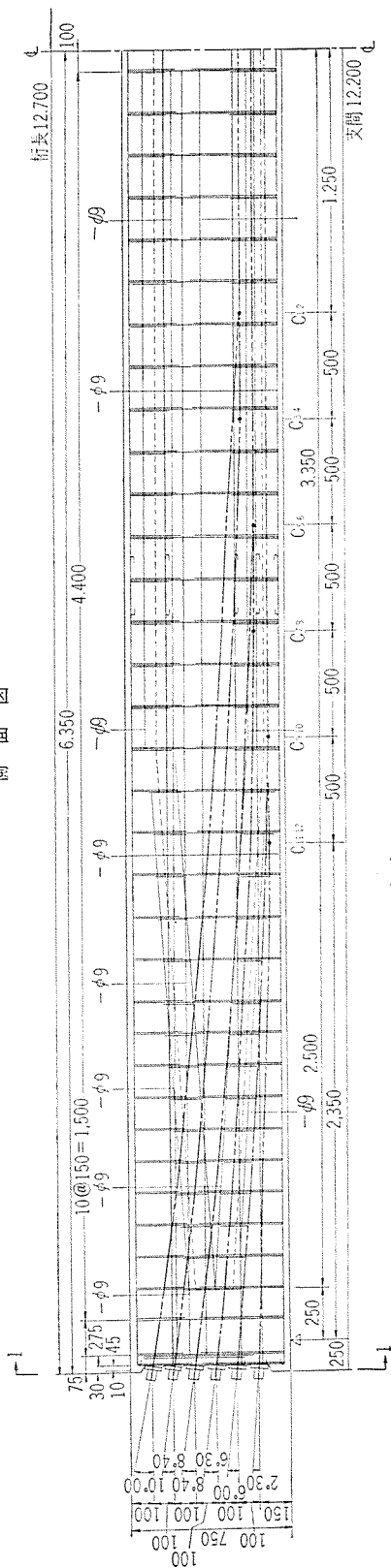




図-1 (b) C 桁詳細図  
側面図



骨 材 表-1 参照  
 コンクリート配合 表-2 参照  
 PC 鋼材 神鋼鋼線鋼索製  $\phi 12.4$  mm  
 7本より PC 鋼より線  
 コンクリート強度  $\sigma_{cs}=400$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $\phi 12.4$  mm 7本より PC 鋼より線破断強度 176 kg/mm<sup>2</sup>

断面図  
4-4

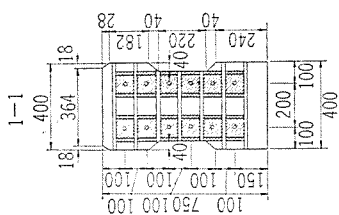
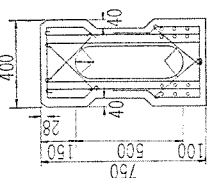


表-1 骨材の試験結果

産 比 単 吸 有 粗	細 骨 材	粗 骨 材
地 重 量 量 物 率	多 摩 川 2.62 1 690 kg/m <sup>3</sup> 2.1 % 合 格	多 摩 川 2.63 1 650 kg/m <sup>3</sup> 1.0 % 合 格
	3.43	6.83

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプト量の比 (%)	セメント量 C (kg)	コンクリート 1 m <sup>3</sup> に用いる骨材重量		コンクリート 1 m <sup>3</sup> に用いる表面乾燥飽和状態の骨材重量
			水量 W (kg)	S/A (%)	
20	1~4	35	470	167	1 790
					44
					795
					995

(3) 荷重荷重および荷重方法

跨座式モノレールの特色として、桁には鉛直荷重、水平荷重およびねじり荷重が同時に加わる。特に市街地を走る関係から曲線桁も多く、この種の桁には鉛直荷重のみによってもねじり荷重が生ずることになる。したがって在来の単独荷重のみによる荷重試験では実際に生ずる現象を的確に再現することにはならない。そこで本試験においてはできる限り、実際の現象に似せるために、鉛直、水平およびねじり各荷重の同時荷重による試験を行なった。実際のモノレールの荷重配置とはやや異なるが、本試験では図-2に示すように、二点荷重法を採用した。設計鉛直荷重  $P$  (偏心する場合は  $P'$  とする)、設計水平荷重  $H$ 、設計ねじり荷重  $T$  の値は、支間中央断面の応力状態が実物と同じになるように決定した。しかしひびわれ時および破壊時の荷重  $P, H, T$  は実物とは関係がなく、供試体の断面形状および材料強度から決るものである。

荷重点は、単独ねじり荷重の場合を除いて、支間中央から、両側に各 1 m ずつ離れた点である。荷重は図-2に示すように、

まず設計鉛直荷重、設計水平荷重、設計ねじり荷重をそれぞれ単独で行なったのち、これら三種の荷重を組合せた合成荷重を行なった。その後直桁に関しては鉛直荷重によって破壊試験を行ない、曲線桁に関しては水平荷重と偏心鉛直荷重の組合わせによって水平と鉛直荷重

図-2 載荷状態図

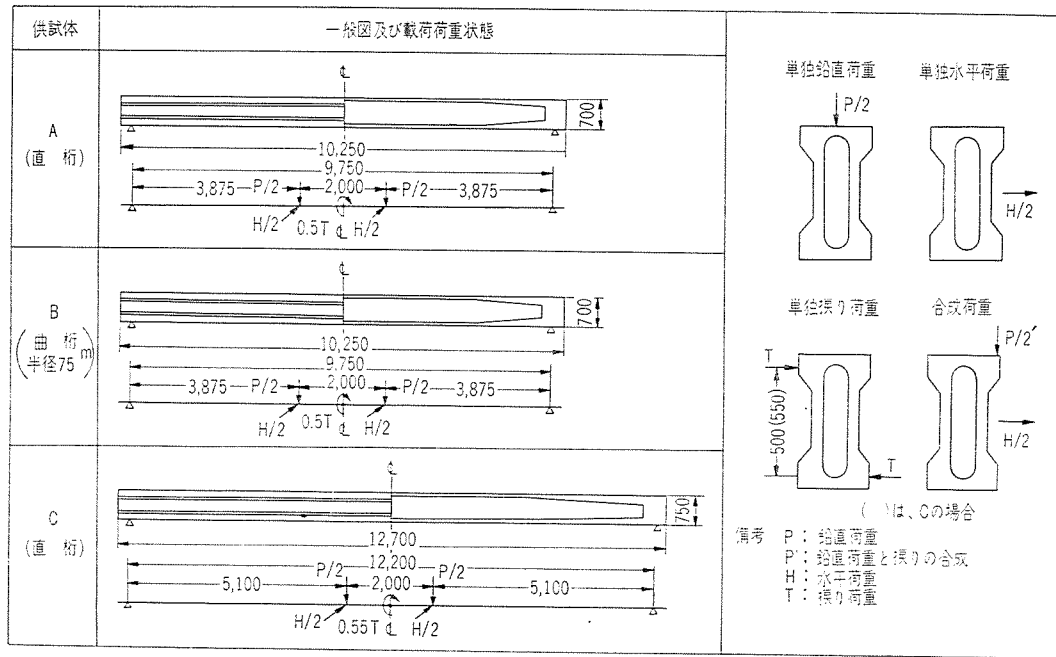


図-3 鉛直荷重載荷装置

側面図 断面図

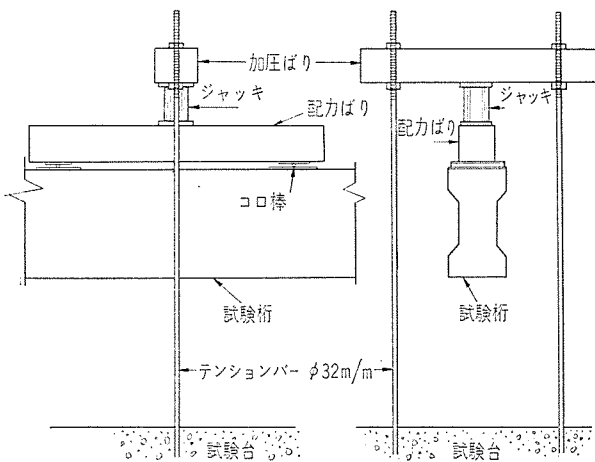
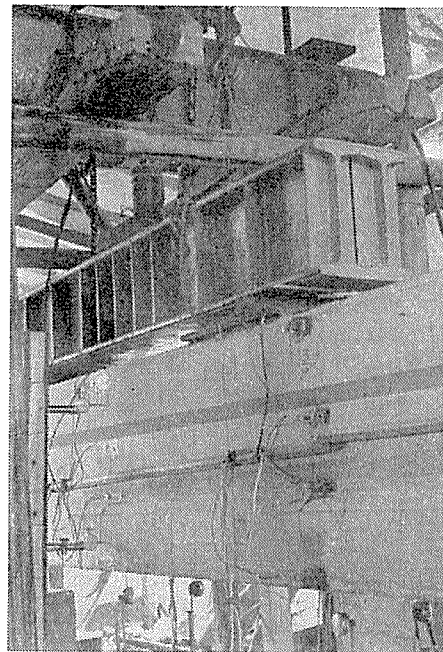


写真-1 鉛直荷重載荷装置



の比を一定に保ちながら破壊試験を行なった。

(4) 載荷装置

a) 鉛直載荷装置 (図-3, 写真-1 参照) 図-3

に示すようにテションバーを用いた載荷装置を使用した。二点載荷であるために、配力ばりを使用して荷重を二等分した。使用したジャッキは100tオイルジャッキである。

b) 水平載荷装置 (図-4, 写真-2 参照) 桁の側

面にコンクリート製のアバットを設け、これに反力を取らせるようにした。設計荷重が2.2tで非常に小さいために設計荷重時においては図-4に示すように能力5tのセンターホールジャッキと桁との間にテションメーターを配置して載荷を行なった。

c) ねじり載荷装置 (図-5, 写真-3 参照) b)の

水平載荷の場合と同様に、桁の両側のコンクリートアバットを使用して、片側は上部フランジ側面に反対側は下部フランジ側面に10tオイルジャッキによって、同時に大きさが同じで方向が反対の水平力を加えて、ねじり荷重とした。

d) 偏心鉛直載荷装置 (図-6, 写真-4 参照) 配

力ばりの位置を適当にずらすことによって、偏心鉛直載荷を行なうことができる。摩擦によって桁の変形を妨げることがないように、桁と配力ばりとの間に数枚の硬質ゴムをそう入した。

図-4 水平荷重装置

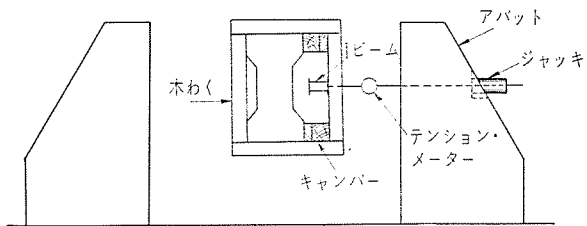


写真-2 水平荷重装置

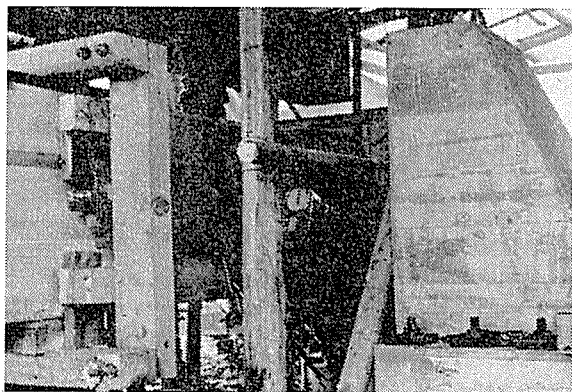


図-6 偏心荷重装置

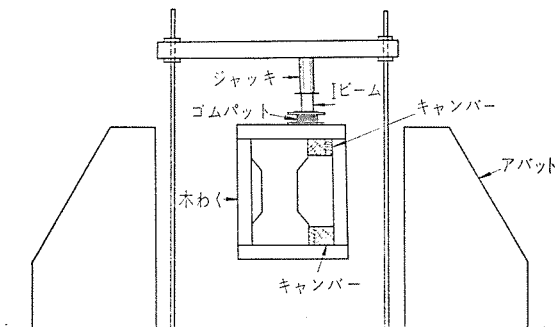


写真-4 偏心荷重装置



図-5 ねじり荷重装置

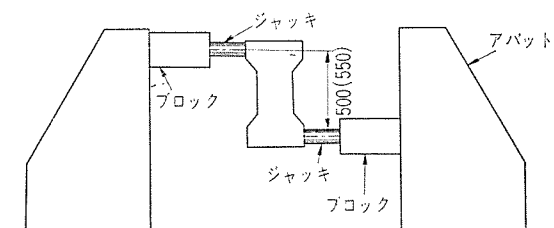


写真-3 ねじり試験装置

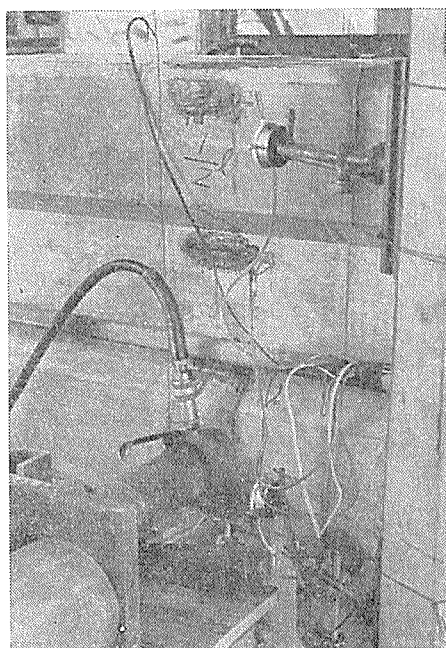


図-7 ストレイン ゲージ貼布位置

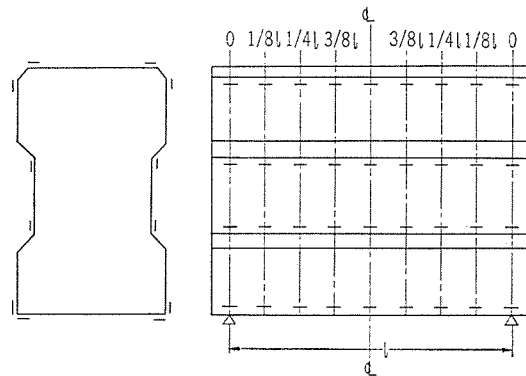
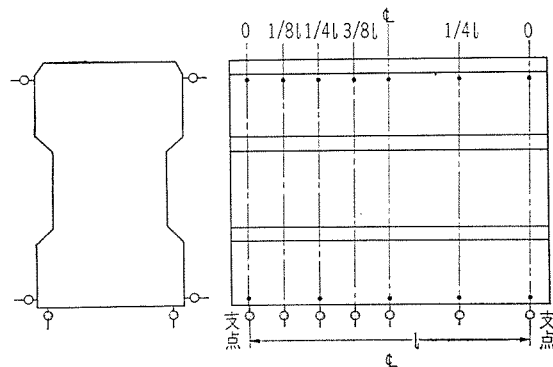


図-8 ダイヤル ゲージ配置位置



(5) 測定方法

ワイヤー ストレインゲージおよびダイヤル ゲージを用いて測定を行なった。

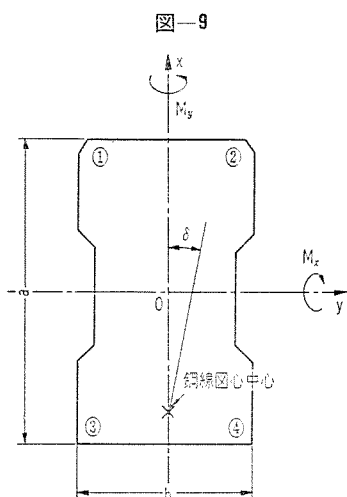
a) ワイヤー ストレインゲージ ゲージ方向は桁長方向のみである。ゲージ配置図を 図-7 に示す。

b) ダイヤルゲージ 桁のねじれ状態も調べるために、桁下面のみでなく、桁両側面にもダイヤルゲージを配置した。配置図を 図-8 に示す。

3. 設計および破壊荷重

(1) 断面の応力度

単独荷重による場合は従来の計算と同じであるが、鉛直、水平およびねじり荷重が同時に作用するいわゆる合成載荷の場合、桁は二方向の曲げを受けることになり、これまでといくぶん変わった計算が要求される。この合成荷重によって桁は当然ねじりモーメントも受けるが、本



試験の載荷法によっては、支間中央付近はねじりモーメントが0であること、および支間中央に関して荷重が対称であり、さらに桁両端断面のそりが拘束されていないために、支間中央断面の桁長方向ひずみは理論上生じない。二方向の曲げモーメントを受けたとき、座標を 図-9 のように取れば、断面の任意点の応力度は重ね合わせの原理から

$$\sigma(x,y) = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_p}{I_x} \cdot x + \frac{M_x}{I_x} \cdot x + \frac{M_y}{I_y} \cdot y$$

となる。

ただし P: PC 鋼線による軸力

A: 断面積

$e_p$ : 最初の水平中立軸より PC 鋼線の偏心量

$M_x$ : y 軸のまわりのモーメント

$M_y$ : x 軸のまわりのモーメント

$I_x$ : y 軸に関する断面二次モーメント

$I_y$ : x 軸に関する断面二次モーメント

したがって  $M_x, M_y$  が決まれば、任意点の応力度を求めることが可能である。 $M_x/M_y$  を一定に保ちながら載荷するものとすれば、ひびわれ荷重を求めることができる。これによって  $M_x/M_y=5$  として、ひびわれ荷重を求めると  $P'=13.3 t, H=2.7 t$  になる。

中立軸の位置はもし、①-③面から②-④面に通り返けるものとすれば、 $\sigma(x, b/2)=\sigma(x, -b/2)=0$  から

$$x = -\left[ \frac{r_x^2}{e_p + \frac{M_x}{P}} \right] - \left[ \frac{\frac{M_y}{P}}{e_p + \frac{M_x}{P}} \times \frac{r_x^2}{r_y^2} \right] \times y$$

となる。

ただし  $r_x^2$ : 慣性半径の2乗

$r_y^2$ : " "

破壊曲げモーメントの計算上の仮定はプレストレストコンクリート部材の破壊曲げモーメントを求める場合の一般的仮定と同じである。ただし二方向曲げモーメントを受ける場合、圧縮部コンクリートに作用する圧縮応力の合力と PC 鋼材断面の図心に作用する引張力によって形成されるモーメントの作用面は  $M_x, M_y$  の合成モーメントの作用面と一致するか、またはこれに平行である必要がある。したがって  $M_x/M_y = \text{const.}$  の条件で荷重を増加させるものとすれば、外力と抵抗力が釣り合うことと、鋼線の張力の中心は鋼線図心にあることから、コンクリート圧縮力の中心は x 軸と  $\tan \delta = M_x/M_y$  だけ傾斜して鋼線図を通る線上にあることになる。以上のことに注意して、破壊荷重を試算によって求めると  $P'=30.7 t, H=6.2 t$  となる。

(2) ねじり角

薄肉箱断面の桁全長にわたって一定のねじりモーメント  $M_T$  が作用しているとき、一端が回転可能で他端が固定であれば、単位長さあたりの回転角  $\theta$  は次式で求められる。

$$\theta = \frac{M_T \Sigma \frac{s}{t}}{4 A^2 G}$$

ただし A: 断面積

t: 肉厚

s: 原点より肉の中心線に沿って測った距離

G: せん断弾性係数

(3) 設計荷重および応力度

2. (3) の項で述べたように中央断面の応力度が実物桁のそれと同じになるように設計荷重の大きさを定めると 表-3 のようになる。さらにこの荷重が作用したときの中央断面の応力度および死荷重、ならびにプレストレスによる応力度は 表-4 のとおりである。ひびわれ荷重および破壊荷重は 表-3 のとおりである。

表-3 設 計 荷 重

荷 重 種	桁 番 号	A 桁 (t)	B 桁 (t)	C 桁 (t)	備 考
設 計 鉛 直 荷 重 $P$		11.0	11.0	12.0	
設 計 水 平 荷 重 $H$		2.2	2.2	2.2	
設 計 ね じ り 荷 重 $T$		4.4	4.4	4.54	
設 計 合 成 荷 重	$P'$	11.0		12.0	
	$H$	2.2		2.2	
鉛 直 ひ び わ れ 荷 重		21.0		23.0	
合 成 ひ び わ れ 荷 重			$P'=13.3$ $H=2.7$		
鉛 直 破 壊 荷 重		37.0 以上		42.0 以上	
合 成 破 壊 荷 重			$P'=30.7$ $H=6.2$ 以上		

表-4 計 算 上 の 応 力 度

(kg/m<sup>2</sup>)

	A				B				C				
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④	
死 荷 重	17.0	17.0	-17.6	-17.6	17.0	17.0	-17.5	-17.5	26.4	26.4	-28.1	-28.1	
プ レ ス ト レ ス	-16.7	-16.7	101.6	101.6	-16.7	-16.7	101.6	101.6	-22.3	-22.3	138.0	138.0	
鉛 直 力 $P$	68.7	68.7	-68.7	-68.7	68.7	68.7	-68.7	-68.7	88.8	88.8	-91.5	-91.5	
水 平 力 $H$	35.0	-35.0	35.0	-35.0	29.0	-29.0	29.0	-29.0	48.2	-48.2	48.2	-48.2	
ね じ り 荷 重 $T$					0	0	0	0					
合 成 値	104.0	34.0	503	-19.7	98.0	40.0	44.4	-13.6	141.1	44.7	66.6	-29.8	

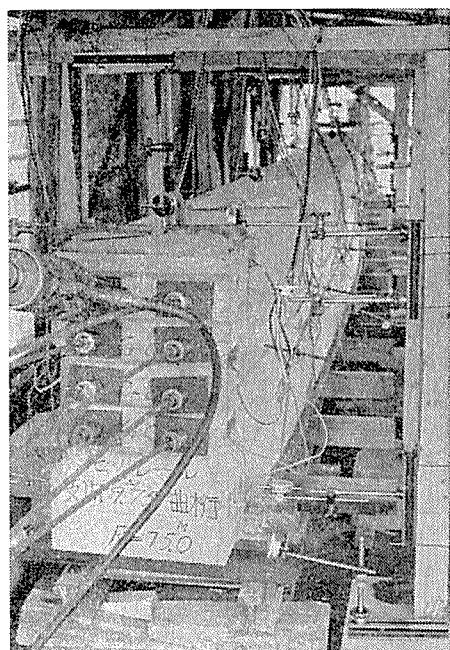
注：負の応力は鉄筋に受け持たせる。

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) プレストレッシング

φ12.4 mm の 7 本より PC 鋼より線を用いてプレストレッシングを行なった。使用したケーブル本数はそれぞれ A 桁 8 本、B 桁 8 本および C 桁 12 本である。一本びきであるために、センターホール 30 t 型ジャッキを

写真-5 プレストレッシング



用い、定着は写真-5に示すように鋼製チャックを用いた。プレストレッシングに先立って摩擦係数の測定を行なったところ、長さ方向の係数  $\lambda=0.004$ 、角度の係数  $\mu=0.5$  なる結果が得られた。プレストレッシングによって生じた支間中央の応力度を示すと図-10の左端のような分布となる。ひずみ測定箇所は上下方向に 4 カ所あるが、この 4 点の測定結果は、よく直線上に乗っており、左右の対称性も十分保たれている。しかし曲線桁である B 桁の導入された応力分布は、他の 2 本の桁に比較してやや悪く、曲線の外側が内側よりも大きな応力が導入されている。

##### (2) 鉛直荷重載荷

配力ばりを用いて支間中央から各 1 m の所に設計荷重の半分すなわち A, B 桁の場合 5.5 t, C 桁の場合 6 t を作用させた。荷重が偏心して桁に作用するのを防止するために、桁と配力ばりとの間にコロ棒をそう入した。全般的に計算値とよく一致しており、曲線桁である B 桁の応力も左右ほぼ対称に記録されている。支間中央の応力については図-10を参照されたい。

##### (3) 水平荷重載荷

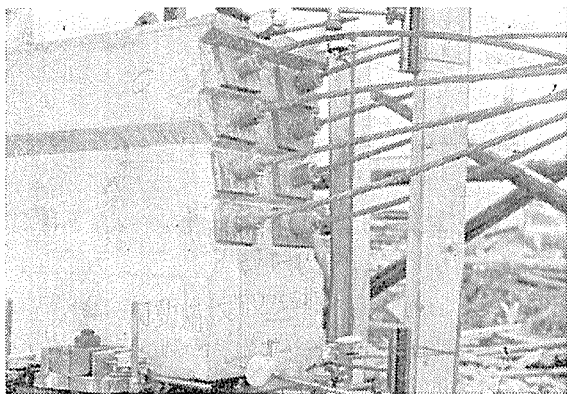
水平荷重をかける場合にシューの構造が問題になると考えられる。本実験においては、写真-6に示すように、桁は支承部左右に突出したシュー金具をボルトによって軽く支承アバットに固定されている。したがって桁長方向に関して伸縮は自由にできるようになっているが、そ

図—10 応力分布および設計荷重

荷重	プレストレス置換 Kg/cm <sup>2</sup>	設計鉛直荷重 Kg/cm <sup>2</sup>	設計水平荷重 Kg/cm <sup>2</sup>	設計捩り荷重 Kg/cm <sup>2</sup>	設計合成荷重 Kg/cm <sup>2</sup>	鉛直ひび割れ荷重 P <sub>12</sub>	合成ひび割れ荷重 (P <sub>12</sub> +H <sub>12</sub> )	鉛直捩り荷重 P <sub>3</sub>	合成捩り荷重 (P <sub>3</sub> +H <sub>3</sub> )
A 応力分布						P <sub>12</sub> =22t (P <sub>12</sub> =21t)		P <sub>3</sub> =51t (P <sub>3</sub> =37t)	
寸法	3.4 (4.7) mm	5.5 (6.4) mm	3.9 (4.0) mm	1°08' (3°15')		113 (11.0) mm		62.0 mm	
B 応力分布							P <sub>12</sub> =16t (H <sub>12</sub> =3.2t) (P <sub>12</sub> =13.2t) (H <sub>12</sub> =2.2t)		P <sub>3</sub> =24t (H <sub>3</sub> =6.8t) (P <sub>3</sub> =20.7t) (H <sub>3</sub> =4.6t)
寸法	3.7 (4.7) mm	5.5 (6.4) mm	4.0 (4.0) mm	1°54' (3°15')					
C 応力分布						P <sub>12</sub> =23.5t (P <sub>12</sub> =23.0t)		P <sub>3</sub> =20t (P <sub>3</sub> =21t)	
寸法	7.5 (6.4) mm	9.1 (9.5) mm	7.4 (7.5) mm	1°23' (4°02')		16.8 (13.8) mm		17.0 mm	

主( )内計算値  
— 実測値  
--- 計算値

写真—6 桁 端 部



れと直角方向すなわち水平荷重方向の移動は拘束されている。前にも述べたように載荷点の周囲に木製わくをばめ、桁側面に設けたアバットに反力を取ることによってこのわくを同時に引張り、桁に水平力を加えた。設計荷重が  $H=2.2t$  という非常に小さい値なので、テンションメーターによって荷重の確認を行なった。水平荷重を受けたときの水平たわみの一例を示すと 図—11 のようになる。桁の上縁および下縁の2カ所で測定を行なったが上下の差はほとんど認められなかった。ただし桁が完全に固定されている部分は桁下面のみであるから、上縁の支承付近においても多少の水平変位はある。図—11 のたわみは支点移動の補正を行なったものである。設計水平荷重による応力度は 図—10 のとおりである。水平荷重によっては桁側面が最大応力を受けるわけである。PC 鋼線配置は鉛直軸に関しては完全対称であるが、水平軸に関しては曲げ上げのために偏心していることになる。特に支間中央でその偏心量は最大となる。この断面の応力状態は 図—10 のようになっており、鉛直軸に関する対称性は非常によい。

(4) ねじり荷重載荷

桁にトルクだけを作用させるために、偶力載荷法を採用した。鉛直偏心載荷を行なうとトルクと同時に鉛直力が作用するためである。アームをできるだけ長くするために、力を上下縁のフランジ側面に作用させた。したがってアームの長さは A,B 桁においては 50 cm, C 桁においては 55 cm になった。桁がねじりモーメントを受けると支承の一部は浮き上がろうとするが、これを防止するために、ナットを使用して支承アバットに固定している。桁の両端が固定された桁の支間中央に、トルクを作用させた場合のねじりモーメント分布は、載荷点でモーメントの付号は逆になるが、その他の部分では絶対値が等しく一様である。

実測によると 図—10 に示すように約 10 kg/cm<sup>2</sup> 前後の応力度が生じている。対角線上の付号がおおむね一致している点が特色である。この応力状態は支間中央に限らず支間 1/4, 支点付近でも、同じ傾向が現われている。したがって、支間中央においても断面のそりによって、この応力が生じたとも考えられる。

ダイヤルゲージによって測定した回転角は、傾向はよく出ているが、計算値の約 1/3 程度の値である。これは測定誤差も多少考えられるが、計算で使用した式が薄肉断面に用いる式であったために生じたものであろう。

(5) 合成荷重載荷

これまでの過程においては、鉛直荷重、水平荷重およびねじり荷重をそれぞれ単独に作用させ、それによって生ずる結果を調べてきた。しかし実際の桁においては荷重が単独で作用することはごくまれで、合成された力が加えられることが多い。力学的な面からいえば、このような単独荷重の重ね合わせが合成荷重となる。

ねじりモーメントを偶力によって生じさせる方法は水平力と同時載荷になる点から、この試験装置では不可能

図-11 (a) 水平たわみの測定値 (I)

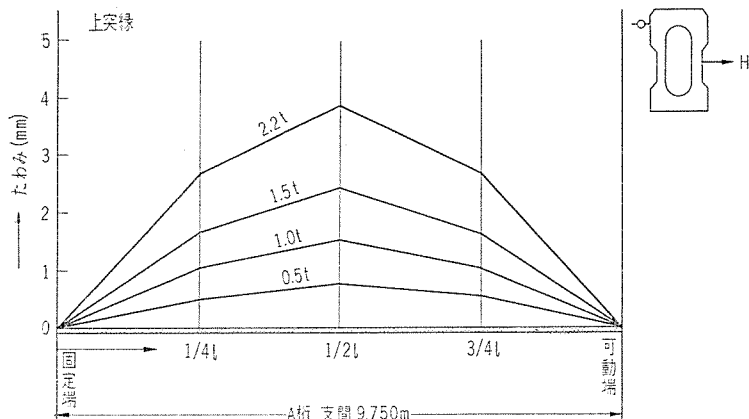


図-11 (b) 水平たわみの測定値 (II)

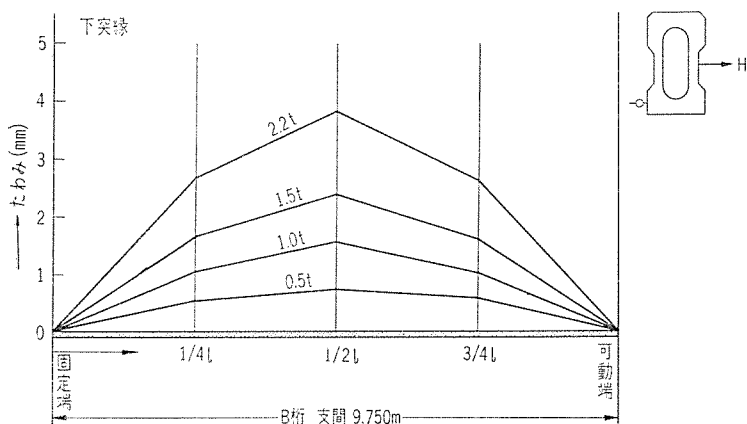


表-5 ひずみの比較

荷重	各設計荷重を単独荷重の場合のひずみ測定値				各設計荷重を合成荷重の場合のひずみ測定値
	鉛直荷重	水平荷重	ねじり荷重	合計	
設計最大荷重	$P=11\text{ t}$	$H=2.2\text{ t}$	$M_T=2.2\text{ tm}$		$P=11\text{ t}$ $H=2.2\text{ t}$ $M_T=2.2\text{ tm}$
断面	1	-200	-80	-20	-300
	2	-200	90	-10	-120
	3	180	-80	30	130
	4	180	90	-40	230

単位:  $\times 10^{-9}$

なので、鉛直力の位置を  $e$  だけ水平に偏心させ、これによってねじりモーメントを作用させた。鉛直力を  $P$ 、加えるべきねじりモーメントを  $M_T$  とすれば、偏心量  $e$  は次のようになる。

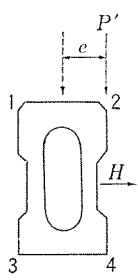
$$M_T = e \cdot P \therefore e = \frac{M_T}{P}$$

これによって偏心量を求めると例えば A 桁の場合  $P=11.0\text{ t}$ 、 $M_T=4.4\text{ t} \times 1/2=2.2\text{ t}\cdot\text{m}$  であるから  $e=2.2/11.0=0.2\text{ m}$  となる。ここで単独に荷重した場合のひずみの和と合成して同時荷重した場合の A 桁の支間中央ひずみを比較してみると表-5 のようになる。なお応力度

に直した比較は、図-10 を参照されたい (B 桁の合成荷重は A 桁の場合とほぼ同じと考えられるので、特に合成荷重としては行なわず、破壊試験の途中において、記録を取るようにした)。ここで注意しなければならない点は、ねじりモーメント分布図が両者で異なっている点である。すなわち単独荷重においては支間中央で付号が逆になり、モーメントの 0 になる点は支間中央ただ一点だけであるが、合成荷重の場合は二点荷重になっているために、支間中央部分 2 m がモーメント 0 の状態になっている。したがって厳密な意味で両者を比較することはできないが、かなりよく一致している。

(6) 鉛直ひびわれ、および破壊荷重

A 桁および C 桁について、単独鉛直荷重によってひびわれおよび破壊試験を行なった。このときの C 桁のひびわれ発生状況を写真-7 に示す。最初のひびわれは、A、C 桁とも荷重点付近に発生した。ひびわれ荷重は A 桁においては 22.0 t、C 桁においては 23.5 t であった。コンクリートの引張強さ係数は測定によると  $41\text{ kg/cm}^2$  であったので、この値を使用して計算上のひびわれ荷重を求めると表-3 に示したように A 桁の場合 21.0 t、C 桁の場合 23.0 t になる。この両者を比較してみると 0.5~1.0 t の範囲すなわち 5% 程度の誤差で非常によく一致している。一方測定値を用いて本試験桁の設計荷重に対する安全率を求めてみると A 桁の場合 2.1、C 桁の場合 1.9 になっている。

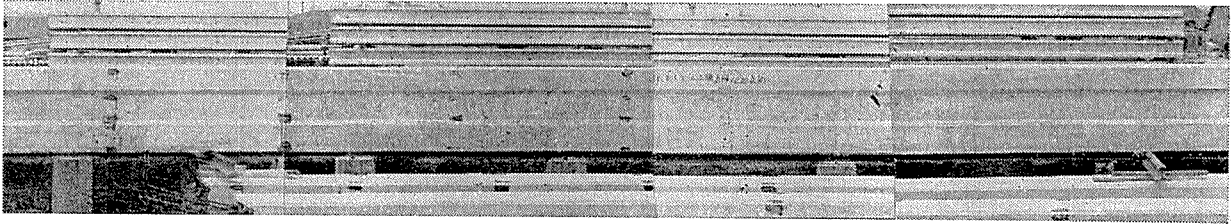


ひびわれ荷重を確認したのちに荷重をいったん解放し、ひびわれ再開荷重を確認しながら、破壊状態に至るまで鉛直荷重を増加させていった。ひびわれの出た範囲は A、C とも支間中央から、支間 1/4 の点までの間でほとんど等間隔で鉛直なひびわれ

が発生している。ひびわれの方向がほぼ鉛直であることから曲げ破壊であることが想定される。ひびわれ状況図で荷重点間で等しい荷重の値を線で結んでみると、多少の波打ちはあるが、おおむね水平であることがわかる (二点荷重であるために両荷重間にはモーメントが一定になるためと考えられる)。A 桁では約 40 t で上部フランジの付根まで達し、C 桁においては、約 60 t で同じ箇所まで達している。さらに荷重を増加させると荷重直下のクラックは上縁側面すなわち断面的にみると中空部分の上部付近まで達した。この状態で荷重の増加はほとんど認



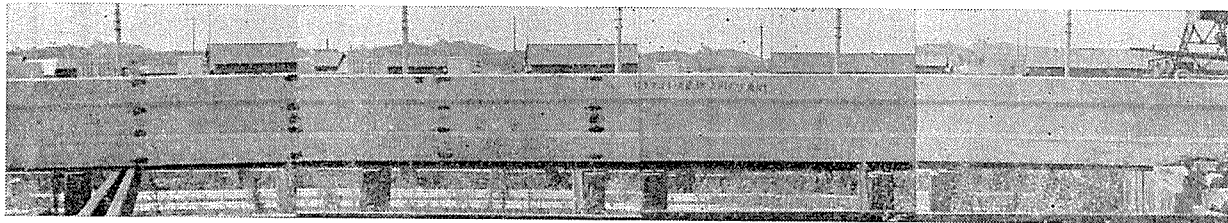
写真一7 鉛直荷重載荷による C 桁のひびわれ発生状態



写真一8 合成荷重（鉛直、水平、ねじり）載荷による B 桁のひびわれ発生状況  
(a) 水平荷重による引張側



(b) 水平荷重による圧縮側



められなくなり、たわみのみ増加したので、この値を破壊荷重とみなした。51 t、および 80 t がそれぞれ A 桁および C 桁の破壊荷重である。

(7) 合成ひびわれ、および破壊荷重

3. の設計および破壊荷重の項でも述べたように、合成荷重が作用した場合の断面の応力度は、ねじりによる断面に垂直な応力度を無視すると

$$\sigma(x,y) = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_p}{I_x} \cdot x + \frac{M_x}{I_x} \cdot x + \frac{M_y}{I_y} \cdot y$$

となる。この式から明らかなように桁断面の④の隅からひびわれが発生するものと考えられる。写真一8 に B 桁のひびわれ発生状況を示す。これによると④の隅に荷重 19 t のときに数本のひびわれが発生した。このときの水平力は常に鉛直力の 1/5 である 3.8 t である。一方計算上のひびわれ荷重は鉛直力 13.3 t、水平力 2.7 t であるから、実測値は計算値に比較してかなり大きいことになる。その後いったん荷重を解放して、その後ひびわれ再開荷重を確認しつつ荷重を上昇させた。なお、ひびわれ再開荷重は  $P' = 12 \text{ t}$ 、 $H = 2.4 \text{ t}$  であった。荷重を増加させるとひびわれは②および④の隅に向かって進み約  $P = 30 \text{ t}$  のときに③-①の面にひびわれが発生し、そのとき③-④面はほぼ全面にわたって、ひびわれが進行している状態であった。鉛直力 34 t のときに支承のアンカー鉄筋が破損したために、ここで実験中止ということにな

り、最終的な破壊荷重をうるまでには至らなかったのは残念である。

計算による破壊合成荷重は  $P' = 30.7 \text{ t}$ 、 $H = 6.2 \text{ t}$  であり、最終的な破壊荷重は得られなかったものの設計破壊荷重以上の強度を有することは確認できたわけである。

この状態で荷重を増加して仮に破壊荷重に達したものとすれば、当然曲げ破壊が生じたものと推定される。

5. 結 論

この実験の結果を要約すると次のようになる。

- ① 水平荷重による応力は弾性理論によって解析してよい。
- ② 中空断面の桁に同時に鉛直、水平およびねじり荷重が作用した場合に生ずる応力は、単独にそれぞれの荷重が作用したときの応力の和に等しいと考えてよい。
- ③ 鉛直荷重および合成荷重時の破壊は、すべて曲げによるものと考えてよい。
- ④ ひびわれ強度はほぼ計算値と一致している。
- ⑤ 実際の破壊強度は計算値に比較してかなり大きい。

試験月日 昭和 37 年 6 月～8 月  
 試験施工 オリエンタルコンクリート KK 多摩工場  
 試験管理 日立モノレールコンサルタント KK オリエンタルコンクリート KK 共参

1963.3.15・受付