

(52) 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

関本 将貴¹・林 巖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 大阪公立大学大学院助教 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 大阪公立大学大学院教授 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式会社 技術開発部（〒550-0001 大阪市西区土佐堀 1-4-11）

E-mail: kubo.keigo@miyaji-eng.co.jp

⁵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 1-4-11）

E-mail: sakai.keiichi@miyaji-eng.co.jp

⁶正会員 宮地エンジニアリング株式会社 計画部（〒102-0006 東京都中央区日本橋富沢町 9-19）

E-mail: aoki.kai@miyaji-eng.co.jp

GFRP(ガラス繊維強化ポリマー)は、軽量、高耐食性という優れた材料特性を有するため、土木構造物への適用が進められている。本研究では、GFRP 壁高欄基部の接合構造を対象として、基部のスロット孔内のボルト配置や荷重条件が接合部の剛性や基部の応力性状に及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、曲げ荷重を受けると荷重に近いボルト位置で高い応力が発生し、切欠き部分から降伏が発生すること。初期剛性は、正側荷重より負側荷重の方が、ボルト配置は内側より外側の方が小さくなることがわかった。引張接合部のボルト軸力は、L型部材が非対称であることから荷重条件により中立軸位置が異なるため、すべてのボルトが引張領域にある正側荷重では、比較的均等に増加するが、負側荷重では不均等になる。

Key Words: GFRP wall railing, L-shaped member, bolt arrangement, bolt tension

1. はじめに

長期供用すると、橋梁の老朽化に伴い、壁高欄や検査路などの付属物も劣化するため、維持管理性に優れた構造が重要となる。現在、橋梁付属物は、取替えが前提の設計となっているが、従来使用される鋼・コンクリートは、重量が大きく腐食劣化が問題となることがあるため、施工性・耐久性に優れた材料・構造の使用が望まれる。このような背景の中、軽量かつ高耐食性を有するガラス繊維強化ポリマー（Glass Fiber Reinforced Polymer: GFRP）材を用いた GFRP 壁高欄が考案された。

これまでの研究で、GFRP 壁高欄の接合構造として、GFRP 部材で製作された壁高欄本体を、基部に埋め込み一体架設する構造¹⁾²⁾や、鋼アングル材を用いた連結板を介して、地覆にアンカーボルトで固定する半剛接合構造³⁾⁴⁾が提案されている。一体架設の場合、腐食劣化の要因となる連結板がないため、長期間の供用に適している。一方、プレキャスト床板のような工場製作された上部工への設置が困難となるため、施工性の観点からボルトによる機械的接合が望ましい。また、連結

板に使用するアングル材に型鋼を使用した場合、施工条件が適さない場所には設置困難となるため、任意の設計が可能となる曲げ加工 L 型鋼部材（以下、L 型部材）の使用が望まれる。

半剛接合に関しては、建築分野の鋼アングル材を用いた、柱-梁間の接合構造についての研究が多くされている。

笠井ら⁵⁾、李ら⁶⁾は、鋼アングル材を用いた半剛接合を有する試験体に対して荷重実験を実施し、柱側のボルト配置が接合部の最大耐力および最大変形能力に大きく影響を及ぼすことを示している。また、田沼ら⁷⁾は、アングルを用いた柱梁接合部に関する実験を実施し、接合部の初期剛性および変形能力は主として、アングルのボルト配置による影響を受けることを明らかにした。さらに、接合部の最大耐力は、アングルが塑性化し、曲げ変形が卓越することにより、軸力の影響による強度上昇を考慮する必要があることを示した。Zhang ら⁸⁾は、アングル材を用いた柱梁接合部において柱側ボルトピッチの増加に伴い、接合部の変形能力が低下し、接合部の初期剛性が低下することを実験的に明らか

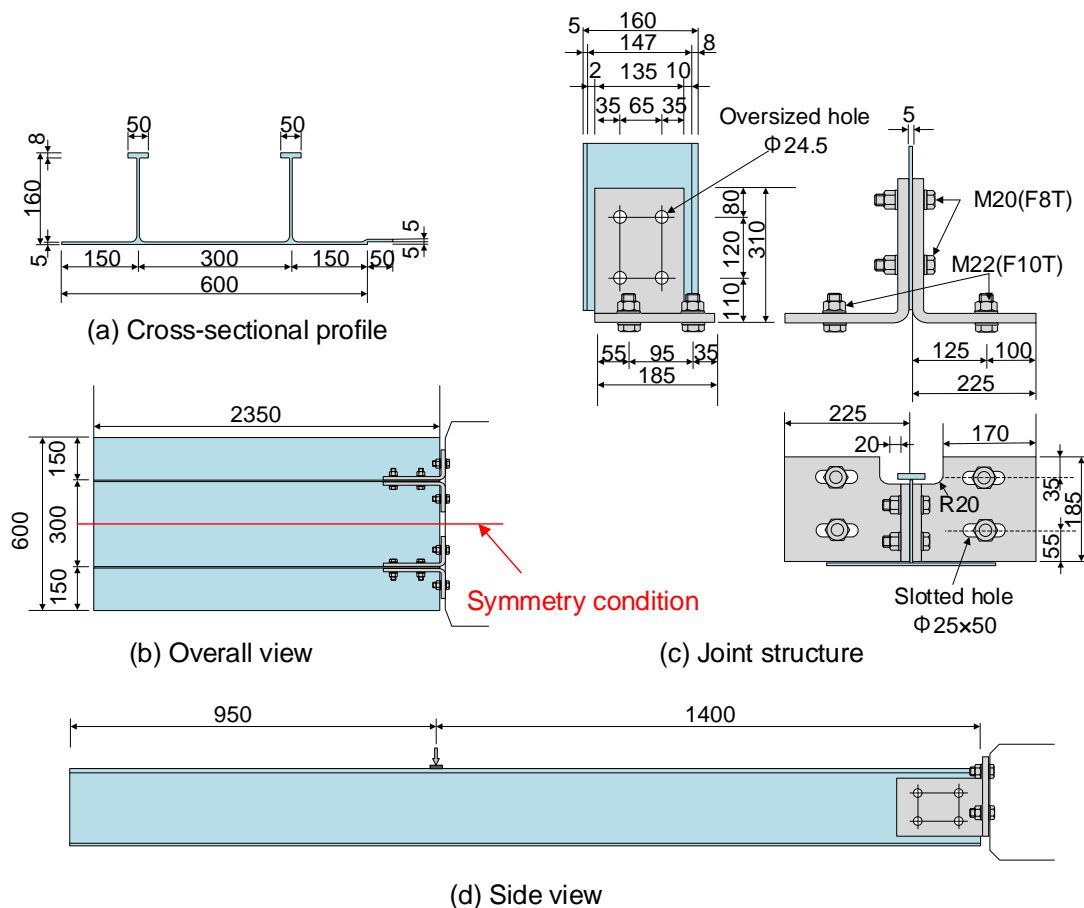


図-1 対象とする GFRP 壁高欄

にした。Song ら⁹⁾は柱梁接合部の耐倒壊性を解析的に検討し、ウェブアングルの板厚は接合部耐力にほとんど影響を及ぼさないこと、引張接合部のボルトとウェブ間の距離が小さくなると接合部耐力が向上することを明らかにした。

また、笠井ら⁵⁾は、柱側ボルトの導入ボルト軸力を小さくすることで、柱側ボルトと柱間ですべりが発生することにより、ピンチング現象が生じることを明らかにした。

これらの研究より、L型部材の接合部耐力には、L型部材のボルト配置の検討および導入ボルト軸力の影響の検討が重要であることが示されている。しかしながら、現状では、橋梁付属物の接合構造に使用する際のL型部材の設計指針は、確立されていない。また、梁側の接合部のすべりに関する検討は行われていない。

そこで本研究では、GFRP 壁高欄の基部接合部を対象として、基部のボルト配置や荷重条件等が接合部の剛性や基部の応力性状に及ぼす影響を解析的に検討する。

2. 対象構造物

図-1 に、対象とする GFRP 壁高欄の全体図および接

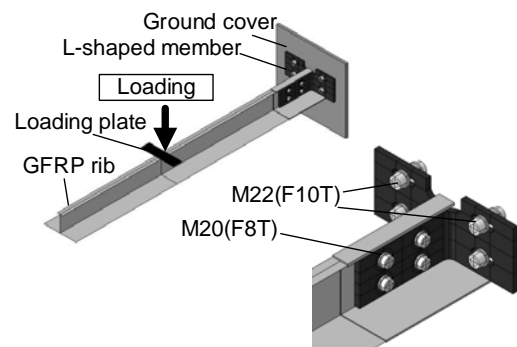


図-2 解析モデル

合構造を示す。

GFRP 壁高欄は、フランジ付きリブを有するπ型断面の GFRP 部材と、連結板・基部構造に用いる L 型部材で構成されている。GFRP 部材と L 型部材は高力ボルトを用いて摩擦接合により接合されており、この L 型部材と地覆コンクリートはアンカーボルトで引張接合で接合される。また、図-1(c) に示すように、L 型部材の地覆側の構造は非対称とした。これはアンカーボルトと地覆部に発生する応力を低減させるためである。GFRP は引抜成形によって製作されたものを使用しており、リブの板厚は 5mm である。L 型部材の板厚は 16mm と

表-1 解析で与えた摩擦係数

Boundary surface	Coefficient of friction
Ground cover - L-shaped member	0.5
Bolt axis - Bolt hole wall	0.2
GFRP rib - L-shaped member	0.2
Ground cover - Washer	0.2
L-shaped member - Washer	0.2

表-2 材料物性値

Members	Material	Young's Modulus E(MPa)	Poisson's Ratio ν	Yield Stress (MPa)
L-shaped member	SS400	200,000	0.30	235
Ground cover				
Bolt	F8T	200,000	0.30	640
	F10T	200,000	0.30	900
Rib	GFRP	34,200	0.25	N.A.

した。

GFRP 壁高欄を設置する際は、図-1(a) に示す π 型 GFRP のフランジの端部に設けているラップ部を重ね合わせることで、隙間が生じないように設置する。本構造は、風荷重によって基部に生じる曲げモーメントに対して、抵抗できるようにアンカーボルトを配置する。アンカーボルト部のボルト孔は現場施工性を考慮してスロット孔とした。

3. 解析モデルおよび解析ケース

(1) 解析モデル

GFRP 壁高欄のモデル化対象は図-1(b) に示す範囲であり、フランジの板幅方向の対称性を考慮して 1/2 モデルとして、解析モデルは図-2 に示す。また、解析モデルを作成するにあたって、実構造物の基部構造にはアンカーボルトを使用しているが、本解析モデルでは事前検討でアンカーボルトが壁高欄基部構造の挙動に大きな影響を与えなかったため、簡略化のため高力ボルトでモデル化を行った。

解析に用いた使用要素について、L 型部材、高力ボルト、座金、載荷板、地覆は、8 節点低減積分ソリッド要素、GFRP リブは 4 節点低減積分シェル要素を用いた。要素分割は、L 型部材は板厚方向に 4 分割になるよう

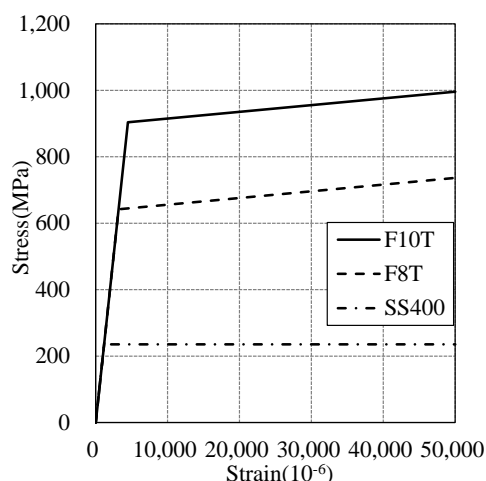


図-3 応力-ひずみ関係

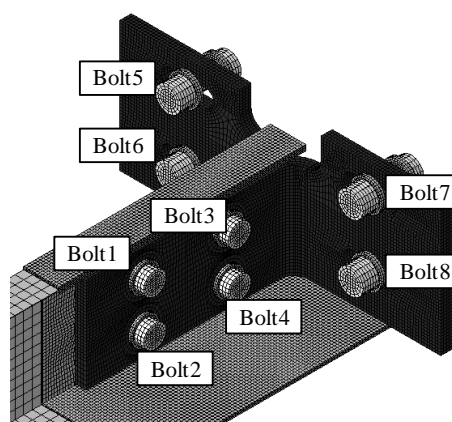


図-4 各ボルトのラベリング

に、高力ボルトでは 1 辺 4mm 程度、載荷板および地覆では 1 辺 10mm 程度に、GFRP リブの先端は 1 辺の長さ 12.5mm 程度を目安に分割し、基部構造については作用応力を的確に再現するため、8 節点低減積分ソリッド要素を用いて、要素は 1 辺 4mm 程度を目安に分割した。

境界条件は、地覆部の端部を完全固定とした。また、GFRP リブのソリッド要素とシェル要素の境界にはカップリング拘束を与えて結合した。接触には、等方性クーロン摩擦モデルによって摩擦係数を付与した。

解析に与えた摩擦係数一覧を表-1 に示す。地覆部-L 型部材間は 0.5、ボルト軸部-ボルト孔壁間、GFRP リブ-L 型部材間、地覆部-座金間、L 型部材-座金間は 0.2 とした。GFRP リブと L 型部材間の接合面処理は、実構造を想定して、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、L 型部材は腐食環境が厳しくない箇所に適用される溶融亜鉛めっき処理とした。

表-2、図-3 は構成部材の鋼種および解析に用いた材料物性値と応力-ひずみ関係を示す。L 型部材には SS400 材を用い、構成則は JIS で定められている公称値を参考¹⁰⁾に完全弾塑性型¹¹⁾とした。GFRP リブ側の高力ボルトは M20 (F8T)、アンカーボルトは M22 (F10T) を用

表-3 解析ケース

Case	Bolt Tension	Bend radius R(mm)	Bolt arrangement		Direction of loading
			Bolt 5 Bolt 7	Bolt 6 Bolt 8	
Ax100-R20-CC-P(1)	100%	20	Center	Center	Positive
Ax100-R20-II-P(2)	100%	20	Inside	Inside	Positive
Ax100-R20-OO-P(3)	100%	20	Outside	Outside	Positive
Ax100-R20-IO-P(4)	100%	20	Inside	Outside	Positive
Ax100-R20-OI-P(5)	100%	20	Outside	Inside	Positive
Ax100-R40-CC-P(6)	100%	40	Center	Center	Positive
Ax50-R20-CC-P(7)	50%	20	Center	Center	Positive
Ax100-R20-CC-N(8)	100%	20	Center	Center	Negative
Ax100-R20-II-N(9)	100%	20	Inside	Inside	Negative
Ax100-R20-OO-N(10)	100%	20	Outside	Outside	Negative
Ax100-R20-IO-N(11)	100%	20	Inside	Outside	Negative
Ax100-R20-OI-N(12)	100%	20	Outside	Inside	Negative
Ax100-R40-CC-N(13)	100%	40	Center	Center	Negative
Ax50-R20-CC-N(14)	50%	20	Center	Center	Negative

い、構成則は公称値¹²⁾を参考に加工硬化係数がE/100のバイリニア型¹¹⁾とした。また、GFRPは引抜成形材を用いており、本来は異方性材料として、方向に応じて材料物性値が異なることを考慮する必要がある。しかしながら、本研究では荷重条件の影響やスロット孔内のアンカーボルトのボルト配置が壁高欄基部の接合構造に及ぼす影響を定性的に把握するために、GFRPを引抜方向の引張弾性係数をもとに等方性材料として扱った。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-3に示す。解析ケース名は、左から順に、高力ボルト摩擦接合部の導入ボルト軸力、L型部材の曲げ加工半径、引張接合部のスロット孔内のボルト配置(I: Inside, C: Center, O: Outside)、荷重条件(P: Positive, N: Negative)とした。導入ボルト軸力は、締付後のリラクゼーションによる軸力低下がGFRP壁高欄の接合部特性に及ぼす影響を検討するため、50%のケースを設定した。曲げ加工半径は、現在適用が想定されているR20mmを基準とし、その2倍であるR40mmのケースを設定した。スロット孔内のボルト配置は、施工誤差の影響を確認するために設定した。

また、図-4に示すように、ボルトにラベリングして、スロット孔内でGFRPリブ寄りに配置した場合を内側として、内側、中央、外側にそれぞれ配置したケース、Bolt5とBolt7を内側、Bolt6とBolt8を外側に配置したケース、Bolt5とBolt7を外側、Bolt6とBolt8を内側に配置したケースの計5ケースとした。荷重条件は、風荷重を考慮して、図-2に示す荷重方向を正側荷重として、その逆方向である負側荷重のケースの2ケースを設定した。

(3) 解析手法

解析は、Step-1でボルトに初期軸力を導入し、Step-2で壁高欄上の載荷板に強制変位による荷重を作用させた。この際、GFRPリブ側のボルト軸力はM20(F8T)の設計ボルト軸力である133kNを100%、地覆側のアンカーボルトは、解析の収束性の観点から0.1kNとした。

4. 解析結果および考察

(1) 荷重 - 変位関係

荷重 - 変位関係を図-5に、荷重 - 変位関係から算出した初期剛性を表-4に示す。図-5において、荷重はGFRPリブと接触している載荷板に作用する鉛直方向の反力の総和とした。変位は載荷板に与えた強制変位量である。図中の直線は、GFRP壁高欄の設計荷重(3.55kN)と基部接合部の設計曲げ耐力(8.15kN)である。本構造の設計荷重は、風荷重(3kN/m²)により生じる基部の曲げモーメント(4.97kN・m)から算出した。基部接合部の設計曲げ耐力は、SS400材の降伏点(235MPa)を用いて算出した。また、設計荷重および設計曲げ耐力は、簡略化のため、本構造を初頭梁理論における片持ち梁モデルと仮定して算出を行った。表-4の初期剛性は、荷重 - 変位関係において、0-5kNの範囲の傾きを最小二乗法を用いて算出した。

図-5より、全てのケースにおいて、荷重15kN程度を境界に、線形性が失われ、変位の増分量が大きくなっている。この時点で、L型部材のR部が降伏応力に達しており、その後は、荷重増加に伴い降伏範囲が進展したため、抵抗力が小さくなり、傾きが小さくなったと考えられる。本構造では、線形性が失われる荷重(15kN)

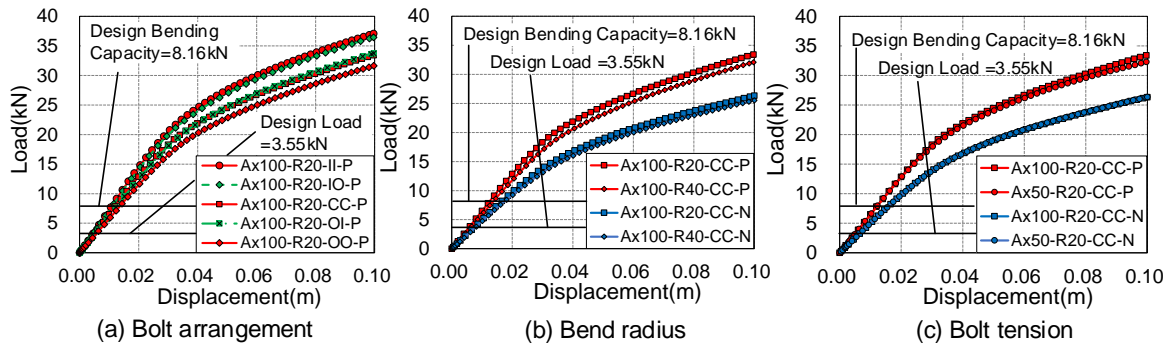


図-5 荷重 - 変位関係

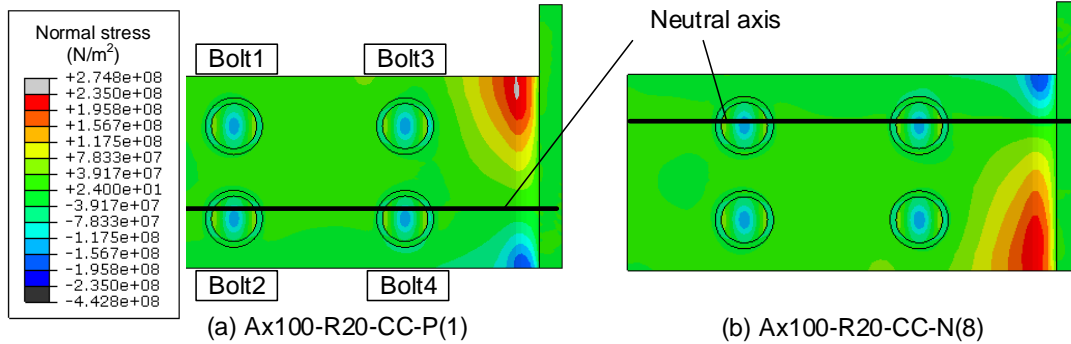


図-6 降伏時の直応力コンター図

表-4 初期剛性

Case	Initial stiffness	
	(kN/m)	/(1) or /(8)
Ax100-R20-CC-P(1)	645	100%
Ax100-R20-II-P(2)	717	111.2%
Ax100-R20-OO-P(3)	572	88.6%
Ax100-R20-IO-P(4)	704	109.1%
Ax100-R20-OI-P(5)	621	96.4%
Ax100-R40-CC-P(6)	584	90.5%
Ax50-R20-CC-P(7)	639	99.1%
Ax100-R20-CC-N(8)	500	100%
Ax100-R20-II-N(9)	547	109.5%
Ax100-R20-OO-N(10)	443	88.6%
Ax100-R20-IO-N(11)	450	90.1%
Ax100-R20-OI-N(12)	553	110.7%
Ax100-R40-CC-N(13)	489	94.0%
Ax50-R20-CC-N(14)	498	99.7%

は設計荷重の約4倍であり、風荷重に対しては十分な耐力を有しているといえる。

a) ボルト配置の影響

スロット孔内のボルト配置による違いに着目するため、図-5(a)に示す Ax100-R20-CC-P(1), Ax100-R20-II-

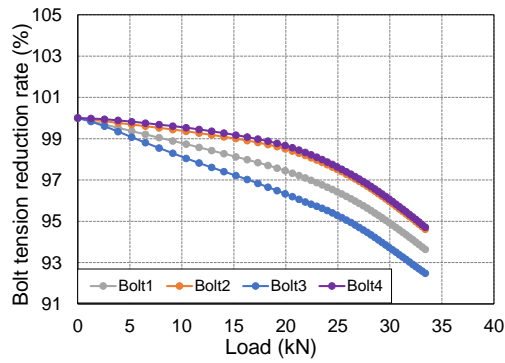
P(2), Ax100-R20-OO-P(3), Ax100-R20-IO-P(4), Ax100-R20-OI-P(5) の比較を行う。

まず、初期剛性は、Ax100-R20-II-P(2), Ax100-R20-IO-P(4), Ax100-R20-CC-P(1), Ax100-R20-OI-P(5), Ax100-R20-OO-P(3) の順に大きくなっており、基本ケースである Ax100-R20-CC-P(1) の初期剛性を 100% とすると、順に 111.2%, 109.1%, 100%, 96.4%, 88.6% となる。この結果から、ボルト配置がスロット孔の内側になるケースで最も剛性が大きくなるのがわかる。一方、ボルトを互い違いに配置したケースでは、荷重載荷位置近くのボルトが内側に配置された場合（正側載荷では Bolt5 と Bolt7) の方の剛性が大きくなった。これらの傾向は、負側載荷でも同様であった。

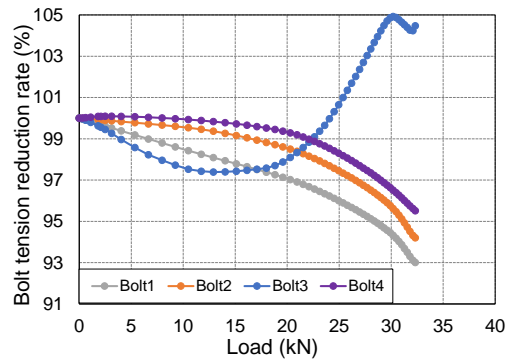
b) 曲げ加工半径の影響

曲げ加工半径による違いに着目するため、図-5(b)に示す Ax100-R20-CC-P(1) と Ax100-R40-CC-P(6), Ax100-R20-CC-N(8) と Ax100-R40-CC-N(13) の比較を行う。

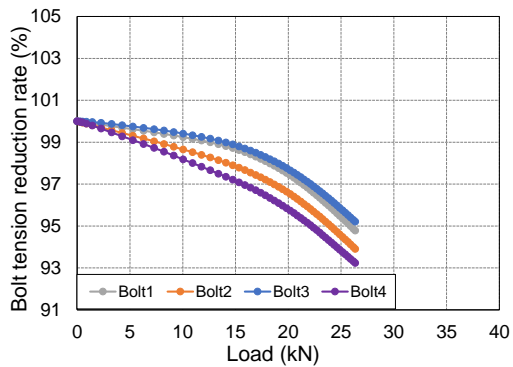
初期剛性は、正側載荷、負側載荷ともに R40 ケースの方が小さくなっており、正側載荷の Ax100-R40-CC-P(6) は Ax100-R20-CC-P(1) の 90.5%, 負側載荷の Ax100-R40-CC-N(13) は Ax100-R20-CC-N(8) の 94.0% であった。曲げ加工半径が大きくなると剛性が低下する理由として、リブからボルト位置までの距離に着目する。R20 ケースに比べて R40 ケースでは、曲げ加工半径が大きい影響でボルト位置が外側に 20cm 移動している。また、ス



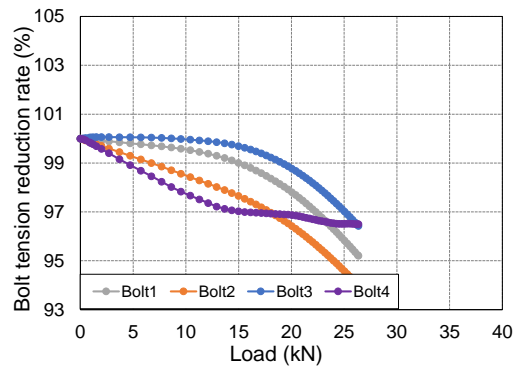
(a) Ax100-R20-CC-P(1)



(b) Ax50-R20-CC-P(7)

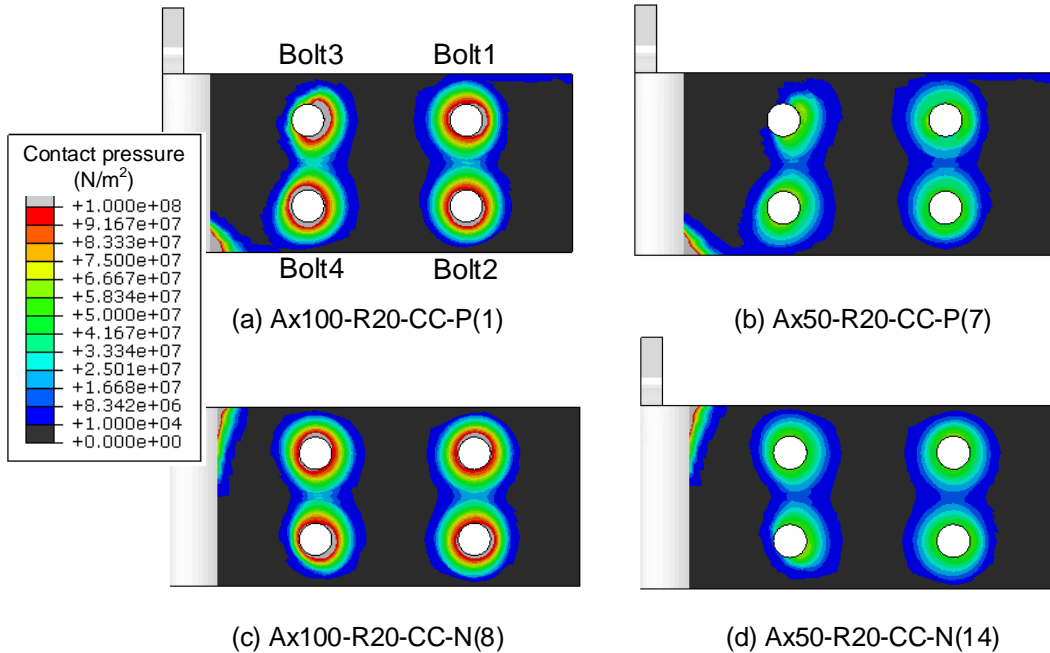


(c) Ax100-R20-CC-N(8)



(d) Ax50-R20-CC-N(14)

図-7 摩擦接合部のボルト軸力変動



(c) Ax100-R20-CC-N(8)

(d) Ax50-R20-CC-N(14)

図-8 摩擦接合部の接触圧コンター図

ロット孔内の外側にボルトを配置したケースでは、中央にボルトを配置したケースに比べてボルト位置が 25cm 外側に移動している。よって、Ax100-R40-CC-P(6) のボルト位置は Ax100-R20-CC-P(1) と Ax100-R20-OO-P(3) の間に位置しており、このボルト位置が Ax100-R20-CC-

P(1) に比べて外側にあることにより剛性が低下していると考えられる。また、リブからボルト位置までの距離を R40 ケースと同じ位置にした新たな R20 ケースの解析結果より、初期剛性の違いは正側载荷、負側载荷ともに 1% 以下であった。これは曲げ加工半径を変化させ

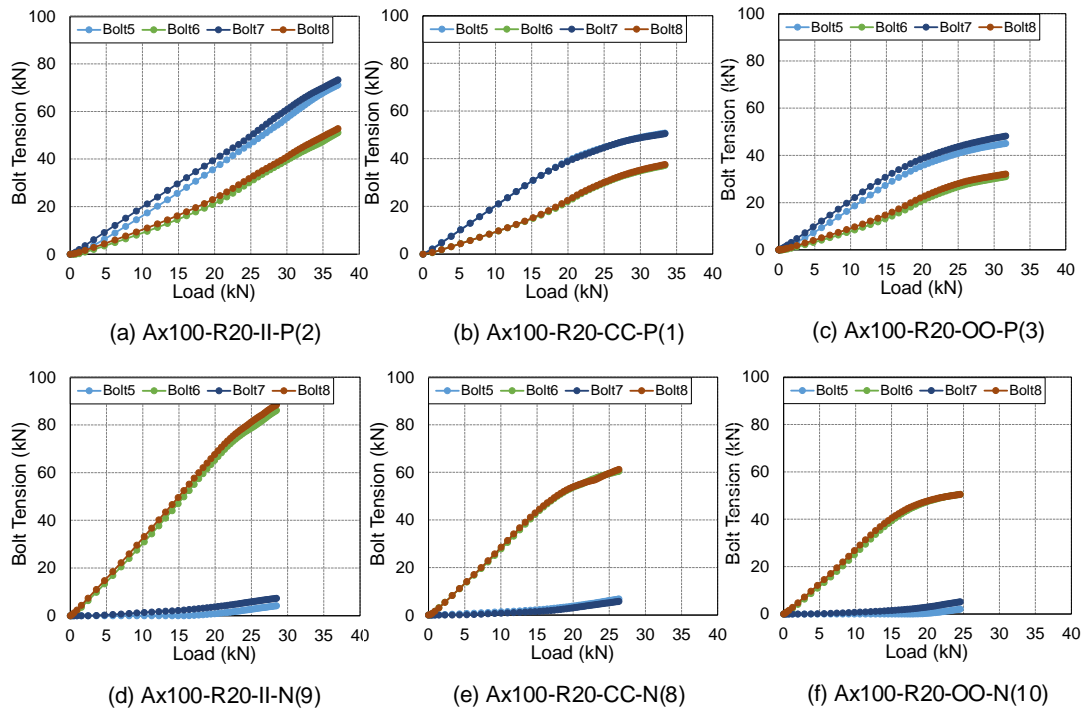


図-9 引張接合部のボルト軸力変動

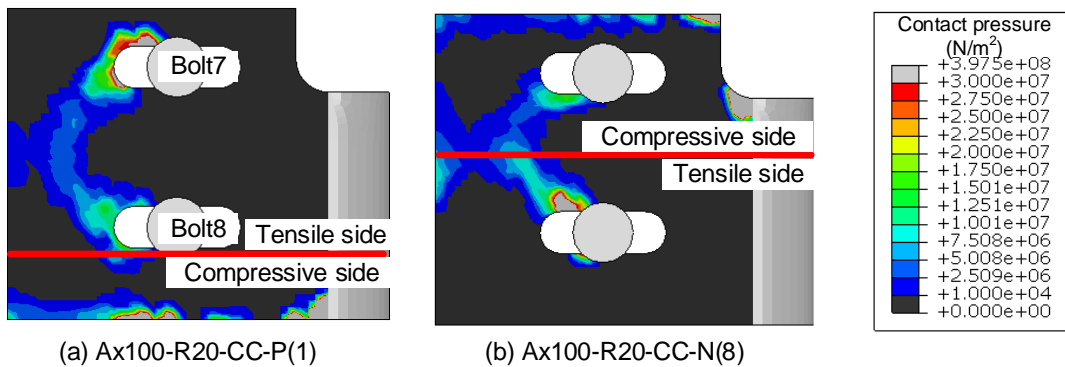


図-10 引張接合部の接触圧コンター図

でも曲げに対する断面剛性が変化しないからであると考えられる。以上より、曲げ加工半径が直接初期剛性に与える影響は小さいが、曲げ加工半径の変化によってボルト位置が移動することによる影響を受けることがわかった。また、R20の方が構造物が小さく、施工条件の制約を受けにくいいため、R20の方が望ましいと考えられる。

c) 荷重方向の影響

本構造は非対称性を有している。荷重方向による違いを検討するため、Ax100-R20-CC-P(1)とAx100-R20-CC-N(8)の比較を行う。

初期剛性は、Ax100-R20-CC-P(1)に比べてAx100-R20-CC-N(8)では約22.6%低いことがわかる。他のケースで比較しても、負側荷重の方が、20-24%程度低くなっていることがわかる。ここで、図-6に示すL型部材の降伏発生時の直応力コンター図をみると、応力分布は

基部構造の非対称性から、圧縮領域よりも引張領域の方が大きくなっていることがわかる。そのため、荷重方向によって、中立軸位置の高さが異なる。この中立軸位置の違いが、表-4の初期剛性にも影響し、荷重方向によって傾きが変わると考えられる。

d) ボルト軸力の影響

高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力による違いに着目するため、図-5(c)に示すAx100-R20-CC-P(1)とAx50-R20-CC-P(7)、Ax100-R20-CC-N(8)とAx50-R20-CC-N(14)の比較を行う。

初期剛性は、正側荷重、負側荷重ともに1.0%以内の差異であり、大きな違いが認められないため、ボルト軸力が初期剛性に与える影響は小さい。

(2) ボルト軸力変動

図-7は摩擦接合部における荷重-ボルト軸力関係、

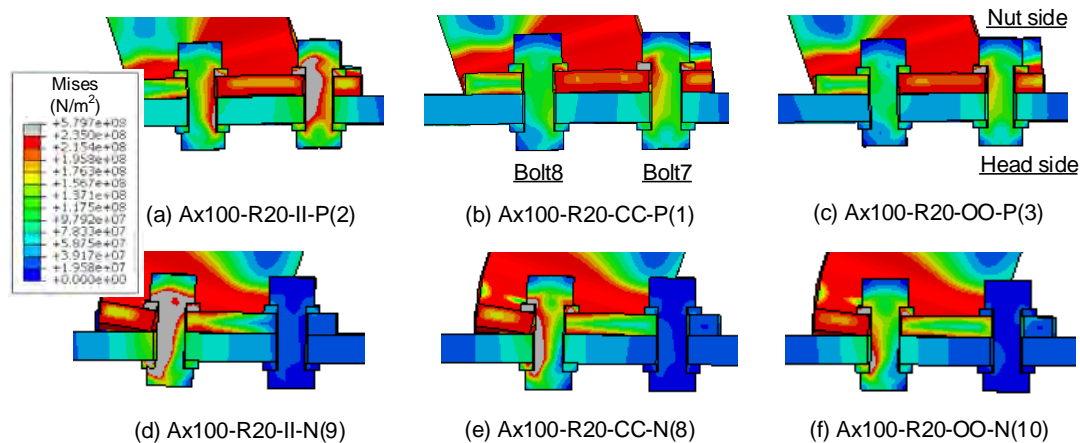


図-11 L型部材の変形状 (変形倍率 5 倍)

図-8は最終ステップ時の摩擦接合部のL型部材の接触圧コンター図、図-9は引張接合部における荷重-ボルト軸力関係、図-10は最終ステップ時の引張接合部のL型部材の接触圧コンター図、図-11は引張接合部におけるL型部材の曲げ変形図を示す。

a) 摩擦接合部

摩擦接合部の Bolt1-Bolt4 におけるボルト軸力において、軸力 100% ケースでは、全てのケースで図-7(a) に示すような軸力低下が確認できた。一方、軸力 50% ケースは荷重側および基部側のボルト、つまり Ax50-R20-CC-P(7) の Bolt3、Ax50-R20-CC-N(14) の Bolt4 では約 13kN を境に、ボルト軸力の変化傾向が異なることがわかる。

また、図-8より、ボルトの基部側の接触圧は、ボルト軸力の低下傾向が異なるボルト位置で小さくなることを確認でき、特に、軸力 50% ケースでは接触圧がほとんど生じていない箇所も見られる。これは、ポアソン効果により、引張領域でL型部材の板厚が減少したことが原因と考えられる。また、基部の荷重位置と反対側のボルト孔周辺では、高い接触圧が発生している事がわかる。この位置は圧縮領域であるため、ポアソン効果により板厚増加したためであると考えられる。

b) 引張接合部

図-9より、引張接合部の Bolt5-Bolt8 において、ボルト軸力は、全ケースで荷重増加に伴いボルト軸力の増加が確認できる。荷重方向による違いでは、正側荷重は4本すべてのボルトの軸力が増加しているが、負側荷重では Bolt6 と Bolt8 の2本のボルトのみが増加している。これは GFRP リブの中立軸との関係があり、図-10に示すように、L型部材が非対称であるため、引張領域が正側荷重ではすべてのボルト、負側荷重では Bolt6 と Bolt8 の2本のボルトのみであるから負側荷重ではその2本のボルトに荷重が集中したと考えられる。

また、図-11より、正側荷重の場合、L型部材の切欠

きが引張接合部のボルト間に位置するため、ボルトピッチ間の板材がリブ先端方向に変形し、Bolt7 のナット側左部に高い応力が発生することがわかる。この応力は、ボルト配置がスロット孔の内側に配置されている場合に特に高くなる。そのため、内側に配置したケースの方がボルト軸力増分量が大きくなったと考えられる。一方、負側荷重では、L型部材の端部が変形するため、Bolt8 のヘッド側左部に高い応力が発生する。また、Bolt7 は、その近傍の板材がほとんど変形しないため、Bolt7 に作用する応力は小さい。そのため、Bolt5 と Bolt7 の軸力はほとんど変化しないと考えられる。

(3) 応力性状

図-12、図-13に、GFRP 壁高欄基部接合部の Mises コンター図を示す。図-12はL型部材のR部の降伏が発生した時点を示しており、括弧内に荷重レベルを示している。また、図-13は最終ステップ時である。

図-12より、L型部材に生じる応力は、切り欠きがある側のR部に大きな応力が発生していることがわかる。また、降伏範囲は解析ケースによって異なるものの、その傾向は荷重方向によらず同様である。正側荷重の場合、L型部材の切欠き部が地覆から離れる方向に変形するため、Bolt7 周辺に高い応力が発生することがわかる。この傾向は、スロット孔の外側にボルトを配置した方が高くなる。一方、負側荷重の場合、切欠きがない側の隅角部が変形するため、Bolt8 周辺に高い応力が発生していることがわかる。また、この発生応力は、正側荷重の場合と同様に、スロット孔の外側にボルトを配置した方が高くなる。

図-13より、最終ステップ時では、L型部材の引張接合部も降伏し、アンカーボルトから GFRP リブ側にかけてほとんどの領域が降伏している。荷重条件による違いは、正側荷重の場合の降伏範囲は、ボルト位置を直線状に結んだ領域で広がることがわかる。一方、負

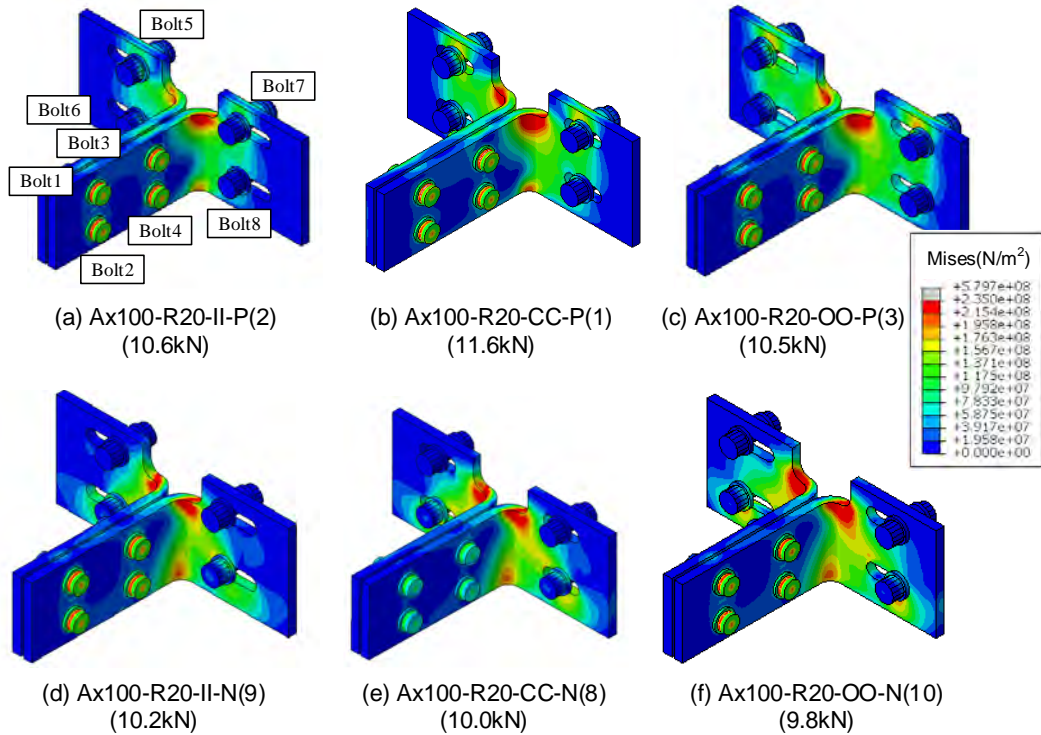


図-12 降伏発生時の L 型部材の Mises コンター図

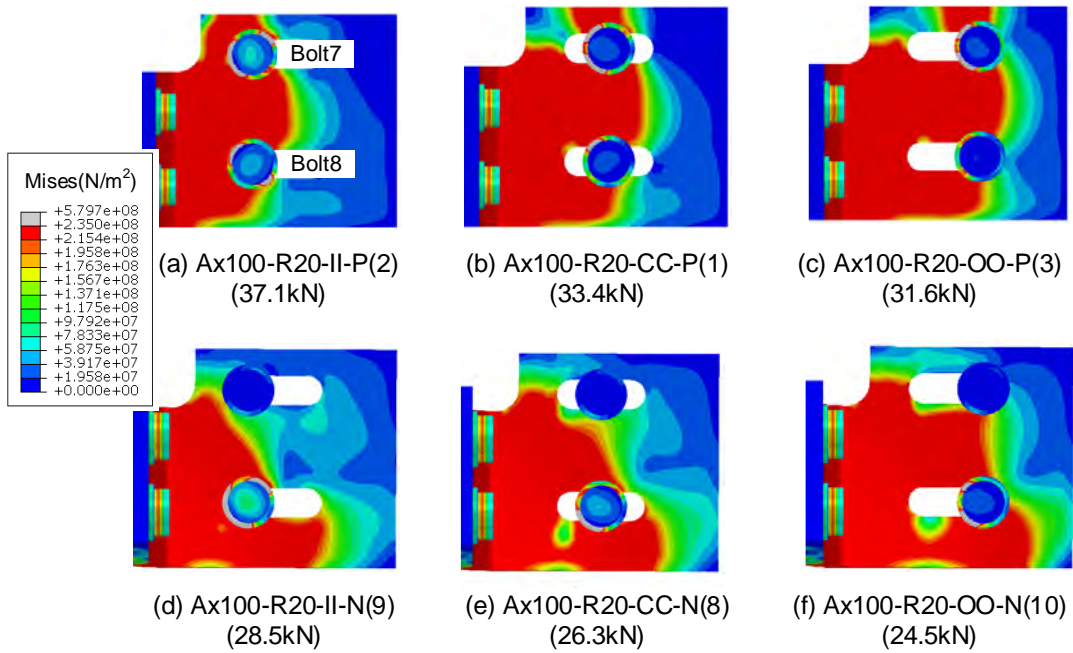


図-13 最終ステップ時の L 型部材の Mises コンター図

側荷重の場合の降伏範囲は、Bolt8 を起点として三角形に分布していることがわかる。また、荷重条件に関係なく、スロット孔の外側にボルトを配置した方が降伏領域が大きいため、L 型部材の地覆側の降伏領域の大きさが影響し、外側に配置したケースで剛性が低くなったと考えられる。

以上の結果から、L 型部材の挙動と剛性は、切欠き

の範囲のみならず、ボルトの配置に依存することがわかった。本構造の設計耐力は、アンカーボルトの地覆コンクリートに対する引き抜き能力で決まるため、今後、より最適な L 型部材の形状やボルトの配置を検討する予定である。

5. 結論

本研究では、GFRP 壁高欄基部の接合部を対象に、基部のボルト配置や荷重条件等をパラメータとした解析を実施し、それらが接合構造の性能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 壁高欄基部接合部は、曲げ荷重を受けると、荷重に近いボルト位置で高い応力が発生し、切り欠き部分から降伏が発生する。その後、降伏領域は引張接合部に広がり、最終的には正側荷重では GFRP リブとボルト位置が一直線上にあるような長方形、負側荷重では、GFRP リブと荷重荷重位置に近い側のボルトを結んだ三角形分布となる。
- 2) 初期剛性は、スロット孔内の中心にボルトを配置したケースに比べて、内側では約 10% 高く、外側では約 11% 低くなる。また、互い違いにボルトを配置したケースでは、荷重荷重方向のボルトを内側に配置した方が剛性を大きくするのに効果的であることがわかった。
- 3) 荷重条件の違いでは、負側荷重の方が正側荷重より 20-24% 低い。これは L 型部材が非対称であることに起因して中立軸位置が異なるからであると考えられる。
- 4) 曲げ加工半径による剛性の違いがほとんどなかった。これは曲げ加工半径を変化させても曲げに対する断面剛性が変化しないからであると考えられる。
- 5) 引張接合部のボルト軸力は、正側荷重ではすべてのボルトが引張側領域にあるため、比較的均等に増加するが、負側荷重では不均等になる。

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) 真田修, 佐藤徹也, 吉松秀和, 北川学: 東名高速道路で初となる鋼橋のリニューアル事業の設計と施工 - 用宗高架橋(下り線)の床版取替え工事 -, コンクリート工学, Vol.55, No.10, pp.887-893, 2017.
- 2) 稲葉尚文, 本庄正樹, 空閑健作, 辻角学: 橋軸方向プレストレス, 壁高欄一体化による取替床版の施工性向上検討, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.213-216, 2018.
- 3) 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, pp.115-122, 2012.
- 4) 久保圭吾, 永見研二, 石原彰子: 鉄道用 FRP 壁高欄の実験的検討, 宮地技報, No.33, pp.5-11, 2020.
- 5) 笠井和彦, 徐養会: アングルを用いたボルト半剛接の繰り返し弾塑性挙動に関するパラメータ実験研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.560, pp.169-179, 2002.
- 6) 李英姫, 小野徹郎: 柱梁半剛接合部の力学特性に関する実験研究 - アングル材を用いた接合部 -, 日本建築学会構造系論文集, Vol.588, pp.149-155, 2005.
- 7) 田沼吉伸, 橋本健一: アングルを接合金物として用いた半剛柱はり接合部の挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.515, pp.123-130, 1999.
- 8) Zhang, Y., Wang, J., Gao, S., Wang, S., Fu, F.: Tensile resistance of bolted angle connections in the beam-column joint against progressive collapse, *Engineering Structures*, Vol.236, 2021.
- 9) Song, Y., Yam, M., Wang, J.: Enhanced progressive collapse resistance of bolted beam-to-column connections with ductile stainless steel components, *Engineering Structures*, Vol.275, 2023.
- 10) 日本工業標準調査会: 一般構造用圧延鋼材, JISG 3101:2017, 2017.
- 11) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書総集編・構造計画編・設計編, 2016.
- 12) 日本工業標準調査会: 摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット, JISB 11862013, 2013.

(Received August 25, 2023)

THE EFFECT OF BOLT ARRANGEMENT ON GFRP WALL RAILING BASE JOINT LOAD BEARING CAPACITY

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

GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) is applied to civil engineering structures because of its excellent material properties such as light weight and high corrosion resistance. In this study, the effects of bolt arrangement in the slotted holes in the base and loading conditions on the stiffness of the joint and stress properties of the base were studied analytically for the base joint of a GFRP wall railing. As a result, when subjected to bending loads, higher stresses occur at the bolt positions close to the load, and yielding occurs at the notches. The initial stiffness was smaller for the negative loading than for the positive loading, and the bolt arrangement was smaller on the outside than on the inside. The bolt tension of tensile joints increase relatively evenly under positive loading, but become unequal under negative loading. This is because the asymmetry of the L-shaped members results in different neutral axis positions depending on the loading conditions, and therefore, not all bolts are located within the tensile region in the negative loading.