

# 長流橋の実験報告

木村 禎吾\* 温泉 重治\*\*

## 目次

1. まえがき
2. 設計説明
3. 応力導入時のPC鋼線摩擦損失係数
  - 3-1 測定概要
  - 3-2 測定結果
  - 3-3 摩擦損失係数の計算
  - 3-4 伸び量からの検算
4. 5径間連続ゲタの振動特性
  - 4-1 自由振動の計算
  - 4-2 測定方法および測定結果

### 1 まえがき

当研究室では橋梁など構造物の力学的挙動を研究するため、毎年数多くの現地実験を行なっているが、37年度完成した長流橋については筆者らが担当して実験をしてきた。本稿はその報告であるが、大別して目次に示すような二つの実験内容からなっている。

長流橋は1級国道37号線伊達町に架設されたもので、BBRV工法を採用した5径間連続PC橋（箱形断面）であり、全長を4つの施工区間に分割して順次施工している。PC鋼線の摩擦損失係数測定の実験は、その第4施工区間について行なったのであるが、この場合PCケーブルの長いことが摩擦損失係数を求める上で、好都合であった（ケーブル長の実験結果への影響については土試月報第111号を参照されたい。）また振動実験では、連続ゲタの振動的挙動の単純ゲタのそれとの相違、不静定次数の多い連続ゲタの動力学的見地からの得失など検討することができた。

### 2 設計説明

#### 設計条件

- イ) 橋種 プレストレスト・コンクリート道路橋
- ロ) 型式 5径間連続ゲタ
- ハ) 支間 5 @ 38.4 = 192m
- ニ) ケタ長 192 + 2 × 0.4 = 192.80m
- ホ) 有効幅員 8m
- ヘ) 総幅員 9m
- ト) ケタ高 1.5m
- チ) 舗装 コンクリート 5~13cm

- リ) 荷重 活荷重  $L-20$   $T-20$   
雪荷重  $100\text{kg/cm}^2$  (有効幅員部分)
- ヌ) 衝撃係数  $i = \frac{20}{50+l}$
- ル) コンクリート強度  
 圧縮強度 (材令28日)  $400\text{kg/cm}^2$   
 (導入時) 360  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 許容曲げ圧縮応力度  
 (設計時) 130  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 (導入時) 170  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 許容曲げ引張応力度  
 (設計時) 0  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 (導入時) 10  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 許容支圧応力度 (設計時) 110  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 許容斜引張応力度  
 (設計時) 9  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$   
 (破壊時) 16  $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$
- オ) PC鋼線強度 (径5mm)  
 PC鋼線引張強度  $165\text{kg/mm}^2$   
 PC鋼線降伏点応力度 140  $\text{kg/mm}^2$   $\text{〳}$   
 PC鋼線許容引張応力度  
 (設計時) 99  $\text{kg/mm}^2$   $\text{〳}$   
 (導入時) 126  $\text{kg/mm}^2$   $\text{〳}$
- ウ) 鉄筋強度  
 許容引張応力度  $1,400\text{kg/cm}^2$   
 腹鉄筋許容引張応力度  $2,200$   $\text{kg/cm}^2$   $\text{〳}$
- カ) 安全度  
 ひびわれに対する安全度  
 (活荷重) 1.4以上  
 ひびわれに対する安全度  
 (全荷重) 1.2  $\text{〳}$   
 破壊に対する安全度 2.0  $\text{〳}$

#### 施工区分

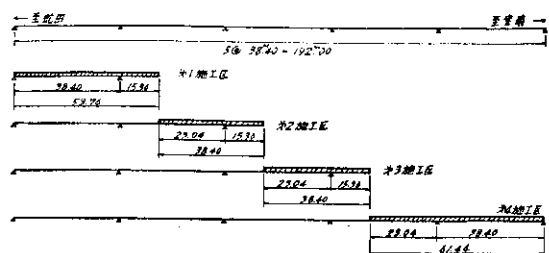


図-1 長流橋上部構造の施工順序

\*前構造研究室 現函館開発建設部道経課  
\*\*構造研究室

断面諸数値

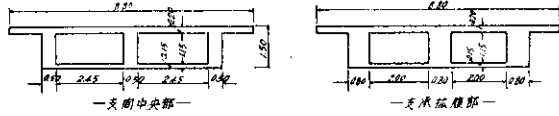


図-2 断面の諸数値 (設計計算上の仮定)

断面積	4.445 m <sup>2</sup>	断面積	5.480 m <sup>2</sup>
中立軸の位置 (下縁からの距離)0.852m		中立軸の位置 (下縁からの距離)0.828m	
断面一次モーメント	3.787 m <sup>3</sup>	断面一次モーメント	4.537 m <sup>3</sup>
断面二次モーメント	1.335 m <sup>4</sup>	断面二次モーメント	1.461 m <sup>4</sup>

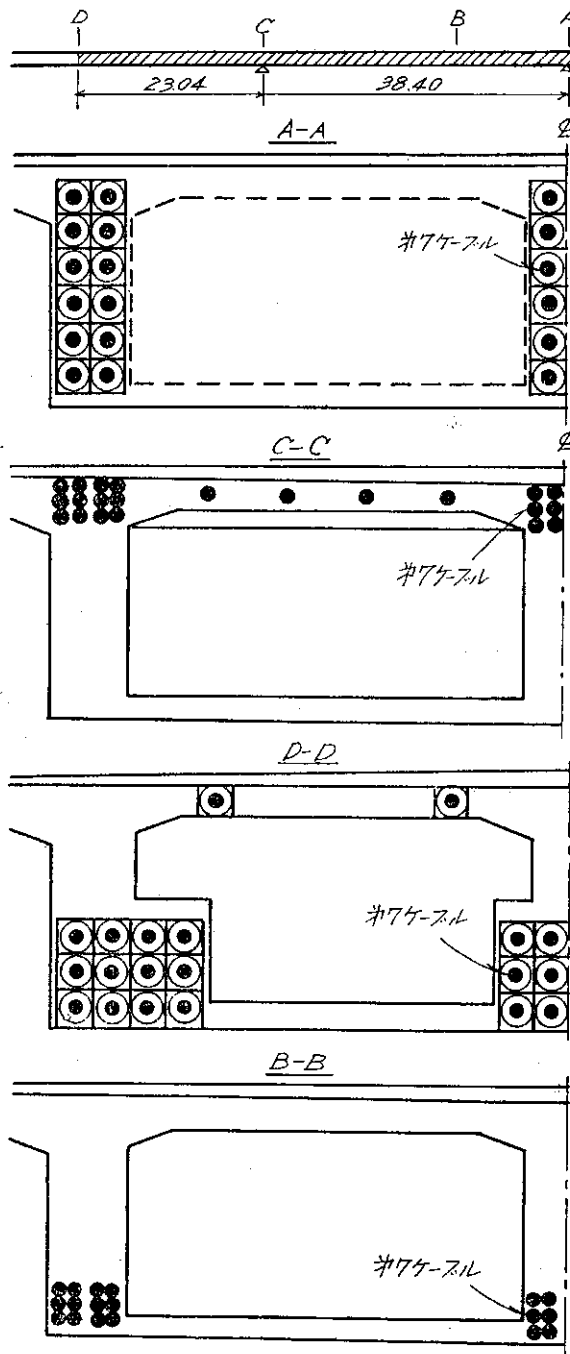


図-3 試験ケーブルの位置図

3 応力導入時のPC鋼線摩擦損失係数

3-1 測定概要

長流橋は、BBRV工法による橋長192mの5径間連続PC橋で、全長を4つの施工区間に分割して順次施工したのであるが、ここではその第4施工区間のプレストレス導入時のPC鋼線応力測定を行なった結果について述べることにする。

実験はPC鋼線の摩擦損失係数を求めることを終局の目的として、次の要領で行なった。まず箱形断面の中央隔壁にある第7ケーブル(図-3・4参照)を試験ケーブルに選び、これに沿って6箇所の測定窓を設けて、ワイヤーストレンゲージによるストレン測定と物指しによる伸びの測定とを行なった。測定窓の位置は図-4に示すとおりである。各測定窓にはそれぞれ6枚のゲージを貼りやすい任意の6本のPC鋼線に貼付して、最大緊張力104tにいたるまで10tごとに応力測定を行ない、同時に各測定窓におけるPC鋼線伸び量を物指しで測ったのである。

なお、緊張によるPC鋼線の円周方向の変位(回転、捩れ)の影響を軽減するため、あらかじめケーブルを10tだけ緊張碇着させたのち、ストレンゲージを貼付したのであるから、最終時のストレンゲージの読みおよびPC鋼線の伸び量は、緊張力94t分に相当するものである。これらに関連した補正は図-5で行なったのである。

使用したストレンゲージはK.K.共和無線研究所製K-14-1で、測定器は同社製スイッチボックスSS-24-JおよびインジケータースM-4Jである。温度補償ゲージは各測定窓に1枚宛用いてある。

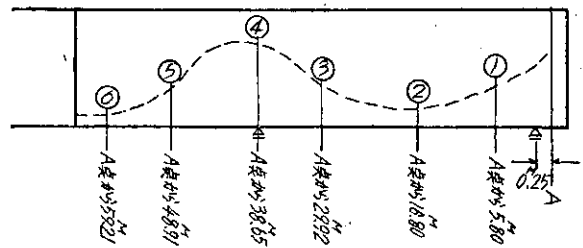


図-4 測定窓の位置図

3-2 測定結果

ストレンゲージによる測定値は表-1のとおりである。

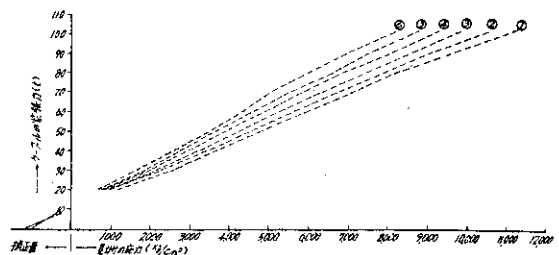


図-5 wire strain gage による測定

表-1 PC鋼線応力 ( )内は補正前の値

単位kg/cm<sup>2</sup>

測定窓	補正量	緊張力 (t)								
		20	30	40	50	60	70	80	90	104
①	1150	2324 (1174)	3586 (2436)	4738 (3588)	5854 (4704)	7026 (5876)	8190 (7040)	9314 (8164)	10,714 (9564)	12,410 (11,260)
②	1100	2022 (922)	3356 (2256)	4484 (3384)	5574 (4474)	6656 (5556)	7814 (6714)	8956 (7856)	10,086 (8986)	11,726 (10,626)
③	1050	1952 (902)	3166 (2116)	4246 (3196)	5250 (4200)	6214 (5164)	7334 (6284)	8400 (7350)	9554 (8504)	10,974 (9924)
④	1050	1854 (804)	2990 (1940)	3950 (2900)	4920 (3870)	5886 (4836)	6854 (5804)	7886 (6836)	9080 (8030)	10,356 (9306)
⑤	1050	1796 (746)	2864 (1814)	3730 (2680)	4684 (3634)	5596 (4546)	6498 (5448)	7614 (6564)	8498 (7448)	9810 (8760)
⑥	1000	1684 (684)	2670 (1670)	3544 (2544)	4428 (3428)	5252 (4252)	6032 (5032)	6966 (5968)	7888 (6888)	9252 (8252)

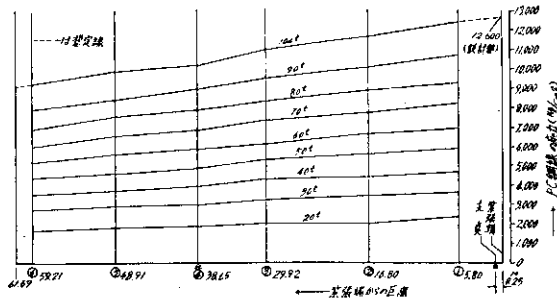


図-5 PC鋼線応力の分布状態 (測定値)

3-3 摩擦損失係数の計算

まずPCケーブルが設計図のとおり配置されていると仮定して、角変化 $\alpha$ およびケーブル長 $l$ を計算すると表-2のようになる。

表-2 測定窓位置の $\bar{\alpha}$ 及 $l$

測定窓	⑥	⑤	④	③	②	①
角変化 $\alpha$ (°)	33.30'	28.50'	20.14'	10.11'	5.02'	1.46'
$\alpha$ (rad)	0.585	0.503	0.353	0.178	0.088	0.031
ケーブル長 $l$ (m)	59.21	48.91	38.65	29.92	16.80	5.80
最終応力 $\sigma_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	9.252	9.810	10.356	10.974	11.726	12.410

今 $\sigma_2 = \sigma_1 \cdot e^{-\mu\bar{\alpha} - \lambda l}$ を書きかえて  $\mu\bar{\alpha} + \lambda l = l \log_e \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$

また図-6から $\sigma_1 = 12.600 \text{ kg/cm}^2$ と仮定すれば、

$\log_e \frac{12.600}{12.410} = 0.0152 = 0.031\mu + 5.80\lambda$

$\log_e \frac{12.600}{11.726} = 0.0719 = 0.088\mu + 16.80\lambda$

$\log_e \frac{12.600}{10.974} = 0.1386 = 0.178\mu + 29.92\lambda$

$\log_e \frac{12.600}{10.356} = 0.1961 = 0.353\mu + 38.65\lambda$

$\log_e \frac{12.600}{9.810} = 0.2503 = 0.503\mu + 48.91\lambda$

$\log_e \frac{12.600}{9.252} = 0.3089 = 0.585\mu + 59.21\lambda$

最小自乗法により $\lambda, \mu$ の最確値を求めると、

$\mu \cdot \Sigma \bar{\alpha}^2 + \lambda \cdot \Sigma (\bar{\alpha} \cdot l) = \Sigma (\bar{\alpha} \cdot l \cdot \log_e \frac{\sigma_1}{\sigma_2})$

$\mu \cdot \Sigma (\bar{\alpha} \cdot l) + \lambda \cdot \Sigma l^2 = \Sigma (l \cdot \log_e \frac{\sigma_1}{\sigma_2})$

であるから、

$0.7602\mu + 79.8670\lambda = 0.4072$

$79.8670\mu + 8602.92\lambda = 43.5544$

これを解いて $\mu = 0.16 \quad \lambda = 0.0036$ を得た。

3-4 伸び量からの検討

上記の値について同ケーブルPC鋼線の伸びのデータから検討してみる。まず各測定窓における緊張力と伸びの関係は表-3、図-7のように測定されている。

表-3 緊張によるPC鋼線の伸び 単位 mm

測定窓	緊張力 (t)									補正した伸び (104 t 時)	
	20	30	40	50	60	70	80	90	104		
①	22	54	84	104	128	158	186	222	265	38	303
②	20	44	62	88	108	131	149	176	207	26	233
③	10	30	45	58	74	90	106	120	144	18	162
④	6	21	32	44	51	63	73	85	100	14	114
⑤	4	9	15	22	26	34	40	47	54	8	62
⑥	1	2	5	6	8	9	11	13	15	3	18

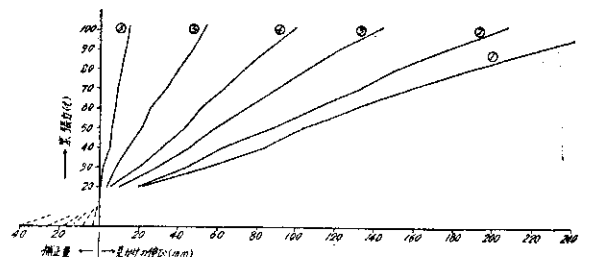


図-7 PC鋼線の実測伸び (表-3の図化)

今  $\lambda=0$   $\mu=0$  とした場合の伸びは①点において

$$\Delta l_0 = \frac{P \cdot l}{E_p \cdot A_p} \doteq 352 \text{mm}$$

ただし、 $P=104 \text{ t}$   $l=55.89 \text{ m}$   $E_p=2 \times 10^6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$   
 $A_p=8.2467 \text{ cm}^2$ 。これに対して計測された伸びは表-3から303mmであるから①点における応力導入率は

$$k = \frac{303}{352} \doteq 0.86$$

である。一方、 $\lambda=0.0036$   $\mu=0.16$  を用いて応力分布を計算すると図-8のようになり、これより①点の導入率(面積比)を求めると  $k'=0.85$  となる。

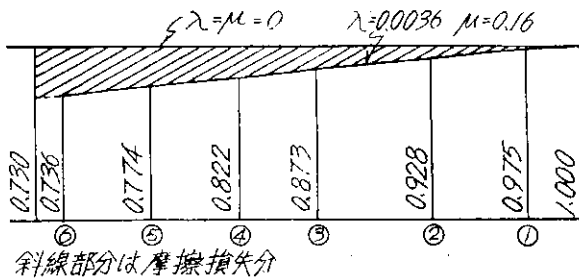


図-8 応力導入率 ( $\lambda=0.0036$   $\mu=0.16$ で計算)

以上の結果  $k \doteq k'$  であるから、前記した  $\lambda=0.0036$ ,  $\mu=0.16$  はほぼ妥当な値であると考えられる。

#### 4 5径間連続ゲタの振動特性

##### 4-1 自由振動の計算

ゲタの横振動に関する微分方程式は

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\tau A}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

単純横振動に関する5径間連続ゲタの振動数方程式を書くのと次のとおりである。

$$D = \begin{vmatrix} -2\varphi & \psi & 0 & 0 \\ \psi & -2\varphi & \psi & 0 \\ 0 & \psi & -2\varphi & \psi \\ 0 & 0 & \psi & -2\varphi \end{vmatrix} = 0$$

ただし、スパンは各径間等しいものとする。

$$\varphi = \cot h k l - \cot k l$$

$$\psi = \operatorname{cosec} h k l - \operatorname{cosec} k l$$

この解の特根は

$$(k l)^2 = \pi^2, (1.05\pi)^2, (1.18\pi)^2, (1.32\pi)^2, (1.45\pi)^2, (2\pi)^2, \dots$$

$$\eta_n = \frac{k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{A\tau}} \text{ より振動数を求めると}$$

$$\eta_n = 2.5, 2.8, 3.5, 4.3, 5.2, 10.0 \text{ cy/sec}$$

$$\text{ただし、} A = 4.445 \text{ (m}^2\text{)}, \tau = 2.4 \text{ (t/m}^2\text{)},$$

$$I = 1.335 \text{ (m}^4\text{)}, g = 9.8 \text{ (m/sec}^2\text{)},$$

$$E = 4.5 \times 10^6 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

なお振動中の物体については静弾性係数より動弾性係

数を用いるほうが実測値に対して良く一致するので、高野俊介氏の提案した次式によって動弾性係数  $E$  を求めた。

$$E = 0.52 \sigma_B^{0.342} \cdot 10^5 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

ただし、 $\sigma_B$  は破壊強度で材令配合などを考慮して 510 ( $\text{kg/cm}^2$ ) と仮定した。

#### 4-2 実測方法および実測結果

##### 1. 実験方法

振動測定には、土木試験所型 2ton 起振機(自重 0.9 t) を用いて行なった。本橋は連続ゲタなので、各径間にわたって回転数 450~700 rpm の間に变化せしめた。振動の記録は共和製加速度計(容量 1 g)を用い共和製 D. P. M にて増幅し、渡辺製のペン書きオシログラフにて記録した。加速度計は各径間の中央並びに  $l/4$  の点にロウ付けして測定を行なった。

##### 2. 実測結果

##### (1) 固有振動数に関して

表-4

	理論値			定測値	
	特根 $(k l)^2$	振動数 $(\text{sec}^{-1})$	周期 $(\text{sec})$	振動数 $(\text{sec}^{-1})$	周期 $(\text{sec})$
第1次	$\pi^2$	2.5	0.4	2.5	0.4
第2次	$(1.05\pi)^2$	2.8	0.36	2.7	0.37
第3次	$(1.18\pi)^2$	3.5	0.28	3.3	0.30
第4次	$(1.32\pi)^2$	4.3	0.23	4.1	0.24
第5次	$(1.45\pi)^2$	5.2	0.19	5.0	0.2
第6次	$(2\pi)^2$	10.0	0.10	9.2	0.11

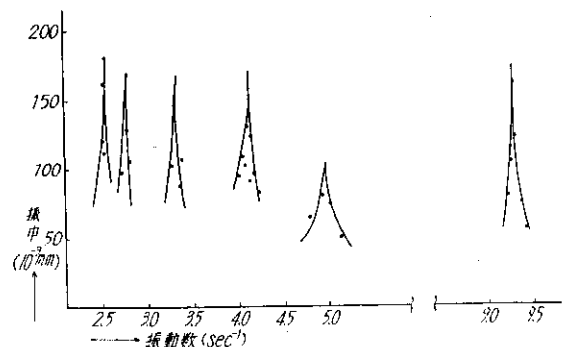


図-9

レスポンスカーブは図-9に示してある。ただしレスポンスカーブの計算式には起振機の回転数による力が一定になるように  $w^2$  で除した。

$$\text{すなわち } y = (\text{起振力の加速度}) \cdot \frac{1}{w^2}$$

連続ゲタの固有振動数間隔は径間数の増加に伴って次第に密になり、共振の度合は増加する。

振巾については単純ゲタが1次以外は非常に小さいのに反して、連続ゲタは2次以後も比較的大きい。表-4、図-9は以上の振動特性を非常に良く示している。

(2) 減衰係数に関して  
 実測値による減衰時の振巾を  $y_1, y_2, y_3 \dots$  とし、

$\frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = v$  を減衰比とすれば対数減衰率は

$$d = \log_e v = \frac{\pi\left(\frac{\nu}{n}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{n}\right)^2}}$$

で表わすことができる。本橋の対数減衰率は実測の結果  
 0.18であるから減衰係数  $\nu = 0.9/sec$  となる。

図書室本棚から

### 最近の購入洋書

著者	書名	発行所
Ernst Klapp	Wiesen und Weiden	Paul Parey
Janke E. Lösch	Tables of Higher Funktionen	Mcgraw Hill
B. M. Gumenskii	Soil Drilling by Vibration	Consultant Bureau
Ralph E. Grim	Applied clay mineralogy	Mcgraw Hill
Legget	Geology and Engineering (2nd Edition)	Kogakusha
R. Miller	Geological Sciences	J. Wilay
Barkan	Dynamics of Bases and Foundation	Mcgraw Hill
H. J. Grove	Fatigue of Metals and Structure	Thamer and Hudson
Muckenhausen	Die Wichtigsten Böden der Bundesrepublik Deutschland	Kommentator Verlag
Milton E. Harr	Groundwater and Seepage	Mcgraw
Amburger	English Russian Dictionary on Civil Engineering	Central Editional Board
A. Schoklitch	Hand Bnch des Wasserban	Springer Verlag
J. Faber	Reinforced Concrete	Spon
Kurt Nagel	Berechnung Statischer System Band 1. Band 2.	Veb Verlag
Olsen	Die Zweitig Gelagerte Platte 2 Band	Wilhelm Ernst
D. Howie	Rock Forming minerals vol. V	Longmans
J. D. Ivins	The Measurement of Grassland Productivity	Butterworth
F. S. Prince	The Grassland Forming in the Humid Northeast	Van Nostland
J. R. Harlan	Theory and Dynamics of Grassland Agriculture	Van Nostland
R. Bauman	Absorption Spectroscopy	Wiley