

ボルト孔を千鳥配置した継手母材の引張降伏線と破断線に関する基礎的検討

九州工業大学 学生会員○香戸 瞭太郎
山口大学 本間 小百合

九州工業大学 正会員 高井俊和

1. はじめに

高力ボルト継手のボルト孔が千鳥配置のとき、母材の純断面積は、1 列目のボルト孔で失われる断面積を控除し、2 列目からは控除量を次式で求める [1] [2].

$$w = d - \frac{p^2}{4g} \tag{1}$$

ここに、 w : 控除量, d : ボルト孔径, p : ピッチ, g : ケージである. 道路橋示方書 [2] では、降伏に対して用いられているが、最大荷重への適用性や破断などの終局挙動に不明な点がある. 本検討では、ボルト孔を千鳥に配置した母材の引張実験と FEM 解析を実施して引張挙動を確認した.

2. 引張実験と FEM 解析の方法

母材の諸元を表 1 に、形状を図 1 に示す. 図は後述の FEM 解析モデルの説明も兼ねている. 引張実験は、九州工業大学所有の 2,000 kN 万能試験機を用いて破断が生じるまで単調に引張荷重を与えた. 実験は各ケースで 3 体ずつ行った. 変位は変位計により測定し、荷重は荷重計を写真撮影して値を読み取った.

FEM 解析では Abaqus Standard v6.13 を用いた. 解析モデルの概要を図 1 に合わせて示す. 要素サイズ 2 mm 程度とし、材料特性はヤング率を 200,000 N/mm², ポアソン比を 0.3 とした. 応力-ひずみ関係を図 2 に示す. 降伏点と引張強さは実態に近づけるため JIS の下限値をそれぞれ 1.1153 倍, 1.2187 倍 [3] した値を用いた. これらの値をもとに、材料特性値間の関係式 [4] を用いてトリリニア型の公称応力-公称ひずみをモデル化し、真応力-真ひずみに変換して解析に用いた. 材料、幾何学的、境界非線形性を考慮して解析計算を実施した. 接触はペナルティー法、摩擦はクーロン摩擦を用いた. 母材と添接板間の摩擦係数は 0.5, それ以外は 0.005 とした.

計算ステップは、レンチによるボルト締めを想定した 500 N のボルト軸力を導入した後、 y の負の方向の持ち手部分の面全体を固定し、正の方向の持ち手部分の面全体に強制変位を与えて引張荷重を作用させた.

表 1 母材の諸元

| 試験体名 | p30g50 | p40g40 | p40g50 |
|-------------|-------------------------|--------|--------|
| 試験体数 | 3 | 3 | 3 |
| 鋼種 | SM490Y | | |
| ピッチ | mm 30 | 40 | 50 |
| 母材厚 | mm 9 | | |
| ナット側添接板厚 | mm 9 | | |
| 添接板厚 | mm 9 | | |
| 板幅 | mm 9 | | |
| 千鳥配置ボルト孔 | mm 18 | | |
| 縁端距離(ピッチ方向) | mm 25 | 30 | 25 |
| 総幅 | mm 150 | 130 | 150 |
| 1列目控除量 | mm 36 | | |
| 2列目控除量 | mm 13.5 | 8 | 10 |
| 母材純断面積 | mm ² 904.5 | 774 | 936 |
| 添接板純断面積 | mm ² 1710 | | |
| 降伏点 | N/mm ² 432.6 | | |
| 引張強さ | N/mm ² 546.5 | | |
| 設計降伏荷重 | kN 391.3 | 334.9 | 404.9 |
| 設計最大荷重 | kN 494.3 | 423.0 | 511.5 |

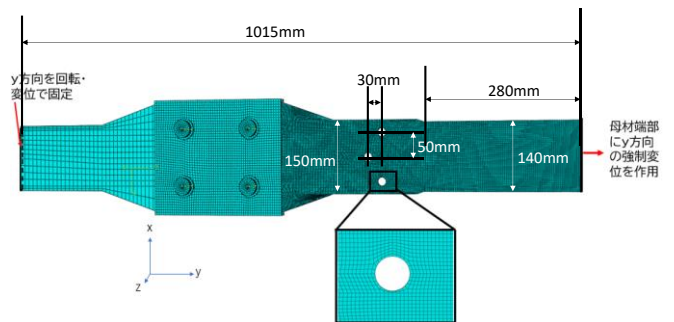


図 1 母板の形状と解析モデルの概要

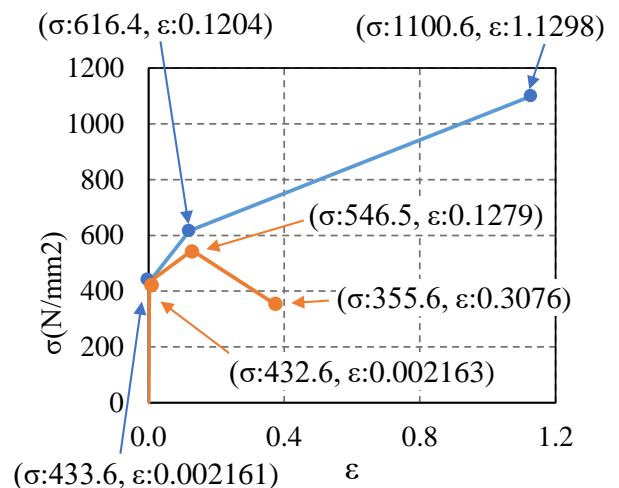


図 2 応力-ひずみ関係(FEM 解析)

3. 結果および考察

解析で得られた降伏荷重と最大荷重を表 2 にまとめる。降伏荷重は設計値との差が 2~9%となり、最大荷重は設計値との差が 11~15%となった。

実験と FEM 解析で得られた荷重-伸び関係を図 3 に示す。伸びの標点間は、千鳥のボルト孔の前後 155 mm とした。実験と FEM 解析で材料特性が異なるため、降伏から最大荷重までの挙動に差がみられた。材料試験結果が入手でき次第 FEM 解析の応力-ひずみ関係を修正して整合を確認する予定である。

次に、降伏時、最大荷重時、破断時のボルト孔周辺の変形状況を表 3 に示す。FEM 解析の降伏時と最大荷重時の変形は、3 ケースともすべてのボルト孔を通る斜めの経路となった一方で、破断時は 2 ケースで千鳥のボルト孔を通らない直線状、1 ケースですべてのボルト孔を通る斜めの破断線となった。引張実験では降伏時、最大荷重時には、斜めの経路にリュウダース線と思われる表面の変状が見られ FEM 解析と同様の経路になった。破断線も 2 ケースで直線状、1 ケースで斜めとなり、FEM 解析と同様になった。

降伏線と破断線が異なった理由について、最大荷重以降で局所変形が進行したとき、斜めの経路はせん断変形となる一方で、直線状の経路は引張変形のため断面積の減少が生じる。直線状の破断となったケースは、斜めの降伏線が生じたにもかかわらず、引張により断面積減少が生じた結果、直線状に破断したと考えられる。

今後の予定として、材料試験結果をもとに実験と FEM 解析の整合を確認し、さまざまな寸法のケースを解析し、ボルト孔配置と終局挙動の関係を確認する予定である。

謝辞 本検討は上田記念財団の研究助成を受けて行いました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

[1] Victor H. Cochrane: Rules for Rivet-Hole Deductions in Tension Members-Simple Formulas for Equal-Area Methods Derived-, ENGINEERING NEWS-RECORD, pp. 847-848, 1922

[2] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (II 鋼橋・鋼部材編), 2017.11

[3] 土木学会：補修・補強のための高力ボルト摩擦接合継手-当て板補修・補強の最新技術-, 鋼構造シリーズ 37, 第 1 版, 2021

表 2 降伏荷重と最大荷重

| | 降伏荷重(kN) | 最大荷重(kN) | 誤差(降伏荷重) | 誤差(最大荷重) |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| p30g50 | 426.9 | 552.8 | 9% | 12% |
| p40g40 | 347.5 | 484.8 | 4% | 15% |
| p40g50 | 414.4 | 569.7 | 2% | 11% |

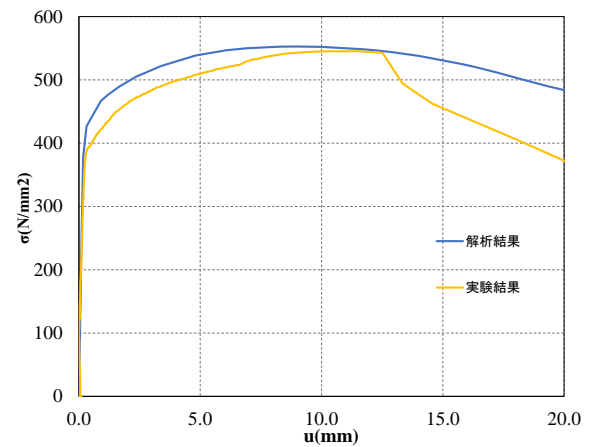
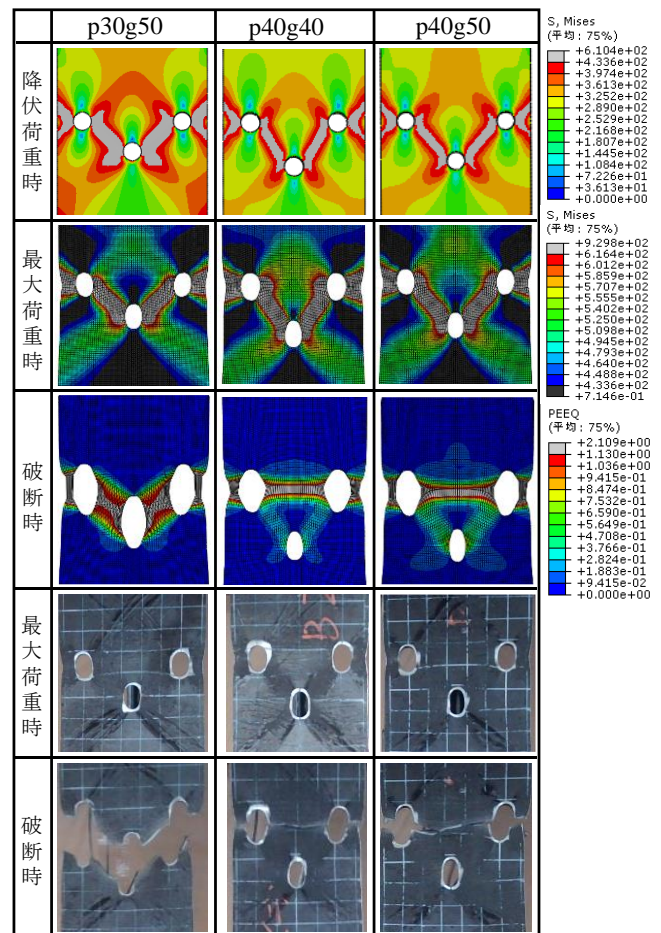


図 3 荷重-母材変位 (p30g50)

表 3 ボルト孔周辺の変形状況



[4] 高井俊和, 大塚貴広：鋼材の真応力-真ひずみ関係の簡易なモデル化方法の 1 提案, 鋼構造年次論文報告集, 第 29 巻, pp. 158-167, 日本鋼構造協会, 2021.11