

令和 元年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04397

研究課題名(和文)FRPボルトによるFRP部材のボルト接着併用接合の力学的挙動解明と設計思想の提案

研究課題名(英文)Proposal for design concept and investigation on mechanical behavior of bolted and bonded connections of FRP members by using FRP bolts

研究代表者

北根 安雄 (Kitane, Yasuo)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10444415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：耐食性に優れたFRPの特徴を活かすため、FRP構造物の接合部に、鋼製ボルトによるボルト接合ではなく、FRPボルトを用いたボルト接合を用いて、さらに接着接合と併用したボルト・接着併用接合を検討し、オールFRP構造を目指した。研究の結果、ボルト・接着併用接合の破壊プロセスは、初期剥離、終局剥離、ボルト支圧による終局破壊となり、終局剥離時の荷重が最大荷重となり、接着接合のみの場合より高くなること、終局剥離後は荷重が低下するものの、ボルトによる支圧接合で荷重に抵抗するため急激な荷重低下を抑制することができることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FRPは耐食性に優れていることから、腐食環境の厳しい地域での構造物への採用事例が多くみられるが、接合部に鋼製の留め具を利用した場合は、留め具が腐食することにより、FRPの特長を活かしきれていない現状がある。本研究の成果により、接合部も含めオールFRP構造を実現し、よりFRPの特長を活かし、ライフサイクルコストも低減できるFRP構造物を提案することが可能となる。また、本研究では、FRPの損傷進展解析方法を提案しており、数値解析によってFRP構造物の限界状態をより正確に把握することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：To utilize high corrosion resistance of FRP composites, this study aimed at achieving all-FRP structure by proposing hybrid bolted-bonded joints of FRP members with FRP bolts. As a result of this study, it was shown that failure process of a hybrid bolted-bonded joint is an initial debonding failure, a complete debonding failure, and a connection failure. The load at the complete debonding failure was found to be the load bearing capacity of the joint which was larger than that of a bonded connection. The bearing capacity of a hybrid joint did not decrease drastically after the complete debonding failure due to the bearing-type load transfer mechanism of FRP bolts.

研究分野：構造工学

キーワード：FRP ボルト・接着併用接合 FRPボルト 接合部耐力 オールFRP構造 設計思想

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

繊維強化プラスチック(FRP)は、軽量、高強度であり、耐食性においても優れた材料である。近年、その優れた特性を活用し FRP を土木構造物に適用する試みが始められている。特に、優れた耐食性を活かし、腐食環境の厳しい地域での事例が多い。

FRP を大型土木構造物の構造部材として使用する場合は、FRP 部材同士を接合する必要がある。FRP 部材を接合する方法としては、ボルトやリベットを使用する機械接合と、接着剤を使用する接着接合に大別される。機械接合は接着接合に比べて、組み立て・分解が可能、表面処理が不要、接合強度のばらつきが小さいなどの利点があるため、FRP 土木構造物の接合には機械接合が主に採用されており、その留め具(ボルト・ナット)には鋼製のものが使用されている。しかし、上記のような腐食環境の厳しい地域では、FRP 部材は健全であるが、ボルト接合部の留め具が腐食し(図 - 1 参照)、留め具が交換された例も報告されており、FRP の優れた特性を十分に活用できていない現状がある。



図 - 1 ボルト腐食の例

2. 研究の目的

本研究では、優れた材料特性を有する FRP 材料を主構造部材に用いた構造物に注目し、その中でも FRP 部材同士のボルト接合に着目する。FRP 部材のボルト接合強度に関する研究は、これまでも数多く行われてきたが、そのほとんどが、鋼製の添接板や留め具で検討されている。そこで本研究では、より耐食性に優れた構造を実現するため、オール FRP 構造を目指し、添接板および留め具も FRP 製の材料を対象とする。ただし、GFRP 製の FRP ボルトは、強度・剛性ともに、同サイズの鋼製ボルトと比較して劣るため、FRP ボルトを用いたボルト接合と接着接合の併用接合とすることで、耐食性の向上、接合部の剛性および強度の確保のみならず、ボルトによる接着接合の施工性の向上および接着強度の向上効果を実現することを目指す。本研究により、ボルト・接着併用接合の接合部強度や破壊モードなどの力学的特性を明らかにし、併用接合の設計思想を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、図 - 2 に示すように、H28～H30 年の 3 カ年で実施し、文献調査、実験的検討、解析的検討を含む 8 つのタスクから成る。研究の中心は、Task 3 から Task 5 におけるボルト接合、接着接合、ボルト・接着併用接合の接合部実験であり、それらの結果から、FRP ボルトを用いたボルト・接着併用接合部の力学的挙動を明らかにした。

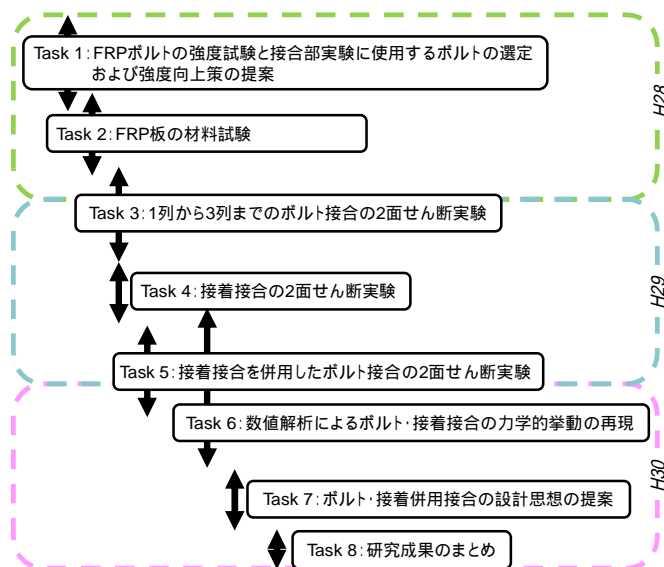


図 - 2 研究方法



図 - 3 併用接合実験の様子

4. 研究成果

(1) ボルト強度試験

FRP ボルトを製造している 2 社から、M16 の GFRP ボルトを入手し、ボルトの引張試験およびせん断試験を実施した。その結果、2 社のボルトの引張耐力およびせん断耐力は、大きな差がないことが明らかとなった。したがって、そのうち 1 社のボルトを接合部実験で使用することにし、M16 のボルトに対する強度試験結果を表 - 1 に示す。

表 - 1 FRP ボルト (M16) の強度試験結果

	せん断試験			引張試験		
	破壊箇所	最大荷重 (kN)	変動係数	破壊箇所	最大荷重 (kN)	変動係数
全ネジ	付け根部のせん断破壊	28.95	0.053	ネジの破壊	21.49	0.094
半ネジ	付け根部のせん断破壊	30.54	0.015	ネジの破壊	24.04	0.049

また、FRP ボルトのリラクゼーション特性を把握するため、M16、M20、M24 の FRP ボルトを用いて、27mm または 36mm 厚の GFRP 板を標準トルク (34Nm) と標準トルクの約 2 倍 (74Nm) で締め付け、その後の軸力を計測した。報告時点で、約 270 日経過しているが、平均して 50% 程度の軸力の減少が見られる。しかし、どの試験体においても、締め付け当初に大きく軸力が低下しており、270 日の減少分の約 7 割が締め付け後 24 時間で発生している。長期的な軸力低下を把握するため、今後も計測を継続する予定である。

(2) ハンドレイアップ材を用いたボルト・接着併用接合部耐力実験

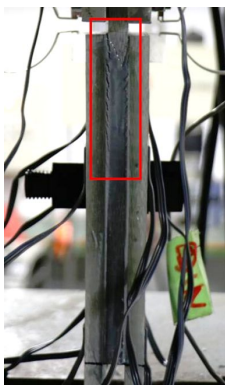
FRP ボルトを用いたボルト接合

1 列から 3 列までのボルト接合部耐力実験結果から、FRP ボルトを用いたボルト接合部は、ステンレスボルトを用いたボルト接合部と比較して、その力学的挙動に大きな違いは見られなかった。ただし、FRP ボルトの強度がステンレスボルトに比較して小さいことから、FRP ボルトのせん断破壊が生じる接合部では、ステンレスボルトと挙動が異なる。

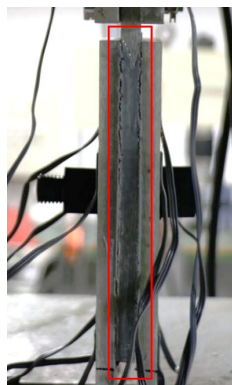
ボルト・接着併用接合

併用接合供試体の破壊は、図 - 4 に示すように 3 つのプロセスが見られた。まずは添接板の接着端部から初期剥離破壊が生じた (初期剥離)。その後、剥離の進展に従い、全接着面積における剥離破壊が見られた (終局剥離)。接着接合が剥離した後に、ボルトの支圧力による母板の破壊が生じた (終局破壊)。この破壊過程における最大荷重は、(b) の全接着面積に剥離破壊が生じた際に得られた。

図 - 5 に 1~3 列接合の併用接合 (紫実線)、ボルト接合 (赤破線)、接着接合 (青破線) の荷重 - 変位関係を示す。ここで、変位には母板と添接板の相対変位である。ボルト接合は接合部の剛性が低く、接着接合は剛性が高いこと、ボルト接着併用接合は接着接合同程度の剛性を有していることがわかる。また、ボルト接合では小さい荷重ですべりが生じるのに対して、接着接合を併用することですべりが抑制されることが確認された。



(a) 端部から生じる初期剥離破壊

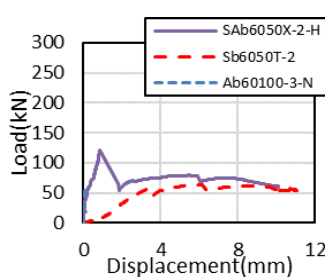


(b) 全接着面積の終局剥離破壊

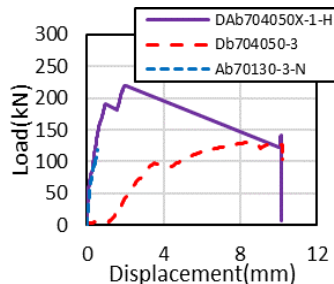


(c) 接着剥離後にボルトの支圧力による母板の破壊

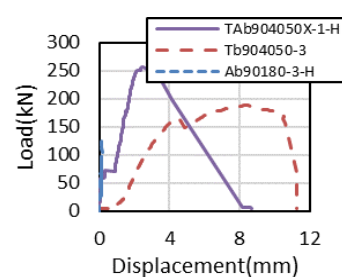
図 - 4 併用接合供試体の破壊過程



(a) 1 列接合



(b) 2 列接合



(c) 3 列接合

図 - 5 併用接合、ボルト接合、接着接合の荷重 - 変位関係の比較

一方、最大荷重については、併用接合が一番高い最大荷重を有している。ボルト接合で締め付けることで、剥離の進展が抑えられたため、接着接合の終局剥離荷重より高い終局剥離荷重になった。また、本研究における終局剥離荷重は、ボルト接合の最大荷重よりも大きくなった。

初期剥離荷重を、接着接合と併用接合を比較すると、大きな差が見られず、ボルトの存在が初期剥離荷重に与えた影響は小さかった。しかし、終局剥離荷重については、併用接合が接着接合の1.5~2.5倍となった。また、接着接合では、終局剥離荷重のばらつきが大きいが、併用接合では、ばらつきが改善される傾向が見られた。これより、併用接合では、接着接合と比較して、初期剥離荷重の変化はないが、ボルトが初期剥離後の剥離の進行を抑制し、終局剥離の耐力向上に効果があることが明らかとなった。

併用接合は、終局剥離後に、ボルトの支圧力による母板の破壊が生じ、最終的な破壊としてボルト接合同様な破壊形式が生じた。この終局破壊時の荷重は、併用接合がボルト接合と比較して、平均で20%大きくなった。これは接着剥離面の摩擦抵抗がボルト接合の摩擦力より大きくなったことが一因として考えられる。

(3) 引抜成形材を用いたボルト・接着併用接合部耐力実験

引抜成形 GFRP 部材を用い、M16 の FRP ボルトを使用したボルト・接着併用接合二面せん断実験を行った。引抜成形材は軸方向に多くの繊維が配向されているため、ボルト孔に支圧力が作用した際に繊維に沿ったせん断破壊により、接合部の端抜けが生じる。そのため、接合部のせん断耐力向上を目指し、接合部領域に Double Bias Mat (成形後の板厚約1mm) を挿入した接合部実験を実施した。供試体は、図-6に示すように、縁端距離を3D (ボルト径 $D=16\text{mm}$ の3倍) とし、ボルト孔を中心に軸方向に6D長さでDBMシートを接着した。

その結果、DBMシートによる補強のない供試体はすべて端抜けが生じたのに対し、DBMシートを接着した供試体は、端抜けが抑えられ、すべてボルトの破断で終局を迎えた。DBMシートを接着するだけで、最大荷重が約70%上昇しており、極めて薄肉のDBMシートを挿入することで、引抜成形 GFRP のボルト接着接合部におけるせん断抜けを抑制できることを明らかにした。

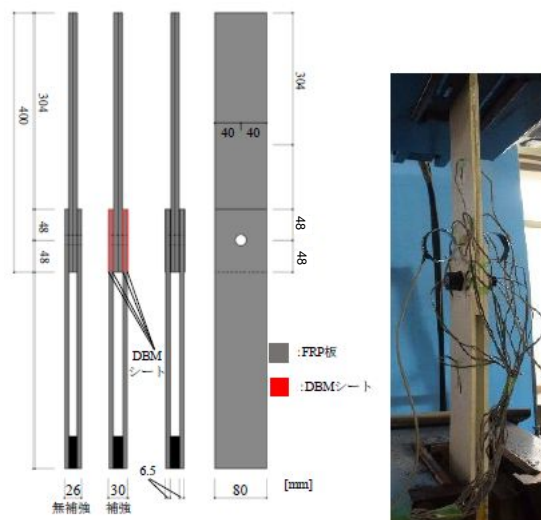


図-6 供試体寸法と実験の様子

(4) 数値解析によるボルト接合部挙動の再現

FRP 材料のボルト接合部を数値解析で再現するためには、ボルトの支圧力による FRP の支圧破壊を考慮できる損傷進展解析方法の開発が必要である。本研究では、既往の文献を参照しながら、FRP の損傷を考慮できる材料構成則を汎用有限要素プログラム Abaqus に組み込んだ。また、損傷後の剛性低下を漸減型とし、限界エネルギー解放率を導入して、非線形の応力-ひずみ関係を定義した。

図-7に、GFRPを3本のステンレスボルトにより接合したボルト接合部に対して、損傷進展解析により得られた荷重-変位関係を実験結果とともに示す。支圧損傷開始後も剛性は低下するものの荷重は上昇し、最終的に最小断面で引張破壊が生じるまで解析で再現することができた。

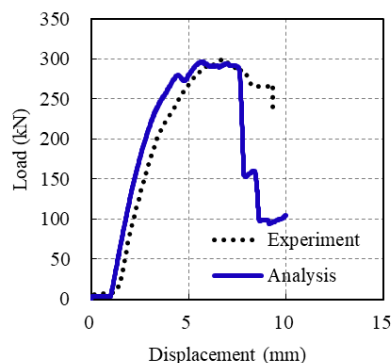


図-7 解析結果の例

(5) まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

FRP ボルトは、鋼製ボルトに比べて、剛性・強度ともに低いが、ボルトの破壊を防ぐことができれば、鋼製ボルトを用いた FRP の接合部で用いられる設計方法を適用することが可能である。

ボルト・接着併用接合を適用することにより、ボルト接合に比べて、接合部の剛性を高くすることが可能となり、また、ボルト孔のクリアランスに起因するすべりの抑制が可能となる。

ボルト・接着併用接合の破壊プロセスは、初期剥離、終局剥離、ボルト支圧による終局破壊となる。初期剥離荷重はボルトの有無によって変化しないが、ボルト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。また、併用接合では、接着剤が完全にはく離した後でも、ボルトによる支圧接合で荷重に抵抗するため、接着剤の剥

離後に接合部が完全に破壊するモードを抑制することができる。
FRP ボルト・接着併用接合を用いた場合、使用限界状態を接着接合の初期剥離とし、終局限界状態を接着接合の終局剥離破壊とする設計思想が提案できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

北村勇斗, 北根安雄: GFRP の繊維方向の引張および圧縮破壊モードにおける限界エネルギー解放率に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 5, 複合構造論文集, 第6巻, pp. 11_36-11_43, 2009, DOI: 10.2208/jscejsee.75.11_36 (査読有)。

〔学会発表〕(計7件)

Phan Viet Nhut, Yukihiro Matsumoto, Kunitaro Hashimoto, and Yasuo Kitane: Mechanical behavior of connection of pultruded glass fiber reinforced polymer plates using FRP bolts and adhesive, Proc. of International Conference of Global Network for Innovative Technology (IGNITE) and AWAM International Conference in Civil Engineering (AICCE) 2017, August 8-10, 2017, Penang, Malaysia.

王超, 北根安雄, 松本幸大, 橋本国太郎: FRP ボルトによる FRP 部材の支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究, 第72回土木学会次学術講演会講演概要集, 土木学会, 九州大学, Paper No. CS5-019, pp. 37-38, 2017.

Phan Viet Nhut, Yukihiro MATSUMOTO, Yasuo KITANE, Kunitaro HASHIMOTO: Fundamental study on Joint Strength of FRP plates using FRP bolt and Adhesive, 第72回土木学会次学術講演会講演概要集, 土木学会, 九州大学, Paper No. CS2-043, pp. 85-86, 2017.

高嶋秀樹, Phan Viet Nhut, 三枝玄希, 北根安雄, 橋本国太郎, 松本幸大: 多軸基材により補強した引抜成形 GFRP 材のボルト接合部の支圧強度, 第7回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 23-28, 2018.

北村勇斗, 北根安雄: GFRP の繊維方向の引張および圧縮破壊モードにおける限界エネルギー解放率に関する実験的研究, 第7回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 37-44, 2018.

高嶋秀樹, Viet Nhut Phan, 松本幸大, 北根安雄, 橋本国太郎: 多軸基材により補強した引抜成形 GFRP 材のボルト接合強度に関する基礎検討, 2018年度日本建築学会東海支部研究集会, February 18-19, 2019, 大同大学, pp.197-200.

王超, 北根安雄, 松本幸大, 橋本国太郎: FRP ボルトによる FRP 部材の多列配置の支圧ボルト接合部の耐力評価に関する研究, 平成30年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, March 1, 2019, 愛知工業大学, Paper No. I-005, pp. 9-10.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 松本幸大

ローマ字氏名: MATSUMOTO, Yukihiro

所属研究機関名: 豊橋技術科学大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 00435447

研究分担者氏名: 橋本国太郎

ローマ字氏名: HASHIMOTO, Kunitaro

所属研究機関名: 神戸大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 40467452

(2)研究協力者

なし

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。