

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

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

¹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)
E-mail: aoki.kai@miyaji-eng.co.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)

⁴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)

⁵正会員 宮地エンジニアリング(株) 関西支社(〒550-0004 大阪市西区靱本町一丁目8番2号)

⁶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)

GFRP構造物の高力ボルト摩擦接合では、GFRP部材のクリープ変形により、ボルト軸力が低下することが懸念される。本研究では、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、長期リラクセーション試験を実施した。長期リラクセーション試験において、GFRP 塗装の有無、ボルトの導入軸力、溶融亜鉛めっきの有無および表面処理方法、GFRP の母材厚、繊維含有率などの継手の接合条件および材料物性値をパラメータとしてリラクセーション特性に及ぼす影響を検討した。その結果、亜鉛めっき鋼板にリン酸塩処理した場合は、GFRP 継手のリラクセーション特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。一方、溶融亜鉛めっき処理を施す場合や GFRP の板厚が薄くなる場合には、軸力低下率が大きくなることがわかった。

Key Words: GFRP, long-term relaxation, hot-dip galvanized, high strength bolt

1. はじめに

ガラス繊維強化ポリマー (Glass Fiber Reinforced Polymer: GFRP) 部材における高力ボルト摩擦接合 (以下、GFRP 継手) では、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セーションが生じる。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。

FRP を構成するマトリックス樹脂のリラクセーション特性に関して、A. Plascied らは、単調引張荷重下のビニルエステルポリマーの粘弾性挙動の物理モデルを構築し、短期的なクリープ挙動を予測した¹⁾。Kitagawa らや Bordonaro らは、ポリプロピレン樹脂やナイロンにおけ

る塑性リラクセーション挙動に対して、超過応力に基づいた粘塑性の流動則を適用し、比較的試験結果と一致することを明らかにした^{2,3)}。

一方、高力ボルト GFRP 継手のリラクセーション特性については、引抜 GFRP 材の摩擦接合継手に対して、J.T. Mottram が実験的に供用期間中に 40%以上低下する可能性があることを明らかにした⁴⁾。また、Thoppul らは、CFRP 継手に対して、短期的には、ボルト軸力が高くなると正規化した低減量が減少するという結論を得た⁵⁾。V. Caccese らは、船舶に用いられる GFRP-金属のハイブリッド継手に対して、3 ヶ月程度のリラクセーション試験を行い、リラクセーション特性の推定式を提案および温度依存性を明らかにした⁶⁾。木嶋らは、引抜 GFRP 材のボルト接合のリラクセーション特性と、材料の板厚やマットイン接着の関係を明らかにした⁷⁾。橋本らは、ハ

表-1 試験ケース

ケース	成形方法	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
		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

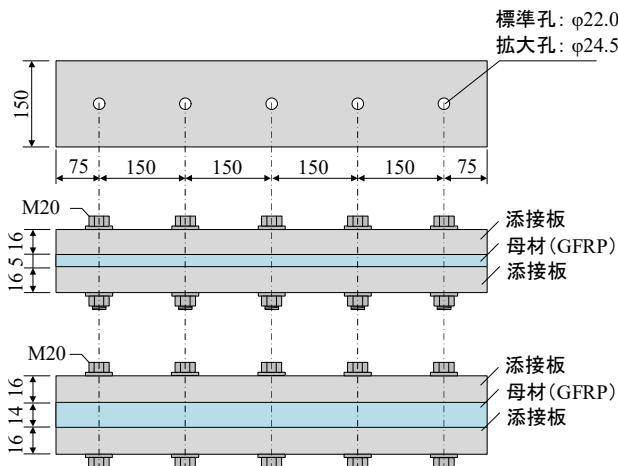


図-1 試験体形状 (単位: mm)

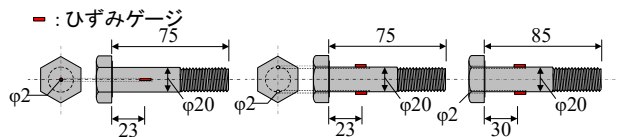


図-2 ひずみゲージ付きボルト (単位: mm)

ンドレイアップ GFRP 材の摩擦接合継手のすべり試験およびリラクセーション試験から、連結板に鋼部材を用いることで、ボルト軸力低下率を 20%程度抑えられることを明らかにした⁹⁾。新井らは、GFRP 材に対して、7年間に及ぶクリープ試験により、最大 25%程度軸力が低下する結果を得た⁹⁾。また、岩崎らは、ハイブリッド FRP 材の摩擦接合継手に対して、リラクセーション特性を明らかにした¹⁰⁾。

このように、多くの研究が国内外問わず行われているが、連結板や GFRP 材の接合面処理が GFRP 継手のリラクセーション特性に及ぼす影響は検討されていない。

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 継手の長期リラクセ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セーション試験を実施した。

添接板



GFRP (Pultrusion materials)

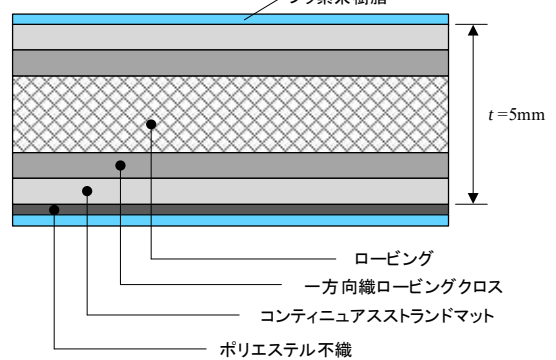


図-3 GFRP 引抜成形材

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

2. 長期リラクセーション試験

(1) 試験体

図-1 に示す継手試験体を対象に長期リラクセーション試験を実施する。GFRP 継手を構成する材料は、母板: GFRP 板, 連結板: 溶融亜鉛めっき処理を施した鋼

板 (SM400A) である。試験体の寸法は、図-1 に示すとおりで、M20 の F8T 溶融亜鉛めっき高力ボルトを用いた 1 行 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、母材の板厚は実物大構造物の 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つきボルト (以下、WSG ボルト) を用いて、文献 11) に示す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。なお、ひずみゲージの貼付け位置は、継手総板厚の中央となる位置に設置した。ボルト孔径は、現場施工性を考慮して、拡大孔を適用し、GFRP 材の表面処理は、フッ素樹脂塗料によりコーティングした。

(2) 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、図-3 は GFRP 材の基本ケースにおける積層構成および継手供試体の表面塗装を示す。

表-1 の GFRP の成形方法に示す「引拔」のうち板厚 5mm のケースは、連続引拔成形 GFRP 材であり、構成材料には、繊維材料は E-glass、樹脂材料は不飽和ポリエステル樹脂を用いた。積層構成は、部材最外面から、ポリエステル不織／コンティニュアスストランドマット／一方向織ロービングクロス／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の計 6 層構成である。一方、板厚 14mm のケースは、板厚 5mm のケースと製作方法や繊維構成は同様であるが、樹脂材料にビニルエステル樹脂を用いた。

「樹脂」は、「引拔」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、「引拔」と同様の積層構成、構成材料であるが、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、部材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、JISK 7052 に規定される焼成法によって算出した。

(3) 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、2.2 に示すように引拔成形材、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、引拔成形 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

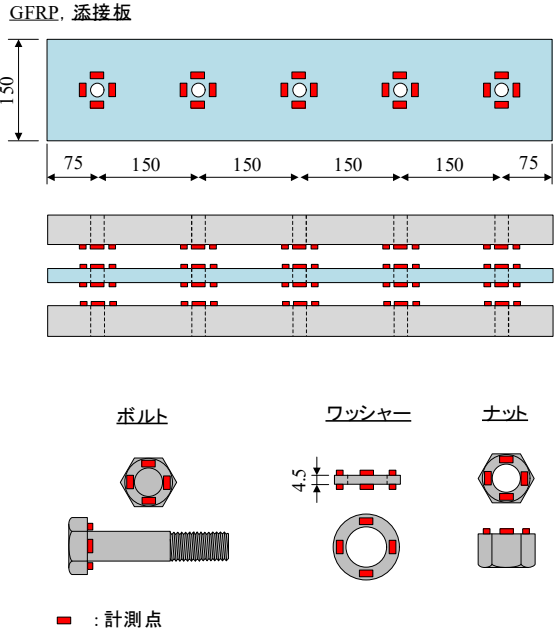


図-4 塗装厚の計測位置

表-3 塗装厚計測結果

Case	塗装厚 (μm)	
	連結板 1 面 あたり	総めっき厚 (ボルト・ナット・座金を含む)
PL5-R1-F-ZZO-Ax100	163.2	1391.8
*PL5-R3-F-ZZO-Ax100	118.0	1211.0
PL5-R1-N-ZZO-Ax80	162.3	1388.2
PL5-R1-N-ZZO-Ax100	163.3	1392.2
PL5-R1-N-ZZN-Ax100	178.9	1454.6
PL5-R2-N-ZZO-Ax100	179.9	1458.6
*PL5-R3-F-PZO-Ax100	166.1	1403.4
*PL14-R4-F-ZZO-Ax100	117.2	1207.8
*Mt5-C0-N-NNO-Ax100	9.1	N/A
*PL5-R3-N-NNO-Ax100	11.6	N/A
*HL5-C30-G-NNO-Ax100	11.2	N/A
*PHL5-C45-G-NNO-Ax100	9.5	N/A
亜鉛めっき ボルト・ナット	131.3	N/A
亜鉛めっき座金	119.1	N/A
GFRP の塗装厚	40.7	N/A

無印：実施時期 2021.3～，*：実施時期 2022.2～



図-5 長期リラクセーション試験体

る導入ボルト軸力は、2.1 に示すように、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 ($\phi 24.5$) と標準孔 ($\phi 22$) 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。

(4) 試験概要

図-5 に示す GFRP 継手の長期リラクセーション試験は、1) 試験体の塗装厚計測、2) 締付ボルトのキャリブレーション、3) 試験体の組立ておよび接触圧試験、4) ボルト締付の順に行う。

a) 塗膜厚測定

塗膜厚の測定は、図-4 に示す連結板、母材、ボルトセットの計測位置で測定した。測定にあたり、電磁式膜厚計 (サンコウ電子: SWT-9000/9100) を用いた。連結板・母材での計測は、試験体の片面に対して、各ボルト孔周辺で 4 点、試験体 1 体あたり 20 点の計測を行った。ボルト・ナットは、ワッシャーとの接触面で 4 箇所、ワッシャーはボルトヘッド側とナット側の両面の測定を行った。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では、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。ボルト・ナットねじ部の膜厚は、計測していない。

表-3 には、片面あたりの平均塗膜厚および、亜鉛メッキの総塗膜厚を示す。なお、本試験は、表-1 に示すとおり締付け時期が 2 回に分かれているため、表-3 には同一時期の実施した試験ケースに*を付けている。

表-3 より、熔融亜鉛めっきの塗膜厚は、先行して実施した試験 (2021.3~) では、約 170 μm 前後であった。一方、2022.3 に実施した試験の熔融亜鉛めっきの塗膜厚は、約 117 μm であり、表面にリン酸塩処理を行うことで、約 166 μm となった。また、熔融亜鉛めっき処理した継手試験体の総亜鉛めっき厚は、約 1.21~1.45mm 程度であった。

b) 締付ボルトのキャリブレーション

リラクセーション試験の初期導入軸力を同定するため、図-2 に示す 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 枚のひずみゲージ貼付ける。そして、キャリブレーション

試験により校正係数を算出して、これを締付時のひずみ応答値に乗じて、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する。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、M20 の F8T 高力ボルトの設計ボルト軸力 133kN の 1.1 倍である 146kN まで载荷・除荷を 3 回繰り返して、2 サイクル目以降の荷重-ひずみ関係の直線回帰より、校正係数を算出する。

c) 試験体の組立ておよび接触圧試験

ボルト締付時の GFRP 継手の母板表面に作用する接触圧分布を測定するため、接触圧試験を行う。本試験には、中圧用 (測定範囲 10~50N/mm²) の圧力測定フィルム (Fujifilm) を用いた。これは、接触圧試験で設定した導入ボルト軸力 (約 154kN) に対する接触圧が、ボルト-ワッシャー間の接触部から 45° に広がると仮定した場合の面圧 (約 45.6N/mm²) から選定した。そして、ボルトのヘッド側とナット側の 2 か所の母材-連結板間の接合面に圧力測定フィルムを挿入し、ボルト締付を行う。その後、試験体を解体し、圧力測定フィルムを取り出し、圧力画像解析システムにより接触圧分布を測定する。

なお、試験体のボルト締付けは、ナット回転法で締付けるとボルトが降伏するため、導入ボルト軸力を 154kN と設定して、ひずみ管理で締付けを行った。ボルトの締付けは、予備締め、本締めの 2 工程としてトルクレンチを用いた。予備締めは、設定した導入ボルト軸力の 60%、本締めは、予め設定した導入ボルト軸力になるように締付けた。なお、ボルトの締付け順序は、中央のボルトから外側に向かい、左右交互に締付けた。

d) 試験体の締付手順

本リラクセーション試験では、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 150Nm 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。

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¹²⁾) 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。

3. 試験結果および考察

(1) 残存ボルト軸力

図-6 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-4 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-6 より締付後のボルト軸

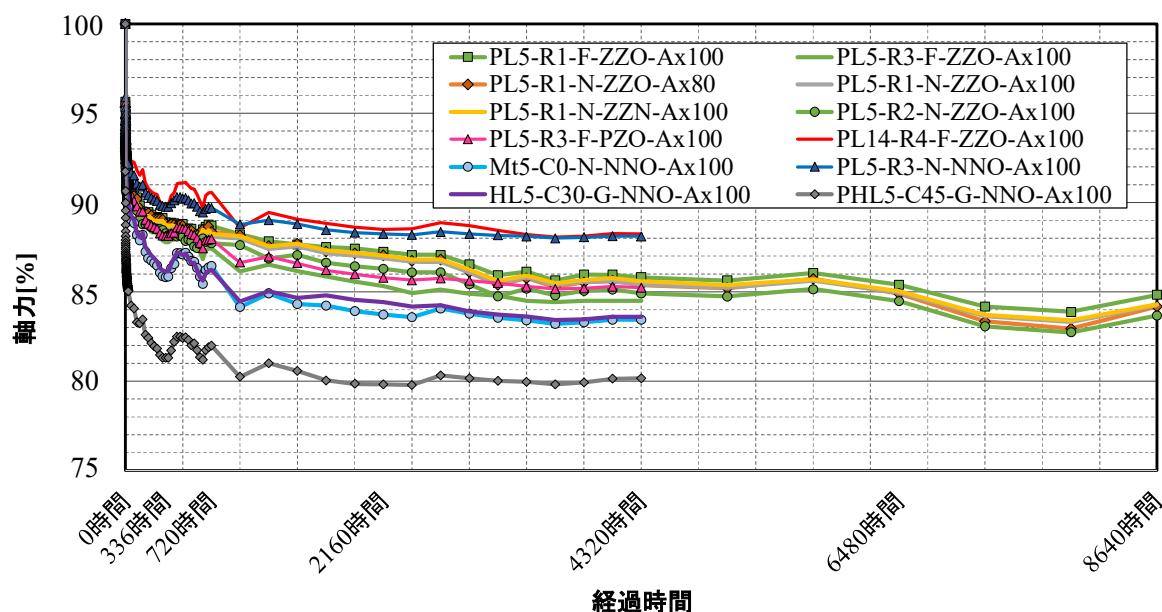


図-6 ボルト軸力の経時変化

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-4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

製作ロットによる残存ボルト軸力の違いに着目するため、製作ロットの異なる PL5-R1-F-ZZO-Ax100, PL5-R2-F-ZZO-Ax100, PL5-R3-F-ZZO-Ax100 の比較を行う。

表-4 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

導入ボルト軸力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-R1-N-ZZO-Ax80 の比較を行う。

表-4 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が見られなかった。これは、既往研究（南ら 2022 土論）¹³⁾での鋼継手のリラクセーション特性において、導入ボルト軸力の影響が小さいと報告され

ており、GFRP 継手においても同様の傾向が認められた。

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

ボルト孔径の違い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-ZZN-Ax100 の比較を行う。

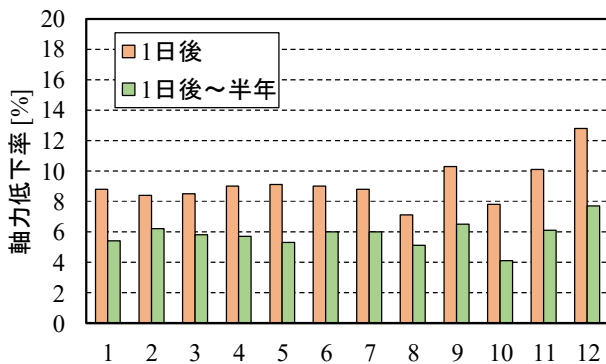
両ケースの軸力残存率の差は、4時間経過から1年経過まで、いずれにおいても 0.1%~0.3%程度であり、1年経過時点での残存率も PL5-R1-F-ZZO-Ax100 が 84.1%、PL5-R1-N-ZZN-Ax100 が 84.3%であることがわかる。そのため、ボルト孔径の違いによる軸力低下の影響は認められない。これについては、鋼部材の継手においても同様の傾向が報告されている¹³⁾。

表-4 長期リラクセーション試験結果

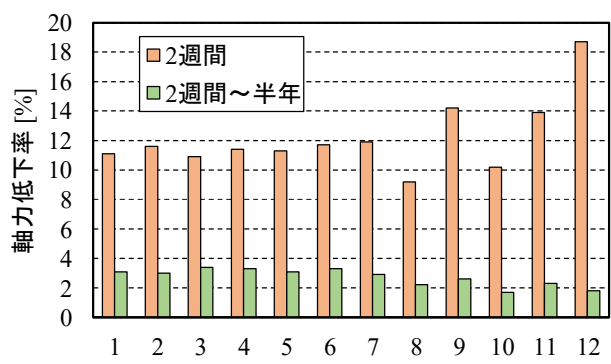
Case	No.	初期 導入 軸力	24時間後 (1日)				336時間後 (14日)				4320時間後 (半年)				8640時間後 (1年)			
			ボルト 軸力		残存率		ボルト 軸力		残存率		ボルト 軸力		残存率		ボルト 軸力		残存率	
			kN	kN	%	Mean (CV) %	kN	%	Mean (CV) %	kN	%	Mean (CV) %	kN	%	Mean (CV) %	kN	%	Mean (CV) %
PL5-R1-F- ZZO-Ax100	1	196.4	178.9	91.1			174.3	88.7			167.8	85.4				165.5	84.3	
	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



(a) 締付け後1日後, 1日後から半年



(b) 締付け後14日後, 14日後から半年

図-7 締付け後のボルト軸力低下率

e) 連結板の処理

連結板のリン酸塩処理によるボルト軸力の違いに着目するため, PL5-R3-F-ZZO-Ax100, PL5-R3-F-PZO-Ax100 の比較を行う。

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

母材板厚による残存ボルト軸力の違いに着目するため, PL5-R3-F-ZZO-Ax100, PL14-R4-F-ZZO-Ax100 の比較を行う。

半年経過時点の両ケースの軸力残存率は, PL5-R3-F-ZZO-Ax100 では 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, 文献 1) でも報告があるように, 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。一方, 木嶋ら⁷⁾のリラクセーション試験では, 反対の傾向を示したことも報告されており, 引き続き検討を行う。

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。

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, 表-3 塗装厚計測結果から, 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。

なお, 前述のボルト軸力の違いによるリラクセーション特性の違いは認められなかったものの, 両ケースの導入軸力は, PL5-R1-N-ZZO-Ax100 は 193.0kN, PL5-R3-N-NNO-Ax100 は 236.7kN と大きく異なるため, リラクセーション特性をより高精度で推測するために今後も検討を行う予定である。

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測する。

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

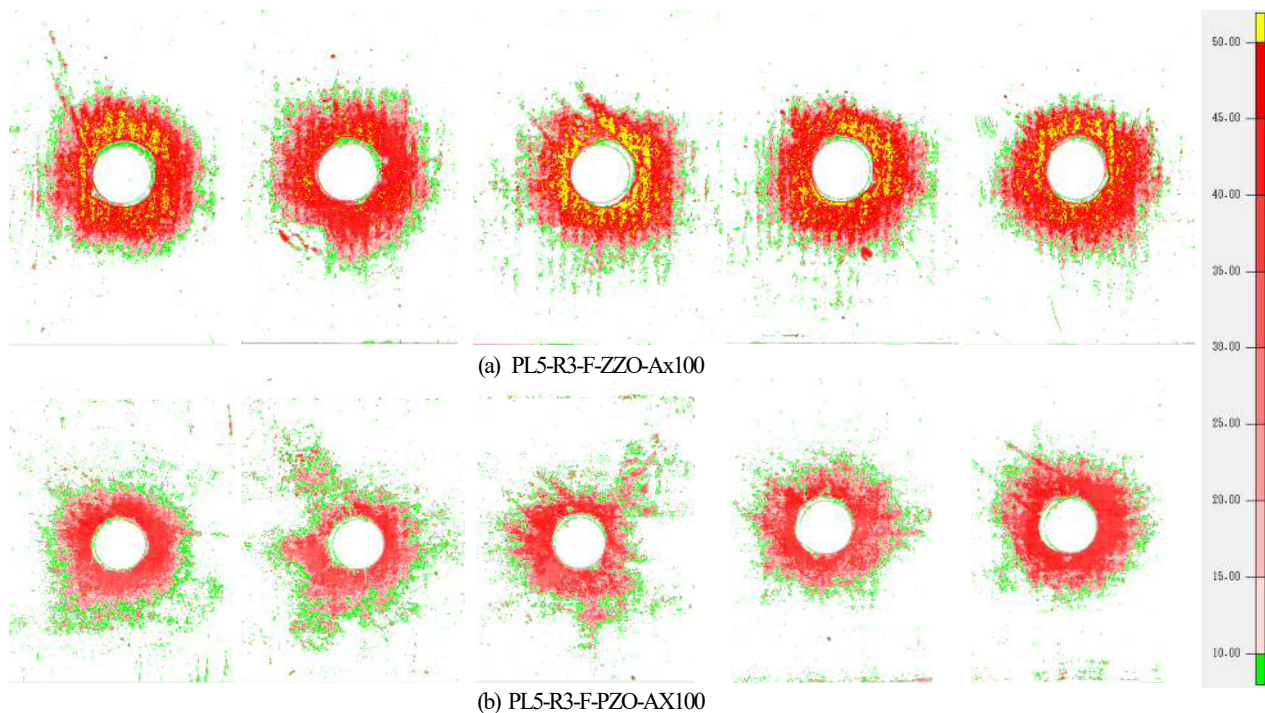


図-8 ボルト頭部側の母材における接触圧分布

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今後検討する．

(2) 締付け後のボルト軸力低下率

図-7 は，締付け後のボルト軸力低下率を示す．図-7(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-7(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-7(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-7 (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) 接触圧試験

表-5は接触圧分布面積と平均圧力，図-8はボルト締付け時のボルトヘッド側の接触圧分布，図-9は連結板の接触面を示す．ここでは，リン酸塩処理による違いに着目す

表-5 接触圧力

Case	No	接触圧力 (N/mm ²)	
		ボルト 1 本	平均
PL5-R3-F-ZZO-Ax100	1	21.5	22.26
	2	19.5	
	3	22.0	
	4	23.3	
	5	25.0	
PL5-R3-F-PZO-AX100	1	30.8	30.58
	2	29.0	
	3	30.3	
	4	31.3	
	5	31.5	



図-9 連結板の接触面

るため，PL5-R3-F-ZZO-Ax100とPL5-R3-F-PZO-AX100の比較を行う．なお，表-4のボルト 1 本あたりの接触圧力は，分析ソフトウェア上で接触範囲（赤色：10 N/mm²～50 N/mm²）の平均値を計算したものである．

図-8より，接触範囲（赤色：10 N/mm²～50 N/mm²）は，PL5-R3-F-PZO-AX100 よりも PL5-R3-F-ZZO-AX100 の方が

大きく、接触圧も PL5-R3-F-ZZO-AX100 の方が濃赤色や黄色が多いため高いことが認められる。これは、表-5 のボルト 1 本あたりの平均接触圧力が小さいことからわかる。溶融亜鉛めっきにリン酸塩処理を実施すると、図-9 のように表面が白くなり、表面の凹凸が大きくなる。そのため、母材一連結板間の密着性が低下し、接触面積および接触圧力が小さくなることが考えられる。これは、図-8 の PL5-R3-F-PZO-AX100 の接触分布が円形状になっていないことからわかる。一方で、両ケースの軸力残存率は概ね同様であることから、前述の通り、接触圧が長期リラクセーション特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

4. 結論

本研究では、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。本試験で得られた成果を下記に示す。

- (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 継手の長期リラクセ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) しかし、圧縮ハンドレイアップ成形による試験ケースの軸力低下は、他に比べ顕著であったことから、成形方法による影響を引き続き検討する。
- (4) 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。引き続き試験を継続し、軸力低下の傾向を調査する予定である。
- (5) 接触圧試験より、溶融亜鉛めっき処理した鋼材表面にリン酸塩処理を施すことによって、表面の凹凸が大きくなり、密着性が低下するため、接触面積および接触圧力が小さくなることがわかった。

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) Plascied, A., Fatemi, A.: Deformation response and constitutive modeling of vinyl ester polymer including strain rate and temperature effects, *Journal of Materials Science*, Vol.43, pp.1191-1199, 2008.
- 2) Kitagawa, M., Mori, T., Matsutani, T.: Rate-dependent nonlinear constitutive equation of polypropylene, *Journal of Polymer Science: Part B*, Vol.27, pp.85-95, 1989.
- 3) Bordonaro, C. M., Krempl, E.: The effect of strain rate on the deformation and relaxation behavior of Nylon 6/6 at room temperature, *Polymer Engineering and Science*, Vol.32, pp.1066-1072, 1992.
- 4) Mottram, J.T.: Friction and load transfer in bolted joints of pultruded fibre reinforced polymer section, *FRP Composites in Civil Engineering - CICE*, pp.845-850, 2004.
- 5) Thoppul, S. D., Gibson, R. F., Ibrahim, R. A.: Phenomenological modeling and numerical simulation of relaxation in bolted composite joints, *Journal of Composite Materials*, Vol.42, No.17, pp.1709-1729, 2008.
- 6) Caccese, V., Berube, K.A., Fernandez, M., Melo, J.D., Kabche, J.P.: Influence of stress relaxation on clamp-up force in hybrid composite-to-metal bolted joints, *Composite Structures*, Vol.89, pp.285-293, 2009.
- 7) 木嶋健, 勝野壽男, 小林憲治, 日野伸一, 西崎到: 引抜成形 GFRP 積層材によるボルト接合の軸力リラクセーション, *材料*, Vol.59, No.7, pp.540-545, 2010.
- 8) 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.
- 9) 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.II_102-II_113, 2016.
- 10) 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, *構造工学論文集 A*, Vol.64A, pp.769-778, 2018.
- 11) 土木学会鋼構造委員会: 高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), *鋼構造シリーズ* 15, 2006.
- 12) 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.
- 13) 南邦明, 筒井康平, 田村洋: 高力ボルト摩擦接合継手のリラクセーションによるボルト軸力低下特性に関する比較検討, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)* Vol.78, No.1, pp.180-189, 2022.

(Received August 26, 2022)

LONG-TERM RELAXATION CHARACTERISTICS OF HOT-DIP GALVANIZED HIGH-STRENGTH BOLTED FRICTION GFRP JOINTS

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

Bolt axial force of high strength bolted GFRP friction joints is reduced due to creep deformation of the matrix resin of the GFRP member. In this study, long-term relaxation tests were conducted to clarify the long-term relaxation characteristics of GFRP joints with hot-dip galvanized coated connecting plates. The parameters of the long-term relaxation test are the connecting conditions and material property parameters, such as the presence or absence of GFRP coating, the introduced axial bolt force, the presence or absence of hot-dip galvanization and the surface treatment of connecting plate, the thickness of the GFRP base member, and the fiber content. The results showed that phosphate treatment of galvanized steel plates had little effect on the relaxation properties of GFRP joints. The rate of bolt axial force reduction increases by using of hot-dip galvanized plates or thin GFRP thicknesses.