

不静定架構のプレストレス導入にともなう二次応力 ——多治見駅本屋架構についての試験——

井 原 道 継*
大 熊 勝 寿**

1. ま え が き

本報告は、多治見駅本屋改築第2期工事において、その躯体を現場打鉄筋コンクリート一体式ラーメンにプレストレスを加える工法を用い、その施工に際してプレストレスの導入状態を実測する試験をおこなったので、その結果をとりまとめて報告したものである。

なお、本試験は昭和38年12月1日～7日に多治見駅構内において行なったものである。

2. 試験の目的

不静定架構にプレストレスを加える場合、プレストレスの導入にともなって、二次応力を発生する。この二次応力の計算はかなり複雑で、かつ、明解でない点が多いため、従来、二次応力を生じないような方法が多く用いられてきた。

多治見駅本屋改築第1期工事においても現場打PC大ばりは、プレストレスの導入時の二次応力の発生を避けるため、柱頭にロッカーピンを設けて大ばりを受け、プレストレス導入後ロッカーピンの周囲にコンクリート打ちを行なって柱頭とはり端を剛接とした。

このような方法を用いると、プレストレスの導入時に生ずる二次応力の発生を避けることはできるが、工期が延びるだけでなく外観も悪くなるので、第2期工事では柱、はりを一体打とし、二次応力を計算に入れて、導入するプレストレスを決定することにした。導入時のプレストレスを確認するとともに、フレシネコーン定着時のPC鋼線のすべりによるプレストレスの減損と、PC鋼線の緊張力の摩擦損失を合わせて測定し、今後の設計施工に資することを目的として本試験を行なった。

3. 試験建物概要

多治見駅本屋は、本来の駅設備のほか、構内の諸建物を統合し、旅客食堂、売店などを合築したもので、PC、RC造混用、奥行12m、桁行78m、総2階、延べ約2000m²の建物である。

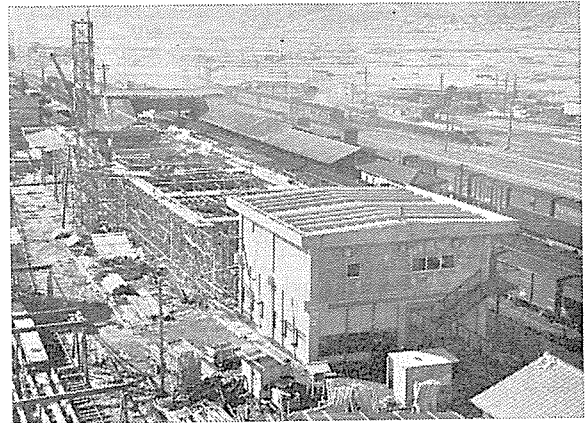
* 国鉄鉄道技術研究所 建築研究室長

** " " 同 研究室

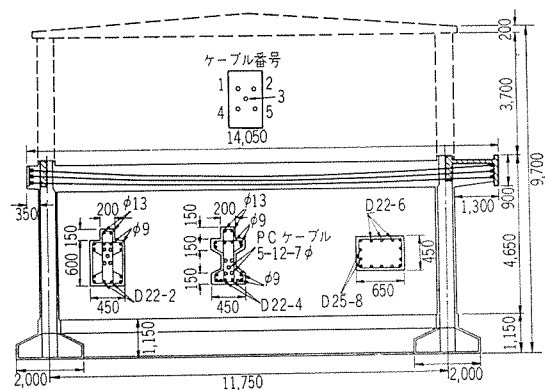
旅客の流れをスムーズにするため奥行12mを1スパンとして旅客広間内に柱を設けず、大ばりはPC造とし2階床にはダブルT版を用い、屋根版にはプレキャストのRC造シングルT版を用いた。ただし柱はRC造である。

なお、第1期工事 塩尻方2スパン約300m²は、昭和37年12月に竣工し、第2期工事 11スパン約1700m²は昭和38年9月着工し、昭和39年3月竣工した。

写真—1 試験建物全景



図—1 構造詳細



4. 試験体概要

前記建物のうち今回試験を行なった部分は 図—2 に示すラーメン中、左側から二つ目のラーメンである。2階の床面から上の部分は、ダブルT版とも施工前の状態で、隣接するラーメンとはRC造の地中ばり、2階桁ばり、

図-2 ラーメン配置

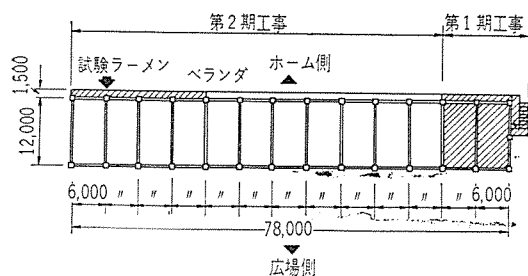
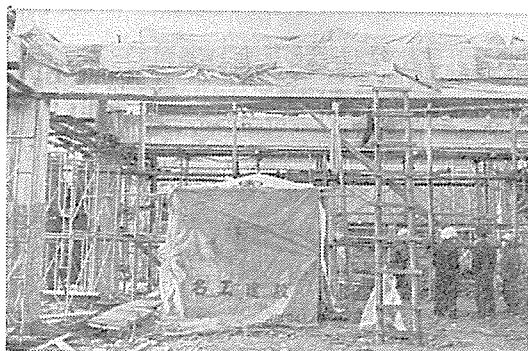


写真-2 試験体全景



線路側ベランダ床で結ばれており、完全に独立した単独のラーメンではない。

コンクリートの配合と圧縮強度は表-1, 2 に示すとおりである。セメントは早強性ポルトランドセメントを使用したもので、柱はコンクリート打設後 30 日目に、はりと同じく 19 日目に本試験を開始した。

写真-3 試験体はり

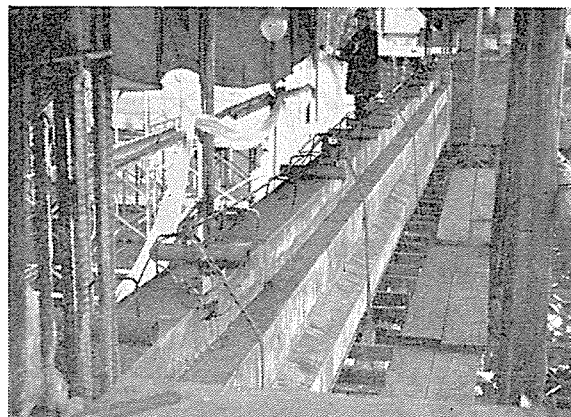


表-1 コンクリートの配合

部 材	設計強度 (kg/cm ²)	スランブ (cm)	w/c (%)	セメント (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	砂 利 (kg/m ³)	水 (l/m ³)
柱	225	10	50	379	802	1 003	187
はり	500	5	34	522	707	999	182

セメント：アサノペロセメント 砂利：木曾川 20 mm 砂：木曾川

表-2 コンクリートの圧縮試験結果

部 材	F ₂₈ (kg/cm ²)	導 入 時		記 事
		材 令	強 度 (kg/cm ²)	
柱 はり	375.5 (421.0)	30	427.0 (標準養生)	F ₂₈ は 試験体 2 個平均値 導入時は試験体 3 個平均値 F ₂₈ 、導入時とも試験体 3 個平均値、なお F ₂₈ は キャッピング不良のため強度不足
		19	447.0 (標準養生)	
		19	407.0 (現場養生)	

表-3 PC 鋼線試験結果

試験項目 試験番号	直 外 径 径 径 (mm)	引 荷 張 重 (kg)	引 強 張 り さ (kg/mm ²)	伸 び 100 mm (%)	屈 曲 36 mmR (回)	降 伏 点 (kg/mm ²)	レラクゼー シ ョ ン (%)
1	7.035	6 520	168	7.0	26	144	
2	7.035	6 520	168	7.0			
3	7.030	6 480	167	7.5			
4					30	136	
5	7.030	6 500	167	7.0			
6	7.040	6 500	167	7.0			
7	7.035	6 500	167	7.0			
8							2.00
9							2.00
	7.034	6 503	167	7.08	28	140	2.00

報 告

コンプレッソメーターにより、導入時において測定したコンクリートの弾性係数は、それぞれ標準養生の柱で 350 t/cm^2 、はりで 360 t/cm^2 、現場養生のはりで 340 t/cm^2 である。

鉄筋は、主筋は SS 49 D を、その他は SS 39 を用いたものである。

PC鋼線は径 7 mm 住友電工KK製のものを用いた。引張強度は表-3 に示すとおりである。

大ばりは、柱と一体にコンクリート打ちを行ない、12-7φ の PCケーブル 5 本をおとしてプレストレスを加え、フレシネコーンを用いて定着させるように設計されているが、摩擦試験終了後、5 本のケーブルのうち No. 2, No. 4 (図-1) のケーブルを緊張定着して、大ばりを自立させはり下部の支柱を撤去し、所定のラーメン形を構成させたうえプレストレスの導入試験を行なった。

5. 測点と測定方法

測点の位置は図-3 に示すとおりである。測定はつぎの方法によった。

1) プレストレス力の測定は、はりの両端のフレシネジャッキに取りつけたマンメーターによるとともに、スケールにより測定した PC 鋼線の伸び量よりプレストレス力を算定した。

2) ワイヤーストレインゲージは、はりの上下と柱の内外面に、それぞれペーパーゲージをパラフィンを用いて接着し、ダミーを各測点に 1 個ずつ用いた (写真-6 参照)。

3) はりのたわみの測定は、はり中央下端から 16φ の鋼棒をつるし、その真下にダイヤルゲージ (1/100 mm)

図-3 測点および測定装置

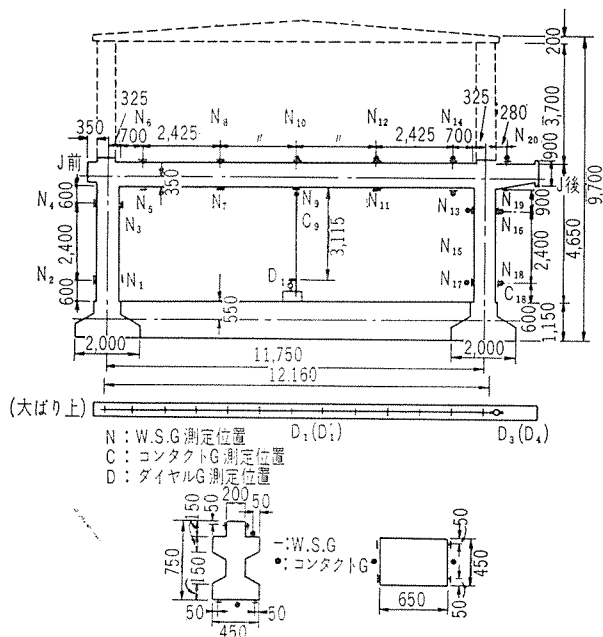


写真-4 はりたわみ測定装置

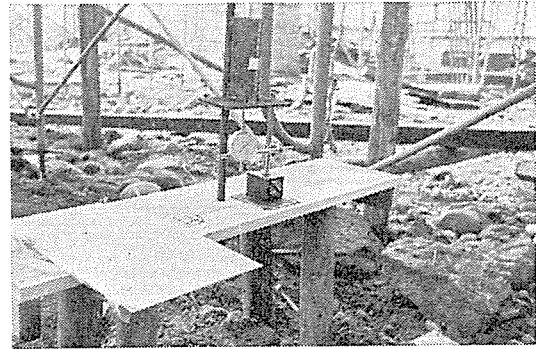


写真-5 はりの圧縮ひずみ測定装置

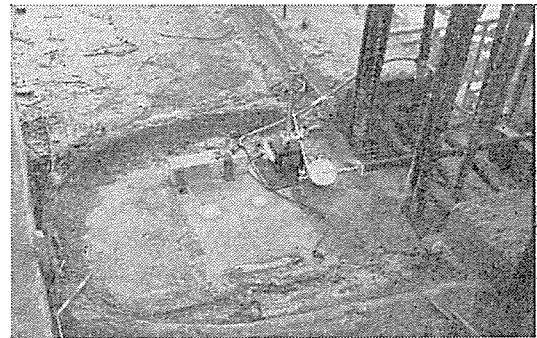


写真-6 はり測定装置詳細



を取りつけた台を設け、鋼棒の下端と台との相対変位を讀んで測定した。なお、温度補正のために隣りの無応力ばりについて同様の測定を行なった (写真-4 参照)。

4) はりの全長にわたる圧縮ひずみの測定は、はりの上縁にそって 19φ の鋼棒を径 5 mm のエンビパイプ製のコロの上のせ一端を固定し、他端を自由にして、その自由端とはりとの相対伸縮をダイヤルゲージ (1/100 mm) で測定した。この場合も垂直たわみの測定と同様に、隣りの無応力ばりについて同様の測定を行なって補正した (写真-5, 6 参照)。

5) PC鋼線の摩擦損失は、PC鋼線をシースにおさめ、その両端にマンメーターをつけたフレシネジャッキをセットし、一方のジャッキを緊張し、そのときの双方のマンメーターの讀みの差から摩擦損失を測定する方法をとった。なお、ジャッキ自身の内部摩擦とコーンによる摩擦損失を測定するため、二つのジャッキにそれぞれ

コーンをつけたものを直接つき合わせにして同様の試験を行ない、それぞれの内部摩擦損失を測定して補正を行なった。

6) なお、試験体ならびに温度補正に用いた隣りのはりには、全面的にシートをかぶせて日照や降雨による影響をさけるようにし、試験体の中央部に水銀寒暖計をつるして随時気温の変化を測定した。

6. 摩擦損失試験

(1) 試験の順序と方法

P C 鋼線の緊張時における摩擦損失試験は、ケーブル No. 2, No. 3, No. 4 について前記の順序で個々に行なった。

始めに、広場側のジャッキのみを動かし広場側のマンメーターが 300 kg/cm^2 の圧力になるまで加力してホーム側のマンメーターを読み圧力を 0 にもどす。

この方法を 3 回くりかえしてから、引続きホーム側のジャッキのみを加圧して、同様の操作を行なった。

No. 3, No. 4 のケーブルについては同様の操作を二度ずつくり返した。

(2) 試験の結果と考察

1) 試験の結果 3 本のケーブルについて得た値の平均値を 図-4 に示す。コーンとジャッキの内部摩擦損失を補正した値である。

はりの中央において、ワイヤー ストレイン ゲージにより測定したひずみ度から算出した軸力を記入した。ただしコンクリートの弾性係数は $360,000 \text{ kg/cm}^2$ とした。

図-4 プレストレスによるはりの軸力 (摩擦試験)

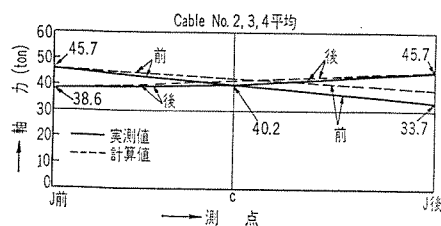


図-5 摩擦試験における両端ジャッキ内圧の関係

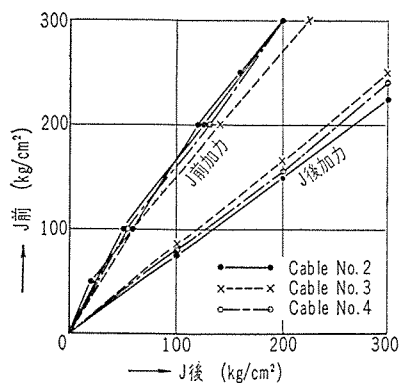


図-6 コーンとジャッキの内部摩擦損失 (摩擦試験)

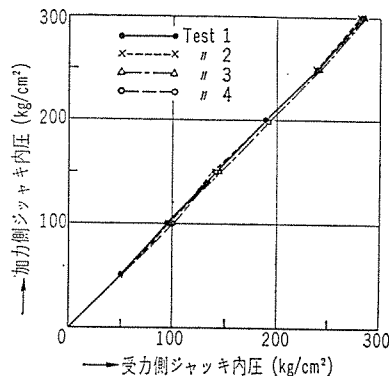


図-4 の計算値は、日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準により求めた値である。

2) 摩擦試験時における両端ジャッキの内圧の関係を 図-5 に示す。広場側ジャッキ 300 kg/cm^2 、加力時のホーム側ジャッキの指度は平均 205 kg/cm^2 、ホーム側ジャッキ 300 kg/cm^2 、加力時の広場側ジャッキの指度は平均 238 kg/cm^2 で、それぞれ 21% および 32% の摩擦損失を示している。

3) 上記摩擦損失中、コーンとジャッキの部分についての内部摩擦損失を両ジャッキについて検定した結果をグラフにしたのが 図-6 である。加力側ジャッキのマンメーターの指度 300 kg/cm^2 に対し受力側ジャッキのそれは平均 282 kg/cm^2 を示しコーンとジャッキにより約 6% の摩擦損失を生じていることを示しており、前項の摩擦損失 21 および 32% からこの値を差引いた 15% および 26% がシースによる摩擦損失と考えられる。計算値 15% に比し後者はかなり上回った値を示している。このことはシースや P C 鋼線のサビ、あるいはシースの局部的わん曲の影響によるものではないかと思われる。

7. 二次応力試験

(1) 試験の順序と方法

試験はケーブル No. 3, No. 1, No. 5 について上記の順序で逐次加圧、減圧をそれぞれ 4 回くり返したのち 5 回目の加圧後、鋼線を定着した。

(2) 試験の結果と考察

1) ワイヤー ストレイン ゲージによるひずみ度の測定はケーブル No. 3, No. 1, No. 5 について行なったが No. 1, No. 5 ケーブルは上下だけでなく左右にも偏心しているため測定値の変動が大きく応力の解析が困難であるので、全ケーブルのほぼ重心的位置に置かれているケーブル No. 3 を代表として検討を加えることにする。

ケーブルの緊張時に生じたひずみ度のうち代表的なもの

としてはりの中央部と広場側柱の下部の測点のひずみ度を 図-7, 図-8 に示す。絶対値の小さいゲージ No. 4, No. 17 のほかは比較的安定した測定値が得られた。

図-9 は、計算による二次応力と、柱とはりに生じたモーメントをひずみ度 (5 回の平均値) から算出したもので、図-10 は、はりに生じた軸力を同様に算出したものである。ただし、コンクリートの弾性係数は柱、はりについてそれぞれ $E_c = 280 \text{ t/cm}^2$,

図-7 ゲージ N 9, N 10 の荷重ひずみ度曲線

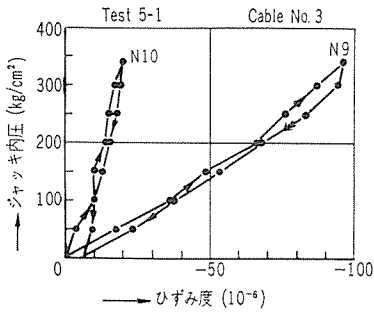


図-8 ゲージ N 1, N 2 の荷重ひずみ度曲線

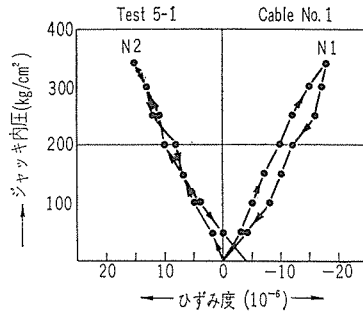


図-11 はりの中央たわみ

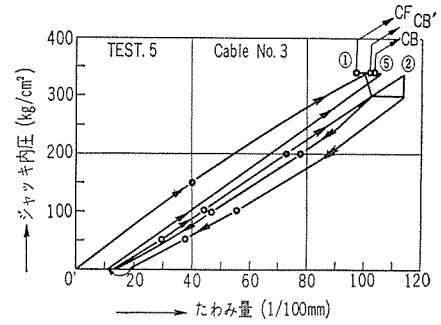


図-9 プレストレスによるモーメント
実測値と二次モーメント (tm)
(点線の値は計算値)

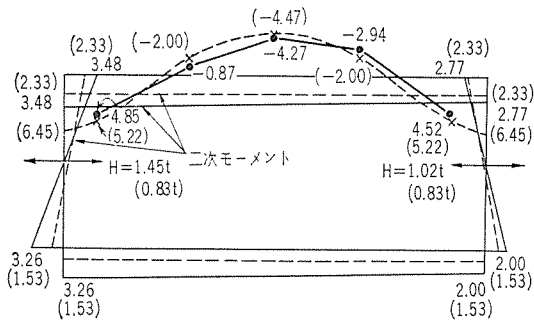


図-12 はりの中央たわみ

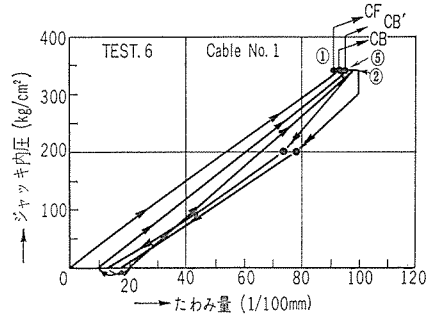


図-10 プレストレスによるはりの軸力

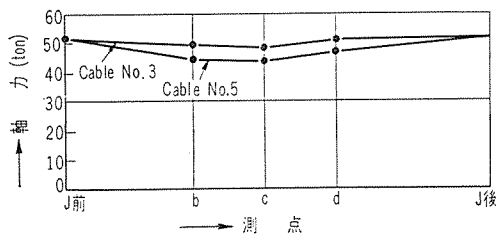
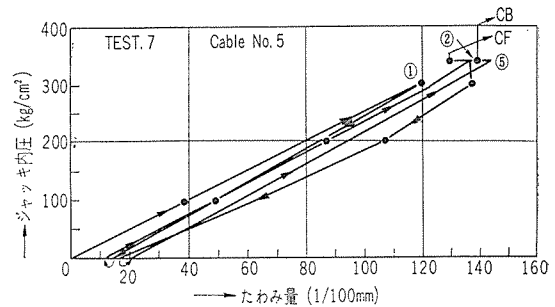


図-13 はりの中央たわみ



$E_g = 360 \text{ t/cm}^2$ とした。

つぎの(3)で述べるとおり、このラーメンを左右対称と仮定してプレストレスを加えた時に柱、はりに生じるモーメントを二次応力を考慮に入れて計算した値が図-9の中の計算値である。

はりについては、実測値と計算値は割合よく一致しているが、柱では実測値は計算値の1.2~1.5倍程度の値となっている。

柱に生じたせん断力は、広場側とホーム側で、それぞれ1.45t, 1.02tで多少異なった値を示しているが、この架構は左右対称でなく、ホーム側の2階床はベランダの床で隣接ラーメンに結ばれているため、この差に相当する力が、隣りのラーメンで分担されていると思われる。したがって柱の抵抗によって減損されるプレストレス力は広場側の柱に生じたせん断力1.45tに等しいものと考えられ、この値は加えられたプレストレス力51.7

tに対し約3%に相当しており、はりに加えるプレストレス力に対する影響は、さほど大きなものではない。

計算より求めた柱のせん断力は0.83tで上記実測値はその約1.8倍に当る。

このような試験体にプレストレスを導入する際に生ずる二次モーメントの影響は図-9に示されるように非常に大きい。かりにこのはりを単純ばりとして同様のプレストレスを加えるときに、はりに生じるモーメントを計算すると、端部で+4.12t, 中央で-6.80tとなるが、柱と剛接にしたための二次応力の影響は、はり全体について計算値では-2.33tmとなり、前記応力に対しそれぞれ56%, 34%となり大きな影響力を持っており、実測値(2.77および3.48tm)もこれに近い値を示していることは注目に値する。

したがって、二次応力の影響は設計当初慎重に検討を加えなければならない問題である。しかし、二次モー

ントは、この架構のような場合、柱とはりの端部については、鉛直荷重によるモーメントと反対の方向を持っており、はり中央部については同一方向である。したがって、十分注意して設計を行なうなら、この二次モーメントの影響を利用した設計ができるので、かならずしも不利とはならない。

2) はり中央部のたわみの測定結果を、それぞれ 図-11, 図-12, 図-13 に示す。中央のたわみの平均は、ケーブル No. 3 では 96.6/100 mm, ケーブル No. 1 では 84.8/100 mm, ケーブル No. 5 では 123/100 mm, いずれも上向の値で、No. 1 が最少, No. 5 が最大の値を示している。これはケーブル配置が No. 1 は上段に位し, No. 5 は下段にあるためと考えられる。ケーブル No. 3 についてのたわみの計算値は上向 0.88 mm で、実測値 0.966 mm はややこれを上回った値を示している。

3) はりの全圧縮ひずみの測定結果を、それぞれ 図-14, 15, 16 に示す。

全圧縮ひずみの平均は、ケーブル No. 3 では 63.6/

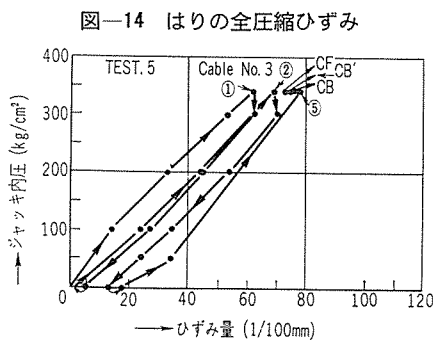


図-14 はりの全圧縮ひずみ

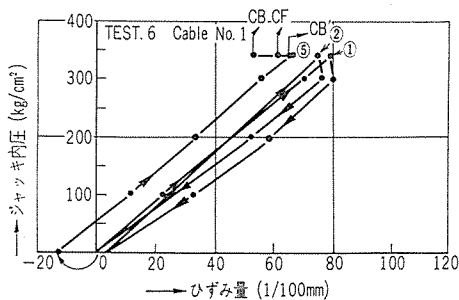


図-15 はりの全圧縮ひずみ

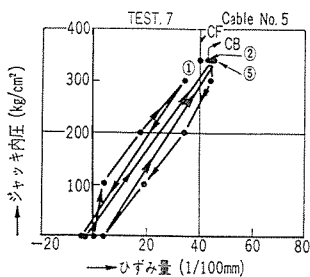


図-16 はりの全圧縮ひずみ

100 mm, No. 1 では 75.0/100 mm, No. 5 では 43.8/100 mm となり, No. 1 は最大値 No. 5 は最少値を示している。この関係は前項のはりの中央たわみの場合とは全く逆の現象であるが、これもまた同様 P C 鋼線の配置の相異によるものと考えられる。

ケーブル No. 3 についての全圧縮ひずみの計算値は 0.668 mm で実測値とほぼ等しい。

(3) 二次応力の計算について

a) 計算を簡略するためにつぎのような仮定を設ける。

- ① ラーメンは左右対称とする。
- ② 柱, はり, つなぎばりの断面はそれぞれ一定とする。
- ③ 柱, はり, 地中ばりの断面の諸要素はそれぞれ表-4 のとおりとする。
- ④ プレストレス力は, はりの全長にわたって一定とし, その値 $P=48.5t$ とする。
- ⑤ ケーブルの配置は左右対称とし, 中央部は下向端部は上向のパラボラとする。

- ⑥ ケーブルの反曲点は, それぞれ柱心より 187.5 cm とし偏心距離 e_x の値はつぎのとおりとする。

$x=0 \sim 187.5$ の間では

$$e_x = K_1(a^2 - x^2)$$

$x=187.5 \sim 987.5$ の間では

$$e_x = K_2(x-a)(b-x)$$

ただし上式において

$$K_1 = -2.42 \times 10^{-4} \quad a = 187.5 \text{ cm}$$

$$K_2 = 0.88 \times 10^{-4} \quad b = 987.5 \text{ cm}$$

とする。

b) 応力計算式

はりを単純ばりと仮定した場合にプレストレスにともなって両端に生じる部材の回転角 θ_A, θ_B をつぎの式より求める。

ただし, はりは左右対称として $\theta_A = -\theta_B = \theta_0$ とし, x 点におけるプレストレスによるモーメントを M_x とする。

表-4 断面の諸要素

	柱	はり	地中ばり	
断面積	cm ²	2 925	2 375	4 600
断面二次率	cm ⁴	105 × 10 ⁴	113 × 10 ⁴	508 × 10 ⁴
断面係数	cm ³	32.2 × 10 ³	上 28.3 × 10 ³ 下 32.4 × 10 ³	88.3 × 10 ³
ヤング率	t/cm ²	280	360	210
材長	cm	465	1 175	1 175

$$\theta_0 = \int_0^{l/2} \frac{M_x}{E_x I_x} dx \dots \dots \dots (1)$$

ただし $M_x = P_x \cdot e_x$

l : はりの材長

E_x : x 点におけるコンクリートのヤング率

I_x : x 点における断面二次率

P_x : x 点におけるプレストレス力

e_x : x 点における偏心距離

$P_x = P_0 = \text{const}$

$E_x E = \text{const}$

$I_x = I = \text{const}$

$$e_x = \left[\begin{matrix} x=a \\ x=0 \end{matrix} K_1(a^2 - x^2) \right]$$

または $\left[\begin{matrix} x=b \\ x=a \end{matrix} K_2(x-a)(b-x) \right]$

とすれば

$$\theta_0 = \frac{P}{EI} \left[\int_0^a K_1(a^2 - x^2) dx + \int_a^{l/2} K_2(x-a)(b-x) dx \right]$$

上式より θ_0 を求めることができる。

つきにこのはりの材端の回転を拘束したときの固定モーメントを M_g とすると

$$M_g = -2 \frac{EI}{l} (2\theta_A + \theta_B) = -2 \frac{EI}{l} \theta_0 \dots \dots (2)$$

つきに、柱頭と柱脚の回転を拘束して柱頭に 4δ の変位を与えた時に生ずる固定モーメントを M_c とすると

$$M_c = -6 \frac{EI}{h^2} 4\delta \dots \dots \dots (3)$$

式(1), (2)より M_g, M_c の値を求めて、固定モーメント法により節点の回転拘束を解除して二次応力を求める。

ただし 4δ の値は次式より求める

$$4\delta = \frac{l \cdot P}{E \cdot A} \cdot \frac{1}{2} \dots \dots \dots (4)$$

式(1), (2), (3), (4)より

$$\theta_0 = -3.44 \times 10^{-4}$$

$$4\delta = 3.34 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$M_g = +2.38 \text{ t}$$

$$M_c = -3.43 \text{ t}$$

となる。

これらの値を用いて固定モーメント法により各部の二次応力を求めたものを 図-9 に示す。

(4) はりのたわみの計算について

計算上の仮定および記号は、二次応力の計算に準ずる。

δ : はりの中央たわみ

δ_P : 単純ばりと仮定したときのプレストレスに

よるモーメントにより生ずるはりの中央たわみ

δ_M : 二次応力によるはりの中央たわみ

M_S : はりの二次応力モーメント

$$\delta = \delta_P + \delta_M \dots \dots \dots (5)$$

上式中

$$\delta_P = \frac{P}{EI} \left[\int_0^a K_1(a^2 - x^2) x dx + \int_a^{l/2} K_2(x-a)(b-x) x dx \right]$$

$$\delta_M = \frac{M_S}{EI} \int_0^{l/2} x dx$$

上式によりケーブル No. 3 について計算すると、

$$\delta_P = -1.76 \text{ mm} \quad \delta_M = 0.98 \text{ mm} \text{ となり}$$

$$\delta = -0.88 \text{ mm} \text{ となる}$$

すなわち、はりは中央部で 0.88 mm 上向にたわみを生ずる。

8. 鋼線の定着時のすべり試験

(1) 試験の順序と方法

ケーブル No. 3, No. 1, No. 5 について PC 鋼線の定着時のすべりをコーンの位置でスケールで測定するとともにはりのたわみ量の変化とワイヤー ストレイン ゲージによるひずみの変化を測定し、これらの値から定着時のプレストレス力の減少を推定した。

コーンの定着は、ホーム側を先にし広場側をつぎに行なった。ケーブル No. 3 と No. 1 については、広場側コーンを定着する前に一度ゆるんだケーブルを広場側のジャッキで引きなおしてから定着した。

(2) 試験の結果と考察

コーンの位置で直接スケールで測定したすべり量を表-5 に示す。おおむね 3~5 mm の間にあり平均 3.8 mm で予測した値に近い。広場側とホーム側を加えた全すべり量の平均値は 7.7 mm で、ケーブルの全伸量の平均値の 67 mm に対して約 11.5% に相当する。

コーン定着時のはりの中央たわみの減少率を表-6 に示す。先に定着したホーム側の平均値は 3.2%、後で定着した広場側の平均値は 5.4% で合計 8.6% となり、ケーブルの伸びの減少率 11.5% よりやや小さい値を示している。これは、ケーブル No. 3 と No. 1 について

表-5 PC 鋼線のすべり量

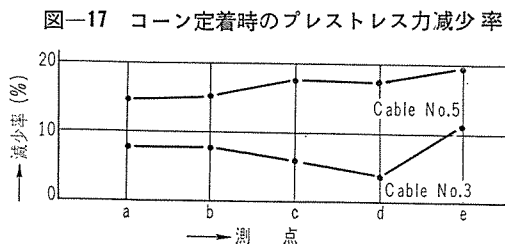
ケーブル	ホーム側 (mm)	広場側 (mm)	計 (mm)
No. 3	4	3	7
No. 1	3	5	8
No. 5	4	4	8
平均	3.7	4	7.7

表-6 コーン定着時のはり中央たわみの減少率

ケーブル	ホーム側 (%)	広場側 (%)	計 (%)
No. 3	2.8	4.9	7.7
No. 1	3.3	4.2	7.5
No. 5	3.5	7.2	10.7
平均	3.2	5.4	8.6

は、中間で一度ケーブルを引きなおしたことで、摩擦の影響によるものと思われる。

コーン定着時のはりのひずみ度より求めたプレストレス力の減少率をケーブル No. 3, No. 5 について求めたものを 図-17 に示す。減少率の値はそれぞれ平均 7.5%



および 17% となっており、中央たわみの減少率に比しケーブル No. 3 はほぼ同一の値を示し、ケーブル No. 5 はやや上回った値を示している。予備計算では、ケーブルの摩擦損失を考慮すると、はりの中央部ではプレストレスの減少はほとんどないものと考えられるにもかかわらず、約 6% または 17.5% の減少率を示していることは注目に値する。

9. あとがき

本試験は、現場で施工中の建物について短期間に行なった試験であるため、測定上にも種々制約される点が多く、したがって高い精度は期待できなかったが、現場施工の精度をチェックするという点で意義があったと思う。

ワイヤーストレインゲージについては、特に測長 67 mm のものを用いダミーゲージも各測点別に設け、試験体はテントで覆いリード線はキャップタイヤコードを用いるなどの方法を講じたが、かならずしも満足な結果は得られなかった。

測点のゲージの数を増す。ジャッキの数を増して同時緊張をおこない、大きなひずみ度の範囲で測定する。試

験体の数を増す。温度変化による影響を少なくするため、日没後に試験を行なうこと。などにより精度を高めることができると思われる。

対応する計算値の算定に用いるヤング率の値の選び方には問題が多いので別途の試験、例えば鉛直載荷試験により実物についてチェックをすることも一案と考えられる。

図-18 に試験当日の外気温の変化を示す。図-19 は温度補正に用いた測点 D_1 , D_4 のたわみ量を時刻に対応させて描いたグラフである。

図-18 気温の変化

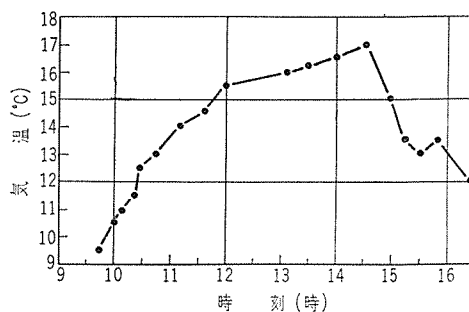
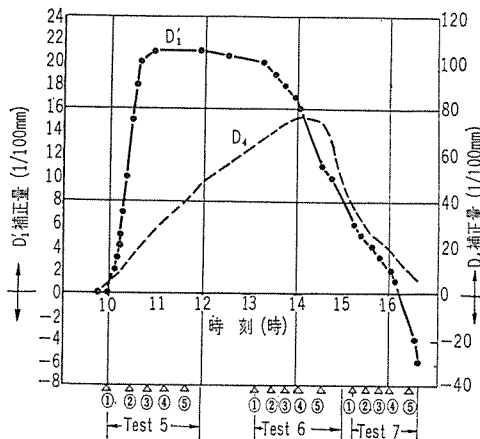


図-19 温度補正曲線



なお、コンクリートの圧縮強度と弾性係数の試験は名古屋工業大学に、またジャッキの内部摩擦損失の測定は、興和コンクリートKK 竹内氏に依頼した。

本試験に当っては、名古屋鉄道管理局施設部建築課 熊谷課長、日本構造橋梁KK 渡辺、興和コンクリートKK 竹内、その他の諸氏にご協力をいただいたので厚く謝意を表する。

1964. 12. 7・受付