

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820229

研究課題名(和文)超軽量新材料を用いた合成構造における機械接合部の力学特性と経年特性の解明

研究課題名(英文) Mechanical and Aging Characteristics of Joints in Composite Structure using Lightweight Materials

研究代表者

松本 幸大 (Matsumoto, Yukihiro)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00435447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では以下のことを明らかとした。

[1] FRP材に対してボルト締めを行った場合、ボルト軸力の経時変化は対数時間軸に対して概ね線形に低下する。[2]ボルト直下のFRP材には局所的に高い圧縮力が作用するが、鋼製大型座金を配することでボルト軸力低下が低減できる。[3] ボルト軸力の経時変化の推定式を提案・検証し実験とよい対応を示す。以上より、提案したボルト軸力低下性状の予測式と滑り係数により、ボルト摩擦接合設計が可能であることを示した。また、[4]小径のボルトを用いた支圧接合によって高い接合部剛性と強度が得られることを明らかとし、FRP合成構造の新たな接合法として期待できることを明らかとした。

研究成果の概要(英文)：In this research, the following results were obtained.

[1] In case of FRP and steel joints using high strength bolts, tensile load of bolt decreases approximately linearly according to the logarithmic time history. [2] Severe compressive stress acts on the FRP material around the bolt, but the stress can be reduced by using large steel washer. [3] The present estimation method for aging change of bolt tension can be apply for evaluation the bolt tension for various diameter of bolt, initial bolt tension as well as diameter of washer. Based on these results, it was shown that frictional joint design is possible by the proposed methods. [4] Moreover, it is clarified that high joint rigidity and strength can be obtained using bolts of small diameter, and it is expected that the joint method relates a new joining technique of FRP composite structures.

研究分野：合成構造

キーワード：合成構造 ハイブリッド構造 繊維強化樹脂

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱硬化樹脂をガラス繊維や炭素繊維で強化した繊維補強樹脂（Fiber Reinforced Polymer：以下、FRP）材は軽量で、軟鋼と同等、またはそれ以上の高い強度を有し、耐食性も優れた材料として、宇宙・航空・自動車分野では応用が進んでいる材料である。こうした特性を建築構造材料として活かすことで、軽量性を活かして一括架設を行うなどの施工の合理化や基礎構造の軽減、自然災害後の早急な応急建設物の建設などに繋がると考えられる。こうした新たな建設構造物の選択肢が広がることは、運搬・施工時の重機使用の削減に繋がり、また、耐久性にも優れることから長寿命化による環境負荷の低減が期待できる。こうした背景から、本研究ではFRP材料を建築構造に応用するための基礎検討として、図1に示すようなFRP部材と鋼製ガセットプレートとを用いて接合する合成構造を提案し、その力学挙動を解明する。

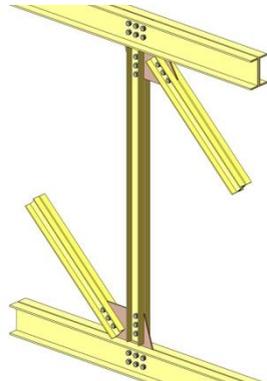


図1 想定するFRP合成構造

(2) 近年、歩道橋や橋梁検査路等を対象にFRP材料の応用が報告されており、土木学会では設計指針（案）の刊行も進んでいる。しかし、FRP材料を建築構造要素として応用した際の力学特性や破壊メカニズム、接合部周辺の経年変化の状況は十分に明らかとなっていない。特に、骨組み構造部材に応用する上で必ず発生する部材同士の接合部の力学特性や、ボルト締め付け部および締め付けによる摩擦抵抗力、ボルト張力のリラクゼーションの定量的評価については詳細な研究成果の蓄積や設計法の構築が必要である。

2. 研究の目的

(1) FRP材と鋼ガセットプレートとを用いた接合部に対して座径径・厚さを変数とした長期ボルト軸力モニタリングを行い、張力低下を定量的に評価する。
 (2) 材料間の接触面を考慮した三次元有限要素解析を行い、接合部周辺の応力性状を把握し、解析より得られる応力と実験により得られたボルト張力から、張力の低下傾向と応力との値を比較し、応力緩和の定量的評価手法を構築する。
 (3) FRP材料の機械接合に適した接合方法の提案と既存FRP構造の経年調査を通して、FRP

構造設計法の構築に繋げる。

3. 研究の方法

(1) 図2に示すような、ボルト内に歪ゲージを直接埋め込んだボルトを用いることで、FRP材と鋼ガセットプレートとを用いた接合部のボルト軸力を精密に計測評価し、その経時変化特性を定量的に評価する。



図2 ボルト軸力の計測方法

(2) 図3に示すようなFRP材料の異方性を考慮した三次元有限要素解析を行い、接合部周辺の応力性状を把握するとともに、応力緩和の定量的評価手法を式(1)でモデル化する。

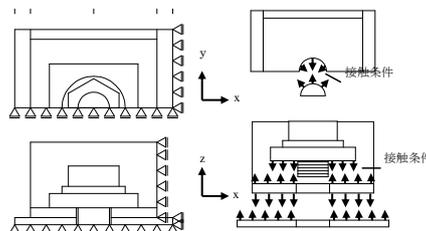


図3 接合部の有限要素解析モデル

$$T = T_0 (1 - A \cdot \sigma_0^B \cdot t^C) \quad (1)$$

(3) FRP材料の機械接合として、航空機分野等で採用されている小径ボルト（図4）の接合部力学特性や接合部耐久性分析、また、既存FRP構造（図5）の経年調査を行い、FRP構造設計法の研究成果の蓄積を行う。



図4 小径ボルトによる接合例

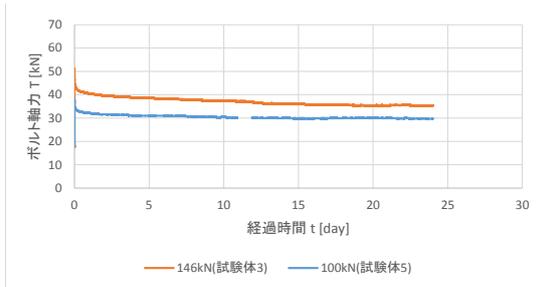


(a) FRP 渡橋 (b) FRP 渡り廊下

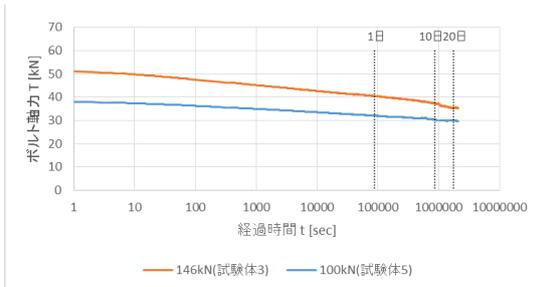
図5 既存FRP構造物の例

4. 研究成果

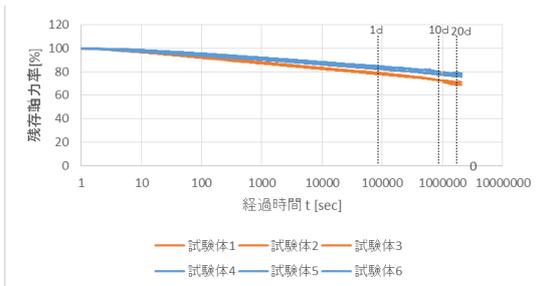
(1) 図5にF10T, M12 ボルトにより GFRP 溝形材 (板厚 6.3mm) 2 枚とブラスト処理された鋼製ガセットプレート (PL9) を接合した際のボルト軸力の経時変化を示す。本研究課題の発端となった既往研究 (科研費 23760522) において M20 ボルトに関してボルト軸力低下性状を分析したが、その結果と同様、対数時間軸に対して概ね線形の特性格を得ることができ、長期間に亘るボルト軸力の定量評価が可能であることが確かめられた。



(a) ボルト軸力の時刻歴変化



(b) ボルト軸力の時刻歴変化 (対数軸)



(c) 残存軸力率の時刻歴変化 (対数軸)

図5 ボルト軸力の経時変化

(2) 図6(a)に示すように、有限要素解析よりボルト直下のFRP材にはボルトの締め付け力により高い圧縮力が作用しており、その分布はFRP材の剪断弾性係数が小さいことにより極めて局所的であることが分かる。これを改善するため、(b)では4.5mm厚56x56mmの鋼製大型座金を配した場合であり、(c)は9mm厚56x56mmの鋼製大型座金を配した場合である。FRP材の圧縮応力度は極めて顕著であり、この効果によりボルト軸力低下が低減できると考えられる。

これを踏まえ、図7に示すような座金部分の応力伝達区間を仮定し、FRP材表面の圧縮応力度を算出することを提案・検証した。図7

より、ボルト軸力 T_0 に対するFRP材の圧縮応力度は式(2)で表すことができる。ここで、ここで t_w は座金の総厚さ、 d_H はボルト孔径である。また、JIS B 1186を参照すると、F10T, M20の場合、 d_w は29mm、高力ボルトセットのみの場合の t_w は4.5mmとなる。

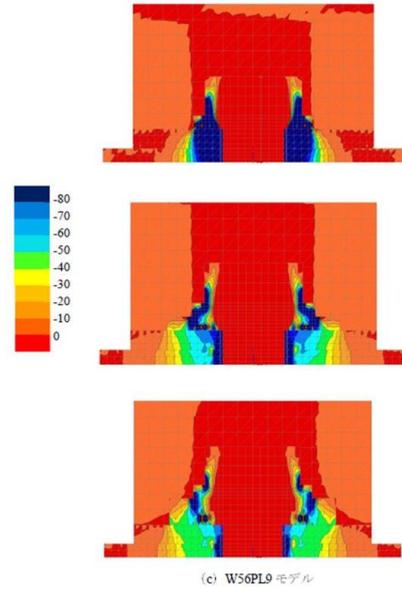


図6 ボルト接合部周辺の応力分布

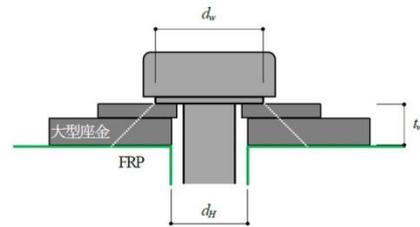
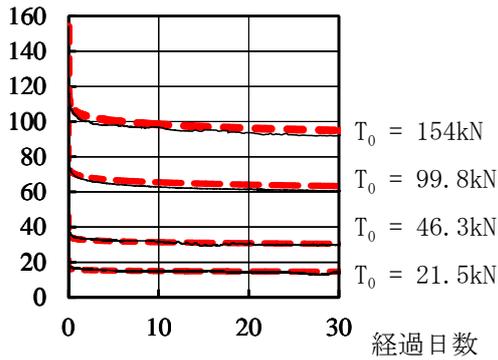


図7 ボルト軸力の影響範囲

$$\sigma_0 = T_0 / \left\{ \frac{\pi}{4} [(d_w + 2t_w)^2 - d_H^2] \right\} \quad (2)$$

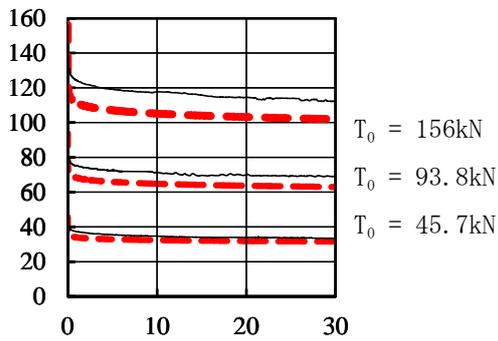
これを踏まえ、式(1)の各変数を実験より得られた定数として、 $C_1=0.1, C_2=0.1, C_3=0.055$ とおくと、図8に示すようにボルト軸力の経時変化が精度よく捉えられていると言える。結果として、F10T M12, M16, M20 に対して導入軸力、座金径をパラメータとして実験・予測式の精度を検討したところ、前述の定数を用いることで、-15%~+5%の範囲でボルト軸力低下の性状を予測できることを明らかとした。また、長期屋内暴露後の接合部は、FRP材がブラスト処理された鋼板面の凹凸に食い込み、すべり係数が鋼構造で基準とされている0.45を上回る0.5~0.6程度まで期待できることが分かった。以上より、提案したボルト軸力低下性状の予測式と滑り係数により、ボルト摩擦接合設計が可能であることを示した。

ボルト軸力 kN



(a) F10T M20, 標準座金(40mm)の場合

ボルト軸力 kN

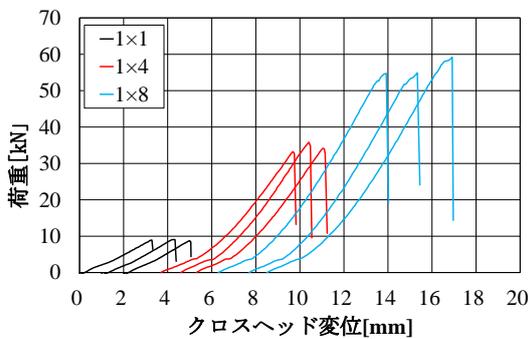


(b) F10T M20, 大型座金(56mm, PL9)の場合

—: 推定, - -: 実験

図8 ボルト軸力の経時変化と推定式

(3) FRP 材を機械接合する場合, 最も懸念されることはボルト孔により FRP 内部の強化繊維が切断され, 接合部破壊の起点となることである。この観点から, 図4に示すような小径ボルトによる機械接合法の検討を行った。これらからは, ボルトとボルト孔とのクリアランスが最小限に抑えられることで図9, 表1に示すように初期滑り変形が生じない高い初期剛性が発揮できること, また支圧強度についても大口径ボルトと同等以上の強度を発揮できることが明らかとなった。



—: 1本, - -: 4本, - -: 8本

図9 小径ボルトによる接合部引張試験結果

表1 小径ボルトの支圧強度

本数	平均耐力 kN	支圧強度 MPa
1x1	8.60	243
1x4	34.42	241
1x8	56.30	198

また長期性状として懸念される繰返しに対して, 静的耐力の50%の荷重レベルにて, 10^3 回の荷重除荷載荷を行った後, 準静的載荷を行った結果, 耐力に有意な差は現れず, 短期荷重レベルとして静的耐力の50%程度を採用することで繰返し荷重下においても応用が可能なFRP合成構造接合部となることが示唆された。設計法については, 多数ボルトを配置した際に生ずる接合部軸方向の応力分布を二面接着接合応力分布式よりモデル化した表2に示す荷重分担割合により設計できることを明らかとした。以上より, 提案した小径ボルトにおける支圧接合の荷重分担率と支圧強度より, 接合設計が可能であることを示した。

表2 複数ボルトの分担率
(母材と接合材の剛性比が1:2の場合)

4本	#1	#2	#3	#4
	0.27	0.25	0.24	0.24
8本	#1	#2	#3	#4
	0.18	0.15	0.12	0.11
	#5	#6	#7	#8
	0.11	0.10	0.11	0.12

既往のFRP構造物の経年調査では, 図5(a)に示すFRP渡橋(架設後約5年)および(b)の渡り廊下(架設後約10年)の調査を行った。(a)は海上に位置する極めて厳しい環境条件であることから, 図10に示すように鋼製ボルトの腐食が著しく, 同様な環境の際は本研究で提案する合成構造接合部の耐力変化を詳細に分析する必要が示唆された。図10(b)に示す渡り廊下についてはFRP材の紫外線による黄変を除いては顕著な変化は見られず, 人力加振による加速度計測を通じた非破壊計測においても1次固有周期3.0Hzおよび近接する3.3Hzの2次固有周期に有意な変化が見られなかったことから, FRP構造物の耐久性を示す貴重な資料が得られた(図11)。なお, 本経年調査は今後も定期的に行い, FRP構造物の耐久性評価のための研究資料を蓄積する予定である。

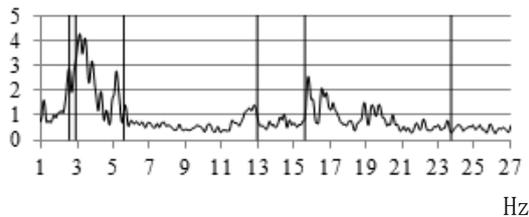


(a) FRP 渡橋の状況 (2016.12)

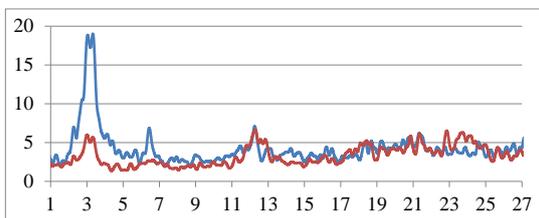


(b) FRP 渡り廊下の状況 (2016. 10)

図 10 FRP 構造物の経年状況



(a) 2010 年の振動計測結果 FFT



(b) 2016 年の振動計測結果 FFT

図 11 FRP 渡り廊下の固有振動数変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Yuya Inoue, Nguyen Ngoc Duong, Chito Satake and Yukihiro Matsumoto, Mechanical Characteristics of Connection for GFRP Plates using Tapping Screws, Proceedings of IGNITE-AICCE' 17, 2017. 8
- ② 中森啓太, 松本幸大: 鋼/FRP ボルト接合部におけるボルト軸力低下に関する考察, 強化プラスチック協会 強化プラスチック, 第 60 巻第 5 号, pp. 178-180, 2014. 5

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 井上侑也, 佐竹ちとう, グエン ゴック ユン, 松本幸大: ドリルビス接合された GFRP 板材の力学特性に関する研究, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集 (CD-ROM), pp. 60-67, 2016. 11
- ② 井上侑也, 松本幸大, 三枝玄希, 他: GFRP 板材のドリルビス接合強度に関する実験的研究, 第 11 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集 (CD-ROM), 2015. 11
- ③ 松本幸大: 引抜成形 GFRP ボルト接合部におけるボルト軸力低下に関する考察, 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集 (CD-ROM), pp. 140-145, 2014. 11

〔その他〕

ホームページ等

<http://sel.ace.tut.ac.jp/y-matsum>

<http://researchmap.jp/read0145091/>

<https://www.tut.ac.jp/university/faculty/ace/656.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 幸大 (MATSUMOTO, Yukihiro)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00435447