多軸基材により補強した引抜成形GFRP材の ボルト接合部の支圧強度

高嶋 秀樹¹・Viet Nhut Phan¹・三枝 玄希¹・北根 安雄² 橋本 国太郎³・松本 幸大⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学 大学院生 建築・都市システム学専攻 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1) E-mail:{h163527,p175510,g155503}@edu.tut.ac.jp

²正会員 名古屋大学 准教授 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: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

³正会員 神戸大学 准教授 大学院工学研究科市民工学専攻(〒657-0013兵庫県神戸市灘区六高台町1-1) E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

> ⁴正会員 豊橋技術科学大学 准教授 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1) E-mail:y-matsum@ace.tut.ac.jp

近年,GFRP引抜成形材を応用した構造物が設計・実用化されている.引抜成形では,一般に部材軸方向 の繊維が配されており、軸方向弾性係数・強度は高いが,接合部周辺で必要となる剪断強度や支圧強度は 材料強度に比して極めて小さく,支圧破壊後に急激な耐力低下を伴う.一方,多軸基材を用いたHLU成形 GFRP材の接合部などでは,高い支圧強度や支圧破壊後も剪断抜けを起こさない延性的な力学挙動となるが 軸方向弾性係数は劣る.そこで,本研究では,引抜成形GFRPの接合部耐力を向上させ,また剪断抜け破壊 による急激な耐力低下を防止する目的で,接合部に多軸基材を用いた薄肉のGFRP板を接着することを検討 する.結果として,肉厚1mm程度の多軸基材GFRPを引抜成形材に接着することで,支圧強度が大幅に上昇 すること,また急激な耐力低下も抑えられることを明らかとする.

Key Words : GFRP, Bolt connection, Beraring strength, Fracture behavior

1. 序論

繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Plastics:以下, FRP) は 繊維と樹脂を組み合わせ、繊維の優れた引張特性によっ て樹脂を強化した複合材料である. FRP 材は軽量, 高強 度,成形の自由度が高いなどの特徴があるため,現在, 車輌や航空機,宇宙の分野に多く利用されている¹⁾.建 築・土木の分野においては、FRP 材は耐久性に優れるこ とから建築物の長寿命化による環境負荷の低減が期待で き、また軽量・高強度であることから、設計に関しては 地震荷重の低減、施工時においては重機使用の削減や工 期短縮等の施工過程合理化に繋がる. 建築分野では、食 堂や屋内プール等の大空間の屋根架構に利用²されてお り、土木分野では歩道橋、橋梁などの点検用の検査路³、 水門扉 ∜などに利用されている.現状では木材やコンク リート,鋼材のように自由に設計することはできないが, それが可能になれば FRP は従来の建築構造を大きく変 えることができる材料であると考えられる.しかし, FRP 材で構造物を構成する際に不可欠となる接合部の力

学的性能や挙動の解明は発展途上であり,合理的な接合 方法や設計法の整備,また,その基となる研究成果の蓄 積が必要である.

FRPの接合は、鋼と異なり溶接接合が困難で、機械接 合や接着接合、またはその両者を複合させた接合方法な どが検討されている⁵. FRPの機械接合については、主 にボルトやリベットを用いた支圧接合が用いられている が、引抜成形GFRP材の剪断強度は軸方向強度に比べ低 いことから、ボルトによる機械接合では接合部に剪断抜 けが生じてしまい、急激に耐力が低下してしまうことが 指摘されている⁶. 一方、多軸基材を用いたGFRP 材の 接合部では、高い支圧強度が得られ支圧破壊後も剪断抜 けを起こさない延性的な力学挙動となるが軸方向弾性係 数は低くなる傾向にあり⁷、構造設計において変形によ って部材断面が定まる場合では、強化繊維が有効活用で きない可能性がある.

そこで本研究では、引抜成形GFRP材の接合部に多軸 基材を用いた薄肉のGFRP板を接着することにより、接 合部耐力及び支圧強度が上昇すること、また剪断抜け破 壊による急激な耐力の低下を抑制することを目的として 実験的研究を行った.

2. 試験体

(1) 引抜成形GFRP材

本試験ではガラス繊維を用いた公称板厚6.3mmの連続 引抜成形のGFRP溝形材のフランジ部分を切断し、ウェ ブ部分の幅80mmの部分を板材として用いる.GFRPの繊 維は主にロービング、樹脂は不飽和ポリエステルで構成 されている.表-1に力学的性質を示す図-1にFRPの寸法 と基材構成、図-2に実際に試験に用いたFRPの写真を示 す.

(2) 多軸基材GFRP板

本研究では、繊維材料としてガラス基材の GFRP シート ([CM/±45], 275,300,300gsm),厚さ 0.236mm)を、マトリックス樹脂として超低粘度型注入補修用エポキシ樹脂で VaRTM 成形した GFRP 板を使用した.この GFRP 板を DBM (Double Bias Mat)シートと呼ぶ.成形後の DBM シートの板厚は約 1mm となった.図-3 に成形した DBM シートを示す.

X Manual Ma Manual Manual Manu			
項目	規格値	測定値	算出方法
引張強さ[MPa]	350≦	408	JIS K 7165
引張弾性率[GPa]	27≦	28	JIS K 7165
剪断強度 [MPa]		27	文献 2)
ガラス含有率[%]		54	JIS K 7052

表-1 FRP材の諸量



図-2 FRP材 図-3 DBMシート

3. 試験方法

試験は端空き距離と支圧強度の関係及びそれらに対す るDBMシートの効果の関係を明らかとすることを目的 として支圧試験を行い,さらにそれらをボルト接合した 2種類の試験を行った.試験は両方とも油圧式引張試験 機を用い準静的載荷試験とした.

(1) 支圧試験

試験体寸法を図-4に示す.試験体の長さはボルト穴ま での長さを260mmと一定にし、ボルト穴からの端空き距 離をM16ボルトを基準に32mm (2D),48mm (3D), 80mm (5D)の3種類で比較を行った.また,各端空き 距離においてDBMシートによる補強材無し(以後,無 補強)とDBMシートを接着した補強材有り(以後,補 強)を3体ずつ、計18体で試験を行った.試験体は引抜 成形GFRP板2枚をエポキシ系接着剤を用いて1枚に貼り 合わせた.ボルト孔径は18mmとし、ボルトはM16の効 力ボルトを使用した.試験では鋼材の母材と添え板で治 具を作成し、その間に試験体を設置して行った.試験時 の治具の寸法及び試験時の様子を図-5に示す.

(2) 接合部試験

試験方法は二面引張剪断試験とした.試験体の母材は 接着にエポキシ系接着剤を使用し,GFRP板2枚を貼り 合わせ1枚として使用した.母材と添え板は端から48mm (ボルト径の3倍)の位置に直径18mmのボルト穴を開け 接合されている.ボルトはFRPボルトを使用し,トルク 強さは約36.7N·m(最大トルクの50%)とした.試験体は補 強材無し(以後,無補強)とDBMシートを接着した補 強材有り(以後,補強)を各3体ずつ,計6体作製した. 補強材有りの試験体接合部を図-6に示す.母材の両面及 び添え板の両外側に計4枚の多軸基材で補強を行ってい る.板厚は補強無しの試験体で約26mm(GFRP板×4),



補強材有りの試験体で約30mm(無補強厚+多軸基材シート×4層)となった. 図-7に試験体寸法及び試験状況 を示す.



図-5 試験時寸法及び試験時の様子



図-6 補強材有りの試験体接合部



図-7 試験体寸法,及び試験状況

4. 試験結果

(1) 支圧試験

表-2に最大荷重及びDBMシートの効果,表-3に破壊モード,図-8に破壊状況を示す.表-2からわかるように各端空き距離のすべての試験体においてDBMシートで補強した試験体は無補強に比べて耐力が向上した. DBMシートの効果は2Dで45.1%,3Dで69.7%,5Dで22.2%となり,補強試験体は板厚が増加しているため,応力度に対するDBMシートの効果は2Dで26.8%,3Dで47.3%,5Dで6.1%となる.よってDBMシートの効果は3Dにおいて最も大きな効果となった.表-3及び図-8より破壊モードは2Dと3Dの無補強及び補強有りのすべての試験体で剪断抜けにより終局を迎えた.5Dにおいては無補強の一つの試験体で支圧破壊となった.図-9に端空き距離-剪断耐力関係及び計算値を示す.剪断耐力の計算値は次式により得られ.

$$P = 2 \cdot m \cdot n \cdot p \cdot t \cdot F \tag{1}$$

これに、ボルト行数(m=1)、ボルト列数(n=1)、有効端空 き距離(p=24mm, 40mm, 72mm), 板厚(t=13mm, 15mm), 剪断強度(F=26.79MPa)⁸をそれぞれ代入する. これを算出 すると図-9の計算値が得られる. 図-9より測定値が無 補強では計算値に近い値となっている.一方,補強有り の耐力の上昇傾向が線形ではないことがわかる.これは、 2D については端空き距離が短いため DBM シートの効 果が発揮されず、5D については FRP 板材自体の剪断強 度が上り DBM シートの効果発現範囲の上限に近づいて しまったことが原因と考えられる. また破壊モードが支 圧破壊になったため DBM シートの効果が低減したと考 えると、剪断抜けした場合に DBM シートはより効果を 発揮すると考えられる. 図-10 に荷重-クロスヘッド変位 関係を示す. 2Dと 3Dを見てみると、補強有りの耐力は 向上しているが最大耐力に到達後に急激に耐力が低下し ていることがわかる. それに対して, 5D を見てみると 最大耐力に達した後も急激な耐力の低下を抑え、延性的 な耐力の低下となっている.

表-2 最大荷重及びDBMシートの効果

試験体	荷重[kN]		平均荷重 [kN]	DBM 効 果[%]	
無補強 2D	15.3	15.2	14.9	15.1	<i>16</i> 1
補強 2D	21.8	21.3	23.2	22.1	40.1
無補強 3D	26.9	25.0	21.9	24.6	607
補強 3D	42.7	41.0	41.6	41.8	09.7
無補強 5D	43.4	46.2	43.1	44.2	22.2
補強 5D	54.3	50.8	57.1	54.1	22,2

無補強	破壊モード	補強	破壊モード
2D-1	剪断抜け	2D-1	剪断抜け
2D-2	剪断抜け	2D-2	剪断抜け
2D-3	剪断抜け	2D-3	剪断抜け
3D-1	剪断抜け	3D-1	剪断抜け
3D-2	剪断抜け	3D-2	剪断抜け
3D-3	剪断抜け	3D-3	剪断抜け
5D-1	支圧破壊	5D-1	支圧破壊
5D-2	剪断抜け	5D-2	支圧破壊
5D-3	剪断抜け	5D-3	支圧破壊

表-3 破壊モード



(a) 2D無補強試験体(左から-1, -2, -3)





(d) 2D補強試験体(左から-1, -2, -3)



(e) 3D補強試験体(左から-1, -2, -3)



(f) 5D補強試験体(左から-1, -2, -3) 図-8 破壊状況

(2) 接合部試験

表-4 に最大荷重及び DBM シートの効果,表-5 に破 壊モード,図-11に破壊状況を示す.表-4より補強有り 試験体は3体共,無補強材試験体の耐力を上回っている ことが確認できる. 試験体の板厚は無補強試験体が 26mmに比べ補強有りの試験体は 30mm と 4mmのみの変 化であったが、DBM シートの効果は 69.6%となり支圧 試験の 3D の結果とほぼ一致し、DBM シートは大きな 効果を発揮していると言える.表-5及び図-10より破壊 モードはすべての試験体で支圧破壊は起きず、ボルトが 破断により終局を迎えた補強-2を除いてすべての試験体 で剪断抜けとなった. また, 補強-1 を見てみると DBM シートがボルト穴から端部にかけて繊維配向の 45°方向 に剪断破壊している. これは FRP 板材が剪断抜けした 後に DBM シートが耐力を保持したからだと考えられる. 式(1)より 3D の有効端空き距離における剪断強度を計算 すると 27.9kN となり実験値は概ね一致している. 図-12 に荷重-クロスヘッド変位曲線を示す. 図-12 より補強-1 が最大耐力に到達した後に急激な耐力の低下とならず、 緩やかな耐力の低下となっていることがわかる. 図-11 より補強-1 は DBM シートが剪断破壊している. このこ とから DBM シートが耐力を保持しているため延性的な 耐力の低下となり、結果的に DBM シートが剪断破壊し たと考えられる.端空き距離 3D における接合部の剪断 耐力は支圧試験の結果より接合部試験の方が耐力が上が り、割合にして補強の有無どちらも12%の耐力の向上と なった. これはボルト接合部において連結板を密着させ ることによって試験体間にクリアランスがなくなったた めだと考えられる⁹. 耐力には差が出たものの, DBM シートによる剪断耐力の向上効果は、支圧試験及び接合 部試験ともに約70%と同等の結果となった.よって DBM シートによる強度向上効果にボルトの締め付けの 有無は寄与しないと言える. また, 支圧試験では DBM シートの耐力保持による延性的な耐力の低下は端空き距 離 5D にのみ確認できたが、接合部試験では端空き距離 3D にもかかわらず 1 つの補強試験体で延性的な耐力の 低下となった. 表-5 より延性的な耐力の低下となった 補強-1 はボルトが破断していない. よってボルトの破断 の前に試験体が剪断破壊もしくは支圧破壊が起きれば DBM シートの耐力保持により延性的な耐力の低下とな ると考えられる.



図-9 端空き距離-剪断耐力関係及び計算値







図-10 荷重-クロスヘッド変位関係

表-4 最大荷重及びDBMシートの効果

試験体名	最大荷重 [kN]	平均值 [kN]	DBM シートの 効果[%]
無補強-1	29.4		
無補強-2	25.9	27.6	
無補強-3	27.6		60.6
補強-1	43.7		09.0
補強-2	49.2	46.8	
補強-3	47.6		

表-5	破壊モー	Ł
-----	------	---

無補強	破壊モード	補強	破壊モード
1	母材剪断抜け	1	添え板剪断抜け DBM剪断破壊
2	添え板剪断抜け	2	ボルト破断
3	母材剪断抜け	3	添え板剪断抜け ボルト破断



(a) 無補強試験体(左から-1, -2, -3)







図-12 荷重-クロスヘッド変位曲線

5. 結論

本研究では、引抜成形 GFRP 材を対象に端空き距離と 支圧強度の関係及びボルト接合した場合の接合部の強度 と、それらに対する DBM シートの効果の関係を明らか とすることを目的として試験を行った.それらにより得 られた知見を以下に示す.

- 補強材として DBM シートを貼ることによってすべての端空き距離で剪断耐力を向上させることができ、端空き距離 3D において DBM シートの効果が最も大きく発現された.
- DBM シートの耐力保持により急激な耐力の低下を 抑えることができる.

今後,多軸基材の厚さと耐力の向上効果及び耐力保持に よる延性的な耐力の低下させる効果の関係を調べる.

謝辞

本研究は,科学研究費補助金 基盤B(課題番号 16H04397)の助成を受けたものです。ここに記して謝意 を表します。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会: FRP60年の歩み, 2015.10
- 米丸啓介,藤崎忠志,杉崎健一,中辻照幸,鈴木弘 之:CFRP パイプを構造材料に適用するための基礎 的研究,日本建築学会構造系論文集,第66巻第

542号, pp.195-202, 2001

- 3) 土木学会:複合構造シリーズ04 FRP歩道橋設計・ 施工指針(案),2011
- 4) 土木学会: 複合構造シリーズ 06 FRP 水門設計・施
 工指針(案), 2014
- 5) 土木学会: 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, 2013
- 6) 松本幸大,山田聖志,花田幸大,川北拓未,小宮 巌:GFRPおよびHFRP形材の支圧強度と破壊 性状,強化プラスチックス,第58巻第2号, pp.46-48,2012.2
- Yukihiro Matsumoto, Seishi Yamada and Iwao Komiya: Nonlinear Failure Behavior and Bearing Strength of Bolted Joints in Fiber Reinforced Polymer Plates, Proceeding of The SAMPE Tech 2012, 2012.10
- #上侑也, 佐竹ちとう, グエン ゴック ユン, 松本幸大: ドリルビス接合されたGFRP板材の力学特性に関する研究, 第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要 集(CD-ROM), pp.60-67, 2016.11
- 9) Yasuo Kitane, Masahiro Myoga, Yoshito Itoh and Hideki Hibi : Effect of Bolt Preload on Bearing Strength of a Single Bolted Connection of GFRP Members, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures, 2017.7

BEARING PRESSURE STRENGTH OF BOLT CONNECTION OF PULTRUDED MATERIAL REINFORCED MULTIAXIAL BASE MATERIAL

Hideki TAKASHIMA, Viet Nhut PHAN, Genki MIEDA, Yasuo KITANE, Kunitarou HASHIMOTO and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, structures using GFRP pultruded material have been designed and put to practical use. Generally, in the pultrusion molding, fibers in the axial direction of the member are arranged, although the axial elastic modulus / strength is high, the shear strength and supporting pressure strength required around the joint portion are extremely small as compared with the material strength, When shear dropout occurs after pressure breakdown, sudden decrease in yield strength is accompanied. On the other hand, joints of hand lay-up molded GFRP materials using multiaxial base materials have ductile dynamic behavior that does not cause shear dropout even after high bearing pressure strength and bearing pressure failure, but the axial elastic modulus is inferior . In consideration of these, in this research, in order to improve the joint strength of pultruded GFRP and to prevent sharp decrease in yield strength due to shear dropout fracture, thin walled GFRP board using multi-shaft base material was bonded to the joint Consider doing. As a result, it is clarified that by adhering the multiaxial base material GFRP having a thickness of about 1 mm to the pultruded material, the bearing pressure strength can be greatly increased, and the sudden reduction in yield strength can be suppressed.