

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 3 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760522

研究課題名(和文) 持続型社会に適した超軽量合成構造におけるボルト接合部の力学特性解明

研究課題名(英文) Mechanical characteristics of the bolted joint in the ultra-lightweight hybrid structure for sustainable society

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)・助教

研究者番号：00435447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、繊維強化樹脂(FRP)形材と鋼板を用いたハイブリッド構造物に対して、長期の経過観察を踏まえた構造実験と数値解析を通して、そのボルト摩擦接合部の耐力と設計用資料を蓄積することを目的としている。接合部のボルトに張力計測用ゲージを埋め込み、ボルト張力を軽鎖臆した結果から、長期の軸力変化特性とその低減方法・推定方法を明らかとした。また接合部材の引張試験より、滑り係数や耐力を明らかとし、鋼板に摩擦面処理(ブラスト処理)を施すことで鋼構造で基準とされている摩擦係数0.45を確保できることを明らかとした。さらにそれらの有限要素解析を行い実験シミュレーションを行った。

研究成果の概要(英文)：This study aims to make clear the mechanical characteristics of the bolted joint in the ultra-lightweight hybrid structure by using FRP member for sustainable structures. In this research, the variation of the bolt tension was discussed through one-month monitoring for the strains of FRP members. Also, the non-linear failure behavior of bolted frictional joints in various bolt tension was experimentally made clear. Then, the large deflection behavior, the effects of the relaxation of bolt tension and the associated frictional coefficients were discussed in detail. It was finally suggested that the FRP frictional coefficient of the bolted joints is equal to or higher than 0.45 even the occurrence of the relaxation of bolt tension. Furthermore, the FEA simulations were carried out and it was confirmed that the FEA results are corresponding to the experimental results.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：FRP ハイブリッド構造 空間骨組構造

様式 C-19、F-19、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱硬化樹脂をガラス繊維やカーボン繊維で強化した繊維補強樹脂 (Fiber Reinforced Polymer: 以下, FRP) 材は軽量で、鋼以上の高い強度を有し、耐食性も優れた材料として、航空分野では既の実績があるが、建築構造物においても適用が期待されている。FRP 材を用いることで、構造体の軽量化や耐震性能の向上、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。

(2) 近年、大スパン屋根構造や橋梁等の構造材重量が構造物の重量の多くを占める構造物を中心に数例の FRP 材の適用が報告されている。しかしながら、FRP 材を建築構造物として応用した際の力学特性や破壊メカニズム、経年変化の状況は十分に明らかとなっていない。特に、建築構造物に適用する上で必ず発生する部材同士の接合部の力学特性、また、樹脂の粘性によりボルト締め付け部で生じる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が必要である。

2. 研究の目的

(1) FRP 材のボルト接合部について、高い張力で締め付ける摩擦接合部周辺では、樹脂の粘性によるリラクゼーションが生じることから、その長期性状を明らかとする。

(2) ボルト接合部を有する FRP 部材について、樹脂の粘性によるリラクゼーションに伴う耐力・破壊性状の変化や期待できる摩擦耐力を明らかとする。

(3) ボルト接合部を有する FRP 部材について、ボルト張力や摩擦を考慮した接合部の数値解析を通して接合部の力学特性を明らかとする。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に示すような高力ボルト内に直接埋め込んで、その張力を計測可能な埋込ゲージを用いて、ボルト張力の長期減少値を計測する。

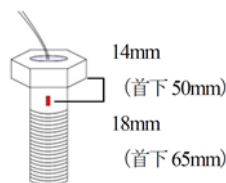


図 1 ボルト埋め込みゲージの概要

(2) 図 2, 3 に示すようなボルトの締め付トルクおよび座金の種類を数種類設定し、ボルト張力の減少を低減する方法を検討する。

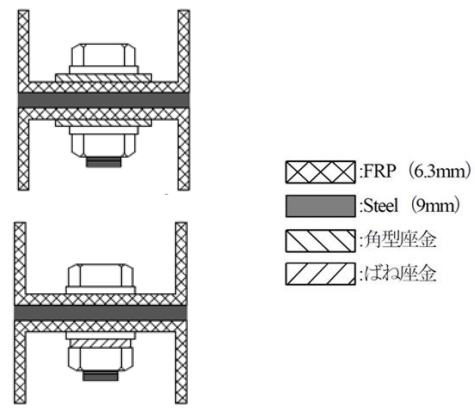
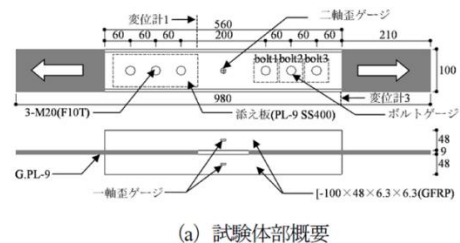


図 2 各種座金を用いた試験体の概要

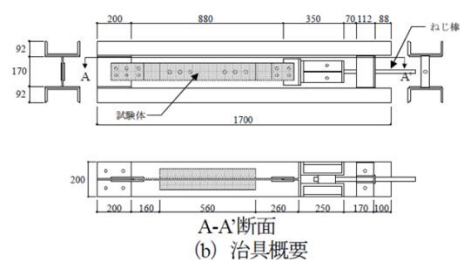


図 3 ボルト張力計測の様子

(3) 図 4 に示すようなボルト接合部を有する FRP 部材を製作し、長期軸力を保持させた状態で長期間養生し、その後、引張载荷試験を行うことで耐力・破壊性状・すべり係数を分析する。



(a) 試験体部概要



(b) 治具概要

図 4 FRP 部材の長期試験の概要

(4) 図 5 に示すような有限要素解析モデルを構築し、実験との対応を確認する。

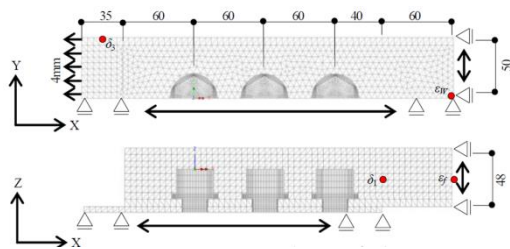


図5 有限要素解析モデルの概要

#### 4. 研究成果

(1) 約1ヶ月のボルト締付後の張力計測を通して、図6に示すような特性を得た。グラフは縦軸を残存軸力率、横軸は経過時間 (s) を対数表示としており、試験体名のTの後の数値はボルトの締付トルク [N.m] を意味する。試験体は M20 ボルトのものとし、T60S はばね座金、その他の試験体は角型座金 (PL4.5) を用いた試験体である。全ての試験体において、経過時間を対数とすることで線形的に残存軸力率が低下していくことがわかる。これより、その後もボルト軸力が低下していく可能性があると考えられるが、本実験では計測期間を1ヵ月としているが、線形的に変化することからこの結果を用いてさらに長期のボルト軸力を予測することが可能である。

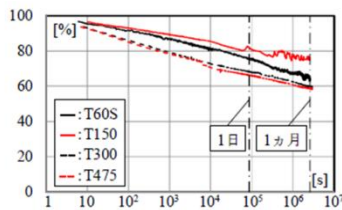


図6 ボルト軸力の低下傾向 (M20)

(2) 座金の種類を試験変数とした試験について、図7に示すような特性を得た。グラフは縦軸を1ヶ月経過後の残存軸力率、横軸はボルト締付トルクとしている。全ての試験体において、角型座金を用いることで約10%改善されていることがわかる。これは、FRPと鋼板の接する面積が大きくなることで応力が平面的に分散したためであると考えられる。さらに、座金の厚さを大きくすることで更に5%前後改善されていることがわかる。これは、厚さが増すことで応力がより広範囲に分散したためである。以上より、摩擦耐力に重要なボルト軸力の減少を低減させる手法が明らかとなった。

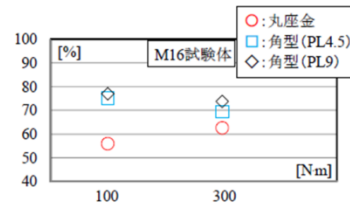


図7 各種座金を採用した際の残存軸力率

(3) ボルトの初期締付トルクを試験変数とした試験について、図8に示すような特性を得た。グラフは縦軸を1ヶ月経過後の残存軸力率、横軸はボルト締付トルクとしている。本締めトルクの大きな試験体ほど残存軸力率が低下していることがわかる。これは、高張力で締付けることで FRP のクリープ変形が大きくなったためであると考えられる。

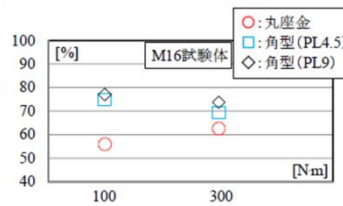
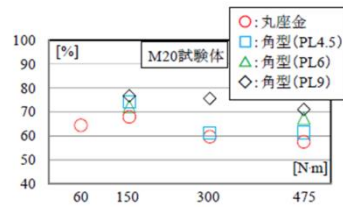


図8 締付トルクを変更した際の残存軸力率

(4) 図4に示した接合部を有する FRP 部材について、長期軸力 (T; 引張力, C; 圧縮力) で後の数値は保持軸力 [kN] を保持させた状態で長期間養生した後、図9のように引張試験を行い、力学性状を分析した。図10に荷重-変位関係を示す。トルク値が大きくなるにつれてすべり荷重、最大荷重が大きくなっていることがわかる。また、試験体作成後に養生せずに载荷試験を行ったイニシャル試験の結果と比較すると同等の耐力もしくは耐力が向上していることがわかった。これは、養生したことで FRP が鋼板の凹凸に徐々に食い込み、接合部が一体化されたためであると考えられる。この結果より、ボルト張力が低下しても接合部の耐力はボルト軸力の低下前と同等もしくはそれ以上となることがわかる。図11にすべり荷重とボルト軸力、すべり係数を示す。縦軸をすべり荷重、横軸をすべり荷重時のボルト軸力とし、グラフ中の斜線をすべり係数としている。養生を行わない試験体ではすべり係数が0.5程度となっていたが、養生することで T60S, T150 試験体ではすべり係数が0.6程度まで向上していることがわかる。以上より、FRP材とブラスト処理された鋼ガセットプレートとの摩擦接

合において、鋼構造で基準となる 0.45 を上回ることを明らかとした。



図 9 引張载荷試験の様子

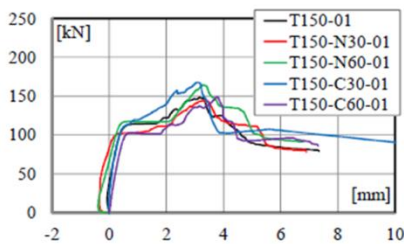
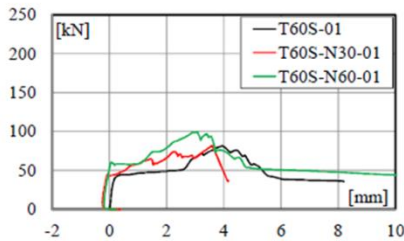


図 10 FRP ボルト接合部材の荷重-変位関係

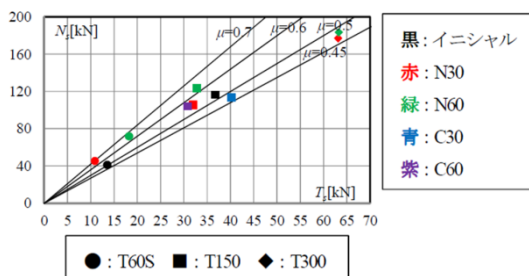


図 11 実験から得られたすべり係数

(5) 図 5 に示した有限要素解析モデルを用いて、ボルト張力や摩擦を考慮した接合部の数値解析を通して接合部の引張载荷時の挙動を解析によって確認し、パラメトリックスタディに発展させるため、シミュレーション解析を行った。図 12 に実験と解析から得られた荷重-変位関係を比較して示す。図 12 より、試験体がすべるまでの挙動は実験と良い対応を示している。さらに、摩擦耐力についても、T60S-N30-01 では実験値 44kN、解析値 42kN、T60S-N60-01 では実験値 60kN、解析値

53kN となり、本実験で定めた摩擦耐力の妥当性を示すことができた。T60S-N30-01 に着目すると、実験では、すべり後に荷重は増加している。これは試験体の不整によりクリアランスが 1mm 以下の状態で長期間引張力を与えた影響により、既に支圧状態であったと考えられる。解析結果では、摩擦耐力を迎えるとクリアランス 1mm のすべりが生じた後、支圧状態に至った。さらに、実験では支圧状態で荷重が増加し変形が 1.6mm 付近で、FRP に損傷が生じ 1 度荷重が低下している。一方、本解析では、FRP に破壊の条件を考慮しておらず直交異方性弾性材料として扱っているため、さらに座金面がすべり 1mm の変形が生じ、FRP 側の円孔と接触した。また、摩擦耐力は解析結果がやや低い値を示している。これは、解析では荷重を作用させた瞬間にボルト軸力が 2kN 程度減少しているのに対して、実験では軸力を維持し続けていることが要因の 1 つとして考えられる。図 13 は図 5 に示した節点の歪  $\epsilon_w$ 、 $\epsilon_f$  における荷重歪関係である。解析結果は実験結果と良い対応を示していることから、FRP に考慮した直交異方性の材料定数の妥当性が確認されるとともに、実験を精度よくシミュレーション可能な解析モデルを構築できた。

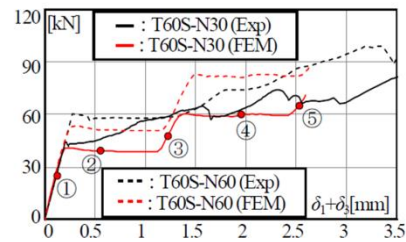


図 12 FRP ボルト接合部材の荷重-変位関係

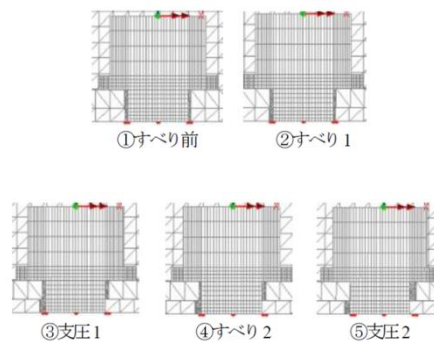


図 13 各荷重レベルでの接合部挙動



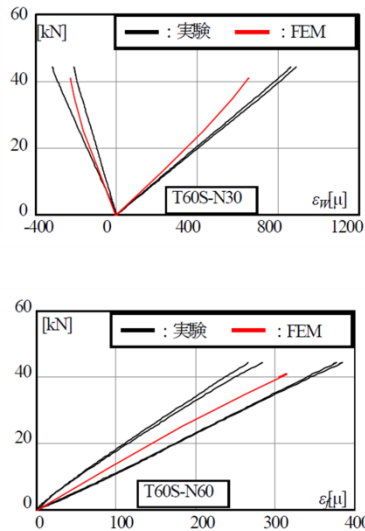


図 13 FRP ボルト接合部材の荷重-歪関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

- ① 松本幸大, 中森啓太, 山田聖志: 引抜成形FRP部材を用いた摩擦接合部の長期性状に関する考察, 日本建築学会 構造工学論文集, Vol.59B, pp.93-99, 2013.3
- ② Yukihiro Matsumoto, Seishi Yamada and Iwao Komiya: Nonlinear Failure Behavior and Bearing Strength of Bolted Joints in Fiber Reinforced Polymer Plates, Proceeding of The SAMPE Tech 2012 (SAMPE Tech 2012) (North Charleston, USA), 2012.10

〔学会発表〕(計 7件)

- ① 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, 58th FRP CON-EX 2013 講演会 講演要旨集, 2013.10
- ② 中森啓太, 川北拓未, 古賀惟彬, 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基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1505-1506, 2013.8
- ③ 川北拓未, 松本幸大: FRP 材の支圧強度と寸法効果に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1509-1510, 2013.8
- ④ 中森啓太, 松本幸大, 山田聖志, 川北拓未: 鋼/FRP 合成構造のボルト接合部に関する長期観察 その1: FRP のクリープ特性とボルト軸力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1487-1488, 2012.9
- ⑤ 松本幸大, 中森啓太, 山田聖志, 川北拓未: 鋼/FRP 合成構造のボルト接合部に関する長期観察 その2: ボルト接合部の引張特性の変化, 日本建築学会大会

学術講演梗概集, pp.1489-1490, 2012.9

- ⑥ 川北拓未, 松本幸大, 山田聖志, 中森啓太, 小宮巖: 機械接合における FRP 母材の支圧耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1483-1484, 2012.9
- ⑦ 中森啓太, 松本幸大, 松野一成, 北農幸生, 山田聖志: 鋼/FRP 合成構造ボルト接合部の長期性状に関する基礎的検討, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第35巻(CD-ROM), 2012.3

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tut.ac.jp/teach/main.php?mode=detail&article=656>

## 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・助教

研究者番号: 00435447