

## 簡略化した PC 桁の緊張管理および現場測定

小 林 明 夫\*  
 中 原 繁 則\*  
 長 田 晴 道\*\*

### 1. はじめに

PC 部材は、所定のプレストレスが与えられてはじめて設計で考えた部材の強度を発揮することができる。したがって、プレストレスは PC 桁製作工程のうち最も重要な作業のひとつであり、その施工の良否は直接 PC 桁の使用性能および耐久性に大きく影響する。

プレストレスは PC 鋼材の断面積のばらつき、PC 鋼材のヤング係数のばらつき、PC 鋼材とシース間の摩擦のばらつき、PC 鋼材の配置の誤差等の要因によってばらつく可能性があるため、所定のプレストレスを与える作業には十分な施工管理が必要である。

これまで行われている緊張管理方法は、あらかじめ摩擦測定を行って PC 鋼材の見掛けのヤング係数および摩擦係数を求め、スパン中央の必要な緊張力に対して桁端で何割増しにして緊張するかの尺度  $\bar{\mu}$  を求め、各ケーブルの緊張から得られる摩擦係数をもとに緊張作業中随時管理限界を修正して緊張作業を行っている。

これまでの緊張管理方法（表—4）は、摩擦測定を行い PC 鋼材の見掛けのヤング係数 ( $\bar{E}_p$ ) および摩擦係数 ( $\bar{\mu}$ ) を求め、設計断面での所定の緊張力を与えるために、種々の要因による損失を考慮して緊張端で何割増しして緊張するかという尺度を摩擦係数  $\bar{\mu}$  と PC 鋼材の見掛けのヤング係数 ( $\bar{E}_p$ ) によって設定して緊張管理を行っている。この摩擦係数  $\bar{\mu}$  は、そのケーブルの摩擦係数としているが、実際の緊張における摩擦係数  $\bar{\mu}$  の値と必ずしも一致しないし、場合によっては、負の値となることが多々ある。これらのことから、これまでの緊張管理方法は、あらかじめ摩擦測定が必要なことおよび管理が複雑であること等により簡略化の必要性がある。

### 2. 解析内容

対象橋梁は I 形桁 904 ケーブル（26 橋梁 150 主桁）、箱形桁 182 ケーブル（6 橋梁 12 連）で、いずれもスパンが 20~35 m 程度の単純桁で、定着方法はフレッシュナー工法である。

解析は表—1 に示すように、摩擦測定で求まる摩擦係

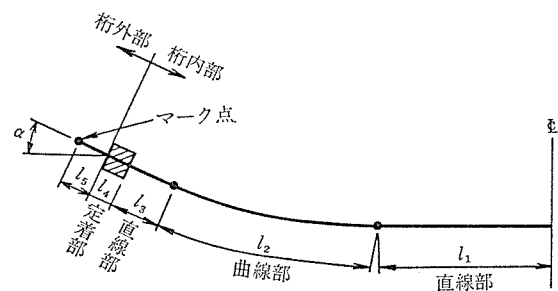
数および PC 鋼材の見掛けのヤング係数、緊張の際に測定される PC 鋼材の伸び ( $\Delta l$ ) と図—1 に示すようなケーブル配置でのケーブルの全長 ( $L=2 \sum_{i=1}^5 l_i$ ) から求められる伸び率 ( $\Delta l/L$ ) および引止め点でのマンノメータの読み（以後マンノメータの読み ( $\sigma_m$ ) とする）に着目した。

### 3. 解析結果

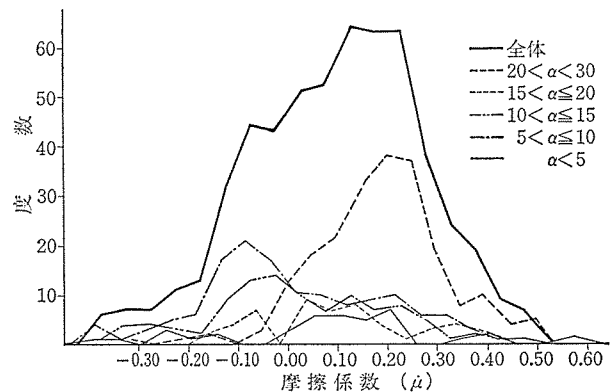
解析項目は次のとおりである。

表—1 解析内容

着 目 点	内 容
摩 擦 係 数	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{\mu}</math> の分布</li> <li>• 摩擦測定から求まる <math>\bar{\mu}</math> とケーブル形状（ケーブル長さ、曲上げ角度）との関係</li> </ul>
PC 鋼材の見掛けのヤング係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{E}_p</math> の分布</li> <li>• 摩擦測定から求まる <math>\bar{E}_p</math> とケーブル形状との関係</li> </ul>
伸び率 ( $\Delta l/L$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 伸び率とケーブル形状との関係</li> </ul>
引止め点でのマンノメータの読み ( $\sigma_m$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\sigma_m</math> と伸び率との関係</li> <li>• <math>\sigma_m</math> から逆算したスパン中央の緊張力 <math>P_j'</math> と設計緊張力 <math>P_j</math> との関係</li> <li>• <math>\sigma_m</math> と最終緊張力 (<math>\sigma_{mi}</math>) との関係</li> </ul>



図—1 ケーブル形状



図—2 摩擦係数  $\bar{\mu}$  の分布

\* 国鉄構造物設計事務所

\*\* 国鉄九州総局下関工事事務所

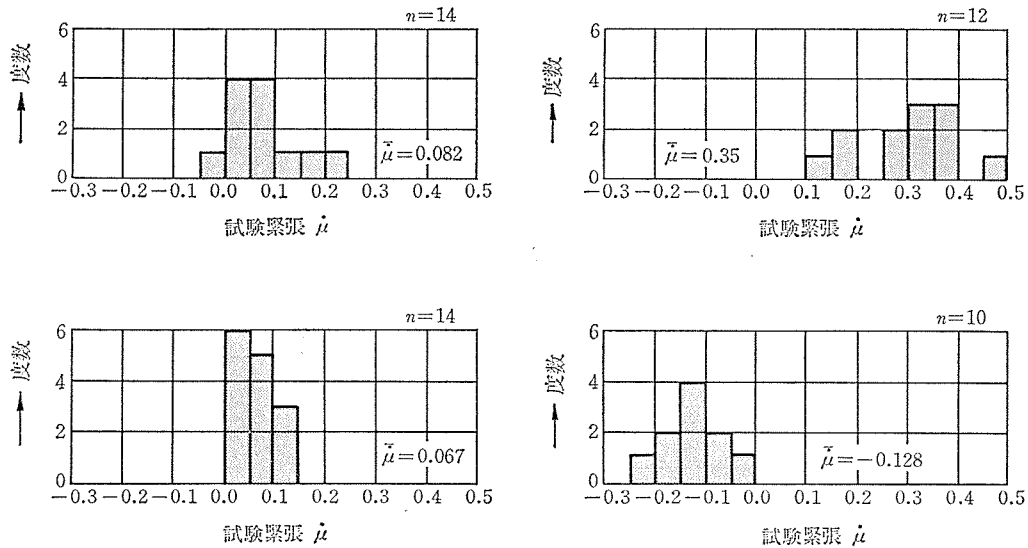


図-3 各現場での摩擦係数

### 3.1 摩擦係数

摩擦係数には、摩擦測定から求まる摩擦係数  $\dot{\mu}$  および管理上の PC 鋼材の見掛けのヤング係数を  $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  とした場合の摩擦係数  $\ddot{\mu}$  がある。

図-2 に摩擦係数  $\dot{\mu}$  の分布を示すが、曲上げ角度 ( $\alpha$ ) 別にみると、曲上げ角度によって異なった分布となっており、曲上げ角度が大きくなっても摩擦係数  $\dot{\mu}$  は必ずしも大きくなっていない。摩擦係数  $\dot{\mu}$  の分布は全体的には  $-0.40 \sim +0.60$  程度の範囲にあり、摩擦係数  $\dot{\mu}$  の平均値は  $+0.15$  程度である。摩擦係数は現場の特性を表わしており、現場での摩擦係数の分布の一例を示せば図-3 のようになっており、現場での PC 鋼材の配置、シーす、PC 鋼材の表面状態等により異なったと考えられる。また摩擦測定を行った PC 鋼材の摩擦係数  $\dot{\mu}$ 、 $\ddot{\mu}$  との関係は図-4 に示すとおりで、摩擦測定から求まる  $\dot{\mu}$  と管理上の  $\ddot{\mu}$  とは必ずしも一様な関係ではない。

ケーブル形状に関する要因としては、ケーブル長ささとケーブルの曲上げ角度を考えた。ケーブル長さは  $2 \sum_{i=1}^5 l_i$  で、PC 鋼材の伸びを測定するために定着具外側の PC 鋼材に付けた基準点 (マーク点) までのケーブル全長である。図-5 にケーブル長さ ( $L$ ) と摩擦係数  $\dot{\mu}$  との関係を示す。ケーブル長ささと摩擦係数との関係には一定の傾向はみられない。

ケーブルの曲上げ角度 ( $\alpha$ ) (定着具の定着角度) と摩擦係数  $\dot{\mu}$  との関係を図-6 に示す。曲上げ角度の大きい方が摩擦係数  $\dot{\mu}$  が大きいと考えられるが、この場合も明らかな傾向はみられない。

### 3.2 PC 鋼材の見掛けのヤング係数

摩擦測定より求まる PC 鋼材の見掛けのヤング係数とケーブル形状との関係を図-7 に示す。ケーブル長さ  $L$

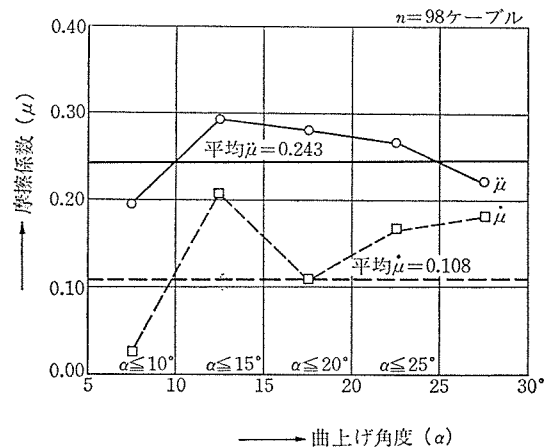


図-4 摩擦測定を行った PC 鋼材の摩擦係数

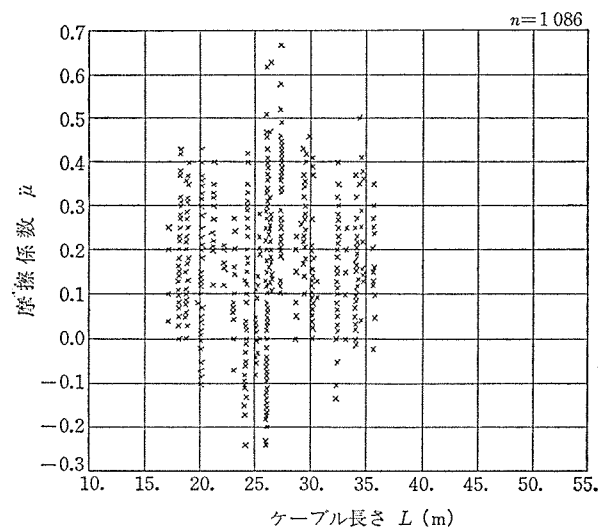
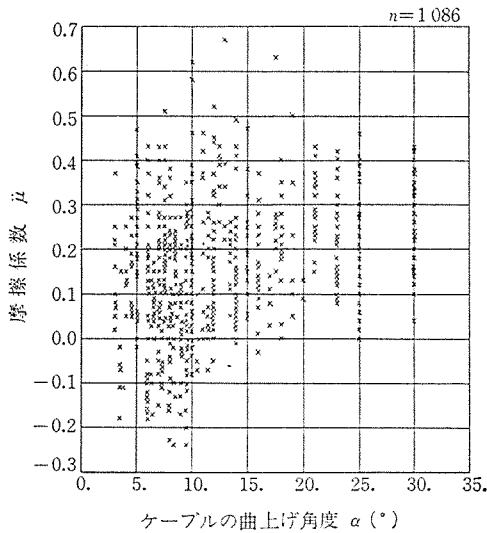
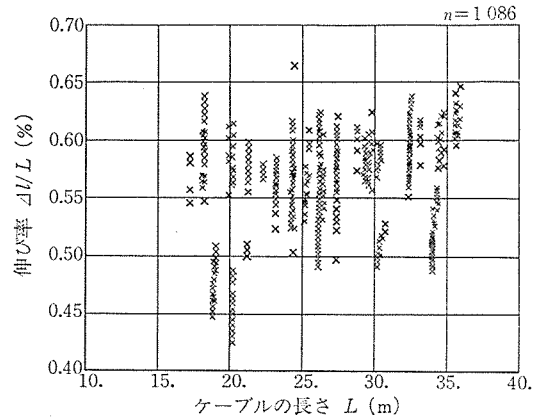


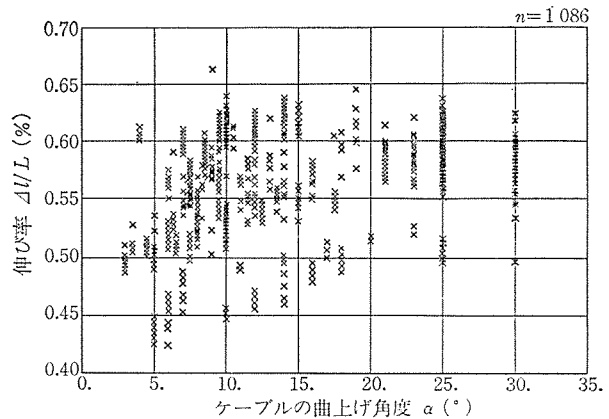
図-5 ケーブル長ささと摩擦係数との関係



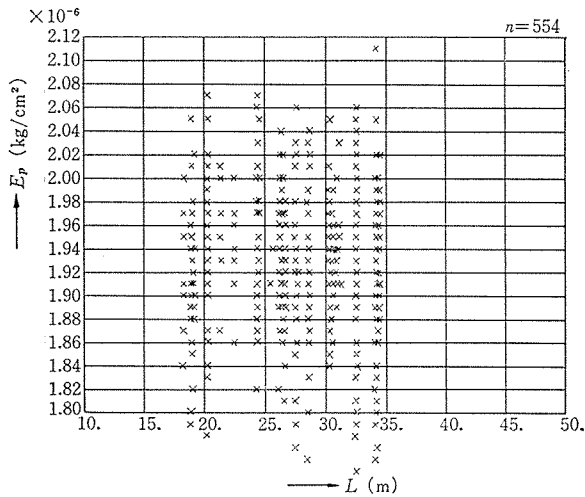
図—6 ケーブルの曲上げ角度と摩擦係数との関係



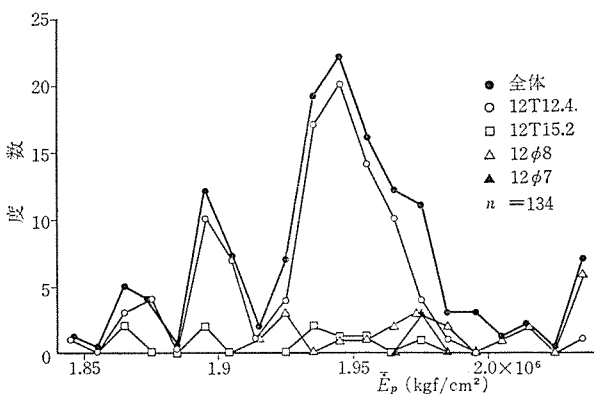
図—9 ケーブルの長さとの関係



図—10 ケーブルの曲上げ角度との関係



図—7 PC 鋼材の見掛けのヤング係数とケーブル長さとの関係



図—8 PC 鋼材の見掛けのヤング係数の平均値 ( $\bar{E}_p$ ) の分布

は  $2 \sum_{i=1}^5 l_i$  であるが、一定の傾向は見られず、 $1.80 \times 10^6 \sim 2.06 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  の間にばらつき、その平均値の分布は図—8 に示すとおりである。平均値は  $1.95 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  で、PC 鋼材の種別では 12 T 12.4 が多く、この分布に支配されており、12  $\phi$  7 ( $n=3$ ) は  $1.98 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、12  $\phi$  8 ( $n=22$ ) は  $2.01 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、12 T 12.4 ( $n=100$ ) は  $1.94 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、12 T 15.2 ( $n=9$ ) は  $1.92 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  が鋼材の種別毎の平均値であった。

### 3.3 PC 鋼材の伸び率とケーブル形状との関係

緊張の際の PC 鋼材の伸び ( $\Delta l$ ) とケーブル長さ ( $L = 2 \times \sum_{i=1}^5 l_i$ ) との比を伸び率 ( $\Delta l/L$ ) として、伸び率とケーブル長さおよび PC 鋼材の曲上げ角度 ( $\alpha$ ) との関係は図—9, 10 に示すとおりである。

伸び率は、ケーブル長さが長くなれば若干増加しているようであるが、一定の傾向は認められない。またケーブルの曲上げ角度と伸び率との関係でも明らかな傾向は認められない。

### 3.4 マノメータの読みと伸び率との関係

緊張の際のマノメータの読みと伸び率との関係は図—11 に示すとおりで、マノメータの読み、つまり桁端緊張力が増加するほど伸び率も増加している。この場合、伸び率のばらつきは 0.05% 程度である。

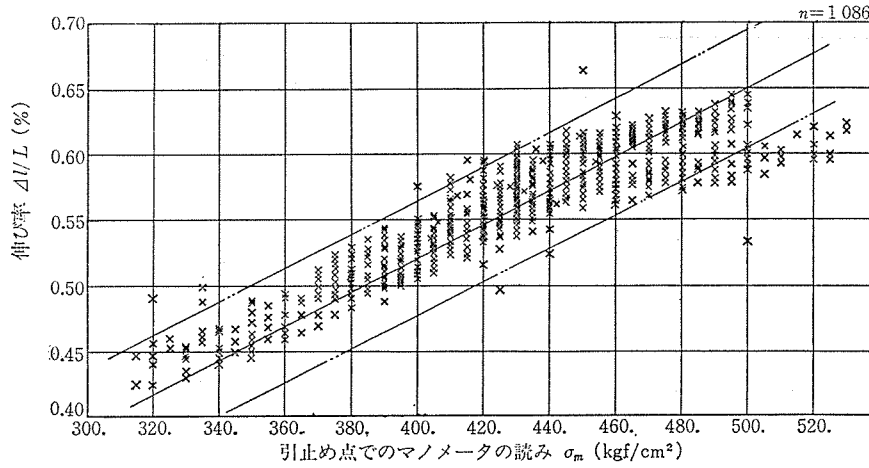


図-11 マノメータの読みと伸び率との関係

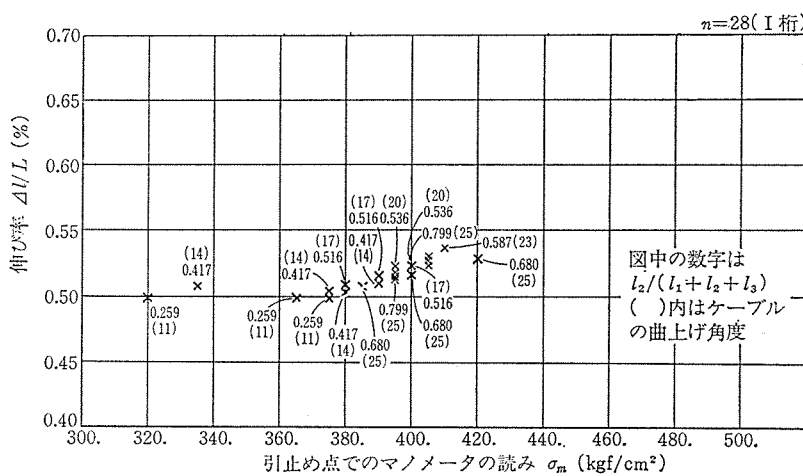


図-12 マノメータの読みと伸び率との関係 (I形桁)

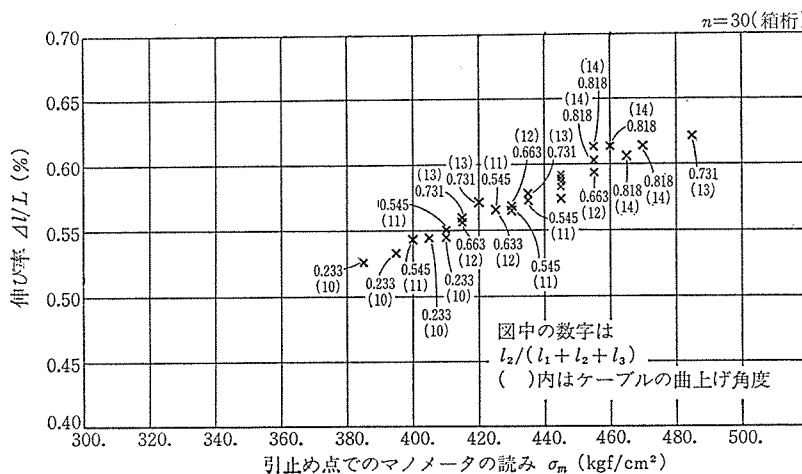


図-13 マノメータの読みと伸び率との関係 (箱形桁)

断面の違い (I形桁および箱形桁) によるマノメータの読みと伸び率との関係は図-12, 13 に示すとおりで、曲上げ角度とケーブルの曲線部分の占める割合 ( $l_2/\sum_{i=1}^3 l_i$ ) がどのように影響するかも合わせて示している。マノメータの読みと伸び率との関係は、曲上げ角度とケーブル

の曲線部分の占める割合が変化しても、ほぼ直線性は認められる。

ケーブル長さ (L) 別および曲上げ角度別のマノメータの読みに対する伸び率の線形回帰式  $\Delta l/L = a\sigma_m + b$  を最小二乗法により求めた結果、 $b=0$  であった。係数  $a$  および標準偏差を表-2 に示す。すなわち、マノメータの読みと伸び率との関係は次式のようになる。

$$\Delta l/L = 0.0013\sigma_m$$

この関係から、 $2\sigma$  の範囲には実測値がほぼ 95% 以上包含されている。図-11 には  $2\sigma$  の 95% 信頼限界で  $\Delta l/L = 0.0013\sigma_m \pm 0.044$  の式を併記している。回帰直線に対する実測値の分布は図-14 に示すとおりで、ほぼ正規分布を示している。

$$\Delta l/L = A \cdot \sigma_m \text{ と示すものとする、}$$

$$A = \frac{\Delta l/2 \sum_{i=1}^5 l_i}{\sigma_m}$$

$$\frac{P_j}{A_p \cdot \dot{E}_p} \left( 1 + \frac{\mu\alpha}{2} + \frac{l_3 + l_4 + l_5 - l_1 \cdot \mu\alpha}{\sum_{i=1}^5 l_i} \cdot \frac{\mu\alpha}{2} \right) = \frac{P_j}{(1+r)(1+a\mu) \frac{P_j}{A_m}}$$

$$\left( 1 + \frac{\mu\alpha}{2} + \frac{l_3 + l_4 + l_5 - l_1 \cdot \mu\alpha}{\sum_{i=1}^5 l_i} \right) = \frac{A_m}{(1+a\mu)}$$

$$\cdot \frac{A_m}{(1+r)A_p \cdot \dot{E}_p} = A_1 \times A_2$$

$$\text{ただし、} a = \alpha + \frac{\lambda}{\mu} \sum_{i=1}^3 l_i$$

ここに、 $P_j$  : 弾性変形を考慮したスパン中央の緊張力

$A_p$  : PC 鋼材断面積

$\dot{E}_p$  : PC 鋼材の見掛けのヤング係数

$\alpha$  : ケーブルの曲上げ角度

$\mu$  : 単位角あたりの摩擦係数

$\lambda$  : 単位長さあたりの摩擦係数

$A_m$  : ジャッキの受圧面積

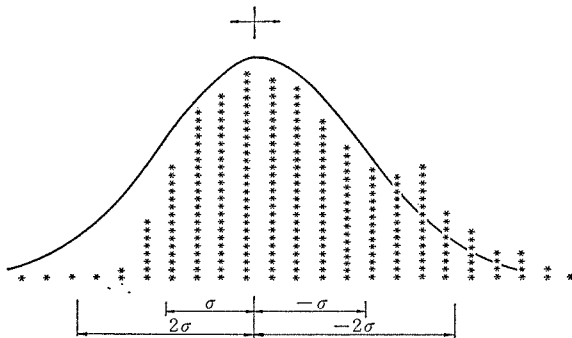
$l_i$  : ケーブル各部分の長さ

$r$  : コーンとジャッキの内部摩擦

上式で  $A_2$  は定数であり、例えば、12 T 12.4 の場合、

表—2 回帰分析結果 ( $\Delta l/L = a \cdot \sigma_m$ )

	$a$	標準偏差 $\sigma$	$n$
$15 < L \leq 20$ m	0.001 3	0.022	217
$20 < L \leq 25$	0.001 3	0.023	116
$25 < L \leq 30$	0.001 3	0.025	320
$30 < L \leq 35$	0.001 3	0.016	433
$\alpha \leq 5^\circ$	0.001 3	0.012	67
$5 < \alpha \leq 10$	0.001 3	0.014	430
$10 < \alpha \leq 15$	0.001 3	0.015	215
$15 < \alpha \leq 20$	0.001 3	0.019	62
$20 < \alpha \leq 30$	0.001 3	0.027	312
全 体	0.001 3	0.022	1086



図—14 実測値の分布

表—3 回帰分析結果 ( $\sigma_m = a' P_j$ )

	$a'$	標準偏差 $\sigma$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	$n$
$15 < L \leq 20$ m	3.61	16.6	44
$20 < L \leq 25$	3.67	24.0	45
$25 < L \leq 30$	3.77	22.6	147
$30 < L \leq 35$	3.66	21.1	214
$\alpha \leq 5^\circ$	3.61	14.3	34
$5 < \alpha \leq 10$	3.62	14.6	200
$10 < \alpha \leq 15$	3.72	25.9	94
$15 < \alpha \leq 20$	3.72	25.5	43
$20 < \alpha \leq 30$	3.83	24.5	80
全 体	3.69	22.4	450

$A_m = 300 \text{ cm}^2$ ,  $A_p = 11.148 \text{ cm}^2$ ,  $E_p = 1.95 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ,  $r = 0.04$  とすると,  $A_2 = 1.327 \times 10^{-5}$  となり, 伸び率は %単位なので,  $A_2 = 1.327 \times 10^{-7}$  となる。

一方,  $A_1 = (1+k)/(1+a\mu)$  であり,

$$\text{ただし, } k = \frac{\mu a}{2} + \left( \frac{l_3 + l_4 + l_5 - l_1}{\sum_{i=1}^5 l_i} \cdot \frac{\mu a}{2} \right)$$

ケーブル形状および摩擦係数の値を変化させても,  $A_1 \approx 0.93$  でほぼ一定値となる。したがって  $A = A_1 \times A_2 = 0.0012 \sim 0.0013$  で解析結果ともほぼ一致する。

### 3.5 スパン中央の緊張力とモノメータの読みとの関係

コンクリートの弾性変形を考慮したスパン中央の緊張力 ( $P_j$ ) に対するモノメータの読みの線形回帰式を求めた。その結果は表—3 に示すとおりで, 係数  $a'$  が各ケ

ースで異なるのは摩擦係数および PC 鋼材のヤング係数等の影響と考えられる。全体 ( $n=450$ ) として解析した場合, 係数  $a'$  は 3.69 で標準偏差は  $22.4 \text{ kgf/cm}^2$  である。

## 4. 緊張管理

ケーブルごとの緊張管理は, 前述のように緊張データをもとに解析した結果, モノメータの読みとケーブルの伸び率, およびスパン中央の緊張力とモノメータの読みとの間に相関性があることが確認できた。簡略化した緊張管理のフローと従来の緊張管理との比較を表—4 に示す。

この新しい緊張管理の特長は, 従来緊張の際に行っていた摩擦測定を行わなくてもよいことにしたことであり, 設計図等に示されているケーブルごとのスパン中央の緊張力 ( $P_j$ ) からモノメータの読み ( $\sigma_m$ ) と伸び率 ( $\Delta l/L$ ) との関係を実験して計算しておけば容易に管理図を作成できることである。

すなわちモノメータとスパン中央の緊張力との関係は次式となる。

$$\sigma_m = \frac{1}{A_m} (1+r) (1+\mu\alpha + \lambda l) P_j \dots \dots \dots (1)$$

ここに, ケーブルごとのスパン中央の緊張力は, スパン中央の平均緊張力として設計計算に用いる緊張力  $P_t$  に緊張順序によるコンクリートの弾性変形を考慮して, 次式により求めることができる。

$$\Delta P_j = n \cdot \sigma_{cpg} \cdot A_p \cdot \left( \frac{N-i}{N} \right) \quad n = \frac{E_p}{E_c}$$

$$P_j = P_t + \Delta P_j \dots \dots \dots (2)$$

ここに,  $\sigma_{cpg}$ : PC 鋼材図心位置のコンクリート応力度

$N$ : ケーブル本数

$i$ : 緊張順序

ケーブルごとのモノメータの読みは (2) 式で求めた  $P_j$  を (1) 式に代入して求めることができ, モノメータの読みに対応する伸び量は次式のように表わされる。

$$\begin{aligned} \Delta l/L &= 0.0013 \sigma_m \\ \Delta l &= 0.0013 \sigma_m \cdot L \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$L = \text{ケーブル長さ} = 2 \sum_{i=1}^5 l_i$$

(3) 式にケーブルごとに求めたモノメータの読みを代入すれば伸び量を計算できる。ここで計算した伸び量は Pull in の影響を考慮していないので, Pull in と許容セット量の関係をもとに補正しなければならない。

以上の作業は机上計算で済み, 緊張の際, 現場ではモノメータの読みおよび PC 鋼材の伸び量を測定し, その軌跡の直線性を確認しながら緊張作業を行うことにな

表-4 緊張管理の比較

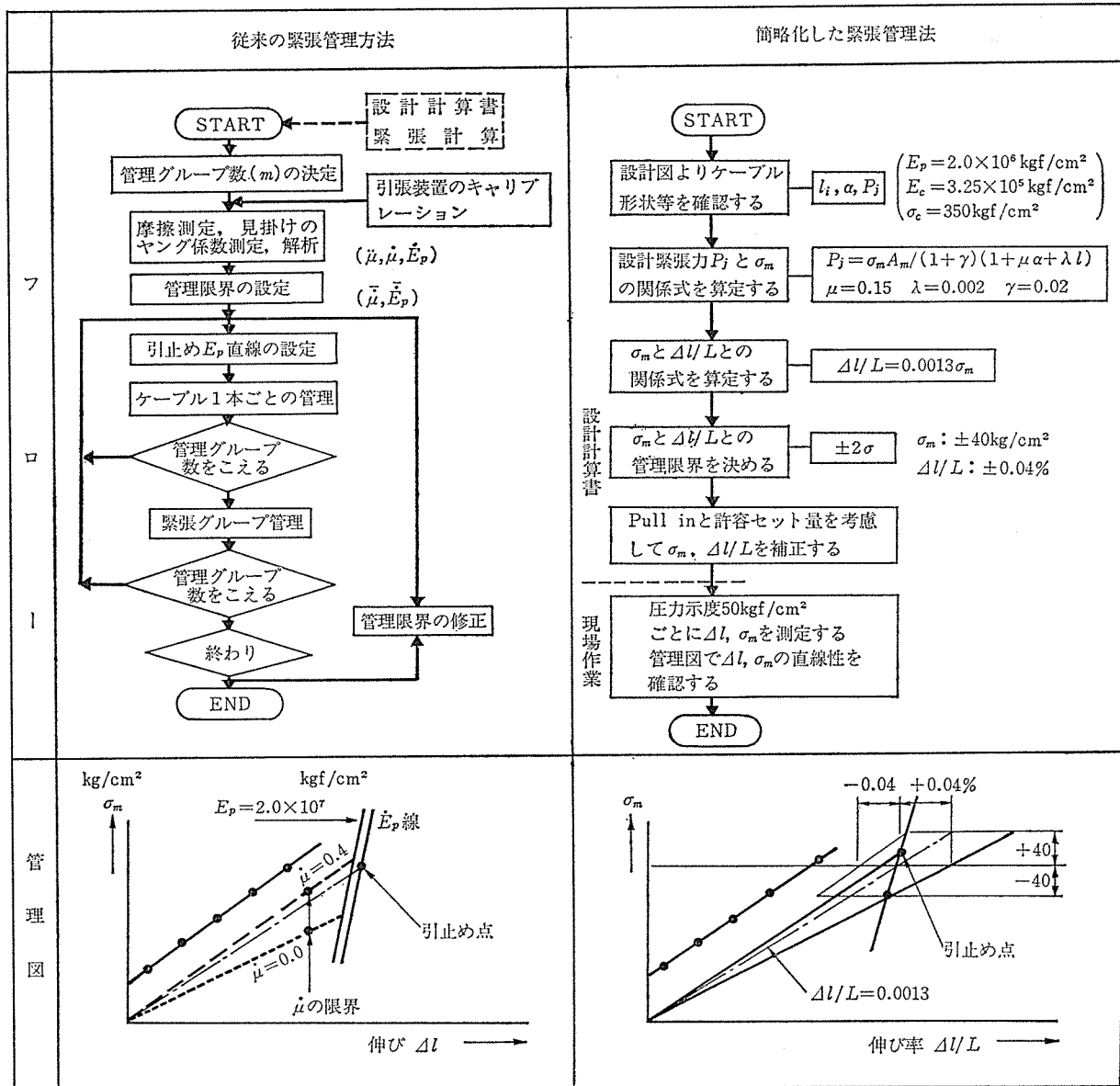


表-5 ジャッキおよびコーンの摩擦

ケーブル種類	標準損失量			引張力(測定時) 0.9 $P_y$ (t)	使用ジャッキ (ストローク 10 cm)	測定法および計算式
	摩擦損失量 $r$ (平均値(%))	標準偏差 (%)	個数 $n$			
12φ5	2.8	0.10	30	32.94	D型	
12φ7	2.8	0.12	50	60.48	E型	
12φ8	2.9	0.09	30	76.14	S7型	
12T12.4	2.8	0.11	60	150.12	S6型	
12T12.7	2.8	0.10	20	171.72	S6型	
12T15.2	2.9	0.11	20	244.08	SF型	
12V12.4	2.5	0.12	20	150.12	S6-V型	
12V12.7	2.5	0.11	10	171.72	S6-V型	

り、緊張管理の計算に用いる諸常数は次のとおりである。

4.1 緊張管理に用いる摩擦係数等

所定の緊張力よりマンメータの読みを求める場合、角変化 1 rad あたりの摩擦係数 ( $\mu$ ) および PC 鋼材の単

位長さあたりの摩擦係数 ( $\lambda$ ) の値については摩擦係数  $\mu$  の平均値 0.15 とし  $\lambda/\mu = 0.0133$  として  $\lambda = 0.002$  とした。

PC 鋼材のヤング係数は 図-8 に示すように平均値

1.95×10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>とした。ジャッキおよびコーンの摩擦は、従来 0.04 の値を採用していたが、最近の測定結果をみると、表—5 に示すように 0.03 程度である。ジャッキおよびコーンの摩擦はジャッキをつき合わせて測定するので、片側のジャッキを引っ張る場合に反対側のジャッキを引き込み、反対側のジャッキおよびコーンの摩擦を含んだ値として測定されているのが現状である。このため片側におけるジャッキおよびコーンの摩擦は実測値より小さいものと考えられる。過去の値は、測定された値をそのまま用いる場合または 1/2 の値と考えた場合もあったが、今回の解析に用いたジャッキおよびコーンの摩擦の値 ( $r$ ) は、安全側を考えて測定値の 2/3 とし 0.02 とした。

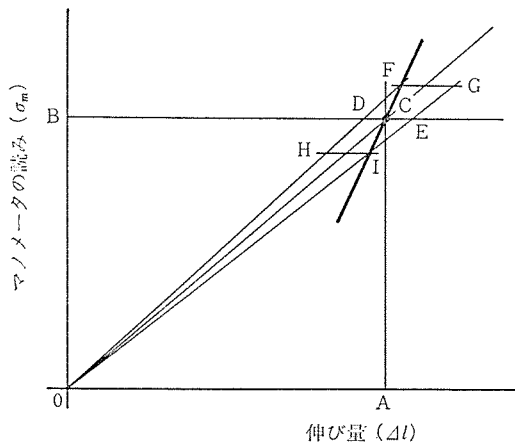
#### 4.2 管理限界および引止め線の設定

伸び率およびマンメータの読みの管理限界については、伸びについて  $2\sigma$  として表—2 から  $\pm 0.04\%$  とし、マンメータの読みについても表—3 のスパン中央の緊張力とマンメータの読みとの関係から  $2\sigma$  を考慮して  $\pm 40$  kg/cm<sup>2</sup> として決定した。

緊張の際の引止め線の設定は、あらかじめ設計図等によってスパン中央の緊張力、マンメータの読みおよび伸び率が求められるので、これら値を管理図にプロットすると図—15 に示す点 C が各ケーブルごとに求まる。この点 C はあらかじめ Pull in と許容セット量等を考慮して求めておくのが緊張の際便利である。

マンメータの読みについて、点 C を中心に  $\pm 40$  kg/cm<sup>2</sup> の線を水平に引き、上限を  $\overline{FG}$ 、下限を  $\overline{HI}$  とする。次にケーブルの伸び量は点 C を中心に伸び率  $\pm 0.04\%$  に相当する量を点 C を通る水平線上にプロットし、この点を点 D、点 E とする。点 D、点 E と原点 O とを結んだ  $\overline{OD}$ 、 $\overline{OE}$  を延長し、マンメータの読みの上下限の線との交点を点 F、点 G、点 H、点 I とする。この点 F と点 I を通る線を引止め線とする。

従来方法では、摩擦測定結果から得られた PC 鋼材



図—15 引止め線の設定

の見掛けのヤング係数に見合った値に補正を行っていたが、この緊張管理方法では補正を行わなくてよいとした。つまり、伸び率とマンメータの読みとの関係は PC 鋼材のヤング係数がばらついていても、各現場、スパン、曲上げ角度およびケーブルの曲上げ部分のケーブル長に占める割合が変化しても、係数の値は 0.0013 と同一の値を示している。ただし、標準偏差は 0.012~0.027 の範囲で、全体での値は 0.022 である。これらのことから、伸び量とマンメータの読みとの関係は、PC 鋼材の見掛けのヤング係数の違いによる影響を考慮してもその誤差はほとんどないと考えることができるので、実用上は PC 鋼材の見掛けのヤング係数の補正を行わなくてもよいことにしたものである。

#### 5. 現場測定

以上からマンメータの読みと伸び率から緊張管理が可能であることがわかったので、従来の緊張管理方法と今回の緊張管理方法との適応性を確認するために実橋において PC 鋼材のひずみ、コンクリートのひずみ、桁の変形等を測定し、プレストレス導入時の PC 鋼材のひずみの挙動について検討を行った。

##### 5.1 測定内容

測定を行った橋梁は表—6 に示すように、スパン 29.2 m と 27.0 m の PC I 形桁である。測定を行った主桁は各橋梁で 2 本ずつ計 4 本である。

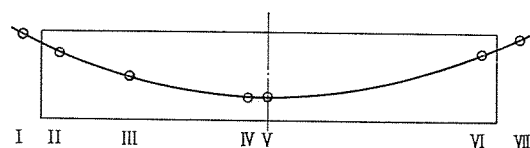
測定内容は表—7 に示すようにプレストレス導入時の PC 鋼材、コンクリートのひずみ、桁の短縮量および反り量で、T 橋では 4 ケーブル/主桁、U 橋では 3 ケーブル/主桁について測定を行った。

表—6 橋梁諸元

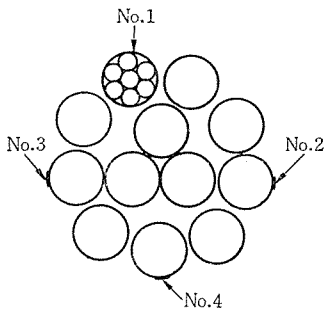
	T 橋	U 橋
構造形式	複線 PCI8 主桁	単線 PCI3 主桁(ブロック工法)
スパン (m)	29.2	27.0
列車荷重	N-18, P-19	KS-16

表—7 測定内容

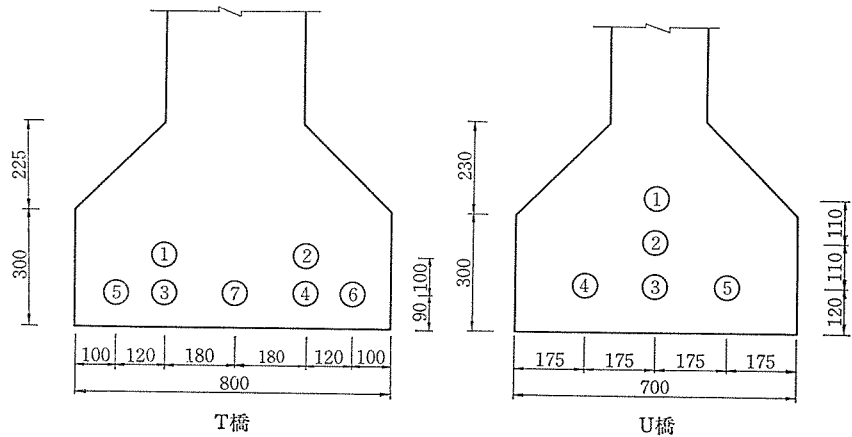
	T 橋	U 橋
プレストレス導入時の PC 鋼材のひずみ	4 ケーブル 7(6) 断面	3(2) ケーブル 7(6) 断面
プレストレス導入時のコンクリートのひずみ	3 断面	
プレストレス導入時の桁の短縮量	桁の両端部	
プレストレス導入時の桁の反り量	スパン中央, 両支点	



図—16 測定位置 (PC 鋼材のひずみ)



図—17 PC 鋼材のひずみゲージ貼付け位置 (U橋)  
(PC 鋼より線 1 T 12.7)



図—18 スパン中央のケーブル配置

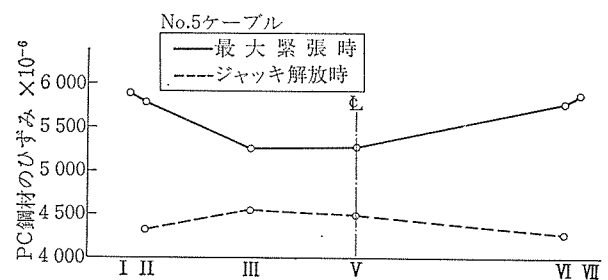
PC 鋼材のひずみの測定位置は図—16 に示すように、スパン中央、第 1 曲上げ点、曲線部、および両端の定着部の前後の 7 断面とした。T 橋の使用ケーブルは 12T 12.4 で 12 本のストランドのうち 1 本のストランドの 7 測定断面にそれぞれ 4 枚のゲージを貼付し、U 橋では図—17 に示すように 12 本のストランドのうち 4 本のストランドの 7 測定断面について 1 枚ずつゲージを貼付し、各橋梁とも各測定断面で同一ストランドの同一素線にゲージを貼付した。ゲージは素線の軸方向に貼付し、マンメータの読みで  $50 \text{ kg/cm}^2$  ごとに最終荷重まで測定した。また、T 橋、U 橋のスパン中央でのケーブル配置は図—18 に示すとおりで、T 橋では 7 ケーブル、U 橋では 5 ケーブルである。

### 5.2 測定結果

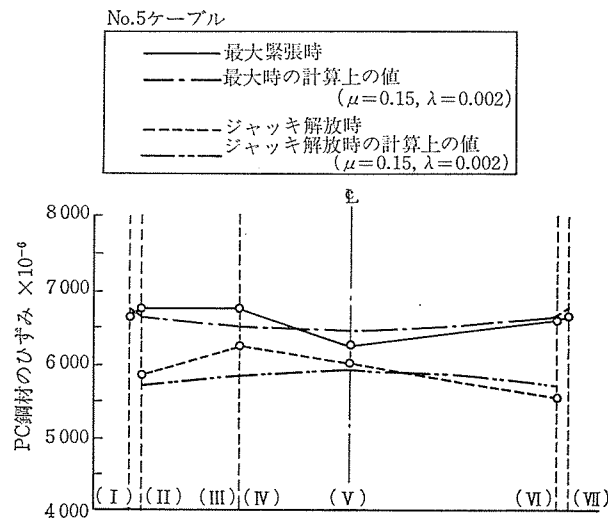
緊張は桁の両端から同時に行い、PC 鋼材に最大緊張力を与えた時とジャッキ解放時の橋軸方向のひずみを測定し、その一例を図—19、20 に示す。最大緊張時のひずみ分布には若干のばらつきはあるが、おおむね桁端にいくほどひずみは増加している。

定着後ジャッキ解放時のスパン中央のひずみは最大緊張時のひずみに比べて約  $500 \sim 700 \mu$  ほど小さい値となっている。このことは、ジャッキの解放によって PC 鋼材が内側へめり込むことにより生じると考えられる。各橋梁で測定ケーブルの許容すべり量 (定着後において緊張力がスパン中央まで影響しないときのすべり量) は表—8 に示すとおりで、 $\mu=0.0$ 、 $\lambda=0.004$  として計算した場合許容すべり量は  $2 \text{ mm}$  であるが、実際のセット量は約  $12 \text{ mm}$  であった。

また、T 橋の測定ケーブルについてスパン中央での最大緊張時の PC 鋼材のひずみを  $5500 \mu$  と仮定し、 $\mu$ 、 $\lambda$  の値を変化させ、すべり量を片側  $12 \text{ mm}$  として、中央のひずみの減少量を計算すると表—9 に示すとおりで、約  $100 \sim 700 \mu$  程度の減少が推定される。同様に U 橋で



図—19 PC 鋼材のひずみ分布 (T橋)



図—20 PC 鋼材のひずみ分布 (U橋)

は、すべり量を片側  $12 \text{ mm}$  としてすべりによるスパン中央のひずみ減少量を求めると表—10 のとおりで、実測値にほぼ一致している。

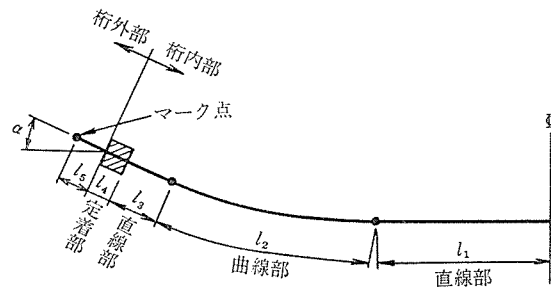
T 橋の各ケーブルを緊張した際の No. 1, 3, 5 ケーブルのコンクリートの弾性短縮によるひずみの減少量は表—11 に示すとおりで No. 3, 5, 7 (測定ケーブル) ケーブル緊張の場合には他のケーブルに比べて幾分大きな値となっている。No. 5 ケーブルの緊張後の時間経過のひずみ変化は図—21 に示すとおりである。U 橋においても同様な傾向である (図—22)。また、弾性変形によ



表—8 許容すべり量

橋名	ケーブル形状等 ケーブル No.	ケーブル形状				許容すべり量 (mm)	
		$l_1$	$l_2$	$l_3$	$\alpha$	$\mu=0.0$ $\lambda=0.004$	$\mu=0.4$ $\lambda=0.004$
T 橋	No. 1	1.745	12.409	0.689	10°00'	2	13
	No. 3	3.399	10.740	0.690	9°30'	2	12
	No. 5	6.985	7.138	0.690	9°30'	2	11
	No. 7	10.294	3.810	0.691	9°00'	1	9
U 橋	No. 1	2.481	10.720	0.641	12°00'	2	14
	No. 4	5.553	7.584	0.629	6°30'	2	12
	No. 5	6.256	6.867	0.626	2°30'	2	9

$l_i$ : 各区間のケーブルの長さ  
 $\alpha$ : 桁端でのケーブル定着角度



表—9 PC 鋼材のひずみの減少量 (T橋) ( $\times 10^{-6}$ )

CASE	1	2	3	4
	$\mu=0.0$ $\lambda=0.0$	$\mu=0.3$ $\lambda=0.004$	$\mu=0.15$ $\lambda=0.002$	$\mu=0.25$ $\lambda=0.002$
No. 1	688	81	394	302
No. 3	689	129	417	340
No. 5	690	199	450	396
No. 7	691	269	484	452

る減少量および導入力を比較すると 表—12 に示すとおりで、計算値と実測値はほぼ一致している。T橋においても同様な結果を得た。

### 5.3 摩擦係数 $\mu$ , $\lambda$ の検討

PC 鋼材の最大緊張時の T橋のひずみを用いて次のような重回帰分析を行った。PC 鋼材上の 2 点の緊張力を  $P_i, P_j$  とすると、次式のように表わされる。

$$P_i = e^{\mu\alpha + \lambda l} \cdot P_j$$

$$\ln(P_i/P_j) = \mu\alpha + \lambda l$$

( $P_i/P_j$ ),  $\alpha, l$  のデータを用いて回帰分析することで  $\mu, \lambda$  を推定することができる。解析ケースおよび解析結果を表—13 に示す。例えば Case 1 では隣合う断面 (図—20) V と IV, IV と III というようにデータを作成し、データ数  $n=16$  で回帰分析を行った結果、 $\mu=0.264, \lambda=$

表—10 PC 鋼材のひずみの減少量 (U橋) ( $\times 10^{-6}$ )

桁	ケーブル 番 号	計算値 ( $\bar{\Delta}l=12\text{mm}$ )	実測値	
			ひずみ	セット量
A 桁	No. 5	500	456	21 mm
	4	461	461	24 "
	1	357	357	23 "
B 桁	No. 5	500	450	22 "
	1	357	424	20 "

注) 計算値は、許容すべり量 12mm,  $\mu=0.15, \lambda=0.002, \gamma=0.02$  とした場合  
 A桁: 簡略化した緊張管理方法  
 B桁: 従来の緊張管理方法

表—11 各ケーブル緊張による実測の PC 鋼材のひずみの減少量 (T橋) ( $\times 10^{-6}$ )

緊張ケーブル 測定ケーブル	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
No. 1	41	66	51	105	51	72
No. 3			60	143	58	103
No. 5					45	97

0.00027 となった。Case 3~5 はジャッキとコーンの内部摩擦係数を各々変化させて検討を行ったが、検討ケースによって  $\mu, \lambda$  が異なり、かなりのばらつきがある。

また、下に示すような内容で検討を行い、その結果を表—14 に示す。

表—12 スパン中央の導入力の比較

ケーブル 番号	計算値 (t)			A桁実測ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )			導入力 (t)	B桁実測ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )			導入力 (t)
	直後の導入力	弾性変形ロス	導入力	直後	弾性変形	計		直後	弾性変形	計	
No. 5	140.2	-4.6(189 $\mu$ )	135.6	5992	-243	5749	139.9	6002	-311	5691	138.2
4	137.9	-2.3(95 $\mu$ )		5787	-173	5614	135.3	—	—	—	—
1	135.6	0		5591	0	5596	135.9	5621	0	5621	136.5

注) 実測の導入力:  $\epsilon \times E_p \times A_p$  ( $E_p=2.05 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2, A_p=11.845 \text{ cm}^2$ )

表-13 解析結果 (1)

CASE	内 容	$\mu$	$\lambda$	$n$
1	隣合う断面間で行う	0.264	0.00027	16
2	PC 鋼材の中央部と端部間で行う	0.177	0.00135	12
3	$\gamma=0.01$ として隣合う断面間で行う	0.337	0.00056	16
4	$\gamma=0.015$ として隣合う断面間で行う	0.318	0.0005	16
5	$\gamma=0.02$ として隣合う断面間で行う	0.306	0.00041	16

表-14 解析結果 (2)

CASE	$\mu$	$\lambda$	$\gamma$	$n$
6	0.268	0.00121	0.015	16
7	0.967	-0.00819	0.015	16
8	-0.088	0.00472	0.015	8
9	0.194	0.00107	0.015	16

case 6: 直線配置区間は  $\lambda$  のみによって  $(P_i/P_j)$  が決定されるので、この区間のデータから  $\lambda$  を算出し、この値を用いて曲線配置区間のデータより  $\mu$  を算出した。

case 7: ジャッキ解放時のひずみより隣合った断面間で解析した。

case 8: PC 鋼材の実際の伸び量と各区間の伸び量より次式を導き、 $\mu$ ,  $\lambda$  を推定した。

$$\Delta l = \frac{P}{A_p E_p} \left\{ \frac{1}{1+\gamma} (2l_4+l_5) + \frac{1}{1+\gamma} (2l_1+2l_2+2l_3+l_4) + \frac{1}{1+\gamma} (2l_1+l_2)\mu\alpha + \frac{1}{1+\gamma} (l_1+l_2+l_3)^2\lambda \right\}$$

case 9: ケーブルの平面的な角度を考慮し、 $\alpha = \sqrt{\alpha_h^2 + \alpha_v^2}$  として解析する。

No.5ケーブル、スパン中央

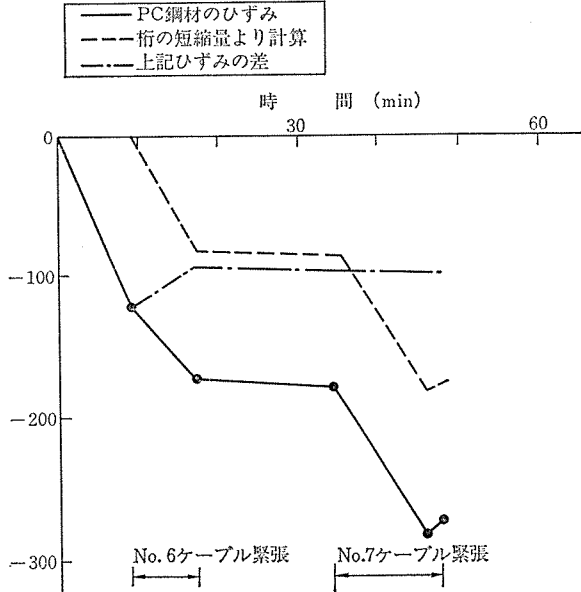


図-21 PC 鋼材のひずみ変化 (1)

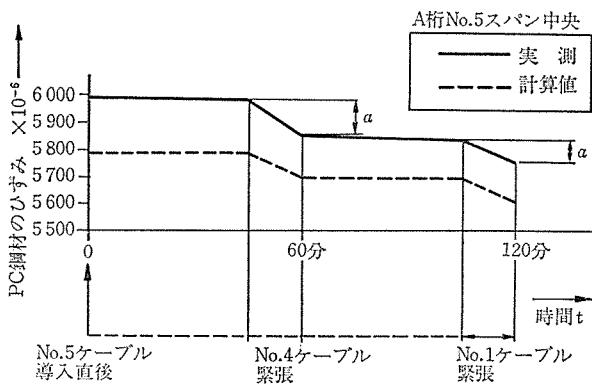


図-22 PC 鋼材のひずみ変化 (2)

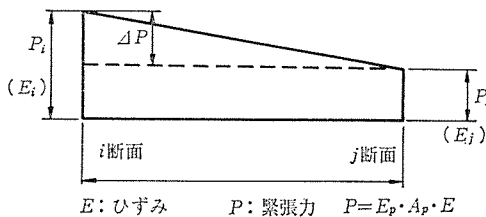


図-23 PC 鋼材のひずみ

同様にU橋においても Case 2 により解析を行った。

図-23 に示すような関係より次式を用いて解析した。

$$\ln(\epsilon_i/\epsilon_j) = \mu\alpha + \lambda l$$

測定データによって  $(\epsilon_i/\epsilon_j)$ ,  $\alpha$ ,  $l$  を用いて回帰分析を行い、 $\mu=0.153$ ,  $\lambda=0.0033$  となった。 $\mu$ ,  $\lambda$  は解析の方法によって異なるが、PC 鋼材の中央と端部間で解析するのが概ね実用的と考えられる。緊張管理に用いる  $\mu$ ,  $\lambda$  もほぼ妥当な値と考えられる。

## 6. おわりに

簡略化した緊張管理は摩擦測定を行わず、PC 鋼材の

伸びとマンオメータの読みによって桁全体の平均的な緊張力を把握して、所定のプレストレスが与えられるように管理するものである。

現場測定によって従来の方法と新しい方法との比較を行ったが、両方法の導入力の差は認められず、今回の緊張管理方法は十分実務的であると考えられる。

緊張の際の PC 鋼材のひずみ分布は、緊張定着後、ジャッキを解放すれば Pull in によって PC 鋼材がめり込み、そのひずみ減少量は PC 鋼材が直線に配置されている場合に近いひずみ分布を今回の測定では得た。

摩擦係数  $\mu$ ,  $\lambda$  について、今回の測定結果からは、 $\mu$ ,  $\lambda$  の値は現行示方書に示されている値よりは小さい値であると考えられる。

今回の解析は単純桁であったが、今後連続桁、低摩擦シースを使用した場合、片引きの場合等について検討し、この方法の適用の拡大をはかりたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 橋田敏之, 齊田 昇: PC 橋のプレストレスングと設計施工, 現代理工
- 2) 小林, 中原, 長田: PC 橋の簡略化した緊張管理, 構造物設計資料, No. 77, 1984.3
- 3) 極東鋼弦コンクリート振興 (株) 資料
- 4) 小林, 中原, 長田: PC 桁の緊張時のひずみについて, 第 38 回セメント技術大会, 昭和 59 年 5 回
- 5) 本山, 長田: 簡略化した緊張管理による現場測定, 土木技術, Vol. 39, No. 11

【昭和 60 年 2 月 1 日受付】