

特集：マルチマテリアルの接合技術**鋼 CFRP 複合構造部材の製作と性能評価
ー接着およびレーザーを用いた異種材料接合技術ー**

株式会社 I H I

兵間 賢吾・森田 花清・猪瀬 幸太郎

1. はじめに

航空機、自動車、船舶など輸送機器では、CO₂ 排出量をはじめとした地球環境負荷を低減するために、燃料消費の抑制が求められている。その対策の一つとして軽量化があり物性の異なる材料を適材適所に配置するマルチマテリアルが注目されている。

航空機では機体はもとより、特に低燃費を意図した高バイパス比エンジンのファンモジュールにおいて炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が積極的に用いられている¹。自動車では、超ハイテン鋼同士、鋼板/非鉄金属、金属/樹脂などの組合せによる車体構造体 (ホワイトボディ) の軽量化が検討されている^{2, 3)}。船舶、例えばコンテナ船では、高強度鋼材の適用や船体縦強度の構造信頼性を高める設計施工によって貨物以外の船体重量を低減し、20 フィートコンテナ 1 個当たりの輸送にかかる燃料消費を低減した実績がある^{4, 5)}。一方、構想段階ではあるが CFRP を多用した環境負荷の小さいコンテナ船もある⁶⁾。このようなマルチマテリアル構造体の開発では構造化技術と接合技術が重視される。

構造素材のうち CFRP は金属材料と比較して、軽量でかつ強度が高く、構造部材への適用拡大が期待されている。そのため一部の高級車では既に適用が進んでいる^{7, 8)}。中でも、マトリクス材料に熱可塑性樹脂を使用した熱可塑性 CFRP の活用が特に注目されている。熱可塑性 CFRP では、加熱して樹脂を溶融させて金属材料と直接接合することが可能であり、様々な熱源を使った研究が行われている⁹⁻¹¹⁾。また、分別や再利用などリサイクル性も良好である。

本記事では、鋼 CFRP 複合構造部材の構造化検討と、これに供する接合技術を紹介する。鋼と CFRP の接合には、主として接着が用いられるが、ここではレーザー溶接技術を応用した鋼 CFRP 溶着技術についても例示する。

2. 鋼と CFRP の異種材料接合技術

鋼と CFRP の異種材料の接合には、接着剤による接合や金属ボルトなどの機械的な接合が一般的である。実際にはこれらを単独または併用で適用することとなる。また、熱可塑性 CFRP では上記接合方法の他に加熱溶着接合の適用も期待できる。

ここでは、鋼と CFRP の異材接合技術として、接着接合およびレーザー溶着接合について検討したので紹介する。

2.1 接着

接着剤による接合は、接着剤の選定が必要となる一方で、他の接合手法と比較して広範囲の材料に適用可能である¹²⁾。そのため、異種材料を接合する場合には広く適用される。接合強度のばらつきが少なく信頼性の高い接着を行うためには、材料や継手構造の選定だけでなく、接着プロセスの管理

も重要となる。特に、接着剤の接合強度は被着材料の表面状態に影響を受けるため、適切な表面処理の評価および選定が重要となる。図1に表面処理と引張せん断強度の関係の一例を示す。被着材料にはSS400と熱可塑性CFRPを用い、接着剤には2液アクリル系接着剤を用いた。表面処理は、鋼材、CFRPともに同じ表面処理を実施した。表面処理により、引張せん断強度が変化することが確認される。このように、各種接着プロセスが接着強度に及ぼす影響を調査し、高い信頼性を確保できる接着プロセスを作り込んでいく必要がある。

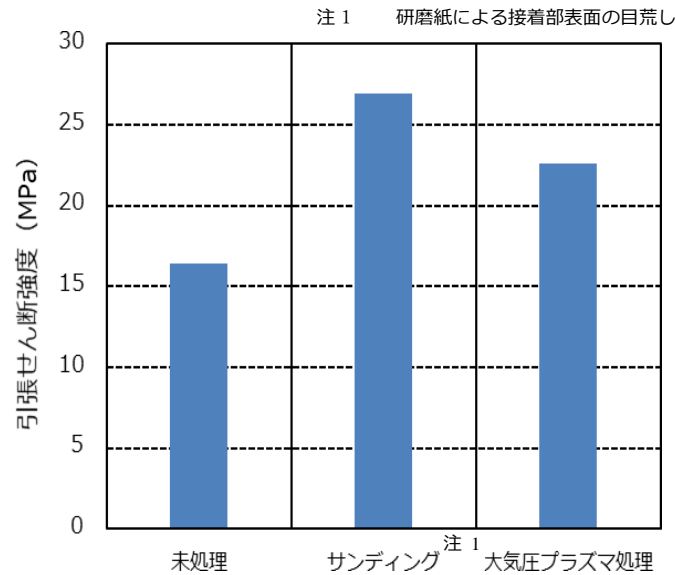


図1 表面処理と引張せん断強度の関係の一例

接着においては、接着剤が硬化するまでの間は養生（固定）が必要となるため、量産品や大型部材など適用する製品によっては生産性を確保する上で課題となる。これを解決するために、レーザーにより局所的に加熱することで、接着剤の硬化を促進する手法について検討を進めている。レーザー加熱接着の模式図を図2に、レーザー加熱による硬化促進の検討例を図3に示す。接着剤には、2液硬化型のエポキシ系接着剤を使用した。短時間（数秒）のレーザー照射により一定の強度を得ることができる。本手法を適用することで、接着剤が硬化するまでの養生の省略や部材のハンドリング性などの向上などが期待できる。

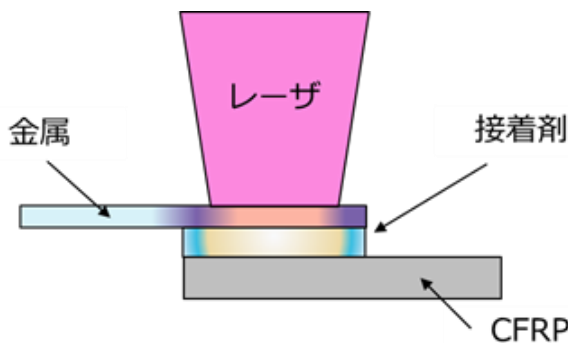


図2 レーザ加熱接着の模式図

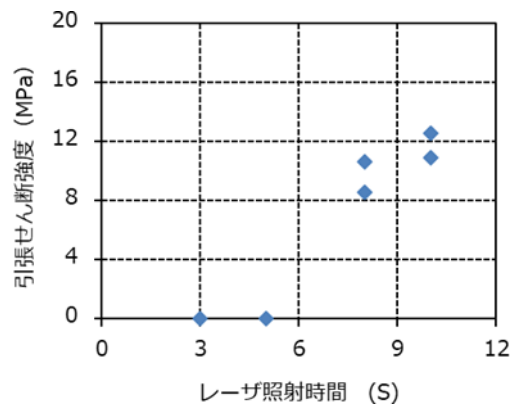


図3 レーザ加熱による硬化促進

2.2 レーザ溶着

図4にレーザー溶着の模式図を示す。鋼材とCFRPを重ね合わせ、ある程度の加圧により密着させる。鋼材側から重ね部にレーザーを照射することで、鋼材とCFRPの接合界面を間接的に加熱し、CFRPの樹脂のみを溶融させ接合する。

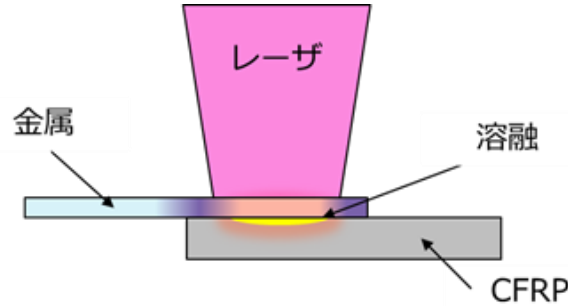


図4 レーザ溶着の模式図

レーザー溶着においては、接合界面の温度を制御することが重要である。そこで、様々なレーザー施工条件により製作した重ね継手の引張せん断強度を取得し、レーザー加熱方法について検討した。ここでは、入熱量とせん断強度の関係を図5に例示する。なお、供試材料は、冷間圧延鋼板SPCCと熱可塑性CFRP(PA6)を用いた。入熱量には最適値がある事が見て取れる。入熱量が低い場合は、樹脂の溶融量が減少し接合面積が小さくなるため強度は低下する。一方で、入熱量が高い場合は、樹脂が劣化するため強度は低下する。また、図中の印はプロセス制御の種類を示している。プロセス管理方法を最適化することで、強度のばらつきを抑えた施工が可能となることを示唆している。

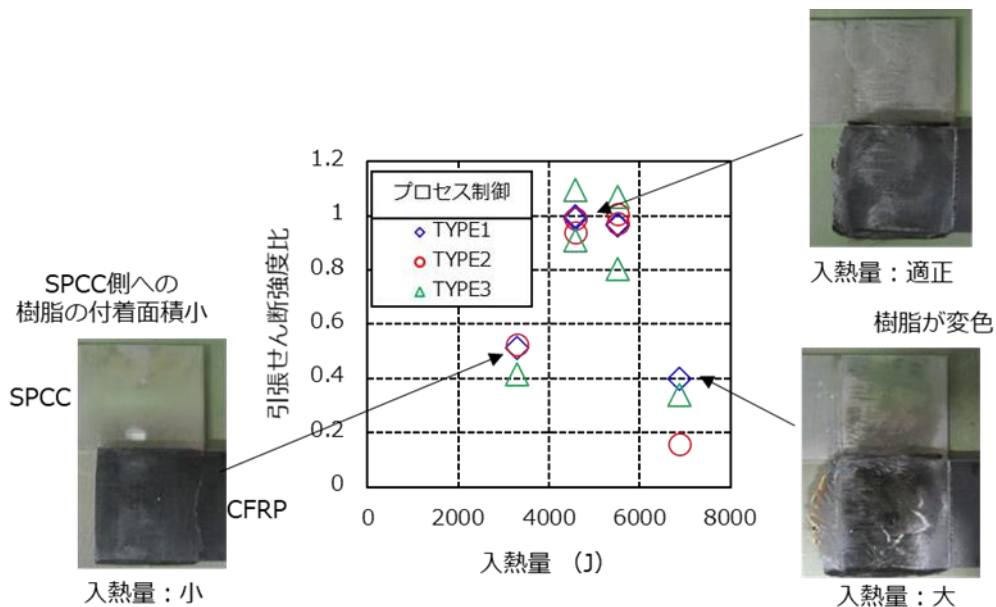


図5 入熱量と引張せん断強度の関係

金属とCFRPとの直接接合の場合、金属と炭素繊維が直接接触する懸念があるため、ガルバニック腐食への配慮が特に必要となる。このようなガルバニック腐食の防止には、接合部にガラスクロス

の絶縁層を付与することが効果的である。図 6 にガラスクロス有無でのせん断引張試験結果を示す。ガラスクロス入りの継手でも静的強度の低下はほとんど見られず、ガルバニック腐食を防止する目的でガラスクロスを付与しても静的強度への悪影響はないことが示唆される。

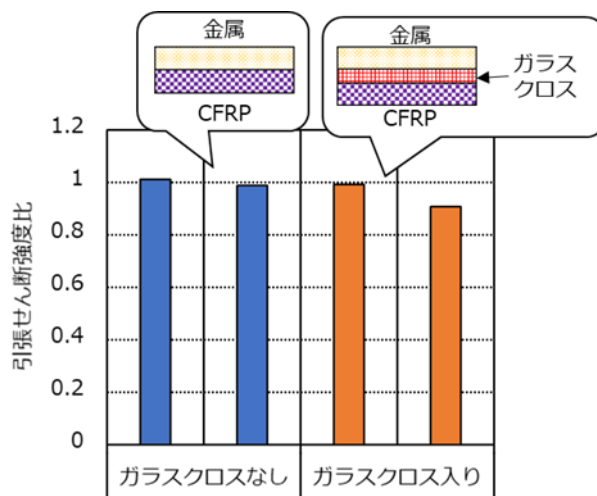


図 6 ガラスクロス有無でのせん断引張試験結果

レーザ溶着継手の耐食性とその対策の効果を評価するために複合サイクル腐食試験を実施した。製作した試験体は、塩水噴霧 (35±1℃ 5% NaCl) 2 時間、乾燥 (60±1℃ 30%RH) 4 時間、湿潤 (50±1℃ 95%RH) 2 時間を 1 サイクルとした複合サイクル試験 (JASO M610-92 準拠) を実施した。複合サイクル完了後に、引張せん断試験を実施することで耐食性を評価した。図 7 に JASO サイクル 30 日での引張せん断試験後の破面を示す。対策なしの継手では、接合面全体に腐食が発生し、引張せん断試験を実施する前に接合部が剥離した。一方で、接着材によりレーザ溶着部をマスキングした継手および接合面にガラスクロスを入れマスキングした継手では、腐食を大幅に低減できていることが見て取れる。また、これらの継手では、JASO サイクル 30 日での引張せん断強度は初期強度からほとんど低下していない。

JASO サイクル	レーザ溶着継手		
	対策なし	マスキング	ガラスクロス + マスキング
30日			

図 7 JASO サイクル 30 日でのせん断試験後の破面

3. 鋼 CFRP 複合部材の構造検討

鋼と CFRP の複合構造の設計は、物性値のまったく異なる材料を組合せる点において従来の鋼構造とは大きく異なる。例えば、鋼は CFRP と比較すると縦弾性係数 (E : ヤング率) が高く、圧

縮耐荷力に優れる。一方 CFRP は軽量化に有利であり、さらに引張荷重下の弾性限界強度に優れる。このような特徴を活かす鋼 CFRP 複合部材の構造を検討する必要がある。

今回は柱構造部材と自動車用車体構造部材を例示する。なお、接合方法には柱構造部材には接着、自動車用車体構造部材にはレーザ溶着を適用した試作例を中心に紹介する。

3.1 鋼 CFRP 複合柱構造部材の検討

柱構造とは主に圧縮荷重を受ける構造部材であり、局部座屈を防ぐ構造とすることが必要となる。CFRP は鋼材と比較すると軽量であるが、縦弾性係数が低いため局部座屈強度は低くなる。そこで、複合柱構造の断面は、角部に鋼材を配置し、それらをつなぐスキムプレートに CFRP を用いた。構造概要を図 8 に示す。鋼は CFRP の局部座屈強度を強化する周辺支持材として、CFRP は鋼材片の全体座屈を防止する材料として機能する。柱の上下端では荷重が集中するため、支圧強度に優れた鋼のみで荷重を伝達する。柱の中間部（一般部）は鋼と CFRP が複合して荷重を支える構造とした。CFRP のスキムプレートと鋼材片はそれぞれ弾性座屈が生じないように幅厚比を制限する。解析結果を図 9 に例示する。幅厚比は線形座屈解析（固有値解析）より得た線形座屈荷重から算出した。また、この解析で得た座屈波形を非線形座屈解析における初期変形状とし、柱部材全体の挙動を確認した。

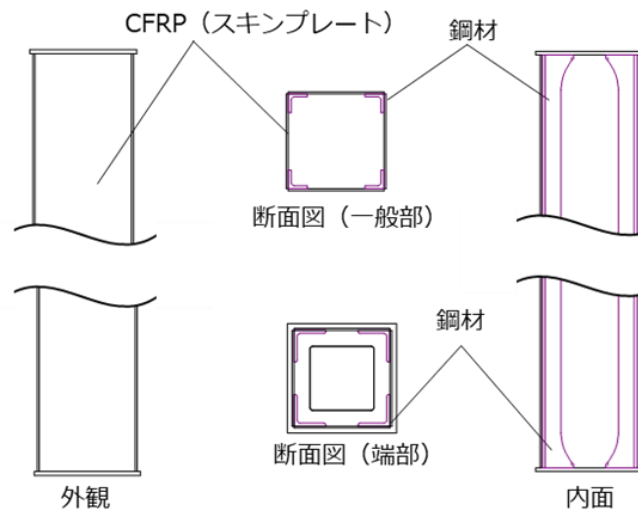


図 8 鋼 CFRP 複合柱構造の構造概要

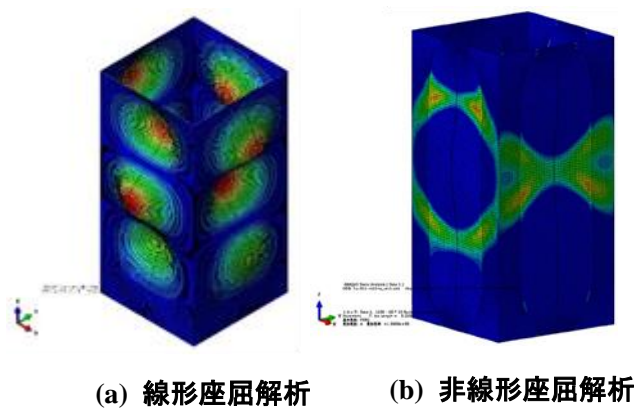


図 9 FEM 解析結果例

設計の妥当性確認のため、複合柱構造を試作し、強度試験を実施した。複合柱構造部材は、鋼部材を溶接で製作し、その鋼部材に CFRP の板材を接着することで製作した。試作状況および試作部材の一例を図 10 に示す。鋼部材には SM400 を、CFRP 板には熱硬化性 CFRP を用いた。なお、接着剤は 2 液硬化型のエポキシ系接着剤を用いた。

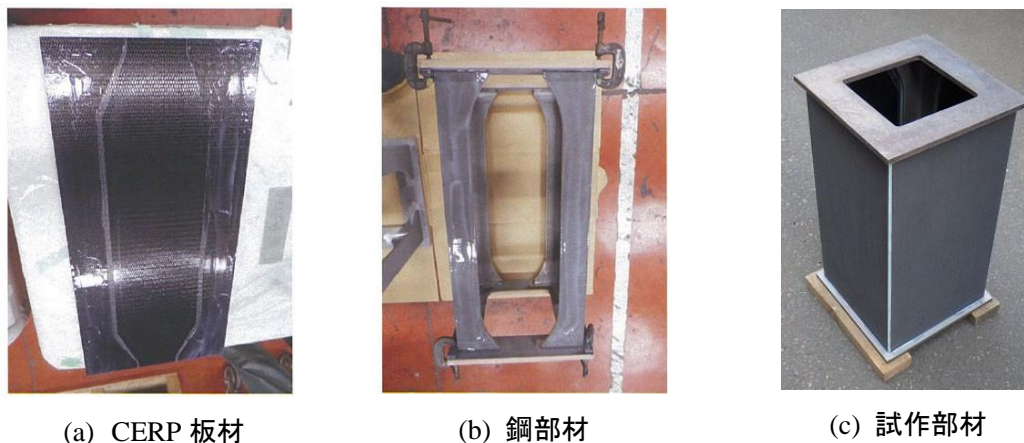


図 10 鋼 CFRP 複合部材の試作状況および試作部材の一例

強度試験状況を図 11 に示す。供試体に静的に圧縮荷重を載荷し、反力、変形、ひずみを計測した。複合柱構造部材は最終的には鋼材と CFRP との接着部が剥離して崩壊に至る事が明らかとなった。

解析と実験で得た荷重変位曲線を図 12 に示す。ここでは鋼材の全断面が降伏するときの荷重（全塑性荷重と呼ぶ）に着目する。本図より、解析と試験結果は全塑性荷重まではよく一致している事が分かる。全塑性荷重以降も概ね一致するが、最高耐荷重については差異が認められる。これは接着の破断強度のばらつきに起因する。上記結果から取得した実験値と解析値の比較（全塑性荷重および最高耐荷重）を図 13 に示す。このなかで全塑性荷重については良く一致しているため、これを設計計算上の基準強度として扱う事ができる。部材の許容荷重はこの基準強度に対し、合理的な安全率を設定して確定する。



図 11 強度試験状況

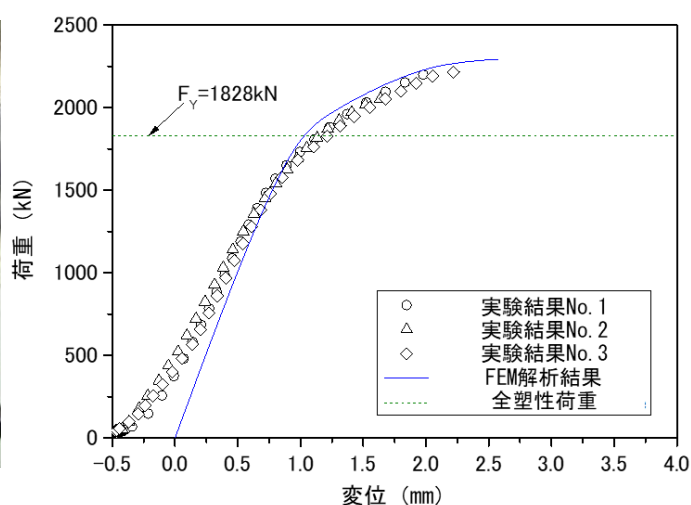


図 12 解析と実験で得られた荷重変位曲線の比較

図 14 に CFRP 単層部と鋼 CFRP 複層部の荷重分担率を示す。本図は最大荷重の 44% 時点であり、部材がまだ弾性範囲内にあるときの分担率であるが、最大荷重時と同じ傾向を示す。さらに本図では

鋼材片の断面積を変えたときの値も示す。柱端部では CFRP 単層部の荷重分担率は 0%であるが、中間部では増加する。またその割合は鋼の断面積が小さいほど大きい。これは設計意図通りに、柱の上下端の荷重集中点では鋼のみで荷重を伝達し、中間部（一般部）では鋼と CFRP が複合して荷重を支えている事を示している。

今回試作した鋼 CFRP 複合柱構造は同じ外形寸法の鋼部材¹³⁾と比較して、同等以上の耐荷力を有しており、部材中央断面の単位長さ当り重量は約 25%軽量である。

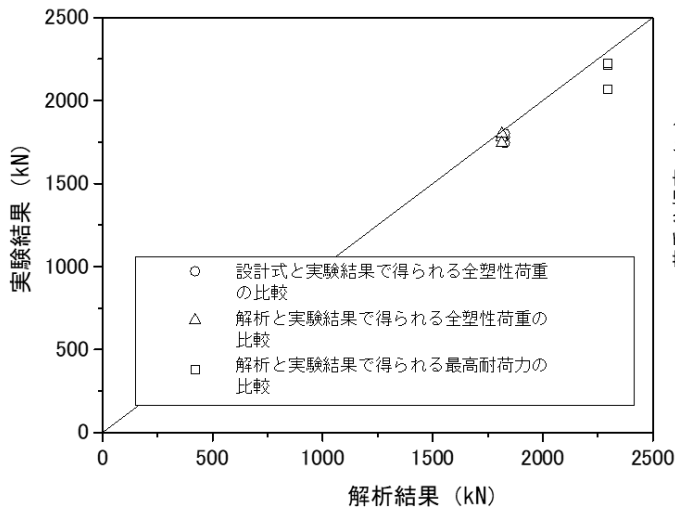


図 13 全塑性荷重および最高耐荷力の解析と実験結果の比較

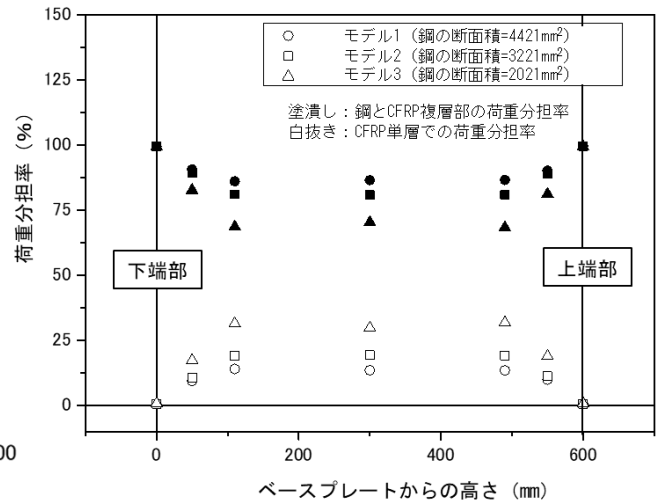


図 14 CFRP 単層部と鋼 CFRP 複層部の荷重分担率の比較（最大荷重の 44%時点）

3.2 自動車車体部材向け鋼 CFRP 複合部材の検討

自動車車体構造部材を想定した鋼 CFRP の複合部材を試作し、その性能を評価した。対象とした部材は B ピラーである。本部材は前部座席と後部座席の間の柱部材で、側面からの衝突時には乗員の安全のための室内空間を確保する。すなわち構造化においては軽量化と衝突エネルギー吸収性能の両立が求められる部材と言える。図 15 に示すように、実車の構造を単純化した形状で試作と性能評価を繰り返して実施した。その一例を図 16 に示す。軽量化とエネルギー吸収性能を両立させるためには、軽量素材の採用と、構造強度の向上、それらを併用するというアプローチがある。そこで、構造要素として引張の荷重を受ける側の鋼材を CFRP に置き換えての軽量化、CFRP などによる補強構造などを検討した。

B ピラー模擬部材の接手法として接着とレーザー溶着を検討した。ここでレーザー溶着による接合例を紹介する。供試材を構成する材片は、980MPa 級の高張力鋼板と熱可塑性 CFRP である。レーザーによるスポット照射を繰り返し、鋼と CFRP を接合した。図 17 に試作部材の全体を示す。本部材を用い側方衝突におけるエネルギー吸収性能を評価した。図 18 に試験後の接合部状況を示す。接合部は最終的には破断したが、エネルギー吸収部材として十分な変形性能を有することが確認できた。

試作した部材は、従来の鋼スポット溶接部材と比較すると、エネルギー吸収性能は同等のまま、重量は約 20%軽量となった。

今回は、レーザー溶着を中心に紹介したが、接着についても接手法および性能評価をしている。さらに接着部材については生産試作ラインを試験的に敷設し、量産化の実現可能性を検証した。

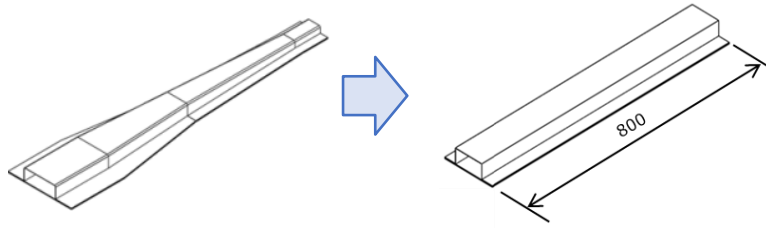
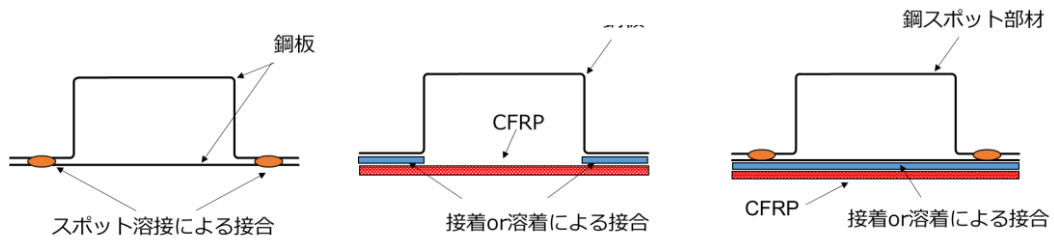


図 15 B ピラー模擬部材



(a) 鋼スポット部材 (b) 複合部材 軽量タイプ (c) 複合部材 高反力タイプ

図 16 断面形状

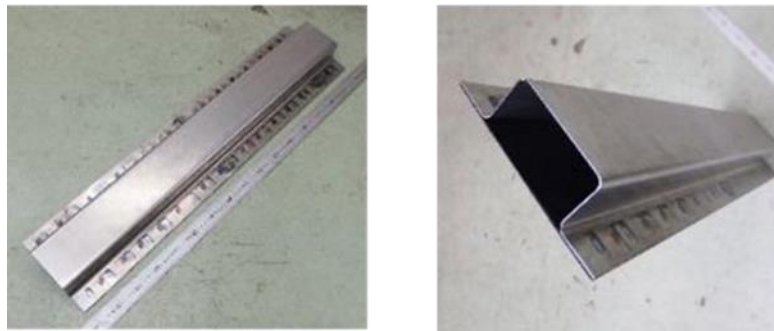


図 17 レーザ溶着により試作した部材

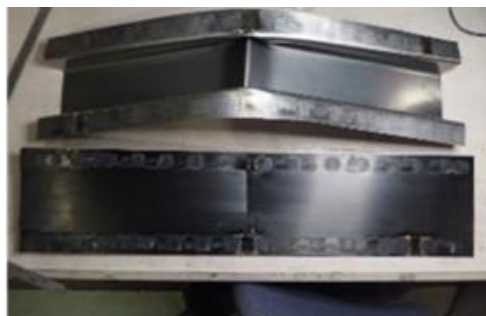


図 18 衝突を模擬した試験後の接合部状況

4. おわりに

以上、鋼 CFRP の接合技術と鋼 CFRP 複合構造化の検討について紹介した。持続可能な社会を実現するためには、構造物の軽量化は必須であり、異種材料の接合技術はますます重要となる。特に、今回紹介したレーザー溶着などの直接接合技術は、リサイクル性の観点から社会的要請が今後加速的に高まることが予想される。

参考文献

- 1) 村上務, 盛田英夫, 及川和喜: 複合材ファンシステム研究開発, IHI 技報, 第 53 巻第 4 号, pp63-67 (2013)
- 2) 平田好則: NEDO/ISMA プロジェクトにおける接合技術開発について, 溶接学会誌 86 巻 1 号 pp6-11 (2017)
- 3) 平田好則: 異材接合継手の性能比較, NEDO/ISMA プロジェクトにおける接合技術開発について (2), 溶接学会誌 89 巻 3 号, pp11-19 (2019)
- 4) 革新的な構造・施工技術「構造アレスト」で実現した安全・環境性能に優れたメガコンテナ船, 第 7 回ものづくり大賞, 経済産業省, pp10-11
- 5) 猪瀬幸太郎, 豊田昌信, 木治昇, 半田恒久: 革新構造設計への道しるべ「大型コンテナ船開発における船体安全性確保のための溶接設計と施工技術」, 溶接学会誌, 第 85 巻第 2 号, pp 221-228, (2016)
- 6) 増子章, 阪口克典, 木田隆之, 内藤裕司, 井上智文: 環境負荷低減型コンテナ船「eFuture 13000C」の開発, IHI 技報, 第 50 巻第 4 号, pp22-27 (2010)
- 7) 佐藤千明, 自動車用接着接合と材料の表面処理の動向, 表面技術, 67(12), 644-648, (2016)
- 8) 氷室雄也, 麻川元康, 山本研一, 自動車における構造接着技術～車体接着の技術動向と課題, および市場劣化予測技術の開発～, 日本接着学会誌 53 巻 8 号 pp 283-289 (2017)
- 9) 永塚公彬, 肖伯律, 呉利輝, 中田一博, 佐伯修平, 北本和, 岩本善昭, 抵抗スポット溶接を応用した金属と炭素繊維強化樹脂の直接異材接合, 溶接学会論文集, 34 巻 4 号 pp 267-273 (2016)
- 10) 三輪 剛士, 北川 大喜, 永塚 公彬, 山岡 弘人, 伊藤 和博, 中田 一博, 摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合, 溶接学会誌 35 巻 1 号 pp 29-35 (2017)
- 11) 廣瀬明夫, マルチマテリアルと異材接合, 軽金属, 71 巻 4 号 pp188-196 (2021)
- 12) 内藤公喜, クローズアップ: 鋼板と樹脂材料の接合技術開発 (車体軽量化を目指したマルチマテリアル化), 溶接技術, 9, pp66-72, 2020
- 13) 猪瀬幸太郎, 廣畑幹人, 中西保正, 金裕哲, レーザを用いて製作した無補剛溶接構造部材の終局強度, 構造工学論文集, 第 54A 巻 p.p50-57 (2008)

<略歴>

兵 間 賢 吾 (ひょうま けんご)

2012 年 広島大学 大学院 工学研究科 機械物理工学専攻 博士前期課程修了
2012 年 株式会社 IHI 入社 技術開発本部 配属
2021 年 技術開発本部 技術基盤センター 接合グループ 現在に至る

森 田 花 清 (もりた かすみ)

2017 年 大阪大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 博士前期課程修了
2017 年 株式会社 IHI 入社 技術開発本部 配属
2021 年 技術開発本部 技術基盤センター 接合グループ 現在に至る

猪 瀬 幸 太 郎 (いのせ こうたろう)

1993 年 金沢大学大学院 機械システム工学 修士課程修了 (機械工学専攻) 修了
1993 年 石川島播磨重工業 (現 株式会社 IHI) 入社 橋梁事業部配属
2001 年 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部 異動
2008 年 大阪大学大学院 工学研究科にて博士 (工学) 取得
2021 年 技術開発本部 技術基盤センター 接合グループ 現在に至る