

## (50) ハイブリッドFRP桁と鋼桁の高力ボルト接合に関する静的載荷試験・疲労試験

小野寺 諒<sup>1</sup>・中村 一史<sup>2</sup>・小林 拳祐<sup>3</sup>・花村 光一<sup>4</sup>・新倉 利之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士前期課程2年  
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)  
E-mail: onodera-ryo2@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 准教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)  
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

<sup>3</sup>株式会社 IHI インフラ建設 橋梁事業部 鋼保全技術部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1)  
E-mail: kobayashi0523@ihi-g.com

<sup>4</sup>株式会社栗本鐵工所 コンポジットプロジェクト室 技術部 (〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町1)  
E-mail: k\_hanamura@kurimoto.co.jp

<sup>5</sup>パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)  
E-mail: toshiyuki.niikura@os.pacific.co.jp

ボルトを用いたFRP部材のせん断支圧接合は、FRP部材の材料強度に依存し、それらは鋼部材の強度に比べて小さいことが課題となる。著者らは、GFRP板と鋼板の接合部の耐力を向上させる方法として、鋼板接着で補強されたGFRP板の鋼添接板による高力ボルト摩擦接合を提案した。本研究は、ハイブリッドFRP桁と鋼桁の接合部に、提案した接合方法を適用した試験体を作製し、桁接合部の耐荷性能・疲労耐久性を実験的に検討したものである。その結果、静的試験からは、桁接合部の破壊はすべりまたははく離が先行すること、ボルト軸力の導入率が小さいほどすべり破壊が先行することなどがわかった。疲労試験からは、小さい荷重範囲において接着接合部に初期はく離が生じるものの、初期はく離は桁接合部の疲労耐久性に影響はないことが確かめられた。

**Key Words:** hybrid FRP composite girder, bonded steel plate, steel girders, high-strength bolted friction joint, static loading test and fatigue test

### 1. はじめに

繊維強化プラスチック（以下、FRP）部材の接合には、一般にボルトを用いたせん断支圧接合<sup>1)</sup>が適用される。その継手耐力は、FRPの支圧強度、せん断強度に依存する。FRPのそれらの材料強度は小さいため、必要なボルト本数が増えることがある。また、鋼板同士の高力ボルト摩擦接合と比べて、縁端距離、側縁距離、ボルト間距離を確保する必要もあり<sup>2)</sup>、接合構造が大きくなることもある。したがって、より合理的なFRP部材の接合方法が求められている。

そこで、FRP板と鋼板の接合部の継手耐力を向上させる方法として、鋼板接着で補強されたFRP板を、鋼添接板を介して力の伝達を図る高力ボルト摩擦接合とする方法を考案した<sup>2)</sup>。この接合方法によれば、継手耐力は、FRP板に接着された鋼板（厚さ3.2mm）と鋼添接板（厚

さ9mm）の間のすべり耐力となることから、従来の高力ボルト摩擦接合の考え方で設計が可能となり、孔径も高力ボルト摩擦接合の寸法に準拠できることから、施工性も改善される。しかしながら、FRP部材の接合方法として、高力ボルト摩擦接合の標準的な設計法はないことが課題として挙げられた。高力ボルトに導入された軸力によるGFRP板のクリープ特性<sup>3)</sup>、鋼板とFRP板の接着接合部の初期はく離<sup>2)</sup>を含め、実験的な検討を行って、適用性を検証する必要がある。

本研究は、継手引張試験で検討した鋼板接着によるFRP板の接合部の補強方法<sup>2)</sup>を、FRP桁と鋼桁との接合部への適用性を明らかにすることを目的として、実物大のハイブリッドFRP（以下、HFRPとよぶ）桁ウェブ（GFRP）と鋼桁ウェブ同士を高力ボルト摩擦接合した試験体を作製し、曲げ載荷実験を行って、桁接合部の静的耐力および疲労耐久性を実験的に検討した。



ニシ E258R) を用いて、GFRP ウェブの両面に接着した。接着後、約 40°C で 24 時間以上、加温養生した。接着厚さは少量のガラスビーズ (直径 0.4mm) を用いて管理した。養生中は試験体はずれないように仮ボルトで固定した。硬化後、仮ボルトを取り外し、孔壁に残ったエポキシ樹脂接着剤をグラインダーで切削し、除去した。

続いてボルト締めは、ひずみゲージ付きボルトを使用し導入軸力を計測しながら、トルクレンチを用いて後述の軸力になるよう導入した。

### (3) 実験方法とセットアップ

接合部の接着およびすべり挙動を把握するため、図-3 に示す箇所にクリップ型変位計 (分解能 0.0008mm) およびマイクロスコープ (倍率 10~230 倍) を設置した。

静的載荷試験では、油圧ジャッキ (容量 2000kN, 200mm) を用いて載荷を行った。載荷方法は 4 点曲げ載荷とし、50kN ごとに荷重を漸増した。また、50kN ごとの載荷ケースでは、載荷・除荷を 2 回ずつ繰返した。

疲労試験では、2 軸構造物載荷試験機 (動的容量 ±750kN, ±200mm) を使用した。図-4 に、セットアップ状況を示す。載荷方法は静的載荷試験と同様に、4 点曲げ載荷とし、載荷速度は、荷重容量に応じて 2Hz または 3Hz とした。繰返し回数は、最大 200 万回までとした。最大荷重に対する最小荷重の荷重比  $R$  は、0.1 とした。

実験シリーズは、静的載荷試験では、FRP のクリープ変形に伴う高力ボルト軸力の低下を考慮して、高力ボルトに導入する軸力をパラメトリックに検討した。M22 F10T の高力ボルトの適用を想定し、設計軸力 (205kN) を 100% として、100%, 80%, 60% の 3 ケースを設定し、それぞれ 2 体ずつ試験体を用意した。疲労試験では、載荷する荷重範囲を 90kN, 176kN, 262kN の 3 ケースを設

表-2 実験シリーズ  
(a) 静的載荷試験

試験体名	ボルト軸力	試験体数
100A/B	100%	2
080A/B	80%	2
060A/B	60%	2

(b) 疲労試験

試験体名	荷重範囲 (kN)	試験体数	予定載荷回数
080F1	81.0	1	200 万回
080F2	158.4	1	200 万回
080F3	235.8	1	200 万回

表-3 破壊荷重と破壊形式

試験体名	初期はく離時		最大荷重時		破壊形式
	荷重 (kN)	軸力導入率 (%)	荷重 (kN)	軸力導入率 (%)	
100A	295.5	90.6	530.8	90.6	すべりはく離
100B	260.2	90.7	490.8	90.7	すべりはく離
080A	210.9	75.5	436.1	75.5	はく離
080B	258.9	75.0	470.8	77.1	すべり
060A	192.2	57.6	464.8	64.0	すべり
060B	254.9	55.9	415.5	53.4	すべり

定して、それぞれ 1 体ずつ用意した。なお、疲労試験における高力ボルトの軸力はリラクゼーション試験<sup>2)</sup>の経過を考慮して、設計軸力 (205kN) の 80% とした。

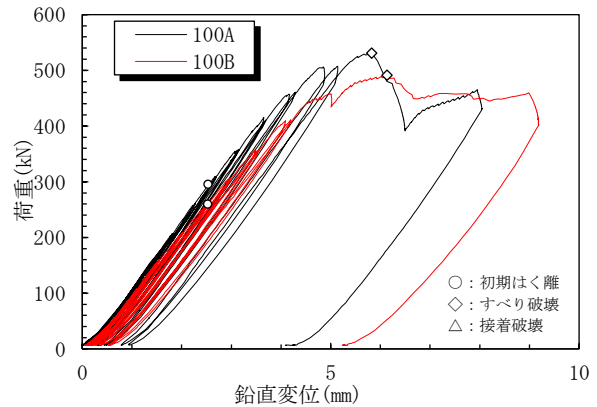
表-2 に、実験シリーズを示す。

## 4. 静的載荷試験の結果と考察

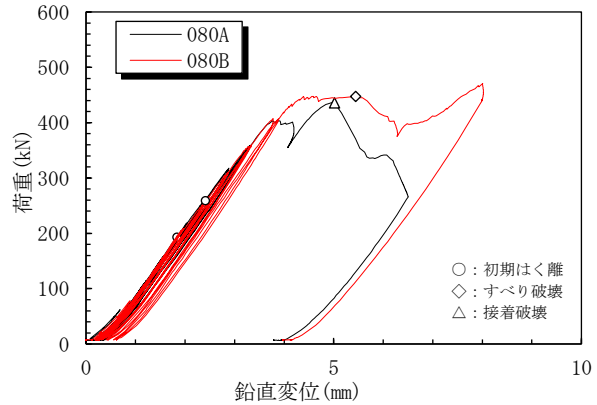
### (1) 接合部の破壊挙動と破壊形式

実験結果の一部として、表-3 に、各実験シリーズにおける破壊荷重と破壊形式を示す。

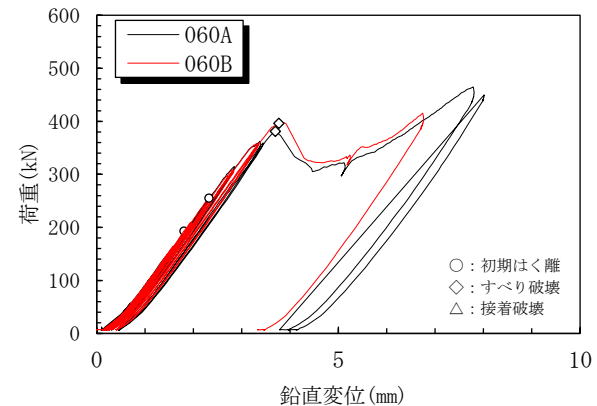
破壊形式に関して、すべりは補強鋼板と鋼添接板の間で生じたすべり破壊を、はく離は GFRP ウェブと補強鋼



(a) 100A および 100B



(b) 080A および 080B



(c) 060A および 060B

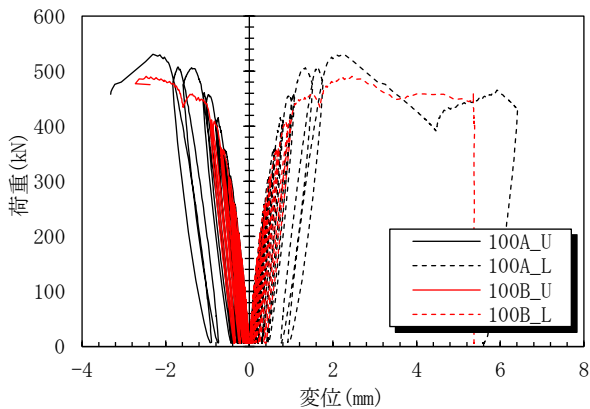
図-5 荷重と鉛直変位の関係

板の間で生じた接着接合部の破壊をそれぞれ指す。

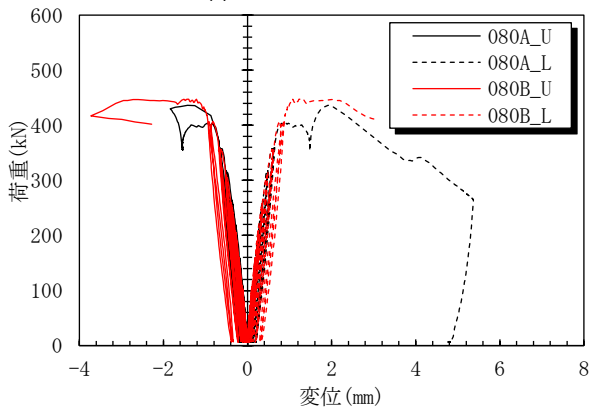
ボルト軸力の導入率が高いほど、接着接合部におけるはく離が先行する傾向にあること、ボルト軸力の導入率が低いほど、摩擦接合におけるすべり破壊が先行する傾向にあることがわかった。

図-5に、静的荷重試験における荷重と鉛直変位の関係を、図-6に、荷重と継目部の相対変位 (Joint\_U, Joint\_L) の関係をそれぞれ示す。図-5より、すべり先行型である060A, 060Bではすべり荷重後に最大荷重が増加することが分かった。これは破壊後に支圧状態となることで、より大きい荷重を受けることができるためと推測される。

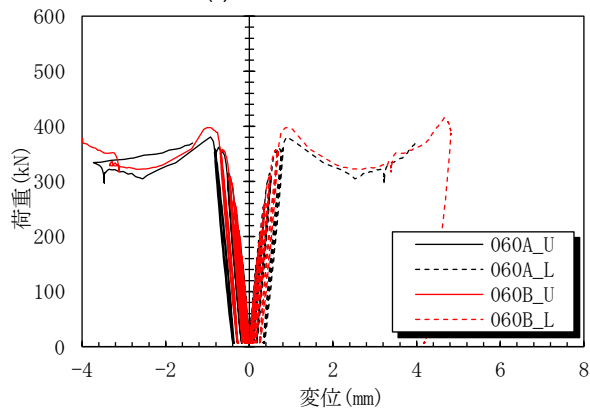
図-6より、継目部の相対変位は全ての試験体において圧縮側と引張側で概ね対称となる挙動を示すこと、載



(a) 100A および 100B



(b) 080A および 080B

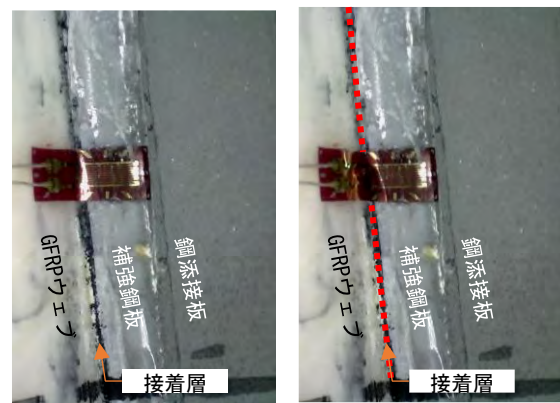


(c) 060A および 060B

図-6 荷重と相対変位の関係

荷・除荷を繰返すごとに残留変位が徐々に増えることがわかった。残留変位は初期はく離よりも小さい荷重から発生することからはく離とは関係がないといえる。

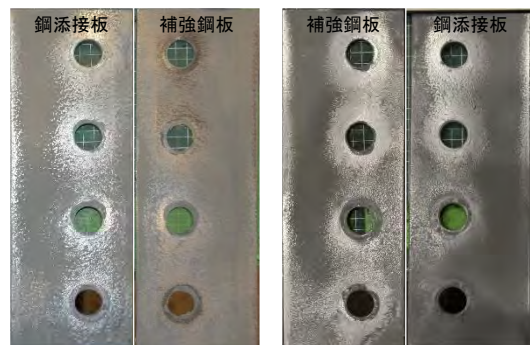
図-7に、100B試験体におけるN側のマイクروسコープの写真を示す。(a)は載荷前の状況であり、(b)は初期はく離が生じる250kNの載荷を行う直前の状況(無載荷時)である。白色のGFRPウェブ表面と灰色の補強鋼板の間の接着剤に若干の変化がみられることから、接着剤に塑性変形が生じていると考えられた。一方、補強鋼板とその右側の灰色の鋼添接板の間には変化がみられないことからすべりは生じていないことがわかった。残留変位が生じる要因は、補強鋼板とGFRPウェブの間に塗布した接着剤の塑性変形によるものであると推察された。



(a) 載荷前

(b) 初期はく離前

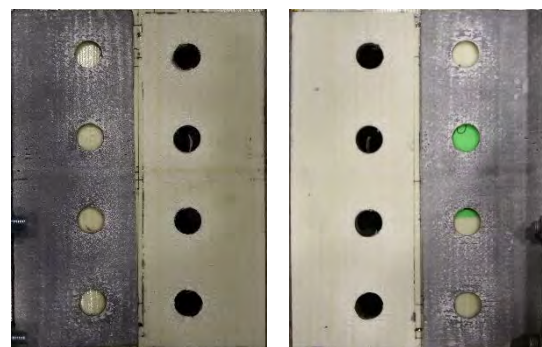
図-7 無載荷時の接着面の状況 (100B試験体N側)



(a) S側 (すべり破壊)

(b) N側 (すべり破壊)

図-8 試験後のすべり面の状況 (080B試験体)



(a) S側 (はく離破壊)

(b) N側 (はく離破壊)

図-9 試験後の接着面の状況 (080A試験体)

(2) すべり面およびはく離面の観察

図-8に、試験後のすべり面の状況を示す。すべりが生じた試験体では、全てボルトまわりの無機ジンクリッチペイントにおいてすべりが観察された。

図-9に、試験後の接着面のはく離の状況を示す。完全にはく離した試験体は、全て凝集破壊であり、補強鋼板を接着することで、接着剤の材料破壊が先行し、GFRPウェブの材料破壊が生じないことが確認された。

(3) マイクロスコープによるはく離の観察

初期はく離の発生について検討を行った。観察方法はマイクロスコープによる目視観察とし、1秒ごとに撮影された接着接合部の画像から、初期はく離が生じた時間を特定し、その時に計測された荷重を初期はく離荷重とした。ただし、一部試験体では、1回目の載荷ステップでははく離せず、2回目に1回目の載荷ステップの最大荷重を下回る荷重で初期はく離したケースがあった。その場合、1回目の載荷ステップの最大荷重を初期はく離荷重とした。

図-10に、観察された初期はく離の一例を示す。また、表-4に、初期はく離荷重と破壊形式を示す。図-11に、初期はく離荷重・最大荷重とその時のボルト軸力の関係を示す。初期はく離荷重は、S側とN側のうち先行して生じた側をそれぞれ示している。

図-10より、接着剤のはく離はGFRPウェブと接着剤の境界から発生することがわかった。また、表-4より100AのS側では初期はく離が生じなかったこと、試験体によってはS側とN側で初期はく離荷重が50kN以上異なるものがあることがわかった。

図-11より、初期はく離荷重は、ボルト軸力が大きいほど高くなる傾向がみられ、最小で192kN、最大で296kNであった。また、最大荷重について、080Aでは436kNで完全にはく離であったが、080Bは471kNですべり破壊であり、完全にはく離は生じなかったことから、破壊

形式にもばらつきがあるといえた。初期はく離荷重とボルト軸力の関係を線形近似し、ボルト軸力がゼロの時の初期はく離荷重を推定したところ、133.46kNであった。最大荷重とボルト軸力の関係についても同様に線形関係にあることがわかる。

これらの結果から、初期はく離荷重・最大荷重は、ボルト軸力と相関があるといえ、初期はく離荷重が大きい試験体ほど完全にはく離荷重も大きい傾向にあるといえた。破壊荷重は、試験体によるばらつきはあるものの、ボルト軸力と概ね線形関係にあるといえた。

5. 疲労試験の結果と考察

(1) 接合部の疲労耐久性と破壊形式の評価

実験結果の一部として、表-5に、各実験シリーズにおける初期はく離が発生した載荷回数と破壊形式を示す。1回は、疲労試験の開始前の静的載荷の時点で生じたことを示す。破壊は、最大繰返し回数(200万回)に達するまでに、疲労試験の継続が困難な状況となった時点で判定し、その時の破壊形式と繰返し回数を示す。

080F1および080F2では、200万回に達するまで、完全にはく離やすべり破壊は生じなかった。一方、080F3では62万回で鋼桁と鋼添接板のボルト接合部ですべりが生じ、疲労試験の継続が困難となったため、試験を終了した。この時、HFRP桁のウェブと補強鋼板との接着接合部に完全にはく離や、補強鋼板と鋼添接板のボルト接合部にすべり破壊は生じなかった。



図-10 試験体060AのN側の初期はく離

表-4 初期はく離荷重と破壊形式

試験体名	破壊の種類		初期はく離荷重 (kN)	
	S側	N側	S側	N側
100A	鋼すべり	接着はく離	なし	296
100B	鋼すべり・接着はく離	接着はく離	359	260
080A	接着はく離	接着はく離	211	218
080B	鋼すべり	鋼すべり	259	259
060A	鋼すべり	鋼すべり	192	262
060B	鋼すべり	鋼すべり	306	255

表-5 破壊形式と繰返し回数

試験体名	初期はく離	破壊形式・繰返し回数
080F1	約50万回	—
080F2	1回	—
080F3	1回	鋼桁側すべり・約62万回

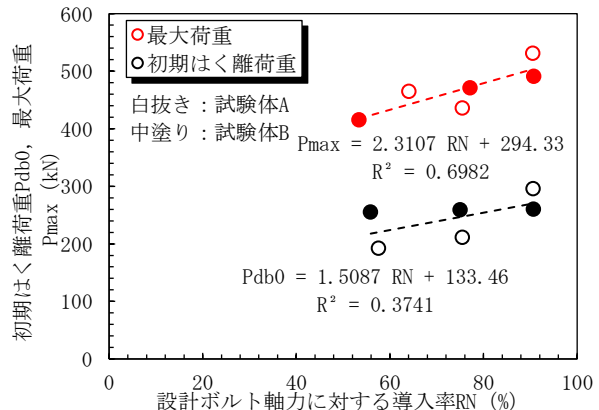


図-11 ボルト軸力と初期はく離荷重・最大荷重の関係

## (2) 繰返し载荷に伴う接合部の挙動

図-12 に、繰返し回数と継目部の相対変位 (Joint\_U, Joint\_L) の関係を示す。相対変位は、最大・最小荷重時の差を示している。図より、相対変位の振幅は、疲労試験中、概ね一定であることがわかる。また、圧縮側 (Joint\_U) と引張側 (Joint\_L) で比較すると、引張側で変動が大きいこと、相対変位の大きさも引張側の方が、すべての試験体、疲労試験の全範囲で大きく、約3倍の大きさであった。

## (3) マイクロ스코ープによるはく離の観察

マイクロ스코ープによるはく離の観察結果の一部を図-13 に示す。マイクロ스코ープの撮影の時間間隔は5分であり、080F1において初期はく離が生じた0~50万回においては、载荷900回ごとの撮影であった。また、初

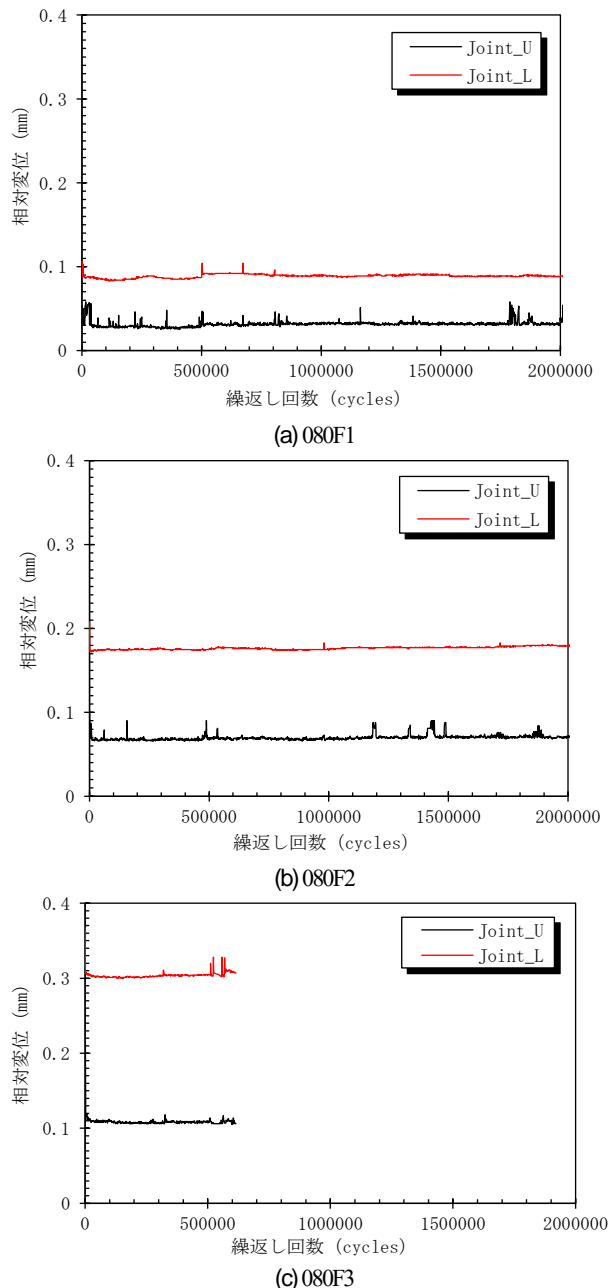


図-12 繰返し回数と相対変位の関係

期はく離の特定は、それが生じたマイクロ스코ープの撮影時刻からその時の繰返し回数を算出した。表-4 に示したように、静的载荷試験において、初期はく離が確認された時の最小荷重は192kN (設計ボルト軸力の60%)であった。また、設計ボルト軸力が同じ80%での初期はく離は211kNであった。

図-13 より、試験体 080F1 (荷重範囲 : 81kN) では、繰返し回数が 497,600 回では確認できなかった初期はく離が 498,500 回において確認された。したがって、この間に初期はく離が生じたと考えられる。

また、はく離の発生回数について、接着接合部の疲労試験結果<sup>4)</sup>を参照して推定を試みた。表-6 に、推定した初期はく離の発生回数を示す。基準となる初期はく離荷重は、静的試験の 080A および 080B の平均値である 235kN とし、各荷重範囲に対する荷重比を算出することで推定を行った。その結果、初期はく離は、080F1 では 3,000,000 回、080F2 では 2,000 回で生じることが推定された。これに対して、疲労試験では、080F1 では 50,000 回、080F2 では 1 回 (静的载荷試験) で初期はく離が生じたことから、推定値を大きく下回った。080F1 では、要素試験の S-N 関係<sup>3)</sup>のばらつきの範囲に収まっていることが確かめられ、概ね妥当であるといえた。080F2 では、要素試験のばらつきの範囲を外れたが、文献<sup>3)</sup>の初期はく離の発生回数には、0~5mm までのはく離進展の回数として評価されている。したがって、表面の初期はく離で評価した実験ではより厳しいはく離の判定となっているといえた。なお、080F3 では、荷重範囲が初期はく離荷重を超えているため、1 回 (静的载荷) で初期はく離が生じることは妥当であるといえる。なお、全ての試験体で初期はく離がみられたものの、検討した荷重範囲において、初期はく離が疲労耐久性に支配的な要因とはな

表-6 初期はく離の発生回数の推定

試験体名	080F1	080F2	080F3
静的はく離に対する荷重比	0.345	0.674	1.003
初期はく離回数 (推定)	3,000,000	2,000	1
初期はく離回数 (実験)	50,000	1	1

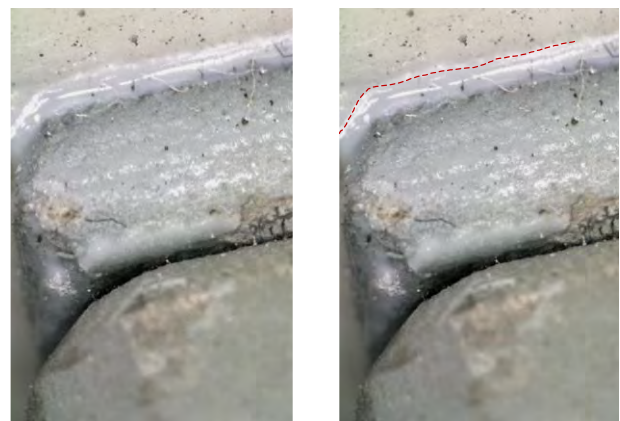


図-13 080F1における補強鋼板端部の初期はく離の状況

らなかった。

## 6. まとめ

本研究では、より合理的な GFRP 板の接合方法を開発することを目的として、継手引張試験で検討した鋼板接着による FRP 接合部の補強方法を応用して、ハイブリッド FRP 桁と鋼桁を高力ボルト接合した試験体を作製し、桁接合部の耐力を静的載荷試験および疲労試験により検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- (1) 接合部ではすべりまたははく離が先行することで、GFRP ウェブの材料破壊が生じないこと、ボルト軸力の導入率が小さいほど、すべり破壊が先行することがわかった。
- (2) 初期はく離は 192~296kN の間で生じ、ボルトの導入軸力が大きいほど、初期はく離荷重、最大荷重が大きくなる傾向にあるといえた。破壊形式は、試験体ごとにばらつきが生じたが、ボルトの導入率が小さいほど、すべり破壊が支配的であった。
- (3) 荷重範囲が 178kN 以下の疲労試験では 200 万回以上の疲労耐久性があり、荷重範囲 262kN では 62 万回で鋼桁側にすべりが生じた。いずれの場合にも完全はく離や補強鋼板のすべり破壊は生じなかった。
- (4) 比較的小さい荷重範囲が繰返し作用する場合においても接着接合部に初期はく離が生じた。しかしながら、初期はく離が接合部の疲労耐久性に支配的とはならないことが確かめられた。

謝辞：本研究は、株式会社 IHI インフラ建設、株式会社

栗本鐵工所、パシフィックコンサルタンツ株式会社、東京都立大学による共同研究として実施された。検討にあたり、松井繁之大阪大学名誉教授には、貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Clarke, J. L.: Structural Design of Polymer Composites -EUROCOMP Design Code and Handbook-, E&FN SPON, 1996.
- 2) 小野寺諒, 中村一史, 小林拳祐, 花村光一, 新倉利之: 鋼板接着で補強された GFRP 板の高力ボルト継手に関する引張試験, 土木学会, 土木学会論文集, vol.79, No.14, 22-14006, 2023.
- 3) 山崎敏宏, 小林拳祐, 小野寺諒, 中村一史, 栗津和弘, 新倉利之: 補強鋼板を接着した GFRP 板と鋼板の高力ボルト接合部のリラクゼーション試験, 土木学会, 第 78 回年次学術講演会講演概要集, Vol.78, CS6-11, 2023.
- 4) 高橋京祐, 中村一史, タイウィナル, 堀井久一: 当て板と鋼板の接着接合部の疲労強度とはく離進展特性に関する実験的検討, 土木学会, 土木学会論文集, Vol.79, No.14, 22-14002, 2023.
- 5) 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, 土木学会, 第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集, 16\_1-8, 2012.
- 6) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 7) 株式会社 IHI インフラ建設: IS パネル (コンクリート床版補強工法) 技術紹介 [https://www.ihico.jp/iik/technology/under\\_deck\\_panel/index.html](https://www.ihico.jp/iik/technology/under_deck_panel/index.html), 2023 年 8 月 25 日閲覧確認

(Received August 25, 2023)

## STATIC AND FATIGUE TEST ON HIGH-STRENGTH BOLTED JOINTS BETWEEN HYBRID FRP COMPOSITE GIRDERS AND STEEL GIRDERS

Ryo ONODERA, Hitoshi NAKAMURA, Kensuke KOBAYASHI,  
Koichi HANAMURA and Toshiyuki NIIKURA

Shear bearing joints of FRP members using bolts depend on the material strength of the FRP members, which is smaller than that of steel members. The authors have proposed a high-strength bolted friction joint of GFRP plates reinforced by bonded steel plates as a method to improve the load bearing capacity of the joint between GFRP plates and steel plates. In this study, specimens were fabricated by applying the proposed joint method to the joint between a hybrid FRP girder and a steel girder, and the load carrying capacity and fatigue durability of the girder joint were experimentally investigated. The static tests showed that the failure of girder joints was preceded by slip or delamination, and that the smaller rate of bolt axial force preceded the slip failure. Fatigue tests showed that although initial delamination occurred at the adhesive joints in a small load range, the initial delamination did not affect the fatigue durability of the girder joints.