

GFRP製リベットを用いたGFRP支圧せん断接合部の強度特性とその高強度化に関する研究

橋本 国太郎¹・石間 啓介²・日比 英輝³

¹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

²正会員 大林組 (研究時, 神戸大学大学院生)

³正会員 株式会社ヒビ (〒503-1337 岐阜県養老郡養老町直江 6 1 3-1)

近年, FRP 材料の中でもガラス繊維を用いたGFRPは土木構造物の主部材にも適用されつつある。それらのFRP製構造物の接合部には, ステンレスボルトなどの一般構造用鋼材と比べて高耐久性の金属材料が用いられている。しかし, 沿岸部などの腐食環境が厳しい場所では, この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耐久性に問題がある。また, 接着接合は, 多くの研究成果があるが, 安全性が担保されていないため, 接着剤のみではあまり使用されていない。さらに, FRP製ボルトはすでに開発されているが, 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。そこで著者らは, GFRP製のリベットを開発し, それによる接合法を既に提案している。本研究では, そのGFRPリベットのせん断強度の高強度化を狙って, 鉄筋によって補強したGFRPリベットを用いた継手の継手強度を検討した。その結果, 補強GFRPリベットを用いた継手の基本的な強度特性を得ることができた。

Key Words : GFRP(glass fiber reinforced plymer), GFRP rivet, dabble lapped joint, joint strength

1. はじめに

近年, FRP 材料の中でもガラス繊維を用いたGFRPは図-1に示すように土木構造物の主部材にも適用されつつある。水門では, 多くの実績があり, また歩道橋でも日本ではいくつかの建設事例が報告されている。それらのFRP製構造物の接合部には, アルミニウムもしくはステンレス製のボルトやリベットなどの鋼材と比べて高耐久性の金属材料が用いられている。しかし, 沿岸部などの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, 接着剤のみではあまり使用されていない。さらに, 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。

そこで著者らは, 既報³⁾によりGFRP製のリベット (以下, GFRPリベット) による接合方法を提案し, 接着剤と併用した継手の実験により, そのGFRPリベットそのものの強度特性や継手としたときの継手強度を検討した。

このGFRPリベットは, 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



図-1 GFRP 製歩道橋 (羽咋自転車道)



図-2 GFRP 歩道橋のステンレスボルトの腐食

FRP製の留め具である。文献3)より、GFRPリベットを用いた引張接合継手と支圧せん断接合継手の基本的な強度特性が得られたが、リベットには1方向のガラス繊維を使用しているためせん断強度が引張強度に比べて大きくなく、支圧せん断型継手の実用化に向けて課題も残った。そこで、本論文では、支圧せん断型継手の強度を改善するために、このGFRPリベット内に鉄筋を挿入した鋼・FRP複合構造としたリベットを提案し、そのリベットおよびそれを用いた支圧せん断継手のせん断強度の向上を目指し、実験的な検討を行った。なお、ここでは比較のため、文献3)で行った支圧せん断接合継手の実験も合わせて示す。

2. ダブルラップ継手の支圧せん断実験

(1) 実験供試体

はじめに、GFRPリベットを用いたせん断支圧接合継手部の基本的な強度特性を確認するため、接着剤のみで接合した試験体を5体（試験体A）、接合面の中心にφ18mm孔加工を施しGFRPリベットを施工し、接着剤と併用した試験体（試験体RA）を5体、および接着剤を用いずGFRPリベットのみで接合した試験体（試験体R）を5体製作して引張試験を行った³⁾。図-3および表-1に試験

体の概要を示す。図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。

次に、GFRPリベットを用いたせん断支圧継手のせん断強度の向上を図るため、図-4および表-1に示すようにリベットの中心にD10異形鉄筋（SD295A）を挿入した試験体（RSシリーズ）を3種類用意した。

RS1シリーズは上述の試験体RやRAと同じ寸法であり、板幅を75mm、縁端距離を40mmとしている。鉄筋入りリベットのみで接合した試験体（RS1）を5体、鉄筋入りリベットと接着剤を併用した試験体（RSA1）を5体製作して引張試験を行った。

RS2シリーズはRS1シリーズより板幅を拡幅しており、板幅を100mm、縁端距離を40mmとしている。RS1シリーズと同様に鉄筋入りリベットのみで接合した試験体（RS2）を5体、鉄筋入りリベットと接着剤を併用した試験体（RSA2）を5体製作して引張試験を行った。

RS3シリーズはRS1シリーズより縁端距離を拡幅しており、板幅を75mm、縁端距離を75mmとしている。こちらもRS1シリーズと同様に鉄筋入りリベットのみで接合した試験体を5体（RS3）、鉄筋入りリベットと接着剤を併用した試験体（RSA3）を5体製作して引張試験を行った。

表-1 GFRPリベット支圧せん断接合試験体の種類（単位：mm）

試験体名	接合方法	板厚 t	板幅 w	縁端距離 e
A	接着	9	75	-
R	リベット	9	75	40
RA	リベット+接着	9	75	40
RS1	鉄筋入りリベット	9	75	40
RSA1	鉄筋入りリベット+接着	9	75	40
RS2	鉄筋入りリベット	9	100	40
RSA2	鉄筋入りリベット+接着	9	100	40
RS3	鉄筋入りリベット	9	75	75
RSA3	鉄筋入りリベット+接着	9	75	75

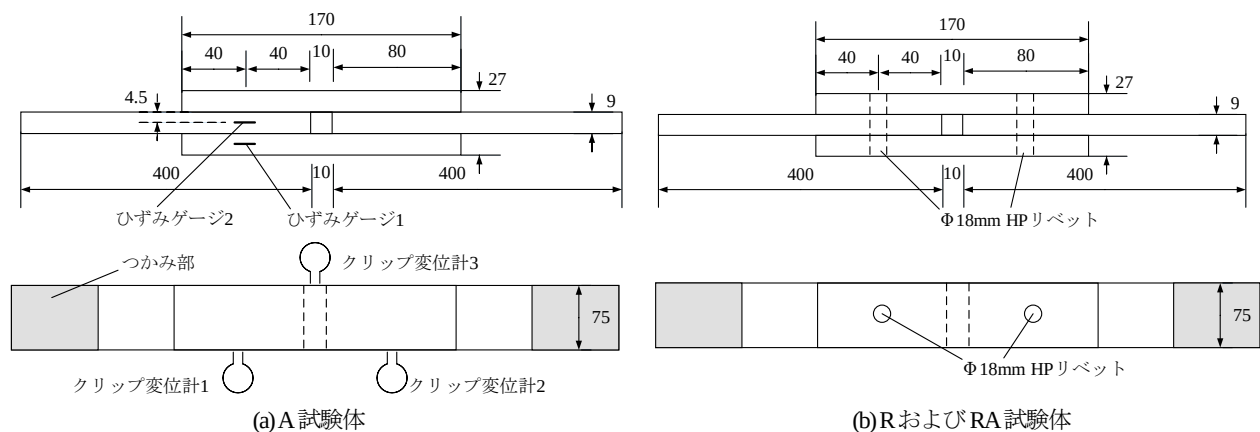
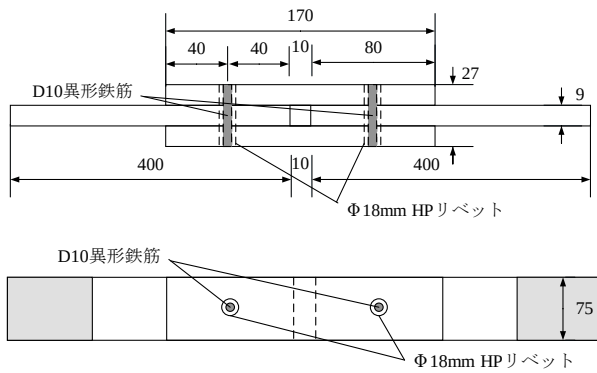
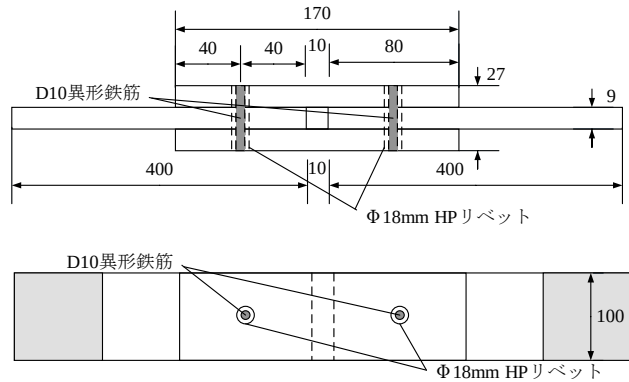


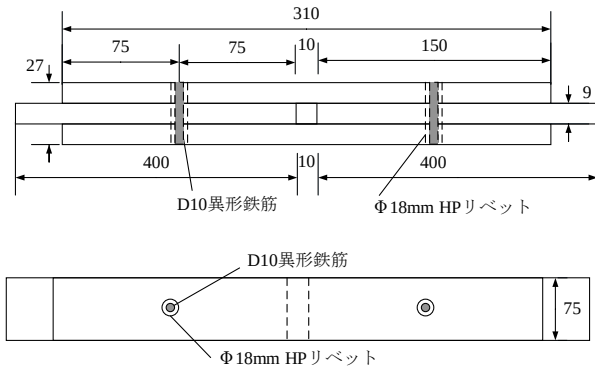
図-3 GFRPリベット支圧せん断接合試験体の概要



(a) RS1 試験体



(b) RS2 試験体



(c) RS3 試験体

図-4 鉄筋を挿入したGFRPリベット支圧せん断接合試験体の概要



図-5 実験の様子

表-2 引張試験結果³⁾

試験体No.	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
1	325	22.1	0.104
2	328	20.1	0.102
3	310	22.6	0.162
4	316	21.5	0.109
5	(261)	22.7	0.130
平均値	320	21.8	0.121
標準偏差	7.11	0.93	0.0227

試験体に用いたGFRP板は、樹脂に不飽和ポリエステルを使用し、繊維にガラス繊維の目付け量600g/m²のロービングクロスを使用した。このロービングクロスの積層数は20層である。また、GFRPリベットは、上述のGFRP板と同様の素材を使用した。ただし、繊維はガラス繊維のロービング材であり、鉄筋無しの場合、孔あたりのロービング使用本数は78本である。また、接着剤にはウレタンアクリルレート系樹脂を用いた。

(2) 載荷方法

引張試験の様子を図-5に示す。引張試験は万能試験機（島津製作所製：UH-2000kN）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ボルト孔横側面位

置の母板および連結板のひずみを測定した。

(3) 材料試験

GFRP板の引張強度、引張弾性係数およびポアソン比を確認するためにJIS K7165に準拠してクーポン試験片を5体製作し、引張試験を行った。

クーポン試験体の引張試験結果を表-2に示す。試験体5についてはつかみ部の接着部分が破壊し、GFRPの破壊まで至らなかったため途中で試験を中止し、この試験体の試験結果の引張強度に関しては平均値から除外した。平均引張強度は320N/mm²であり、参考とした同一メーカーのFRP板の引張強度⁴⁾の274N/mm²より若干高い強度となった。また、引張弾性係数は21.8 kN/mm²、ポアソン比は0.12となった。

3. 実験結果

(1) 破壊モード

各試験体シリーズの試験後の破壊モードの一例を図-6に示す。

図-6(a)に示すように、AシリーズではGFRP板の表層が剥がれガラス繊維がむき出しになった。これは接着剤の強度が高かったためと考えられる。Rシリーズでは図-6(b)に示すようにリベットがせん断破壊した。RAシリーズでは、試験体RA-1のみ、図-6(c)に示すように接合部表面のGFRPの表層が剥がれている。一方で他の4体の試験体は図-6(d)に示すように表層に損傷はなく、接着剤で凝集破壊していた。

リベットに鉄筋を入れたRS1およびRS2では、図-6(e)

および(g)に示すように母材の孔付近でせん断破壊が起こり、き裂が進展して引張破壊と複合した引裂破壊となったが、RS3では、図-6(i)に示すようにリベット内の鉄筋が大きく曲がり抜け出すことによって終局を迎えた。

また接着と併用したRSA1やRSA3では、図-6(f)や(j)に示すように接着剤の凝集破壊とリベット内の鉄筋の抜け出しが発生したが、RSA2では、図-6(h)に示すようにRS2と同様に引裂破壊となった。ただ、内部の鉄筋も変形が生じていた。

(2) 強度特性

A、RおよびRA試験体の引張試験結果のまとめを表-3に、荷重変位関係を図-7に示す。

表-3および図-7(a)～(c)より、A試験体では最大荷重が



(a) A試験体



(b) R試験体



(c) RA-1試験体



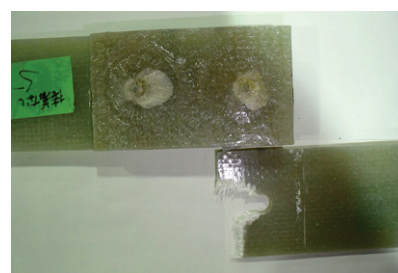
(d) RA-3試験体



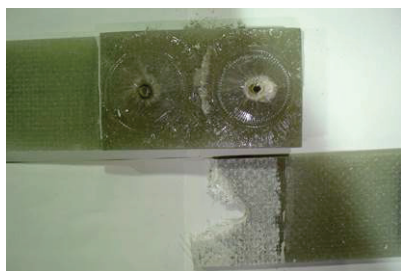
(e) RS1試験体



(f) RSA1試験体



(g) RS2試験体



(h) RSA2試験体



(i) RS3試験体



(j) RSA3試験体

図-6 各試験体の試験終了後の破壊形状

85.4kN, R試験体は22.3kNとなった。また接着と併用したRA試験体では、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という結果となった。ただし試験体RA-1のみ第2ピーク荷重が確認できなかった。

R試験体の結果より、GFRPリベット単体のせん断強度は43.8 N/mm²ということがわかった。文献4)に示されている同材料のロービングクロス材のせん断強度51.3 N/mm²より若干小さい値となった。

RA試験体では、第1ピーク荷重で接着剤がせん断強度に達して、破壊した後、GFRPリベットがせん断力を受け持つという形となった。このことから、接着剤とGFRPリベットが同時に抵抗するのではなく、まず、接

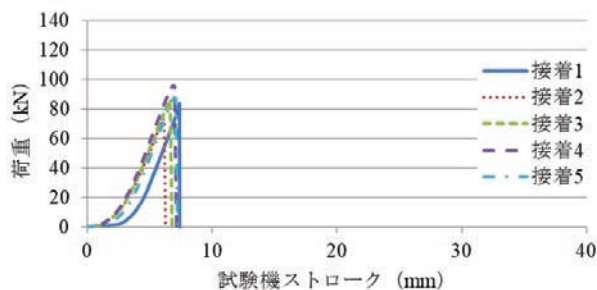
着剤で荷重に抵抗し破壊した後、リベットが抵抗するということがわかった。

また、A試験体とRA試験体で、第1ピーク荷重に差が出たのは、RA試験体では、リベット孔の分だけ接着面積が小さいためと考えられる。それぞれの第1ピーク荷重を接着面積で割ると7.12 N/mm²と5.94 N/mm²となり、若干RA試験体の接着強度が高いことがわかる。これはリベット孔の影響などが出たためと考えられる。また、R試験体の最大荷重に比べ、RA試験体の第2ピーク荷重が若干上昇しており、これは接着剤の影響が若干出たものと考えられる。

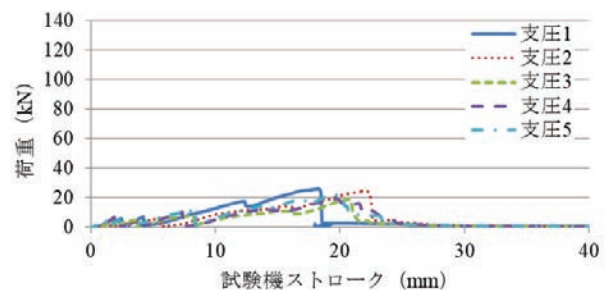
GFRPリベット1本のこのRA試験体では、リベットの

表-3 A, RおよびRAシリーズ実験結果のまとめ (単位: kN) ³⁾

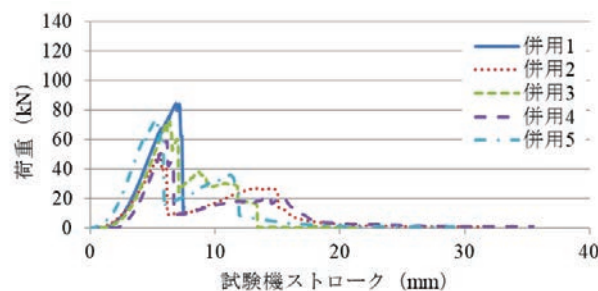
試験体名		第1ピーク荷重	平均	標準偏差	第2ピーク荷重	平均	標準偏差
A 試験体	A-1	83.8	85.4	7.3	-	-	-
	A-2	73.4					
	A-3	85.8					
	A-4	96.2					
	A-5	87.8					
R 試験体	R-1	26.0	22.3	2.7	-	-	-
	R-2	24.6					
	R-3	19.2					
	R-4	19.6					
	R-5	22.0					
RA 試験体	RA-1	84.4	68.3	11.5	-	30.8	6.7
	RA-2	51.8			27.4		
	RA-3	72.3			38.1		
	RA-4	59.0			21.5		
	RA-5	73.8			36.1		



(a) A試験体



(b) R試験体



(c) RA試験体

図-7 A, RおよびRAシリーズ荷重-変位関係

表-4 RSシリーズ実験結果のまとめ (単位: kN)

試験体名		第1ピーク荷重	平均	標準偏差	第2ピーク荷重	平均	標準偏差
RS1 試験体	RS1-1	36.4	37.0	0.57	-	-	-
	RS1-2	37.7					
	RS1-3	36.7					
	RS1-4	37.5					
	RS-15	36.4					
RSA1 試験体	RSA1-1	49.7	46.9	2.5	43.1	37.3	6.0
	RSA1-2	44.0			34.2		
	RSA1-3	47.1			36.0		
	RSA1-4	44.0			27.4		
	RSA1-5	49.6			45.9		
RS2 試験体	RS2-1	39.5	39.8	0.67	-	-	-
	RS2-2	39.6					
	RS2-3	38.9					
	RS2-4	41.0					
	RS2-5	39.9					
RSA2 試験体	RSA2-1	103	99.8	2.9	47.3	38.0	7.7
	RSA2-2	99.4			27.2		
	RSA2-3	95.2			42.4		
	RSA2-4	102			30.6		
	RSA2-5	98.8			42.6		
RS3 試験体	RS3-1	41.1	42.8	1.6	-	-	-
	RS3-2	43.9					
	RS3-3	44.1					
	RS3-4	40.6					
	RS3-5	44.3					
RSA3 試験体	RSA3-1	109	107	8.5	35.8	39.3	4.9
	RSA3-2	113			45.9		
	RSA3-3	98.7			32.3		
	RSA3-4	95.6			39.7		
	RSA3-5	118			42.9		

強度が小さいため、接着剤が破壊した後の荷重上昇がそれほど大きくなかった。そこで、GFRPリベットそのもののせん断耐力を上げるために、リベット内に鉄筋を挿入して補強した試験体（RSシリーズ）を用意し、実験を行った。RSシリーズでは板幅や縁端距離を変化させて、それらがどのように継手の耐力に影響するのかを検討した。

RSシリーズの引張試験結果のまとめを表-4に、荷重変位関係を図-8に示す。

表-4および図-8(a)より、RS1試験体は最大荷重が37.0kN、RSA1試験体はRA試験体と同様に荷重のピークが2つ現れ、第1ピーク荷重は46.9kN、第2ピーク荷重は37.3kNとなった。

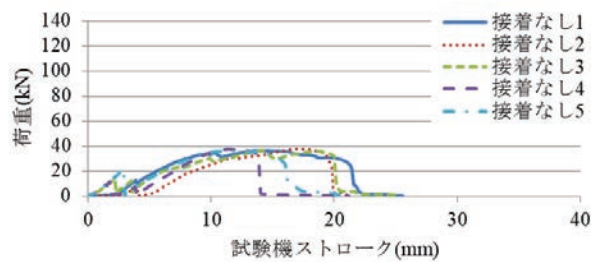
RS1試験体と先述のR試験体とを比較すると、最大荷重は22.3kNから37.0kNと14.7kN増加（65.9%上昇）しているものの、RS1試験体では、最終的にFRP板のせん断破壊で終局を迎えており、この結果からは鉄筋入りGFRPリベットのせん断強度まではわからなかった。

RSA1試験体とRA試験体とを比較すると、接着剤で決

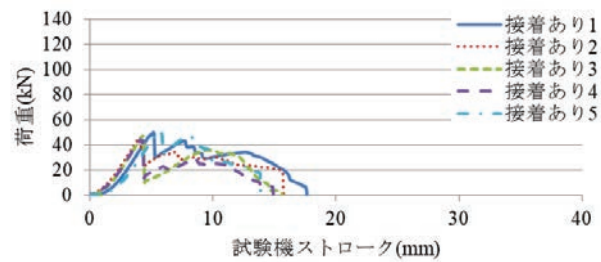
まると考えられる第1ピークがRA試験体に比べ小さくなっていることがわかる。接着面積で割ったせん断強度で比較すると、RA試験体の5.94 N/mm²に対して、RSA1試験体では4.08 N/mm²と2 N/mm²弱の差が見られる。これは、同じ種類の接着剤を使用しているものの、ロッドが違うことや施工時期（気温や湿度など）の違いなどによる接着剤の強度のばらつきや、表面処理などの施工時などに誤差があった可能性が考えられる。

板幅を大きくしたRS2試験体、および縁端距離を大きくしたRS3試験体の最大荷重は、それぞれ39.8kNおよび42.8 kN、また、RSA2試験体およびRSA3試験体では、第1ピーク荷重がそれぞれ99.8kNおよび107kN、第2ピーク荷重は38.0kNおよび39.3kNとなった。

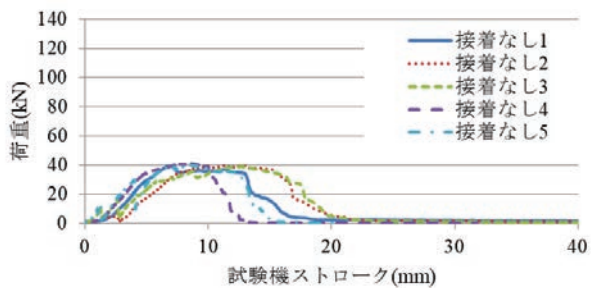
接着剤を併用したRSA2試験体およびRSA3試験体では、板幅や縁端距離の増大により接着面積が大きくなったことで、荷重の第1ピーク荷重はRSA1試験体に比べ大きくなっていることがわかる。それぞれの接着面積で荷重を割ったせん断強度は、6.44 N/mm²および4.87 N/mm²であり前述したA、RAおよびRSA1試験体と比較すると同等程



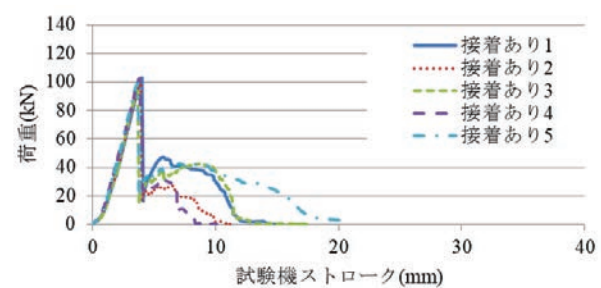
(a) RS1試験体



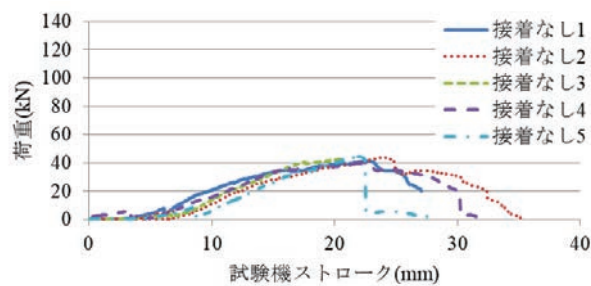
(b) RSA1試験体



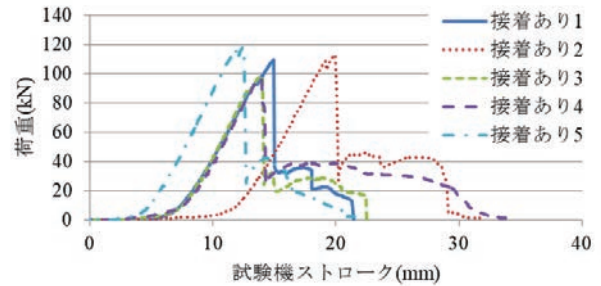
(c) RS2試験体



(d) RSA2試験体



(e) RS3試験体



(f) RSA3試験体

図-8 RSシリーズ荷重-変位関係

度である。

RS2やRS3試験体では、せん断強度がRS1試験体より大きくなっており、特にリベットの鉄筋の抜けで終局に到ったRS3試験体では、継手の耐力がリベットの破壊で決まっている。このことから、この継手の最大荷重がリベットの最大荷重とすれば、鉄筋を入れたGFRPリベットの断面積で割ることでせん断強度が 84.1N/mm^2 と計算でき、もとのGFRPリベットに比べ約2倍の強度となった。なお、鉄筋の降伏強度と本実験で得られたGFRPリベットのせん断強度を合成断面によって計算すると 97.3N/mm^2 となり、実験値は計算値より15%程度小さい値となった。これは図-6の鉄筋の破壊形状を見てもわかるように、純せん断ではなく、曲げの影響も出たためと考えられる。なお鉄筋は最終的に大きく曲げ変形し、抜け出している。

さらに、RSA2およびRSA3試験体の第2ピーク荷重とRS2およびRS3試験体の最大荷重がほぼ同程度となっていることから、接着剤と併用した場合、接着面が破壊し

た後にリベットが抵抗し始め、リベットの抜けもしくは板の破壊が生じるという破壊順序となることがわかった。また、実験結果全体を見ると、接着剤を使うことで継手耐力のばらつきが大きくなることもわかった。

4. 結論

本研究では、GFRP部材同士の接合にGFRP製リベットと接着剤を併用した継手の強度特性と継手強度を向上させるためにGFRPリベットに鉄筋を挿入したリベットを用いて実験的な検討を行った。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) GFRPリベットと接着剤を併用すると、初期に接着面で破壊が起こり、その後リベットが抵抗し、リベットのせん断破壊で終局を迎えることがわかった。
- 2) 実験の結果より、鉄筋入りGFRPリベット継手の耐力はGFRPリベット継手の耐力の約2倍程度となること

がわかった。ただし、本研究で用いたダブルラップ継手では、鉄筋の抜け出しが起こり、理論上の強度上昇量より15%程度小さい値となった。

- 3) 接着剤を使うことで継手耐力のばらつきが大きくなることがわかった。

今後の課題として、このGFRPリベットの実用的な製作・施工方法の検討や、鉄筋入りGFRPリベットの内部鉄筋の耐久性（腐食など）の検討などが挙げられる。

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) 例えば，太平株式会社ホームページ，ボルトナット，http://www.taihei-toyama.co.jp/produ/frp_product_a.html，（参考，2018. 8. 30）
- 3) 石間啓介，橋本国太郎，日比英輝：HP リベットによる GFRP 部材の接合に関する基礎的研究，第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.53-59，2016.11.
- 4) 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH CHARACTERISTIC AND ENHANCING OF GFRP LAPPED JOINTS USING GFRP RIVETS

Kunitaro HASHIMOTO, Keisuke ISHIMA and Hideki HIBI

FRP material have been applied in many engineering fields because of the many advantages which are light weight, high strength and non-corrosive material. Therefore GFRP (glass fiber reinforced polymer) material is being used in civil engineering filed because glass fibers is cheaper than other fibers. On the other hands, metallic 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, metallic bolts are easy to corrode under heavy corrosive environment in civil engineering filed. Therefore, a practical method is proposed for connection of GFRP members with rivets made of GFRP and adhesion instead of using fasteners made of metals in past study carried by authors. To enhance the shear strength of the GFRP rivet, this research investigated the strength of the joint using GFRP rivet reinforced by a steel bar experimentally. The experiment resulted in the strength characteristic of the GFRP reinforced riveted joint.