

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

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⁾。本研究では、オール FRP 構造に着目し、FRP 添接板と FRP ボルト・ナットを使用した 1 列のボルト接合部に対し接合部強度実験を行い、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と同時に、鋼製ボルトを対象とした現行の耐力評価式の FRP ボルト接合部に対する適用性について検討する。

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。材料特性を得ることを目的として、引張試験、面内圧縮試験、面内せん断試験、支圧試験を行った。試験方法および得られた GFRP 板の材料特性を表-1 に示す。

3. 接合部実験概要

FRP ボルトによる GFRP 部材のせん断支圧ボルト接合の破壊形式と耐力を明らかにすることを目的として、

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作製し、両端から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 5 種類で、それぞれ寸法パラメータ、母板の板厚、ボルト軸力の有無が異なっている。軸力有の場合は FRP ボルトの推奨締付トルク 35N・m 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開けた状態で実験した。実験では、荷重と母板と添接板の相対変位を計測した。いずれの供試体も 3 体ずつ実験を行った。

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 は耐力の実験値、耐力 2 は耐力 1 から摩擦力を差し引いた後の値である。破壊形式において、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と定義し、荷重-変位曲線のピーク時を終局破壊と定義した。また、破壊形式は供試体の損傷の様子から判断した。実験では、支圧破壊(B)、引張破壊(T)、せん断破壊(S)が観察された。

支圧耐力の評価式は ASCE²⁾と CNR³⁾ともに式(1)で定

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	375	25.1
	90	12	396	24.6
	0	9	376	25.7
	90	9	389	25.2
面内圧縮 (JIS K7018)	0	12	267	26.1
	90	12	288	26.2
	0	9	248	27.5
	90	9	290	27.3
面内せん断 (ASTM D7078)	0	12	75.2	3.91
	0	9	65.2	3.25
支圧 (WU Test)	0	12	269	-
	0	9	248	-

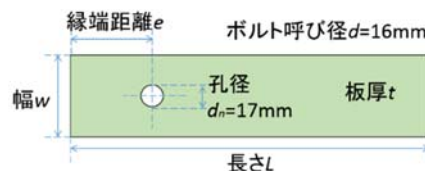


図-1 GFRP 板の概要

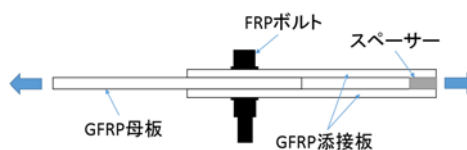


図-2 接合部供試体の概要

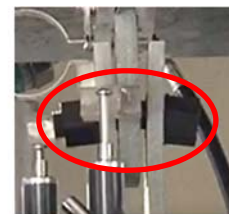


図-3 ボルトの曲げ変形



図-4 実験後の様子(Sa1540P)

キーワード FRP ボルト, ボルト接合, せん断支圧接合, 耐力評価, 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		トルク (N・m)	母板 板厚(mm)	添接板 板厚(mm)	ASCE Pre-Standard(kN)			CNR DT205/2007(kN)			初期破壊(kN)			終局破壊(kN)	
	e/d	w/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
Sa4015P	4	1.5	0	12	9	21.3	70.1	51.6	28.4	100	51.6	T	21.7	21.7	T	27.1
Sa4015T	4	1.5	35	12	9	21.3	70.1	51.6	28.4	100	51.6	T	23.5	26.2	T	28.6
Sa1540P	1.5	4	0	12	9	83.3	19.6	51.6	191	28.0	51.6	S	16.8	16.8	S	33.5
Sa1540T	1.5	4	35	12	9	83.3	19.6	51.6	191	28.0	51.6	S	17.7	20.0	S	43.3
Sb4040P	4	4	0	9	9	60.6	52.6	35.7	122	75.1	51.6	B	28.9	28.9	B	31.4
破壊形式：B：支圧破壊，T：引張破壊，S：せん断破壊																

破壊形式：B：支圧破壊，T：引張破壊，S：せん断破壊

義されている。

$$P_{br} = t d \sigma_{br} \quad (1)$$

ここで、 t は母板板厚、 d はボルト径、 σ_{br} はGFRPの支圧強度である。終局破壊として支圧破壊が生じた供試体(Sb4040P)については、実験値は計算値より14%小さくなった。実験中の観察で、図-3のようにボルトの曲げ変形が見られ、ボルトの軸部と母板の孔壁の接触面積が小さくなったことが原因であると考えられる。

引張破壊に対する耐力評価式は、ASCEでは式(2)、CNRでは式(3)で定義されている。

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

$$P_{nt} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} (w - d_n) t \sigma_T \quad (3)$$

ここで、 K_{nt} は応力集中を考慮する係数、 w は板幅、 d_n はボルト孔径、 σ_T はGFRPの引張強度である。初期破壊として引張破壊が生じた供試体(Sa4015P, Sa4015T)については、初期引張破壊荷重とASCEの計算値との誤差は平均で6.5%である。一方、終局破壊として引張破壊が生じたSa4015PとSa4015T供試体の終局荷重とCNRの計算値との誤差は平均で2.8%である。このことからFRPボルト供試体でも鋼製ボルト⁴⁾の場合のように、ASCEの評価式は初期引張耐力に、CNRの評価式は終局引張耐力に適用できることがわかる。

せん断破壊に対する耐力評価式は、ASCEでは式(4)、CNRでは式(5)で定義されている。

$$P_{sh} = 1.4 \left(e - \frac{d_n}{2} \right) t \tau_{sh} \quad (4)$$

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

$$P_{sh} = 2 e t \tau_{sh} \quad (6)$$

ここで、 e は縁端距離、 τ_{sh} はGFRPの面内せん断強度である。初期せん断破壊が生じた供試体(Sa1540P, Sa1540T)については、初期せん断耐力はASCEの計算

値より平均14%小さくなった。これは図-4に示すように母板のみでなく添接板にもせん断損傷が生じ、接合部の剛性が低くなったことが原因として考えられる。一方、式(5)による計算値は実験で得られた終局せん断耐力を最大55%も下回っている。ボルト孔の半径分を考慮する式(6)による計算値とSa1540Tの終局耐力との誤差が1%になるため、式(6)によりボルト軸力有供試体の終局せん断耐力を精度よく予測できる。一方、軸力無のSa1540Pに関しては、実験値はCNRの計算値より21%大きく、修正式による計算値より22%小さいため、軸力無の供試体の終局せん断耐力の耐力評価方法は今後検討する必要がある。

5. 結論

- (1) 支圧耐力に関して、FRPボルトの曲げ変形が原因で、終局支圧耐力はASCEとCNRの評価式による算定値に比べて、1割以上下回っている。
- (2) 引張耐力に関して、ASCEの評価式は初期引張耐力の評価に、CNRの評価式は終局引張耐力の評価に適用できる。
- (3) せん断耐力に関して、ボルト軸力有供試体の終局せん断耐力はCNRの評価式にボルト孔の半径分をせん断面積に加えた算定値が精度よく予測したが、ボルト軸力無の供試体の終局せん断耐力の評価方法は今後検討する必要がある。

謝辞

本研究はJSPS科研費16H04397の助成を受けたものです。

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) ASCE (2010)：Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structure, pp.67-83.
- 3) National Research Council (2007)：Guide for the Design and Construction of Structures Made of FRP Pultruded Elements, CNR-DT 205, pp.25-31.
- 4) 茗荷将浩, M.A. Kader, 北根安雄, 伊藤義人, 日比英輝 (2016)：ハンドレイアップGFRP部材を用いた単ボルト接合実験による接合部耐力評価，第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.78-86.