

ハンドレイアップ GFRP 部材におけるボルト接合の支圧耐力評価に関する研究

名古屋大学大学院 学生会員 ○茗荷 将浩
Dhaka University of Engineering & Technology Mohammad Abdul Kader
名古屋大学大学院 正会員 北根 安雄
名古屋大学大学院 フェロー会員 伊藤 義人

1. 研究目的

FRP は高強度、高剛性、軽量性、高耐食性といった優れた材料特性から土木構造部材への適用が増えている。FRP を構造物に適用する場合、寸法や形状の制約から FRP 部材同士を接合することによって荷重を伝達する必要がある。しかし FRP 部材のボルト接合部挙動に関していまだ不明な点が多く設計手法が確立されているとは言えないのが現状である¹⁾。そこで本研究ではハンドレイアップ成形された GFRP 部材のせん断支圧ボルト接合に着目し、ボルト軸力の有無、板厚、添接板材料の異なる供試体を用いて強度実験を行うことで、GFRP 部材のボルト接合部耐力を実験的に明らかにする。

2. 材料試験

本研究ではハンドレイアップ成形された GFRP 板を用いる。繊維には 0 度と 90 度方向に同量のガラス繊維が配向されたロービングクロス材を、マトリックス樹脂には不飽和ポリエステルを使用している。

この GFRP 板の材料特性を得ることを目的として、引張試験、面内圧縮試験、面外圧縮試験、面内せん断試験、層間せん断試験を JIS K7164, K7018, K7181, K7019, K7057 に基づいて行った。全ての試験を MTS 材料試験機、または前川試験機を用いて実施した。材料試験により得られた GFRP 板の材料特性を表-1 に示す。

3. 接合部実験概要

GFRP 板のせん断支圧ボルト接合供試体の破壊形式と接合部耐力を調査することを目的として、単ボルト接合部実験を行った。図-1 に示す 17mm のボルト孔を持つ GFRP 母板と M16 のステンレスボルト(A2-70)を用いて図-2 のように接合供試体を用意し、両端に引張荷重を載荷した。供試体は全 20 セットで、それぞれ寸法パラメータ(外縁距離 w/d , 縁短距離 e/d), 母板および添接板の板厚, 添接板材料(ステンレス鋼, GFRP), ボルト軸力の有無が異なっている。軸力有の場合は手締め程度の軸力を考慮してトルクを 3Nm に設定し、軸力無の場合はピン接合で母板と添接板に間隔を空けた状態で実験した。供試体の概要を表-2 に示す。1 セットにつき 3 体実験を行う。接合部供試体の変位は、変位計を用いて図-3 に示すように 4 箇所で計測した。

4. 実験結果

図-4 に示すような実験から得られる荷重変位曲線において、剛性が初期剛性から 30%低下した時点破壊開始点と定義し、荷重変位曲線のピーク時を最終破壊と定義する。変位は図-3 の縁端の変位を使用した。それぞれの点で破壊モードを実験における供試体の損傷領域から判断し、表-2 に示す。実験では、せん断破壊(S), 引張破壊(NT), 支圧破壊(B)が観察された。

せん断破壊が生じた試験体は J2,6,7,8,13,16,19 でいずれも e/d が 3 以下であり、母板と添接板 2 枚の板厚の合計が等しい J19 では、添接板でせん断破壊が生じた。引張破壊が生じた供試体は J1,3,4,9,11,12,14,18 であり、J1,3,9,14 では支圧破壊が生じた後に引張破壊が生じ、引張破壊のみが生じた J4,11,12,18 はいずれも w/d が 2 以下だった。支圧破壊が生じた供試体は J1,3,5,9,10,14,15,17,20 だった。J20

表-1 GFRP の材料特性

E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{33} (GPa)
26.2	25.1	13.2
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
0.14	0.38	0.41
G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
3.06	4.44	4.64
X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)
353	267	335
Y_C (MPa)	Z_C (MPa)	S_{12} (MPa)
288	339	46.3
S_{23} (MPa)	S_{23} (MPa)	
34.3	34	

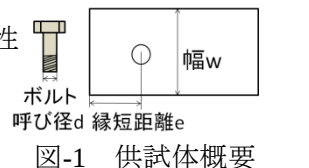


図-1 供試体概要



図-2 接合実験方法

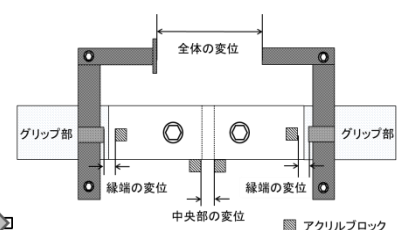


図-3 変位の測定方法

表-2 供試体概要と実験結果

試験体	寸法		トルク (Nm)	母板		添接板		破壊開始時		最終破壊	
	e/d	w/d		板厚	材料	板厚	材料	形式	荷重(kN)	形式	荷重(kN)
J1	4	3	3	12	FRP	6	Steel	B	55.2	NT	84.2
J2	3	4	3	12	FRP	6	Steel	S	50.2	S	76.3
J3	4	4	3	12	FRP	6	Steel	B	57.0	NT	93.1
J4	4	2	0	12	FRP	6	Steel	NT	34.8	NT	45.7
J5	4	4	0	12	FRP	6	Steel	B	35.3	B	48.2
J6	2	4	0	12	FRP	6	Steel	S	21.4	S	45.8
J7	2	4	3	12	FRP	6	Steel	S	35.2	S	59.5
J8	1.5	4	3	12	FRP	6	Steel	S	20.9	S	44.5
J9	4	2.5	3	12	FRP	6	Steel	B	53.0	NT	70.8
J10	4	5	0	12	FRP	6	Steel	B	40.2	B	51.2
J11	4	2	3	12	FRP	6	Steel	NT	39.6	NT	56.8
J12	4	2	3	12	FRP	12	FRP	NT	48.0	NT	57.4
J13	1.5	4	3	12	FRP	12	FRP	S	21.7	S	44
J14	4	4	3	12	FRP	12	FRP	B	56.8	NT	90.4
J15	4	2	0	6	FRP	6	Steel	B	17.4	B	20.0
J16	1.5	4	0	6	FRP	6	Steel	S	11.3	S	17.4
J17	4	4	0	6	FRP	6	Steel	B	17.0	B	17.9
J18	4	2	3	12	FRP	6	FRP	NT	43.6	NT	59.3
J19	1.5	4	3	12	FRP	6	FRP	S	19.7	S	41.0
J20	4	4	3	12	FRP	6	FRP	B	42.1	BE	69.3

B:支圧破壊, S:せん断破壊, NT:引張破壊, BE:曲げの影響あり

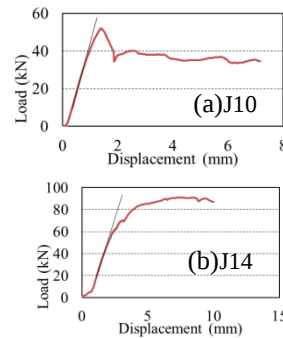


図-4 荷重変位曲線

表-3 支圧応力

試験体	破壊開始時 支圧応力(MPa)	最終破壊 支圧強度(MPa)
J1	288	-
J3	297	-
J4	184	251
J9	276	-
J10	209	267
J14	296	-
J15	181	208
J17	177	186
J20	219	-

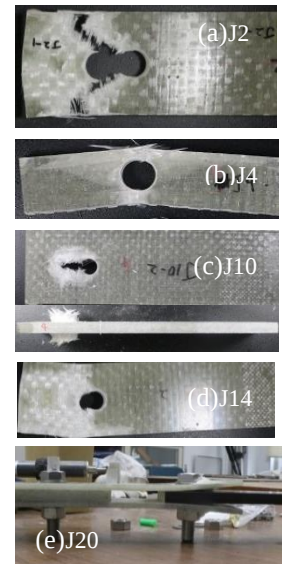


図-5 供試体の破壊の様子

では図-5(e)に示すように、添接板が面外に変形し、最終的に曲げ(BE)により添接板が破壊した。

ボルトトルクの有無に着目する。12mmの母板を用いた供試体において、トルクを導入した供試体(J1,3,9,14)の破壊開始点の支圧応力は、導入しなかった供試体(J4,10)と比べて 47%増加した(表-3 参照)。また、トルクを導入した供試体では支圧破壊後も荷重が増加し最終的に引張破壊(図-5(d))が生じたが、トルクを導入しなかった供試体では支圧破壊によって面外方向への材料のはらみ出し(図-5(c))が見られた。トルクの導入によって、この面外方向への支圧変形を妨げることができるため支圧強度の増加に繋がったと考えられる²⁾。

次に板厚の違いに着目する。トルクを導入していない 12mm 厚の母板を持つ供試体(J4,10)は 6mm 厚の母板を持つ供試体(J15,17)と比べて、破壊開始点の支圧応力では 10%、最終的な支圧強度では 31%大きくなった。これは繊維の座屈強度は板厚に影響を受け、板厚が厚いと圧縮強度が大きくなるためであると考えられる³⁾。

最後に添接板材料の違いに着目する。ここでは添接板が母板と密着する、トルクを導入した供試体を考える。母板で支圧破壊が生じる場合、ステンレス鋼製添接板を用いた J1,3,9 と、GFRP 添接板を用いた J14 では、破壊開始時の支圧応力が 2.3%しか変わらず、添接板材料の影響は無いと考えられる。しかし、12mm 厚の GFRP 母板に対し 6mm 厚の GFRP 製添接板を 2 枚用いた J20 の場合、添接板で支圧破壊が生じ、母板(12mm)で支圧破壊した J1,3,9,14 と比較して 24%も破壊開始時の支圧応力が低下した。これは、上記で述べたように板厚が薄いものを用いると繊維の座屈抵抗が小さくなることが原因であると考えられる。このため、添接板の板厚の合計が母板の板厚と等しいような接合部の場合、添接板で先に支圧破壊が生じることが予想されるため、添接板の板厚の合計は、母板の板厚より大きくすることが推奨される。

5. まとめ

- (1) トルクの導入は面外への支圧変形を妨げるため、今回検討したトルク範囲では、支圧強度増加に繋がる。
- (2) 板厚の増加は繊維の座屈抵抗を増加させるため、板厚が厚い方が支圧強度が大きくなる。
- (3) 単ボルト接合部供試体において母板で支圧破壊が生じる場合、添接板材料の違いによる影響はない。しかし、添接板の板厚の合計が母板の板厚が等しい場合、母板より先に添接板で支圧破壊が生じる。

参考文献

- 1) 土木学会 (2013) : 複合構造レポート 09 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, 丸善, pp. 3-42.
- 2) Sen, F. and Sayman, O. (2009) : The influences of geometrical parameters on the failure response of two serial pinned/bolted composite joints, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part L: Journal of materials: design and applications, Vol. 223, Iss. L4, pp. 169-181.
- 3) Liu, D. and Hou, L. (2003) : Three-dimensional size Effects in composite pin joints, Experimental Mechanics, Vol. 43, No. 2, pp. 115-123.