

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 2 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04571

研究課題名(和文)CFRP積層板の組継接着接合に関する研究

研究課題名(英文)Strength evaluation on finger joint adhesive bonding for CFRP laminates.

研究代表者

岩堀 豊 (Iwahori, Yutaka)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：50358636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：CFRP積層板に組継接合を適用した場合の継手強度に関する力学的な関連性を調べるため、ピッチ及び組継深さをパラメータとし、組継が荷重と直行する方向に設けられたTシリーズ、組継が荷重方向に設けられたLシリーズについての供試体を製作し、引張試験を実施し強度試験中の観察、強度評価、構造解析を実施した。組継を適用したCFRP積層板の接着接合強度は、組継方向、組継深さ、ピッチに影響し、荷重方向に組み継ぐLシリーズの方式は、通常接着の約3倍の荷重を負担でき、有効な接着方式になると考えられる。さらに安定した高強度接着接合構造を設計するためには、組継パラメータと破壊モードを丹念に調べる必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複合材積層板を接合する手法として機械的及び接着接合があるが、接着接合強度の向上は、接着剤及び界面強度向上が主であり、しかも層間強度以上の強度は望めない。また、実際の設計では、確実な接合を保証する方法がなく、重量や疲労強度に有利といわれる接着接合部分には、機械的接合を併用しているのが現状である。しかし、本研究の結果では、接合方向と組継パラメータ条件を設定すれば、これまでの接合部分よりも約3倍もの接合強度を発現できることが確認され、これまで接着接合を用いることのできなかつた部位にも接着接合が適用できる可能性がある。本研究結果では、今後の複合材構造軽量設計に大きく貢献できる可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：Tensile tests were carried out to investigate the mechanical properties of finger joint strength for CFRP laminates structures. Observations during the strength tests, strength evaluations, and structural analysis (FEA) were also conducted. Manufactured specimens have parameters which are the splicing pitch and splicing depth as the finger joint parameters. The T series specimen was provided the grooves in which were the perpendicular to the applied load direction. The L series specimen was provided the grooves in which were the applied load direction. It was revealed that the adhesive bonding strength of finger joint for the CFRP laminates affects the splicing grooves direction, the splicing depth, and the splicing pitch. The L series specimens were improved the strength about three times of the normal shear bonded joint strength. It was confirmed that finger joint (L series) was an effective structural bonding method for high loaded CFRP laminates joint area.

研究分野：複合材料構造設計

キーワード：複合材料 接着接合

1. 研究開始当初の背景

般空機等の複合材構造接合には機械的接合が多用されているが、構造設計・製造的に非効率である面も多い。一方、接着接合に対する信頼性は十分でない上に、複合材の層間剥離強度以上の荷重は伝達できない。本研究では、木材建築物等の部材端部接合に用いられている組継接合をCFRP接着構造に応用した「CFRP積層板の組継接着接合に関する研究」を提案する。CFRP積層板に組継接着接合を適用することによって、凹凸による接着面積は増加し接合部強度向上が期待できるが、継手内部が組継による複雑な幾何形状となることや、CFRP特有の層間強度が低い部分が混在するため、単純な面積増加に伴う強度向上ではない。本研究では、CFRP積層板に組継接合を適用した場合の組継パラメータと継手強度に関する力学的な関連性について明らかにし、新しい接合法の可能性を示す。

2. 研究の目的

般空機等の複合材構造接合には、ファスナーを使った機械的接合が多用されているが、構造設計・製造的に非効率である面も多い。一方、接着接合に対する信頼性は十分ではない。そのため、接着を用いた場合でも機械的接合を併用するなど、接着接合の長所を活かせていないのが現状である。CFRP構造接合に対し信頼性が高く、荷重伝達が効率よく行うことのできる接合手法が確立できれば、構造設計の自由度増加、軽量化、製造・組立工程の削減に貢献できる。

本研究では、CFRP積層板構造の接合手法として組継による接着接合を提案する。組継接合は、古来より木材を使った建築物や家具等の部材端部に用いられてきた接合手法である。この組継接合は、接合端部を組み合うように加工し、木材どうしの接合強度を高めるもので、平面の端部を合わせ接着するよりも大きな接着面積を確保でき頑丈な木材構造接合法として使用されている(木材の場合接着しない場合もあり)。本研究では、この接合手法をCFRP積層板に応用し接着接合部の強度向上を目指す。

3. 研究の方法

組継接合によって継手強度向上は期待できるが、組継接合部は複雑な幾何形状となり荷重伝達が複雑になる。また、CFRP積層板には強い異方性があり、特に層間強度が非常に低い層が板厚方向に存在する事から、組継加工(凹凸)の深さや幅で(組継パラメータと呼ぶ)接合部の破壊挙動が変化し強度にも影響するものと考えられる。そこで、本研究ではこれらの組継パラメータと接合部強度について研究を行い、異方性を有するCFRP積層板に対する組継接合の強度特性を解明する。組継接合をCFRP積層板に適用する場合、組継凹凸の深さ、幅、接着長さの変化に伴うせん断強度、接着部端部のピール強度(引き剥がし)を考慮し、最弱部となるCFRPの層間強度を考慮して継手内部の複雑な応力分布を考慮し継手強度を考察することが必要である。そのため組継試験片に負荷(引張)を与えつつ破壊の初期状態から進展に関する一連の現象を把握する。また、構造解析を同時に進め試験片内部の応力分布を推定し破壊モード、最終強度等の実験結果との比較を行いながらCFRP積層板に組継接合を適用した場合の強度特性を明らかにする。

本研究では、CFRP積層板に組継接合を適用した場合の継手強度に関する力学的な関連性を調べるため、組継数(n)、ピッチ(s)及び組継深さ(d)をパラメータとし、組継が荷重と直行する方向に設けられたもの(Tシリーズ)、組継が荷重方向に設けられたもの(Lシリーズ)と組継を施さないもの(Nシリーズ)のCFRP接着接合供試体を製作し、引張試験を実施した。

4. 研究成果

(1) Tシリーズ(組継は荷重に対して直角方向)

組継数(n)及び組継深さ(h)に対する最大荷重の平均値をFig.1に示す。参考のため組継を施さない場合(同被着材のラップシアT0)の試験結果を同図(h=0)に示す。同じ組継深さh=0.5の結果では、組継数に関わらず、組継なし(h=0)とほぼ同等の強度であることがわかる。また、組継深さが増すに従い最大荷重は低下する傾向にあることがわかる。また、同じ深さを有する試験片では組継数が異なってもほとんど強度変化がないことがわかる。

各パラメータにおいて、画像解析を行った。典型的な破壊の進展をFig.2に示す。Tシリーズにおいては、組継した先端部の内側から破壊が進み、これが荷重の負荷に伴い進展するため、試験片の耐荷重が上がり破壊に至ること

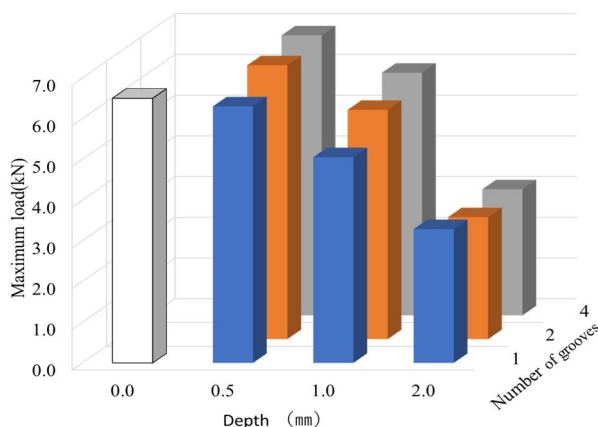


Fig.1 Tシリーズの組継パラメータと強度

がわかった。さらに組継を深くするほど、溝を掘った後の残部の剛性が低下し、試験片本体の剛性が低下するため、試験片の反りが増大する。従って、溝を深くすることは試験片自体の強度を低下させることになることが明らかとなった。

典型的な、荷重-変位線図を Fig.3 に示す。同図には、各荷重-変位時のシミュレーションのモデル及びシミュレーション結果を表示した。このシミュレーション結果から、組継端部からの破壊の進展を模擬することによって、実験的に求めた荷重-変位線図を再現でき、破壊の進展がこの試験片の伝達能力を決めていることが明らかとなった。

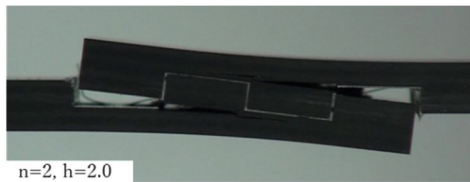


Fig.2 組継接合試験片の破壊進展

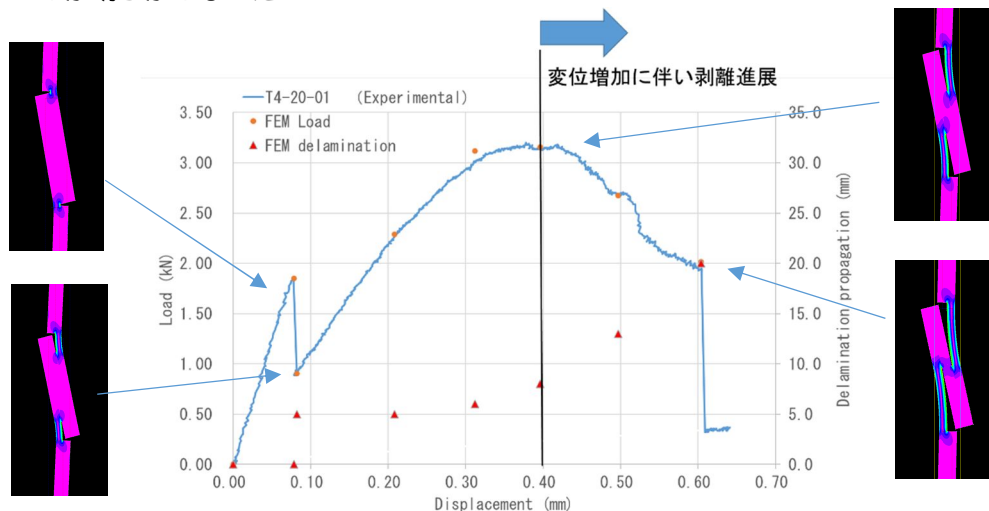


Fig.3 Tシリーズ荷重-変位線図と解析結果

(2) Lシリーズ (組継が荷重方向)

組継ピッチ (s) 及び組継深さ (d) に対する最大荷重の平均値を Fig.4 に示す。参考のため組継を施さない場合 (ラップシア N0) の試験結果を同図 (s = None, d = 0) に示す。接着面積が大きくなる順にピッチを並べ替えた。

荷重と同一方向に組継を施した Lシリーズ試験片では、全ケースについて最大荷重は高くなった。特に組継が深さ最も大きい 2.0 mm で、ピッチが 6.2 mm のものが最も高い値を示し、通常のラップシア試験片のおよそ 3 倍の荷重を負担できる能力があることが明らかになった。

一方、深さやピッチが異なると、接着面積が異なるため、最大荷重を接着面積で除し、せん断応力とした値を Fig.5 に示す。せん断応力について比較してみると、深さが 1 mm の時にはせん断応力はほぼ同等であるが、2 mm となるとせん断応力が高くなり、継ぎ手としては良好な特性を持つことになるといえる。

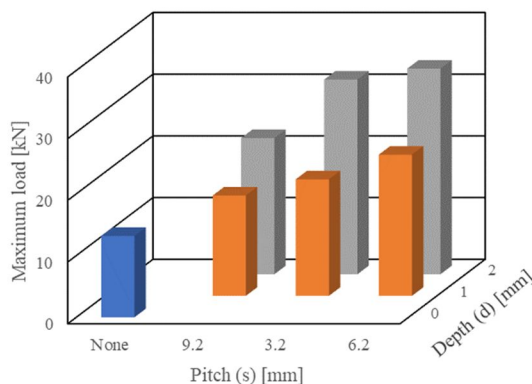
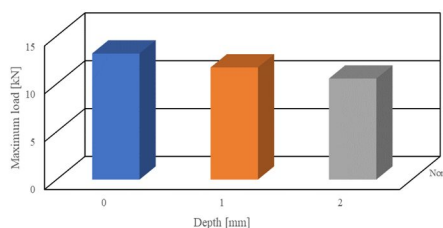
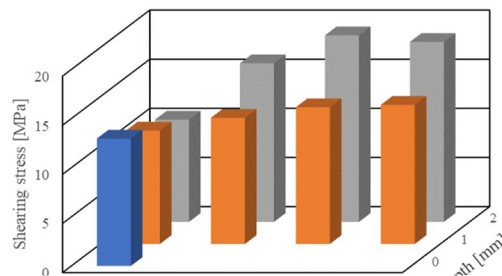


Fig.4 Lシリーズの組継パラメータと最大荷重



(3) Nシリーズ (組継なしオフセット量変更)

組継構造は、深さ及び幅が主なパラメータであるが、組継深さが増加すると、被接着試験片間の中立軸間距離が短くなり発生モーメントが減少し、その結果試験片の強度が増加する可能性が考えられる。そのため、接合の深さのみを変化させ、組継をしない試験片を製作し、中立軸間距離の影響を確認した。深さを 0, 1 mm, 2 mm として強度を計測した結果を Fig.6 に示す。組継深さが増すに従い、最大荷重が小さくなることわかる。また、各種試験片 3 本ずつの最大荷重の値に

大きなばらつきがあり今回の試験では、深さと強度との関係を断定することはできなかった。一般的な感覚としては、中立軸の減少によって発生モーメントは減少し、接着剤端部の剥離力が減少。その結果強度は増加する可能性があると思われたが、今回の結果は予想に反した結果となっている。試験片破壊後の剥離面を詳細に観察したところ、Nシリーズ試験片の接着面にはFig.7に示すようなボイドが多数発生しており、正しい接着性能が出ていない可能性も示唆された。

まとめ

(1) Tシリーズ

CFRP 積層板に対して荷重方向と垂直に組継パラメータを設定し引張試験を実施した。その結果、荷重方向と直交方向に組継パラメータを設定した場合、CFRP 積層板における層間破壊モードが主となり、接着接合継手強度の増加は望めない。組継加工端部の角から層間剥離が発生し進展する。これは組継深さが大きいほど顕著になる。組継深さが深い場合、残存部が薄くなるとともに、被着材組継部に発生した層間剥離間隔が長くなり層間剥離を助長する幾何形状となることが明らかとなった。

(2) Lシリーズ

CFRP 積層板に対して荷重方向に組継パラメータを設定し、引張試験を実施した。荷重方向に組継パラメータを設定した場合、接着接合継手強度の増加を見込め、接着面積と強度には相関関係があることが明らかになった。また、組継深さが深くなることにより、破壊前の試験片の変形角度が小さくなることが確認された。これは、組継深さが増加すると、接着されているCFRP板の中立軸が近くなり、発生モーメントが小さくなることによるものと考えられる。一方、試験片の強度は、組継のない通常の接着接合と比較して約3倍の荷重伝達ができることがわかり、複合材料積層板の接合方法としての可能性を示すことができた。

(3) Nシリーズ

CFRP 積層板に対して組継をせず、深さのみを削り量として設定した試験片について引張試験を実施したところ、深さと強度との関係については、深さが増すほど強度低下する結果となり、接合される積層板間のモーメントアームが短くなり強度が向上するという想定とは異なった結果となった。破壊モードを詳細に観察したところ、界面破壊部やボイド残部が接着層内の剥離面において確認された。Nシリーズについては、接着の不良が疑われ、再検討が必要となった。

(4) 総括

組継を適用したCFRP積層板の接着は、組継パラメータとともに、複合材の層間強度と接着強度とが影響する。組継の方向によっては、Tシリーズのように層間剥離が助長されるような結果となり、積層型の複合材についてはこのような方式で組継接合することは避けた方がよいことが分かった。一方、荷重方向に組み継ぐLシリーズの方式では、最大3倍の荷重を負担でき、通常のラップシヤ接着では達成できない強度を発現できることが明らかとなり、積層型の複合材を効率的に接合するために有効な接着方式になるのではないかと考えられる。ファスナーを用いた機械的接合でもこれだけの荷重伝達は不可能である。今回の研究では、組継パラメータの最適化を示すまでには至らなかったが、今後さらなる組継パラメータの最適化、さらには圧縮特性等、荷重方向の影響に関する評価を進めていく。

Fig.6 Nシリーズの組継パラメータ最大荷重

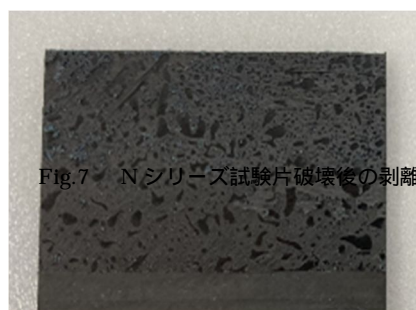


Fig.7 Nシリーズ試験片破壊後の剥離面

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡本駿、岩堀豊、慶良太、杉本直
2. 発表標題 組継CFRP積層板の接着接合強度に関する研究
3. 学会等名 第61回 構造強度に 関する講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩堀 豊, 慶 良太, 岡本 駿, 杉本 直
2. 発表標題 組継を用いたCFRP積層板接着接合の研究
3. 学会等名 第44回 複合材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Iwai, Syun Okamoto, Yutaka Iwahori
2. 発表標題 Experimental evaluation on mechanical properties of finger jointed CFRP laminates
3. 学会等名 16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩堀豊、岡本俊、慶良太、杉本直
2. 発表標題 組継CFRP積層板の接着接合強度に関する研究
3. 学会等名 第11回 日本複合材料合同会議（コロナ影響で前刷りのみ発行）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本俊、岩堀豊、杉本直
2. 発表標題 CFRP積層板の組継接着接合に関する研究
3. 学会等名 第12回 日本複合材料合同会議
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------