

ハイブリッドFRP部材と鋼部材の高力ボルトによる継手強度とリラクセーション特性

岩崎 初美¹・松井 孝洋²・近藤 富士夫³・齋藤 舜⁴・中村 一史⁵

¹正会員 株式会社 I H I 社会基盤・海洋事業領域 (〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1-1)
E-mail: hatsumi_iwasaki@ihi.co.jp

²正会員 東レ株式会社 ACM技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町二丁目1-1)
E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

³東レ株式会社 コンポジット技術1部 (〒455-0024 愛知県名古屋港区大江町9-1)
E-mail: Fujio_Kondo@nts.toray.co.jp

⁴正会員 首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: saito-shun@ed.tmu.ac.jp

⁵正会員 首都大学東京 准教授 大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: nakamura-hitoshi@tmu.ac.jp

本研究では、鋼板と炭素繊維及びガラス繊維からなるハイブリッドFRP板間の1面せん断継手の合理的な接合方法を検討した。特に、鋼橋の構造部材をハイブリッドFRP部材で代替することを検証するために、必要な実験を行った。従来と比べて弾性率、耐クリープ特性を高めたハイブリッドFRPを用い、種々の接合条件をパラメータとして引張試験とリラクセーション試験を実施した。その結果、高力ボルト接合に接着剤を併用することで、継手耐力が増加することがわかった。また、リラクセーション試験の結果、設計ボルト軸力を確保できることを確認した。

Key Words : hybrid FRP, high strength bolted connections, joint strenght, relaxation

1. はじめに

FRPは、鋼材に比べ軽量であり、優れた耐腐食性を保有していることが長所である。そこで、腐食した鋼部材の交換部材として、FRPの適用が期待される。例えば、既設鋼橋で腐食した端対傾構や横構などの二次部材の代替材料としてFRP形材の利用が考えられる。

しかし、我が国における橋梁の構造用材料として、FRPが適用された事例は鋼に比べて少なく、FRPは橋梁製作における主要な構造用材料とはなっていない。鋼に比べて低弾性のガラス繊維強化プラスチック (GFRP) を適用した場合、大断面が必要となる一方、高弾性の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を適用した場合には、材料コストが高くなる。そこで、炭素繊維補強プラスチック (CFRP) とガラス繊維補強プラスチック (GFRP) を層状に設けたハイブリッドFRP (Hybrid Fiber Reinforced Plastic ; HFRP) を用いることとした。

これまでに、FRPを用いた部材の接合方法に関する研究^{1)~10)}が行われており、HFRPのクリープ変形に伴うリ

ラクセーションの検証、継手の耐荷力に対する安全性の確認が実施されつつある。

損傷した鋼部材を撤去しHFRP部材を取り付ける場合、鋼部材が取り付けられていた摩擦接合用高力ボルト孔を使用しHFRP部材を取り付けることが合理的である。高力ボルトには摩擦接合用高力ボルトと支圧接合用高力ボルトがあるが、高力ボルト支圧接合の場合ボルト軸径とボルト孔径が同一であり、現地で各部材をあわせて孔明け作業を行う必要があり、施工時間が長くなる。そこで摩擦接合用高力ボルトを用いたHFRP形材と鋼部材の継手において、継手強度が高くリラクセーションの少ない継手構造を提案する。

そこで本研究では、従来¹⁰⁾と比べて、弾性率を高めたハイブリッドFRP、さらに耐クリープ特性も向上させたハイブリッドFRPを用い、異種材料間1面せん断継手の合理的な接合方法を提案することを目的として実験的な研究を行った。接合材料には、摩擦接合用高力ボルト (F10T M22) を用い、エポキシ樹脂接着剤を併用するなど、種々の接合条件をパラメータとした継手試験体を

製作して、引張試験を実施した。それに加え、HFRP材と鋼部材からなる異種継手において、高力ボルトの軸力を長期間計測し、高力ボルトのリラクゼーションについて検証した。

2. 材料特性

HFRP部材は、炭素繊維を一方向に配置し、繊維直角方向あるいはせん断方向に抵抗する方向にガラス繊維を配置したハイブリッド構造とした。また、マトリックス樹脂はビニルエステル樹脂を用い、クリープの小さい耐クリープハイブリッドFRP部材を使用した。HFRP板の製造方法は真空含浸工法（VaRTM: Vacuum assisted resin transfer molding）を使用した。

表-1に、材料物性値を示す。HFRP板と鋼板についてはメーカーによる材料試験の計測値、高力ボルトについては材料証明書の値である。

3. 継手引張試験

(1) 試験概要

既設鋼橋における腐食した鋼製二次部材をハイブリッドFRP部材で代替するため、継手の引張試験を行い、継手構造の検討を実施した。表-2に、継手引張試験の試験ケースを示す。また、図-1～図-3に、継手引張試験用の試験体図を示す。

本試験では、材質、接合方法、接着剤の有無、ボルト列数、ボルトピッチをパラメータとした。ボルトは摩擦接合用高力ボルト（F10T M22）を使用した。なお、鋼部材における高力ボルト摩擦接合の設計に基づき、ボルトの縁端距離は40mmを基本とし、ボルト孔径26mmの拡大孔とした。写真-1に、継手試験体の接合面の状態を示す。接合面は鋼板・HFRP板とも、アルミナ（#24）によるブラスト処理を行った。表面粗さの計測値（平均値）は、鋼板で29.9 μ m、HFRP板で40.3 μ mであった。写真-2に、試験体の接着接合の状態を示す。接着剤を使用

した試験体は、1週間室温（23 $^{\circ}$ C）養生した後、引張試験を実施した。写真-3に、ボルト締め付けの状況を示す。ボルト軸力の導入にはトルクレンチを使用し、設計軸力（205kN）の10%増しを目標値として導入した。この試験体の導入軸力は、ボルト頭部に設置した二軸ゲージを用いて計測した。なお、TYPE3の接着方法は接着併用であるが、接着剤の硬化後に本締めを行ったTYPE3aと、

表-2 継手引張試験の試験ケース

タイプ	試験体の材質	接合方法	締め付け条件	ボルト列数	ボルトピッチ (mm)	挿入軸力 (kN)
TYPE3a	鋼-HFRP	接着併用	硬化後	2	75	230
TYPE3b				2	75	202
TYPE4			2	112	225*	
TYPE5			3	75	225*	
TYPE10		摩擦	—	2	75	225*
TYPE12	HFRP同士	接着併用	接着時	2	75	225*

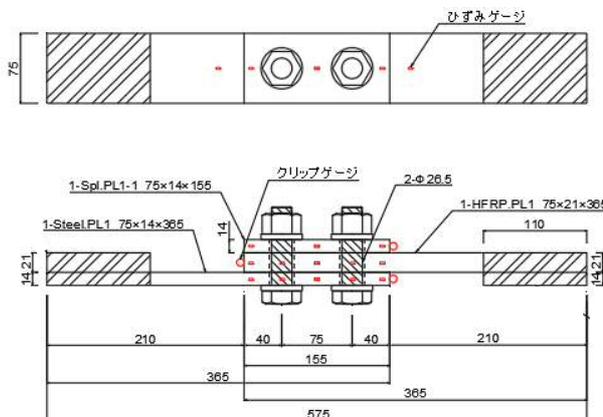


図-1 継手引張試験用の試験体（TYPE 3a,3b,TYPE10）

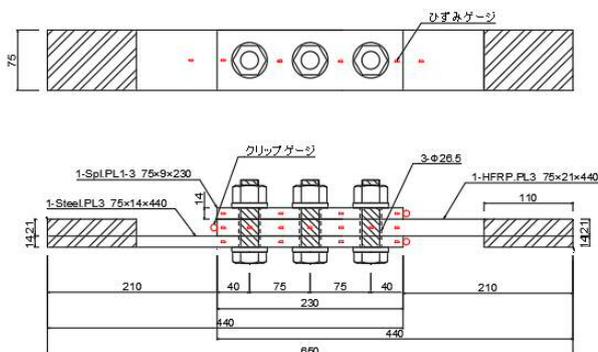


図-2 継手引張試験用の試験体（TYPE 4）

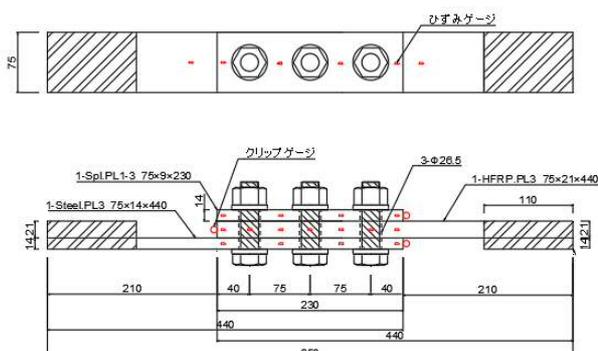


図-3 継手引張試験用の試験体（TYPE5）

表-1 材料物性値

HFRP板 (板厚 21mm)	弾性係数 (kN/mm ²)	1469
	引張強度 (N/mm ²)	8424*
鋼板 (SM570, 板厚 14mm)	弾性係数 (kN/mm ²)	206
	降伏強度 (N/mm ²)	577
接着剤 (コニシ E258R) **	引張強度 (N/mm ²)	647
	圧縮強度 (N/mm ²)	77
	圧縮弾性係数 (N/mm ²)	3.6
	引張せん断接着強さ (N/mm ²)	26
摩擦接合用高力ボルト (F10TM22) ***	耐力 (Nmm ²)	1030
	引張強度 (N/mm ²)	1068
	トルク係数値	0.131

* 定着部で破壊した時の最大引張応力（暫定値）

** メーカーによる計測値

*** 材料検査証明書値

接着と同時に本締めを行なったTYPE3bを比較することで、締め付け時期が継手耐力に及ぼす影響を検討した。写真-4に、載荷試験の状況を示す。実験には、万能試験機（容量：1000kN）を使用し、載荷速度を2.5mm/minと

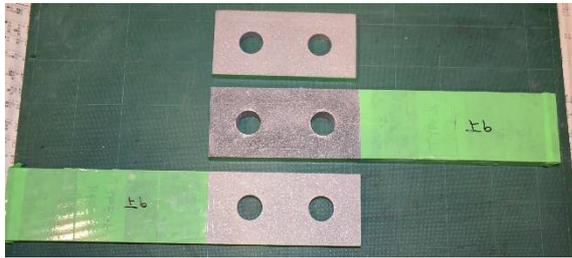


写真-1 継手試験体の接合面の状態



写真-2 接着接合の状況



写真-3 ボルト締め付けの状況



写真-4 載荷試験の状況

して破壊まで載荷した。試験体にはHFRP板の側面及び鋼板の表面と側面に1軸ゲージ（ゲージ長3mm）を設置した。部材間の相対変位を計測するために π 型変位計を設置した。

(2) 試験結果

表-3に、継手の引張試験の結果を示す。試験体ごとに表層部破壊荷重、すべり荷重、すべり係数、最大荷重、破壊形式を示す。本試験では端部に設置したクリップゲージで計測した鋼板とHFRP板の相対変位と荷重の関係から、最初に変形が急増し非線形挙動を示した点をすべり点として、その荷重をすべり荷重として評価した。また、接着接合併用の場合、最初に変形が急増し非線形挙動を示した点を観察した。今回は、HFRPの表層部の破

表-3 継手引張試験結果

タイプ	表層部破壊荷重 (kN)	すべり荷重 (kN)	すべり係数	最大荷重 (kN)	破壊モード
TYPE3a	2922	-	-	3708	HFRP 部材の純断面引張破壊
TYPE3b	2847	-	-	3645	
TYPE4	3141	-	-	4042	
TYPE5	3762	-	-	4208	
TYPE10	-	2192	0.486	358.7	
TYPE12	2863	-	-	378.7	

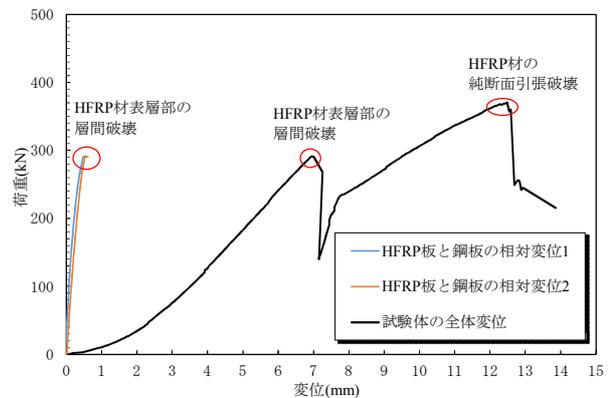


図-4 荷重-変位関係 (TYPE3a)

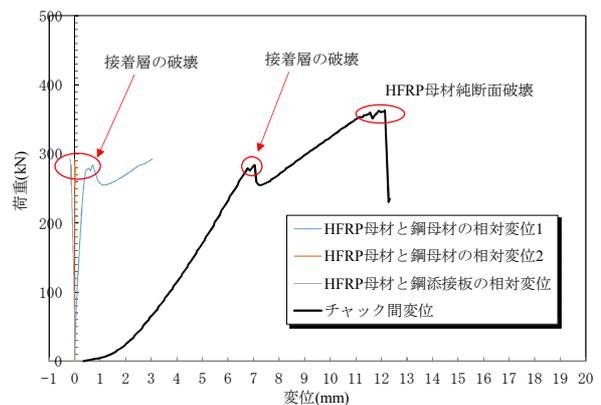


図-5 荷重-変位関係 (TYPE3b)

壊が発生していたので、その荷重を表層部破壊荷重とした。

試験結果から、摩擦接合された試験体TYPE10はすべり係数が0.486であり、道路橋示方書の規格値0.4を上回る値であった。また、接着接合併用の試験体については、すべて表層部破壊荷重は道路橋示方書の規格値を上回る値であった。

図-4～図-8に、TYPE3a, TYPE3b, TYPE4, TYPE5, TYPE10における荷重-変位関係を示す。クリップゲー

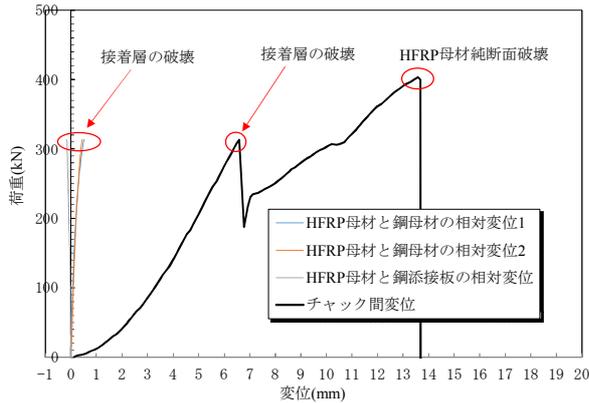


図-6 荷重-変位関係 (TYPE4)

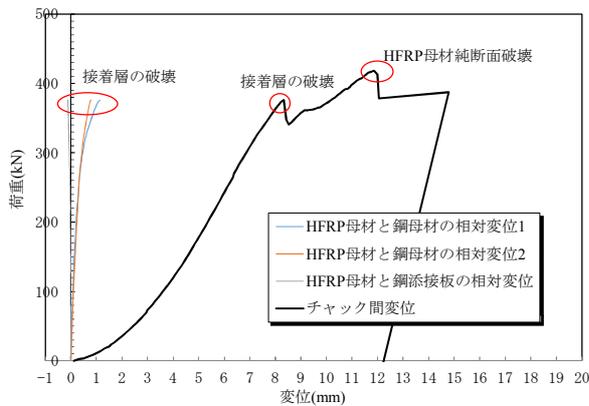


図-7 荷重-変位関係 (TYPE5)

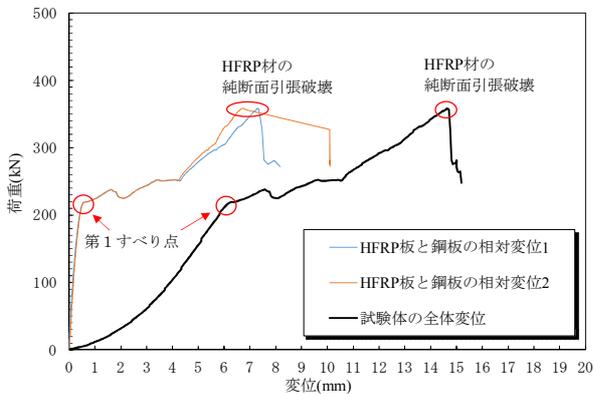


図-8 荷重-変位関係 (TYPE10)

ジの変位を相対変位、試験機のチャックの変位を全体変位とした。全体変位は試験体全体の伸びが含まれるので相対変位を用いて継手のすべり特性を評価した。

TYPE3a, TYPE3bの表層破壊荷重は、292.2kN, 284.7kNであり、どちらも道路橋示方書で規定されるすべり係数(0.4)より必要とされる荷重を上回っており、接着併用ボルト接合の場合、接着時にボルトを締め付けることで、継手耐力を確保できることがわかった。

TYPE3b, TYPE4の比較より、ボルトピッチの影響を確認する。TYPE3b, TYPE4の表層破壊荷重は、284.7kN, 314.1kNでありTYPE4の方が大きい。これは、TYPE3b, TYPE4のボルトピッチが、75mm, 112mmであり接着面積が増加したことに起因するものと推察される。

TYPE3b, TYPE5の比較より、ボルト本数の影響を確認する。TYPE3b, TYPE5の表層破壊荷重は、284.7kN, 370.2kNであり、ボルト本数が2本から3本に増加することで、荷重が増加することが確認できた。

表-3より、HFRP板同士の接着併用ボルト接合であるTYPE12においても、表層破壊荷重は286.3kNでありHFRP板と鋼板の継手TYPE3b (284.7kN) と同等の荷重を確保することが確認できた。

写真-5, 写真-6に、TYPE4, TYPE10の破壊後の写真を示す。接着接合を併用したTYPE4は、荷重の増加とともにHFRP板の表層部で層間破壊が生じた後、HFRP板とボルトが支圧状態となりHFRP板のボルト近傍で純断面引張破壊が生じている。この挙動は接着併用した試験体で全て同じであった。

摩擦接合を使用したTYPE10は荷重の増加とともにす



写真-5 HFRP板の接合面の表層はく離破壊 (TYPE4)

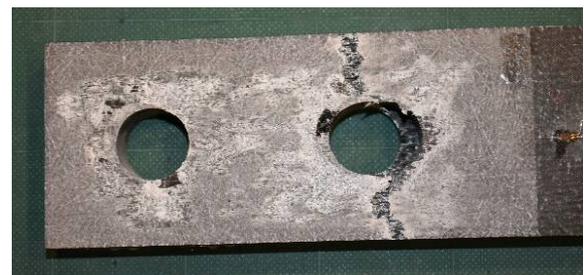


写真-6 HFRP板の純断面引張破壊 (TYPE10)

べりが生じ、HFRP板とボルトが支圧状態になりHFRP板のボルト近傍で純断面引張破壊が生じている。

図-9に、TYPE3aのHFRP板と鋼板のひずみ分布を示す。全ての試験体において、破壊は断面CでのHFRP純断面引張破壊であった。HFRP板では破壊断面C近傍（断面B、D）で最大荷重時に高いひずみが発生していることがわかる。また、TYPE3aの鋼板では、鋼側ボルト孔断面Eで、最大荷重時に降伏ひずみ（ 2770×10^{-6} ）を超えるひずみが生じていることがわかる。

4. リラクゼーション試験

(1) 試験概要

端対傾構にHFRP部材を使用することを想定し、高力ボルト継手の試験体を製作した。図-10に、試験体を示す。端対傾構の上弦材のHFRPガセットと鋼桁の垂直補剛材の継手を想定し試験体BL、CRを設けた。また、端対傾構の上弦材のHFRP形材とHFRPガセットの継手を想定して試験体CRDを設けた。試験体BL、CRは、HFRP板と鋼板の一面接合継手でありHFRP板の外側に鋼添接板

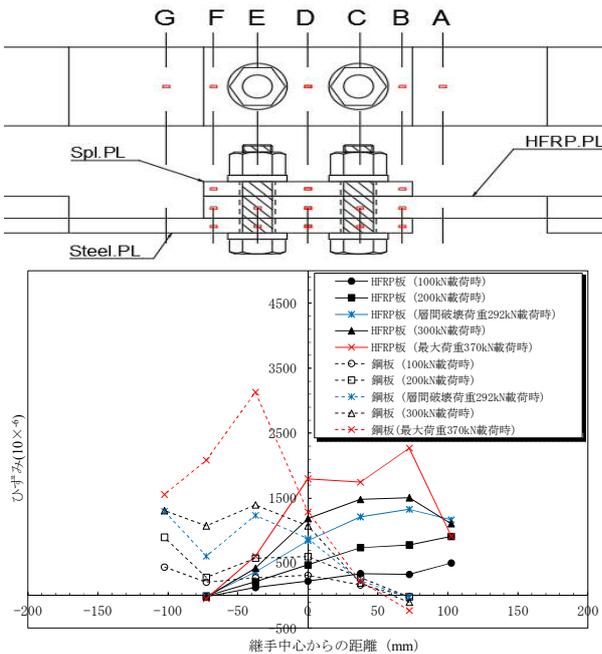


図-9 継手試験体図と継手部のひずみ分布 (TYPE3a)

表-4 試験体ケース

試験体	接着	HFRP板の種類	HFRP板の枚数	増し締め	数量
BL	有	高弾性炭素繊維板	1	無	2
CR	有	耐クリープ炭素繊維板	1	無	2
CRD1	有	耐クリープ炭素繊維板	2	無	1
CRD2	有	耐クリープ炭素繊維板	2	本締め24H後に増締め	1

を追加した構造である。試験体CRDはHFRP板とHFRP形材の一面接合継手であり、HFRP板の外側に鋼添接板を追加した構造である。表-4に、試験体ケースを示す。試験体BLは高弾性炭素繊維板を使用し、試験体CR、CRDは耐クリープ炭素繊維板を使用した。また、試験体

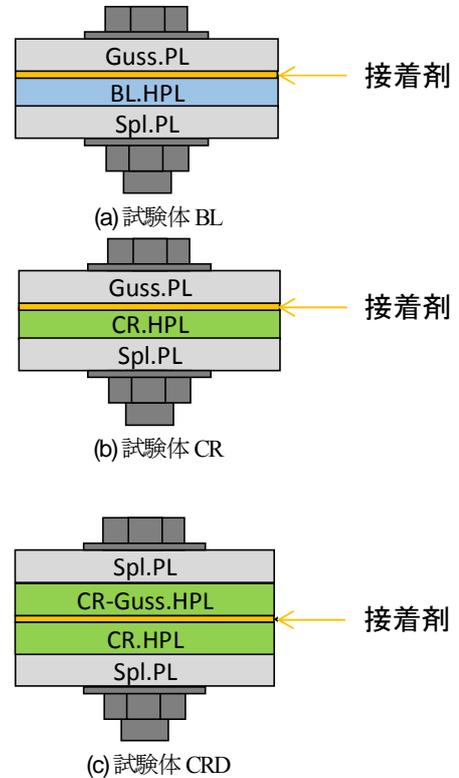


図-10 リラクゼーション試験における試験体

表-5 表面粗さ計測の結果 (平均値)

種類	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{MS} (μm)
HFRP板	7.21	43.0	32.8
鋼板	7.29	42.1	29.8



写真-7 チャンバーによる温度管理の状況

CRD2は本締め24時間後に増締めを行った。なお、試験体は既設鋼橋の継手の縁端距離40mmを考慮し幅80mm×80mmとした。また、今回の試験では、試験体の孔径は26mmφとし、接合面に接着剤（コニシE258R）を使用する条件に統一した。表-5に、表面粗さ計測結果を示す。HFRP板、鋼板ともアルミナ（#24）によるサンドブラストにより処理を行い、必要な表面粗さを確保した。また、接着剤の養生を行うため、試験体の接着後、チャンバー内で約23℃の温度で8日間の養生を行った（写真-7）。実験ではトルクレンチを使用して設計ボルト軸力205kNを割り増して軸力を導入した。なお、使用した摩擦接合用高力ボルト（M22 F10T）には、埋め込み式の

ワイヤーストレインゲージを設置し、ボルト軸力を計測した。

(2) 試験結果と考察

表-6に、ボルト軸力の計測値を示す。また、図-11に、ボルト軸力と経過時間の関係を、図-12に、温度補正後のボルト軸力と経過時間の関係をそれぞれ示す。なお、経過時間は、ボルトの締付けから500時間後（約3週間）と5000時間後（約7ヶ月）の計測結果について示している。また、ボルト軸力は温度（室温）変化に応じて変化しているため、文献10)と同様の方法で、温度補正を行った。式(1)に、ワイヤーストレインゲージの補正ひず

表-6 ボルト軸力の計測値（温度補正後）

試験体	ボルト軸力 (kN)				軸力の初期値に対する軸力低下量 (kN)		設計ボルト軸力 (205kN) に対する軸力の残存率 (%)		
	目標値	初期値	500時間後	5000時間後	500時間後	5000時間後	初期値	500時間後	5000時間後
BL1	237.0	236.3	232.0	223.4	4.3	12.8	115.2	113.1	109.0
BL2	239.9	240.9	233.5	225.2	7.3	15.6	117.5	113.9	109.9
CR1	239.9	238.7	233.2	226.4	5.4	12.3	116.4	113.8	110.4
CR2	237.3	237.6	232.2	224.7	5.4	12.9	115.9	113.3	109.6
CRD1	234.8	232.1	222.0	211.8	10.1	20.3	113.2	108.3	103.3
CRD2	236.8	228.2	218.1	205.9	10.1	22.3	111.3	106.4	100.4

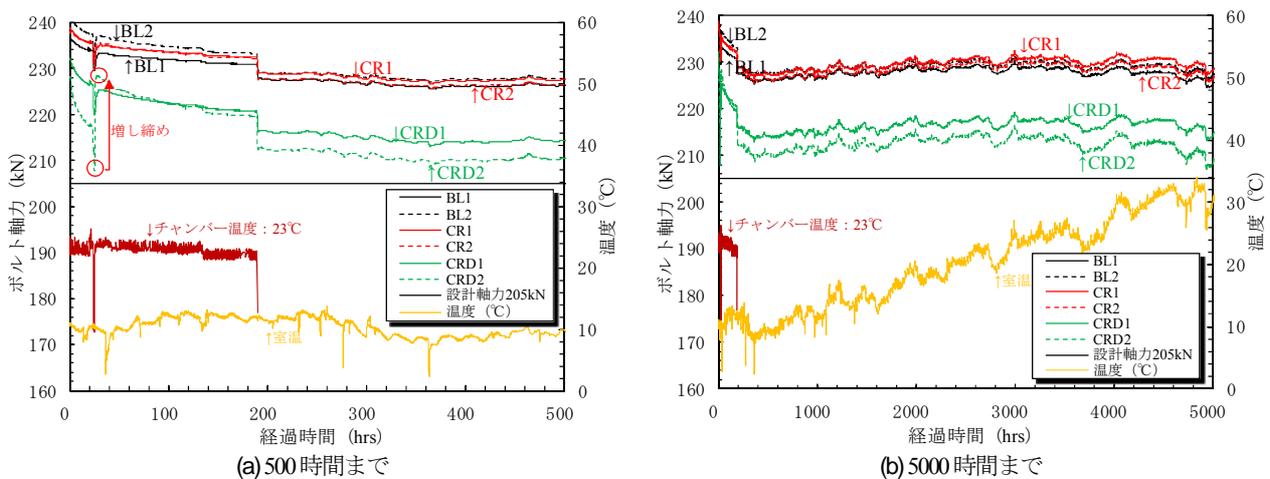


図-11 ボルト軸力と経過時間の関係（温度補正前）

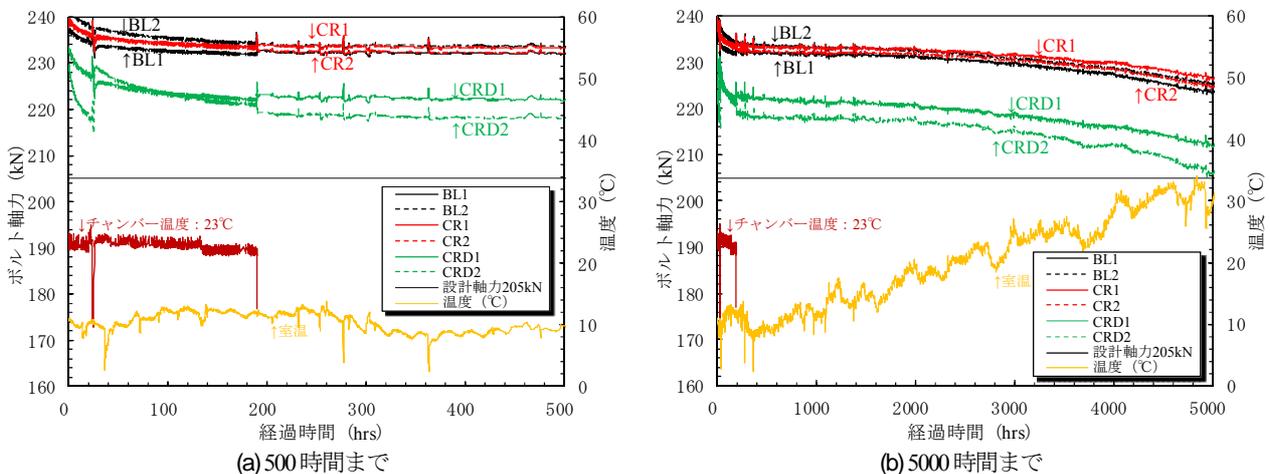


図-12 温度補正後のボルト軸力と経過時間の関係

み ε_{ci} の算定式を示す。

$$\varepsilon_{ci} = \varepsilon_i + c_T \cdot (T_i - T_0) \quad (1)$$

ここに、 ε_i は経過時間 i のワイヤーストレインゲージのひずみ、 c_T は補正係数、 T_0 はボルト軸力導入時の温度、 T_i は経過時間 i の温度である。本実験における補正係数 c_T は、それぞれ試験体BL、CRで15、CRDで20であった。

表-6、図-11 (a)より、CRD2は、他の試験体に比べて、目標値に対して初期値の差が大きいこと、24時間後の低下も大きかったことから、室温において、増し締めを行った。それによりCRD1と同等までボルト軸力が回復するが、CRD1と比べてボルト軸力の低下の度合いが大きいことがわかる。

図-11より、季節による室温の温度変化によりボルト軸力が変動すること、また、室温の上昇に伴って、ボルト軸力が微増もしくは一定に推移することがわかる。これに対して、温度補正後を行った図-12からは、温度変化の影響が小さくなり、ボルト軸力は時間の経過とともに漸減している状況がわかる。特に、300時間後あたりまでの軸力の低下量が大きく、それ以降は徐々に低下する傾向が見られた。なお、1週間(167時間)後に、チャンバー(約23℃)による養生を終了し、室温(12.8℃)に戻しているが、図-12 (a)より、この時の温度変化(約-11℃)で、温度補正を行っても軸力に差が生じていることがわかる。これは、養生中にエポキシ樹脂接着剤の硬化が軸力及ぼす影響と考えられた。

これらの図表より、5000時間後、試験体BL、CR、CRDとも設計ボルト軸力205kNを確保できていることがわかるが、試験体CRDでは、設計ボルト軸力に近い値となっており、時間の経過とともに軸力が漸減するものと考えられ、下回ることも予想される。また、鋼板とHFRP板の継手を想定した試験体BL、CRと、HFRP板とHFRP板の継手を想定した試験体CRDを比較すると、試験体CRDの方がリラクセーションは比較的大きいことがわかる。これは、試験体CRDはHFRP板の合計板厚が2倍になっているため、クリープ変形が大きくなりリラクセーションが増加したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、耐クリープハイブリッドFRPを対象に、異種材料間1面せん断継手の合理的な接合方法を提案することを目的として実験的な研究を行った。本試験で得られた成果を以下に示す。

(1) 耐クリープハイブリッドFRP材を使用することで、HFRP板と鋼板の1面せん断継手及びHFRP板同士の間1面せん断継手のすべり荷重、及び表層部破壊荷重は、道路橋示方書の規格のすべり係数0.4に対応する荷重を上回ることを確認できた。

- (2) 接着併用高力ボルト接合において、接着直後にボルトを締め付けた場合、また接着後養生しボルトを締め付けた場合とも、継手耐力に影響がないことが確認できた。
- (3) HFRP板と鋼板の1面せん断継手において、接着を併用した高力ボルト接合は摩擦接合に比べ、継手耐力が増加した。
- (4) 耐クリープハイブリッドFRP板を使用した継手のリラクセーション試験の結果、5000時間後までは、全ての試験体で設計ボルト軸力205kNが確保されることがわかった。
- (5) HFRP板とHFRP板の継手は、鋼板とHFRP板の継手に比べリラクセーションが大きくなる傾向が確認できた。

参考文献

- 1) 木嶋健, 勝野壽男, 小林憲治, 日野伸一, 西崎到: FRPボルト接合における軸力の経時変化に関する実験的検討, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, CS10-004, pp.449-450, 2006.
- 2) 小林憲治, 大本透, 日野伸一, 貝沼重信, 山口浩平, 青木卓也: 接着剤およびボルト接合を用いたGFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, CS02-042, pp.131-132, 2008.
- 3) 山本育実, 睦好宏史, 浅本晋吾, 松井孝洋: ハイブリッドFRP桁のボルト接合に関する実験的検討, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, CS02-054, pp.155-156, 2008.
- 4) 橋本国太郎, 山内弘之, 杉浦邦征, 日比英輝: GFRP部材のボルト接合法に関する実験的研究, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, CS02-008, pp.15-16, 2010.
- 5) 片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 松井孝洋, 鈴川研二, 吉田一, 柳沼謙一: ハイブリッドFRP部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する実験的研究, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, CS02-012, pp.23-24, 2010.
- 6) 濱崎景太, 片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: 高力ボルトと接着剤を用いたハイブリッドFRP部材の接合法に関する実験的研究, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, CS02-033, pp.65-66, 2011.
- 7) 永田拓也, 石丸勝, 林耕四郎, 皆田理, 勝野壽男: GFRP材料の高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究, 土木学会第54回中国支部研究発表会発表概要集, 第54巻, pp.69-70, 2002.
- 8) 永田拓也, 皆田理, 石丸勝, 勝野壽男, 林耕四郎: GFRP材料を用いた高力ボルト摩擦接合の力学的挙動, 土木学会第55回中国支部研究発表会発表概要集, 第55巻, pp.57-58, 2003.
- 9) 片野洋輔, 中村一史, 前田研一, 柳沼謙一, 松井孝洋: 実大部分模型を用いたハイブリッドFRP桁と鋼桁の高力ボルト

ト接合方法に関する研究, 土木学会第 67 回年次学術講演
会講演概要集, CS02-032, pp.63-64, 2012.

FRP部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する強度特性, 構
造工学論文集, Vol.64A, pp.769-778, 2018.

10) 岩崎初美, 松井孝洋, 小林拳祐, 中村一史: ハイブリッド

JOINT STRENGTH AND RELAXATION OF HIGH STRENGTH BOLTED CONNECTIONS BETWEEN HYBRID FRP MEMBERS AND STEEL MEMBERS

Hatsumi IWASAKI, Takahiro MATUI, Fujio KONDO, Shun SAITO
and Hitoshi NAKAMURA

In this study, the reasonable design method of single lap shear joints between steel plates and hybrid FRP plates which made of carbon fibers and glass fibers was investigated experimentally. In particular, the experimental tests have been conducted in order to replace the structural members of steel bridges with hybrid FRP members. Using the hybrid FRP plates with high elastic modulus and creep resistant, tensile tests and relaxation tests were carried out with various joining conditions as parameters. The result shows that the tensile strength in joints using high strength bolts and adhesive increased. In the result of relaxation tests, it was also confirmed that the bolt axial forces were over the design bolt axial force.