

(37) ハイブリッド FRP 引抜成形材と鋼材の 支圧ボルト接合部に関する耐力実験

寺口 大輝¹・北根 安雄²・松井 孝洋³・舘石 和雄⁴

¹ 学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻（〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町）
E-mail: teraguchi.daiki@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

² 正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail: kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 東レ株式会社 ACM 技術部産業・スポーツ技術室（〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1）
E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

⁴ 正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻（〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町）
E-mail: tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究では、鋼構造物の補修補強用に開発した山形断面のハイブリッド FRP 引抜成形材について、鋼材との接合部に使用するせん断力を受ける支圧ボルト接合部の耐力評価を引張実験により行った。ボルト列数、ボルトの種類、せん断面数、ボルトの軸力の有無、座金の種類をパラメータとして、それらが接合部耐力に与える影響について実験的に明らかにした。

ボルト軸力の導入により、ボルト孔付近の面外変形を抑制し、接合部耐力を 2 倍程度に増加させることを確認した。また、1 面せん断と 2 面せん断の比較では、1 面せん断の接合部耐力が 2 面せん断より約 10% 低くなることを確認した。また、1 面せん断に角座金を用いた場合も 2 面せん断未満の接合部耐力となった。最後に、支圧接合用ボルトと高力ボルトの比較では、接合部耐力に明確な差は確認できなかった。

Key Words: hybrid FRP, bearing-type bolted connections, strength of connections, steel bridge repair

1. はじめに

現在、我が国に存在する社会資本の多くは高度経済成長期に建設されており、これらの維持管理は今後ますます重要な課題となってくることが想定される¹⁾。

当然、鋼橋をはじめとした鋼構造物も例外ではなく、これらの構造物については主に腐食による性能低下が主な問題となる²⁾。腐食により、設計時に必要とされていた性能を満たすことができなくなった場合、その構造物に対して補修を行い、その性能を回復させるか、その構造物を新しい構造物に取り換える必要がある。

鋼橋の架け替えを行う場合、多大なコストが必要であることに加え、長期にわたり交通網の一部が遮断されることになり、大きな社会的損失がもたらされる。そのため、可能な限り早期に損傷を確認し、補修を行うことにより供用年数を延長することが望まれる。

腐食した鋼橋の補修工法として一般的なものの一つに鋼板を用いた当て板補修が挙げられる。これは主桁端部などの腐食箇所鋼板をボルト接合により接合することにより、その性能を回復させる工法である。鋼橋におい

て腐食が発生しやすい代表的な箇所は、風通しが悪く滞水しやすい狭隘な箇所であり、この工法ではそのような箇所に重量物である鋼板を運び込み、接合などの作業を行う必要がある。また、補修箇所の防食も難しく、この工法は施工性、維持管理性において課題が残ると言える。

近年では、軽量であり、高い耐候性を有する³⁾ことから、施工性、維持管理性に優れる FRP が注目されており、腐食減肉箇所への CF シートの積層接着に関する研究⁴⁾や、二次部材の取り換えを想定しての FRP 引抜成形材と鋼部材とのボルト接合部の耐力評価⁵⁾などが行われている。

本研究では、山形断面の FRP ハイブリッド引抜成形材を開発した。現在、この部材を補修補強用に使用できるようにするため、各種部材性能を明らかにしているが、本稿では、FRP-鋼せん断支圧ボルト接合部の耐力評価を行うため、接合部供試体の引張実験を行った。実験では、各種実験パラメータを変化させた供試体をに対して実験を行い、それぞれが接合部耐力に与える影響について明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

(1) 材料

本研究で用いる山形断面のハイブリッドFRP引抜成形材の断面寸法を図-1に示す。本材料は鋼構造物の補修・補強を想定して開発された材料であり、板厚は14mmである。引抜成形法はFRPの成形法の1つであり、同一断面の製品の量産に適した成形法である。また、本

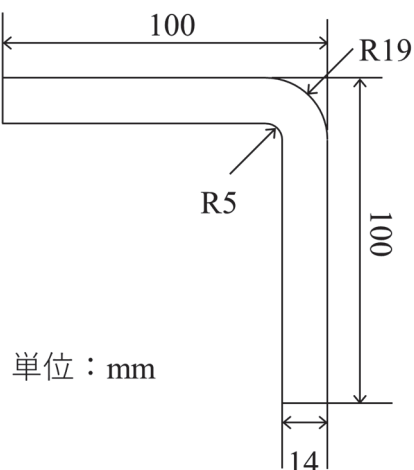


図-1 山形材断面寸法

材料はハイブリッドFRPであり、0°方向には炭素繊維が、90°および±45°方向にはガラス繊維が用いられている。また、繊維含有率は56.6%である。炭素繊維を用いたFRP(CFRP)は高い引張強度および引張弾性率を有する一方、圧縮強度や面内せん断強度、支圧強度についてはガラス繊維を用いたFRP(GFRP)と比較して優れているとは言えない⁹⁾。また、炭素繊維はガラス繊維と比較し高価である。したがって、面内せん断強度および支圧強度を補強する90°および±45°方向にはガラス繊維を用いた。このことにより炭素繊維の持つ優位性を生かしつつ、材料コストを削減することができる。また、積層構成は、複数の積層構成を考慮し、材料試験を行うことで、決定した。この材料の材料試験結果を表-1に示す。本実験ではこの材料を用いて供試体を作成する。

(2) 供試体

本実験では、ボルト列数、ボルトの種類、せん断面数、ボルトの軸力の有無、座金の種類といったパラメータを変化させ、それらの違いが接合部耐力に与える影響について調査した。ボルト列数とボルトの種類ごとの供試体の寸法を図-2および表-2に示す。すべての供試体の名称とその説明を表-3に示す。

本実験に用いるボルトはM22のF10T高力ボルトとM22のB10T打ち込み式支圧接合用ボルトの2種類である。それぞれの外観を図-3に示す。高力ボルト用の孔径は23mm、支圧接合用ボルトの孔径は23.5mmである。

表-1 材料試験結果

	引張		圧縮		曲げ		面内せん断	
	弾性率 GPa	強度 MPa	弾性率 GPa	強度 MPa	弾性率 GPa	強度 MPa	弾性率 GPa	強度 MPa
平均値	181.9	1326	160.0	467.0	180.2	740.2	6.299	112.7
変動係数	0.0357	0.0392	0.0447	0.0186	0.0069	0.0200	0.0184	0.0716
試験法	土木学会基準 JSSE-E 531-2007		JIS K 7018		JIS K 7017		ASTM D 7078	

	層間せん断		支圧強度(MPa)		
	弾性率 GPa	強度 MPa	孔径 22mm	孔径 23mm	孔径 23.5mm
平均値	4.441	33.86	324.3	262.4	229.5
変動係数	0.0549	0.0256	0.0500	0.0402	0.0553
試験法	JIS K 7057		Mottram試験法		

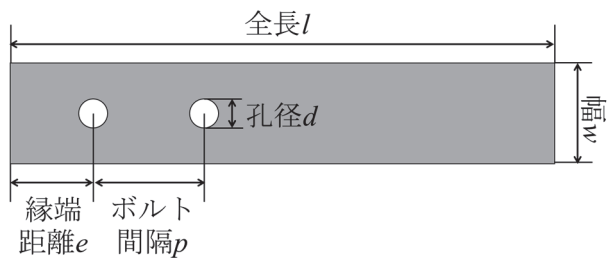


図-2 供試体形状

表-2 供試体寸法

列数	ボルト	l	w	e	p	d
1列	高力	318	66	88	-	23
	支圧					23.5
2列	高力	434	80	66	88	23
	支圧					23.5
3列	高力	522				23
	支圧					23.5

表-3 供試体名称と実験結果

名前	列数	ボルト	せん断 面数	軸力	座金	接合部 耐力(kN)	破壊 形式	
J1HS1	1	高力	1面	あり	普通	146.7	支圧	
J1HS2					角	160.0		
J1HD0			2面	なし	普通	86.0	せん断	
J1HD1						176.1		
J1BS1		支圧	1面			147.0	支圧	
J1BD1			2面			171.1	せん断	
J2HS1	2	高力	あり		普通	310.2	支圧	
J2HS2						305.5		
J2HD1				2面		角	317.8	せん断
J2BS1							1面	284.3
J2BD1		2面		306.3	せん断			
J3HS1				3	高力		普通	439.2
J3HD1	2面	466.2	せん断					
J3BS1	支圧	1面	430.4			支圧		
J3BD1		2面	464.8			せん断		

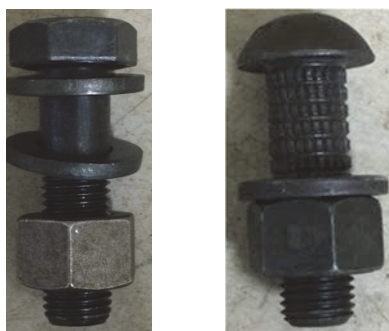


図-3 ボルト外観 (左: 高力, 右支圧)

本実験で用いる2種類の座金を図-4に示す。ここでの普通座金は高力ボルト用の座金である。角座金は正方形の形状であり、普通座金よりも面積が大きく、FRP母板のボルト孔支圧部の面外へのはらみだしを抑制すること

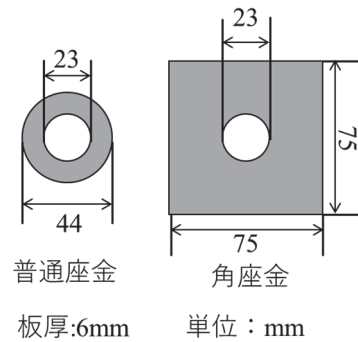


図-4 座金寸法

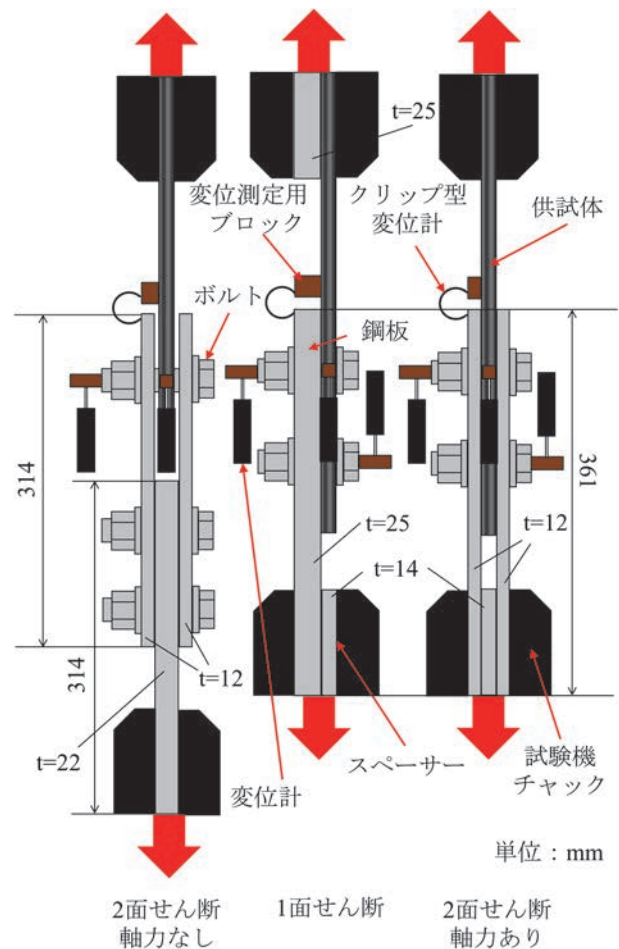


図-5 実験概要図

を期待している。1列および2列の高力ボルトを用いた1面せん断の供試体のボルトヘッド側に取り付ける。

(3) 実験方法

ボルト接合部引張実験の概要図を図-5に示す。前川式万能試験機を用いて供試体に引張荷重を載荷した。鋼添接板の材質はSM490Yである。FRP母板と鋼添接板間の相対変位およびボルトとFRP母板のボルト孔のある箇所の変位、そして試験機のストロークを測定した。2面せん断の場合は2枚の鋼添接板でFRP母板を挟み込み、1

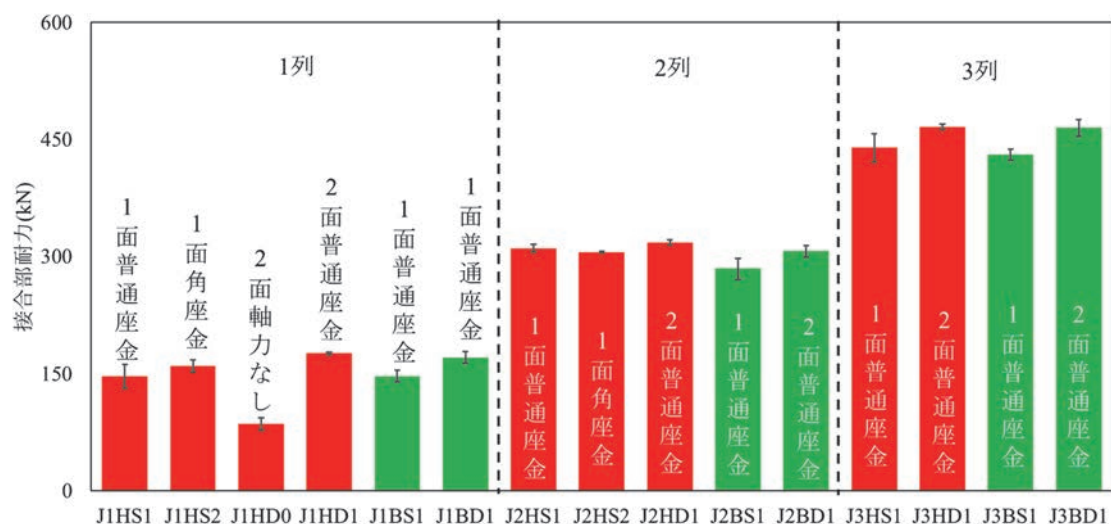


図-6 接合部耐力



図-7 実験後の J1HD1 の外観

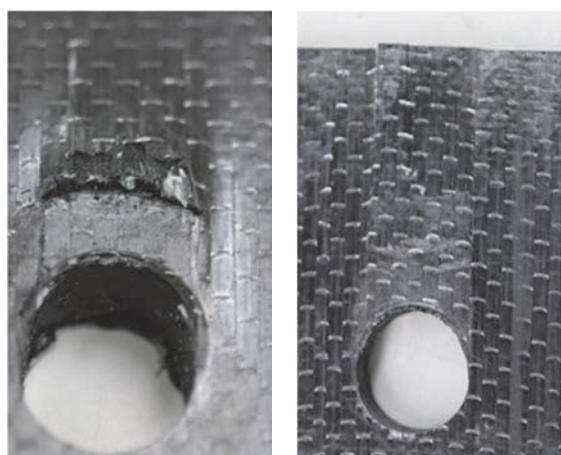


図-8 破壊形式ごとのボルト孔付近の外観

(左：J2HS1 支圧破壊，右：J2HD1 せん断破壊)

面せん断の場合は鋼添接板を1枚のみ用いて、上下のつかみ部には鋼製のスペーサーを用いた。また、FRP母板側がボルトヘッド側となるようボルトを配置した。軸力を導入しない場合は鋼添接板とFRP母板の間に隙間を設け、ピン接合とした。軸力を導入する場合は鋼添接板と

FRP母板は接しており、ボルトには一律で40N・mのトルクで軸力を導入した。このトルクは、M22摩擦接合高力ボルトの締め付けトルクの5%程度であり、これは樹脂のクリープ変形でボルト軸力が低下しほとんど残存していない状態を再現している³⁾

3. 実験結果

実験によって得られた接合部耐力を表-3と図-6に示す。また、単ボルト2面せん断供試体(J1HD1)の実験後のFRP板の様子を図-7に示す。軸力を導入した2面せん断供試体および1面せん断供試体については支圧破壊が破壊モードとなった。支圧破壊した供試体(J2HS1)とせん断破壊した供試体(J2HD1)の実験後のボルト孔付近の外観を図-8に示す。

ここで、各種実験パラメータが接合部耐力に与えた影響について考察する。

(1) ボルト軸力の有無の影響

表-3より、J1HD0およびJ1HD1のボルト接合部耐力を比較するとJ1HD1はJ1HD0の2.05倍の接合部耐力を有することがわかる。ここで実験終了後のJ1HD0の外観を図-9に示す。J1HD0のボルト孔支圧部は面外に大きくはらみだす変形が確認できるが、J1HD1においてはそのような変形は確認できない。これは、J1HD0の場合はFRP母板と鋼添接板の間に隙間があるが、J1HD1の場合はボルト孔の両面が鋼添接板によって拘束されており、支圧部が層間剥離した後に面外にはらみだすことを抑制したためと考えられる。

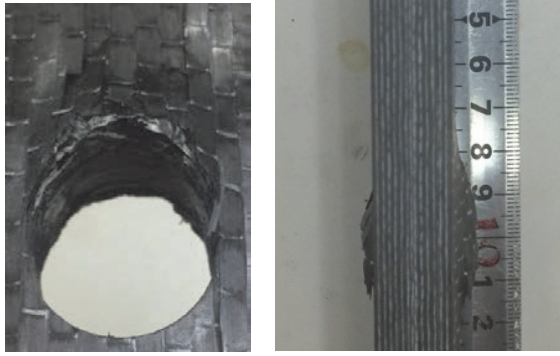


図-9 J1HD0実験後外観（左：正面，右：側面）

表-4 摩擦力計算値

	摩擦力 (kN)		
	1列	2列	3列
1面せん断	5.6	11.2	16.8
2面せん断	11.2	22.4	33.6

表-5 接合部耐力比較（ボルトの種類）

	せん断面	名称	接合部耐力	H/B
			kN	-
1列	1面	J1HS1	146.7	1.00
		J1BS1	147.0	
	2面	J1HD1	176.1	1.03
		J1BD1	171.1	
2列	1面	J2HS1	310.2	1.09
		J2BS1	284.3	
	2面	J2HD1	317.8	1.04
		J2BD1	306.3	
3列	1面	J3HS1	439.2	1.02
		J3BS1	430.4	
	2面	J3HD1	466.2	1.00
		J3BD1	464.8	
平均				1.03

本実験は支圧ボルト接合部の実験ではあるが、支圧のみではなく、FRP母板と鋼添接板の間の摩擦力も接合部耐力に寄与している。しかし今回導入したトルクは 40 N・m と非常に小さいものであり、これにより発生する摩擦力も小さい。表-4 にせん断面の数、ボルト列数の違いにより FRP 母板と鋼添接板間に生じる摩擦力の計算値を示す。この計算の際、ボルトのトルク係数は 0.13、FRP 母板と鋼添接板間の摩擦係数は 0.4 として計算した。このことから、軸力の導入による接合部耐力の増加したのは、主に支圧損傷部の面外へのはらみだしを抑制したことにより、材料の支圧強度が増加したことが原因だと考えられる。

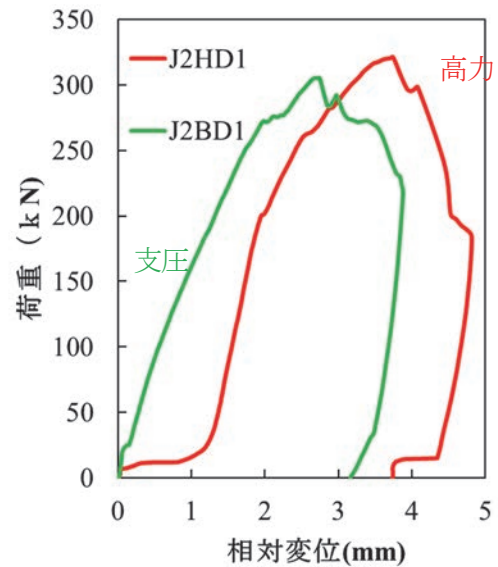


図-10 ボルトの違いによる荷重変位関係の比較

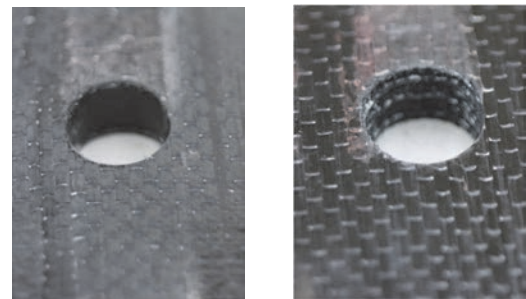


図-11 実験後のボルト孔の外観

(左：高力 J2HD1，右：支圧 J2BD1)

(2) ボルトの種類の影響

ボルトの種類が異なり、その他の条件が同じである 2 種類の供試体の接合部耐力の比較を表-5 に示す。ここでの H/B は高力ボルト（摩擦接合用）を用いた場合の接合部耐力を支圧接合用高力ボルトを用いた場合の接合部耐力で除したものである。この表から、ボルトの種類の違いによる接合部耐力の差は最大でも 9% 程度であり、大きな違いは確認できなかったものの、支圧接合用高力ボルトの方がわずかに耐力が小さくなる傾向を示した。

ボルトの種類のみ異なる 2 種類の供試体（J2HD1 と J2BD1）の荷重変位関係の比較を図-10 に示す。ここでの変位は、クリップ型変位計によって測定した FRP 母板と鋼添接板間の相対変位を表している。この図から、高力ボルトを用いた場合は荷重の小さい範囲で荷重が増加することなく変位のみ増加するすべりが存在するが、支圧接合用高力ボルトを用いた場合はすべりが存在しないことがわかる。高力ボルトによる接合では、クリアランスの存在により、すべりが生じるまでは FRP 母板のボルト孔と高力ボルトが接していないが、そのクリアランス

表-6 接合部耐力比較（せん断面数）

列数	ボルト	名称	接合部耐力	S/D
			kN	-
1列	高力	J1HS1	146.7	0.83
		J1HD1	176.1	
	支圧	J1BS1	147.0	0.86
		J1BD1	171.1	
2列	高力	J2HS1	310.2	0.98
		J2HD1	317.8	
	支圧	J2BS1	284.3	0.93
		J2BD1	306.3	
3列	高力	J3HS1	439.2	0.94
		J3HD1	466.2	
	支圧	J3BS1	430.4	0.93
		J3BD1	464.8	
平均				0.91

図-12 実験後のボルト孔の外観
(左：2面 J1HD1，右：1面 J1HS1)

表-7 接合部耐力比較（座金の種類）

列数	ボルト/ せん断面	名称	接合部耐力	角/普
			kN	-
1列	高力/ 1面	J1HS1	146.7	1.09
		J1HS2	160.0	
2列		J2HS1	310.2	0.98
		J2HS2	305.5	
平均				0.98

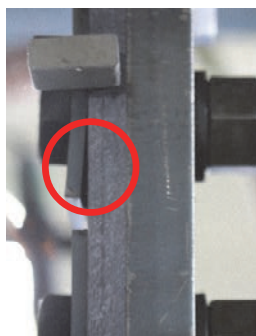


図-13 J2HS2の実験中の外観（赤丸部が変形）

分のすべり変位が発生したのち、ボルト孔と高力ボルトが接することにより荷重が増加していったものと考えられる。一方、支圧接合用高力ボルトは打ち込み式であり、実験開始時からボルト孔と支圧接合用高力ボルトの間にクリアランスはなく、すべりは発生しない。

ボルトの種類のみ異なる2種類の供試体（J2HD1とJ2BD1）の実験後の支圧損傷部の外観を図-11に示す。支圧接合用高力ボルトを用いた供試体については、支圧接合用高力ボルトの軸部の凹凸の跡があることを確認した。このように支圧損傷部の状態の差異は確認できたが、これは接合部耐力に大きな違いをもたらすものではなかった。

(3) せん断面の数の影響

せん断面の数が異なり、その他の条件が同じである2種類の供試体の接合部耐力の比較を表-6に示す。ここでのS/Dは1面せん断の場合の接合部耐力を2面せん断の場合の接合部耐力で除したものである。この表から、面せん断の場合、2面せん断場合と比較して2%から17%程度接合部耐力が小さいことがわかる。

せん断面の数により、接合部耐力が異なった理由の一つとしてボルト孔部の拘束の違いが考えられる。2面せん断の場合はFRP母板の両面に対して鋼添接板が接している。このことによりボルト孔支圧損傷部の両面に対して面外方向へのはらみだしを抑制することができる。しかし1面せん断の場合は片面にのみ鋼添接板が接しており、もう片面は座金だけの拘束となり、座金側の拘束範囲が小さくなる。せん断面の数のみ異なる2種類の供試体（J1HD1とJ1HS1）の実験後の外観を図-12に示す。2面せん断の場合はボルト孔支圧損傷部の面外へのはらみだしが両面に対して発生していないことに対し、1面せん断の場合、鋼添接板が接していない面は座金の外側で面外へのはらみだしが確認できる。

また、せん断面の数が2つになることでFRP母板と鋼添接板間に発生する摩擦力は倍増する。今回の実験ではボルトに導入したトルクが40 N・mと非常に小さいものであるが、このことも2面せん断の場合接合部耐力が増加した理由の一つだと考えることができる。

(4) 座金の種類の影響

座金の種類が異なり、その他の条件が同じである2種類の供試体の接合部耐力の比較を表-7に示す。ここでの角/普は角座金を用いた場合の接合部耐力を普通座金を用いた場合の接合部耐力で除したものである。この表から1列の場合は角座金を用いることで接合部耐力が10%程度増加しており、2列の場合は接合部耐力の増減はほぼないことがわかる。ここで角座金を用いた箇所は1面せん断の場合のボルトヘッド側であり、普通座金を

表-8 接合部耐力比較 (ボルト列数)

せん断面	ボルト	列数	名称	接合部耐力	2列or3列/ 1列
				kN	
1面	高力	1列	J1HS1	146.7	-
		2列	J2HS1	310.2	2.11
		3列	J3HS1	439.2	2.99
	支圧	1列	J1BS1	147.0	-
		2列	J2BS1	284.3	1.93
		3列	J3BS1	430.4	2.93
2面	高力	1列	J1HD1	176.1	-
		2列	J2HD1	317.8	1.80
		3列	J3HD1	466.2	2.65
	支圧	1列	J1BD1	171.1	-
		2列	J2BD1	306.3	1.79
		3列	J3BD1	464.8	2.72

用いた場合は座金の外側から面外へのはらみだしが生じ、その結果 2 面せん断の場合と比較して接合部耐力は減少している。角座金を用いた理由は普通座金の場合は生じてしまう面外へのはらみだしを、座金の面積を大きくすることで抑制することを期待したためである。しかし、今回は 1 列、2 列の両方の場合でも、角座金が曲げ変形したことにより、2 面せん断の場合ほど接合部耐力の増加効果は得られなかった。図-13 に、角座金を用いた供試体 (J2HS2) の実験中の座金外観を示す。角座金が、FRP 母板のボルト孔支圧損傷部の面外へのはらみだしを抑制しきれずに曲げ変形していることがわかる。このことから、ボルト孔支圧損傷部の面外へのはらみだしを抑制するためには、座金の面積だけではなく、座金の曲げ剛性が十分であるかどうかを考慮する必要があるといえる。

(5) ボルト列数の影響

ボルトの列数が異なり、その他の条件が同じである 2 種類の供試体の接合部耐力の比較を表-8 に示す。この表から、ボルト列数の増加により、接合部耐力は増加していることが確認できる。しかし、2 列高力ボルト 1 面せん断 (J2HS1) を除いてはボルトの列数倍未満の耐力となっており、この傾向は 2 面せん断の方が大きく、2 列の場合は 1 列の耐力の約 1.8 倍、3 列の場合は 1 列の場合の約 2.7 倍となっている。

本実験では軸力を導入した 2 面せん断の供試体の破壊モードはせん断破壊であったが、せん断破壊線はボルト孔の縁から縁端に向け、載荷軸に平行に生じている。そのため、せん断破壊線の長さは縁端距離と各ボルト間距離の合計で表すことができる。表-2 より、供試体のせん断破壊線の長さは 2 列、3 列でそれぞれ 1 列の 1.75 倍、2.5 倍とボルト列数倍と比べ小さい値となることがわかる。このことが、2 面せん断の接合部耐力が列数倍未満

となったことの一つの要因と推察できる。

4. 結論

本研究では、鋼構造物の補修補強用に開発した山形断面のハイブリッド FRP 引抜成形材について、鋼材との接合部に使用するせん断力を受ける支圧ボルト接合部の耐力評価を引張実験により行った。ボルト列数、ボルトの種類、せん断断面数、ボルトの軸力の有無、座金の種類を実験パラメータとして、それらが接合部耐力に与える影響について実験的に明らかにした。

以下に得られた結論を示す。

- (1) 高力ボルト (摩擦接合用) を用いた場合と支圧接合用高力ボルトを用いた場合では接合部耐力に大きな差異は見られなかった。しかし、支圧接合用高力ボルトの方が若干耐力が小さくなる傾向が得られた。また、支圧接合用ボルトを用いた場合はボルト孔とボルトの間にクリアランスがないため、高力ボルトを用いた場合とは異なり、すべりが見られなかった。
- (2) FRP 母板と鋼添接板が接しており、接合部に用いるボルトに軸力を導入されている場合は、FRP 母板と鋼添接板が離れており、ボルトに軸力が導入されていない場合と比較して接合部耐力が 2 倍程度に増加する。これは、鋼添接板が FRP 母板のボルト孔支圧損傷部を拘束することにより、面外へのはらみだしを抑制し、材料の支圧強度を向上するためである。
- (3) 1 面せん断の場合と 2 面せん断の場合を比較すると、1 面せん断の場合のほうが接合部耐力が 2% から 17% 程度小さい結果となった。これは、1 面せん断の場合は FRP 母板の片面でのみ鋼添接板と接していることに對し、2 面せん断の場合は両面接しており、ボルト孔支圧損傷部の拘束がより強く、面外へのはらみだしの抑制効果がより大きかったためだと考えられる。
- (4) 1 面せん断の供試体のボルト孔付近の拘束を強化することを目的に、鋼添接板がない側の座金をより面積の大きい角座金に変更したが、角座金の剛性が不十分であり、曲げ変形を生じてしまったため 2 面せん断の場合まで接合部耐力は増加しなかった。
- (5) ボルト列数のみ異なる供試体の接合部耐力を比較すると 2 列、3 列の接合部耐力は 1 列の接合部耐力の列数倍未満の値となる場合が多く、この傾向は 2 面せん断の場合のほうが大きかった。これは、2 面せん断の場合は破壊モードがせん断破壊であり、接合部耐力は、せん断破壊線の長さに比例したためだと考えられる。

謝辞：本研究は、H29 年度～H30 年度国土交通省建設技術研究開発助成を受け実施した「低ライフサイクルコストを実現するインフラ向け CFRP 引抜部材の設計・成形・施工法の開発および光ファイバを用いたモニタリング技術の開発」研究の一部である。また、研究の推進には福井県の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 25 年度国土交通白書，第 I 部第 1 章第 3 節，2014.
- 2) 市川明広，武田達也，玉越隆史：既設橋梁の架替実態調査結果，土木技術資料 50-5，2008.
- 3) 強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP，コロナ社，2016.
- 4) ニャムバヤルトゥワーン，タイウィサル，中村一史，松井孝洋：断面欠損した鋼桁端部の VaRTM 成形を用いた CFRP 接着による補修・補強，第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，2018.
- 5) 岩崎初美，松井孝洋，小林拳祐，中村一史：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強度特性，構造工学論文集 A，Vol. 64A，pp. 769-778，2018.
- 6) 上山裕太，北根安雄，松井孝洋，近藤富士夫，舘石和雄：ハイブリッド FRP 積層体の支圧強度評価法に関する実験的研究，土木学会論文集 A1，Vol.73，No.5，複合構造論文集，第 4 巻，pp. II_74-II_83，2017.
- 7) 北根安雄，上山裕太，寺口大輝，松井孝洋，舘石和雄，後藤基浩：腐食した鋼桁端部に対する引抜成形 FRP アンクル部材による補修方法の検討，土木学会論文集 A1，Vol. 75，No.5，複合構造論文集，第 6 巻，pp. II_27-II_35，2019.

(Received August 30, 2019)

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF BEARING-TYPE BOLTED JOINTS BETWEEN PULTRUDED HYBRID FRP AND STEEL

Daiki TERAGUCHI, Yasuo KITANE, Takahiro MATSUI and Kazuo TATEISHI

In this study, strength of bearing-type bolted joints between pultruded hybrid FRP and steel was examined experimentally. The number of bolt rows, bolt types, the number of shearing surfaces, the presence or absence of bolt axial force, and washer types were test parameters. Effects of these parameters on joint strength were investigated.

As a result of the experiment, it was confirmed that by introducing the bolt axial force, the out-of-plane deformation near the bolt hole can be suppressed, and the joint strength can be increased to about twice the strength without the axial force. In addition, it was found that the strength of single-lap joints was about 10% lower than that of double-lap joints. Also, when a square washer was used for a single-lap joint, the joint strength was less than that of double-lap joint. Finally, a difference in joint strength between high strength bolts for a bearing-type joint and those for a friction-type joint was found to be insignificant.