

工場屋根組プレストレスト コンクリート 構造に関する模型試験報告

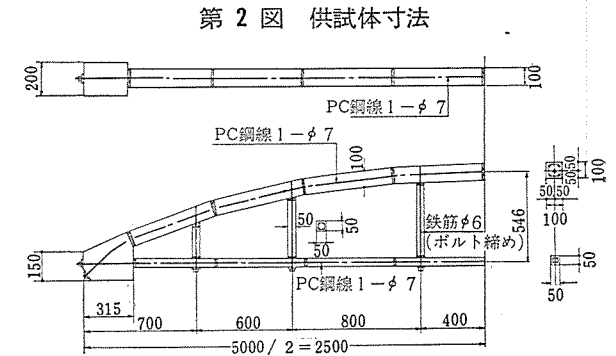
猪 股 俊 司

1. ま え が き

某工場新設にあたり、床面積 4 000 m² をおおう屋根構造にプレストレスト コンクリート構造を採用することとした。そのスパンは 25.25 m で桁行方向には 6 m 間隔に鉄筋コンクリート柱を現場打ちで施工し、これら相対する柱の間にスパン 25.4 m の第 1 図のような構造物を架設し、これらの間にプレストレスト コンクリート小バリを架設するものである。小バリ間には現場打ち鉄筋コンクリートを施工した。この種構造は大スパンの場合には、所要材料および力学的性質において非常に有利であるが、国内においてはまだ実施経験がないため、施工上の諸問題および、安全度を検討するため実物の約 1/5 の模型を製作し、プレストレスの分布、載荷時の応力分布、破壊安全度、等を検討したものである。

2. 供試体およびプレストレスの分布測定

供試体は第 2 図に示すにうなものである。上弦材は 10×10×55 cm の柱状モルタルブロック 8 コよりなり、下弦材は 5×5×33.5 cm のモルタルブロック 8 コより

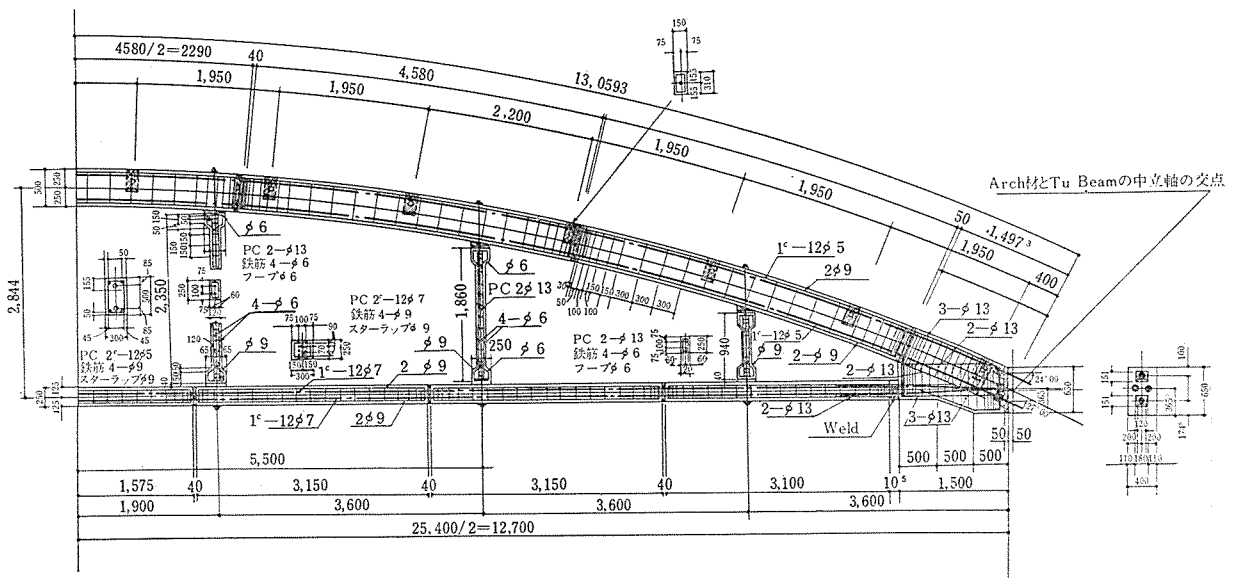


第 2 図 供試体寸法

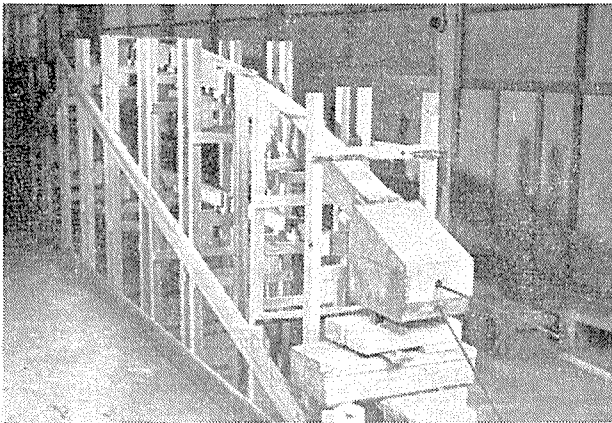
なっている。各ブロックの中央には φ 13 mm の穴をあけ φ 7 mm の PC 鋼線を通すようにしてある。吊材は 5×5 cm のモルタルブロックで、上下両弦材には U 形の φ 6 mm ボールトによって結合されている。モルタル配合は $w/c=0.35$, $c/s=1/1.25$ であり目地モルタルは $w/c=0.30$, $c/s=1/1$ である。PC 鋼線は、 $\sigma_{pu}=161 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_{py}(0.2\%)=142 \text{ kg/mm}^2$ であった。プレストレッシング後はシーす内にポリエステルを注入した。

プレストレッシングは実際施工の場合と同様な状態とするため第 3 図のような架台上に各部材を乗せて実施

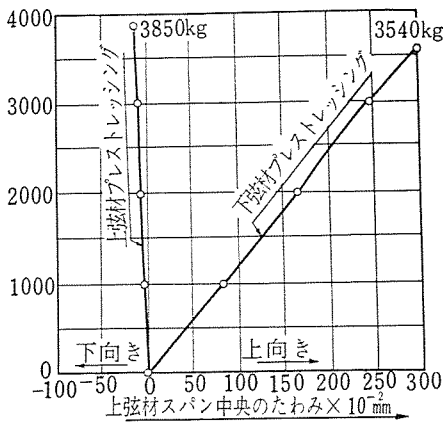
第 1 図 屋根組用 PC ポーストリング構造



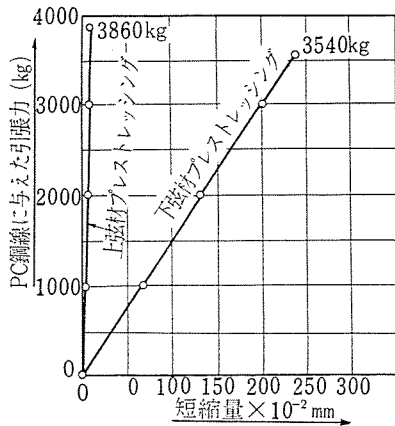
第 3 図 供試体組立用架台



第 4 図 アーチ両端間で測定された短縮量



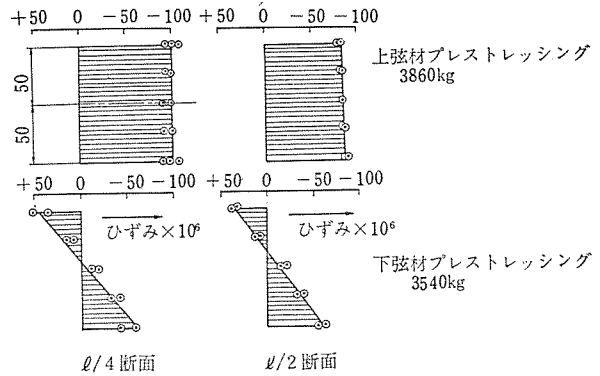
第 5 図 上弦材スパン中央のたわみ



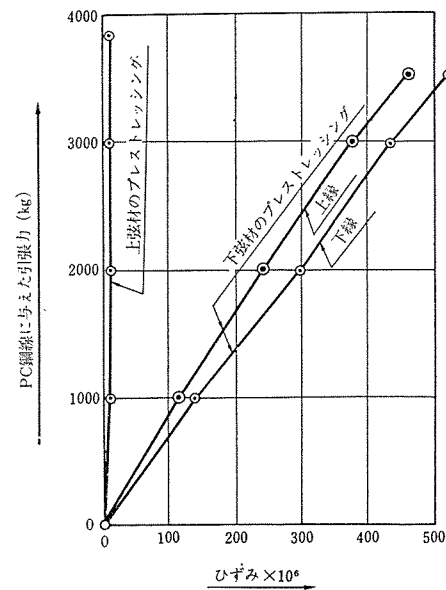
した。目地施工硬化後、吊材を上下両弦材にとりつけるボルトを締めつけ、(1) 上弦材、(2) 下弦材、の順序に従ってプレストレスを与えた。第 4 図、第 5 図にそれぞれプレストレスをあたえた場合のアーチ両端間で測定された短縮量および上弦材スパン中央のたわみを示してある。PC 鋼線に与えた引張力は、上下弦材でそれぞれ 3860 kg および 3540 kg であった。

プレストレス コンクリート Vol. 1, No. 1.

第 6 図 上弦材のプレストレスによるひずみ分布



第 7 図 下弦材のプレストレスによるひずみ分布



第 6 図は上弦材のひずみ分布を第 7 図には下弦材のひずみ分布を示してある。

以上の測定結果によると、プレストレス後のアーチ両端間で測定された短縮量は $\Delta l = 250 \times 10^{-2} \text{mm}$ であり、上弦材中央点の変位は上向きに $\Delta \delta = 283 \times 10^{-2} \text{mm}$ である。上弦材のプレストレスによるひずみ分布は各断面で一様であるが、 $l/2$ 断面では $l/4$ 断面での約 85% となり摩擦が相当大きいことを示している。下弦材のプレストレスによる上弦材断面のひずみ分布は、上縁で伸びを下縁では圧縮を示す直線分布となり、上弦材には軸方向力と同時に負の曲げモーメントが作用したことを示している。

下弦材には上弦材のプレストレスによっては、ほとんどひずみを生じていないが、下弦材のプレストレスによっては大きいひずみを生じている。

吊材におこる ひずみ はプレストレスングによつては常に 10×10^{-6} 以下であつて電気抵抗線ひずみ計の測定誤差の範囲を出ていない。以上ひずみ測定結果を総合すると第1表のようになる。

第1表 ひずみ測定結果 (平均値) 単位 10^{-6}

プレストレスングの順序	上 弦 材				下 弦 材	
	1/4 断面		1/2 断面		上 緑	下 緑
	上 緑	下 緑	上 緑	下 緑		
上 弦 材	+100	+100	+ 85	+ 85	+ 10	+ 10
下 弦 材	- 45	+ 55	- 42	+ 52	+460	+520
合 計	+ 55	+155	+ 43	+137	+470	+530

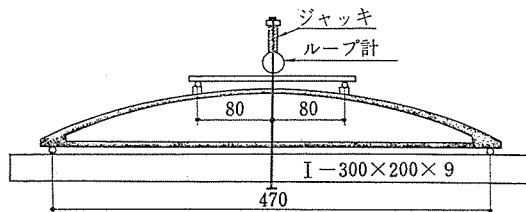
注: 正号...圧縮ひずみ, 負号...引張ひずみ

3. 載 荷 試 験

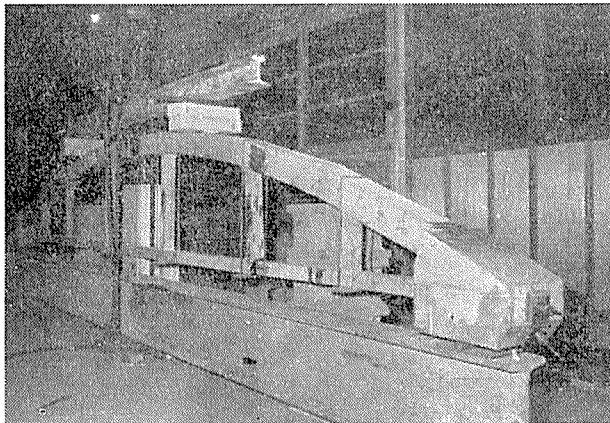
載荷試験は第8図, 第9図に示す方法により対称2点荷重を上弦材に作用させた。試験時のモルタル圧縮強度は 764 kg/cm^2 であった。第10図, 第11図にアーチ両端間で測定された水平変位および上弦材スパン中央のたわみを示してある。第12図には上弦材スパン中央断面のひずみ分布を示してある。

載荷試験時最初にひびわれの発見されたのは $2P = 1.0 \text{ t} \sim 1.2 \text{ t}$ のときで端ブロックと上弦材との接合断面目地モルタル位置であった。 $2P = 1.8 \text{ t} \sim 2.0 \text{ t}$ で上下両弦材ともにひびわれが発生し, 特に $2P = 2.0 \text{ t}$ 以

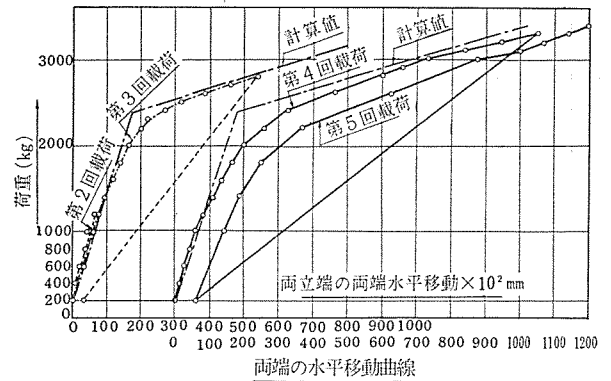
第8図 載荷試験方法



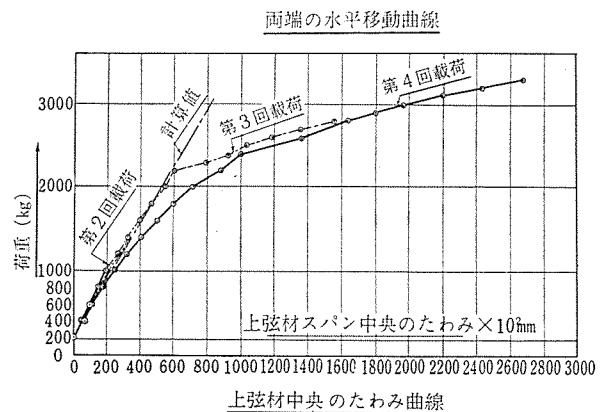
第9図 載荷試験状況



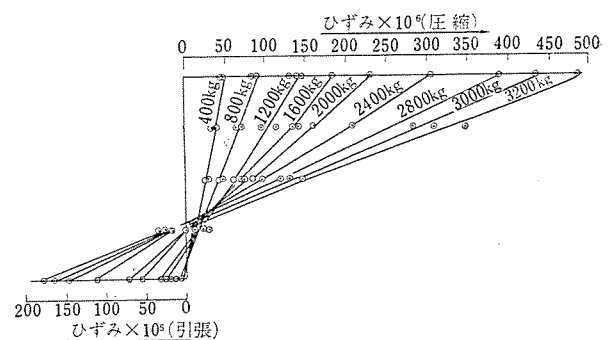
第10図 アーチ両端間で測定された水平変位



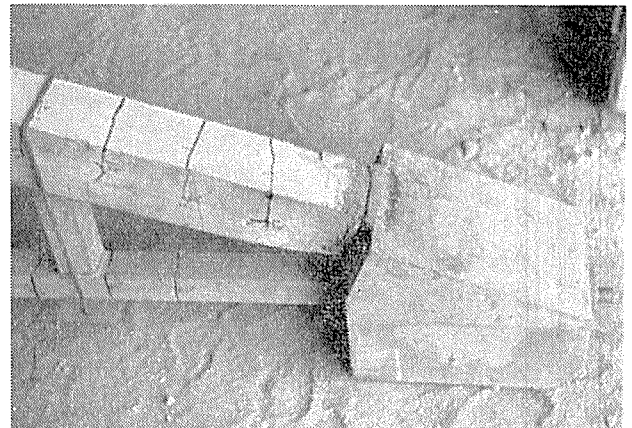
第11図 上弦材スパン中央のたわみ



第12図 上弦材スパン中央断面のひずみ分布



第13図 ひびわれ状況の一部



上では下弦材のひびわれ、目地切れによって、水平変位および上弦材のたわみが急激に増加する結果となった。第13図にはひびわれ状況の一部を示してある。数回荷重をくり返したが $2P=1.0\text{ t}$ までは、水平、垂直、変位ともに荷重に比例し弾性的であった。 $2P=3.6\text{ t}$ のときに第13図に示す端ブロックと上弦材との接合断面上で上弦材のモルタルが圧縮破壊を生じた。

4. 試験結果の検討

この構造物は内的に一次の不静定であると簡単に仮定し、上下両弦材は吊材によって結合されているので両者のたわみは同一であると考え、荷重による曲げモーメントは上下両弦材に、その断面2次モーメントに比例して分配されるものと考えられる。不静定力 X_1 を求めるため下弦材に切断面を考え δ_{11} を計算すると、つぎのようになる。

$$\delta_{1,1} = \int \frac{y^2}{EI} ds + \int \frac{1}{EA_2 \cos \theta} dx + \int \frac{1}{EA_1} dx \equiv 829.68 \frac{1}{E}$$

ここに、 $I=I_1+I_2$ (上下両弦材断面2次モーメント和)
 A_2, A_1 : それぞれ上下両弦材断面積

上弦材のプレストレッシングにより上弦材には曲げモーメントは作用しないから、 δ_{1,p_0} はつぎのようになる。

$$E \delta_{1,p_0} = - \int \frac{P_0 \cos \theta}{A_2} ds \equiv -4.4 P_0$$

下弦材のプレストレッシングによる δ_{1,p_u} は、

$$E \delta_{1,p_u} = \int \frac{P_u}{A_1} dx = 17.60 P_u$$

となる。よってプレストレッシングによる不静定反力は

$$X_{p_0} = -\delta_{1,p_0} / \delta_{1,1} = 0.004586 P_0$$

$$X_{p_u} = -\delta_{1,p_u} / \delta_{1,1} = 0.02121 P_u$$

となる。等分布荷重 w による $E \delta_{1,w}$ は、計算すると、

$$E \delta_{1,w} = 369065 w$$

となり、自重 $w=0.33\text{ kg/cm}$ による $X_w = -\delta_{1,w} / \delta_{1,1} = -147\text{ kg}$ である。

$l/2$ および $l/4$ 断面でのひずみ分布を比例すると 12° の角変化で15%の減少となっている。これから摩擦係数を求め、端ブロック内での角変化をも考慮に入れると、上弦材のプレストレッシングの平均引張力は 2710 kg となる。よって

$$X_{p_0} \equiv 12\text{ kg} \quad X_{p_u} = -75\text{ kg}$$

となる。自重が作用したときの下弦材に作用する軸方向力は

$$N = 3540 + 12 - 75 - 147 \\ = 3330\text{ kg}$$

プレストレスト コンクリート Vol. 1, No. 1.

となる。よって下弦材の全短縮量は、

$$\Delta l \equiv \frac{3330}{23.7} \times \frac{440}{E} = \frac{61800}{E} (\text{cm})$$

となる。測定結果(第4図)の原点の補正をすると、 $\Delta l=0.24\text{ cm}$ となっているので、 $E=2.6 \times 10^5\text{ kg/cm}^2$ と仮定できる。

$l/2$ 断面の垂直方向のたわみは $X_1=1$ および自重 w を考慮して求めると、つぎのようになる。

$$E \delta_{1,1}' = - \int_0^{l/2} \frac{xy}{I} ds + \frac{l}{2} \int_0^{l/2} \frac{y}{I} ds = 1339.929$$

$$E \delta_{1,w}' = \frac{l}{2I} \int_0^{l/2} \frac{1}{2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) ds - \frac{1}{I} \int_0^{l/2} \frac{1}{2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) x ds + X_{1w} E \delta_{1,1}' \\ = 557.222 + 1339.929 X_{1w}$$

よってプレストレッシングの終了したときの中央たわみは、 $E=2.6 \times 10^5$ として求めるとつぎのようになる。

$$\Delta \delta = [-1339.929(75-12) - 557.222 \times 0.33 \\ + 1339.929 \times 149] \cdot \frac{1}{2.6 \times 10^5} = -0.275\text{ cm}$$

測定結果は 0.285 cm であった。

載荷荷重(対称2点荷重)による不静定反力 X_p を求めると、つぎのようである。

$$X_p = -1.375 \times 2P$$

載荷時のアーチ両端で測定された水平移動および上弦材スパン中央たわみは、つぎのように求められる。

$$\delta_h = \frac{X_p}{EA_1} l = 81.7 \times 10^{-2} \times 2P (\text{mm})$$

$$\delta_v = \frac{Pl}{2EI} \int \left(\frac{l}{2} - R \sin \theta \right) ds - \frac{P}{EI} \int \left(\frac{l}{2} - R \sin \theta \right) R \sin \theta \cdot R d\theta + X_{1p} \delta_{1,1}' = 283 \times 10^{-2} \times 2P (\text{mm})$$

これらの結果を第10図、第11図に記入すると、 $2P=1.4\text{ t}$ 程度までよく測定値と一致している。上下両弦材に相当ひびわれを発生しても不静定力に変化がないものとして δ_h を、不静定力がPC鋼線だけで、うけられるものとする、

$$\delta_h = \frac{X_p}{A_p E_p} l = 806 \times 10^{-2} \times 2P (\text{mm})$$

となる。下弦材のひびわれの大となる $2P=2.4\text{ t}$ から、これを図示したものが第10図に示してある。大体の傾向は測定結果と一致している。

プレストレスの計算値は上弦材で軸力は $P_0 - 210 \cos \theta$ (kg)、曲げモーメントは、

$$\left[\frac{0.33}{2} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) - 210 y \right] \frac{I_2}{I}$$

であるから、上弦材のスパン中央で $\sigma_{c0}=10 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{cu}=33 \text{ kg/cm}^2$ となる。測定結果は、 11 kg/cm^2 , 36 kg/cm^2 となっている。1/4 断面でも大体計算値と測定値とは一致している。下弦材の1/2 断面では、軸力 $N=3\,330 \text{ kg}$ 、曲げモーメント、 $M=-2\,050 \times 1/17 = -120 \text{ kg/cm}$ を用いて計算すると、上下両縁でそれぞれ $+134 \text{ kg/cm}^2$, $+146 \text{ kg/cm}^2$ となる。測定値はそれぞれ $+120 \text{ kg/cm}^2$, $+135 \text{ kg/cm}^2$ となっている。

2P なる荷重による上弦材 1/2 断面の断面力は、軸力 $1.375 \times 2P$ 、曲げモーメント、 $2.182 \times 2P$ である。よって上下両縁の応力度は、それぞれ $26 \times 2P$, 0 kg/cm^2 である。第12図のひずみ分布は $2P=1.0 \sim 1.2 \text{ t}$ までは大体三角形分布を示し計算結果と大体一致している。 $2P=1.6 \text{ t}$ 以上となると下縁にも引張応力度を生じ、ひびわれ発生によって前記弾性範囲の計算式の成立しないことを示している。

最初にひびわれの発見された断面において $2P=1.1 \text{ t}$ として引張応力度を計算すると 45 kg/cm^2 となりプレストレス $+41 \text{ kg/cm}^2$ と大体一致する。すなわち目地の引張強度を無視すれば、ひびわれ発生荷重は説明できる。以上の計算結果を総合すると、本試験の荷重状態に対して、フルプレストレスリングの設計荷重は $2P=1.0 \text{ t}$ と考えることができる。

5. 破壊荷重の計算

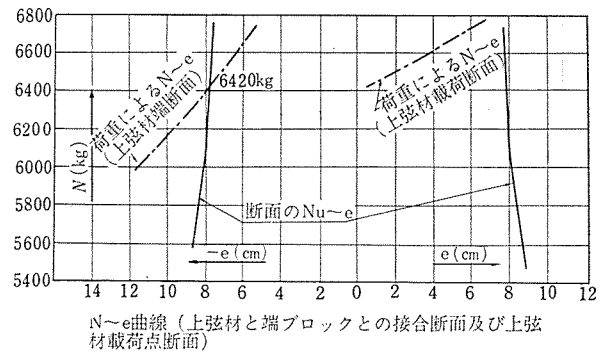
弾性理論の範囲内において不静定力 X は荷重 P の一次関数であって容易に定められる。よって上弦材断面の応力計算にあたって偏心軸方向力をうけるものとして計算できる。この偏心量は $e=M/N$ であって、 M, N ともに P の一次関数で常数項を有しないから、 e は常に一定である。しかし破壊近くなるとひびわれが発生するので偏心量 e は一定でなく P の関数となる。下弦材の目地が切断し、またブロックにひびわれが発生すると、下弦材の変形は急激に増加するから PC 鋼線のうける引張応力度も、非常に大となっているものと考えられる。用いられた PC 鋼線の応力-ひずみ曲線は引張応力度が 143 kg/mm^2 ($5\,500 \text{ kg}$ 程度) から急激にひずみが増加する。よっていま簡単のため構造物の破壊時には下弦材の PC 鋼線はその引張強さ $6\,200 \text{ kg}$ に達しているものと考えことにする。

以上の仮定によると上弦材と端ブロックとの接合断面における M, N はつぎのようになる ($2P$ の単位は t)。

$$N = 183 \times 2P + 5\,770 \text{ (kg)}$$

$$M = 7\,500 \times 2P - 77\,500 \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$$

第14図 $N_u - e$ 曲線



本関係から $e=M/N$ を求めると第14図のようになる。同様に載荷点断面の $N-e$ 曲線を図示してある。つぎに部材断面破壊時の最大偏心荷重 N_u とその偏心量との関係を求める。平面保持および $\epsilon_{cu}=0.3\%$ の仮定を用い圧縮応力度は σ_{cu} でその分布は矩形であるとする。以上の仮定を用いて

$$N_u = b x \sigma_{cu} - A_p \sigma_p,$$

$$A_p \cdot \sigma_p \cdot e - b x \sigma_{cu} \left(e - d + \frac{x}{2} \right) = 0$$

の条件で、 x を仮定して、 ϵ_p を求め、これと有効引張応力度のひずみとを加えとを加えて PC 鋼線引張応力度を求め、上の条件式に代入して $N_u - e$ 曲線が求められる。この結果を第14図に記入して各断面における荷重による $N_u - e$ 曲線との交点を求める。

この結果は上弦材端断面において $N_u=6\,420 \text{ kg}$ を与え破壊荷重 $2P_u$ はつぎのようになる。

$$2P_u = \frac{6\,420 - 5\,770}{183} = 3.55 \text{ t}$$

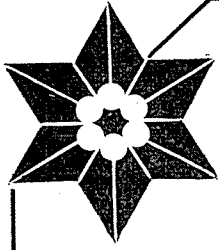
載荷点では $2P_u$ は 3.55 t より大となっている。よって破壊は上弦材端でおこり、 $2P_u=3.55 \text{ t}$ である。試験の結果は試験装置の全重量をも含めて $2P_u=3.68 \text{ t}$ であった。すなわち非常によく一致しているといえる。

6. む す び

本試験は実験方法その他に不備の点も多いが、この種構造物の設計にあたって用いられた仮定が十分正しいものであったことを示している。すなわち相当大きいひびわれの発生するまでは弾性理論によって応力分布、変形が正しく説明でき、またプレストレスの分布も実用上十分正しく説明できる。破壊荷重も極限強度理論を適用することによって説明することが可能であった。

以上のことから、この種構造物は十分安全なものであることが証明され、大スパン屋根組構造として応用可能なことが明らかとされた。なお本試験に際しなされた渡辺明、星川明男、両君の労を多とする。

(正会員 工博 極東鋼筋コンクリート振興KK設計部長)

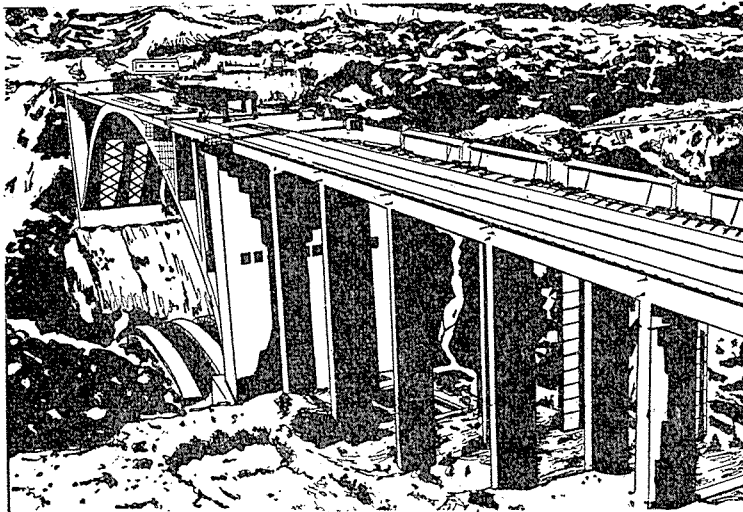


最古の歴史
最新の設備
最高の技術

PCワイヤ PCストランド

東京製綱株式会社

東京都台東区浅草橋 2~3~5 電話 85局 8261 (代)
川崎工場・小倉工場・蒲郡工場



ピアノ線を使ったPS工法による橋の架設状況です。



- ◎鉄道の枕木にも **E71** 線
- ◎上・下水道のヒューム管にも **E71** 線
- ◎近代的高層建築にも **E71** 線
- ◎高速度道路にも **E71** 線

E71線はその力強さとねばり強さから
土木建築工業にかくことのできない材
料となりました その使用量は毎年60
%以上も増加しています

鈴木金属工業株式会社

取締役社長 村山 祐太郎

スズメPC鋼線