

断面欠損した鋼材と補剛材の溶接隅角部の CFRP接着による補修に関する検討

西岡 裕次郎¹・タイ ウィサル²・中村 一史³・坪川 毅彦⁴・松井 孝洋⁵

¹ 学生会員 東京都立大学大学院 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

² 正会員 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科 博士研究員 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: visal-thay@tmu.ac.jp

³ 正会員 東京都立大学大学院 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

⁴ 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

⁵ 正会員 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、海洋構造物に関して真空含浸工法 (VaRTM) の成形技術を適用して、CFRP を腐食・減肉した鋼部材に接着し、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解析的、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。補修ケースを 3 種類用意し検討した。その結果、CFRP が曲げ引張状態になる場合、隅角部へ樹脂をすりつけたうえで、18 層の炭素繊維シートを接着することで健全体の最大荷重まで回復することがわかった。

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

1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic ; 以下、CFRP) 接着工法^{1)~4)}は、鋼部材に樹脂を用いてCFRPを接着するため、火気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、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、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) の船体構造における合理的な補修工法として、真空含浸工法 (VaRTM) の成形技術⁴⁾⁵⁾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。

過年度までに、FPSO のボトムプレートとロンジ材をモデル化した補剛材を有する試験体を用いて 3 点曲げ試験を行った⁶⁾。補修方法を 3 ケース用意し、タンク内の

漲水の有無により外板に加わる海水圧が正負に変化することを考慮して、曲げ圧縮状態と曲げ引張状態の 2 種類の載荷方向で試験を行った。その結果、曲げ圧縮状態では、すべての補修ケースで健全体まで性能が回復したが、曲げ引張状態では溶接接合部の隅角部からはく離が生じ、性能回復には至らなかった。

そこで本研究では、曲げ引張状態において、CFRP のはく離を防止して、性能回復を図るための設計条件を把握することを目的とし、実験的、解析的な検討を行った。はじめに、隅角部における CFRP ・不陸修正材の曲率半径を大きくすることで、接着接合部の応力を緩和することを検討した。次に、CFRP の剛性を増加することで、接着接合部の応力を低減することを試みた。

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とよばれる補剛材の溶接接合部の近傍に腐食が生じ、板厚減肉に対する補修が必要となる場合を想定して、CFRPの適切な配置と接着を検討し、性能回復を試みた。一般に、対象とするロンジ材ウェブ板厚は10～12mm、ボトムプレート板厚は17～20mmである。

写真-1に、FPSO船体構造の内部における腐食状況の一例を示す。ロンジ材近傍のボトムプレートに一樣な腐食が生じていることがわかる。本検討では、写真-1のような腐食に対する補修を想定し、モデル化した。

本検討では、ロンジ材近傍のボトムプレートで支配的であると考えられる水圧による曲げ作用に着目し、簡便な載荷実験で評価することとした。ここでは、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それぞれ検討した。しかしながら、前述したように、曲げ引張の条件では、はく離が先行し、性能回復に至らなかった。そこで、本研究では、曲げ引張による3点曲げ試験を行うこととした。

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、補修作業が可能な、補剛材の取り付け側からの補修を検討することとした。

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。補剛材の溶接接合部はすみ肉溶接とし、溶接の脚長は6mm(試験体の実測値7mm)とした。対象とするボトムプレートは様々な作用を担う部材であるが、最も重要な強度要件である面外荷重による板曲げ強度に対するCFRP補修効果を検討するため、厚さ10mm、幅60mm試験体を用いた3点曲げ試験とした。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。これは、写真-1に示したように、実構造物において、補剛材近傍のボトムプレートが腐食により断面欠損した場合を想定したものである。試験体の製作では、断面欠損を切削加工したのち、補剛板を溶接接合した。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。補剛される鋼板、補剛材ともに、鋼種はSM490Aであり、降伏強度411.9N/mm²、引張強度568.0N/mm²、ヤング係数195.0kN/mm²である。

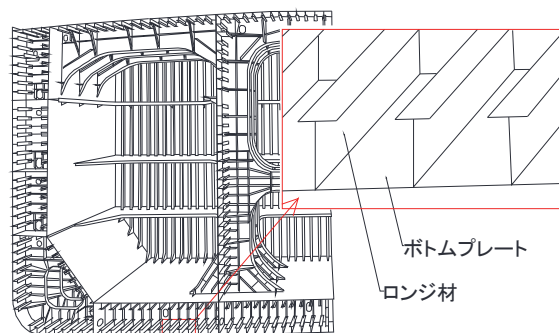


図-1 Double Hull 構造と対象部材

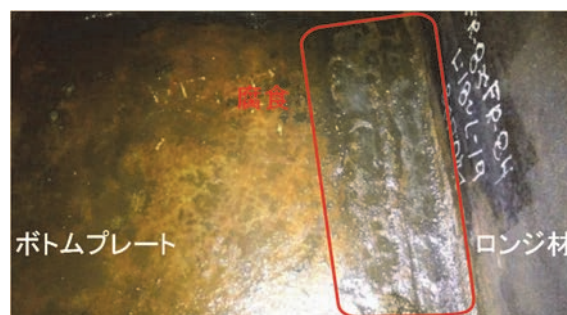
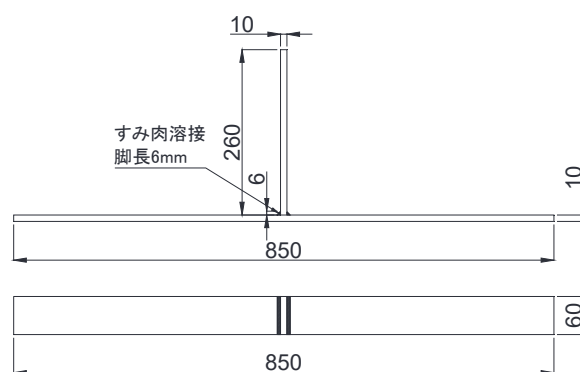
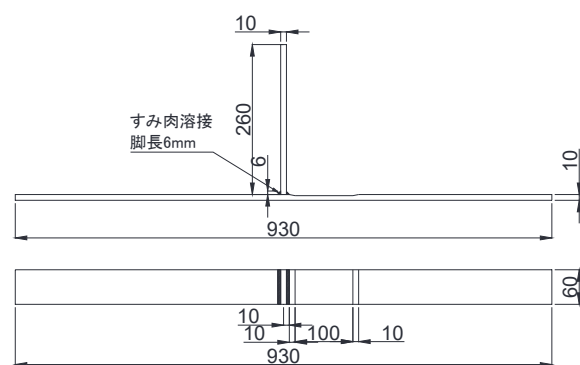


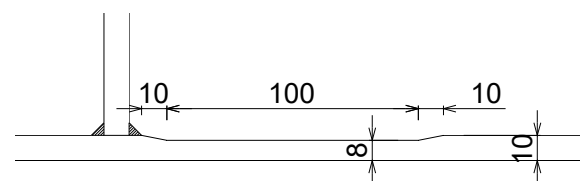
写真-1 FPSO 船体構造の内部における腐食状況の一例



(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

(2) CFRP 補修方法

補修の方針として、炭素繊維（以下、CF）シートの弾性係数を考慮した、鋼材の減肉厚さ（2mm）と等価な剛性を付与することとして、CF シートの必要厚さおよび必要積層数を次式により算出した。

$$A_{sl} \leq A_{cf,s} \quad (1)$$

$$A_{cf,s} = t_{cf,s} \cdot B_{cf} \quad (2)$$

$$t_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot t_{cf} \cdot n \quad (3)$$

ここで、

A_{sl} : 鋼部材の補修・補強必要断面積 (mm²)

$A_{cf,s}$: CF シートの鋼換算断面積 (mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

E_{cf} : CF シートの弾性係数 (N/mm²)

B_{cf} : CF シートの幅 (mm)

t_{cf} : CF シート 1 枚あたりの厚さ (mm)

n : CF シートの積層数 (枚)

$t_{cf,s}$: CF シートの鋼換算厚さ (mm)

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/mm²、弾性係数 440kN/mm²）を用いた⁴⁾⁵⁾。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。

補剛される鋼材側のCFRP 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配置し、端部のはく離が生じないようにした。実構造物では端部のはく離を考慮する必要があるが、曲げ作用によるはく離は、曲げ作用が小さくなる位置まで定着長を十分確保することで対応できる。したがって、本検討では、減肉部および接合部の耐力のみを対象とした。補剛材側の定着長は、作用力は小さいが、文献2)の軸方向力に対する算定式に基づき算出し、78mm とした。

そのうえで5層のCFRP を真空含浸工法（VaRTM）により接着した。図-3 に、VaRTM の概念図を示す。

不陸修正材には E258R（弾性係数 3.6kN/mm²、可使用時間 23℃で 85 分）を、接着用樹脂材料には AUP40（弾性係数 3.4kN/mm²、可使用時間 23℃で 60 分）を用いた。

(3) 試験方法とセットアップ

荷重条件は3点曲げ載荷とした。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載荷する方法とした。CFRP 側が曲げ引張状態となるように、補剛材側のつかみと治具が離れていく方向に載荷した。写真-2 に、セットアップの状況を示す。

載荷試験には、島津サーボパルサ（静的容量±240kN）を使用した。載荷速度は 5mm/min とした。

本検討では、補修試験体の性能回復を目的としており、断面欠損のない、健全体が全塑性となる時の荷重を目標値としている。目標値は、単純はりの中央に集中荷重を作用させた際の断面計算により、以下の式から求めた。

$$Z_p = bt^2/4 \quad (4)$$

$$M_p = \sigma_y \times Z_p \quad (5)$$

$$P_p = 2 \times M_p / L_t \quad (6)$$

ここで、

t : 鋼板の板厚 (mm)

b : 鋼板の幅 (mm)

Z_p : 塑性断面係数 (mm³)

σ_y : 鋼材の降伏強度 (N/mm²)

M_p : 全塑性モーメント (Nmm)

L_t : 支点から溶接止端部までの距離 (mm)

P_p : 全塑性時の荷重 (N)

試験体は補剛材を有するため、鋼板中央ではなく溶接止端部がはじめに降伏すると想定している。その結果、目標とする荷重 P_p は 5.62kN となった。

4. 隅角部の曲率半径がはく離に及ぼす影響

(1) 曲率半径の設定

過去に行った3ケースの補修方法による試験では、低い荷重の段階で隅角部からはく離が生じた。補修ケース

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
鋼材の減肉厚さ	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

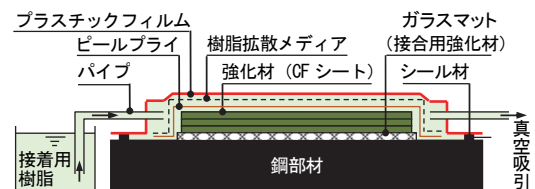


図-3 VaRTM による CFRP 接着補修の概念図



写真-2 セットアップの状況

と結果の詳細は文献6)を参照されたい。ここでは、隅角部での曲率半径に着目して、曲率半径を大きくすることによる応力緩和がはく離に及ぼす影響を検討した。

まず、過去に行った試験体の曲率半径を計測し、本検討に用いる曲率半径を決定した。写真-3に、曲率半径の計測の様子を示す。計測は試験の後に行ったため、破壊が生じており、簡便な計測である。写真-3には、今回検討した曲率半径30mmの試験体も併記している。表-2に、曲率半径の計測結果を示す。過去の3ケースはそれぞれ、曲率半径が概ね10mmと20mmであった。そこで、本検討では、曲率半径を30mmとしたものをパラメータとして追加し、曲率半径を大きくすることによるはく離への影響を検討した。

隅角部の処理方法として、円弧状に不陸修正材を施す（以下、R加工）ことにより曲率半径30mmを事前に作製し、そのうえでCFRPを接着した。接着方法はVaRTMによった。図-4に、CFシートとひずみゲージの配置を示す。

(2) 結果と考察

a) 荷重と変位の関係

表-3に、試験パラメータと荷重のまとめを、図-5に、荷重と鉛直変位の関係をそれぞれ示す。図中には、解析結果も併記している。

図-5より、初期の剛性は健全よりも高く、弾性的に挙動しているが、荷重5.00kNでR加工部のCFRP下ガラスマット層が破壊し、荷重が急激に低下した。その後は補修効果が失われ剛性が低下し、無補修と同程度の荷重増加となり、最大荷重は5.11kNにとどまった。なお、試験は回復が見られないと判断し、変位50mmまで行わずに載荷を停止した。

b) 破壊の状況

写真-4に、破壊の状況を示す。赤線に示すように、荷重5.00kNでCFRP下のガラスマット層から破壊が生じ、補剛される鋼材まで達したあと、鋼材面に沿って進展した。破壊は急激に鋼材面まで進展し、脆性的であった。その際、荷重が急激に低下し、補修効果が失われる結果となった。

c) 荷重とひずみの関係

図-6に、荷重とひずみの関係を示す。図-6より、中央から20mm、70mm位置（それぞれ20%欠損端部と中央

表-2 曲率半径のまとめ

曲率半径			
ケース 1	ケース 2	ケース 3	本検討
10mm	20mm	20mm	30mm

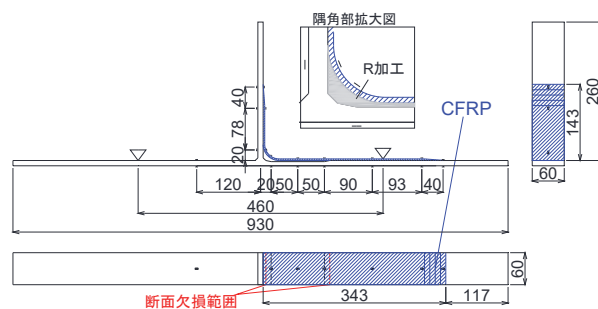


図-4 CFシートとひずみゲージの配置

表-3 試験パラメータと荷重のまとめ

試験体名	検討ケース	最大荷重 (kN)	はく離荷重 (kN)
R00	健全	6.33	—
R20	無補修	5.16	—
R20r30	5層, R加工 30mm	5.11	5.00

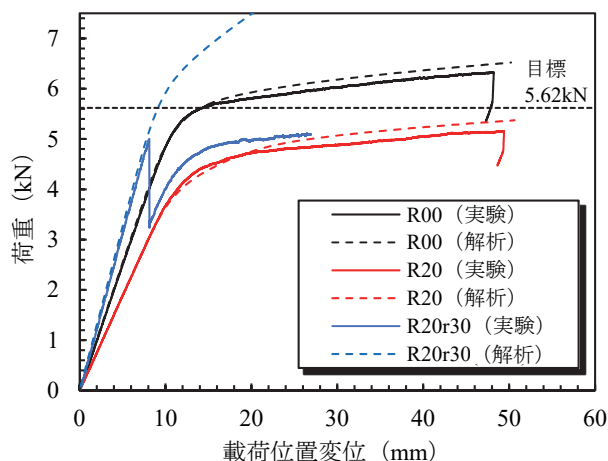
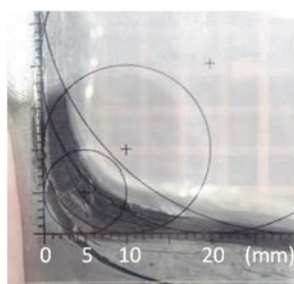
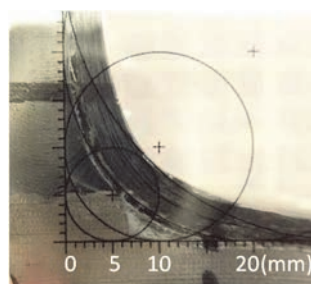


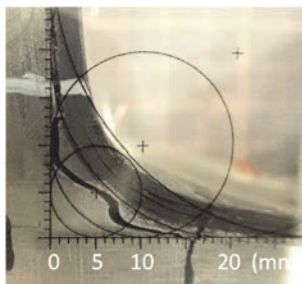
図-5 荷重と鉛直変位の関係



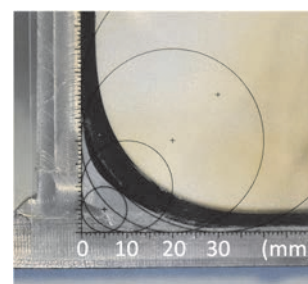
(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3



(d) 曲率半径 30mm

写真-3 曲率半径の計測

部に相当)ともに荷重が急激に低下する 5.00kN まではほぼ弾性的に挙動していることがわかる。荷重が低下した後、ひずみが増加するものの荷重は増加していない。

中央から 20mm と 70mm を比較すると、実験値では曲げモーメントが大きい 20mm 位置よりも 70mm 位置の方が、大きなひずみが生じているため、隅角部の R 加工により高い剛性が付与されていることがわかる。しかし、解析値では中央から 20mm 位置の方が大きなひずみが生じている。これは、試験体作製時の隅角部での CFRP の厚さ管理が難しく、解析モデルよりも厚くなっているためと考える。

(3) はく離強度の評価

以上の結果より、R 加工 30mm、5 層の積層では健全体のパフォーマンスまでは回復しないことがわかった。そこで、隅角部のはく離強度の評価を行った。はく離強度は、これまでに行った実験条件に基づいて解析的に検討し、実験で確認されたはく離荷重において、接着用樹脂材料に生じる最大主応力を求めることで、はく離の限界値とした。

a) 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 点曲げ載荷条件に基づいてモデル化し、弾塑性有限変位解析により、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、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、奥行き方向の寸法は試験体の幅方向と同じ 60mm とした。図-7 に、解析モデルの隅角部拡大図を示す。

溶接ビード部は、実際には、若干丸みを帯びた形状で

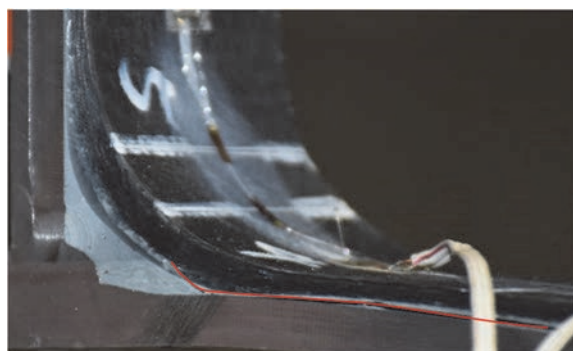


写真4 破壊の状況 (R20r30)

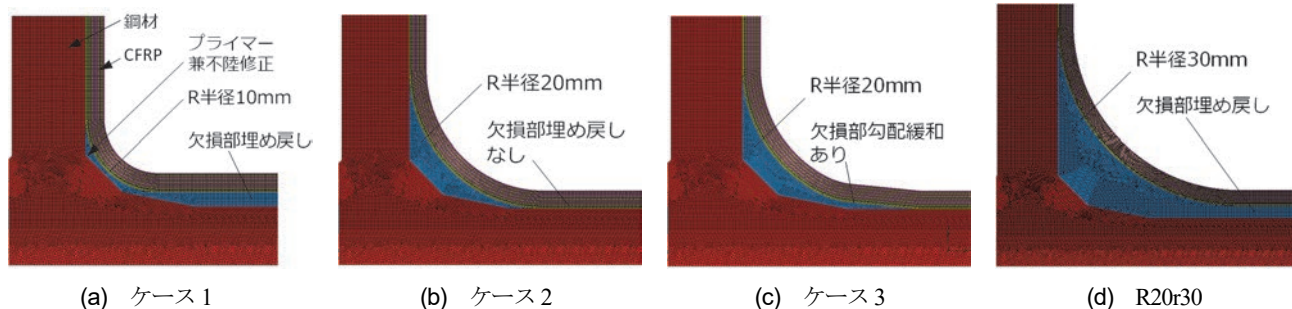


図-7 解析モデルの隅角部拡大図

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。要素分割は、鋼材と R 加工部の不陸修正では自動分割とした。その他の材料では、長方形および四辺形に分割した。CF シート、ガラスマット、接着用樹脂材はそれぞれ厚さ方向に 2 分割しており、アスペクト比が 1:2 程度となるように分割している。

図-8 に、境界条件を示す。図中の赤い矢印、青い矢印、黄色い矢印はそれぞれ鉛直方向拘束、水平方向拘束、鉛直方向荷重の境界条件を示している。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、水平方向に拘束することで再現した。支点は、実験と同様に、両方ともローラー支点とした。

図-9 に、積層 CF シート、ガラスマットのモデル化を示す。CFRP が接着された部分は、CF シートと接着用樹脂材を交互に重ねることでモデル化した。各層は厚さ方向に 2 分割している。はく離強度の評価は、ガラスマット層下の接着用樹脂材の最大主応力に着目して行った。

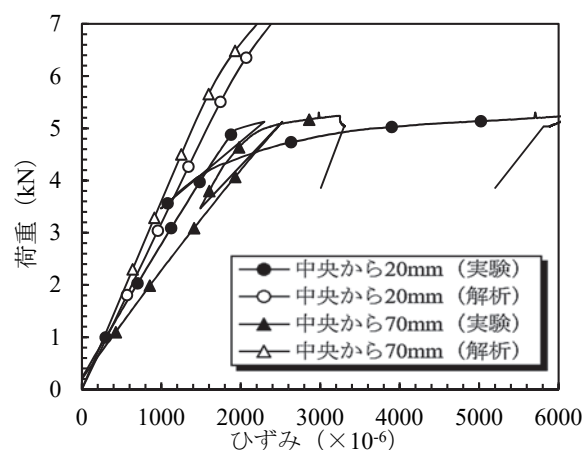


図-6 荷重とひずみの関係

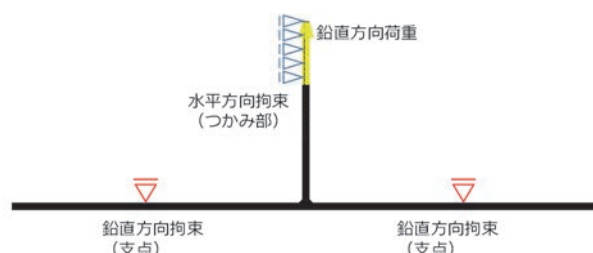


図-8 解析の境界条件

表-4 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。不陸修正材、接着用樹脂材料は等方弾性体とした。

b) 検討結果

図-5 の荷重と変位の関係より、解析と実験がよく一致していることから、解析結果は妥当であると考え、はく離強度の評価を行った。

図-10 に、曲げ試験はく離荷重と接着用樹脂はく離強度の関係を示す。ここでは、実験ではく離荷重時におけるガラスマット層下の接着用樹脂材に作用する最大主応力のピーク値をはく離強度として評価した。図-11 に示す、最大主応力のコンタ図と方向より、R 加工部で最大の主応力が生じること、引きはがす方向に作用することがわかる。これは実験ではく離の状況と概ね一致することから評価は適切であると考え。はく離強度の平均値は 22.3N/mm^2 であり、変動係数は 9% であった。荷重の範囲に対して比較的に小さいばらつきであるといえた。以上の結果から、以降の解析的検討では、はく離強度として 22.3N/mm^2 を用いることとした。

(4) はく離防止を目的とした解析的検討

隅角部ではく離を防止するために、積層数と R 加工半径をパラメータとした解析的な検討を行った。

R 加工半径 30, 35, 40mm に対して、それぞれ積層数を 5 層から一層ずつ増やし、目標値まではく離が生じない積層数を検討した。はく離は、前節の検討から求めたはく離強度を用いて評価した。はく離荷重は、ガラスマット層下の接着用樹脂材料に生じる最大主応力のピーク値がはく離強度に達したときの荷重として評価した。モデルの作製を簡便にするために、補剛材側の端部は段差を設けず、一定の長さに積層するモデルとして解析を行った。

図-12 に、CF シート積層数とはく離荷重の関係を R 加工半径ごとに示す。なお、図中には、5 章で述べる実験の結果も併記 (×印) している。R 加工半径 30mm では

18 層で、35mm では 12 層で、40mm では 7 層で目標値の曲げ耐力の荷重まではく離しないことがわかった。はく離荷重の向上効果は、CF シートの積層数よりも R 加工半径による影響が大きいことが確かめられた。

しかしながら、その後、端部からのはく離防止のために、補剛材側段差ありの実験の試験体と同様のモデルを解析した結果、はく離荷重が下がる傾向となった。R 半径 30mm, 18 層のモデルにおいて、段差なしではく離荷重が 5.73kN であったのに対し、段差ありでは 5.60kN となった。目標の荷重は 5.62kN であるため、解析上では及ばないことがわかった。これは、補剛材側の段差を設けることで CFRP 全体の長さが長くなり、CFRP 全体の剛性も高くなったため、はく離が生じやすい状態となったと考えられる。表-5 に、解析によるはく離荷重を示す。なお、このことは試験体作製後に確認したため、実験は 18 層のままで行った。

以上の結果から、5 章では、剛性を大きくすることによるはく離に対する影響を調べるために、R 加工半径 30mm, 5 層の試験体に 13 層の CF シートを追加で接着した試験体について、実験的に検証した。さらに、追加



図-9 積層 CF シート、CSM のモデル化

表-4 材料物性値

材料	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	195000	0.286
接着用樹脂材料	3430	0.39
不陸修正材	3600	0.3
ガラスマット	18750	0.3
CF シート	$E_1=440000$	$\nu_{23}=0.005$
	$E_2=8000$	$\nu_{31}=0.34$
	$E_3=8000$	$\nu_{12}=0.005$

E_1, E_2, E_3 : それぞれ長手方向、幅方向、厚さ方向の弾性係数
 $\nu_{23}, \nu_{31}, \nu_{12}$: それぞれ E_1, E_2, E_3 の方向に直交する断面のポアソン比

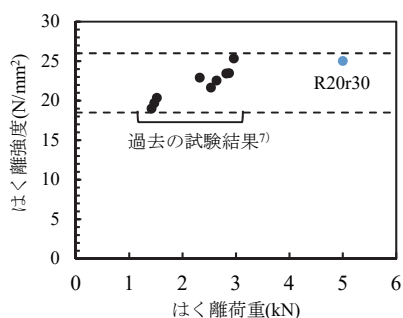


図-10 曲げ試験はく離荷重と接着用樹脂はく離強度の関係

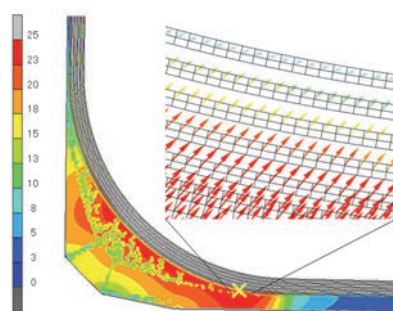


図-11 不陸修正材と接着用樹脂の最大主応力コンタ図と方向 (R20r30) (N/mm²)

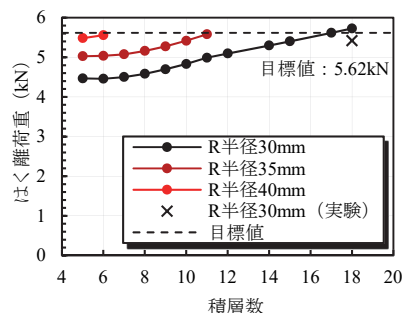


図-12 積層数とはく離強度の関係 (補剛材側 CFRP 段差なし)

13 層と等価な曲げ剛性を与える断面の補修ケースを用意し、2 種類の補修ケースについて実験を行った。

5. CFRP の剛性がはく離に及ぼす影響

4 章では、隅角部の曲率半径がはく離に及ぼす影響を検討した。ここでは、4 章で検討した試験体にさらに CF シートを積層することで、剛性を上げ、接着接合部のはく離に対する影響を検討する。

(1) 試験体の設計と作製

a) 試験体の設計

本検討では、2 種類の補修ケースについて実験を行った。表-6 に、試験パラメータを示す。

補修ケース R20r30_p8+ure は、R20r30_p8 の 18 層断面部と同等以上の曲げ剛性を与えることとして断面を設計した。図-13 に、各補修ケースの断面の概要を示す。図中の S 軸まわりの断面二次モーメント I_s について算出し、設計した。追加する CF シート積層数は 3 層に固定し、硬質発泡ウレタンの厚さをパラメータとして設計した。各ケースの断面二次モーメントは以下の式から算出した。なお、硬質発泡ウレタンの断面は断面二次モーメントの算出には無効とし、CFRP のみを有効としている

$$I_s = bh^3 / 3 \quad (7)$$

ここで、

I_s : S 軸まわりの断面二次モーメント (mm^4)

b : CFRP の幅 (mm)

h : CFRP の厚さ (mm)

その結果、硬質発泡ウレタンの厚さを 6.5mm とした。

b) 試験体の作製

図-14 に、CF シートとひずみゲージの配置を示す。図-14 (a)の段差は、解析から端部のはく離が生じないことを確認し、最適化のために最短の長さとしている。図-14 (b)のウレタン長さは、R20r30_p18 の 18 層部分の長さと同程度となるように決定した。その際、R20r30_p18 の施工誤差により 20mm ほどずれが生じたため、実際の長さに合わせて 85mm+30mm テーパーとした。

写真-5 に、R 加工部の補修状況を示す。写真-5(b)に示すように、硬質発泡ウレタンは、円弧状に沿わせるために、切込みを入れている。

(2) 結果と考察

a) 荷重の比較、荷重と変位の関係

表-7、図-15 に、最大荷重、はく離荷重の比較を、図-16 に荷重と変位の関係をそれぞれ示す。図-16 には解析結果も併せて示す。表-7 のはく離荷重は、最初に荷重が

表-5 解析によるはく離荷重の比較

R 加工半径 (mm)	積層数	補剛材側の段差	はく離荷重 (kN)	備考
30	18	あり	5.60	実試験体と同様の形状
30	18	なし	5.73	—

表-6 試験パラメータ

No.	試験体名	補修ケース
1	R20r30_p18	18 層, R 加工 30mm
2	R20r30_p8+ure	ウレタン材+8 層, R 加工 30mm

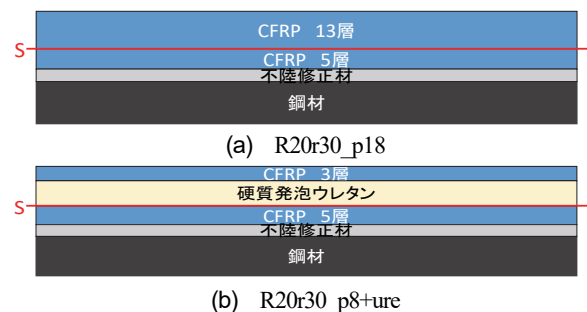


図-13 各補修ケースの断面の概要 (断面欠損部)

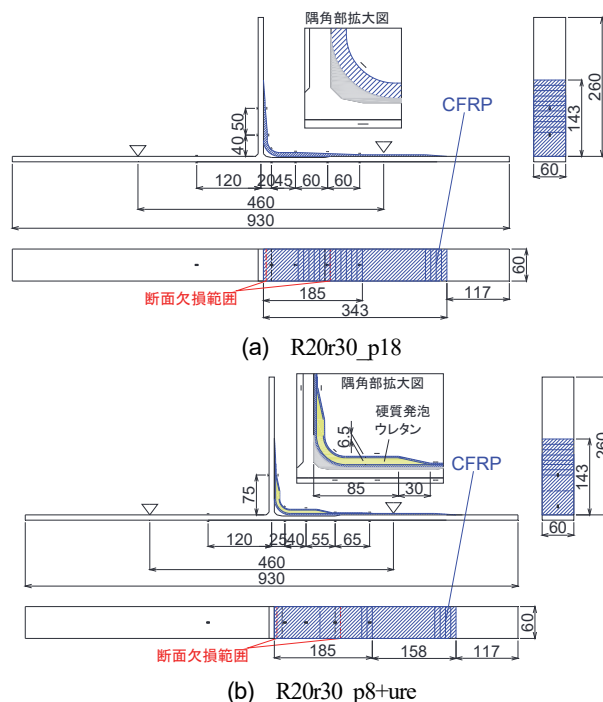


図-14 CF シートとひずみゲージの配置

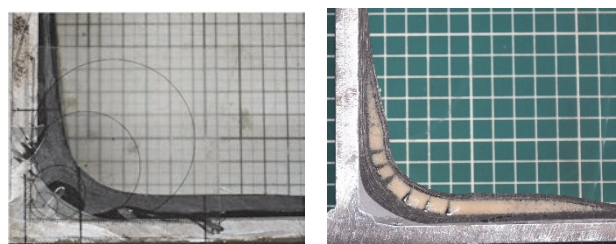


写真-5 補修後の状況

急激に下がったときの値とし、3章で検討した R20r30 の結果も併記している。

補修モデル R20r30_p8+ure では、最大荷重が目標値 5.62kN に届かなかった。これは、後述するが、ガラスマット層やウレタン材の接着面から破壊が生じ、その後の荷重が増加しなかったためである。はく離荷重は R20r30 と R20r30_p8+ure でそれぞれ、5.00kN と 5.09kN となり、両者は近い値であった。

補修モデル R20r30_p18 では、はく離荷重は 5.42kN であり、目標値 5.62kN にわずかに届かなかったが、最大荷重は、健全の最大荷重を上回ることがわかった。解析結果(図-12)より、はく離荷重は 5.60kN であることから、解析より、はく離荷重を概ね予測できるといえる。

図-16 より、荷重と変位の関係を比較すると、R20r30_p18 では、健全の剛性、最大荷重を上回ることがわかる。荷重 5.42kN で初期のはく離破壊が生じ、一旦、荷重が低下することがわかる。その後もはく離が生じる度に荷重の増減を繰り返すものの、健全を上回る荷重を保ちながら変形を続けた。

R20r30_p8+ure では、R20r30_p18 と同等の曲げ剛性を付与する設計である。初期の剛性は、健全を上回るものの、荷重の増加とともに、R20r30_p18 の剛性を下回り、R20r30 と同程度の剛性となることがわかる。剛性の詳しい評価は後述する。また、5.09kN で荷重が急激に低下してはく離し、その後は CFRP の補修効果が失われ、健全の荷重を上回らなかった。

b) 破壊の状況

写真-6 に、破壊の状況を示す。写真-6(a)の R20r30_p18 については、破壊が始まった箇所を目視で確認することは困難であったが、後述する荷重とひずみの関係から、赤線に示す補剛材部分での CFRP 下のガラスマット層から破壊が生じたと考えられる。その後、はく離は、隅角部の方向に鉛直に進展し、R 加工に沿って破壊したのち補剛される鋼材まで達した。補剛される鋼材の面に沿っての破壊は進展せずに、荷重の増加とともに補剛材側の破壊が大きくなった。そのため、補剛される鋼材側で CFRP の補修効果が大きく失われることはなく、荷重が健全体を上回ったと考えられる。R20r30_p18 は 18 層の CFRP による高い剛性と補剛材側の短い定着長により、補剛材側の CFRP がはく離したと判断された。また、ガラスマット層のはく離と並行して CFRP の層間にはく離も生じたが、それらは、性能回復に影響はなかった。

写真-6(b)の R20r30_p8+ure については、荷重 2.48kN で、ウレタン材と上側の CFRP 界面で破壊が生じた。荷重 5.09kN では、赤線で示す 1 層目 CFRP 下のガラスマット層で破壊が生じ、荷重が急激に低下した。はく離による破壊は、補剛される鋼材側へと進展し、補修効果が失われた。最終的に、上層部(1～5 層目まで)の CFRP

はウレタン材との境界部で破壊が生じた。

以上のことから、すべての補修モデルで、最終的に 1 層目 CF シート下のガラスマット層が破壊し、それらは

表-7 最大荷重、はく離荷重の比較

試験体名	補修ケース	最大荷重 (kN)	はく離荷重 (kN)
R00	健全	6.33	—
R20	無補修	5.16	—
R20r30	5 層, R 加工 30mm	5.11	5.00
R20r30_p18	18 層, R 加工 30mm	6.37	5.42
R20r30_p8+ure	ウレタン材+8 層, R 加工 30mm	5.53	5.09

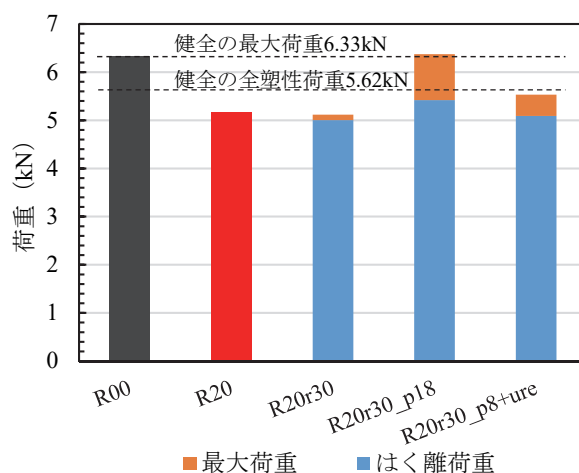


図-15 はく離荷重、最大荷重の比較

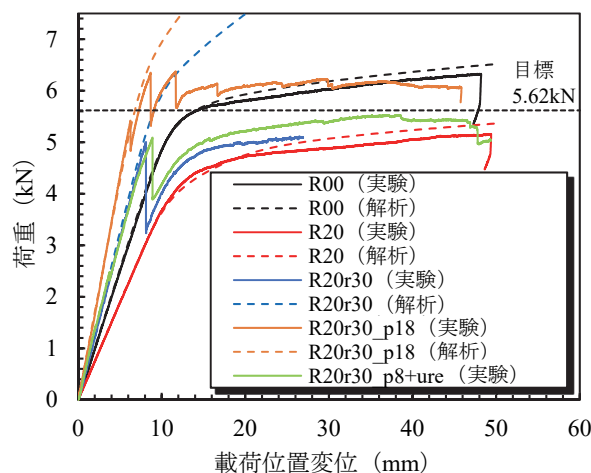


図-16 荷重と鉛直変位の関係

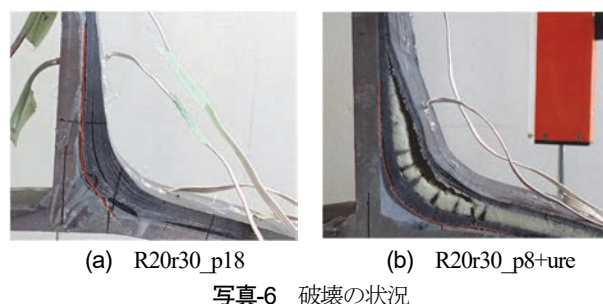


写真-6 破壊の状況

荷重の低下に影響を及ぼす破壊であること、隅角部や補剛材側でCFRP がはく離しても、補剛される鋼材の接着が確保されていれば、補修効果を急激に失うことはないことがわかった。

c) 荷重とひずみの関係

図-17 に、荷重とひずみの関係を示す。図-17 (b)は、CFRP 配置位置の都合により、R20r30 は中央から 70mm の位置のひずみを、R20r30_p18 と R20r30_p8+ure は中央から 65mm の位置のひずみを示している。図-17 (c)は、R20r30_p18 の補剛材側CFRP のひずみ挙動を示しているが、それぞれの試験体でひずみゲージを配置した位置が異なるため、比較は行っていない。

図-17 (a)より、中央から 20mm の位置すなわち R 加工部の CFRP のひずみ挙動を比較すると、R20r30_p18 はそのほかに比べてひずみが抑制されていること、5.42kN で一度荷重が下がった後も、ひずみ挙動が大きく乱れることはなく、線形的な挙動が部分的に見られる。このことから、CFRP が曲げ作用に対して荷重を伝達していたと考えられる。R20r30 は、5.00kN ではなく離後、剛性が失われていることがわかる。R20r30_p8+ure は、1.7kN ほどの段階から不規則なひずみ挙動となっている。荷重と変位の関係からはこの変状は確認できないが、撮影したビデオで確認すると、ウレタン側面の樹脂にわずかにき裂が生じていることがわかった。その後、2.48kN でウレタン上側と CFRP の界面が破壊した後、線形的な挙動を示すが、中央から 65mm 位置のひずみ挙動からは、荷重を伝達していないと考えられる。5.09kN で 1 層目の CFRP 下のガラスマット層が破壊すると、剛性が失われていることがわかる。

図-17 (b)より、中央から 65mm および 70mm 位置のひずみ挙動を比較すると、図-17 (a)と同様に、R20r30_p18 では破壊が進行する間も CFRP が荷重を伝達していることがわかる。R20r30 は中央から 20mm 位置と同様の挙動を示した。R20r30_p8+ure は、1.7kN 付近での変状の後、ひずみがほとんど生じないことから、それ以降は CFRP が荷重を伝達していないと判断された。

図-17 (c)より、R20r30_p18 で荷重が低下した 5.42kN で、CFRP 側のひずみが急激に変化している。その後は不安定なひずみ挙動となっていることから、この位置で CFRP がはく離したと考えられる。また、CFRP 側と CFRP 裏側のひずみが正負逆の値をとっているため、補剛材に曲げ作用が生じていることがわかる。この傾向は他の補修試験体でも見られた。

d) 剛性の評価

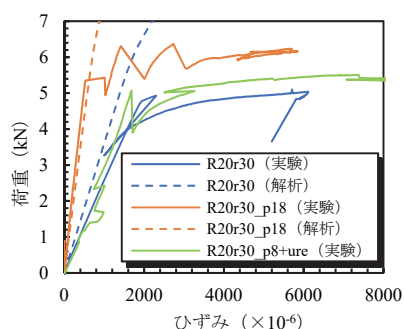
補修ケース R20r30, R20r30_p18, R20r30_p8+ure について、剛性の比較を行った。剛性は荷重と鉛直変位の関係の傾きとして定義し、回帰直線により傾きを求めた。剛性は、3 ケースの荷重範囲に分けて評価した。荷重範囲は、R20r30_p8+ure の変状があった荷重に基づいており、ひずみの変状があった 1.7kN 付近、荷重が明確に下がった 2.5kN 付近を境にした剛性の変化を比較した。データの正確性を考慮して原点付近は範囲から外し、0.1kN からとしている。

表-8 に、剛性の比較を示す。決定係数はすべて 0.997 以上であり、評価は適切であると考えられる。0.1～1.5kN の剛性を比較すると、R20r30_p18 が 0.817 で R20r30_p8+ure が 0.701 であることから、この 2 ケースは同等の曲げ剛性として設計したものの、差があることがわかる。初期の変状がない状態で剛性に差があるため、R20r30_p8+ure の設計では、断面二次モーメントだけを考慮することは不十分であるといえた。

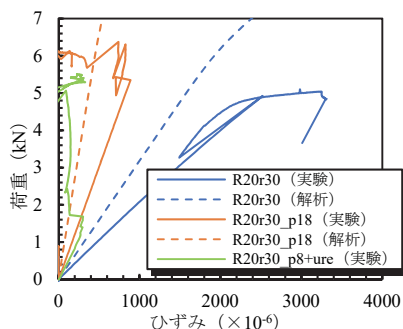
荷重範囲ごとに比較すると、R20r30 と R20r30_p18 は剛性が低下していないこと、R20r30_p8+ure は、変状があった荷重を境に、剛性が低下していることがわかる。また、R20r30 と R20r30_p8+ure を比較すると、1.7kN 以上の範囲ではほぼ同じ剛性となっていることから、R20r30_p8+ure は初期の微小な変状により、上層部 3 層

表-8 剛性の比較

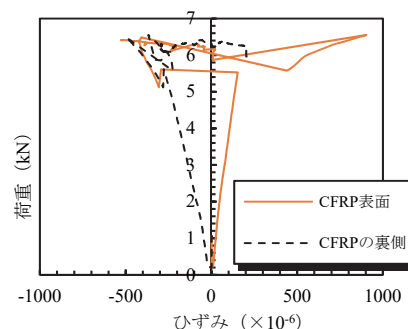
補修ケース	剛性 (kN/mm)		
	0.1～1.5kN	1.7～2.4kN	2.6～4.0kN
R20r30	0.627	0.626	0.619
R20r30_p18	0.817	0.897	0.894
R20r30_p8+ure	0.701	0.648	0.598



(a) 中央から 20, 25mm 位置 (CFRP 面)



(b) 中央から 65, 70mm 位置 (CFRP 面)



(c) R20r30_p18 の補剛材側

図-17 荷重とひずみの関係

の CFRP が効果を失い、5 層のみの場合とほぼ同じ補修効果といえる。これは、はく離荷重が 5.00kN と 5.09kN でほぼ同じであったことから推察できる。

6. まとめ

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 接着補修によるはく離の抑制、曲げ耐力の回復を目的として、実験的、解析的な検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 隅角部に円弧状の不陸修正材 (R 加工) を施し、補剛材から断面欠損部にかけて CFRP 補修した場合、曲げ引張試験により隅角部ではく離が生じ、健全の性能まで回復しないことがわかった。
- (2) 実験ではく離荷重に基づき、解析結果と併せて接着用樹脂材料の主応力によるはく離強度を検討した結果、概ね $19 \sim 26 \text{ N/mm}^2$ であること、ばらつきは 9% 程度であることから、この接合方法におけるはく離強度として評価できることが示された。
- (3) はく離強度向上を目的として、積層数と R 加工の大きさをパラメータとした解析的検討を行った結果、R 加工半径を大きくすること、積層数を増やすことではく離強度の向上が見込めた。
- (4) R 加工 30mm、18 層の CFRP 補修によるはく離強度向上の効果を実験的に検討した結果、5 層の補修に比べ、はく離強度が 1.08 倍に増加し、最大荷重は健全を上回った。はく離荷重は目標の荷重に対して 0.96 倍程度であり、はく離が生じると一時的に荷重が低下するが、健全体を上回る性能を確保できた。

- (5) 18 層の CFRP と等価以上の曲げ剛性を与えることとしてウレタンを CFRP で挟む、サンドイッチパネル形状の補修を施した結果、ウレタンと CFRP 界面ではく離が早期の段階で生じ、今回の補修方法では効果が得られないことがわかった。

本検討は、簡便な試験体と曲げ試験によるものであり、実構造物や作用の再現が限定的である点に注意が必要である。今後の課題として、立体的な補修方法の検討などさらに効果的で合理的な補修方法を検討する必要がある。

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，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) 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
- 4) 小林洸貴，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.20-II_31，2017.5
- 5) 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，No.5，pp.67-II_80，2018.5
- 6) 西岡裕次郎，中村一史，坪川毅彦，松井孝洋：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，第 13 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2019.11

(Received August 28, 2020)

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

Yujiro NISHIOKA, Visal THAY, 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 attaching resin to the corner and then bonding the CFRP of 18 layers, when CFRP is in a bending tensile state, it was found that it is possible to recover to maximum load of sound.