

FRP材の支圧強度と破壊性状に関する 実験的研究

松本 幸大¹・川北 拓未²・山田 聖志³・小宮 巖⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学助教 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

²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
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

³正会員 豊橋技術科学大学教授 建築・都市システム学系
E-mail: yamada@ace.tut.ac.jp

⁴正会員 福井ファイバーテック 主任研究員 (〒441-3196 愛知県豊橋市中原町岩西5番地の1)
E-mail: i-komiya@fukui-fibertech.co.jp

本研究では、FRP材を建設構造物に適用する際に生じる支圧接合部における耐力について、FRP材の繊維配向角と繊維の種類、ボルト径を変数とした実験を実施し、耐力や最大耐力後の変形性状や破壊性状を分析し報告する。まず、著者らの独自の支圧強度を評価方法を提案し、次に±45度のガラス繊維マルチアクシヤル基材を配したGFRP板材、また、軸方向繊維の一部に炭素繊維を配したハイブリッドFRP板材、さらに、土木・建築用部材として一般に用いられている軸方向繊維を多く配した引抜成形GFRP材に対して、M10、M20ボルト等による支圧実験を実施する。最後に、それらの支圧耐力や変形・破壊性状、またボルト径の違いによる寸法効果の影響を分析し、FRPボルト接合部設計の一助となるデータを報告する。

Key Words : GFRP, Hybrid FRP, Bearing test, Bearing joint, Joint strength

1. はじめに

近年、軽量で耐食優れるFRP材の建設構造への応用が拡大しており、それらの設計事例も公表されている^{1,3)}。FRPを建設構造部材として使用する場合、部材同士の接合部が発生することは避けられないが、特に機械接合においては材料設計が可能なFRP材特有の性質として、基材構成によって接合強度やその力学特性が顕著に変化することが明らかとなっている。一方、FRP材の支圧強度を算定する際、標準的な試験法が整備されていないことから、各構造物の接合法を試験体として採用し実施されている現状にある^{2,3)}。

以上を踏まえ、本研究では、まずFRP支圧接合強度を算定する試験法を提案・制作し、GFRPおよびHFRP (C+GのハイブリッドFRP) 材を対象とした様々な基材構成のFRP板材について支圧試験を実施した結果を報告する。さらに、ボルト径とボルト孔径の違いによる支圧強度の変化について分析することで、接合部の寸法効果についても言及し、FRPボルト支圧接合設計の一助とな

るデータを蓄積することを目的としている。

2. 実験概要

本研究で対象とする GFRP, HFRP 形材の積層構成を表1に示す。F, W, CB, SP はそれぞれ、引抜成形法により成形された部材である。なお、F, W は H 型断面部材 (H-250x95x9x14) より切り出したフランジとウェブ、CB はチャンネル材、SP は箱型断面部材である。GA, GB, HA, HB は VARIM 成形法で成形された FRP 板である。W, GA, GB, CB, SP は GFRP, F, HA, HB は HFRP である。CB, SP 以外においては、支圧接合に配慮して±45°や 0/90°のような、マルチアクシヤル基材を多く使用している。

図1に実験概要を示す。ボルトについてはM10, M16, M20を採用し、支圧接合部のボルト孔径はM10ボルトでは10.5mm (以下, M10φ10.5), M16ボルトでは16.5mm (以下, M16φ16.5), M20ボルトでは20.5mm (以下, M20φ20.5) と22mm (以下, M20φ22) を採用した。端空きは各ボルト径 d の5倍とした。本研究で提案する実験

治具は、図1に示すように3枚の鋼板を高力ボルトによって継手接合し、中央の鋼板を変更することにより、様々な板厚のFRP材に対応させるとともに、2mm以上のクリアランスを確保し、摩擦が生じないようにした。また、支圧試験に用いるボルトは軸部のみがFRPに接するようにボルト首下を設定した。実験時は、鋼製治具とFRP板に変位計を取り付け、相対変位 δ を計測するとともに、円孔から100mmの距離に歪ゲージを貼付し、軸方向、幅方向を計測した。なお本研究では、図2に示すように荷重-変位関係における最初の極大点 P_{max} を最大耐力と定義し、最大支圧応力度 F 、弾性係数 E は式(1)、(2)で評価した。

$$F = \frac{P_{max}}{d \times t} \quad (1)$$

$$E = \frac{(P_{max}/2)/A}{\epsilon_{max}/2} \quad (2)$$

ここで、 d はボルト径、 t は試験体板厚、 A は試験体断面積である。式中の ϵ_{max} は、本研究では P_{max} の点で歪ゲージより得られた歪値を採用した。

3. 実験結果

図3に実験結果から得られた最大支圧応力度を、表2に平均支圧応力度を示す。なお、GA、GBのM10ボルトの場合、ボルトの剪断破壊が先行したため、それらの数値は参考値である。

まず、ボルト径による違いに注目すると、全ての試験体においてM10 ϕ 10.5やM20 ϕ 20.5による評価が高く、次いでM16 ϕ 16.5 ϕ 16.5、M20 ϕ 22となっている。また、M20 ϕ 20.5とM20 ϕ 22を比較してみると、M20 ϕ 20.5の評価が大きく上回っていることが分かる。これは、ボルトと円孔のクリアランスの違いにより、局所的な損傷が生じ、一時的に耐力に達したため、M20 ϕ 22の値が低くなったと考えられる。次に繊維配向による違いに注目してみる。GAとGB、HAとHBを比較してみると、それぞれ

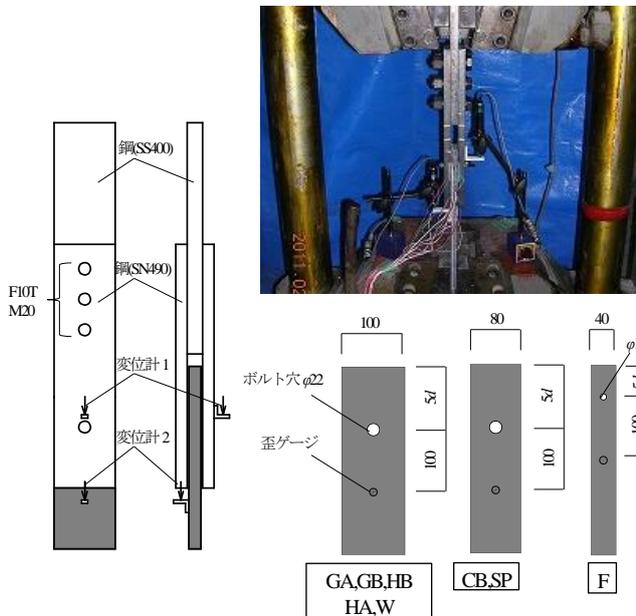


図1 実験概要

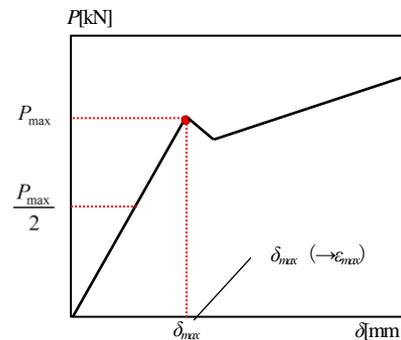


図2 最大支圧応力度、弾性係数の定義

表1 試験体の繊維配向

名称	板厚(mm)	基材構成 (アンダーラインはCF)
GA	20	[0/90/±45] <u>1</u> 1s
GB	20	[0/±45] <u>1</u> 1s
HA	14	[[0/90/±45/Q] <u>4</u> /[0/90/±45] <u>2</u> 2s
HB	10	[0/90/±45/Q] <u>4</u> s
F	14	[CSM/0/90/M/[0/Q/±45/Q/±45] <u>4</u> /Q/0/±45/0/90/±45/0/90/±45/0/90/M/±45/0/90/M/CSM]
W	9	[CSM/0/90/M/±45/0/90/M/±45/0/90/±45/0/90/±45] <u>2</u> 2s
CB	6.3	[CSM/0/CSM]
SP	5.5	[CSM/0/CSM/0/CSM]

ぞれ GB, HA の方が高く、軸方向繊維の割合が高い方が、支圧応力度が高くなるという結果が得られた。最大支圧応力度に関して 99.9%信頼区間として評価すると、マルチアクシャル基材を使用した試験体では 250MPa 期待でき、特に GB, HA においては 350MPa を上回る。なお、文献 (5) によると面圧 (支圧) 強さ 195MPa (標準偏差 22MPa), また、文献 (3) によると既往の実験結果においても 200~250MPa 程度の結果である。よって本実験で採用した、マルチアクシャル基材を使用した GA, GB, HA, HB, F, W 試験体は、高い支圧強度を有していると言える。

図 4 に試験体中央部に貼付した歪ゲージより評価した弾性係数を示す。GA, GB を比較すると、GB シリーズの方が軸方向の繊維が多いため弾性係数が高いことが分かる。また、HA, HB を比較すると、HB シリーズの方が炭素繊維の割合が高いため、弾性係数が高いことが分かる。

図 5, 図 6 に荷重-変位関係を示す。全ての試験体で、最大耐力まで線形的な挙動を示している。また、最大耐力を迎えた後も载荷を続けた試験体について見ると、軸方向繊維の割合が高い CB, SP では最大支圧応力度を迎えた後に大きな耐力低下が生じているのに対し、マルチアクシャル基材を使用することで最大支圧応力度後も顕著な耐力低下や剪断抜け等は生じないことが明らかとなった。なお、GA の M20φ22 において、大変形後に最大耐力が支圧耐力を上回っている試験体については、ボルトのめり込みによって面外に押し出された FRP と試験治具との摩擦力によって耐力が増大したものである。

図 7 に支圧強度とボルト孔径をボルト径で除した値の関係を示す。なお図 7 には本研究で採用したボルト径およびボルト孔径の試験結果が 3 体以上実施できた W, CB, SP のみ示している。図 7 より、ボルト孔径/ボルト径の低い試験体で支圧応力度が高い傾向にあることが明らかとなった。すなわち、ボルト孔径/ボルト径が 1.05 以下であれば支圧強度に大きな差異は見られないが、これを超える M20φ22 では支圧強度が相対的に低下すること明らかとなった。これは、鋼材のように局所的に降伏しても塑性や応力再配分によって耐力低下が起きない材料とは異なる性状であると考察できる。今後、支圧強

度とボルト孔径/ボルト径の関係については詳細に分析する必要があると考えられる。

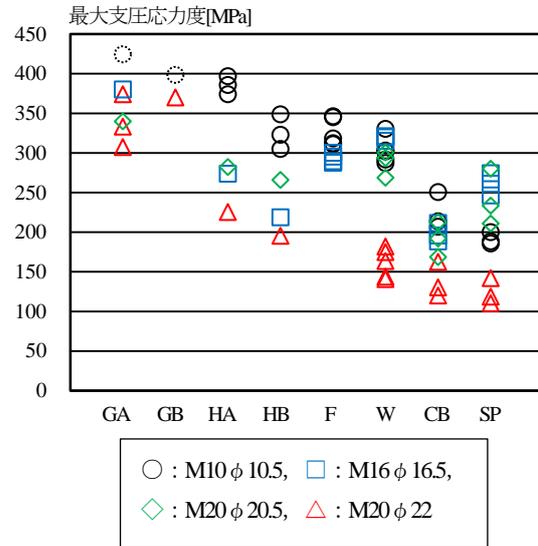


図3 最大支圧応力度

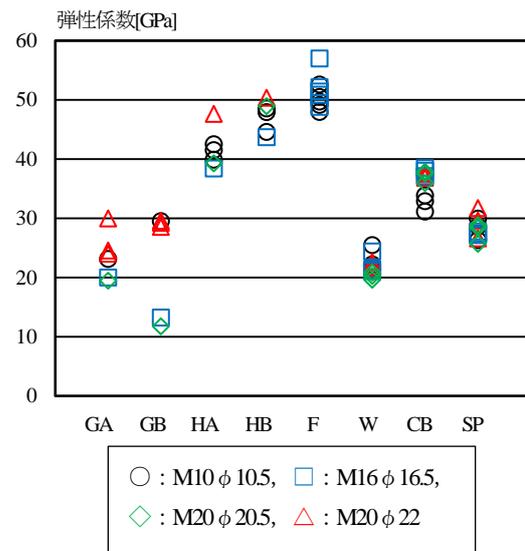
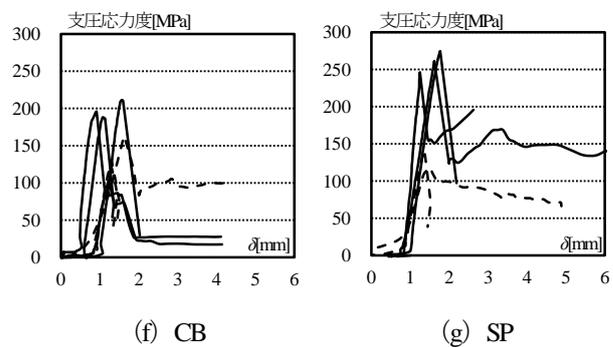
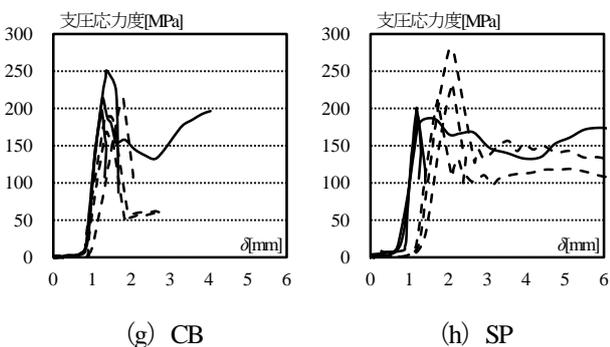
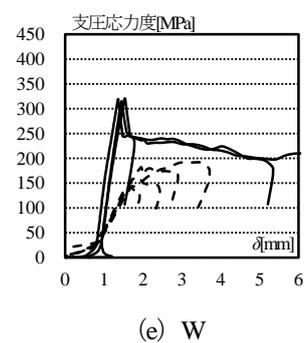
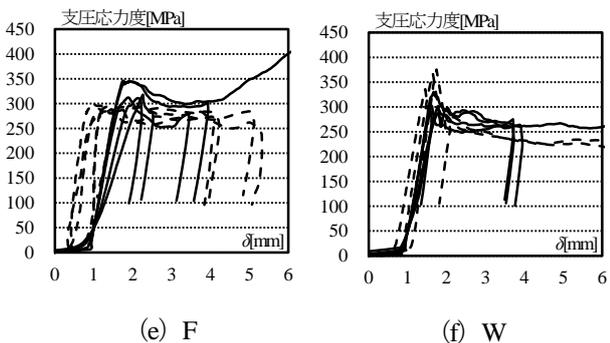
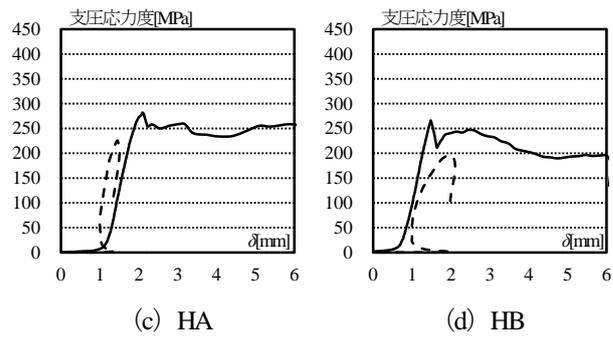
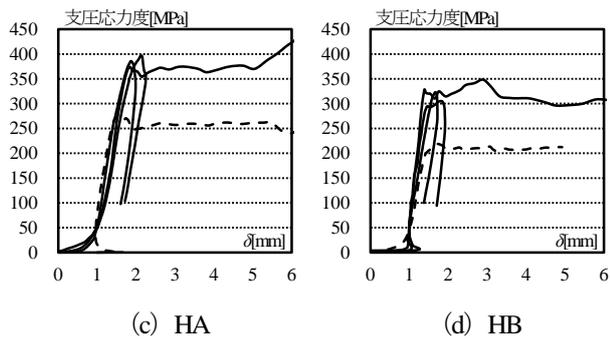
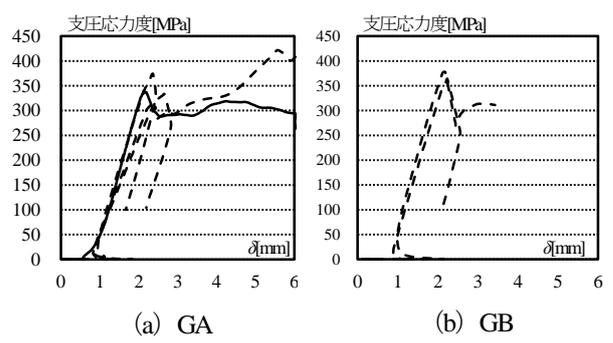
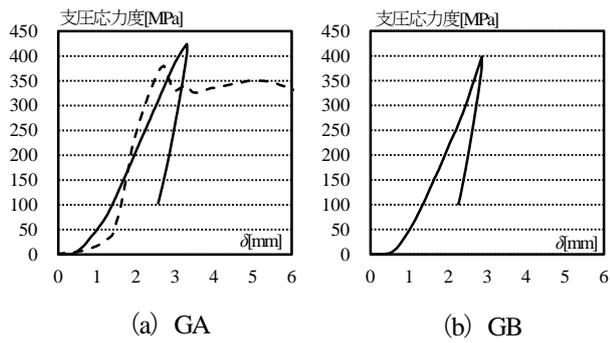


図4 弾性係数

表2 平均支圧応力度

試験体	ボルト径	平均支圧応力度	試験体	ボルト径	平均支圧応力度	試験体	ボルト径	平均支圧応力度	試験体	ボルト径	平均支圧応力度
GA	M10 φ 10.5	424.3	HA	M10 φ 10.5	385.5	F	M10 φ 10.5	326.4	CB	M10 φ 10.5	223.7
	M16 φ 16.5	380.0		M16 φ 16.5	273.6		M16 φ 16.5	292.1		M16 φ 16.5	198.4
	M20 φ 20.5	339.8		M20 φ 20.5	282.0		M20 φ 20.5	292.1		M20 φ 20.5	191.0
	M20 φ 22	338.1		M20 φ 22	225.2		M20 φ 22	292.1		M20 φ 22	137.6
GB	M10 φ 10.5	398.3	HB	M10 φ 10.5	325.4	W	M10 φ 10.5	302.7	SP	M10 φ 10.5	191.3
	M16 φ 16.5	331.5		M16 φ 16.5	218.7		M16 φ 16.5	318.6		M16 φ 16.5	260.5
	M20 φ 20.5	331.5		M20 φ 20.5	265.8		M20 φ 20.5	287.4		M20 φ 20.5	241.4
	M20 φ 22	331.5		M20 φ 22	195.3		M20 φ 22	160.9		M20 φ 22	123.6



— : M10 φ 10.5, -- : M16 φ 16.5

— : M20 φ 20.5, -- : M20 φ 22

図5 M10 φ 10.5, M16 φ 16.5の荷重-変位関係

図6 M20 φ 20.5, M20 φ 22の荷重-変位関係

図8に試験体の載荷後の状況を示す。何れの試験体も白化現象が確認され、支圧破壊となっている。Fについては両面で繊維が異なるが、破壊性状に特徴的な差異は観察されなかった。CBについては、6試験体中2試験体で剪断抜け破壊となったが、これらの試験体は軸方向繊維の比率が高いからだと考えられる。試験後に支圧面積を目視で測ったところ、M10φ10.5の場合、すべての試験体においてボルト径の9割程度であったが、M20φ22の場合、GA、GB、HA、HBにおいてはボルト径の8割程度、それ以外においては5割程度であった。このことから、局所的な破壊によって支圧強度が低下したことがうかがえる。

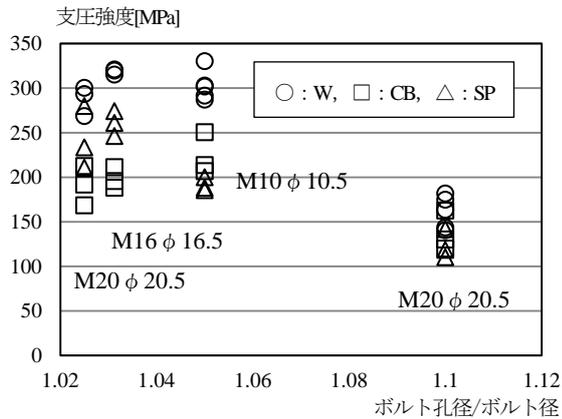


図7 支圧強度とボルト孔径/ボルト径の関係

4. まとめ

本研究では、FRP材を建設構造物に適用する際に生じる支圧接合部における耐力について、FRP材の繊維配向角と繊維の種類、ボルト径を変数とした実験を実施し、耐力や最大耐力後の変形状や破壊性状を分析した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 1) マルチアクシャル基材を使用したFRPの支圧耐力は使用しないFRPに比べ40%程度高くなる傾向を示した。
- 2) それらの試験体に対して端空きを5dとした場合、支圧破壊を呈した後の挙動について、大きな耐力低下や破断は見られないことが明らかとなった。
- 3) M10φ10.5やM20φ20.5の支圧耐力がM20に比べ40～90%程度高くなり、ボルト孔のクリアランスを大きく設定すると寸法効果により支圧耐力が低くなる傾向を示した。

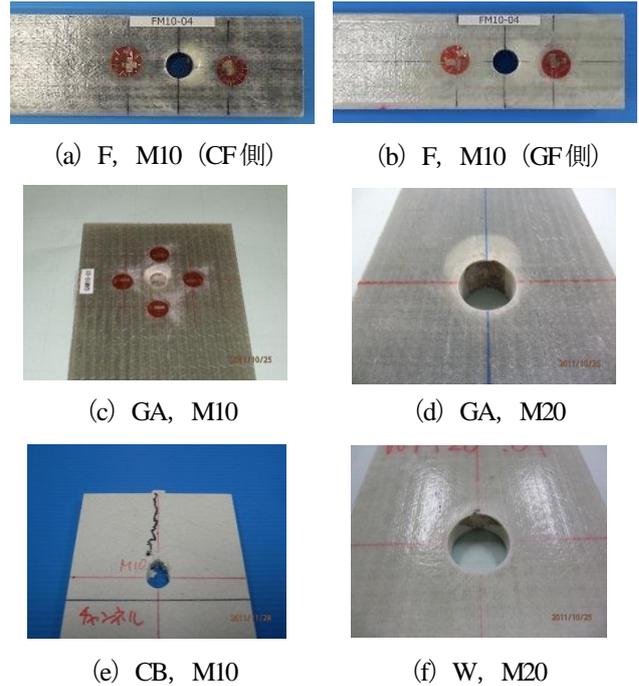


図8 破壊性状

謝辞

本研究の一部は、平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業「高耐久性新素材を用いた部材の結合方法の開発と橋梁への適用」の補助を得ている。実験には元豊橋技術科学大学大学院生（現、浦野設計）花田幸大氏の多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：新しい建築空間—ハイブリッド構造の新展開—, 2009
- 2) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案）, 土木学会複合構造シリーズ04, 2011
- 3) 土木学会：FRP 橋梁 —技術とその展望—, 2004
- 4) J. T. Mottram and G J Turvey: Physical test data for the appraisal of design procedures for bolted joints in pultruded FRP structural shapes and systems, Progress in Structural Engineering and Materials, Volume 5, Issue 4, pp.195-222, 2003
- 5) 強化プラスチック協会：繊維強化フェノール基複合材料設計規準, 2007
- 6) 松本幸大, 山田聖志, 花田幸大, 川北拓未, 小宮巖：GFRP および HFRP 形材の支圧強度と破壊性状, 強化プラスチック協会, 強化プラスチック, Vol.58, No.2, pp.46-48, 2012
- 7) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧, 1994

MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BEARING JOINTS FOR FIBER REINFORCED POLYMER PLATES

Yukihiro MATSUMOTO, Takumi KAWAKITA, Seishi YAMADA and Iwao KOMIYA

Recently, a lot of FRP civil structures are constructed and the retrofits by using fiber reinforced polymer (FRP) are developed. However, the joint strength and its design procedures are not made clear. Furthermore, it is possible that the rational fiber orientation is designed in the FRP material and it is of primary importance to ensure joint strength in composite structures. Then the non-linear failure behaviors of bolted bearing joints in various FRP plates have been studied by using the present proposed new tensile testing. And the effects of the multi-axial fiber for the bearing strength and the deformation behavior are investigated with in this paper. Finally, it has been suggested that the bearing strength per unit area for a FRP bolted joint decreases as the diameter of bolt increases because of no redistribution after yielding.