

プレフレックスばりの施工時における横座屈安定性について

金沢大学 吉田 博
金沢大学 西田 進
川田工業 渡辺 晃

1. 緒言

プレフレックス工法^{1),2)}は、従来のプレストレス工法に多少アイディアは似ているが、ベルギーの技師A. Lipskiがブリュッセル大学のL. Baes教授と共同で開発し、1951年にベルギーで紹介されたものであり、ベルギーをはじめ、欧州でかなり普及しており、最近では北アメリカでも使用されるようになった。

このプレフレックス桁は、H型鋼に特別のプレストレス工法を用い、全断面をコンクリートで包んだ合成桁の一種であり、その工法は以下の通りである。

あらかじめH型鋼にキャンバーをつけ、2点集中荷重と作用させて鋼桁に曲げ応力を発生する。この状態のまま、下フランジを包むように下部コンクリートを打設する。コンクリートの硬化後荷重を除去することにより、コンクリートにプレストレスが導入される。その後床版コンクリートを打設してプレフレックス桁を完成する。

(図-1参照)

このようにして製作されたプレフレックス桁の特長は

(1)他の型式の桁に比して、桁の剛性を非常に大きくすることができ、たわみと制限された場合に有利で、たわみと小さくすることができ。

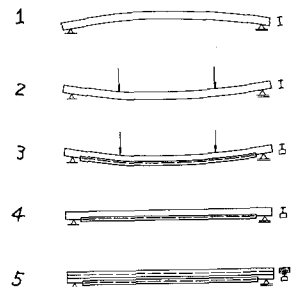
(2)桁の高さの低い割合に、曲げ剛性、ねじり剛性が大きく、たわみ、振動と小さくすることができ。

(3)鋼桁とコンクリートで覆っているため、耐火構造として有利であり、また、化学作用に対する抵抗性も大きく、水辺や海岸の構造物に有利に利用できる。

(4)桁の規格化が容易であり、塗装の必要がなく、維持、管理が容易である。

プレフレックス桁の製作に際しては、図-2に示すように、2本の鋼桁を重ね合せ、スパンの左右4分の1点に支承と置いて、スパンの両端に荷重と作用させて、2本の桁と同時に製作する工法が用いられているようである。

2点集中荷重と作用させて、鋼桁に応力を発生させる際に、桁の横座屈座屈の問題が生じる。



1. キャンバーをつける。
2. 2点荷重をかける。
3. 下部コンクリートと打設する。
4. 荷重をとりをく。
5. 床版の打設

図-1 プレフレックス桁の製作工程

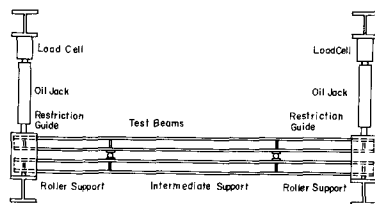


図-2 プレフレックス桁製作工法

橋脚側座屈を防ぐ方法としては、スパンの中間で、数箇所横方向の変位と拘束すればよいが、現場において、その反力をとるためのアンカーを作るのが困難な場合が多い。したがって、最も簡単な方法として、重ね合わせた2本の桁の数箇所で、各々の桁のねじりと拘束することにより、座屈荷重と高めることが可能である。

この問題は、一般の桁橋の橋全体の横座屈の問題とも類似している。近年、高張力鋼を使用したスレンダーな横断道橋や長径間のプレートガーダー等が多く架設されている。これらの桁橋は、中員に比してスパン長の大きいものが多く、橋軸と直角方向の安定性について検討することが必要であると思われる。

横方向の安定性を保つためには、一般の桁橋においては、横桁や対横構、横構が用いられるが、理論的には、横構、対横構および横桁等はねじり拘束材として作用するものと考えられ、これらが橋全体としての横座屈に対して、どれほどの効果を有するが、また、どれほどの強度が要求されるかについて調べることは興味のあるところである。

本研究では、これら両面から、スパン中間にねじりに対する拘束ばねを有するはりについて、その横座屈強度と、理論的および実験的に考察した。

2 理論計算

プレフレックスばりの施工時および一般の桁橋の両端における境界条件は、ねじりおよび水平変位に関しては単純支持である。はりに対して橋軸と図-3のように仮定する。荷重は2点集中荷重と考える。両反点より $\frac{L}{2}$ のよりのCおよびD点のフランジ上へ作用し、ねじり拘束ばねは、両反点より $\frac{L}{2}$ のよりのEおよびF点のせん断中心におかれているものとする。ここに、 L はスパン長である。

ねじり拘束ばね定数と k とすると、はりが橋脚側座屈をする際にたわめるとミエエネルギーおよびバネがたわめるとエネルギーは

$$V = \frac{EI_x}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{EI_y}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 v}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{GK_T}{2} \int_0^L \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz + \frac{EI_\omega}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 \varphi}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} k \varphi_{\frac{L}{2}}^2 + \frac{1}{2} k \varphi_{(1-\frac{L}{2})}^2 \quad (1)$$

となる。ここに、 EI_x ははり断面のx軸まわりの曲げ剛度、 EI_y はy軸まわりの曲げ剛度、 GK_T はSt. Venantのねじり剛度、 EI_ω ははり断面の曲げねじり剛度、 φ ははりのねじり角、 $\varphi_{\frac{L}{2}}$ および $\varphi_{(1-\frac{L}{2})}$ はねじり拘束ばねのあるEおよびF点でのはりのねじり角である。外力 P はせん断中心より上方 a の点に作用するものとするとき外力のたわみ仕事量は

$$T = - \int_0^L M_z \frac{d^2 v}{dz^2} dz - \int_0^L M_z \frac{d^2 u}{dz^2} \varphi dz - \frac{1}{2} P a \varphi_{\frac{L}{2}}^2 - \frac{1}{2} P a \varphi_{(1-\frac{L}{2})}^2 \quad (2)$$

で示される。ここに、 M_z はZ点でのはりのx軸まわりの曲げモーメント、 $\varphi_{\frac{L}{2}}$ および $\varphi_{(1-\frac{L}{2})}$ は荷重用点でのはりのねじり角である。全エネルギーは $W = V + T$ である。ここで、

$$\frac{EI_x}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 v}{dz^2} \right)^2 dz = \int_0^L M_z \frac{d^2 v}{dz^2} dz \quad (3)$$

を用いて W を求めると。

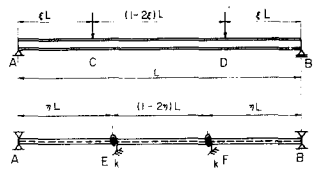
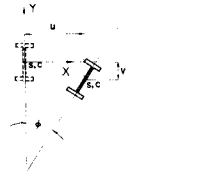


図-3

$$W = \frac{EI_y}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 u}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{GK_T}{2} \int_0^l \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz + \frac{EI_w}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 \varphi}{dz^2} \right)^2 dz + \frac{1}{2} k \varphi_l^2 + \frac{1}{2} k_{(1-\gamma)l} \varphi^2 - \int_0^l M_z \frac{d^2 \varphi}{dz^2} \varphi dz - \frac{1}{2} P a \varphi_{\frac{l}{3}}^2 - \frac{1}{2} P a \varphi_{(1-\frac{2}{3})l}^2 \quad (4)$$

となる。

そこで境界条件を満足する横変位 u およびねじり角 φ を次のよう三角級数と仮定する。

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} A_i l \sin \frac{i\pi}{l} z \quad (5)$$

$$\varphi = \sum_{j=1}^{\infty} B_j \sin \frac{j\pi}{l} z$$

変分法において、境界条件を満足する線型試験関数と仮定し、これを汎関数に代入し、その任意係数の微分をゼロにすることにより近似解を求める Ritz の方法、線型試験関数より求めた固有値は、真の固有値に等しいが、これより大きいという Rayleigh の原理よりなる Rayleigh-Ritz の方法を用いる。

式(5)と式(4)を代入すると

$$W = V + T = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{EI_y}{4l} (i\pi)^4 A_i^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{EI_w}{4l^2} (j\pi)^4 B_j^2 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{GK_T}{4l} (j\pi)^2 B_j^2 + \frac{1}{2} k \left(\sum_{j=1}^{\infty} B_j \sin j\pi \right)^2 + \frac{1}{2} k \left(\sum_{j=1}^{\infty} B_j \sin (1-\gamma)\pi \right)^2 + Pl\pi^2 \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} A_i B_j \left[\{1 + (-1)^{i+j}\} K_{1(ij)} + \frac{2}{3} K_{2(ij)} \right] i^2 - \frac{1}{2} Pa \left(\sum_{j=1}^{\infty} B_j \sin \frac{\pi}{3} \right)^2 - \frac{1}{2} Pa \left(B_j \sin (1-\frac{2}{3})\pi \right)^2 \quad (6)$$

が得られる。そこで、

$$K_{1(ij)} = \frac{2}{2\pi} \left\{ \frac{\sin(i-j)\frac{\pi}{3}}{i-j} - \frac{\sin(i+j)\frac{\pi}{3}}{i+j} \right\} + \frac{1}{2\pi^2} \left\{ \frac{\cos(i-j)\frac{\pi}{3}}{(i-j)^2} - \frac{\cos(i+j)\frac{\pi}{3}}{(i+j)^2} - \frac{1}{(i-j)^2} + \frac{1}{(i+j)^2} \right\} \quad i \neq j$$

$$= \frac{1}{4i^2\pi^2} \left\{ \sin^2 i\frac{\pi}{3} - i\frac{\pi}{3} \sin 2i\frac{\pi}{3} + (i\frac{\pi}{3})^2 \right\} \quad i = j$$

$$K_{2(ij)} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\sin(i-j)(1-\frac{2}{3})\pi}{i-j} - \frac{\sin(i-j)\frac{\pi}{3}}{i+j} - \frac{\sin(i+j)(1-\frac{2}{3})\pi}{i+j} - \frac{\sin(i+j)\frac{\pi}{3}}{i-j} \right\} \quad i \neq j$$

$$= \frac{i\pi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2(1-\frac{2}{3})i\pi + \frac{1}{4} \sin 2i\frac{\pi}{3} \quad i = j$$

式(6)に A_i および B_j を代入し偏微分すると

$$\frac{\partial W}{\partial A_i} = \frac{EI_y}{2l} \pi^4 i^4 A_i + \frac{Pl\pi^2 i^2}{2} \sum_{j=1}^{\infty} B_j \left[\{1 + (-1)^{i+j}\} K_{1(ij)} + \frac{2}{3} K_{2(ij)} \right]$$

$$\frac{\partial W}{\partial B_j} = \frac{Pl\pi^2}{2} \sum_{i=1}^{\infty} A_i \left[\{1 + (-1)^{i+j}\} K_{1(ij)} + \bar{\alpha} K_{2(ij)} \right] i^2 + \left\{ \frac{EI_w}{2l^2} \pi^2 j^4 + \frac{GK_T}{2l} \pi^2 j^2 \right\} B_j$$

$$+ k \sin j \gamma \pi \sum_{i=1}^{\infty} B_i \sin i \gamma \pi + k \sin j (1-\gamma) \pi \sum_{i=1}^{\infty} B_i \sin i (1-\gamma) \pi$$

$$- Pa \sin j \bar{\alpha} \pi \sum_{i=1}^{\infty} B_i \sin i \bar{\alpha} \pi - Pa \sin j (1-\bar{\alpha}) \pi \sum_{i=1}^{\infty} B_i \sin i (1-\bar{\alpha}) \pi$$

を得る。

これをマトリックス表示すると、

$$\begin{bmatrix} \frac{EI_w}{2l} \pi^4 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(11)} + \bar{\alpha} K_{2(11)}) & \frac{Pl}{2} \pi^2 \bar{\alpha} K_{2(12)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^1\} K_{1(1,n)} + \bar{\alpha} K_{2(1,n)} \\ 0 & \frac{EI_w}{2l} \pi^4 & \cdots & 0 & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \bar{\alpha} K_{2(2,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(22)} + \bar{\alpha} K_{2(22)}) & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^2\} K_{1(2,n)} + \bar{\alpha} K_{2(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{EI_w}{2l} \pi^4 & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,1)} + \bar{\alpha} K_{2(n,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,2)} + \bar{\alpha} K_{2(n,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(n,n)} + \bar{\alpha} K_{2(n,n)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{(1,1)} \\ f_{(1,2)} \\ \vdots \\ f_{(1,n)} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(1,1)} + \bar{\alpha} K_{2(1,1)}) & \frac{Pl}{2} \pi^2 \bar{\alpha} K_{2(1,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^1\} K_{1(1,n)} + \bar{\alpha} K_{2(1,n)} \\ \frac{Pl}{2} \pi^2 \bar{\alpha} K_{2(2,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(2,2)} + \bar{\alpha} K_{2(2,2)}) & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^2\} K_{1(2,n)} + \bar{\alpha} K_{2(2,n)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,1)} + \bar{\alpha} K_{2(n,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,2)} + \bar{\alpha} K_{2(n,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(n,n)} + \bar{\alpha} K_{2(n,n)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{(1,1)} \\ f_{(1,2)} \\ \vdots \\ f_{(1,n)} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^1\} K_{1(1,1)} + \bar{\alpha} K_{2(1,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^1\} K_{1(1,2)} + \bar{\alpha} K_{2(1,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(1,n)} + \bar{\alpha} K_{2(1,n)}) \\ \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^2\} K_{1(2,1)} + \bar{\alpha} K_{2(2,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^2\} K_{1(2,2)} + \bar{\alpha} K_{2(2,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(2,n)} + \bar{\alpha} K_{2(2,n)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,1)} + \bar{\alpha} K_{2(n,1)} & \frac{Pl}{2} \pi^2 \{1 + (-1)^n\} K_{1(n,2)} + \bar{\alpha} K_{2(n,2)} & \cdots & \frac{Pl}{2} \pi^2 (2K_{1(n,n)} + \bar{\alpha} K_{2(n,n)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{(1,1)} \\ f_{(1,2)} \\ \vdots \\ f_{(1,n)} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\times \{ A_1 \ A_2 \ \cdots \ A_n \ \cdots \ B_1 \ B_2 \ \cdots \ B_n \ \cdots \} = 0$$

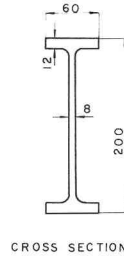
$z \geq z'$, A_i ($i=1, 2, \dots$) および B_j ($j=1, 2, \dots$) がゼロ以外の解を持つためには、その係数⁽⁷⁾を作るマトリックスの Determinant がゼロでない。これより座屈荷重を決定する z が得られる。ただし、 $f_{(ij)} = k^2 (\sin i \gamma \pi \sin j \gamma \pi + \sin i (1-\gamma) \pi + \sin j (1-\gamma) \pi)$ である。

3 実験に用いた断面と材料の引張試験

実験に用いるのは、 $200 \times 200 \times 8 \times 12$ の H 型鋼をガス切断により $200 \times 60 \times 8 \times 12$ の断面とし、比較的短いスパンで、弾性限界近くで座屈するように選んだ。この断面の H 型鋼から、上下フランジより各 2 枚、ウェブより 2 枚の計 6 本の引張試験片を製作し、引張試験を行った。この結果を表-1 および図-5 に示す。これより、ヤング係数 $E = 2.13 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、降伏応力 $\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.288$ を得た。

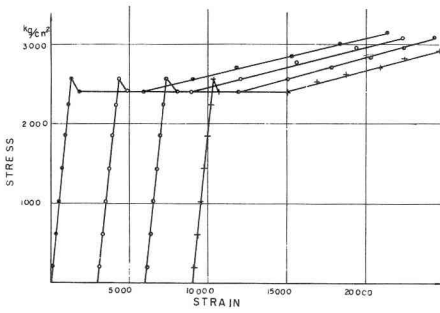
表-1 ヤング係数, 降伏応力, ポアソン比

	試験片	E (kg/cm ²)	σ_y (kg/cm ²)	ν	試験片面積 (cm ²)
Flange	No. 1	2.01×10^5	2,500	0.282	4.876
	No. 2	2.33×10^5	2,460	0.305	4.970
	No. 3	2.14×10^5	2,460	0.276	4.995
	No. 4	2.07×10^5	2,400	0.263	4.684
	平均	2.13×10^5	2,450	0.280	
Web	No. 5	2.13×10^5	2,900	0.298	3.222
	No. 6	2.12×10^5	2,740	0.274	2.921
	平均	2.13×10^5	2,820	0.286	

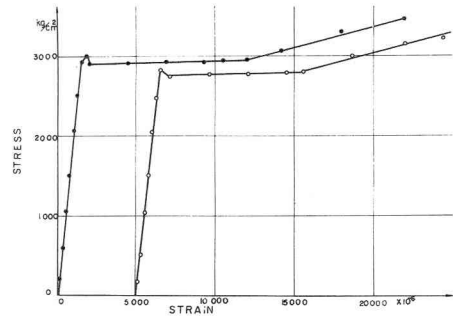


CROSS SECTION

図-4 断面



フランジ



ウェブ

図-5 引張試験結果

4曲ヤ試験

座屈実験の予備実験として, 座屈実験に用いるのと同じ断面のスパン2.5mのはりの両支点よりスパン長の4分の1点に2点集中荷重を作用させて, 曲ヤ試験を行った。なお, この際, はりが横座屈をおこさないよう図-6に示すようなブラッシングを数箇所とりつけて, 横変位と拘束し, 鉛直変位のみに自由にした。図-7に実験結果を, 縦軸に荷重を, 横軸に中央点のたわみをとって示した。引張試験より得られた単軸塑性変位による値とほぼ一致しているが, 弾性限界の近くでたわみが大きくていゝ。これはフランジのガス切断による残留応力の影響と考えられる。

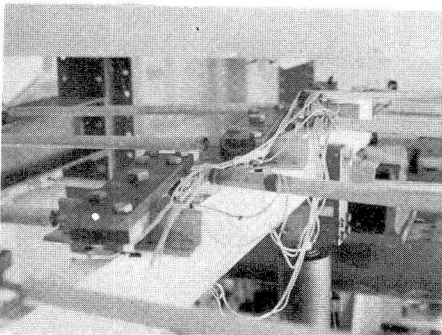


図-6 ブラッシング

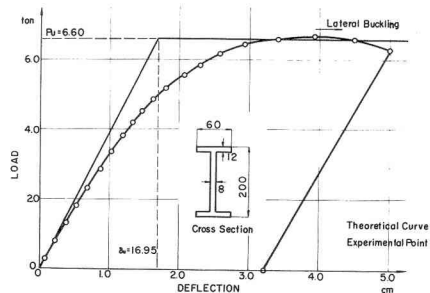


図-7 曲ヤ試験結果

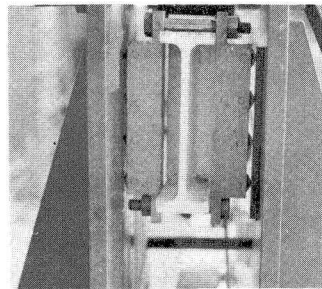
5座屈実験

横座屈実験用はりとして、スパン4.5m, 5.5mおよび6.5mの3種類についてそれぞれ6本の試験桁と製作した。実験は同一スパン長のもつを四-2のよう1組とし、ねじり拘束材ととりつけない無拘束のもの、中央点で1箇所だけねじり拘束材ととりつて拘束したもの、両端よりスパン長の4分の1点で拘束材ととりつてねじりを拘束したものの3組について、合計9組、18本の桁について実験を行った。

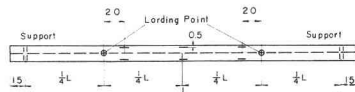
実験は四-2に示すように、まず Lower Beam を単純ばりとして、両端をローラー支承上に設置し、その上フランジ上で両支点よりスパン長の4分の1点に中間支承としてローラーを設置し、その上に Upper Beam をのせた。荷重は Upper Beam の両端に作用させることにより、Upper Beam および Lower Beam に2点集中荷重を作用させたことになる。また、はりのスパン中間が横変位しても、上下両 Beam と同じ方向に横変位し、ローラー支承で荷重を伝えるので、荷重の方向は変らない。

また、はりの両端においては、横変位およびねじりに対して単純支持となるように、四-8のようにはりの側面にローラーを取りつけ、鉛直変位は可能であるが、ねじりと横変位を拘束し、単純支持の条件を満たすように両側から板で支えこんだ。スパン中間におけるねじりの拘束の方法もこれにならった。

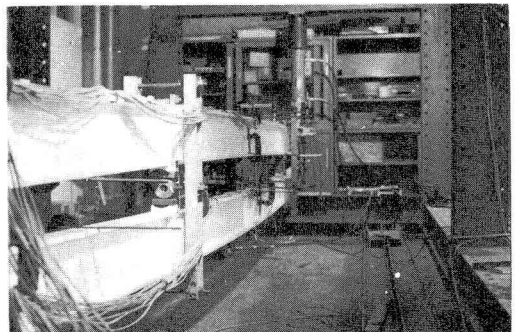
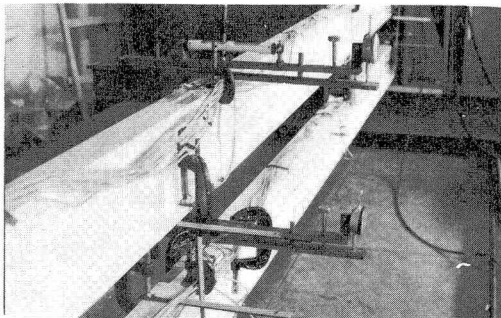
荷重は理研精機製のオイルポンプと2箇の複動ラム（容量50ccm, ストローク30mm）を用いて載荷した。荷重の測定には BALDWIN 社製の高精度ロードセルを用いた。ストレーンゲージは四-9に示すように、断面の上下両フランジの突出部のはしに近い部分にはりつけた。また、四-10に示すローテーションゲージと無拘束の場合と4分の1点拘束の場合にはスパン中央断面の上フランジ上に、中央点拘束の場合は4分の1点の上フランジ上に設置し、高精度で桁のねじりを測定した。桁の鉛直たわみは、桁の数箇所にとりつてられに物指とレベルで、水平変位はトランシットで



四-8 ねじり拘束のためのローラー



四-9 ストレインゲージ接着位置



四-10 ローテーションゲージと座屈実験（スパン6.5m, 4分の1点ねじり拘束）

0.2mmの精度で読みとった。

図-11, 12および13はスパン長4.5m, 5.5mおよび6.5mの桁について、ねじり拘束のない場合、スパン中央でねじりを拘束した場合、スパン4分の1点の左右2箇所だけねじりを拘束した場合について、~~縦軸~~縦軸にねじりモーメント、横軸に水平変位をとって示したものである。

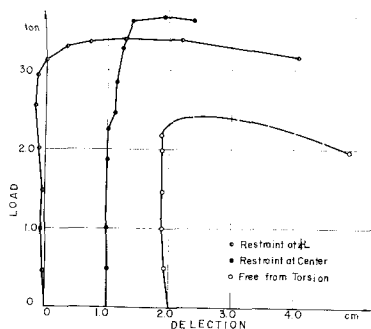


図-11 荷重横ねじり曲線 (スパン6.5m)

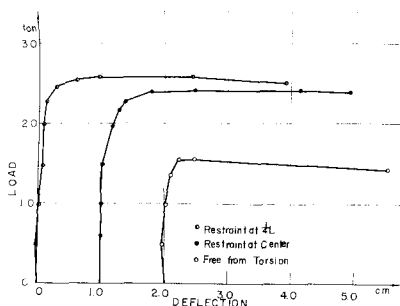


図-12 荷重横ねじり曲線 (スパン5.5m)

図-14および15は、スパン長6.5mのはりで、4分の1点拘束の場合の断面中央での左右のストレインゲージのひずみの差と荷重に対してプロットしたものと、鉛直変位と水平変位を同時にプロットしたものを示している。

図11~15よりわかるように、はりの水平変位、ストレインゲージ、ローテーションゲージにより容易に横割れ現象をはあくすることができた。

これらの荷重の最大値と座屈荷重とを、縦軸に座屈荷重を降伏荷重 P_y と無次元化し、横軸に細長比をとって示したのが図-17である。

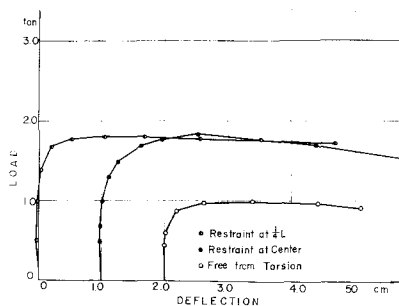


図-13 荷重横ねじり曲線 (スパン6.5m)

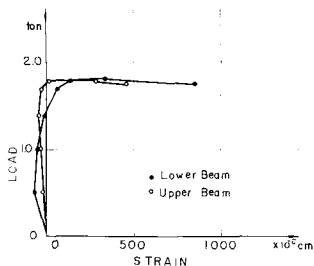


図-14 左右のストレインゲージのひずみの差 (スパン6.5m, 4分の1点拘束)

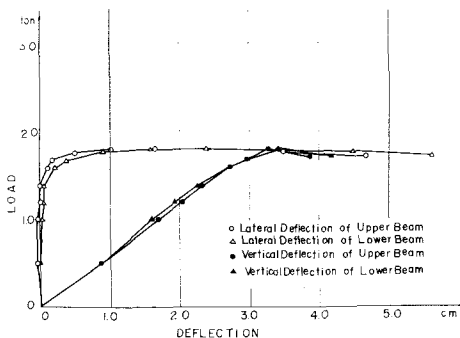


図-15 鉛直ねじりおよび水平ねじり (スパン6.5m, 4分の1点拘束)

6 数値計算および考察

ねじり拘束材の剛性(ばね定数 k)と座屈荷重の関係を知るために、実験に用いた断面 2 、スパン 6.5m 、スパン中央点がねじり拘束をうける場合について検討を行った。図-16は縦軸に座屈荷重 P_k 、横軸にばね定数 k を、桁のねじり剛度を単位として示してある。この図からわかるように、ねじりのねじり剛度が急激に荷重が上昇し、以後はほとんど変化しない。図-17の実線は、ばね定数が無限大の場合について、3つの拘束条件についての計算値を示している。これより、無拘束、中央1点拘束、4分の1点の2点拘束の順に座屈荷重が大きくなる。このことは実験結果からも見ることが出来る。

実験においては、無拘束の場合においては弾性範囲内での座屈したが、拘束のある場合はすべてこの場合に部分的に塑性域に入ったものと考えられる。特に、残留応力の影響が大いと思われるので、この点について、さらに検討が必要と思われる。

7 結論

スパンの中間点、ねじりに対する拘束を有するはりの横座屈強度について理論的、実験的に考察を行った。その結果、横座屈強度を高めるためには、比較的弱い拘束材でも、間隔をこまかく配置することにより、その効果を高めることが出来ることがわかった。

8 参考文献

- 1) 三品吉彦, 清水永策: プレフレックス梁, 橋梁, NO. 10, pp. 57~61 昭和41年10月
- 2) 喜内, 小堀, 吉田, 清水: プレフレックス梁に関する研究, 土木学会第22回学術講演会, IV-35, 昭和42年
- 3) 喜内, 柳田, 小堀, 吉田, 川村: プレフレックス試験4Eの破壊試験について, 金沢大学工学部紀要, 第5巻第2号, 昭和44年2月
- 4) S. P. Timoshenko, J. M. Gere: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, New York, 1961
- 5) T. V. Galambos: Structural Members and Frames, Prentice-Hall, Englewood, 1968
- 6) F. Bleich: Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill, New York, 1952
- 7) 寺沢寛一: 自然科学者のための数学概論, 岩波書店

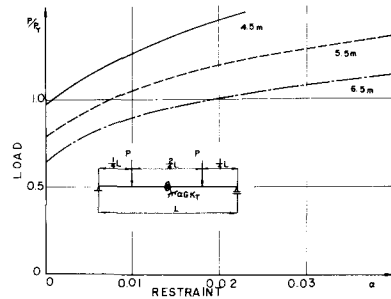


図-16 ねじり拘束係数と座屈荷重
(スパン 6.5m , 中央点拘束)

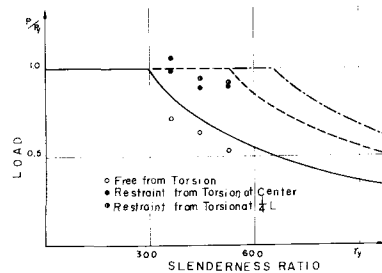


図-17 座屈曲線と実験結果