

I-397

高力ボルト摩擦接合継手のすべり機構と応力特性に関する研究

大阪大学工学部 学生員 池端文哉 大阪大学工学部 正会員 西村宣男
 大阪大学工学部 正会員 亀井義典 駒井鉄工(株) 正会員 秋山寿行

1. まえがき 現在, 我国の土木分野における鋼構造設計法の書式が許容力度設計法から限界状態設計法へと移行しようとしている。設計法の移行に際し, 高力ボルト摩擦接合継手に関しても, 我国の技術水準を考慮して, 各種限界状態の系統的な見直しが必要である。今回の報告では, アイソパラメトリック要素を用いた弾塑性有限変位解析によって, 主すべりを生じる以前の, 摩擦接合継手の挙動を検証するために部分すべり機構のモデル化を行った。また, 実験と解析の母材および添接板の応力状態と比較するとともに, 継手の部分すべり現象と有効接着領域の変化の関連性について考察を試みた。

2. 解析モデルと, すべり機構のモデル化 本解析に用いる解析モデルは, 実験との比較を念頭に置き, 実験継手供試体の諸元をそのまま採用している。主すべりが発生する前に母材が降伏に達するBf2-bタイプ(ボルト配置は2行1列), 主すべりと母材の降伏が同時に発生するC2-bタイプ(ボルト配置は2行1列)を考えた。図-1に接着領域固定型の解析, 図-2にジョイント要素型の解析における要素分割図を示す。接着領域固定型の解析では, 母材-添接板における部分すべりの影響は考慮せず, 母材-添接板の接触面における有効接着領域は, 継手に作用する引張力の大小に関わらず, 藤本ら¹⁾の仮定した一定値 $r=d+h$ (r : 接着領域半径, d : 座金半径, h : 添接板厚)で規定した。ジョイント要素型の解析においては, 節点パネ型のジョイント要素を, 母材-添接板の全接触領域に導入し, 接触面における力学状態に応じて, ジョイント要素の剛性を変化させることにより, 部分すべりの構成則を表現しようとした。ジョイント要素はせん断2方向と板厚方向に自由度を有する。また, 接触面を有する母材・添接板各々の要素の積分点に生じる応力から, ジョイント要素の作用力を推定し, 接触面の力学状態の判定に用いた。

式(1)に作用力の評価式, 式(2)に力学状態の判定式を示す。

$$\begin{cases} F_x = A \times \bar{\tau}_{zx} / n, & F_y = A \times \bar{\tau}_{yz} / n, & F_z = A \times \bar{\sigma}_z / n \quad \dots (1) \\ F_x \leq F_z \cdot \mu, & F_y \leq F_z \cdot \mu, & F_z \leq 0.0 \quad \dots (2) \end{cases}$$

ここに, F_x, F_y, F_z : ジョイント要素に加わるせん断方向 (x 方向, y 方向) 及び板厚方向 (z 方向) の作用力, A : ジョイント要素で結合される要素の接触面における面積, $\bar{\tau}_{zx}, \bar{\tau}_{yz}, \bar{\sigma}_z$: 積分点のせん断および板厚方向の応力の平均値, n : アイソパラメトリック要素を結合するジョイント要素数, μ : すべり係数である。さらに, 接着領域における板厚方向の荷重伝達機構の評価についてはマトリクス自由度の縮合を行い, 計算の効率化を図っている。

3. 実験と解析の比較と, 解析結果 図-3にBf2-bタイプ, C2-bタイプ, 継手全伸びの実験と解析の比較の図を示す。図の縦軸は, 荷重を母材純断面降伏荷重(実測値)で無次元化した値(P/P_y), 図の横軸は継手全伸びを継手全長で無次元化した値を表す。有効接着領域固定型の解析では, 母材純断面降伏荷重以降も線形性を保っているのに対して, 実験では, 純断面降伏荷重以降, 非線形性を呈している。すなわち, 母材純断面降伏荷重が, 部分すべりを考慮しない解析の適用限界であるといえる。ジョイント要素型の解析では母材純断面降伏荷重以降も実験を追従するように非線形性が増し, 適用限界が向上している。Bf2-bタイプは, 母材純断面降伏荷重に対し, 主すべり発生荷重の余裕

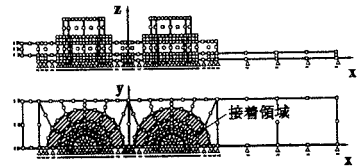


図-1 接着領域固定型要素分割図



図-2 ジョイント要素導入型要素分割図

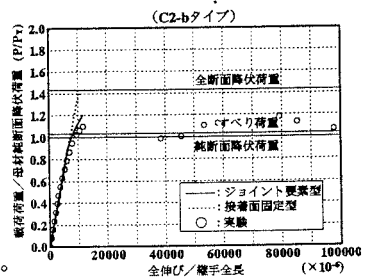
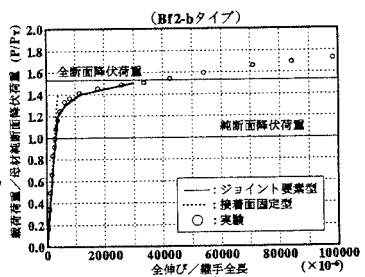


図-3 継手全伸びの実験と解析の比較

が大きく、主すべり発生までに部分すべりが顕著に発生するモデルであり、母材全断面降伏荷に至るまでの部分すべりに起因する荷重-変位特性は、的確に評価出来ている。一方、C2-bタイプは母材純断面の降伏と主すべりが同時に発生するように設計されたモデルであり、Bf2-bタイプに比べ母材の降伏に伴う部分すべりは僅かしか確認されない。そのため部分すべりに起因する荷重-変位特性は明確には確認できないが、主すべり発生段階の継手全伸びが評価し得ている。図-4に、Bf2-bタイプ、C2-bタイプのボルト孔周辺の相当応力の分布を示す。母材コバ面の応力の実測値と、解析値とを比較すると $P/P_F=1.2$ までは妥当性が伺える。しかし、部分すべりに対して母材の伸びの影響が顕著に現れる $P/P_F=1.2$ 以降、解析値と実験値に差が生じており、 $P/P_F=1.2$ が本ジョイント要素の適用限界と考えられる。Bf2-bタイプでは、ボルト軸力の導入により、ボルト孔周縁部には降伏応力の80%近い応力が生じている。また、本継手モデルにおける応力集中部の降伏は、 $P/P_F=0.6$ と低い段階で発生する。しかし、これらの現象が継手全伸びに与える影響は僅少である。荷重の増加に伴う応力の増加は、内側ボルト孔周辺に比べ、外側が大きく、母材の塑性域は外側ボルト孔周辺より内側へと広がる。更に、外側ボルト孔周辺では $P/P_F=1.2\sim 1.4$ の段階で塑性域が急増しており、母材の塑性変形と共に部分すべりが顕著に発生している。C2-bタイプでは、内側および外側ボルト孔周辺で、Bf2-bタイプと同様の傾向が伺えるが、塑性域の広がりBf2-bタイプに比べて小さい。ボルト軸力の導入によっても、ボルト孔周縁部で降伏応力の約40%の応力しか生じていない。また、荷重載荷に伴う塑性領域の増加も少なく、その結果、部分すべりは、微量しか確認されなかった。図-5に、Bf2-bタイプの荷重載荷にともなう有効接着領域の変化を示す。図中の●に示す節点内が、有効接着領域である。初期軸力導入時の有効接着領域は、藤本らの仮定¹⁾に一致している。母材が弾性状態にある $P/P_F=1.0$ の段階では有効接着領域の減少は殆ど伺えないが、外側ボルト孔周辺は引張荷重載荷方向から、内側ボルト孔周辺は継手中心方向からの有効接着領域減少の傾向が伺える。母材が塑性化する $P/P_F=1.2\sim 1.4$ の段階で有効接着領域が急激に減少しており、特に母材降伏型の本継手モデルでは外側ボルト孔周辺で、座金半径内にまで減少している。

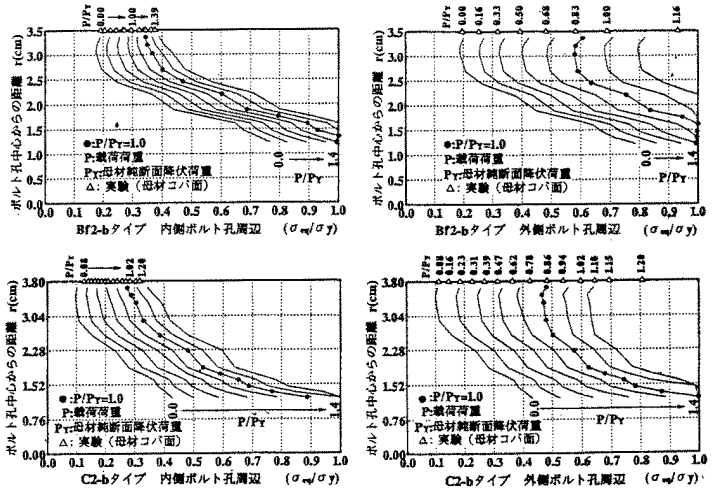


図-4 ボルト孔周辺の相当応力の分布

4. まとめ(1)ボルト軸力導入により生じる、ボルト孔周辺の過大な圧縮応力や、荷重載荷によるボルト孔近傍の局所的な降伏は、継手全体の剛性の低下をもたらさない。(2)本報告で提案したジョイント要素を用いることにより、部分すべりの挙動が解析的に表現可能となる。特に部分すべりの発生が著しいBf2-bタイプの継手では、良好の結果が得られた。(3)継手の部分的なすべりは、母材-添接板の接触面における有効接着領域の減少が原因であり、接着領域の減少は、母材または添接板の塑性変形により助長される。

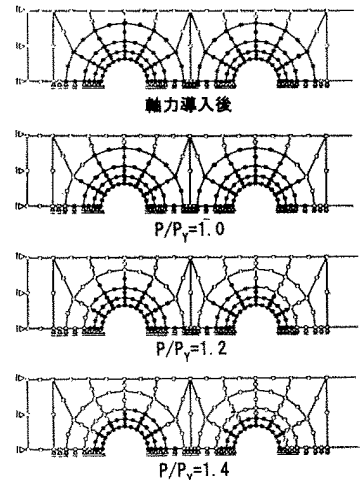


図-5 Bf2-b 荷重載荷に伴う有効接着領域の変化