摩擦接合の欠陥ボルト数と耐荷力との関係について
———摩擦接合のリライアビリティ———

神戸大学工学部　正員　西村　昭

1. 緒言

摩擦接合における高力ボルト軸力のばらつきは，継手辷り耐力のばらつきを生ずる。その確率法則については，3つの仮定〔①ボルト軸力は正規分布に従って変動する；②継手の辷り耐力はボルト軸力和に比例する；③摩擦面の辷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.〕に基づいて前報[1]にて導いた通りである．しかし，実際状態では，仮定したボルト軸力分布に従わないような軸力を有するボルト，すなわち，締め忘れ，あるいは頭飛びなどのいわゆる欠陥ボルトが存在しうる。そこで本研究においては，これらの欠陥ボルトを有する継手の辷り耐力のばらつきをもとめ，摩擦接合の安全性に若干の検討を与えようとするものである。

2. 継手辷り耐力の分布

欠陥ボルトの位置は継手内では at random であるから，継手の軸方向に対し，非対称なボルト軸力配置を生ずる．そのような継手の辷り耐力は，ボルト本数の少ない小継手では影響があり[2]，ボルト本数の多い場合は影響がない[3]という実験結果があるが，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。従って，継手辷り荷重 P_S は軸力和 $\sum_i N_i$ に比例し，

$$P_S = f\mu\sum_{i=1}^{n} N_i \tag{1}$$

を用いて評価することができる。ここに，f：摩擦面の数，μ：摩擦面の辷り係数，N_i：第 i 番目のボルトの軸力，n：一継手内のボルト総数である。

一継手内に欠陥ボルト k 本を有する場合の辷り荷重 $P_{S,n-k}$ は次のようになる．

$$P_{S,n-k} = f\mu\sum_{i=1}^{n-k} N_i \tag{2}$$

μ，N_i がそれぞれ次のような正規分布：

$$\mu : N\,(m_\mu\,;\,\sigma_\mu^2)\,;\quad N_i : N\,(m_N\,;\,\sigma_N^2) \tag{3}$$

に従うときは，$P_{S,n-k}$ の分布は，次のような正規分布となる．

$$\left.\begin{aligned}&\text{平均値}\quad m_{P_S,n-k} = f\cdot(n-k)\,m_\mu\cdot m_N\\ &\text{分　散}\quad \sigma^2_{P_S,n-k} = f^2(n-k)\left\{m_\mu^2\sigma_N^2+(n-k)m_N^2\sigma_\mu^2+\sigma_\mu^2\sigma_N^2\right\}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

3. 継手許容辷り耐力に対する非超過確率

式(4)に対して許容辷り耐力 P_a は，安全率を ν とすると

$$P_a = f\,n\,m_\mu\,m_N/\nu \;\equiv\; m_{P_S}/\nu \tag{5}$$

で与えられ，かつ施工上の目標軸力，すなわち標準軸力は設計軸力 m_N の α 倍（$\alpha>1$）に選ばれるから，この継手の辷り耐力は次のような正規分布に従うことになる．

$$\left.\begin{aligned}&\text{平均値}\quad m'_{P_S,n-k} = \alpha f\cdot(n-k)\,m_\mu\,m_N\\ &\text{分　散}\quad \sigma'^2_{P_S,n-k} = \alpha^2 f^2(n-k)\left\{m_\mu^2\sigma_N^2+(n-k)m_N^2\sigma_\mu^2+\sigma_\mu^2\sigma_N^2\right\}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

このようなk本の欠陥ボルトを有する継手のリライアビリティは，式(6)の分布において，その継手辷り耐力が式(5)のP_a以上となる確率p，あるいは非超過確率$1-p(\equiv q)$を以て評価することができる。すなわち，

$$p=\int_{t_a}^{\infty}\phi(t)\,dt,\quad \phi(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \tag{7}$$

ここに，$t_a=\left(P_a-m'_{P_s,\,n-k}\right)/\sigma'_{P_s,\,n-k}$ であるが，式(5)，(6)を用いて変形すると，

$$t_a=\frac{1}{v'_{P_s}}\left(\frac{1}{1-\frac{k}{n}}\;\frac{1}{\alpha\nu}-1\right)=\frac{1}{v'_{P_s}}\;\frac{r-0.432}{1-r} \tag{8}$$

ただし，$k/n=r$：欠陥率（$r\leq 1$）であり，$\alpha=1.1$，$\nu=1.6$とした。また$v'_{P_s}=\sigma'_{P_s,\,n-k}/m'_{P_s,\,n-k}$で，これを式(6)で書き直し，式(8)に用いると次のようになる。

$$t_a=\frac{1}{v_\mu}\sqrt{\frac{1}{1+\frac{1}{n(1-r)}\left(\frac{v_N}{v_\mu}\right)^2}}\;\frac{r-0.432}{1-r} \tag{9}$$

すなわち，この関係を用いて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，欠陥率rなどの相関性を知ることができる。また，式(9)より，nの増大は継手リライアビリティの増大をもたらすことを直ちに知ることができる。[一般に $t_a<0$]

さて，v_μ，v_N/v_μ，n，rの値の各種の組合せについてq値を求め，rと$\log q$関係をプロットするとほぼ直線関係を得る。それから$q=10^{-3}$，および10^{-2}に対する欠陥率をもとめ，nrの値から辷り耐力が許容耐力を下廻らないための許容欠陥ボルト数をもとめると表示したようになる。

許容ボルト数

v_N/v_μ	n	$q=10^{-3}$	$q=10^{-2}$
0.5	30	5	7
	8	1	2
	6	1	1
	4	0	1
	3	0	0
	2	0	0
1.0	30	5	7
	20	3	5
	10	1	2
	8	1	1
	6	0	1
	4	0	0
	3	0	0
	2	0	0
2.0	30	4	7
	20	2	4
	10	1	2
	8	0	1
	6	0	1
	4	-	0
	3	-	0

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，$q=10^{-3}$に抑える場合は，1本の欠陥ボルトの存在も許容されないのは$n\leq 4$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本以下となる。$q=10^{-2}$に抑えると，それぞれ，$n\leq 3$；4；4本となる。

4. むすび

本文で言うリライアビリティは，前述のように本来のものとは若干異なる内容のものであるが，これを以て継手の安全性を示す一つの指標とすることができる。また，欠陥ボルトの存在と継手の安全性との相関性についても，本研究でかなり明確にできたと考えている。

参考文献：

1) 西村他：現場締め高力ボルト軸力のばらつきについて，土木学会第22回年次講演会，昭42－5月

2) 西村他：摩擦接合の耐力変動について，土木学会関西支部年次講演会，昭43－5月

3) 西村他：摩擦接合の耐力に及ぼす軸力のばらつきの影響，土木学会第23回年次講演会，昭43－10月