

## 建築における緊張管理 とくに摩擦係数に関する一考察

(株)ピーエス三菱 正会員

○吉永 健治

キーワード：緊張管理，摩擦係数

### 1. はじめに

建築における緊張管理は、日本建築学会プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説<sup>1)</sup>(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<sup>2)</sup>(JASS5)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%として行われている。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、PC規準に示される計算仮定値を用いると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の見直しなどを行って対処している。

また、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る各係数の値をはじめ、多少の修正が施されながら今日に至っている。しかしながら、この手法が建築部材の緊張管理として、あるいは設計の安全性を保證する上から妥当であるものか必ずしも明確にはなっていない。

本研究報告は、2016年のプレストレストコンクリート工学会会誌において掲載された研究報告<sup>3)</sup>の緊張データの調査分析結果に加え、摩擦係数 $\mu$ 、 $\lambda$ の特性について論ずるものである。

### 2. 緊張データの調査・分析

緊張計算に用いられる各係数の適正值、誤差の分布性状を把握す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。調査は、14物件70グループPCケーブル399本について行った。調査で得たデータは、各ケーブルの全長 $L$ 、全角度変化 $\alpha$ 、緊張端における初緊張力 $P_0$ および伸び量 $\Delta L$ である。

緊張データの分析は、下式(1)～(3)の基本式を用いた。

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

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

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

式(1)を変形して得られる式(4)より、各ケーブルの平均引張力 $P_{ave}$ を求める。式(2)を変形した式(5)を用いて、前述の $P_{ave}$ から固定端引張力 $P_d$ を推定する。

$$P_{ave} = \frac{\Delta L \cdot E_p \cdot A_p}{L} \quad (4)$$

$$P_d = \frac{P_{ave}^2}{P_0} \quad (5)$$

さらに分析を行うにあたって、単位長さあたりの角度変化の平均値となる $\alpha/L$ (以降、これを角度変

化率と記す)を指標として用いた。具体的には、式(3)を変形して得られる式(6)に、式(7)を代入し変形した式(8)から $y$ を求めた。 $y$ は単位長さあたりの平均摩擦に相当し、式(7)で示すように、傾きが $\mu$ 、切片を $\lambda$ とした角度変化率の一次関数として表されることになる。

$$P_d = P_0 \cdot e^{-\mu \left( \frac{\alpha}{L} + \lambda \right)} \quad (6)$$

$$y = \mu \frac{\alpha}{L} + \lambda = \mu x + \lambda \quad (7)$$

$$y = \frac{\ln(P_0 / P_d)}{L} \quad (8)$$

このようにして実績データより求めた $y$ 、 $x$ をプロットしたものを図-1、図-2に示す。なお、分析に用いた見掛けのヤング係数は $E_p' = 192 \text{ kN/mm}^2$ である。<sup>3)</sup>

図-1は全ケーブルについてプロットした図であるが、グループごとのケーブル数の差に影響を受けるため、図-2に各グループごとの平均値でプロットしたものを示す。一般に、グループ内のケーブル数が少ない場合は測定誤差のようなランダム誤差の影響が大きくなり、グループ内のケーブル数が多い場合はランダム誤差の影響は小さくなる。図-2に示す近似直線 $y = 0.1499x + 0.0025$ は6本以上のグループの平均値であり、この程度のケーブル数であればランダム誤差の影響は少ないものと考えられる。データの分布範囲をこの近似直線の並行な直線範囲と捉えると、見掛け上は $\mu$ が一定ですべての誤差が $\lambda$ に集約された誤差分布を考えることができ、実績データの分析から得た見掛けの摩擦係数の平均値は概ね $\mu' = 0.15$ 、 $\lambda' = 0.0025$ であり、図-1における $\lambda'$ の $3\sigma$ 分布範囲は、 $\lambda' = -0.0046 \sim 0.0104$ であった。

これはPC規準に示される摩擦係数の値 $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$ と大きく異なっており、図-1、図-2に示す $y = 0.25x + 0.004$ のラインと実測データの分布には相関性はみられない。図-1、図-2から、PC規準における摩擦係数の値は概ね安全側に配慮された数値であるといえるが、角度変化率が小さい場合には引張力不足になる可能性があることや、角度変化率がとくに大きい場合には $\mu = 0.25$ 、 $\lambda = 0.004$ を用いた伸び管理を行うことが極めて困難であることがうかがえる。

見掛けの $\lambda'$ の分布は、実際にはケーブル長 $L$ に影響した分布となることが考えられる。図-3は縦軸に見掛けの $\lambda'$ 、横軸にケーブル長 $L$ をとった分布図である。見掛けの $\lambda'$ のばらつきは $L$ が短くなるほど大きくなる。これは、 $L$ が長い場合には1mmの測定誤差の影響が小さいが、 $L$ が短くなれば測定誤差が見掛け上 $\lambda'$ の誤差として大きく表されるため

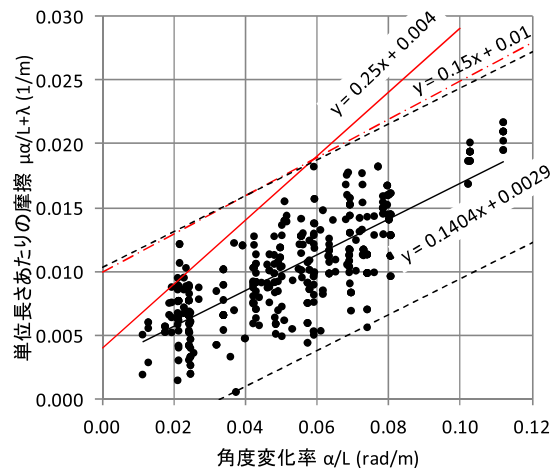


図-1 摩擦係数の分布(全ケーブル)

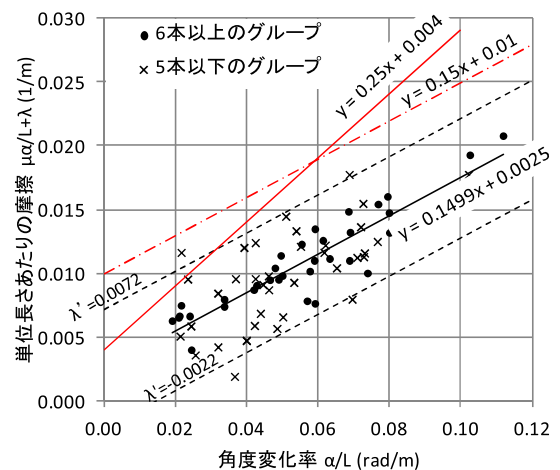


図-2 摩擦係数の分布(グループごと)

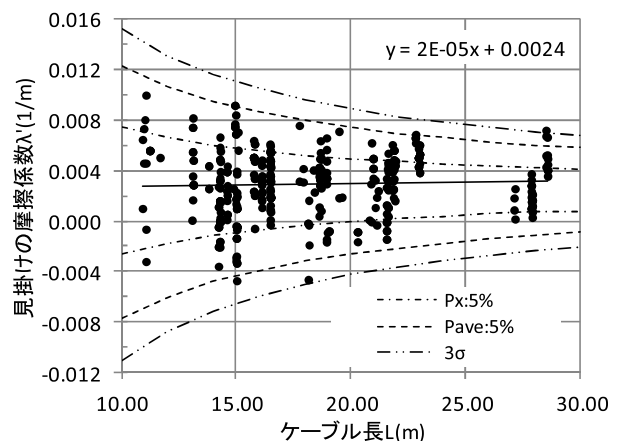


図-3 見掛けの $\lambda'$ の分布

である。図-3の $P_x$ :5%ラインは固定側引張力 $P_x$ の誤差5%を示しており、 $P_{ave}$ :5%のラインは平均引張力 $P_{ave}$ の誤差5%のラインである。

今回の調査分析から得られた見掛けのヤング係数 $E_p' = 192\text{kN/mm}^2$ とした場合の摩擦係数 $\mu' = 0.1499$ ,  $\lambda' = 0.0025$ から求めた計算伸び量に対する実測伸び量の関係を図-4のヒストグラムに示す。計算伸びに対する $3\sigma$ の分布は6.57%であった。図-3における $3\sigma$ ラインはこの $3\sigma = 6.57\%$ のラインである。これらは、あらかじめ平均値を知っていても5%管理から外れるものが存在することを意味しており、緊張計算を行う際の計算仮定値がいかに重要であるかを示している。また、図-3における平均引張力5%の誤差とは伸びの誤差5%を意味し、伸び量5%の誤差は $2.28\sigma$ に相当する。5%の伸び管理を行う前に適切な計算仮定値を用いて伸び量の計算ができれば、早期に異常を発見するという観点から5%の伸び管理は有効だと考えられる。その一方で、5%の管理値を外れるケーブルがある一定確率存在し、その場合どのような対応を行うべきか、また図-3からも分かるように固定側引張力の誤差は5%を超えるものが多数存在し、設計の安全性を保証するという観点からこの5%という値が妥当であるかは不明である。

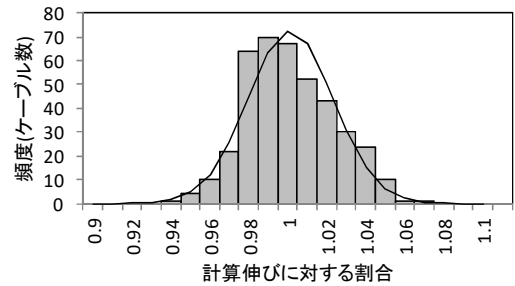


図-4 計算伸び量と実測伸び量の関係

### 3. 摩擦係数 $\mu$ と $\lambda$ の違い

前節では、見掛けの $\mu'$ を一定として見掛けの $\lambda'$ がばらつきをもっているものとして分析を行った。これは従来より土木で用いられる $\mu$ 管理の手法とまったく異なる手法であり、一般的な手法ではない。ここで基本に立ち返り、摩擦係数 $\mu$ と $\lambda$ の違いについて考えたい。

一般的に用いられる摩擦損失の式(3)の基になる式は下式(9), (10)である。

$$N = P \cdot d\alpha \quad (9)$$

$$dp = -\mu \cdot N \quad (10)$$

式(9)は、図-5に示すような円周方向力と半径方向力の力の釣り合い式であり、式(10)はクーロンの摩擦理論式である。式(9), (10)より

$$\frac{dp}{P} = -\mu \cdot d\alpha \quad (11)$$

式(11)を積分して、式(12)が得られる。

$$P = P_0 \cdot e^{-\mu \alpha} \quad (12)$$

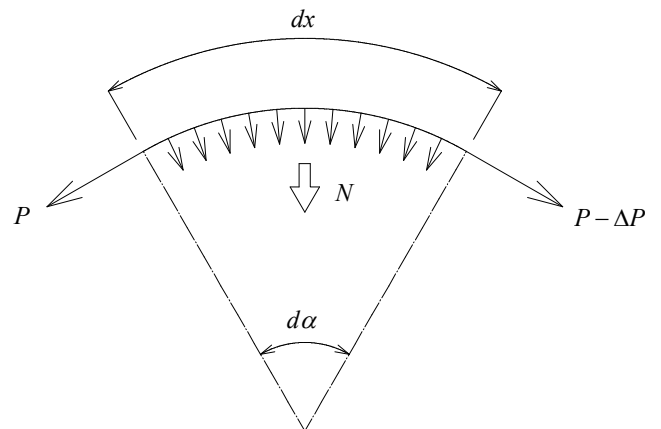


図-5 円周方向力と半径方向力の関係

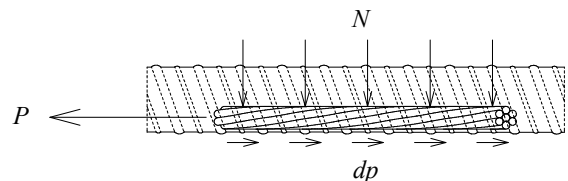


図-6 摩擦損失の概念図

ここで注意しなければならないのは、 $\alpha$ が軸直角方向力 $N$ を算出するために用いられているものであって、 $\mu$ が角度変化 $\alpha$ に依存するものではないということである。 $\mu$ はPC鋼より線とシースの接触面の表面状態から決定される摩擦係数であり、一般的に用いられる摩擦係数と同じく単位は存在しない。

$\mu$  の単位として1/radと記されるのは便宜上、 $\lambda$  と区別するためと考えられる。

一方 $\lambda$ については、PC規準に以下のように記されている。『PC鋼材を直線配置とする場合でも、PC鋼材をシース中央で正しく緊張することが困難であること、コンクリート打込み中にシースにへこみをつくったり、セメントペーストが流入したりして予期せぬ摩擦が働くことがあること、シースに波打ちができたりして摩擦が働くことなどによって、実際にはPC鋼材長さに関係する摩擦がある』<sup>1)</sup>。この記述からも分かるように $\lambda$ は施工に起因した摩擦であり、本来定量化することのできない軸直交方向力Nが単位長さあたりに対してある一定量作用しているものとして、仮定された摩擦係数である。この $\lambda$ に対する摩擦損失は、式(12)の型にあてはめて得られる式(13)で計算されている。

$$P = P_0 \cdot e^{-\lambda L} \quad (13)$$

この式は、PC鋼材を直線配置したとしても、式(14)に示す軸直交方向力Nが常に作用していると仮定していることを意味している。

$$N = \frac{\lambda}{\mu} L \cdot P \quad (14)$$

摩擦係数 $\mu$ と $\lambda$ はもともと意味合いの異なるものであり、 $\mu$ はクーロン理論に基づく理論的な値であり材料の表面状態によって決定され、 $\lambda$ は施工におけるばらつきを考慮したものである。前節で行った $\mu$ を一定値とし、 $\lambda$ をばらつきとする分析手法は、その点から合理性のあるものだとはいえる。

#### 4. まとめ

緊張管理の実績データの分析を行った結果、概ね下記の値を得た。今回調査を行った範囲では、PC鋼より線およびシースのメーカーが同一であり、施工手法にも大きな差がないと考えられるため、材料や施工手法の違いによって下記の値は変動するものと考えられる。

見掛けのヤング係数	$E_p'$	=192kN/mm <sup>2</sup>
見掛けの摩擦係数	$\mu'$	=0.15
	$\lambda'$	=0.0025
伸び量のばらつき		6.6%

建築における緊張管理は現在、一般に伸び管理で行われており、緊張計算に用いる計算仮定値は実態に近い値を用いることが非常に重要となる。今回、かぎられたデータ数の中ではあるが、その参考となる値を示すことができた。今後は、この仮定値の精度をより高めていくことと、設計の安全性の保証という点から緊張管理はどうあるべきか考えていく必要があると思われる。

#### 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，2015.
- 3) 吉永健治：建築における緊張管理に関する一考察，プレストレストコンクリート，Vol. 58, No. 4, July 2016, プレストレストコンクリート工学会
- 4) 猪股俊司：プレストレストコンクリートの設計および施工，pp89, 1957, 技報堂