

第3回 緊張計算について

講師：天谷 公彦*

はじめに

第1回では設計時におけるプレストレスの設計にあたって必要な知識について、第2回ではプレストレスの変動要因と、緊張管理の基本的な考え方について解説しました。今回は、緊張計算について解説します。

設計計算では、設計断面（応力的に検討が必要な断面位置）でのPC鋼材応力度を求めるために、PC鋼材の緊張端からプレストレスの減少要因を引いていく計算を紹介しました。一方、緊張計算では、着目する設計断面（着目断面）に所要のPC鋼材応力度を与えるために、設計断面位置から減少要因を加算していきます。

1. 緊張計算の概要

緊張計算は、設計計算書に示されたPC鋼材応力度を、コンクリート構造物に正しく導入するための予備計算として行います。具体的には、設計計算書に示されるPC鋼材応力度を導入するための緊張ジャッキの緊張力、緊張作業時のPC鋼材の伸び量、定着時の許容セット量を算出します。なお、許容セット量については、『4.5 許容セット量の算出』の項で詳細に説明します。

図-1にPC鋼材応力度の減少要因を示します。プレストレス中においては緊張端^{a)}より与えられたPC鋼材応力度 σ_{pi} は、緊張から定着までの間に下記の①、②の要因により、緊張端から離れるにしたがって減少していきます。

- ① PC鋼材とシース間の摩擦（図-1, $\Delta\sigma_{pi}$ ）
 - ② 緊張ジャッキおよび定着具の内部摩擦（図-1, $\Delta\sigma_j$ ）
- また、プレストレス直後は、定着具が引き込まれることによる影響と、緊張されるPC鋼材によるプレストレスの影響、すなわち③、④の要因により減少します。
- ③ 定着後のセットロス（図-1, $\Delta\sigma_{p1}$ ）
 - ④ プレストレスによるコンクリートの弾性変形（図-1, $\Delta\sigma_{p2}$ ）

表-1に設計計算と緊張計算の相違点を示します。設計計算では、緊張端での初期導入応力度 σ_{pi} を設定してから、前述した①、③、④の要因によるプレストレス力の減少を考慮し、設計断面位置でのプレストレス直後

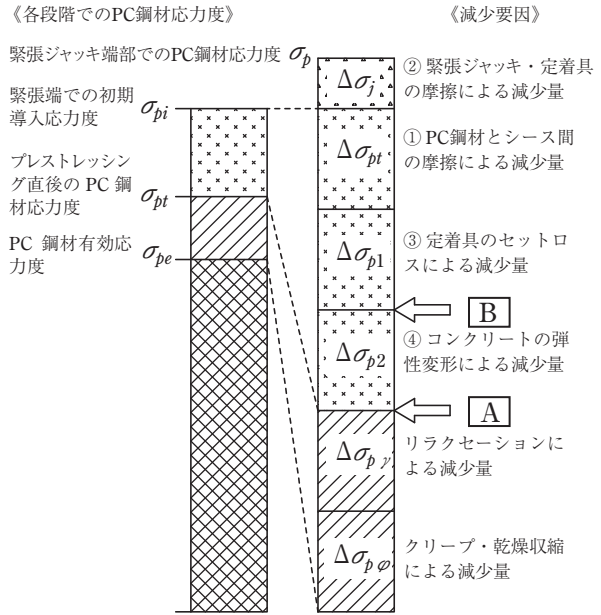


図-1 PC鋼材応力の減少要因

表-1 設計計算と緊張計算の主な相違点

項目	設計計算	緊張計算
概要	端部張力を設定し、各設計断面でのPC鋼材応力度を算出する。	着目断面位置での目標PC鋼材応力度を設定し、導入緊張力とPC鋼材の伸び量を算出する。
PC鋼材伸び量の算出	基本的に不要	必要
PC鋼材のヤング係数	道路橋示方書などで定められた設計計算用の値を用いる。(表-2:道路橋示方書I表-3.3.1)	試験緊張により得られた見かけのヤング係数、または道路橋示方書などに定められた見かけのヤング係数(表-2:道路橋示方書III表-解19.8.3)、または過去の試験データの実績値を用いる。
PC鋼材とシースの摩擦係数	道路橋示方書などで定められた値を用いる。(表-2:道路橋示方書I表-解2.2.1)	設計計算書で仮定している摩擦係数 μ をまたぐ2つの値(設計計算書で $\mu=0.3$ と仮定している場合、たとえば $\mu=0.2, 0.4$ と設定)、または試験緊張により得られた摩擦係数 μ と変動率を用いる。

* Kimihiko Amaya : (株)日本ピーエス 技術施工部

の PC 鋼材応力度 σ_{pt} を求めていきます。一方、緊張計算は、設計計算書に示されるプレストレス力を導入するための計算です。したがって、設計計算書に示されるプレストレス直後の PC 鋼材応力度 σ_{pt} (図 - 1, 矢印 A) を基に、実際の緊張時に生じる ④, ①, ② の減少要因を加算して、ジャッキ端部での PC 鋼材応力度を逆算していきます。なお、③ 定着後のセットロスの影響については、緊張計算時に後述の許容セット量を算出し、この値を基に緊張管理時に補正を行います。

設計計算と緊張計算では、計算に用いる数値も異なります (表 - 2)。以下に道路橋を例として解説します。設計計算での PC 鋼材のヤング係数 E_p は、値の相違が部材の応力度や変形などの計算結果に及ぼす影響が小さいことから、一般に道路橋示方書 I 表 - 3.3.1 に示される値を用います。摩擦係数 μ (PC 鋼材角変化 1 ラジアンあたりの摩擦係数)、 λ (PC 鋼材の長さ 1 m あたりの摩擦係数) は PC 鋼より線の場合、 $\mu = 0.30$, $\lambda = 0.004$ (道路橋示方書 I 表 - 解 2.2.1) と仮定して計算を行うのが一般的です。

表 - 2 道路橋示方書に定められている数値

PC 鋼材の種類	道路橋示方書 I 表 - 3.3.1	道路橋示方書 I 表 - 解 2.2.1 道路橋示方書 III 表 - 解 19.8.3		
	E_p (N/mm ²)	μ	λ	\dot{E}_p (kN/mm ²)
PC 鋼線	2.0×10^5	0.30	0.004	195
PC 鋼より線	2.0×10^5	0.30	0.004	185
PC 鋼棒	2.0×10^5	0.30	0.003	200

緊張計算では、PC 鋼材の見かけのヤング係数 \dot{E}_p を用います。ここで、見かけのヤング係数とは、PC 鋼材のヤング係数だけでなく、PC 鋼材の弾性変形以外の影響 (現場条件、コンクリートの弾性変形、PC 鋼材の配置形状など) を考慮した値です。見かけのヤング係数は、試験緊張 (第 5 回の講座にて解説予定) によって得られた値、道路橋示方書 III 表 - 解 19.8.3 に示される値、過去の実績値 (同様の構造形式で十分な試験データがある場合) のいずれかを用います。摩擦係数 μ は試験緊張によって得られた値と変動率、もしくは、設計計算書で仮定している摩擦係数をまたぐ任意の 2 つの値 (設計計算書で $\mu = 0.3$ と仮定している場合、たとえば $\mu_L = 0.2$, $\mu_U = 0.4$ と設定) を用います。なお、摩擦係数 λ は一定値として設計計算で仮定している数値を用います。

2. 緊張計算の手順

緊張計算は一般に以下の手順で行います。

- (1) 設計計算書にある主桁の合成応力度の検討結果を参照し、着目断面を選定する (詳細は「3. 着目断面の選定」を参照)。
- (2) 各着目断面について、摩擦係数 μ_U , μ_L , μ (設計値) を用いて、桁端緊張力および PC 鋼材の伸び量などを求める (詳細は「4. 緊張計算」を参照)。
- (3) PC 鋼材応力度のチェックを行う。
 - ・ μ (設計値) を用いたケースについて計算を行い、PC 鋼材応力度の計算値が、設計計算書の値とおおむね一致

していることを確認します。一致していない場合は、緊張計算に何らかのミスがある可能性があります。

- ・ PC 鋼材応力度が許容応力度以内であることを確認します。プレストレス中およびプレストレス直後の PC 鋼材応力度は、表 - 3 (道路橋示方書 III 表 - 3.4.1) に示す許容引張応力度を超えていないことを確認する必要があります。

表 - 3 PC 鋼材の許容引張応力度

応力度の状態	許容引張応力度	備考
プレストレス中	$0.80 \sigma_{pu}$ 又は $0.90 \sigma_{py}$ のうち小さい方の値	σ_{pu} : PC 鋼材の引張強さ (N/mm ²)
プレストレス直後	$0.70 \sigma_{pu}$ 又は $0.85 \sigma_{py}$ のうち小さい方の値	σ_{py} : PC 鋼材の降伏点 (N/mm ²)

3. 着目断面の選定

3.1 着目断面の選定方法

緊張計算を行うにあたり、最初に緊張計算の対象とする着目断面を選定します。着目断面は、設計計算書に示される設計断面の中から、許容応力度に対する主桁の合成応力度の余裕 (以下、余裕量) の少ない断面を 1 断面以上選定します。

単純桁において PC 鋼材の端部を両側から緊張する (両引き緊張) 場合は、一般的には作用する断面力がかつとも大きくなる支間中央部を着目断面に設定します。連続桁橋において両引き緊張を行う場合は、作用する断面力が大きくなる中央径間の支間中央部や、中間支点位置、側径間の支間中央部などから、余裕量の少ない設計断面を選定します。また、連続桁橋やラーメン橋で、端支点近傍の主桁の応力度が許容応力度に対して余裕の無い場合においては、PC 鋼材の緊張端を着目断面に設定する場合があります。

3.2 着目断面を複数設定する場合の考え方

連続桁橋やラーメン橋などにおいて、余裕量がほぼ等しい設計断面が複数存在し、着目断面を 1 断面に限定できない場合には、着目断面を複数設定し、おのおのの断面で所定の緊張力を満足する必要があります。

ここで、図 - 2 (1) に示される両引きされる単純 PC 梁モデルを用いて、着目断面を 2 断面選定する際の合理的な考え方を示します。設計断面は、断面 a, b, c とし、各断面での主桁応力度の余裕量は等しいと仮定します。なお、設計計算で用いた μ 値は 0.3 とします。

図 - 2 (2) に、断面 a を着目断面としたときの μ 値の違いによる PC 鋼材応力度の違いを示します。 $\mu = 0.3$, $\mu > 0.3$ の場合は断面 a, b, c のいずれにおいても必要とされる PC 鋼材応力度を満足しています。しかし、 $\mu < 0.3$ の場合は、断面 a に対しては鋼材応力度を満足していますが、断面 b, c については $\mu = 0.3$ (設計値) の値を下回っており、PC 鋼材応力度が不足しています。

図 - 2 (3) に、 $\mu > 0.3$ の場合に断面 a を、 $\mu < 0.3$ の場合に断面 c を着目断面としたときの PC 鋼材応力度の状態を示します。この場合、断面 a, b, c のいずれの断面においても $\mu = 0.3$ の値を上回っており、PC 鋼材応力度の不足は生じません。

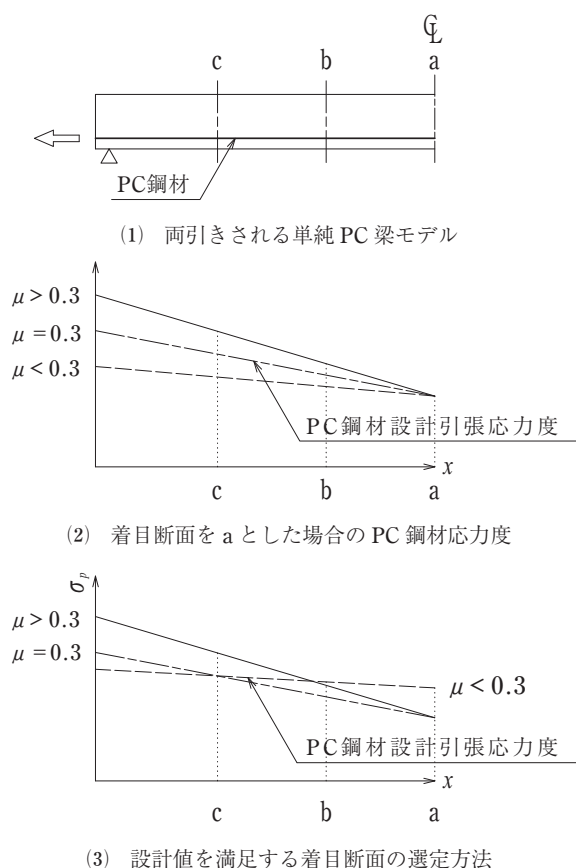


図 - 2 着目断面ごとの PC 鋼材応力度

以上を整理すると、下記ようになります。

- ・ $\mu = 0.3$ のときは、設計で仮定した条件と同じなので、いずれの断面を着目断面として選定しても、問題は生じません。
- ・ $\mu > 0.3$ のときは、緊張端からもっとも離れている断面を着目断面として選定します。
- ・ $\mu < 0.3$ のときは、緊張端にもっとも近い断面を着目断面として選定します。

したがって、断面 a および断面 c を着目断面に設定することで、 μ の値によらず、いずれの断面でも PC 鋼材応力度の不足は生じなくなります。

図 - 3 に 3 径間連続桁橋の中央径間の中央断面に関して対象に配置された PC 鋼材を両引き緊張する場合を示します。

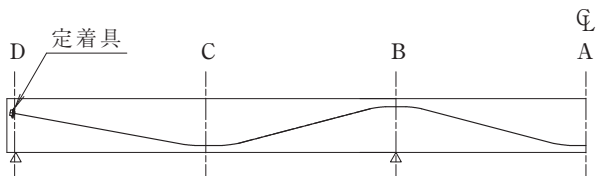


図 - 3 3 径間連続桁橋における着目断面の一例

図 - 3 において、断面 A, B, C の各断面で主桁応力度の余裕量がほぼ等しく、着目断面を 2 断面選定する必要があります。

ある場合は、図 - 2 の両引き単純 PC 梁モデルの例と同様に、断面 A および断面 C、すなわち緊張端からもっとも遠い設計断面ともっとも近い設計断面を着目断面とすることで、いずれの設計断面でも PC 鋼材応力度の不足は生じなくなります。

なお、着目断面を複数選定した場合は、それぞれの断面について緊張計算を行います。

4. 緊張計算

4.1 目標とする PC 鋼材応力度 σ_0 の設定

緊張計算に先立ち、設計計算書を参照して着目断面位置でのプレッシング直後の PC 鋼材応力度 σ_{pt} を確認します。一般に、設計計算書に示される σ_{pt} は、初期導入応力度 σ_{pi} から図 - 1 中の ①, ③, ④ の影響要因による PC 鋼材応力度の減少を考慮しています。

着目断面での目標とする PC 鋼材応力度 σ_0 は、 σ_{pt} と ④ コンクリートの弾性変形による PC 鋼材応力度の平均減少量 $\Delta\sigma_{p2}$ を用いて、式 (1), (2) により算出します。

ただし、設計計算書のなかには σ_{pt} に ④ コンクリートの弾性変形による損失 $\Delta\sigma_{p2}$ を加えた値 (図 - 1, 矢印 B の位置での応力状態) が示されているものもあります。この場合は、設計計算書中の値をそのまま σ_0 にすることができますので、混同しないように注意が必要です。

$$\sigma_0 = \sigma_{pt} + \Delta\sigma_p \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{p2} = \frac{1}{2} n_p \cdot \sigma_{cpg} \cdot \frac{N-1}{N} \quad (2)$$

ここに、 σ_{pt} : プレッシング直後の PC 鋼材応力度 (N/mm²)

$\Delta\sigma_{p2}$: PC 鋼材の引張応力度の平均減少量 (N/mm²)

n_p : PC 鋼材と緊張時の材齢におけるコンクリートとのヤング係数比 (= E_p/E_c)

σ_{cpg} : プレッシングによる PC 鋼材図心位置でのコンクリート応力度 (N/mm²)

N : PC 鋼材の緊張回数 (本数)

ここで σ_{cpg} は、主桁自重による応力度とプレストレスによる応力度の合計で、設計計算書に示されているのが一般的です。

4.2 PC 鋼材とシースの摩擦・角変化による摩擦の影響

PC 鋼材の引張応力度は、PC 鋼材とシースの摩擦、角変化による摩擦によって、緊張端から不動点に向かって減少します。ここで、不動点とは、PC 鋼材がプレッシング時に動かない点であり、両引き緊張の場合は両側の緊張端より与えられた PC 鋼材引張応力度の釣合点を、片引きの場合は固定端を示します。

着目断面から緊張端に向かっての PC 鋼材各点 (図 - 4 の $\sigma_0 \sim \sigma_3$ の点) での引張応力度は、式 (3) を用いて算出します。

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma_{i-1} \cdot e^{(\mu \cdot a_i + \lambda \cdot \ell_i)} \\ &= \sigma_{i-1} \cdot e^{\mu \cdot a_i} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 σ_i : 点 i における PC 鋼材応力度 (N/mm²)

- a_i : $a_i + \lambda / \mu \cdot \ell_a$
- a_i : 点 $i-1$ から点 i 間の角変化 (rad)
- ℓ_i : 点 $i-1$ から点 i 間の PC 鋼材長さ (mm)
- λ : PC 鋼材の長さ 1 m あたりの摩擦係数
- μ : PC 鋼材角変化 1 ラジアンあたりの摩擦係数で、任意の 2 点 (μ_u, μ_L) で計算する。
- λ / μ : 一定値として扱う
(たとえば, $0.004/0.3 = 0.0133$)

さらに、緊張ジャッキおよび定着具内部の摩擦損失により、定着具において PC 鋼材応力度が減少します (図 - 4 の $\sigma_4 \sim \sigma_5$ の点)。定着具の前面 $j-1$ 点、緊張ジャッキの背面を j 点と表すと、その両点での PC 鋼材応力度の関係は、式 (4) で表されます。なお、緊張ジャッキおよび定着具内部の摩擦損失は各定着工法に応じた値を用います。

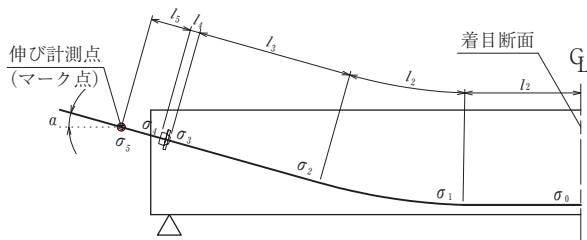


図 - 4 PC 鋼材の形状

$$\sigma_j = (1 + \gamma) \cdot \sigma_{j-1} \cdot e^{\mu \cdot a_j} \quad (4)$$

したがって、式 (3)、(4) より緊張ジャッキ端部での PC 鋼材応力度 σ_p は式 (5) で算出できます。

$$\sigma_p = (1 + \gamma) \cdot \sigma_0 \cdot e^{\mu \cdot a} \quad (5)$$

ここに、 γ : 緊張ジャッキおよび定着具の内部摩擦損失

- a : $a + \lambda / \mu \cdot \ell$
- a : 着目断面から緊張端までの PC 鋼材の角度変化量 (= $\sum a_i$) (rad)
- λ : 着目断面から緊張端までの PC 鋼材の長さ (= $\sum \ell_i$) (mm)

4.3 端部緊張力の算出

プレストレスの現場では、緊張ジャッキの圧力ポンプに作用している圧力を読み取るにより緊張ジャッキ端部での PC 鋼材応力度を確認するため、この圧力 (端部緊張力) を算出する必要があります。端部緊張力は式 (5) により求めた σ_p を用いて、式 (6) により算出します。また、圧力計の示度 (緊張ポンプの圧力計の読み) は、式 (7) により算出します。

$$P_i = \sigma_p \cdot A_p / 1000 \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{P_i}{A_m} \quad (7)$$

ここに、 P_i : 端部緊張力 (kN)

A_p : PC 鋼材一本あたりの断面積 (mm²)

σ_m : 圧力計示度 (MPa)

A_m : 緊張ジャッキの受圧面積 (mm²)

なお、緊張ジャッキの受圧面積は使用する緊張ジャッキに応じた値を用います。

4.4 PC 鋼材の伸び量の算出

PC 鋼材の応力は各点によって異なるため、PC 鋼材の伸び量は各点間の平均応力を用いて算出します。PC 鋼材の平均応力度は式 (8)、伸び量は式 (9)、(10) を用いて算出します。

$$\sigma_{mi} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i-1}}{2} \quad (8)$$

$$\Delta L_i = \sigma_{mi} / \dot{E}_p \cdot \ell_i \quad (9)$$

$$\Delta L = \sum \Delta L_i \quad (10)$$

ここに、 σ_{mi} : 点 $i-1$ と点 i の平均応力度 (N/mm²)

ℓ_i : 点 $i-1$ と点 i 間の PC 鋼材長さ (mm)

ΔL_i : 点 $i-1$ と点 i 間における PC 鋼材の伸び量 (mm)

ΔL : PC 鋼材の全伸び量 (mm)

\dot{E}_p : PC 鋼材の見かけのヤング係数 (N/mm²)

4.5 許容セット量の算出

ねじ式定着工法のセット量は僅少であるため、この影響は一般に無視することができます。しかし、くさび式定着工法では比較的大きなセット量が生じるため、これによる PC 鋼材応力度の低下を考慮する必要があります。セット量の影響が着目断面に達した場合、着目断面の PC 鋼材応力度が低下することになります。したがって、着目断面に必要なプレストレスを導入するためには、着目断面に影響を及ぼさないようにセット量の最大値 (許容セット量) を計算する必要があります。

許容セット量は、プレストレス中とプレストレス直後 (セット時) の摩擦係数が等しいとして、式 (11) を用いて算出します。

$$\Delta \ell = \frac{1}{\dot{E}_p} \sum_{i=1}^n A_i \quad (11)$$

ここに、 $\Delta \ell$: 許容セット量 (mm)

A_i : 図 - 5 および式 (12) により求められるセット量の影響範囲面積 (N・mm/mm²)

$$A_1 = 2 \left\{ (\sigma_1 - \sigma_0) \frac{\ell_1}{2} \right\} = (\sigma_1 - \sigma_0) \ell_1$$

$$A_2 = 2 \left[\left\{ (\sigma_2 - \sigma_0) + (\sigma_1 - \sigma_0) \right\} \frac{\ell_2}{2} \right] = \left\{ (\sigma_2 - \sigma_0) + (\sigma_1 - \sigma_0) \right\} \ell_2 \quad (12)$$

$$A_3 = 2 \left[\left\{ (\sigma_3 - \sigma_0) + (\sigma_2 - \sigma_0) \right\} \frac{\ell_3}{2} \right] = \left\{ (\sigma_3 - \sigma_0) + (\sigma_2 - \sigma_0) \right\} \ell_3$$

$$A_4 = 2 \left[\left\{ (\sigma_4 - \sigma_0) + (\sigma_3 - \sigma_0) \right\} \frac{\ell_4}{2} \right] = \left\{ (\sigma_4 - \sigma_0) + (\sigma_3 - \sigma_0) \right\} \ell_4$$

$$A_5 = \sigma_5 \cdot l_5 = \sigma_4 \cdot l_5$$

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

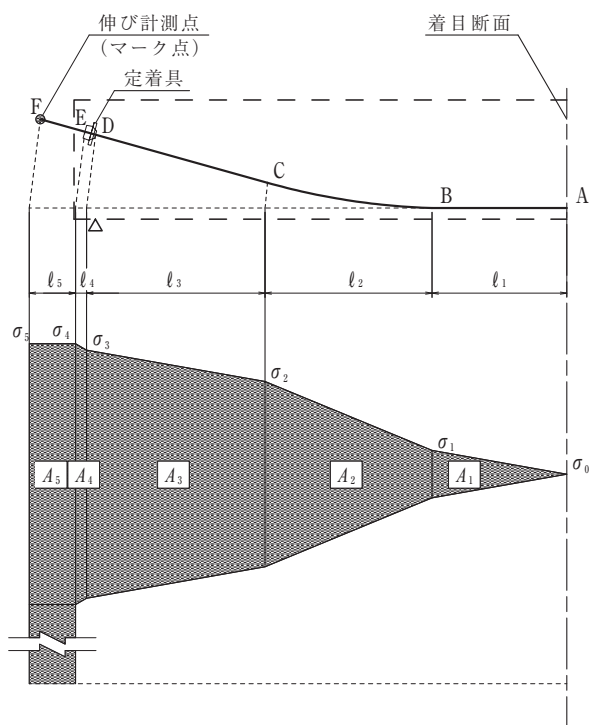


図 - 5 セット量の影響が着目断面に達したときの PC 鋼材応力変化図

ここで、許容セット量は伸び計測点^{b)}(マーク点)の PC 鋼材応力度を起点として算出しています。したがって、

式 (11), (12) によって求められた許容セット量は、定着具背面から伸び計測点 (マーク点), または定着具背面から緊張ジャッキのウェッジ間 (図 - 5 の E ~ F 間) の PC 鋼材の伸びの戻り量 (図 - 5 の A₅ 部) を考慮した値となっていますので、緊張管理時に設計セット量と比較する際には注意が必要です。なお、許容セット量は他の計算と同様に、任意の 2 点の摩擦係数 (μ_u, μ_L) で計算する必要があります。

おわりに

今回は、着目断面の選定方法と緊張計算方法について解説しました。なお、緊張計算の具体的な数値を用いた計算例については、参考文献^{3), 4)}などを参照してください。

次回は、緊張管理手法について解説いたします。

注

- a) 緊張端：設計計算では、PC 鋼材に緊張力を与えたときの定着位置を示す。緊張計算においては、プレストレス中に緊張ジャッキが PC 鋼材をつかんでいる位置を示す。
- b) 伸び計測点 (マーク点)：PC 鋼材の伸び量の計測位置を示す。一般的には緊張ジャッキの背面を伸び計測点とすることが多い。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2002
- 2) 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
- 3) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧, 1998
- 4) 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

【2010 年 2 月 16 日受付】



図書案内

National Report

The Third *fib* Congress 2010
Washington D.C. USA (英・和文併記)
2010 年 5 月

頒布価格：定 価 6,000 円 / 送料 500 円
：会員特価 5,000 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