

# (55) オープンモールドへの直接成形を可能とする 「ファイバーtoコンポジット(F to C)成形法」の 開発

朝倉 千裕<sup>1</sup>・森野 和英<sup>1</sup>・藤田 直博<sup>1</sup>・  
木村 公<sup>2</sup>・助宗 剛<sup>2</sup>・郷家 正義<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(株)ADEKA 機能高分子開発研究所 (〒346-0101 埼玉県久喜市菖蒲町昭和沼 20)

E-mail: chi-asakura@adeka.co.jp

<sup>2</sup>(株)ジーエイチクラフト (〒412-0048 静岡県御殿場市板妻 733)

E-mail: gh\_info@ghcraft.com

鉄などの材料に比べて、軽量かつ経年劣化しづらい繊維強化プラスチック (FRP) が、近年建築・土木用途でも注目されている。一方、FRP 成形において、エネルギーやコストの観点から中間基材不要、短時間硬化工程、硬化炉やプレスを使用しないその場成形といった要望が挙げられている。本発表では、大規模な硬化炉やプレスを使用せず繊維から直接オープンモールドに FRP を成形可能な新規成形法「ファイバー to コンポジット (F to C) 成形法」について報告する。また、F to C 成形の応用として、SPCC-SD に接着剤を用いず CFRP を直接成形した事例と得られた CFRP/SPCC-SD 成形品の特性についても併せて報告する。

**Key Words:** high strength FRP, direct molding, out of autoclave, reinforcement of structural material

## 1. 緒言

従来、建築・土木向け用途では鉄・コンクリートなどの材料が主に用いられてきた。これらの材料は低コストかつ加工性・成形性が高いという利点を有しているが、高重量で風雨により経年劣化しやすいという欠点を有している。実際に、高度成長期に集中して建設された橋やトンネルといったインフラ設備は老朽化が進行し、定期的なメンテナンス・補修が欠かせない状況である。

そこで近年では、軽量かつ高強度で経年劣化しづらい特徴を有する繊維強化プラスチック (FRP) が建築・土木向けの材料として注目されている。FRP はガラス繊維や炭素繊維などの繊維シートにエポキシ樹脂などのマトリックス樹脂を含浸・硬化させることにより製造される複合材料であり、オートクレーブ成形や RTM など、これまでに様々な成形方法が開発されている。しかしながら、これらの従来成形法では加熱による長時間硬化が必要であり、大型の硬化炉やプレス機を必要とするため、設備及びエネルギーのコスト面、さらには製造場所が限定されるといった課題が存在する。加えて中間基材を金型に合うようトリミングするため、発生する廃棄物の処理コスト低減も課題となっていた。さらに従来成形法では、成形時に樹脂内で繊維ヨレが生じることで、FRP の性

能・品質の低下を引き起こしていることも問題の一つであった。

以上の背景から我々は従来成形法が抱える課題点を克服する新規成形法の構築を目指した結果、硬化炉を使用せず、オープンモールドに直接 FRP を積層可能な「ファイバー to コンポジット (F to C) 成形プロセス」の開発に成功した。本発表では、F to C 成形プロセスの概要と得られる FRP の特性について報告する。また、F to C 成形の応用として、SPCC-SD に接着剤を用いず CFRP を直接成形した事例と得られた CFRP/SPCC-SD 成形物の特性について報告する。

## 2. ファイバー to コンポジット (F to C) 成形の概要

F to C 成形プロセスは、繊維を高度に配向させながら、樹脂含浸、硬化、積層の各プロセスを連続かつ自動で行う成形方法である。F to C 成形プロセスの概念図を図-1 に、実際に開発された F to C 成形プロセスのテスト成形装置を図-2 に示す。F to C 成形プロセスは「繊維開繊」「樹脂塗布」「含浸」「赤外線硬化」の4つの工程に大別される。

繊維開繊工程では、ガラス繊維及び炭素繊維ローベン

グを基材として成形機内で開繊シートが作製され、テンションをかけて繊維の配向性を高めた状態でオープンモールドへ供給される。このとき、開繊済みのシートやクロスを直接供給することも原理上可能である。樹脂塗布工程では、赤外線硬化な新規熱硬化性樹脂がオープンモールドに塗布され、その後、含浸工程において供給された開繊シートへの樹脂含浸が行われる。赤外線硬化工程では、樹脂含浸シートに赤外線を照射することにより硬化反応が迅速に起こり、繊維の配向性を維持したまま成形物を得ることができる。以上のプロセスを1つの装置内で完結し、積層を繰り返し実施することで任意の厚みの成形物をその場で製造することが可能となる。

また、金属等の異種材料をオープンモールドに見立ててFtoC成形を行うことにより、異種材上にFRPを直接

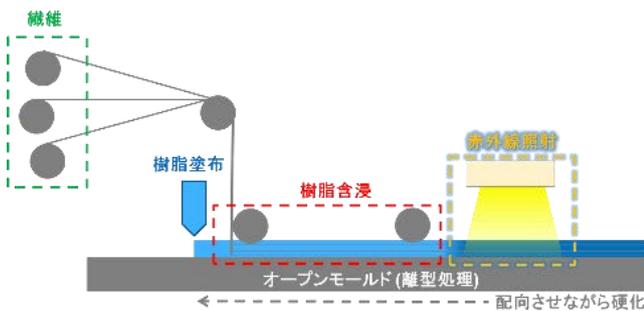


図-1 FtoC成形プロセスの概念図

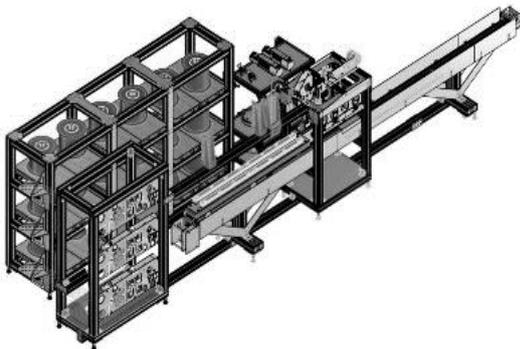


図-2 FtoC成形プロセスのテスト成形装置

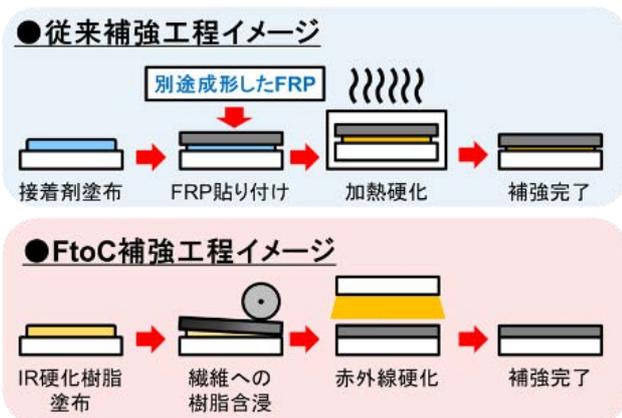


図-3 FRPによる補強工程イメージ

積層し、補強することが可能である。このようなFtoC成形を応用した補強では、従来必要であったFRPの事前成形、接着剤の使用、加熱炉による硬化が不要となり、1プロセスで工程が完了する(図-3)。これにより、材料・エネルギー・設備等のコスト削減が期待できる。

### 3. GFRP成形物評価

まずは、FtoC成形プロセスのテスト成形装置を用いてGFRPの成形検討を実施し、得られたGFRPの物性について評価した。

#### (1) 材料及びGFRP成形

繊維として汎用ガラス繊維ロービングであるRS 220 RL-510AS(日東紡社製)、マトリックス樹脂として赤外線速硬化樹脂(高伸び型)を用いてFtoC成形を実施し、GFRPを得た。得られたGFRPは150°Cで2時間追加加熱を実施し、各種評価に用いた。

比較として使用した標準GFRP(s-GFRP)は、SAERTEX社製の一方用汎用ガラス繊維とビスフェノールA型エポキシ樹脂/希釈剤/脂肪族ポリアミンからなる樹脂組成物を用いてVaRTM法により樹脂含浸繊維を作製し、室温12時間後60°Cで3時間、その後70°Cで10時間加熱硬化することで得た。

#### (2) 評価方法

##### a) 静強度試験

GFRPの引張、圧縮、曲げおよび層間剪断試験はASTMD3039、JIS K 7076B、JIS K 7017およびJIS K 7057に準拠した方法に従って実施した。

##### b) X線CT観察

X線CT観察はCT Lab GX130(リガク社製)を用いて実施した。

#### (3) 結果と考察

##### a) 成形結果

FtoC成形により得られたGFRP(FtoC GFRP)の一例を図-4に示す。90回積層を繰り返すことにより厚さ50mmのGFRPを成形することに成功した。得られたGFRPの繊維体積含有率(Vf)は約60%と、従来成形法により得られるGFRPと同等の値を示すことを確認した。以上の結果は、FtoC成形により硬化炉やプレス用金型を用いず繊維から直接FRPを成形可能なことを示している。

##### b) 繊維配向性・分散性評価

得られたFtoC GFRPについて、X線CT分析を用いてガラス繊維の配向性・分散性について評価した(図-5)。

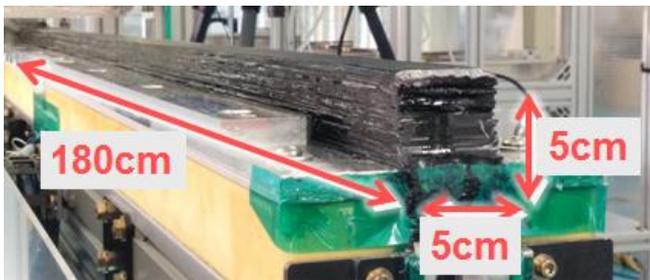


図-4 FtoC成形 GFRP (90回積層)

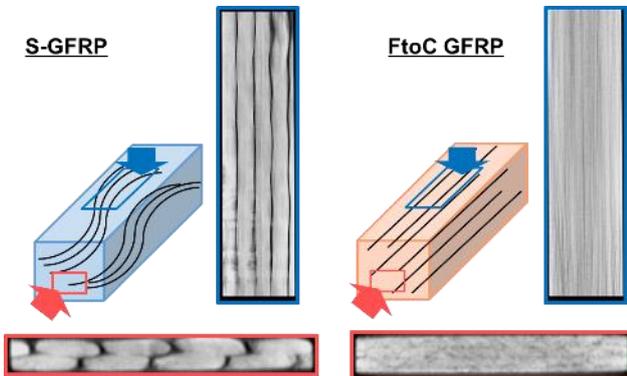


図-5 X線CT観察結果(GFRP)

成形物上部からの観察により、VaRTM 成形品である s-GFRP では繊維が蛇行しているのに対し、FtoC GFRP では比較的まっすぐに繊維が配向していることが確認された。一方、成形物断面からの観察では、s-GFRP ではロービングの束が視認できるのに対し、FtoC GFRP では束が確認されず、均一に分散していることが確認された。以上のことから、F to C 成形プロセスにより繊維の配向性・分散性の高い GFRP が得られたと言える。

### (3) 静強度試験

FtoC GFRP の性能について確認するため、各種静強度試験を実施した(図-6)。また、s-GFRP の試験結果についても比較として併せて示す。s-GFRP と比較して FtoC GFRP の引張、圧縮、曲げ強度はそれぞれ、1.4倍、2.4倍以上、2.2 倍と非常に高い強度を示した。特に曲げ強度に関しては、汎用である E ガラスを使用した GFRP でありながら約 1800 MPa という CFRP と同等な強度 (1600~2000 MPa) を発現することが明らかとなった。上述したように、FtoC 成形により得られた GFRP は高い繊維配向性と分散性を有しており、その結果優れた強度を示したと考えられる。特に、高い繊維分散性による高強度化への寄与が引張試験後の破壊状態から推測された。図-7 に FtoC GFRP および s-GFRP の引張試験後の試験片写真を示す。s-GFRP では繊維束レベルでの破壊が起こるのに対して、FtoC GFRP では繊維一本一本のレベルで細かく破壊が起こっていることが確認でき、フィラメントレベルで荷重を受けていることが示唆された。

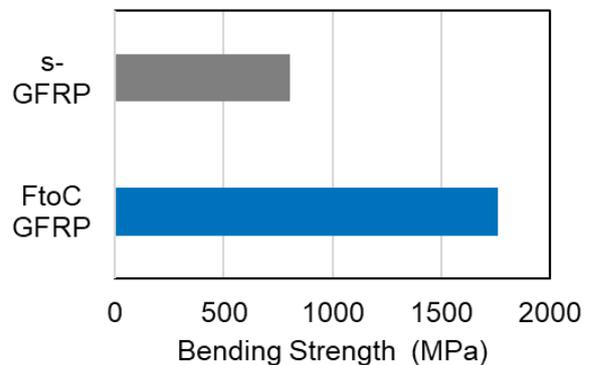
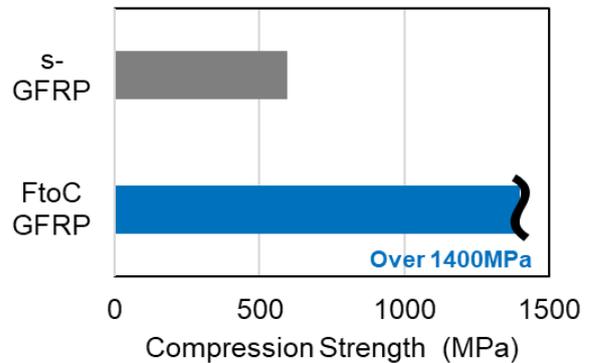
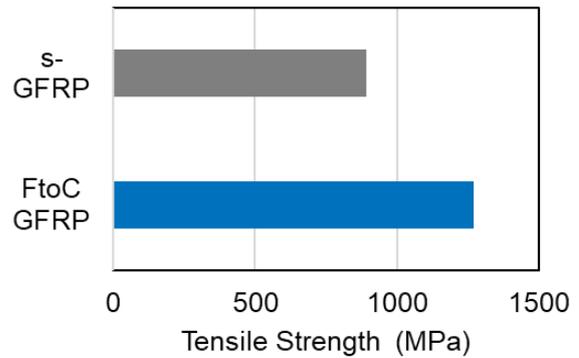


図-6 静強度試験結果(GFRP)

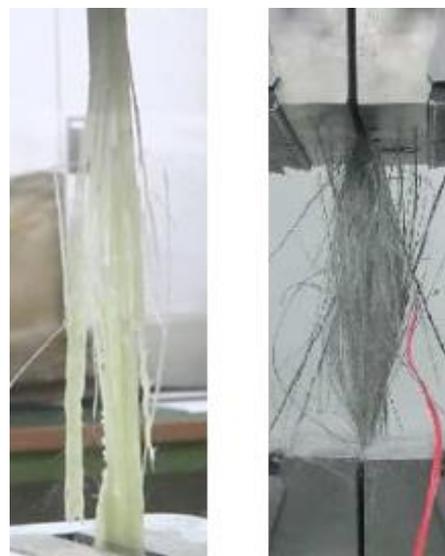


図-7 引張試験後の GFRP 試験片(左:s-GFRP、右:FtoC GFRP)

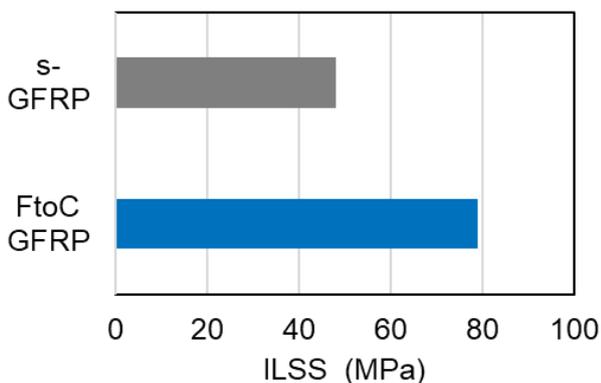


図-8 層間せん断試験結果 (GFRP)

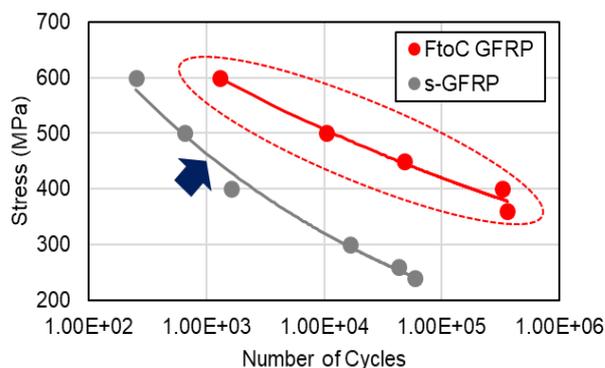


図-10 引張疲労試験結果 (GFRP)

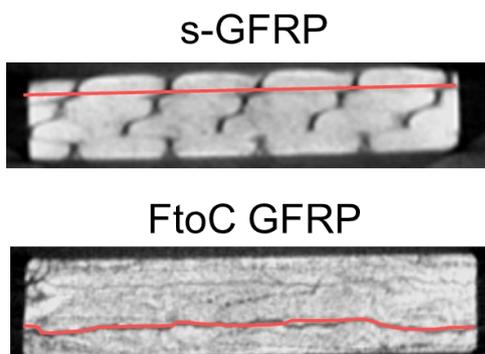


図-9 層間せん断試験後 GFRP の X線 CT 観察結果

F to C 成形プロセスは赤外線硬化後の FRP 上に直接樹脂を塗布・積層を繰り返して成形するため、層間密着性の低下が懸念された。そこで、層間密着性の確認のために、層間せん断試験を実施した(図-8)。その結果、FtoC GFRP の層間せん断強度 (ILSS) は s-GFRP に対して約 1.75 倍と非常に高い値を示し、層間密着性が良好であることが明らかとなった。層間せん断試験後の破断試験片の断面を X 線 CT で観察したところ、s-GFRP では層間にまっすぐに亀裂が進展し破壊したのに対し、FtoC GFRP では明確な層が観察されず、不規則に亀裂が進展し破壊している様子が確認された(図-9)。以上の結果より、FtoC GFRP では層間が消失していることで層間せん断強度が向上した可能性が考えられるが、層間の消失要因については現在不明であり、さらなる分析を実施中である。

FRP を構造部材として使用する際に重要な性能として疲労強度が挙げられる。そこで、疲労特性を確認するために、引張疲労試験を実施した(図-10)。その結果、FtoC GFRP の S-N カーブは s-GFRP と比較して緩やかであった。繰り返し最大応力が同じである場合、破断までの繰り返し回数も大きなことから、優れた疲労特性を有すると言える。

#### 4. CFRP 成形物評価

前述の通り、F to C 成形プロセスにより得られた GFRP は、繊維の配向性が高く、優れた物性を示すことが明らかとなった。次に、CFRP についても同様に成形検討、および物性評価を実施した。

##### (1) 材料及び CFRP 成形

繊維として STS-40(帝人社製)を開織した幅 22mm の炭素繊維シート、マトリックス樹脂として赤外線速硬化樹脂(高 Tg 型)を用いて F to C 成形を実施し、CFRP を得た。得られた CFRP の硬化度は 90% 以上であったため、追加熱は実施せずに各種評価に用いた。

比較として使用した汎用プリプレグ CFRP (Prepreg CFRP) は、一方向 CFRP プリプレグをオートクレーブを用いて成形することで得た(成形圧力: 3kgf/cm<sup>2</sup>、130°C×230 min 硬化)。

##### (2) 評価方法

###### a) 静強度試験

CFRP の引張、圧縮、曲げおよび層間剪断試験は JIS K 7165、JIS K 7076B、JIS K 7017 および JIS K 7078 に準拠した方法に従って実施した。

##### (3) 結果と考察

###### a) 成形結果

F to C 成形により得られた CFRP の一例を図-11 に示す。積層を 4 回繰り返すことにより厚さ 2mm の CFRP を成形することに成功した。得られた CFRP の Vf は約 55% と、従来成形法により得られる CFRP と同等の値を示すことを確認した。以上の結果より、GFRP と同様に、CFRP においても F to C 成形が可能なが判明した。

###### b) 静強度試験

得られた FtoC CFRP の性能について確認するため、各種静強度試験を実施した(図-12)。また、Prepreg CFRP の

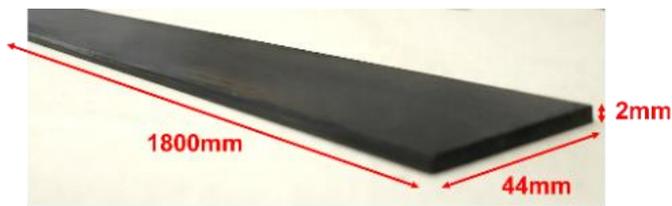


図-11 FtoC CFRP 成形物 (4回積層)

試験結果についても比較として併せて示す。FtoC CFRP の引張、曲げ強度はそれぞれ約 2300 MPa、1950MPa と、Prepreg CFRP よりも高い強度を示した。さらに圧縮強度に関しては、約 1500 MPa と非常に高い強度を発現することが明らかとなった。この値は Prepreg CFRP に対して約 1.6 倍である。GFRP と同様、F to C 成形により得られた CFRP は高い繊維配向性と分散性を有しており、その結果優れた強度を示したと考えられる。

また、FtoC CFRP の層間剪断強度 (ILSS) は約 90 MPa と高い値を示し、層間の密着性も良好であることが明らかとなった (図-13)。

## 5. CFRP / SPCC-SD 直接積層検討

オープンモールド上での F to C 成形プロセスにより、優れた物性の GFRP および CFRP が得られることが明らかとなった。一方、F to C 成形のオープンモールドを異種材料と仮定した場合、異種材上に高強度 FRP を直接積層できることになり、接着剤や硬化炉を用いなくても、異種材の補強が可能となる。そこで、異種材として SPCC-SD を用いた F to C 成形により、SPCC-SD 上への CFRP 直接積層検討および得られた直接積層物の補強性評価を実施した。

### (1) 材料及び CFRP / SPCC-SD 直接積層

繊維として STS-40 (帝人社製) を開織した幅 22 mm の炭素繊維シート、マトリックス樹脂として赤外線速硬化樹脂 (高 Tg 型) を用いた。被着体として、表面をサンドブラスト処理した SPCC-SD (JIS G 3141) を用いた。SPCC-SD 上で直接 FtoC 成形プロセスを実施し、CFRP / SPCC 直接積層物を得た。ポストキュアは実施せずに各種評価に用いた。

比較として使用した CFRP / SPCC-SD 接着物は、接着剤として Araldite 2014-1 (Huntsman 社製) を用い、4 章で使用した Prepreg CFRP と SPCC-SD を rt.×12h+60°C×2h の条件で接着することで作製した。

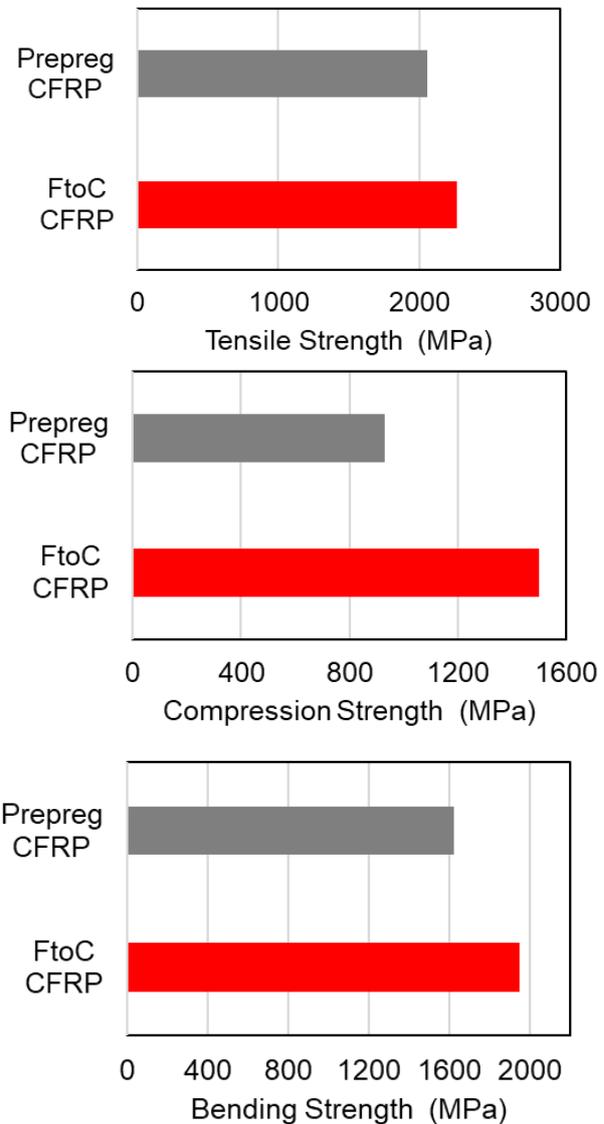


図-12 静強度試験結果 (CFRP)

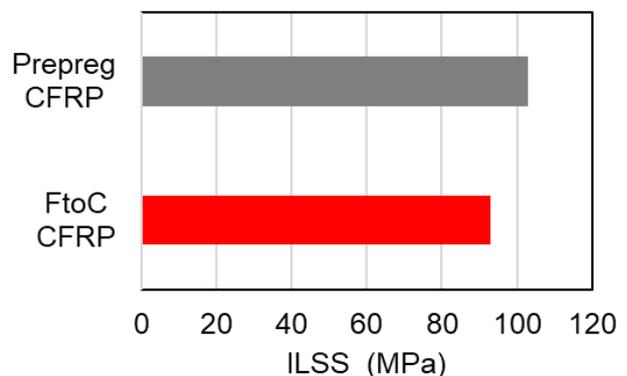


図-13 層間せん断試験結果 (CFRP)

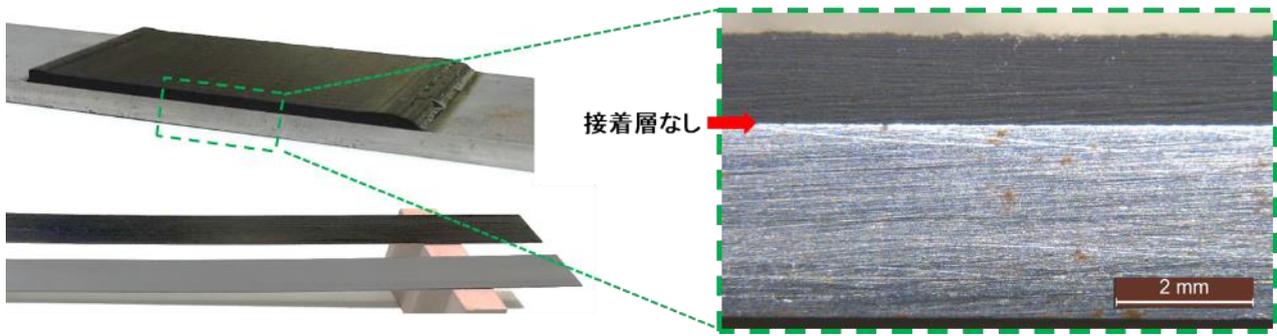


図-14 CFRP/SPCC-SD直接積層物(左上:4層積層物断面、右:4層積層物断面拡大図、左下:1層積層物とSPCC-SD)

## (2) 評価方法

### a) 補強性評価

CFRP/SPCC直接積層物の補強性は、3点曲げ試験により評価した。このとき、スパン間距離:20 mm、テストスピードを1mm/minとし、SPCC-SD側が圧子に接触するように試験片を設置した。

## (3) 結果と考察

### a) 成形結果

SPCC-SDをオープンモールドと見立て、F to C成形を実施することにより得られたCFRP/SPCC-SD直接積層物を図-14に示す。4層積層物の断面観察において、CFRPとSPCC-SDの界面には目立ったボイドなどは観察されなかったことから、CFRPのマトリックス樹脂が接着剤の役割を担い、薄い接着層を形成していると考えられる。以上の結果より、SPCC-SD上へのF to C成形により、接着剤を用いないCFRPの直接積層が可能であることを見出した。

### b) 補強性評価

SPCC-SD(0.8 mm)上にF to C成形によりCFRPを1層(約0.5 mm)積層したCFRP/SPCC-SD直接積層物について曲げ試験を実施し、種々の厚みのSPCC-SDと変位-荷重挙動を比較した(図-15)。直接積層物の曲げ荷重は2.3 mm変位において最大となり、約800 Nを示した。この値は、同変位時における積層前のSPCC-SD(0.8 mm厚)の約4倍、ほぼ同厚みのSPCC-SD(1.2 mm厚)の約2.4倍の値であった。さらに厚いSPCC-SD(1.6 mm厚)と比較すると、初期弾性挙動は異なるものの、ほぼ同等の曲げ荷重を担持できることが判明した。以上の結果から、F to C成形プロセスを用いたCFRP直接積層による異種材補強が可能であることが明らかとなり、部材軽量化が期待される。

試験後の直接積層物の破壊様相を観察した結果、接着界面の剥離は確認されず、圧子付近におけるCFRPの母材破壊が確認された(図-16)。このことから、樹脂とSPCC-SDの界面が十分に高い密着性を有していることが示唆された。

従来の補強工程を模擬して、Prepreg CFRP(約0.4 mm)

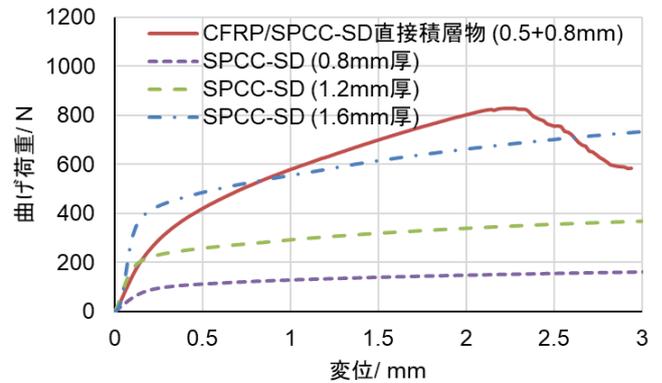


図-15 CFRP/SPCC-SD直接積層物とSPCC-SDの曲げ試験結果

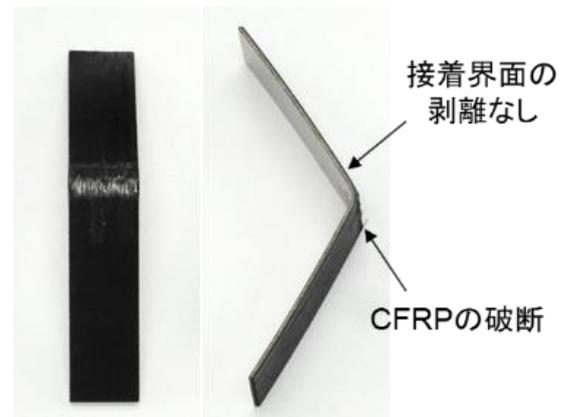


図-16 CFRP/SPCC-SD直接積層物の曲げ試験後外観

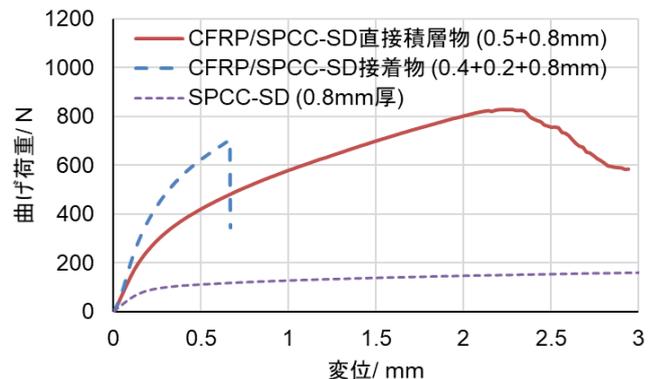


図-17 CFRP/SPCC-SD直接積層物と接着物の曲げ試験結果

と SPCC-SD (0.8 mm) を接着して得られた CFRP/SPCC-SD 接着物についても曲げ試験を同様に実施し、F to C 成形補強との比較を行った(図-17)。接着層の厚みは約0.2mmとなるよう管理した。接着物の最大荷重は約700Nであり、未補強の SPCC-SD よりも高い曲げ荷重を示したが、変位0.7mm付近で試験片の破壊に起因する急激な降伏が生じた。この試験片を観察した結果、CFRPの破断ではなく、CFRPと接着層の界面における剥離が発生していた。これは、Prepreg CFRPと接着層の界面の接着力が不足していたためと考えられる。これに対し、F to C 成形プロセスで得られた CFRP/SPCC-SD 直接積層物は界面の接着力が高いため CFRP の剥離が生じず、炭素繊維が破断するまで荷重を担持した結果、良好な補強性を発現したと考えられる。

### c) 耐環境性評価

CFRP等の成形品が使用される環境は室温のみでなく、高温・低温・高湿などの環境に暴露されることが想定される。CFRP/SPCC-SD直接積層物に関しても同様であり、特に界面への影響が懸念される。そこで、直接積層物を各環境に暴露した後に曲げ試験を実施し、ブランクに対する曲げ荷重保持率を比較する耐環境性試験を実施した(図-18)。

耐熱性試験(100°C×10日間)および恒温恒湿試験(85°C/85%RH×10日間)の結果、曲げ荷重保持率はそれぞれ99%および98%と非常に高い結果であった。このことから、高温・高湿な環境によるCFRP/SPCC-SD界面への影響は非常に軽微であると考えられる。

一方、耐寒性試験(-25°C×10日間)の結果、曲げ荷重保持率は92%と高い結果であったが、他の環境性試験と比較してやや低い結果であった。これは耐寒性試験の暴露環境が-25°Cと低温であり、線膨張係数の大きいSPCC-SDが大きく収縮し、CFRP側が伸展する方向に反りが発生することで界面にダメージが加わったためと推測される(図-19)。

以上の結果より、F to C 成形により得られた CFRP/SPCC-SD 直接積層物は耐環境性に優れ、特に高温・高湿環境に強いことが明らかとなった。

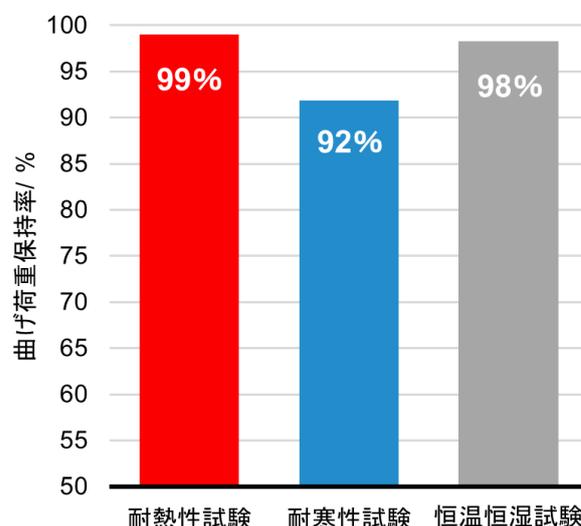


図-18 CFRP/SPCC-SD直接積層物の耐環境性試験結果

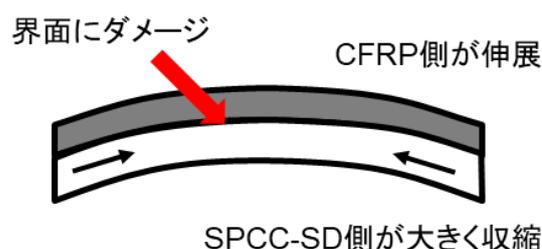


図-19 耐寒性試験暴露時の反り発生イメージ

## 6. 総括

硬化炉を使用せず、オープンモールドに直接FRPを積層可能な「ファイバーto コンポジット(F to C)成形プロセス」を開発し、F to C 成形により得られるFRPが優れた物性を示すことを見出した。さらに、F to C 成形のオープンモールドへの直接積層という特徴を活用し、SPCC-SD上へのF to C 成形により接着剤を用いずにCFRPを直接積層可能なことを見出した。得られた直接積層物の曲げ荷重は積層前のSPCC-SDよりも非常に高い値を示し、F to C 成形プロセスによる異種材補強の可能性が示唆された。

(Received August 30, 2019)

## DEVELOPMENT OF FIBER TO COMPOSITE MOLDING PROCESS CAPABLE OF BEING DIRECTLY MOLDED ON OPEN MOLD

Chihiro ASAKURA, Kazuhide MORINO, Naohiro FUJITA,  
Tomo KIMURA, Tsuyoshi SUKEMUNE and Masayoshi GOKE

Fiber Reinforced Plastics (FRP) is attracting attention in civil engineering and construction fields due to their light weight and environmental durability as compared with metal materials. Recent FRP molding techniques such as intermediate free, fast curing and out of autoclaves are required to save cost and energy. From this background, we developed a novel FRP molding method “Fiber to composite (F to C) molding process”, which needs no curing oven, no press machine, and no intermediate product. In this study, we produced GFRP/ CFRP on open mold with F to C molding process and evaluated their static properties by F to C molding. Furthermore, we achieved to mold their CFRP on SPCC-SD without an adhesive agent by F to C molding and evaluated characteristics of obtained products.