

土木・建築分野への複合材料の適用

齊藤 義弘¹・鶴澤 潔²・保倉 篤³

¹ 金沢工業大学 産学連携コーディネーター (〒924-0838 石川県白山市八束穂 2-2)

E-mail: y.saito@neptune.kanazawa-it.ac.jp

² 金沢工業大学教授 革新複合材料研究開発センター (〒924-0838 石川県白山市八束穂 2-2)

E-mail: uzawa@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³ 正会員 金沢工業大学研究員 革新複合材料研究開発センター (〒924-0838 石川県白山市八束穂 2-2)

E-mail: hokura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

炭素繊維を強化繊維として用いたCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) は軽量、高強度で腐食しないことから航空機への実用化が進みさらに近年は自動車への適用が進みつつある。しかし製造工程が複雑で生産性が低く材料コストに加え製造コストも高くなることから、その生産量は全世界で10万トン程度と限定的な適用にとどまっている。こうした中、複合材料を大量に世の中に供給し活用するために生産サイクルが短く加工性に優れる熱可塑性プラスチックを母材樹脂に用いたFRTP (Fiber Reinforced Thermoplastic) の製造・加工技術の開発が進んでいる。この量産製造可能なFRTPを用いた汎用部材等を土木・建築分野へ大量に供給することが可能になれば単なる軽量化だけでなく現場施工の大幅な効率化や搬送、維持管理も容易となり社会コストを低減する長寿命でメンテナンスフリーな新たな社会インフラシステムの構築が可能となり実用化が期待されている。

Key Words : FRP, FRTP, manufacturing process, infrastructure, thermoplastics

1. はじめに

20世紀半ばに実用化がスタートした複合材料は、近年欧州を中心とした自動車分野へのCFRPの利用拡大に伴い、製造技術の向上、自動化等に代表される成形技術の多様化により世界的に飛躍的な適用拡大の時期を迎えている¹⁾。一方、日本国内の複合材料市場は建築分野においてユニットバスや浄化槽等にGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) が一定量使用されているが新たな商品開拓が進んでおらず市場拡大が見られない状況である (図-1参照)。

さらにCFRPについては世界の炭素繊維の製造の約7割を日本のメーカーが占めるもののそれを使ったものづくりに関しては1割以下であり、素材製造技術の強みを生かしていないといえる (図-2参照)。

日本を除く欧米、中国が成長産業として複合材料の市場拡大が進む中、海外では自動車、航空機に続く新たな市場としてB & I (Building & Infrastructure) への適用が近年注目されている。土木・建築の分野においても軽くて錆びないFRPは期待が大きく、さらに形状の自由度、現場施工の大幅な効率化など、これまでの発想にとらわれない新たな可能性があるといえる。

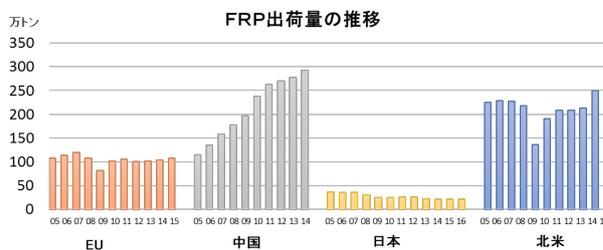


図-1 地域別FRP出荷量

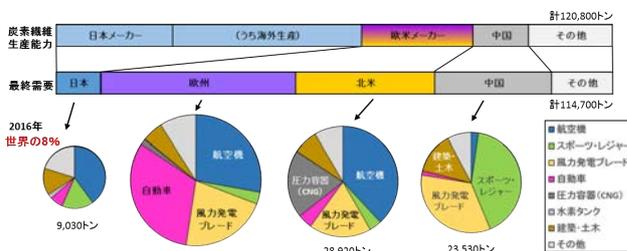


図-2 炭素繊維の生産能力および地域別CFRP生産量

複合材料の適用に向けた課題の一つはコストであるが材料価格だけでなく、部材の製造コスト、特に土木・建築分野では現場施工も含めたトータルでの評価が必要であり、高い生産性で高品質な部材を供給することができ

れば日本においても土木・建築分野への適用拡大は十分見込めるといえる。

以下、近年の海外での土木・建築分野へのFRPの適用事例を概説する。また、課題解決に向けて筆者らが取り組む、革新的イノベーション創出プログラム（COI STREAM）（以下COI事業）において進めている土木・建築分野への複合材料の適用開発について紹介する。

2. 近年のFRPの土木・建築分野への適用動向

(1) 海外でのFRPの建築分野への適用例

建築分野では 1900 年代の半ばより適用事例が見られるが、近年では意匠性の高い建築デザインの実現と現場施工の効率化を目的に適用が進んでいる。図-3 のサンフランシスコ近代美術館（SFMOMA）ビルディングは約 700 枚の FRP 製外壁材（製造：PCT 社）を利用した米国最大の FRP 適用例で、外壁材の軽量化により 500 トンの鉄骨を削減できたと報告されている。



図-3 FRP パネルを外壁材に採用したサンフランシスコ近代美術館²⁾

図-4は2017年にカリフォルニア州に建設されたApple社の施設で、円形の屋根は長さ21m、幅3.5mの同一ラジアルパネル44個で構成され、CFRPを使用することで軽量化され（屋根重量80トン）、地上で組立て後、一体でクレーンにより吊り上げ取付けが可能で、高いデザイン性ととも施工の省力も可能となった例である。



図-4 CFRP製の一体屋根（Apple Campus 2）²⁾

図-5 はサウジアラビアに建設されたメディナ駅コンコースで、ルーフに GF/難燃性 PET フォームコア/難燃性エポキシ樹脂のサンドイッチパネルが用いられている（製造：PCT 社，材料：Grit 社）。4 つのステーションにわり 16,000m² を超える FRP パネルが使用され、重量は 720 トンで FRP を用いた建築では世界最大の規模である。この例も FRP でなければ実現できない高いデザイン性、軽量材料による省施工、ルーフを支える主構造の簡略化を示す例である。図-6 も同様に大型の FRP サンドイッチパネルを使用した例で、教会上部のドームを 8 分割したパネルで構成し、地上で組立て一体にした後にクレーンで設置を行っている。



図-5 Medinah Station Concourse Roof²⁾



図-6 composite domes on top of orthodox cathedral²⁾

このような大型パネルの製造については図-7に示すように主にVaRTM（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）成形法を用いて製造されている。建築分野の適用例では上記に示したように、主に外壁やルーフなどの各建築物に固有の形状で一品ごとの製造が必要であり、少量生産、大型部材の一体成形を行うためにはVaRTM成形法が適しているといえる。このVaRTM成形法は、簡易な型に繊維基材やコア材を配置し、これをフィルム等で覆い真

空圧力により樹脂を注入させる方法で、大型一体成型が可能でありプレジャーボートやヨットの製造方法として開発された成形法である。上記で紹介したルーフやパネルの製造を行ったPCT社やMultiPlast社はヨットの製造メーカーでもあり、このようなFRPの大型構造一体成形の設計・施工を得意としたメーカーが欧米には数多く存在し、これらの企業が建築分野でも活躍していることは特筆される点である。



図-7 VaRTM成形方法³⁾

一方で日本では小型船舶（漁船）やボート、ヨットなどのFRP製造を支えるボート産業がバブル期以降縮小し、製造を担う企業が非常に少ないことが複合材料の適用拡大への大きな障壁の一つであるといえる。

さらに、日本における建築分野での課題としては、建築基準法への準拠、耐火・防火構造への適用、認定等が必要であり技術的な課題と並行して取り組む必要がある。

(2) 海外でのFRPの土木分野への適用例

土木分野では多くの建造物が大型で高い外力に耐荷する必要があり、FRPの適用はFRP単体ではなくコンクリートや他の材料と組み合わせた複合化により大型構造部材を実現している適用例が多くみられる。

図-8（左側）は鉄筋の代替えとしてFRP筋を使用した例である。日本でも降雪地域や海岸部では塩害による鉄筋腐食が大きな問題であり、腐食しないFRP筋を用いることが有効であるといえる。

さらに、引張強度の高いCFRPを有効に使用することで、部材の軽量化や断面形状を小さくすることが可能である。図-8（右側）のコンクリート桁では同じ剛性、強度を保ちながら50%の軽量化が実現されている。



図-8 FRP製補強筋²⁾

また、コンクリートとCFRPのハイブリッドの事例としては、図-9および図-10に示すように、内側と外側のコンクリートでESP（発泡スチレン）フォームを挟み

CFRPメッシュ（Chomart社製C-GRID®）で補強した高断熱のプレキャストが実用化されている。斜め方向のCFRPのメッシュで内側、外側のコンクリートをつなぎせん断荷重を受け持つことで鉄筋を大幅に減らすことができ、プレキャストプレートの重量を40~50%軽量化している。この軽量効果により現場施工も1週間の工期短縮が可能となったと報告されている。

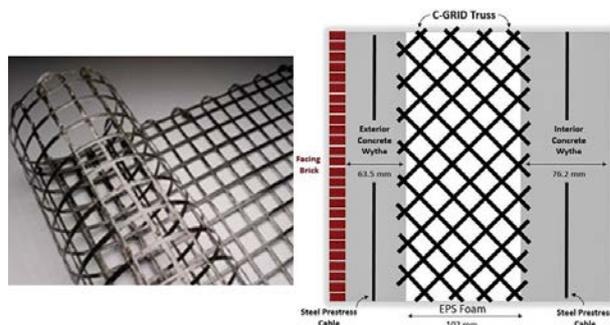


図-9 Chomart社製 C-GRID®のコンクリートプレキャストへの適用⁴⁾



図-10 コンクリート/ESP/CFRPハイブリッドのプレキャスト適用例（GSU Piedmont Central student housing, Atlanta）⁴⁾

図-11、図-12は橋梁のケーブル、緊張材にCFRPケーブルを使用した例である。引張強度に優れるCFRPを緊張材に使用することは最も効果的な適用方法であり、さらに、長いスパンでは線膨張係数が小さく季節による伸びの変化が小さいことも利点である。このような張力のかかる部材への適用では金属とは異なる端部の固定方法が課題である。



図-11 CFRP-UD ロッドによるパラレルケーブル（右）と斜張橋の適用事例⁵⁾

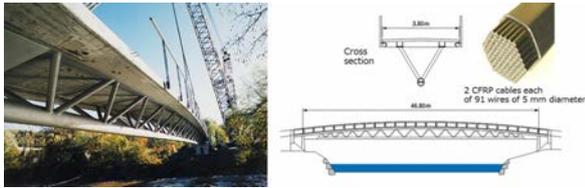


図-12 CFRP-UD ロッドによるパラレルケーブルをトラス構造に用いた橋梁の例⁵⁾

また、既存のコンクリート建造物への補修・補強工法分野ではCFRPの軽量・高強度な機械特性や優れた施工性、さらにコンクリート表面の被覆による鉄筋の腐食を抑える効果も期待できるなど多くの利点があり、多数の事例がある。特に橋梁の耐震補強は、橋脚の表面や床版と桁の裏側など、重い鋼材より簡便な作業で施工できることから海外では広く普及している。国内でも補修補強指針や施工マニュアル等も整備されており、今後のCF材料の価格低減によって、さらに普及が進むと期待されている(図-13参照)。



図-13 CFRPによる橋梁の補強例²⁾

このように炭素繊維やガラス繊維は引張に強く、コンクリートは圧縮に強い性能を組み合わせることが効果的であり、FRPは腐食しないことからコンクリート内部に埋込み適用する場合はかぶり厚を考慮する必要が無いことなど、単なる材料置換だけではないFRPの特徴を生かす設計を盛り込むことでさらに軽量化、省施工、長寿命化、高機能化が可能になるといえる。

3. COI 事業における建築・土木分野へのFRP適用を目指した革新的連続成形技術研究開発事業

前章で紹介したように海外におけるFRPの土木、建築分野への適用事例は数多くあり、さらに適用分野が拡大している状況である。日本においてもFRPの土木・建築分野への適用はインフラの老朽化、現場での人手不足、災害対策などの多くの課題を解決する手段として期待できるが、FRPに関する認知度、技術の普及度、製造を担う企業の不足など、欧米とは異なる背景があり同じように適用拡大が進む状況とはいえない。

本章では筆者らが日本における土木建築分野へのFRP

の適用を目指し進めているCOI事業「革新複合材料による次世代インフラシステムの構築」について概要を紹介する。

本COI事業では、FRPの母材樹脂に従来と異なる熱可塑性樹脂を用いることで部材の超高速成形を実現することがカギであり、二次加工性にも優れた汎用部材の大量生産を可能にすることで、製造・組立・施工・維持管理までのトータルでのコスト成立性も検証し、社会実装を目指すアプローチである。以下にプロジェクトの概要、開発成果の例を紹介する。

(1) 建築・土木分野へのFRP適用を目指したCOI事業の概要

COI事業は文部科学省が企業だけでは実現できない革新的なイノベーションを産学連携で実現を目指すために、平成25年度から開始したJST(国立研究開発法人科学技術振興機構)の研究支援プログラムである。このプログラムでは日本の研究開発の「センター・オブ・イノベーション」として一つ屋根の下(アンダーワンルーフ)、川上(基礎研究)から川下(産業への適用研究)までの一貫した研究開発を行い、それにより10年後の「活気ある持続可能な社会の構築」を目指すことを理念とし全国で12拠点が9年間の事業として事業を実施している。(平成30年9月現在18拠点)

金沢工業大学を中核拠点としたCOI事業は「革新材料による次世代インフラシステムの構築」をテーマとし、環境性能に優れ高機能(長期耐久性、難燃性等)な「革新材料」の開発と、高速・連続技術により生産性を従来の100倍を目指す「革新製造技術」を開発することで、革新複合材料を次世代インフラシステムに適用し社会実装することを目標としている。



図-14 金沢工大 COI 拠点の社会実装目標

主な社会実装先は、海洋および社会インフラ、住宅・都市の三分野をターゲットとしている。海洋分野では鉄など従来材料では成立が困難だった長大連続構造を革新

複合材料により可能にし、例えば大型帆走船の硬翼帆や革新洋上風力発電システム、さらには大深海洋上プラント等へ適用を目指している。社会インフラ分野では軽量高強度で長寿命な革新複合材料によりメンテナンスフリーな社会インフラ（橋梁、付帯設備等）を実現し、さらに住宅・都市分野では災害にも強く社会環境の変化に対応可能な町づくりを目指している。これらにより「安心・安全で地球と共存できる数世紀社会」を実現がすることがゴールである（図-14参照）。

(2) 熱可塑性 FRP と連続成形技術による汎用構造部材の開発

革新複合材料の開発では、熱可塑性樹脂を主な開発材料としている。従来の熱可塑性樹脂を使用した射出成形やプレス成形技術はその特徴から小型部材への適用に限定されていたが、革新的な製造技術との組み合わせにより、土木建築分野で広く用いられている型鋼・長尺部材などの汎用構造部材と同様に熱可塑性複合材料（以下 FRTP）を大量生産し、低コストで供給することが目的の一つである。FRTP は加熱溶融することで容易に曲げや接合が可能な点もこれまでの FRP に無い特徴である。

図-15 に本事業で開発中の熱可塑性 CFRP 中間基材の高速連続成形技術を示す。複合材料に熱可塑性樹脂を用いる場合、最大の課題は繊細な繊維束内部への樹脂の含浸である。重合が完了した高分子の熱可塑性樹脂は、熱による溶融 - 固化の可逆性による重合反応を必要としないため、高速での成形が可能である反面、溶融時の粘度が非常に高く繊維との一体化が容易ではない。図-15 に示すダブルベルトプレス（DBP）装置は上下のスチールベルトの間に材料を挟み加熱・加圧し、溶融した樹脂を高圧で繊維基材に含浸させることで連続的に熱可塑性 FRP の平板の高速成形を実現している。さらに、これを中間基材として再度加熱軟化させることで、ロールフォーミング成形（図-16）や連続プレス成形（図-17）により短時間での形状付与が可能である。ロールフォーミング成形では5m分の成形速度を実現している。

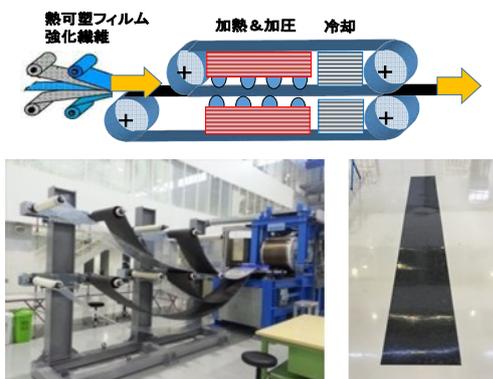


図-15 DBP 装置による中間基材の製造技術

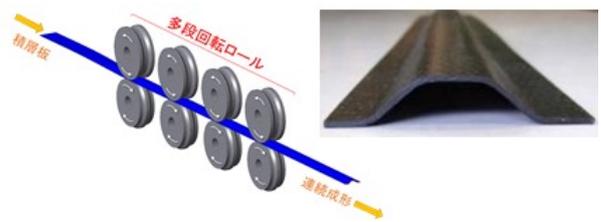


図-16 ロールフォーミング技術による長尺部材の成形



図-17 連続プレス成形による長尺部材の成形 (L=4m)

図-18 は新規熱可塑性エポキシ樹脂による超高速引抜き成形の例である。熱可塑性エポキシ樹脂は、熱硬化性と熱可塑性の両方の利点を持ち合わせる樹脂であり、低粘度の液状モノマーで温風雰囲気下で重合することができ、さらに重合後は熱可塑性の特性を有しているため、重合反応後に冷却固化することにより、低コストな大型オープンを用いた大幅な高速成形実現している。

図-19 は上記の含浸プロセスを用いた CFRP ワイヤで小松精練株式会社により商品化され（カボコーマストランドロッド）耐震補強等の用途開拓が進んでいる。比強度に優れ、かつ柔軟性も持つ CFRP ワイヤは既存の建築物にも簡単に施工できることから、歴史的建造物や木造家屋の補強などに適用がはじまり、今後さらなる普及が期待されている（図-20参照）。

また、カボコーマストランドロッドは優れた技術を早期に標準化し事業化を促進する経済産業省の「新市場創造型標準化制度」の対象として採択され、平成 30 年度内に耐震補強材として JIS に制定される見込みである。

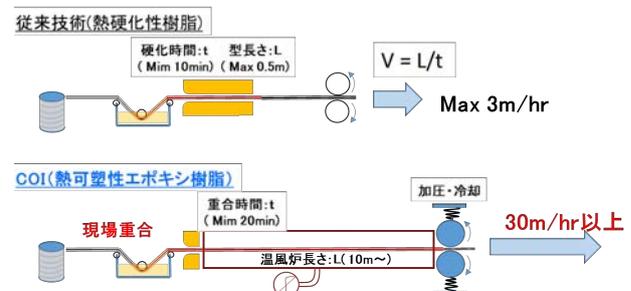


図-18 高速引抜き成形技術（熱可塑エポキシ樹脂）



図-19 CFRP ワイヤー (カボコーマストランドロッド) による耐震補強 (小松精練 fa-bo)

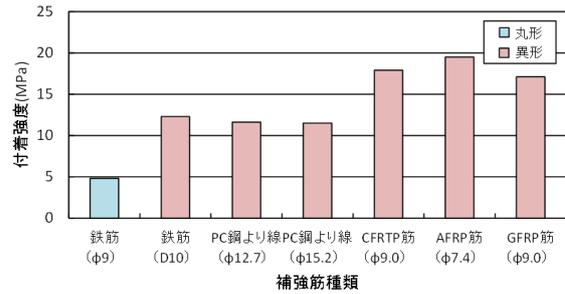


図-22 コンクリートとの付着試験



図-20 CFRP ワイヤー (カボコーマストランドロッド) による善光寺経蔵の耐震補強

コンクリート構造の鉄筋代替えとして期待される FRP 筋の開発では、超高速引抜き成形による FRP ワイヤーの開発を進めている。安価な PP 樹脂とガラス繊維、またはバサルト繊維等を用い 1 m/秒の成形速度を目標としている (図-21 参照)。製造技術の開発とともにコンクリートとの適用性の検証を進めており、図-22 に示すコンクリートとの付着試験結果では、PC 鋼より線と比較して、FRP ワイヤーの方が付着強度は約 1.5 倍大きいことを確認しており、さらに長期耐久性等についても試験を実施している。

図-23 は T 桁橋梁の鉄筋代替えとして CFRP ワイヤーの適用を検討した 1/2 モデルである。図-23 に示すように熱可塑性樹脂を使った FRP 筋は熱を加えることで容易に曲げることができるため、現場施工の大幅な効率化も期待できる。



図-23 CFRP ワイヤーによる T 桁の配筋 (1/2 モデル)

(3) 土木・建築分野へ FRP を社会実装するために

製造技術の開発と並行して、研究開発された材料を新たに、かつ継続的に建築・土木分野へ社会実装し事業化するためには、それを担う企業との深い連携が不可欠である。本 COI 事業では、土木分野への実装に向けて、発注者/管理者、認証者、建設会社、部材メーカー等の 4 分野 27 組織から構成される土木研究会を立ち上げ、4 年間に亘る委員会やイベントを通じ、ユーザーからのニーズや要求仕様やニーズを整理し、研究メンバー側に提言してもらい取り組みを行ってきた。これにより、基礎研究レベルや共通基盤技術への展開に留まらず、具体的な出口目標に向かった研究開発により社会実装の実現を目指していることも本事業の特徴といえる。

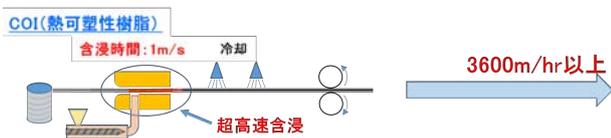


図-21 GF/PP 超高速引抜き成形による FRP ワイヤー

5. おわりに

軽量、高強度で長寿命な複合材料は、近年の熱可塑性 FRP の研究開発により、これまでに不可能であった高速成形や曲げや溶着などの二次加工が可能になり、土木・建築分野においては現場での施工の効率化も大きく期待できる。製造・組立・施工・維持管理までトータルで検証することによりコスト成立性もクリアできるといえる。

すでに海外では、鉄やコンクリートだけでは実現できない土木・建築構造を FRP で実現しつつある中、大学研究機関としては、技術普及、産学連携による開発支援、

ネットワーク構築のプラットフォームの役割を担い、土木建築分野を牽引役として、社会的課題を解決する FRP の適用拡大に注力していきたい。

謝辞：本研究は、文部科学省・科学技術振興機構による COI プログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～」により進められたものである。

参考文献

- 1) 鶴澤潔・斉藤義弘・保倉篤：土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 5, II_1-II_9, 2017.
- 2) Frederic Reux, Andrew Mafild : The future of building, Frederique Mutel, 2017.
- 3) Amer Affan : Architectal Project shwcases in composites, Composite Asia 2018, July 2018.
- 4) Ginger Gardiner : Higher performance in precast concrete with CFRP, Composites word, pp. 34-40, January 2018.
- 5) Meier, U. : Long term reliability of CFRP in bridge engineering, EMPA (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology), 20th International Conference on Composite Materials, Proceedings, 2015.

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS TO CIVIL ENGINEERING AND CONSTRUCTION FIELDS

Yoshihiro SAITO, Kiyoshi UZAWA and Atsushi HOKURA

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) is light, strong and corrosion free, so it came into use in the field of aerospace and lately application to automobiles is moving ahead. However, since the manufacturing process is complicated and productivity is low, not only material cost but also manufacturing cost becomes high, the production volume is still around 100,000 tons worldwide and has found limited application. Under these circumstances, in order to supply and use a large amount of composite materials in the world, the development of manufacturing and processing technology of FRTP (Fiber Reinforced Thermoplastic), which has short production cycle and excellent processability is underway. If it becomes possible to supply a large volume of standard components made of this mass-producible FRTP to the civil engineering and construction fields, it is not merely weight reduction but greatly improves work efficiency, and moreover, material handling and maintenance become easy. Therefore construction of new social infrastructure systems, which are long-lasting and maintenance-free, capable of reducing social costs becomes feasible. High expectations are being placed on the practical application of FRTP.