

高力ボルト摩擦接合継手の支圧限界強度に関する 2, 3 の考察

大阪市立大学大学院 学生員 ○戸田 圭彦
大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司

1. はじめに

近年、高力ボルト摩擦接合継手の一層の合理化に向けて、接合面処理に応じたすべり係数の見直しや、すべり後耐力の評価が待たれている。特にすべり後耐力を考慮した設計は、継手の耐力を飛躍的に高める余地があり、国外の設計体系^{1,2)}ではすでにその思想が取り入れられている。

すべり後耐力の評価のためには、高力ボルト摩擦接合継手の各限界状態を明らかにしておくことが不可欠であるが、現状国内ではすべり限界以外は明確に規定されていない^{3,4)}。また、支圧接合継手の支圧抵抗については規定があるものの、すでにすべり後が考慮されている国外の設計体系とは大きく異なる。各国の支圧強度の比較は既に文献⁵⁾に見られるが、当時は許容応力度設計法(ASD)であり、荷重抵抗係数設計法(LRFD)などの限界状態設計法に切り替わりつつある。

そこで本稿では、常時荷重に対しては摩擦抵抗で、非常時荷重に対しては支圧抵抗で抵抗するような摩擦接合継手の設計思想に立脚し、日本・米国・欧州の設計体系の支圧抵抗を比較し、考察を加えた。

2. 高力ボルト継手の支圧抵抗

表-1 に各設計体系における支圧抵抗の規定の比較を示す。比較しやすいように記号を統一し、支圧抵抗は全て公称支圧応力(図-2)に置換して表記した。一般に、支圧力を受ける鋼板の破断強度は縁端距離の関数として表すことができる。鋼板の支圧実験は種々行われているが、ここでは代表して 2 グループの提案式^{6,7)}を示した。

図-3 は母材が SS400 であるときの、縁端距離と支圧抵抗応力との関係を示したものである。支圧抵抗応力は母材の降伏強度で無次元化している。Eurocode は $e_2/d > 1.5$ の場合を示した。AASHTO および Eurocode は

表-1 各設計体系の支圧強度

道路橋示方書 (ASD)	鉄道構造物等設計標準	AASHTO	Eurocode	実験式
許容支圧応力度は、材料の降伏強度までとする。 $\sigma_{ba} = \sigma_y$ ただし、安全率を 1.7 と仮定すると、 $\sigma_b = 1.7\sigma_y$ と考えることもできる。	支圧強度の特性値は、材料の降伏強度の 50% 増しとする。 $\sigma_b = 1.5\sigma_y$ ただし、引張強度を超える場合は、引張強度を上限とする。 $\sigma_b \leq \sigma_u$	ピッチおよび端部距離が 2.0d 以上であれば、 $\sigma_b = 2.4\sigma_u$ ピッチあるいは端部距離が 2.0d 以下であれば、 $\sigma_b = 1.2 \frac{e_1}{d} \sigma_u$ 拡大孔の場合はそれぞれ $\sigma_b = 2.0\sigma_u$ $\sigma_b = 1.0 \frac{e_1}{d} \sigma_u$	$\sigma_b = k_1 \alpha_b \sigma_u$ k_1 は次の最小値 $k_1 = 2.8 \frac{e_2}{d} - 2.7$ $k_1 = 2.5$ α_b は次の最小値 $\alpha_b = \sigma_{ub} / \sigma_u, 1.0$ ここで、 $\alpha_d = \frac{e_1}{3d}$	Kulak ら : $\sigma_b = \frac{1}{0.715} \left(\frac{e_1}{d} - 0.5 \right) \sigma_u$ ただし、 $1.0 \leq e_1/d \leq 4.0$ 藤本ら : $\sigma_b = \frac{e_1}{d} \sigma_u$ ただし、 $1.5 \leq e_1/d, e_2/d \leq 2.0$

ここに、 σ_b : 支圧抵抗応力、 σ_{ba} : 許容支圧応力、 σ_y : 母材の降伏強度、 σ_u : 母材の引張強度、 σ_{ub} : 高力ボルトの引張強度、 e_1 : 端部距離、 e_2 : 縁端距離、 d : ボルト軸径、 D : 孔径、 t : 母材の板厚である。縁端距離、端部距離は図-1 を参照。

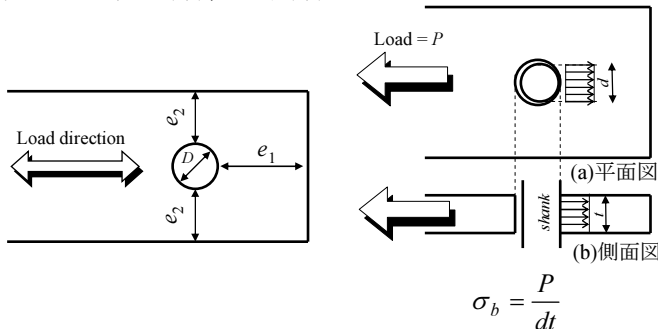


図-1 縁端距離の表記

図-2 支圧抵抗応力

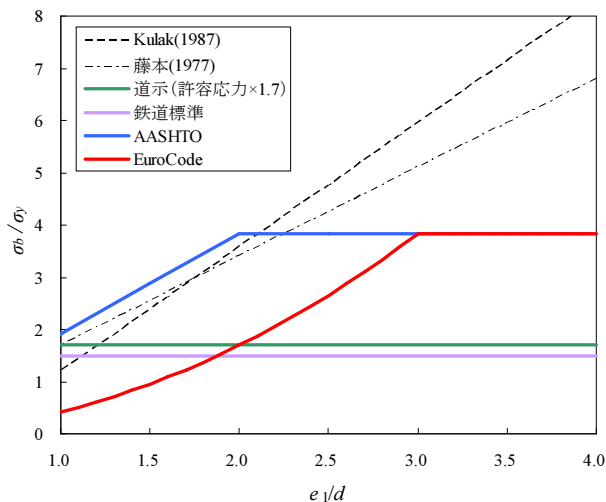


図-3 縁端距離と支圧抵抗の関係

キーワード 高力ボルト摩擦接合, 限界状態設計法, 支圧強度, 支圧限界状態

連絡先 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系 橋梁工学分野 TEL06-6605-2765

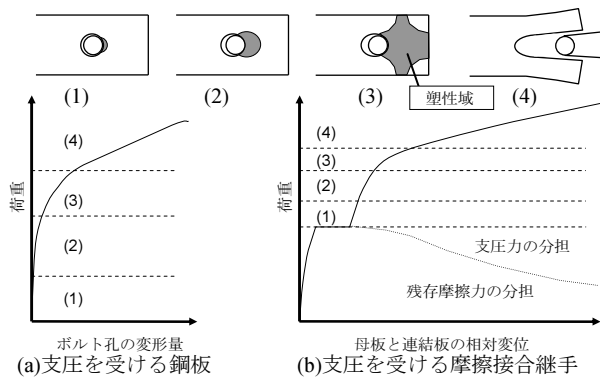


図-4 支圧限界状態の推移

支圧抵抗の大きさは縁端距離に比例している。図より、Eurocode は AASHTO に対してやや安全側となっていることがわかる。我が国の道路橋示方書(以下道示)・鉄道構造物等設計標準(以下鉄道標準)は、縁端距離に関わらず一定である。

縁端距離を大きくとれば、破断までに相当の支圧応力に対して抵抗できる。しかし、相当量の支圧力作用下においてはボルト孔の損傷は免れない。そのため、AASHTO や Eurocode では、おおよそ降伏強度の 4 倍程度の支圧応力以内に抑えるように規定されている。

3. 支圧限界状態

支圧限界状態がどのような状態であるか、その定義によって設計耐力は大きく変わる。支圧を受ける鋼板の挙動は概ね次のようである⁵⁾。(1)ボルト軸の接触している頂部およびその周囲の孔側面が降伏する(2)円弧状に塑性域が拡大する(3)塑性域が縁端部を貫通し剛性が低下する(4)塑性変形の増大と破断。図-4(a)に荷重-変位関係とともに各段階の位置を示す。表-1 で示した二つの実験式はこの内の(4)段階の破断時点の荷重を示すものである。AASHTO は(4)段階を支圧限界状態とし、Eurocode は文献 5)に示される実験結果と照合すると(3)段階程度に相当すると判断できる。しかしながら、道示・鉄道標準ではこれらの規定がどのような支圧限界状態に相当するのかを明確にしていない。

4. すべり後の余裕耐力

すべり後、支圧限界状態に到達するまでの余裕耐力をすべり/降伏耐力比 β を変化させて試算した。1 行 2 列 2 面摩擦継手、M22(F10T)、すべり係数 0.4、SS400、 $e_1/d=e_2/d=2.0$ の場合の試算した結果を表-2 に示す。

$\beta=0.6\sim 0.8$ では、すべり後に Eurocode で規定される支圧限界荷重に到達する。また全てのケースで終局限界状態は支圧限界状態では決定しない。

5. 摩擦力の取り扱い

継手のすべりが発生したのち、荷重は支圧抵抗以外

表-2 2 面摩擦接合継手の試設計

case	β	t	P_{slip}	P_y	$P_{b\ EC}$	$P_{b\ AA}$	P_u	P_{ub}	$P_{b\ EC}/P_{slip}$	$P_{b\ AA}/P_{slip}$
1	0.6	26	328	547	465	1050	930	790	1.4	3.2
2	0.7	23	328	469	399	900	798	790	1.2	2.7
3	0.8	20	328	410	349	787	698	790	1.1	2.4
4	0.9	18	328	364	310	700	620	790	0.9	2.1
5	1.2	13	328	273	233	525	465	790	0.7	1.6

ここに、 t : 板厚(mm), P_{slip} : すべり荷重(kN), P_y : 母材の降伏荷重(kN), $P_{b\ EC}$: Eurocode 支圧抵抗荷重(kN), $P_{b\ AA}$: AASHTO 支圧抵抗荷重, P_u : 母材の引張破断荷重(kN), P_{ub} : ボルトのせん断降伏荷重(kN)

にもボルト軸力によって生じた摩擦抵抗によっても分担されていると考えられる。一方、主すべり以降の残存摩擦力を推定するのは不確定要因も多く、多くの困難を伴うために、一般にはこれを無視して荷重は全て支圧抵抗で受け持つとされ、設計計算時にも、支圧状態へ移行した時点ですべり荷重に相当する力が全て支圧部分に作用すると仮定している。この仮定は安全側の評価となり、実際には図-4(b)のように支圧挙動が推移すると考えられる。例えば文献 8)では、すべり後の残存軸力量が十分存在していることが示されており、この影響を考慮することで一層、合理的な摩擦接合継手が実現できると考えられる。

6. まとめと今後の展望

本稿で得られた結論は次のとおりである。

- 1) 各設計体系における支圧抵抗の比較を行った。
- 2) 支圧を受ける鋼板の支圧限界状態について考察した。
- 3) 継手の試設計を行い、すべり後の余裕耐力について議論した。
- 4) 摩擦接合の支圧限界状態を考える上で、摩擦力の取り扱いが重要であることを示した。

本稿で述べた通り、我が国における支圧限界状態に関する研究はやや停滞している感がある。今後は支圧限界状態を定量的に評価できるような技術情報の蓄積が望まれる。

参考文献

- 1) European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.8, Design of joints, EN 1993-1-8, 2005.
- 2) AASHTO : LRFD Bridge design specifications, -2005 interim revisions, Washington, D.C., 2005.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 2000.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説-鋼・合成構造物, 丸善, 2009.
- 5) 日本鋼構造協会接合小委員会: 鋼構造接合資料集成-リベット接合・高力ボルト接合-, 技報堂, 1977.
- 6) 藤本盛久・佐藤亘宏: 鋼材の支圧強さおよび許容支圧応力度に関する研究 (その 3), 日本建築学会論文報告集, No.218, 1974.
- 7) G. L. Kulak, J. W. Fisher, J. H. A. Struik : Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints Second Edition, AISC, 1987.
- 8) 亀井義典・西村宣男: 高力ボルト摩擦接合継手の主すべり以降の挙動, 鋼構造論文集, 8 巻, 31 号, 2001-9.