

高力ボルト摩擦接合継手の接合面における継手部の断面変化と

新接合面処理に着目したすべり後挙動に関する研究

STUDY ON AFTER SLIP BEHAVIOR OF THE HIGH STRENGTH BOLTED FRICTIONAL JOINT FOCUSING ON CROSS SECTION CHANGE AND NEW CONTACT SURFACE TREATMENT

橋梁工学分野 山本 佑大

Bridge Engineering Yuta YAMAMOTO

高力ボルト摩擦接合継手においてすべり後の支圧状態における終局限界に関する研究が行われているが、ボルトが多列配置となると、荷重分担が不均等になり、各ボルト位置で個々にすべりが生じ、支圧時の各ボルト孔の変形量が不均等になる。そこで、すべり後挙動の均等化を目標に、テーパーによる継手部の断面変化と接合面のせん断強度を利用した継手のすべり後の耐力上昇について、試験ならびに FEM 解析を行い、各ボルト位置でのすべり挙動均等化の実現可能性を示した。

Study on the ultimate limit in a bearing state after slip behavior in a high-strength bolted frictional joint have been conducted, but when the bolts are arranged in multiple rows, the load sharing becomes uneven and slip occurs individually at each bolt position, the amount of each bolt hole deformation during bearing state becomes unequal. Therefore, with the aim of uniforming in slip behavior, experiments and FE analysis were performed on the strength tolerance after slip of the joint with the cross sectional change of the joint part due to taper and the shear strength of the joint surface, we revealed feasibility of slip behavior uniformization.

1. 研究背景および目的

鋼橋の現場接合法として、高力ボルト摩擦接合継手が多く用いられている。現状の我が国の高力ボルト摩擦接合継手の設計は、すべり耐力と母材の降伏に対し安全に設計される。しかし、すべりを限界とする設計では、部材の大型化に伴い接合部構造が大型化し、ボルト列数が増加する傾向にある。高力ボルト摩擦接合継手において、1ボルト線上の多列配置となると、各ボルトに作用する力が不均等になり、すべり係数が低下する。このように、現状の設計では、接合部が有する潜在的な耐力を活かしきれていない。

一方、海外の設計基準における終局限界では、支圧耐力による設計を可能にしている。我が国においても、平成 29 年の道路橋示方書の改訂により、高力ボルト摩擦接合継手において、すべり後を想定した限界状態 3 を考慮した設計が取り入れられている。限界状態 3 に関する既往研究の成果より、すべり後の支圧降伏限界としてボルト孔の変形量で規定した変形支圧限界状態の提案がされている²⁾が、現状の継手構造では、各

ボルト位置で個々にすべりが生じ、支圧状態での各ボルト孔の変形量が不均等になり、終局状態での耐力上昇が見込めないことが予測される。しかし、各ボルト孔位置での摩擦力を均等化し、ボルト軸部とボルト孔の接触を均等化することで、継手端部に配置したボルトの早期のせん断破断を抑制することにより、終局耐力の向上が期待される。よって、すべり後挙動に着目した知見を蓄積する必要がある。

そこで、本研究では、継手部の断面変化と接合面のせん断強度に着目し、継手のすべり後の力学的挙動について検討する。

2. 変断面継手の引張・圧縮試験

2.1 試験目的

接合面にテーパーによる勾配を設けることで、継手部の各ボルト位置において断面を変化させる。継手部にテーパーを有する高力ボルト摩擦接合継手の研究例は少なく、継手の力学的挙動について十分に検討されていない。よって、試験では、継手の総厚を一定とし、

接合面に両勾配と片勾配のテーパーを設けた継手の引張ならびに圧縮試験を行い、その力学的挙動の解明を目的とする。

2.2 試験体の構造緒言

本試験で用いた試験体の形状ならびに寸法を図-1、表-1に示す。また、使用鋼材の鋼種および材料特性を表-2に示す。テーパーなしの基準試験体（以下、引張は試験体 NP-T、圧縮は試験体 NP-C）、両勾配のテーパーを設けた試験体（以下、引張は試験体 VP-T、圧縮は試験体 VP-C）、片勾配のテーパーを設けた試験体（以下、引張は試験体 TP-T、圧縮は試験体 TP-C）をそれぞれ用意した。基準となる母板の板厚は $t_m = 38$ mm、連結板の板厚は $t_{spl} = 19$ mm である。試験体 VP は引張並びに圧縮の両方向で耐力上昇が期待できる構造としており、試験体 TP は継手全体でのテーパーの効果を検討する構造としている。すべり側に使用するボルトは、M16 (F10T) であるため、ボルト径は 17.8mm とし、縁端距離やボルトピッチといった寸法は、文献 2) を基にそれぞれ 40,50 mm と決定した。

2.3 計測項目

計測項目は、万能試験機の荷重、変位、継手の全体変位、母板と連結板の相対変位、ボルト軸力である。それらの計測位置を図-2に示す。母板と連結板の相対変位は、母板縁端部から 10, 20 mm 離れた位置、各ボルト孔の中心位置、ボルトピッチの中央位置、継手端部から 20 mm 離れた位置を計測した。ボルト軸力は、軸部に貼り付けたひずみゲージによって計測した。

2.4 試験結果と考察

2.4.1 荷重と相対変位の関係

引張ならびに圧縮試験のボルト No.1 と 6 の位置における荷重と相対変位の関係を図-3に示す。引張試験では、試験体 VP-T のボルト No.1 の位置において、すべり後の曲線の勾配がテーパーなしの試験体 NP-T よりも大きくなった。これは、すべりが生じ、母板と連結板のテーパーが噛み合うことにより、相対変位が抑制される効果（くさび効果）であると考えられる。一方で、ボルト No.6 はすべり時に総板厚が減る方向のテーパーであるため、試験体 NP-T よりもすべり後の曲線の勾配が小さくなった。試験体 TP-T においては、ボ

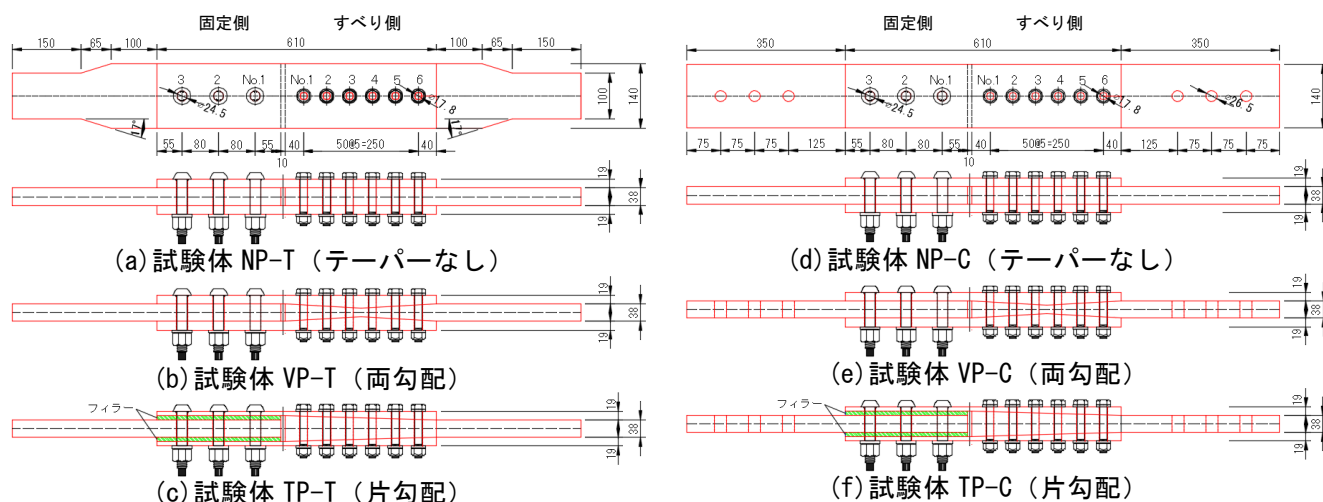


図-1 試験体の形状 (mm)

表-1 試験体の形状 (mm)

試験ケース	試験体数	軸平行径 d (mm)	ボルト孔径 d_0 (mm)	ボルト列数 n	縁端距離 e_1 (mm)	ピッチ p (mm)	板幅 w (mm)	テーパの有無	母板の板厚 (板厚変化は継手中央部→継手端部の順)		連結板の板厚 (板厚変化は継手中央部→継手端部の順)		テーパの勾配 θ (°)
									t_m (mm)		t_{spl} (mm)		
NP	3	16	17.8	6	40	50	140	無	38	19	0		
VP	2							有(両勾配)	38→19→38	19→28.5→19	3.3		
TP								有(片勾配)	57→38	9.5→19	1.6		

表-2 使用した鋼材の鋼種および材料特性

鋼種	使用部材	板厚 t (mm)	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	降伏点ひずみ $\epsilon_y = \sigma_y / E$ ($\times 10^{-6}$)	降伏比 $YR = \sigma_y / \sigma_t$	伸び (%)
SM490YB	NP, TPの連結板	19	211,973	0.286	424.1	556.3	2,001	0.76	50.1
	NP, VPの母板 VPの連結板	38	207,637	0.285	373.4	520.9	1,798	0.72	32.8
SM520C-H	TPの母板	60	212,589	0.280	488.4	595.2	2,297	0.82	26.3

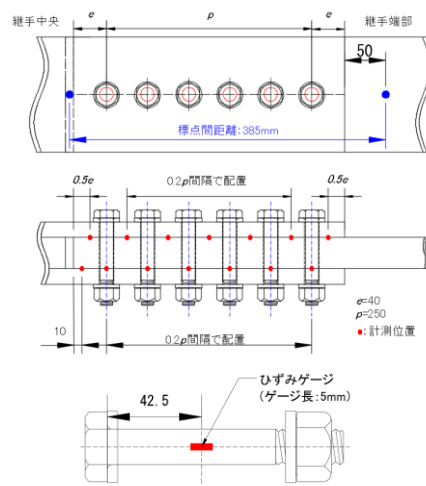


図-2 各計測項目の計測位置 (mm)

ルト No.6 の位置でのすべり後の勾配が試験体 NP-T と同等である。しかし、ボルト No.1 では、連結板厚が薄く伸びが大きい為、初期勾配が小さくなったと考えられる。

圧縮試験においては、試験体 VP-C のすべり後の荷重増加は見られるが、試験体 NP-C に比べその増加は小さい。一方、試験体 TP-C においては、荷重方向に対してのテーパーによる効果はほとんどなく、荷重増加がほとんど見られなかった。

2.4.2 荷重とボルト軸力の関係

試験体 VP-T と VP-C の荷重とボルト軸力残存率の関係を図-4 に示す。試験体 VP は、両勾配のテーパーを有するため、ボルト No.1 ~ 3 と No.4 ~ 6 のすべり後の傾向が異なる。ボルト No.1 ~ 3 の位置では、すべり時に母板と連結板の総板厚が増える方向にずれるため、すべり後のボルト軸力の増加が大きい。一方、ボルト No.4 ~ 6 の位置では、総板厚が減少する方向にずれるため、特にボルト No.5, 6 ですべり前のボルト軸力の低下が大きくなっている。また、すべり後のボルト軸力の増加はボルト No.1 ~ 3 に比べて少ない。

試験体 VP-C は試験体 VP-T と同様に両勾配のテーパーを有し、引張試験とは逆の傾向を示した。なお、すべり前のボルト軸力の減少は、ポアソン効果の影響により、引張試験時に比べ小さかった。

2.4.3 すべり耐力

すべり発生は、作用荷重の低下、すべり音の発生、相対変位の急激な増加などを総合して判断した。継手のすべり試験を参考に、母板縁端部から 10 mm 離れた位置での相対変位が 0.2 mm に達した時の荷重もしくは最大荷重をすべり耐力³⁾とした。すべり係数は、式(1)を用いて算出した。すべり係数とすべり耐力をまとめたものを図-5 に示す。引張ならびに圧縮試験において、テーパーを設けた試験体 VP と TP のすべり係数は、試験体 NP と同等もしくは低下した。

$$\mu_i = \frac{P}{m \cdot n \cdot N_i} \quad (1)$$

ここに、 μ_i : すべり係数、 N_i : 試験前ボルト軸力、 m : 接合面数、 n : ボルト本数である。

3. FEM 解析による変断面継手のテーパー形状の検討

3.1 解析目的

テーパーを有する継手の引張ならびに圧縮試験結果より、引張試験時にすべり後に母板と連結板のテーパーが噛み合う、くさび効果が確認できた。しかし、くさび効果による耐力上昇を大きく期待するには、テーパー形状の再検討が必要となる。よって、試験結果

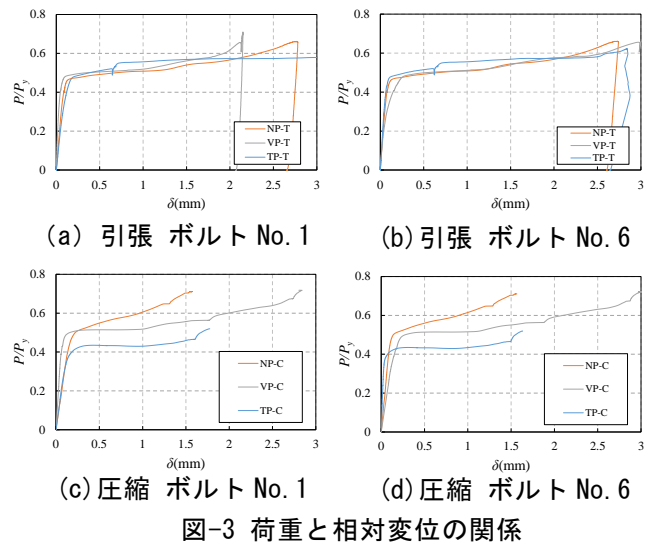


図-3 荷重と相対変位の関係

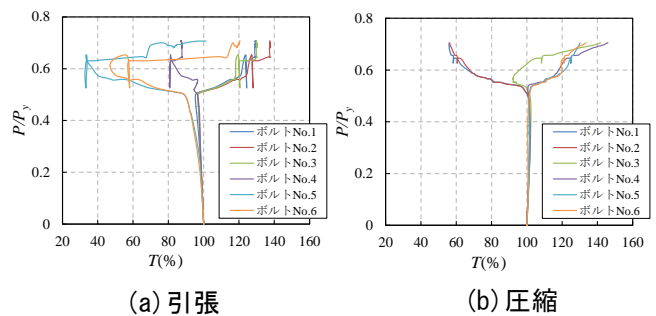


図-4 荷重とボルト軸力残存率の関係

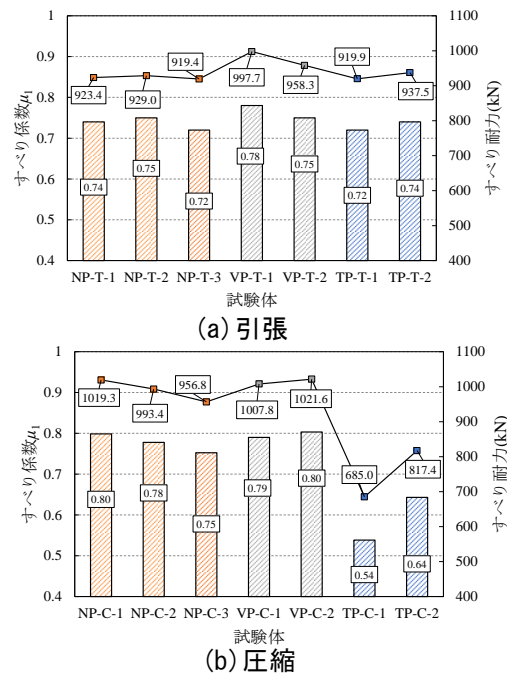


図-5 すべり係数とすべり耐力

を基に、テーパー形状をパラメータとした FEM 解析を行い、最適なテーパーの形状を検討することを目的とする。

3.2 解析モデル

有限要素解析プログラム Abaqus 2016 を用いて変断面継手の引張試験の FEM 解析を行った。解析モデルを図-6 に、与えた材料特性を表-3 に、解析ケースをま

とめたものを表-4に、母板の最小板厚をボルト3と4の間、4と5の間、5と6の間に設けた場合の一例を図-7に示す。構造の対称性を考慮し全体の1/4をモデル化した。高力ボルトは、試験で使用したM16(F10T)をモデル化し、頭部とナットは円形でモデル化した。解析モデルにおいて、要素タイプは、変形が大きくなると考えられる母板では、20節点低減積分ソリッド要素を使用し、連結板と高力ボルトでは8節点低減積分ソリッド要素を使用している。要素分割は、母板と連結板は要素長を3mm程度、ボルトは要素長を1mm程度を基本としている。連結板の継手中心側の端を固定し、継手端部側の母板のつかみ部に強制変位を与え、引張荷重を作用させた。

3.2 すべり耐力および支圧開始耐力

母板の最小板厚とすべり耐力ならびに支圧開始耐力の関係を図-8に示す。各耐力は、母板の純断面降伏荷重で無次元化している。すべり耐力ならびに支圧開始耐力は、図-9に示すように荷重と相対変位の関係より求めた。相対変位は、母板縁端部から10mm位置の変位である³⁾。

すべり耐力は、テーパ形状を変更したとしても、NPに比べ耐力の増加は大きくても4%程度であった。一方、支圧開始耐力においては、NPに比べ、最大で

25%程度の増加が見られた。すべり耐力の結果より、すべりが生じるまでは、接合面の摩擦力による力の伝達が大きく、テーパを付けたことによるくさび効果による力の伝達は小さい。すべり発生後、接合面のテーパによる耐力増加が見られ、試験と同様にテーパのくさび効果が確認できた。最小板厚部分を継手端部に配置し、テーパの角度を大きくした場合、NPに比べ支圧開始耐力の増加が最も大きくなったが、板厚が19mmの場合、ケースに関係なく、NPに比べ支圧開始耐力の増加は約15%であった。

3.3 Mises 応力分布によるテーパ部の降伏に関する検討

支圧開始耐力時 P_b における母板のMises 応力分布を図-10に示す。VP34-19のケースにおいては、母板の最小板厚の断面から降伏が始まり、近くの純断面部分まで降伏が進行した。VP56のケースにおいては、支圧開始耐力が最も大きかった $t_f=22$ mmにおいても母板の最小板厚部がほぼ降伏しており、 $t_f=25$ mm以上にさらに降伏範囲が小さくなっている。母板の最小板厚位置が継手端部に近づくほど、継手端部での作用断面力が大きいため、最小板厚位置での降伏がより進行すると考えられる。

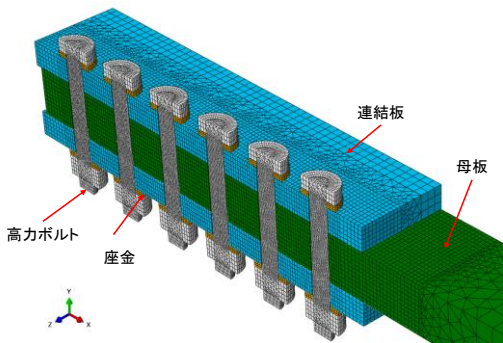


図-6 解析モデル

表-3 材料特性

	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	弾性係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν	要素タイプ	材料構成則
母板	SM490YB	374.1	207,637	0.29	20節点 低減積分要素	材料試験結果より 決定した 応力ひずみ関係
連結板		424.9	211,973	0.29	8節点	
ボルト/ナット	F10T	904.0	200,000	0.30	低減積分要素	トリニア型

表-4 解析ケース

Analytical cases name	x	t_f (mm)
VP34-19	Between bolts No.3 and 4	19
VP34-22		22
VP34-25		25
VP34-28		28
VP34-32		32
VP34-36		36
VP45-19	Between bolts No.4 and 5	19
VP45-22		22
VP45-25		25
VP45-28		28
VP45-32		32
VP45-36		36
VP56-19	Between bolts No.5 and 6	19
VP56-22		22
VP56-25		25
VP56-28		28
VP56-32		32
VP56-36		36

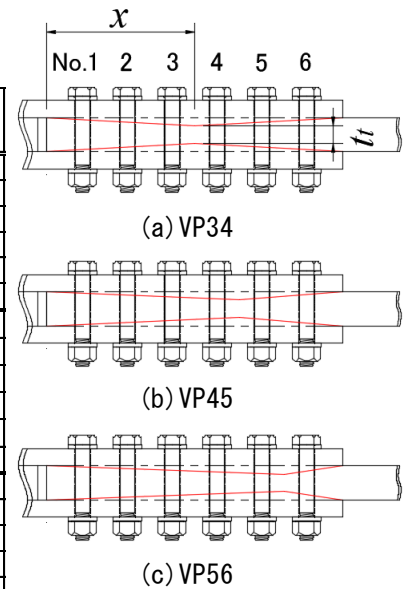


図-7 解析モデル例

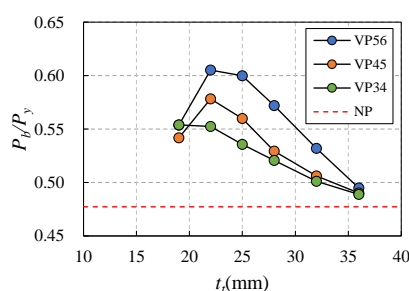
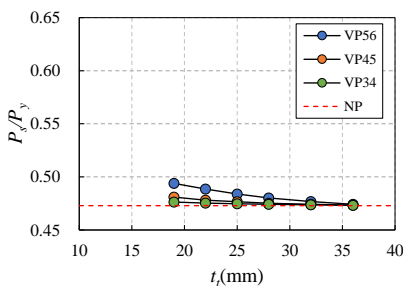


図-8 すべり耐力 (左) ならびに支圧開始耐力 (右)

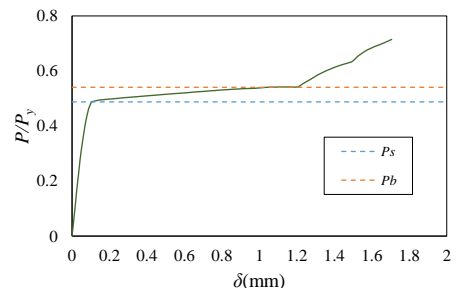


図-9 荷重と相対変位の関係

4. 新接合面処理を施した継手の引張試験

4.1 試験目的

継手の断面形状ではなく、接合面のせん断強度に着目し、多列継手のようなボルト位置によって不均等となる分担摩擦力を、接合面処理によりボルト位置でせん断強度を変化させ、接合面におけるすべりを均等化し、支圧時に各ボルトが均等に支圧状態となることですべり後の耐力上昇を期待する。本試験では、せん断変形能の高いポリウレア樹脂を用いた接着剤による接合面処理の継手の引張試験を行い、すべり後挙動におけるせん断強度について解明することを目的とする。

4.2 試験体形状ならびに試験パラメータ

本試験で用いた試験体の形状は、図-1(a)に示す試験体 NP-T と共通の形状である。母板の板厚は $t_m=38$ mm、連結板の板厚は $t_{sp}=19$ mm である。ボルト径や縁端距離、ボルトピッチについても同じ寸法である。すべり側に使用するボルトも M16 (F10T) である。

試験パラメータを表-5 に、ニッケルメッシュ、パンチングメタルを図-11 に示す。各ケース 3 体で合計 5 ケースの接合面処理をパラメータとする。試験体数は、合計で 15 体である。試験体 B は、母板と連結板の接合面処理はショットブラストのみの処理による試験体である。柔軟性のあるポリウレア樹脂の接着剤のみを用いた試験体は 2 種類あり、ポリウレア硬化前に締め付けた試験体 PUS とポリウレア硬化後に締め付けた試験体 PUL である。また、ポリウレア樹脂とニッケルメッシュを組み合わせた試験体 NI とポリウレア樹脂とパンチングメタルを組み合わせた試験体 PA を用意

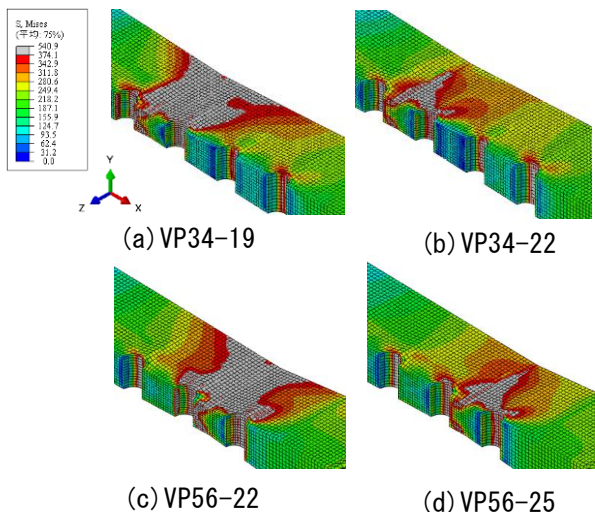


図-10 Mises 応力分布

表-5 試験パラメータ

試験体名	試験体数	接合面処理	備考
B	3	ブラスト	-
PUS	3	ポリウレア	本締め:ポリウレア硬化前
PUL	3		本締め:ポリウレア硬化後
NI	3	ポリウレア+ニッケルメッシュ	-
PA	3	ポリウレア+パンチングメタル	-

した。

4.3 試験体の組み立て

試験体の組み立ては、図-12 に示すようにまずブラスト面の凹部に接着剤を充填し、接合面全面に接着剤を塗り、母板と連結板の孔位置を合わせて組み立てた。その後、仮ボルトを組立用スパナで力いっぱい締めた状態 (スナッグタイト) で締め付け、余剰な接着剤を排出し接着剤厚を極めて薄くした状態で養生した。

ニッケルメッシュやパンチングメタルと組み合わせて締め付ける場合、ニッケルメッシュとパンチングメタル内に接着剤が十分に充填されるように接着剤を塗布した。

4.4 計測項目ならびに载荷方法

計測項目は、変断面継手の引張ならびに圧縮試験時と同様で、万能試験機の荷重、変位、継手の全体変位、母板と連結板の相対変位、ボルト軸力であり、計測位置も図-2 と同様である。

引張試験は、大阪市立大学所有の 2,000 kN 万能試験機を用いて実施しており、その試験状況を図-13 に示す。すべり発生前の载荷速度は、1 kN/s 程度で増加するように制御した。各ケースの 3 体中の 1 体は、接合面保護のために、支圧状態に移行した後の 1,400 kN で除荷した。

4.5 試験結果

4.5.1 荷重と相対変位の関係

ボルト 1 と 6 荷重と相対変位の関係を図-14 に示す。

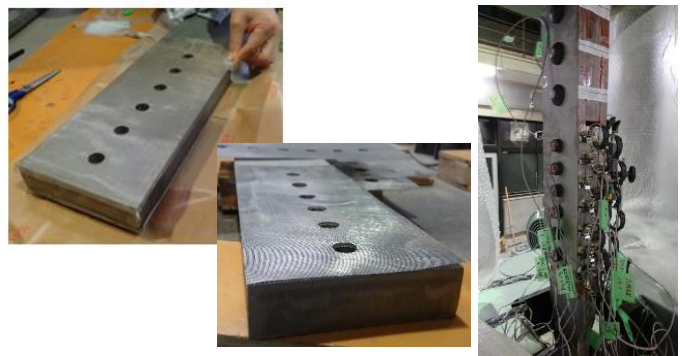


図-11 ニッケルメッシュ (左)
パンチングメタル (右)

図-13 試験状況

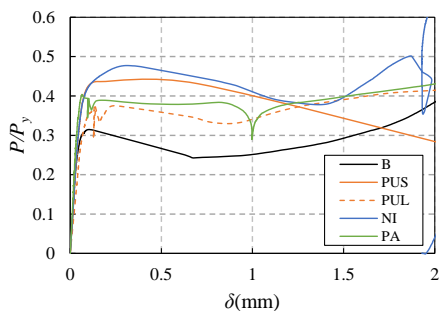


図-12 試験体組み立ての様子

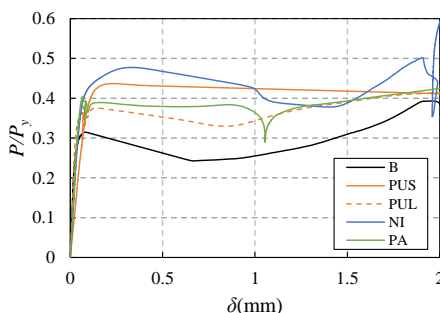
縦軸は母板の純断面降伏耐力で無次元化している。ポリウレア樹脂の接着剤を塗布したことにより、すべり後の荷重低下が試験体 B に比べ小さい。接着剤の硬化前に締め付けた試験体 PUS と接着剤の硬化後に締め付けた試験体 PUL の比較から、硬化前に締め付けた方がすべり耐力は大きくなった。また、試験体 PUL よりも試験体 PUS の方が、ポリウレア樹脂の柔軟性による効果が見られた。ポリウレア樹脂とニッケルメッシュを組み合わせた試験体 NI においては、最大荷重到達前に曲線の傾きが緩やかになり、到達後も緩やかに荷重が低下するといった特徴が見られた。これは、ポリウレア樹脂の柔軟性とニッケルメッシュの伸縮性によるものであると考えられる。

4.5.2 試験後の接合面状況

試験後の接合面の状況を図-15に示す。図はボルト頭部側の接合面である。試験体PUSは主に接着剤層での破壊が見られたが、試験体NIでは、ニッケルメッシュでの破壊が見られた。このことから、接着剤層での破壊は起きていないと考えられるため、ポリウレア樹脂の柔軟性による効果が期待できる。

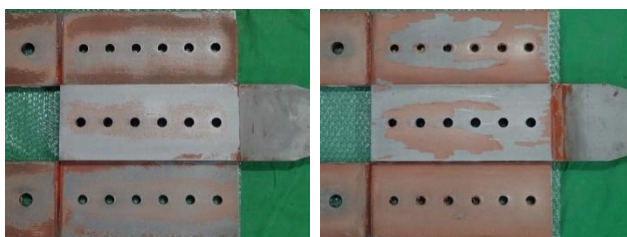


(a) ボルト 1



(b) ボルト 6

図-14 荷重と相対変位の関係



(a) PUS (b) NI

図-15 試験後の接合面状況

5. 結論およびまとめ

本研究では、テーパーによる継手部の断面形状の変化ならびにせん断変形能の高い接合面処理を用いた高力ボルト摩擦接合継手の引張ならびに圧縮試験、FEM解析を行い、高力ボルト摩擦接合継手のすべり後の耐力向上について検討した。本研究で得られた結果を、以下に示す。

- 1) 接合面に両勾配のテーパーを設け、継手部の断面形状を変化させた場合、すべり発生後、接合面のテーパーの噛み合わせにより耐力が増加した。また、母板の最小板厚部を継手端部に配置し、テーパーの角度を 2° で設けた場合、テーパーなしの接合面に比べすべり後の耐力増加が25%程度向上した。
- 2) 母板の最小板厚によっては、その断面に設計値以上の断面力が作用し、板の降伏による変形が大きくなり、かみ合わせによるすべり後の耐力増加が大きく見込めない。
- 3) せん断変形能の高いポリウレア樹脂とニッケルメッシュを組み合わせた場合、すべり前に勾配が徐々に傾き、その後もやや荷重が増加し、最大荷重を迎え、徐々に荷重が低下する傾向が見られ、ポリウレア樹脂の接着剤のみを塗布した接合面処理に比べ、すべり後の荷重低下が小さくなった。
- 4) せん断変形能の高いポリウレア樹脂をニッケルメッシュやパンチングメタルと組み合わせることで、ポリウレア樹脂のせん断変形量が異なり、接合面のせん断強度を変化させることが可能である。よって、ボルト位置によって適切な接合面処理を選定することで、接合面内でせん断強度を変化させ、各ボルト位置でのすべり挙動を均等化させることが可能である。

今後の課題として、断面変化においては、ボルト本数と継手の総厚をパラメータとしたFEM解析による検討が挙げられる。また、接合面処理においては、ポリウレア樹脂とニッケルメッシュの接合面内での割合をパラメータとした検討が挙げられる。

参考文献

- 1) 村越 潤, 澤田 守, 山口 隆司, 彭 雪, 大嶽 敦郎: 接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験, 土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 1, pp. 94-104, 2014.9
- 2) 森山仁志: 鋼 I 桁摩擦接合部のすべり後挙動に関する基礎的研究, 大阪市立大学大学院工学研究科修士論文, 2015
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 第3版, 2012.3