

高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の荷重低下を再現する簡易的な FEM 解析手法の一提案

九州工業大学 正会員 高井 俊和
 大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司

熊本大学大学院 正会員 森山 仁志
 大阪市立大学 学生会員 古財 千寿

1. 目的

高力ボルト摩擦接合継手の引張載荷時の荷重と母板・連結板の相対変位関係では、図 1 にイメージを示すように、実験ではすべり後に荷重が低下する場合があります。一方で、著者らのこれまでの FEM 解析手法 [1] では、静止摩擦のみモデル化しているため、図中の (I) のように荷重低下が再現されない、設定する摩擦係数は全部位で均一のため、(II) のようにワッシャー・連結板間の摩擦がすべりの途中で付加されボルト軸部とボルト孔の接触、すなわち支圧開始までに荷重が上昇する 2 点で、実挙動との整合性を向上させる余地がある。

本検討は、すべり後の荷重低下とワッシャー部の摩擦に着目し、実挙動に整合したすべり後挙動を得るための簡易的な FEM 解析手法を提案し、その効果を確認することを目的としている。

2. 検討方法

図 2 に試験体形状を示すすべり試験の再現解析を実施し、解析で得られたすべり荷重、すべり後の低下した荷重、および荷重-母板・連結板の内側相対変位関係を実験と比較し解析の整合性向上を確認する。

継手はすべり側に F10T M16 の高力ボルトを 3 本配置しており、実験結果 (n3-NF-1) であり、解析で再現する目標値のすべり荷重は 543 kN、すべり後の低下荷重が 525 kN である。すべり側のボルト軸部とボルト孔のクリアランスは 2 mm である。

3. 解析方法および解析ケース

解析モデルの形状を図 3 に示す。要素長は 5 mm 程度とした。対称性を考慮して 1/4 モデルとした。降伏点、耐力、引張強さはミルシートの値を用いた。ヤング係数、ポアソン比は公称値である 200,000 N/mm², 0.3 とした。

解析ケースを表 1 にまとめる。ケース A~D はワッシャー・連結板間の摩擦係数をその他の部位の 1, 0.1, 0.01, 0.001 倍としたケースである。ケース E はケース D をもとに実験の荷重低下の再現を意図したケースである。ケース F, G はすべり後の低下した荷重をすべり

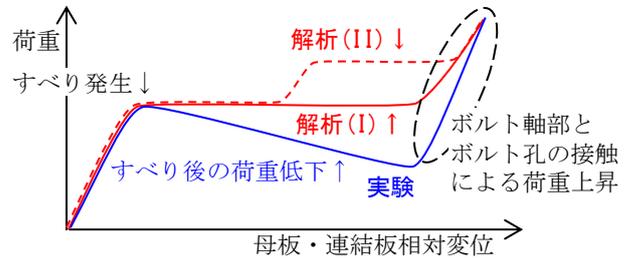


図 1 荷重-相対変位関係のイメージ

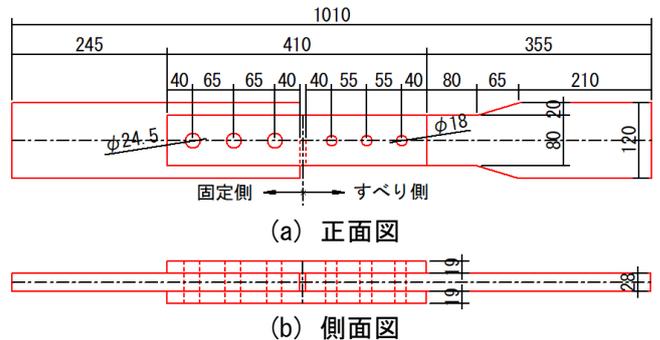


図 2 継手の試験体形状 (n3-NF-1)

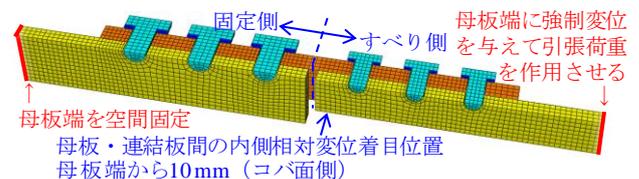


図 3 解析モデルの例

表 1 解析ケース

| 解析ケース名 | 設定した摩擦係数 | | | 目標値 | | |
|--------|----------------|------------------|--------------------|------------|-------|-----------|
| | すべり μ_{st} | 支圧開始時 μ_{dy} | ワッシャー・連結板間 μ_w | すべり荷重 (kN) | すべり係数 | 低下荷重 (kN) |
| A | 0.886 | | | 543 | 0.854 | 543 |
| B | 0.8825 | 0.08825 | | | | |
| C | 0.881 | | 0.00881 | | | |
| D | 0.881 | | 0.000881 | | | |
| E | 0.856 | | 0.000881 | | | 525 |
| F | 0.402 | | | | | 272 |
| G | 0.437 | | | | | |

荷重の半分としたケースである。解析モデルの摩擦係数は、目標とするすべり荷重、低下した荷重を再現するように事前解析で調整して決定した。すべりに対して設定した摩擦係数がケースにより多少異なっているのは、ワッシャーと連結板間の摩擦係数を変えると、すべり荷重も変化し、摩擦係数を調整したためである。

キーワード 高力ボルト摩擦接合継手, すべり, 荷重低下, 摩擦係数, 解析モデル化, FEM 解析

連絡先 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学 大学院工学研究院 建設社会工学研究系 TEL 093-884-3123

4. ワッシャー部の摩擦係数の影響

解析で得られたすべり荷重およびすべり後の低下荷重を図4に示す。荷重-相対変位関係を図5に示す。

すべりが生じ、ボルト軸部のボルト孔のクリアランスの片側分がずれた後、ワッシャーと連結板がずれるときに摩擦抵抗が付加され、ケース A, B では途中で作用荷重が上昇した。ケース C, D は、ワッシャー部の摩擦係数をその他の部位のそれぞれ 0.01 倍, 0.001 倍としており、すべり途中の荷重上昇が無視できるほど小さく、実挙動に近い結果が得られた。

5. すべり後の荷重低下の簡易的なモデル化手法

モデル化のイメージを図6に示す。引張過程を、(i)すべりが生じるまで、(ii)すべり後、荷重低下の最後まで、(iii)荷重が上昇に転じた以降の3ステップに分ける。(i)の摩擦係数はすべり荷重を、(iii)は低下した荷重を再現するように設定した。(i)と(iii)で設定する摩擦係数が異なるため、(ii)のステップで計算の進行に応じて摩擦係数を線型で変化させた。(i), (ii), (iii)ともクーロン摩擦モデルで、動摩擦は設定しておらず、計算上は静止摩擦係数を途中で変化させたことに相当する。

図3にも示すように、引張荷重は、変位増分で母板端に設定した強制変位により与えたため、図6に青線で示す母板端部変位-相対変位関係から、ステップの切替タイミングに対応する母板端部変位を求め、(i)と(ii)のステップ終了時の母板端部変位がその変位量となるように強制変位を設定することで、意図したタイミングで摩擦係数が変化するようにした。

6. すべり後の荷重低下の簡易的なモデル化の効果

ケース E~G と実験 (n3-NF-1) の荷重-相対変位関係の比較を図7に示す。ケース E と実験の比較からわかるように、ケース E はすべり後の荷重低下の過程が実験とよく一致した。なお、荷重低下後の上昇に転じた以降の挙動が実験と異なったため、整合させるためには更なる検討が必要であり、今後の課題である。

実験によっては、すべり後の荷重低下がすべり荷重に対して大きい場合や、荷重の低下が早いケースもある。摩擦係数が途中で大きく変化すると計算収束性が低くなりやすいが、本検討で示した手法では図7のケース F, G ように荷重低下がすべり荷重の半分と極端な場合でも結果が得られることを確認した。

7. まとめ

ワッシャー・連結板間の摩擦係数を他の部位の 0.01

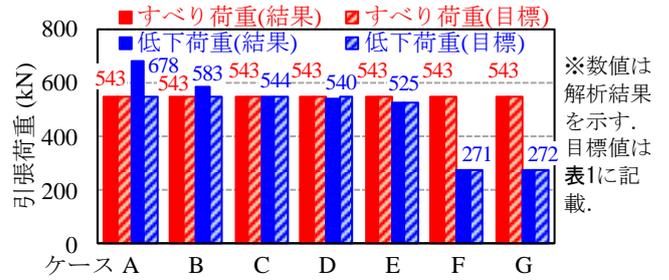


図4 すべり荷重および低下荷重

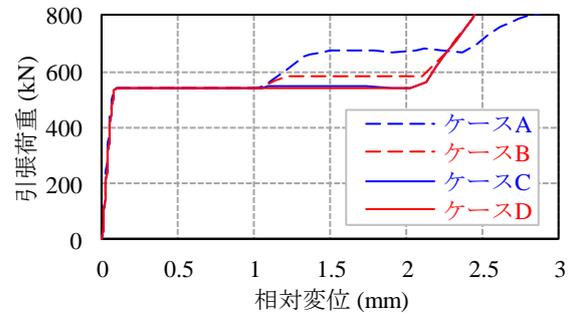


図5 荷重-相対変位関係

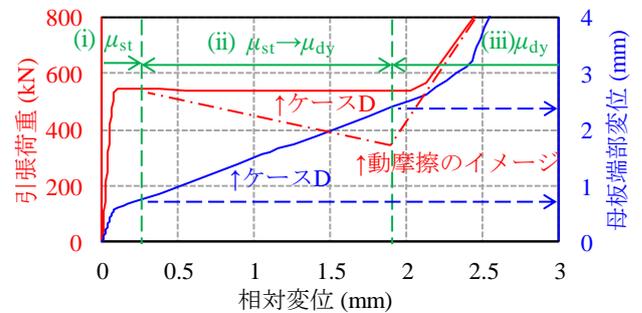


図6 低下荷重を再現するモデル化の概要

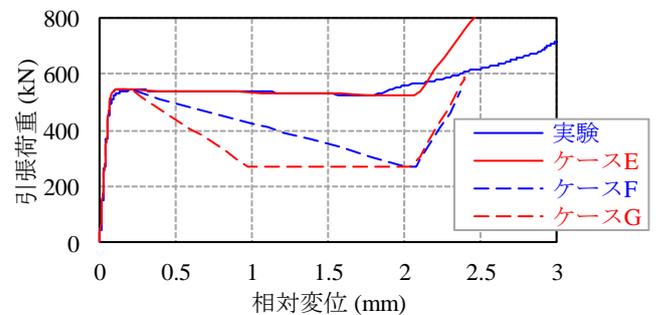


図7 荷重低下を反映した荷重-相対変位関係

倍から 0.001 倍程度とすること、母板端部の強制変位で引張荷重を与えるとき、強制変位量と摩擦係数を適宜調整することで、実験で得られるすべり後、ボルト軸部とボルト孔の接触により支圧状態になるまでの荷重低下を伴う荷重-相対変位関係を FEM 解析で簡易的に再現できることを示した。

参考文献

[1] 彭 雪, 山口 隆司, 高井 俊和, 村越 潤, 澤田 守: 厚板多列高力ボルト摩擦接合継手の構造諸元がすべり挙動に与える影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 69, No. 3, pp. 452-466, 2013.9