

各種 PC 単純桁橋 (道路橋) の載荷試験とその傾向について

清 野 茂 次*
横 溝 幸 雄**

まえがき

本報告はプレストレスト コンクリート桁橋 (PC 桁橋) の実物載荷試験のうち、代表的単純桁橋4橋を選定し、これらの測定方法およびその結果の一部を紹介するとともに、この試験の結果より統計的に推察できる PC 桁橋の一般的性状について報告するものである。

統計的性質といっても4橋程度であるから十分な結論とはいえないが、すでに各方面で発表されている個々の橋に関する報告の総合的な意味で、大体の傾向は得られるものと信ずる。

ここに示す4橋を、A,B,C,D 橋と記号をつける。このうち A,B 橋は橋が完成したのち測定したものであり、C, D 橋は舗装、地覆、高欄を施工する以前に測定したものであって、ここにも橋に対する橋面工の影響が興味ぶかくなるかわれる。

PC 桁橋は一般に縦横とも、完全にプレストレッシングされており、主桁の相互作用、ならびに横剛性は非常によく、したがって載荷試験の結果も他の種の橋と異なった性質を示すことが予想される。

PC 桁橋の構造的性状を知ることは、有意義なことであると信じ、ここに発表する次第である。

1. 各橋の一般的形状

いま、ここに述べる A,B,C,D 橋の一般的形状を示すと表-1 のようになる。

2. 測定方法および載荷荷重

(1) 測定器具

静的載荷試験に用いた主たる測定器具は、たわみを直接はかるダイヤルゲージとひずみ度を電氣的に測定するワイヤーストレインゲージの2種である。

(2) 測定位置

ダイヤルゲージはスパン中央および1/4点の各主桁の下に取りつけ直接にたわみを測定できるようにした。

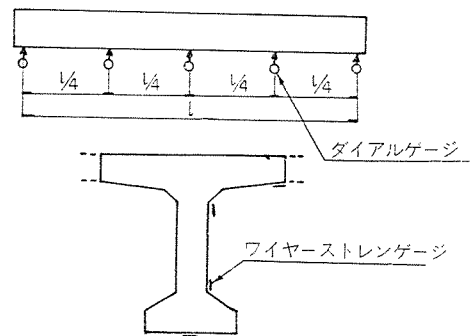
ひずみ度を測定するワイヤーストレインゲージ(ゲージ長60mm, 抵抗値120Ω)はダイヤルゲージ取付位置と同じ断面の図-1に示す位置に貼付した。

* KK オリエンタルコンサルタンツ 設計第四課長 技術士
** 同上 設計第四課主任

表-1 各橋の諸寸法

橋 種	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
桁 長	34.96 m	24.96 m	22.46 m	23.96 m
支 間	34.16 "	24.26 "	21.80 "	23.26 "
巾 員	5.50 "	6.00 "	6.00 "	9.50 "
全 巾	6.20 "	6.70 "	6.70 "	10.20 "
桁 高	1.40 "	1.20 "	1.10 "	1.20 "
主 桁 間 隔	1.25 "	1.35 "	1.30 "	1.28 "
主 桁 本 数	5 本	5 本	5 本	8 本
横 桁 本 数	8 "	7 "	5 "	5 "
斜 角	LR	LR	LR	右 84°17'
設 計 荷 重	T-14, L-14	T-14, L-14	T-20, L-20	T-20, L-20
主桁コンクリート強度 σ_{28}	400 kg/cm ²	400 kg/cm ²	400 kg/cm ²	400 kg/cm ²

図-1



(3) 荷 重

測定に用いた荷重は普通トラック(7.5t積)にセメントまたは砂利、等を満載し、直接に重量を検定したものである。各橋に載荷した荷重車は表-2に示すとおりである。

(4) 荷重車の載荷位置および測定番号

表-2に示したA車、B車の2台を同時に所定の位置に載荷静止させたのち、たわみおよびひずみを同時に測定した。荷重車の載荷位置は、表-3に示すとおりとし、これに測定番号をつけた。なお実際に行なった測定番号は各橋ともNo. 9までであるが、本文では代表的な

表-2 荷重車の重量表

車 種	橋 別	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
		(t)	(t)	(t)	(t)
A 車	前 輪	3.390	3.940	1.405	4.080
	後 輪	10.400	10.320	5.825	10.200
	合 計	13.790	14.260	7.230	14.280
B 車	前 輪	3.500	3.130	1.190	3.390
	後 輪	10.640	10.770	5.490	10.770
	合 計	14.140	13.900	6.680	14.160

表—3 測定番号と載荷位置

橋種	測定番号	載荷状態		記事
		縦方向	横方向	
A橋	No.1	A車 B車 後輪 前輪	最大偏心	
	No.2	12.48 4.80 4.80 5.43 34.16m		
	No.3			
B橋	No.1	A車 B車	最大偏心	
	No.2	6.33 4.30 5.60 4.80 24.26m		
	No.3			
C橋	No.1	A車 B車	最大偏心	
	No.2	6.90 4.00 3.50 4.00 3.40 21.80m		
	No.3			
D橋	No.1	A車 B車	最大偏心	
	No.2	6.78 4.35 4.30 4.20 3.13 23.26m		
	No.3			

載荷番号 No. 3 までについて記述することにした。

3. 測定結果

前記の測定方法によって得たデータのおもなものを示

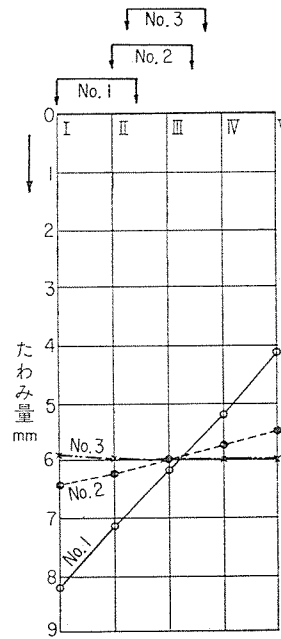
表—4 スパン中央のたわみ測定値 (mm)

橋種	主桁番号 測定番号	主桁番号							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
A橋	No. 1	8.19	7.04	6.12	5.19	4.05	—	—	—
	No. 2	6.41	6.17	5.95	5.69	5.34	—	—	—
	No. 3	5.93	5.98	5.85	5.95	6.00	—	—	—
B橋	No. 1	5.00	4.15	3.25	2.40	1.60	—	—	—
	No. 2	3.80	3.50	3.20	2.90	2.70	—	—	—
	No. 3	3.30	3.30	3.25	3.30	3.25	—	—	—
C橋	No. 1	3.58	2.80	2.14	1.56	0.73	—	—	—
	No. 2	2.41	2.03	1.86	1.67	1.53	—	—	—
	No. 3	2.15	2.15	2.16	2.12	2.08	—	—	—
D橋	No. 1	5.00	4.13	3.30	2.46	1.60	0.82	0.30	-0.45
	No. 2	2.78	2.67	2.50	2.40	2.17	1.89	1.60	1.34
	No. 3	2.13	2.20	2.25	2.34	2.30	2.20	2.10	2.04

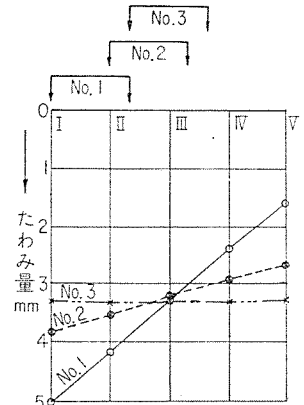
表—5 ひずみ度の測定値 ($\epsilon \times 10^{-6}$) (+) 伸び (-) 縮み

橋種	主桁番号 測定番号	主桁番号							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
A橋	No. 1	75	65	50	35	30	—	—	—
	No. 2	65	65	60	45	45	—	—	—
	No. 3	55	60	60	55	55	—	—	—
B橋	No. 1	65	55	40	30	25	—	—	—
	No. 2	55	45	40	40	35	—	—	—
	No. 3	45	50	45	50	50	—	—	—
C橋	No. 1	45	35	25	20	10	—	—	—
	No. 2	30	30	25	25	20	—	—	—
	No. 3	30	30	35	30	30	—	—	—
D橋	No. 1	75	60	50	45	30	25	10	-10
	No. 2	45	35	35	30	30	20	15	10
	No. 3	25	30	30	30	30	25	30	25

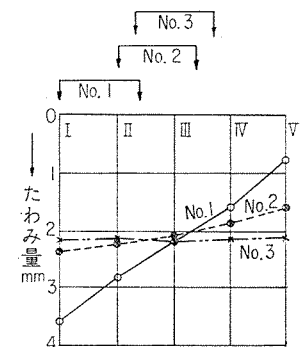
図—2 スパン中央各主桁のたわみ曲線 (A 橋)



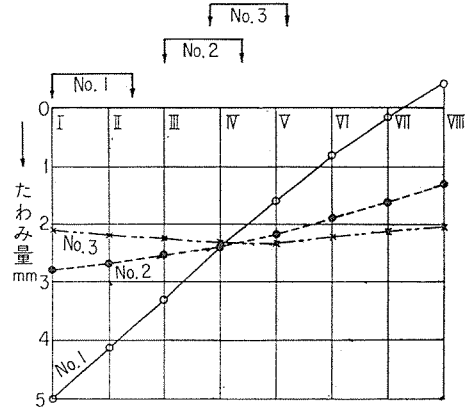
図—3 同左 (B 橋)



図—4 同上 (C 橋)



図—5 同上 (D 橋)



すと次のようになる。

(1) たわみ量

スパン中央のたわみ量を主桁別に示すと表—4 のようになる。

これらの値をグラフに示すと図—2~5 のようになる。このグラフから荷重の位置によって、橋中央の運動方向が明白に推察できるであろう。

(2) ひずみ度

ひずみ度の測定値はスパン中央断面下縁についてのみ表—5 に示す。

4. 測定結果と理論計算値との関係

(1) 理論計算

多主桁橋構造の解析方法を大別すると、格子構造的解析と直交異方性板（縦横の桁はそれぞれ平均して同じ剛度を持つ連続構造と置きかえる）としての解析の2種類

がある。

前者は F. Leonhardt, H. Homberg, A.W. Hendry and L.G. Jaeger 等, 各氏によって実用化され, 後者は Y. Guyon と C. Massonnet によって提案されている。

一般に PC 橋は諸外国で多数の橋の解析に適用されまた多くの実験から好結果を得ている Guyon and Massonnet の方法がわが国で一般に広くその解析に採用されている。本文でも理論計算値はこの方法によって求め, 測定値と比較することにする。また桁のねじりを考慮して, 格子構造として, 前に記した各方法で解析を行なったとしても, Guyon and Massonnet の結果とほとんど同じ結果が得られることを付記しておく。

Guyon and Massonnet の方法は, 縦 (x), 横 (y) 方向が等値の連続した曲げおよびねじり剛度を持つ構造, すなわち直交異方性板について, Lagrange の方程式を基礎とする次の微分方程式を出発点としている。

$$B_x \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \cdot H \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + B_y \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = P(x, y) \dots\dots\dots(1)$$

(1) 式で w はたわみ (x, y 座標) で, 第 1, 第 3 項は x, y 方向の曲げに関し, 第 2 項はねじりに関したもので, $P(x, y)$ は荷重に関する関数である。

コンクリートの Poisson's ratio の影響を簡単のために無視すると (1) 式の係数 B_x, B_y は単位長さあたり $B_x = E_x \cdot I_x, B_y = E_y \cdot I_y$ となる。

また, $H = \alpha \sqrt{B_x \cdot B_y}$ とおくと, α はねじれのパラメータとしてねじれに関する影響を表わし, 次のように示す。

$$\alpha = \frac{H}{\sqrt{B_x \cdot B_y}} = \frac{J_x + J_y}{2 \sqrt{E_x \cdot I_x \cdot E_y \cdot I_y}} \dots\dots\dots(2)$$

また, 板はこの α ともう一つの縦横の曲げ剛性の関係を示すパラメータ θ の二つによって, その状態が決定される。 θ は次式で示される。

$$\theta = \frac{b}{l} \sqrt{\frac{B_x}{B_y}} = \frac{b}{l} \sqrt{\frac{E_x \cdot I_x}{E_y \cdot I_y}} \dots\dots\dots(3)$$

(2), (3) 式で,

E_x, E_y : x 軸方向, y 軸方向の Young 係数

I_x, I_y : " 各断面の単位あたり断面 2 次モーメント

J_x, J_y : x 軸方向, y 軸方向の単位あたりのねじり剛性

l : x 軸方向の長さ (橋のスパン)

b : y 軸方向の長さ (有効橋巾) の 1/2

以上のようにして求まる θ, α の値より, Y. Guyon-C. Massonnet の数表を用いることによって, y 軸方向の荷重分配係数 K_y をうる事ができる。この K_y は荷重 P による荷重作用点のたわみと平均のたわみとの比

で表わされている。数表は K_0 ($\alpha=0$ の場合の数値), K_1 ($\alpha=1$ の場合の値) が示されており, $K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0) \sqrt{\alpha}$ の式を適用することによって, 任意の α に対する K_α の値を求めることができる。(2), (3) 式を用いて θ および α の値を各橋について算出すると, 表-6 のようになる。この計算には, $G=0.435 E, E_x=E_y, G_x=G_y$ の仮定のもとに行なったものである。また, ねじり剛性, J_x, J_y の計算は, 桁断面を長方形に分割して, Saint Venant の方法を用いた。

表-6 θ, α の計算値

橋種	A 橋	B 種	C 橋	D 橋
θ	0.145	0.190	0.235	0.340
α	0.0224	0.0179	0.0416	0.0320
$\sqrt{\alpha}$	0.150	0.134	0.204	0.179

●各主桁の荷重分担係数 (K)

表-6 の θ, α の値より, 各主桁の影響係数曲線 (K 曲線) を描き, 荷重分配係数 K をうる。

いま, 任意荷重が作用した場合に各主桁に生ずる曲げモーメントは次の式によって求まる。

$$M = K \cdot M_m \dots\dots\dots(4)$$

式中, M_m : 任意荷重による主桁の平均曲げモーメント

K : 主桁の荷重分配係数 ($K = \frac{\eta_i}{i}$)

K 曲線より各荷重状態 (測定荷重) に対する荷重分配係数 K を求めると表-7

のようになる。

表-7 に示す K の値を用いることによって各主桁の応力, たわみを算出することができる。いま測定番号 No. 3 について

たわみの計算値を求めると表-8 のようになる。

(2) 測定値と計算値との関係

表-7 荷重分担係数 (K)

橋種	主桁 測定 番号	I II III IV V VI VII VIII							
		A 橋	No. 1	1.965	1.480	1.000	0.515	0.035	—
	No. 2	1.235	1.110	1.000	0.880	0.760	—	—	—
	No. 3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—	—	—
B 橋	No. 1	2.115	1.550	1.000	0.415	-0.125	—	—	—
	No. 2	1.270	1.115	1.000	0.840	0.725	—	—	—
	No. 3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	—	—	—
C 種	No. 1	2.212	1.612	1.004	0.400	-0.187	—	—	—
	No. 2	1.287	1.147	1.007	0.837	0.675	—	—	—
	No. 3	0.985	1.000	1.010	1.000	0.985	—	—	—
D 橋	No. 1	2.650	2.160	1.685	1.205	0.730	0.285	-0.125	-0.575
	No. 2	1.430	1.320	1.215	1.105	0.965	0.815	0.650	0.515
	No. 3	0.950	0.990	1.025	1.050	1.050	1.025	0.990	0.950

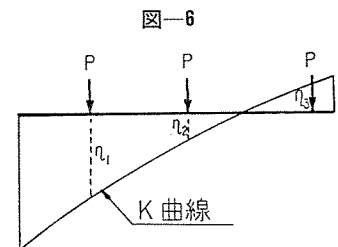


表-8 たわみの測定値 ($E_c=3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とする)

橋種	主桁 測定 番号	主桁番号							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
A橋	No. 3	8.24	8.24	8.24	8.24	8.24	—	—	—
B橋	No. 3	4.47	4.47	4.47	4.47	4.47	—	—	—
C橋	No. 3	2.32	2.35	2.38	2.35	2.32	—	—	—
D橋	No. 3	2.40	2.50	2.59	2.66	2.66	2.59	2.50	2.40

a) 応力度およびたわみの比較 測定によって得られた応力度、たわみ量と計算による値を比較すると表-

図-7 荷重分担係数 (A 橋)

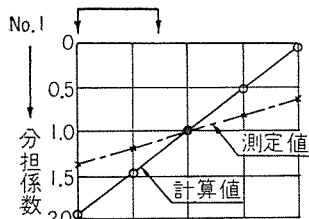


図-8 同左 (B 橋)

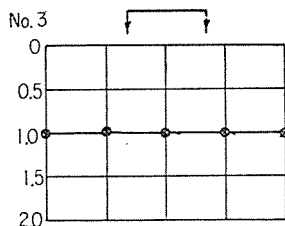
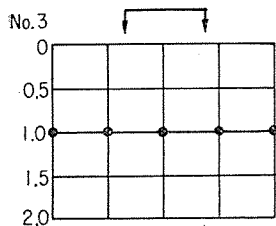
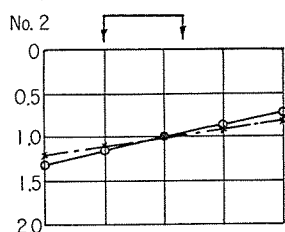
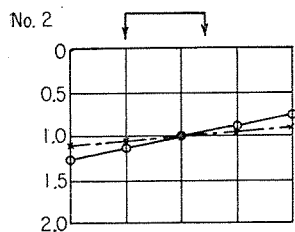
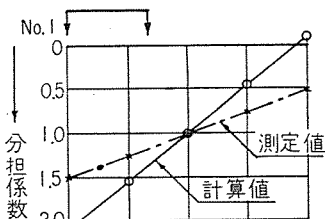
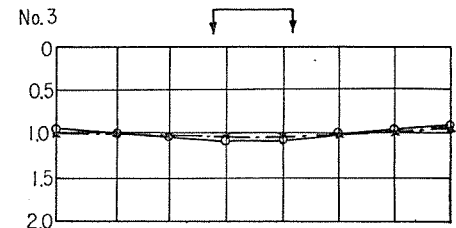
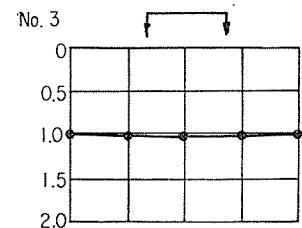
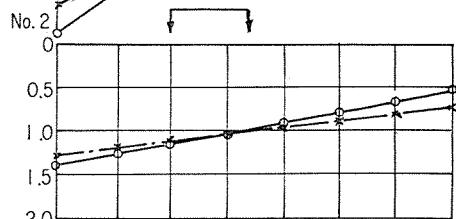
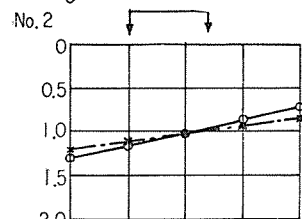
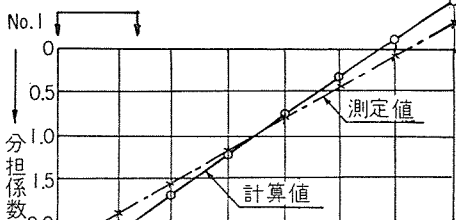
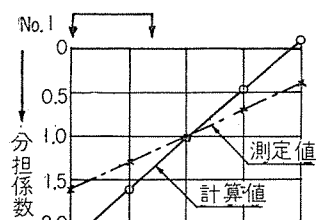


図-9 同上 (C 橋)

図-10 同上 (D 橋)



9 のようになる。ここに示す比率は、橋のねじり抵抗の影響をあまりふくまない対称荷重載荷時の値である。また前述のとおり、A, B 橋は橋面工完成後測定したものであり、C, D 橋は橋体工のみ完成した状態で測定したものに注意していただきたい。

表-9 応力度、たわみ比較

橋種	比率 = $\frac{\text{測定値}}{\text{計算値}} \times 100$	摘 要
A 橋	72 %	舗装, 地覆, 高欄, 完成後測定
B 橋	73 %	
C 橋	90 %	橋体工のみ完成後測定
D 橋	86 %	

● 荷重分担係数の比較

実測によって得られたたわみの値より求めた各主桁の荷重分担係数と、計算値を比較すると図-7~10に示すようになる。

5. PC 桁の一般的性状について

以上述べた種々のデータより PC 桁橋の性質を二、三推論してみよう。

(1) 主桁の荷重分担係数について

多くの主桁が並列され、床版および横桁によって、互いに結合された構造物に任意荷重が作用した場合、この荷重を各主桁がどのような割合で受けもつものであるか。この分担率を適格に、しかも簡単に計算できる方法があれば問題はない。

Guyon-Massonet による方法は表を用いることによって比較的簡単に分担係数を算出できるが、この値は必ずしも一致しないようである。

実測によって得られた荷重分担係数と、計算によって得られた値とを比較したものが図-7~10である。

これらの図は実際の橋の性質を知るための重要な資料と思われる。

曲げ剛性に関するパラメーター θ の値は橋の縦横の比でほとんど決定され、曲げ剛性の影響は比較的小さい。したがって θ を正しいものと仮定し、ねじり剛性に関するパラメーター α を測定値より求めてみる。

$$K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0) \sqrt{\alpha} \text{ の式より,}$$

$$\sqrt{\alpha} = \frac{K_\alpha - K_0}{K_1 - K_0}$$

となる。

K_α は実測の結果えられるものであり、 K_1 , K_0 は Guyon-Massonet の表より求める値である。この値を各橋について求めると表-10 のようになる。

表-10 α の計算値と測定値

α の値		A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
測定値	α	0.473	0.367	0.347	0.146
	$\sqrt{\alpha}$	0.688	0.606	0.590	0.382
計算値	α_m	0.224	0.0179	0.0416	0.0320
	$\sqrt{\alpha_m}$	0.150	0.134	0.204	0.179
$\sqrt{\alpha} / \sqrt{\alpha_m}$		4.60	4.50	2.90	2.20

次に、 α は測定値と計算値の間かなりのひらきがあるが、これが実際われわれが設計に用いる L 荷重を載荷した場合、分担係数にどのような影響が表われるかについて比較してみると表-11 のようになる。この表に示す値は耳桁に対するものである。

表-11 L 荷重による応力分担係数とその比

分担係数	橋 種	A 橋	B 橋	C 橋	D 橋
計算値 α_m を用いた場合 (K_m)		1.211	1.319	1.218	1.333
実測値 α を用いた場合 (K)		1.120	1.200	1.150	1.229
分担係数比 $K_{(m)}/K \times 100$ (%)		108.1	109.9	106.0	108.5

この結果、 α の計算において、一般に使用されているねじり剛性係数 (St. Venant のねじり剛性) を適用した場合、橋のねじり剛性は真の値より少なく計算されていることは明確であることがわかる。ただし表-10 における A, B 橋には舗装地覆による曲げ剛性の影響が相当であると推定できる。 α の差による影響は動荷重 (L 荷重) による耳桁の応力が約 5~10% となって表われている。

α の値を正確に計算することは非常に複雑であるとともに困難であると思われる。ここで θ の値が約 0.4 以下であれば、偏心載荷による横方向のたわみ曲線は、ほとんど直線になることに注目して、前記の St. Venant のねじり剛性 (個々断面自体がもつねじり剛性) のほかに断面全体が、ねじり中心を中心にして回転することによって生ずるねじり剛性も考慮して α に対する計算値と実測値に対する考察を行なった研究があることをここに記しておく。それは田原、手塚、国広各氏による“上松川橋ほか一橋の応力測定結果について” (昭和 31 年 9 月 7 日実際橋梁、構造物の応力測定および測定結果に関する研究発表会) である。

(2) 応力度、たわみ比について

応力度、たわみの測定値と計算値の比較したものは表

-9 のとおりである。この表によって明白なように、荷重分担係数の差を除けば 70~90% の値を示している。舗装高欄が完成されていない C, D 橋は 90%, 80% の値を示しているが、実際の橋と計算値上の仮定の値について、次の点を考慮すればこの程度の差は十分考えられる。すなわち桁断面の曲げ剛性 ($E_c I_e$) の相違と支承条件および載荷重の分布、A, B 橋については 72%, 73% の値であるが、これらの点に加えて、添加構造物 (地覆舗装高欄) が曲げ剛性におよぼす影響が大きく表われていることがわかる。

6. 結 論

以上の結果より得られた結論を要約すると次のようになる。

- 1) 各主桁の相互作業は非常によく、完全に一体となって運動している。
- 2) 橋の剛性は設計計算値よりかなり大きく、特に橋面工 (地覆、高欄、舗装) を施工することによって橋は一段とその剛性を増す。
- 3) Guyon and Massonnet による荷重分担の計算過程における θ の値は、ほぼ正しいと考えてよいが α の値はかなりの差がある。すなわち、橋のねじり剛性は計算上の断面の値と実物との差、Young 率の差その他による差が原因して違いが出てくることも、もちろん考えられるが、計算方法そのものに、かなりの差があるものと考えられる。
- 4) α の値によって生ずる設計計算上の差は、L 荷重を作用させた場合、耳桁において 5~10% となる。

あとがき

ここに報告した資料は、4~5 年前に測定したデータより部分的に整理したもので、特に目新しいものではないと思われるが、地震、舗装、等が橋におよぼす影響は、この資料よりある程度まで類推できるであろう。この点について理解されれば、本報告の目的は達することになる。ただこのような性質は設計荷重作用範囲内においての性状で、破壊の状態については別の状態になると思われるので、この点についても注意して頂きたい。

1962. 4. 30 ・ 受付



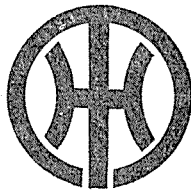
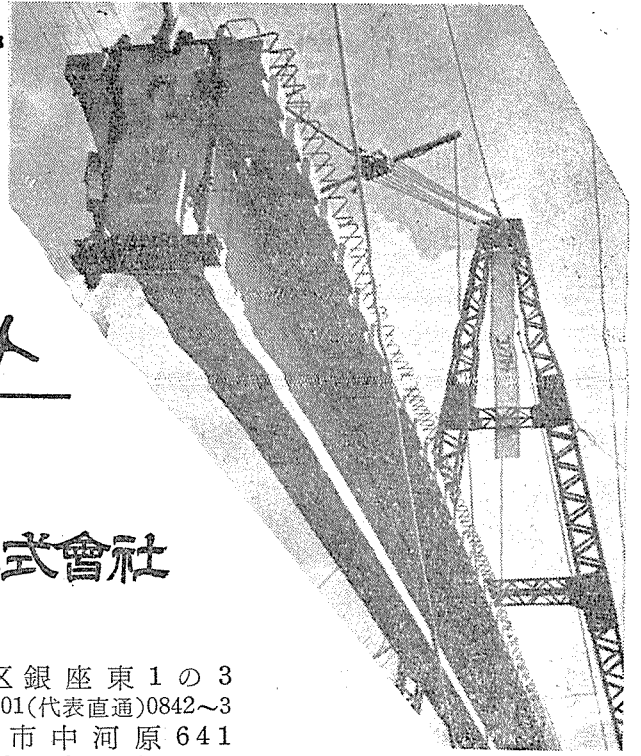
N.P.C.K.

プレストレスト

コンクリート

日本鋼弦コンクリート株式會社

本社・営業所 東京都中央区銀座東1の3
 電話 京橋(561)9301(代表直通)0842~3
 多摩工場 東京都府中市河原641
 電話 武蔵府中(0236)2681~2(代表)
 天竜工場 静岡県磐田郡豊田村700
 電話 磐田 1 5 1 4



水道管の革命!!

安く強い“プレストレストコンクリート管”

特長

1. 設計水圧に応じた合理的な管が製造出来る。
2. 同じ水圧または口径に対して鉄管類より遥かに安い。
3. 高压に堪えて破壊することなく特殊な複元性がある。
4. 内面が平滑で永久に変化しない為流量が減少しない。

本 社 東京都中央区日本橋本石町3-6
 電 話 (241) 2111 (代表)

工 場 横 浜 ・ 名 古 屋

帝国ヒューム管株式会社