

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：24405

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14234

研究課題名（和文）構造システム挙動を考慮したFRP壁高欄における接合構造の合理化

研究課題名（英文）Rationalization of Joint Structure in FRP Bridge Barriers Considering Structural System Behavior

研究代表者

林 巖（HAYASHI, Gen）

大阪公立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10869530

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、GFRP壁高欄の接合構造の合理化を目標として、高力ボルト摩擦接合GFRP継手に関する研究を実施した。その結果、短冊形の継手実験において、連結板の亜鉛めっき処理や母材のフッ素樹脂塗装などの接合面処理がすべり耐力に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。再現解析では、せん断弾性係数のばらつきはすべり挙動に及ぼす影響が大きいことがわかった。また、実大GFRP壁高欄基部の曲げ実験では、摩擦挙動や破壊モードを確認して、初期剛性や応力分布を定量的に評価した。さらに、長期リラクゼーション試験では、亜鉛めっき鋼板と繊維体積含有率がボルト軸力に及ぼす影響を評価し、ボルト軸力の低下予測式を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は施工性や維持管理性の優れた実務上の要請に応え得る橋梁付属物の設計の一助となる検討である。構造材料としてFRPを用いることで重機を使用せずとも施工可能となることで施工性を良くし、従来の構造材料では実現できない高耐久性の橋梁付属物であるからである。また、本研究の試みたFRP部材の接合部における高力ボルト摩擦接合は、有効性が高く、今後、大型土木構造物への波及効果も期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, research on high-strength bolted frictional GFRP joints was conducted with the goal of rationalizing the joint structure of GFRP bridge barriers. The results showed that joint surface treatments, such as galvanizing the connecting plate and fluororesin coating the base metal, significantly affected the slipping capacity in the slip joint experiments. Reproduction analysis indicated that the variation of the shear modulus had a significant effect on the slipping behavior. Bending experiments at the base of full-scale GFRP bridge barriers confirmed the frictional behavior and failure modes, quantitatively evaluating the initial stiffness and stress distribution. Furthermore, the effects of galvanized steel and fiber volume content on bolt axial force were evaluated in long-term relaxation tests, leading to the proposal of a prediction equation for the reduction of bolt axial force.

研究分野：複合材料，接合構造，橋梁工学

キーワード：複合材料 高力ボルト摩擦接合 引張接合 長期リラクゼーション特性

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高架橋に用いられる壁高欄には、現場打コンクリートやプレキャストコンクリート、コンクリートブロックが用いられているが、これらは死荷重が大きくなるため耐震性が懸念され、施工時は大型の重機が必要となり交通規制が必要となるため軽量化が望まれている。また、道路路面に散布される凍結防止剤や沿岸地域での飛来塩分による塩害や凍害などの環境作用が、内部鉄筋の腐食やコンクリートのひび割れを発生させ、かぶりコンクリートの剥落による第3者被害も懸念されることから、長期に渡る供用に耐えうる高耐久性の壁高欄の開発が望まれる。

このような背景から軽量・高耐食性を有する Fiber Reinforced Polymer (以下、FRP) を用いた土木構造物が近年増加しており、壁高欄についても FRP を用いた製品が開発されている。一般的に、これらの構造物は、鋼部材と同様に高力ボルトを用いた摩擦接合が用いられることもあるが、FRP 部材同士の接合であると、FRP の粘弾性挙動によりボルトの軸力抜けが懸念されている。そのため、それを防ぐために FRP 部材を挟むように接合部の連結板には鋼板を介した構造となるが、FRP-鋼の異種材料の接合となるため、接合部の力学的挙動が複雑となる。また、FRP 壁高欄の基部は地表との接合する必要があり、接合部が設けられているおり、そこには L 字の鋼材が用いられているが、それに適した鋼部材が規格品として製造されていないため、厚板鋼板を曲げ加工して製作し使用されている。この部材は、厚板の曲げ加工により湾曲部の曲率が大きくなるため、接合部に密着できない箇所を有するため、継手性能が十分に発揮できず、また、塑性加工の影響を有するため、終局挙動にどのような影響を及ぼすのか解明できていない。

2. 研究の目的

研究では、FRP 構造物を汎用的に使用するための接合構造の検討を行う。このとき、施工性をより良くするために、重量が大きい鋼部材を極力減らすことを目指し、より合理的な FRP 壁高欄とするためにシステム全体の挙動から FRP-鋼の接合構造を提案する。接合部における接合面処理、板厚構成、ボルト配置などの諸条件の最適化を図ることで、鋼部材の曲げ加工部材の曲率や板厚を減少させ、結果として、FRP-鋼部材の接合部に適した接合構造を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、目的達成のために、下記に示す課題について、載荷試験および有限要素解析を行った。

✓ 接合部のディテールや材料ばらつきが異種材料を用いた接合構造に及ぼす影響の解明

表面処理性状やボルト孔径などの継手諸元が GFRP 継手の力学的挙動に及ぼす影響をパラメトリックな数値解析を行うことで解明し、解析的な検討によって、より合理的な継手構造を提案する。そして、提案した継手構造に対して、粗さ試験、短冊形継手の引張試験を実施し、解析の妥当性及び摩擦挙動のメカニズムを解明する。また、FRP は材料物性値にばらつきを有するため、継手挙動に及ぼす影響を解析的に検討する。

✓ 壁高欄全体挙動の把握と接合構造の合理化

曲げを受ける実大スケールの GFRP 壁高欄に対して、接合部のボルト配置や接合面処理、ボルト軸力の影響を検討するために、実大載荷実験および数値解析を実施する。また、1 軸方向に載荷される短冊形継手と、曲げを受ける継手接合部の挙動の違いについて考察を行う。

✓ 長期供用に伴う構造性能の把握

高力ボルト摩擦接合を用いた FRP 継手接合部では、FRP の粘弾性挙動によるボルトの軸力抜けを抑制するために連結板に鋼材が用いられているが、その影響について検討された事例は少ない。そのため、長期供用を想定して、母材・連結板の材質や表面処理、導入軸力など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、軸力低下予測式を提案する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下に示す。

✓ 接合部のディテールや材料ばらつきが異種材料を用いた接合構造に及ぼす影響の解明

まず、防食性能を向上させるために熔融亜鉛めっき処理した連結板を有する高力ボルト摩擦接合 GFRP 継手の接合条件がすべり挙動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、連結板および母材の表面処理、ボルト軸力、ボルト孔径である。すべり実験の結果、りん酸塩処理によって熔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。また、接触圧試験とすべり面観察から、母材の表面処理に GFRP より柔らかい素材の塗料を用いることで、母材-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。

また、材料特性のばらつきの統計的評価と、そのばらつきが継手挙動に及ぼす影響を検討するために、直交異方性モデルを用いた高力ボルト摩擦 GFRP 継手のモデルを構築し、引張解析を実施した。その結果、まず、材料試験から得た材料物性値を用いると、初期荷重-相対変位関係は実験結果と概ね一致するが、荷重増加とともに曲線の乖離が大きくなることを確認した。また、材料物性値のばらつきを考慮するために、材料試験結果に対して統計的評価し、そのばらつきを継手解析に導入して引張解析すると、ポアソン比は、どの方向においてもすべり挙動に大きな影響を与えないことがわかった。そして、すべり挙動に最も影響を与える材料特性は、板厚方向のせん断弾性係数であることを明らかにした。

✓ 壁高欄全体挙動の把握と接合構造の合理化

GFRP 壁高欄基部の接合構造を対象として、接合面処理や、基部のスロット孔内のボルト配置が、接合部の剛性や基部の L 型連結部材の応力性状に及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、L 型部材は、曲げを受けると、载荷位置に近い位置で高い応力が発生して切り欠き部分から降伏が発生することがわかった。また、初期剛性は、正側载荷より負側载荷の方が、基部のボルト配置は外側より内側の方が高くなることがわかった。さらに、引張接合部のボルト軸力は、L 型部材の非対称性から载荷方向で中立軸位置が異なり、正側载荷では全ボルトが引張領域となるため、均等に増加する。一方、負側载荷では不均等に増加することがわかった。

その後、GFRP 壁高欄基部の高力ボルト摩擦接合部を対象に、作用面圧や表面処理の違いが GFRP 壁高欄基部の摩擦挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実物大 GFRP 壁高欄を用いた曲げ载荷実験を行った。その結果、摩擦接合面のりん酸塩処理の有無、作用面圧によって、摩擦挙動は変わるものの、GFRP 材料の強度によって終局耐力が決定するため、設定した継手パラメータが曲げ耐力に及ぼす影響は小さいことがわかった。

✓ 長期供用に伴う構造性能の把握

溶融亜鉛めっきを施した連結板を用いた GFRP 継手の長期リラクゼーション特性を明らかにすることを目的として、長期リラクゼーション試験を行った。実験パラメータは、GFRP の表面処理の有無、導入ボルト軸力、溶融亜鉛めっき処理の有無、連結板の表面処理、GFRP の母材厚、繊維体積含有率などの接合条件や材料物性値である。接合面の素地調整として行われている亜鉛めっき鋼板のりん酸塩処理は、GFRP 継手のリラクゼーション特性にほとんど影響しないことがわかった。また、溶融亜鉛めっき鋼板や繊維体積含有率の低い GFRP を用いることで、ボルト軸力の低下は大きくなることがわかった。さらに、1ヶ月以上のリラクゼーション特性のデータから長期のボルト軸力を推定できる可能性が高いことを明らかにした。供用期間を 30 年とした場合、予想されるボルト軸力の減少は、初期締め付け値の 70%であることを確認した。本研究では、溶融亜鉛めっきボルトを用いており、その締結方法はナット回転角法であるため、設計ボルト軸力を下回る可能性は低いことを明らかにした。それ故、GFRP 部材の接合部への高力ボルト摩擦接合の適用は高いと言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 関本 将貴, 林 巖, 山口 隆司, 土生川 季永, 久保 圭吾, 酒井 圭一	4. 巻 14
2. 論文標題 曲げを受けるGFRP壁高欄基部接合部の構造性能に関する検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-14003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-14003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 林 巖, 関本 将貴, 山口 隆司, 久保 圭吾, 酒井 圭一, 青木 海	4. 巻 14
2. 論文標題 実大GFRP壁高欄基部高力ボルト摩擦接合部の曲げ挙動に関する実験的研究	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-14005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-14005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaki Sekimoto, Gen Hayashi, Takashi Yamaguchi, Keigo Kubo	4. 巻 6(5)
2. 論文標題 Performance of Joint Structure of Bent L Shaped Steel Members for GFRP Wall Railings	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ce/papers	6. 最初と最後の頁 1446-1454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cepa.2051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海	4. 巻 13
2. 論文標題 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挙動に及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 (In press)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sekimoto Masaki, Hayashi Gen, Yamaguchi Takashi, Sakai Keiichi, Aoki Kai, Kubo Keigo	4. 巻 -
2. 論文標題 Slipping Behavior and Relaxation Characteristics of Thin-Walled GFRP High-Strength Bolted Friction Joints for Sound Barriers on Bridge Viaducts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IABSE Congress Nanjing 2022	6. 最初と最後の頁 490-497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2749/nanjing.2022.0490	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 関本将貴, 林 巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海
2. 発表標題 GFRP壁高欄基部接合部のボルト配置が曲げ性能に及ぼす影響
3. 学会等名 第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井圭一, 林 巖, 関本将貴, 山口隆司, 青木海, 久保圭吾
2. 発表標題 実大GFRP壁高欄基部接合部の曲げ載荷実験
3. 学会等名 第15回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Gen HAYASHI
2. 発表標題 Slipping behavior and relaxation characteristics of thin-walled GFRP high-strength bolted friction joints
3. 学会等名 13th Taiwan-Japan Workshop on Structural and Bridge Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本将貴, 林 巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一
2. 発表標題 曲げを受ける GFRP 壁高欄基部高力ボルト摩擦接合部の基部設計に関する検討
3. 学会等名 令和6年度 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 林 巖, 関本将貴, 山口隆司, 久保圭吾
2. 発表標題 土木構造物に用いるGFRP部材の高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究
3. 学会等名 第48回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本将貴, 林 巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木海, 林 巖, 関本将貴, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井圭一, 久保圭吾, 青木海, 林巖, 山口隆司, 関本将貴
2. 発表標題 高力ボルトGFRP摩擦接合の長期リラクゼーション特性
3. 学会等名 令和5年度 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海
2. 発表標題 基部のボルト配置がGFRP壁高欄基部の構造性能に及ぼす影響
3. 学会等名 令和5年度 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海
2. 発表標題 薄板GFRPを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動
3. 学会等名 令和4年度 土木学会関西支部年次学術講演会, 2022.6.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関本将貴, 林巖, 山口隆司, 久保圭吾, 酒井圭一, 青木海
2. 発表標題 断面観察による高力ボルト摩擦接合GFRP継手の表面塗装がすべり耐力に及ぼす影響評価
3. 学会等名 令和4年度 土木学会年次学術講演会, 2022.9.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木海, 久保圭吾, 酒井圭一, 山口隆司, 林巖, 関本将貴
2. 発表標題 GFRP摩擦接合における高力ボルトのリラクゼーション特性
3. 学会等名 令和4年度 土木学会年次学術講演会, 2022.9.
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関