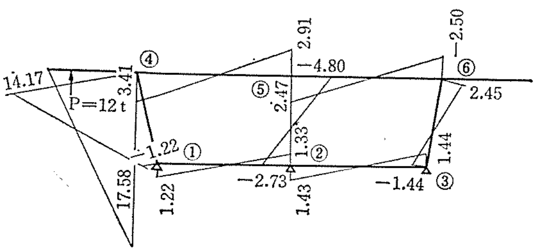
従来張出しスラブに生ずる曲げモーメント M（単純幅当り）の算出にはいくつかの方法があり，実際値に近いものを算出することができる。したがって，本橋の設計では，この張出しスラブの曲げモーメント M(t·m/m) を 図—**11** のようなラーメン（単位幅 1m）に作用させて各部材の断面力を求めた。

実験では 図—**10** のように p を a なるスパンで作用させた。いま仮りに $M=p\cdot a$ を単位幅 1m のラーメンに作用させると曲げモーメントの分布は 図—**11** のようになる。

（2）実　　験

1）張出しスラブに鉛直上向きの荷重をジ

図—11



ャッキによって加え，あらかじめ貼布しておいたゲージに生ずるひずみを測定した。

2）載荷点の位置は 図—**10** に示すとおりで，荷重段階は，2t, 4t, 8t, 12t, 8t, 4t, 2t, 0t とした。

3）ゲージはポリエステルゲージを主体とし，チェックのためにモールドゲージを併用した。

載荷実験による測定値の中から，前述したように取付部節点の曲げモーメントの伝達を知るために，載荷点と同一断面内のひずみを 表—**2** にまとめた。またゲージ設置箇所の曲げモーメントの計算値から次式によってひずみを算出して 表—**2** に並記した。

応力ひずみ　$\varepsilon=\dfrac{M}{EI}y=\dfrac{12M\cdot y}{Ebh^3}=\dfrac{4y}{h^3}\cdot M\cdot 10^{-6}$

ここで，$b=100$ cm, $E=3\times10^5$ kg/cm²

（3）ま と め

表—2　載荷線上の測定値

測定値		ゲージ位置のひずみの計算値（幅 1m として）				
ゲージ記号	ひずみ $(\varepsilon_1)\times10^{-6}$	h (m)	y (m)	$\dfrac{4y}{h^3}$	M (t·m/m)	$(\varepsilon_2)\times10^6$
AO-4-3 AU-4-3	−50 +65	0.30	0.15	22.2	12.78	±284
A_2 A_7	−43 +48	0.30	0.12	17.8	12.78	∓228
BO-4-3 BI-2-3	−25 +10	0.27	0.135	27.4	2.70	∓ 74
B_2 B_7	−13 +10	0.27	0.105	21.3	2.70	∓ 58
CO-2-3 CI-2-3	+20 −28	0.38	0.19	13.8	11.12 9.37	+154 −129
DO-2-3 DI-2-3	+ 8 − 6	0.38	0.19	13.8	2.78 4.48	+ 38 − 62
EO-2-3 EI-2-3	+12 −10	0.15	0.075	89.0	0.97	± 87
FO-2-3 FI-2-3	−20 +12	0.20	0.10	50.0	2.28	±114

表—3　測定値と計算値の比較

断面位置		A	B	C
測定値	$\varepsilon_{n.1}$ $\varepsilon_{n.1}/\varepsilon_{A.1}$	58×10^{-6} 1.000	16×10^{-6} 0.243	28×10^{-6} 0.455
計算値	$\varepsilon_{n.2}$ $\varepsilon_{n.2}/\varepsilon_{A.2}$	284×10^{-6} 1.000	69×10^{-6} 0.275	129×10^{-6} 0.482
有効幅	$\varepsilon_{n.2}/\varepsilon_{n.1}$	4.90 m	4.32 m	4.60 m

表—**2** から A, B, C 点の計算値と換算および平均した測定値をまとめると 表—**3** のようになる。

この表からつぎのことが推察できる。

1）表—**3** の計算値は単値幅　1m として計算されているので，$\varepsilon_{n-2}/\varepsilon_{n-1}$ は有効幅に相当するものとなる。本実験の載荷スパンが $l=1.46$ m であり，したがって，有効幅は純 3l に相当するとみてよい。

2）箱桁のウェブの断面力は，各ウェブ直下で単純支持された一様の幅（単位幅）をもつラーメンに，上スラブの支点の曲げモーメント（単位幅当り）を作用させて求めてよい。

4. あ と が き

ここでのべた2つのテーマは，直接にはプレストレストコンクリートの技術と関係のないものであるが，最近ＰＣ箱桁橋がますます大型化され，そしていろんな施工方法が開発されつつあることから，箱桁特有の内容について本橋の設計にあたっていくらか検討を加えたので報告した。はじめのテーマについては，日本構造橋梁研究所　猪股俊司氏に，あとのテーマについては大阪府立工業専門学校　久良喜代彦氏に御指導を賜わったことを感謝する。

1967.5.31・受付