

令和元年5月31日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06469

研究課題名(和文) 鋼桁端部をFRP桁とした高耐久性性能を有する鋼・FRP混合桁の開発

研究課題名(英文) Development of high durability steel-FRP mixed girder replacing steel girder end to FRP girder

研究代表者

橋本 国太郎 (HASHIMOTO, Kunitaro)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40467452

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)：本研究では、鋼桁端部を高強度・高耐久性を有するFRP桁に置換した鋼FRP混合桁の開発を目的に、鋼とFRPの接合方法や混合桁としたときのスパン割の検討、また、その終局強度を含めた力学的挙動の検討を行った。

接合には接着接合より信頼性の高い高力ボルト摩擦接合を使用し、FRP材料や表面処理方法の検討を行った。これによりFRP側を適切な粗さとすれば、鋼とFRPの間には0.45以上のすべり係数が得られることが分かった。次にFRPと鋼のスパン割に関しては、解析的な検討を行い、経済的な観点も取り入れて最適スパンを見出した。最後に高力ボルト摩擦接合された鋼FRP混合桁の載荷実験を行いその力学的挙動を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、鋼桁の桁端部を高強度・高耐久性を有するFRPに置き換えた鋼・FRP混合桁の開発を行うために、接合部の要素実験、混合桁の載荷実験やFE解析を実施した。その結果、FRPにガラス繊維を用いたGFRPを用い、高力ボルト摩擦接合で鋼桁と接合する混合桁を開発した。

FRPと鋼の接合を考えるうえで、高力ボルト摩擦接合を用いることができるという可能性が示されたことや他の部材への応用が可能であるため学術的意義が大きいと考えられる。また開発された桁を種々の土木構造物に用いることで、構造物の耐久性性能の向上がはかれ、その長寿命化に大きく貢献すると考えられ社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：To develop a steel-FRP mixed girder replacing steel girder ends to FRP girders with high strength and high durability, this study researched connection method between steel material and FRP material, optimum span length of the FRP girder and the steel girder as the mixed girder, and mechanical behavior contained ultimate strength of the mixed girder. High strength bolted joints which have higher reliability than adhesion joints were used to connection of the mixed girdes, and FRP material and it's surface treatment method were studied. From the above research, slip coefficient obtained more than 0.45 by processing to appropriate roughness on connection surface of FRP material. Secondary, analytical study was carried out on the steel-FRP mixed girder, then optimum span length was found by adapting view point of economy. Finally, mechanical behavior of the steel-FRP mixed girder was found by carrying out the loading test of the girder connected by the high strength bolts.

研究分野：複合構造

キーワード：鋼 FRP 混合桁 高力ボルト摩擦接合

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

1. 研究開始当初の背景

(1) FRP 材料の土木構造物への適用の広がり

現在、FRP で製作された歩道橋は日本では数橋程度存在し、また橋梁用の検査路や合成床版への適用も実現している。また、図-1 に示すように、海外では道路橋の一部もしくはすべての構造部材に FRP が使用されているなど、日本に比べ土木構造物へ FRP 材料が積極的に利用されているものの、日本では FRP 材料の橋梁主桁構造への利用はいまだに実現していない。

(2) 大規模修繕における鋼桁端部の取替え方法の検討

一方、橋梁の劣化などにより、都市高速道路では、現在、大規模修繕・更新事業として劣化した橋梁の架け替えや部材の取替えなどの検討が始められ、実際の工事も始まりつつある。鋼橋の場合、部材を部分的に取替えやすいことから、図-2 に示すような腐食した桁端部を丸ごと取替える工法が検討されている。ただし、腐食した部位では、腐食環境が厳しいため、鋼材による取替えは長期的に見た場合、腐食劣化が再発する可能性が高く、恒久的な対策ではないと言える。

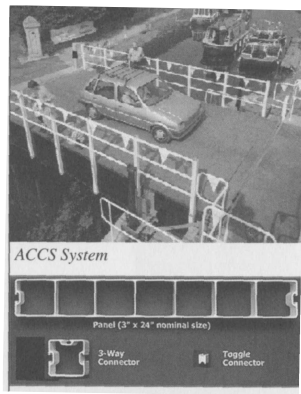


図-1 FRP 適用事例<sup>1)</sup>

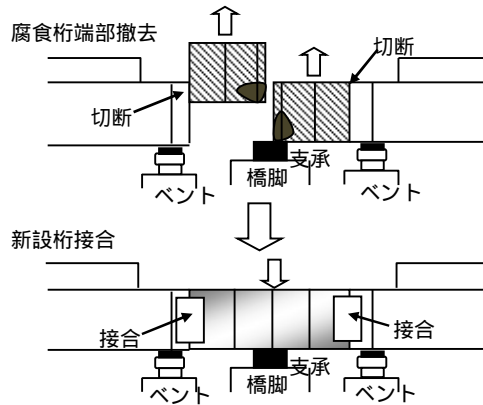


図-2 桁端部の取替え工法例

<参考文献>

1) Thomas Keller: Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, ASEC, 2003

2. 研究の目的

申請者は、これまで FRP 部材同士の接合法の検討や FRP はりのたわみやすさを改善するために、鋼板を積層し合成構造化した鋼・FRP 合成はりの開発<sup>2)</sup>、さらには腐食した桁端部を補修するために図-3 に示すような CFRP 部材を用いた鋼桁端部の新しい補修方法に関する検討<sup>3)</sup>を行ってきた。それらの研究および上述した 2 つの学術的な背景から、本研究の着想を得ており、図-4 に示すような、桁端部のみを FRP 桁とする鋼・FRP 混合桁を開発することを大きな目的としている。

このように桁端部のみ FRP 桁とすることで、腐食に対する耐久性が飛躍的に向上すること、また、高弾性 CFRP では問題にならないが、GFRP などの弾性係数が小さい材料を用いることで桁全体のたわみが大きくなる問題があるが、FRP を部分的に使用し混合構造とすることで桁構造全体のたわみ増加を抑えることができるなどのメリットがある。なお、本研究ではせん断力が卓越する桁端部に FRP を使用することから、繊維方向が 2 方向に配置されたロービングクロ

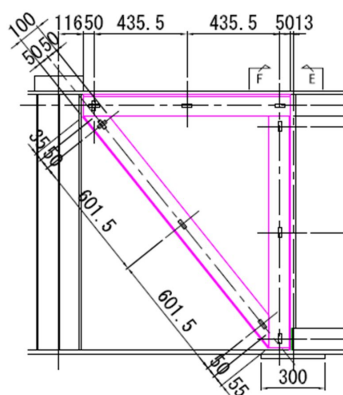


図-3 桁端補修研究例<sup>3)</sup>

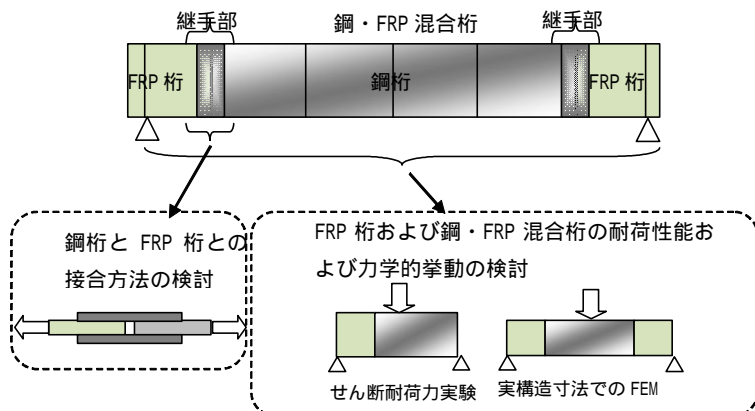


図-4 鋼・FRP 混合桁の開発イメージ

スを積層できるハンドレイアップ製法もしくは VaRTM 成型で製作された FRP 桁を使用する。

しかし、このような構造形式としての課題は、FRP と鋼との接合方法、FRP 桁端部および鋼・FRP 混合桁としての力学的挙動や耐荷性能の把握、さらには設計に関する考え方などが挙げられる。

そこで、本研究では、特に、FRP を桁端部取替え時に利用することを前提とした図-4 に示す鋼・FRP 混合桁を対象とし、研究期間内に 鋼・FRP 混合桁のボルト接合方法、および 鋼・FRP 混合桁の力学的挙動と耐荷性能を主として検討する。

#### <参考文献>

- 2) 橋本国太郎, LEE EngMing, 杉浦邦征, 西崎 到, 日比英輝: 鋼・GFRP 合成桁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1 (複合構造論文集), Vol.70, No.5, pp.11\_31-11\_39, 2014
- 3) 田中大介, 橋本国太郎, 丹波寛夫, 杉浦邦征: 桁端部が腐食した鋼 I 桁の CFRP による補修に関する実験的研究, 第 5 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.95-104, 2014

### 3. 研究の方法

#### (1) FRP 板と鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究 (平成 28 年度実施)

本目的を達成するために、初めに FRP 桁と鋼桁のボルトでの接合方法を要素実験で検討した。

図-5 に示すように片側の被締結板 (母板) を鋼板, 片側を FRP 板とし, それぞれの板を鋼の連結板を介してボルト接合した実験供試体を用意する。このとき, ボルトの接合方法 (支圧接合および摩擦接合), FRP の材料 (GFRP および CFRP), 板の接合表面の処理方法などをパラメータとして実験を行う。ただし, より施工性のよい摩擦接合で実験を行い, 所定の接合面処理においてすべり係数 0.45 以上が得られることが分かれば, その他の表面処理や支圧接合の実験は行わないこととする。供試体のボルト本数や標準寸法は, 図に示す通り, M16 高力ボルト 1 列であり, すべりが生じる前に FRP 板が破断しないような寸法とした。

図-5 に示す実験供試体の片側を固定し, もう片側に引張力を作用させることで, ボルト接合継手の荷重, 変位 (母板間の離間量), ボルト軸力および母板のひずみなどを計測する。

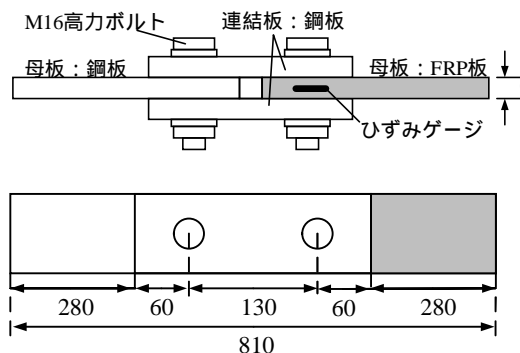


図-5 試験体の概要 (単位: mm)

#### (2) 鋼・GFRP 混合桁の最適スパン割に関する解析的検討 (平成 29 年度実施)

次に, 鋼・GFRP 混合桁の最適なスパン割を検討するために, FE 解析を実施し, その力学的挙動を明らかにする。また, 鋼材と FRP 材との体積比や重量比も求め, 剛性などの力学的観点に加え経済的な観点からも考察を行い, 混合桁の最適なスパン割を検討する。

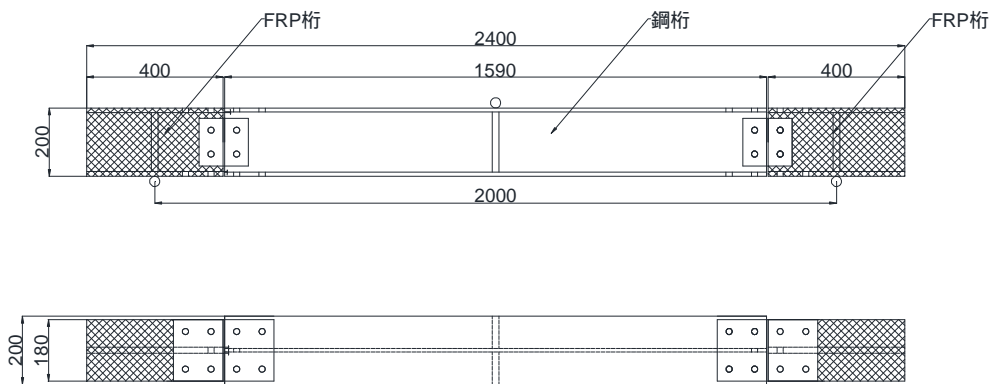
解析には有限要素解析コード ABAQUS を用いて, FRP 材料には材料の異方性を考慮し, 鋼材は等方性材料とした。FRP の弾性係数などの材料特性は過去に行われた実験結果<sup>3)</sup>を用いた。また, 実際にはボルト接合を考慮しているが, 本解析では, ボルト接合は考慮せずに, FRP 桁と鋼桁は連続的に材料を変化させるのみでモデル化した。解析は弾性微小変位解析とした。

解析モデルに採用した桁の寸法は図-6 に示す次に実験予定である実験供試体の形状と一致させた。なお図-6 では, ボルト接合部があるが, 解析ではこの部分はモデル化せずに桁一般部と同じにしている。荷重も, 実験と同様に桁のスパン中央部にフランジ幅に線荷重として強制変位を与えた。また, 図-6 ではスパン割が決められているが, 本解析では, 全体スパンは 2000mm (全長 2400mm) のまま, FRP と鋼の長さをそれぞれ変化させ, 特に曲げ剛性に着目して検討した。

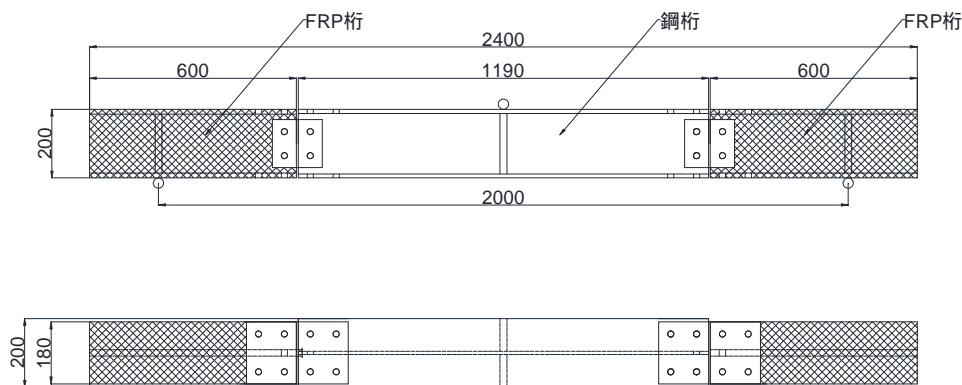
#### (3) 鋼・GFRP 混合桁の曲げ挙動および終局強度に関する実験的研究 (平成 30 年度実施)

最後に, 鋼・GFRP 混合桁の曲げ挙動および終局強度を検討するために, 3 点曲げ載荷実験を行った。実験供試体は, (2) の解析結果を踏まえ, 実際のボルト接合などの接合に必要な長さなども考慮し, 図-6 に示す両側の桁端部の長さをそれぞれ 400mm (SFRP400) 支点間では 200mm, もしくは 600mm (SFRP600) 支点間では 400mm の FRP 桁とし, 残りの中央部を鋼桁とした 2 体の実験供試体を用意した。荷重は, スパン中央に集中荷重を載荷した。測定はボルト軸力および桁中央部下フランジのひずみ, スパン中央部およびスパン 1/4 部のたわみ, 接合部の離間量などを計測した。

なお, FRP 桁と鋼桁では桁高は同じであったが, それ以外の断面寸法 (フランジ幅やウェブ板厚, フランジ板厚) が若干違うため, 接合部に鋼のフィラープレートを挿入し, 摩擦接合を行った。また, FRP 桁の表面粗さは, (1) での実験結果やこれまでの知見を踏まえ,  $R_a = 2.0$  程度以上得られるように処理を施した。



(a) SFRP400



(b) SFRP600

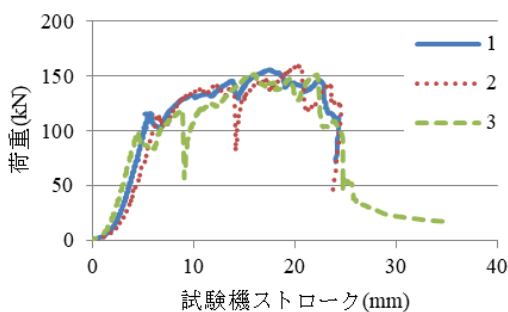
図-6 鋼・FRP混合桁実験試験体（単位：mm）

#### 4. 研究成果

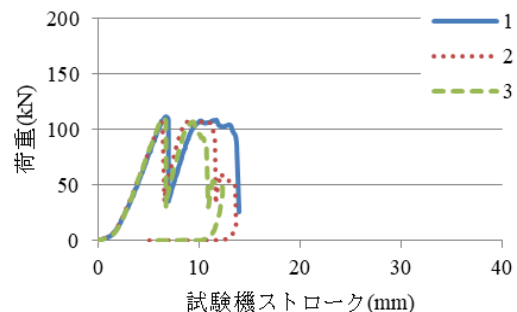
##### (1) FRP 板と鋼板を用いた高力ボルト摩擦接合に関する実験的研究

FRP 板にサンドブラストを施し、表面粗さ  $Ra=2\sim 4$  程度得られた試験体に対して、引張試験を行った結果、図-7 に示すように鋼・CFRP 試験体では 117kN の荷重の時に CFRP 板ですべりが生じ、146kN で鋼板のすべりが生じた。また、鋼・GFRP 試験体では 110kN の荷重時に GFRP 板ですべりが生じ、鋼板のすべりは確認できなかった。このすべり荷重およびボルト軸力の測定結果よりすべり係数を算出した。鋼・CFRP 試験体では CFRP 板のすべり係数は 0.551、鋼板のすべり係数は 0.692、鋼・GFRP 試験体では GFRP 板のすべり係数は 0.517 となり、いずれの場合も、道路橋示方書の基準値 (0.45) を満足していることが分かる。

さらにリラクゼーション試験の結果、鋼・CFRP 混合部材の場合、高力ボルトの軸力は 7 日間で 10~12% 程度低下し、鋼・GFRP 混合部材の場合、高力ボルトの軸力は 7 日間で 13~17% 程度低下した。これは鋼材同士（接合面に無機ジンクリッチペン）との低下量とあまり変わらないもしくは軸力低下率が小さくなった。これらの結果を踏まえ、より安価な GFRP を採用し、以降の検討を行った。



(a) 鋼・CFRP 試験体



(b) 鋼・GFRP 試験体

図-7 FRP 摩擦接合の引張試験結果

(2) 鋼・GFRP 混合桁の最適スパン割に関する解析的検討

解析の結果、当然の結果であるが、GFRP 部材を長くすると剛性が小さくなり、短くすると剛性が大きくなる。そこで、鋼/(鋼+GFRP)の重量比  $W$  を考える。この  $W$  は鋼部材が多いと 1 に近づき、FRP 部材が多いと 0 に近づく 0~1 の範囲の値となる。これをさらに剛性  $R$  との比である剛性比  $R/W$  を考える。この剛性比が大きいほどより良い(軽くて剛性が大きい)という指標であることがわかる。図-8 に示すように、この値で比較すると GFRP の剛性が鋼材に比べかなり小さいため、最適な値は得られなかった。ただし、GFRP 桁長さが 510mm (片側長さ 265mm) あたりの値のとき、鋼の剛性比とほぼ同じ値となることが分かったため、本研究では、その値を最適値とした。

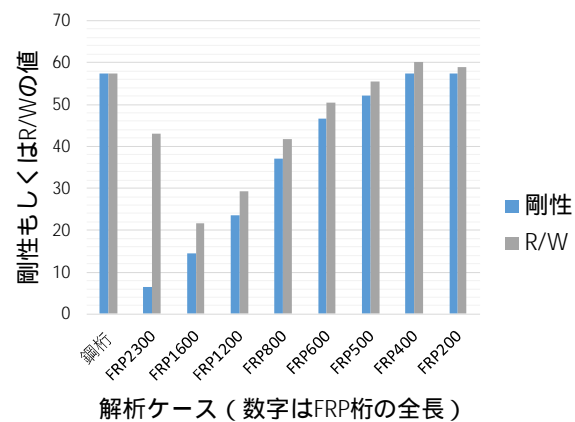


図-8 スパン割解析結果

(3) 鋼・GFRP 混合桁の曲げ挙動および終局強度に関する実験的研究

(2)の解析結果を踏まえ、さらにボルト接合部の製作性や施工性を考慮し、図-6 に示した SFRP400 (片側長 400mm) という実験供試体を基準の混合桁とした。その比較のため、剛性比が比較的小さかった SFRP600 (片側長 600mm) という供試体も用意し載荷実験を行った。なお、SFRP400 の載荷では、試験体の観察などを行うため二度除荷をし再載荷している。

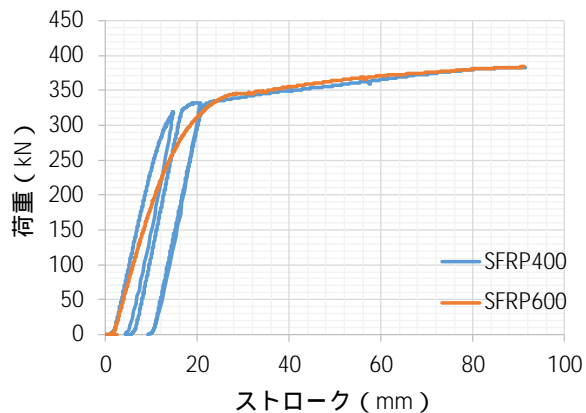


図-9 鋼・GFRP混合桁実験結果

この実験の結果、SFRP400 では、桁中央部の鋼桁部材の圧縮フランジで座屈破壊したのに対し、SFRP600 では、FRP 桁ウェブのせん断破壊で終局を迎え、破壊モードに大きな違いが出た。また、図-9 に示すように、最大荷重は両供試体とも 380kN 程度とほぼ同じ荷重となったが、曲げ剛性は SFRP400 のほうが大きくなった。なお、過去行われた<sup>4)</sup>GFRP 桁や GFRP 内に鋼材を積層した合成桁の実験結果に比べ、最大耐荷力は 2 倍近く、曲げ剛性は 4~5 倍以上となった。さらに、載荷中に高力ボルト摩擦接合部における大きな主すべりは見られなかったものの、実験データ分析により SFRP600 で、若干ながら接合面ですべりが発生していた可能性があることがわかった。これらの結果より、GFRP 部材をより短く使用することで、剛性が上がり、接合部でのすべりは起こりにくくなることがわかった。ただし、実際の使用時の GFRP 桁の長さの決定方法に関しては、これまで検討した剛性や重量・コストなどの検討事項以外にも、建設後の桁端部の腐食環境の範囲も検討項目の一つであることに留意が必要である。

<参考文献>

4)橋本国太郎, 日比英輝, 杉浦邦征: 鋼・GFRP 合成はりの終局強度に関する実験的研究, 第 12 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, (8pages, CD-R), 2017.11

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

石間啓介, 橋本国太郎: 鋼・FRP 混合部材の高力ボルト接合部強度に関する実験的検討, 第 12 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 査読有, 2017, (6pages, CD-R)

[学会発表](計 1 件)

橋本国太郎, 石原悠気, 日比英輝: 鋼・GFRP 複合はりの力学的挙動に関する解析的研究, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2018, 1-38

6. 研究組織

(1)研究分担者: なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：日比英輝

ローマ字氏名：(HIBI , Hideki )

研究協力者氏名：松井孝洋

ローマ字氏名：( MATSUI , Takahiro )

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。