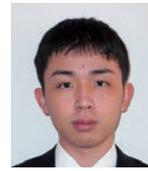


高力ボルト摩擦接合GFRP継手の実験的研究

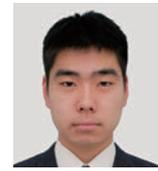
Experimental Study on High-strength Bolted and Friction-welded GFRP Joints



久保 圭吾^{*1}
Keigo KUBO



酒井 圭一^{*2}
Keichi SAKAI



青木 海^{*3}
Kai AOKI

要 旨

腐食環境が厳しくない箇所での高力ボルト摩擦接合GFRP継手は、溶融亜鉛めっき連結板が用いられる。そのため、溶融亜鉛メッキ連結板を用いた高力ボルト摩擦接合GFRP継手のすべり耐力を明らかにすることを目的として、長期リラクゼーション試験、すべり試験を実施した。これらの結果、ボルトの軸力低下は最大20%程度であり、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。

キーワード：GFRP，溶融亜鉛めっき，高力ボルト摩擦接合，長期リラクゼーション，すべり抵抗

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ものの、設計基準が明確に規定されていないなどの設計上の課題を有している。特に、FRP構造物の現地設置に際しては、接合構造が重要となることから、接合設計法の確立が求められている。

FRPの継手構造としては、摩擦接合、支圧ボルト接合、接着接合などがあるが、接合部の変形が少なく、母材強度と同程度で接合するには、高力ボルト摩擦接合が適している。

一般に、摩擦接合では、高耐食のGFRP材を用いることから、連結板にも高耐食なステンレス鋼が用いられるが、写真-1に示す鉄道用壁高欄の適用例のように、軽量化を求めた腐食環境の厳しくない箇所では、比較的安価な溶融亜鉛めっき処理鋼板が適用されている。また、引抜成形GFRP材は、直射日光の影響を受ける場合、紫外線劣化を防止するためフッ素樹脂塗装を施すが、接合面の塗装がすべり挙動に及ぼす影響を明らかにすることで、接合面を塗り残す必要がなくなり、製作性・施工性

の向上にも繋がる。

そこで本研究では、連結板を溶融亜鉛めっき処理した高力ボルト摩擦接合GFRP継手の長期リラクゼーション特性を把握することを目的とした長期リラクゼーション試験を実施した¹⁾。また、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継手のすべり試験を実施した²⁾。



写真-1 鉄道用壁高欄への適用例

^{*1} 技術・開発本部 研究開発部 関西研究開発グループ 担当リーダー

^{*2} 関西支社 設計・開発部 設計・開発グループ

^{*3} 計画本部 計画部 計画第1グループ

2. 長期リラクゼーション試験

GFRP継手にボルト軸力を加えた際、板厚方向の力学的特性を支配するマトリックス樹脂のクリープ変形により、経時的にボルト軸力低下するリラクゼーションが生じる。このボルト軸力低下は、摩擦接合の継手性能に大きく影響を与えるため、その特性を十分に把握することが重要となる。そのため、連結板を溶融亜鉛めっき処理した高力ボルト摩擦接合GFRP継手の長期リラクゼーション特性を把握することを目的として、継手の接合条件および表面処理、材料物性値、製作ロット、成形方法を試験パラメータとした長期リラクゼーション試験を実施した。

(1) 試験概要

GFRP継手を構成する材料は、母材：GFRP板、連結板：溶融亜鉛めっき処理を施した鋼板（SM400A）とした。試験体の寸法は、**図-1**に示すように、M20のF8T溶融亜鉛めっき高力ボルトを用いた5列の2面摩擦接合継手である。本試験の基本ケースの試験体では、母材の板厚は実構造物の5mmを基本とした。試験体のボルト間距離、縁端距離は、隣接のボルトの面圧の影響を受けないように設定した。ボルト軸力は、**図-2**に示すひずみゲージ付きボルト（以下、WSGボルト）を用いて、ナット回転法により締付けた際の導入ボルト軸力を100%とした。ボルト孔径は、現場施工性を考慮して、拡大孔を適用し、GFRP材の表面は、フッ素樹脂塗装を施した。

1) GFRP材料

表-1は試験の母材に用いた種類および製作ロット、**表-2**は、使用材料の材料物性値を示す。

表-1のGFRPの成形方法に示す「引抜」のケースは、引抜成形GFRP材であり、**図-3**に示す6層構成である。ただし、板厚5mmのケースは、不飽和ポリエステル樹脂を、板厚14mmのケースは、ビニルエステル樹脂を用

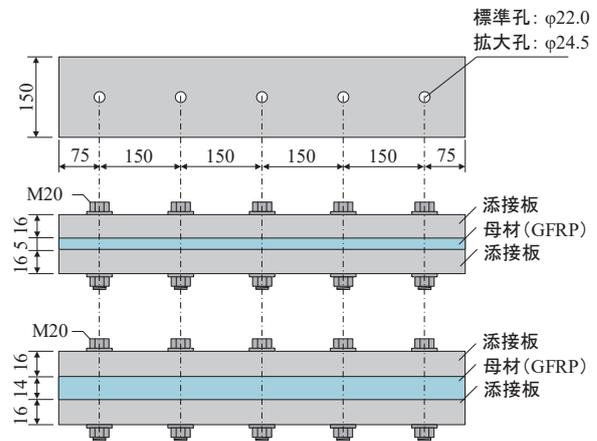


図-1 試験体形状 (単位: mm)

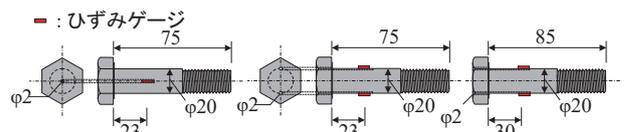


図-2 ひずみゲージ付きボルト (単位: mm)

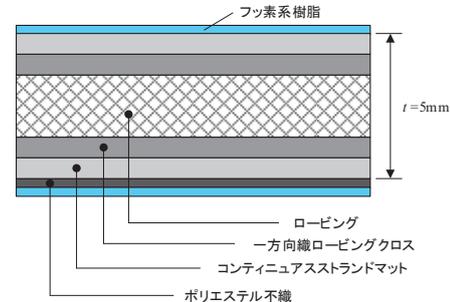


図-3 GFRP引抜成形材の繊維構成

表-1 試験ケース

ケース	GFRP 材					鋼材 表面 処理	高力ボルト		平均導 入 軸力 (kN)	締付 管理	試験 開始 時期
	成形 方法	板厚 (mm)	製作 ロット	V_f (%)	表面処理		表面 処理	孔径 (mm)			
PL5-R1-F-ZZO-Ax100	引抜	5	Rot-1	58	フッ素塗装	めっき	めっき	24.5	192.2	回転角	2021.3
PL5-R3-F-ZZO-Ax100	引抜	5	Rot-3	59	フッ素塗装	めっき	めっき	24.5	200.2	回転角	2022.2
PL5-R1-N-ZZO-Ax80	引抜	5	Rot-1	58	無塗装	めっき	めっき	24.5	155.5	ひずみ	2021.3
PL5-R1-N-ZZO-Ax100	引抜	5	Rot-1	58	無塗装	めっき	めっき	24.5	194.1	ひずみ	2021.3
PL5-R1-N-ZZN-Ax100	引抜	5	Rot-1	58	無塗装	めっき	めっき	22.0	191.2	ひずみ	2021.3
PL5-R2-N-ZZO-Ax100	引抜	5	Rot-2	54	無塗装	めっき	めっき	24.5	192.3	ひずみ	2021.3
PL5-R3-F-PZO-Ax100	引抜	5	Rot-3	59	フッ素塗装	リン酸塩	めっき	24.5	193.9	回転角	2022.2
PL14-R4-F-ZZO-Ax100	引抜	14	Rot-4	58	フッ素塗装	めっき	めっき	24.5	193.1	回転角	2022.2
Mt5-C0-N-NNO-Ax100	樹脂	5	N/A	0	無塗装	黒皮	黒皮	24.5	227.7	回転角	2022.2
PL5-R3-N-NNO-Ax100	引抜	5	Rot-3	59	無塗装	黒皮	黒皮	24.5	237.4	回転角	2022.2
HL5-C30-G-NNO-Ax100	HLU	5	N/A	34	ゲルコート	黒皮	黒皮	24.5	229.4	回転角	2022.2
PHL5-C45-G-NNO-Ax100	PHLU	5	N/A	45	ゲルコート	黒皮	黒皮	24.5	227.0	回転角	2022.2

いている。

「樹脂」は、「引抜」の樹脂材料に用いた不飽和ポリエステル樹脂のみで製作した部材であり、型枠に流し込み、製作した。

「HLU」と「PHLU」は、コンティニューアストランドマットを積層した材料であり、HLUはハンドレイアップ成形、PHLUは圧縮ハンドレイアップ成形によって製作した。なお、材料の表層部にはゲルコート層を設けている。

試験体は、製作ロット間の材料物性値のばらつきを考慮するために、異なる製作ロットで成形された試験体も準備した。なお、表-1中の対象材料の繊維含有率は、JIS K 7052に規定される焼成法によって算出した。

2) 試験ケース

表-1は、長期リラクセーション試験における試験パラメータを示す。GFRP継手の母材は、引抜成形材、樹脂のみ、ハンドレイアップ成形材、圧縮ハンドレイアップ成形材の4種類とし、引抜成形GFRP材の板厚は、5mmと14mmとした。長期リラクセーション試験における導入ボルト軸力は、M20 (F8T) ボルトに対して、ナット回転法により締付けた際の、ボルト軸力を基準とした。ボルト締付けにあたり、スナッグタイトまで締付

表-2 材料物性値

材料	引張強度 (MPa)	引張弾性係数 (GPa)	降伏点 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
引抜 GFRP (t=5mm)	361	31	N/A	363
引抜 GFRP (t=14mm)	356	24	N/A	N/A
樹脂	22	3	N/A	N/A
HLU	117	9	N/A	N/A
PHLU	181	13	N/A	N/A
SM400A	443	200	337	N/A



写真-2 長期リラクセーション試験状況

け、その後、120°まで回転させて軸力を導入した。2021.3に実施の試験では、残りの試験ケースは、導入軸力を制御するためにひずみ管理で締付けを行った。また、2022.2に実施の試験では、すべての試験ケースについてナット回転法で締付けた。接合面処理のパラメータは、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。ボルト孔径は、拡大孔(φ24.5)と標準孔(φ22)とした。導入ボルト軸力は、100%と80%とした。なお、各ケースの試験体において締付ボルト本数は、それぞれ5体である。

3) 試験体の締付手順

試験体のボルトは、①試験体にゲージボルトをセットする。②予備締めとして試験体内側ボルトから外側の順で、締付けトルク150N・mで締付ける。③ボルト、ナット、座金、部材にわたってマーキングを行う。④本締めにおいて、予備締めから回転角120°になるよう締付け、回転角管理で締付けを行う手順とした。

軸力の測定間隔は、締付け直後（初期軸力はピークから3秒後³⁾）から1時間後までは1秒間隔で測定する。その後は、24時間後までは1分間隔、以降14日までは15分間隔で測定する。ボルト軸力の算出は、各試験体の5本のボルト軸力の平均値とする。

(2) 試験結果および考察

1) 残存ボルト軸力

図-4はボルト締付けから8640時間までのボルト軸力の経時変化、表-3は締付直後の任意時間における残存ボルト軸力を示す。なお、図-4より締付後のボルト軸力は、締付直後数日で大きく低下し、その後、さらに時間経過とともに緩やかに低下していることが認められる。そのため、表-3における経過時間は、24時間後（1日）、336時間後（14日）、4320時間後（半年）、8640時間後（1年）とした。

(a) 製作ロット

表-3の、製作ロットの異なるPL5-R1-F-ZZO-Ax100、PL5-R2-F-ZZO-Ax100、PL5-R3-F-ZZO-Ax100の比較より、いずれの試験ケースにおいても軸力残存率は、24時間後で約91%、半年後で約85%、1年間計測しているPL5-R1-F-ZZO-Ax100、PL5-R2-F-ZZO-Ax100の平均残存軸力も約84%となり、ほぼ同程度であることが認められる。また、表-1より、PL5-R1-F-ZZO-Ax100、PL5-R2-F-ZZO-Ax100、PL5-R3-F-ZZO-Ax100の繊維含有率は、それぞれ58%、54%、59%であったものの、各試験ケース間の平均軸力

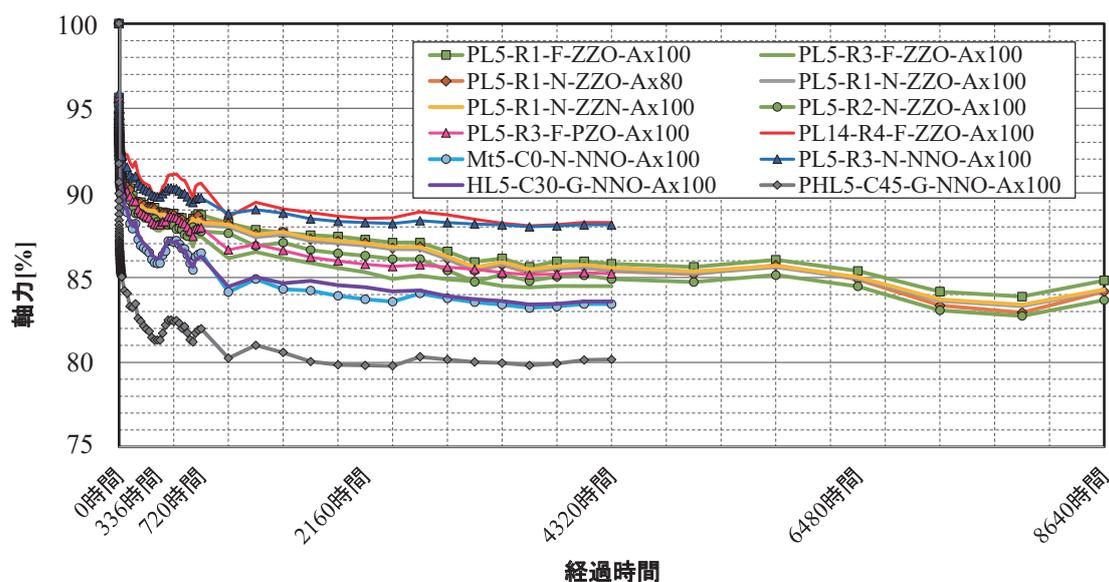


図-4 ボルト軸力の経時変化

残存率のばらつきは、ほとんど変わらないことから、製作ロットの違いによる軸力低下に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(b) 導入ボルト軸力

表-3のPL5-R1-N-ZZO-Ax100、PL5-R1-N-ZZO-Ax80の比較より、両ケースの平均軸力残存率の差は、24時間経過から1年経過まで、いずれにおいても0.2%~0.5%程度の差であり、導入ボルト軸力の違いによる軸力低下の傾向に顕著な違いは見られなかった。

また、1年経過時点での軸力残存率の平均値はPL5-R1-N-ZZO-Ax100で84.1%、PL5-R1-N-ZZO-Ax80で84.3%となっており、締付時から16%程度の軸力低下であることが認められる。

(c) GFRP材の塗装

GFRP材の塗装による残存ボルト軸力の違いに着目するため、PL5-R1-F-ZZO-Ax100、PL5-R1-N-ZZO-Ax100の比較を行う。両ケースの残存軸力率の差は、24時間経過から1年経過まで、いずれにおいても0.6%程度となっており、軸力低下の傾向、低下率ともに概ね同様であることが認められる。これは、フッ素樹脂塗料のクリープ変形よりもマトリックス樹脂のそれが支配的となるため、影響が小さくなったと考えられる。

(d) ボルト孔径

ボルト孔径が異なるPL5-R1-F-ZZO-Ax100、PL5-R1-N-ZZN-Ax100の比較では、両ケースの軸力残存率の差は、4時間経過から1年経過まで0.1%~0.3%程度であり、1年経過時点での残存率もPL5-R1-F-ZZO-Ax100が84.1%、

PL5-R1-N-ZZN-Ax100が84.3%であることがわかる。そのため、ボルト孔径の違いによる軸力低下の影響は認められない。

(e) 連結板の処理

連結板のリン酸塩処理が異なるPL5-R3-F-ZZO-Ax100、PL5-R3-F-PZO-Ax100の比較では、両ケースの軸力残存率の差は、24時間経過から半年経過まで、いずれにおいても0.4%程度となり、軸力残存率の差が小さいことが認められる。また、両ケースともに、半年経過時点での軸力残存率は85%程度であるため、連結板のリン酸塩処理による影響は小さいと考えられる。

(f) 母材板厚

母材板厚が異なるPL5-R3-F-ZZO-Ax100、PL14-R4-F-ZZO-Ax100の比較では、半年経過時点の両ケースの軸力残存率が、PL5-R3-F-ZZO-Ax100で85.4%、PL14-R4-F-ZZO-Ax100では87.8%であり、PL14-R4-F-ZZO-Ax100の方が、やや軸力残存率が高いことが認められる。また、軸力残存率の差も、24時間時点では、1.3%程度であるが、半年経過時点では2.4%程度となっていることが認められる。これは、マトリックス樹脂の締付総板厚が厚くなると、同じ軸力で締付けても、ひずみ速度が緩やかになることから、クリープ変形が小さくなったと考えられる。

(g) 溶融亜鉛めっき

溶融亜鉛めっきによる残存ボルト軸力の違いに着目するため、PL5-R1-N-ZZO-Ax100、PL5-R3-N-NNO-Ax100の比較を行う。

表-3 長期リラクセーション試験結果

Case	No.	初期 導入 軸力 kN	24時間後 (1日)			336時間後 (14日)			4320時間後 (半年)			8640時間後 (1年)		
			ボルト 軸力 kN	残存率		ボルト 軸力 kN	残存率		ボルト 軸力 kN	残存率		ボルト 軸力 kN	残存率	
				%	Mean (CV) %									
PL5-R1-F-ZZO-Ax100	1	196.4	178.9	91.1		174.3	88.7		167.8	85.4		165.5	84.3	
	2	200.5	182.7	91.1		178.2	88.8		172.1	85.8		170.1	84.9	
	3	196.4	179.3	91.3	91.2 (0.3)	174.7	88.9	88.9 (0.3)	168.5	85.8	85.8 (0.3)	166.6	84.8	84.7 (0.3)
	4	193.1	175.4	90.8		170.9	88.5		165.3	85.6		163.2	84.5	
	5	188.1	172.2	91.6		167.9	89.3		162.1	86.2		160.0	85.0	
PL5-R3-F-ZZO-Ax100	1	195.5	174.0	89.0		166.7	85.3		159.2	81.4				
	2	195.6	177.6	90.8	91.6 (2.6)	171.4	87.6	88.4 (3.5)	165.6	84.6	85.4 (5.0)			
	3	195.3	179.1	91.7		171.8	88.0		164.7	84.3				
	4	205.5	194.6	94.7		190.5	92.7		187.7	91.4				
PL5-R1-N-ZZO-Ax80	1	156.6	140.6	89.8		136.8	87.4		132.0	84.3		129.9	83.0	
	2	156.2	140.9	90.3		137.2	87.9		131.4	84.1		129.0	82.6	
	3	155.4	141.6	91.1	91.5 (1.7)	137.9	88.7	89.1 (1.8)	132.7	85.4	85.7 (1.8)	130.8	84.2	84.3 (1.8)
	4	158.0	147.1	93.1		143.4	90.7		138.0	87.3		135.9	86.0	
	5	157.3	146.6	93.2		142.8	90.8		137.2	87.2		135.0	85.8	
PL5-R1-N-ZZO-Ax100	1	194.4	177.9	91.5		173.2	89.1		167.0	85.9		164.7	84.7	
	2	192.4	177.2	92.1	91.0 (1.1)	172.5	89.6	88.6 (1.1)	166.0	86.3	85.3 (1.1)	163.6	85.0	84.1 (1.1)
	3	192.3	174.0	90.4		169.3	88.0		163.3	84.9		161.0	83.7	
	4	193.0	173.6	89.9		168.9	87.5		162.5	84.2		160.0	82.9	
PL5-R1-N-ZZN-Ax100	1	191.2	173.8	90.9		169.6	88.7		163.6	85.6		161.2	84.3	
	2	190.6	172.7	90.6	90.9 (0.4)	168.2	88.2	88.7 (0.5)	162.3	85.2	85.6 (0.5)	160.0	83.9	84.3 (0.5)
	3	191.6	174.9	91.3		170.6	89.0		164.7	86.0		162.4	84.8	
PL5-R2-N-ZZO-Ax100	1	192.9	176.4	91.5		171.4	88.9		165.3	85.7		163.1	84.6	
	2	191.8	174.5	91.0	91.0 (0.4)	169.4	88.3	88.3 (0.5)	162.9	84.9	85.0 (0.5)	160.4	83.6	83.8 (0.7)
	3	193.0	174.9	90.7		170.1	88.1		163.8	84.9		161.6	83.7	
	4	191.6	173.5	90.6		168.5	88.0		162.3	84.7		159.6	83.3	
PL5-R3-F-PZO-Ax100	1	199.8	182.0	91.1		176.1	88.1		170.3	85.2				
	2	178.2	160.2	89.9	91.2 (1.4)	154.2	86.5	88.1 (1.8)	148.9	83.6	85.2 (1.9)			
	3	192.6	178.2	92.5		172.9	89.7		167.4	86.9				
PL14-R4-F-ZZO-Ax100	1	199.3	186.5	93.6		181.0	90.8		175.9	88.3				
	2	193.9	178.6	92.1	92.9 (0.8)	172.9	89.2	90.0 (0.9)	168.6	87.0	87.8 (0.8)			
	3	194.3	180.5	92.9		174.6	89.9		171.5	88.2				
Mt5-C0-N-NNO-Ax100	1	227.5	204.3	89.8		195.3	85.8		189.8	83.4				
	2	225.7	204.0	90.4	89.7 (0.8)	195.9	86.8	85.8 (1.2)	190.7	84.5	83.2 (1.8)			
	3	227.4	202.4	89.0		192.8	84.8		185.6	81.6				
PL5-R3-N-NNO-Ax100	1	238.6	221.0	92.5		215.0	90.1		211.0	88.4				
	2	236.3	217.4	92.0	92.2 (0.2)	211.4	89.4	89.8 (0.3)	207.6	87.9	88.1 (0.2)			
	3	240.5	221.7	92.2		215.8	89.7		211.9	88.1				
	4	231.4	213.1	92.1		207.8	89.8		203.9	88.1				
HL5-C30-G-NNO-Ax100	1	237.3	211.0	88.9		202.6	85.4		196.7	82.9				
	2	227.6	206.4	90.7		198.1	87.0		194.5	85.4				
	3	225.8	204.6	90.6	89.9 (0.9)	196.0	86.8	86.1 (1.0)	191.7	84.9	83.8 (1.6)			
	4	232	208.8	90.0		199.9	86.1		193.9	83.6				
	5	227	202.7	89.3		193.2	85.1		186.8	82.3				
PHL5-C45-G-NNO-Ax100	1	226.4	198.6	87.7		190.6	84.2		186.8	82.5				
	2	230.9	222.1	96.2		190.6	82.5		185.1	80.2				
	3	227.9	192.1	84.3	87.2 (6.1)	181.3	79.6	81.3 (2.7)	176.4	77.4	79.5 (2.9)			
	4	232.5	197.6	85.0		189.1	81.3		187.0	80.4				
	5	226.7	187.7	82.8		178.4	78.7		174.0	76.8				

CV: 変動係数

1 : PL5-R1-F-ZZO-Ax100	5 : PL5-R1-N-ZZN-Ax100	9 : Mt5-C0-N-NNO-Ax100
2 : PL5-R3-F-ZZO-Ax100	6 : PL5-R2-N-ZZO-Ax100	10 : PL5-R3-N-NNO-Ax100
3 : PL5-R1-N-ZZO-Ax80	7 : PL5-R3-F-PZO-Ax100	11 : HL5-C30-G-NNO-Ax100
4 : PL5-R1-N-ZZO-Ax100	8 : PL14-R4-F-ZZO-Ax100	12 : PHL5-C45-G-NNO-Ax100

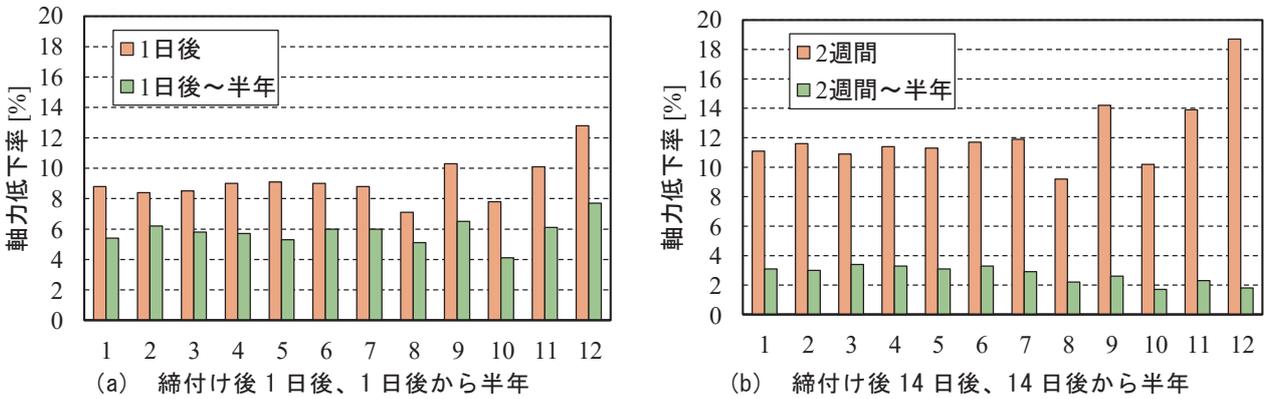


図-5 締付け後のボルト軸力低下率

半年経過時点の両ケースの軸力残存率は、PL5-R1-N-ZZO-Ax100では85.8%、PL5-R3-N-NNO-Ax100では88.1%であり、PL5-R3-N-NNO-Ax100の方がやや軸力残存率が高いことが認められる。また、軸力残存率の差も、24時間時点では、1.1%程度であるが、半年経過時点では2.8%程度となっていることが認められる。これは、PL5-R1-N-ZZO-Ax100には約1.3mmの亜鉛めっきが施されており、この影響を受けたものと考えられる。

(h) 繊維含有率

繊維含有率による残存ボルト軸力の違いに着目するため、Mt5-C0-N-NNO-Ax100、HL5-C30-G-NNO-Ax100、PHL5-C45-G-NNO-Ax100、PL5-R3-F-ZZO-Ax100の比較を行う。

まず、Mt5-C0-N-NNO-Ax100とHL5-C30-G-NNO-Ax100を比較すると、半年時点の軸力残存率の差は0.6%程度であり、繊維含有率が0%と30%の軸力低下の傾向の違いは認められなかった。また、これらとPL5-R3-F-ZZO-Ax100と比較すると、半年時点で約2%程度、PL5-R3-F-ZZO-Ax100の方が軸力残存率が高い。これらの結果より、繊維含有率がある一定値を下回ると、マトリックス樹脂の粘弾性挙動が支配的になるため、繊維含有率がリラクセーション特性に及ぼす影響は小さくなると推察される。一方、PHL5-C45-G-NNO-Ax100の軸力残存率は、半年経過時点で79.5%となっており、他のケースよりも軸力残存率が低いことがわかる。このケースの繊維含有率は45%を目標に製作されており、前述の繊維含有率と軸力

残存率の傾向が異なることがわかる。この要因は、現状では解明できていないが、違いとして、PHL5-C45-G-NNO-Ax100は、圧縮ハンドレイアップ成形により製作されているため、GFRP材の製作方法による影響も考えられる。

2) 締付け後のボルト軸力低下率

図-5は、締付け後のボルト軸力低下率を示す。図-5 (a) は、締付け後から1日後および1日後から半年までの軸力低下率、図-5 (b) は、締付け後から14日後および14日後から半年までのボルト軸力低下率である。

図-5 (a) より、締付け1日後には、約7~12%程度ボルト軸力が低下しており、1日後から半年にかけては約4~8%ほど低下することが認められる。これにより、締付け1日後経過するまでに大幅にボルト軸力が低下することがわかる。一方、図-5 (b) より、締付け14日後では、約9~18%程度低下しており、14日後から半年までの低下率は2%程度となることが認められる。この結果から、ボルト締付け後2週間以降の軸力低下率はいずれケースにおいてもばらつきが小さく、長期リラクセーション特性を推定する際、締付け後2週間までのデータを活用すれば、推定値にばらつきが小さくなる可能性がある。

3. すべり試験

(1) 試験体

1) 試験体寸法

図-6に、すべり試験に用いた試験体の形状を示す。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。試験体の寸法は、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。本試験体の母板の板厚は、本継手構造を適用の実物大壁高欄構造と同じ5mmとした。ボルト軸力および連結板の厚さは、実物大壁高欄構造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、試験体は、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。

2) 材料物性値

表-4に、GFRP材および連結板に用いた鋼板の材料物性値を示す。なお、GFRP材は、引抜成形によって成形しており、積層構成は、図-3に示すとおりである。試験体は、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。

3) 接合面処理および表面塗装

試験体の接合面処理は、GFRP材の表面処理の有無をパラメータとして、塗装有のケースでは、防食のため部材表面にフッ素樹脂塗料を用いた。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リン酸塩処理を施したものを基本とした。

表-5は、試験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。各計測ともに、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。なお、GFRP塗装面の塗膜厚は、膜厚計が、素地が金属でないと測定できないことから、塗膜厚計測用の鋼板を別途用意し、同一ロット塗装を行うことで塗膜厚の計測を行った。この結果、GFRP塗装面の塗膜厚は約40 μ mであり、連結板のめっき厚は、無処理は150 μ m程度、リン酸塩処理は200 μ m程度であった。

また、粗さ計測の結果、GFRP材の表面粗さは1.0 μ m程度であり、連結板では、無処理は7 μ m程度、リン酸塩処理は10 μ m程度であった。

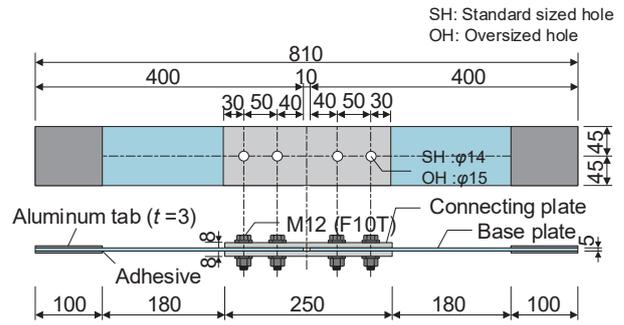


図-6 試験体形状 (単位: mm)

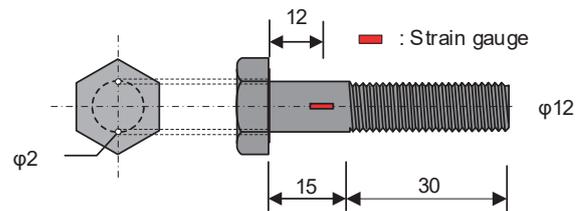


図-7 ひずみゲージ付きボルト (単位: mm)

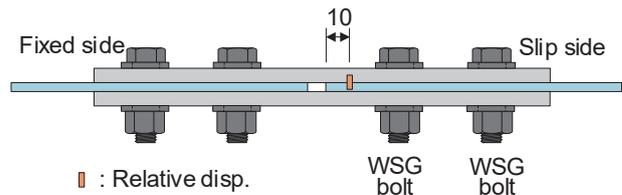


図-8 相対変位計測位置 (単位: mm)

表-4 材料物性値

Materials	引張強度 (MPa)	引張弾性係数 (GPa)	降伏点 (MPa)	圧縮強度 (MPa)
GFRP	361	31	N/A	363
SM400A	443	200	337	N/A

4) 試験ケース

表-6に、すべり試験における試験パラメータを示す。すべり試験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、事前検討で、実大GFRP継手 (M20のF8T) を対象に実施した長期リラクゼ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、本試験体の設計ボルト軸力とした。なお、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、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 (ϕ 15) と標準孔 (ϕ 14) とした。

表-5 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-6 試験ケース

Case	Axial force	Surf.coating of connecting plate	Surf.coating of GFRP	Bolt hole	β
Ax100-PNL	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Over ($\phi 15$)	0.62
Ax80-PNL	80%	Phosphate treat.	Unpainted	Over ($\phi 15$)	0.49
Ax100-PPL	100%	Phosphate treat.	Painted	Over ($\phi 15$)	0.62
Ax80-PPL	80%	Phosphate treat.	Painted	Over ($\phi 15$)	0.49
Ax100-PNN	100%	Phosphate treat.	Unpainted	Standard ($\phi 14$)	0.61
Ax100-NPL	100%	N/A	Painted	Over ($\phi 15$)	0.62

各ケースの試験体はそれぞれ5体とし、載荷試験は、終局までを3体、すべり発生までを2体とした。

5) 設計耐力

試験体の設計耐力は、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。

(2) 試験概要

1) 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、ボルト締付時に試験体のボルト軸力を管理するため、**図-7**に示すWSGボルトを用いた。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。

2) 試験体の組立て

試験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。

3) 載荷試験

載荷試験では、試験体を**写真-3**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、

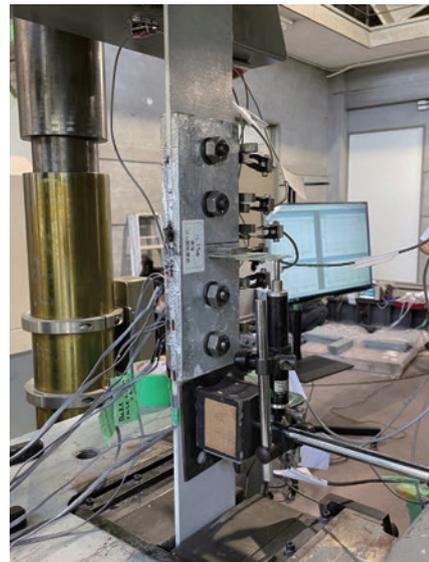


写真-3 すべり試験の状況

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。

計測項目は、ボルト軸力、試験機荷重、**図-8**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、載荷試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。

$$\mu = \frac{P_s}{m \cdot n \cdot N} \quad (1)$$

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。

(3) 試験結果および考察

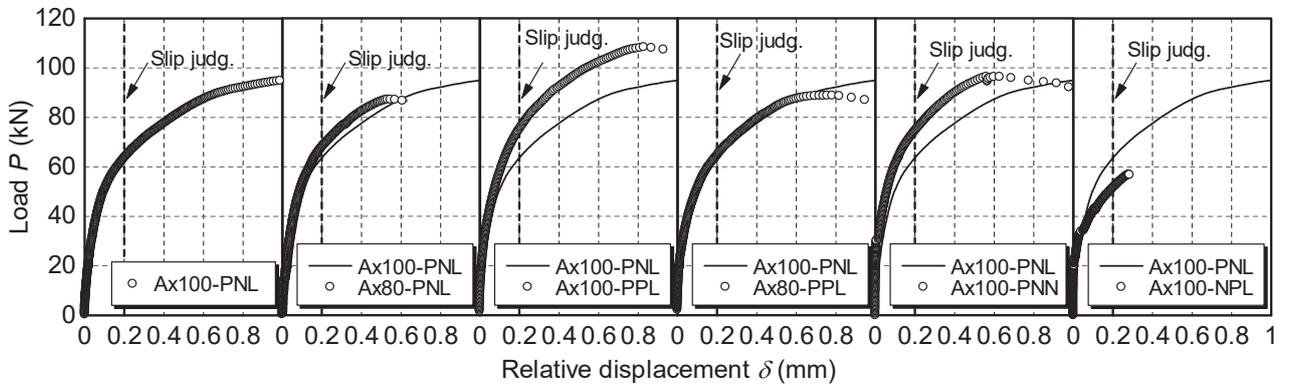
1) 荷重-相対変位

図-9は、すべり試験における母板縁端10mm位置(図-8に参照)の荷重-相対変位関係の一例を示す。図-9(a)は、試験で得られた荷重-相対変位、図-9(b)は、試験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

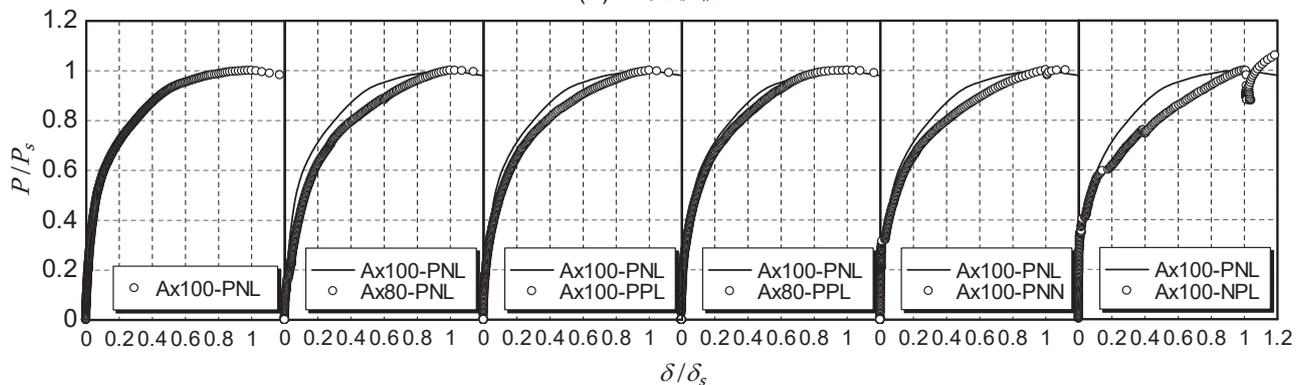
め、参考値として図-9(a)中にプロットした。

図-9(a)より、いずれの試験体においても、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-9(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のため、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。



(a) 実験値



(b) 無次元化

図-9 荷重-相対変位関係

表-7 すべり試験結果一覧

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*	53.4	50.3	93.6	0.448*		0.448*		0.465*					
	2	52.2	54.2	50.9	96.6	0.463	0.462	1.2	0.446	0.455	1.8	0.474	0.486	1.9
	3		52.7	49.1	94.6	0.453			0.449			0.482		
	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	45.8	44.1	76.2	0.365			0.453		0.432				
	2	52.2	41.2	38.5	76.6	0.367	0.387	5.2	0.464	0.483	4.2	0.498	0.509	8.2
	3		41.7	38.8	83.6	0.400			0.501			0.538		
	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*	53.1	51.2	108.6	0.520*			0.520*		0.531*				
	2	52.2	52.9	51.4	107.1	0.513	0.522	1.7	0.506	0.522	3.1	0.521	0.541	3.2
	3		52.6	50.3	108.4	0.519			0.516			0.539		
	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	43.1	40.4	90.2	0.432			0.524		0.559				
	2	52.2	42.9	41.1	97.0	0.465	0.429	5.1	0.565	0.540	3.4	0.591	0.573	2.4
	3		40.7	38.4	88.8	0.425			0.546			0.578		
	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	53.7	50.2	97.0	0.465			0.452		0.483				
	2	52.2	54.5	51.0	99.0	0.474	0.461	2.3	0.454	0.454	1.6	0.485	0.488	1.5
	3		52.0	48.4	96.8	0.464			0.466			0.493		
	4		53.1	48.9	96.3	0.461			0.454			0.481		
	5		52.0	48.0	92.3	0.442			0.443			0.481		
Ax100-NPL	1	52.8	52.3	49.2	0.236			0.233		0.235				
	2	52.2	53.1	51.8	56.9	0.273	0.253	13.6	0.268	0.253	12.1	0.275	0.259	12.6
	3		52.7	51.3	62.9	0.301			0.299			0.307		
	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		

2) すべり係数

表-7はすべり試験結果の一覧、図-10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

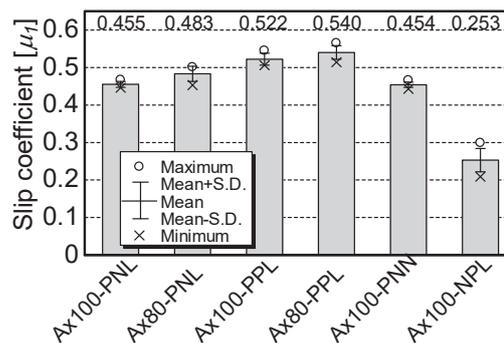


図-10 すべり係数 μ_1

高くなった。

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%程度高くなることわかった。

d) 連結板の表面処理

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した試験ケースにおいて、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。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、本試験で対象とした試験ケースでは、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。

3) 荷重－軸力残存率

図-11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%とした载荷中の軸力残存率である。

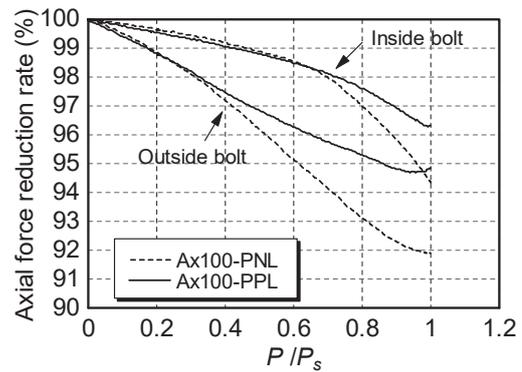
a) 設計ボルト軸力100%

図-11 (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。

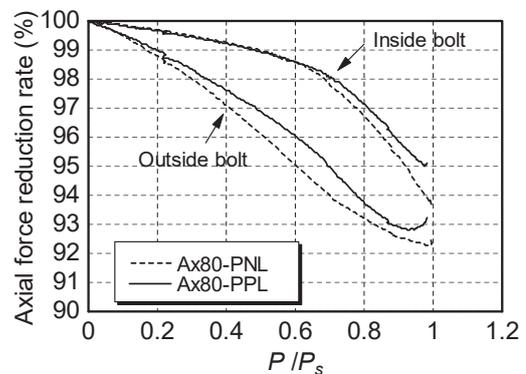
また、すべり荷重付近で外側ボルトにおいて軸力の上昇が認められる。これは、外側ボルトのボルト軸力低下が大きいことから、ボルト軸部の母板への支圧力の影響と考えられる。

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。



(a) 設計ボルト軸力 100%



(b) 設計ボルト軸力 80%

図-11 荷重－軸力残存率関係

b) 設計ボルト軸力80%

図-11 (b) より、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。

4. まとめ

溶融亜鉛めっき処理を施した高力ボルト摩擦接合GFRP継手の長期リラクセーション特性を明らかにすることを目的として、接合条件や接合面処理をパラメータとした長期リラクセーション試験を実施した。また、薄板GFRP材を用いた高力ボルト摩擦接合継手に対して、

すべり試験を実施し、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。これらの試験で得られた結果を以下に示す。

- (1) ボルト導入軸力、ボルト孔径、リン酸塩処理、母材塗装、GFRPの製作ロットの条件が、GFRP継手の長期リラクゼーション特性へ及ぼす影響は小さいことがわかった。
- (2) 連結板の溶融亜鉛めっき処理、締付総厚、繊維含有率の条件は、高力ボルトの軸力低下率へ及ぼす影響が大きいことがわかった。
- (3) ボルト締付け後の軸力低下は14日経過までに大きく軸力が低下し、その後、緩やかに低下する。この低下率はいずれのケースでも、最大で20%程度であることがわかった。
- (4) 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。
- (5) すべり試験より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り、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。
- (6) 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。
- (7) 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：本研究は、大阪公立大学、宮地エンジニアリングの共同研究として行われたものであり、ご指導頂いた共同研究の関係各位に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 青木海, 林巖, 関本将貴, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一: 溶融亜鉛めっき処理を施した高力ボルト摩擦接合GFRP継手の長期リラクゼーション特性, 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp136-145, 2022.
- 2) 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海: 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, 土木学会論文集特集号(複合構造) Vol.79, No.14, 22-14003, 2023.
- 3) 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ゼ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.

2024.03.01 受付