

第 1 回 設計におけるプレストレス

講師：中井 聖棋*

本講座の開設にあたって

本号から「プレストレスの基本」と題した講座（全 11 回予定）を開講します。

プレストレスコンクリート（以下、PC）構造物の構築において、引張力に弱いコンクリートに圧縮力を与える「プレストレス」は、とても重要な作業の一つです。

また、実際の現場では施工条件などによる不確定要素が非常に多く、確実なプレストレスが行われていることを定量的に確認するには「緊張管理」が重要な作業となります。

本講座は、プレストレスに関する基本事項や、実務における具体的な緊張管理方法などを理解していただくことを目的としています。全体の構成は、表 - 1 のとおりを予定しており、主にポストテンション方式の PC 桁橋を想定したプレストレス手順を追いながら進めていきますが、他種の PC 構造物におけるプレストレスについても、紹介していく予定です。

なお、本講座には、プレストレス特有の数式や図表などが多く出てきます。それぞれに重要な意味があることを認識しながら、注意深く読み進めてください。

(文責：講座部会)

1. はじめに

プレストレスコンクリート（PC）構造物は、PC 鋼材^{a)}によってプレストレス^{b)}が与えられたコンクリート構造物です。プレストレスを与える作業、すなわち PC 鋼材に緊張力^{c)}を導入する作業を、プレストレスもしくは緊張作業と呼び、その作業を確実に行うための作業を緊張管理と呼びます。プレストレスと緊張管理は、

PC 構造物に期待される性能を与えるうえで、きわめて重要な作業です。

プレストレスでは、設計で定められたプレストレスを、それぞれの現場の条件を考慮して導入することが求められます。そのため、プレストレスを計画、実施するためには、現場での固有の条件のほかに、設計でのプレストレスの取扱いに関する知識も必要となります。

そこで講座初回では、プレストレスと緊張管理を正しく行うために必要な知識として、設計におけるプレストレスの取扱いについて解説します。

表 - 1 連載予定内容

題名 (予定)	掲載予定
第 1 回 設計におけるプレストレス	本号
第 2 回 緊張管理の考え方	53 巻 1 号
第 3 回 緊張計算	53 巻 2 号
第 4 回 管理手法	53 巻 3 号
第 5 回 試験緊張と管理の事例	53 巻 4 号
第 6 回 プレストレスの施工	53 巻 5 号
第 7 回 管理図によるリスク管理	53 巻 6 号
第 8 回 安全管理	54 巻 1 号
第 9 回 緊張管理の実計算例	54 巻 2 号
第 10 回 建築における緊張管理	54 巻 3 号
第 11 回 特殊構造物における緊張管理	54 巻 4 号

2. プレストレスとはなにか

プレストレスとは、PC 鋼材の端部に取り付けた緊張ジャッキにより PC 鋼材に緊張力を導入して定着具^{d)}により固定することで、コンクリート部材にプレストレス力^{e)}を与える作業です（図 - 1）。

緊張力を与えられた PC 鋼材は、定着具により構造物に固定され、その反力が構造物に伝達されます。これが、プレストレス力となります。

設計では、コンクリート部材に作用する荷重の大きさに応じて必要なプレストレス力を決定しています。実施工でのプレストレスでは、設計で定められた所定のプレ

* Seiki NAKAI : (株) ピーエス三菱 技術本部

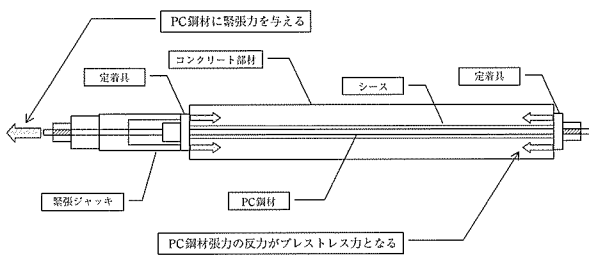


図 - 1 プレストレッシング

ストレス力を実際に与えるために、緊張管理が行われます。

次に、プレストレッシングを行うにあたり必要となる、設計でのプレストレス力の取扱いについて、簡単に解説します。

3. 設計におけるプレストレス力

3.1 設計断面と照査

必要なプレストレス力はどうのように決められるのでしょうか。ここで、プレストレス力を決めるための設計手法について、簡単な例を示して説明します。

まず構造物として、長方形断面の単純梁（図 - 2）を考えます。このような梁部材の設計では、自重・橋面荷重・自動車荷重などの作用荷重により、部材軸に直角な面である断面に力が生じると考えます。設計では、このような断面を設計断面¹⁾として、必要数（1 径間あたり 10 以上）設けて、設計作業を進めていきます。設計断面に生じる力を断面力（曲げモーメント、軸力、せん断力、ねじりモー

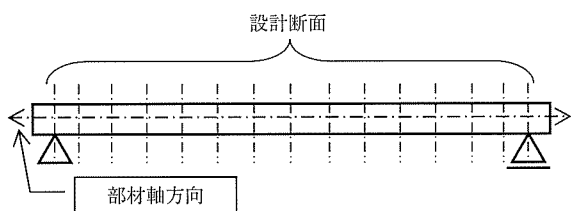


図 - 2 単純梁と設計断面

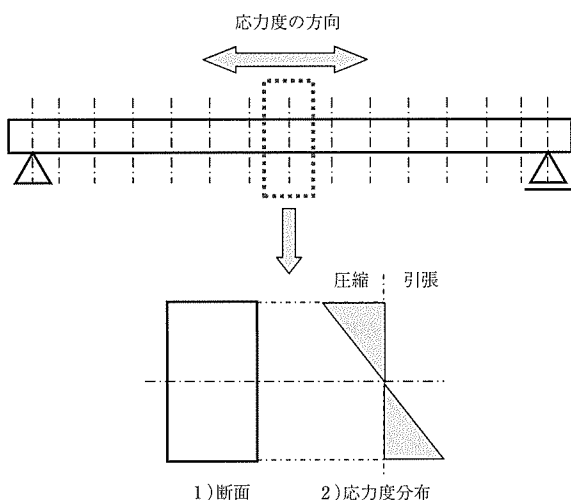


図 - 3 自重などによる曲げ応力度

メント）と呼び、これを単位面積あたりの力である応力度に換算し、制限値（許容値）と比較を行うことで、構造物の良否を判断します。

必要なプレストレス力を決めるために、とくに重要な断面力は、曲げモーメントと軸力です。単純梁の場合、作用荷重による軸力は生じないので、曲げモーメントのみにより部材軸方向に応力度が生じます。図 - 3 に、支間中央の設計断面に生じる作用荷重による曲げ応力度の例を示します。

このように、支間中央では上縁側に圧縮応力度が、下縁側に引張応力度が生じます。コンクリートは圧縮に比較して引張に弱い材料なので、生じている引張応力度を低減させる必要があります。

そのために、構造物内に配置した PC 鋼材に緊張力を与え、プレストレス力をコンクリート部材に導入します。図 - 4 は、長方形断面に配置した PC 鋼材によるプレストレス力の例を表しています。PC 鋼材の緊張力では、緊張力による軸力と、PC 鋼材の高さ位置（偏心²⁾）による曲げモーメントによって部材軸方向に応力度が生じます。

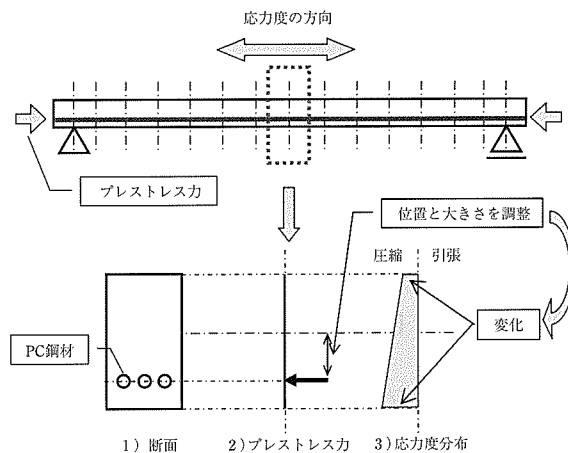


図 - 4 プレストレス力

次に自重などの荷重による応力度と、プレストレス力による応力度を足し合わせ、合成応力度を求めます（図 - 5）。その応力度状態が、定められた範囲内に収まるようにプレストレス力を調整します。

なおプレストレス力の大きさは、PC 鋼材の張力（本数）と配置位置により調整します。

定められた範囲は、許容応力度として表されます。道路橋の場合、使用するコンクリート強度・断面形状・荷重状

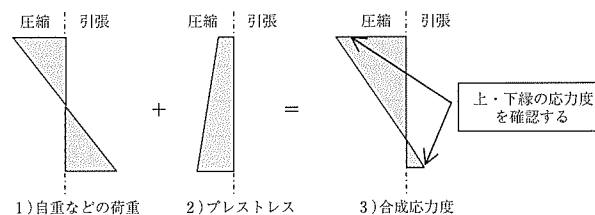


図 - 5 合成応力度

態などによって異なりますが、圧縮側では13～17N/mm²、引張側では-1.8～0.0N/mm²と定められています。

通常は、圧縮側の合成応力度は許容応力度に対して余裕があり、引張側の合成応力度は許容応力度に近く余裕が少ない状態になります。構造物の設計断面の中で、特に余裕の少ない断面を、クリティカルな断面と呼びます。これは、緊張計算で着目する断面を選定する際に必要になります。

3.2 PC 鋼材張力（応力度）の計算と材料特性

設計断面でのプレストレスは、その断面でのPC鋼材の配置位置と張力から算出されます。したがって、各設計断面のPC鋼材張力を求める必要があります。

PC鋼材張力は、その端部（緊張端）に取り付けた緊張ジャッキにより与えられます。緊張端より与えられる緊張力を、緊張端の初期導入張力（応力度）と呼びます。PC鋼材の張力（応力度）は、いくつかの要因により減少するため、設計では、次のステップにしたがって減少量を計算します。

[プレストレス導入直後まで（PC鋼材の張力分布）]

- 緊張端での初期導入張力（応力度）の決定
- 任意断面でのPC鋼材張力（応力度）の算出（PC鋼材とシース間の摩擦，セットロスの影響による減少量の算出）
- 任意断面でのコンクリートの弾性変形による減少量の算出

[定着後（コンクリート部材と一体化後の張力変化）]

- 任意断面での時間経過による張力変化量の算出（クリープ・乾燥収縮，リラクゼーションによる減少量の算出）
- 以上の減少要因によるPC鋼材応力度の変化を、図-6

に示します。

図-6に示す、各ステップでのPC鋼材応力度は、設計計算書に記載されており、これらの値は、実施工での緊張計画時に必要となります。緊張計画では、通常、任意断面での直後応力度 σ_{pt} から緊張端での初期導入応力度 σ_{pi} を、緊張計算により求めます。ただし、 σ_{pi} に考慮されている減少要因は、断面位置や設計時での算出方法によって異なるので、十分注意する必要があります。

(1) 緊張端の初期導入張力（応力度）

緊張端の初期導入張力（応力度）は、PC鋼材の導入時における許容応力度に対し、実施工時のプレストレスシ

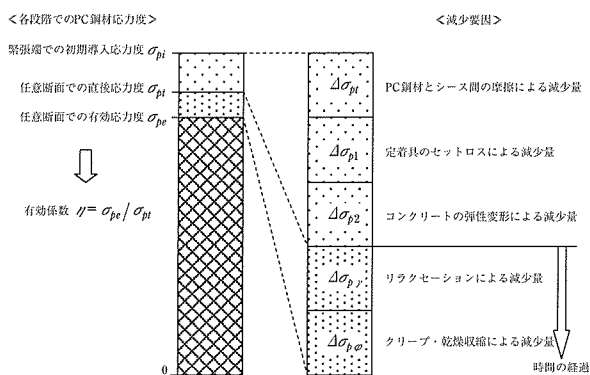


図-6 PC鋼材応力度の減少

グにおいて必要な余裕量（150～200N/mm²程度）を確保できるように決定します。

(2) PC鋼材とシース間の摩擦による影響

緊張端から緊張ジャッキにより与えた緊張力は、端部から離れるにしたがい、シースとPC鋼材との摩擦の影響により減少していきます。両端から緊張されるPC鋼材の張力分布の例を図-7に示します。

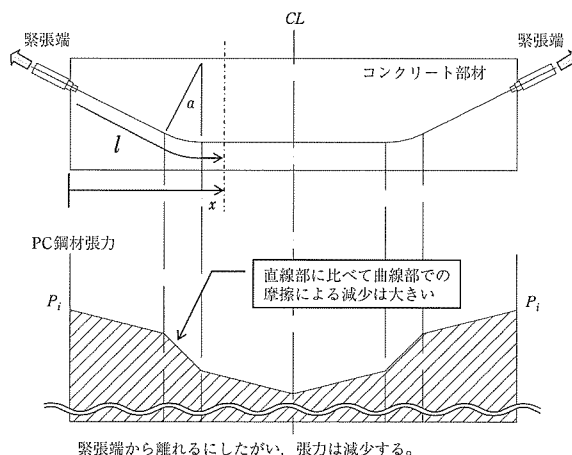


図-7 摩擦の影響によるPC鋼材張力の変化

摩擦の影響は摩擦係数として評価され、長さ1mあたりの摩擦係数を λ (1/m)、角度変化1ラジアンあたりの摩擦係数を μ (1/rad)と表記します。これらの値は、シースの材質や、PC鋼材の種類によって異なります。表-2は、標準的な摩擦係数の例です。

表-2 摩擦係数¹⁾

種類	μ	λ
PC鋼線、PC鋼より線	0.30	0.004
PC鋼棒	0.30	0.003

端部から距離 x 離れた位置に着目するとき、端部から着目位置までのPC鋼材長さを l (m)、曲線配置部での角度変化の合計値を α (rad)と表記すると、初期導入張力 P_i を与えた時の、着目位置でのPC鋼材張力 $P_x(x)$ は、次式で計算することができます。

$$P_x(x) = P_i \cdot e^{-(\mu\alpha + \lambda l)} \quad (1)$$

ちなみに、曲線配置部でのPC鋼材張力（応力度）が減少する度合いは、その曲げ半径によって左右されますが、直線配置部に比べて、約10倍程度となることもあります。

(3) 定着具のセットロスによる影響

緊張力を導入したPC鋼材をクサビ定着方式の定着具により構造物に固定する場合は、クサビがめり込むことにより伸びの戻り（図-8）が生じます。これにより、PC鋼材応力度が減少する現象をセットロスと呼びます。

セットロスによるPC鋼材張力（応力度）の減少は、緊張端付近でもっとも大きくなり、離れるにしたがって小さくなります（図-9）。

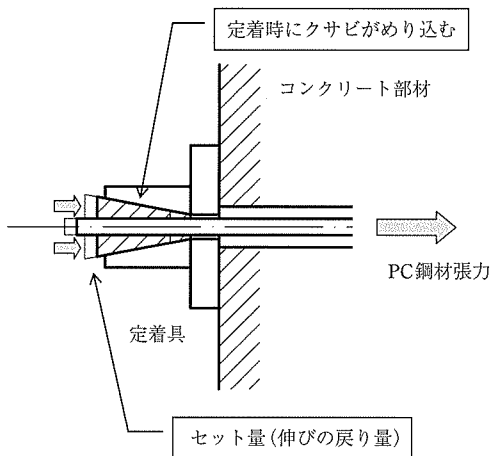


図 - 8 セット量

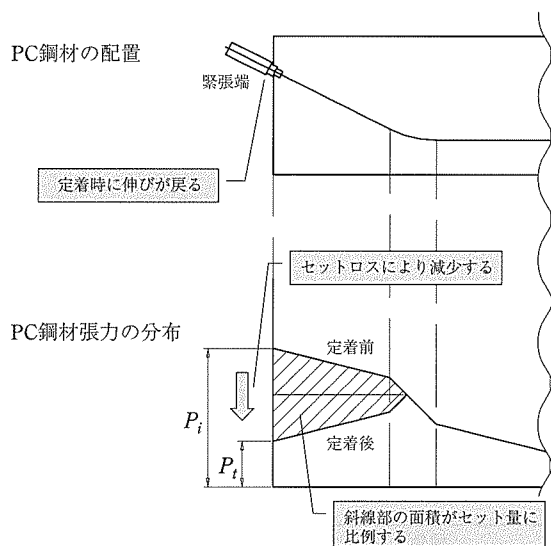


図 - 9 セットロスの影響

なお、この伸びの戻り量をセット量と呼び、このセット量は、定着具の種類ごとに標準的な値（通常3～8mm）が定められています。

(4) コンクリートの弾性変形の影響

プレストレスングによりコンクリートは圧縮力（応力度）を受け、弾性変形（ひずみ）を生じます。

複数のPC鋼材を段階的に緊張する場合、先に緊張されたPC鋼材の張力（応力度）は、後に緊張されるPC鋼材によるプレストレス力によって弾性変形の影響を受け、減少していきます（図 - 10）。

また緊張後においても、コンクリート部材に定着されたPC鋼材の張力（応力度）は、荷重作用による弾性変形の影響を受け、変化します。

弾性変形は荷重作用により瞬時に生じ、供用時^{h)}の荷重状態では生じる応力度に比例するとして取り扱います。PC鋼材も同様の挙動を示します。その比例係数をヤング係数と呼び、ひずみ ϵ と応力度 σ との関係はヤング係数 E を用いて、次式で表されます。

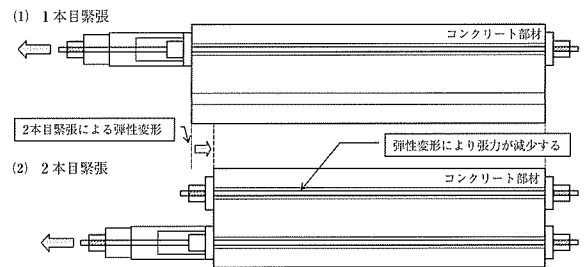


図 - 10 弾性変形の影響

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2)$$

ちなみに、設計で用いられるPC鋼材のヤング係数は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であり、コンクリートでは弾性変形が生じる時の強度によって変わり、 $2.8 \sim 3.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ となります。

(5) クリープ・乾燥収縮の影響

コンクリートには、クリープおよび乾燥収縮と呼ばれる時間経過とともに変形が進行する性質があります。これらの変形により、コンクリート部材と一体化しているPC鋼材は弾性変形を生じ、その結果、PC鋼材張力（応力度）は減少（変化）します。

クリープとは、荷重を受けて弾性変形が生じたコンクリートが、その荷重を受け続けることにより、時間経過とともに変形が増加する現象です。荷重作用を受けるコンクリートに生じている応力度が許容応力度以下である状態では、荷重による弾性変形に比例してクリープ変形が生じます。たとえば、道路橋示方書では材齢4日でプレストレスを導入した場合の最終的なクリープ変形量は、弾性変形量の約2.6倍とされています。

図 - 11は、プレストレス力により弾性変形を生じたコンクリート部材において、クリープ変形が時間の経過とともに増加し、その結果PC鋼材に弾性変形が生じ、PC鋼材張力（応力度）が減少する様子を表しています。なお、クリープ変形は主桁自重などの荷重によっても生じ、この変形によってもPC鋼材張力（応力度）は減少（変化）します。

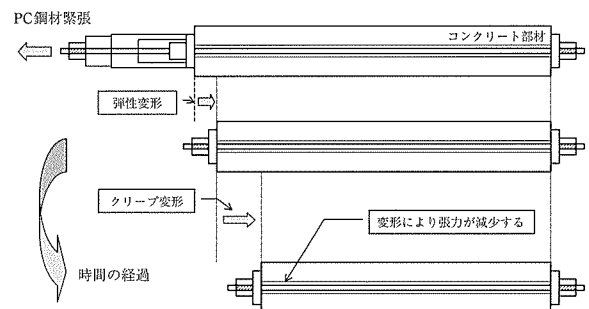


図 - 11 クリープ変形

また、コンクリートには時間経過とともに収縮を生じる性質があり、これを乾燥収縮と呼んでいます。これにより

生じる変形量（ひずみ）を乾燥収縮度と呼び、その大きさは道路橋示方書では 20×10^{-3} 程度とされています。これは、長さ 10 m の部材で 2 mm の変形に相当します。

(6) リラクセーションの影響

PC 鋼材には、張力を与えた状態にしておくと、その長さに変化がなくても、時間の経過とともに、その張力が減少する性質があります。これを、リラクセーションと呼びます。

この性質により、プレストレスングされた PC 鋼材の張力（応力度）は減少します。通常の PC 構造物に配置された状態での減少量は、見かけのリラクセーション率¹⁾として表されます。その大きさは一般に与えられた張力（応力度）の 1.5～5% であり、そのほとんどは、張力を与えられてから 1～2 カ月の間に生じます。

4. おわりに

今回は、プレストレスングにあたって必要な設計でのプレストレスに関する知識について解説しました。

次回は、緊張管理の基本的な考え方について解説いたします。

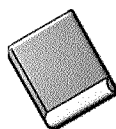
注

- a) PC 鋼材：主に、プレストレスを与えるために用いる高強度の鋼材。PC 鋼線、PC 鋼より線、PC 鋼棒などがある。
- b) プレストレス：引張力を打ち消すために、あらかじめ計画的にコンクリートに与える圧縮力。
- c) 緊張力：PC 鋼材に与えられた引張力。
- d) 定着具：PC 鋼材の端部をコンクリートに定着し、プレストレスを部材に伝達するための装置。
- e) プレストレス力：プレストレスングにより部材の断面に作用している力。
- f) 設計断面：曲げモーメントなどの断面力に対する部材の安全性の照査を行う断面。
- g) 偏心：設計断面の図心と PC 鋼材の図心が離れていること。偏心している場合、PC 鋼材を緊張すると断面内に軸力とともに曲げモーメントが発生する。
- h) 供用時：構造物が実際に使用されている時期。
- i) 見かけのリラクセーション率：PC 鋼材のリラクセーションに加え、コンクリートの乾燥収縮やクリープなどによる影響を考慮した PC 鋼材緊張力の減少量を、最初に与えた PC 鋼材緊張力に対する百分率で表した値。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，p.27，2002

【2010 年 10 月 29 日受付】



図書案内

PC 技術規準シリーズ

貯水用円筒形 PC タンク設計施工規準

定 価 4,200 円／送料 500 円

会員特価 3,500 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 編

技報堂出版