

第 I 部門 薄板 GFRP を用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動

大阪市立大学工学部 学生員 ○関本 将貴 大阪市立大学大学院 正会員 林 厳
 大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司 宮地エンジニアリング(株) 正会員 久保 圭吾
 宮地エンジニアリング(株) 正会員 酒井 圭一 宮地エンジニアリング(株) 正会員 青木 海

1. はじめに

ガラス繊維強化ポリマー（Glass Fiber Reinforced Polymer：以下、GFRP）は軽量でかつ、耐食性に優れており、施工性の良さから、橋梁付属物への適用も進んでいる。その際、接合部には、鋼構造物で実績があり、信頼性の高い、高力ボルト摩擦接合が用いられる。一方、GFRP 部材を用いた高力ボルト摩擦接合継手（以下、GFRP 継手）のすべり挙動において、GFRP 継手の接合面処理や薄板 GFRP 部材をパラメータとした研究は少なく、現状、継手の設計基準も確立されていない。

本研究では、壁高欄接合部で使用される薄板の GFRP 継手を対象に、それらをパラメータとした引張試験を行い、すべり挙動に及ぼす影響を検討した。

2. 引張試験

試験体形状を図-1、試験体パラメータを表-1 に示す。母板は GFRP 引抜成形材、連結板は溶融亜鉛メッキ処理を施した SM400A、ボルトは M12 (F10T) を使用した。試験体は、文献 1) を参考に、母板表面に作用する面圧が実物大相当 (M20 (F8T)) と同等になるように設計した。GFRP 積層構成は、板厚中心からロービング、一方向織ロービングクロス、コンティニューアスストランドマットであり、部材の最外面をポリエステル不織とした 6 層構成である。また、樹脂材料は、不飽和ポリエステル樹脂である。試験体は、全て同一ロットで製作しており、繊維含有率は、焼成試験結果から 54~58% であった。

導入ボルト軸力は、ナット回転法で締付を行った文献 2) の長期リラクセーション試験の結果を基に、その約 4 ヶ月後の軸力を 100% として設定した。また、さらなる軸力低下を想定して、80% のケースも実施した。接合面処理におけるパラメータは、連結板ではリン酸塩処理の有無、GFRP ではフッ素樹脂塗装の有無とした。孔径は、拡大孔 ($\phi 15$) と標準孔 ($\phi 14$) とした。試験時のボルト軸力は、図-2 に示すひずみゲージ付きボルトのひずみ値で管理した。なお、試験体数は各ケース 5 体ずつとした。

母板と連結板の表面粗さ Ra 計測結果を表-2 に示す。

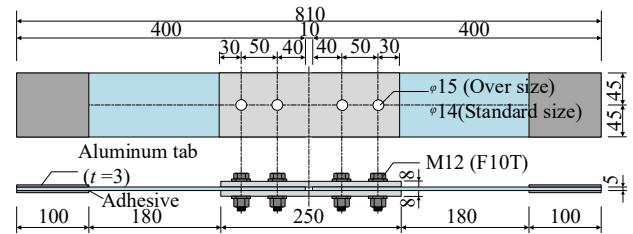


図-1 試験体形状 (単位: mm)

表-1 試験体パラメータ

Case	Axial force	Surf. coating of splicing plate	Surf. coating of GFRP	Bolt hole	β^*
R1-80-PNL	80%	Phosphate treat.	Unpainted	Over($\phi 15$)	0.49
R1-100-PNL	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Over($\phi 15$)	0.62
R1-80-PPL	80%	Phosphate treat.	Painted	Over($\phi 15$)	0.49
R1-100-PPL	100%	Phosphate treat.	Painted	Over($\phi 15$)	0.62
R1-100-PNN	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Standard($\phi 14$)	0.61
R1-100-NPL	100%	N.A.	Painted	Over($\phi 15$)	0.62

* β : Designed slip/yield resistance ratio

表-2 表面粗さ計測結果

Case	Surface roughness Ra(μm)	
	Base plate	Splicing plate
R1-80-PNL	1.77	10.30
R1-100-PNL	1.45	10.22
R1-80-PPL	1.14	11.09
R1-100-PPL	1.09	9.12
R1-100-PNN	1.70	11.35
R1-100-NPL	1.04	7.41

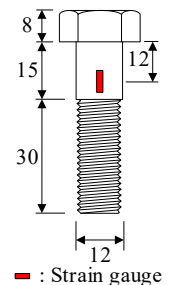


図-2 WSG bolt (単位: mm)

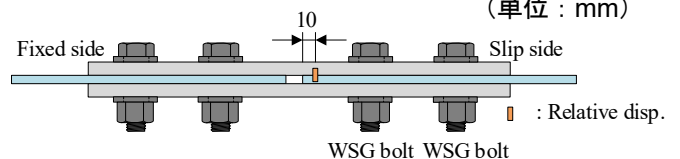


図-3 相対変位計測位置 (単位: mm)

計測は、全試験体に対して、ボルト孔周辺で試験体 1 体あたり 16 点の計測を行った。また、GFRP 塗装面の塗膜厚は約40 μm であった。

载荷は、万能試験機 (最大容量 2000kN) を用いて行い、载荷速度は 0.5kN/s とした。計測項目は、図-3 に示す位置で計測する相対変位、試験機荷重、ボルト軸力である。また、試験体の設計耐力は、ボルトのせん断耐力が 291.2kN、純断面破断耐力が 140.8kN、母板の端抜け破断

耐力が 39.6kN であり、終局まで載荷した際の予想破壊形式は、母板の端抜け破断である。

3. 試験結果および考察

母板縁端 10mm 位置の荷重－相対変位関係を図-4 に示す。(a)は、荷重－相対変位、(b)は、すべり時荷重とすべり時の相対変位で無次元化した結果を示す。GFRP 継手は、母材の剛性が低いことから、相対変位が大きくなる。そのため、本試験では、荷重低下した時点の試験機荷重をすべり荷重とした。また、(b)より、荷重－相対変位関係は、リン酸塩処理、GFRP の塗装の有無に関わらず、同様の傾向を示すことがわかる。

すべり係数を表-3、図-5 に示す。すべり係数 μ_0, μ_1, μ_2 はそれぞれ、設計ボルト軸力、試験前ボルト軸力、すべり時ボルト軸力より算出した。 μ_1, μ_2 は、数値は異なるものの、同様の傾向を示すことがわかる。

導入ボルト軸力に着目すると、80%のすべり係数 μ_1 は、100%より、塗装無では約 6.1%、塗装有では約 3.4%高くなる。これは、ボルト軸力が低い方が、母板に作用する面圧が小さくなったからであると考えられる。

塗装に着目すると、塗装有のすべり係数 μ_1 は、軸力 80%では約 11.8%、軸力 100%では約 14.7%高くなった。これは、フッ素樹脂塗装が柔らかく、連結板とフッ素樹脂面間の締付後の密着性が高くなったことが要因であると考えられる。

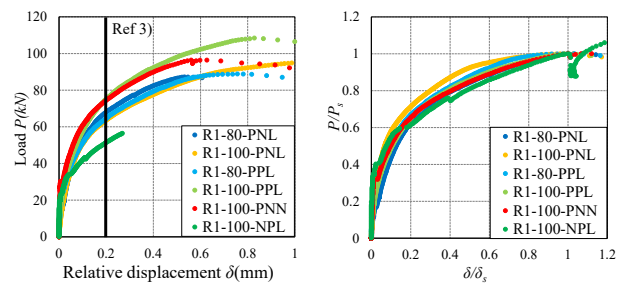
連結板表面は、リン酸塩処理をした方がすべり係数 μ_1 は約 106%高くなった。一方で、拡大孔と標準孔によるすべり係数の違いは認められなかった。

連結板表面粗さとすべり係数 μ_0 の関係を図-6 に示す。図-6 から、リン酸塩処理により表面粗さが大きくなるため、すべり係数が向上したと考えられる。連結板にリン酸塩処理すると、すべり係数 μ_0 は 0.40 以上を見込め、GFRP に塗装すると、さらにすべり係数が上昇することがわかる。

荷重－軸力残存率関係を図-7 に示す。横軸は荷重をすべり荷重で無次元化しており、縦軸は試験前ボルト軸力を 100%としたときの軸力残存率である。外ボルトは一定の割合で軸力低下しているが、内ボルトは $P/P_s = 0.6$ の時点で軸力低下の割合が大きくなっている。また、GFRP の塗装有は、塗装無より 2~3%軸力低下量が小さい。この要因については、今後解析的に検討を行う。

4. まとめ

本研究で薄板の GFRP 継手を対象に引張試験を行った結果、GFRP の表面を塗装、連結板をリン酸塩処理する

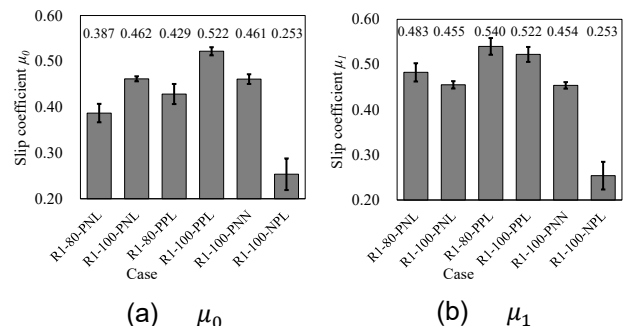


(a) 実験値 (b) 無次元化

図-4 荷重－相対変位関係

表-3 すべり係数 μ_0, μ_1, μ_2 (平均値)

Case	Slipping load (kN)	Slip coefficient μ_0 ave.	Slip coefficient μ_0 CV(%)	Slip coefficient μ_1 ave.	Slip coefficient μ_1 CV(%)	Slip coefficient μ_2 ave.	Slip coefficient μ_2 CV(%)
R1-80-PNL	80.8	0.387	5.19	0.483	4.17	0.509	8.20
R1-100-PNL	95.8	0.462	1.16	0.455	1.77	0.486	1.85
R1-80-PPL	89.4	0.429	5.13	0.540	3.40	0.573	2.39
R1-100-PPL	108.9	0.522	1.73	0.522	3.16	0.541	3.23
R1-100-PNN	96.3	0.461	2.28	0.454	1.57	0.488	1.45
R1-100-NPL	52.8	0.253	13.59	0.253	12.14	0.259	12.60



(a) μ_0 (b) μ_1

図-5 すべり係数 μ_0, μ_1

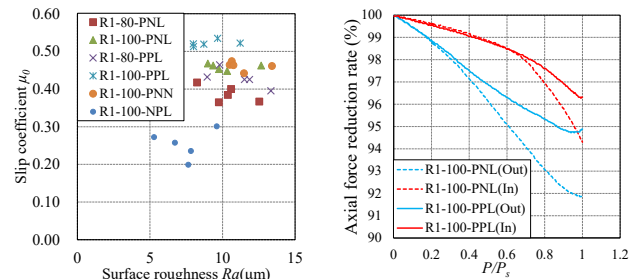


図-6 すべり係数 μ_0 －連結板表面粗さ

図-7 荷重－軸力残存率

と、設計すべり係数 μ_0 は 0.40 以上見込めることがわかった。また、試験前ボルト軸力によるすべり係数 μ_1 は、導入ボルト軸力が 80%では約 3.4~6.1%、GFRP 処理は塗装有の方が約 11.8~14.7%、連結板表面はリン酸塩処理した方が高くなった。一方で、拡大孔と標準孔による影響は見られないことがわかった。

<参考文献>

- 1) 小林憲治, 日野伸一, 山口浩平, 大本透: 接着剤および高力ボルトを用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究: 構造工学論文集, Vol.55A, 2009.
- 2) 酒井圭一, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾: 溶融亜鉛めっき高力ボルトを用いた GFRP 摩擦接合のリラクゼーション特性, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, I-07, 2021.
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2002.