

FRP ボルトによる FRP 部材の多列配置の支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究

名古屋大学大学院	学生会員	○王 超
名古屋大学大学院	正会員	北根 安雄
豊橋技術科学大学大学院	正会員	松本 幸大
神戸大学大学院	正会員	橋本国太郎

1. 研究目的

現在、土木構造物に使用されている FRP 部材のボルト接合部は、鋼製の添接板や留め具を用いて接合されている。しかし厳しい腐食環境下では、ステンレス製の添接板や留め具であっても腐食してしまう場合がある¹⁾。FRP 添接板と FRP ボルト・ナットを使用した 1 列のボルト接合部の耐力評価に関して、多くの研究成果がある²⁾。FRP ボルトによる FRP 部材のボルト接合部耐力を実験的に明らかにすることを目的として、本研究では、多列の支圧ボルト接合部に対し接合部強度実験を行った。また、鋼製ボルトを対象とした現行のボルト接合部の耐力評価式が FRP ボルト接合部に対しても適用できるかどうかについても検討する。

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。材料特性を得るため、引張、面内圧縮、面内せん断、支圧試験を行った。試験方法と得られた材料特性を表-1 に示す。

3. 接合部実験概要

図-1 に示すような、直径 17mm のボルト孔を持つ GFRP 母板および同じ形状を持つ板厚 9mm の GFRP 添接板 2 枚と、M16 の FRP ボルトを用いて図-2 のような

接合部供試体を製作し、引張荷重を載荷した。供試体の一覧を表-2 に示す。供試体は全 8 種類で、それぞれ寸法パラメータが異なっており、いずれの供試体も 3 体ずつ実験を行った。ボルトは推奨締付トルク 35N・m で締付けた。実験では、母板と添接板の相対変位および荷重を計測した。

4. 実験結果

実験結果を表-2 に示す。耐力は 3 体の平均値を示している。なお、耐力 1 は実験で得られた耐力、耐力 2 は耐力 1 から摩擦力を差し引いた後の値である。最大荷重の 2~4 割の荷重区間における傾きを初期剛性とし、初期剛性から 3 割の剛性低下が生じた点を初期破壊点、荷重-変位曲線の最大荷重時を終局破壊点と定義した。破壊形式は供試体の損傷の様子から判断した。実験では、図-3~図-5 に示すような支圧破壊(B)、引張破壊(T)、せん断破壊(S)、引裂破壊(C)が観察された。

現行の設計マニュアル³⁾⁴⁾にある支圧耐力の評価式は、ボルト 1 本あたりの耐力を対象としている。多列接合の場合に、初期破壊と終局破壊ともに支圧破壊が生じた供試体(Sb6050T, Db704050, Tb904050)について、図-6 に示すように多列接合における支圧耐力は 1 列接合の支圧耐力のボルト列数倍で評価できることが明らかとなり、鋼製ボルトを用いた GFRP 板の多列接合⁵⁾と同じ結果となった。

表-1 GFRP の材料特性

試験	試験方向(°)	板厚 (mm)	強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
引張 (JIS K7164)	0	12	364	25.6
	90	12	396	24.6
	0	9	376	25.7
	90	9	383	25.8
面内圧縮 (JIS K7018)	0	12	267	26.1
	90	12	288	26.2
	0	9	271	27.5
	90	9	299	27.2
面内せん断 (ASTM D7078)	0	12	66.5	3.69
	0	9	64.3	3.37
支圧 (WU Test)	0	12	269	-
	0	9	248	-



図-1 GFRP 板の概要

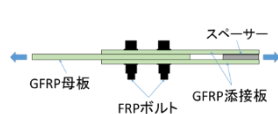


図-2 接合部供試体の概要

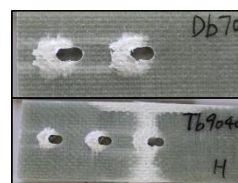


図-3 支圧破壊の様子

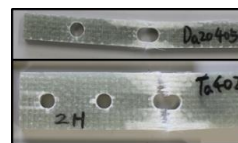


図-4 引張破壊の様子

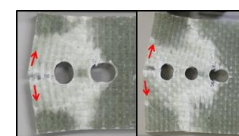


図-5 せん断/引裂破壊の様子

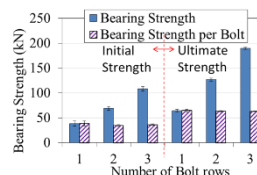


図-6 ボルト列数と支圧耐力の関係

キーワード FRP ボルト, ボルト接合, せん断支圧接合, 多列接合, オール FRP 構造
 連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 C1-3(651) TEL052-789-2736

表-2 供試体一覧と実験結果

試験体	寸法			列数	母板 板厚 (mm)	評価式による予測						実験結果				
						ASCE Pre-Standard(kN)			CNR DT205/2007(kN)			初期破壊(kN)			終局破壊(kN)	
	w/d	e/d	s/d			引張	せん断	支圧	引張	せん断	支圧	形式	耐力 1	耐力 2	形式	耐力 1
Sb6050T	6	5	-	1	9	85.9	57.9	35.7	233	82.8	35.7	B	40.4	38.7	B	64.8
Da404040	4	4	4	2	12	105	134	103	185	191	103	B*	73.7	70.7	T	132
Da204050	2	4	5		12	43.5	151	103	59.0	216	103	T	49.7	46.8	T	54.6
Da602020	6	2	2		12	134	62.0	103	311	88.6	103	S	59.3	56.3	S,C	102
Db704050	7	4	5		9	121	110	71.4	290	157	71.4	B	71.4	69.0	B	127
Ta402040	4	2	4	3	12	92.8	204	155	185	242	155	T	95.3	91.0	T	142
Ta902020	9	2	2		12	155	102	155	500	140	155	S	80.6	74.7	S,C	142
Tb904050	9	4	5		9	130	185	107	387	249	107	B	114	108	B	190
破壊形式：B：支圧破壊，B*：添接板に支圧破壊，T：引張破壊，S：せん断破壊，C：引裂破壊																

破壊形式：B：支圧破壊，B*：添接板に支圧破壊，T：引張破壊，S：せん断破壊，C：引裂破壊

多列接合の引張耐力の評価式は，ASCE³⁾では式(1)，CNR⁴⁾では式(2)で定義されている。

$$P_{nt} = \frac{wt\sigma_T}{K_{nt}L_{br}\frac{w}{d} + \frac{K_{op}(1-L_{br})}{1 - \left(\frac{d_n}{w}\right)}} \quad (1)$$

$$P_{nt} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}(w - d_n)t\sigma_T \quad (2)$$

ここで， w は板幅， d_n はボルト孔径， d はボルトの呼び径， t は板厚， σ_T は引張強度， K_{nt} は1列目ボルトの支圧荷重による応力集中を考慮する係数， K_{op} はバイパス荷重による応力集中を考慮する係数， γ_{Rd} は孔あき断面のモデル化の部分係数(=1.11)である。 L_{br} は1列目ボルトが受け持つ荷重分担率である。初期引張破壊が生じた供試体(Da204050, Ta402040)について，初期引張耐力2はASCEの計算値とよく一致しており，平均2.8%の誤差であった。応力集中を考慮することで，ASCEの評価式は初期耐力を精度よく予測している。終局引張破壊が生じた供試体(Da404040, Da204050, Ta402040)について，幅が大きくなるほど，終局引張耐力1がCNRの計算値に比べて小さくなる。 $w = 2d$ のDa204050では，計算値が実験値の+8%であるのに対し， $w = 4d$ のDa404040とTa402040では，計算値が実験値の+40%と+30%であった。幅が大きい場合は，応力が断面内で一様に分布していないことが原因として考えられる。これは鋼製ボルトの接合部でも同じ傾向が見られた⁵⁾。

ASCE³⁾によるせん断耐力の評価式は，2列接合の場合に式(3)，3列接合の場合に式(4)で定義されている。また，式(5)はCNR⁴⁾による1列接合のせん断耐力の評価式を拡張して得た多列接合の評価式になる。

$$P_{sh} = 1.4 \left(e - \frac{d_n}{2} + s \right) t \tau_{sh} \quad (3)$$

$$P_{sh} = 2(n-1)st\tau_{sh} \quad (4)$$

$$P_{sh} = 2 \left\{ \left(e - \frac{d_n}{2} \right) + (n-1)s \right\} t \tau_{sh} \quad (5)$$

ここで， e は縁端距離， s はボルト間隔， n はボルト列数， τ_{sh} はせん断強度である。せん断破壊が生じた供試体(Da602020, Ta902020)について，初期せん断耐力2はASCEの計算値より平均18%小さくなった。これはASCEで定義されるせん断破壊線より小さい領域でせん断破壊が生じたためと考えられる。終局せん断耐力1はCNRの計算値より8.1%大きくなった。図-5に示すように終局破壊としてせん断破壊と同時に引裂破壊も生じたことが原因と考えられる。鋼製ボルトの場合でも同じ破壊形式であった⁵⁾。

5. 結論

- (1) 支圧耐力に関して，多列接合における支圧耐力は，1列接合の支圧耐力にボルト列数をかけることで算出することができる。
- (2) 引張耐力に関して，ASCEの評価式は初期引張耐力を精度よく予測できた。終局引張耐力については，CNRの評価式は幅が大きくなると過大評価になることが明らかとなった。
- (3) せん断耐力に関して，CNRの評価式は終局せん断耐力を約10%過小評価する。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 16H04397 の助成を受け実施した。

参考文献

- 1) 土木学会(2013)：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，複合構造レポート09，丸善，pp.3-42.
- 2) 王超，北根安雄，松本幸大，橋本国太郎(2017)：FRPボルトによるFRP部材の支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究，第72回土木学会学術講演会講演概要集，pp.663-664.
- 3) ASCE(2010)：Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structures, pp.67-83.
- 4) National Research Council(2007)：Guide for the Design and Construction of Structures Made of FRP Pultruded Elements, CNR-DT 205, pp.25-31.
- 5) 若荷将浩(2017)：ハンドレイアップGFRP部材を用いた支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究，名古屋大学修士論文。