

# 高力ボルト摩擦接合部のはしあき破断に関する研究

213-052 小屋 大地

## 1. 序論

鋼構造建築物において、高力ボルト接合形式が出現して以来、それが一般的に使用されるようになってきている。高力ボルト接合は溶接接合に比べて、現場の環境条件に左右されず、構造欠陥の恐れが少なく施工できる。よって高い品質保持が可能となる接合形式であり、今後とも一般的に用いられる接合形式であると考えられる。しかし高力ボルト接合を用いた場合、接合部の耐力計算が複雑になってくる。本論文では、数種類の破断形式のうち、はしあき破断について検討するため、数種類の解析モデルを作成し、数値解析を行い、既存のはしあき破断耐力評価式と比較し、評価方法の妥当性及び評価式の精度を検討する。また、既存の評価式の中にはボルト孔中心から45度方向に広がる破断を仮定して耐力を算出する評価式もある。本論文の解析結果を用いてはしあき破断の詳細を検討する。

## 2. 既存の評価式

「鋼構造接合部設計指針」と「建築鋼構造の理論と設計」による評価式を式(1)と式(2)、簡略図を図1に示す。なおどちらの式も $n_1$ 列 $n_2$ 行高力ボルト接合モデルである。 $A_{nt}$ は引張応力が作用する有効断面積で、はしあき破断の場合は0となる。 $A_{ns}$ はせん断応力が作用する有効断面積、 $A_{se}$ は両応力の影響を考慮した有効断面積である。

$$P_{u1} = (A_{nt} + 0.5A_{ns})F_u \quad (1)$$

$$P_{u2} = \left( A_{nt} + \frac{1}{\sqrt{3}}A_{se} \right) F_u \quad (2)$$

$$A_{ns} = 2n_2\{(n_1 - 1)p + e_1\}t$$

$$A_{se} = n_2[(n_1 - 1)\{p - (\sqrt{2} - 1)d\} + \left(e_1 - \frac{\sqrt{2}-1}{2}d\right)]t$$

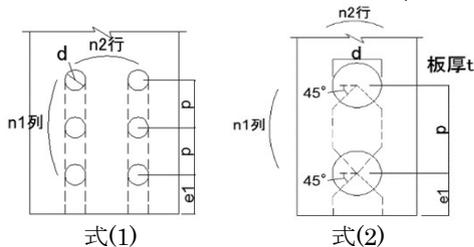


図1 接合部のはしあき破断

ここで $F_u$ は被接合材の引張強度、 $p$ は応力方向のボルトピッチ、 $e_1$ ははしあき距離、 $t$ は被接合材の板厚、 $d$ はボルト孔径である。

## 3. 解析概要

解析モデルの作成には高性能汎用プリポストプロセッサ HyperMesh を用いて作成し、数値解析には有限要素解析ソ

フトウェア Abaqus を用いて解析した。解析モデルについては、図2のような高力ボルト2面せん断型摩擦接合部形式の単純引張型モデルを作成し解析を行った。モデルは2列1行の高力ボルト接合部である。また、解析時間短縮などの目的で対称性を考慮して、解析モデルをx軸方向に対して半分にした。被接合材の母材はSS400材の真応力-真ひずみデータを使用した弾塑性体とし、添え板は弾性体とした。板厚に関しては、母材を15mm、添え板を9mmとした。高力ボルトに関しては、F10TのM16と用いて弾性体と設定した。また最大耐力時のボルト接合部の残留摩擦力の影響を除去するため、高力ボルトには初期張力を導入していない。解析モデルの拘束条件については、図示モデルの左端部を固定端とし、母材の右側端部に対して引張荷重を加えた。解析に使用した接触面のすべり係数は0.45、鋼材のヤング係数は205kN/mm<sup>2</sup>とした。ボルトピッチは40mmで固定値にし、はしあき距離を解析の変数として22~40mmに設定して計5モデルを作成して、解析した。

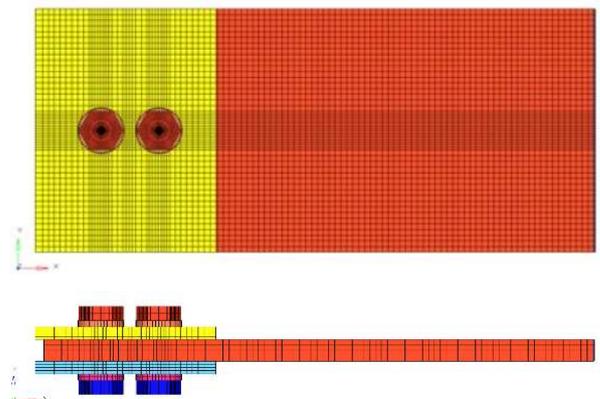


図2 解析モデル

## 4. はしあき破断耐力の評価

式(1)と式(2)の評価式より得られた耐力値 $P_{u1}$ 、 $P_{u2}$ 及び解析により得られた耐力値 $P_u$ を表1に示す。数値解析で得られた荷重-変位グラフは図3に示した。この数値解析では、明確な最大耐力が得られるように母材の材料特性に対して、引張強度 $\sigma_u$ とその時のひずみ $\epsilon_u$ をもつ $\sigma$ - $\epsilon$ 曲線上の点から劣化勾配を設定した。設定した劣化勾配を変動させても最大耐力はほとんど変わらないことを確かめた。表1の値 $P_u$ は、図3のグラフから読み取った最大荷重の値である。また、今回の解析モデルでは高力ボルトを安定させるため、載荷初期から荷重方向の接触が成立し易いように母材と添え板2枚を交互にずらした。図3の初期すべりは残りのボルト孔クリアランスに対応している。

表 1 各モデルのはしあき寸法及び最大耐力

モデル名	$e_1$ [mm]	$P_{u1}$ [kN]	$P_{u2}$ [kN]	$P_u$ [kN]
A1	40	480	476.8	447.6
A2	35	450	442.1	419.9
A3	30	420	407.5	395.9
A4	25	390	372.8	372.1
A5	22	372	352.1	357.2

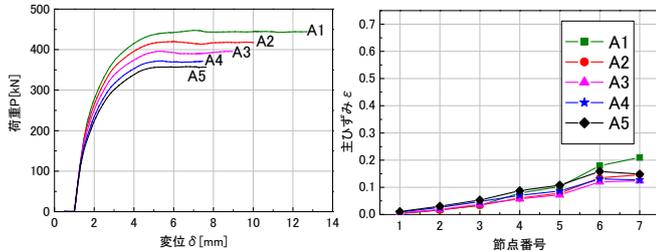


図 3 荷重-変位グラフ

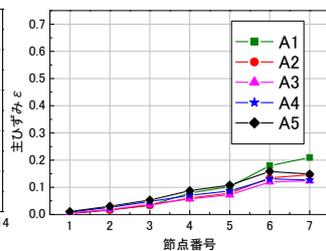


図 6 式(1)の主ひずみ分布

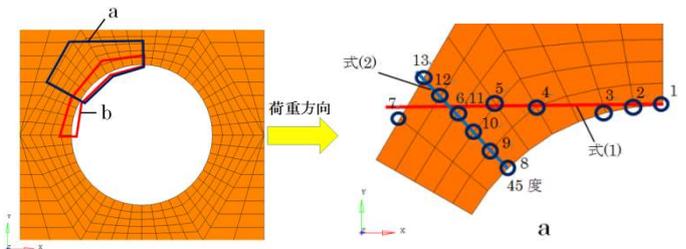


図 4 母材のボルト孔周辺要素

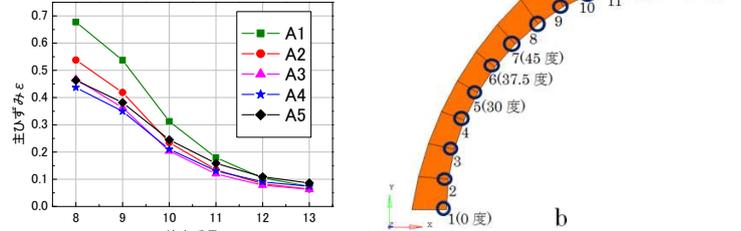


図 7 式(2)の主ひずみ分布

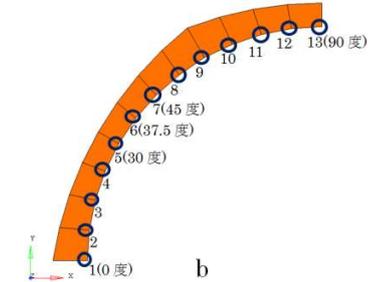


図 5 要素拡大図(a,b)

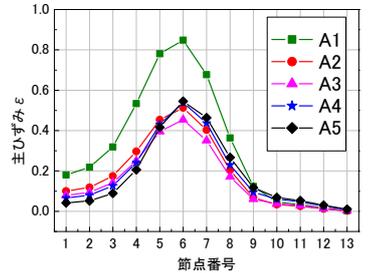


図 8 0度~90度の主ひずみ分布

図 3 に示すように 5 モデルともグラフは明確な弾塑性性状を示しており、大きな変形を経てから最大耐力に至った。まず式(1)と式(2)の異なる評価法による最大耐力の値を比較すると、学会指針の評価式(1)は改良された評価式(2)より最大耐力を大きく算出している。その差は約 1%~5%程度になっている。はしあき寸法が小さくなれば差が大きくなるが、評価方法による差が大きくなる傾向が見られる。これはせん断破断の違いによるもので、有効せん断面積が大きくなるものの、最大せん断強度 $\tau_u$ の設定違い(0.5 $F_u$ と $F_u/\sqrt{3}$ の違い)によって大差に至らず、緩和された結果であると言える。一方、学会指針の評価式(1)に対して数値解析の結果と比較すると、全体的には過大評価の傾向が見られた。はしあき寸法が大きい A1 モデルはその差が最も大きく約 7%程度になっているが、はしあき寸法を小さくすると差が少し小さくなる傾向が見られる。一方ボルト孔 45 度破断線に基づく評価式(2)の評価値については、数値解析に比べ全体的に学会指針値と同様の傾向が見られたが、はしあき寸法の小さいケースでは、精度の良い評価値を示している。

### 5. ボルト孔近傍の 45 度破断線に対する検討

本論文では耐力評価式の精度のみならず、仮定した破断モードについても検証する。はしあき破断耐力を算出する評価式(2)は、はしあき破断線がボルト孔中心から 45 度の角度で広がっていくと仮定している。その 45 度の破断線がどの程度明確に確認できるかについて、ひずみ分布のデータによる検討を行うため、ボルト孔近傍の要素密度を増やした。そのボルト孔周辺の様子を図 4 に示し、枠で囲った 2 つの部分拡大図を図 5 に示す。示す節点は z 軸方向 1 層~3 層をまとめたもので、主ひずみ値はその 3 層分の平均値として扱っている。図 5(a)のように式(1)の破断線と式(2)の破断線近傍の節点を数点とる。次に、図 5(b)のように節点 1(0 度)から 90 度回転した節点 13(90 度)までをとりだす。それら分布形を図 6~図 8 に示す。図 6 と図 7 に示すように

式(2)の節点のほうが式(1)の節点より全体的に過大値となり、45 度破断線を明確に確認できた。図 8 に示すように、5 モデルとも節点 6(37.5 度)で最大値となった。また節点 5(30 度)と節点 7(45 度)で比べると、はしあき寸法が比較的大きい A1~A3 モデルでは節点 5 のほうが大きく、小さい A4,A5 モデルは節点 7 のほうが大きい傾向が見られた。はしあき寸法が小さいケースのほうが評価式(2)の 45 度破断線に近いことが分かる。前述の最大耐力の結果も考えると、評価式(2)においてははしあき寸法の小さいケースでは評価精度が良くなることは、この応力・ひずみの解析結果に対応していると言える。

### 6. まとめ

本論文では高力ボルト摩擦接合部のはしあき破断について数値解析を行い、既存評価式の精度や、45 度線などのはしあき破断モードがどの程度確認できるのかを検討した。得た結果は以下のとおりである。

- (1)式(1),(2)ともに精度良く評価できているが、45 度破断線を考慮した改良式(2)の方がより精度良く評価でき、いずれの評価方法もはしあき寸法が大きくなると評価の誤差が大きくなる傾向が見られた。
- (2)はしあき寸法が小さい場合では、ボルト孔中心から 45 度に近い角度で破断が生じるが、はしあき寸法が大きくなると、この破断角度が若干小さくなる傾向が見られた。

### 参考文献

- 1)井上一朗:建築鋼構造の理論と設計,京都大学学術出版,2003.8
- 2)一般社団法人 日本建築学会:鋼構造接合部設計指針,2012.3
- 3)佐藤篤司,吹田啓一郎,多田裕一:支圧を考慮した高力ボルト接合部の最大耐力評価,日本建築学会構造系論文集,2011.1

(林研究室)