

## (56) 補剛材の溶接接合部近傍の断面欠損に対する CFRP 接着による曲げ耐力の回復

西岡 裕次郎<sup>1</sup>・中村 一史<sup>2</sup>・坪川 毅彦<sup>3</sup>・松井 孝洋<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)  
E-mail: nishioka-yujiro@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup> 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 准教授 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)  
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

<sup>3</sup> 三井海洋開発株式会社 事業開発部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 2-3-10)  
E-mail: Takehiko.Tsubokawa@modec.com

<sup>4</sup> 東レ株式会社 ACM 技術部 (〒103-8666 東京都日本橋室町 2-1-1)  
E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

本研究は、真空含浸工法 (VaRTM) の成形技術を応用して、CFRP と断面欠損した鋼部材を一体化させ、性能回復を図る工法の開発を目指したものである。補剛材の溶接接合部近傍に台形状の断面欠損を有する、板厚 10mm の鋼部材に対して、CFRP の配置がその曲げ耐力の回復に及ぼす影響を実験的に検討した。試験は、3点曲げ載荷とし、曲げ治具に設置した試験体の補剛材上部をつかみ、荷重を載荷した。補修ケース 3つを用意し、検討を行った。その結果、断面欠損量と等価な軸剛性の CFRP を配置することで、CFRP が曲げ圧縮状態の場合、全ての補修方法で性能が回復すること、曲げ引張状態の場合、隅角部で早期にはく離が生じ、性能が回復しないことがわかった。さらに、はく離強度向上を目的とした解析的検討を行い、隅角部へ樹脂をすりつける加工が接合部の破壊時の荷重の向上に効果的であることがわかった。

**Key Words:** sectional loss, bending strength, carbon fiber sheet, bonded joint, debonding

### 1. はじめに

浮体式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備 (Floating Production Storage and Offloading system ; 以下, FPSO) の船体構造は、継続的な生産を維持するために、ドライドックでの点検・補修を行わず、20~30年間の洋上での稼働が求められている。FPSO 船体構造には、腐食、疲労に伴う劣化・損傷が多く、一般に、溶接接合による当て板で補修が行われている。しかしながら、火器を伴う施工となるため、熱による母材への影響だけでなく、石油・ガスの生産設備であることから、施工に大きな制約が生じる。

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic ; 以下, CFRP) 接着工法<sup>1)~4)</sup>は、鋼部材に樹脂を用いて CFRP を接着するため、火器の使用が不要で施工が簡便であり、母材への影響もほとんどないこと、さらに、CFRP は軽量かつ高強度であり、耐腐食性に優れることから、FPSO 船体構造のように、施工の制約や腐食環境等が厳しい条件の下では有用な補修工法になると考えら

れる。

本研究は、FPSO 船体構造の補修工法として、真空含浸工法 (VaRTM) の成形技術<sup>5),6)</sup>を用いて、CFRP と断面欠損した鋼部材を一体化させ、性能回復を図る工法の開発を目指したものである。

FPSO 船体構造では、補剛材の溶接接合部の近傍で腐食が生じ、断面欠損する場合がある。このような箇所に CFRP 接着工法を適用する場合、定着長が確保しにくいこと、補修の効果も不明であるため、適用にあたり十分な検討が必要である。本研究では、FPSO 船体構造において、補剛材の溶接部近傍の母材の断面欠損の性能回復を目的として、CFRP 接着工法の適用性を実験的、解析的に検討した。

ここでは、FPSO 船体構造の一部を部分的にモデル化して検討した。試験体は、補剛板が溶接接合された鋼板に所定の断面欠損を与えて作製した。次に、VaRTM 成形技術を用いて CFRP を接着して、3 ケースの補修を行った。さらに、2 種類の 3 点曲げ載荷実験を行って、曲げ耐力の性能回復を検討した。

## 2. 検討対象とモデル化

本研究では、図-1 に示すように、FPSO 船体構造で多用される Double hull 構造の補修を対象とした。ボトムプレートとロンジ材の接合部は、腐食が生じやすく、断面欠損に対する補修が必要となる場合があるため、CFRP 接着による性能回復を試みた。

補剛材（ロンジ材）が溶接されたボトムプレートの接合部には、面外方向から水圧が作用し、曲げ作用が支配的であることから、曲げ耐力の性能回復を対象とした。

これらの部材およびCFRP 接着による補修方法を、部分的かつ簡便にモデル化することとした。試験体は、補剛材が溶接接合された鋼板とし、断面欠損は溶接接合部の近傍に台形状に与えるものとし、片側からの補修を検討することとした。また、水圧による曲げ作用を鋼板の3点曲げ試験とすることでモデル化し、交番作用を考慮して、CFRP 側に曲げ圧縮あるいは曲げ引張が作用する場合を検討した。

## 3. 試験体と補修方法

### (1) 試験体の設計と断面欠損のモデル化

図-2 に、試験体寸法を示す。補剛材接合部はすみ肉溶接とし、溶接脚長は、5mm とした。腐食による断面欠損をモデル化するために、補剛材の溶接接合部近傍に板厚の20%の断面欠損を与え、かつ、断面欠損部と健全部との間には、1:5 の直線勾配ですりつけを設けた形状とした。実構造物において、溶接止端部から腐食により断面欠損することが確認されているため、このような形状とした。試験体の製作では、断面欠損を切削加工で施したのち、補剛材を溶接接合した。このような試験体の溶接時の残留応力の状態は、実際とは異なる可能性があるが、製作の都合によりこのような条件とした。母材、補剛材ともに、鋼種はSM490Aであり、降伏強度411.9N/mm<sup>2</sup>、引張強度568.0N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数195.0kN/mm<sup>2</sup>である。

### (2) 補修ケースとVaRTMによるCFRP 接着補修

補修の方針として、鋼材の欠損厚さから炭素繊維（以下、CF）シートの弾性係数を考慮した等価な剛性を付与することとして、CFシートの必要厚さ（積層数）を算出した<sup>9)</sup>。CFシートは、強度と弾性率のバランスに優れる、一方向材の中弾性タイプ（設計厚さ0.217mm、引張強度2.4kN/mm<sup>2</sup>、弾性係数440kN/mm<sup>2</sup>）を用いた<sup>9)</sup>。表-1 に示すように、20%欠損では5層のCFシートを積層する。

図-3 に、CFシート接着長さおよびすみゲージ設置位置を示す。鋼板とCFRPには、中央から20mm、70mm、120mm、210mmの位置に加え、接着端部にも配置した。

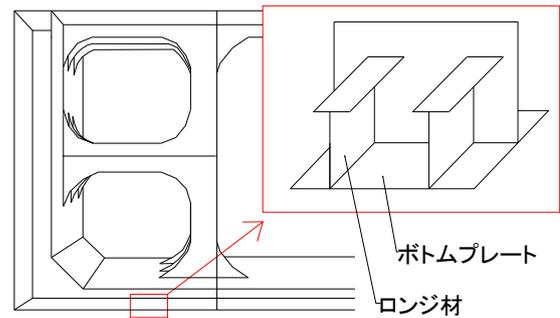
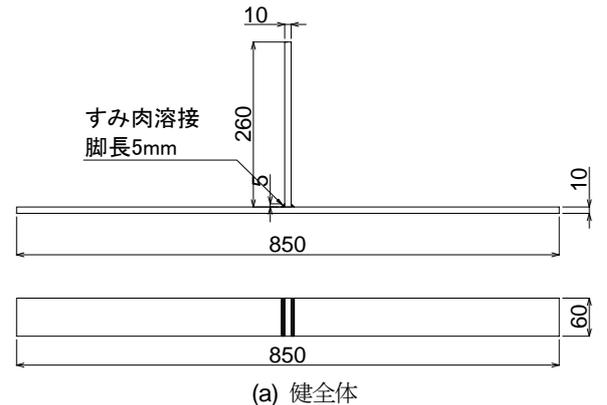
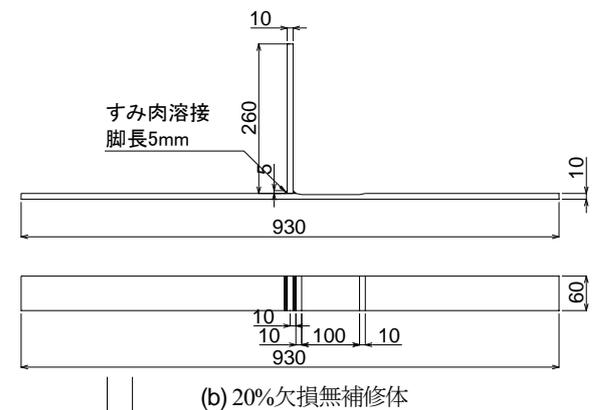


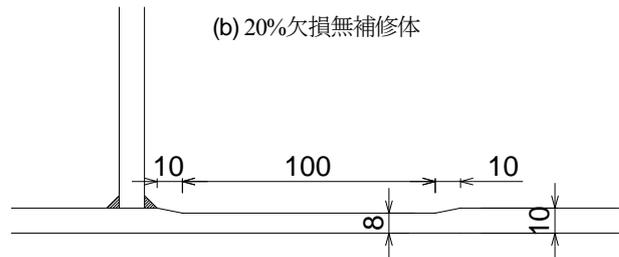
図-1 Double Hull 構造と対象部材



(a) 健全体



(b) 20%欠損無補修体



(c) 20%欠損部詳細

図-2 試験体寸法

表-1 炭素繊維シートの数量

| 項目          | 単位 | 20%欠損 |
|-------------|----|-------|
| 鋼材の健全体の厚さ   | mm | 10.0  |
| 鋼材の必要厚さ     | mm | 2.0   |
| CFシートの体積含有率 | %  | 50    |
| CFRPの必要厚さ   | mm | 1.82  |
| 必要積層数       | 層  | 5     |

補剛材には、鋼板表面から 15mm の位置と接着端部に配置した。支点間距離 460mm に支点が下側に示されているが、これは圧縮試験時であり、引張試験時は支点が上側になるように設置する。詳しくは後述する。試験体の長手方向に強化されるように CF シートを配置し、接着端部は 10mm ずつ段差を設けた。鋼板側の接着端部は支点の外側に位置するように配置し、端部のはく離が生じないようにした。補剛材側の定着長は、作用力は小さいが、文献<sup>2)</sup>の軸方向力に対する算定式に基づき算出し、70mm とした。

図-4 に、補修方法を示す。3 ケースの補修方法を設定した。Case1 は欠損部にエポキシ樹脂接着剤で不陸修正を施したうえで CF シートを接着するケース、Case2 は不

陸修正なしで、また、Case3 は応力緩和のため、1:5 の勾配の欠損すりつけ部を 1:10 の勾配で不陸修正を施して、CF シートを接着するケースである。

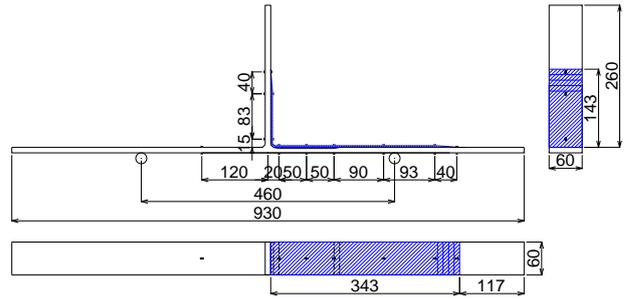


図-3 CF シートとひずみゲージの配置 (曲げ圧縮時)

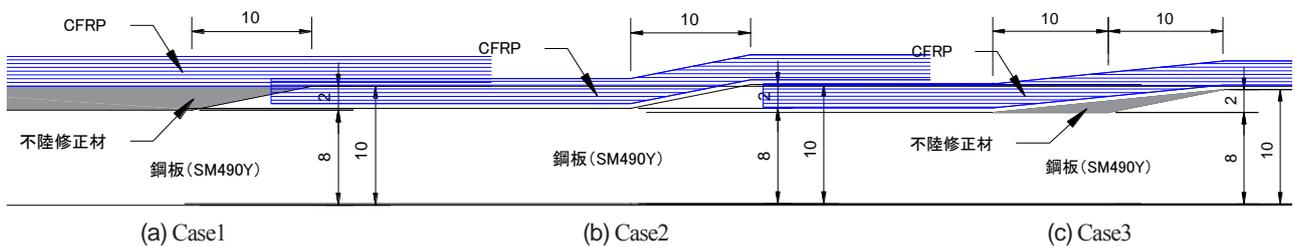
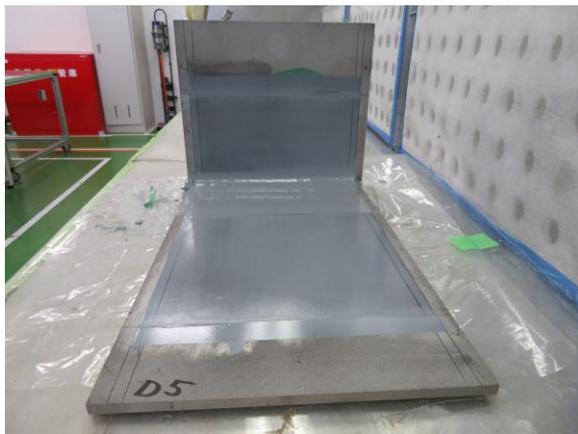
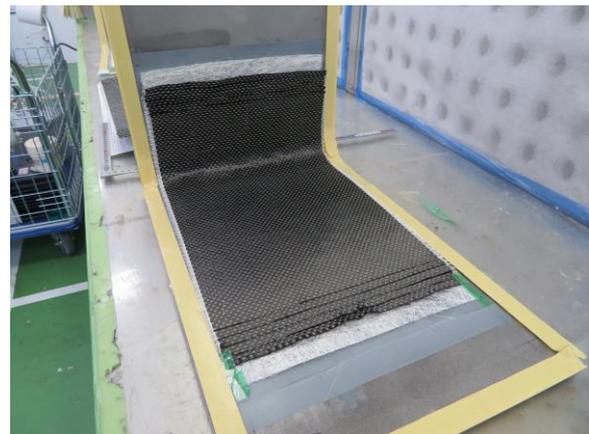


図-4 補修方法



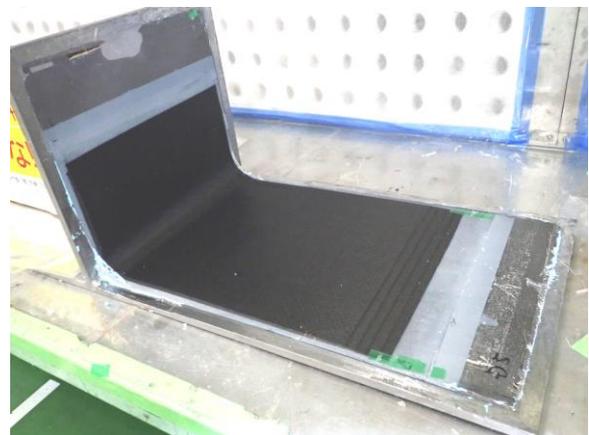
(a) 下地処理とプライマー塗布



(b) CF シートの配置



(c) 副資材の配置と真空含浸の状況



(d) 補修後の状況

写真-1 VaRTM 成形による補修方法

本検討では、CF シートの積層接着は、真空含浸法 (VaRTM) による。図-5 に、VaRTM の概念図を示す。

写真-1 に、VaRTM による補修方法を示す。写真-1 は補修 Case1 の状況であり、欠損部はエポキシ樹脂接着剤により埋め戻している。

写真-1 (a) に、下地処理と不陸修正の状況を示す。ブラスト面成形動力工具を用いて、表面の黒皮、錆を除去するとともに、表面粗さを確保することにより、はく離しにくくする。その後、アセトンを用いて表面の汚れを除去し、プライマー塗布、断面欠損部への不陸修正を施す。

写真-1 (b) に、CF シートの配置の状況を示す。プライマー塗布後に、アセトンを用いて表面の汚れを除去し、チョップドストランドマット、CF シートを所定の位置に配置する。補剛材や接合部への配置は、CF シートがずれないように仮止めする。

写真-1 (c) に、副資材の配置と真空含浸の状況を示す。含浸後の副資材の除去を容易にするために、配置した CF シートの上にピールプライを、さらにその上に、接着用樹脂材料の流動性を確保するために拡散メディアを配置した。その後、真空ポンプ吸引側と樹脂引き側にパイプを配置する。真空封入のために粘着性のテープを用いて、空気が入らないよう、プラスチックフィルムで全体を覆う。含浸完了後は、樹脂が硬化するまで養生する。

写真-1 (d) に、補修後の状況を示す。樹脂が硬化した後、プラスチックフィルム、ピールプライ等の副資材をすべて除去する。

各補修ケースで3体分を VaRTM により CFRP を一体成形した。硬化後、ウォータージェットで切断加工して、試験体を作製した。

#### 4. 曲げ载荷試験

##### (1) 試験方法とセットアップ

荷重条件は3点曲げ载荷とした。CFRP 側に圧縮力が作用する、曲げ圧縮試験では、荷重を補剛材の先端に鉛直下向きに、また、曲げ引張試験では、荷重を鉛直上向きの载荷をする。試験体を支点間距離 460mm の治具に設置し、補剛材上部をつかみ、载荷する方法とした。写真-2 に、セットアップ図を示す。曲げ引張試験時には、試験体は支点の下側に配置される。

载荷試験には、島津サーボパルサ (静的容量: ±240kN) を試用した。载荷速度は 5mm/min とした。表-2 に、実験パラメータを示す。

##### (2) 試験結果と考察

###### a) 曲げ圧縮特性

表-3 に、曲げ圧縮試験における最大荷重のまとめを、図-6 に、荷重と鉛直変位の関係をそれぞれ示す。実験は、健全体と無補修体については、鉛直変位 50mm に達した時点で、補修モデルについては、CFRP の圧縮破壊が生じた時点で終了とした。最大荷重は、各試験体における荷重の最大値で評価したが、健全、無補修については、鉛直変位が 50mm の時の荷重とした。補修モデルにおける荷重と変位の関係は、3 体のうち、最大荷重が 2 番目に高かった 1 体を代表値として記載している。

まず、無補修の最大荷重は、健全の最大荷重に比べて 18% 低下した。これは、20% の断面欠損の部分が早期に降伏に達するためである。

一方、ほとんどの補修ケースで、最大荷重は健全を上回る事がわかる。補修 Case3 では、1 体のみが健全の最大荷重を下回っている。これは、健全は降伏後も荷重が上がるためであり、図-6 に示したように、健全の初期降伏までは、健全よりも剛性が上がり、耐荷性能が回復している事がわかる。補修ケースごとに比較すると、最大荷重、剛性ともに補修 Case1 が最も大きく、補修

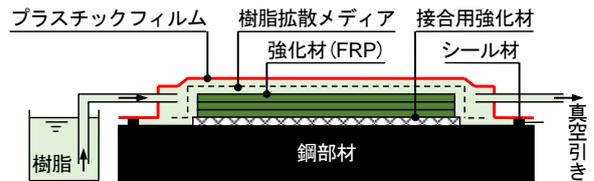


図-5 VaRTM 成形の概念図



写真-2 セットアップ (曲げ圧縮試験)

表-2 実験パラメータ

| 荷重条件 | モデル名    | 検討ケース    |
|------|---------|----------|
| 曲げ圧縮 | R00C0-A | 健全       |
|      | R20C0-A | 無補修      |
|      | R20C1-A | 補修 Case1 |
|      | R20C2-A | 補修 Case2 |
|      | R20C3-A | 補修 Case3 |
| 曲げ引張 | R00C0-B | 健全       |
|      | R20C0-B | 無補修      |
|      | R20C1-B | 補修 Case1 |
|      | R20C2-B | 補修 Case2 |
|      | R20C3-B | 補修 Case3 |

Case2 が補修 Case3 よりも若干小さいことがわかる。これは、不陸修正材の量が多いほど、CFRP が偏心して接着され、曲げ剛性が大きくなり、剛性、最大荷重が大きくなったと考えられた。

表-3 より、補修ケースの最大荷重のばらつきは十分小さく、変動係数はいずれの補修ケースでも 3%以内に収まっていることがわかる。したがって、圧縮強度のばらつきは小さいといえる。

写真-3 に、曲げ圧縮試験における破壊の状態を示す。すべての補修ケースにおいて、破壊形式は、断面欠損部における断面変化点での CFRP の圧縮破壊であった。補修 Case1 では、写真-3(a)より、鋼材と不陸修正材の間で

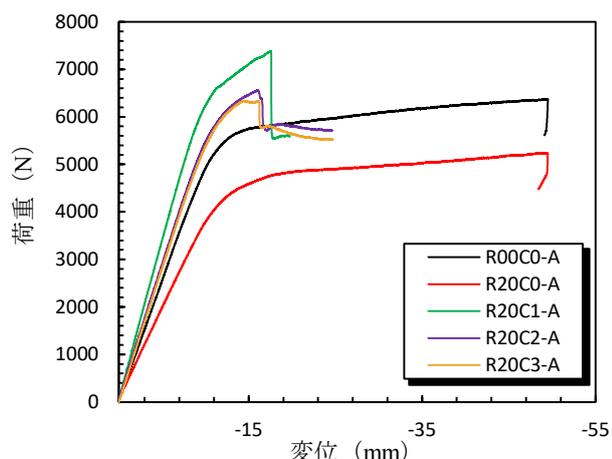


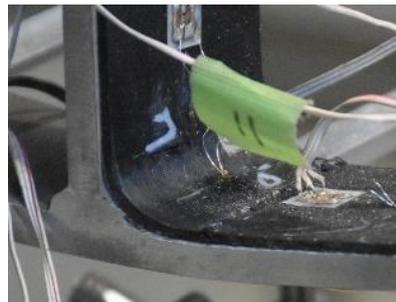
図-6 曲げ圧縮試験における荷重と鉛直変位の関係

表-3 曲げ圧縮試験における最大荷重のまとめ

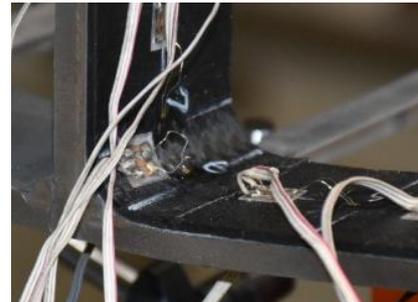
| モデル名    | 検討ケース    | 最大荷重 (kN) | 平均 (kN) | 変動係数  | 健全に対する割合 |
|---------|----------|-----------|---------|-------|----------|
| R00C0-A | 健全       | 6.37      | -       | -     | 1.00     |
| R20C0-A | 無補修      | 5.24      | -       | -     | 0.82     |
| R20C1-A | 補修 Case1 | 7.39      | 7.43    | 0.029 | 1.16     |
|         |          | 7.72      |         |       | 1.21     |
|         |          | 7.19      |         |       | 1.13     |
| R20C2-A | 補修 Case2 | 6.46      | 6.56    | 0.013 | 1.01     |
|         |          | 6.56      |         |       | 1.03     |
|         |          | 6.66      |         |       | 1.05     |
| R20C3-A | 補修 Case3 | 6.48      | 6.38    | 0.011 | 1.01     |
|         |          | 6.34      |         |       | 1.00     |
|         |          | 6.31      |         |       | 0.99     |



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

写真-3 曲げ圧縮試験における破壊の状態

はく離が生じたが、CFRP の圧縮破壊が曲げ耐力に支配的であった。図-6 に示した荷重と変位の関係より、CFRP に圧縮破壊が生じると荷重は急激に低下することがわかる。

#### b) 曲げ引張特性

表-4 に、曲げ引張試験における最大荷重のまとめを、図-7 に、荷重と鉛直変位の関係をそれぞれ示す。実験は、鉛直変位 50mm に達した時点、あるいは荷重が急激に低下した時点で終了とした。最大荷重は、各試験体における荷重の最大値で評価したが、健全、無補修については、鉛直変位が 50mm の時の荷重とした。荷重と変位の関係は、実験した 3 体のうち、最大荷重が 2 番目に高かった 1 体を代表値として記載している。

図-7 より、すべての補修モデルで、載荷の早い段階ではく離が生じ、健全体の最大荷重まで回復しないことがわかる。はく離時の荷重は後述するが、はく離が生じた後は、剛性が低下し、無補修の荷重-変位関係に徐々に近くなるのがわかる。したがって、はく離後は、補修ケースの耐力の差異はほとんど見られない。

表-4 より、補修ケースごとの最大荷重のばらつきは、非常に小さく、いずれも変動係数は 1%未満に収まっていることから、はく離後の荷重の増加は、ばらつきは小さいといえる。

写真-4 に、曲げ引張試験における破壊の状態を示す。すべてのケースにおいて、溶接接合部近傍の欠損部から

はく離が生じ、進展した。曲げ引張状態では、母材と補剛材との溶接接合部のはく離が曲げ耐力に支配的であることがわかった。これは、補剛材に引張力を载荷すると、鋼板に対してCFRPを引きはがす方向に力が働き、はく離に対しては最も厳しい条件となるためである。

補修 Case1, Case3 では、不陸修正材で凝集破壊が生じること、また、補修 Case2, Case3 ではCFRPの層間破壊が生じることもわかる。

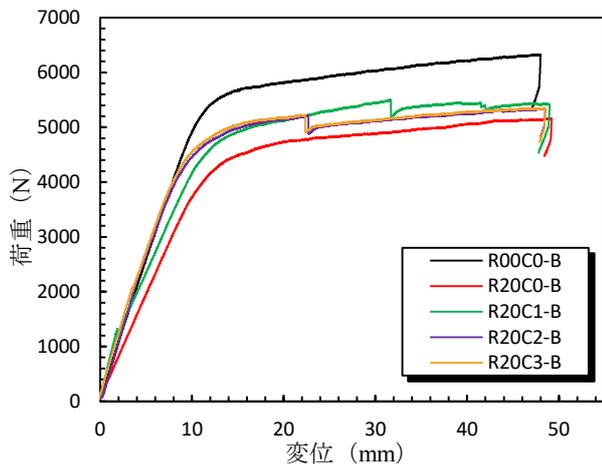


図-7 曲げ引張試験における荷重と鉛直変位の関係

表-5 はく離荷重のまとめ

| モデル名    | はく離荷重平均 (kN) | 変動係数  |
|---------|--------------|-------|
| R20C1-A | 1.47         | 0.028 |
| R20C2-A | 2.71         | 0.067 |
| R20C3-A | 2.27         | 0.011 |

表-4 曲げ引張試験における最大荷重のまとめ

| モデル名    | 検討ケース    | 最大荷重 (kN) | 平均 (kN) | 変動係数  | 健全に対する割合 |
|---------|----------|-----------|---------|-------|----------|
| R00C0-A | 健全       | 6.33      | -       | -     | 1.00     |
| R20C0-A | 無補修      | 5.16      | -       | -     | 0.82     |
| R20C1-A | 補修 Case1 | 5.50      | 5.51    | 0.001 | 0.87     |
|         |          | 5.50      |         |       | 0.87     |
|         |          | 5.51      |         |       | 0.87     |
| R20C2-A | 補修 Case2 | 5.34      | 5.33    | 0.002 | 0.84     |
|         |          | 5.35      |         |       | 0.85     |
|         |          | 5.32      |         |       | 0.84     |
| R20C3-A | 補修 Case3 | 5.35      | 5.39    | 0.006 | 0.85     |
|         |          | 5.39      |         |       | 0.85     |
|         |          | 5.43      |         |       | 0.86     |



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

写真-4 曲げ引張試験における破壊の状態

表-5 に、はく離荷重のまとめを示す。表-5 より、はく離荷重は健全体の最大荷重に比べて低く早期であること、すべてのケースで変動係数が 7%以内に収まっており、はく離強度のばらつきは小さいことがわかる。

## 5. 曲げ引張試験の解析的検討とはく離の評価

### (1) はく離強度の向上を目的とした解析的検討

以上の実験結果から、曲げ圧縮試験では、補修ケースに関わらず性能回復が確認されたが、曲げ引張試験では、隅角部からはく離が生じ、性能回復に至らないことがわかった。そこで、隅角部からはく離挙動の評価と隅角部における接着剤や不陸修正材の応力緩和を目的として、有限要素解析を行った。

接着接合部の応力緩和については、溶接接合部に円弧状の不陸修正 (以下、R加工とよぶ) を施した上で、CFRPの接着を行うことを想定した解析モデルを作成し、補修ケースとR加工の半径 ( $r=20, 30\text{mm}$ ) をパラメータとして、解析的に検討した。表-6 に、検討パラメータを示す。補修 Case3 のR加工の半径  $30\text{mm}$  では、すりつけ部が補修 Case2 と同じ形状になるため、作成していない。なお、本検討では、曲げ引張試験についてのみ検討した。

### (2) 解析モデルと解析条件

解析には、汎用有限要素解析ソフト Msc Marc 2018 を用いて、実験での 3 点曲げ载荷条件に基づいてモデル化

し、弾塑性有限要素解析により、力学挙動、接着層のはく離を検討する。試験体を平面ひずみ状態とみなして、2次元平面解析とした。解析モデルは、4節点シェル要素で作成し、厚さは、試験体の幅方向と同じ寸法の60mmを設定した。図-8に、解析モデルの接合部の拡大図を、図-9に、境界条件をそれぞれ示す。

溶接ビード部は、実際には、若干丸みを帯びた形状であるが、ここでは簡便に、直角二等辺三角形でモデル化した。補修 Case3 の R 加工半径 20mm (C3r20) のモデルでは、すりつけ部との接合部で折れ曲がる点が生じないように、半径 10mm でフィレットしている。要素分割は、鋼材と R 加工部の不陸修正材では自動分割とした。その他の材料では、長方形および平行四辺形に分割した。最小要素寸法は約 0.07mm×0.2mm である。要素寸法は、CF シートの厚さ 0.217mm を基準とし、CF シートを厚さ方向に 2 分割したときにアスペクト比が 1:2 程度になるようにした。なお、ガラス繊維のチョップドストランドマット (以下、CSM) のアスペクト比は、要素数や解析時間を考慮して、1:3 程度とした。

荷重は、補剛材の上部に分布荷重を与えた。つかみ部は、実験と同様に 80mm とし、水平方向に固定することで再現した。支点は両方ともローラー支点とした。

表-6 解析の検討パラメータ

| モデル名  | 補修ケース | R 加工半径(mm) |
|-------|-------|------------|
| R00C0 | 健全    | -          |
| R20C0 | 無補修   | -          |
| C1r20 | Case1 | 20         |
| C2r20 | Case2 | 20         |
| C3r20 | Case3 | 20         |
| C1r30 | Case1 | 30         |
| C2r30 | Case2 | 30         |

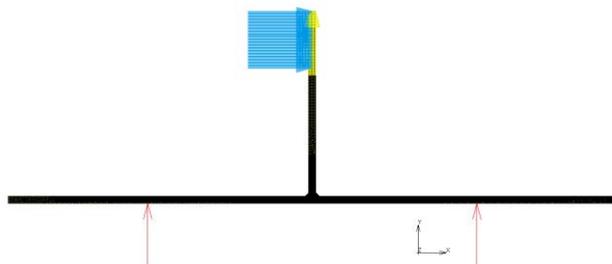


図-9 解析モデルにおける境界条件

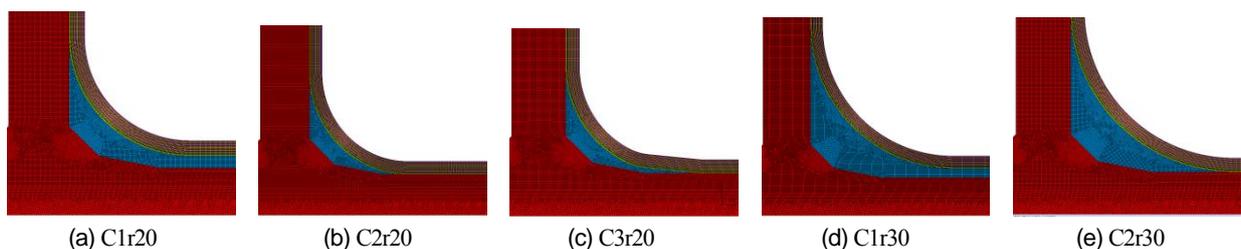


図-8 解析モデルの接合部の拡大図

図-10に、積層CFシート、CSMのモデル化を示す。CFRPが接着された部分については、CFシートと接着樹脂を交互に重ねることでモデル化した。

表-7に、材料物性値を示す。使用材料は実験で用いたものと同じである。鋼材の構成則はバイリニア型とし、鋼材の降伏後の硬化係数は、鋼材の弾性係数の1/100とした。CFシートは直交異方性を考慮し、弾性体とした。含浸接着樹脂、接着剤は等方弾性体とした。なお、別途実施した、接着接合部の試験結果<sup>7)</sup>より、接着層の主応力が40N/mm<sup>2</sup>となった時点ではく離と判断し、解析ではく離荷重を評価した。含浸接着樹脂、接着剤の主応力は、解析における最大主応力で評価した。

### (3) 検討の結果と考察

図-11に、荷重と鉛直変位の関係を、表-8に、はく離荷重のまとめをそれぞれ示す。図-11には、健全体と無補修体は実験値も併記している。マーカーは、はく離の位置を示している。■はr20、▲はr30である。

図-11より、健全体と無補修体の挙動は、解析値と実験値でよい一致を示すことから、モデル化は妥当であるといえる。r30では、すべてのケースにおいて、目標値で

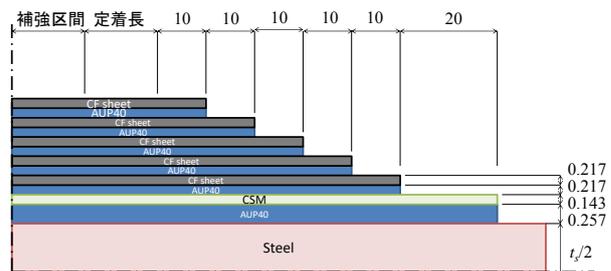


図-10 積層CFシート、CSMのモデル化

表-7 材料物性値

| 材料     | 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比            |
|--------|---------------------------|------------------|
| 鋼材     | 195000                    | 0.286            |
| 含浸接着樹脂 | 3430                      | 0.39             |
| 不陸修正材  | 3600                      | 0.3              |
| CSM    | 18750                     | 0.3              |
| CF シート | $E_1=440000$              | $\nu_{12}=0.005$ |
|        | $E_2=8000$                | $\nu_{23}=0.005$ |
|        | $E_3=8000$                | $\nu_{31}=0.34$  |

ある健全体の全塑性時の荷重の理論値5617Nより大きい荷重ではく離が生じるため、健全体の性能まで回復すること、r20 に比べて不陸修正材の厚さが厚くなり、r20 よりも曲げ剛性が高くなることからわかる。

表-8 より、補修ケースごとに比較すると、補修 Case1 では、補修 Case2、補修 Case3 よりもはく離荷重が大きいため、最も効果的な補修ケースと R 加工半径の組み合わせは、補修 Case1 の R 加工半径 30mm であった。なお、R 加工半径が大きいほど、はく離に対する効果が高くなると考えられるが、施工性の観点から、できるだけ小さい R 加工半径が望ましいと考える。

図-12 に、はく離荷重時における不陸修正材と接着用樹脂材の最大主応力のコンタ図を示す。図-12 より、全体の傾向として、すりつけ部の断面変化点付近で接着用樹脂材の最大主応力が大きくなり、その位置ではく離が生じることがわかる。これは、写真-4 に示した実験ではく離は生じる位置と概ね一致していることから、はく離が生じる位置の予測は可能であるといえる。

図-13 に、はく離荷重時における接着層の最大主応力分布を示す。接着層は、1 層目の接着用樹脂材に着目している。図より、すべてのケースで、最大主応力は、ピークを迎えてから急激に下がる分布となることがわかる。また、補修 Case2、補修 Case3 では、補修 Case1 に比べて、最大主応力に明瞭なピークが見られること、R 加工半径 20mm は、R 加工半径 30mm に比べてその傾向が強いことがわかる。これは応力集中に起因していると考えられる。したがって、不陸修正材による平坦化とより大きな R 加工半径の付与により、応力集中が緩和されることが予測される。補修 Case3 の R 加工半径 20mm では、最も応力集中の影響が大きい。これは、前述したように、この解析モデルでは、部分的に半径 10mm でフィレットしており、その部分で応力集中しているためである。このことから、R 加工の半径によっても応力集中の度合いが変化するため、実際の施工時でも注意する必要がある。

## 6. まとめ

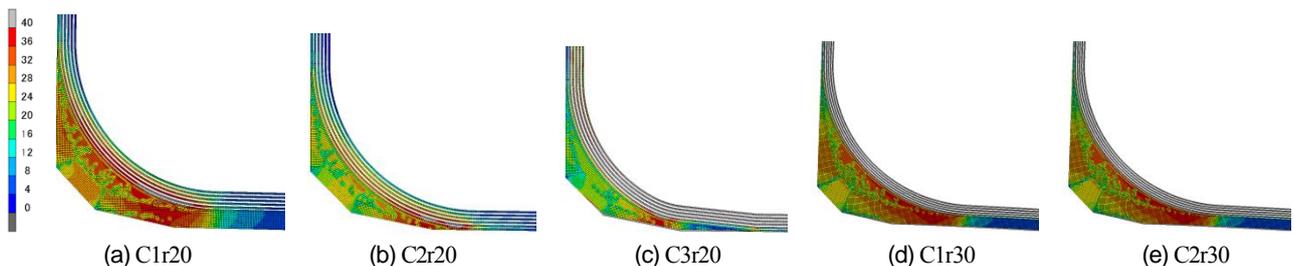


図-12 はく離荷重時における接着用樹脂材と不陸修正材の最大主応力コンタ図 (N/mm<sup>2</sup>)

補剛材の溶接接合部近傍に断面欠損を有する鋼部材の CFRP 接着補修による曲げ耐力の回復を目的として、実験的、解析的検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 補剛材から断面欠損部にかけて CFRP 補修を施すことで、曲げ圧縮試験では曲げ耐力が回復すること、

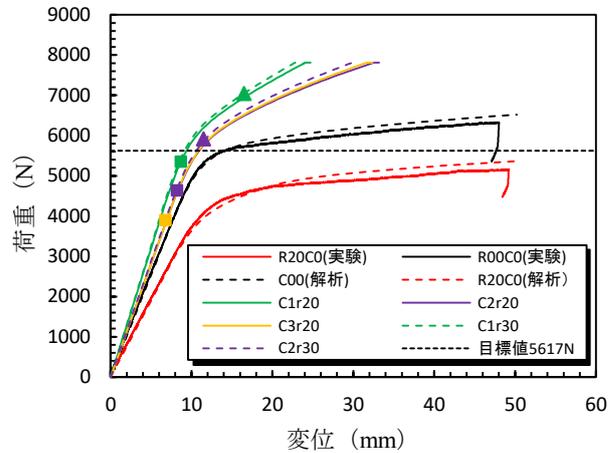


図-11 荷重と鉛直変位の関係

表-8 はく離荷重のまとめ

| モデル名  | はく離荷重 (kN) | 目標値に対する割合 |
|-------|------------|-----------|
| C1r20 | 5.34       | 0.97      |
| C2r20 | 4.63       | 0.82      |
| C3r20 | 3.89       | 0.69      |
| C1r30 | 7.04       | 1.25      |
| C2r30 | 5.92       | 1.05      |

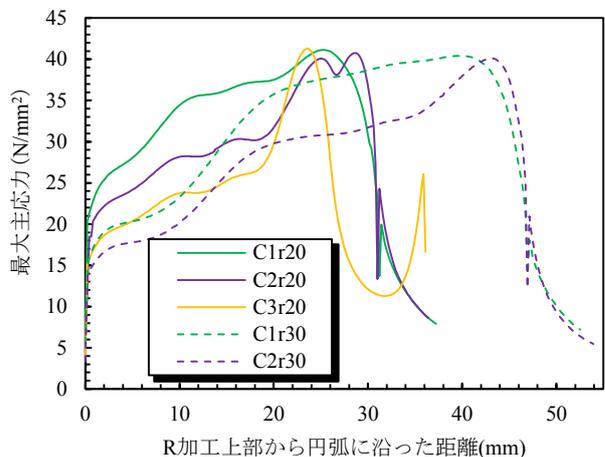


図-13 接着層の最大主応力分布

CFRP の曲げ圧縮破壊が最大荷重に支配的であることが確かめられた。

- (2) 曲げ引張試験では、低い荷重で溶接接合部近傍からはく離が生じ、今回の補修方法においては、健全の性能までは回復しないことが確かめられた。
- (3) 接着接合部に円弧状の不陸修正を施すことではく離強度の向上を解析的に検討した結果、不陸修正材で平坦にした上で(補修 Case1)、R加工半径 30mm とした場合が最も効果が大きく、健全の性能まで回復が見込めることがわかった。

今後の課題として、解析的な検討で、提案した補修方法について、実験的な検討を行って、はく離強度の向上効果を検証する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修補強工法設計・施工マニュアル，p.32，2013.10
- 2) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，pp.55-56，2018.7
- 3) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宣央，秀熊佑哉，堀本歴，

長井正嗣：鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を用いた補修工法の実験的研究，構造工学論文集 A，Vol.58A，pp.710-720，2013.4

- 4) 松井孝洋，松本幸大，古賀惟彬，服部明生，山口信之，山田勝：断面欠損を有する鋼管部材の CFRP による補修効果，鋼構造論文集，Vol.21，No.83，pp.1-10，2015.10
- 5) 小林洗貴，近藤諒翼，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：真空含浸工法を応用した CFRP 接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.73，No.5，pp.II\_20-II\_31，2017.5
- 6) 松山晃大，佐藤潤，タイウイサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による圧縮力を受ける鋼部材の補修・補強に関する研究，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.74，No5，pp.II\_67-II\_80，2018.5
- 7) タイウイサル，小沢拓弥，譚暢，中村一史，松井孝洋：積層した炭素繊維シートの VaRTM 成形・接着による面外ガセット溶接継手の疲労耐久性の向上，土木学会 第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.103-109，2018.11

(Received August 30, 2019)

## RECOVERY OF BENDING STRENGTH OF STEEL MEMBERS IN WELDED JOINTS TO STIFFENERS WITH SECTIONAL LOSS BY EXTERNALLY BONDED CFRP

Yujiro NISHIOKA, Hitoshi NAKAMURA, Takehiko TSUBOKAWA and  
Takahiro MATSUI

The purpose of this study is to develop a method to recover performance by integrating CFRP and steel members with sectional loss using the vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM) technique. The effect of arrangement of CFRP on the recovery of bending strength has been experimentally investigated for steel members with trapezoidal sectional loss near the weld joint of stiffeners. The three-point bending tests have been conducted. Three cases of repair method have been prepared and examined. As a result, by arranging CFRP with axial rigidity equivalent to the amount of sectional loss, it was found that the initial performance of the specimen without sectional loss can be recovered by all repair methods when CFRP is in a bending compressive state. However, when CFRP is in a bending tensile state, it was found that debonding occurred at the corners early and the performance can not be recovered. Furthermore, an FE analysis has been conducted to improve the debonding strength. As a result, it was found that the processing of rubbing the resin to the corner was effective to improve the debonding strength.