

(46) 鋼・FRP混合部材の高力ボルト接合部強度に関する実験的検討

石間 啓介¹・橋本 国太郎²

¹学生会員 神戸大学大学院博士前期課程 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: 166t103t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Polymer : 以下, FRP) は軽量かつ高強度であり, 耐食性にも優れていることから構造物の建設だけでなく, 既存構造物の補修・補強に利用する事例が増加している. そこで鋼橋の部材取り換え時に部分的にFRP部材を使用する場合, 鋼・FRP混合部材となり, その異種部材同士の接合方法には各材料の特性を把握し, 十分に検討する必要がある. また, 土木鋼構造物の現場接合としては, 高力ボルト摩擦接合が主流ではあるが, FRP部材の接合にボルト摩擦接合を用いた事例はほとんどない. そこで本研究では鋼・FRP混合部材の高力ボルトによる摩擦接合を対象に, 接合部の引張試験を行い, 接合部強度, すべり係数, 高力ボルトのリラクセーションを検討した.

Key Words : CFRP, GFRP, steel and FRP mixed structure, high strength bolted joint, joint strength

1. 研究背景および目的

繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Polymer : 以下, FRP) の中でもガラス繊維を用いたGFRP(Glass Fiber Reinforced Polyme), は軽量かつ高強度で, 耐食性にも優れ, また, 他の強化繊維に比べ安価であることから水門, 歩道や検査路などの新設の構造物に利用され始めてきている. 一方, FRPを用いた既存構造物の補修や補強には, これまで, 繊維強化材に炭素繊維を用いたCFRP(Carbon Fiber Reinforced Polyme)もしくはアラミド繊維を用いたAFRP(Aramid Fiber Reinforced Polyme)が主に採用されている.

また, 土木構造物の補修や補強に上述したFRPを用いた検討は多くなされてきているが, 基本的には炭素繊維シートやアラミド繊維シートもしくはプレート状にしたものを既設構造物に接着し既設構造物の強度を増加させている.

しかし, 最近一部の鋼橋で, 腐食環境が悪く, ほとんど点検をしてこなかった橋では, 腐食が進行し, 一部の部材や板の板厚が無くなるような重度な損傷事例が見受けられる. その場合, その腐食欠損した部材を取り換えることが考えられるが, 同じ鋼材で取り換えたとしても, 元々腐食環境が厳しい場所では同様の損傷を繰り返す可

能性がある. そこで, 高耐食性のFRP材料を用いた部材への取り換えなどが有効な手段として考えられる. その場合, 前述したFRPシートやプレートによる補修・補強と同様に接着接合を用いることも考えられるが, 高力ボルトを用いた摩擦接合を用いることでより信頼性の高い接合部とすることが可能と考えられる. これは, これまで高力ボルト摩擦接合は鋼構造物の現場接合で多く用いられてきており, 当て板補修・補強時や部材交換時の新規の鋼部材の取り付けでも多く用いられており信頼性が高いためである. しかし, 元々ある既設の鋼部材にFRP部材を新たに接合するときに高力ボルトを用いて摩擦接合とした事例はほとんどない.

そこで, 本研究では鋼部材とFRP部材の鋼・FRP混合部材の高力ボルト摩擦接合継手を対象に, 接合部の引張試験を行い, 接合部強度 (最大強度およびすべり強度), すべり係数, および高力ボルトのリラクセーションを検討した. ここでは, 補修補強でよく用いられるCFRP材, および新規の土木構造部への適用実績の豊富なGFRP材を使用した.

2. リラクゼーション試験および引張試験の概要

摩擦接合供試体の実験は、ボルトのキャリブレーション、実験供試体の組立て（ボルトの締め付け）、ボルトリラクゼーション試験、载荷実験（引張試験）という手順で行った。

(1) 実験供試体

鋼・FRP混合部材における高力ボルトのリラクゼーションおよび接合部強度を検討するため図-1に示すように、母材の片側にFRPを用いた板、反対側に鋼材を用いた板、連結板に鋼材を使用し、ダブルラップ形式で接合した試験体を3体ずつ用意した。

使用鋼材はSS400で全試験体、表面は無機ジンクリッチペイント（膜厚 $75\mu\text{m}$ 以上）を施工している。使用ボルトはF10T高力ボルト（M16）である。

使用FRP材についてCFRP材は繊維に二方向クロス300（積層数は30）を使用し、VaRTM成形法により製作した試験体を用意した。VaRTM成形技術とは、FRPなどの強化材をプラスチックフィルム等で封入し、真空吸引した後に、液体樹脂を注入・含浸して硬化させて、成型する製造技術である。

GFRP材は繊維にロービングクロス600（積層数は20）を使用し、ハンドレイアップ成形法により製作した試験体を用意した。

各試験体のFRP板のすべり面はサンドブラストによって施工されている。表面粗さの測定結果として算術平均粗さRaおよび十点平均粗さRzJISの平均値を表-1に示す。また、鋼材側の接合面は、実際の仕様を考慮して全て無機ジンクリッチペイントを $75\mu\text{m}$ 以上施している。

(2) ボルトのキャリブレーション

ボルト締め付け時のボルト軸力を把握するために、ボルト軸力とボルト頭部に貼付したひずみとの関係を調べ、そのひずみからボルトに導入された軸力を把握できるように、実験供試体の組立ての前に、すべてのボルトに対し、キャリブレーションを行った。ボルトのひずみは、ボルト頭部に2軸ゲージを貼付し、キャリブレーション用の引張冶具を用い、ボルトを弾性範囲内で引っ張った。図-2には、ボルト頭部に貼付した結果の一例として、荷重-ひずみ関係を示している。図-2に示すひずみ値は平均値である。この図より、荷重-ひずみ関係は線形的であることがわかる。

(3) リラクゼーション試験

全試験体にトルクレンチを用いて設計ボルト軸力106kNの10%増しである標準軸力117kNを目標に軸力を

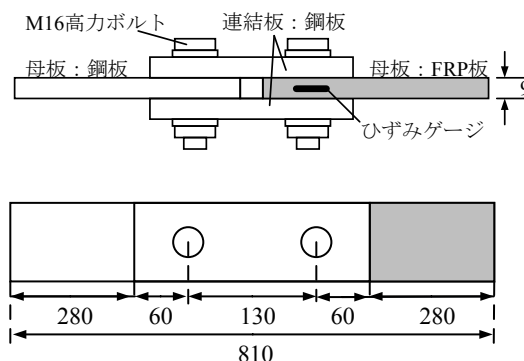


図-1 試験体の概要（単位：mm）

表-1 表面粗さ測定結果（平均値）

	Ra(μm)	RzJIS(μm)
CFRP板	3.67	12.3
GFRP板	2.21	10.7

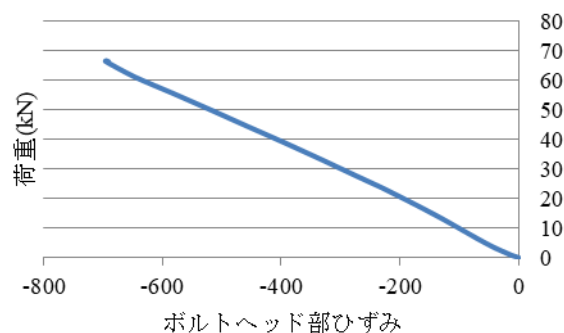


図-2 荷重-ひずみ関係の一例



図-3 引張試験状況

導入し、その後 7日間計測を行った。軸力導入の際は、一次締め付けとして、すべてのボルトに対し、設計軸力の6割程度を導入し、その後、二次締め付けとして標準軸力に達するまで締め付けを行った。締め付け中は、ボルトに貼付したひずみゲージの値を読み取り、軸力はそのひずみ値で管理した。

(4) 引張試験

摩擦接合による鋼・FRP混合部材における接合部の最大強度、すべり耐力、すべり係数および摩擦係数を確認するため図-3に示すように万能試験機（島津製作所製：UH-1000kNXh）を用いて荷重、変位、ひずみおよび試験機ストロークを測定した。なお、引張試験は、ボルト軸力導入後、7日間経過してから開始した。

3. 実験結果

(1) リラクゼーション試験

a) 鋼・CFRP試験体

鋼・CFRP混合部材のリラクゼーション試験結果を図-4および表-2に示す。7日後のボルト軸力低下率の平均は母板の種類別に見ると、鋼側のボルト軸力低下率は12.1%，CFRP側のボルト軸力低下率は10.5%であった。すべてのボルトにおいて軸力導入直後に大きく軸力が低下し、約24時間後に安定した。

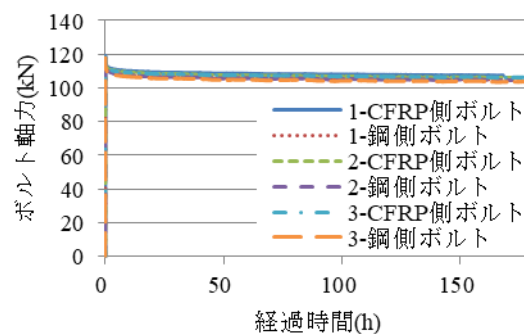
母板の種類によってボルト軸力低下率が変化したことの考察として母板の厚さの違いが原因のひとつと考えられる。母板の厚さを計測したところ、鋼板の厚さは9.00mmであるのに対してCFRP板の厚さは約9.25mmであった。これによりボルト締め付け力が連結板および母板に均等に伝達せず、ボルト軸力にも影響が及んだと考えられる。

b) 鋼・GFRP試験体

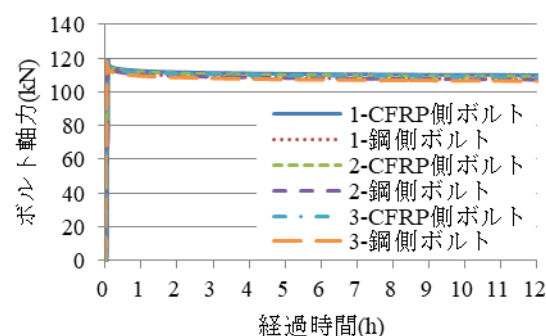
鋼・GFRP混合部材のリラクゼーション試験結果を図-5および表-2に示す。7日後のボルト軸力低下率の平均は母板の種類別に見ると、鋼側のボルト軸力低下率は16.5%，GFRP側のボルト軸力低下率は13.5%であった。すべてのボルトにおいて軸力導入直後に大きく軸力が低下し、約24時間後に安定した。

表-2 ボルト軸力低下率

	ボルト位置	ボルト軸力低下率 (%)		
		1日後	3日後	7日後
CFRP	鋼側	10.2	11.1	12.1
	CFRP側	8.56	9.45	10.5
GFRP	鋼側	12.9	14.8	16.5
	GFRP側	11.3	12.8	13.5

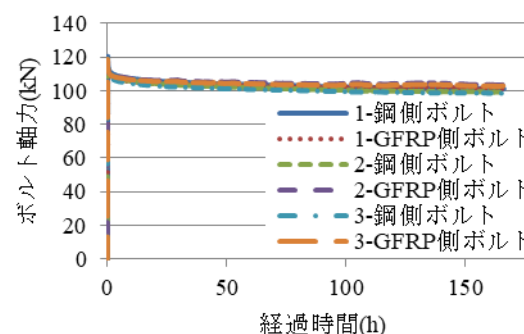


(a)試験結果（7日間）

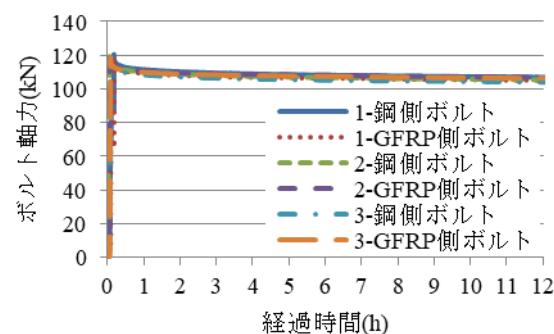


(b)試験結果（初期12時間）

図-4 CFRPリラクゼーション試験結果



(a)試験結果（7日間）



(b)試験結果（初期12時間）

図-5 GFRPリラクゼーション試験結果

母板の種類によってボルト軸力低下率が変化したことの考察としてはCFRP試験体と同様に母板の厚さが原因のひとつと考えられる。母板の厚さを計測したところ、鋼板の厚さは9.00mmであるのに対してGFRP板の厚さは約8.5mmであった。

以上の結果より、リラクセーションの一番大きい試験体は鋼材であり、次いでGFRP、一番小さい試験体はCFRPとなった。CFRPとGFRPはほとんど差が出なかったが、鋼材とFRP材とでは差が生じていることがわかる。これは、上述した板厚差という理由もあるが、そもそも鋼材の表面には無機ジンクリッチペイントを施しており、それによりボルト軸力が抜けたと考えられ、その抜け量よりも、連結板に鋼材を用いることでFRP材の方の軸力抜けが小さいということがわかった。

(2) 引張試験

a) CFRP試験体

鋼・CFRP混合部材の引張試験結果を図-6(a)～図-8(a)および表-3～4に示す。

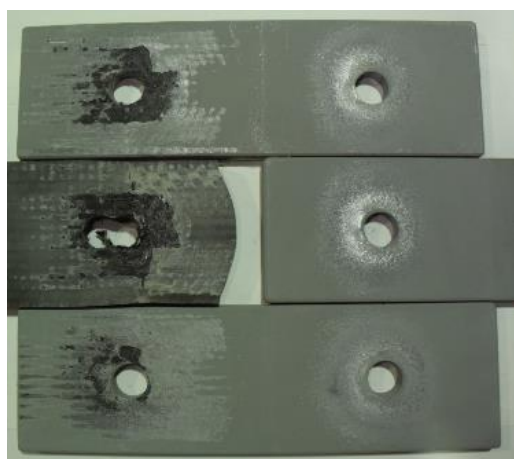
表-3に示すようにCFRP側母板のすべり荷重は117kN、

鋼側母板のすべり荷重は146kN、最大荷重は154kNであった。

図-6(a)には、載荷実験終了後の実験供試体を示している。最終の破壊モードはCFRP側の母板ですべりが生じた後、ボルトと母材の孔が支圧状態となり、鋼側の母板ですべりが生じ、最終的にはCFRP板の支圧引張破壊となった。鋼・CFRP試験体では、CFRP板の表層が剥がれるような状態となっており、これより鋼板の無機ジンクリッチペイントがCFRP板表面の凹凸に食い込み、すべり時にはCFRP表層が破壊することで、すべりが発生したと考えられる。

また、表-4に示すようにすべり荷重と各ボルト軸力よりすべり係数および摩擦係数を算出した。すべての値において道路橋示方書の規定値である0.45以上となっており、すべり係数の観点からは十分な値といえる。

図-8(a)はCFRP板の側面ひずみと引張荷重の関係を示している。CFRP板のすべり荷重に達するまでは引張力が作用していて、その後圧縮が作用し、鋼板がすべり荷重に達した後は再び引張力が作用している。これより、CFRP板がすべり荷重に達した後は、CFRP板の孔がボル

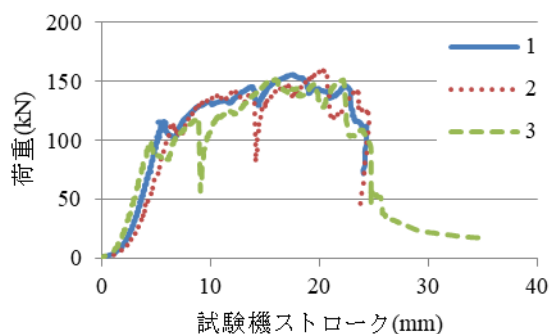


(a)鋼・CFRP試験体

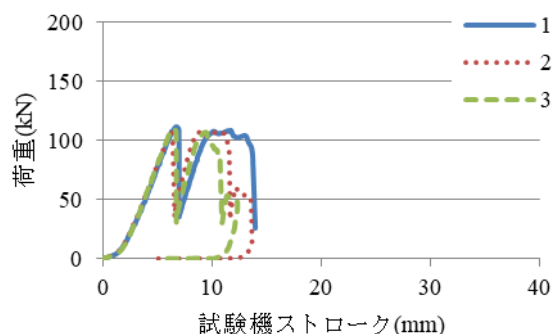


(b)鋼・GFRP試験体

図-6 終局状態



(a)鋼・CFRP試験体



(b)鋼・GFRP試験体

図-7 荷重-試験機ストローク関係

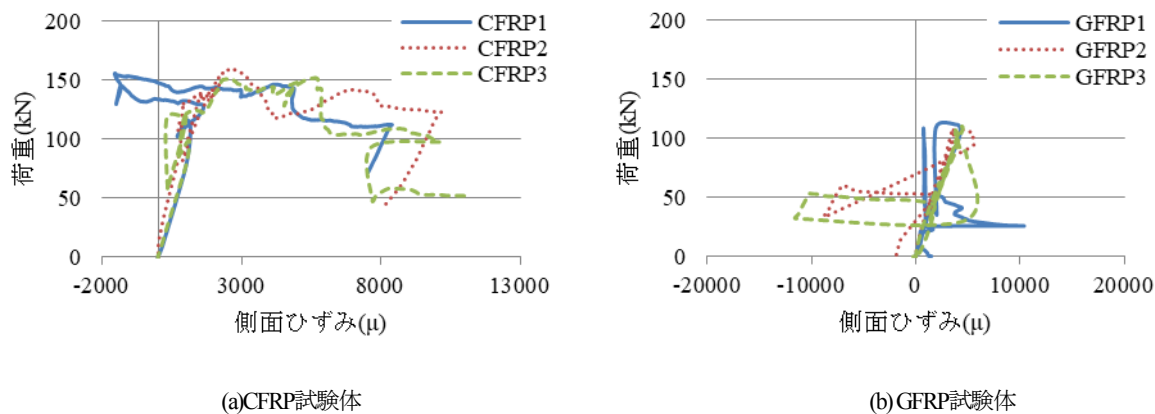


図-8 荷重-側面ひずみ関係

表-3 すべり荷重および最大荷重

		FRP側 すべり荷重(kN)	平均 (kN)	鋼側 すべり荷重(kN)	平均 (kN)	最大荷重 (kN)	平均 (kN)
鋼・CFRP	1	116	117	146	146	156	156
	2	115		142		159	
	3	119		152		152	
鋼・GFRP	1	112	110	—	—	112	110
	2	107		—		109	
	3	110		—		110	

※鋼・GFRP試験体については鋼側母材のすべりが生じる前に破断した。

表-4 すべり係数および摩擦係数

		すべり係数		摩擦係数
		1	2	
鋼・CFRP	鋼側	0.692	0.705	0.745
	CFRP側	0.551	0.549	0.597
鋼・GFRP	鋼側	—	—	—
	GFRP側	0.517	0.534	0.590

※すべり係数1は設計軸力(106kN)，すべり係数2は載荷実験直前の軸力，摩擦係数はすべりが発生した時の軸力で計算した値である。

トに支圧され，鋼板がすべり荷重に達した後は図-6(a)でもわかるようにCFRP板の支圧が進行し，最終的には引張破壊した。

b) GFRP試験体

鋼・GFRP混合部材の引張試験結果を図-6(b)～図-8(b)および表-3～4に示す。

表-3に示すようにGFRP板のすべり荷重および最大荷重は110kNであった。図-6(b)には，載荷実験終了後の実験供試体を示している。破壊モードはGFRP側の母板ですべりが生じた後，GFRP板の孔がボルトによって支圧され，最終的にはGFRP板の引張破壊となった。鋼・GFRP試験体ではGFRP板接合面のボルト孔周辺には無機ジンクリッチペイントが付着しており，鋼板表面のペイントが剥がれていることより，無機ジンクリッチペイントが破壊したと考えられる。

また，表-4に示すようにすべり荷重と各ボルト軸力よ

りGFRP板のすべり係数および摩擦係数を算出した。すべての値において道路橋示方書の規定値である0.45以上となっており，すべり係数の観点からは十分な値といえる。

図-8(b)はGFRP板の側面ひずみと引張荷重の関係を示している。すべり荷重に達するまでは引張力が作用しており，その後圧縮力が作用していることより，GFRP板が支圧化されていることが確認できる。

4. 結論

本研究では鋼・FRP混合部材の継手性能を確認するためにリラクセーション試験および引張試験を行った。いかにその結果をまとめる。

- 1) リラクセーション試験の結果，鋼・CFRP混合部材の場合，高力ボルトの軸力は7日間で10～12%程度低下し，鋼・GFRP混合部材の場合，高力ボルトの軸力は7日間で13～17%程度低下した。いずれのケースでも鋼材側

のリラクセーション量が大きかった。

- 2) 引張試験の結果、鋼・CFRP試験体では117kNでCFRP板ですべりが生じ、146kNで鋼板のすべりが生じ、最終的に156kNでCFRP板に支圧引張破壊が生じた。鋼・GFRP試験体では110kNでGFRP板ですべりが生じ、鋼板のすべりは確認できなかったが、最終的には、110kNでGFRP板に支圧引張破壊が生じた。
- 3) 鋼・CFRP試験体ではCFRP板のすべり係数は0.551、鋼板のすべり係数は0.692、鋼・GFRP試験体ではGFRP板

のすべり係数は0.517となり、いずれの試験体でも道路橋示方書の規定値を上回った。

謝辞：本研究の実験供試体の製作は（株）ヒビ日比英輝社長をはじめスタッフ一同および東レ（株）松井孝洋氏に多大なご支援・ご指導を賜りました。ここに記して謝意を表します。

EXPERIMENTAL STUDY ON HIGH STRENGTH BOLTED CONNECTION FOR STEEL AND FRP MIXED STRUCTURE

Keisuke ISHIMA and Kunitaro HASHIMOTO

FRP (Fiber Reinforced Polymers) is a composite material made of a polymer matrix reinforced with fibers. The fibers are usually used glass, carbon, or aramid. FRP have been applied in a variety of ways because of the many advantages which are light weight, non-corrosion and high strength. The connection between steel members and FRP members is necessary, when FRP members are partially used for steel bridges. And high strength bolt friction joining is mainstream for civil engineering steel construction, but there are few case using bolt friction welding for joining FRP members. Therefore this study describes on strength and mechanical properties of high strength bolt friction joining for steel and FRP mix structure . Joining strength, slip factor and relaxation in high strength bolt for steel and FRP mix structure are investigated through experiments.