

第2回 プレストレスと緊張管理

講師：中井 聖棋*

1. はじめに

今回は、緊張管理を行うにあたって必要となる知識として、設計におけるプレストレスの考え方について解説しました。

今回は、緊張管理手法の解説に先立って、緊張管理の基本的な考え方について解説します。

2. プレストレスと緊張管理

2.1 緊張管理とは

プレストレスの目的は、設計で指定されたプレストレス力、すなわち所定のプレストレスを構造物に与えることです。

しかし実際のプレストレスでは、設計において所定のプレストレスの決定に用いたヤング係数・摩擦係数などの特性値に対し、誤差（ずれ）と変動（ばらつき）を生じます。同時に構造物製作に伴う施工誤差や、PC 鋼材張力を確認するための計測での誤差も生じます。構造物の品質を確保するためには、これらの誤差変動が、ある一定の範囲内で安定していることが求められます。

所定のプレストレスを与えるためには、構造物の品質を確保することが前提となります。このため、プレストレスにおいて誤差変動が安定していることを確認したうえで、所定のプレストレスを導入し、それを確認する必要があります。これらの作業を緊張管理と呼びます。

2.2 プレストレスと緊張管理

通常の PC 構造物の断面には、複数の PC 鋼材が配置されています。プレストレスでは、PC 鋼材 1 本ごとに緊張力が導入されます。断面に所定のプレストレスを導入するためには、断面に配置された PC 鋼材全体で必要とされる緊張力を、確実に導入することが求められます。

図 - 1 は、緊張管理においてプレストレスの安定性と所定のプレストレス導入の確認をどのように行っているかを表した図です。

緊張管理では、はじめに PC 鋼材 1 本ごとのプレストレスにおいて作業の安定性を確認し、必要な緊張力を導入します。そして複数の PC 鋼材のプレストレスを行った後、それらの変動の安定性を確認することにより、所定のプレストレスが導入されたと判断します。

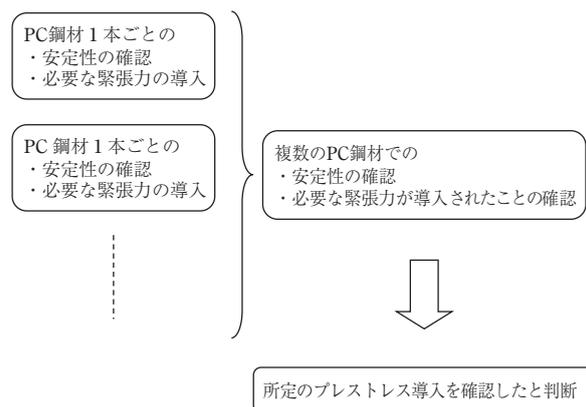


図 - 1 プレストレスと緊張管理（全体）

なお緊張管理手法によっては、複数の PC 鋼材の導入緊張力の合計値の確認も行います。

PC 鋼材 1 本ごとのプレストレスでは、緊張力として PC 鋼材に与えた荷重と、その結果として得られる伸びの関係から作業の安定性と誤差の傾向を確認します。それらに問題がなければ、誤差の傾向に応じて最終的に必要な荷重（緊張力）を決定・導入します（図 - 2）。

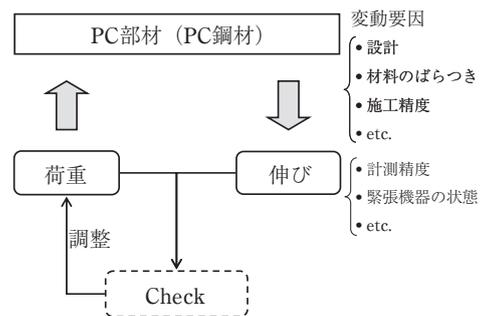


図 - 2 PC 鋼材 1 本ごとのプレストレスと緊張管理

次章からは、緊張管理の安定性の確認について説明を行い、次に所定のプレストレスの導入について説明します。

3. 安定性の確保

3.1 誤差と変動

緊張管理では、ジャッキで与えている荷重と、それに伴

* Seiki NAKAI : (株) ピーエス三菱 技術本部

い生じる PC 鋼材の伸び量を直接計測し、管理のためのデータとします。荷重は、それが安定して導入されていることを確認するために、一度にはではなく段階的に加えられます。

プレストressingで計測される、各荷重段階と対応する伸びの例を図 - 3 に示します。プレストressingが正常に行われている場合、荷重 - 伸びグラフにプロットされて各荷重段階と伸びの計測値は、ほぼ直線上に分布します。

実際の PC 構造物が、設計で想定した条件と等しいのであれば、これらのデータ点は設計条件から得られる荷重と伸びの組合せと一致します (図 - 3(a))。しかし実際には、設計と施工ではプレストressingに影響を及ぼす材料特性などの誤差が存在するため、一致するとはかぎりません (図 - 3(b), (c))。

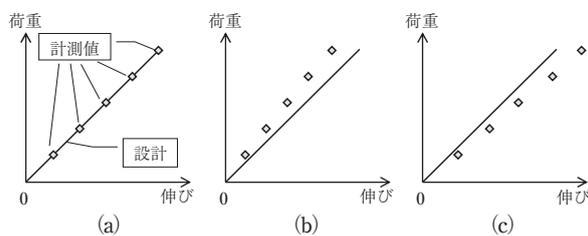


図 - 3 プレストressingによる荷重と伸び

図 - 3 に示す各荷重段階の計測値は、ほぼ直線上に分布するため、荷重と伸びの関係を傾きとして数値化することができます。そのため、この傾きによって、計測値の設計値からの誤差や、計測値の平均値・分布状態 (変動) を数値として把握することが可能となります。

図 - 4 は複数の PC 鋼材のプレストressingから得られた傾きを、プレストressingを行った順にプロットした図です。これらの値は、平均値を中心として分布し、設計値に対し平均値は誤差を生じています。

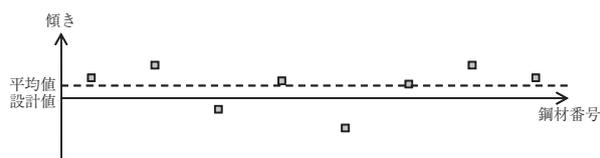


図 - 4 複数 PC 鋼材の傾き分布

3.2 変動要因

正常なプレストressingで得られる計測値は、材料特性や施工誤差などのランダムな誤差変動により、ある確率で生じる変動を示します。これを偶然誤差による変動と呼びます。一方で、図 - 5 のように、ある時から平均値が変化するような傾向性のある変動が生じる場合があります。このような変動は、緊張機器の故障などにより生じ、これを異常誤差による変動と呼びます。

異常誤差による変動は構造物の不具合につながるため、早期に原因を特定し取り除くなどの対応が必要となります。

異常誤差による変動が見られないか、その兆候をとらえ

原因に対応することで、変動が安定した状態を維持したということは、材料特性や施工誤差が安定し、緊張作業が正常に行われたことを示しています。

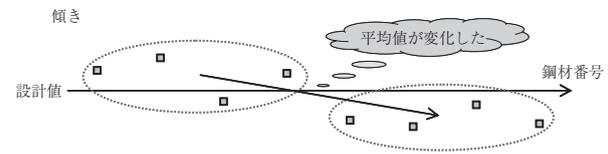


図 - 5 複数 PC 鋼材の傾き分布 (異常変動時)

3.3 変動の管理

異常誤差による変動の検出を、緊張管理では管理図を用いて、次のステップで行います。

- (1) PC 鋼材 1 本ごとの各荷重段階と伸びのプロット点が直線状に並ぶことを確認する。
- (2) PC 鋼材 1 本ごとの変動が管理限界^{a)}を超えていないことを確認する。
- (3) 複数の PC 鋼材にわたる変動の傾向を観察する。
- (4) グループごとの平均値が管理限界を超えていないことを確認する。
- (5) 傾向性のない変動が除かれたグループごとの平均値の、変動の傾向を観察する。

PC 鋼材 1 本ごとの緊張管理では、図 - 6(a)~(c)に示すような、各荷重段階と対応する伸びの計測値が記録されます。正常にプレストressingが行われているのであれば、これらは直線上に分布します。この直線の傾きが管理限界内、すなわち上限線^{b)}と下限線^{c)}の間に入っていることを、PC 鋼材 1 本ごとのプレストressing時には確認する必要があります。

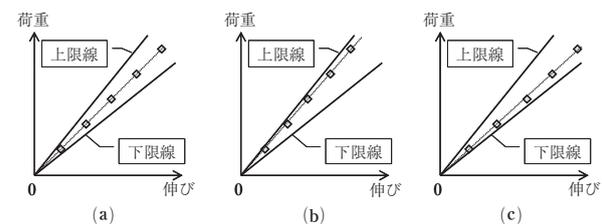


図 - 6 PC 鋼材 1 本ごとの緊張結果

次に、各ケーブルのプレストressingで得られた傾きを、プレストressingを行った順にプロットしていきます (図 - 7 上段)。ここでは、異常な動きの有無を確認します。

続いて、グループごとの平均値を求め、プレストressing順にプロットします (図 - 7 下段)。これら平均値が、管理限界内であることと、その変動に異常な動きがないかどうかを確認します。これは、平均値を求めることによって偶然誤差の影響を打ち消し、異常誤差による影響を把握しやすくするために行います。一般に、 n 個のデータを平均化することにより、偶然誤差の影響は $1/\sqrt{n}$ となるので、平均値の管理限界は 1 グループのデータ数によって変化す

ることになります。

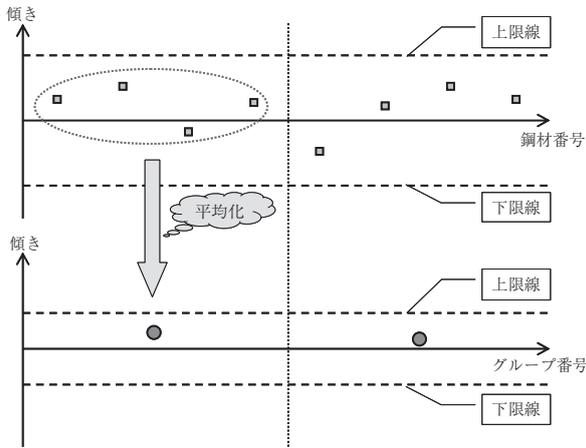


図 - 7 複数 PC 鋼材の傾き分布とグループごとの平均値

4. 所定のプレストレスの導入

4.1 概要

所定のプレストレスを導入するためには、PC 鋼材に必要とされる張力（応力度）を与える必要があります。そのため、プレストレスの前に、導入に必要なジャッキ荷重 P と対応する伸び Δl を準備します。

この荷重と伸びの組合せは、荷重-伸びグラフ上では図 - 8(a)の A 点で表されます。プレストレスにおいて、荷重と伸びが図 - 8(a) A 点に達したとき、所定のプレストレスを導入するために必要な PC 鋼材張力を与えたと判断されます。

しかし、実際には先に述べた誤差変動の影響があるため、必要な PC 鋼材張力を与えたと判断できる荷重と伸びの組合せは、ある一定の幅を有した斜線範囲（図 - 8(b)）として表されます。

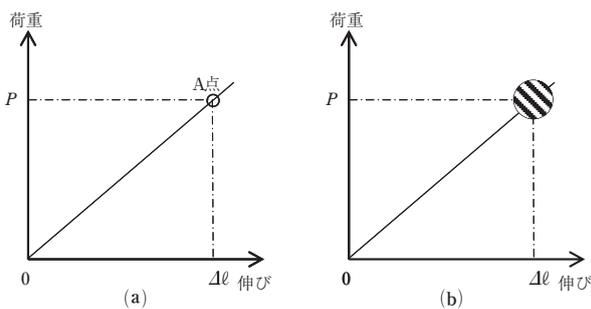


図 - 8 緊張管理図と最終緊張力

次章からは、この斜線範囲すなわち必要な PC 鋼材張力を与えたと判断できる範囲の定め方について解説します。

4.2 影響要因と必要な荷重および伸びとの関係

設計計算において、プレストレス直後の PC 鋼材の応力度分布に影響を与える主な要因は「シースと PC 鋼材の摩擦損失」でした。これは、構造物の形状や製作精度によって、比較的大きな変動を示します。

また伸びに影響を与える要素として「鋼材のヤング係数」があげられます。加えてプレストレス時には、コンクリート部材の弾性変形も同時に生じているため、「コンクリートのヤング係数」なども伸び量に影響を及ぼします。したがって、PC 鋼材をコンクリート部材内に配置した状態での「鋼材のヤング係数」（一般に、見かけのヤング係数と呼びます）は、PC 鋼材そのもののヤング係数に比べて、一般に小さな値となり、ばらつきも大きくなります。

ここでは、「シースと PC 鋼材の摩擦損失」を摩擦係数 μ と表現し、伸びに影響を与える「鋼材のヤング係数」を E_p と表して解説します。

図 - 9 は、直線配置された PC 鋼材を左端より緊張するときの鋼材の応力度分布です。着目断面を固定端（右端）とします。摩擦係数 μ は、鋼材応力分布に影響を与えます。すなわち、着目断面において必要な PC 鋼材張力を導入するための端部荷重（以下、必要な端部荷重と呼びます）が大きくなると大きく、 μ が小さくなると小さくなります。

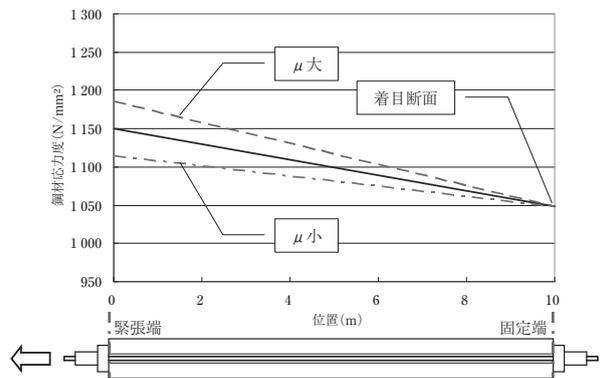


図 - 9 μ の変化と PC 鋼材応力分布

これを、荷重-伸びグラフ上に表すと、図 - 10(a)となります。 E_p が一定ならば、鋼材の応力度分布と長さから伸びが定まるので、 μ の変化に応じて、必要な端部荷重と対応する伸びが決定します。図 - 10(a)では、 E_p 線と各 μ に対応する線との交点が、該当する荷重と伸びの組合せとなります。

次に、 μ が一定で E_p が変化する場合を考えます（図 - 10(b)）。 μ が一定であれば、必要な端部荷重は一定となります。一方、このときの鋼材応力分布状態の下での E_p の変化により、伸び量が変化します。ここで μ 線と各 E_p 線との交点が、該当する荷重と伸びの組合せとなります。

実際には μ と E_p は独立して変化するため、必要な端部荷重と伸びの組合せは、これらを合成した図 - 10(c)となります。ここで A 点の状態から、 E_p のみが小さくなった場合 B 点が、 μ のみが大きくなった場合 C 点が、 E_p が小さく μ が大きくなった場合には D 点が、必要な端部荷重と伸びの組合せとなります。

4.3 必要な荷重と伸びの決定

次に、プレストレス時の計測値から、所定のプレ

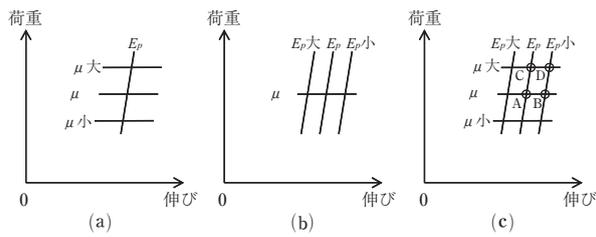


図 - 10 荷重 - 伸びの関係 (1)

ストレス導入に必要な荷重と伸びを決定する方法について解説します。

プレストレッシングにおいて、各荷重と対応する伸びは荷重 - 伸びグラフ上では直線状に分布します。そこで得られる情報は、その直線の傾きのみです。したがって、この傾きから推測できる値は、 μ もしくは E_p のどちらか一方のみとなります。ここでは、比較の変動が大きく、プレストレス力に影響を与える μ を傾きから推測することが妥当です。

一方、 E_p は対象とする構造物の推定値として、適切な値を用いる必要があります。加えて各ケーブルの E_p の変動に対応することが必要となります。実際には E_p の値とその変動幅として、試験緊張⁴⁾ 結果による推定値もしくは道路橋示方書などに定められた値を用います。

次に、必要な端部荷重の決定方法について説明します。実際のプレストレッシングから得られた荷重と伸びの関係から、図 - 11 (a) の 0A 線が得られたとします。ヤング係数が E_p である場合には、端部荷重を P_A としたときに、着目断面に所定のプレストレスが導入されたと判断することができます。この時の PC 鋼材の応力度分布は図 - 12 の $\sigma_A - \sigma$ 線となります。

しかし、プレストレッシングを行う各 PC 鋼材の E_p は、用いている推定値に対して小さいか大きい場合があり得ま

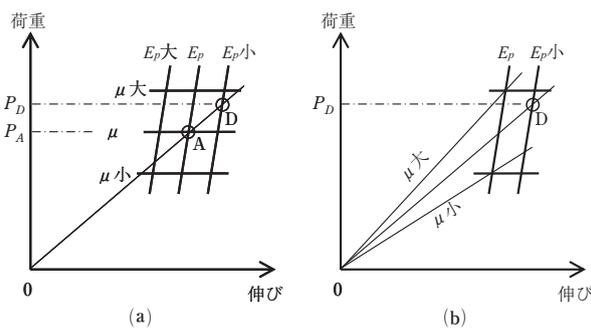


図 - 11 荷重 - 伸びの関係 (2)

す。 E_p が小さくなった場合を想定すると、荷重と伸びの組合せが図 - 11 (a) での A 点である場合の鋼材の応力度分布は図 - 12 の $\sigma_A - \sigma'$ 線となります。これは E_p が小さい場合には、応力度レベルが小さくても伸びを得ることができるからです。しかしこの場合、着目断面で必要となる PC 鋼材張力は確保されていません。必要な PC 鋼材張力を確保するためには、より大きな荷重を端部に与える必要があります。すなわち図 - 12 の鋼材の応力度分布を $\sigma_D - \sigma$ 線とする必要があるのです。同時に図 - 11 (a) では、0A 線の延長線上にある D 点が着目断面に所定のプレストレスを導入するために必要な端部荷重と対応する伸びとなります。そして、図 - 11 (a) から不要な線を取り除くと図 - 11 (b) となり、これが実際の緊張管理に用いるグラフとなります。

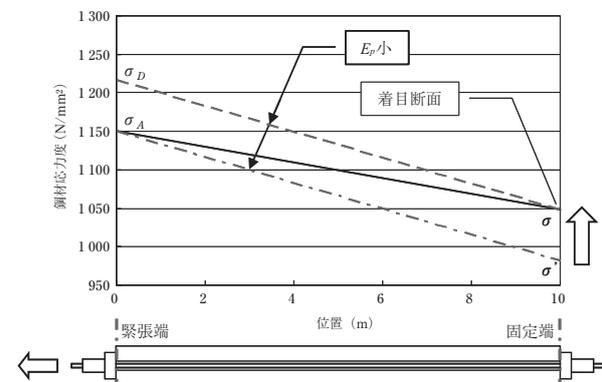


図 - 12 E_p の変化と PC 鋼材応力分布

5. おわりに

今回は、緊張管理の基本的な考え方について解説しました。

次回からは、具体的な手法として、緊張計算について解説いたします。

注

- a) 管理限界：異常誤差の兆候と偶然誤差を見分けるために設けた限界
- b) 上限線：中心線の上にある管理限界線
- c) 下限線：中心線の下にある管理限界線
- d) 試験緊張：プレストレッシングの前に、現場固有の特性値である見かけのヤング係数と摩擦係数を測定する作業

参考文献

- 1) 橋田 敏之, 齊藤 昇: PC 橋のプレストレッシングと設計施工 - 増補版 -, 現代理工学出版 (株), 1995.3.5

【2010年11月9日受付】