

繊維強化プラスチック成形体の補強部品 “ぴったりくん[®]”[†]の開発と応用

鈴木 勝¹⁾ 鈴木 公夫²⁾ 青山 正義³⁾

1. はじめに

近年、脱炭素システムへの変換が望まれ、SDGs 視点から持続可能な社会への貢献の必要性が増している。工業材料には繰り返し使用等節約志向でリサイクル等が注目され、安価で長く使える技術や製品が望まれている。現在の社会インフラの動向として、(1)発電領域では、化石燃料から太陽光・洋上風力発電への変遷の動きが進み⁽¹⁾、風力発電設備の長寿命化と補強・補修が、(2)輸送分野領域では、自動車⁽²⁾・飛行機⁽³⁾・等の燃費向上が課題となっている。

軽量の樹脂と強度の高い繊維から成る複合材料FRP (Fiber Reinforced Plastics)は1930年代⁽⁴⁾に開発され、比強度、優れた耐食性、非磁性等の特徴から利用が拡大してきた。現在では構造物の大型化に伴い、軽量化視点で薄肉高強度かつ高い剛性を有するFRP成形体が望まれている。ここでの課題は、ボルト締め付け穴周辺部、曲げ応力がかかる部分、設計的に相対的に弱い部分の補強である。

1974年以降、FRP成形体の繊維層の長手方向に対する角度等の構造を変え強化する技術(特開2002-307585号)やFRPのボルト穴部の繊維束が切れにくくするように繊維束を切らず穴を迂回する構造にする技術(特開2003-225914号)、樹脂製部品のボルト穴に樹脂補強シートを貼る技術(特開2017-19311号)等が検討されてきた。FRPの研究は数多く行われ⁽⁴⁾、多くのデータと実績がある。

市場の変化が技術革新を生む。既に、古典的な銅系合金でも、市場の進化を捉えたマイクロ視点の研究により、新規性ある材料⁽⁵⁾を創出した。そこで、FRP破壊時の微細構造の詳

細観察解析⁽⁶⁾によりき裂発生・伝播を制御したいと思い、工業的に簡単に使える微細構造制御補強部品の開発状況を紹介する。

2. 補強部品の開発コンセプトと適用技術概要

(1) 補強部品“ぴったりくん[®]”の開発コンセプト

FRP成形体はその軽量高強度の特徴から、FRP同士やFRPと金属材料の接続等多様な使われ方をする。用途により様々な応力状態、温度域など特異な使用環境で使われる場合も多い。図1は代表使用例であり、(a)FRP/鋼材のボルト結合の例、(b)FRP/FRP/鋼材のボルト結合の例であり、図中の矢印はき裂の発生し易い位置である。実際の樹脂やFRP成形体のボルト穴付近から放射状にき裂が観察され易いので、図2に放射状き裂の形態をモデルで示した。このき裂は、David Brokeによる古典的三種類の割れモード⁽⁷⁾、き裂開口、せん断、ねじれの組み合わせによりき裂発生と伝播によって起こる。

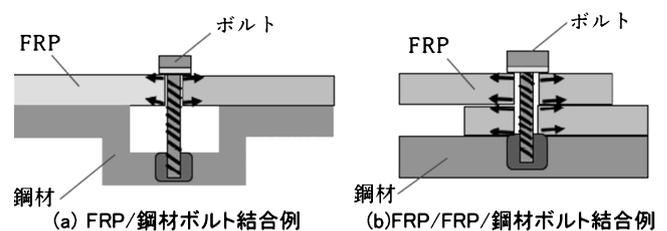


図1 FRP成形体結合構造。

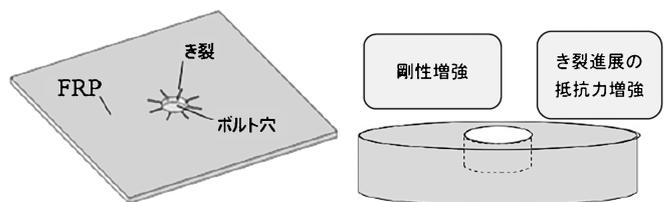


図2 ボルト穴を備えたFRP成形体に観察されるき裂モデル。

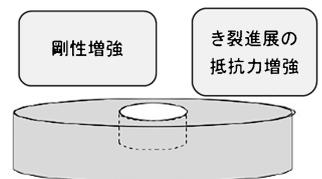


図3 剛性向上とき裂発生伝播抑制を図るためのディスク状の補強材概念。

* (株)ジェイ・オー・エヌ・七二; 1)代表取締役 2)技術部長 3)技術顧問

Development and Applications of Reinforcing Parts (Pittarikun[®]) for Fiber Reinforced Plastics Product; Masaru Suzuki, Kimio Suzuki and Seigi Aoyama. (JON72 CO., Ltd) 2024年8月1日受理[doi:10.2320/materia.64.41]

[†] “ぴったりくん”は、(株)ジェイ・オー・エヌ・七二の登録商標です。

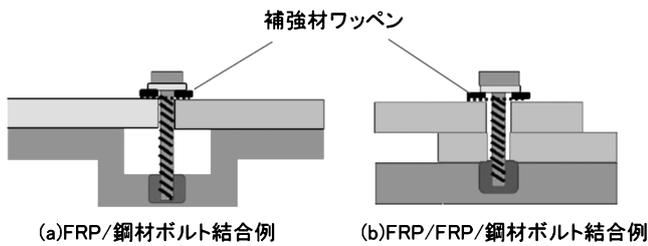


図4 FRP成形体結合部に補強材を貼りつけた結合構造。

マクロの視点では、高剛性補強部材をFRP成形体に貼り付ける対策がある。ミクロの視点では、き裂発生と伝播を抑制するため、き裂発生伝播の抵抗となるガラス繊維を配置する。即ち、曲げせん断に強い剛性に優れたガラス構造とき裂の抵抗となるガラス構造の工夫により補強できると考えられる。図3に剛性向上とき裂発生伝播を抑制するディスク状補強材(以下ワッペンと称す。)を示した。

ワッペンを図4(a), (b)に示すように、図1記載FRPに貼り付け剛体化することにより、き裂発生伝播抑制の役割を果たす。

(2) 補強部品の内部構造の検討

従来から、FRPの強化のためのガラス繊維束の配列が検討されており、ガラス繊維が長手方向に配列したFRP試料の強度と剛性率が高いことが分かっている。既知の事実を踏まえた体系的実験により破壊現象の微細構造を観察検討⁽⁶⁾した。き裂の発生伝播の挙動から、ガラス繊維の適切な配置がき裂の発生進展の抵抗になると考えられる。即ち、図5に示すようにき裂の伝播方向に直角に直線状あるいは渦巻き状にガラス繊維を配列することで、FRP形状に応じたき裂発生および伝播を抑制できると考えた。

図6は、ボルト穴部付きFRP成形体を補強する補強材内部に配置された繊維基本構成を示したものである。放射状のき裂発生進展抑制のため、FRPのボルト穴から外側に向かって渦巻き状ガラス繊維を配置した。さらにFRPのボルト穴から外側に向かって直線状のガラス束を含む格子状繊維布

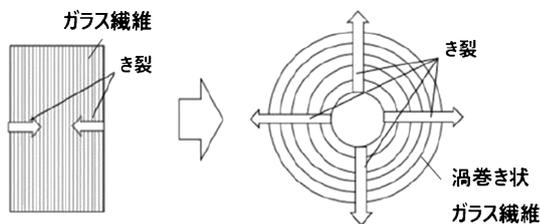


図5 き裂発生および伝播を抑制するガラス繊維構造。

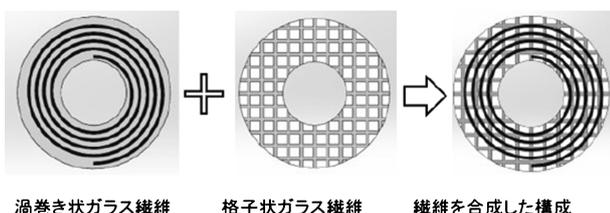


図6 理想的なFRP補強材を構成するガラス繊維構成。

の配置で、ボルト穴の深さ方向のFRP成形体の曲げ剛性を高めた⁽⁶⁾。この格子状繊維はワッペンの中心を軸に45度回転されたものを加えることで、計3層の基本構成の補強材ワッペンになる。ガラスと樹脂の割合は従来知見⁽⁸⁾から重量比3:7とした。この基本構成で製作したワッペンを基に破壊試験を行い、補強効果の有用性を調べた。次項にてワッペンの製法について述べ、3章では開発品の特徴の中で補強効果の結果を示す。

(3) 補強材ワッペンの構成と三次元プリンター製作

既報の基礎的検討にて、FRP成形体の補強効果が得られた⁽⁶⁾ので、次に工業的な生産を目的に、三次元プリンターを用いたワッペン製造技術を検討した。ここでワッペンの構成材料としてのガラス繊維は、Markforged社のCFFファイバークラスフィラメント(引張強度590MPa、破断伸び3.8%)、樹脂は製品名ONYX(ナイロン引張降伏応力36MPa、破断伸び58%)を用いた。製作した補強材ワッペンは厚さ3mmである。ガラス繊維構成は、三種の構成要素部材から成っている。ワッペンの基底面表面からファイバーを直線状に等間隔で並べて配置4枚の要素部材を製作し、次に渦巻き状のガラスファイバーからなる4枚の要素部材を製作積層した後、さらにファイバーを直線状に等間隔で並べて配置4枚の要素部材を配置し、合計12枚の樹脂/ファイバー構成の要素部材を製作した。この中で、ファイバーを直線状に等間隔で並べて配置した合計8枚のファイバーの詳細構成は、ワッペンのボルト穴中央を軸に45度ずつ回転させ格子状相当構造にしたものである。図7は、厚さ3mmの補強材ワッペンの透過X線像である。渦巻き状ファイバーと格子状ファイバーの精密な規則的配列状況が分かる。

3. 開発した補強部品の特徴

(1) 開発品の破壊試験による亀裂進展の抑制効果の検証

実社会でのFRP/鋼材のボルト結合の場合、図1のように、FRP成形体(3mm)に厳しい曲げ応力やせん断応力が作用すると考え、図8に示した破壊試験設備を考案製作した。ハンドレイアップ成形法で製作した3mm厚さ、縦150mm、横150mmのFRP基材に接着剤商品名CRESTABOND® M7-15を用いて補強材ワッペンを貼り付けた後、ボルト締め試

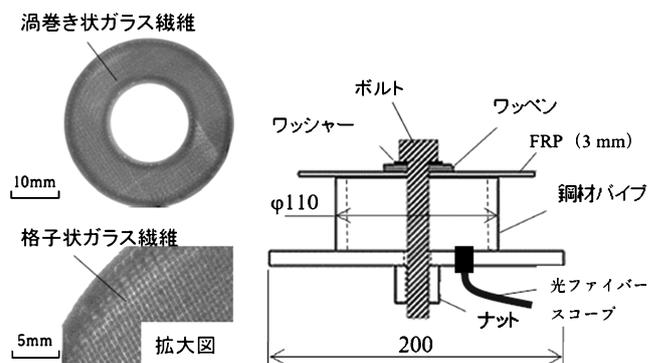


図7 補強材ワッペンのX線透過画像。 図8 補強材ワッペンの補強効果を評価する破壊試験設備。

験を行った。ここで試験は、(株)東日製作所製トルクレンチにて、回転速度約 4 min^{-1} にて押し込み変位 H を変数として、トルクを測定しつつ深さ約 5 mm (約 $10 \sim 13 \text{ N} \cdot \text{m}$) まで連続的にボルト締めによる負荷を加えた。鋼製試験機底面から光ファイバースコープを挿入し、ボルト穴を備えた FRP 板の下方から連続的にき裂発生と伝播状況のデジタル画像を取得した。図 9 にワッペンの押し込み変位 H とボルト締めトルクの関係を示した。写真にはき裂の発生状況を示した。押し込み変位 H の変化に対応して(a)ワッペン無し(b)補強材ワッペン有りについて伝播状況のデジタル画像を取得した。

ワッペン無し FRP 板では、トルクは増加後 $H 5 \text{ mm}$ で低下が起る。これに対しワッペンを貼り付けた FRP 板ではトルクが増加し続け、 $H 5 \text{ mm}$ でも低下しない。図 10 に押し込み変位 $H 5 \text{ mm}$ の場合の X 線透過写真を示した。補強材ワッペンを貼り付けることで貼り付けないものに比べて、割れの発生伝播が認められない。X 線透過により内部のき裂状況が分かり、FRP 基材裏面とワッペンともに損傷は見られず、き裂発生伝播が抑制されたことが分かる。

(2) 開発品接着技術の開発とせん断強度の検証

2 章にて、き裂発生と伝播を抑制するため、曲げ抵抗とせ

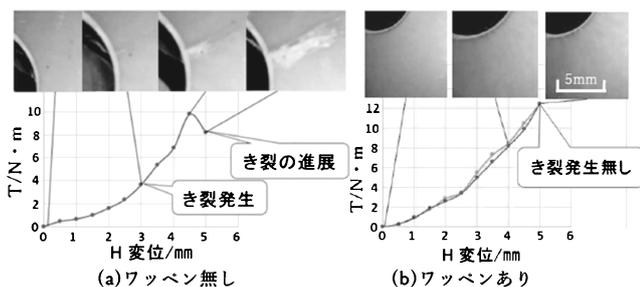


図9 ワッペン押し込み変位 H とボルト締め付けトルク T の関係。

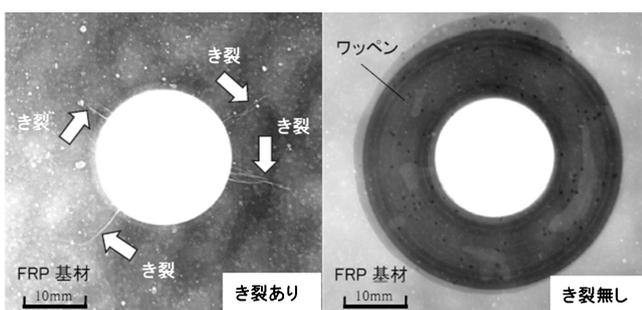


図10 X 線透過法によるき裂発生状況(押し込み深さ $H 5 \text{ mm}$)。

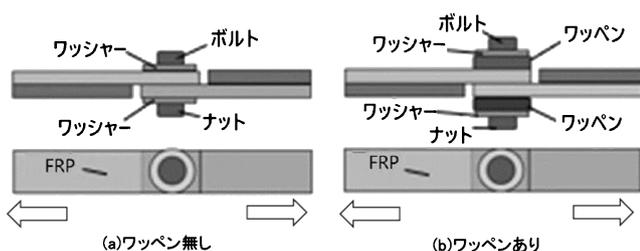


図11 FRP 基材にワッペンを貼りつけた接合部のせん断応力評価。

ん断抵抗の向上が重要であることが分かった。そこで、接着剤商品名 CRESTABOND® M7-15 を使い、図 11 に示す試料を作製し接着条件を適正化し、約 40% 破断荷重の向上が確認された。

4. 特許および実用化の動向

FRP の出現以来、ガラスやカーボン製ファイバーを用いた製品が実用化されてきた。本製品技術は、多くの実績のあるガラスファイバー使用 GFRP 製品の優位性を見直し、時代に合せた新たな視点で開発したものである。この基本特許⁽⁹⁾は、すでに日本国で権利化され、米国、欧州、中国へ出願中である。

さらにワッペン関連のせん断力を高める接続技術を高める応用特許等 5 件を出願した。現在お客様の技術課題に応え、配管補強部材や精密機械用保護カバー等に実用化した。

5. ま と め

持続可能な SDGs 視点で、ガラス/樹脂複合材の基本構成の見直しを行い、プラスチックや FRP 成形体を簡単に補強できる補強技術や部品を開発した。この技術は、補強材内部の微視的繊維構造を制御しているので、サイズによらず使える普遍的強化技術になる。さらにデザイン性に優れた様々な形の補強材を提供できる。本開発品と技術はその使い易さから“ぴったりくん”と命名した。本検討では、実験室での強度評価試験結果を紹介したが、使用環境・用途に応じてワッペン形状やサイズ・構成材料・接続構造・製作方法を提案できる。

本開発補強技術と補強部品が持続可能な社会に向けた諸問題解決のツールになれば幸いである。

評価技術に関して茨城大学大学院理工学研究科西野創一郎准教授に、特許出願に対し INPIT 茨城県知財総合支援窓口・武藤康晴様にご支援ご指導頂き深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 上田悦紀：風力発電の動向，日本マリンエンジニアリング学会誌，**51**(2016)，79-84。
- (2) 三国 敦：CFRP の自動車車体への適用，第342回塑性加工シンポジウム「複合材加工技術の最前線」，(2021)，15-21。
- (3) 青木雄一郎：航空機 CFRP 構造の軽量化を可能とする最適積層設計技術，第342回塑性加工シンポジウム「複合材加工技術の最前線」，(2021)，25-32。
- (4) 土木学会：複合構造レポート09 FRP 部材の接合及び鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，(2013)，17-40。
- (5) 青山正義：まてりあ，**51**(2012)，251-257。
- (6) 鈴木公夫，青山正義，鈴木 勝，西野創一郎：JON72技術資料，(2024)，1-6。
- (7) David Broke: Elementary engineering fracture mechanics, Noordhoff international publishing, Leyoden, (1974)，29。
- (8) D. Hull and T. W. Clyne(宮入裕夫，池上皓三，金原勲共訳)：複合材料入門(改訂版)，培風館，(2003)，35。
- (9) 日本特許第7190087号：日本特許第745866号。