

「プレストレストコンクリート工事における緊張管理の手引き（建築編）」の発刊について

縄田 雅巳*1・佐藤 勇平*2・妹尾 正和*3

建築における緊張管理は、日本建築学会のプレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（以下、PC規準）および建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事（以下、JASS5）などに基づいて行われている。しかしながら、これらの規準・仕様書に沿った手法で適切に管理したにも関わらず、実測伸び量が管理範囲に収まらないケースがあることがプレストレスト・コンクリート建設業協会（以下、PC建協）加盟各社より報告されている。そこで、PC建協において、加盟各社から実施工での緊張管理データを収集・分析することにより、適切かつ実状に合った緊張管理ができる手法を「プレストレストコンクリート工事における緊張管理の手引き（建築編）」（以下、本手引き）としてまとめた。

キーワード：緊張管理、摩擦係数、伸び管理幅

1. はじめに

緊張管理はPC工事における重要な品質管理の一つであり、設計で定められたプレストレスを正確に導入することで、PC部材は目標とする耐力を保有することができる。PC規準にはPC鋼材とシース間の摩擦係数（以下、 μ 、 λ ）や見掛けのヤング係数（以下、 Ep' ）の標準値が示されていて、これらを使用してPC鋼材の伸び量を計算し、実測値との差が管理範囲内であれば所定のプレストレスが導入されたと判断している。

緊張管理において緊張機器の故障や緊張作業にミスが無いにも関わらず、PC鋼材の実測伸びが管理範囲に収まらない原因として、計算に使用する諸係数や伸びの管理値が実態に合っていないことが考えられる。

そこで、データの分析により明らかにする項目は以下とした。

- ・摩擦係数（ μ 、 λ ）の適正值と μ と λ の相関性
- ・ヤング係数 Ep' の適正值とミルシート値
- ・シース内での鋼材移動の評価
- ・伸び実測値のバラツキとその要因
- ・構造設計との整合性

2. 建築におけるPC緊張管理

2.1 従来の管理手法

建築における緊張管理に用いる管理手法には、緊張力と伸び量を独立して管理する「第1の方法」と摩擦係数をパラメーターとする「第2の方法」がPC規準に示されている（図-1）。

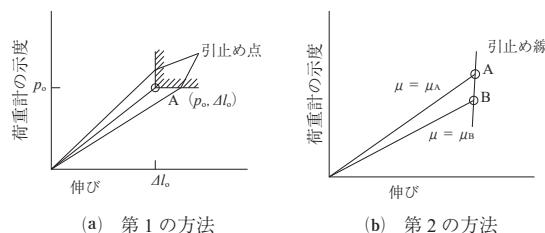


図-1 管理手法

「第1の方法」は、PC規準の本文に規定されていることもあり、建築工事ではほとんどがこの緊張管理手法で行われている。「第1の方法」で伸び計算に使用する諸係数（ μ 、 λ 、 Ep' 等）はPC規準に示された値を用いるが、諸係数のバラツキにより計算伸びと実測伸びが合わないケースで



*1 Masami NAWATA

オリエンタル白石(株)
本社 PC建築部



*2 Yuhei SATO

川田建設(株)
プレキャスト本部



*3 Masakazu SENOO

(株)建研
東京支店 設計部

は、JASS5において認められた対処法に準じて、過去の実績値より諸係数の見直しを行う場合が多い。

一方PC規準の解説に示されている「第2の方法」は、PC鋼材の配線範囲においてあらかじめクリティカルな断面位置を決定してから管理値を決めている。しかし、建築物の架構は一般に多スパン連続梁の不静定ラーメン架構であり、クリティカル断面が複数の箇所が存在するため、特定の位置を絞り込むことが困難であることから一般には「第2の方法」の採用頻度は少ない。

2.2 緊張管理の問題点

建築における緊張管理の問題点として、以下の点が考えられる。

- ①「第1の方法（伸び管理）」の管理幅±5%の値は過去のプレテンション部材の管理実績値に由来するといわれているが、ポストテンション部材にもその値が使用されている。しかし、その妥当性は過去十分に検証されていない。
- ②実建物において緊張計算に用いる諸係数のバラツキが、実際の緊張作業においてどのように影響するものであるか分析されたものがない。
- ③建築物では片引き緊張が多く、固定端が躯体内に埋め込まれているため、試験緊張を実施することができない。したがって、実際の緊張作業に先立って実建物で用いる諸係数を調べる「第2の方法（μ管理）」の採用はきわめて稀である。
- ④管理限界値の根拠が明確でないために、異常と判断する基準や対処方法を明確にできない。

緊張管理において管理限界値は、緊張作業が正常に行われたかどうかを判断する基準として定められている。しかし、伸び量を計算するために必要な諸係数は重要な値でありながら、建築では緊張管理データの蓄積と分析が十分に行われてこなかったためにそれらの値の妥当性が検証されることなく課題として残ったままであった。

PC規準に示されている管理幅を5%で管理する方法は、角度変化が小さく直線配置に近い配線形状で、単スパン梁やプレテンション部材および一定の長さ以上のPC鋼棒の緊張管理に適していると考えられる。

本手引きでは、建築の架構で多い多スパン連続梁で角度変化が大きい配線形状に適した緊張管理方法を新たに提案し、その妥当性を検証した。

3. 実緊張管理データの収集と分析

3.1 収集されたデータの概要

収集されたデータの概要を図-2～4に示す。

図-2にはスパン数と緊張方法を示すが、スパン数は1スパンのデータがもっとも多く、1スパンの緊張方法はほとんどが片引きであることが分かる。2スパン以上になると両引きのデータが増加している。

図-3はスパン数と配線形状の対称性を示しているが、ここでいう非対称とは、架構が対称であっても、配線の角度変化率がスパンによって一定ではないものは非対称と定義している。

図-4は、ケーブル長と角度変化量 Σa との関係を示しているが、ケーブル長は片引きに換算して示している。これより、ケーブル長は片引き長さとして最大で50m程度、角度変化量としては3.0rad程度まで含まれたデータであることが分かる。

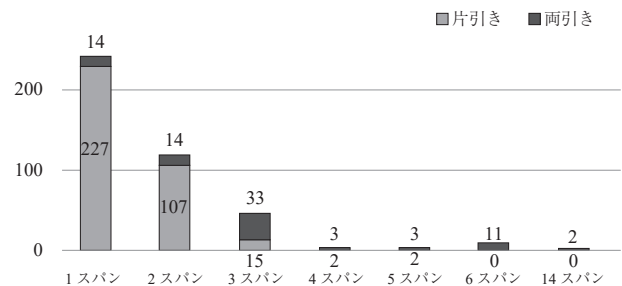


図-2 スパン数と緊張方法

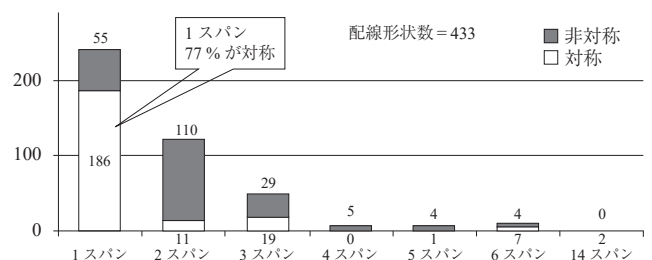


図-3 スパン数と配線形状の対称性

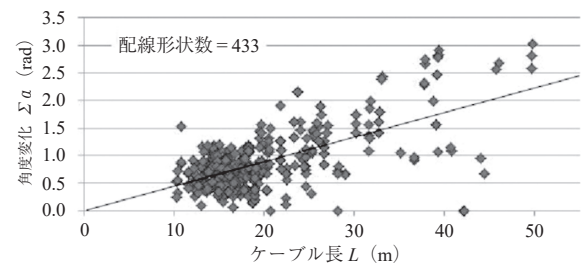


図-4 ケーブル長（片引き換算）と角度変化量 Σa

3.2 データの分析方法

最初に、収集されたデータから μ と伸び量の実測値と計算値との比率を算出した。 μ は鋼材断面積やヤング係数 E_p などの誤差を含んだ値であるため、ここでは $\hat{\mu}$ と記載する。

収集されたデータには、図-3で示したように角度変化率が一定ではない非対称のデータが含まれているため、図-5に示すように1スパンを最大8分割して配線形状を再現した計算モデルを作成し、伸び量実測値に対応する $\hat{\mu}$ を繰返し計算により求めることとした。

角度変化率が一定の場合は、(1)式に示す理論式により、 $\hat{\mu}$ を求めることは可能である。この理論式は、のちほど述べるパラメトリックスタディを行う際に使用している。

$$\hat{\mu} = \ell n \{ (L \cdot P_o) / (\Delta L \cdot A \cdot E_s) \} / a e \quad (1)$$

ここで、 $a e$: 伸び量を計算するための代表軸力の位置での $(\Sigma a + \lambda / \mu \cdot L)$ 値で式により求める。

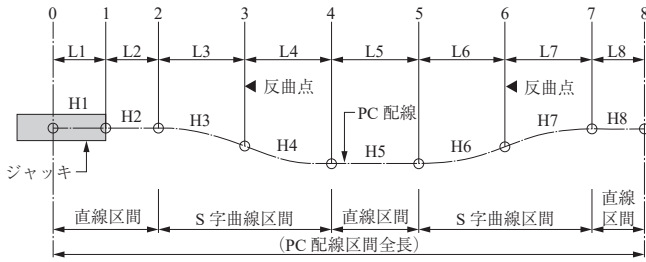


図 - 5 繰り返し計算モデルの1スパン分割要領

$$ae = -\frac{1}{\mu} \cdot \ln \left\{ \frac{1}{\mu \cdot \Sigma a + \lambda \cdot L} (1 - e^{-(\mu \Sigma a + \lambda \cdot L)}) \right\}$$

3.3 Ep' と $\dot{\mu}$ の分布状況の関係

PC 規準によれば、緊張管理計算に使用する PC 鋼材の見かけのヤング率 Ep' を 190 kN/mm^2 としている。

図 - 6 に Ep' を $185, 190, 195 \text{ kN/mm}^2$ とした場合の $\dot{\mu}$ と $\Sigma a/L$ (単位長さあたりの角度変化) との関係を示す。 Ep' を変化させれば $\dot{\mu}$ の値は平均値として変わるの当然

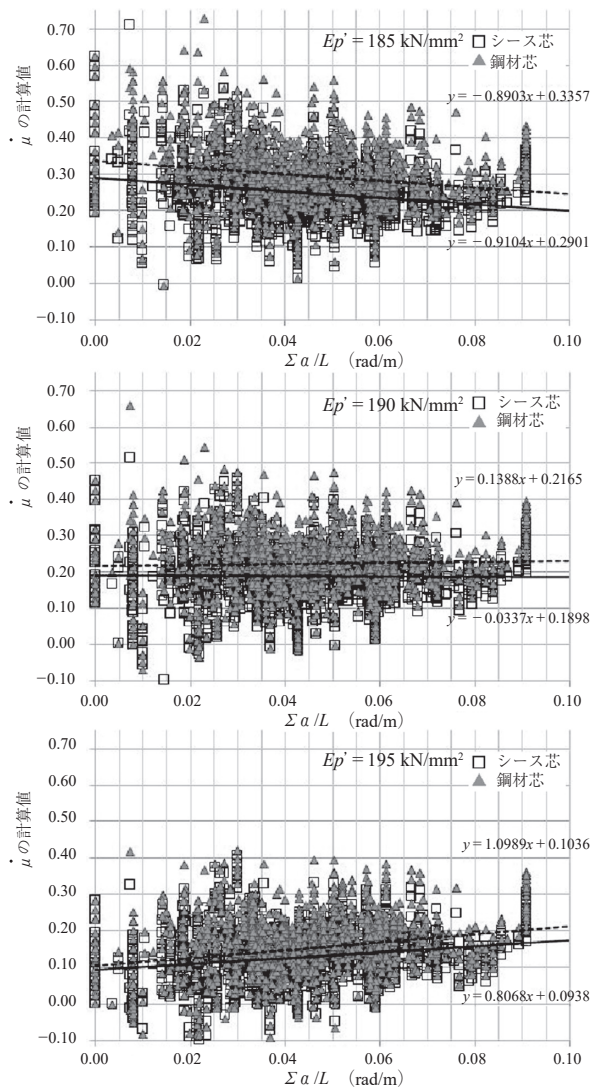


図 - 6 各 Ep' における $\dot{\mu}$ と $\Sigma a/L$ の関係

であるが、本来はほかのパラメータに関わらず一定値となるべき値であるところ、図 - 8 の $Ep' = 185$ と 195 の場合には $\Sigma a/L$ によって大きく傾斜が出ており、 Ep' としては 190 kN/mm^2 が妥当であることが分かる。

3.4 Ep' と伸び量の計算値と実測値との比率の関係

次に、各 Ep' において得られた $\dot{\mu}$ の平均値を用いて伸び量を計算し、伸び量の計算値と実測値との比率 (以下、伸び比率と称する) を求める。この伸び比率の度数分布図を図 - 7 に示す。ここで、シース芯とは配線高さ = シース芯とするもので、鋼材芯とはシース内の鋼材偏心の影響を考慮したものである。

図 - 7 を見ると、各 Ep' における $\dot{\mu}$ の平均値を用いて伸び量を計算しているため、すべてのケースで伸び比率は平均値が $\pm 0\%$ 近辺となる正規分布状の分布となっていることが分かる。ただし、標準偏差 σ を比べると、 $Ep' = 190$ の場合がもっとも小さく、 $\sigma = 3.5\%$ 以下となっている。PC の緊張管理においては、異常の早期発見を優先するために 2σ で管理することが一般的であり、この場合 2σ で $\pm 7\%$ の管理幅となる。

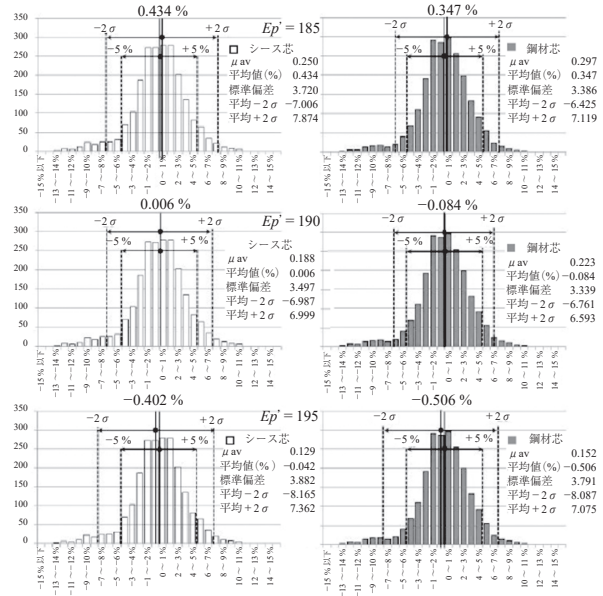


図 - 7 $\dot{\mu}$ の平均値を用いた伸び比率の度数分布図

3.5 理論式を用いた諸係数のパラメトリックスタディ

3.2 で示した理論式は、角度変化率が一定の対称データにおいて成立する。そこで収集されたデータの内、対称とされたデータにおいて、計算モデルを用いた繰返し計算による $\dot{\mu}$ と理論式による $\dot{\mu}$ との比較を図 - 8 の中段 ($\lambda = 0.016 \cdot \mu$) に示すが、両者はほとんど一致していることが確認できる。この状態を元に、ここでは μ と λ の関係性を理論式を用いてスタディする。

先に示した結果は、PC 規準で示された標準値の $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$ を、 $\lambda = 0.016 \cdot \mu$ という関係で、 λ を μ に比例させた検討結果である。この関係を $\lambda = 0.012 \cdot \mu$ ($\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.003$ に相当)、 $\lambda = 0.02 \cdot \mu$ ($\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.005$ に相当) に変更した場合の $\dot{\mu}$ と $\Sigma a/L$ との関係

図 - 8 の上段と下段に示す。これを見ると、 $\lambda = 0.012 \cdot \mu$ の場合は $\Sigma a / L$ に応じて右下がりに、 $\lambda = 0.02 \cdot \mu$ の場合は右上がりに分布が変化することが分かる。

次に λ を一定値として、 $\lambda = 0.003, 0.004, 0.005$ に変化させた場合の $\dot{\mu}$ と $\Sigma a / L$ との関係を図 - 9 に示す。これを見ると λ を固定とした場合は、 λ を比例させた場合(図 - 9 左上) に比べて $\dot{\mu}$ のバラツキが通常想定される値よりかなり大きく変動することが分かる。

いずれのスタディも鋼材芯の場合のみを示しているが、シース芯の場合でも同様の結果であった。これらのスタディ結果からは、 $E_p' = 190$ の検討においては、PC 規準に示される $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$ を基に、 $\lambda = 0.016 \cdot \mu$ という関係で λ を μ に比例させた場合がもっとも適切であることが分かる。

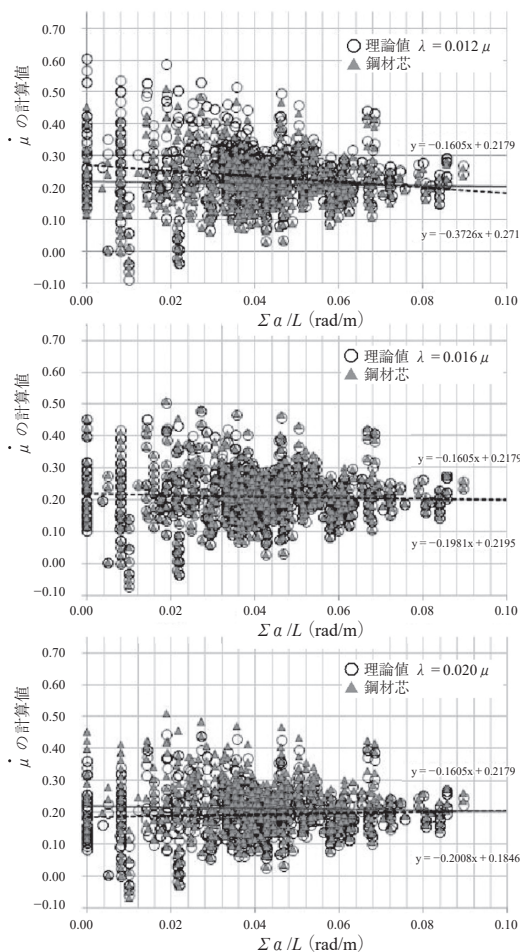


図 - 8 μ と λ の関係を変化させた $\dot{\mu}$ と $\Sigma a / L$ の関係

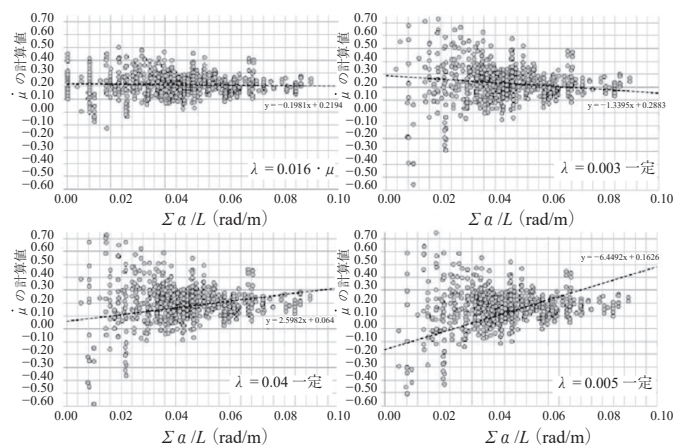


図 - 9 λ を固定とした場合の $\dot{\mu}$ と $\Sigma a / L$ の関係

3.6 伸び量にバラツキを生じる要因の考察

ここでは、伸び量にバラツキを生じさせている要因に関する考察を行う。図 - 10 に伸び比率の絶対値と角度変化量 Σa との関係を示す。これを見ると、伸び比率のバラツキの大きさには Σa との関係性が強く表れている。そこで、伸び比率のデータ全体を Σa が小さな方から順に、データ数がおおよそ 400 個前後となる 5 つのグループに分け、それぞれの σ と 2σ の位置を図 - 11 にプロットする。これを見ると、 Σa が小さな領域では 2σ で 5% 程度であったものが、 Σa が大きな領域では 9% 以上に増加していることが分かる。全データでのバラツキは 2σ で 7% であることが分かっているが、 Σa によってバラツキの大きさが変化していることが分かる。

ここで、伸びの実測値に含まれる誤差の要因について考察する。PC 規準によれば測定値の読み取り誤差が $\pm 2 \text{ mm}$ で 1~2% 程度、その他最終緊張力、鋼材断面積、ヤング係数などの誤差がトータルで 3% 程度あるとされている。この誤差が $\dot{\mu}$ の 2σ の範囲に平均値からの差に比例して含まれていると仮定すると、3.2 で示した理論式を用いて、この誤差を取り除いた μ のバラツキを推定できる。計算結果を図 - 12 示すが、鋼材芯で評価した場合の誤差を取り除いた μ の分布は、 2σ で 0.22 ± 0.06 程度の小さなバラツキとなっている。

しかし、この小さなバラツキを再度理論式を用いて、伸び比率の変動に置き換え、図 - 10 にプロットしたものを図 - 12 に示す。ここでは代表例として $L = 15 \text{ m}$ の場合を想定している。これを見ると、 Σa が小さな領域においては μ のバラツキによる変動は 1% 程度であるが、 Σa の増加とともに 7% 程度まで大きく変化することが分かる。伸び量の理論式において、 e 関数の指数が μ と $a e$ の積となっており、 $a e$ は代表軸力での $\Sigma a + \lambda / \mu \cdot L$ であることから、結果的に μ のバラツキが Σa によって増幅されることが理解できる。このように、伸び比率のバラツキは Σa によって大きく変化する性質のものであることが分かる。

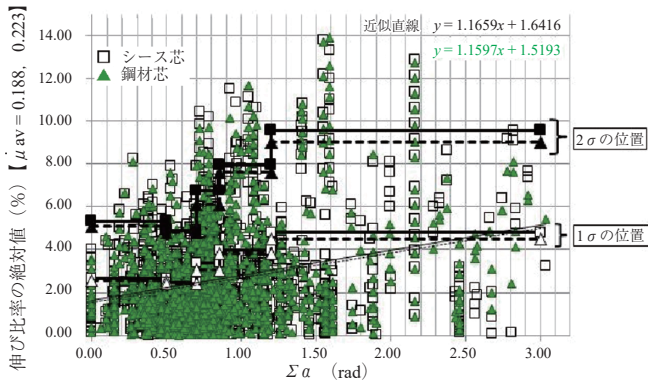


図 - 10 伸び比率（絶対値）と $\Sigma\alpha$ の関係性と各グループの σ , 2σ の位置

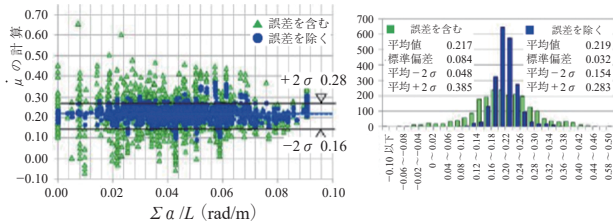


図 - 11 μ から誤差を取り除いた後のバラツキ

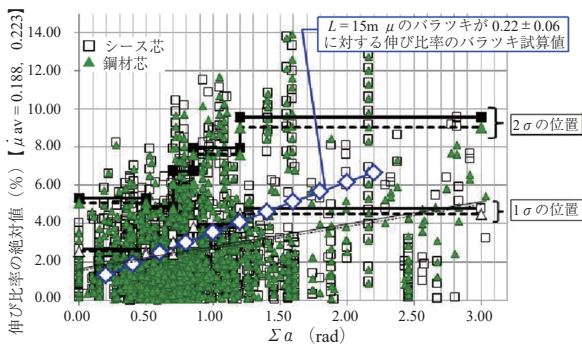


図 - 12 μ のバラツキが伸び比率の変動に与える影響

4. 提案する緊張管理手法

4.1 基本方針

PC 鋼材の緊張にあたっては、以下を基本方針として管理することとした。

- ・ PC 鋼材はおのおのに所定の初引張力が与えられるように緊張する。
- ・ PC 鋼材に与える引張力は、PC 鋼材の伸びにより確認する。
- ・ PC 鋼材の伸び計算に使用する諸係数および実測伸びの許容範囲は、緊張管理実績データの分析結果により定めた値とする。

4.2 PC 鋼材各位置の引張力の計算

PC 鋼材各位置における摩擦損失後の PC 鋼材引張力は下式により計算する。

計算式

$$P_x = P_0 e^{-(\dot{\mu} \alpha x + \dot{\lambda} l x)}$$

(記号)

P_x : 緊張端から x の位置における PC 鋼材引張力 (N)

P_0 : 緊張端における PC 鋼材引張力 (N)

$\dot{\mu}$: PC 鋼材の角度変化に対する摩擦係数 (1/rad)

α_x : 緊張端から x の位置までの PC 鋼材の全角度変化 (rad)

$\dot{\lambda}$: PC 鋼材の単位長さあたりに対する摩擦係数 (1/m)

l_x : 緊張端から x の位置までの PC 鋼材の全長さ (m)

摩擦係数「 $\dot{\mu}$ 」については角度変化の計算方法により使い分けることとした。

①角度変化をシース芯で計算する場合。

$$\dot{\mu} = 0.18 \text{ (1/rad)}$$

②角度変化を鋼材芯で計算する場合

$$\dot{\mu} = 0.22 \text{ (1/rad)}$$

摩擦係数「 $\dot{\lambda}$ 」については角度変化の計算方法に関わらず一定とした。

$$\dot{\lambda} = 0.0035 \text{ (1/m)}$$

なお、角度変化の計算については本手引きの方法によることとした。

4.3 PC 鋼材伸び量の計算

PC 鋼材の伸び量は各反曲点間の伸び量をそれぞれ計算して、それらを合計したものを全伸び量とした (図 - 13)。

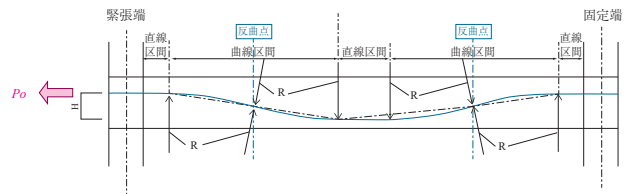


図 - 13 全伸び量の計算方法

伸び量計算式は以下とした。

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A_p \cdot E_p'}$$

ΔL : 伸び量 (mm)

P : PC 鋼材の緊張力 (N)

L : PC 鋼材の長さ (mm)

A_p : PC 鋼材の断面積 (mm²)

E_p' : PC 鋼材の見掛けのヤング係数 (N/mm²)

PC 鋼材の見掛けのヤング係数は分析結果より以下の値とした。

$$E_p' = 190 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$$

4.4 PC 鋼材伸び量の管理幅

PC 鋼材の計算伸びに対する実測伸びの誤差は $\pm 7\%$ 以内を標準とする。 $\pm 7\%$ はデータ分析結果より得られた伸び量の度数分布における $\pm 2\sigma$ に相当する。これは偶然のバラツキのみが生じる安定した状態において、確率として 95% が正しく緊張されたとみなせる管理幅である。

4.5 設計緊張力の確保

PC 鋼材の伸び量と固定端引張力是一对一に対応している。したがって、実測伸びが設計時の μ および λ で計算した伸び (以下、設計伸び) 以上であれば、固定端において

も設計導入力が確保されていると判断できる。

4.6 緊張管理の手順

以下に PC 鋼材の各位置で設計緊張力を確保するための緊張管理の手順を示す。

(1) 伸び管理用の基準伸びの計算

データ分析結果から得られた諸係数 ($\dot{\mu}$, $\dot{\lambda}$, E_p') を使用して、伸び管理用の基準伸びを以下に示す手順にて計算する。

- ① 設計図または仕様書で初引張力を確認する。
- ② 各工法のマニュアルなどでジャッキ内部の摩擦損失およびキャリブレーション表を確認して作業緊張力を決定する。
- ③ 本手引きで示した、データ分析結果から得られた諸係数により、PC 鋼材の伸び量 ($\Delta L1$) を計算する。

(2) 設計伸び量の計算

構造設計で使用された諸係数 (μ , λ , E_p') を使用して、前項と同じ要領で設計伸び量 ($\Delta L2$) を計算する。

(3) 緊張管理グラフの作成

以下の要領で緊張管理グラフを作成する (図 - 14)。

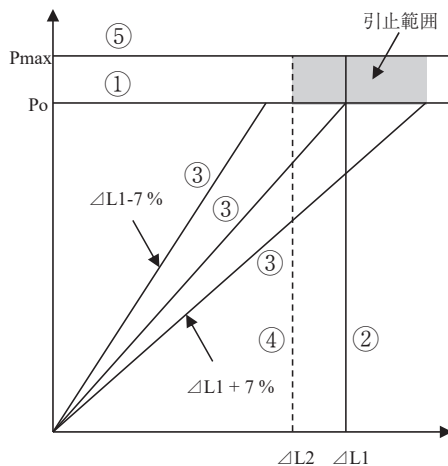


図 - 14 本手引きによる伸び管理の方法

- ① 作業緊張力 P_0 のラインを引く。
- ② 伸び管理用の基準伸び ($\Delta L1$) のラインを引く。
- ③ $\Delta L1$ に対して $\pm 7\%$ の管理ラインを引く。
- ④ 設計伸び ($\Delta L2$) のラインを引く。
- ⑤ P_{max} を適宜設定して引止範囲を決定する。

(4) 実測伸びの測定

- ① 各緊張段階の実測伸びをグラフにプロットして管理範囲内 ($\Delta L1 \pm 7\%$) であることを確認する。
- ② 作業緊張力 P_0 において実測伸びが管理範囲内 ($\Delta L1 \pm 7\%$) かつ設計伸び ($\Delta L2$) 以上であることを確認する。
- ③ 作業緊張力 P_0 において実測伸びが設計伸び ($\Delta L2$) 以下の場合は、実測伸びが $\Delta L2$ のラインを超える範囲まで引き越す。

5. おわりに

データ分析から明らかになったように、角度変化量が小さい範囲では現行の PC 規準の手法でも十分に管理できるが、角度変化量が大きくなるにつれて現行の手法では適正な管理は困難になってくる。したがって、角度変化量の大小によって適切な管理手法を使い分けることが望ましいと考える。

なお、本手引きの付録には詳細なデータの収集結果と分析結果を収録しているので緊張管理の際の参考にしていたければ幸いである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 3) 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工事における緊張管理の手引き (建築編), 2019

【2021年4月22日受付】



新刊案内

プレストレストコンクリート技術 2021年7月 (PC 技士試験講習会テキスト)

別冊として、過去5年間のPC 技士試験問題、正解および解説を掲載しています。

現金書留または郵便普通為替にてお申込みください。

定 価 6,111 円 (税込) / 送料 500 円

会員特価 5,000 円 (税込) / 送料 500 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会