

(21) GFRP板材のドリルビス接合強度に関する 実験的研究

井上 侑也¹・松本 幸大²・三枝 玄希³・室本 章浩⁴・仲本 克則⁵

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:y133506@edu.tut.ac.jp

²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-matsu@ace.tut.ac.jp

³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:g155503@edu.tut.ac.jp

⁴AGCマテックス株式会社 技術部 (〒252-0216 神奈川県相模原市中央区宮下1-2-27)

E-mail:muromoto@agm.co.jp

⁵大和リース株式会社 新規事業推進室 (〒540-0011 大阪府大阪市中央区農人橋2-1-36 ピップビル)

E-mail:naka-k@daiwalease.jp

繊維強化樹脂（以下、FRP）は軽量・高強度・高耐食性などの特徴から車輻や航空機、宇宙関係など様々な分野に利用され、建設分野での応用も進んでいる。FRP材の接合方法は多く提案されており、既往の研究ではボルトやリベット、接着等を対象として検討・評価されている。一方、本研究では、下穴なしで接合可能なドリルビスに注目する。FRPはハンドレイアップ成形法及び引抜成形法によって成形されたGFRPを用いている。接合部試験は、引抜試験・一面せん断試験・二面せん断試験の3種について準静的載荷により、耐力評価を行った。その結果、以下のような知見を得た。(1)各種外力条件における耐力について明らかにし、既往の研究によるボルトの支圧強度とおおむね同等の値を得た。(2)一面・二面せん断試験においてFRPの板厚及び間隔が耐力に及ぼす影響を評価する手法を示した。

Key Words :GFRP, tapping screw,joint strength

1. はじめに

繊維強化樹脂（Fiber Reinforced Plastics：以下、FRP）は、軽量・高強度・高耐食性などの特徴から車輻や航空機、宇宙関係など様々な分野に利用され、建設分野での応用も進んでいる¹⁾。FRP材を建設構造物として応用する場合、材料強度等の設計用値や弾性係数等の材料特性を把握することに加え、大型の構造物が多い建設構造分野では一体成形は困難であることから各部材の接合部を検討する必要がある。前者については文献2, 3)に示されているような材料特性区分等により、材料の用途に対応した材料特性を有する引抜成形FRP材が選択できるが、後者に関しては、その接合法・接合強度共に都度実験などを行って設計用値を定めている現状にある。FRP材の接合に関しては、ボルトやリベットを用いた機械接合により接合する方法が主として用いられており、その設計耐力

はFRP材の支圧強度より評価される場合が多い。異方性の強い引抜成形FRP材の支圧強度は、材料強度に比して小さくなることが多く^{4,5)}、高強度なFRP材の特性を活かしきれていない現状にあると考えられる。

FRP材の工業分野への応用は約一世紀を迎えており⁶⁾、この間、特に航空分野ではFRP材ならびにその接合に関して、様々な検討がなされてきた。中でも文献7, 8)では小径の金属製ビスを多数打ち込むことで、CFRP板を全強接合できることが示されている。また、文献4)においてもボルト・リベット接合や接着接合以外の新たな接合方法の可能性が言及されており、今後、FRP材を用いた建設構造物を考える上で、接合方法の効率化・高度化は極めて重要な研究課題と言える。そこで本研究では、軽量建築鉄骨構造の接合に用いられている、ドリルビスに注目する。ドリルビスはビスの先端にドリル部を有して

いることから、下穴なしで接合可能である。ドリル部の穿孔時には必要最小限の孔あけしか行わず、またクリアランスが存在しないため、支圧接合に比して高い初期剛性が期待できるとともに、径は3~5mm程度となっており、ビスの挿入によるFRP材の繊維の切断を低減できるため、接合効率の向上に繋がると考えられる。本研究では、まずドリルビスを用いたFRP材の接合に関して、基礎データおよび設計法の確立を念頭に、ビス1本に対する接合強度や力学挙動を把握することを行った。

2. 試験概要

試験に用いたFRPはハンドレイアップ（以下、HLU）成形法で成形されたGFRPと引抜（以下、PL）成形法で成形されたGFRPの二種を使用した。強化繊維と樹脂の種類は、HLU材においては、チョップドストランドマットと不飽和ポリエステル樹脂であり、PL材においては主にロービングと不飽和ポリエステル樹脂である。試験は表1に示す、引抜・一面せん断・二面せん断試験を行った。

表1の試験を行うに先立ってHLU材で軸引張試験による材料試験を行った。それによって得られた結果を表2に示す。FRPは、耐力がほとんど繊維の量で決定され、樹脂量の変化は耐力にほとんど影響を及ぼさないという特徴を持つので、板厚を公称板厚である4mmに統一して弾性係数を算出すると、既往の研究と同等の弾性係数であった⁹⁾。表3にはPL材の力学特性を示している。

HLU材とPL材における試験に用いたドリルビスを図1に示す。ドリルビスはHLU材とPL材の板厚に適したものを選択している。締付けトルクは母材の損傷を防ぐため、HLU材で9N・m、PL材で15N・mとして制御した。

各試験の模式図を図2に示す。一面せん断・二面せん断試験では、FRP同士が接する部分に防水テープ(厚さ0.8mm)を挟んだものについても試験を行った。

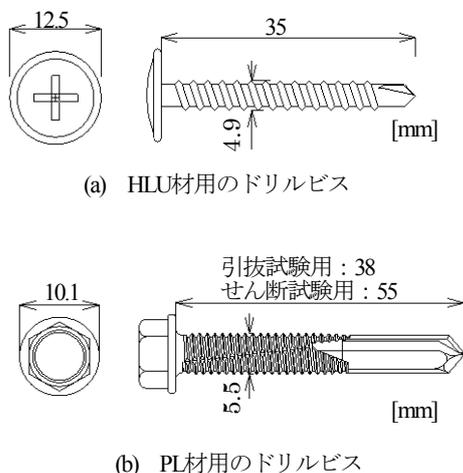


図1 試験に使用したドリルビスの形状

表1 試験の種類と体数

試験種類	成形法	板厚	防水テープ有無	試験体数
引抜	HLU	3mm	-	10
		4mm	-	10
	PL	6.3mm	-	10
一面せん断	HLU	3mm	無	5
			有	5
		4mm	無	5
			有	5
	PL	6.3mm	無	5
			有	5
二面せん断	HLU	3mm	無	5
			有	5
	PL	6.3mm	有	5

表2 HLU材の材料試験結果

	板厚 [mm]	最大応力 [MPa]	最大応力変動係数	弾性係数 [GPa]	弾性係数変動係数
試験板厚 (公称板厚)	4.47 (4.00)	108.82 (121.17)	0.10 (0.08)	9.03 (10.02)	0.09 (0.12)

表3 PL材の力学特性

	規格値	測定値
引張強度 [Mpa]	平均350以上	435
縦弾性係数 [Gpa]	平均27以上	38
ガラス含有率 [%]		57

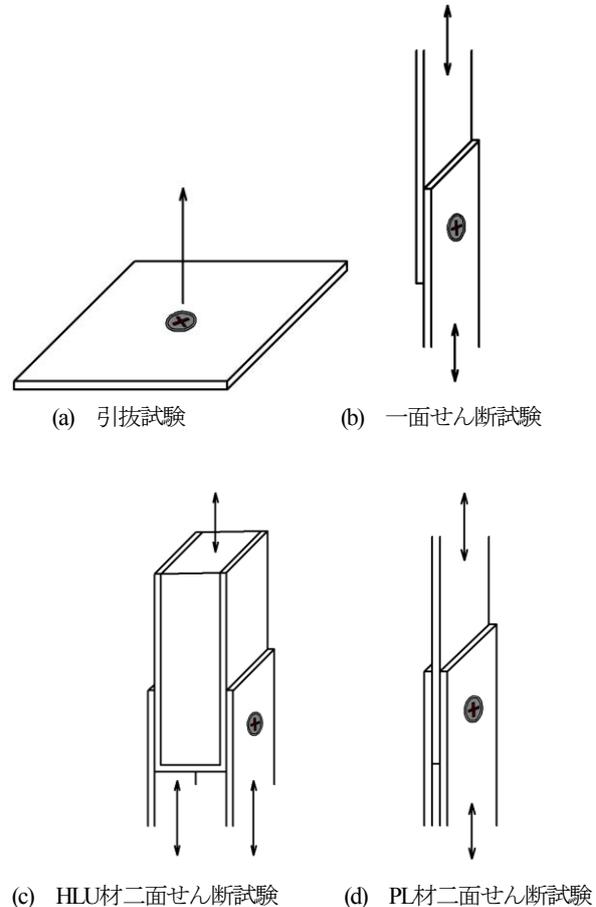


図2 各種試験の模式図

3. 試験結果

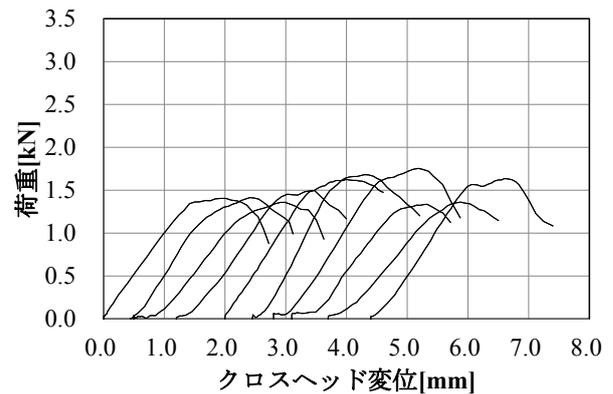
(1) 引抜試験

引抜試験は図3に示すような試験体寸法と荷重方法で行った。すなわちドリルビスの先端から押し力を加えることで引抜力を模擬した。引抜試験の様子を図4に示す。

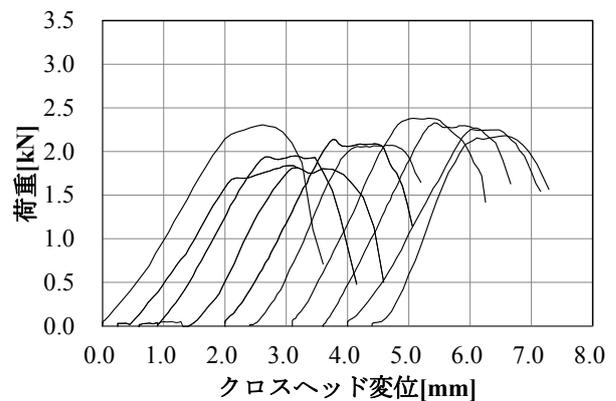
引抜試験の結果及び荷重－変位曲線を表4、図5、図6に示す。図5を見ると、引抜耐力とFRP板厚は線形関係にあるということがわかる。そのため表4の板厚あたりの耐力はどの試験体も同程度の大きさとなっている。また、板厚あたりの耐力の変動係数を見ると、HLU材とPL材で同程度の値となっているが、耐力の変動係数はPL材の方が小さくなっている。これは、耐力の変動係数には板厚と耐力の変動が含まれており、機械成形であるPL材は板厚の変動が小さいためであると考えられる。図6の荷重－変位曲線を見るとHLU材では最大耐力到達後緩やかに荷重が低下しているのに対し、PL材では急激に耐力が低下している。図7は、荷重－変位曲線のプロットごとの傾きを Δk 、最大耐力を P_{max} とし、 $0.2 P_{max} \sim 0.5 P_{max}$ の区間を線形補間した傾きを k としたときの荷重－ $\Delta k/k$ 曲線である。この図より $\Delta k/k$ が0.5までの範囲で剛性があるとして耐力を規定すると、HLU3mm材では $0.88 P_{max}$ 、HLU4mm材では $0.93 P_{max}$ 、PL6.3mm材では $0.88 P_{max}$ であった。既往の設計基準強度である $0.70 P_{max}^{10)}$ の範囲内においては剛性低下は見られない。

表4 引抜試験結果

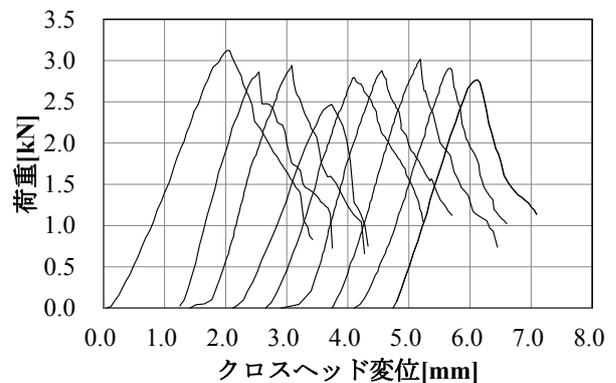
板厚	平均板厚 [mm]	平均耐力 [kN]	耐力変動係数	板厚あたりの耐力 [kN/mm]	板厚あたりの耐力変動係数
HLU3mm	3.57	1.51	0.10	0.42	0.06
HLU4mm	4.62	2.13	0.09	0.46	0.05
PL6.3mm	6.47	2.86	0.06	0.44	0.06



(a) HLU3mm材



(b) HLU4mm材



(c) PL6.3mm材

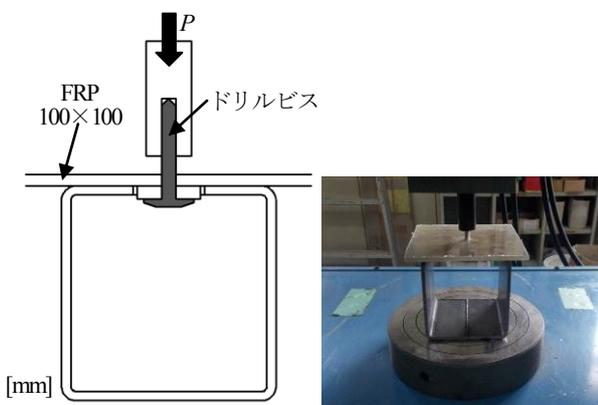


図3 引抜試験体の寸法

図4 引抜試験の様子

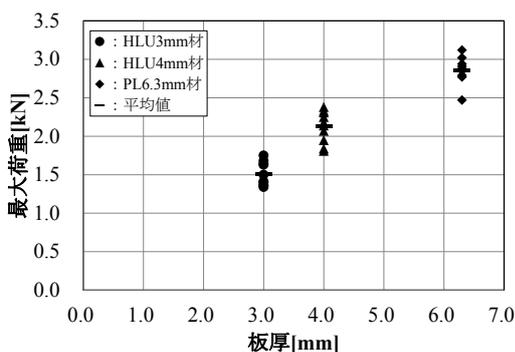


図5 引抜試験の最大荷重

図6 引抜試験の荷重－変位曲線

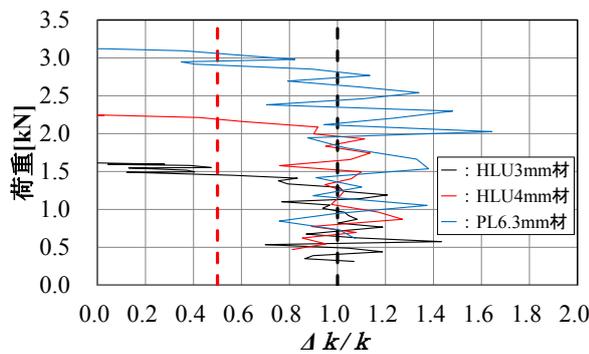


図7 引抜試験の荷重- $\Delta k/k$ 曲線

(2) 一面せん断試験

一面せん断試験は図8に示すような試験体寸法と荷重方法で行った。一面せん断試験の様子を図9に示す。

一面せん断試験の結果及び荷重-変位曲線を表5、図10、図11に示す。図10に示すように、一面せん断試験では耐力と板厚に線形の関係は見られなかった。表5を見ると、HLU材の板厚あたりの耐力は同等であったがPL材はHLU材に比べて小さい値となっている。これは図1に示すようにドリルビスのネジ頭の外径が、HLU材に用いたものよりもPL材に用いたものの方が小さく、ドリルビスが早期に回転をしてしまったことが原因であると考えられる。また、図11(a)~(d)のHLU材の荷重-変位曲線は最大荷重到達後、緩やかに低下している。

一面せん断試験ではFRP同士が接する部分に防水テープを挟むことで耐力の低下が見られ、その低下率はHLU3mm材で約11%、4mm材で約8%、PL6.3mm材で15%であった。これは防水テープの厚み分だけFRP同士の軸間距離が大きくなり、作用するモーメントが増加するためであると考えられる。

防水テープの影響について、図12に示す応力状態を仮定すると、中立軸までの距離 x_0 は次式のように得られる。

$$x_0 = \frac{7t_F^2 + 6t_F t_t}{12(t_F + t_t)} \quad (1)$$

また、ドリルビスの外径を d とすると、縁応力 σ_0 と荷重 P は次式の関係になる。

$$P = \frac{\sigma_0 d (-t_F^2 + 2t_F x_0)}{2x_0} \quad (2)$$

これらの式よりFRP板厚 t_F と板厚同士の間隔 t_t を用いて、縁応力 σ_0 を一定としたときの荷重を算出し、図13には t_t と $t_F=0$ に対する荷重割合の関係を表している。 t_t の増加によって荷重の低下率は大きくなるが、その低下率は t_F が大きいほど鈍感になっている。防水テープを挟んだ試験と比較すると、HLU材ではその傾向が見られるが、PL材では板厚が増加しているにもかかわらず、板厚3mmや

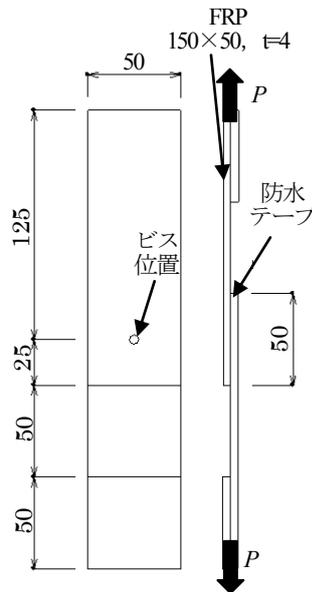


図8 一面せん断試験の寸法



図9 一面せん断試験の様子

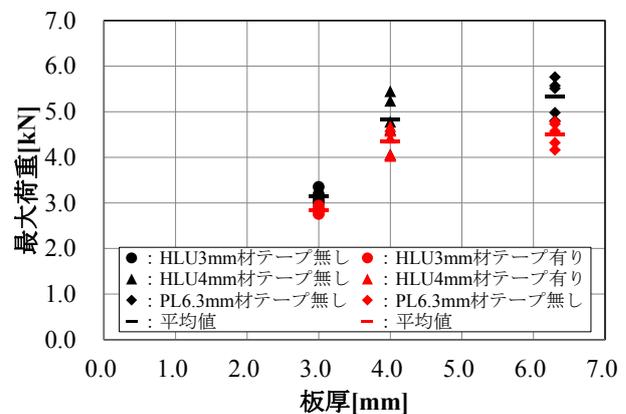


図10 一面せん断試験の最大荷重

表5 一面せん断試験結果

板厚	防水テープ有無	平均板厚 [mm]	平均耐力 [kN]	耐力変動係数	板厚あたりの耐力 [kN/mm]	板厚あたりの耐力変動係数
HLU3mm	無	3.37	3.15	0.04	0.93	0.03
	有	3.43	2.84	0.02	0.83	0.03
HLU4mm	無	4.43	4.83	0.10	1.09	0.08
	有	4.37	4.36	0.13	1.00	0.08
PL6.3mm	無	6.47	5.32	0.07	0.82	0.07
	有	6.46	4.51	0.05	0.70	0.05

4mmのHLU材の荷重低下率を上回っている。これも使用したドリルビスのネジ頭の外径が異なっていることが影響していると考えられる。

次にボルト接合で設計に用いられる支圧強度について考察する。支圧強度 f_b は、

$$f_b = P_{\max} / dt_F \quad (3)$$

と表される。これを求めると、防水テープ無し HLU3mm材及び4mm材で191MPa、223MPaと既往の研究による引抜成形FRP材のボルト支圧強度⁵⁾と同等の値

であったが、PL6.3mm材では支圧強度 150 MPaと既往のボルト支圧強度を下回った。これもドリルビスのネジ頭の外径の違いが原因であると考えられる。破壊性状としては、PL材ではせん断抜け、HLU材では片方の板が変形し、ビスが引き抜かれるような破壊を示した。その様子を図14に示す。

引抜試験と同様に荷重- $\Delta k/k$ 曲線を考察すると、 $\Delta k/k=0.5$ のとき、HLU3mm材の防水テープ無しで $0.79P_{max}$ 、有りで $0.88P_{max}$ 、HLU4mm材の防水テープ無しで $0.79P_{max}$ 、有りで $0.74P_{max}$ であった。また、PL6.3mm材の防水テープ無しで $0.77P_{max}$ 、有りで $0.76P_{max}$ であった。

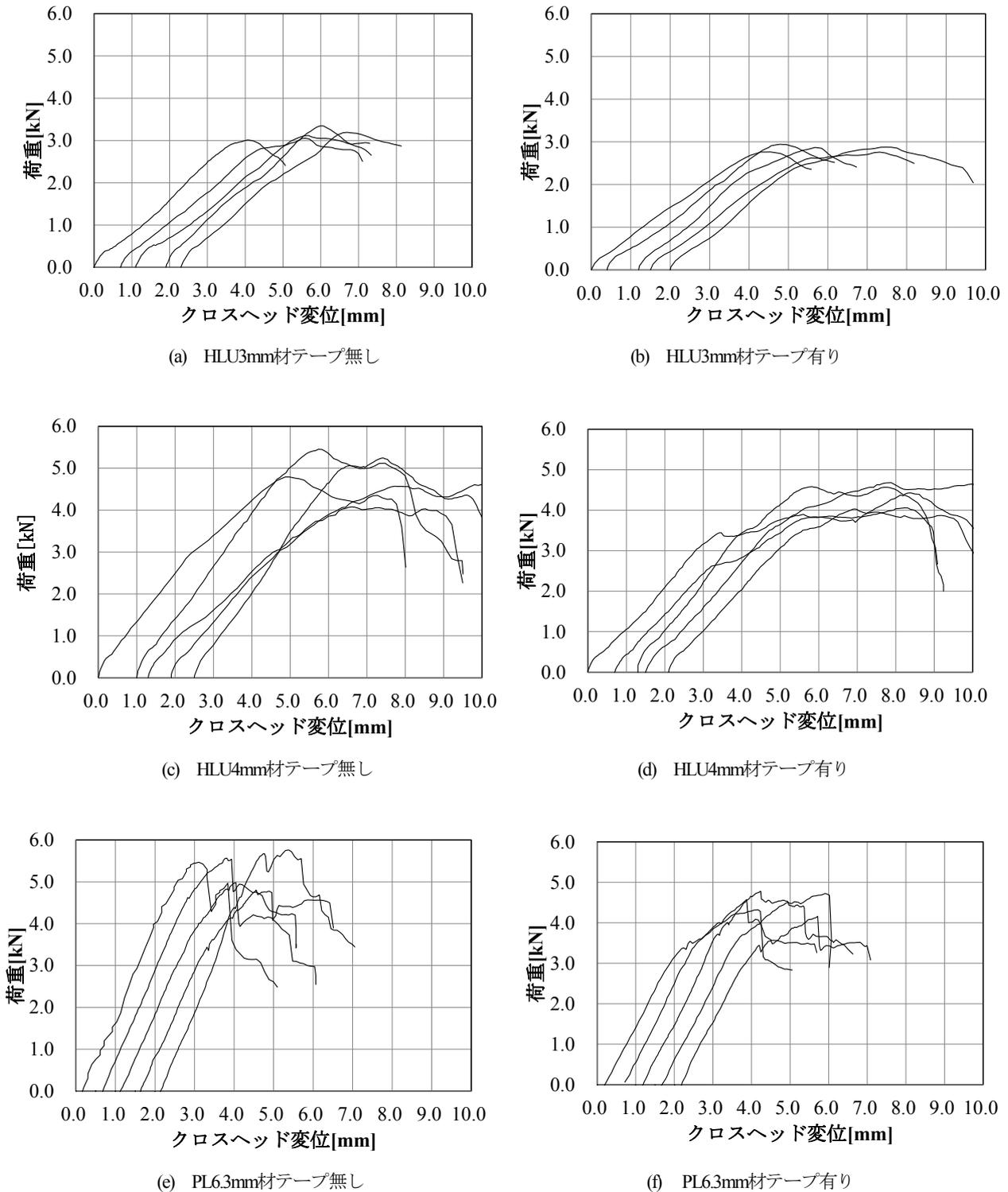


図11 一面せん断試験の荷重-変位曲線

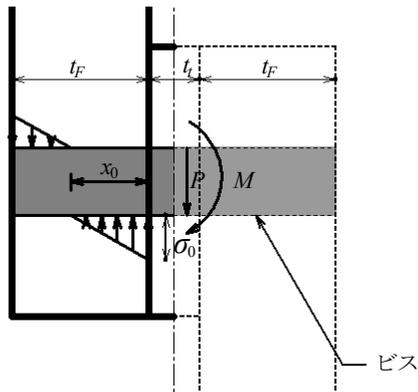


図12 応力分布の模式図

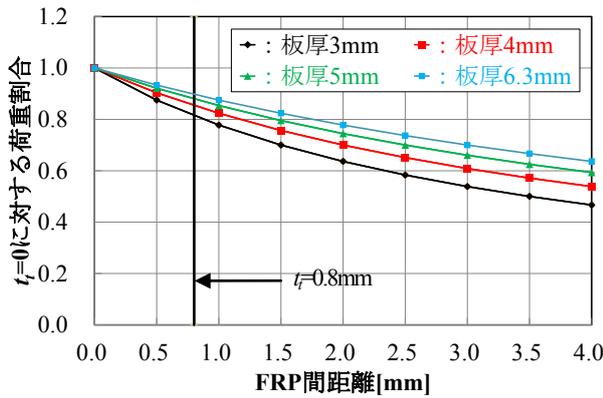
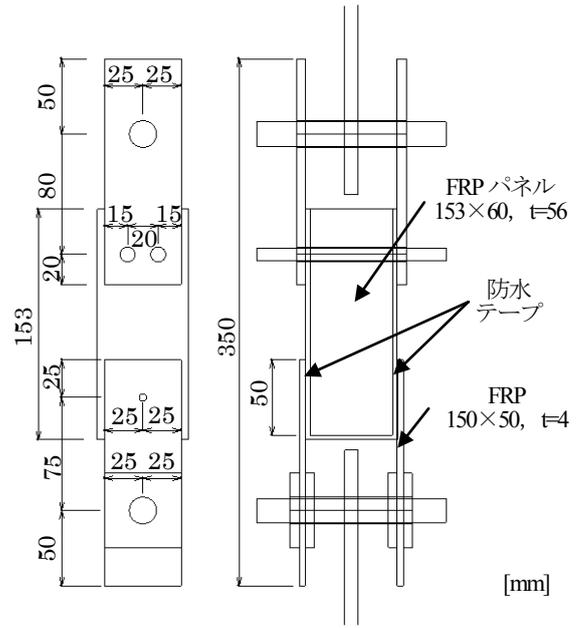
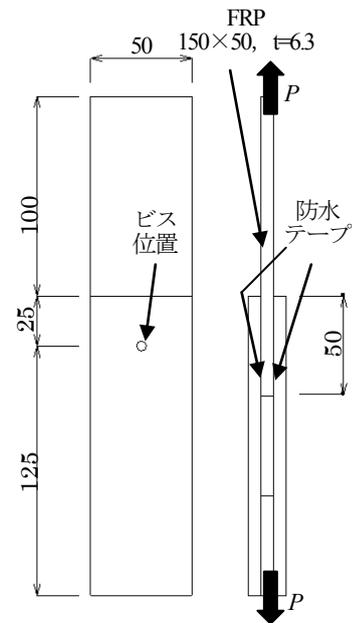


図13 FRP間距離による荷重変化



(a) HLU材による二面せん断試験



(b) PL材による二面せん断試験

図15 二面せん断試験体の寸法



(a) PL材

(b) HLU材

図14 一面せん断試験の破壊状況

(3) 二面せん断試験

二面せん断試験は図15に示すような試験体寸法と載荷方法で行った。二面せん断試験の様子を図16に示す。HLU材による二面せん断試験は、一面せん断試験をFRPパネルの両面で行うような形状となっている。PL材による二面せん断試験は、一面せん断試験の試験体の偏心を解消するような形状となっており、パネルは50mmの発泡材に両側3mmのFRPを張り付けたものである。

二面せん断試験の結果及び荷重-変位曲線を表6、図

17、図18に示す。表6より、HLU3mm材では一面せん断試験と同様の理由から、平均耐力は防水テープを挟むことで約16%低下し、単位板厚あたりの耐力も一面せん断試験と同等の値となった。図18に示すHLU3mm材の荷重-変位曲線を一面せん断試験と比較すると、最大荷重到達後、急激に荷重が低下している。試験治具にクリアランスを設けており、破壊後に偏心が進展してしまったことが原因だと考えられる。また、PL材による二面せん断試験は、偏心のない一面せん断試験とも考えられるため、一面せん断試験の板厚あたりの耐力と比較す

ると、二面せん断試験の方が約 1.3 倍の耐力となった。これは、偏心が解消されたため、耐力が支圧強度に支配されているためであると考えられる。支圧強度を一面せん断試験の時と同様の式によって算出すると、243MPa であり引抜成形 FRP のボルト支圧強度と同等の値を得た。また、偏心がないため、一面せん断試験で見られたような防水テープによる耐力の低下は見られなかった。

引抜試験・一面せん断試験と同様に示すような荷重- $\Delta k/k$ 曲線を考察すると、 $\Delta k/k=0.5$ のとき、HLU3mm材の防水テープ無しで $0.93 P_{max}$ 、有りで $0.94 P_{max}$ 、PL6.3mm材の防水テープ無しで $0.89 P_{max}$ 、有りで $0.92 P_{max}$ であった。



(a) HLU材 (b) PL材

図16 二面せん断試験の様子

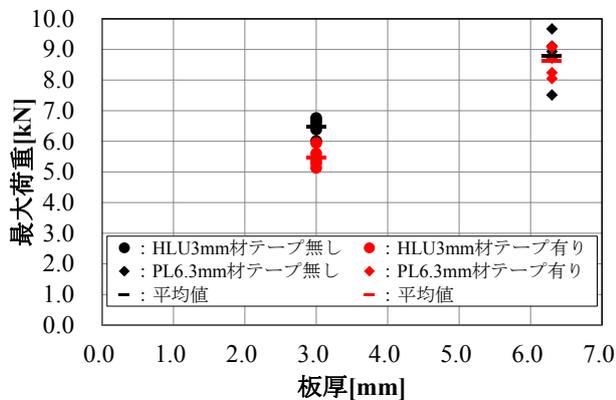
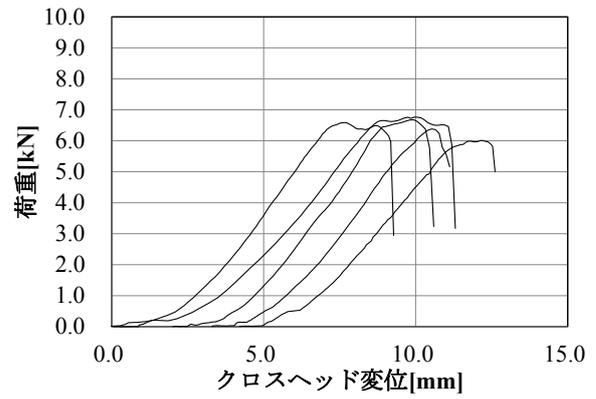


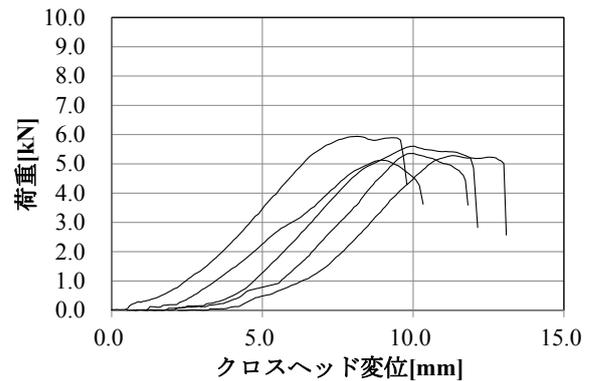
図17 二面せん断試験の最大荷重

表6 二面せん断試験結果

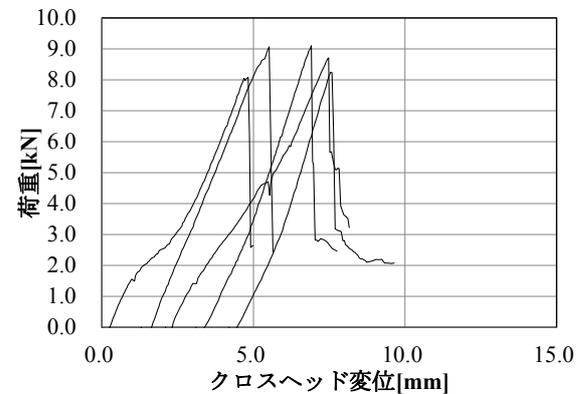
板厚	防水テープ有無	平均板厚 [mm]	平均耐力 [kN]	耐力変動係数	板厚あたりの耐力 [kN/mm]	板厚あたりの耐力変動係数
HLU3mm材	無	6.80	6.48	0.04	0.95	0.09
	有		5.46	0.05	0.80	0.05
PL6.3mm材	無	6.42	8.60	0.09	1.34	0.09
	有		8.63	0.05	1.34	0.05



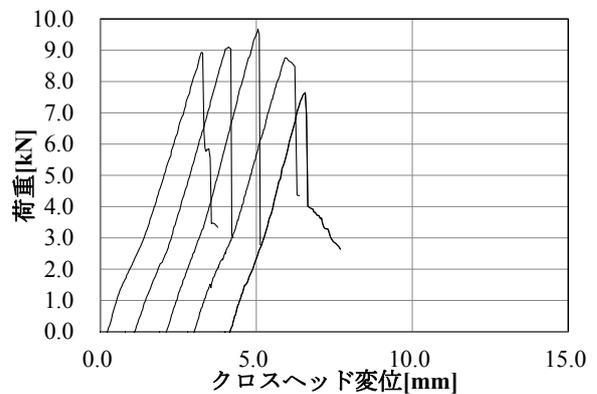
(a) HLU3mm材テープ無し



(b) HLU3mm材テープ有り



(c) PL6.3mm材テープ無し



(d) PL6.3mm材テープ有り

図18 PL材二面せん断試験荷重-変位曲線

4. まとめ

本研究では、ハンドレイアップ成形 GFRP 及び引抜成形 GFRP を用いて、ドリルビス接合部の引抜試験・一面せん断試験・二面せん断試験を行った。それにより得られた知見を以下に示す。

- 1) 板厚あたりの引抜耐力は HLU 材及び PL 材で同程度であった。
- 2) 一面せん断などのドリルビスに回転変位が生じるような場合には、耐力にドリルビスのネジ頭の外径が影響すると考えられる。
- 3) 一面・二面せん断試験において FRP 板の間隔と耐力の変化を評価する手法を示した。
- 4) $\Delta k/k$ が 0.5 までの範囲で剛性があるとして剛性評価を行った結果、各試験とも既往の設計基準強度を上回った。
- 5) 引抜成形材による二面せん断試験を行うことで、既往のボルト支圧強度と同程度のドリルビス支圧強度を得た。

今後はせん断試験において多列配置した際の接合強度の変化について検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：FRP 材を用いた合成構造に関する動向と将来への展望，日本建築学会大会構造部門 PD 資料，2014.9
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書 2014 年版，2015.5
- 3) 日本工業規格調査会：JIS K 7015
- 4) 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，2013.11
- 5) 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
- 6) JEC Group : THE CHALLENGING WORLD OF COMPOSITES, 2013.6
- 7) 守屋一政, 井上寛之, 加藤勝義：炭素繊維強化積層複合材と金属材の細径ピンによる接合，日本複合材料学会誌 第 36 巻第 5 号，2010
- 8) 守屋一政, 加藤勝義, 井上寛之：炭素繊維強化積層複合材の細径ピンによる穿孔と細径ボルトの密集配置による接合，日本複合材料学会誌 第 37 巻第 1 号，2011
- 9) 植村益次, 井山向史, 山本芳子：ランダム繊維強化複合材料の弾性係数，東京大学宇宙航空研究所報告，第 12 巻第 4 号 (A) , p.824, 1979.10
- 10) 日本建築学会：容器構造設計指針・同解説 第 4 版，日本建築学会，p.46, 2010.3

FUNDAMENTAL STUDY ON JOINT STRENGTH USING TAPPING SCREW FOR GFRP

Yuya INOUE, Yukihiro MATSUMOTO, Genki MIEDA
Akihiro MUROMOTO and Katsunori NAKAMOTO

FRP material has good characteristics such as light-weight, high-strength and high-corrosion resistance. Light-weight structure possesses some advantages over the rational constructing procedure such as self-building structures. In recent years, mechanical characteristics of FRP joints using bolts/rivet are investigated in detail. Then the bearing joints using bolts/rivets are used in many FRP structures. However, the bearing strength is low compared with material strength and the bearing joint needs the prepared bolt hole. That's why, an alternative joint system for FRP structures using tapping screw is proposed and the joint strength is investigated through experiments in this paper. Firstly, the pull-out tests using tapping screw and FRP plates are carried out and the strength and deformation behaviour are investigated. Secondly, the tensile shear tests of single-lap joint are carried out and the strength, deformation behaviour and the effects of thickness of FRP plates are investigated. Thirdly, the tensile shear tests of double-lap joint are carried out. Finally, the joint strength, deformation behaviour is made clear for the present joint system. Based on these, it will be suggested that the present joint system provides the easy, rational and economical joint system for GFRP structures.