高力ボルト摩擦接合GFRP継手の表面処理がすべり耐力に及ぼす影響

関本　将貴[1]・林　厳[2]・山口　隆司[3]
久保　圭吾[4]・酒井　圭一[5]・青木　海[6]

[1]学生会員　大阪公立大学　大学院工学研究科（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）
E-mail: si22064x@st.omu.ac.jp

[2]正会員　大阪公立大学助教　大学院工学研究科（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）
E-mail: hayashi-g@omu.ac.jp

[3]正会員　大阪公立大学教授　大学院工学研究科（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）
E-mail: yamaguti-t@omu.ac.jp

[4]正会員　宮地エンジニアリング（株）　関西支社（〒550-0004 大阪市西区靭本町一丁目 8 番 2 号）

[5]正会員　宮地エンジニアリング（株）　千葉工場（〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3 番地）

[6]正会員　宮地エンジニアリング（株）　東京本社（〒103-0006 東京都中央区日本橋富沢町 9 番 19 号）

本研究は，溶融亜鉛めっき連結板を有する高力ボルト摩擦接合 GFRP（ガラス繊維強化ポリマー）継手の接合条件がすべり耐力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，短冊型 GFRP すべり供試体を用いたすべり実験および接触圧試験を実施し，すべり実験後には電子顕微鏡を用いたすべり供試体の接合面観察を行った．実験パラメータは，連結板および GFRP 部材の表面処理，ボルト軸力，ボルト孔径である．すべり実験の結果，リン酸塩処理によって溶融亜鉛めっき連結板の表面粗さを粗くすること，GFRP 表面にフッ素樹脂塗装を施すことで，すべり耐力が向上することがわかった．これは，接触圧試験とすべり面観察から，母板の表面処理に低硬度の塗料を用いることで，母板－連結板間の密着性が良くなるため，すべり耐力が向上することを示した．

Key Words: *GFRP,high strength bolted frictional joint, slip resistance,*

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，高耐食性といった優れた性質を有するため，沿岸地域の歩道橋の主部材，壁高欄や検査路等の橋梁付属物のような土木構造物への適用が進んでいる．一方，鋼部材のように接合設計法が確立されておらず，今後，FRP 構造物を大型化するためには接合構造の重要性が増すため，FRP 構造物に適した接合構造の検討が課題となる．

GFRP の適用実績がある機械分野・航空分野の接合法は，接着接合，あるいは小口径リベットによる機械接合が主流である[1]．一方，土木構造用 FRP 部材の接合構造に関する研究では，支圧接合は，例えば V.Mara ら[2]や茗荷ら[3]が研究を行っており，高力ボルト摩擦接合は，引抜 GFRP 材に対しては，小林ら[4]が M12 高力ボルト，J.T.Mottram ら[5]はボルト径 12.7mm，16.3mm，19.05mm の 3 種類の構造用ボルトの継手に対して検討を実施している．また，ハンドレイアップ GFRP 材に対しては，橋本ら[6]が M22 高力ボルトの継手の検討を実験的に実施した研究がある．また，岩崎らは[7]ハイブリッド FRP 部材に対して，支圧接合，摩擦接合など各ボルト接合を対象に引張実験を実施している．これらの研究では，接着接合，摩擦接合，接着・摩擦併用接合の接合方法や，連結板の材質がパラメータに設定されており，摩擦接合および接着・摩擦併用接合において，連結板に硬い材料を用いると，FRP の粘弾性挙動が抑えられ，すべり耐力を確保できるため，GFRP 材に対して高力ボルト摩擦接合を適用できると示されている．

その一方で，FRP の粘弾性挙動については，J.T.Mottram[8]は，引抜 GFRP 継手のリラクセーション試験を行い，GFRP 材の粘弾性挙動により，初期軸力導入後

436 時間でボルト軸力が約 25%低下し，以降も軸力低下が進行することが示されている．また，Caccese ら[9]により，初期軸力導入後 2000 時間でボルト軸力が約 55%低下することが示された．これらのボルト軸力低下は，高力ボルト摩擦接合継手の継手性能に影響を及ぼすため，現状では，FRP 材に対する高力ボルトの適用が進んでおらず，支圧接合あるいは，接着・支圧併用接合がよく用いられている．

高耐食性の GFRP を鋼材と併用する際，連結板には高価なステンレス鋼が一般的に用いられるが，腐食環境の厳しくない箇所での適用には，比較的安価な溶融亜鉛めっき処理の適用が望まれる．文献 4)や文献 6)では，鋼材あるいはステンレス鋼製の連結板に対して，ブラスト処理で素地調整を行っており，十分なすべり耐力が得られることを示しているが，溶融亜鉛めっき処理された継手の検討はほとんどない．そのため，連結板を溶融亜鉛めっき処理した場合のすべり耐力を検討することで，FRP 継手の適用範囲拡大に大きく貢献できる．さらに，引抜成形 GFRP 材は，紫外線劣化を防止する観点から，フッ素系樹脂処理される．そのため，これらの塗装がすべり挙動に及ぼす影響を明らかにできると，製作性・施工性の向上にも繋がる．

そこで本研究では，薄板の GFRP 継手を対象に，連結板あるいは母板の表面処理やボルト軸力などの接合条件がすべり耐力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として，GFRP 継手のすべり実験および接触圧試験を実施するとともに，電子顕微鏡を用いてすべり実験後の接合面を観察する．

2. すべり実験

(1) 実験供試体

a) 供試体寸法

本研究では**図-1** に示す摩擦接合継手の実験供試体を対象にすべり実験を実施した．GFRP 継手は，母板が GFRP 板，連結板が溶融亜鉛めっき処理を施した鋼板（SM400A）により構成される．供試体の寸法は，**図-1** に示す通りで，文献 4）を参考に，M12 の F10T 高力ボルトを用いた 1 行 2 列の 2 面摩擦接合継手である．本供試体の母板の板厚は，本継手構造を適用予定の実物大構造物と同じ 5mm とした．ボルト軸力および連結板の厚さは，実物大構造物の母板表面に作用する面圧（M20 の F8T 相当）と同等になるように設計した．また，実験供試体は，すべり先行型となるように，すべり耐力／GFRP 引張強度比（以降，β とする．）の設計値が 0.6 程度になるように設計した．ボルト孔径は，現場施工性を考慮して，拡大孔の適用を想定している．

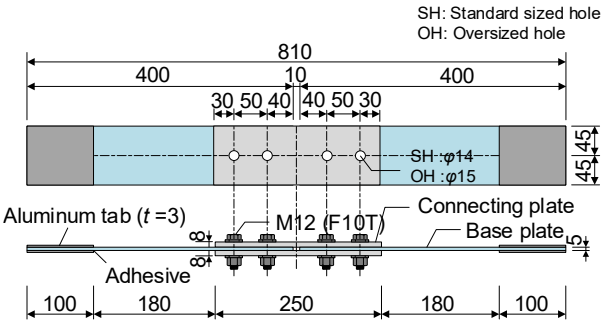
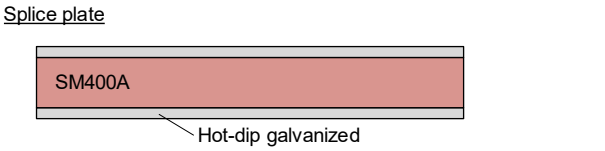


図-1 供試体形状（単位：mm）



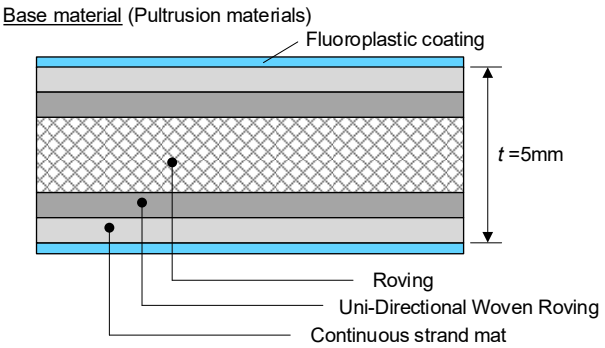


図-2 GFRP 引抜成形材および連結板

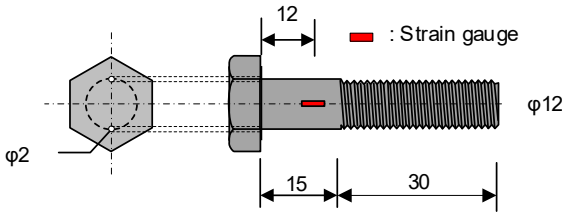


図-3 ひずみゲージ付き六角ボルト（単位：mm）

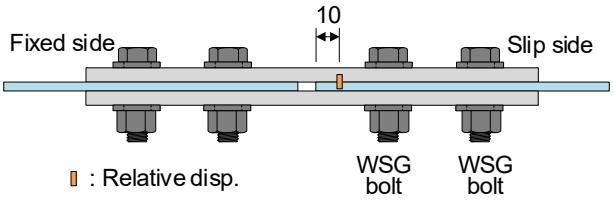


図-4 相対変位計測位置（単位：mm）

表-1 材料物性値

Matrials	Tensile strength (MPa)	Tensile elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)
GFRP	361	31	N/A	363
SM400A	443	200	337	N/A

表-2 表面粗さと塗装厚計測結果

Case	Surface roughness Ra(μm)		Coating thickness (μm)	
	Base-plate	Splice-plate	Base-plate	Splice-plate
Ax80-PNL	1.45	10.22	N/A	199.3
Ax100-PNL	1.77	10.30	N/A	197.9
Ax80-PPL	1.09	9.12	40.2	185.3
Ax100-PPL	1.14	11.09	45.5	208.7
Ax100-PNN	1.70	11.35	N/A	203.1
Ax100-NPL	1.04	7.41	36.4	148.6

表-3 実験ケース

Case	Axial force	Surf.coating of connecting plate	Surf.coating of GFRP	Bolt hole	β
Ax100-PNL	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Over (φ15)	0.62
Ax80-PNL	80%	Phosphate treat.	Unpainted	Over (φ15)	0.49
Ax100-PPL	100%	Phosphate treat.	Painted	Over (φ15)	0.62
Ax80-PPL	80%	Phosphate treat.	Painted	Over (φ15)	0.49
Ax100-PNN	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Standard (φ14)	0.61
Ax100-NPL	100%	N/A	Painted	Over (φ15)	0.62

b) 材料物性値

表-1 は GFRP 材および連結板に用いた材料物性値，**図-2** は GFRP 材の積層構成および継手供試体の表面塗装を示す．

本実験で使用した GFRP 板は，引抜成形によって製作しており，積層構成は，**図-2** に示すとおり，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．樹脂材料は，不飽和ポリエステル樹脂であり，繊維材料は，E ガラスである．実験供試体は，製作ロット間の材料物性値のばらつきを排除するため，全て同一ロットで成形した部材から切り出して製作しており，繊維含有率は，JIS K 7052 に基づき，焼成試験を実施して，その結果 54~58%であった．

c) 接合面処理および表面塗装

各実験供試体の接合面処理は，GFRP 材の表面処理の有無をパラメータとして，塗装有ケースでは，防食のため部材表面にフッ素系樹脂塗料を用いた．また，連結板は，防食対策として溶融亜鉛めっきを施しており，すべり耐力を確保するため，溶融亜鉛めっき後に接合面を刷毛塗りでりん酸塩処理を施したものを基本とした．

表-2 は，各実験供試体の母板と連結板の表面粗さ Ra および塗膜厚の計測結果を示す．表面粗さの計測には，表面粗さ測定機（ミツトヨ サーフテスト：SJ-210），連結板の塗膜厚の測定には，電磁式膜厚計（サンコウ電子：SWT-9000/9100）を用いた．各計測ともに，全供試体に対して，ボルト孔周辺で供試体 1 体あたり 16 点の計測を行った．なお，使用した膜厚計は，素地が金属でないと測定できないため，GFRP 塗装面の塗膜厚測定は，塗膜厚計測用の鋼板を別途用意し，同一ロット塗装を行い，塗膜厚の計測を行った結果である．

粗さ計測の結果，GFRP 材の表面粗さは 1.0μm 程度であり，連結板では，無処理は7μm程度，リン酸塩処理は10μm 程度であった．これらの結果は，文献 4)，文献 10)の表面粗さ Ra を計測した結果と同程度であった．また，膜厚計測の結果，GFRP 塗装面の塗膜厚は約 40μm であり，連結板のめっき厚は，無処理は150μm程度，リン酸塩処理は200μm程度であった．

d) 実験ケース

表-3 は，すべり実験における実験パラメータを示す．

すべり供試体の設計ボルト軸力は，100%（52.2kN），80%（41.8kN）とした．この導入ボルト軸力は，事前検討[11]で，実大 GFRP 継手（M20 の F8T）を対象に実施した長期リラクセーション試験の結果に基づき決定した．この試験では，ボルト締付は，ナット回転法で実施して，初期軸力導入約 4 ヶ月後時点の残存軸力を 100%（52.2kN）とし，本供試体の設計ボルト軸力とした．また，文献 12)では，GFRP 材に対して 7 年間の長期リラクセーション試験を実施し，初期軸力導入 4 か月後以降も軸力が低下し続けることが明らかになっている．そこで，さらなる軸力低下を想定して，80%のケースも実施した．接合面処理のパラメータは，前項に示すとおり，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．また，ボルト孔径は，拡大孔（φ15）と標準孔（φ14）とした．なお，各ケースの供試体はそれぞれ 5 体として，載荷実験は，終局までを 3 体，すべり発生までを 2 体とした．本論文では，すべり耐力を対象としているため，以後の検討ではすべり耐力のみ記載している．

e)　設計耐力

供試体の設計耐力は，**表-1** の材料物性値を用いて，ボルトのせん断耐力が 291.2kN，継手の純断面破断耐力が 140.8kN，母板の端抜け破断耐力が 39.6kN である．本供試体は，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．

⑵　実験概要

摩擦接合供試体の載荷実験は，1) 締付ボルトのキャリブレーション，2) 実験供試体の組立ておよび接触圧試験，3) 120 時間以上のリラクセーション，4) 載荷実験，5) すべり面および断面観察という手順で行う．

a)　締付ボルトのキャリブレーション

すべり側の締付ボルトは，ボルト締付時に実験供試体のボルト軸力を管理するため，**図-3** に示すひずみゲージ付きボルト（以下，WSG ボルト）を用いた．WSG ボルトは，ボルト軸部に対して 1 軸ひずみゲージを対称かつ平行に 2 枚のひずみゲージを貼付ける．そして，キャリブレーション試験を行い，校正係数を算出して，ボルト軸力を同定する．ひずみゲージの貼付け位置は，締付総厚の中心部となるように設定した．キャリブレーション試験では，キャリブレーション用の圧縮治具を用いて，M12 の F10T 高力ボルトの設計ボルト軸力 56.9kN の 1.1 倍である 62.5kN まで 3 回載荷して，2 サイクル目以降の荷重－ひずみ関係から，直線回帰して，校正係数を算出した．

b)　実験供試体の組立ておよび接触圧試験

供試体のボルト締付けは，予備締め，本締めの 2 工程とした．予備締めでは，導入ボルト軸力の 60%となるように，トルクレンチを用いてトルク管理で締付けた．本締めでは，予め設定した導入ボルト軸力になるように，ひずみ管理で締付けた．ボルトの締付け軸力は，文献 13)を参考にして，締付け直後の最大軸力から 3 秒後を 100%とした．

また，ボルト締付け時の母板表面に作用する接触圧を測定するため，接触圧試験を行った．試験には中圧用（測定範囲 10～50N/mm^2）の圧力測定フィルム（Fujifilm）を用いた．これは，設計ボルト軸力（52.2kN）に対する接触圧が，ボルトーワッシャ間の接触部から 45°に広がると仮定した場合の面圧（43.2N/mm^2）から選点した．そして，ボルトのヘッド側とナット側の 2 か所の母板－連結板間の接合面に挿入し，ボルトの締付を行う．その後，供試体を解体し，感圧紙を取り出し，圧力画像解析システムにより接触圧分布を測定する．

c)　載荷実験

載荷実験では，実験供試体を**図-5** に示すように，万能試験機（最大容量 2000kN）に設置して，引張力を与える．載荷速度は，すべり時の荷重を測定するため 0.5kN/s となるよう調整し，計測間隔は 1 秒間隔とした．載荷は，GFRP 材のクリープ変形によるボルト軸力抜けを考慮するために，ボルト締付時から 120 時間以上経過後に実施した．その期間も計測を行い，計測間隔は締付後 1 時間後まで 1 秒，24 時間後まで 1 分，それ以降は 15 分とした．この結果，ボルト軸力低下率は概ね 15~20%であった．そのため，載荷前に，固定側ボルトに対して，設計ボルト軸力の 1.15 倍程度になるようトルク管理で増し締めを実施した．

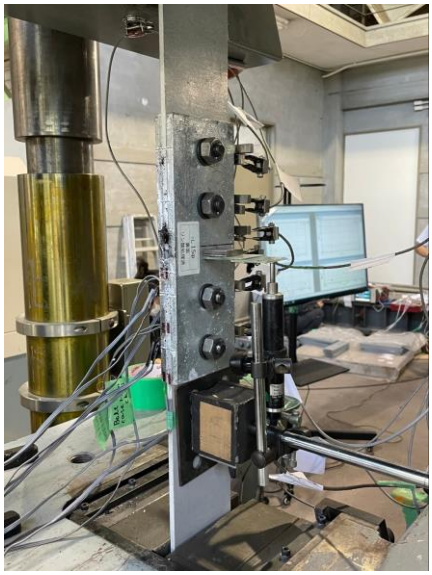


図-5　すべり実験設置状況

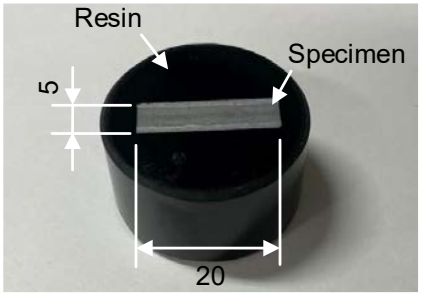


図-6　断面観察用試料（単位：mm）

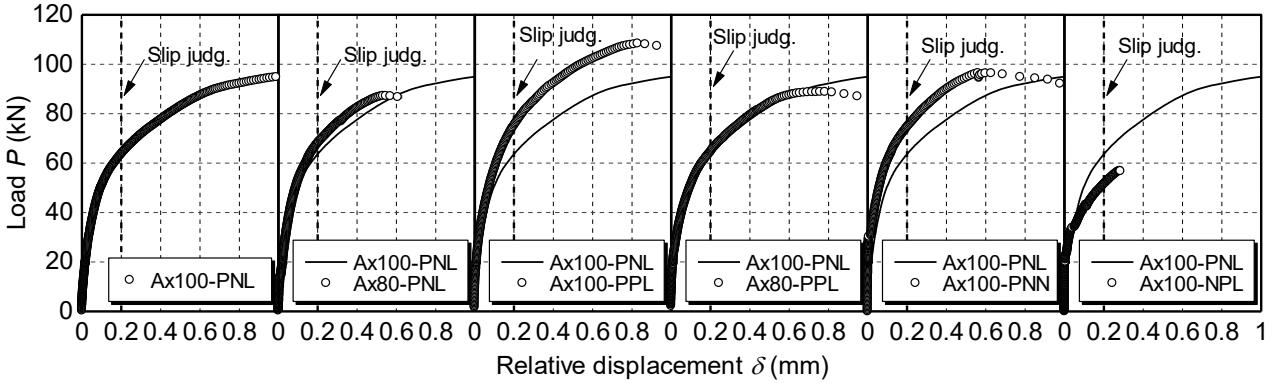
計測項目は，ボルト軸力，試験機荷重，**図-4** に示す位置で計測する母板－連結板間の相対変位である．また，載荷実験におけるすべり係数は，主すべりが発生した時の荷重を，すべり荷重として，式(1)より算出した．

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot N} \tag{1}$$

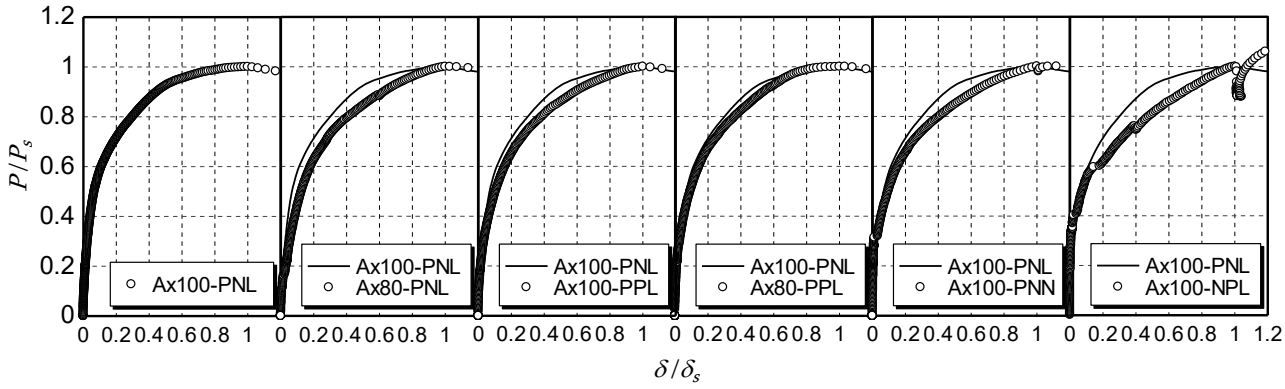
ここに，P_S：すべり荷重，m：接合面数，n：ボルト本数，N：ボルト軸力である．なお，すべり係数 μ_0, μ_1, μ_2 は，それぞれ設計ボルト軸力（52.2kN），試験前ボルト軸力，すべり時ボルト軸力を用いて算出した．

d)　すべり面および断面観察

すべり面および断面観察は，すべり発生直後に載荷を



(a)　実験値



(b)　無次元化

図-7　荷重－相対変位関係

終了した供試体を対象に実施した．同一の表面性状でのすべり面の観察を行うため，載荷実験の除荷のタイミングは，すべり発生後，ボルトが支圧状態に移行した時点とした．

また，母板の断面観察を実施するために，**図-6** に示す断面観察用試料を製作した．試料製作にあたり，まず，母板と連結板の接触面と，それ以外の箇所の計 2 箇所から GFRP 材を切り出す．その後，この GFRP 材の表面状態を保持するため，GFRP 材と熱硬化樹脂を，断面観察用試料作製装置に設置し，加熱硬化させる．そして，観察断面を研磨して鏡面仕上げ後，倒立型金属顕微鏡より観察する．なお，拡大倍率は 200 倍とした．

3. 実験結果および考察

(1) 荷重－相対変位

図-7 は，すべり実験における母板縁端 10mm 位置（**図-4** に参照）の荷重－相対変位関係の一例を示す．**図-7 (a)** は，実験で得られた荷重－相対変位，**図-7 (b)**は，供試体間のばらつきを取り除くため，すべり時荷重とすべり時の相対変位で無次元化処理を行った結果である．なお，鋼部材の標準すべり試験体の場合には，すべり側の母板縁端 10mm 地点の相対変位が 0.2mm に達した時点での荷重をすべり荷重として用いることがあるため，参考値として**図-7 (a)**中にプロットした．

図-7 (a)より，いずれの供試体においても，相対変位が 0.2mm を超えても，主すべりに伴う荷重低下が発生しておらず，荷重が大きくなっていることがわかる．これは，GFRP 材は鋼材と比較して，弾性係数が低いことから，母板が変形しやすいため，相対変位が大きくなったと考えられる．そのため，以降の考察では，主すべりが発生して，大きく荷重低下した時点までの範囲で，最大となった試験機荷重をすべり荷重とした．

図-7 (b)から，ボルト軸力（Ax80-PNL），母板の表面処理（Ax100-PPL），ボルト孔径（Ax100-PNN）と，基準ケース（Ax100-PNL）を比較すると，同様の挙動であることが認められることから，GFRP 継手のすべり挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる．一方，リン酸塩処理の未実施ケース（Ax100-NPL）では，主すべりが発生するまでに，小さな荷重低下が発生していることがわかる．これは，リン酸塩処理が未実施なため，表面粗さが確保できずに接合面内で部分すべりが発生し，荷重低下が生じた可能性が考えられる．また，すべり発生後には，直ちに荷重増加していることから，ボルトが支圧状態に移行している可能性が高いと推察される．

表-4　すべり実験結果一覧

Case		Design bolt axial force (kN)	Bolt axial force before testing (kN)	Bolt axial force during slip (kN)	Slipping load (kN)	Slip coefficient μ_0			Slip coefficient μ_1			Slip coefficient μ_2		
							Mean	CV (%)		Mean	CV (%)		Mean	CV (%)
Ax100-PNL	1*	52.2	53.4	50.3	93.6	0.448*			0.448*			0.465*		
	2		54.2	50.9	96.6	0.463			0.446			0.474		
	3		52.7	49.1	94.6	0.453	0.462	1.2	0.449	0.455	1.8	0.482	0.486	1.9
	4		53.3	50.1	97.7	0.468			0.458			0.488		
	5		51.8	48.4	96.6	0.463			0.467			0.499		
Ax80-PNL	1	52.2	45.8	44.1	76.2	0.365			0.453			0.432		
	2		41.2	38.5	76.6	0.367			0.464			0.498		
	3		41.7	38.8	83.6	0.400	0.387	5.2	0.501	0.483	4.2	0.538	0.509	8.2
	4		43.5	40.4	87.2	0.418			0.501			0.539		
	5		40.6	37.2	80.3	0.385			0.494			0.539		
Ax100-PPL	1*	52.2	53.1	51.2	108.6	0.520*			0.520*			0.531*		
	2		52.9	51.4	107.1	0.513			0.506			0.521		
	3		52.6	50.3	108.4	0.519	0.522	1.7	0.516	0.522	3.1	0.539	0.541	3.2
	4		51.2	49.5	111.6	0.534			0.545			0.563		
	5*		53.2	50.2	109.0	0.522*			0.522*			0.542*		
Ax80-PPL	1	52.2	43.1	40.4	90.2	0.432			0.524			0.559		
	2		42.9	41.1	97.0	0.465			0.565			0.591		
	3		40.7	38.4	88.8	0.425	0.429	5.1	0.546	0.540	3.4	0.578	0.573	2.4
	4		40.3	38.0	88.8	0.425			0.551			0.584		
	5		40.1	37.1	82.6	0.396			0.514			0.556		
Ax100-PNN	1	52.2	53.7	50.2	97.0	0.465			0.452			0.483		
	2		54.5	51.0	99.0	0.474			0.454			0.485		
	3		52.0	48.4	96.8	0.464	0.461	2.3	0.466	0.454	1.6	0.500	0.488	1.5
	4		53.1	48.9	96.3	0.461			0.454			0.493		
	5		52.0	48.0	92.3	0.442			0.443			0.481		
Ax100-NPL	1	52.2	52.8	52.3	49.2	0.236			0.233			0.235		
	2		53.1	51.8	56.9	0.273			0.268			0.275		
	3		52.7	51.3	62.9	0.301	0.253	13.6	0.299	0.253	12.1	0.307	0.259	12.6
	4		51.8	50.8	53.8	0.258			0.260			0.265		
	5		49.9	49.1	41.6	0.199			0.209			0.212		

⑵　すべり係数

表-4 はすべり実験結果の一覧，**図-8** は設計ボルト軸力および試験前ボルト軸力を用いて算出したすべり係数を示す．なお，表中の*においては，固定側ですべりが発生したため，増し締め時のトルク値を用いて載荷前のボルト軸力を算出している．そのため，各すべり係数の平均値の算出には用いていない．また，すべり係数μ_2は，すべり荷重到達時のボルト軸力をすべり時ボルト軸力として算出した．

a)　ボルト軸力

設計ボルト軸力による違いに着目するため，Ax100-PNL と Ax80-PNL，Ax100-PPL と Ax80-PPL の比較を行う．

Ax100-PNL と Ax80-PNL のすべり係数μ_1の平均値は，それぞれ 0.455 と 0.483 であり，約 6.1%程度 Ax80-PNL の方が高くなった．一方，Ax100-PPL と Ax80-PPL のすべり係数の平均値は，それぞれ 0.522 と 0.540 であり，約 3.4%程度 Ax80-PPL の方が高くなった．母板の塗装の有無にかかわらず，すべり係数はボルト軸力が低いケースの方が高くなった．これは，文献 14)において，接合面に無機ジンクリッチペイントを施した鋼材を用いた高力ボルト摩擦接合継手で導入ボルト軸力をパラメータとした引張試験を実施し，試験前ボルト軸力が小さくなるほど，すべり係数が大きくなることが示されており，GFRP 継手においても，同様の傾向が認められた．

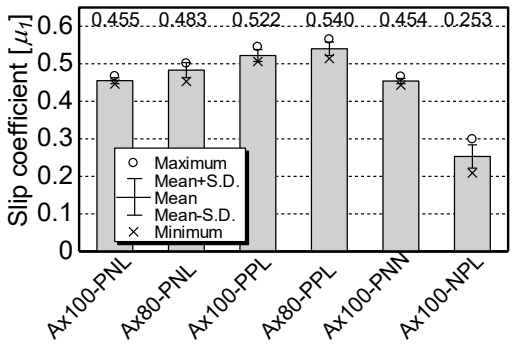


図-8　すべり係数μ_1

b)　ボルト孔径

ボルト孔径の違いに着目するため，Ax100-PNL と Ax100-PNN の比較を行う．

Ax100-PNL と Ax100-PNN のすべり係数の平均値は，それぞれ 0.462 と 0.461 であり，拡大孔と標準孔の違いによるすべり係数の違いは認められなかった．

c)　母板の塗装

母板の塗装による違いに着目するため，Ax100-PNL と Ax100-PPL，Ax80-PNL と Ax80-PPL の比較を行う．

Ax100-PNL と Ax100-PPL のμ_1の平均値は，それぞれ 0.455 と 0.522 であり，Ax100-PPL の方が約 14.7%高くなった．また，軸力 80%のケースである Ax80-PNL と Ax80-PPL の平均値も，それぞれ 0.483 と 0.540 であり，Ax80-

PPL の方が約 11.8%程度高くなることがわかった.

d) 連結板の表面処理

本項では，連結板の表面処理による違いに着目するため， Ax100-PPL と Ax100-NPL の比較を行う.

Ax100-PPL と Ax100-NPL のすべり係数の平均値は，それぞれ 0.522 と 0.253 であり， Ax100-PPL の方が約 106.3%高くなった.

また，連結板表面をリン酸塩処理をした実験ケースにおいて，いずれもすべり係数μ_1は 0.40 以上を確保できることがわかった．また，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.

以上の結果から，本実験で対象とした実験ケースでは，リン酸塩処理が最もすべり係数に影響を及ぼすことがわかった.

⑶ 荷重－軸力残存率

図-9 は荷重－軸力残存率関係を示す．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%とした載荷中の軸力残存率である.

a) 設計ボルト軸力 100%

図-9(a)より，引張荷重を受ける Ax100-PNL のボルト軸力低下は，内側ボルトよりも外側ボルトの方が大きいことが認められる．特に，外側ボルトはすべり発生まで概ね一定の割合で軸力低下しているが，内側ボルトは P/P_s=0.6 程度まで直線的に低下し，これを超えると軸力低下の割合が大きくなることが認められる．また，すべり荷重付近で外側ボルトにおいて軸力の上昇が認められる．これは，外側ボルトのボルト軸力低下が大きいことから，ボルト軸部の母板への支圧力の影響と考えられる.

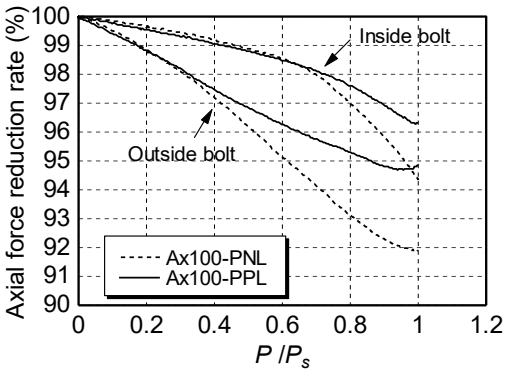
GFRP の塗装有の Ax100-PPL では，外側ボルトの軸力低下はP/P_s=0.3 まで，概ね Ax100-PNL の挙動と一致しているが，それ以降は徐々に乖離して，すべり荷重に達する．一方，内側ボルトは P/P_s=0.6 まで Ax100-PNL と一致しているが，それ以降は徐々に乖離している．また，ボルト軸力の低下率は，Ax100-PNL の方が Ax100-PPL に比べて 2~3%程度大きくなった.

b) 設計ボルト軸力 80%

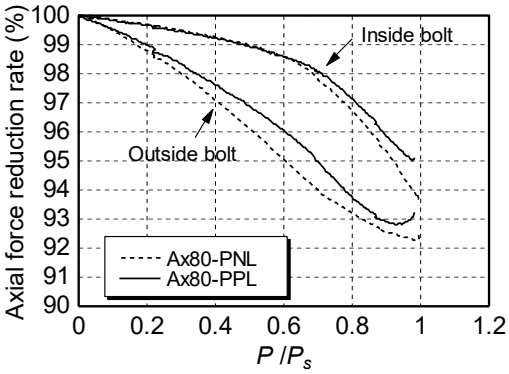
Ax80-PNL と Ax100-PNL を比較すると，Ax80-PNL のボルト軸力低下は，外側ボルトでは Ax100-PNL と概ね同様の挙動を示すが，内側ボルトでは，Ax80-PNL の方がボルト軸力低下が大きいことが認められる.

また，Ax80-PNL と Ax80-PPL と比較すると，内側ボルトは P/P_s=0.6 まで一致しているが，外側ボルトについては Ax80-PPL の方が，軸力低下が小さいことがわかる.

以上より，母板に塗装を施すと，軸力低下が低減できることが認められた.



(a) 設計ボルト軸力 100%



(b) 設計ボルト軸力 80%

図-9 荷重－軸力残存率関係

⑷ 接触圧試験，すべり面および断面観察

a) 接触圧試験

表-5 は接触圧分布面積と平均圧力，**図-10** はボルト締付時のボルトヘッド側およびナット側の接触圧分布を示す．また，**図-10** の黒枠は，ボルトーワッシャ間の接触部から，連結板板厚方向に 45°に広がると仮定した場合の接触圧の影響範囲である．なお，**表-4** の接触圧分布面積を計算する際は，**図-10** 中の接触圧が 10N/mm^2 以上（図中，赤色と黄色）の範囲を対象とした.

表-4，**図-10** より，いずれの供試体についても，ボルトヘッド側よりナット側の接触圧分布面積のばらつきは，同程度であるが，接触面積はリン酸塩処理を実施していない Ax100-NPL が最も大きく，接触圧も高いことが認められる．この結果と**表-2** の計測結果から，リン酸塩処理を行うことで，接触面積および平均接触圧は，小さくなることが認められる．一方，すべり係数は，リン酸塩処理有ケースの方が大きいことから，すべり耐力には粗さが重要なパラメータであることがわかる.

次に，Ax100-PNL と Ax100-PPL と比較すると，平均の接触圧分布面積は，概ね同等であるが，接触圧は，Ax100-PPL の方が高く，濃赤色の範囲が大きいことがわかる．さらに，接触面の平均圧力は，Ax100-PNL では 22.7N/mm^2， Ax100-PPL では 26.2N/mm^2 であり，GFRP 材に塗装を施す方がやや高くなる．これは，GFRP 材のマ

表-5　接触圧分布面積と平均圧力

Case	Distribution area (mm²)						Mean pressure (N/mm²)	
	Head side	Case's Mean	Nut side	Case's Mean	Mean	Case's Mean		Case's Mean
R1-100-PNL-No.1	2193	2478	2450	2337	2322	2408	21.80	22.7
R1-100-PNL-No.2	2763		2224		2494		23.65	
R1-100-PPL-No.1	2009	2189	2644	2430	2327	2309	25.90	26.2
R1-100-PPL-No.2	2368		2216		2292		26.50	
R1-100-NPL-No.1	2615	2738	2215	2563	2415	2650	28.25	29.5
R1-100-NPL-No.2	2861		2910		2886		30.65	

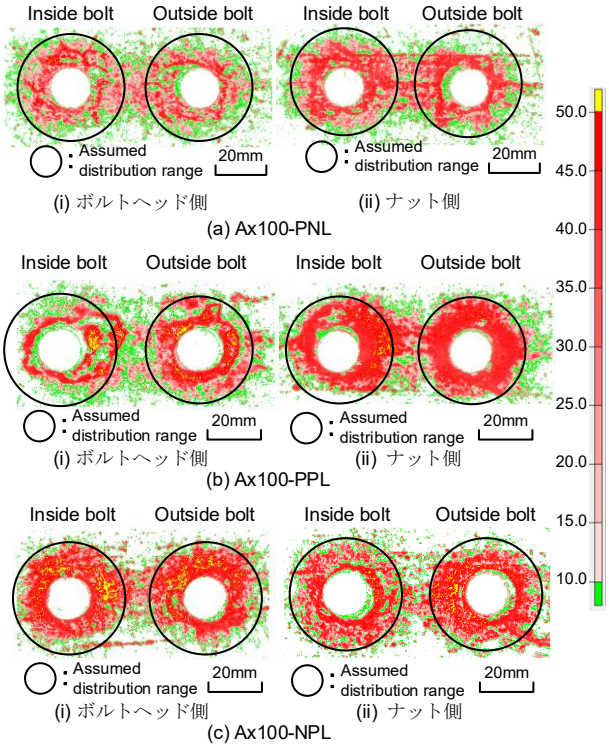


図-10　接触圧分布の一例（単位：N/mm2）

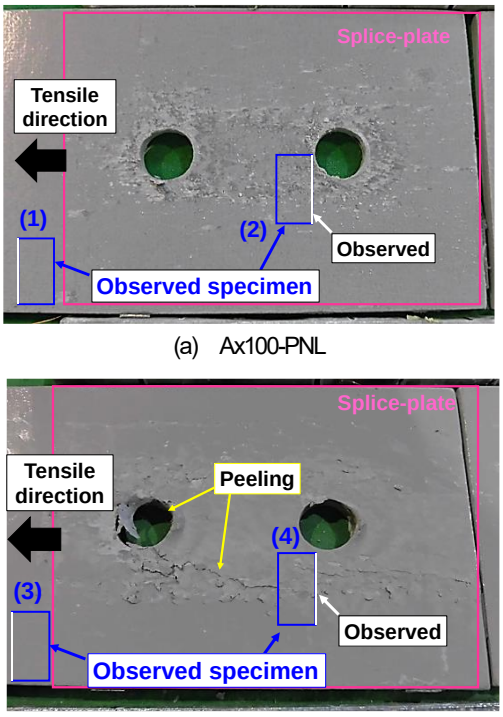


図-11　実験後の供試体すべり面

トリックス樹脂である不飽和ポリエステルよりも，フッ素樹脂塗料の方が硬度が低く，ボルト締付けた際，密着性が高くなったためと推察される．そのため，GFRP 材に塗装を施した方が，すべり耐力が高くなったと考えられる．

b)　**すべり面**

図-11 はすべり後の供試体の接合面性状を示す．Ax100-PNL，Ax100-PPL ともに，接触圧の高いボルト孔周辺やボルトピッチ間に，明瞭なすべり痕があることが認められる．Ax100-PNL では，GFRP 表層にキズが入り，白色ぽくなっていることが認められる．その一方で，Ax100-PPL では，ボルト孔周辺やボルト間のような接触圧が高い箇所でフッ素樹脂塗装の剥離が認められるため，GFRP 材と表面塗料の界面ですべりが発生している可能性がある．

c)　**断面観察**

図-12 は，**図-11** 中の(1)～(4)に示す位置での母板断面の拡大写真を示す．**図-12** の断面は，**図-11** 中 の青枠部分から断面観察用試料を採取して，白線部分を拡大した

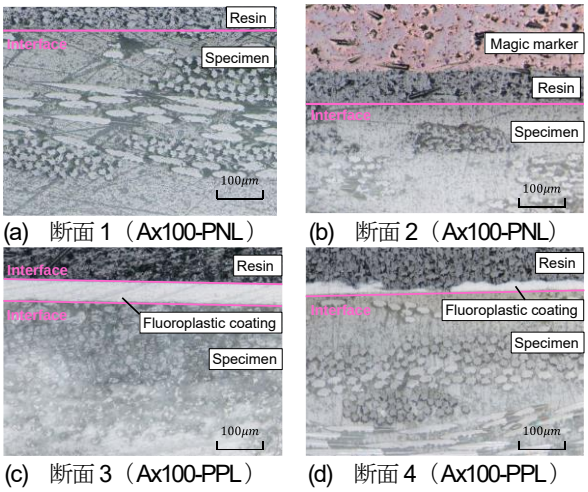


図-12　断面の拡大写真

写真となる．また，**図-12 (a), (c)**は，母板の連結板接触範囲の外側から採取したものであり，GFRP 材の塗装面は健全状態となる．一方，**図-12 (b), (d)**は，すべり痕が見られたボルト孔周辺から採取したものであり，塗装面は

塗膜剥離あるいは損傷状態となる．なお，**図-12** 中の赤実線はそれぞれの界面となり，**図-12 (a)**，(b)中は赤実線より下側が GFRP である．**図-12 (c)**，(d)中の白色の層はフッ素樹脂塗装であり，それより下側が GFRP となる．

図-12(a)，(b)より，Ax100-PNL は，**図-11(a)**ではすべり痕が認められるが，すべり発生部の断面を拡大しても，表層付近に大きな凹凸が無いことがわかる．そのため，最表層の樹脂のみが損傷していると考えられる．一方，**図-12(c)**，(d)より，Ax100-PPL は，硬化樹脂とフッ素樹脂塗装の界面に凹凸が認められ，**図-11(b)**の塗装の剥離位置では GFRP に達するまで塗装が消失している．このことからも，Ax100-PPL では，連結板とフッ素樹脂塗装の界面ですべりが発生していると考えられる．

以上より，GFRP 材の塗装を施したケースでは，フッ素樹脂塗装層にのみ凹凸が認められた．これは，フッ素樹脂塗装の硬度が不飽和ポリエステルの硬度よりも低いことから，リン酸塩処理した連結板と母板の密着性が向上し，接触圧が高くなったため，その結果，すべり耐力が向上して，すべり係数が高くなったと考えられる．そのため，GFRP の表面処理には，マトリックス樹脂より柔らかい塗装を用いると，より高いすべり係数を確保できる可能性がある．

4. 結論

本研究では，薄板 GFRP 材を用いた高力ボルト摩擦接合継手に対して，すべり実験および接触圧試験，すべり実験後の接合面観察および断面観察を実施し，GFRP 継手の接合条件がすべり耐力に及ぼす影響について検討した．その結果を以下に示す．

(1) GFRP 継手における溶融亜鉛めっき連結板の表面をリン酸塩処理すると，すべり耐力が約 2 倍程度（0.253→0.522）向上することがわかった．また，本研究で設定したパラメータのうち，最もすべり耐力に影響を与えるパラメータであった．

(2) すべり実験と，すべり実験後のすべり面観察および断面観察を実施した結果，GFRP 材の表面にマトリックス樹脂の硬度よりも低いフッ素樹脂塗装を施すことによって，約 15%程度（0.455→0.522）すべり耐力が向上することがわかった．この要因は主として，母板－連結板間の密着性が向上するためであると考えられる．

(3) フッ素樹脂塗装を施したケースのうち，導入ボルト軸力 80%より 100%の方が，フッ素樹脂塗装によるすべり耐力の上昇率が大きくなることがわかった．一方，ボルト孔径がすべり耐力に及ぼす影響は小さいことがわかった．

謝辞：本研究の一部には，JSPS 科研費（課題番号：21K14234）の助成を受けた．ここに謝意を表します．

参考文献

1) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.
2) Mara, V., Haghani, R., and AL-Emrani, M.: Improving the performance of bolted joints in composite structures using metal inserts, *Journal of Composite Materials*, Vol.50, No.21, pp.3001-3018, 2015.
3) 茗荷将浩，Mohammad Abdul KADER，北根安雄，伊藤義人，日比英輝：単ボルト接合実験によるハンドレイアップ GFRP 部材の接合部耐力評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.5，pp.II_62-II_73，2017.
4) 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，土木学会，構造工学論文集 A，Vol.55A，pp.1140-1149 2009.
5) Mottram, J. T. and Turvey, G. J.: Physical test data for the appraisal of design procedures for bolted joints in pultruded FRP structural shapes and systems, *Progress in Structural Engineerinf and materials*, Vol.5, No.4, pp.195-222, 2003
6) 橋本国太郎，杉浦邦征：高力ボルト摩擦接合された GFRP 部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察，土木学会，構造工学論文集 A，Vol.58A，pp.935-945，2012.
7) 岩崎初美，松井孝洋，小林拳祐，中村一史：ハイブリッド FRP 部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する強度特性，土木学会，構造工学論文集 A，Vol.64A，pp.769-778，2018.
8) Mottram, J. T.: Friction and load transfer in bolted joints of pultruded fibre reinforced polymer section, *Taylor & Francis Group plc*, London, UK, 2005.
9) Caccese, V., Berube, K. A., Fernandez, M., Melo, J. D. and Kabche, J. P.: Influence of stress relaxation on clamp-up force in hybrid composite-to-metal bolted joints, *Composite Structures*, Vol.89, pp.258-293, 2009.
10) 南邦明，吉原伸行，徳富恭彦，鈴木茂弘：りん酸塩処理した溶融亜鉛めっき接合面の高力ボルト摩擦接合継手におけるナット回転角の提案，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69，No.3，pp.467-480，2013.
11) 酒井圭一，林厳，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 摩擦接合のリラクセーション特性，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.
12) 新井崇裕，古市耕輔，吉澤弘之，林田道弥，糸久智：FRP 連結部及び FRP 部材のクリープ諸特性に関する実験的検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.72，No.5，pp.102-113，2016.
13) 南邦明，田村洋，内田大介，白旗弘実，吉岡夏樹，筒井康平，藤野大地：高力ボルト継手のリラクセーション試験における初期値の設定について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.76，No.3，pp.496-509，2020.
14) 森猛，網谷岳夫，内田大介：高力ボルト摩擦接合継手のすべり係数に対するボルト軸力の影響，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.75，No.1，pp.58-66，2019.

(Received August 26, 2022)

THE EFFECT OF SURFACE TREATMENT ON HIGH-STRENGTH BOLTED FRICTION GFRP JOINTS IN SLIP RESISTANCE

Masaki SEKIMOTO, Gen HAYASHI, Takashi YAMAGUCHI,
Keigo KUBO, Keiichi SAKAI and Kai AOKI

The purpose of this study was to determine the effect of joint conditions on the slip resistance of high-strength bolted GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) friction joints with hot-dip galvanized connecting plates. In this study, slip and contact pressure tests were conducted using a strip-type specimen, and the slip surfaces were observed using an electron microscope on the joint surfaces after the slip tests. The joint conditions of the slip specimens were determined by the bolt axial force, bolt hole diameter, and surface treatment of the connecting plates and GFRP members. Slip test results showed that phosphate treatment, roughening the surface properties of the connecting plates, and applying a fluoropolymer coating to the GFRP surface improved the slip resistance. The results of the contact pressure test and the observation of the sliding surfaces indicated that the use of a low-hardness material for the surface treatment of the base metal improves the adhesion between the base metal and the connecting plate, which may increase the slip resistance.