

(6) FRPボルト・接着併用継手接合部の力学性状に 及ぼすボルト位置の影響

○小島 敬司¹・松本 幸大²

¹正会員 豊橋技術科学大学 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: t113621@ace.tut.ac.jp

²正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 助教
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Polymer : 以下, FRP) は軽量, 高強度であり, 耐久性に優れることから, 建設構造物や二次部材への適用も期待されている。しかし, FRP材で建設構造物を構成する場合に不可欠となる接合部の力学的性状は明らかになっておらず, 研究成果の蓄積が必要である。本論では, FRP材の接着接合及び, 接着・機械併用接合を対象に, FRP継手接合部の引張試験を行い, 接合部の接着長さ, 機械接合配置の変化による力学的性状への影響について分析及び考察を行う。特に, 接着接合で応力が集中する端部の補強を想定し, 接着部の端部に機械接合を配置した場合の効果について分析する。結果として, 接着長さを増加すると耐力は増加するが, 最大平均せん断応力度は減少することに対して, ボルトを併用することにより耐力が向上し, 更に, 接着部端部をボルトで抑えることで耐力が向上すること等を示す。

Key Words : FRP, single lap joint, joint strength, adhesive joint, bolted joint

1. はじめに

FRPは軽量, 高強度であり, 耐久性に優れることから, 建設構造物や二次部材への適用も期待されている。しかし, FRP材で建設構造物を構成する場合に不可欠となる接合部の力学的性状や合理的な設計法は十分に明らかになっていないとは言えず, 研究成果の蓄積が必要である。既往の研究では, 機械接合に接着接合を併用することで, 接合能力の上昇を目的とし接着・ボルト併用接合でボルトの本数, ボルトの締め付けトルクの違いによる力学特性への影響¹⁾²⁾, リベット接着併用接合の力学特性³⁾が報告されている。FRP材の接合では, ボルトによる支圧接合がよく用いられるが, ボルト孔のクリアランスによる変形が懸念され, これを防止するため補助的に接着剤を併用する例も見られる。また, 接着による接合とその力学性状も数多く報告されているが, 接着接合は接着長さが長くなると相対的に剥離時の引張剪断応力度が低下することが知られている。これらを踏まえ, 本研究では, 接着接合を補強する目的でボルトを用いることを念頭に, FRP材の接着接合及び, 接着・機械併用接合を対象として引張試験を行い, 接合部の接着長さ, 機械接合配置の変化による力学的性状への影響について分析及び考察を行う。特に, 接着接合で応力が集中する端部⁴⁾の補強を

想定し, 接着部の端部に機械接合を配置した場合の効果について分析する。

2. 実験概要

本研究で使用した試験体は, 図1に示すようなガラス繊維を用いた引抜成形FRP材(□-100×100×5×5)から切り出した帯板を用いた。繊維はガラス基材としコンティニューアスストランドマットとガラスロービングで構成され繊維体積含有率は63%, 樹脂は不飽和ポリエステル樹脂を使用している。表1にFRP材の力学特性, 写真1に材料試験体, 写真2に材料試験の様子を示す。

表2に実験変数・試験体数, 図2に試験体概要を示す。試験体は図2のような重ね継手接合で, 接着剤はエポキシ樹脂接着剤E258を用いた。図2(b), (c)では接着剤が硬化する前にM10ボルト(ボルト孔d=12mm)を用い, 図の位置で締め付けトルク10N・mで締めた。また, 図2(d)は接着剤が硬化した後, プレートで接着部端部を締め付けた。図2(e)は図2(b), (c)と同様に, 接着剤が硬化する前に板厚3mmの鋼プレート用い, 接着部端部をM10ボルトで締め付けトルク10N・mで締めた。

表1 FRP材の力学特性

	公称値	測定値(平均)
引張強度 σ (MPa)	350 以上	396
弾性係数 E (GPa)	27 以上	31.3
ポアソン比	—	0.25

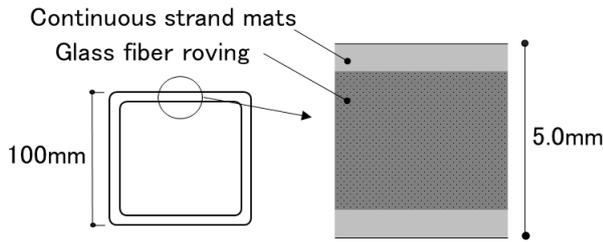


図1 FRP材の概要

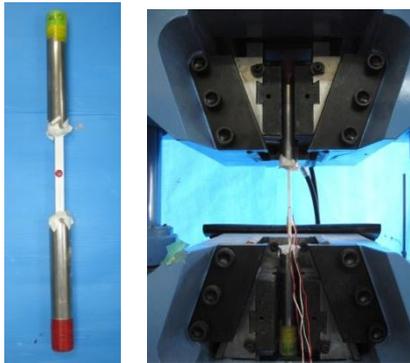


写真1 材料試験体 写真2 材料試験の様子

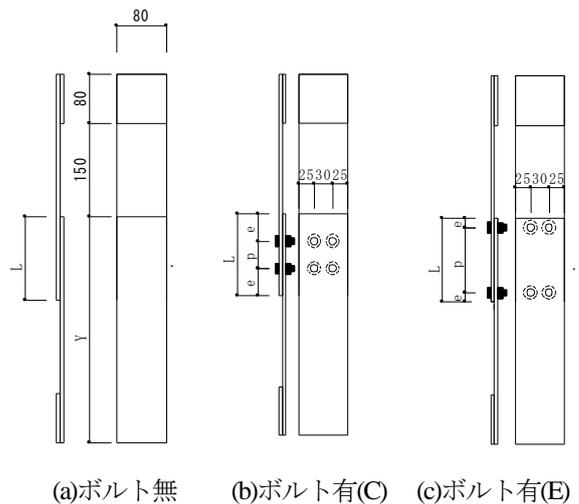


写真3 引張载荷時の様子

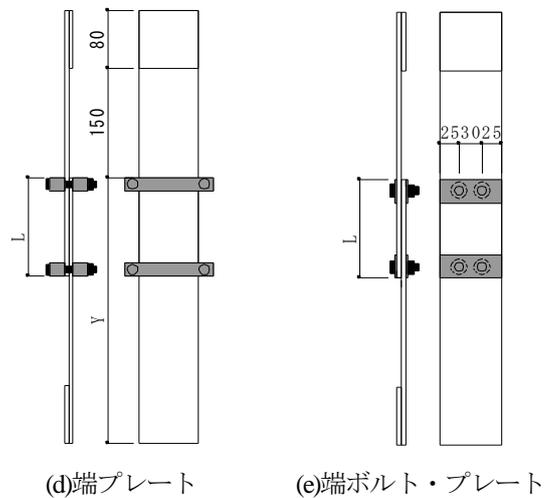
実験変数は接着長さ、併用する機械接合の有無・種類、ボルト配置とし、表2の17ケースとした。試験体名は接着接合試験体（以下、ボルト無）、接着・ボルト併用接合試験体のボルトを均等に配置した場合（以下、ボルト有(C)）、接着・ボルト併用接合試験体のボルトを端部に配置した場合（以下、ボルト有(E)）は、 p がボルト間隔、 L が接着長さ、 e が端空長さをそれぞれ表し、接着部端部をプレートで締め付けた場合（以下、端プレート）は、 L が接着長さ、 c がプレートの有無を、接着部端部をプレートを用い、ボルトで締め付けた場合（以下、端ボルト・プレート）は、 L が接着長さ、 bc がボルト・プレートの有無を表している。

表2 実験変数・試験体数

試験体名	接着長さ L	機械接合種類	ピッチ p	端空 e	部材長 Y	試験体数 n
L90	90mm	—	—	—	320mm	4体
p30L90		ボルト	30mm	30mm		4体
p60L90e15		ボルト	60mm	15mm		4体
L90c		プレート	—	—		3体
L135	135mm	—	—	—	365mm	4体
p45L135		ボルト	45mm	45mm		4体
p105L135e15		ボルト	105mm	15mm		4体
L135c		プレート	—	—		3体
L135bc		ボルト・プレート	105mm	15mm		3体
L180	180mm	—	—	—	410mm	4体
p60L180		ボルト	60mm	60mm		4体
p150L180e15		ボルト	150mm	15mm		4体
L180c		プレート	—	—		3体
L180bc		ボルト・プレート	150mm	15mm		3体
L270	270mm	—	—	—	500mm	3体
p240L270e15		ボルト	240mm	15mm		3体
L270bc		ボルト・プレート	240mm	15mm		3体



(a)ボルト無 (b)ボルト有(C) (c)ボルト有(E)



(d)端プレート (e)端ボルト・プレート

図2 試験体概要

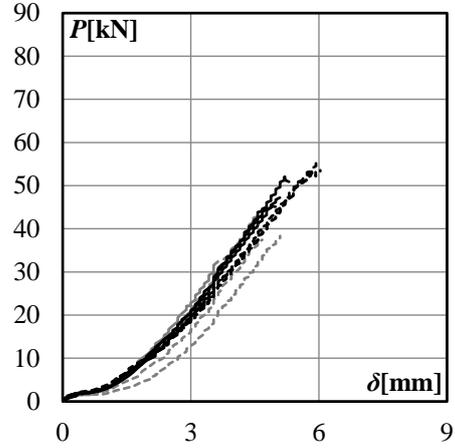
実験は万能試験機を用いて引張試験を行った。接着接合は破断または荷重が上がらなくなるまで、図2(b), (c), (e)は端抜けするまで載荷を行い、その後、除荷を行った。写真3に引張載荷時の様子を示す。

均せん断応力度を示す。また、図3(b)には式(1)、図3(a)には式(2)による各シリーズの平均値の近似曲線を加えた。図4より、機械接合の有無・種類・配置に関わらず、接着長に伴い、耐力が増加している。これは接着長が増加す

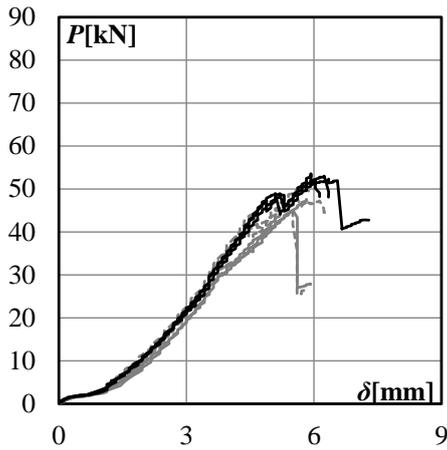
3. 実験結果と考察

図3に荷重-変位曲線を示す。すべての試験体で最大荷重までは線形的な挙動を示している。ボルト無と端プレートは最大荷重到達と同時に剥離し、急激に耐力を喪失する。接着・ボルト併用接合と端ボルト・プレートは耐力低下後も耐力を保持した。これはボルト無と端プレートは最大荷重到達後、接着面が破断し、接着・ボルト併用接合と端ボルト・プレートはボルトの支圧により耐力を保持したと考えられ、破壊順序が接着面の破壊後ボルトの支圧破壊であるといえる。

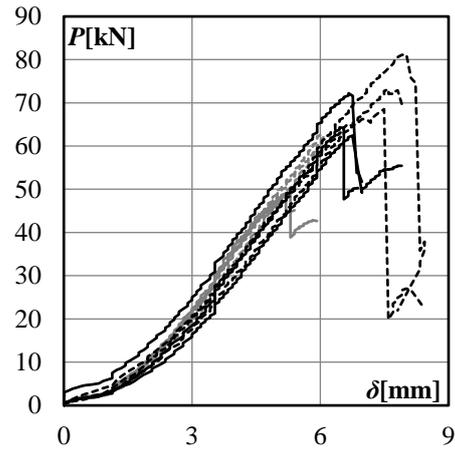
図4に各試験体の最大耐力、最大平均せん断応力度をプロットしたもの、表3に平均最大耐力、表4には最大平



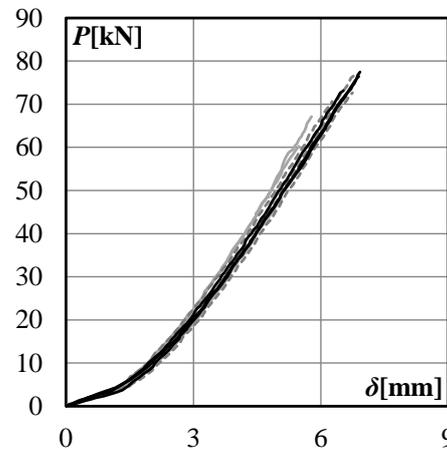
(a)ボルト無



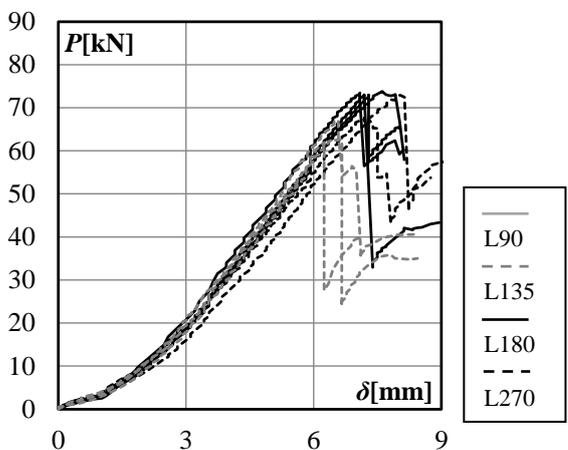
(b)ボルト有(C)



(c)ボルト有(E)



(d)端プレート



(e)端ボルト・プレート

図3 荷重-変位曲線

ること荷重を負担する面積が増加したためである。しかし、最大平均せん断応力度は接着長の増加につれ低下している。これは接着部でのせん断応力分布は均一でなく、接着部の両端で応力集中が生じ、接着長の増加に伴い、剪断応力度を負担しない接着中央部面積が大きくなるためであると考えられる。L90シリーズでボルト有(C)はボルト無と比較すると最大耐力が1.3倍程度、ボルト有(E)は1.5倍程度、端プレートは1.8倍程度増加している。同様に、L135シリーズではボルト有(C)は1.2倍程度、ボルトEは1.5倍程度、端プレートは2.2倍程度、端ボルト・プレートは1.6倍程度増加し、L180シリーズではボルト有(C)は1.1倍程度、ボルトEは1.4倍程度、端プレートは2.3倍程度、端ボルト・プレートは1.5倍程度増加し、L270シリーズではボルトEは1.4倍程度、端ボルト・プレートは1.3倍程度増加した。これより、接着・機械併用接合はボルト無に比べ耐力が増加していることが分かる。これは機械接合で締め付けることで、接着部の剥離が抑えられたためであると考えられる。また、ボルト有(E)はボルト有(C)に比べ耐力が増加し、端ボルト・プレートはL270以外でボルト有(E)に比べ耐力が増加し、端プレートはさらに耐力が増加した。これは接着部端部に機械接合を設置することにより、剥離が生じ始める端部で剥離を抑制する圧着力が作用したためであると考えられる。しかし、L270に関しては、接着部が長い場合接着施工時のボルトによる締め付けが中央部まで届かず、接着不良ならびに接着層厚が増大し、端ボルト・プレートの耐力がボルト有(E)より低くなったと考えられる。ボルト有(C)は接着長が増加するに伴い、ボルト無との耐力差が小さくなっている。これは接着長に伴い端

$$\sigma_{(x)} = a \frac{1}{(x+1)^b} \quad (1)$$

$$P_{(x)} = \sigma_{(x)} \cdot B \cdot x = a \frac{B \cdot x}{(x+1)^b} \quad (2)$$

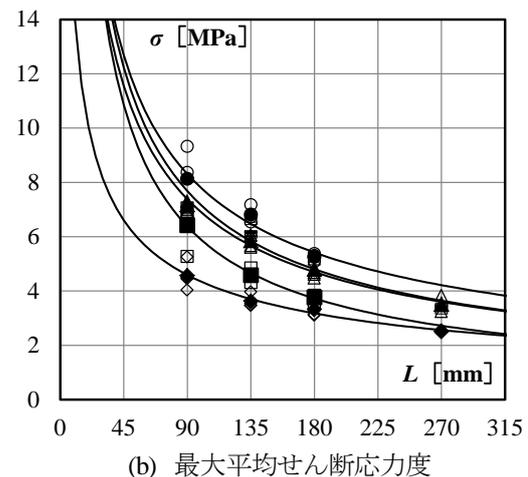
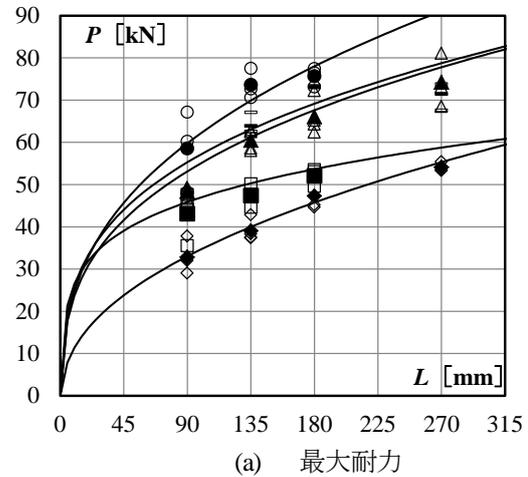


表3 最大平均耐力(単位:kN)

	ボルト無	ボルト有(C)	ボルト有(E)	端プレート	端ボルト・プレート
L90	32.8	43.1	48.4	58.5	—
L135	39.1	47.4	60.5	73.6	63.9
L180	47.3	52.1	66.1	75.	73.1
L270	54.1	—	74.2	—	71.4

表4 最大平均せん断応力度(単位:MPa)

	ボルト無	ボルト有(C)	ボルト有(E)	端プレート	端ボルト・プレート
L90	4.6	6.4	7.2	8.1	—
L135	3.6	4.6	5.8	6.8	6.2 N
L180	3.3	3.8	4.8	5.3	5.2
L270	2.5	—	3.5	—	3.4

実験値：◇ボルト無 □ボルト有(C) △ボルト有(E)
 ○端プレート ◻端ボルト・プレート
 平均値：◆ボルト無 ■ボルト有(C) ▲ボルト有(E)
 ●端プレート ■端ボルト・プレート

図4 最大耐力・最大平均せん断応力度

空が大きくなり、上記のボルトによる剥離抑制効果が減じられたためである。さらに、端部を抑えたものとボルト有(C)の耐力差は接着長が短い場合は、小さくなっている。これは接着長が短い場合は、全体に対する端空の割合が大きいためであると考えられる。

図5に荷重-歪曲線、図6に接着部のひずみ分布を示す。剥離が生じると、その位置では応力の伝達がなくなるため歪が減少する兆候が表れる。本研究で得られた初期剥離が生じた荷重（以下、初期剥離荷重）を図5に横線で示す。初期剥離荷重は端プレート、端ボルト

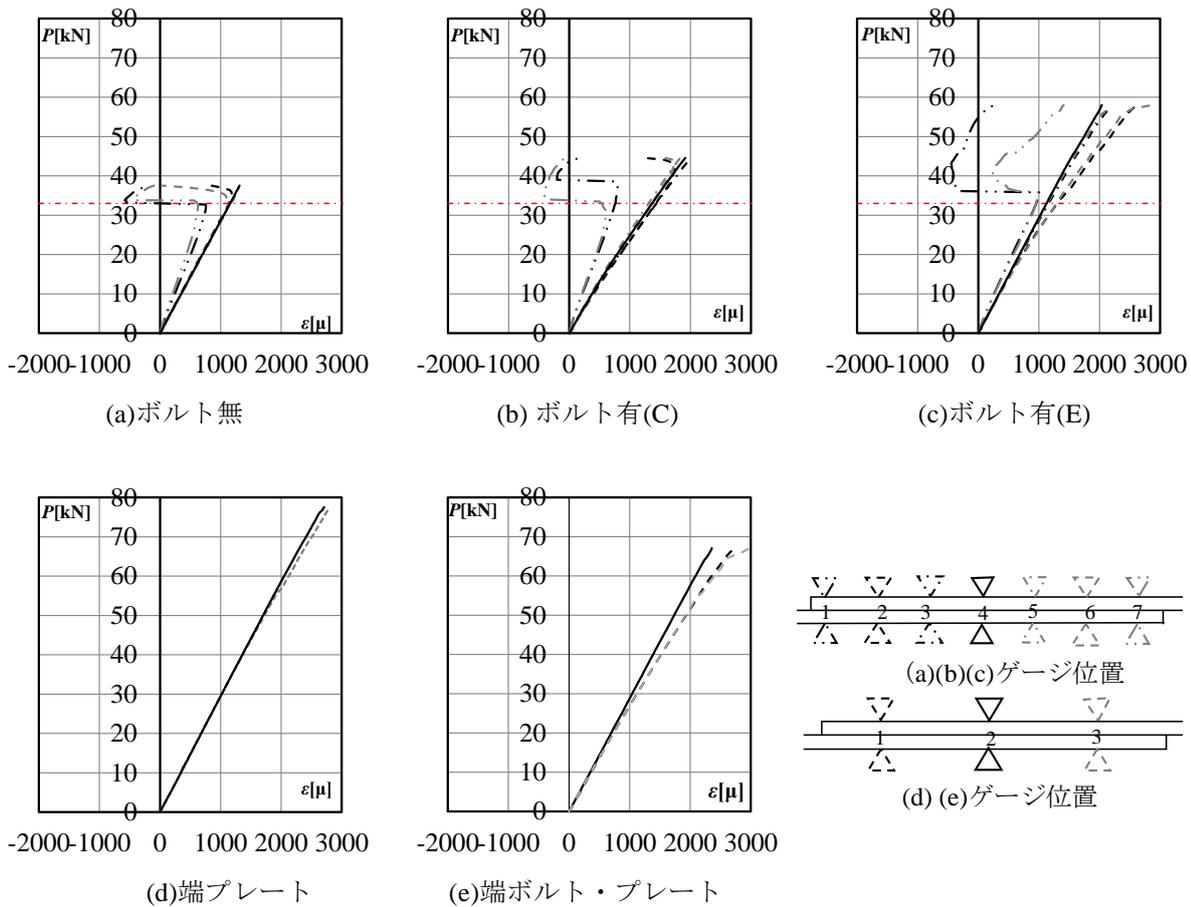
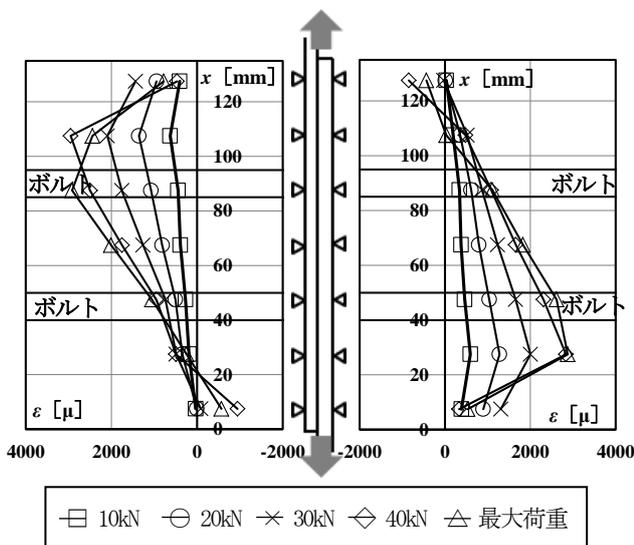


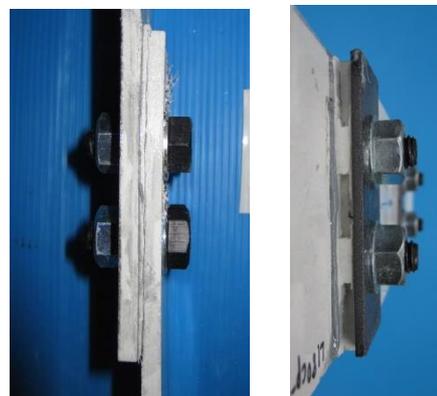
図5 荷重-歪曲線(L135シリーズ)



ト・プレート以外のシリーズで接着部端部の位置で 30kN 付近に表れた。接着・ボルト併用接合としても初期剥離荷重は変化しないと考えられる。しかし図 5(b), (c)から、ボルトより外側の歪ゲージのみから剥離の兆候が観察されていることから、ボルト間では剥離の兆候は表れないといえる。これは、図 6 のひずみ分布から分かる。端プレートと端ボルト・プレートでもプレート



(a) ボルト無(L90) (b) ボルト無(L90)



(c) ボルト有(C)(p30L90) (b) 端ボルト・プレート(L180bc)

写真3 破壊性状

間では剥離の兆候は表れていない。これより、初期剥離荷重はボルトの有無、配置によって変化しないが、機械接合を併用することで、剥離の進行を抑え初期剥離後の耐力向上の効果があると考えられる。

試験体の破壊状況を写真3に示す。破壊性状は全てのシリーズで接着層での破壊でなくFRP材のマット層とロービング層とが剥離し破壊している。

4. まとめ

本実験は、FRP材の接合に関して、接着・ボルト併用接合とし引張試験を行い、考察を行った。

- 1) 接着長さを増加すると耐力は増加するが、最大平均剪断応力度は減少することを示した。
- 2) 接着・ボルト併用接合は、接着接合に比べ耐力が向上し、特に接着部端部を抑えることで耐力が向上することを示した。均等に配置した場合は接着長さが増加すると、耐力向上効果が低くなることを示し
- 3) 初期剥離荷重は、ボルトの有無、配置によっての変化はないが、ボルトの設置によってボルト内側への剥離の進行を抑制する効果が見られ初期剥離後の耐力が向上することを示した。
- 4) 破壊性状は、ボルトの有無・配置、プレートの有無

に関係なく、FRP材の層間せん断破壊によるマット層の剥離を確認した。その後、ボルト併用したものはボルトの支圧による端抜けを確認した。

謝辞：本研究は山田聖志教授の懇切丁寧なご指導を頂いたものであり、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中尾旭, 松本幸大, 小宮巖: FRP継手接合部の力学性状に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集第32巻, "226-1"- "226-4", 2009.3
- 2) 花田幸大, 松本幸大, 小宮巖: FRP継手接合部の破壊性状に関する実験的研究, 学術講演梗概集. B-1, 構造I, 荷重・信頼性, 応用力学・構造解析, 基礎構造, シェル・立体構造・膜構造, 2009, 7
- 3) 中村一史, 前田研一, 睦好宏史, 松井孝洋, 柳沼謙一: リベット接合と接着接合によるハイブリッドFRP桁の連結方法に関する実験的検討, 第4回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.95-103, 201
- 4) 中澤博之: 建設構造用引抜成形FRP部材の接合部に関する実験的研究, 豊橋技術科学大学 博士学位論文, 2003

Effects of bolt position on bolt/adhesive combined lap joints consisting of FRP plates

KOJIMA Takashi and MATSUMOTO Yukihiro

In recent years, fibre reinforced polymer (FRP) has been applied to the civil structures and architectural materials. FRP material has been taken as the maintenance-free, long-lived and light-weighted structure because of its high corrosion resistant, light weight and high strength characteristics. However, it is primary importance to ensure joint strength in composite structures. In this paper, the tensile tests on the bolt/adhesive combined lap joints consisting of FRP plates have been carried out. Then, joint strength and debonding behavior have been investigated through the tests. Also, the effects of bolted joints and the bolt position are investigated in detail. As the results, the bolts on the end of bonded area effectively increase the joint strength for the adhesively bonded joints.