

令和元年6月20日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06006

研究課題名(和文) 熱可塑性CFRPの接合成形による高強度大型構造部材の作成法

研究課題名(英文) Joint-forming method of thermoplastic CFRP for large-size structure

研究代表者

立野 大地 (Tatsuno, Daichi)

金沢大学・フロンティア工学系・助教

研究者番号：30714159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：熱可塑性CFRPシートの積層構造を活用して、元のシートと同等の強度を有する継手構造を明らかにした。この結果を応用し、端部にその継手構造を有するU字ビームをプレス成形する方法を確立した。プレス成形したU字ビームどうしを、プレス機を用いて、部分加熱圧着により接合して閉断面ビームを製作する技術と、閉断面ビームを長手方向に接合する技術を開発した。これにより単位部品をつなぎ合わせてより大きな部材を製作する工法を見いだした。一方、部分的な加熱圧着では継手周囲の強度が低下する問題が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、元の材料と同等の強度をもつ継手構造が明らかとなった。熱可塑性CFRPの接合は樹脂強度に依存するため母材強度に比べて弱くなるが、積層構造を活用することでこの問題を克服した。この継手構造を活用して単位部品をつなげて長尺閉断面ビームを成形できることを示した。本研究を通して接合に求められる成形方法や金型の機能、さらに本接合法における課題も明らかになり、今後の研究の方向性が示唆された。この研究成果は熱可塑性CFRPの活用に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed an efficient joint structure, which having same strength of original material without joint, for thermoplastic CFRP. Press forming method for U-beam having the joint structure at the end of it, has been developed. We further developed the techniques; forming closed-section-beam by joining the U-beams, and joining them in longitudinal direction, using press machine. We have demonstrated potential of this technique to fabricate large-size structure by joining unit parts.

On the other hand, in case of joining with local heating, we have found that the strength decreases at the boundary of heating zone.

研究分野：機械工学

キーワード：熱可塑性CFRP 接合

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱可塑性 CFRP(炭素繊維強化樹脂)は、軽量でありながら高強度であり、将来的に輸送機器などの部材に適用して運用中のエネルギー消費量を低減するなど、さまざまな産業において活用が期待されている素材である。従来の熱硬化性 CFRP とは異なり、加熱すれば樹脂がやわらかくなり冷やせば固まる熱可塑性を利用し、短時間で成形加工が可能とされている。しかしながらその普及は進んでおらず、熱可塑性 CFRP に適した成形加工技術が発達していないことが一因である。

熱可塑性 CFRP の特徴の一つが、部分的な加熱圧着により接合が可能なことである。この性質を利用して、プレス成形したハット材のフランジ部を接合して閉断面ビームを成形することが可能である⁴⁾。あるいはパネルを連結してより大面積のパネルを作ることも考えられる。しかしながら熱可塑性 CFRP シートを単に重ねただけでは、接合強度は樹脂の強度で制限される、接合部の板厚が元の 2 倍となる、応力集中が起きるなどの問題もある。したがって炭素繊維の強度を活かし、滑らかにつながる接合構造を明らかにすることが求められる。

筆者らは、熱可塑性 CFRP シートを用いたプレス成形法の研究や、部分加熱圧着による接合の基礎的な研究を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究は、熱可塑性 CFRP シートどうしを母材と同等の強度で接合する継手構造の解明を目指す。熱可塑性 CFRP シートの積層構造を活用して元のシートと同じ強度となる継手構造を明らかにする。さらに、その継手構造を端部に有するパーツをプレス成形する技術を開発し、これらを接合し、一体成形したものと同等な強度・剛性をもつ大型構造部材を成形する接合成形技術を確認する。成形対象として、プレス機ではむずかしいとされる長尺閉断面ビームを製作する技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 継手構造の基礎研究

本研究ではまず、継手構造と強度との関係を調べ、高い強度を持つ継手構造を研究する。図 1 に示すように、所定の長さにした平織炭素繊維熱可塑性 CFRP シートを金型の中で積み重ねて加熱圧着し、種々の継手構造を有する短冊試験片を製作する。一方が他方にはまりこんだ入れ込み継手と、階段継手を取り上げる。これは、継手の強度は接合面積の合計に比例すると考えたからである。積層したシートを単に重ねて加熱圧着したのでは接合面積は小さく、応力集中が生じ、また接合部は板厚の 2 倍の厚さとなる。入れ込みや階段継手において層の重なり長さを変えて引張強度および曲げ強度との関係を明らかにする。

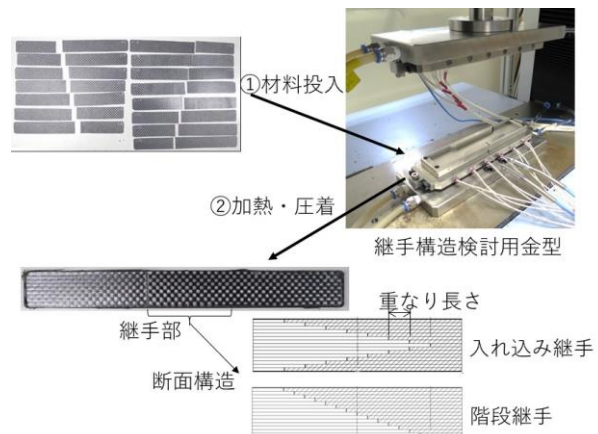


図 1 継手構造の研究

(2) プレス成形法の研究

プレス成形において、上記で確立した高強度な継手構造を端部に実現する方法を確認する。実際の製造においては、板状の素材をプレス成形等で特定の形状に変形させた上で端部に狙いの継手構造を実現させることが求められる。ここでは、図 2 に示すように、U 字ビームを成形対象として取り上げ、元となるシートの寸法設計法、シート加熱法、プレス成形法を検討し、狙い通りの継手構造を実現する方法を明らかにする。

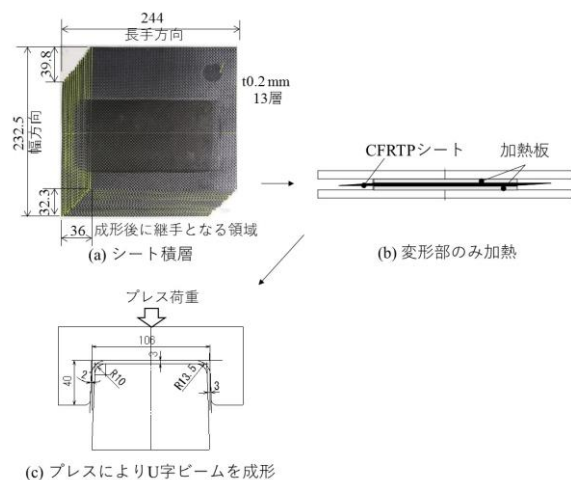


図 2 プレス成形法の研究

(3) 閉断面ビーム成形法の研究

U字ビームどうしをはめあわせ、プレス機を用いて継手部のみ加熱圧着して閉断面ビームを成形する方法を開発する。閉断面ビーム接合金型を図3に示す。筆者らの先行研究により、部分加熱による接合の問題点は、加熱板が接触する周囲の樹脂も熱伝導で樹熔融し、加圧しないまま冷却するとボイドが生じ、強度が低下することであった。そこで本研究の金型は、加熱領域の周囲も冷却板で加圧してボイドを押しつぶし強度低下を防ぐことを狙った。本方式の有効性を検証し、プレスで閉断面ビームを製作できることを示す。

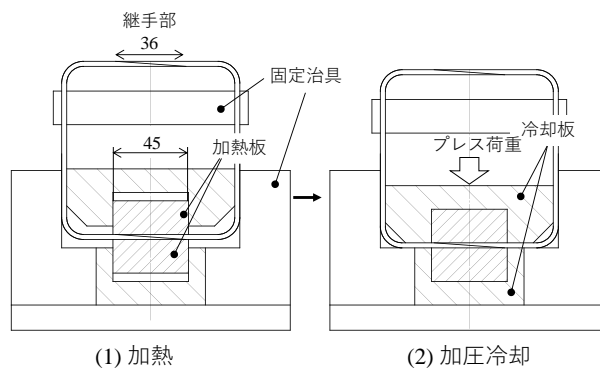


図3 閉断面ビーム成形金型断面図

(4) 閉断面ビームの連結法の研究

閉断面ビームをさらに長手方向に連結し、継手部のみを加熱圧着して長尺閉断面ビームを製作する方法を開発する。熱可塑性CFRPの接合では、溶けた樹脂を冷やしながら加圧することが高い強度を得るために必要である。したがって閉断面ビームを連結する場合は外側と内側の両面から加圧することが求められる。このため本研究では、図4に示すように、外側の加圧をプレスのスライドで、内側からの加圧は小型の油圧ジャッキを用いて行うこととした。内側の加熱加圧ユニットはプレスとは独立して閉断面ビームの内部に設置が可能であるため、事実上無制限に閉断面ビームを連結可能である。本装置を用いてプレス機による継ぎ足しで長尺閉断面ビームを成形する方法を明らかにする。



図4 閉断面ビーム連結金型

(5) 部分加熱接合部の評価

部分加熱圧着による接合部の内部組織および強度を評価する。前述の通り、部分加熱の周囲の熱影響部が強度低下の原因となるが、その発生を防ぐ機構を設けた金型の有効性を検証する。接合後に継手部も含めて試験片を切出し、引張強度を評価する。

4. 研究成果

(1) 継手強度の評価

上記の基礎研究において調査した継手構造と強度との関係の代表例を表1に示す。各構造において層の重なり長さを1.5, 3, 6mmとして引張強度および曲げ強度を調べた。金型温度を260℃としてシートを加熱し、5MPaを3分保持しながら冷却した。

継目のないシートの引張および曲げ強度は、それぞれ500MPaと556MPaであった。実験結果より、入れ込み継手と階段継手は同等の強度であること、引張強度は層の重なり長さが長いほど大きいことがわかった。継手3の引張強度は326MPaで他と比べて強度が低く、このことから重なり長さは3mm以上が望ましいことがわかった。曲げ強度については、継手3, 4, 5の比較から、重なり長さが強度に関係していることがわかったが、引張強度に比べるとその寄与率は小さい。これは曲げ応力は板厚方向に傾斜的に分布するためと考えられる。入れ込み継手も階段継手も、重なり長さを3mm以上とすることで、母材強度の90%以上の継手強度を得られることがわかった。

表1 継手構造と平均強度(n=5)

継手の断面模式図		引張強度	曲げ強度
入れ込み継手	継手1 10.2×15層 3mm 3, 21	469MPa	500MPa
	継手2 6, 42	518MPa	479MPa
階段継手	継手3 1.5	326MPa	480MPa
	継手4 3	475MPa	505MPa
	継手5 6	515MPa	546MPa

※平織炭素繊維、PA6、Vf50%
※母材強度：引張500MPa、曲げ556MPa
※5回の平均値

(2) プレス成形法

本研究で製作した、端部に継手構造を持つU字ビームを図5に示す。継手構造は、強度、はめこみやすさ、継手長さのバランスから表1の継手4を採用した。U字ビームの端部には3mmずつずれた継手を形成する必要があるが、曲げ変形で生じる内外の周長差を考慮してシート寸法を決定した。変形しない部分をあらかじめ加熱圧着することで、積層した各層が成形過程で相対的にずれるのを防いだ。積層したシートを280℃に加熱し、150℃に保持した金型で7.4MPaを30秒間保持して成形した。離型後のスプリングイン量を考慮した勾配を金型に与え、成形後に曲げ部の角度が90°となるようにした。継手部も加熱するとふやけてその後の接合がむずかしくなるため、継手部を除いて加熱することが有効であった。研究の結果、狙い通りの継手構造をプレスで実現することができた。

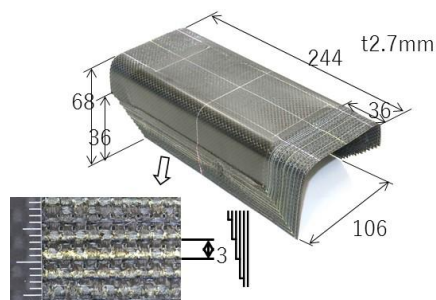


図5 端部に継手をもつU字ビームの成形

(3) 閉断面ビームの成形

上記のU字ビームどうしをはめ合わせて接合した閉断面ビームを図6に示す。継手部を230℃に加熱し5MPaを60秒保持しながら冷却した。プレスの際、U字ビームどうしが圧力でずれるため、固定治具でビームを位置決めした。これによりはめあわせたときの精度が向上し、圧力によるずれを防ぐことができた。プレスを用いて階段継手により閉断面ビームを成形する方法を明らかにした。

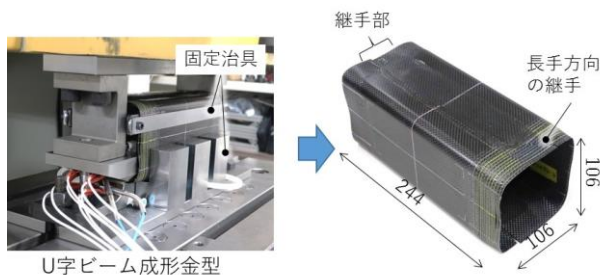


図6 閉断面ビームの成形

(4) 閉断面ビームの連結

閉断面ビームを連結して製作した長尺閉断面ビームを図7に示す。長手方向の継手をはめる際、うまくはまりこまなかったため、はめ込む側(オス側)の継手を加熱してすぼめる必要があった。これはプレス成形金型形状を工夫して長手方向の継手をすぼめて成形するなどの工夫が有効であると考えられる。ビーム内側からも加熱加圧することで、プレス機を用いて閉断面ビームを連結する方法を明らかにした。この手法は2つ以上の連結でも機能し、長尺物の成形にも対応する。



図7 連結した閉断面ビーム

(5) 部分加熱接合部の評価

図6に示す金型で接合した部分の強度を評価するため、階段継手を持つ平板をまず製作してこれらを接合し、引張試験を行った。結果、図8に示すように、加熱の縁にあたる位置で破断し、その強度は325MPaであり、母材よりも強度が低下していることがわかった。試験前の試験片の内部組織観察より、加熱板のすぐ外側の繊維が座屈していることがわかった。これは溶けた樹脂が圧力で押し出されて固体状態の樹脂にぶつかるためと考えられる。そこで冷却板の温度も樹脂の融点付近まで加熱して温度勾配を減らすなどしたが、この問題の解決には至らなかった。部分加熱接合においてこの問題は重要であり、今後詳細な原因追及や改善方法の研究が必要である。

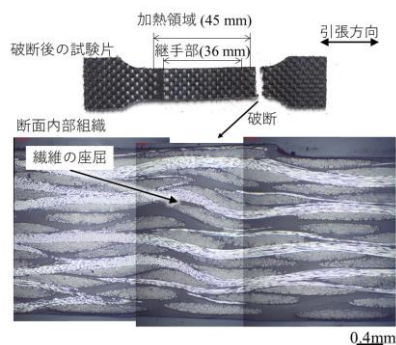


図8 破断後の試験片と内部組織

以上のように、熱可塑性CFRPの接合において、母材と同等の強度となる継手構造を明らかにした。プレス成形後のパーツの端部にその継手構造を形成するプレス成形法を確立した。プレス成形したU字ビームをプレス機で接合して閉断面ビームを製作し、さらにそれらをつなぎ合わせて長尺閉断面ビームを製作する方法を明らかにした。一方で部分加熱圧着では加熱した周囲で繊維が座屈し強度が低下する問題が明らかとなった。今後この原因と改善方法を明らかにしていくつもりである。

<引用文献>

1) D. Tatsuno, T. Yoneyama, K. Kawamoto, M. Okamoto, Production System to Form, Cut, and Join by Using a Press Machine for Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets, Polymer composites, Volume39, Issue7, 2571-2586, 2018

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

立野大地, 米山猛, 熱可塑性 CFRP の接合成形法, 平成 30 年度塑性加工春季講演会, 2018 年 6 月 1 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 米山 猛

ローマ字氏名: Yoneyama Takeshi

所属研究機関名: 金沢大学

部局名: 理工研究域機械工学系

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 30175020

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。