

# 第4回 緊張管理方法

講師：永井 篤\*

## 1. はじめに

これまでの講座でも説明があったように、緊張管理は主に、実施工におけるさまざまな誤差要因によるプレストレスの異常を早期に発見するために行われます。今回は、緊張管理の方法と、その手順について解説します。

## 2. 緊張管理方法の概要

緊張管理の実務的な方法としては、①摩擦係数をパラメータとして管理する方法（摩擦管理）、②引張力と伸びを独立して管理する方法（伸び管理）の2通りの方法があります。これらの2つの管理手法は、主として構造物に配置されているPC鋼材の配置形状や、本数の程度などによって使い分けられています。表-1に緊張管理方法の比較表を示します。

また、それぞれの管理方法において「PC鋼材1本ごとの管理」と、「PC鋼材グループごとの管理」があります。前者は、計測された引張力や伸びが、所定の範囲内にあることを確認するために行われる管理です。後者は、品質のばらつきなどによる偶然誤差<sup>a)</sup>や、計測器の故障などによる異常誤差<sup>b)</sup>を管理するために行われます。

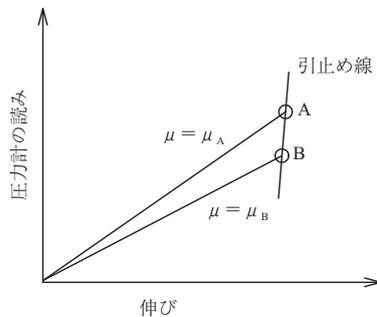
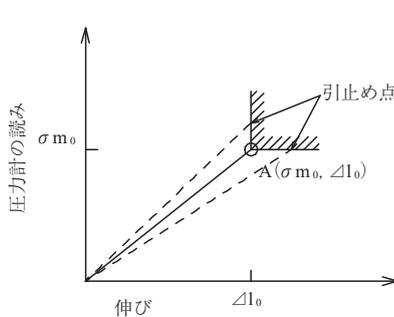
## 3. 摩擦係数をパラメータとして管理する方法

摩擦係数をパラメータ<sup>c)</sup>として緊張管理を行う場合の手順を図-1に示します。

### 3.1 PC鋼材の見かけのヤング係数と摩擦係数の設定

摩擦係数をパラメータとした緊張管理を行うにあたり、これから緊張しようとするPC鋼材の見かけのヤング係数 $\dot{E}_p$ と摩擦係数 $\dot{\mu}$ の値を設定する必要があります。これらの値は試験緊張により求めることが原則です。しかし、連

表-1 緊張管理方法の比較

分類	摩擦係数をパラメータとして管理する方法	引張力と伸びを独立して管理する方法
管理手法	 <p>試験緊張などによって求められた見かけのヤング係数を用い、摩擦係数<math>\mu</math>の任意の2つの値(<math>\mu_A</math>および<math>\mu_B</math>)について緊張計算を行い、この計算結果よりAおよびB点を求め、ABを通過する線を引止め線とする方法。</p>	 <p>あらかじめ、必要となるA点(座標<math>\sigma_{m0}</math>, <math>\Delta l_0</math>)を緊張計算で求めておき、緊張作業にあたっては、図のハッチした部分を引止め範囲とする方法。</p>
適用範囲	<ul style="list-style-type: none"> <li>PC鋼線およびPC鋼より線を主方向の内ケーブルに使用する場合。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PC鋼棒を使用する場合。</li> <li>PC鋼線およびPC鋼より線を床版横締め、横桁横締め、および主方向の外ケーブルに使用する場合。</li> </ul>
適用理由	<ul style="list-style-type: none"> <li>主方向のPC鋼材配置では、曲げ上げ、曲げ下げの角度が大きく、曲線配置部でのPC鋼材とシース間の摩擦によるプレストレスの損失が大きい。そのため、プレストレスの変動の主要因として、曲線配置部でのPC鋼材とシース間の摩擦係数の変動に着目して管理することが合理的であるため。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>プレストレスの変動に対して卓越する要因が無いため、引張力と伸びのそれぞれを不足させないことで、プレストレス不足を防止することが合理的であるため。</li> <li>床版横締めの場合は、PC鋼材本数が多く、プレストレスが不足する確率が小さいため。</li> </ul>

\* Atsushi NAGAI : 三井住友建設(株) 土木本部 土木工事管理部

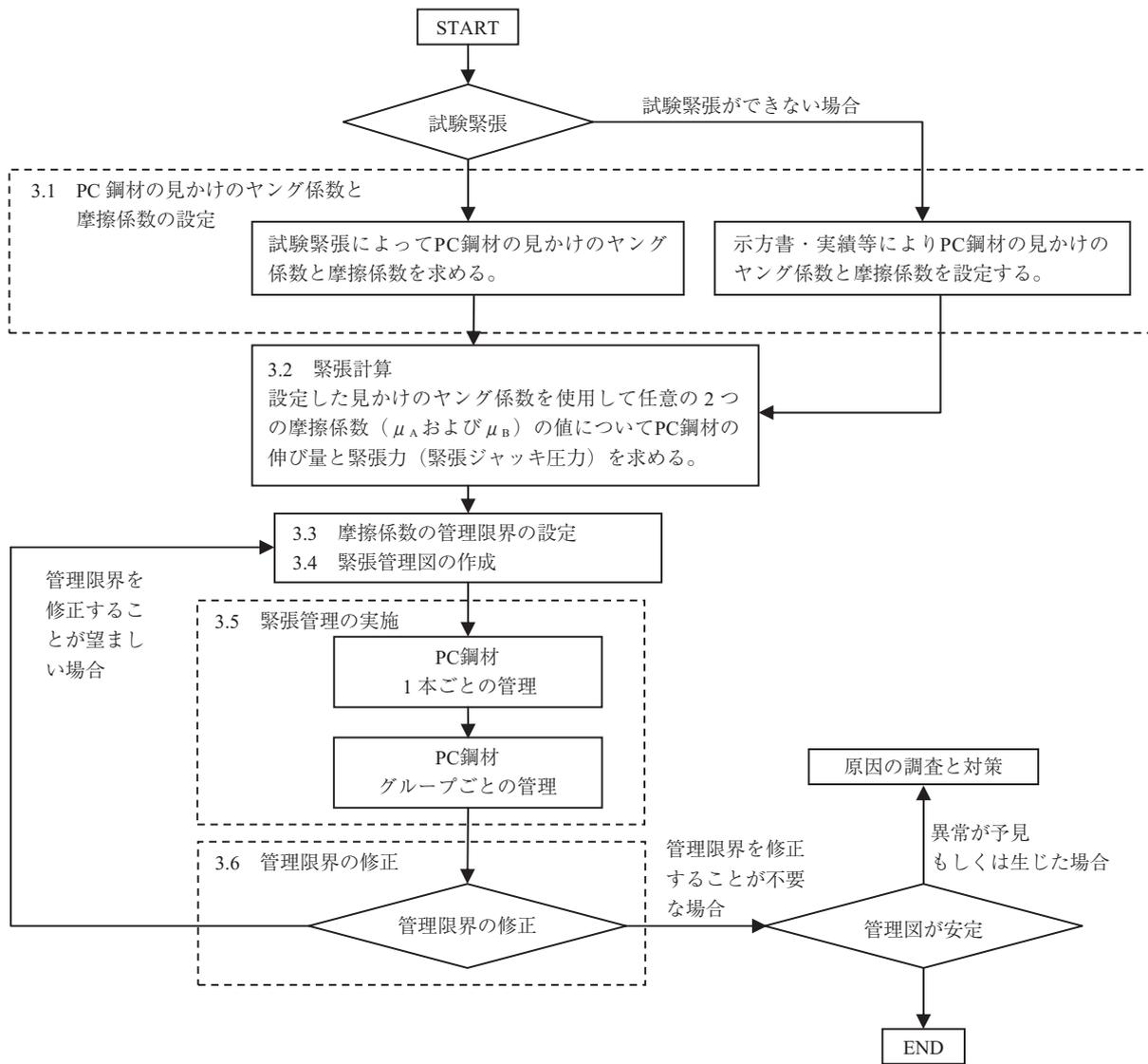


図 - 1 摩擦管理の手順

続桁の分割施工のように片側からの緊張を前提として PC 鋼材が配置されている場合は、緊張ジャッキが片側にしか設置できないために試験緊張が実施できません。これは、試験緊張は PC 鋼材の両端に緊張ジャッキを設置する必要があります。このような場合は、道路橋示方書に示されている値 (表 - 2) を用いることができます。また、従来の実績から十分な試験データが得られている場合には、その実績値を用いることもできます。

表 - 2 摩擦係数および見かけのヤング係数の標準値

鋼材種別	$\dot{\mu}$	$\lambda$	$\dot{E}_p$ (kN/mm <sup>2</sup> )
鋼線	0.30	0.004	195
鋼より線	0.30	0.004	185
鋼棒	0.30	0.003	200

(道示Ⅲコンクリート橋編による)

PC 鋼材の見かけのヤング係数  $\dot{E}_p$  と摩擦係数  $\dot{\mu}$  を試験緊張により求めることを原則とする理由は、これらの値が現

場の条件により変動するためです。したがって、試験緊張によりこれらの値を確認することが正しいプレストレッシングを実施するために有効な方法です。

試験緊張の具体的な説明については、次回の講座で紹介いたします。

### 3.2 緊張計算

3.1 で決定した PC 鋼材の見かけのヤング係数  $\dot{E}_p$  を用いて緊張計算を行い、任意の 2 つの摩擦係数 ( $\mu_A$  および  $\mu_B$ ) について、設計緊張力を満足する PC 鋼材の伸び量  $\Delta l$  と緊張ジャッキの圧力計の読み  $\sigma_m$  を求めます。

### 3.3 摩擦係数の管理限界の設定

プレストレッシングによって得られる実際の摩擦係数  $\mu$  は、PC 鋼材の配置形状や、PC 鋼材およびシーす間の摩擦特性などによってばらつきが生じています。そのため、それぞれの鋼材に所定のプレストレスが与えられているかの判断をするために、あらかじめ摩擦係数の管理限界を設定します。

摩擦係数の管理限界は、統計学的手法を用いて設定しま

すが、(1)十分な予備データが得られている場合と(2)十分な予備データが得られていない場合とでは若干異なりますので、以下それぞれ説明します。

(1) 十分な予備データが得られている場合

プレストレッシングにおいて計測される摩擦係数 $\mu$ のばらつきが正規分布すると考えると、それぞれの計測値がある所定の範囲内に収まっていることの確認は、平均値からの離れを管理値として設定することにより可能となります(図-2)。PC鋼材の緊張管理では、計測された値の約95%が管理範囲内になるようにするために、その離れを標準偏差 $\sigma$ の2倍として管理限界を定めています(2シグマ法という)。これは5%、つまり20回に1回程度は偶然に管理限界の外に出るということとなりますが、管理限界外となったことがすぐに異常ということではありません。

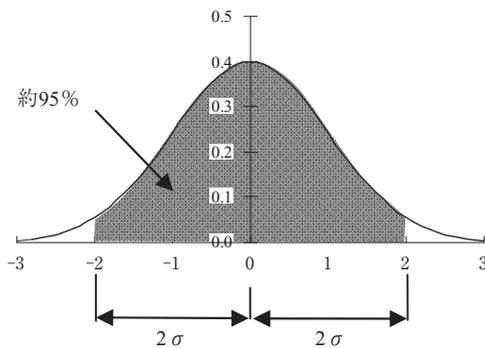


図-2 正規分布

しかし、プレストレッシングのミスを未然に防ぐために、管理限界の外に出た場合には異常の有無を確かめる必要があります。

計測された摩擦係数 $\mu$ が1回だけ管理限界を外れた場合には、異常原因が発見できなくても、偶然に管理限界外の計測値が得られたと考えてプレストレッシングを続けます。しかし、次も連続して計測値が管理限界の外に出た場合には、偶然に1/400の確率(確率1/20の事象が2回続けて起こる確率)の事象が生じたとは考えにくいので、異常が生じたと判断してその原因を追究し、対策を講じる必要があります。

ここで、製造業の品質管理において一般的に用いられている3シグマ法ではなく、PC鋼材の緊張管理においては2シグマ法を採用している理由を説明します。ある計測値が偶然に管理限界の外となる確率は、3シグマ法では0.3%であるのに対して、2シグマ法では前述の通り5%です。そのため、計測値が偶然に(異常が無いとしても)管理限界の外に出る確率が比較的高いことになり、頻繁に異常原因を探すこととなります。したがって、2シグマ法を採用した場合は存在しない異常原因を探すコストと手間が必要になりますが、これは異常を早めに発見してトラブルを未然に防ぐことを優先しているからです。

以上によりPC鋼材1本に対する管理限界である摩擦係数 $\mu$ の上限值および下限値は、式(1)により算出します。

① PC鋼材1本に対して

$$\begin{aligned} \mu \text{ の上限値} &= \bar{\mu} + 2\sigma \\ \mu \text{ の下限値} &= \bar{\mu} - 2\sigma \end{aligned} \tag{1}$$

ここに

- $\mu$  : 摩擦係数の計測値
- $\bar{\mu}$  : 試験緊張などにより得られる摩擦係数 $\dot{\mu}$ の平均値
- $\sigma$  : 試験緊張など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

また、緊張機器や計器の故障などが原因による異常誤差を検出するためには、品質のばらつきなどが原因による偶然誤差の影響を取り除く必要があります。これを管理するのがPC鋼材のグループに対する管理であり、摩擦係数 $\mu$ の上限值および下限値は、式(2)により算出します。

② PC鋼材のグループごとに対して

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

ここに

$m$  : 1グループのPC鋼材の本数

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。これにより偶然誤差が取り除かれ、異常誤差を容易に検出することができます。これは、故障などが原因である異常誤差にはばらつきがなく、誤差が一定となる傾向があるためです。式(2)において、 $m$ 本の鋼材における平均値をとった場合、偶然誤差の影響は1本ごとのばらつきが $1/\sqrt{m}$ と小さくなりますが、一定の傾向を示す異常誤差は、1本の鋼材ごとの値と $m$ 本の鋼材の平均値とで値が変わりません。このように鋼材を何本かのグループに分けて管理していくと、偶然誤差によるばらつきの幅が小さくなり、故障の有無が鋭敏にあらわれます。また、何本かの鋼材をまとめることは、ばらつきの幅が安定しているかどうかを判断するためにも必要です。

なお、異常を検出するための観点からは、グループとしてまとめる本数は同じ数にすることが望ましいといえます。ただし、鋼材配置などの理由により本数を変更する場合には、各グループの本数に合わせて式(2)により各グループの管理限界を定めます。

(2) 十分な予備データが得られていない場合

試験緊張のデータ数が少ない場合と、試験緊張を行わない場合の管理限界の設定について説明します。

試験緊張のデータ数が少ないと、設定した標準偏差 $\sigma$ がこれから緊張作業を行うPC鋼材(統計学では母集団という)を代表していない場合があります。このような場合では、摩擦係数 $\mu$ の管理限界は式(3)および式(4)により定

○ 講座 ○

めます。

① PC 鋼材 1 本に対して

$$\begin{aligned} \mu \text{ の上限値} &= \bar{\mu} + 0.4 \\ \mu \text{ の下限値} &= \bar{\mu} - 0.4 \end{aligned} \quad (3)$$

② PC 鋼材のグループごとに対して

$$\begin{aligned} \mu \text{ の上限値} &= \bar{\mu} + (\text{表 - 3 の標準値}) \\ \mu \text{ の下限値} &= \bar{\mu} - (\text{表 - 3 の標準値}) \end{aligned} \quad (4)$$

これらは、前述の式(1)および式(2)において、標準偏差  $\sigma$  を 0.2 とした式です。表 - 3 の管理限界の標準値も同様に、標準偏差  $\sigma$  を 0.2 としてグループの PC 鋼材本数  $m$  ごとに算出した値です。

表 - 3 摩擦係数  $\mu$  の管理限界の標準値

グループの PC 鋼材本数: $m$	管理限界の標準値
1	± 0.40
2	± 0.28
3	± 0.23
4	± 0.20
5	± 0.18
6	± 0.16
7	± 0.15
8	± 0.14
9	± 0.13
10 以上	± 0.13

(道路橋施工便覧による)

次に、試験緊張を行わない場合の管理限界は、表 - 2 に示す  $\bar{\mu} = 0.30$  を平均値  $\bar{\mu}$  として式(3)、式(4)により算出します。これらの場合も母集団を代表していないため、10 本（試験緊張で求められるデータ数）以上の PC 鋼材のプレストレスを行った段階で、式(1)および式(2)を用いて管理限界の修正を行うことが望ましいといえます。

3.4 緊張管理図の作成

緊張管理図は、緊張計算で求めた値を用いて緊張作業の引止め線を求め、設定した摩擦係数の管理限界（上限線と下限線）を図示することにより作成します（図 - 3）。

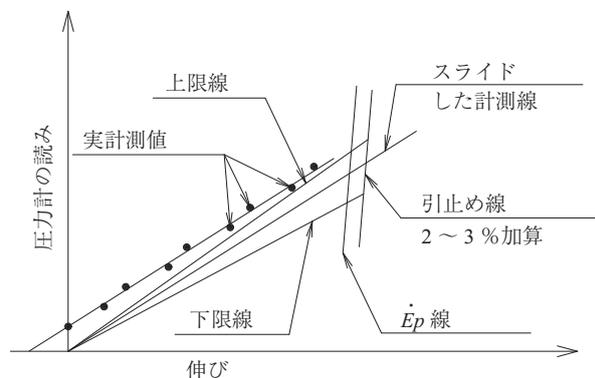


図 - 3 PC 鋼材 1 本ごとの緊張管理図

引止め線の設定は見かけのヤング係数  $\dot{E}_p$  の変動係数(標

準偏差 / 平均値) が 1.5 ~ 2.0 % であることを考慮して、伸び量が 2 ~ 3 % 大きくなるように引止め線を決定します。

緊張管理図は緊張作業時における圧力計の読みと PC 鋼材の伸び量の関係を表したグラフで、 $\mu$  が小さいケースと大きいケースについての情報が盛り込まれています。

3.5 緊張管理の実施

(1) 1 本ごとの管理図を用いた管理方法

作成した緊張管理図を用いて PC 鋼材の緊張管理を実施します。緊張管理図に、実計測値をプロットしていきます。そして、グラフを確認しながら緊張作業を止める緊張力（引止め点）を決定します。その際プロットした点が、直線状であるか、原点を通るように平行にスライドさせた計測線が管理限界内に収まっているか、などを確認して PC 鋼材 1 本ごとの管理を行います。

(2) グループごとの管理図を用いた管理方法

1 本ごとの緊張結果（摩擦係数  $\mu$ ）がある程度集まった時点でグループごとの管理を実施し、プレストレスが正常に行われていることを確認します。まず、何本かの鋼材の  $\mu$  値をまとめ、その平均値をグループ管理図にプロットします。管理図にプロットされた PC 鋼材ごとのデータ（ $\mu$  値）のばらつきをチェックして管理します（図 - 4）。

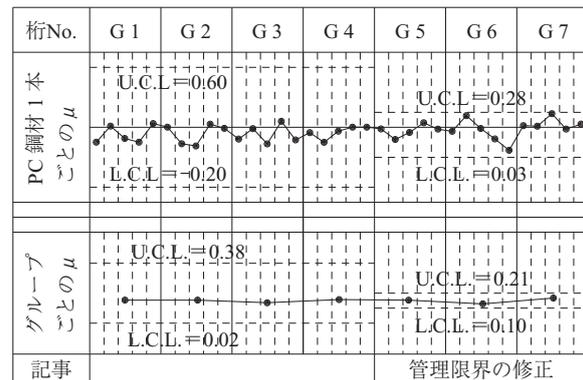


図 - 4 グループ管理図

3.6 摩擦係数の管理限界の修正

摩擦管理においては、プレストレスが正常に行われていることを確認する指標として摩擦係数  $\mu$  を用いて管理します。その管理限界は必要に応じて、作成された管理図をもとに修正します。この管理限界の修正方法については、今後の講座で紹介する予定です。

4. 引張力と伸びを独立して管理する方法

引張力と伸びを独立して管理する方法は、鋼材本数が多いためプレストレスが不足する確率が小さい場合（多数の PC 鋼棒、横締め PC 鋼材）や、摩擦係数による影響が小さく摩擦係数をパラメータとする管理手法が不向きと考えられる場合（主方向外ケーブル）に採用される便宜的な方法です。引張力と伸びを独立して緊張管理を行う場合の手順を図 - 5 に示します。

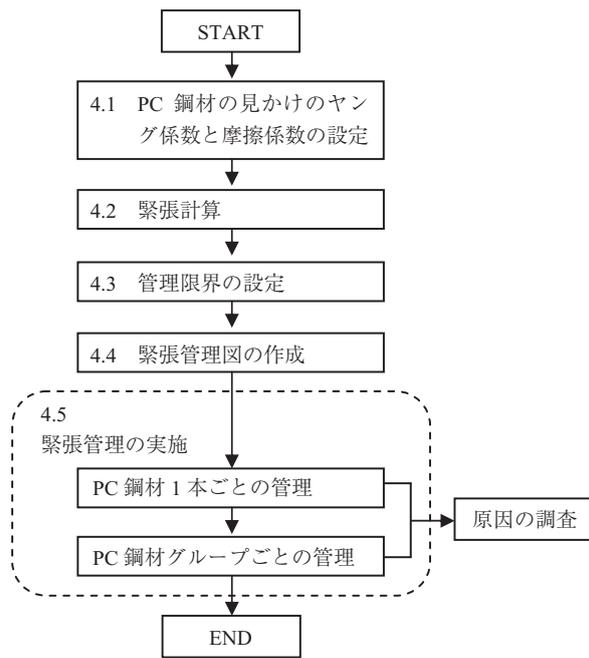


図 - 5 伸び管理手順

4.1 PC 鋼材の見かけのヤング係数と摩擦係数の設定

伸び管理では、一般的に試験緊張を行わず、道路橋示方書などの標準値により、PC 鋼材の見かけのヤング係数  $\dot{E}_p$ 、摩擦係数  $\dot{\mu}$ 、 $\lambda$  を定めます (表 - 2)。

4.2 緊張計算

4.1 で定めた PC 鋼材の見かけのヤング係数  $\dot{E}_p$  や摩擦係数  $\dot{\mu}$ 、 $\lambda$  を用いて、設計緊張力を満足する PC 鋼材の伸び量  $\Delta l_a$  と緊張ジャッキの圧力計の読み  $\sigma_{m_a}$  を求めます。

4.3 管理限界の設定

1 本ごとの許容誤差は、伸び量や圧力計の読みのばらつきを標準偏差  $\sigma = 5\%$  とみなして、 $\pm 2\sigma = 10\%$  とします。

これは、摩擦管理の場合と同様に、2 シグマ法に基づいた管理方法です。

4.4 緊張管理図の作成

伸び管理では、圧力計の読み ( $\sigma_m$ ) と PC 鋼材の伸び量 ( $\Delta l$ ) が、いずれも不足しないような引止め点を満足させることにより管理します。緊張管理図の作成は、まず緊張計算で求めた圧力計の読みと伸び量を管理図にプロットします (点 A : 座標 ( $\sigma_{m_a}$ ,  $\Delta l_a$ ))。次に点 A を基準として、引止め線を作図します。併せて、圧力計の読みと PC 鋼材の伸び量のそれぞれについて、設計値から 10% の誤差を上限として、管理限界線を作図します。伸び管理に用いる緊張管理図を図 - 6 に示します。

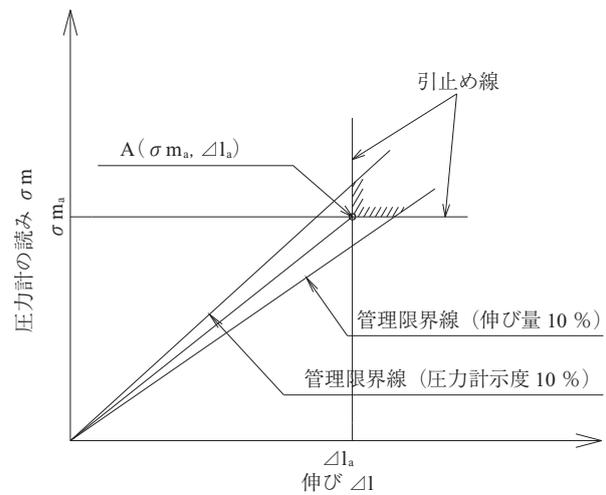


図 - 6 伸び管理の緊張管理図

4.5 緊張管理の実施

伸び管理においても、PC 鋼材 1 本ごとの管理とグループごとの管理を行う必要があります。

表 - 4 PC 鋼材グループごとの管理図例

組番号	PC 鋼材番号	測定伸び (mm)	計測伸び (mm)	① 差 (%)	測定応力 (MPa)	計算応力 (MPa)	② 差 (%)	$\delta = \frac{① - ②}{①} (\%)$	$\bar{\delta}$	管理図 (伸び)		管理図 (応力)		備考
										10.0	0.0	-10.0	10.0	
1	1	69	68	1.5	58	57.3	1.2	0.3	-0.2					
	2	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	3	68	〃	0.0	58	〃	1.2	-1.2						
	4	69	〃	1.5	59	〃	3.0	-1.5						
	5	70	〃	2.9	58	〃	1.2	1.7						
	6	68	〃	0.0	58	〃	1.2	-1.2						
	7	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	8	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	9	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	10	68	〃	0.0	59	〃	3.0	-3.0						
	11	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	12	70	〃	2.9	58	〃	1.2	1.7						
	13	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	14	69	〃	1.5	58	〃	1.2	0.3						
	15	70	〃	2.9	58	〃	1.2	1.7						
	16	68	〃	0.0	59	〃	3.0	-3.0						
許容誤差				10%以下			10%以下	3.2%以下						

## ○ 講座 ○

### (1) 1本ごとの管理図を用いた管理方法

作成した緊張管理図を用いてPC鋼材の緊張管理を行います。まず、測定値を管理図にプロットし、グラフを確認しながら緊張作業を止める緊張力（引止め点）を決定します。その際、引止め点が引止め線を超えているか、管理限界内に収まっているかを確認します。図-6のハッチング部が、正常な引止め範囲となります。

### (2) グループごとの管理図を用いた管理方法

グループごとの管理では、表-4のような管理図を用います。圧力計の読みと伸び量のそれぞれの誤差の差をあらわす $\delta$ は、摩擦管理の場合と同様に、グループの本数の平方根に反比例して小さくなる傾向を示します。表-5に許容誤差の標準値を示します。この $\delta$ の許容誤差は、1グループを構成するPC鋼材本数を $m$ としたときに、PC鋼材1本ごとの $\delta$ の許容誤差である $\pm 2\sigma = 10\%$ を用いて式(5)により算出された値です。

$$\text{許容誤差の標準値 (\%)} = 10/\sqrt{m} \quad (5)$$

ここに

$m$ : 1グループのPC鋼材の本数

表-4の $\bar{\delta}$ が表-5の許容誤差の標準値を超える場合には、誤差の原因を追究し、適切な対処を行う必要があります。

グループ管理の中で誤差の管理値に収まらない原因が、4.1にて設定したPC鋼材の見かけのヤング係数 $E_p$ と摩擦係数の数値が実際とかけ離れている場合もあります。そのような場合には、これらの値を実際に測定して管理値を修正することも必要となります。

## 5. おわりに

今回は、緊張管理方法の考え方と手順について解説しました。次回は、試験緊張と管理の事例などについて解説します。

表-5 許容誤差の標準値

1グループを構成する PC鋼材本数 (本)	許容誤差の標準値 (%)
1	10
2	7.1
3	5.8
4	5.0
5	4.5
6	4.1
7	3.8
8	3.5
9	3.3
10以上	3.2

### 注

- 偶然誤差：プレストレスングにおいて避けることの出来ない誤差のこと。たとえば、PC鋼材の断面積のばらつきによる誤差、PC鋼材のヤング係数のばらつきによる誤差、PC鋼材の伸びの測定による誤差、荷重計の読みとりによる誤差など。
- 異常誤差：計測・緊張機器の故障による誤差のこと。検出、排除しなければ行けない誤差であり、たとえば、荷重計示度の狂い、計算において仮定した摩擦損失と実際の摩擦損失の差、緊張計算における計算仮定の誤りによる誤差など。
- パラメータ：統計学における用語で、確率分布の状況を表現する値。具体的には平均値や標準偏差のこと。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説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

【2011年3月18日受付】



刊行物案内

# コンクリート構造診断技術

## コンクリート構造診断技術講習会テキスト

### 2010年5月

定 価 7,500円/送料500円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会