

フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手の  
ボルトのせん断耐力評価手法に関する解析的検討

大阪市立大学大学院      学生員    ○藤原   眞幸

大阪市立大学大学院      正会員      山口   隆司

高田機工（株）          正会員      古財   千寿

1. 緒言

道路橋示方書<sup>1)</sup>において、高力ボルト摩擦接合継手の限界状態 3 はボルトの破断または被接合部材の破壊で定義され、フィラーを有する場合についても同様に、その耐荷性能を照査する必要がある。

文献 2), 3)では、フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手（以下、フィラー継手）を対象に実験および解析的検討を行い、フィラー厚が大きくなるほどボルトのせん断耐力が低下することを明らかにしている。しかし、具体的な設計手法の確立には至っていない。

本研究では、ボルトのせん断破断で終局限界状態を迎えるフィラー継手を対象にパラメトリック解析を行い、ボルトのせん断耐力評価手法を検討した。

2. 解析手法

表 1, 図 1 に解析ケース, 解析モデルをそれぞれ示す。パラメータである断面変化率 $\alpha$ は厚板側母材厚に対するフィラー厚の百分率で式(1)により表される。

$$\alpha = t_{fp} / t_{mn} \tag{1}$$

ここに、 $t_{fp}$ ：フィラー厚、 $t_{mn}$ ：厚板側母材厚  
解析 Solver に Abaqus/Standard2018<sup>4)</sup>を用いて短冊状フィラー継手をモデル化し、対称性を考慮した静的弾塑性有限変位解析を行った。要素分割には 8 節点低減積分ソリッド要素を用い、接触の境界条件は接触面とボルト軸部－ボルト孔壁間にクーロン摩擦モデルを付与した。これにより、支圧状態も再現可能である。解析ステップは、ボルト軸力を導入し、次のステップで強制変位を与える手順で構成した。

解析に用いた材料特性を表 2 に示す。母材および連結板には SM490Y、ボルトセットには F10T を用いた。

解析におけるボルトのせん断破壊判定は、ボルト軸断面上のすべての要素積分点における Mises 応力が引張強度に達した時点とした。

なお、これらの解析手法は文献 3)によってその妥当性が検証されている。

表 1 解析ケース

| 解析<br>ケース | ボルト径<br>$d$<br>(mm) | ボルト<br>孔径<br>$d_o$<br>(mm) | 板幅<br>$w$<br>(mm) | 縁端距離<br>$e$<br>(mm) | ボルト<br>ピッチ<br>$p$<br>(mm) | 厚板側<br>母材厚<br>$t_{mn}$<br>(mm) | 連結板厚<br>$t_{sp}$<br>(mm) | 設計ボルト<br>軸力<br>$N_d$<br>(kN) | ボルト<br>本数<br>$n$ | 薄板側<br>母材厚<br>$t_{mf}$<br>(mm) | フィラー<br>厚<br>$t_{fp}$<br>(mm) | 断面<br>変化率<br>$\alpha$<br>(%) |
|-----------|---------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| n2-a0     | 22                  | 24.5                       | 300               | 75                  | 75                        | 30                             | 20                       | 205                          | 2                | 24                             | 6                             | 0                            |
| n2-a20    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 20                           |
| n2-a30    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 30                           |
| n2-a40    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 40                           |
| n2-a50    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 50                           |
| n3-a0     |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              | 3                | 24                             | 6                             | 0                            |
| n3-a20    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 20                           |
| n3-a30    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 30                           |
| n3-a40    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 40                           |
| n3-a50    |                     |                            |                   |                     |                           |                                |                          |                              |                  |                                |                               | 50                           |

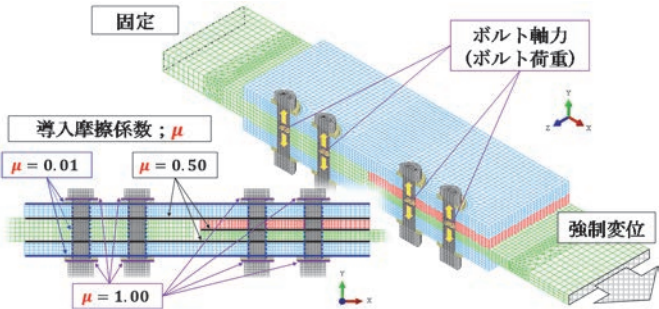


図 1 解析モデルの一例

表 2 材料特性

| 部材                | 鋼種     | 弾性係数<br>$E^*$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Poisson 比<br>$\nu$ | 真応力<br>$\sigma^*$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 真ひずみ<br>$\epsilon^*$<br>( $\mu$ ) |
|-------------------|--------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|
| 母材<br>連結板<br>フィラー | SM490Y | 200,533                               | 0.300              | 355.6                                     | 1,773                             |
|                   |        |                                       |                    | 474.0                                     | 48,790                            |
| ボルト<br>ナット<br>座金  | F10T   | 201,352                               | 0.300              | 904.1                                     | 4,490                             |
|                   |        |                                       |                    | 908.0                                     | 8,861                             |
|                   |        |                                       |                    | 1,047.4                                   | 46,311                            |

キーワード フィラー、高力ボルト摩擦接合継手、ボルトのせん断耐力、すべり後挙動

連絡先 〒594-1105 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138 大阪市立大学大学院 橋梁工学研究室 TEL06-6605-2765

### 3. 結果と考察

解析結果を表 3 に示す。最大耐力はすべてボルトのせん断破壊によって決定された。なお、ボルトのせん断耐力は最大耐力時におけるボルトの支圧力として算出し、接合面の残存摩擦力は加えていない。また、表中の設計値はフィラー継手を複せん断継手<sup>1)</sup>(ボルトのせん断破壊面数: 2) とみなして算出している。表 3 より、断面変化率が大きくなるほどボルトのせん断耐力が低下し、設計値を大きく下回ることが確認できる。

図 3 にボルトのせん断破壊時の载荷軸方向直応力コンターを示す。図 3 より、フィラーは支圧状態において抵抗断面として機能していないことがわかる。

文献 2)では、フィラー継手におけるボルトのせん断破壊は 1 面で生じ、フィラー付近で軸部の曲げ変形を伴うことが明らかになっている。本解析においても同様に、母材-連結板間の 1 面のみでボルトのせん断破壊に至った。これより、フィラー側連結板の支圧力が母材側連結板に対して小さい段階でボルトのせん断破壊が生じ、その耐力は 2 面分に達しないと考えられる。

図 4 にフィラー継手のボルトに作用する支圧応力分布の簡易モデルを示す。ボルトのせん断破壊面に生じる作用力を  $R_B$  とし、フィラー厚によらず一定値と仮定すると、フィラー継手のボルトのせん断耐力  $P_{bsd}^*$  は式 (2) で表される。また、 $R_A$ 、 $R_B$  は式 (3) で表されるので、 $P_{bsd}^*$  は低減係数  $\zeta_{fp}$  を用いて式 (4) となる。

$$P_{bsd}^* = P_{bsd} \times \frac{R_A + R_B}{2R_B} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_A = \frac{\sigma_{mp}(l - t_{fp})^3(l + t_{fp})}{2l^3} \\ R_B = \frac{\sigma_{mp}(l - t_{fp})(l^3 + t_{fp}l^2 + t_{fp}^2l - t_{fp}^3)}{2l^3} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{bsd}^* = \zeta_{fp} P_{bsd} = \frac{1}{1 + \alpha + \alpha^2 - \alpha^3} \times P_{bsd} \quad (4)$$

ここに、 $P_{bsd}$ : 複せん断として算出したボルトのせん断耐力、 $\sigma_{mp}$ : 母材による支圧応力、 $l$ : 母材とフィラーの総厚(=  $t_{mn}$ )、 $t_{fp}$ : フィラー厚、 $\alpha$ : 断面変化率(=  $t_{fp}/l$ )

図 5 には式 (4) より得た曲線と解析結果を示している。図 5 より、フィラー継手におけるボルトのせん断耐力は、断面変化率が大きいと複せん断としての設計値を大きく下回る一方、式 (4) を用いることで安全に評価できることがわかる。また、低減係数  $\zeta_{fp}$  は断面変化率  $\alpha$  のみで表すことができ、簡易的な評価式となっている。

表 3 解析結果

| 解析ケース  | 最大耐力<br>$P_u$<br>(kN) | 最大耐力/設計値<br>$P_u/P_{bsd}$ | ボルトのせん断耐力<br>$P_{bs}$<br>(kN) | ボルトのせん断耐力/設計値<br>$P_{bs}/P_{bsd}$ |
|--------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| n2-a0  | 1,027                 | 1.12                      | 893                           | 0.97                              |
| n2-a20 | 1,003                 | 1.09                      | 856                           | 0.93                              |
| n2-a30 | 971                   | 1.06                      | 806                           | 0.88                              |
| n2-a40 | 933                   | 1.01                      | 747                           | 0.81                              |
| n2-a50 | 871                   | 0.95                      | 656                           | 0.71                              |
| n3-a0  | 1,543                 | 1.12                      | 1,337                         | 0.97                              |
| n3-a20 | 1,501                 | 1.09                      | 1,235                         | 0.90                              |
| n3-a30 | 1,437                 | 1.04                      | 1,181                         | 0.86                              |
| n3-a40 | 1,346                 | 0.98                      | 1,050                         | 0.76                              |
| n3-a50 | 1,228                 | 0.89                      | 903                           | 0.65                              |

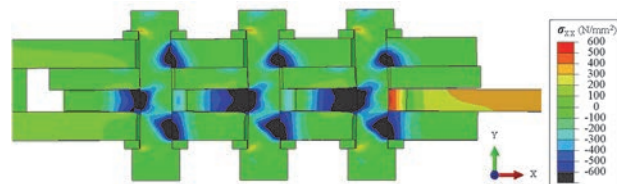


図 3 最大耐力時の载荷軸方向直応力コンター

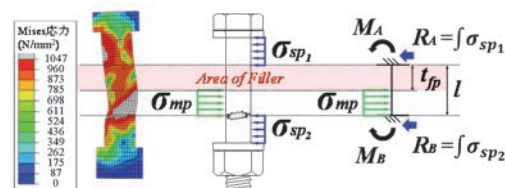


図 4 フィラー継手の支圧応力分布モデル

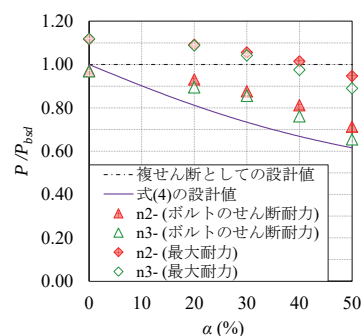


図 5 ボルトのせん断耐力と断面変化率の関係

### 4. 結言

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) フィラー継手におけるボルトのせん断耐力は、断面変化率の増加と共に低下し、複せん断として算出した設計値を大きく下回った。
- (2) フィラー継手では、支圧状態においてフィラーは抵抗断面として機能しない。ボルトのせん断耐力は、フィラーを無視した簡易モデルによって、断面変化率を用いて安全側に評価し得る。

#### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017。
- 2) 古財千寿，山口隆司，森山仁志，高井俊和：間接連結を適用したフィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手のすべりおよびすべり後挙動に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol. 66A，pp. 70-80，2020。
- 3) 藤原真幸，山口隆司，古財千寿：フィラーを有する高力ボルト摩擦接合継手の終局限界状態を考慮した間接連結の効果に関する解析的検討，構造工学論文集 Vol. 67A，pp. 296-308，2021。
- 4) Dassault Systemes : Abaqus 6.14ja オンラインドキュメンテーション，2018。