FRTPリベットによるFRP材接合法の提案と カ学性能評価 - 梁継手の耐力評価とクリープ特性-

松井 健良¹・松本 幸大²・松下 義幸³

¹豊橋技術科学大学大学院生 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) E-mail: matsui.takayoshi.us@tut.jp

²正会員 豊橋技術科学大学大学院准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) E-mail: matsumoto.yukihiro.lp@tut.jp

³イオインダストリー株式会社 技術営業部開発室(〒431-0302 静岡県湖西市新居町新居 3380-500) E-mail: matsushitay@io-industry.co.jp

近年, FRP 材の構造用部材としての適用が進められている.適用にあたっては接合法の検討が必要となるが,一般的には金属材料による機械接合が使用されており, FRP 材の特長である耐腐食性を十分に生かした接合になっていないと考える.また,ボルトなどの接合部にクリアランスがあることで,均一な荷重伝達が行われず耐力低下につながる可能性がある.そこで筆者らは熱可塑性樹脂を使用した FRTP 製のリベットによる接合法を提案し,接合評価を行っている.

本論では FRTP リベットにより継手した梁部材の 4 点曲げ試験及びクリープ試験を行った. その結果, FRTP リベットの材料試験から算定された梁継手の継手部耐力は実験と良い対応を示すことを明らかにした. また, FRTP リベットは時間の対数に対して線形的なクリープ変形を示すことを明らかにした.

Key Words: FRTP, rivet, beam connection, creep

1. はじめに

FRP 材は軽量性や対腐食性に優れた材料であり,建築 土木分野においては構造物の補修・補強をはじめとし, 近年では構造用部材としての利用が進められている^{1.2}. FRP 歩道橋や FRP 検査路などへの適用事例が見られるが, FRP 材を構造用部材として利用するにあたっては接合法 の検討が重要となってくる.FRP 材の接合法としては機 械接合や接着接合,またそれらを組み合わせた接合法な どが提案されており,一般的には金属製のボルトやリベ ットによる支圧接合が採用されている.しかしながら, 金属製の接合具は腐食する可能性があり,特に塩分の飛 散が多い海岸部の構造物では腐食の被害が多く,FRP 材 の持つ耐腐食性を十分に発揮することができないと考え る.また,FRP 材は鋼材のように塑性変形が期待できな いため,接合時にFRP材と接合具の間に不均一なクリア ランスが存在すると十分な応力分配がなされず,期待す る耐力を発揮できない可能性がある.

一方,材料分野においてはマトリックス樹脂に熱可塑 性樹脂を使用した FRP(以下,FRTP)が注目されてい る.FRTPは熱を与えることで軟化する性質を持ってお り,現場での二次加工やリサイクルによる環境負荷低減 が期待されている.また,製造技術の進歩により,射出 成型やプレス成型といった手法によって従来に比べて高 速で製造することが可能となり,大量生産による低コス ト化が期待されている³.

これらの背景を踏まえ,筆者らはFRP材の特長を生か した接合法として,FRTP 製のリベットによる接合法の 提案と評価を行っている⁴⁰.併せて,接合時にドリルビ スによる仮止めの工程を行うことでクリアランスを限り なく小さくする方法を検討している^{7,8)}.既往の研究で はFRTP リベットの基礎物性値の計測として引張,剪断, 曲げ試験を行った.その結果,他の機械接合と比較する とFRTP リベット1本あたりの引張及び剪断耐力は低い ものの,ばらつきが小さく安定した耐力を持つことを明 らかにした.また,GFRP 材に対して複数のFRTP リベ ットにより接合した二面剪断接合部の引張試験を行った. その結果,母材とFRTP リベットのクリアランスを限り なく小さくすることができ,FRTP リベットの本数を12 本まで増やしても本数分の耐力を安定して発揮すること が可能なことを明らかにした.

本研究では FRTP リベットを梁部材の接合に用いるこ とを想定し, FRTP リベットを用いて継手した組立 H形 GFRP 材に対して 4 点曲げ試験を行った.また,クリー プ変形を評価するため, FRTP リベット接合部のクリー プ試験を行った.

2. 梁継手4点曲げ試験







図-2 梁継手4点曲げ試験 継手詳細図

(1) 試験概要

梁継手4点曲げ試験では、図-1に示すように、長さ 1000mmの組立H形GFRP材2体を梁部材とし、FRTPリ ベットを用いて継手したものを試験体とした.試験方法 としては実験値と想定耐力の比較を容易とするため、継 手部において剪断力の作用しない4点曲げ試験を採用し た.なお、継手位置を中心とし、載荷点間距離を 600mm、支持点間距離を1800mmと設定した.また、図 -1において試験体正面をA面、裏面をB面としたとき、 継手部中心を境として左側をL側、右側をR側と呼ぶこ ととする.

継手部においては、図-2 に示すように、上下フランジおよびウェブに対して添接板を介し、FRTP リベット によって接合した.FRTP リベットの配列については、 フランジウェブともに梁部材軸方向に対して8列(梁部 材片側4列), 直交方向に対して4列とした. なお,本 数と配列については, FRTP リベットによる耐力の想定 値と実験値の比較を行うため,梁部材の破壊モードに対 して FRTP リベットの破断が先行するように決定した. また,梁部材同士には 5 mmのクリアランスを設けて継手 をしており,曲げ変形時に梁部材同士が接触することに よる影響が生じないようにした.

(2) 試験体の作成

本試験で梁部材として使用する組立 H形 GFRP 材は, 溝形 GFRP 引抜材 2 体を背中合わせにし,エポキシ系接 着剤 E250 を用いて接着することにより作成した.使用 した溝形 GFRP 引抜材は既往の研究 やで行った二面剪断 継手試験において母材として使用した GFRP 板材と同じ ものを使用しており,物性値を表-1に示す.また,作成 した組立 H形 GFRP 材断面の設計値及び測定値を表-2 に 示す.

表-1 溝形 GFRP 引抜材物性値(※メーカーによる実測値)

繊維含有率[wt%]	53	JIS K 7165
引張強度[MPa]	411	JIS K 7165
引張弾性率[GPa]	28	JIS K 7052

		設計値	測定値
高さ[mm]	Н	150	151
幅[mm]	В	100	100.6
フランジ厚[mm]	<i>t</i> f	5	4.7
ウェブ厚[mm]	<i>t</i> _w	10	10.8
フランジ中立軸間距離[mm]	h	145	146.3
断面積[mm ²]	A	2400	2474.7
断面二次モーメント[mm⁴]	Ι	7545000	7627267

表-2 組立H形GFRP材寸法

継手に用いた添接板は、ガラス繊維及びエポキシ樹脂 E205 を用いて、真空含浸成形法によって成形した.ガ ラス繊維の基材構成としては、ガラスクロス 0/90 (ERW580-554A)12 層を、ガラスチョップ(ECM450-501/T) で挟んだ計 14 層としており、成形後の厚さは約 6.7mm となった.

FRTP リベットの接合作業の様子を図-3 に示す.始め にクランプを用いて梁部材と添接板を固定し,部材同士 が動かない程度にドリルビスで仮止めを行った.次に FRTP リベットの接合位置にドリルで穴をあけ,FRTP リ ベットを挿入したのち,加熱再成形によって固定した. 加熱再成形は,お椀状にくりぬいた銅製の金具を先端に 取り付けた温調可能なはんだごてを使用して行った. FRTP リベットにより梁部材と添接板を固定できた後, 始めに打ち込んだドリルビスを引き抜き,FRTP リベッ トに差し替えた. 接合後の試験体の様子を図-4に示す. なお, 試験体の座屈を防ぐため, 載荷点及び支持点にあ たる位置に補剛材として木材片をエポキシ系接着剤によ り取り付けた.



図-3 梁継手4点曲げ試験 接合の様子



図-4 梁継手4点曲げ試験 接合後の試験体の様子

(3) 予想耐力と変形量

FRTP リベットによる継手耐力の算定にあたり,FRTP リベットが負担する曲げモーメント M_R を考える.フラ ンジに接合された FRTP リベットが負担する曲げモーメ ント $M_{B'}$ は式(2a)に示すように,フランジ中立軸間距離 hに,片端のフランジに接合されている FRTP リベットの 本数 $n_{B'}$ と1本あたりの二面剪断耐力 F_R を乗ずることで 求めた.なお,FRTP リベットの二面剪断耐力は,既往 の研究 0 で行った二面剪断継手試験において FRTP リベ ット 1 本で継手した試験体より得られた値である 2.717kNを用いた.

$$M_{Rf} = n_{Rf} \cdot F_R \cdot h \tag{2a}$$

また、ウェブに接合された FRTP リベットが負担する 曲げモーメント M_{Rw} は式(2b)に示すように、FRTP リベッ ト継手の重心位置から各 FRTP リベットまでの距離 nに、 その FRTP リベットが負担する最大荷重 F_{R} を乗じたもの の和として求めた. 各 FRTP リベットが負担する最大荷 重は、梁材中立軸を基準としたフランジ中立軸までの高 さh/2に対する各 FRTP リベットまでの高さhの比に, FRTP リベットの二面剪断耐力を乗じたものとして計算 した.

$$M_{Rw} = \sum r_i \cdot F_{Ri} = \sum r_i \cdot \frac{h_i}{h/2}$$
(2b)

FRTP リベットが負担する曲げモーメントは式(2c)に示 すように,フランジとウェブのそれぞれのFRTP リベッ トが負担する曲げモーメントの和として求めた.

$$M_R = M_{Rf} + M_{Rw} \tag{2c}$$

この時に試験体に作用する荷重 P_R は、式(2d)に示すように、支持点から載荷点までの距離 lを用いて求めた.

$$P_R = \frac{2M_R}{l} \tag{2d}$$

次に、荷重Pが作用した時の試験体中央及び載荷点に おける変形量を考える.中央で継手された梁部材の変形 量の算定にあたっては図-5に示すように、梁理論により 求められる曲げ変形量 δ_b 及び剪断変形量 δ_s に、中央を ピンとし曲げモーメントが作用したモデルを考え、 FRTP リベットが変形することを考慮して求めた変形量 δ_r を加えることで求めた.



図-5 梁継手4点曲げ試験 変形量の算定モデル

梁理論より、梁部材のヤング率を E、断面二次モーメントを I とすると、曲げによる試験体中央の変形量 δ_{k0} は式(2e)、載荷点の変形量 δ_{b0} は式(2f)を用いて求めた.

$$\delta_{b(1)} = \frac{23Pl^3}{48EI} \tag{2e}$$

$$\delta_{b(2)} = \frac{5Pl^3}{12EI} \tag{2f}$$

同様に梁理論より,梁部材の断面積をA,剪断弾性率 をG,剪断補正係数を κ とすると,剪断力による試験体 中央の変形量 $\delta_{3(0)}$,及び載荷点の変形量 $\delta_{3(2)}$ は式(2g)を 用いて求めた.なお,剪断弾性率は梁部材の繊維含有率 から複合則を用いて求めた値である1.9GPaとした.また, 剪断補正係数は梁部材の全断面積に対するウェブ断面面 積の比である 1.71 とした.

$$\delta_{s(1)} = \delta_{s(2)} = \frac{\kappa P l}{2GA} \tag{2g}$$

FRTP リベットの変形を考慮した時の梁部材の変形量 の導出にあたっては、始めに、荷重 Pが作用した時にフ ランジに接合された FRTP リベットに作用する剪断力 Q を、式(2h)に示すように試験体中央に作用する曲げモー メント Mとフランジ中立軸間距離 h から求めた.

$$Q = \frac{M}{h} = \frac{Pl}{2h}$$
(2h)

この時のフランジの水平方向の変形量 δ_{h} は,式(2i)に 示すように FRTP リベット 1 本あたりが負担する剪断力 と FRTP リベットの二面剪断剛性 K_R から求めた.なお, 二面剪断剛性については,既往の研究 4 で行った二面剪 断継手試験において FRTP リベット 1 本で継手した試験 体より得られた値である 4.123kN/mm を用いた.

$$\delta_{fh} = \frac{Q}{n_{Rf}K_R} = \frac{Pl}{2n_{Rf}hK_R}$$
(2i)

求めた水平方向の変形量より、中立軸を中心とした梁の回転角 θは式(2)を用いて求めた.

$$\theta = \frac{2\delta_{fh}}{h} = \frac{Pl}{n_{Rf}h^2K_R}$$
(2j)

式(2k)及び式(2l)に示すように、梁の回転角に支持点からの距離を乗ずることで、FRTP リベットの変形を考慮した時の試験体中央の変形量 δ_{n0} ,及び載荷点の変形量 δ_{n2} が求められる.

$$\delta_{r(1)} = \theta \cdot \frac{3}{2}l = \frac{3Pl^2}{2n_{Rr}h^2K_R}$$
(2k)

$$\delta_{r(2)} = \theta \cdot l = \frac{Pl^2}{n_{Rf}h^2 K_R}$$
(21)

よって,想定される変形量は式(2m)及び式(2n)に示すように,各計算モデルより得られた変形量の和として求めた.

$$\delta_{(1)} = \delta_{b(1)} + \delta_{s(1)} + \delta_{r(1)}$$
(2m)

$$\delta_{(2)} = \delta_{b(2)} + \delta_{s(2)} + \delta_{r(2)} \tag{2n}$$

計算により求めた4点曲げ試験の最大荷重及び変形量の想定値を表-3に示す.なお、計算に用いた梁部材の寸法については表-2に示す設計値を使用した.

表-3 梁継手4点曲げ試験 想定耐力と変形量

想定耐力[kN]	変形量[mm]		
		中央	載荷点
	δ_b	10.95	9.52
22.35	δ_s	2.57	2.57
	δ_r	8.70	5.80
	δ	22.23	17.90

(4) 試験結果

試験は準静的とし,FRTP リベット継手が破壊するま で行った.試験では荷重及び継手部中央と載荷点の変位 の計測を行った.変位の計測位置を図-6に示す.また試 験時の様子を図-7に示す.



図-6 梁継手4点曲げ試験 変位計測位置



図-7 梁継手4点曲げ試験 試験の様子

試験の結果, FRTP リベットの破断によって最大荷重 が決定した.試験によって得られた最大荷重及び最大荷 重時の変位を表-4にに示す.試験によって得られた最大 荷重は想定した値と非常に近い値を示しており,梁部材 の接合においても想定通りの耐力が期待できることがわ かった.また,このことからすべての FRTP リベットが 荷重負担を行っていると考えられる.試験より得られた 変形量についても想定した値と非常に近い値を示してお り,梁理論による曲げ・剪断変形に加え,FRTP リベッ トの変形を考慮することで,変形量の想定が可能なこと がわかった.しかしながら,梁理論より得られる曲げ変 形に比べ,FRTP リベット継手の変形量は 2 倍ほど大き い値を示しており,たわみが大きくなることが課題とし て挙げられた.

試験より得られた荷重-変位関係を図-8に示す.最大 荷重到達後は FRTP リベットの破断により急激な荷重低 下が生じていることがわかる.また,荷重に対して変位 線形はではなく,破断に近づくにつれて勾配が小さくな っていることがわかる.

具十世舌		最大荷重	重時変位[mm]	
取八何里	載荷点		載荷点	
[KIN]	中央	L平均	R平均	LR 平均
22.61	22.26	17.53	17.68	17.60

表-4 梁継手4点曲げ試験 試験結果



試験後の試験体の様子を図-9に示す.破断時の衝撃に より複数の FRTP リベットが飛び散っていることがわか る.また,主に R 側の継手において FRTP リベットが破 断していることがわかる.上フランジでは FRTP リベッ トの破断が確認されなかったものの,下フランジでは梁 外側の添接板と下フランジの境目において FRTP リベッ トが剪断破壊していることを確認した.これは梁断面の 外端において曲げモーメントによって生じる FRTP リベ ットへの剪断力が最大となることから妥当な壊れ方であ ると思われる.また,ウェブにおいては R 側の FRTP リ ベットが添接板とウェブの境目で剪断破壊しており,L 側の FRTP リベットについては破断している様子は確認 されなかった.



図-9 梁継手4点曲げ試験 試験後の様子

3. FRTP リベット接合部のクリープ試験

(1) 試験概要

本試験では FRTP リベット 1 本によりダブルラップ形 式で接合した GFRP 板材に一定の荷重を与え続け,接合 部の相対変位の時間変化を計測することでクリープ変形 に対する評価を行った.なお、GFRP 板の一端に錘を吊 り下げることにより接合部に荷重を作用させた.作用さ せる荷重の設定としては、式(3a)、(3b)に示すように、 FRTP リベット 1 本当たりの二面剪断耐力から標準偏差 の 3 倍の値を引いくことで求めた値を耐力のばらつきの 最小値とし、その値の 1/3 を載荷荷重とした.FRTP リベ ット 1 本当たりの二面剪断耐力 F_R 及び標準偏差 σ_R は、 既往の研究 $^{\Phi}$ で行った二面剪断継手試験より得られた値 を用いており、二面剪断耐力は 2.717kN、標準偏差は 0.0858kNである.

二面剪断耐力のばらつきの最小値 FRmin [kN]

$$F_{R\min} = F_R - 3\sigma_R = 2.459 \tag{3a}$$

載荷荷重 Forep [kN]

$$F_{creep} = F_{RL} / 3 = 0.820$$
 (3b)

(2) 試験方法

本試験で作成した試験体を図-10,試験治具を図-11 に 示す.試験体について,母材としている GFRP 板材は2 章の梁継手4点曲げ試験において梁部材として使用した 溝形 GFRP 材と同じ部材から切り出したものである.試 験治具について,錘としては厚さ19mmの鋼板を重ねて 使用しており,錘連結部において試験体と錘をピン接合 とすることで、偏心による曲げの影響を小さくしている. また、ボルト接合を介して試験体を直列につなげること で、同時に3体のクリープ試験を行った.表-5に試験体 の載荷荷重の算定値を示す.また表-6には同時に試験し たことによる各試験体の載荷荷重の差を示しており、載 荷荷重の差が非常に小さいことから試験体の自重による 載荷荷重の違いは無視することとした.

試験では各 FRTP リベット接合部の相対変位の変動を 計測し,計測にはパイ型変位計を使用した.試験期間は 載荷を始めてから 119 日間とし,その後錘を除荷してか らさらに5日間計測を続けた.作成した試験体を図-12に, 試験の様子を図-13 に示す.なお,試験は室温 25℃に設 定した室内において行った.





図-11 クリープ試験 試験治具図

表-5 載荷荷重の算定

載荷物質量[kg]	錘	80.334
	錘連結部	2.179
	調整錘	1.213
合言	83.726	
載荷	0.821	
想定載	0.820	
想定荷重	0.001	
過分	0.077	
合計 載荷 過分	83.7 0.8 0.0 0.0 0.0	

表-6 各試験体の載荷荷重比較

		試験体A	試験体B	試験体C
各	錘+錘連結部	83.726	83.726	83.726
部	試験体A自重		0.211	0.211
質	M8ボルトx3		0.060	0.060
量	試験体B自重			0.215
[kg]	M8ボルトx3			0.060
	合計質量[kg]	83.726	83.997	84.272
İ	載荷荷重[kN]	0.821	0.823	0.826
試験	検体 A との差[kN]	-	0.003	0.005



図-12 クリープ試験 試験体の様子



図-13 クリープ試験 試験中の様子

図GFRP板材

(3) 試験結果

試験より得られた相対変位の時間変化を図-14 及び図-15 に示す.相対変位については載荷前の状態を原点と し,各試験体の両面で計測された値の平均値としている. また,載荷後(200s)から除荷前までの範囲において求め た各試験体の時間 t の対数に対する相対変位 δの相関係 数,及び式(3c)に示すような線形式で近似した時の値を 表-7 に示す.なお,求めた各試験体の近似式を図-15 に 合わせて示す.載荷後に相対変位が徐々に増加しており, FRTP リベットがクリープ変形を起こしていることがわ かる.さらに,試験体 B を除き相関係数が 0.9 程度と高 いことから,対数軸に対して線形的なクリープ変形をし ていると考えられる.

線形近似式
$$\delta = C_1 \log_{10} t + C_2$$
 (3c)

表-7 クリープ変形の相関係数と線形近似式

	試験体		
	А	В	С
C_1	0.0168	0.0061	0.0112
C_2	0.1883	0.2075	0.1554
相関係数	0.91	0.61	0.88





図-14 相対変位の時間変化(日数軸)



図-15 相対変位の時間変化(対数軸)

4. 結論

本研究では FRTP リベットの梁部材への適用を想定し, FRTP リベットにより継手した梁部材に対して 4 点曲げ 試験を行った.また, FRTP リベットのクリープに対す る影響を調べるため, FRTP リベット接合部のクリープ 試験を行った.その結果,以下のことを明らかにした.

- (1) FRTP リベットの梁継手の耐力は,鋼構造ボルト接 合耐力と同様に,リベット1本の耐力に中立軸位置 までの距離をかけることで算定が可能である.
- (2) FRTP リベットで接合した梁継手の変形量の評価に はFRTP リベットの変形についても考慮する必要が あり,単一の梁部材と比べて変形量は大きくなる.
- (3) FRTP リベット接合部は対数時間軸に対して線形的 なクリープ変形を示す.

参考文献

- 九保圭吾:土木構造物への FRP 材料の適用事例,第
 7回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム,2018
- 2) 強化プラスチック協会: FRP60年の歩み, 2015.10
- 斎藤義弘, 鵜澤潔, 保倉篤:土木・建築分野への複 合材料の適用, 第7回 FRP 複合構造・橋梁に関する シンポジウム, 2018
- 4) 松井健良,松本幸大:FRTP リベットによる FRP 材の 接合法に関する検討,日本建築学会 技術報告集, 第 26 巻 第 63 号, pp.567-572,2020.6
- 5) 松井健良,松本幸大,松下義幸:FRTP リベットに よる FRP 材二面せん断接合部の耐力評価,第13回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演概 要集(CD-ROM), pp.438-445, 2019.11
- 6) 松本幸大,松井健良,三枝玄希,松下義幸:FRTP リベットによる接合法の提案と基礎物性評価,第7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム,2018
- 7) 井上侑也,松本幸大,三枝玄希,室本章浩,中本克 則:GFRP 板材のドリルビス接合強度に関する実験 的研究,第11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),2015.11
- 8) Nguyen Ngoc Duong, Phan Viet Nhut, Chito Satake and Yukihiro Matsumoto: Study on Mechanical Behavior of Self-Tapping Screws Connection Using Washers in Single-Lapped Glass Fiber Reinforced Plastic Plates by Experiment and Finite Element Analysis, International Conference on Building Materials and Construction (ICBMC 2018), C0027, 2018.2

(Received August 28, 2020)

MECHANICAL BEHAVIOR OF CONNECTION USING FRTP RIVETS FOR FRP STRUCTURES -STRENGTH OF BEAM JOINT AND CREEP CHARACTERISTIC-

Takayoshi MATSUI, Yukihiro MATSUMOTO, Yoshiyuki MATSUSHITA

In recent years, the application of FRP materials as structural members have been promoted. Usually, metallic rivets or bolts are used for the connection of FRP structures. Therefore, the connections are not completely prevented from corrosion. Also, smooth stress distributions cannot be performed and connection strength will be decrease due to the clearance at the connection. Therefore, the authors have proposed and studied the connection method using fiber reinforced thermoplastic (FRTP) rivets for FRP structures.

In this study, four-point bending test of beam using FRTP rivets connection and creep test of connection using FRTP rivet are carried out. As a result, it is confirmed that the connection strength of beam using FRTP rivets can be calculated from material strength of FRTP rivet and creep deformation of FRTP rivet can be evaluated using the logarithm of time.