

(51) 実大GFRP壁高欄基部接合部の曲げ載荷実験

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

¹正会員 宮地エンジニアリング株式会社 関西設計部（〒550-0001 大阪市西区土佐堀一丁目4番11号）
E-mail: sakai.keiichi@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

²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

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

²正会員 宮地エンジニアリング株式会社 技術開発部（〒550-0001 大阪市西区土佐堀一丁目4番11号）
E-mail: kubo.keigo@miyaji-eng.co.jp

³正会員 宮地エンジニアリング株式会社 計画部（〒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

橋梁の老朽化に伴う壁高欄等の橋梁附属物の劣化が問題視されているなかで、維持管理性や施工性の観点から、軽量かつ高耐食性を有するGFRPを用いた壁高欄が注目されている。GFRP壁高欄基部の構造は、溶融亜鉛めっき処理された曲げ加工鋼板を連結板として、高力ボルト摩擦接合で接合されている。一方、GFRP部材のクリープ変形によるボルト軸力の低下や接合面処理が継手挙動に及ぼす影響は明らかとなっていない。本研究では、ボルト軸力の低下や表面処理の違いがGFRP壁高欄基部の継手性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実物大壁高欄を用いた曲げ載荷実験を行った。その結果、摩擦接合面のリン酸塩処理の有無、GFRP部材のクリープ変形によりボルト軸力の低下がGFRP壁高欄の終局耐力に及ぼす影響は小さいことがわかった。

Key Words : GFRP, bending performance, high-strength bolted joint, hot-dip galvanized

1. はじめに

昨今、橋梁の老朽化が問題となっており、これに伴う橋梁附属物の維持管理も重要な課題である。このような背景の中、軽量かつ高耐食性であるガラス繊維強化ポリマー（以下、GFRP）の橋梁附属物への適用が増加傾向にある。特に、道路橋の壁高欄においては、耐衝撃性に優れる鋼製やコンクリート製が多く用いられている。しかしながら、これらは、重量が大きく、塩害・凍害、コンクリート片の剥落も懸念されるため、維持管理性や施工性に課題が残る。一方、鉄道橋の場合には、耐衝撃性が道路橋ほどは必要ではなく、新たに図-1に示すようなGFRPを用いた壁高欄が開発された²⁾。

GFRP壁高欄は、GFRPパネルと地覆に接続するための鋼材で構成されており、接合部はGFRPパネル側では高力ボルト摩擦接合、地覆側では引張接合となる。

基部構造に用いられる鋼材は、GFRPの高耐食性を活かすため、厳しい腐食環境下ではステンレス材が用いられることが多いが、腐食環境が厳しくない箇所では、経済性の観点から溶融亜鉛めっき材が使用される。ま



図-1 GFRP壁高欄

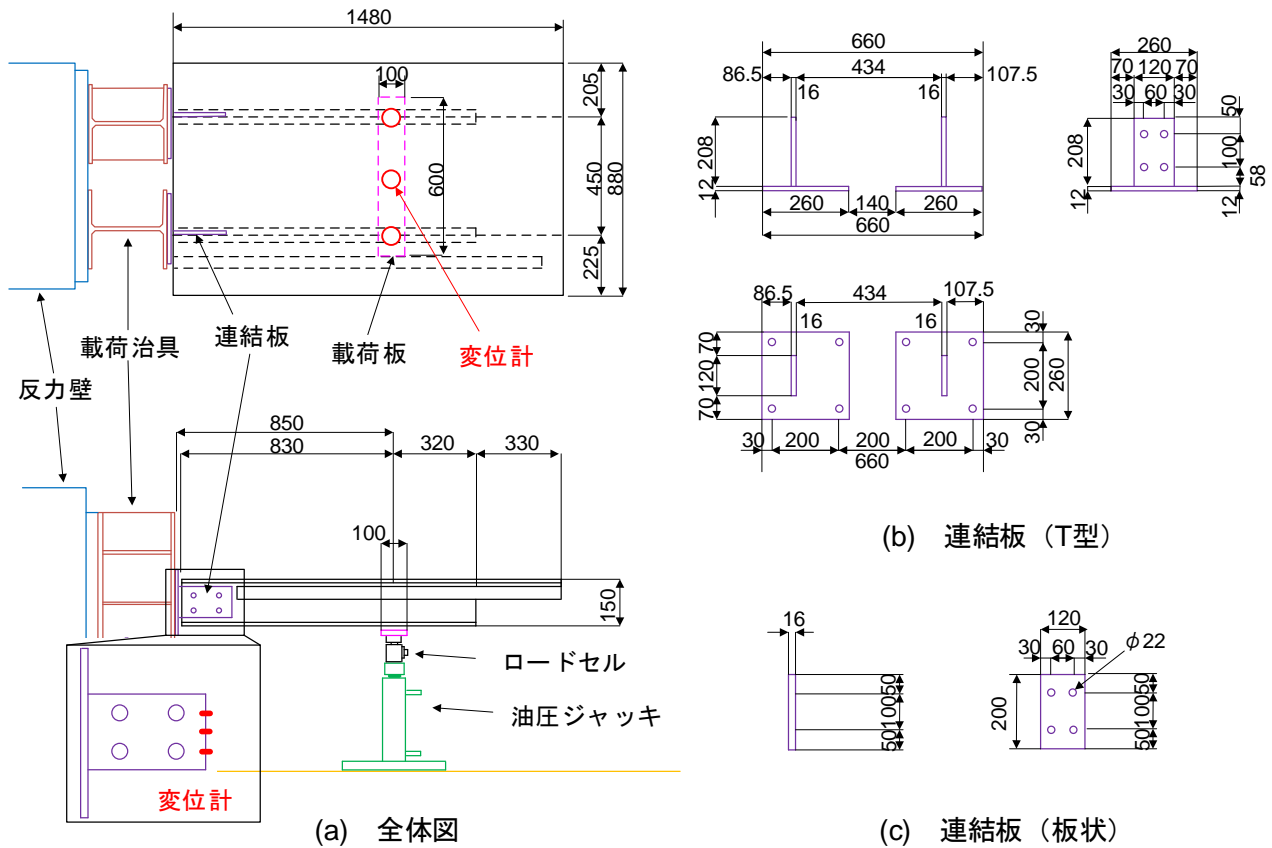


図-2 供試体形状

た、溶融亜鉛めっき材は、表面状態が比較的滑らかであり、摩擦係数を確保するため、りん酸塩処理が行われる。さらに、高力ボルトでGFRP部材を接合する場合、GFRPのクリープ変形により、ボルト軸力が低下する³⁾。これらの表面処理やボルト軸力低下は、高力ボルト摩擦接合継手の継手性能に影響を及ぼすことが明らかになっているが、検討されている実験⁴⁾は、短冊型の試験体レベルに留まっており、実際の壁高欄の摩擦接合部では曲げを受けるため、実物大レベルでの挙動は不明である。

そこで本研究では、実物大のGFRP壁高欄を用いて、接合面の表面処理、導入ボルト軸力をパラメータとした载荷実験を実施し、曲げを受けるGFRP壁高欄の摩擦接合部の継手性能を実験的に明らかにする。

2. 曲げ载荷実験

(1) 供試体概要

図-2に実物大サイズのGFRP壁高欄の実験供試体の寸法・形状を示す。GFRPパネルは、フランジ付きリブを有するπ型断面であり、リブの板厚は5mmとなる。上述のように、実構造における接合構造は、高力ボルト摩

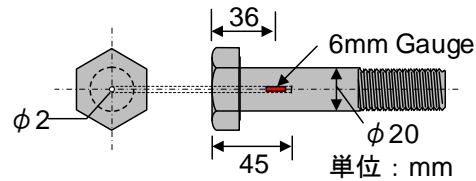


図-3 ゲージボルト

擦接合と引張接合で構成されているが、本実験では曲げを受ける高力ボルト摩擦接合GFRP継手の摩擦挙動に着目するために、鋼板を突き合わせ溶接した構造とした連結板を用いる。

また、GFRPは引抜成形によって製作された部材、連結板は溶融亜鉛めっき処理されたSS400材を使用した。接合面処理は、GFRPは紫外線劣化防止の観点から施されるフッ素樹脂塗装とし、連結板は、溶融亜鉛めっき処理および、刷毛塗りでりん酸塩処理を施したものとした。なお、りん酸塩処理は、溶融亜鉛めっき高力ボルト接合設計施工指針に基づいて行った⁹⁾。

高力ボルト摩擦接合部に使用するボルトは、M20F8Tの溶融亜鉛めっき高力ボルトである。このボルトは、実験中のボルト軸力のモニタリングおよび、締付け時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、ゲージボルト）とした。このゲージボルトは、ボルト中心部に孔をあけ、接着剤でひず



図-4 供試体設置状況（正側載荷）



図-5 載荷位置状況（負側載荷）

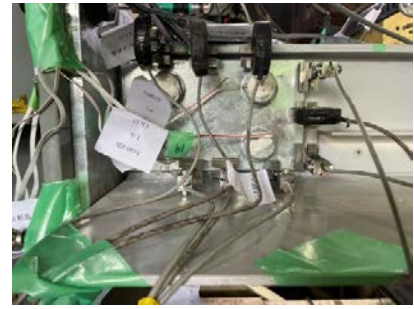


図-6 相対変位計設置状況

みゲージを埋め込むことで作成した。このとき、ひずみゲージの埋め込み位置は、締付総厚の中心となるように設定した。ボルトの校正係数を算出するために、事前にキャリブレーション試験を行い、M20F8T高力ボルト設計ボルト軸力である133kNまでの載荷・除荷を4回繰り返すように実施した。そして、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。

(3) 供試体の組立

供試体の摩擦接合部のボルト締付けは、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ひずみ管理で締付けた。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。なお、ボルトの締付け軸力は、締付時の最大値とした。

また、設計ボルト軸力は、M20F8T高力ボルトの設計ボルト軸力133kNの80%である106.4kNおよび50%である66.5kNとした。導入ボルト軸力はリラクセーションによる軸力低下を考慮して、設計ボルト軸力の1.15倍とした。

(4) 実験ケース

表-1に曲げ載荷実験における実験ケースを示す。本実験での実験パラメータは、連結板の表面処理および導入ボルト軸力、載荷方向である。

表面処理は、連結板のりん酸塩処理の有無として、処理有供試体は2.(1)に示す方法でりん酸塩処理を行う。また、導入ボルト軸力は、過去に著者らの研究グループが実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試験結果より、締付約1年間での軸力低下率が15~18%であるため⁹⁾、この軸力低下を考慮した軸力80%ケースを設定した。また、長期供用においてさらなるボルト軸力低下も予測されるため、その場合を想定して、軸力50%のケースも設定した。さらに、本対象構造は、非対称性を有しているため、平板側（リブ上向きに設置）、リブ側（リブ下向きに設置）のそれぞれ

表-1 試験ケース

ケース	表面処理	導入ボルト軸力	載荷方向
Ax80-ZT	熔融亜鉛めっき	80%	正側
Ax50-ZT	熔融亜鉛めっき	50%	正側
Ax50-PT	りん酸塩処理	50%	正側
Ax80-ZB	熔融亜鉛めっき	80%	負側
Ax50-ZB	熔融亜鉛めっき	50%	負側
Ax50-PB	りん酸塩処理	50%	負側

の方向から載荷を行った。

実験では、以上のパラメータを考慮した計6ケースの実験ケースとした。なお、各ケースの供試体数はそれぞれ1体である。

(5) 載荷実験

リブ上向きに供試体を設置した状況を図-4、図-5に示す。

実験供試体は、図-4に示すように、アンカー部と連結板（T型）を高力ボルトで固定し、片持ち梁となるように設置した。荷重は、供試体下部に設置した油圧ジャッキ（株式会社大阪ジャッキ製作所製T20H15）に接続したロードセル（東京測器研究所製 CLP-100KNB）を介して作用させた。また、載荷にあたり、油圧ジャッキから供試体に荷重が均等に伝わるように載荷板（図-5）を取り付けた。載荷位置は、図-2に示すように、アンカー部の側面から850mmの位置とした。ここで、本稿では、リブを上向きに設置して載荷したケースを正側載荷、反対に設置したケースを負側載荷とする。載荷速度は、0.05kN~0.1kN/sを目安とし、計測間隔は1秒とした。

なお、載荷実験は、実験中のGFRP部材のクリープ変形によるボルト軸力低下を避けるために、ボルト締付けから1週間以上経過後に実施した。リラクセーション期間も軸力の計測は行い、計測間隔は締付け1時間後までを1秒、24時間後までを1分、それ以降は15分とした。

(6) 計測項目

計測項目は、ボルト軸力、載荷荷重、図-2および図-6

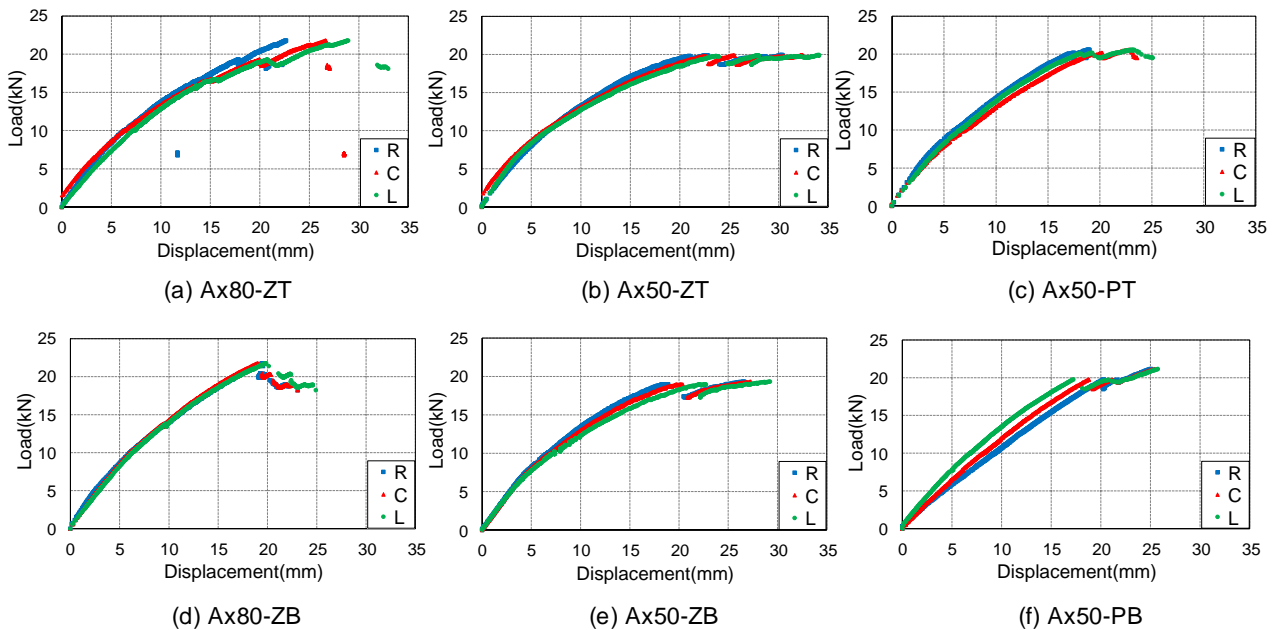


図-8 荷重-全体変位関係

に示す位置での変位である。載荷点の全体変位は高感度変位計（東京測器研究所製：CDP-50），基部接合部の連結板-ウェブ間の相対変位はクリップ式変位計（東京測器研究所製：UB-5，RA-5）を用いて計測した。また，GFRPと連結板との接合部の相対変位計測の設置位置を図-2に示す。

3. 載荷実験結果および考察

(1) 荷重-変位関係

図-7，図-8は，荷重-全体変位関係を示す。全体変位は，2本のリブ位置およびその間の計3点の計測を行った。図-4の手前側のリブをR，奥側のリブをL，リブ間をC（Center）と設定した。また，図-7は全6ケースのリブ間の結果を示している。

まず，図-7より，荷重-変位関係は，荷重増加とともに徐々に緩やかになるとなる非線形挙動を示していることがわかる。そして，荷重が17kN~20kNに到達すると，荷重低下および変位増大することが確認できる。これは，GFRPパネル基部付近のリブ近傍でき裂が発生した影響である。

次に，荷重-変位関係の初期剛性に着目する。5kN付近までの線形回帰より剛性（kN/mm）を算出すると，Ax80-ZTは1.72，Ax50-ZTは1.75，Ax50-PTは1.57，Ax80-ZBは1.70，Ax50-ZBは1.60，Ax50-PBは1.31であったため，概ね同等であるといえる。ただし，Ax50-PBのケースについては，図-8(f)に示すようにR側とL側で変位量が異なっており，載荷時に偏心していたことが予想さ

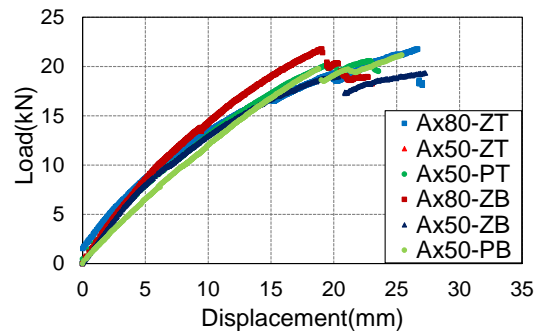


図-7 フランジ中央部の全体変位

れるため，剛性が小さくなったと考えられる。これについては，今後，実験で取得したデータをさらに分析する予定である。

(2) 荷重-相対変位関係

図-9，図-10は，荷重とGFRPリブのウェブ-連結板間の相対変位関係を示す。連結板の2本のボルト位置およびボルト間中心の3点の計測を行い，GFRPリブのフランジ側（Upper），中央（Center），平板のフランジ側（Lower）の結果である。

まず，載荷方向による違いに着目するため，Ax80-ZTとAx80-ZB，Ax50-ZTとAx50-ZB，Ax50-PTとAx50-PBの比較を行う。

正側載荷では，ウェブ面の下側（Lower）で正の変位，上側（Upper）で負の変位が出ていることから，供試体リブ側に圧縮の変形，フランジ側に引張方向の変形が生じていることがわかる。一方，負側載荷では，ウェブ面の下側（Lower）で負の変位，上側（Upper）で正の

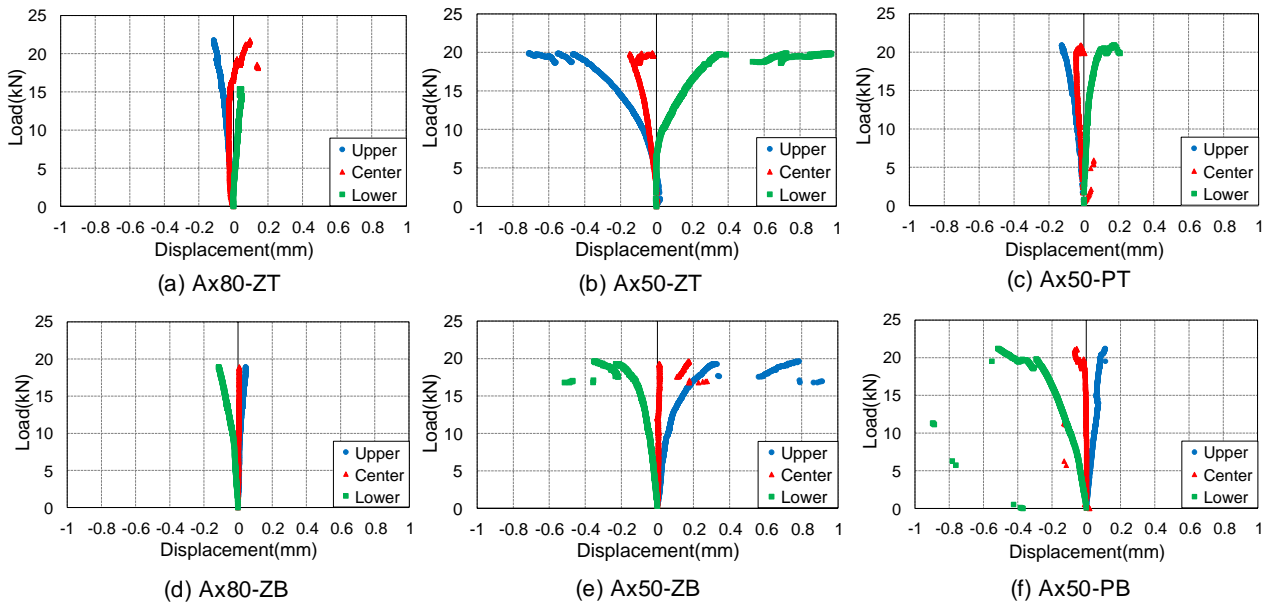


図-9 ウェブ面における荷重-相対変位関係 (R側リブ)

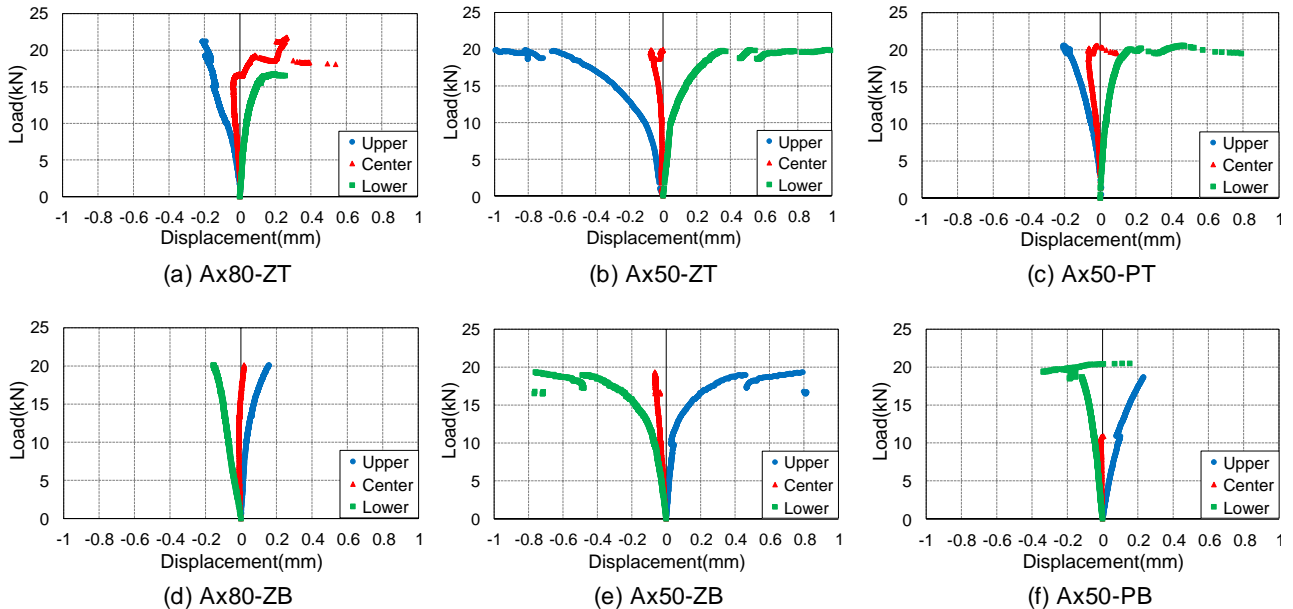


図-10 ウェブ面における荷重-相対変位関係 (L側リブ)

変位が出ており、供試体フランジ側に圧縮の変形、リブ側に引張方向の変形が生じていることがわかる。また、相対変位量は、載荷方向によらず、概ね同等であることが認められるため、GFRPパネルが非対称であっても、継手部の挙動には大きく影響を及ぼさないと考えられる。

以上より、本実験では、水平1方向のみの相対変位の計測ではあるが、作用した曲げ荷重によって、接合構造の挙動としては、回転方向に変位していることがわかる。

次に、軸力の違いに着目するため、Ax80-ZTとAx50-ZT、Ax80-ZBとAx50-ZBの比較を行う。

最大荷重時の相対変位は、軸力80%ケースでは0.2mm程度であるが、軸力50%ケースでは0.4mm~1.0mmであり、相対変位量が大きいために認められる。これは、導入ボルト軸力が小さいため、接合面に加わる面圧も小さくなり、接合部のすべり耐力が低くなったことで、すべりが発生したものと考えられる。これは、既往研究で同面圧になるよう実施した短冊型のGFRP継手のすべり試験において、0.4mm程度ですべりが生じていることから、本実験において接合面内ですべりが発生している可能性が高いと推測できる。

表面処理の違いに着目するため、Ax50-ZTとAx50-PT、Ax50-ZBとAx50-PBの比較を行う。

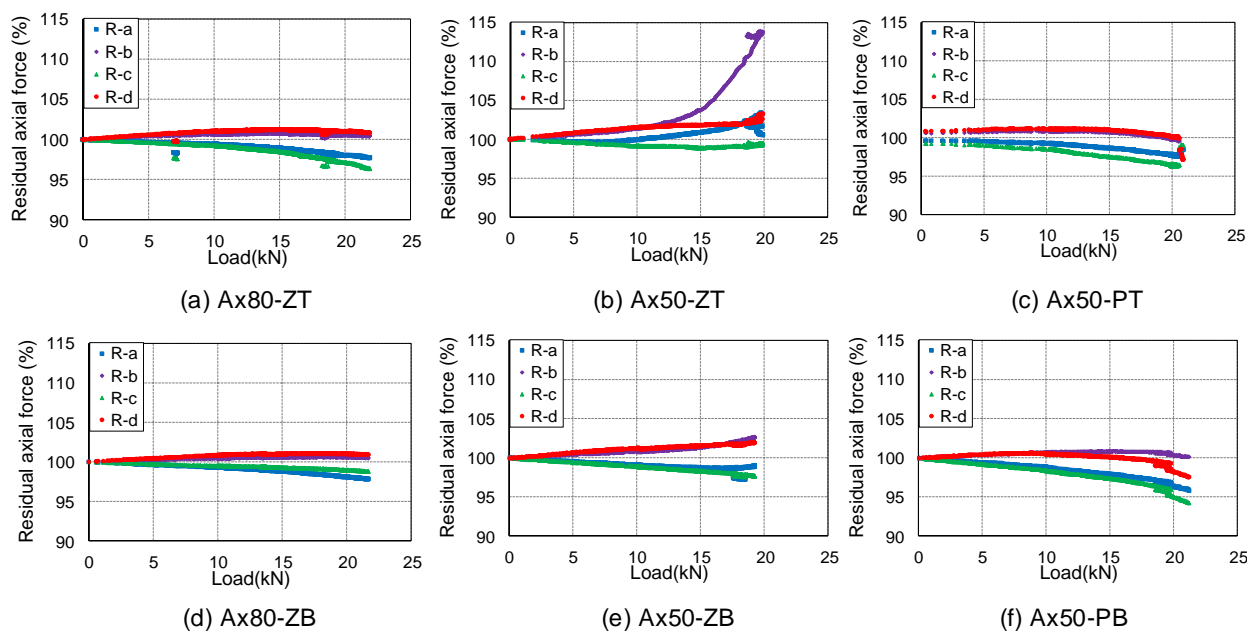


図-11 荷重-ボルト軸力関係 (R側リブ)

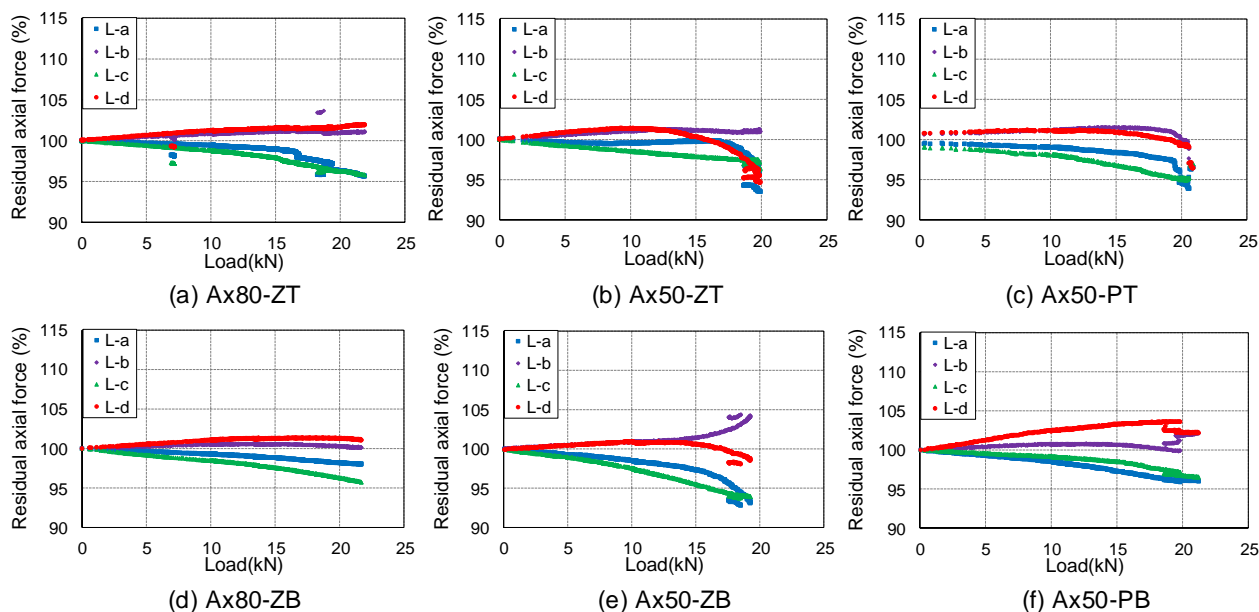


図-12 荷重-ボルト軸力関係 (L側リブ)

りん酸塩処理したケースの最大荷重時の相対変位量は、0.2mm~0.5mmであり、熔融亜鉛めっきのみのケースより小さいことが認められる。これは、りん酸塩処理した場合には、熔融亜鉛めっきと比べて、すべり係数が2倍程度大きくなるため⁴⁾、りん酸塩処理を施したことで接合部のすべり耐力が大きくなったと考えられる。

(3) 荷重-ボルト軸力関係

図-11、図-12は、載荷実験中の荷重-ボルト軸力の関係を示す。なお、ボルトのラベリングは、図-13に示すとおりである。

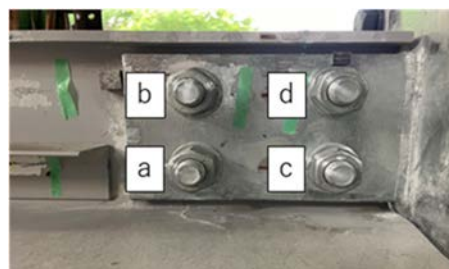


図-13 摩擦接合部のボルトのラベリング

図-11、図-12より、GFRP壁高欄に対して、載荷位置側のボルト (Bolt-a, Bolt-c) は軸力低下、載荷位置と反対側のボルト (Bolt-b, Bolt-d) は軸力増加が認められる。

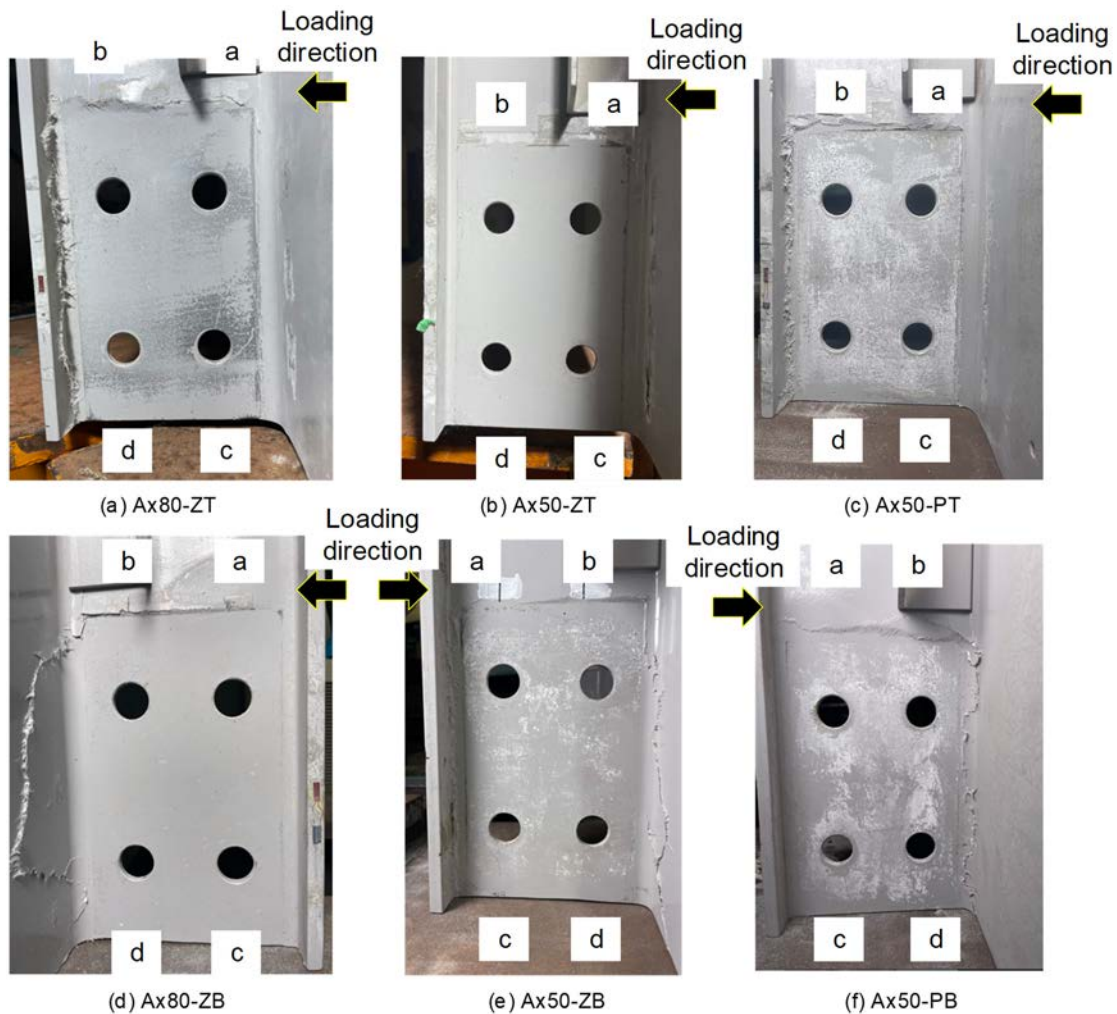


図-14 載荷後供試体状況

これは、載荷点に荷重を受けて、摩擦接合部に曲げ荷重が作用することで、載荷位置側は引張領域、載荷位置と反対側は圧縮領域になるためである。これに起因して、ポアソン効果によって板厚が変動するため、引張領域では板厚減少、圧縮領域では板厚増加したため、ボルト軸力の増減に繋がったと考えられる。

また、相対変位が大きく生じた Ax50-ZT では圧縮領域にある Bolt-d で大きな荷重低下が確認できる。Ax50-ZT は、導入ボルト軸力が小さく、すべり係数が小さい溶融亜鉛めっき処理の供試体であるため、最も接合部のすべり耐力が小さく、接合部のすべりが発生したためであると考えられる。

(4) 載荷後供試体状況

図-14は、載荷後の GFRP リブの摩擦接合部を示す。

実験後の破壊箇所は、平板側フランジとウェブ近傍や、連結板とリブの境界であることがわかる。これは、溝形断面部材となるが、既往の研究^{7,8)}で、GFRP 部材断面内の材料物性値を調査しており、フランジとウェブの隅角部では、繊維材料の配向が複雑になるため、引

張強度や圧縮強度がその他の部位と比べて小さくなることや、隅角部には応力集中するため、これらが起因して、材料が破壊したものと推測する。また、連結板とリブの境界は、GFRP 継手において、連結板に対して母材の GFRP の剛性が低いため、ボルトで締付けた際に、母材に連結板が食い込むため、曲げを受けた際に局所的に応力が集中したものと考えられる。

曲げを受ける接合面内での破壊位置は、Ax50-ZT ケース以外は、圧縮領域側で破壊していることがわかる。また、Ax50-ZT および Ax50-ZB のボルト孔周辺では、拡大すると、すべり痕が確認できたため、この2ケースのみ、接合部のすべり耐力が小さくすべりが発生したと考えられるため、すべりが生じると応力状態が変わるため、破壊モードが変わると考えられる。

本実験で GFRP 壁高欄の終局荷重は、20kN 前後であったが、実際の壁高欄基部の設計断面力は 5.8kN であるため、本構造は設計断面力に対して約 3.4 倍の耐力を有していることがわかった。また、すべりが発生したと考えられる Ax50-ZT および Ax50-ZB でも終局耐力は同程度であるため、摩擦接合部のすべりが GFRP 壁高欄の摩擦

接合部の耐荷力に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、すべりを許容の有無によって、破壊モードが変わるため、橋梁付属物に適した継手設計の検討を実施する予定である。

4. まとめ

本研究では、実物大のGFRP壁高欄を用いて、接合面の表面処理、導入ボルト軸力をパラメータとした载荷実験を実施し、曲げを受けるGFRP壁高欄の摩擦接合部の継手性能を実験的に検討した。その結果を以下に示す。

- 1) 導入ボルト軸力を設計ボルト軸力の50%にすると、接合部のすべり耐力が小さくなるため、接合部の変形が大きくなる、また、すべり発生による実験中のボルト軸力低下も確認できた。
- 2) 接合面の表面処理にすべり係数を高くするりん酸塩処理を施すことで、接合部のすべり耐力が大きくなり、接合部の変形を抑えることができることがわかった。
- 3) 導入ボルト軸力を50%、接合面の表面処理を溶融亜鉛めっきしたケースでは、正側载荷、負側载荷ともに、実験後の供試体のボルト孔周辺ですべり痕が確認できたため、すべりが発生していると考えられる。
- 4) GFRP壁高欄の摩擦接合部は、設計断面力の約3.4倍の耐荷力を有していることがわかった。また、すべりが発生しても、終局耐力は同程度であるため、摩擦接合部のすべりが耐荷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) 岩館佑樹, 武田三弘, 皆川翔平: コンクリート製壁高欄の塩化物イオンの吸い上げ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, 2019.
- 2) 久保圭吾, 永見研二, 山口 浩平, 日野伸一, 稲葉尚文, 青木卓也: 道路橋検査路用FRP製ブラケットの静的耐荷性能と試験施工, 第4回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2012.
- 3) 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.
- 4) 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海: 溶融亜鉛めっき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, Vol.79, No.14, 22-14003, 2023.
- 5) 溶融亜鉛めっき高力ボルト技術協会: 溶融亜鉛めっき高力ボルト接合設計施工指針, 2020.
- 6) 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継手の長期リラクセーション特性, 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2022.
- 7) 林巖, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 西崎到, 北根安雄: 土木構造物用GFRP溝型材の引張特性における統計的評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 75, No. 3, pp.293-304, 2019.
- 8) 林巖, 北根安雄, 五井良直, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 西崎到: 溝形GFRP材の材料特性のばらつきを考慮した圧縮・曲げ性能評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 76, No. 1, pp.110-125, 2020.

(Received August 25, 2023)

BENDING EXPERIMENTS ON BASE JOINTS OF FULL-SCALE GFRP WALL BALUSTRADES

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

Aging of bridges and bridge attachments such as wall balustrades has become a problem, and wall balustrades made of GFRP, which is lightweight and highly corrosion resistant, are being used from the viewpoint of maintenance and workability. The structure of the base of the GFRP wall railing is composed of bent steel plates and high-strength bolts, and the surface is hot-dip galvanized. However, there is a concern that the bolt axial force may decrease due to creep deformation of the GFRP member. In this study, a loading experiment was conducted on a full-scale wall balustrade in order to clarify the structural performance of the GFRP wall balustrade base under reduced bolt axial force. As a result, it was confirmed that the decrease in bolt axial force due to the presence or absence of phosphate treatment on the friction joint surface and the creep deformation of the GFRP member had no effect on the base of the GFRP wall railing.