

第9回 緊張計算の実計算例

講師：永井 篤*

1. はじめに

前回までは、プレストレッシングの管理における一連の流れを解説しました。

今回は、実計算例として、摩擦係数をパラメータとして管理する方法について、具体的な数字を使いPC鋼材1本ごとの緊張管理図の書き方について解説します。

2. 緊張計算の実計算例

今回、実計算の例として摩擦係数をパラメータとして緊張管理を行う主桁の形状とPC鋼材配置を、図-1に示します。以下、C1ケーブルを対象に具体的な数字を用いて緊張管理を説明します。なお、本例での設計断面位置は支間中央の1箇所としています。連続橋などで複数の設計断面位置を設定する必要がある場合の計算例は、文献1)などを参照してください。

2.1 PC鋼材の見かけのヤング係数と摩擦係数の設定

本例では試験緊張によってPC鋼材の見かけのヤング係数 $\dot{E}_p = 191 \text{ kN/mm}^2$ 、摩擦係数 $\dot{\mu}$ の平均値 $\bar{\mu} = 0.15$ 、摩擦係数 $\dot{\mu}$ の標準偏差 $\sigma = 0.18$ が得られたとします。本緊張における引止め \dot{E}_p 線は、試験緊張から得られた \dot{E}_p を3%割り増す方法を採用しますので、 \dot{E}_p の標準偏差は使用しません。なお、試験緊張では、C1～C5ケーブルを片側ごとに緊張（データ数 $n = 5 \text{ 本} \times 2 \text{ 方向} = 10$ ）したもの

とします。

試験緊張の具体的な説明は第5回の講座記事で行っています。

2.2 緊張計算

2.1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、摩擦係数 $\dot{\mu}$ の任意の2つの値（本例では0.2と0.4）について、設計緊張力を満足するPC鋼材の伸び量 Δl と緊張ジャッキの圧力計の読み σ_m を求めます。本例では、緊張計算によって、表-1の値が求められたとします。

緊張計算については第3回の講座記事で解説しています。

表-1 緊張計算結果の例

| | 圧力計の読み σ_m (MPa) | PC鋼材の伸び Δl (mm) |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 摩擦係数 $\dot{\mu}$ 0.2 | 43.0 | 209 |
| 摩擦係数 $\dot{\mu}$ 0.4 | 46.0 | 218 |

2.3 摩擦係数の管理限界の設定

試験緊張で求めた摩擦係数の標準偏差 σ を使い、以下の式(1)から管理限界を定めます。

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

ここに

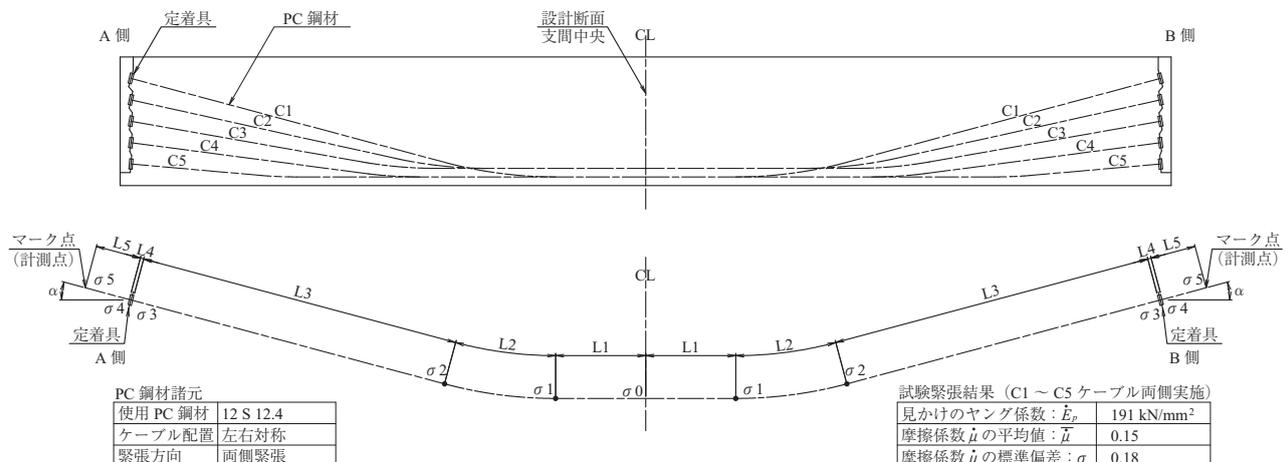


図-1 PC鋼材の形状 (対称配置)

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

μ : 摩擦係数の計測値
 $\bar{\mu}$: 試験緊張より得られる摩擦係数 $\dot{\mu}$ の平均値
 σ : 試験緊張より得られる摩擦係数 $\dot{\mu}$ の標準偏差
 μ の上限値 = $\bar{\mu} + 2 \times 0.18 = 0.15 + 0.36 = 0.51$
 μ の下限値 = $\bar{\mu} - 2 \times 0.18 = 0.15 - 0.36 = -0.21$

3. 緊張管理図の作成

2.2 で求めた値から緊張時の引止め線を求め、2.3 で設定した管理限界を図示し、緊張管理図を作成します。

緊張管理図の作成手順を以下に示します。手順を追って実際に作図をしたほうが、さらに理解が深まりますので、図 - 10 に管理限界線を記入する前の緊張管理図を掲載しています。作図される場合は A3 サイズに拡大複写をして使用してください。

手順 1 : \dot{E}_p 線の記入

2.2 で求めた $\dot{\mu}$ の任意の値 (本例では 0.2 と 0.4) についての緊張計算結果 (表 - 1) をそれぞれ管理図にプロットし、2 点を直線で結ぶ。これが見かけのヤング係数 \dot{E}_p 線となる。なお \dot{E}_p 線は上下に延長しておく。

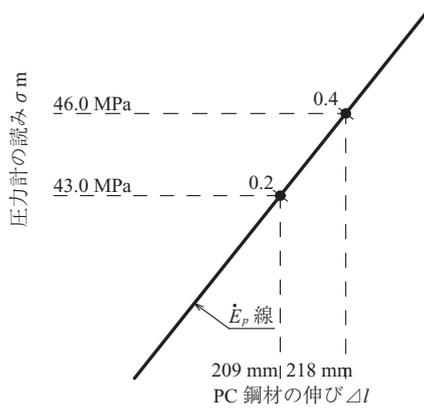


図 - 2 \dot{E}_p 線の記入

手順 2 : \dot{E}_p 線の分割

手順 1 における 2 点の距離を基準として、 $\dot{\mu} = -0.2, 0.0, 0.6$ の点を作図する。

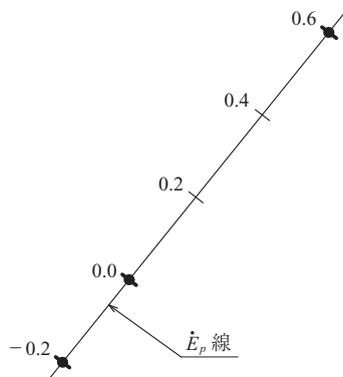


図 - 3 \dot{E}_p 線の分割

手順 3 : 引止め線の記入

PC 鋼材の緊張力不足を避けるため、本例では伸び量が 3 % 長くなる時点まで PC 鋼材を緊張する。PC 鋼材を引止める時のヤング係数は、見かけのヤング係数を 1.03 で除した値となる ($191/1.03 = 185 \text{ kN/mm}^2$)。表 - 1 に示す伸び量 Δl を修正した 2 点を管理図にプロットし、この 2 点を結んだ線が引止め線となる。

$\dot{\mu} = 0.2$: $209 \times 1.03 = 215 \text{ mm}$ (6 mm 増)

$\dot{\mu} = 0.4$: $218 \times 1.03 = 224 \text{ mm}$ (6 mm 増)

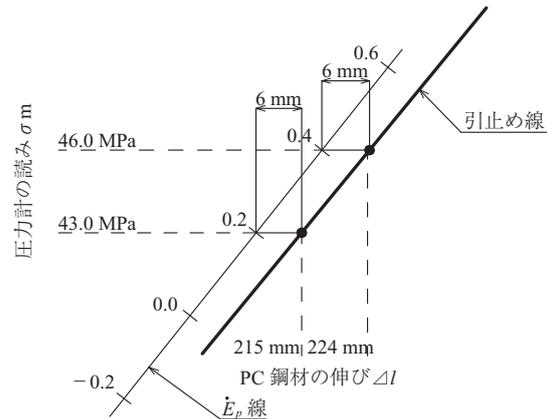


図 - 4 引止め線の記入

手順 4 : 管理限界の記入

2.3 で求めた管理限界値 $\dot{\mu} = 0.51$ および -0.21 を \dot{E}_p 線上にとり、これと原点を結んだ線がそれぞれ管理限界の上限値 (U.C.L) および管理限界の下限値 (L.C.L) となる。この管理限界線は、引止め線まで延長しておく。

また、プレストレスング時において PC 鋼材がプレストレスング中の許容応力度 (PC 鋼材の引張強さの 80 % または PC 鋼材の降伏点の 90 %) を超えないよう、絶対上限線を記入する。本例で

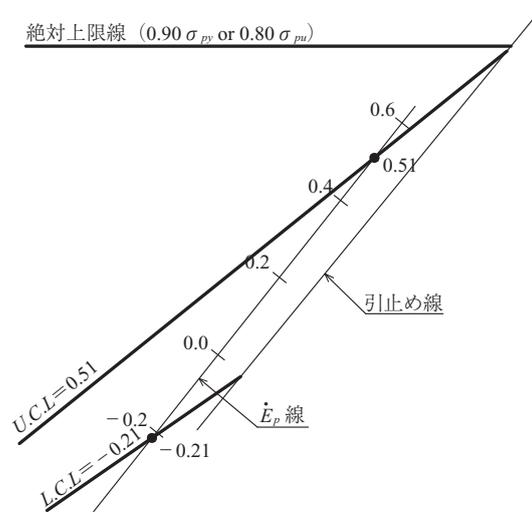


図 - 5 管理限界の記入

○ 講座 ○

の絶対上限線は、49 MPa とする。

手順5：許容セット量のグラフ化

くさび式定着方式では、セット量の影響があり、 $\dot{\mu}$ 値が小さい場合に引止め線の補正が必要となる。そのため第3回の講座記事の「許容セット量の算出」で説明した方法で許容セット量を求める。本例での許容セット量は以下の値とする。

$$\dot{\mu} = 0.2 \text{ に対する許容セット量} = 10 \text{ mm}$$

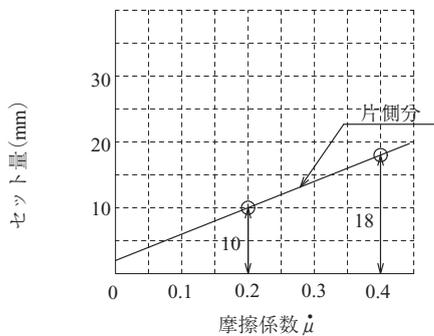
$$\dot{\mu} = 0.4 \text{ に対する許容セット量} = 18 \text{ mm}$$

この許容セット量は、図-6の手順①～③に示す手順でグラフ化する。

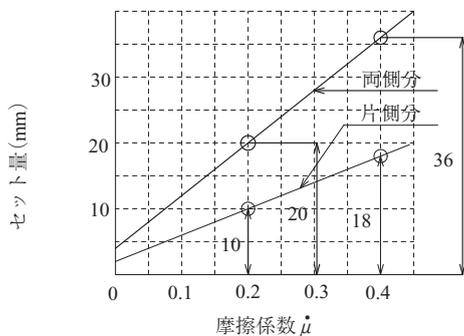
手順①：上記許容セット量より、片側分の許容セット量をグラフ化する。

手順②：本例は両引き緊張なので、両側分の許容セット量（手順①の許容セット量の2倍）をグラフ化する。

手順①：片側分のセット量のグラフ化



手順②：両側分のセット量のグラフ化



手順③：予想セット量と許容セット量が一致する摩擦係数の表示

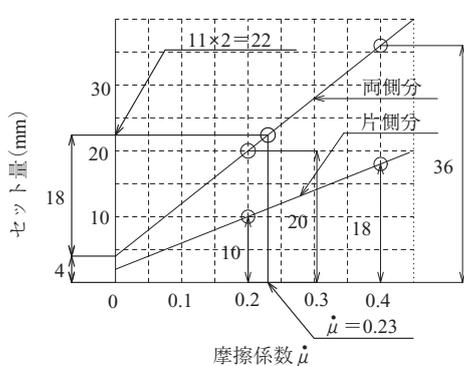


図-6 セット量のグラフ

手順③：定着具の構造により、定着時に生じると予想されるセット量の値が決まっている。たとえば、定着具の基本セット量（Pull in 量）を 9 mm（定着具メーカーにより異なる）とし、定着具と伸び測定点（マーク点）間の伸びを 2 mm とすると、この予想セット量は 11 mm となる。本例の予想セット量を 11 mm とすると、両側で 22 mm となる。この予想セット量と許容セット量が一致するときの摩擦係数 $\dot{\mu}$ の位置を、セット量のグラフに図示する。

手順6：セット量を考えた補正線の記入

実際の緊張によって生じるセット量は、摩擦係数の値にかかわらず、定着具の予想セット量に近い値を示す。図-6の③より、定着具の予想セット量（片側で 11 mm，両側で 22 mm）と許容セット量が一致するときの摩擦係数は $\dot{\mu} = 0.23$ となる。これは、 $\dot{\mu}$ 値が 0.23 より小さい場合には、セット量が許容セット量を超え、セットの影響が緊張管理の設計断面までおよぶことを意味する。このような場合は、PC 鋼材の緊張力が不足しないように緊張力の補正が必要となる。図-6の③から $\dot{\mu} = 0$ のときの許容セット量は片側では 2 mm，両側では 4 mm であることがわかる。片側では予想セット量 11 mm の補正量は $11 - 2 = 9$ mm となり、両側では補正量は 2 倍となり $22 - 4 = 18$ mm となる。この補正量は、以下の手順で緊張管理図に反映させる。

まず、 \dot{E}_p 線に $\dot{\mu} = 0.23$ をとり、これと原点を結ぶ直線を引止め線まで延長した A 点を求める（図-7）。

次に、 $\dot{\mu} = 0$ のときの補正量は 18 mm であるから、引止め線上の $\dot{\mu} = 0$ 線を引止め線からさら

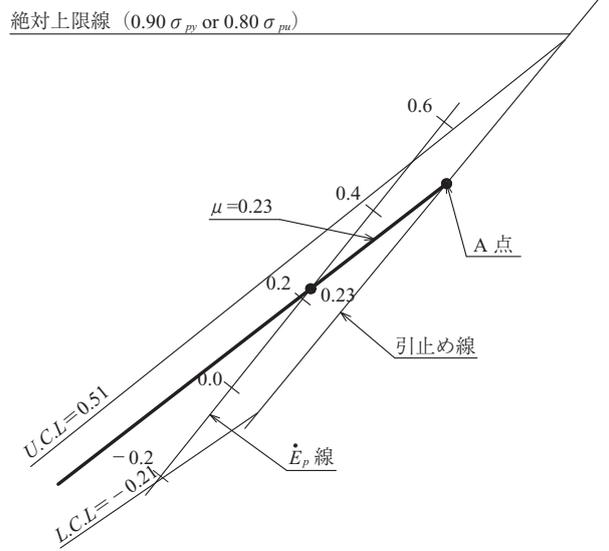


図-7 A 点の記入

に延長して 18 mm の伸び量が生ずる B 点と求める。セット量の補正線は A 点と B 点を結ぶことにより求まる (図 - 8)。

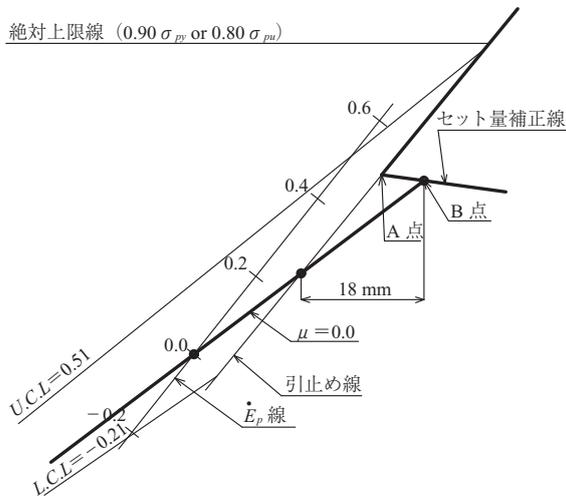


図 - 8 セット量補正線の記入

最後に特記事項などを記入して、緊張管理図が完成します。この管理限界線を記入した後の緊張管理図を、図 - 11 に掲載します。

4. 緊張作業の実施

作成した緊張管理図を用いて PC 鋼材の緊張作業を実施します。3 で作成した緊張管理図に、測定値をプロットしていきます。

具体的な管理手順は以下のようになります。

手順 1 : PC 鋼材のたるみによる誤差を除去するために、圧力計の示度が 5 MPa (一般には 5 ~ 10 MPa) となるまで緊張して、PC 鋼材に伸び測定用のマークを示す。

手順 2 : 5 MPa (一般には 5 ~ 10 MPa) ごとに測定される PC 鋼材の伸び量の合計を緊張管理図にプロットする。本例での計測値は、表 - 2 のとおりとする。

表 - 2 測定値 (C1 ケーブル)

| 圧力計 (MPa) | PC 鋼材の伸び量 (mm) | | |
|-----------|----------------|-----|-----|
| | A 側 | B 側 | 合計 |
| 35 | 74 | 73 | 147 |
| 30 | 62 | 60 | 122 |
| 25 | 49 | 48 | 97 |
| 20 | 37 | 34 | 71 |
| 15 | 25 | 24 | 49 |
| 10 | 11 | 11 | 22 |

手順 3 : 緊張計算結果から予想される最終緊張力の約 75 % 程度 (本例では、35 MPa 時点) で、プロットした点を結び水平軸まで延長する。これを測定線

とする。測定線と水平軸との交点の値を確認し、これを 0 補正值とする。本例では、0 補正值は 25 mm である。

手順 4 : 測定線が原点を通るように水平に平行移動し、平行移動した線と引止め線またはセット補正線との交点を引止め点とする。この際、管理限界内におさまっていることを確認する。本例では、セット補正線との交点が引止め点となり 47.0 MPa である。

手順 5 : E_p 線上の μ 値を補間法にて読みとる。この μ 値は管理データとして保管する。本例では、 μ 値は 0.12 である (図 - 9)。

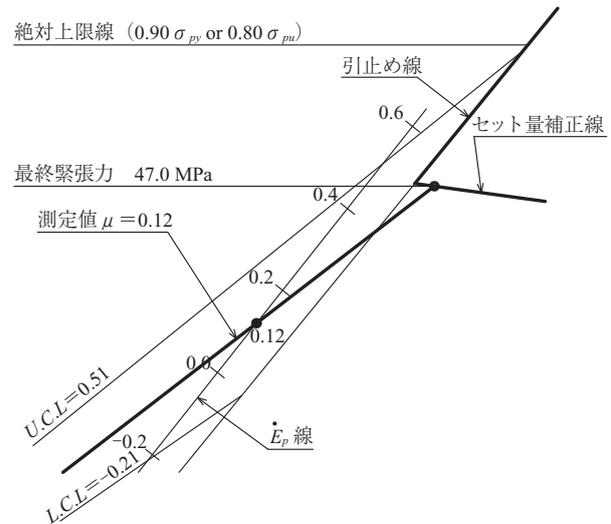


図 - 9 μ 値の読みとり

手順 6 : さらに最終緊張力になるまで 5 MPa ごとに緊張を続ける。最終緊張力時点での PC 鋼材の左右の伸びの合計値 204 mm と 0 補正值 25 mm の合計が、PC 鋼材の全伸び量 229 mm であり、これを補正全伸び量として記録する。本例での 40 MPa 以降の計測値は、表 - 3 のとおりとする。

表 - 3 測定値 (C1 ケーブル)

| 圧力計 (MPa) | PC 鋼材の伸び量 (mm) | | |
|-----------|----------------|-----|-----|
| | A 側 | B 側 | 合計 |
| 47 | 102 | 102 | 204 |
| 45 | 99 | 98 | 197 |
| 40 | 86 | 84 | 170 |

手順 7 : 圧力計の読みが最終緊張力以上で、補正全伸び量が管理限界内におさまっていることを確認した後、くさびを定着して、緊張力を徐々に減圧する。

手順 8 : 5 MPa まで減圧した時までの PC 鋼材の戻り量を計測して、実セット量を算出する。本例では、緊張前との差が左右ともに 12 mm となったため、実セット量は 12 + 12 = 24 mm である。本例の予想セット量は、片側で 11 mm、両側で 22 mm

であるため、実セット量と予想セット量がほとんど等しく、セット量が妥当であることが確認できる。

この緊張作業後の緊張管理図を、図 - 12 に掲載します。

5. おわりに

今回は、摩擦係数をパラメータとして管理する方法について、具体的な数値を用いて PC 鋼材 1 本ごとの管理図の書き方について解説しました。緊張管理図には多くの数値や直線などが記載されていますが、管理図を手書きで作成してみると、図中に記載されている数値や直線などに、どのような意味があるのかが認識できると思いますので、この機会に是非、緊張管理図の作成にチャレンジしてみてください

さい。

なお、実際の緊張管理では、1 本ごとの管理をさらに進めていき、グループごとの管理も実施する必要があります。また、初期の管理限界は管理限界の幅が広く設定されているため、ある程度の緊張管理データが得られた時点で、新たに管理限界を設定し直すことが望まれます。これらに関しては、第 5 回の講座記事で解説していますので参照してください。

今回は建築における緊張管理について解説します。

参考文献

- 1) ㈱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

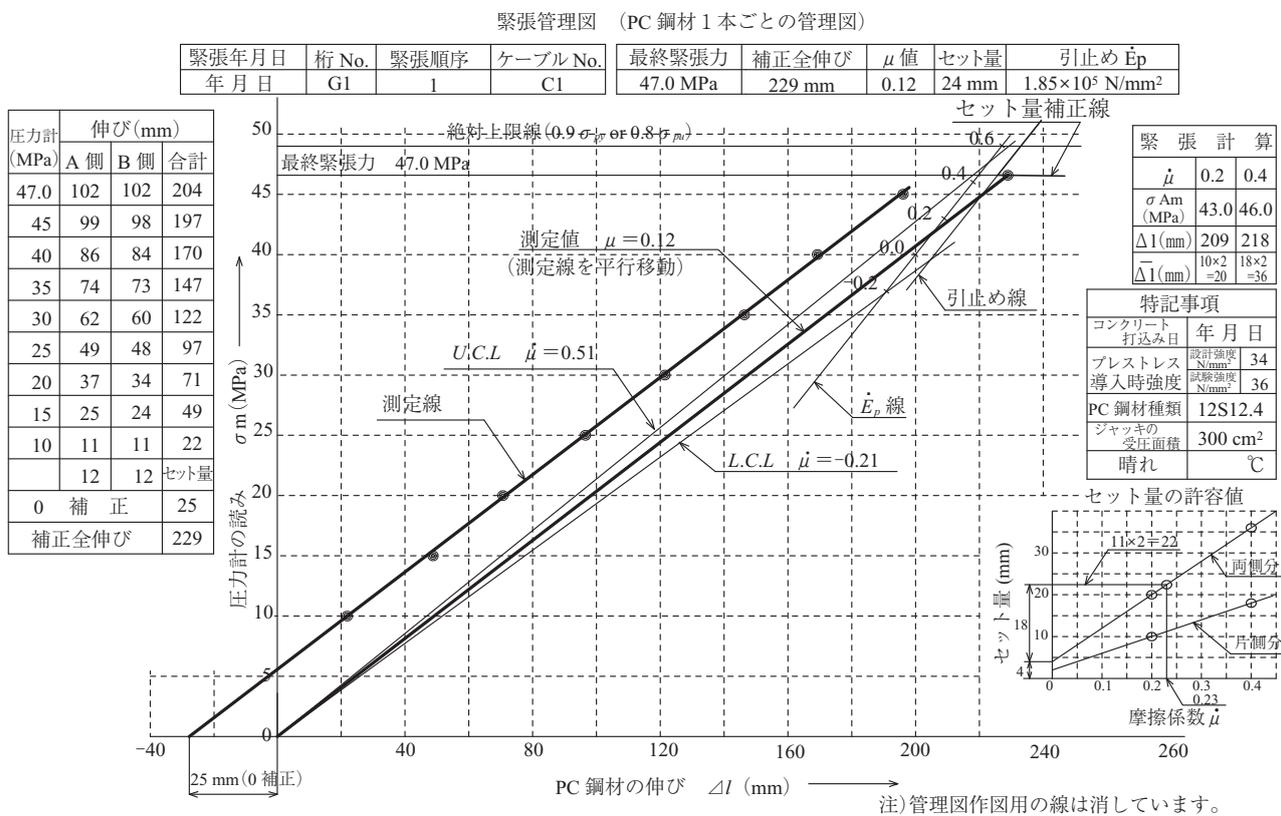


図 - 12 PC 鋼材 1 本ごとの緊張管理図 (緊張後)

【2012年2月6日受付】