Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00313

Received date : 1 October, 2021

Accepted date : 8 February, 2022

J-STAGE Advance Publication date : 17 February, 2022

© The Japan Society of Mechanical Engineers

この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止 4.0 国際]ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

パンチングリベット法により作製した GFRP/A6061 継手の継手強度

海津 浩一^{*1}, 本岡 拓也^{*2}, 日下 正広^{*1}, 木村 真晃^{*1}, 平井 三友^{*3}

Joint strength of GFRP / A6061 Al alloy joint made by punching rivet method

Koichi KAIZU^{*1}, Takuya MOTOOKA^{*2}, Masahiro KUSAKA^{*1},
Masaaki KIMURA^{*1} and Mitomo HIRAI^{*3}

^{*1,*2} Graduate School, University of Hyogo

2167 Shosha, Himeji-shi, Hyogo 671-2280, Japan

(^{*2} Current affiliation: JTEKT Corporation

1-1 Asahi-machi, Kariya-shi, Aichi 448-8652, Japan)

^{*3} Jikei University of Health Care Sciences

1-2-8 Miyahara, Yodogawa-ku, Osaka 532-0003, Japan

Abstract

To reduce weight of the transportation machines, joining of the FRP and the light metal is considered as important technique. In this study, the punching rivet method was applied to make joints between a GFRP sheet and an aluminum alloy A6061 sheet and joint strength was examined. The punching rivet method is possible to join the sheets without drilling by using a rivet and a rivet holder. The punching-out process of the sheets using a rivet shank as a punch and the joining process of the sheets using the rivet and the rivet holder are continuously performed. From the experimental results of joining of the GFRP sheet and the A6061 sheet, the joints made by the punching rivet method had no large crack and out-of-plane deformation of the joints was suppressed. From the results of the joint strength tests, the joints made by the punching rivet method had almost the same joint strength as the bolted joints which were tightened by regulated torque. In addition, the fatigue life of the joints made by the punching rivet method was longer than that of bolted joints. It could be confirmed that the punching rivet method was effective to join the GFRP sheet and the A6061 sheet.

Keywords : Rivet, Dissimilar material joint, GFRP, Punching rivet method, Multi-material, Joint strength

1. 緒 言

繊維強化プラスチック（FRP）は軽量で比強度に優れた材料であるが、機械や構造物では単体で用いられることは少なく、金属材料と接合されて使用される場合が多くなっている。近年では、自動車や航空機などの軽量化のために異種材料の特性を活かしたマルチマテリアル構造が必要不可欠になっている。このような FRP と金属材料によるマルチマテリアル化には異材接合を可能にする接合技術が不可欠であり、活発に研究が行われている。本研究では、FRP のうちで炭素繊維強化プラスチック（CFRP）より安価であり、比強度、比剛性の優れたガラス繊維強化プラスチック（GFRP）板を金属材料とリベット接合することを試みる。GFRP と金属の接合方法として、主に接着剤による接着接合（Fame et al., 1991, 関根他, 2003, 佐藤, 2014, Ostapiuk and Bienias, 2020）、ボルトやリベットによる機械的接合（後藤, 1999, 橋本, 杉浦, 2012, 北山他, 2013, 岩崎他, 2018）、さらに接着接

No.21-00313 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00313]

^{*1} 正員, 兵庫県立大学大学院 (〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167)

^{*2} 兵庫県立大学大学院 (現 (株) ジェイテクト (〒448-8652 愛知県刈谷市朝日町 1 丁目 1 番地))

^{*3} 滋慶医療科学大学 (〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 1-2-8)

E-mail of corresponding author: kaizu@eng.u-hyogo.ac.jp

合と機械的接合の併用が用いられている（小林他，2009， Franco and Zuccarello, 2014）．接着接合は被接着材の大きさや厚みなどに左右されず，気密性や水密性を持つなどの優れた特徴があるが，被接着材の材質に合わせて接着剤を選ばなければならないこと，接着時間が長い場合があること，可燃性のものが多いこと，接着剤の品質管理が必要なことなどの問題がある．機械的接合のうちボルトによる接合の場合は，組み立てや分解が容易に行えるという極めて優れた特徴があるが，穴あけなどの機械加工が必要で作業工程が多くなること，製品が振動を受けるとゆるみが発生する場合があることなどが問題である．最近では，穴あけ加工が必要ではなく，接合速度が速いために生産効率が非常に良いという特徴を持つセルフピアッシングリベットが GFRP とアルミニウム合金との接合（Settinieri et al., 2010, Gay et al., 2015）に用いられているが，セルフピアッシングリベットを打ち込んだ部分の GFRP の損傷が大きいことや接合強度は高くないという問題点がある．

著者らは従来から接合メカニズムが簡単で高い強度の得られるリベット接合に着目しており，リベットを加速した錘の打撃力を利用して高速で板へ打ち込むことによる打抜きと，リベット軸とリベットホルダーによる板の接合をほぼ同時に行う衝撃リベット締結法（木之下他，2009，2010，海津他，2012）を提案した．そして，2 枚のアルミニウム合金板同士ならびに 2 枚の冷間圧延鋼板同士の接合実験を行い，衝撃リベット締結法により作製した継手は，接合部の変形が小さくかつ高い継手強度を持つことを明らかにした．さらに汎用プレス機によりリベット軸を板へ押し込み，穴あけ加工無しで板の接合を行うパンチングリベット法（木之下他，2011）も開発し，2 枚の冷間圧延鋼板同士が良好に接合できることを示した．また，これまでの研究でリベット頭部とリベットホルダーによる座面圧力により接合部の穴周辺の損傷からのき裂進展を抑制できることもわかってきている（海津他，2018）．本研究では，GFRP 板と A6061 板をパンチングリベット法によって接合を試み，GFRP 板と金属板の接合へのパンチングリベット法の適用の可否について検討する．

2. 供試材料，試験片形状および実験方法

2.1 供試材料および試験片形状

リベットおよびリベットホルダーにはアルミニウム合金 A7075BE-T6 を用いた．被接合材となる板はアルミニウム合金 A6061P-T6 板と GFRP 板である．各材料の化学成分ならびに機械的性質を表 1，表 2 に示す．表中の T.S. は引張強さ，0.2%Y.S は 0.2%耐力，El.は伸び，E はヤング率を表す．GFRP 板は強化繊維とマトリックス（母材）からなり，東レ製 ABS 樹脂トヨラック® 100G-30 のガラス繊維（短繊維）を 30%混合させた材料であり，射出成形機（FUNAC AUTOSHOT Tseries MODEL 75D）により，成形条件は，最大射出圧 1900kg/cm²，最大射出時間 5.0s，最大保圧速度 100mm/s，サックバック量 5.0mm，サックバック速度 30mm/s，冷却時間 15.0s，射出時の温度 220℃で成形した．リベットおよびリベットホルダーの形状と寸法を図 1 に示す．接合強度を高める目的でリベット軸の先端を広げられるように，リベットにはリベット軸に内径 2.5mm，深さ 3.0mm の穴を設け，リベットホルダーには C1.0 の面取り加工を施した．また，リベットホルダーの内径は 5.1mm であり，打抜きの際のリベット軸とリベットホルダーのクリアランスは 0.1mm となっている．GFRP 板および A6061 板はともに板厚 2.0mm，50mm×100mm の形状とした．

2.2 継手の作製方法

パンチングリベット法の接合プロセスは図 2 に示した通りである．継手の作製は以下の手順で行った．

- (1) 図 2 (a) のように，下部ダイスにホルダー支え，ピン，リベットホルダーを挿入し，上側に A6061 板，下側に GFRP 板を重ねて置く．そして上部ダイスを被せ，上部のダイスの穴にリベット，パンチを挿入し，上下のダイスをボルトで固定する．このときのボルトの締め付けトルクは規定トルクを満たす 12.5Nm とした．
- (2) 図 2 (b) のように，パンチに荷重を加え，リベットを押し込むことで板が打抜かれる．
- (3) 図 2 (c) のように，板が打抜かれた後，リベット軸先端は板の打抜き片を介してピンに接触する．ピンに接触後も所定の荷重まで荷重を加え続けることでリベット軸が塑性変形し，リベットホルダーの面取り部に入り込むことで強固に接合される．接合後の継手の形状を図 3 に示す．

なお，通常，複合材料のリベット接合の場合にリベット頭部が複合材料にめり込むことを防止するためにワッシャーを用いることが多いと考えられるが，本研究では，継手の軽量化を考慮し，またパンチングリベット法の

主要パーツのリベットとリベットホルダーだけを用いて GFRP 板と A6061 板の接合を評価したいと考えたことから、パンチングリベット法ではワッシャーを用いていない。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of A7075BE-T6.

Chemical composition [mass%]								Mechanical properties			
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	T.S. [MPa]	0.2%Y.S. [MPa]	El. [%]	E [GPa]
0.07	0.18	1.60	0.04	2.60	0.20	5.80	0.01	671	623	9.6	72.7

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of A6061P-T6.

Chemical composition [mass%]								Mechanical properties			
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	T.S. [MPa]	0.2%Y.S. [MPa]	El. [%]	E [GPa]
0.61	0.44	0.29	0.02	1.02	0.25	0.02	0.04	329	293	12.9	73.6

Fig.1 Rivet and rivet holder.

2.3 各種実験方法

継手の継手強度を調べるために、引張速度 1.0mm/min で破断するまで継手を引っ張った。図 3 の継手に対してまっすぐに引っ張れるように、図 4 (a) に示すように継手のつかみ部に接着剤でタグを貼り付けた。また比較のために、図 4 (b) に示すように、あらかじめドリルで直径 5.1mm の穴あけ加工を施した GFRP 板と A6061 板を M5 ボルトで締結し、真っ直ぐ引張れるようにタグを貼り付けた。なお、ボルトはステンレス製六角穴付ボルトの半ねじタイプのものを使用し、板の穴の側面にボルトのねじ部が接触しないようにした。締付けトルクは一般的に用いられている T 系列を参考にして 3Nm とした。また GFRP 単体の強度を調べるため、図 4(c)に示すよ

うに、ドリルで直径 5.1mm の穴をあけた GFRP 板に直径 5mm の SKD11 のピンを通した引張試験も行った。まっすぐ引っ張ることができるように CFRP 板を A6061 板で挟むようにして取り付けた。また、CFRP 板と A6061 板の間に隙間をあけて接触しないようにした。

Fig.2 Schematic illustrations of punching rivet method. The punching rivet method is carried out as follows: (1) The rivet holder is inserted in the hole of the die. Two sheets without hole are set on the rivet holder. Then, the rivet is set on these two sheets, as shown in Fig.2 (a). The sheets are fixed by bolting the die. (2) The rivet shank is pushed into the sheets by pressing the punch. The rivet shank punches out the sheets and enters the hole of rivet holder, as shown in Fig. 2(b). (3) The tip of the rivet shank with punched pieces of sheets is pushed to the pin and after that, the rivet shank is plastically deformed. The sheets are joined by the head of the rivet and the rivet holder, as shown in Fig. 2(c).

Fig.3 Shape and dimension of joint.

Fig.4 Schematic illustration of tensile test for joints.

3 実験結果および考察

3.1 接合状態

接合実験は、インストロン万能試験機を用いてリベットの押し込み速度を 10mm/min, 押し込み荷重の上限値を 30kN とした。継手の接合過程中的の荷重－変位曲線を図 5 に示す。図中の A～E の記号は、後述の 4 章に示す接合過程の観察を行う箇所を示している。変位約 2mm までの荷重の増減はリベットが A6061 板を打抜く過程であり、このときの最大荷重は約 10kN であった。変位が約 2mm から 4mm までの荷重は約 1kN～3kN であるが、これは GFRP 板を打抜く過程に相当する。その後の変位が約 4mm から 5.5mm までは荷重が約 0kN であり、これはリベット軸先端がリベットホルダーの穴に入る過程である。変位約 5.5mm でリベット軸先端が板の打抜き片を介してピンに接触することで荷重が上昇し、設定した 30kN の荷重に達すると接合が完了する。

次に継手の外観観察および断面観察を行った。外観写真を図 6 に、断面写真を図 7 にそれぞれ示す。外観上、継手の面外変形や A6061 板（上側）および GFRP 板（下側）の割れは観察されず、パンチングリベット法によって A6061 板と GFRP 板の接合は可能であることがわかる。継手断面を見ると、リベット軸が GFRP 板の部分で少し太って接合されている。

Fig.5 Load-displacement curves in joining process. The first rise of the load corresponded to the punching-out process of the GFRP sheet and the aluminum sheet. The second rise of the load corresponded to joining process.

Fig.6 Appearance of punching rivet joint.

Fig.7 Cross-section of punching rivet joint.

3.2 継手強度

継手の強度試験の結果を図8に示す。すべての継手において、線形的に荷重が増加して最大引張荷重に達した。その後、完全に破断した。最終的な変位量は1.11mm～1.72mmでばらつきがあった。最大荷重を継手強度とし、それらの値を表3に示す。

次に引張試験後の継手外観の例を図9に示す。図より、打抜いた穴の縁に沿って荷重方向と垂直に破断したことがわかる。

Table 3 Joint strength of punching rivet joint.

Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4	Joint 5	Average
2.23kN	2.31kN	2.35kN	2.25kN	2.37kN	2.30kN

Fig.9 Appearance of joint after tensile test. All joints broke perpendicular to the load direction.

Fig. 8 Tensile load-displacement curves obtained by tensile tests of punching rivet joint. The amount of displacement of each test piece was different. The maximum load was considered as joint strength.

ボルト継手の継手の強度試験の結果を図 10 に示す。すべての継手において、パンチングリベット継手と同様に荷重が増加して最大引張荷重に達した後、完全に破断した。最大引張荷重を継手強度とし、それらの値を表 4 に示す。ボルト継手の接合強度は表 3 のパンチングリベット継手の接合強度よりもわずかに高いが、パンチングリベット継手の強度はボルト継手の強度とほぼ同等と考えられる。

Fig.10 Tensile load-displacement curves obtained by tensile tests of bolted joint.

Table 4 Joint strength of bolted joint.

Joint 1	Joint 2	Joint 3	Average
2.39kN	2.29kN	2.40kN	2.36kN

図 4(c) に示したドリルで直径 5.1mm の穴をあけた GFRP 板にピンを通した引張試験における強度の結果を図 12 に示す。図 12 に示すように、すべての試験片において荷重は最大引張荷重に達した後に破断した。また最大引張荷重を強度とし、それらの値を表 5 に示す。表 3 の結果と比較すると最大引張荷重は約 64%となっており、パンチングリベット継手ではリベット頭部とリベットホルダーで板を締め付けている座面圧力の効果や図 7 のリベット軸の太りの効果などから強度が向上しているものと考えられる。

Fig.12 Tensile load-displacement curves obtained by tensile tests of GFRP sheet with a pin through the hole.

Table 5 Maximum tensile loads of GFRP sheet with a pin through the hole.

Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Average
1.41kN	1.48kN	1.47kN	1.46kN	1.56kN	1.48kN

3.3 パンチングリベット法による打抜き穴の表面性状

パンチングリベット法により作製した継手の穴の表面の写真を図 13 にそれぞれ示す。図 13 (a) は接合部の穴を正面から見た写真であり、(a') は (a) の GFRP の穴の部分の一部を拡大した写真、(b) と (c) は接合部の穴を正面から見たときの左右の部分の断面写真である。図 13 (a) を見ると、A6061 板の上部は平滑であったものの、A6061 板下部および GFRP 板では凹凸のある表面になっている。図 13 (a') から GFRP 板の穴の表面に A6061 の打抜き片の側面がこすったような筋が見え、また赤印で示した箇所に繊維が抜けたへこみのような黒い部分が見られた。図 13 (b) , (c) を見ると、A6061 板にばりが発生していた。また、GFRP 下部に破片が確認された。

Fig.13 Sheared edge of hole of punching rivet joint. Photograph (a) is a front view of the punched hole.

Photograph (a') is an enlargement of a part of GFRP in photograph (a). Photographs (b) and (c) are cross sections of the left and right parts when the holes in the joint are viewed from the front.

4. パンチングリベット法による接合過程の観察

4.1 実験方法

これまでの実験結果から、図 7 の断面写真でリベット軸が GFRP 板の部分で太っており、また図 13 (b) と (c) の打抜き穴の断面写真では A6061 板にばりが発生し、さらに A6061 の破片が見られた。これらがどの段階で生じているのかを明らかにするため、図 5 の図中に示す A～E 点のそれぞれの点において板が打ち抜かれる状態やリベットの変形状態の観察を行った。A 点は板の打抜き時の荷重が最大になったときであり、B 点は荷重が低下し、リベットの押し込み量が 2mm のとき、C 点はリベットの接合過程が始まり、荷重が上がり始めたときである。さらに D 点は荷重が 15kN になったときであり、E 点は荷重が 30kN になり、リベットの押し込みを完了したときである。前述した継手の作製方法と同じ方法で接合を開始し、図中の点に達すると試験機を停止させ、それぞれの点における接合部の断面を観察した。観察は断面の全体および図 14 に示すようなリベット軸周りの部分 Section 1, Section 2 について行った。接合時の実験条件は、リベットの押し込み速度を 10mm/min, 押し込み荷重を 30kN とし、板の積層順序は A6061 板が上、GFRP 板を下とした。

4.2 実験結果および考察

図 5 中の A 点～E 点それぞれの点の接合部断面を観察した結果を図 15 に示す。A 点における接合部断面を図 15 (a) に示す。A 点では、A6061 板と GFRP 板でリベットの押し込みによる変形が開始しているが、A6061 板のだれはほとんどない。また、リベットの変形は肉眼では確認されなかった。

B 点における接合部断面を図 15 (b) に示す。B 点では、リベットによる A6061 板の打抜きが完了しており、

それに伴い図 5 の荷重も低下していた。また、打抜き時の変形により、A6061 板のばりがわずかに発生し、A6061 板の打抜き片が外側へ膨らんでいた。この点でも、リベットの変形は肉眼では確認されなかった。

C 点における接合部断面を図 15 (c) に示す。C 点は、リベット軸の塑性変形が開始される点であり、リベットがさらに押し込まれ、板とリベット軸の間に隙間が生じていた。黒丸で示すように、GFRP 板とリベット軸の間に打抜いた A6061 板の削られた破片が残っていることがわかる。これは B 点で A6061 板の打抜き片が外側へ膨らんでいたため、膨らんだ破片の一部がリベットホルダーの穴を通るときにリベットホルダーの穴の縁で削られたと考えられる。

D 点における接合部断面を図 15 (d) に示す。D 点では、リベット軸が太るような変形が開始し、板とリベット軸間の隙間がなくなっていた。GFRP は A6061 に比べて強度が低いため GFRP の穴の部分でリベット軸が太くなっていると考えられる。破片は下へ排出されずに GFRP 板とリベット軸の間に残っていた。

E 点における接合部断面を図 15 (e) に示す。E 点の写真は接合後の継手断面であり、リベット軸がさらに太るような変形をしていた。

Fig.14 Position of cross-sectional observation.

Fig.15 Cross-sections of punching rivet joint in joining process. These photographs show cross sections of the joint at each point A to E in Fig.5. The cross sections of the joint at points A, B, C D and E are shown in photographs (a), (b), (c), (d) and (e), respectively. At point A, no deformation of the rivet shank was observed. At point B, the punching of the A6061 sheet by rivets was completed. The lower part of the punched piece of the A6061 plate was deformed outward. Point C is the point where the plastic deformation of the rivet shank starts. The rivet was pushed further, and a gap was created between the plate and the rivet shank. At point D, the rivet shank was deformed to become thicker, and there was no gap between the plate and the rivet shank. The photograph of point E is the cross section of the joint after joining, and the rivet shank became thicker.

5. 打抜き穴の表面性状による継手強度と疲労寿命への影響

パンチングリベット法によって接合を行う際に、図13の(a)と(a')のように、板の打ち抜かれた穴の表面が凹凸になっていることが明らかとなった。このような穴の表面状態が継手強度にどの程度影響しているのかを調べるため、事前に穴あけ加工を施したA6061板とGFRP板をパンチングリベット法と同様の方法で接合し、パンチングリベット法により作製した継手と継手強度の比較を行う。この方法で作製した継手（以下、リベット継手：Riveted joint）は、穴あけ加工を施した板を用いているため、板の打抜きによる損傷を有していない。

5.1 実験方法

リベット継手の作製方法の概略図を図16に示す。継手の作製は以下の手順で行ったが、基本的にはパンチングリベット法と同じである。

- (1) 図16(a)に示すように、下部ダイスにホルダー支え、ピン、リベットホルダーを挿入し、直径5.1mmの穴あけ加工を施したA6061板およびGFRP板を重ねて置く。2枚の板の穴が重なった部分にリベット軸を通し、軸先端がピンに接触するようにリベットを設置する。上部ダイスを被せ、上部ダイスの穴にパンチを挿入し、上下のダイスをM8ボルトで固定する。ボルトの締め付けトルクは規定トルクを満たす12.5Nmとした。

(2) 図 16 (b) に示すように、パンチに荷重を加え、リベットを押し込むことでリベット軸が塑性変形して板が接合される。このとき、パンチングリベット法と異なり、リベット軸先端が直接ピンに接触している。

接合条件は、A6061 板を上、GFRP 板を下とし、リベットの押し込み速度を 10mm/min、押し込み荷重を 30kN とした。また、リベット軸先端が直接ピンに接触していること、つまり 2 枚の板の打抜き片を介さず接触していることを考慮して、ピンの長さを 4.0mm 長くした。

Fig.16 Schematic of riveting process.

5.2 打抜き穴の表面性状の観察

図 17 に GFRP 板に施したドリル穴の加工面の写真を示す。図 17 (a) からわかるように、GFRP 板のドリル穴の加工面は平滑な面となっている。(b) は (a) のドリルの穴の加工面の一部を拡大したものであり、赤丸で示した箇所で GFRP のガラス短繊維が確認できる。図 16 の接合方法は板の打抜きを伴わないため、図 13 に示したようなパンチングリベット法による板の打抜き穴の粗い表面性状の影響を除いた状態での接合強度を評価できる。

Plate thickness direction

Fig.17 Drilled hole of GFRP sheet. Photograph (b) is an enlargement of a part of drilled hole in photograph (a).

5.3 接合実験の結果

リベット継手の外観観察の結果を図 18 に、断面観察の結果を図 19 にそれぞれ示す。外観上、継手の面外変形や A6061 板および GFRP 板の割れは観察されなかった。また、継手断面を見るとリベット軸が GFRP 板の部分で少し太り、軸先端の変形は大きくはなかった。また、GFRP 板の強度が低いため、パンチングリベット法で作製した継手と同様にリベットは GFRP 板の部分で変形が太くなることがわかった。

継手の接合部の穴の写真を図 20 に示す。図 20 (a) は穴を正面から見た写真であり、(b) と (c) は図 14 の Section 1 および Section 2 の部分である。板には事前に穴あけ加工を施しているため、接合前の GFRP 板は平滑面である。また図 20 (b), (c) を見ると、リベット軸が太ることにより、A6061 の穴の下側が少し広がっていた。

Fig.18 Appearance of riveted joint.

Fig.19 Cross-section of riveted joint.

Fig.20 The surface of hole of riveted joint. Since the plate is pre-drilled, the surface of the holes in the GFRP plate is smooth.

5.4 継手強度試験の結果

リベット継手の強度試験により得られた荷重－変位曲線を図 21 に示す．すべての継手が最大引張荷重に達した後に破断した．最終的な変位量は 1.10mm～1.75mm とばらつきがあった．また，すべての継手において，図 9 のように GFRP 板が破断した．

パンチングリベット継手およびリベット継手の最大引張荷重をプロットしたグラフを図 22 に示す．継手強度の平均値はリベット継手で 2.27kN，パンチングリベット継手で 2.30kN，図 4 で示したボルト継手で 2.36kN であり，ほぼ同じ値であった．また，リベット継手はパンチングリベット継手に比べてばらつきがやや大きくなった．これはリベット継手ではリベット軸を通すためにあらかじめ板に直径 5.1mm の穴を開ける必要があり，このクリアランスがリベット継手の接合強度のばらつきに影響したのではないかと考えられるが，詳細は今後の課題である．

継手の穴の表面についても，図 13 と図 17 を比べるとパンチングリベット継手の穴の表面の凹凸が大きく粗いことが分かる．しかし，継手強度の比較では，パンチングリベット継手とリベット継手で大きな差異は認められなかった．図 7 と図 19(a)を見るとリベット軸の下部分は同じように太っており，同じ 30kN の荷重で継手を作製していることから，パンチングリベット継手とリベット継手の違いは穴の表面性状であるが，両者の穴の表面性

状程度であれば継手強度にほとんど影響しないと考えられる。図 9 から分かるように、GFRP 板は打ち抜いた穴から引張荷重方向と垂直に破断している。これはリベット軸により打ち抜かれた穴からき裂が引張荷重方向と垂直に進展したと考えられるが、パンチングリベット継手もリベット継手のどちらもリベット頭部とリベットホルダーにより板を上下から締め付け、穴の縁でき裂が開くことを抑える効果があると考えられる。そのため、パンチングリベット継手とリベット継手の穴の表面性状の差ぐらいであれば座面圧力の効果が同程度あり、両者の強度に差が生じなかったと考えている。座面圧力の具体的な数値などの詳細については今後の課題としたい。

Fig.21 Tensile load-displacement curves of obtained by tensile tests of riveted joint. The amount of displacement of each test piece was different. The GFRP plates of all the joints broke as shown in Fig. 9.

Fig.22 Maximum tensile loads of punching riveted joint and riveted joint. The strength of the riveted joint (the joint with drilled hole) was almost same as the strength of the punching rivet joint (the joint with punched hole).

5.5 疲労試験

5.5.1 実験方法

疲労試験に用いるパンチングリベット継手は、板の積層の順序を A6061 板が上、GFRP 板を下とし、押し込み速度 10mm/min、押し込み荷重 30kN で作製した。比較のため、ボルト継手も疲労試験を行った。ボルト継手は強度試験に用いたものと同様であり、図 4 (b) に示したものである。疲労試験機は、油圧サーボ式疲労試験機(EFH-

50-5-5, 鷺宮製作所)を用いた。最大荷重に対する最小荷重の応力比は0.1とし、引張片振りの正弦波荷重を強度試験と同じ方向に加え、試験周波数を10Hzとして行った。

5.5.2 疲労試験の結果

疲労試験から得られた最大荷重と繰返し数の関係を図23に示す。図より、パンチングリベット法により作製した継手の疲労寿命が長いことがわかる。これは疲労試験中にボルト継手のボルトが緩んで行ったことが原因と考えられる。破断後の継手の写真を図24に示す。全てのパンチングリベット継手は図24に示すように、GFRP板のリベットホルダー周辺からき裂が発生し破断した。

Fig.23 Relationship between maximum load and number of cycles. The fatigue life of the punching rivet joints was longer than fatigue life of bolted joints.

図25にボルト継手の破断後の外観を示す。き裂は穴から生じた(a)とワッシャーの周りに沿うように生じた(b)の2つがあった。破壊形態は荷重が高いほど(a)が多く、低いほど(b)が多かった。荷重が低い場合は、あらかじめ板にあけておいた穴φ5.1mmとM5ボルトの間にわずかなクリアランスがあったこと、繰返し荷重が多い場合はボルトが緩むことから疲労試験中にGFRP板が反り、その結果として、図4に示すボルト継手のワッシャーの外周のエッジ部分がGFRP板に押しつけられ、それが繰返されることで破断に至ったと考えられる。

Fig.24 Appearance of punching rivet joint after fatigue test.

Fig.25 Appearances of bolted joints after fatigue test.

6. 結 言

本研究では、軽金属材料であるアルミニウム合金 A6061 板と、構造用材料として注目されている短繊維で強化された GFRP 板をアルミニウム合金 A7075 のリベットを用いてパンチングリベット法によって接合することを試み、十分な継手性能を有する継手を作製できるかを検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) パンチングリベット法により、A6061 板と GFRP 板を A7075 リベットによりリベット接合できることを示した。
- (2) 接合過程中的の接合部の穴の断面を観察すると、継手断面の A6061 板のばりはリベットの打抜き時に発生し、A6061 板の打抜き片が GFRP の穴の表面を擦ることで穴の表面が粗くなる。
- (3) パンチングリベット法による継手は、穴の表面が凸凹ではあるが、穴の表面が平滑な場合のリベット接合の場合と継手強度は同等であった。
- (4) パンチングリベット法により作製した継手は、ボルト締結した継手と同等な継手強度を有している。また、リベット接合は繰り返し荷重が作用しても接合が緩みにくいため、ボルト締結に比べて疲労寿命が長いと考えられる。

謝 辞

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 20K04242) の補助を受けたことを記して感謝の意を表するとともに、試験片作製等に多大なご協力いただきました兵庫県立大学工作センターの職員の皆様にも感謝申し上げます。

文 献

- Fame, C. D., Correia, J. R., Ghafoori, E. and Wu, C., Damage tolerance of adhesively bonded pultruded GFRP double-strap joints, *Composite Structure*, Vol.263 (2021), 113625.
- Franco, G. D. and Zuccarello, B., Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints, *Composite Structures*, Vol.116 (2014), pp.682-683.
- Gay, A., Lefebvre, F., Bergamo, S., Valiorgue, F., Chalandon, P., Michel, P. and Bertrand, P., Fatigue of aluminum/glass fiber reinforced polymer composite assembly joined by self-piercing riveting, *Procedia Engineering*, Vol.133 (2015), pp. 501-507.
- 後藤芳樹, GFRP 機械的継手の疲労強度に及ぼすフレッチングの影響, *材料*, Vol.48, No.7 (1999), pp.753-757.
- 橋本国太郎, 杉浦邦征, 高力ボルト摩擦接合された GFRP 部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察, *構造工学論文集 A*, Vol.58A (2012), pp.935-945.
- Iwasa, M., Study on the strength of GFRP/stainless steel adhesive joints reinforced with glass mat, *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, Vol.48, No.4 (2005), pp. 256-263
- 岩崎初美, 松井孝洋, 小林拳祐, 中村一史, ハイブリッド FRP 部材と鋼部材の高力ボルト接合に関する強度特性, *構造工学論文集*, Vol.64A (2018), pp.769-778.
- 海津浩一, 木之下広幸, 池田清彦, インパクトリベット, 特許 4972732(2012).
- 海津浩一, 伊藤脩平, 日下正広, 木村真晃, 木之下広幸, アクリル樹脂板とアルミニウム合金板のパンチングリベット法による締結, *日本機械学会論文集*, Vol.84, No.862 (2018), DOI: 10.1299/transjsme.17-00485.
- 木之下広幸, 海津浩一, 吉原智啓, 河村隆介, 池田清彦, 衝撃リベット締結法による冷間圧延鋼板の接合, *自動車技術会論文集*, Vol.40, No.5(2009), pp.1309-1314.
- 木之下広幸, 海津浩一, 吉原智啓, 河村隆介, 池田清彦, リサイクル設計を考慮した衝撃リベット締結法, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.76, No.763 (2010), pp.710-716.
- 木之下広幸, 海津浩一, 小林太一, 池田清彦, パンチングリベット法による冷間圧延鋼板の締結, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.77, No.780 (2011), pp.3184-3192.
- 北山暢彦, 前田研一, 中村一史, 渡邊哲也, 瀬戸内秀規, 床版橋形式 GFRP 歩道橋のリベット接合と接着接合を併

- 用した連結構造の開発, 構造工学論文集 A, Vol.59A (2013), pp.936-948.
- 小林憲治, 日野伸一, 山口浩平, 大木透, 接着剤および高力ボルトを用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 A, Vol.55A (2009), pp.1140-1149.
- Ostapiuk, M. and Bienias, J., Fracture analysis and shear strength of aluminum/CFRP and GFRP adhesive joint in fiber metal laminates, materials, Vol.13, No.7 (2020), DOI: 10.3390/ma13010007
- 佐藤千明, FRP の接着接合, 日本接着学会誌, Vol.50, No.5 (2014), pp.175-178.
- 関根尚之, 中田政之, 宮野靖, 倉石晃, Stephen W. Tsai, GFRP/Metal 継手の引張疲労強度の時間および温度依存性, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.69, No.678 (2003), pp.412-419.
- Settineri, L., Atzeni, E. and Ippolito, R., Self piercing riveting for metal-polymer joints, International Journal of Material Forming, Vol. 3(2010), pp.995-998.

References

- Fame, C. D., Correia, J. R., Ghafoori, E. and Wu, C., Damage tolerance of adhesively bonded pultruded GFRP double-strap joints, Composite Structure, Vol.263(2021), 113625.
- Franco, G. D. and Zuccarello, B., Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints, Composite Structures, Vol.116 (2014), pp.682-683.
- Gay, A., Lefebvre, F., Bergamo, S., Valiorgue, F., Chalandon, P., Michel, P. and Bertrand, P., Fatigue of aluminum/glass fiber reinforced polymer composite assembly joined by self-piercing riveting, Procedia Engineering, Vol. 133 (2015), pp. 501-507.
- Goto, Y., Effect of fretting on fatigue strength of mechanically fastened GFRP joint, J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol.48, No.7 (1999), pp.753-757 (in Japanese).
- Hashimoto, K. and Sugiura, K., Mechanical consideration on frictional behavior and maximum strength of GFRP members connected by high strength frictional bolted joint, Journal of Structural Engineering, A, Vol.58A(2012), pp.935-945 (in Japanese).
- Iwasa, M., Study on the strength of GFRP/stainless steel adhesive joints reinforced with glass mat, JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, Vol.48, No.4(2005), pp. 256-263 (in Japanese).
- Iwasaki, H., Matsui, T., Kobayashi, K., Nakamura, H., Strength characteristics of high strength bolted connections between hybrid FRP members and steel members, Journal of structural engineering A, Vol.64A(2018), pp.769-778. (in Japanese).
- Kaizu, K., Kinoshita, H. and Ikeda, K., Impact rivet, Japanese Patent 4972732 (2012) (in Japanese).
- Kaizu, K., Ito, S., Kusaka, M., Kimura, M. and Kinoshita, H., Joining of acrylic resin sheet and aluminum alloy sheet by punching rivet method, Transactions of the JSME, Vol.84, No.862(2018), DOI: 10.1299/transjsme.17-00485. (in Japanese).
- Kinoshita, H., Kaizu, K., Yoshihara, T., Kawamura and R., Ikeda, K., Joining of cold-reduced carbon steel sheets by impulsive riveting method, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.40, No.5(2009), pp. 1309-1314 (in Japanese).
- Kinoshita, H., Kaizu, K., Yoshihara, T., Kawamura and R., Ikeda, K., Impact riveting considering design for disassembly, Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineering, Series C, Vol.76, No.763(2010), pp. 710-716 (in Japanese).
- Kinoshita, H., Kaizu, K., Kobayashi, T. and Ikeda, K., Joining of cold-reduced carbon steel sheets by punching rivet method, Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineering, Series C, Vol.77, No.780(2011), pp. 3184-3192 (in Japanese).
- Kitayama, N., Maeda, K., Nakamura, H., Watanabe, T. and Hideki Setouchi, Development of girder connection using rivet and structural adhesive in a GFRP pedestrian slab bridge, Journal of Structural Engineering, A, Vol.59A(2013), pp.936-948 (in Japanese).
- Kobayashi, K., Shinichi Hino, S., Yamaguchi, K. and Ohmoto, T., Experimental study on strength of GFRP and steel plates connection using adhesively-bonded and bolted joint, Journal of Structural Engineering, A, Vol.55A(2009), pp.1140-1149 (in Japanese).
- Ostapiuk, M. and Bienias, J., Fracture analysis and shear strength of aluminum/CFRP and GFRP adhesive joint in fiber metal

laminates, materials, Vol.13, No.7 (2020), DOI: 10.3390/ma13010007

Sato, C., Adhesive Bonding for FRP, Adhesion, Vol.50, No.5 (2014), pp.175-178. (in Japanese).

Sekine, N., Nakada, M., Miyano, Y., Kuraishi, A. and Tsai, S. W., Time-temperature dependence of tensile fatigue strength for GFRP/metal joint systems, Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineering, Series A, Vol.69, No.678(2003), pp. 412-419 (in Japanese).

Settineri, L., Atzeni, E. and Ippolito, R., Self piercing riveting for metal-polymer joints, International Journal of Material Forming, Vol. 3(2010), pp.995-998.