

HPリベットによるGFRP部材の接合に関する基礎的研究

石間 啓介¹・橋本 国太郎²・日比 英輝³

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

³株式会社ヒビ (〒503-1337 岐阜県養老郡養老町直江613-1)

現在GFRP部材同士の接合は金属製のボルトもしくはリベットを使用した支圧接合やそれと接着接合との併用が用いられるが、腐食環境の厳しい場所ではFRP部材が腐食しなくても金属製ボルトが腐食するなど、耐久性の面から問題がある。そこで本研究では、ボルトやリベットなどの金属製ファスナーを使用せず、接着剤を補助的に使用するFRP製のリベット（以下、HPリベット）による接合方法を提案し、実験により、その強度特性を検討した。HP（Hand Pultrusion）リベットとは、人の手による引抜成形法で製作され、軸部とヘッド部を有するリベット形状をしたFRP製の留め具である。はじめにHPリベットの基本的な性能として、引張強度および引張弾性係数を確認するため、軸部およびヘッド部の引張試験を行った。次にHPリベットを用いた継手の強度を確認するため、引張接合部材および支圧せん断接合部材の引張試験を行った。

Key Words : FRP, HP rivet, bearing joint, tension joint

1. 研究背景および目的

近年、FRPは図-1に示すように土木構造物にも適用されつつあるが、腐食環境が厳しい場所では図-2に示すようにFRP部材が腐食しなくても接合部に使用されているステンレスボルトが腐食するなど接合部の耐久性に問題がある。また、FRPを接着剤で接合した接合方法は、多くの研究成果¹⁾があるが、安全性が担保されていないため、あまり使用されていない。

また、FRP材料を用いた支圧せん断型の留め具として、FRP製ボルト²⁾はすでに存在するが、ねじ部の強度が小さいため、大きなトルクが導入できないなどの問題がある。

そこで本研究では、接着剤を補助的に使用するFRP製のリベット（以下、HPリベット）による接合方法を提案し、実験により、その強度特性を検討する。

HP（Hand Pultrusion）リベットとは、人の手による引抜成形法で製作され、軸部とヘッド部を有するリベット形状をしたFRP製の留め具である。本研究ではこの提案したHPリベットの基本的な性能として、はじめに軸部およびヘッド部の強度を調べるために引張試験を行い、

基本的な力学的性能を検討する。次に、HPリベットを用いた引張接合継手および支圧接合継手の接合部強度を調べるために引張試験を行い、その力学的挙動を実験的に検討することを目的としている。



図-1 FRPを用いた土木構造物（羽咋巖門自転車道）



図-2 ステンレスボルトの腐食の例

2. 実験方法

(1) HPリベットの軸部引張試験

HPリベットの軸部の引張強度および引張弾性係数を確認するため、図-3に示すように $\phi 8\text{mm}$ の軸部両端にGFRP製のつかみ部を接着剤により接合した試験体を5体製作して引張試験を行った。試験体のGFRPはロービング材を使用し、繊維含有率はおおよそ31%である。

引張試験は万能試験機（島津製作所製：UH-1000kNXh）を用いて荷重および試験機ストロークを測定、軸部の中心に対称な位置に貼った2枚の1軸ひずみゲージによりひずみを測定した。

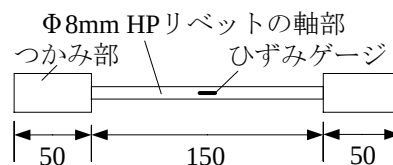


図-3 HPリベットの軸部

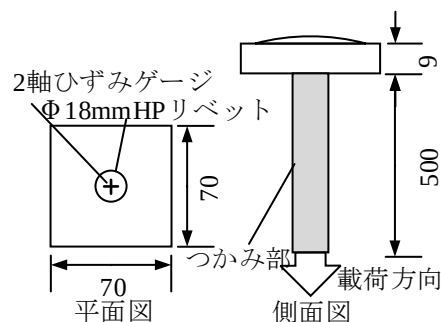


図-4 HPリベットのヘッド部

(2) HPリベットのヘッド部引張試験

HPリベットのヘッド部の引張強度を確認するため、図-4に示すように中心部に $\phi 18\text{mm}$ のHPリベットを通し、接着剤により接合した試験体を5体製作して引張試験を行った。2.(1)と同じGFRPを使用した。また、つかみ部でGFRPが破壊しないように半割とした鋼管をつかみ部に接着した。また、引張方法として図-5に示すような鋼製の治具を用いて試験を行った。

引張試験は万能試験機（島津製作所製：UH-2000kNI）を用いて荷重および試験機ストロークを測定、およびヘッド部の中心に貼った2軸ひずみゲージによりひずみを測定した。

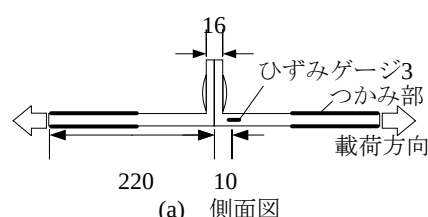


図-5 使用した鋼製の治具

(3) HPリベットを用いた引張接合継手の引張試験

HPリベットを用いた引張接合によるGFRP部材の強度を確認するため、L形の部材を接着剤のみで接合した試験体を5体、および接合面の中心に $\phi 18\text{mm}$ 孔加工を施しHPリベットを挿入し、接着剤と併用した試験体を5体製作して引張試験を行った。試験体のGFRP板は繊維にロービングクロス(#600)を使用し、その積層数は20である。図-6に試験体の概要を示す。なお、試験体のつかみ部でFRPが破壊しないようにアルミ板を接着した。

引張試験は2.(2)と同じ万能試験機を用いて荷重および試験機ストロークを測定、クリップ式変位計を用いてL形部材同士の相対変位を測定し、および1軸ひずみゲージを用いて図-6に示す位置のひずみを測定した。



(a) 側面図

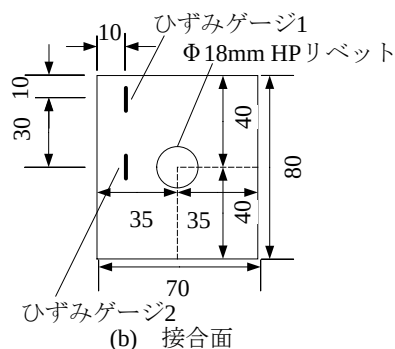


図-6 引張接合部材

(4) HPリベットを用いた支圧接合継手の引張試験

HPリベットを用いた支圧接合によるGFRP部材の強度を確認するため、接着剤のみで接合した試験体を5体、接合面の中心に $\phi 18\text{mm}$ 孔加工を施しHPリベットを埋め込み、接着剤と併用した試験体を5体、および接着剤を用いずHPリベットのみで接合した試験体を5体製作して引張試験を行った。試験体のGFRP板は2.(3)と同じ繊維および同じ積層数とした。図-7に試験体の概要を示す。

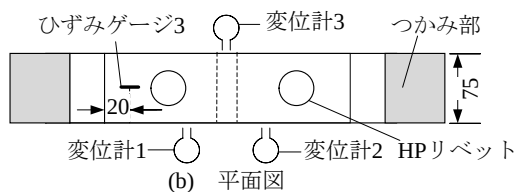
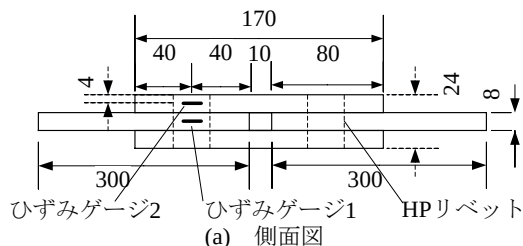


図-7 支圧接合部材

図-7に示すように継手の形状は基本的な特性を把握する観点から、ダブルラップ接合を対象とした。また、試験体のつかみ部でFRPが破壊しないようにつかみ部にアルミ板を接着した。

引張試験は2.(2)と同じ万能試験機を用いて荷重および試験機ストローク、クリップ変位計を用いて板同士の相対変位、および1軸ひずみゲージを用いて図に示す位置の板のひずみを測定した。

3. 実験結果

(1) HPリベットの軸部引張試験

試験結果を表-1、表-2、図-8 および図-9 に示す。試験体 2 については軸部とつかみ部の接着部分がすべり、破壊まで至らなかったため途中で試験を中止した。HP リベットの軸部引張試験結果として、平均最大応力は 247N/mm^2 、引張弾性係数は 14.2kN/mm^2 であった。参考とした同一メーカーの FRP 板の引張強度³⁾は 274N/mm^2 、引張弾性係数は 23.0kN/mm^2 であり、参考強度と比較すると小さい値となった。強度や弾性係数が低下した要因の 1 つとして参考値は繊維構成の違う板の強度を対象としているためと考えられる。FRP 板は繊維を交差させたロービングクロスで積層しているため、参考とした板の強度は HP リベットの強度より高い値となると考えられる。他に繊維含有率や樹脂内の繊維の配置のばらつきも 1 つの要因に挙げられる。

(2) HPリベットのヘッド部引張試験

図-10~図-12 および表-3 に試験結果を示す。表-3 より HP リベットのヘッド部引張試験結果として、平均最大応力は 96.0N/mm^2 であり、軸部試験の最大応力

242N/mm^2 と比較すると、ヘッド部の強度は軸部の半分以下の値となった。HP リベットのヘッド部はガラス繊維を直線的に配置することが難しく、ガラス繊維を折り返す形状となる。よって繊維は繊維方向に引っ張られず

表-1 最大応力

試験体	最大応力 (N/mm^2)	平均 (N/mm^2)	標準偏差
1	247	247 (242)	14.0 (9.4)
2	(219)		
3	233		
4	258		
5	251		
参考値 ²⁾		274	

() は参考値とする。

表-2 引張弾性係数

試験体	引張弾性係数 (kN/mm^2)	平均 (kN/mm^2)
1	13.4	14.2 (18.4)
2	(35.2)	
3	14.5	
4	14.8	
5	14.0	
参考値		23.0

() は参考値とする。

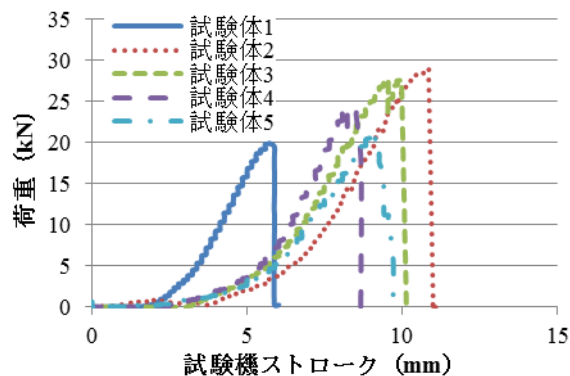


図-8 応力試験機ストローク関係

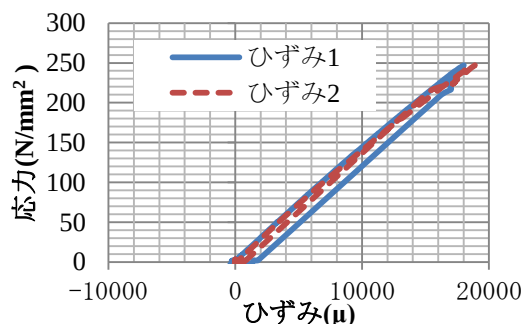


図-9 応力-ひずみ関係

ヘッド部の強度が低下したと考えられる。また、標準偏差は 13.8 となりばらつきが大きくなった。中でも試験体 1 と試験体 5 は他の試験体より最大応力が小さく、その要因として GFRP 板の製作精度が考えられる。試験体 1 と試験体 5 は特に樹脂の表面に凹凸があり、設置した時点で治具の板から少し浮いていた。その結果、応力が偏心したことで本来の強度より低くなったと考えられる。

(3) HPリベットを用いた引張接合継手の引張試験

試験後の様子を図-13に、引張試験結果を表-4と図-14以降に示す。表-4より最大荷重について接着試験体は 7.5kN、併用試験体は2度荷重が上昇し、第1ピーク荷重は10.0kN、第2ピーク荷重は9.6kNと併用試験体の方が大きい値をとった。

破壊の形式について接着試験体は最大荷重に達した時点で接着剤が破壊した。接着試験体は最大荷重に達した後、接着剤の破壊が荷重位置から進展し、ひずみ1とひずみ2は圧縮力が作用し、ゲージ箇所での接着剤が破壊した後、引張力が作用したと考えられる。また、試験後の様子から接合面のGFRPの表層が剥がれて破壊していたことから、接着剤の接着強度が大きかったと考えられる。

併用試験体は図-16より第1ピーク荷重に至るまでは接着試験体と同様に接着剤が荷重を負担し、接合面の荷重位置から破壊が進み、HPリベットに荷重が伝達、第2ピーク荷重に達した時点でHPリベットが破壊したと考えられる。併用試験体は5つの試験体のうち4体はHPリベットが途中で抜けたが、試験体3のみHPリベットが途中で抜けずにL形部材で破壊した。第1ピーク荷重以降の荷重をすべてHPリベットが負担していると仮定して、応力を求めると 37.9N/mm^2 となり、試験体3のみの応力でも 43.6N/mm^2 となった。この値をHPリベットのヘッド部強度 96.0N/mm^2 と比較すると半分以下の強度であり、強度が低下した要因としては、接合面の荷重位置から破壊が進んだことによって、HPリベットに直引張でなく曲げ引張が作用したためと考えられる。

(4) HPリベットを用いた支圧接合継手の引張試験

HP リベットを用いた支圧せん断接合部材の引張試験結果を表-5および図-17～図-20に示す。これらの図表から、平均最大荷重として、接着試験体は 85.4kN、支圧試験体は 22.3kN、併用試験体は L 形部材試験と同様に荷重が 2 度上昇し、第 1 ピーク荷重は 68.3kN、第 2 ピーク荷重は 30.8kN となった。破壊の形式について併用試験体は第 1 ピーク荷重に達するまで接着剤が荷重を負担し破壊した後、HP リベットに荷重が伝達し第 2 ピーク荷重に達して破壊した。併用試験体の強度が接着試験体より低下した原因としては、HP リベットを挿入するため

に開けた孔による接着面積の減少が考えられる。また、支圧試験体の結果より HP リベットの 1 本当たりのせん断強度を求めると 43.8N/mm^2 であり、この材料と同様の参考強度 51.3N/mm^2 と比較すると小さい値となった。強度低下の原因は軸部の引張試験と同様と考えられる。

表-3 最大応力

試験体	最大応力 (N/mm^2)	平均 (N/mm^2)	標準偏差
1	78.5	96.0	13.8
2	114		
3	109		
4	96.0		
5	83.0		



図-10 試験後の様子

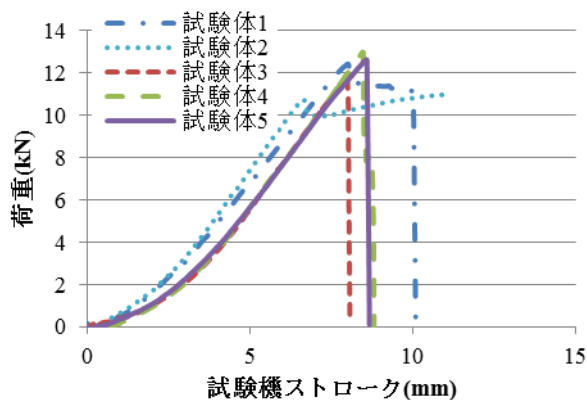


図-11 荷重-試験機ストローク関係

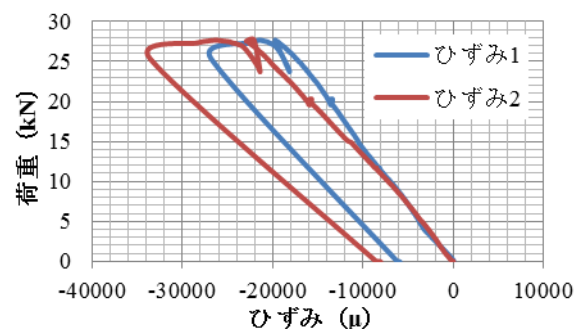
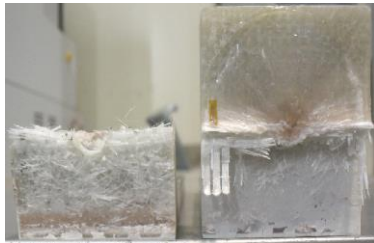


図-12 応力-ひずみ関係

表-4 最大荷重

		第1 ピーク 荷重 kN	平均 kN	標準 偏差	第2 ピーク 荷重 kN	平均 kN	標準 偏差
接着	A1	6.2	7.5	1.8	—	—	—
	A2	10.6					
	A3	7.4					
	A4	7.8					
	A5	5.6					
併用	B1	9.4	10.0	1.0	9.3	9.6	0.88
	B2	11.1			11.1		
	B3	10.0			10.2		
	B4	8.4			8.6		
	B5	10.9			9.1		



(a) HP リベットが抜けなかった試験体



(b) HP リベットが抜けた試験体

図-13 試験後の様子

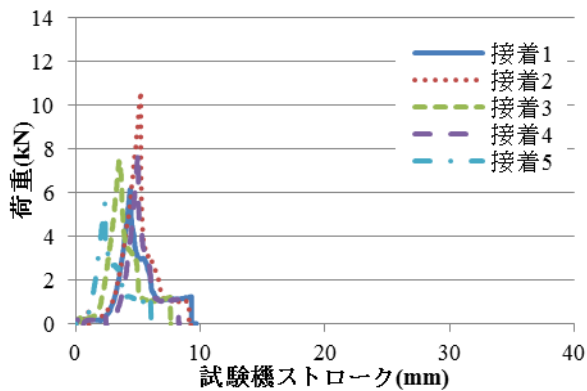


図-14 荷重-ストローク関係 (接着試験体)

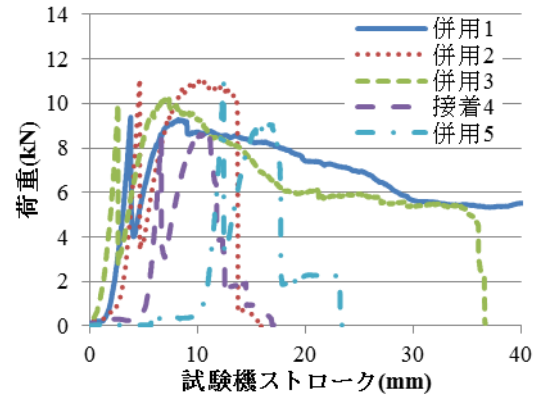


図-15 荷重-ストローク関係 (併用試験体)

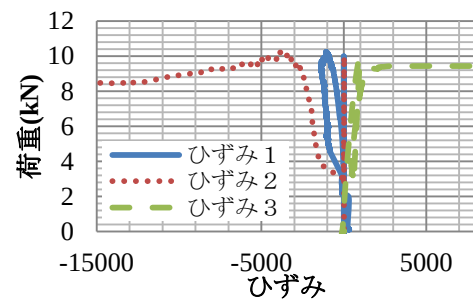


図-16 荷重-ひずみ関係 (併用試験体)

表-5 最大荷重

		第1 ピーク 荷重 kN	平均 kN	標準 偏差	第2 ピーク 荷重 kN	平均 kN	標準 偏差
接着	A1	83.8	85.4	7.3	—	—	—
	A2	73.4					
	A3	85.8					
	A4	96.2					
	A5	87.8					
支圧	B1	26.0	22.3	2.7	—	—	—
	B2	24.6					
	B3	19.2					
	B4	19.6					
	B5	22.0					
併用	AB1	84.4	68.3	11.5	—	30.8	6.7
	AB2	51.8			27.4		
	AB3	72.3			38.1		
	AB4	59.0			21.5		
	AB5	73.8			36.1		

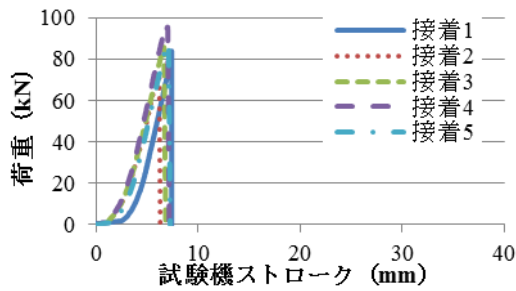


図-17 荷重-ストローク関係（接着試験体）

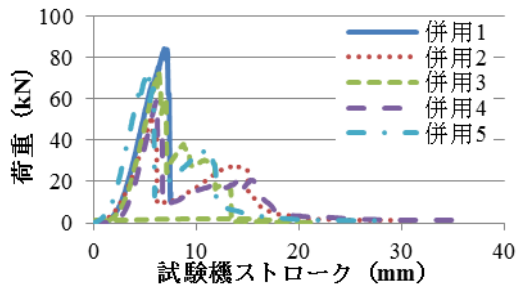


図-18 荷重-ストローク関係（併用試験体）

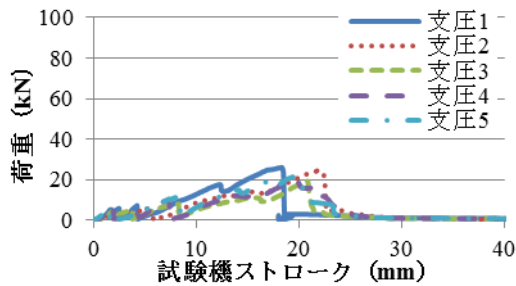


図-19 荷重-ストローク関係（支圧試験体）

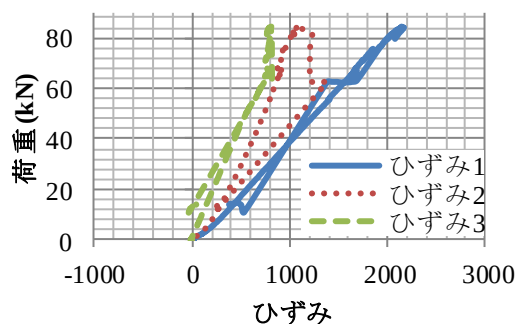


図-20 荷重-ひずみ関係（併用試験体）

4. 結論

本研究では提案したHPリベットの性能を確認するために軸部とヘッド部の強度およびHPリベットを用いた継手の強度を実験により検討した。以下にその結果をまとめる。

- (1) HPリベットの軸部の引張強度は板の参考強度の88%程度，引張弾性係数は80%程度，せん断強度は85%程度で全体的に板の参考強度より低い結果となった。
- (2) HPリベットのヘッド部の強度は軸部の引張強度と比較すると，40%程度であった。
- (3) HPリベットのせん断強度と引張強度比は板の参考強度値では0.187であるのに対して，実験結果は0.181となった。鋼材のせん断/引張強度比は0.577であり，比較するとHPリベットのせん断/引張強度比は小さい結果となった。
- (4) 引張接合では，HPリベットと接着剤を併用することで接着剤のみの継手の強度と比べて33%程度上昇した。
- (5) 支圧接合では，接着剤のみの継手の強度と比べて20%程度低下した。
- (6) HPリベットは引張接合継手のように繊維方向の応力には効果的であったが，支圧接合継手のように繊維直角方向の応力には課題が残る。

今後の課題として本実験結果を参考にし，HPリベットの改良を行い，特にせん断強度の向上を図る。

参考文献

- 1) 複合構造委員会・FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会：FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70, No.5, II_120-II 133, 2014.
- 2) 仙北谷英貴，富山禎仁，久保内昌敏，津田健，小山充彦：腐食環境下における切欠付き GFRP 丸棒の劣化に関する研究，材料，Vol.51, No.5, pp.512-517, 2012.
- 3) 土木学会複合構造委員会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），pp.195-199, 2011.1.

STUDY ON A CONNECTING METHOD OF GFRP MEMBERS USING HP RIVET

Keisuke ISHIMA, Kunitaro HASHIMOTO and Hideki HIBI

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 be-

cause of the many advantages which are light weight, non-corrosion and high strength. Metal bolts; stainless or steel bolts are almost used for connecting between GFRP members. However, even if GFRP members don't have the problem for corrosion, metal bolts are easy to corrode under heavy corrosive environment.

Therefore this study describes on connecting method of GFRP members without using fasteners made of metal. A practical method is proposed for connection of GFRP members with rivet made of FRP(HP rivet). In addition, strength and mechanical properties of the proposed joint are investigated through experiments.