

高力ボルト摩擦接合のすべり荷重の統計学的考察

STOCHASTIC CONSIDERATION ON THE SLIP LOADS OF FRICTION TYPE BOLTED JOINTS

西 村 昭*

By Akira Nishimura

表一1 現場締め高力ボルト軸力のばらつき¹⁾

桁	締付方法	継手位置	ボルト数	軸 力		
				平均値 (t)	標準偏差 (t)	変動係数 (%)
G1	トルクレンチ	FU	12	20.1	1.8	9.0
		MU	12	21.2	2.0	9.5
		S	28	19.5	1.2	6.2
		ML	12	20.3	1.8	8.9
		FL	28	18.9	1.9	10.0
G1'	油圧レンチ	FU	20	20.3	1.2	5.9
		MU	12	20.2	1.9	9.4
		S	40	19.1	1.6	8.4
		ML	12	19.7	1.5	7.6
		FL	56	20.3	1.1	5.4
G2	インパクトレンチ	FU	16	18.1	1.7	9.4
		MU	12	17.1	1.6	9.4
		S	28	18.0	2.5	13.9
		ML	12	17.2	2.4	14.0
		(T) FL	32	18.0	1.7	9.5
G3	インパクトレンチ (A)	FU	16	20.8	2.4	11.5
		MU	12	21.7	2.6	12.0
		S	28	20.8	2.2	10.3
		ML	12	21.7	1.3	6.0
		FL	32	19.6	1.2	6.1
G4	ナット回転角法	FU	20	19.3	2.2	11.4
		MU	12	20.6	3.8	18.4
		S	18	19.9	2.8	14.1
		ML	12	19.8	2.5	12.6
		FL	36	19.9	2.6	13.1

* FU, MU, S, ML, FL はそれぞれ上フランジ, 上モーメントプレート, シャープレート, 下モーメントプレート, 下フランジを表わす。

1. ま え が き

摩擦接合による継手のすべり荷重は、鋼板の摩擦面の状態、ならびにボルト軸力の大きさなどによって左右される。ボルト軸力の導入、すなわちナットの締付けには、トルク法、ナット回転角法など種々の方法が考案、利用されているが、いずれも直接軸力を測定して確認するものではなく、軸力と関係ある物理量を介して軸力を推定する間接的方法である。また、軸力の検査も、ナットの回転に要するトルクによるなど間接的方法に頼り、しかも全数検査ではない。このように摩擦接合のすべり荷重を左右する軸力はもちろんのこと、摩擦面自体のすべり係数も不明な状態であるから、その継手のすべり荷重は、統計学的方法の援用をまわって推定する以外に有効な方法はないといえる。

本研究は、鋼構造物のリライアビリティ解明に至る研究の一環として、摩擦接合部のすべり荷重の変動を、従来の関連研究に基づいて解明しようとするものである。本研究の一部は土木学会関西支部年次学術講演会に発表したものである^{1),2)}。

2. 基 礎 事 項

(1) 高力ボルト軸力のばらつき³⁾

工場仮組時の I 形断面プレート ガーダーを利用して、現場継手高力ボルトの軸力全数測定を行なったが、その結果としてボルト締付方法、締付ボルトの位置などにより若干の違いがあるが、概して軸力分布は正規分布に従うようであった。またその変動係数は、最大 18.4% という例もあったが、大体 10% 前後であった。軸力のばらつきの標本値は表一1のとおりである。

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学教室

(2) 軸力ばらつきと継手すべり耐力との関係⁴⁾

ワイヤストレイン ゲージを貼布してボルト軸力を確認しながら、標準軸力ボルトとそれより軸力を 3σ (として標準軸力の 10% をとった) 低くしたものとを混在せしめた継手のすべり試験を実施したところ、ボルト軸力とすべり荷重との間には比例関係が認められ、同様の結果を更に摩擦面のすべり係数の相違による影響をできる限り少なくした実験でも確認した。

3. 摩擦接合のすべり荷重変動の統計学的考察

前節で述べたような従来の研究成果に基づき、次の仮定を設ける:

- ① ボルト軸力のばらつきは、正規分布に従う。
- ② 継手のすべり荷重は継手構成ボルト軸力之和に比例する。

これらの仮定に加えて、摩擦面のすべり係数に関して次の仮定を設ける。

- ③ 摩擦面のすべり係数は、一継手内では一定とし、継手間での変動は正規分布に従う。

さて、仮定②により、 n 本のボルトを有する摩擦接合のすべり荷重 P_s は次式のようなになる。

$$P_s = f \mu \sum_{i=1}^n N_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 f : 摩擦面の数、 μ : 摩擦面のすべり係数、 N_i : 第 i 番ボルトの軸力

仮定 ①, ③ により μ, N_i を確率変数と考え、それぞれ次の正規分布に従うものとする:

$$\left. \begin{aligned} \mu &: N(m_\mu; \sigma_\mu^2) \\ N_i &: N(m_N; \sigma_N^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

そのときには式 (1) の $\sum_{i=1}^n N_i$ は正規分布:

$$\sum_{i=1}^n N_i : N(nm_N; n\sigma_N^2) \dots\dots\dots (3)$$

に従い、式 (1) の P_s は次の正規分布に従うことになる:

$$\left. \begin{aligned} P_s &: N(m_{P_s}; \sigma_{P_s}^2) \\ \text{ただし,} \\ m_{P_s} &= f n m_\mu m_N \\ \sigma_{P_s}^2 &= f^2 n (m_\mu^2 \sigma_N^2 + n m_N^2 \sigma_\mu^2 + \sigma_\mu^2 \sigma_N^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) は書き直すと、

$$\sigma_{P_s}^2 = \frac{(f n m_\mu m_N)^2}{n} \left\{ \left(\frac{\sigma_N}{m_N} \right)^2 + n \left(\frac{\sigma_\mu}{m_\mu} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_\mu}{m_\mu} \right)^2 \left(\frac{\sigma_N}{m_N} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$\sigma_{P_s}/m_{P_s} = v_{P_s}, \sigma_N/m_N = v_N, \sigma_\mu/m_\mu = v_\mu \dots\dots (6)$$

とおくと、

$$\begin{aligned} v_{P_s} &= \{(v_N^2 + n v_\mu^2 + v_N^2 v_\mu^2)/n\}^{1/2} \\ &= \{(v_N^2 + n v_\mu^2)/n\}^{1/2} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

を得る。

前記の通り v_N は一般に 0.1 程度であり、かつ v_μ も同程度の場合を考え、

$$v_N \approx v_\mu = v \dots\dots\dots (8)$$

とおくと、式 (7) は近似的に次のように表わされる。

$$v_{P_s} \approx v \sqrt{(1+n)/n} \dots\dots\dots (9)$$

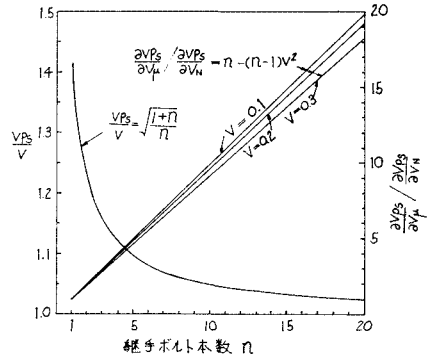


図-1

式 (9) を図示すると 図-1 のようになり、継手すべり荷重の変動 v_{P_s} に対しては、ボルト軸力の変動の影響は、継手構成ボルト本数の増大とともに減少し、次第に v に近づくことがわかる。また式 (7) から、多数ボルト継手のすべり荷重変動は、軸力のばらつきよりも摩擦面のすべり係数のばらつきに左右されることがわかるが、これを具体的に示すと、式 (7) より、

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{P_s}}{\partial v_\mu} / \frac{\partial v_{P_s}}{\partial v_N} &= \frac{v_\mu (n + v_N^2)}{v_N (1 + v_\mu^2)} \\ &\approx \frac{n + v^2}{1 + v^2} \approx n - (n-1)v^2 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

式 (10) を $v=0.1, 0.2, 0.3$ に対してプロットすると 図-1 のようになり、ボルト本数の増加と共に直線的に影響を増すといえよう。

4. 摩擦接合のリライアビリティ

現行示方書⁵⁾ によって設計された摩擦接合のリライアビリティを、主すべり発生を基準に検討して見よう。構造物のリライアビリティは作用する荷重と構造物が保有する強度の両者によって判断されるが、ここでは基礎的研究として、まず強度面のみに着目するものとする。すなわち、設計上得られる許容すべり荷重に対して、実際のすべり荷重がそれ以上となる確率を求めて見る。示方書によれば、摩擦接合の許容すべり荷重 P_a は次式で与えられる。

$$P_a = f n \mu N / \nu \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 ν は安全率、 N は設計軸力である。ここで μ はそのばらつきの平均値よりもいくらか低い値がとられている現状であるが、いま μ, N はいずれもそれぞれのばらつきの平均値として考えられているものと解釈して、

$$P_a = f n m_\mu m_N / \nu = m_{P_s} / \nu \dots\dots\dots (12)$$

これに対して実際の施工に当たっては、 N に代わり αN

($\alpha=1.1$) を目標に締付けられる。いま、この場合の軸力ばらつき確率法則が、 N の代わりに単に αN なる変換を行なって得られるものと仮定すると、摩擦接合のすべり荷重が許容すべり荷重 P_a 以上となる確率 p は、すべり荷重の分布（正規分布）：

$$\left. \begin{aligned} &N(m_{P_s'}, \sigma_{P_s'}^2) \\ &\text{ただし,} \\ &m_{P_s'} = \alpha m_{P_s} \\ &\sigma_{P_s'} = \alpha \sigma_{P_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

において、式 (12) の P_a を用いて評価される。図-2 はその説明図である。

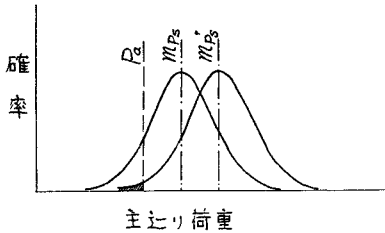


図-2

継手のすべり荷重が保有する安全率 ν_a を平均値の比として考えると、式 (12) より、

$$\nu_a = m_{P_s'} / P_a = \alpha f n m_\mu m_N / P_a = \alpha \nu \dots\dots\dots (14)$$

かつ、継手の p は次のようになる。

$$p = \int_{t_a}^{\infty} \phi(t) dt, \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \dots\dots (15)$$

ここに、

$$\begin{aligned} t_a &= \frac{P_a - m_{P_s'}}{\sigma_{P_s'}} = \left(\frac{1}{\nu_a} - 1\right) \frac{m_{P_s'}}{\sigma_{P_s'}} \\ &= \frac{1}{\nu_{P_s'}} \left(\frac{1}{\nu_a} - 1\right) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

現在わが国で用いられている諸値： $\nu=1.6$, $\alpha=1.1$ を用いると $\nu_a=1.76$ となる。式 (15), (16) を用いて $\nu_{P_s'}$ と p との関係を示すと表-2 のようになる。これより $\nu_{P_s'}=0.1$ ではすべり荷重が P_a を割ることはまずないと考えられるが、

$\nu_{P_s'}=0.2$ 程度になると $p=0.985$, すなわち 15/1000 の割合で P_a を割ることになる。一般の施工管理状態にある場合には、 $\nu_{P_s'}$ は 0.1 以下と見てよいかから、この意味から実際上の問題は無いと言える。

表-2

$\nu_{P_s'}$	p
0.10	0.999991
0.15	.998
0.20	.985
0.25	.958
0.30	.925

5. 無効ボルトを有する摩擦接合のリライアビリティ

前節での論議はすべてボルトが正常に締付けられている継手を対象としている。したがって、締め忘れボルト、あるいは締め過ぎによる破損ボルトなどがある場合にはあてはまらない。本節では、そのような無効ボルトを有する継手のリライアビリティについて検討する。

無効ボルトを生ずる位置は継手内で at random であるから、継手の軸方向に関し、非対称なボルト軸力配置を生ずる。ボルト軸力配置が継手内で非対称な場合の継手すべり耐力は、ボルト本数の少ない小継手では非対称性に影響され、ボルト本数の多い場合は影響されないという実験結果⁹⁾があるが、実構造物では一般に荷重方向には3本以上のボルトが並ぶことを考慮し、ここでは一応、ボルト軸力の非対称分布の影響は無視するものとする。したがって、継手すべり荷重は軸力之和に比例し、式 (1) を用いて評価することができる。

いま、ボルト数 n の継手において、無効ボルト k 本を有する場合のすべり荷重 $P_{s,n-k}$ は次のようになる。

$$P_{s,n-k} = f \mu \sum_{i=1}^{n-k} N_i \dots\dots\dots (17)$$

以下第2節と同様に、 $P_{s,n-k}$ の分布は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} &P_{s,n-k} : N(m_{P_{s,n-k}}, \sigma_{P_{s,n-k}}^2) \\ &m_{P_{s,n-k}} = f(n-k) m_\mu m_N \\ &\sigma_{P_{s,n-k}}^2 = f^2(n-k) \{m_\mu^2 \sigma_N^2 + (n-k) \\ &\quad \times m_N^2 \sigma_\mu^2 + \sigma_\mu^2 \sigma_N^2\} \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

さて、この継手の許容すべり荷重 P_a は式 (12) で与えられる。また設計軸力 m_N の α 倍として施工上の目標軸力が選ばれるから、この継手のすべり荷重は、次のような正規分布に従うことになる。

$$P'_{s,n-k} : N(m'_{P_{s,n-k}}, \sigma_{P_{s,n-k}}^2) \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 $m'_{P_{s,n-k}}$, $\sigma_{P_{s,n-k}}^2$ はそれぞれ式 (18) の $m_{P_{s,n-k}}$, $\sigma_{P_{s,n-k}}^2$ において、右辺の m_N , σ_N をそれぞれ αm_N , $\alpha \sigma_N$ で置き換えたものである。

このような k 本の無効ボルトを有する継手のすべり荷重が、許容すべり荷重 P_a 以上となる確率は次のようになる (図-3 参照)。すなわち、

$$p = \int_{t_a}^{\infty} \phi(t) dt, \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] \dots\dots (20)$$

ここに、

$$\begin{aligned} t_a &= \frac{P_a - m'_{P_{s,n-k}}}{\sigma'_{P_{s,n-k}}} = \frac{f n m_\mu m_N / \nu - f(n-k) m_\mu \alpha m_N}{f \alpha \sqrt{(n-k) \{m_\mu^2 \sigma_N^2 + (n-k) m_N^2 \sigma_\mu^2 + \sigma_N^2 \sigma_\mu^2\}}} \\ &= \frac{\frac{1}{\alpha \nu} - (1-r)}{(1-r) \sqrt{\frac{1}{n(1-r)} \nu N^2 + \nu_\mu^2 + \frac{1}{n(1-r)} \nu_\mu^2 \nu N^2}} = \frac{\frac{1}{\alpha \nu} - (1-r)}{(1-r) \nu_\mu \sqrt{\frac{1}{n(1-r)} \left(\frac{\nu N}{\nu_\mu}\right)^2 + 1}} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

ただし、 $r = k/n \leq 1$ ：無効率

式(21)からわかるように、 v_N の影響は n が大となるほど減少する。そこで、継手のすべり荷重の変動とすべり係数の変動係数 v_μ 、変動係数比 v_N/v_μ 、継手構成ボルト数 n 、無効率 r などの相関性を知るために、

- $v_\mu = 0.05, 0.1, 0.3$
- $v_N/v_\mu = 0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 4.0$
- $n = 2 \sim 30$
- $r = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3$

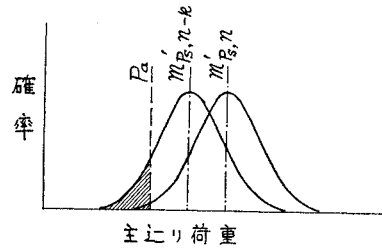


図-3

について式(21)より t_a を計算し、すべり荷重が許容値を下まわる確率 $1-p$ を求めて図示したものが図-4, 5, 6である。

図-7は、無効率と $1-p$ との関係、 $v_N = 0.1$ として、種々の値の v_N/v_μ 、ならびに n について示したものである。

これらの図より、次の諸点が明らかである：

- ① 継手構成ボルト数 n が増大するほど、継手のすべり荷重が許容すべり荷重より大となる確率 (p) も増大する。
- ② その増大の仕方は、 $v_N/v_\mu < 1$ の場合は緩で、その変化は実際上無視しうる程度である。また、 $v_\mu = 0.3$ 程度になると、 v_N/v_μ の比のいかんを問わず、かつ n によって $1-p$ の値はほとんど変わらなくなることがわかる(図-6)。
- ③ 無効率 r と $\log(1-p)$ の間には、図-7 のようにほぼ直線関係が存在する。
- ④ すべり荷重が許容すべり荷重以下となる確率 $1-p$ が 10^{-3} 、および 10^{-2} の場合の許容無効率を図-7 から求め、それより無効ボルト許容数を求めると表-3 のようになる。このように、軸力管理が行き届いた $v_N/v_\mu = 0.5$ の場合には、 $1-p =$

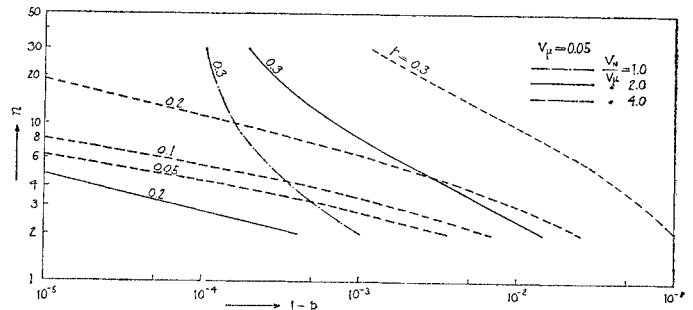


図-4 変動係数比 v_N/v_μ が p におよぼす影響 ($v_\mu = 0.05$)

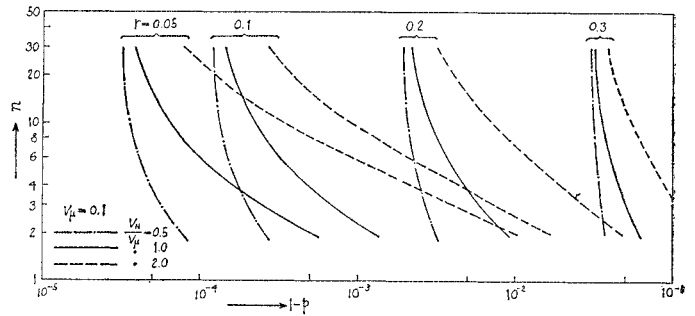


図-5 変動係数比 v_N/v_μ が p におよぼす影響 ($v_\mu = 0.1$)

10^{-3} に抑えると、1本の無効ボルトの存在も許容されないのは継手構成ボルト数4本以下の場合であるが、 $v_N/v_\mu = 1.0, 2.0$ となると、それがそれぞれ6, 8本以下

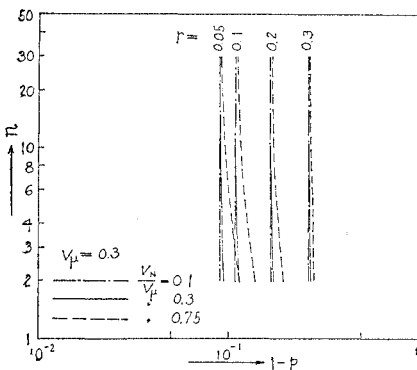


図-6 変動係数比 v_N/v_μ が p におよぼす影響 ($v_\mu = 0.3$)

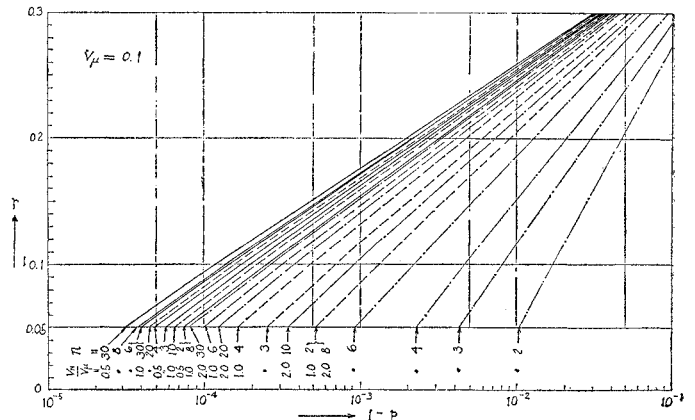


図-7 無効率 r と $1-p$ との関係 ($v_\mu = 0.1$ の場合)

表-3 無効ボルト許容数

v_N/v_μ	n	$1-p=10^{-3}$			$1-p=10^{-2}$		
		r	nr	許容数	r	nr	許容数
0.5	30	0.176	5.3	5	0.259	7.8	7
	8	0.172	1.4	1	0.257	2.1	2
	6	0.171	1.0	1	0.257	1.5	1
	4	0.167	0.7	0	0.253	1.01	1
	3	0.163	0.5	0	0.251	0.8	0
	2	0.154	0.3	0	0.247	0.5	0
1.0	30	0.171	5.1	5	0.257	7.7	7
	20	0.169	3.4	3	0.255	5.1	5
	10	0.160	1.6	1	0.249	2.5	2
	8	0.154	1.2	1	0.247	1.98	1
	6	0.147	0.9	0	0.241	1.4	1
	4	0.132	0.5	0	0.233	0.9	0
	3	0.117	0.4	0	0.224	0.7	0
	2	0.086	0.2	0	0.205	0.4	0
2.0	30	0.152	4.5	4	0.245	7.4	7
	20	0.141	2.8	2	0.238	4.8	4
	10	0.105	1.1	1	0.215	2.2	2
	8	0.086	0.7	0	0.205	1.6	1
	6	0.055	0.3	0	0.185	1.1	1
	4	—	—	—	0.151	0.6	0
	3	—	—	—	0.117	0.4	0

となる。 $1-p=10^{-2}$ に抑えると、上記のそれぞれに対応して、継手構成ボルト数が 3, 4, 4 本以下では 1 本の無効ボルトの存在も許されないことになる。

6. 設計軸力の割増しの効果

わが国現行示方書では、ボルト軸力としては設計値に対して若干割増した標準軸力を導入するように規定している。これは締付誤差によって、実際の軸力が設計値を下まわること避けるための方便であるが、ボルト材の強度が高くなるほど締め過ぎによる悪影響が表面化するおそれがある。

ここでは、このようにして、導入軸力を割増することにより、継手のリライアビリティがどのように変化するかを、前述の場合と同様に継手のすべり荷重が許容すべり荷重以下となる確率を用いて、定量的に検討して見る。

式 (21) において、 $r=0, v_N=v_\mu=v$ の場合を考える

$$t_a = \frac{\frac{1}{\alpha v} - 1}{v\sqrt{\frac{1}{n} + 1}} \dots\dots\dots (22)$$

これより割増し係数 α を求めると、

$$\alpha = \frac{1}{v\left(1 + vt_a\sqrt{\frac{n+1}{n}}\right)} \dots\dots\dots (23)$$

となる。式 (23) において、許容すべり荷重に対する非超過確率 $1-p$ を与えて、それに対応する t_a の値を用

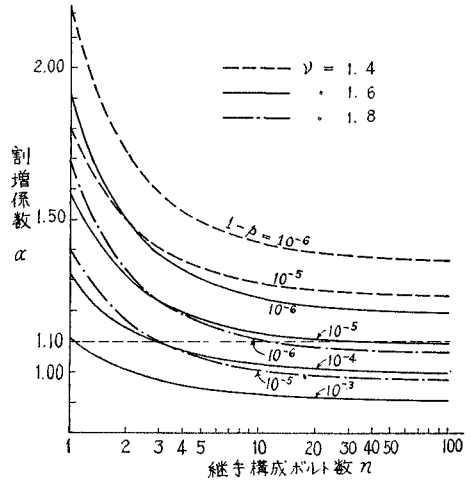


図-8 α - n 関係 ($v=0.1$ の場合)

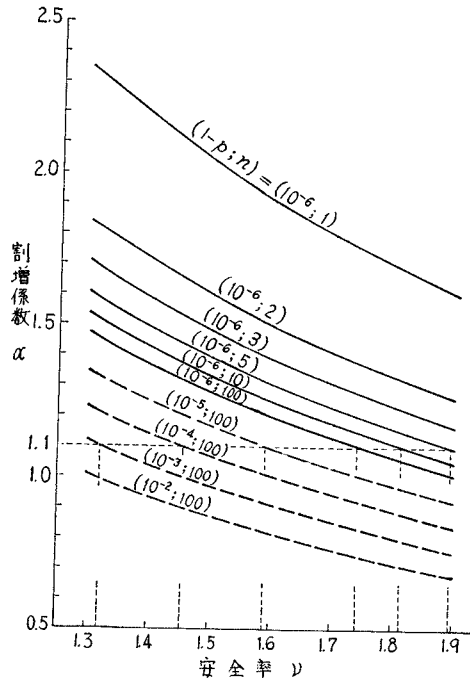


図-9 α - ν 関係

い、 v, n を種々の値に選んで、軸力の割増し係数 α がいかに変化するかを、ボルト軸力の変動係数が 10% の場合について求めると 図-8、および 9 のようになる。すなわち、図-8 は、継手構成ボルト数と α との関係を示したものであり、図-9 は $1-p, n$ をパラメータとして α と ν との関係を示したものである。

図-8 のように $1-p$ を与えた場合、 n が 10 程度以下と少ない場合には、 n に対しての α の変化はかなり急激であるが、10 程度以上では n の変化によって α はほとんど変化しないといえる。橋梁実部材の継手においては、 $n > 10$ と考えてよいから、 $n=100$ の場

合を用いて実部材の諸量相互の比較を行なうことができる。図-9 の下方に位置する5本の曲線は、いずれも $n=100$ で $1-p=10^{-2} \sim 10^{-6}$ に対応するが、これにより非超過確率 $1-p$ との関係を探ることが出来る。また、上方に位置する6本の曲線はいずれも $1-p=10^{-6}$ で、 $n=1 \sim 100$ にとって n の変化による影響を示している。 α の値として現行の 1.1 をとる場合、図-9 から各 $(1-p; n)$ の組合せに対応する安全率 ν の値を求めて見ると、

$(1-p; n) = (10^{-3}; 100)$	のとき	$\nu = 1.32$
$(10^{-4}; 100)$	〃	$\nu = 1.45$
$(10^{-5}; 100)$	〃	$\nu = 1.59$
$(10^{-6}; 100)$	〃	$\nu = 1.74$
$(10^{-6}; 10)$	〃	$\nu = 1.82$
$(10^{-6}; 5)$	〃	$\nu = 1.89$

となり、現行のように $\nu=1.6$ とすると、それに対応する非超過確率 $1-p$ はほぼ 10^{-5} となることがわかる。

次に、軸力の割増しを行わずに $\alpha=1.0$ とした場合の安全性を検討してみると、図-9 において、 $\nu=1.6$ に対応する $1-p$ の値としてほぼ 10^{-4} が得られる。これは上述の 10^{-5} に比較して 10 倍の確率であるが、この確率は許容すべり荷重となる確率であるから、被損から見た安全性はなお十分であるといえる。

また、前述の $1-p=10^{-3}$ の値を保ちながら、 $\alpha=1.0$ でボルト軸力を与える場合には、設計上の安全率としては 1.75 程度を選ぶ必要があることもわかる。

7. 結 び

高力ボルト摩擦接合のすべり荷重を左右する摩擦面のすべり係数、ならびにボルト軸力はともにばらつき、このため継手すべり荷重もばらつきを示す。本文は従来行なってきた軸力変動、ならびにそれが継手すべり荷重におよぼす影響に関する研究成果に基づき、ボルト軸力分布の正規性、継手すべり荷重と継手構成ボルト軸力間の比例関係、およびすべり係数の一継手内での均一性を仮定して、

1) 摩擦接合のすべり荷重の分布法則を与えた(式(4))。

その結果、

2) 継手すべり荷重のばらつきに対しては、ボルト軸力のばらつきの影響は、継手構成ボルト本数の増大とともに減少し、その変動係数は次第に摩擦面のすべり係数のそれに近づくことを示した。

3) 摩擦接合のリアリティ解明に至る基本的研

究として、まず継手の強度に注目し、その継手のすべり荷重が設計許容すべり荷重以上となる確率 p を求めると、一般の施工管理状態にある場合では、実際上問題を生じない程度の確率となった。

以上は正常な施工により得られた継手に当てはまるが、これらに対し、締め忘れ、あるいは遅れ破壊などによるボルト破損により、一継手内での有効ボルト数の減少がある場合、その割合を無効率 r で表わすと、

4) r と $\log(1-p)$ との間にはほぼ直線関係が存在する。その際、 $1-p$ を仮に 10^{-3} で抑えると、軸力管理が行き届いた場合 ($v_{\mu}=0.1, v_N/v_{\mu}=0.5$) には、1本の無効ボルトの存在も許容されない限界となる継手構成ボルト数は $n \leq 4$ となるが、 $v_N/v_{\mu}=1.0; 2.0$ となると、それぞれ $n \leq 6; 8$ となる。同様のことは $1-p$ を 10^{-2} で抑えると、それぞれ $n \leq 3; 4; 4$ となった。

最後に、現在わが国で採用されているような設計軸力を 10% 割増した(割増し係数 $\alpha=1.1$) 標準軸力为目标に施工する方式について検討を加えた結果、

5) $1-p$ を定値に保つには、 n が 10 程度以下のような少数ボルトの継手では、 n に対する α の変化は鋭敏であるが、 n が 10 程度以上となると n によって α はほとんど変化しないようになる。

6) 現行のように安全率 $\nu=1.6, \alpha=1.1$ とすると、それに対応して継手すべり荷重が許容すべり荷重以下となる確率 $1-p$ はほぼ 10^{-5} となる。また、軸力の割増しをせず $\alpha=1.0$ とした場合は、 $1-p$ はほぼ 10^{-4} となる。なお、この $1-p$ 値を上記と同じ値である 10^{-5} に保つためには、設計上の安全率を $\nu=1.75$ 程度に選ぶ必要がある。

本研究は昭和 43, 44 年度文部省科学研究費総合研究の一環として実施したものである。ここに付記して関係各位に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 西村：摩擦接合のリアリティについて、土木学会関西支部年次学術講演会概要集，pp. 1-25-1~2, 昭和 44 年 5 月。
- 2) 西村：摩擦接合の欠陥ボルト数と耐荷力との関係について、土木学会関西支部年次学術講演会概要集，pp. 1-42-1~2, 昭和 45 年 5 月。
- 3) 西村・田井戸・瀬良・穂積・三谷：現場締め高力ボルト軸力のばらつきについて、土木学会論文報告集，No. 180, pp. 1~9, 1970 年 5 月。
- 4) 西村：高力ボルト摩擦接合のりり耐力変動について、土木学会論文報告集，No. 187, pp. 37~47, 1971 年 3 月。
- 5) 日本道路協会：鋼道路橋高力ボルト摩擦接合設計施工指針，昭和 41 年 7 月。

(1970. 8. 2・受付)