

# 建築における緊張管理に関する一考察

吉永 健治\*

建築における緊張管理は、プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説（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（JASS5）に基づいて行われている。現行 PC 規準に示される 5% の伸び管理は、1975 年改訂版から示されているものであり、緊張計算に用いられている各係数の値も含め、その妥当性についてこれまでも議論が行われてきた。

本稿では、建築における緊張管理手法の変遷を振り返るとともに、実績データの分析を行い、合理的な緊張管理手法を検討した結果について報告する。

キーワード：ポストテンション方式、緊張管理、見掛けのヤング係数、摩擦係数

## 1. はじめに

建築における緊張管理は、日本建築学会発刊の PC 規準<sup>1)</sup> および JASS5<sup>2)</sup> において PC ケーブル 1 本ごとの伸び管理が示され、管理限界値を 5% としている。しかしながら、実際の現場においては、計算伸び量よりも実測値が伸びすぎる傾向がみられ、5% の管理範囲に入らないケースが少なくない。こういった場合、現状では JASS5 の記述に基づき計算仮定値の見直しなどを行って対処している。なお、PC 規準における緊張管理の管理限界や計算仮定値の妥当性については、建築学会の委員会においても議論されてきた<sup>3, 4)</sup>。このような背景のもと JASS5（2015 年版）では、従来の「5% 以上にならないように」の表記から、「5% を標準として管理する」と表現の緩和が行われている。しかしながら、実績データを基に 5% の妥当性を検証した例はいまだなく、建築における緊張管理の妥当性は課題として残されたままである。

本研究報告は、ポストテンション方式グラウト工法で鋼製シースを用いた PC 鋼より線を対象として、建築における緊張管理の変遷および既往の研究を振り返り、現場の実績データを分析することにより現状の緊張管理に用いられる各種数値の妥当性を検討し、合理的な管理手法について一提案を行うものである。なお、本研究報告ではプレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針

（案）・同解説については言及しない。

## 2. 緊張管理の変遷と海外における摩擦係数

### 2.1 5% 管理の変遷

PC 規準は 1961 年に第 1 版が制定され、1975 年、1987 年、1998 年に改訂され、現在は第 4 版が運用されている。緊張管理については、導入応力の管理と題して記載されており、1961 年版では 5% 管理の規定はなく、解説中に「抜け出し長さの計算値と実測値の差は通常 5% 以下にとどまる例が多い」と記されている。また、ACI (American Concrete Institute) 規準案と土木学会規準案が紹介されており、そのうち ACI 規準案については「5% くらいくいちがいを生じたときは責任技術者の指示をまつように規定されている」と記されている。1975 年版では、現行とほぼ同様の記述が行われ、5% 管理が規定されている。さらに 1987 年版では  $\mu$  管理が追加され、現在に至っている。

ここで土木の世界に目を向けると、土木の緊張管理の考え方が議論されるようになったのは 1960 年頃からで、1970 年までの間に緊張管理、とくに  $\mu$  管理に関する研究論文が発表され、1973 年のプレストレストコンクリート道路橋施工便覧において規準として確立している<sup>5)</sup>。土木における緊張管理手法の確立に至る経緯は明瞭であるが、建築ではその間の論文発表がないことも含め不明確である。1960 年当時は、具体的な数値をあげている海外の規準が ACI とフランス国鉄の 5% 管理の二例ぐらいのものであった<sup>6)</sup>とされており、PC 規準における 5% の管理値は、ACI 規準案を参考に決められたと推測する向きもある。ただし、当時の ACI 規準の 5% 管理はプレテンション部材の実績から求められたものであり、現在はポストテンション方式に対応するかたちで 1989 年に改訂され、7% となっている<sup>7)</sup>。

### 2.2 見掛けのヤング係数の変遷

1961 年版の PC 規準では見掛けのヤング係数の概念がなく、構造計算に用いる値も緊張計算に用いる値も同じく  $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  となっている。1975 年版では、PC 鋼材



\* Kenji YOSHINAGA

(株)ピーエス三菱  
PC建築部

のヤング係数は  $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、見掛けのヤング係数は PC 鋼棒  $2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、鋼線束  $1.95 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、鋼より線束  $1.90 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  になり、1987 年版でも同じ値が用いられている。1991 年版第 1 刷では SI 単位系に変わり、PC 鋼材のヤング係数は  $200 \text{ kN/mm}^2$  に、見掛けのヤング係数は PC 鋼棒  $200 \text{ kN/mm}^2$ 、鋼線束  $195 \text{ kN/mm}^2$ 、鋼より線束  $190 \text{ kN/mm}^2$  となり、SI 単位への換算は  $\times 10$  換算で行われている。これが 1991 年版第 2 刷では、PC 鋼材のヤング係数は PC 鋼より線  $195 \text{ kN/mm}^2$ 、PC 鋼線・PC 鋼棒などは  $200 \text{ kN/mm}^2$  となるが、見掛けのヤング係数は 1991 年版第 1 刷と同じままである。1991 年版第 2 刷における変更は、鉄筋のヤング係数にあわせて SI 単位への換算を  $\times 9.8$  換算としているものと考えられるが、土木では PC 鋼より線の見掛けのヤング係数は  $185 \text{ kN/mm}^2$  が用いられており<sup>8)</sup>、PC 規準における PC 鋼より線の見掛けのヤング係数のみ  $\times 10$  換算で取り残されたかたちとなっている。SI 単位が導入されて以降、緊張管理において従来よりも伸びぎみの傾向にあるといわれるのは、この換算の問題に起因していると考えられる。

### 2.3 摩擦係数の変遷

PC 規準 1961 年版では摩擦係数について解説文において、「実際に使用するものについて実験を行って、その値を求めておくのがぞましい。しかし、実際上は実験を行うことがきわめて困難なことが多い」とし、普通の場合の値として  $\mu = 0.30$ 、 $\lambda = 0.005$  が示されている。

1975 年版では、本文において「摩擦係数  $\mu$  および  $\lambda$  の値は、従来のデータを検討して用いるか、実験の値を用いる」とし、解説文において「各工法のマニュアルに示されている値を用いてよい」として、各工法設計施工指針による  $\mu$ 、 $\lambda$  の値が示されている。各工法とも PC 鋼より線の場合、 $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$  で共通した値になっている。当時の各工法指針（案）は土木学会コンクリート委員会 PC 工法小委員会にて審議され、土木学会のコンクリートライブラリーとして発刊されている。これは 1961 年改訂の土木学会プレストレストコンクリート設計施工指針に基づいて審議されたものであり、同指針の  $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$  が各工法指針の値になっていると考えられる。

1987 年版以降は、解説文において、「通常のシーすを用いた場合は表に示す摩擦係数を用いてよい」として、 $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$  が採用されている。

### 2.4 海外における摩擦係数

海外の規準において用いられている摩擦係数  $\mu$ 、 $\lambda$  の値を表 - 1 に示す。使用材料の違いや管理手法の違いがあるため単純に比較することはできないが、海外で用いられている摩擦係数  $\mu$  は  $0.15 \sim 0.25$  程度で、 $\lambda$  の値は  $0.00066 \sim 0.0066$  と大きい幅があるが、PC 規準の  $0.004$  よりもおおむね小さい値が採用されている。日本では建築、土木ともに構造計算上安全側になるよう摩擦係数を大きく設定するという設計上の配慮が根底にあると思われる。

### 2.5 緊張管理の課題

緊張管理に用いられている 5% の管理値や摩擦係数  $\mu$ 、 $\lambda$  の値は、建築独自の特性を考慮して実験などにより定め

表 - 1 海外における摩擦係数の値<sup>9)</sup>

| 規準・指針等                                   |             | 摩擦係数                        |                             |
|--|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  |             | $\mu$ (rad)                 | $\lambda$ (m)               |
| ACI 318-08                               | ACI 2008    | 0.16-0.25                   | 0.0016-0.0066               |
| ACI 318-14                               | ACI 2014    | 指定なし                        | 指定なし                        |
| Bridge design manual                     | PCI 2011    | 0.20                        | 0.00066                     |
| Post-tensioning manual                   | PTI 2006    | 0.14-0.22<br>推奨値 0.18       | 0.0010-0.0023<br>推奨値 0.0016 |
| AASHTO LRFD Bridge design specifications | AASHTO 2014 | 0.15-0.25                   | 0.00066                     |
| BS 8110                                  | BSI 1997    | 0.20, 0.25, 0.30<br>(錆に応じて) | 0.0033 以上                   |
| Eurocode 2                               | CEN 2002    | 0.19                        | 0.00095-0.0019              |
| CEB-FIP model code                       | CEB 1993    | 0.19                        | 0.00095-0.0019              |
| fib model code for concrete structures   | fib 2013    | 0.16-0.20                   | 0.0008-0.002                |
| コンクリート標準示方書                              | JSCE 2012   | 0.30                        | 0.004                       |
| PC 規準                                    | AII 1998    | 0.25                        | 0.004                       |

られた数値ではなく、参考となる指針により定められてきた経緯があると考えられる。しかし、参考にしたと考えられる指針は技術の発展や研究の成果によって改訂されてきており、これらの数値の妥当性は改めて考える必要がある。

## 3. 緊張管理の目的

PC 規準においては、「緊張材はそのおのおのの所定の初引張力が与えられるように緊張しなければならぬ」とされており、「プレストレッシングは、プレストレストコンクリートの施工におけるもっとも重要な作業であり、導入応力の管理は決してゆるがせにできない」とあるが、それが伸び管理によりどのように達せられるかは述べられていない。文献 5) においては、緊張管理では次の二点を確認する必要があるとしている。一つ目は、構造物の安全性を確保するための「所定のプレストレスの導入」であり、二つ目は品質を安定確保するための「作業安定性の確保」である。建築における緊張管理では端部の初緊張力を指標としてプレストレス力の導入確認を行っている。しかしながら、「所定のプレストレスの導入」、「作業安定性の確保」という観点からは必ずしも十分とはいえない。土木においては 1 本ごとの PC ケーブルの緊張管理として  $\mu$  管理を用いて、設計着目点におけるプレストレス力が不足しないように引止め線を工夫した管理が行われている。またグループ管理を併用し、統計的に管理することで作業安定性を確保している。もちろん建築においては、複雑な架構になる場合が多く、土木の手法をそのまま用いることは困難であるが、所定の品質を確保するという観点から適切な管理がなされなければならない。

緊張時の測定値は種々の誤差により変動する。いわゆる誤差変動である。緊張管理における誤差変動は一般的に 2 種類に分けて考えられており、材料特性や施工誤差などのランダムな誤差によりある確率で生じる変動を偶然誤差による変動といい、緊張機器の故障などにより生じる誤差を異常誤差による変動という。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である<sup>5)</sup>。緊張計算に用いた摩擦係数などの仮定値と実際値の乖離も早期に取り除く必要のある異

常誤差といえる。

これらの誤差を考慮したうえで所定のプレストレスが導入される必要があり、また誤差変動は一定の範囲内で安定していなければならない。

#### 4. 誤差分布の推定

##### 4.1 測定誤差

緊張管理における計測値には種々の誤差変動が存在するが、これらの誤差の分布性状を把握しなければ、それを管理することは困難である。PC 規準で誤差の大きさが示されているのは、圧力計の誤差と伸び測定値の誤差の2点である。圧力計の誤差については、圧力計を0.5級のものとした場合、測定精度として2%程度が期待できることが記されている。しかし、この記述は計器そのものの誤差について記されているものと考えられ、通常50MPa程度の圧力計示度に対し最小目盛り1MPaの圧力計を使用していることから、測定値の読みの誤差だけで2%の誤差となりえる。

また、伸びの測定については、緊張材の長さが10m以上の場合、最小目盛り1mmのスケールを用いて最終伸び量の $\pm 1 \sim 2\%$ の精度が得られるとされている。総伸び量が50mmであれば1mmの測定誤差で2%であるから、伸び量の測定そのものは2%以下に収まるものと考えられる。

##### 4.2 見掛けのヤング係数

PC 規準ではPC鋼より線のヤング係数について、鋼材が本来もっているヤング係数 $E_p = 205 \text{ kN/mm}^2$ 、試験成績表におけるヤング係数 $E_p = 195 \text{ kN/mm}^2$ 、現場の伸び測定から求められる見掛けのヤング係数 $E_p' = 190 \text{ kN/mm}^2$ の3段階で数値を示している。それと同時に、「PC鋼材の抜出し量から求めた見掛けのヤング係数は、通常、試験成績表の値より低い値となる」としている。この記述は1975年版から記載されており、1960年代の研究の成果が反映されたものと推測されるが、当時の研究はPC鋼線に対するものが主流であり、PC鋼より線についてのデータはほとんどない。

近年の研究として、文献5)に各種のPC鋼より線の試験成績表に記録されたヤング係数についての調査結果が示されている。鋼材種類により多少の差はあるもののヤング係数の平均値は192~193kN/mm<sup>2</sup>程度であり、3 $\sigma$ の分布範囲は3%程度になっている。また同文献5)では、71件の試験緊張データ収集結果が一覧表として示されており、このうちアンボンドおよびプレグラウトならびにポリエチレンシースのデータを除いた65件、588本のヤング係数の測定結果の平均値は193.1kN/mm<sup>2</sup>となる。この結果から、試験緊張から求められる見掛けのヤング係数が試験成績表の値よりも小さくなることは認められず、試験成績表のヤング係数と現場における試験緊張で求められる見掛けのヤング係数にはほとんど差がないといえる。

##### 4.3 摩擦係数

見掛けのヤング係数と同様に文献5)の上記65件、588本の試験緊張データから摩擦係数 $\mu'$ の平均値を求めると、その値は0.152となる。試験緊張における摩擦係数には $\lambda$

の影響が含まれており単純な比較はできないが、PC規準に示される $\mu = 0.25$ とは大きく異なることが分かる。PC鋼材の抜出し量から見掛けのヤング係数を求めようとするとき、 $\mu = 0.25$ を使用して計算を行うと見掛け上ヤング係数は小さく計算されることになり、「見掛けのヤング係数は、通常、試験成績表の値より低い値となる」原因は、摩擦係数の仮定上の問題が主要因であることが推測される。

摩擦係数による誤差としては、文献10)で誤差要因として示される摩擦損失値および応力分布があり、それぞれの最大誤差は2.5%、2.0%と考えられている。

##### 4.4 管理図における誤差分布の推定

いかなる誤差も存在しない場合に初緊張力 $P_0$ で $\Delta L$ の伸び量になるとすると、荷重と伸び量の関係は図-1に示す直線OAとして表される。管理図における誤差はA点を中心とした分布になり、種々の誤差変動は伸び量と圧力の誤差として表現されることになる。

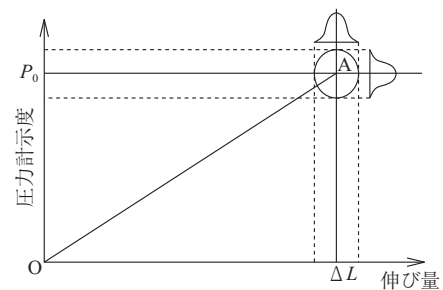


図 - 1 管理図における誤差の分布

文献10)には、伸びと荷重間の誤差要因とその大きさについて記されており、その値と前節までに述べた誤差の大きさを比較してみる。文献10)におけるPC鋼材の断面積およびヤング係数に起因する誤差は、それぞれ1%、2%であり、試験成績表のヤング係数のばらつき約3%と一致している。伸びの測定誤差2%についても同様である。圧力の誤差は、文献10)では最大3%となっており、PC規準に示されている2%よりも多少高い値となっている。摩擦係数に関する誤差については前節においても文献10)を参考として記したが、ここでは $2.5\% + 2.0\% = 4.5\%$ のうち、3.5%を配線特性による摩擦誤差、1.0%を施工精度による摩擦誤差と仮定する。これらの誤差数値をまとめると表-2のようになる。

表 - 2 誤差要因とばらつきの仮定

| 誤差要因  |         |             | ばらつきの大きさ (%) |     |
|-------|---------|-------------|--------------|-----|
| 伸びの誤差 | 材料特性に起因 | PC鋼材の断面積    | 1.0          | 3.0 |
|       |         | PC鋼材のヤング係数  | 2.0          |     |
|       | 測定誤差    | 伸びの読み       | 1.5          | 2.0 |
|       |         | 応力ひずみ直線     | 0.5          |     |
| 圧力の誤差 | 配線形状に起因 | 配線特性による摩擦誤差 | 3.5          | 3.5 |
|       |         | 施工精度による摩擦誤差 | 1.0          |     |
|       | 測定誤差    | 荷重計示度の読み    | 2.0          | 3.0 |

表-2に示した各誤差の関係性について考える。たと



えば、材料特性に起因する誤差は3%であるから、2.9%の誤差をもつPC鋼材が現場に搬入されることは稀にしか存在しないと考えられる。しかし、その現場において搬入されたPC鋼材がすべて同一コイルから取り出されたPC鋼材であれば、2.9%の誤差をもつことは稀な状態ではなく、この現場においてはむしろ標準といえる。緊張作業時の測定誤差はこのこととは関係なく発生することを考えると、材料特性に起因する誤差と測定誤差はそれぞれ独立したものとイえる。配線形状に起因する誤差についても同様のことが考えられる。ある特定の配線が決定された時点で摩擦損失のおおむねの値は決定しており、同一の配線形状のグループ内であれば、施工精度分のみがばらつきとして現れるはずである。これらを考慮して、表-2のばらつきを管理図に表現すると、図-2のように表すことができる。

従来の伸び管理では、圧力の誤差はないものとして管理グラフが作成されるため、図-3に示すように見掛け上伸びの誤差が大きくなる。

## 5. 緊張データの調査・分析

### 5.1 調査概要

前章に示した各係数の適正值、誤差の分布性状を把握す

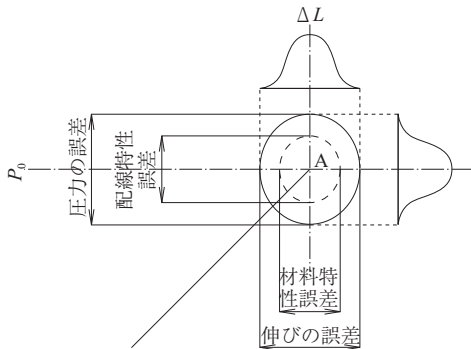


図-2 伸びの誤差と圧力の誤差の分布

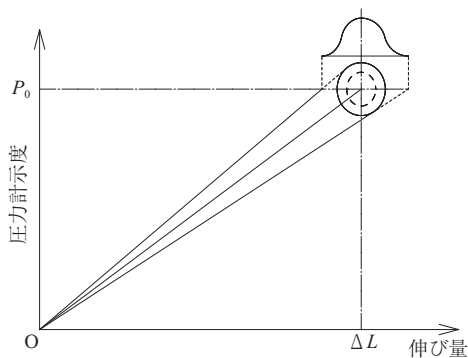


図-3 伸び管理における誤差の分布

ることを目的として、緊張管理の実績データの調査を行った。調査の対象は建築工事における梁部材で、ポストテンション方式グラウト工法のマルチストランドケーブルで、定着工法はVSL工法である。調査を行ったPC鋼より線の構成を表-3に示す。調査は表-4の書式を用い、14物件70グループ399本のPCケーブルのデータを集めた。

PCケーブルの配線形状から決定される各グループの形状特性は図-4、図-5に示すとおりである。収集データの形状特性は、ケーブル長が長くなると、全角度変化は大きくなる傾向があるが、単位長さあたりの角度変化（以降、これを角度変化率と記す）にはこのような傾向はない。

### 5.2 見掛けのヤング係数の分布

緊張データの分析には式(1)~(3)を用いた。平均引張力は、試験緊張から見掛けのヤング係数を求める場合と同様に、相乗平均を用いた式(2)により求めることとした。両引きケーブルにあつては $a/2$ 、 $L/2$ 、 $\Delta L/2$ の片引きケーブルと同じものとして扱っている。

表-3 調査鋼材

| 鋼材種類    | PCケーブル数 | 鋼材種類     | PCケーブル数 |
|---------|---------|----------|---------|
| 5S12.7B | 6       | 9S12.7B  | 64      |
| 6S12.7B | 24      | 10S12.7B | 50      |
| 7S12.7B | 94      | 12S12.7B | 87      |
| 8S12.7B | 52      | 12S15.2B | 22      |
|         |         | 合計       | 399     |

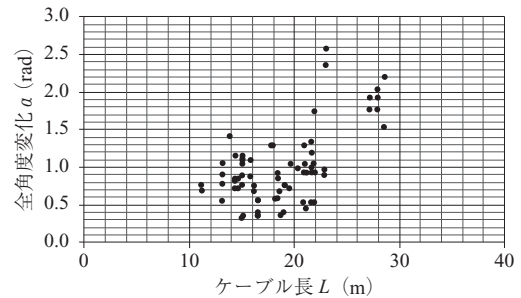


図-4 ケーブル長と全角度変化の関係

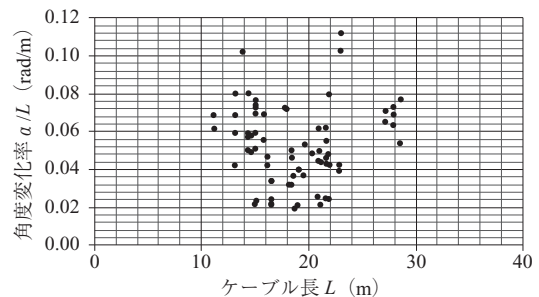


図-5 ケーブル長と角度変化率の関係

表-4 緊張データ調査書式

| No. | PC鋼材種類  | 片引き<br>or<br>両引き | 鋼材断面積<br>A (公称)<br>mm <sup>2</sup> | 初緊張力<br>P <sub>0</sub><br>kN | 全角度変化<br>α<br>Rad | ケーブル長<br>L<br>m | 伸び量<br>ΔL<br>mm |
|-----|---------|------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| 1   | 7S12.7B | 片引き              | 691                                | 874                          | 1.15197           | 14.312          | 84              |
| 2   | 7S12.7B | 片引き              | 691                                | 874                          | 1.15197           | 14.312          | 88              |
| .   | .       | .                | .                                  | .                            | .                 | .               | .               |

PC ケーブル伸び量：
$$\Delta L = \frac{P_{ave} \cdot L}{E_p' \cdot A_p} \quad (1)$$

平均引張力：
$$P_{ave} = \sqrt{P_0 \times P_x} \quad (2)$$

固定端引張力：
$$P_x = P_0 \cdot e^{-(\mu a + \lambda L)} \quad (3)$$

ここに、 $P_0$ ：緊張端初引張力

最初に、構造計算で通常使用している  $\mu = 0.25$ ,  $\lambda = 0.004$  を用いて伸び量データから見掛けのヤング係数を求め、各グループの見掛けのヤング係数の平均値を縦軸に、角度変化率を横軸にプロットしたグラフを図 - 6 に示す。各グループの PC ケーブル数が十分に多い場合、ランダムにばらつく測定誤差の平均値は 0 に近づくが、PC ケーブル本数が少ない場合、測定誤差は見掛けのヤング係数の誤差となって現れる。この影響を考慮するため、図 - 6 ではグループの PC ケーブル数が 6 本以上とそれ未満のグループに分けたプロットを行っている。図から PC ケーブル数が少ない場合ばらつきが大きくなっていることがうかがえる。

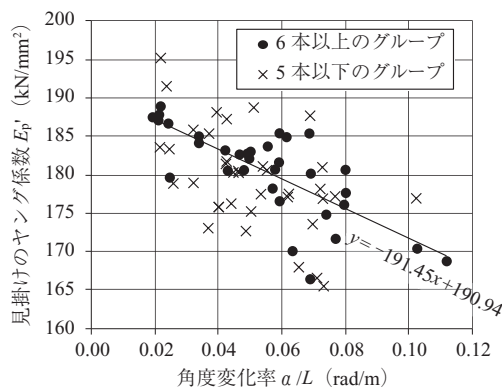


図 - 6 見掛けのヤング係数の分布

6 本以上のグループに着目してみると、角度変化率が大きくなると、見掛けのヤング係数は小さくなり、数値的にも試験成績表の平均的な値  $E_p = 192 \sim 193 \text{ kN/mm}^2$  から大きく外れてくる。PC ケーブル本数が 6 本以上のグループの近似直線は図 - 6 内に示されている式で表されるが、その切片、つまり角度変化  $a = 0$  の場合における見掛けのヤング係数の推定値は  $190.94 \text{ kN/mm}^2$  となっており、これは試験成績表の平均的な値より若干低い近似的な値である。

ヤング係数は本来材料の特性値であり、配線形状の特性などによりヤング係数が変動するのは見掛け上のものである。今回の調査結果のように、角度変化率といった配線形状に応じて見掛けのヤング係数が変動していく管理手法は妥当とは考えにくい。既往の研究<sup>5)</sup>における試験緊張データや試験成績表の値と照らし合わせても、緊張管理に用いる見掛けのヤング係数  $E_p'$  の適正值は  $192 \text{ kN/mm}^2$  程度で一定と考えるべきである。ただし、部材短縮が大きい場合はその短縮量を測定値から差し引くなどの考慮が必要である。

### 5.3 摩擦係数の分布

緊張計算に用いられる仮定値は、摩擦係数  $\mu$ ,  $\lambda$  および

見掛けのヤング係数  $E_p'$  である。このうち見掛けのヤング係数を  $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  程度で一定として管理するのであれば、未知である仮定値は摩擦係数  $\mu$  および  $\lambda$  の二つとなる。この摩擦係数の適正值および分布性状を知るために、式 (3) を角度変化率を用いて評価できる式 (4) に変換した。

$$P_x = P_0 \cdot e^{-L(\frac{\mu a}{L} + \lambda)} \quad (4)$$

図 - 7 は、調査全 PC ケーブルのプロット図で、縦軸に式 (4) の括弧内の  $\mu a/L + \lambda$  をとり、横軸に角度変化率  $a/L$  をとったものである。また、図 - 8 は各グループの平均値をプロットしたものである。縦軸に示される  $\mu a/L + \lambda$  は、角度変化による摩擦を考慮した単位長さあたりの摩擦になる。

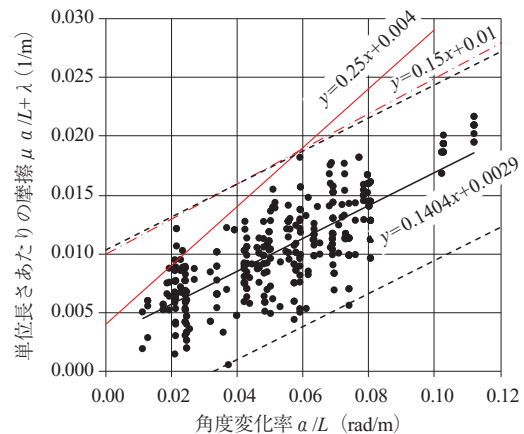


図 - 7  $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  の場合の摩擦係数の分布 (1)

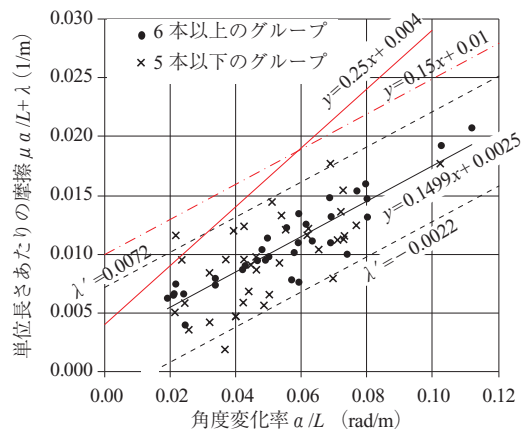


図 - 8  $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  の場合の摩擦係数の分布 (2)

図 - 8 は、角度変化率が大きくなると単位長さあたりの摩擦が大きくなることを示しており、その分布は直線性を示している。各グループの PC ケーブル数が 6 本以上のグループの平均値をプロットした近似直線は図 - 8 内に示す式となる。この直線式は  $y = \mu x + \lambda$  を意味しており、傾きが  $\mu$ 、切片が  $\lambda$  で表される。分布範囲をこの近似直線と並行の直線範囲と捉えれば、見掛け上は  $\mu$  が一定で全ての誤差が  $\lambda$  に集約された誤差分布を考えることができる。このとき変動値として扱われる  $\lambda$  は見掛け上の値であることから構造計算に用いる  $\lambda$  と区別して  $\lambda'$  と記すことにす

る。

見掛けのヤング係数  $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  とした場合、6本以上のグループの平均値から求められる摩擦係数  $\mu$  および  $\lambda'$  の値は、それぞれ  $\mu = 0.1499$ 、 $\lambda' = 0.0025$  である。この数値に対する測定誤差による影響は小さいと考えられるので、見掛けのヤング係数の誤差が与える影響について考えてみる。図 - 8 と同様の手法で、見掛けのヤング係数  $E_p'$  の値を変えた場合の近似直線から求められる摩擦係数を表 - 5 に示す。見掛けのヤング係数の変動が摩擦係数に与える影響は、 $\mu$  に対してはある程度範囲が限定されるのに対し、 $\lambda'$  に対しては大きな幅をもっている。

表 - 5 見掛けのヤング係数  $E_p'$  と摩擦係数の関係

| $E_p'$ の意味合い    | 見掛けの $E_p'$ (kN/mm <sup>2</sup> ) | 摩擦係数          |                  |
|-----------------|-----------------------------------|---------------|------------------|
|                 |                                   | $\mu$ (1/rad) | $\lambda'$ (1/m) |
| 上限 (192 × 1.03) | 197.76                            | 0.1519        | -0.0011          |
| 想定適正值           | 193.00                            | 0.1503        | 0.0019           |
|                 | 192.00                            | 0.1499        | 0.0025           |
| PC 規準値          | 190.00                            | 0.1492        | 0.0038           |
| 下限 (192 × 0.97) | 186.24                            | 0.1479        | 0.0063           |

これらのデータより、 $\mu$  の適正值は 0.15 程度、 $\lambda'$  は 0.002 ~ 0.003 程度と考えられる。 $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  とした場合、6本以上のグループから求められる  $\lambda'$  の標準偏差  $\sigma\lambda'$  は  $\sigma\lambda' = 0.0016$  であり、図 - 8 の破線で示される  $3\sigma\lambda'$  のばらつき範囲は  $\lambda' = -0.0022 \sim 0.0072$  である。同様に全 PC ケーブルに対する  $\lambda'$  の標準偏差は  $\sigma\lambda' = 0.0025$  であり、図 - 7 の破線で示される  $3\sigma\lambda'$  のばらつき範囲は  $\lambda' = -0.0046 \sim 0.0104$  であった。

緊張管理における  $\lambda'$  のばらつきの大きさは、実際にはケーブル長  $L$  の影響を受ける。 $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$ 、 $\mu = 0.1499$  とした場合の実測伸びから求められる  $\lambda'$  のばらつきを長さ  $L$  を指標として分布図に表すと図 - 9 のようになる。

図 - 9 における  $P_x$  : 5% ラインは長さ  $L$  地点における引張力  $P_x$  に対する誤差 5% のラインで、 $P_{ave}$  : 5% は平均引張力に対する誤差 5% のラインである。3 $\sigma$  ラインは、次節に示す計算伸びに対する実測伸びのばらつき 3 $\sigma$  の範囲を示しており、3 $\sigma = 6.57\%$  のラインである。見掛けの

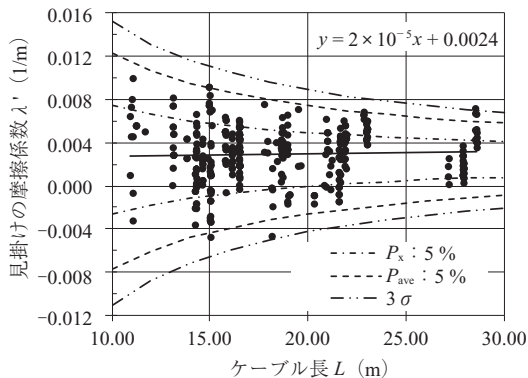


図 - 9 見掛けの  $\lambda'$  の分布

$\lambda'$  の分布は、これらの曲線と同様の分布性状を示しており、ケーブル長  $L$  が短いほどばらつきが大きくなっている。

#### 5.4 伸び管理上の測定伸びの分布

今回想定した見掛けのヤング係数  $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$  に対応する  $\mu = 0.1499$  および  $\lambda' = 0.0025$  を用いて緊張計算を行った場合の計算伸び量に対する実測伸び量の関係を図 - 10 のヒストグラムに示す。

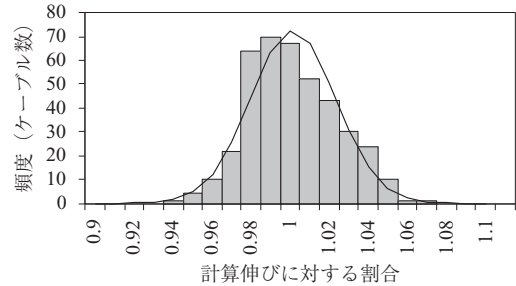


図 - 10 計算伸び量と実測伸び量の関係

計算伸びに対する 3 $\sigma$  の分布は 6.57% であった。これは、あらかじめ平均値を知っていても 5% 管理が困難であり、計算仮定値がいかに重要であることを示している。今回の調査データからは ACI における 7% 管理は概ね実績データに即した値といえる。

また今回のデータにおいて、この 3 $\sigma$  から外れた PC ケーブルは 1 本であり、その確率は  $1/399 \times 100 = 0.25\%$  である。統計理論上 3 $\sigma$  から外れる確率は 0.27% であるから、このデータは必ずしも異常とはいえ、確率的に存在するものと考えられる。

#### 5.5 調査データから推測する誤差の分布

今回 399 ケーブルについて調査を行い、データ数としては十分であることから、施工誤差はほとんど網羅されていると思われる。一方、14 物件 70 グループのデータという点では、材料特性や配線特性による誤差はある程度限られた範囲のものであることは否めないが、今回得られたデータから誤差の分布を推定する。

伸び管理上の測定伸びの 3 $\sigma$  分布幅は 6.57% であった。これに材料特性や配線特性による誤差のブレがあったとしても、7% 程度の誤差に全体が収まっているものと考えられる。この誤差全体の分布は図 - 2 における外円の分布円に相当し、図 - 7 における 3 $\sigma\lambda'$  の分布範囲と同義である。また、図 - 2 における内円の分布円は、図 - 8 における 3 $\sigma\lambda'$  の分布範囲と概ね同義であると考えられる。全 PC ケーブルから求められる見掛けの  $\lambda'$  の標準偏差は 0.0025 であり、6本以上のグループから求められる見掛けの  $\lambda'$  の標準偏差は 0.0016 であることから、分布内円に対する分布外円の大きさは  $0.0025/0.0016 = 1.56$  倍程度と考えることができる。

これらを考慮して表 - 2 の誤差のばらつきを見直したものを表 - 6 に示す。

表 - 6 の誤差のばらつきから求められる分布外円の大きさは  $\sqrt{(4.5^2 + 5.5^2)} = 7.1\%$  であり、分布内円に対する

表 - 6 誤差要因とばらつき

| 誤差要因  |         |             | ばらつきの大きさ (%) |     |
|-------|---------|-------------|--------------|-----|
| 伸びの誤差 | 材料特性に起因 | PC 鋼材の断面積   | 1.0          | 3.0 |
|       |         | PC 鋼材のヤング係数 | 2.0          |     |
|       | 測定誤差    | 伸び, 応力ひずみ直線 | 1.5          | 1.5 |
| 圧力の誤差 | 配線形状に起因 | 配線特性による摩擦誤差 | 3.5          | 3.5 |
|       |         | 施工誤差による摩擦誤差 | 0.5          |     |
|       | 測定誤差    | 荷重計示度の読み    | 1.5          | 2.0 |

分布外円の大きさは  $\sqrt{(4.5^2 + 5.5^2)} / \sqrt{(3.0^2 + 3.5^2)} = 1.54$  倍である。

## 6. 構造計算に使用する摩擦係数について

### 6.1 現状の規準値について

調査データから得られた  $\mu$  および  $\lambda$  の平均値は, PC 規準の値よりも小さい値であり, PC 規準における摩擦係数  $\mu = 0.25$ ,  $\lambda = 0.004$  は, 構造計算上安全側に設定された数値と考えられる。しかし, 図 - 7 に示す  $y = 0.25x + 0.004$  のラインより上側にプロットされる PC ケーブルでは, 構造計算で用いる摩擦係数  $\mu = 0.25$ ,  $\lambda = 0.004$  よりも大きな摩擦損失となっている可能性があり,  $a/L$  が小さい場合  $\lambda = 0.004$  では必ずしも十分な安全率といえない。

また, 今回の調査で得た摩擦係数と従来から用いられてきた摩擦係数とで, 引張力にどのくらいの差が出るかを試算した結果を表 - 7 に示す。試算に用いた配線特性は, 今回のデータには含まれておらず, 摩擦損失が非常に大きくなる事例として設定したものである。調査平均値から求めた引張力は, 従来の摩擦係数  $\mu = 0.25$ ,  $\lambda = 0.004$  で計算した場合に比べ,  $L = 30$  m の位置では約 50%, 平均引張力にして約 23% 過緊張となっており, その影響は決して小さくない。

表 - 7  $L = 30$  m,  $a/L = 0.12$  の場合の引張力の比較

|        | 摩擦係数   |            | 引張力     |           |
|--------|--------|------------|---------|-----------|
|        | $\mu$  | $\lambda'$ | $P_x$   | $P_{ave}$ |
| 従来構造計算 | 0.2500 | 0.0040     | 0.361Po | 0.600Po   |
| 調査平均値  | 0.1499 | 0.0025     | 0.541Po | 0.735Po   |
| (仮)参考値 | 0.1500 | 0.0100     | 0.432Po | 0.657Po   |

PC 規準で示されている摩擦係数の値は, 今回の調査で得た実際の摩擦係数の分布性状とは大きく異なっている。単純に引張力が不足しないことに着目するのであれば, 図 - 7, 図 - 8 の一点鎖線で表した  $\mu = 0.15$ ,  $\lambda = 0.01$  というように,  $\lambda$  を大きくとる方がより合理的だと考えられる。またその場合, 表 - 7 に示すように実測データに対しても誤差の小さいものになる。

構造計算に用いる摩擦係数は, 実際の摩擦係数の分布に対し, ある一定の安全性を担保するようなものでなければならぬと考えられる。合理的な安全率を決めようとする場合,  $\mu$  を変動係数とするよりも  $\lambda$  を変動係数とする方が, 構造計算の精度は高くなると考えられる。

### 6.2 構造計算手法に関する提案

緊張管理において発生しうる誤差変動に対し, どのような状態においても構造計算で安全であることが確認されるのが理想であるが, その場合非常に広範囲の検討を行う必要が生じ, 実務上も現実的ではない。また, 構造計算自体がある一定の施工誤差を許容して成り立っていることを考えると全ての誤差変動に対して構造計算を行うことは合理的ではない。材料特性や配線特性から生じる誤差 (図 - 2 の分布内円) は施工管理でコントロールできるものではないため, これらの誤差に対しては構造計算で安全性を担保するべきであり, 施工誤差に対しては, 緊張管理における引止め線の工夫などにより施工管理上で安全性を担保することが望ましい。このような観点から分布内円を構造計算にて保証する手法について提案する。

構造計算に用いる引張力は, 縁応力度の検討に用いる各着目点の引張力と, 不静定力を算定する際に用いる平均引張力の二つを考える必要がある。縁応力度の検討上, 各着目点の引張力はそれが不足しないようにすることが望ましいが, 不静定力はより実情に合った値とするのが妥当と考えられる。今回の調査で得た摩擦係数の平均値から数値を整理した  $\mu = 0.15$ ,  $\lambda = 0.0025$  で構造計算を行えば, 不静定力は実情に近い値となるが, 各着目点では摩擦係数のばらつきにより引張力が不足する可能性が生じる。これに対し, あらかじめばらつき分の引張力を低減して縁応力度の安全性を確認しておけば, 引張力の不足は生じないことになる。実際の手法としては, 従来, 式 (5) で示される縁応力度に引張力の誤差に対する低減率  $\zeta$  を考慮した式 (6) を用いて, 縁応力度の追加検討を行う方法が考えられる。

$$\sigma = \frac{\eta \cdot P}{A} \pm \frac{\eta \cdot P \cdot e}{Z} \pm \frac{M}{Z} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\zeta \cdot \eta \cdot P}{A} \pm \frac{\zeta \cdot \eta \cdot P \cdot e}{Z} \pm \frac{M}{Z} \quad (6)$$

ここで, 低減率  $\zeta$  は誤差の分布内円を保証する低減率で, 引張力の誤差は  $\lambda'$  を分布変数として長さ  $L$  により変動する。今回の調査で得た分布内円の最大摩擦は  $\lambda' = 0.0072$  であり, 平均値は  $\lambda' = 0.0025$  である。横軸に着目点までの長さ, 縦軸にそれぞれの  $\lambda'$  から求められる引張力の比率を低減率としてプロットすると図 - 11 のようになる。

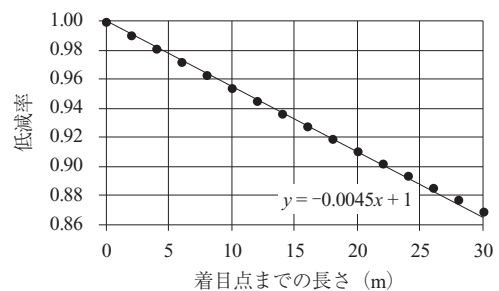


図 - 11 低減率  $\zeta$  とケーブル長との関係

各プロット点を簡易的に直線で表すと, 低減率  $\zeta$  は式 (7) のように表すことができる。



$$\zeta = 1 - 0.0045 \cdot L \quad (7)$$

このような低減率を用いて縁応力度の検討を行うことで、容易に各着目点の引張力を確保し、かつ実情に合った不静定力を計算することができる。ただしここでは、セト量の影響については無視している。

ここで、引張力に対する緊張管理誤差の影響について改めて考えてみる。表 - 6 に示した誤差の場合、1 ケーブルの平均引張力の誤差は最大で 7.1 % と考えることができる。構造計算に用いる引張力は一本の梁に配置されるすべての PC ケーブルの合計値であり、通常一本の梁には 2 ケーブル以上の PC ケーブルが配置されている。2 ケーブルの平均値の  $3\sigma$  分布範囲は、 $3\sigma/\sqrt{2} = 2.12\sigma$  であるから、一梁の引張力の平均値としては  $7.1/3 \times 2.12 = 5.02\%$  の誤差とみなすことができる。摩擦係数の値を分布平均値として平均引張力を求め、その平均引張力を用いて不静定力の計算を行えば、応力計算の精度は 5 % 程度の誤差となるはずで、これは許容応力度設計の応力計算としては十分な精度であるといえる。

## 7. 緊張管理手法について

緊張管理においても構造計算を行う場合と同様に、見掛けの  $\lambda$  を指標として管理する方がより合理的になると考えられる。ここでは、前章で示した構造計算手法を用いる場合についての緊張管理手法について提案する。先に示した構造計算手法では分布内円の範囲のばらつきに対して、低減率を考慮した縁応力度の検討を行うことで、各着目点での安全性確認を行っている。そのため構造計算で保証した  $\lambda = 0.0072$  (以降、保証  $\lambda$  と記す) 以下の範囲では、圧力計度を構造計算で設定した端部緊張力まで上げれば各着目点の引張力は不足しない。保証  $\lambda$  よりも摩擦が大きい範囲では、最遠着目点において保証  $\lambda$  と同等の引張力を保証するように引止め線を設けることで引張力の不足が生じないようにすることが出来る。これを管理図に表すと、図 - 12 に示す引止め線になる。

図 - 12 では、上下限ラインを計算伸び量に対する 7 % としている。これはおおむね  $3\sigma$  に相当するため、異常誤

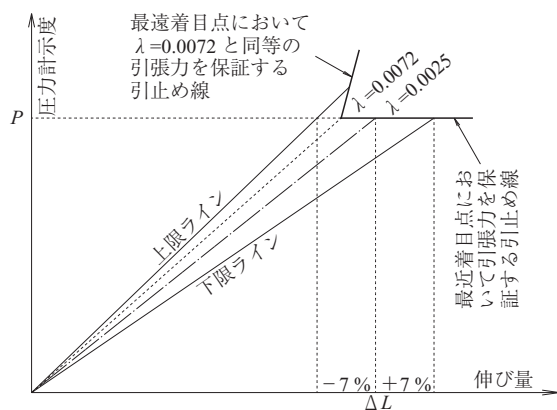


図 - 12 緊張管理における引止め線

差を発見しにくいという問題が生じる。したがってたとえば 5 % を超える場合は、異常の有無を確認したうえで合否の判断を行うなどの配慮が必要であり、またグループ管理を活用することも一つの手段として考えられる。

## 8. おわりに

既往の研究を振り返り、実際の緊張データを調査、分析した結果、およびそこから導き出された緊張管理手法、構造計算手法について下記にまとめる。

- (1) 緊張計算に用いる PC 鋼より線の見掛けのヤング係数は、 $192 \text{ kN/mm}^2$  程度が適切と考えられる。
- (2) PC 鋼より線のヤング係数のばらつきは、おおむね 3 % 程度であり、見掛けのヤング係数のばらつきもこれと同程度と考えられる。
- (3) 実績データから得られた摩擦係数  $\mu$  は 0.15 程度である。
- (4) 実績データから得られた見掛けの摩擦係数  $\lambda$  は、0.0025 程度と考えられるが、見掛け上大きな幅がある。
- (5) 伸び - 圧力関係の  $3\sigma$  のばらつきは 7 % 前後と考えられる。
- (6) 構造計算、緊張管理においては  $E_p$ 、 $\mu$  を固定値として、 $\lambda$  を指標とした方が合理的と考えられる。
- (7) 上記 (1) ~ (6) を基本に、保証  $\lambda$  を用いた構造計算および緊張管理の手法を提案した。

## 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, 1961, 1975, 1987, 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, 2009, 2015
- 3) 日本建築学会構造委員会プレストレストコンクリート構造運営委員会：2011 年度日本建築学会大会 (関東) 構造部門 (PC 構造) パネルディスカッション資料, 2011
- 4) 日本建築学会構造委員会プレストレストコンクリート構造運営委員会：2007 年度日本建築学会大会 (九州) 構造部門 (PC 構造) パネルディスカッション資料, 2007
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会耐久性部会プレストレスト保証 WG：プレストレストと緊張管理, 2011
- 6) 野口 功：プレストレストコンクリート橋梁特に鉄道橋におけるプレストレッシングの管理に関する研究, 土木学会論文集, Vol.102, pp.17-38, 1964
- 7) American Concrete Institute Committee 318 : Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, 2008
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ V コンクリート橋編, pp.348-349, 2012
- 9) Se-Jin Jeon, Sung Yong Park, Sang-Hyun Kim, Sung Tae Kim, Young Hwan Park : Estimation of Friction Coefficient Using Smart Strand, International Journal of Concrete Structures and Materials, vol.9, No.3, pp.369-379, 2015
- 10) 野口 功：プレストレッシングの管理について、最近におけるプレストレストコンクリート, 土木学会, pp.21-30, 1961

【2016 年 4 月 25 日受付】