

1. まえがき

我国の摩擦接合継手に対する設計規準は、主すべりにより規定されている。しかし、限界状態設計法への移行に際し、主すべり発生後の継手の連続性や終局状態におけるボルトの耐力等を含め、継手部の挙動を支配する要因を整理することが検討課題として考えられる。本報告では摩擦接合継手の線形限界以降に存在する各種限界状態を評価することを目的に、主すべり以降の挙動に対する解析手法を開発した。

2. 解析手法

図-1にボルト孔とボルト軸の支圧問題に対する計算過程を示す。支圧問題を解くにあたり、計算過程は大きく①ボルト孔とボルト軸の接触判定、②接触要素の導入の2過程に別れる。

(1) ボルト孔とボルト軸の接触判定

図-2に接触判定の概要を示す。ボルト軸のボルト孔周囲に対する接触状況は、その節点位置に応じ以下の3ケースに分別される。

- a) P1 (Separate)・・・ボルト孔とボルト軸が接触していない状態。
- b) P2 (Pass)・・・ボルト孔周囲の節点がボルト軸内にまで変位し、幾何学的形状に矛盾が生じている状態。
- c) P3 (Touch)・・・ボルト孔周囲の節点がボルト軸に接している状態。

上記3ケースを判定する際、ボルト軸の形状が重要な問題となる。本解析では簡易的にボルト軸の形状として短径 r_a 、長径 r_b で表される楕円で近似する。次式は上記3ケースに対する判定式である。

$$\left. \begin{aligned} P1 \cdots R > r_\theta + \Delta r_\theta \\ P2 \cdots r_\theta + \Delta r_\theta \geq R \geq r_\theta - \Delta r_\theta \\ P3 \cdots r_\theta - \Delta r_\theta > R \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 r_θ は、次式で与えられる。 $r_\theta = \sqrt{(r_a \cos \theta)^2 + (r_b \sin \theta)^2}$ 。

また、 θ ：ボルト軸中心とボルト孔周囲における節点のなす角度、 R ：ボルト軸中心からボルト孔周囲における節点までの距離である。許容誤差 Δr_θ の値としては、解析精度上問題がないことを確認した上で r_θ の 10^{-3} 倍の値を採用した。継手端部に強制変位を与えることにより、ボルト孔周囲にP2となる節点が存在する場合、現ステップの繰り返し計算における増分変位および応力、ひずみを破棄し、強制変位量を縮小し再計算する。P2が存在しなくなるまで、上述の計算過程を繰り返し、接触要素の導入に備える。

(2) 接触要素の導入

図-3に接触要素導入の概要を示す。①の過程でP3と判定されたボルト孔周囲の節点は、ボルト軸部の節点P3'と接触要素により結合される。接触要素は、荷重増分に伴って生じる接触現象を表現するために接触点P3、P3'間に挿入される特殊なバネ要素である。導入の際には、

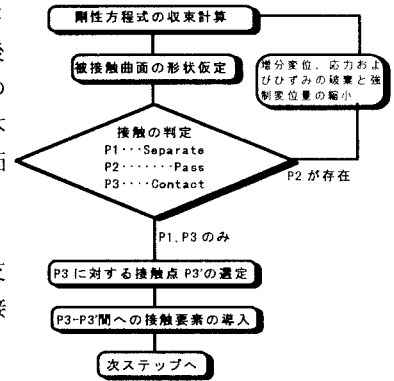


図-1 接触要素導入過程

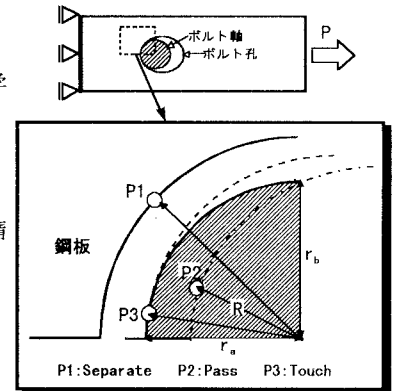


図-2 接触判定の概要

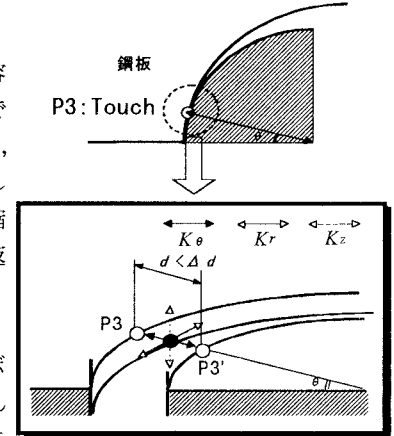


図-3 接触要素導入の概要

接触要素を含めた全自由度を再計算し、計算に必要な配列を確保する。P3'の選定方法は、ボルト軸部に属する節点群でP3と最短距離にある節点をP3'とする。接触要素は、接触点において法線方向、接線方向、鉛直方向の3自由度を有し、それぞれの方向の剛性を K_θ, K_r, K_z とする。接触点P3, P3'は、法線方向には変位を共有し、接線方向および鉛直方向には滑動を考える。 K_θ の値としては、法線方向に変位を共有する十分な値として鋼板の剛性の10³倍の値、 K_r に対しては滑動を表現しうる値として摩擦係数0.5を使用した。 K_θ, K_r は継手長手方向およびそれに直角な方向の剛性 K_θ, K_r をボルト軸周りに座標変換することにより得られる。

$$K_\theta = \frac{(K_x r_b^2 \cos^2 \theta + K_y r_a^2 \sin^2 \theta)}{r_a^2 \sin^2 \theta + r_b^2 \cos^2 \theta}, \quad K_r = \frac{(K_x r_a^2 \sin^2 \theta + K_y r_b^2 \cos^2 \theta)}{r_a^2 \sin^2 \theta + r_b^2 \cos^2 \theta} \dots\dots\dots (2)$$

3. 実験との比較による妥当性の検証

表-1に示す2モデルを解析する。これらは過去に著者らにより、実験を実施したモデルである。モデル1はボルト配置片側2行1列、モデル2は1行2列であり、双方2面せん断継手である。解析モデルの対称性を考慮して1/8を解析対象とし、外力はボルト軸力導入後、継手端部に強制変位として与える。また、鋼板の終局状態は局所的なひずみがJIS規格により規定される鋼材の伸び(SS400で17%, JIS G 3101¹⁹⁹⁵⁾に達した時点で評価する。ジョイント要素は母材-添接板、添接板-座金間の全接触面に導入し、接触面における力学状態に応じて固着、すべりおよび剥離状態を表現することが可能となっている。¹⁾

表-1 解析モデルの諸元

		モデル1	モデル2
高力ボルト (F10T, M20)		2行1列	1行2列
母材	鋼種	SS400	SM490Y
	板厚	12mm	12mm
添接板	鋼種	SS400	SM490Y
	板厚	12mm	12mm
鋼材の構成則		弾性域, 降伏棚 By-Lenear ひずみ硬化域 B-n近似曲線 一様伸びに対するひずみの限界値 : 17%	
形状			

図-4は解析結果である。図(a)にモデル1、図(b)にモデル2に対する荷重-全伸び関係および変形図を示す。主すべり発生後、双方のモデルで、全伸び約15000 μ の時点でボルト孔とボルト軸部は支圧状態となり、荷重は再上昇する。両ケースで最大荷重時における実験値との誤差は2%以内に収まり、解析解に対する精度が検証された。また、実験ではモデル1はボルト軸部による母材の押し抜きせん断、モデル2は外側ボルト列における母材純断面の破断により終局状態に至ったが、本解析においても、それぞれ上述した箇所(図-4参照)で局所的にひずみが伸びの限界値に達しており終局状態までの継手の挙動を的確に表現している。

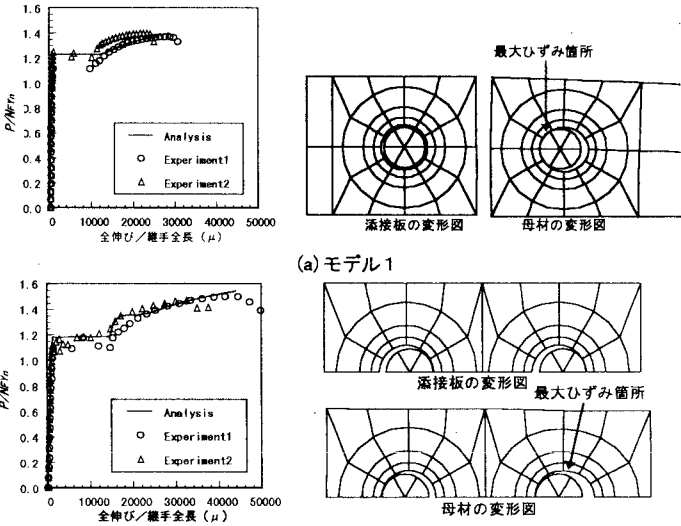


図-4 解析結果

参考文献 1) Nishimura,N., Kamei,Y., and Ikehata,B. : Analysis of HSFG Bolted Joints Considering Local Slip, TECHNOLOGY REPORTS OF THE OSAKA UNIVERSITY, Vol.46, No.2257 pp.227~236, 1996. 10.