

## 第5回 試験緊張と管理限界の設定

講師：須田 悦弘\*

## 1. はじめに

これまでの講座でも説明しましたが、緊張管理には、①「摩擦係数をパラメータとして管理する方法」と②「引張力と伸びを独立して管理する方法」の2種類があります。

今回は、①の手法により緊張管理を行う場合において、実際にプレストレスを導入しようとする構造物とPC鋼材を用いて本緊張に先立って実施される試験緊張の手法と、その手順について説明します。

## 2. 試験緊張の目的

試験緊張は、PC鋼材の見かけのヤング係数 $E_p$ （平均値および標準偏差）と、摩擦係数 $\mu$ （平均値）および管理限界幅（標準偏差による）を求める目的で行われます。

設計段階におけるプレストレスの算出に用いるPC鋼材とシースの摩擦係数や、PC鋼材のヤング係数などの値は、実績に基づくものです。

一方、実施における摩擦係数やヤング係数には、ばらつきがあるため、一般に設計で用いた値と異なります。したがって、試験緊張によりそれらの値や、ばらつき具合を求めることで、より正確にプレストレスを設計断面へ導入することができます。

なお、試験緊張では、PC鋼材の両端にジャッキとポンプをセットする必要があります。したがって、分割施工<sup>a)</sup>によりプレストレスする場合など、現場の制約により物理的に試験緊張が実施できない場合があります。このような場合は、前回の講座で紹介したように、試験緊張ではなく実績などによりPC鋼材の見かけのヤング係数などを設定することになります。

## 3. 試験緊張の手順

## 3.1 試験PC鋼材の選定

試験緊張は、これから緊張しようとする全PC鋼材のうち、配置形状の異なる4本以上のPC鋼材を選定し行うことが原則です。これは、形状の異なるPC鋼材を同一の管理限界で管理するためです。そのため、なるべく多くの異なる形状のPC鋼材で試験緊張を実施することが望まれます。

試験緊張で求めるPC鋼材の見かけのヤング係数 $E_p$ や

摩擦係数 $\mu$ は、現場の条件、PC鋼材の配置形状などにより大きく変動するため、PC鋼材の選定を慎重に行うことが重要です。試験PC鋼材の選定にあたって留意すべきことを以下に記します。

- 1) 試験PC鋼材の本数は4本以上とする。
- 2) 与えられた時間内で（通常1日分の仕事量）、できるだけ多く行うのが望ましい。一般には4～10本の場合が多い。
- 3) 曲げ上げ角度、長さの異なるPC鋼材を、できるだけ多く選ぶ必要がある。

また、PC鋼材配置形状がまったく同じ桁を2本以上製作する場合には異質性は少ないと考えられるため、最初に施工する桁についてのみ、試験緊張を実施するのが一般的です。

## 3.2 試験緊張の一般的な手順

試験緊張の一般的な手順を以下に記します。

手順1：試験緊張を実施するPC鋼材の両端に、ジャッキ(A)および(B)を取り付ける(図-1)。

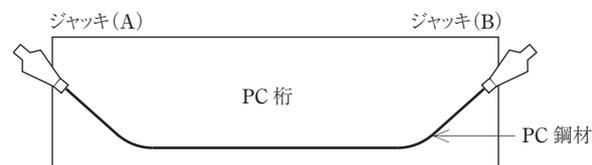


図-1 試験緊張時のジャッキ配置

手順2：ジャッキ(B)の油圧ポンプのコックを締めて(B)側のPC鋼材を固定し、ジャッキ(A)を作動して試験緊張を開始する。このとき、固定側ジャッキ(B)が引き込まれてしまうため、ジャッキのストロークを若干出してジャッキの破損を未然に防いでおく必要がある。

手順3：ジャッキ(A)の圧力を5MPaまで上げてPC鋼材のたるみを除去し、伸び測定用の標点をPC鋼材の両側にマークする。

手順4：ジャッキ(A)の圧力を5～10MPa刻みに増加させ、このときのジャッキ(A)、(B)での標点の移動量とジャッキの圧力(圧力計示度)を測定して、記録しておく。

\* Yoshihiro SUDA：鹿島建設(株) 関東支店 長野営業所

- 手順5：ジャッキ（A）があらかじめ決めておいた最大圧力（今回の例では40 MPa）に達した後、ジャッキ（A）の圧力を解放する。
- 手順6：次に、ジャッキ（A）を固定側に変更して、ジャッキ（B）を作動させ、手順1～5を繰り返す。
- 手順7：記録した移動量と圧力により表-1を作成する。  
PC鋼材の伸び量 $\Delta l$ は、ジャッキ（A）とジャッキ（B）での移動量の合計とする。

表 - 1 試験緊張の測定結果例

PC鋼材番号 C <sub>1</sub>				
圧力計 (MPa)		伸 び (mm)		
作動側 P	固定側 P'	作動側 $\Delta l_P$	固定側 $\Delta l_{P'}$	計
40	32	173	-5	168
35	28	148	-4	144
30	24	122	-3	119
25	20	99	-3	96
20	16	74	-3	71
15	12	51	-2	49
10	7	23	0	23

- 手順8：記録した緊張側ジャッキの圧力計の読み $P$ と、固定側の圧力計の読み $P'$ により $P - P'$ をグラフ上にプロットし、これらの点を結ぶ直線を引く(図-2)。この直線が $P'$ 軸と交わる点(今回の例では $\Delta P = -1.5$  MPa)と固定側の最終値(今回の例では32 MPa)の合計から緊張側の圧力 $P = 40$  MPaに対応する固定側の圧力 $P'$ の値を読みとる。(今回の例では $P' = 32 + 1.5 = 33.5$  MPa)

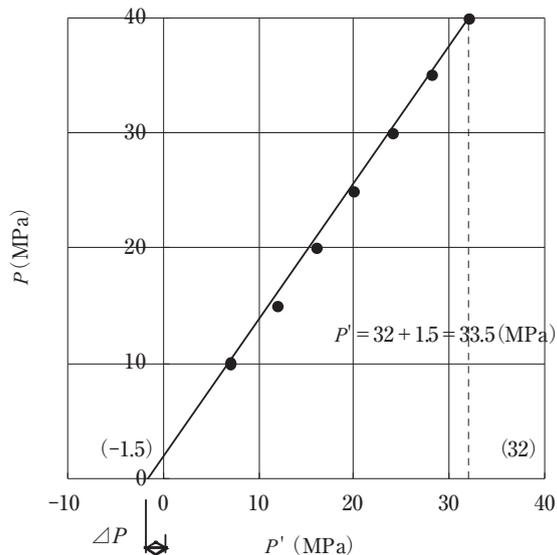


図 - 2  $P - P'$  線 (鋼材番号 C<sub>1</sub>)

- 手順9：記録した緊張側ジャッキの圧力計の読み $P$ と、PC鋼材の伸び量 $\Delta l$ により $P - \Delta l$ をグラフ上

- にプロットし、これらの点を結ぶ直線を引く(図-3)。この直線が $\Delta l$ 軸と交わる点(今回の例では $\Delta l' = -23$  mm)と標点の移動量の合計(今回の例では168 mm)の合計から $P = 40$  MPaに対応するPC鋼材の伸び量を読みとる。(今回の例では $\Delta l = 168 + 23 = 191$  mm)

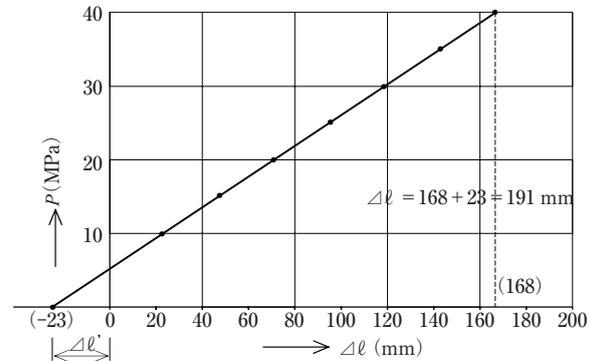


図 - 3  $P - \Delta l$  線 (鋼材番号 C<sub>1</sub>)

- 手順10：以降、手順1～9を各PC鋼材(今回の例では5種類)について実施し、固定側の圧力 $P'$ とPC鋼材の伸び量 $\Delta l$ について、表-2のようなデータとしてまとめる。

表 - 2 試験緊張の測定結果例 ( $P' - \Delta l$ )

PC鋼材番号	緊張順序	緊張方向	$P'$ (MPa)	$\Delta l$ (mm)
C <sub>1</sub>	1	右	33.5	191
	2	左	36.0	191
C <sub>2</sub>	3	右	33.0	191
	4	左	32.5	187
C <sub>3</sub>	5	右	34.5	189
	6	左	34.0	187
C <sub>4</sub>	7	右	32.0	188
	8	左	32.0	176
C <sub>5</sub>	9	右	32.5	191
	10	左	34.5	190

以上が、試験緊張の一般的な手順となります。

### 3.3 試験緊張作業における留意事項

試験緊張において、留意すべき事項を以下に記します。

#### (1) 試験PC鋼材の選定

試験緊張は一本ごとに荷重を載荷・解放するため、図心位置から極端に偏心しているケーブルを選ぶ場合には、試験緊張時に発生する桁の応力度の確認や、有害変形の発生の有無の検討を行うなどの注意が必要である。

#### (2) マーク時の圧力計示度

標点をマークする時の圧力計示度は、一般的に5 MPaとすることが多いが、PC鋼材長が長い場合や曲げ角度が大きい場合はPC鋼材のたるみがとれないこともあるため、5 MPa～10 MPaの範囲で適切に選定する。

○ 講座 ○

(3) 測定の間隔

道路橋施工便覧には、5 MPa～10 MPaと記載されているが、最大圧力が小さい場合などは、測定個数が少なくなるため、5 MPaごとに測定するのが望ましい。

(4) 最大圧力

一般的には本緊張の最終圧力で管理することが望ましいが、最終のPC鋼材の伸び量が大きい場合は1回の緊張では最終の伸び量まで引けないこともあるため、PC鋼材の長さ和使用ジャッキのストロークの関係を考慮し決定する。

(5) 緊張順序

試験緊張では、緊張後に荷重を解放するため、緊張順序は任意でよい。なるべく多くのPC鋼材が緊張できるように、作業効率を考慮して決定するのが一般的である。

(6) 定着具

試験緊張ではPC鋼材を定着しないため、桁に設置される定着具には、くさびをセットしてはならない。

(7) 測定位置

PC鋼材の伸びの測定位置は、ジャッキにセットされたくさびの位置と桁に配置された定着具の間の区間となるが、各定着工法により測定できる位置が異なるため、作業前に定着工法の指針などで確認する必要がある。

4. 試験緊張結果の解析

4.1 摩擦係数

図-4のような形状のPC鋼材について試験緊張を行った場合、摩擦係数 $\dot{\mu}$ は下式により算出できます。

$$\dot{\mu} = \frac{1}{2 \times \left( a + \frac{\lambda}{\mu} \ell \right)} \log_e \left\{ \frac{P}{P'} \cdot \frac{1}{(1+\gamma)^2} \right\}$$

ここに、

- $a$  : 標点, 固定点間のPC鋼材の角変化の合計の1/2 (ラジアン)
- $\mu$  : PC鋼材角変化1ラジアンあたりの摩擦係数 (1/ラジアン)
- $\lambda$  : PC鋼材長さ1mあたりの摩擦係数 (1/m)
- $\lambda / \mu$  : 0.0133 (今回の例では,  $\mu = 0.3$ ,  $\lambda = 0.004$ )
- $\ell$  : 評点, 固定間のPC鋼材の長さの1/2 (m)
- $\gamma$  : 定着具およびジャッキの内部摩擦損失 (定着工法により値が異なるため, 各定着具メーカーの技術資料あるいはPC工法指針<sup>4)</sup>ほかを参照。今回の例では $\gamma = 3\%$ )
- $P$  : 作動側ジャッキの圧力計の読み (MPa)
- $P'$  : 固定側ジャッキの圧力計の読み (MPa)

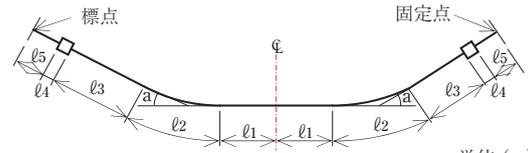
4.2 PC鋼材の見かけのヤング係数

図-4のような形状のPC鋼材について試験緊張を行った場合、PC鋼材の見かけのヤング係数 $\dot{E}_p$ は、次式により算出できます。

$$\dot{E}_p = \frac{L}{\Delta \ell} \cdot \sqrt{P \cdot P'} \times \frac{A_m}{A_p}$$

ここに、

- $\dot{E}_p$  : PC鋼材の見かけのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)



PC鋼材番号	角度	ラジアン	$\ell_1$	$\ell_2$	$\ell_3$
C1	5° 30'	0.0960	3.500	1.178	13.160
C2	4° 30'	0.0785	5.200	1.920	10.691
C3	3° 30'	0.0611	6.900	1.626	9.268
C4	3° 00'	0.0524	8.600	2.280	6.905
C5	1° 00'	0.0175	10.300	0.777	6.699

(1° ≒ 0.0175 ラジアン)

$\ell_4$ : 0.127 m,  $\ell_5$ : 0.335 m

図-4 試験緊張を行ったPC鋼材の形状

- $L$  : PC鋼材長 (標点, 固定点間の距離) (mm)
- $\Delta \ell$  : PC鋼材の伸び量 (= 作動ジャッキ側の伸び量 - 固定ジャッキ側の引込み量) (mm)
- $A_m$  : ジャッキの受圧面積 (cm<sup>2</sup>) (今回の例では  $A_m = 300$  cm<sup>2</sup>)
- $A_p$  : PC鋼材の断面積 (cm<sup>2</sup>) (今回の例では  $A_p = 11.148$  cm<sup>2</sup>)

4.3 解析のまとめ

以上から、各PC鋼材について $\dot{\mu}$ と $\dot{E}_p$ が算出できます。また、それぞれの平均値 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{E}_p$ と標準偏差 $\sigma$ をまとめると、表-3の結果が得られます。なお、平均値と標準偏差の算出方法については、次節で示します。

5. 摩擦係数の管理限界

5.1 PC鋼材1本に対して

PC鋼材1本に対する摩擦係数 $\mu$ の管理限界は、2シグマ法により次式によって求められます。詳細は、前回の講座を確認してください。

$$\begin{aligned} \mu \text{ の上限値} &= \bar{\mu} + 2\sigma \\ \mu \text{ の下限値} &= \bar{\mu} - 2\sigma \end{aligned}$$

ここに

- $\mu$  : 摩擦係数の計測値
- $\bar{\mu}$  : 試験緊張により得られる摩擦係数 $\dot{\mu}$ の平均値
- $\sigma$  : 試験緊張により得られる摩擦係数 $\dot{\mu}$ の標準偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\bar{\mu} - \dot{\mu})^2}{n-1}}$$

$n$  : 試験緊張時の計測値の個数

表-3で算出した結果について求めると、以下となります。

$$\mu \text{ の上限値} = 0.201 + 2 \times 0.069 = 0.34$$

$$\mu \text{ の下限値} = 0.201 - 2 \times 0.069 = 0.06$$

5.2 PC鋼材のグループに対して

グループ管理の方法としては、何本かの鋼材をグループとしてまとめて、各グループの平均値を管理図上にプロットしていきます。グループに対する管理限界は、次式で求められます。詳細は、前回の講座を確認してください。

表 - 3  $\dot{\mu}$  および  $\dot{E}_p$  の平均値および標準偏差 ( $P = 40 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 0.03$ )

測定 順序	PC 鋼材 番号	緊張 方向	$P'$ (MPa)	$a + \frac{\lambda}{\mu} \ell$	$\Delta \ell$ (mm)	$L$ (mm)	$\dot{\mu}$	$(\bar{\mu} - \dot{\mu})^2$	$\dot{E}_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$(\bar{E}_p - \dot{E}_p)^2$
1	C <sub>1</sub>	右	33.5	0.3394	191	36 600	0.174	$0.729 \times 10^{-3}$	$1.888 \times 10^5$	$5.66 \times 10^6$
2		左	36.0		191		0.068	$17.689 \times 10^{-3}$	$1.957 \times 10^5$	$20.43 \times 10^6$
3	C <sub>2</sub>	右	33.0	0.3215	191	36 546	0.207	$0.036 \times 10^{-3}$	$1.871 \times 10^5$	$16.65 \times 10^6$
4		左	32.5		187		0.231	$0.900 \times 10^{-3}$	$1.896 \times 10^5$	$2.50 \times 10^6$
5	C <sub>3</sub>	右	34.5	0.3039	189	36 512	0.146	$3.025 \times 10^{-3}$	$1.931 \times 10^5$	$3.69 \times 10^6$
6		左	34.0		187		0.170	$0.961 \times 10^{-3}$	$1.938 \times 10^5$	$6.86 \times 10^6$
7	C <sub>4</sub>	右	32.0	0.2951	188	36 494	0.278	$5.929 \times 10^{-3}$	$1.869 \times 10^5$	$18.32 \times 10^6$
8		左	32.0		176		0.278	$5.929 \times 10^{-3}$	$1.996 \times 10^5$	$70.90 \times 10^6$
9	C <sub>5</sub>	右	32.5	0.2601	191	36 476	0.285	$7.056 \times 10^{-3}$	$1.853 \times 10^5$	$34.57 \times 10^6$
10		左	34.5		190		0.171	$0.900 \times 10^{-3}$	$1.919 \times 10^5$	$0.52 \times 10^6$
Σ							2.008	0.04315	$19.118 \times 10^5$	$180.10 \times 10^6$
平均							$\dot{\mu} = 0.201$		$\bar{E}_p = 1.91 \times 10^5$	
標準 偏差							$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\dot{\mu} - \bar{\mu})^2}{n-1}}$ =0.0692		$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\dot{E}_p - \bar{E}_p)^2}{n-1}}$ =0.0447×10 <sup>5</sup>	

$\mu$  の上限値 =  $\bar{\mu} + 2\sigma\sqrt{m}$   
 $\mu$  の下限値 =  $\bar{\mu} - 2\sigma\sqrt{m}$

ここに

$m$ : 1 グループの PC 鋼材の本数

表 - 3 で算出した結果において、4 本の PC 鋼材を 1 グループとしてまとめた場合について求めると、以下となります。

$\mu$  の上限値 =  $0.201 + 2 \times 0.069 / \sqrt{4} = 0.27$

$\mu$  の下限値 =  $0.201 - 2 \times 0.069 / \sqrt{4} = 0.13$

## 6. PC 鋼材の見かけのヤング係数の設定

試験緊張の結果から PC 鋼材の見かけのヤング係数均  $\dot{E}_p$  の管理限界 (下限値による引止め点) を設定します。引止め点の設定方法には、① 統計的手法を用いて設定する方法<sup>1)</sup>と、② 平均値を割増して設定する方法の 2 種類があり、一般的には②が広く用いられています。これは、①の下限値を引止め点とすると、試験緊張のデータ数が少なかったり、データの質が良くない場合には平均値の変動係数が異常に大きくなり、必要以上に過大なプレストレスが導入されるおそれがあるためです。②の方法は、見かけのヤング係数のばらつきを示す変動係数が、一般に 1.5 ~ 2.0 %であることを考慮して、プレストレスが不足しないように伸びが 2 ~ 3 %程度大きくなるように引止め点を定めます。これらの諸数値は、表 - 3 の結果を用いると以下のようになります。

① による PC 鋼材の見かけのヤング係数の変動係数 = 標準偏差  $\sigma$  / 平均  $\bar{E}_p = 0.0447 \times 10^5 / 1.91 \times 10^5 = 2.3 \%$  (① による PC 鋼材の見かけのヤング係数の算出方法は、文献 2 などを参照してください。)

② による PC 鋼材の見かけのヤング係数 = 平均  $\bar{E}_p / (1 + 3 \%) = 1.91 / (1 + 0.03) = 1.85 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  (② による場合、標準偏差  $\sigma$  の計算は省略できます。)

なお、試験緊張結果の PC 鋼材の見かけのヤング係数や摩擦係数が設計値と大きく異なる場合は、試験緊張に使用した PC 鋼材やジャッキの性能などを確認する必要があります。

## 7. おわりに

今回は、試験緊張と管理限界の設定方法例について記しました。次回は、プレストレスの施工について解説します。

### 注

- a) 分割施工 : 連続橋などで構造物を数回に分割して構築する施工方法。PC 鋼材も分割して配置されるために両側にジャッキがセットできないことから、片側から緊張するのが一般的。
- b) 統計的手法を用いて設定する方法 :  $\dot{E}_p$  の平均値が  $t$  分布すると見なして推定する方法。 $t$  分布はデータが多いと正規分布の形状に近づき、少ないと平たい形状となる性質があるため、データ数が多いほど、ばらつきは少なくなる。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編, III コンクリート橋編, 2002
- 2) 日本道路協会 : コンクリート道路橋施工便覧, 1998
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会 : プレストレストコンクリート施工管理基準 (案), 1998
- 4) 土木学会 : コンクリートライブラリー 66 プレストレストコンクリート工法設計施工指針, 1991

[2011 年 6 月 6 日受付]