

# トルク規制を行なった場合の 多導体用スペーサ締付ボルトの 適正締付トルクおよび軸力の検討

村田 時彦\*

井上 充男\*\*

## 1. まえがき

スペーサ(ボルト締付形クランプ方式)の電線把持力に直接関与するのは締付ボルトの軸力であり、これが不適当な場合はボルトのねじ切れ、把持力不足、ゆるみなどの弊害をきたす恐れがある。これを防ぐためスペーサ取り付けに際しては、締付ボルトの軸力規制が必要となるが、現時点においてボルト軸力を直接管理する実用的な方法はなく、したがって間接管理法であるトルク規制法がスペーサ取り付けに汎用されているのが現状である。

トルク規制法としては、(1)トルクレンチによる規制 (2)ブレイクアウェイボルト使用などの規制法が考えられるが、トルク規制を行なった場合でもボルト、ナットのねじ面および、座面の仕上げ、表面状況などの変化により軸力は、ばらつくことになる。本文ではトルク規制を行なった場合、この軸力のばらつきを考慮に入れたスペーサ締付ボルトの適正締付トルク、および軸力につき410mm<sup>2</sup>用スペーサを例に検討を行なう。

## 2. スペーサボルトの適正締付トルクおよび検討手順

スペーサボルトの締付軸力は、電線把持力および、ゆるみの面よりボルト自身の降伏軸力を越えず、かつ実用的な締付トルクにより得られる範囲内で高い方が望ましい。締付軸力はトルク規制を行なっても前述のごとくばらつくが、この軸力のばらつきの下限が電線把持力より要求される軸力以上で、かつ、上限がボルト自体の締め付けによる降伏軸力を越えない範囲で、可及的その値に近い軸力が得られる締付トルクが適正締付トルクとなる。

\*むらた ときひこ 技術部長

\*\*いのうえ みつお 研究部

したがって、検討手順としては、まず要求される電線把持力より、その把持力を得るための軸力の検討を行ない、次いでボルトの締付トルクと降伏軸力の関係を吟味のうえ総合的に検討し、適正締付トルクを決定する。

### 3. スペーサに要求される把持力

スペーサの把持力は電線捻回の際に、クランプと電線間にすべりを生ぜしめないためのすべりだし捻回トルクで示される。一方、電線の捻回角  $\theta$  と捻回トルク  $T_T$  の間には、下式の関係がある。

$$T_T = \frac{2G}{l} \theta \dots\dots\dots(1)$$

ここに、  $G$  : 電線のねじり剛性

$l$  : スペーサ間隔

$\theta$  : 捻回角

したがって、スペーサに要求される把持力  $T_o$  は、(1)式の右辺に与えられた条件を代入したとき、

$$T_o > T_T = \frac{2G}{l} \theta \dots\dots\dots(2)$$

であればよい。今、410mm<sup>2</sup>用スペーサ ( $G = 17 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{rad}$ ,  $l = 15 \text{ m}$ ,  $\theta = \pi/2$ ) を例に取り  $T_o$  を計算すれば、

$$T_o > \frac{2 \times 17}{15} \times \frac{\pi}{2} \approx 3.6 (\text{kg} \cdot \text{m})$$

となる。

### 4. 電線把持力より要求される締付ボルト軸力

電線締付力  $N'$  で締め付けられたスペーサのすべりだし捻回トルク  $T'_s$  は、次式で示される。

$$T'_s = 2 N' \mu'_s R \dots\dots\dots(3)$$

ただし、  $\mu'_s$  : 電線とクランプの摩擦係数

$R$  : 電線半径

また、電線締付力  $N'$  と締付ボルト軸力  $N_o$  の関係は、

$$N' = \eta N_o \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\eta$  : クランプの形状、寸法により定まる係数

(3), (4)式より

$$T'_s = 2 \eta N_o \mu'_s R$$

$$\therefore N_o = \frac{T'_s}{2 \eta \mu'_s R} \dots\dots\dots(5)$$

$T'_s = T_o$  (前項参照)とし、410mm<sup>2</sup>用スペーサにおける数値  $T_o = 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}$ ,  $\eta = 0.55$ ,  $\mu'_s = 0.5$ ,  $R = 0.0143 \text{ m}$  を(5)式に代入  $N_o$  を計算すれば、

$$N_o = \frac{3.6}{2 \times 0.55 \times 0.5 \times 0.0143} = 457 \text{ (kg)} \dots\dots\dots(6)$$

すなわち、締付ボルトの軸力  $N_o$  は、457kg あれば良いことになる。

### 5. ボルト締付時の軸応力および、せん断応力

ボルト締付時における軸力  $N$  と締付トルク  $T$  の間には次の関係がある。

$$T = KNd \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $K$  : トルク係数  
 $d$  : ボルト呼び径

今、トルク係数  $K$  を詳記すれば、

$$K = \frac{1}{2d} (d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha + \mu d_w) \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $d_2$  : ボルト有効径  
 $\beta$  : リード角 ( $\tan \beta = P / \pi d_2$   $P$  : ピッチ)  
 $\mu$  : ねじ面および座面の摩擦係数  
 $\alpha$  : ねじ山の半角  
 $d_w$  : 座面の平均摩擦直径

また、軸方向の応力  $\sigma$  は、次式より求められる。

$$\sigma = \frac{4N}{\pi d_s^2} \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 $d_s$  : ボルト有効断面の直径

一方、ボルトに  $N$  なる軸力を生ぜしめるトルク  $T$  は、(7)式により示されるが、このうちボルトのねじりに関与するトルク  $T'$  は  $K$  として、(8)式の( )内、第2項まで取った次式の値となる。

$$T' = \frac{N}{2} (d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) \dots\dots\dots(10)$$

したがって、この時ボルトの有効断面に生じるせん断応力  $\tau$  は、

$$\tau = \frac{T'}{(\pi/16) d_s^3} = \frac{8 \times (d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) N}{\pi \times d_s^3} \dots\dots\dots(11)$$

(11)式と(9)式の比を取れば、

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{2}{d_s} (d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) \dots\dots\dots(12)$$

となる。

### 6. トルク係数および摩擦係数のばらつき

トルク係数  $K$  は、前述のごとく (8) 式で表わされ、軸力  $N$  と締付トルク  $T$  を測定すれば (7)式より直接求められる。当社のM16スペーサボルト(鋼製)のトルク係数測定結果は、第1図の通りで、その分布はほぼ正規分布をなしている。今、 $K$  の分布を  $N(K_M, s_K^2)$  とすれば、(8)式の摩擦係数  $\mu$  の分布は  $N(\mu_M, s_\mu^2)$  となり、 $\mu_M$  および  $s_\mu$  は同式より次のごとく求められる。

$$\mu_M = \frac{2 d K_M - d_2 \tan \beta}{d_2 \sec \alpha + d_w} \dots\dots\dots(13)$$

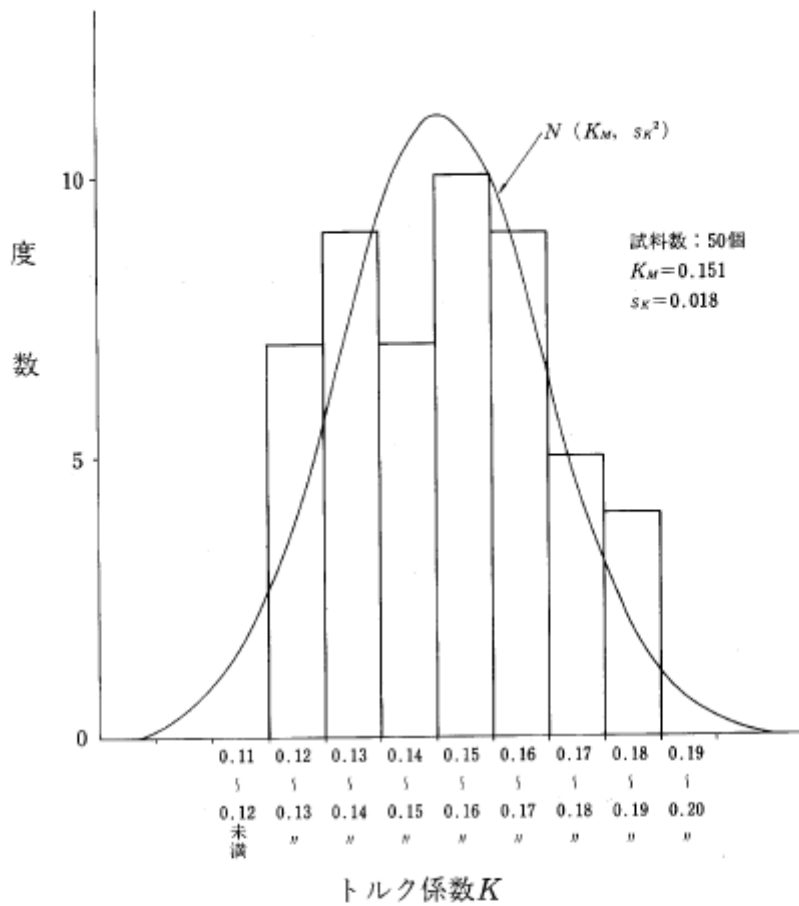
$$s_\mu = \frac{2 d s_K}{d_2 \sec \alpha + d_w} \dots\dots\dots(14)$$

### 7. 締め付けによるボルトの降伏軸力

ボルトの締め付けによる破断荷重は単純引張によるそれに比べ低下する。これは前者の場合、ボルトに引張応力  $\sigma$  のほかに、ねじりによるせん断応力が加わるためである。 $\sigma$  と  $\tau$  が、どのように影響しあって破損が生じるかについては種々の学説があるが、ボルトの材料に使用される低中炭素鋼は延性材料と見なされ、せん断歪エネルギー説によっている文献が多い。

せん断歪エネルギー説によれば  $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$  の値が単純引張による破損応力に達したときに破損が生じることになるが、今この関係が締め付けによるボルトの降伏にも適用されるものとする。すなわち、 $\sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \dots\dots\dots(15)$

とおき、この等価応力  $\sigma_v$  がボルトの単純引張による降伏応力  $\sigma_s$  に達したときに、ボルトが降伏するものとする。



第1図 スペーサ用M16鋼ボルトトルク係数測定結果

(15)式の  $\tau$  に(12)式の関係代入,

$$\sigma_v = \sigma \sqrt{1 + 12\{(d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) / d_s\}^2} \dots\dots\dots(16)$$

(16)式において、 $\sigma_v = \sigma_s$  とおき  $\sigma$  につき示せば,

$$\sigma = \sigma_s / \sqrt{1 + 12\{(d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) / d_s\}^2} \dots\dots\dots(17)$$

したがって、ボルトの降伏軸力  $N_s$  は、(17)式に有効断面積  $(\pi/4)d_s^2$  を乗じて

$$N_s = \pi \sigma_s d_s^3 / 4 \sqrt{1 + 12\{(d_2 \tan \beta + \mu d_2 \sec \alpha) / d_s\}^2} \dots\dots\dots(18)$$

となる。

### 8. 把持力より要求される締付トルク

電線把持力より要求されるボルト軸力は、(5)式に示される  $N_0$  である。一方、締付トルクと軸力の間には(7)式の関係があるゆえ、電線把持力より要求される締付トルク  $T_1$  は次式で示される。

$$T_1 > N_0 K d \quad \dots\dots\dots(19)$$

ただし、(19)式において  $K$  のばらつき、およびトルク規制におけるトルクの誤差を考慮する必要があり、これなどを考慮<sup>\*</sup>した場合の締付トルク  $T_1'$  を求める式として、次式が得られる。

$$T_1' > N_0 (K_M + 3 s_K) d + \epsilon \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここに、 $\epsilon$  : トルク規制における最大誤差

$K_M$  : トルク係数の平均値

$s_K$  : トルク係数の標準偏差

### 9. 降伏軸力に与える締付トルク

第7項において、ボルトの降伏軸力  $N_S$  を求める式として(18)式を導いたが、同式と(7)式より降伏軸力  $N_S$  を与える締付トルク  $T_2$  を求める式として、次式を得る。

$$\begin{aligned} T_2 &= N_S K d \\ &= \frac{\pi \sigma_s d_s^2 K d}{4 \sqrt{1 + 12 \{ (d_s \tan \beta + \mu d_s \sec \alpha) / d_s \}^2}} \quad \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

前項同様、誤差および、ばらつきを考慮すると

$$T_2' = \frac{\pi \sigma_s d_s^2 (K_M - 3 s_K) d}{4 \sqrt{1 + 12 \{ (d_s \tan \beta + (\mu_M - 3 s_\mu) d_s \sec \alpha) / d_s \}^2}} - \epsilon \quad \dots\dots\dots(22)$$

### 10. 適正締付トルクの決定

前項までにおいて、スぺーサボルトの適正締付トルクの内容について述べ、それを検討するための条件式として、(20)、(22)式が導かれた。本項においては、これらの式に 410 mm<sup>2</sup> スぺーサに使用する M16 多導体用スぺーサ鋼ボルトの諸数値を代入し、 $T_1'$ 、 $T_2'$  を求め、 $T_1' < T_p < T_2'$  の条件より適正締付トルク  $T_p$  の決定を行なう。

\* )  $K$  の値として  $(K_M + 3 s_K)$ 、トルク値として  $(T_1' - \epsilon)$  を取った。

⑳、㉔式に下記の数値を代入計算すれば、

$$\begin{aligned}
 N_0 &= 457(\text{kg}) & d_s &= 1.47(\text{cm}) \\
 K_M &= 0.151 & \tan\beta &= 0.043 \\
 s_K &= 0.018 & \sec\alpha &= 1.15 \\
 d &= 1.6(\text{cm}) & d_w &= 1.3d = 2.08(\text{cm}) \\
 \epsilon &= 50(\text{kg}\cdot\text{cm}) & \mu_M &= 0.111 \\
 \sigma_s &= 4000(\text{kg}/\text{cm}^2) & s_\mu &= 0.015 \\
 d_s &= 1.41(\text{cm})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_1' &= N_0(K_M + 3s_K)d + \epsilon \\
 &= 457 \times (0.151 + 3 \times 0.018) \times 1.6 + 50 \\
 &= 200(\text{kg}\cdot\text{cm})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_2' &= \frac{\pi\sigma_s d_s^2 (K_M - 3s_K)d}{4\sqrt{1 + 12\{[d_s \tan\beta + (\mu_M - 3s_\mu)d_s \sec\alpha]/d_s\}^2}} - \epsilon \\
 &= \frac{\pi \times 4000 \times 1.41^2 (0.151 - 3 \times 0.018) \times 1.6}{4\sqrt{1 + 12\{[1.47 \times 0.043 + (0.111 - 3 \times 0.015) \times 1.47 \times 1.15]/1.41\}^2}} - 50 \\
 &= 843(\text{kg}\cdot\text{cm})
 \end{aligned}$$

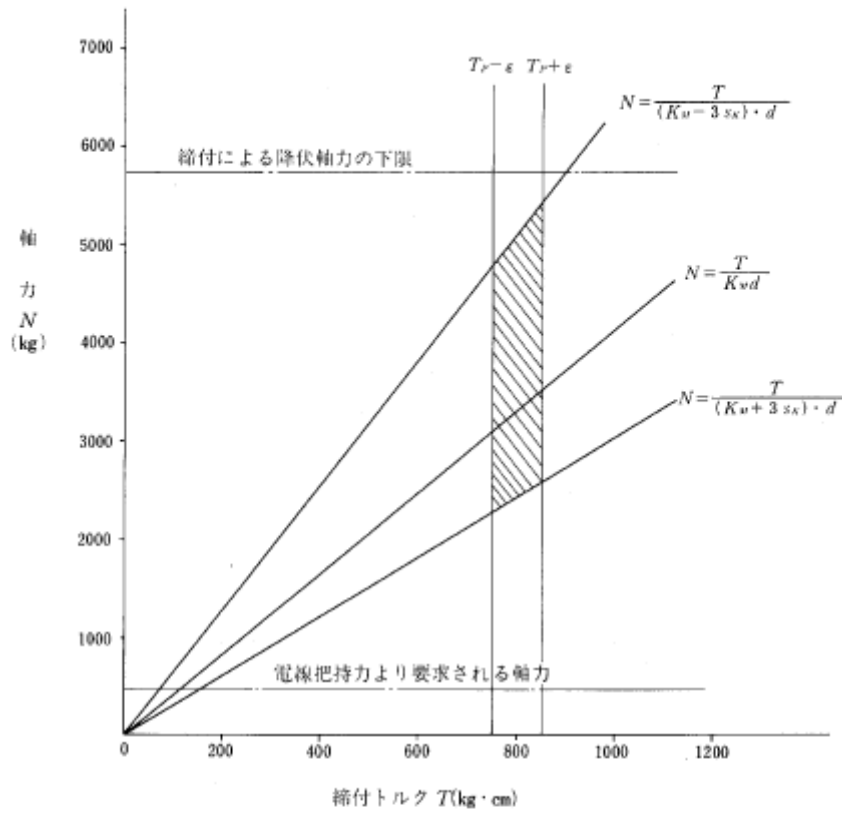
すなわち、 $200 < T_p < 843\text{kg}\cdot\text{cm}$  であれば良いが、ゆりみ、および電線把持力に対する安全率の増加の面より締付トルクの高い方が望ましく、これらの点、およびM16鋼ボルトの標準締付トルクを考慮し、 $410\text{mm}^2$ 多導体スペーサ用M16鋼ボルトの適性締付トルクは、 $800\text{kg}\cdot\text{cm}$ とする。なお、この場合適正締付トルク  $T_p$  におけるボルト平均軸力  $N_M$  は、(7)式により

$$N_M = \frac{T_p}{K_M d} = \frac{800}{0.151 \times 1.6} = 3300(\text{kg})$$

また、軸力および締付トルクは、46ページ第2図の斜線図の範囲で、ばらつくことになる。

## 11. むすび

以上、 $410\text{mm}^2$ 用スペーサを例に取りスペーサの取り付けに際し、トルク規制を行なった場合のボルト(M16多導体用スペーサ鋼ボルト)軸力につき、トルク係数の分布が正規分布をなすものとして、統計的な手法を加味した検討を行ない、軸力ばらつきの上限がボルト降伏軸力を越えず、かつ、その下限がスペーサの性能より要求される軸力を下回らない条件より、適正締付トルク  $800\text{kg}\cdot\text{cm}$  を得た。



第2図 410mm<sup>2</sup>用スペーサM16締付ボルト (締付トルク—軸力特性)

文 献

- (1) 日本ねじ研究会 “ねじの適正締付に関する調査研究報告書” (昭和47年)