

土木・建築におけるFRP材応用の状況

松本 幸大¹・橋本 国太郎²

¹正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

FRP材料が開発されてから約一世紀を迎え、近年では、土木・建築構造物においてもFRP材の応用法が目覚ましく研究・開発されている。これまで、既存構造物の補修・補強材料や軽量・高耐食性を活かした軽量構造物としての応用、また、他の構造材と複合化することで高機能化を図る方法などが進められており、適材適所の材料選定と応用の事例が進められている。FRP材は、強化繊維とマトリックス樹脂との複合材料であり、各材料の選定の他、成形方法や材料設計を必要とするなど、鋼やコンクリートとは別の設計上の留意点が存在する。本稿では、こうした材料選定・検討を含んだ既往の研究・応用事例を纏めるとともに、今後の展望について述べる。

Key Words : FRP, application, civil structures, building structures

1. はじめに

繊維強化樹脂（FRP）材は軽量・高強度で構造材料としての性能を十分に有していることに加え、耐食性の観点、また、材料設計の自由度を有することなどから、様々な建設構造物材料として利用されている^{1,6}。FRP材は強化繊維とマトリックス樹脂の複合材料であり、所望の構造性能や成形材料の形状、また、施工・使用環境などに応じて材料や基材構成、成形方法を選択する必要がある材料である。図-1は、FRP材を応用するにあたって、材料設計に関わる主要な事項を示したものであるが、各々が独立に検討されることは望ましくなく、相互の関係性も考慮し、最良のものを選択する必要があると言える。FRP材を用いた航空機・自動車や産業部品・製品では、形状・基材構成・成形方法などの仕様を決定した後、大量生産するケースが多いが、建設分野においてはそうした共通化が困難なケースが少ないため、個々の事例に応じて設計検討が必要となると考えられる。

例えば、FRP材接着による構造物の補修や補強⁷⁻¹⁰を考えた場合、接着対象が平面で一方向強化材によって効果が得られる場合であれば、連続引抜成形材などの工場生産品を現場で接着する方法が効果的かつ効率的と考えられる。また、複雑な表面形状で多軸方向に強化繊維を配することが必要であれば、表面形状に柔軟に対応可能な現場でのハンドレイアップ成形・接着が用いられることが多い。これは、ハンドレイアップ成形は平面であって

も適用可能であるが、連続引抜成形材の利点として、高い強度・剛性とその品質の安定性が挙げられ、ハンドレイアップ成形による方法と比較して少ないFRP材の使用量で所望の性能が得られることによる。さらに、平面で多軸基材を要する場合は、成形方法や施工方法に選択肢が広がると考えられる。

基材・樹脂選定を考えると、炭素繊維はガラス繊維・アラミド繊維に比べ高い剛性を有していることから、剛性が必要な補修・補強、また被補強材との剛性のバランスから鋼構造においては炭素繊維を用いることが一般的となる。強化繊維が決定されると、マトリックス樹脂もある程度限定され、成形方法と併せて樹脂選定を進めることになる。前述のハンドレイアップ成形では、接着性・施工性の観点から常温硬化型のエポキシ樹脂が用いられることが多い⁷⁻¹⁰。

FRP材を主構造部材として用いる場合では、等断面長尺部材が成形・施工上扱いやすいことから、連続引抜成形材などが用いられることが多い。これは、機械的性質に加え、材料の価格にも関係する。また、FRP構造においては、その接合方法が数多く検討されており¹¹、機械接合や接着接合、またその併用などが提案されているとともに、新たな接合方法の提案検討も進んでいる。

本稿では、こうした材料設計の視点から、FRP材の特性と研究・応用事例との関係を整理し、近年のFRP関係研究を中心に俯瞰し、図-1に示した[1] 材料選定・[2] 材料設計・[3] 成形法・[4] 施工環境の観点で考察すると

もに、今後の応用に関する展望を纏める。

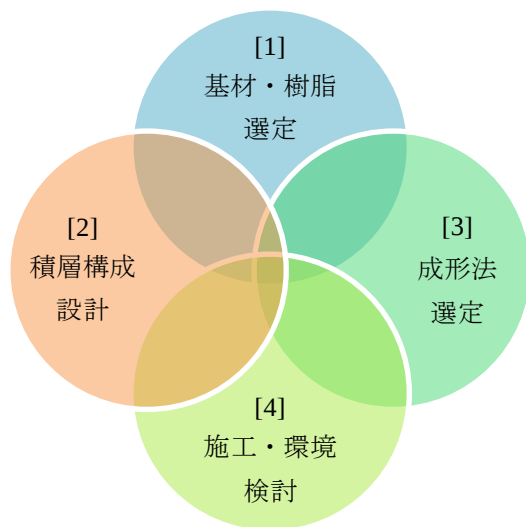


図-1 FRP材応用のための検討事項

2. 基材・樹脂選定に関する状況

(1) 強化繊維に着目した分類

建設分野におけるFRP材の強化繊維としては主に炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維が用いられている。炭素繊維を使用したCFRPは他の繊維に比べ高い剛性・強度を有することから、鋼構造の補修・補強やRC構造の補強材料として応用される例が多く報告されている⁷⁸⁹⁾。ガラス繊維を使用したGFRPは繊維が安価なことから、FRP構造物の主構造部材の材料としての応用事例^{1,2,46,87,89)}の多くはGFRPとなっており、GFRP部材の一部に炭素繊維を配することで剛性を確保したハイブリッドFRP部材も応用されている⁸⁹⁾。アラミド繊維の剛性は炭素繊維に及ばないものの、耐アルカリ性や局所変形性能に優れるなどの特徴から、組紐状の成型品などが開発されており、AFRPとしてRC構造の補修・補強材料として応用されている^{10,90-102)}。

CFRP・GFRPについては、設計に用いる材料強度特性の解明や、基材構成の違いが力学特性に及ぼす影響などを分析する学術研究も多く行われている。これは、CFRP・GFRPがハンドレイアップ成型品や引抜成型品、またプリプレグ基材などとして入手しやすいこと、また自由な基材構成による成形が可能なハンドレイアップ成形での実績が多くあることが要因と考えられる。

(2) マトリックス樹脂に着目した分類

マトリックス樹脂は、強化繊維との相性や施工性などを基に選定されることが多いと考えられる。すなわち、補修・補強におけるFRP成形では含浸接着樹脂としての用途となり、接着性能も必要であることから常温硬化型

エポキシ樹脂が用いられ、成形品の応用においては、CFRPの場合はエポキシやビニルエステル、GFRPの場合は不飽和ポリエステルやビニルエステルが用いられている。建築分野など耐熱性が要求される用途ではフェノール樹脂を選定することもあり¹⁰³⁾、FRP材の弱点克服・応用範囲拡大のために耐熱性能を向上させたフェノール樹脂の開発は盛んに行われている¹⁰⁴⁾。これらの樹脂は熱硬化性樹脂であり、FRP材の建設分野への応用初期においては熱硬化樹脂を用いたFRP材がほとんどであったが、近年では、大量生産性や加熱再成形、またリサイクル可能性もある熱可塑性樹脂を用いたFRP材の応用も検討され始めている^{51,105,106)}。

3. 積層構成・材料設計に関する状況

(1) 一方向強化材の応用事例

一方向強化材は、強化繊維の方向に優れた強度・剛性を有することや、高精度・高品質で大量生産が可能な引抜成形法による成形に適していることから、棒材・板材などを中心として多くの断面形状の工場成型品が生産され、応用されている。一方で、強化繊維の方向と異なる方向や剪断方向の剛性・強度に対しては、強化繊維のそれに対して機械的性質が極めて劣ることから、応用の際には作用応力を十分に検討することや、強化繊維の方向に有効に応力を作用させる設計が必要となる。引抜成形材においても、円管の場合はワインディングなどによる周方向繊維の配置や、コンティニュアストランドマットやチョップドストランドマットを配することで軸方向以外の性能改善を図ることが行われている。また、引抜成形においても多軸基材を導入した事例も報告されている^{88,107)}。

一方向強化材が最も適する用途としては、引張材としての応用といえ、RCへの補強筋や引張側補強として、また、ケーブルや板状のFRP材をブレース材としての応用がなされている^{21-26,34,40,44-47,51,57,63,82,90-94,96-98,100-102,105)}。また、一方向強化材を細径の棒状の断面とすることで、繊維シートに近い扱いが可能であることに注目して、一方向強化材を多軸に接着した補強事例も見られている^{108,109)}。

(2) 多軸基材の応用事例

一方向にのみ強化されたFRP材では、構造性能として不十分な場合には複数方向に強化繊維を配したFRP材を用いること、またその配向方向を設計することが必要となる。これには、添接板などの複雑な応力状態が予想される用途や、構造部材における機械接合部の強度確保、設計において疑似等方性の機械的性質が必要な場合などがあげられる。機械接合部周辺においては、[0/90]や[±

45]などの繊維配向とすることで支圧強度の上昇や、支圧破壊後に剪断抜けを生じにくく延性的な破壊挙動となることが示されている¹¹⁰⁾。強化繊維自体は弾性材料であり繊維破断後は急激な耐力低下を招くが、繊維配向設計により最大耐力到達後も急激な耐力低下を防ぐ設計が可能であると考えられる。

4. 成形法に関する状況

(1) ハンドレイアップ成形の応用事例

ハンドレイアップ成形はFRP材の成形において最も古典的な方法の一つと言え、補修・補強における現場成形や、工場生産においても広く用いられている。大規模な成形用設備が必要なく、基材構成の自由度も高いことが特徴であると言える。一般には高剛性の金型の上に、強化基材を配置して含浸を行い、硬化後に脱型する成形法となるが、既存構造物の補修・補強においては被補強材である既存構造表面を成形用の型として用い、含浸成形と同時に接着を行うことも可能であることから、この種の手法による補修・補強効果の研究事例が多く検討されている^{12,14,15,20,23,27-30,35,36,38,39,42,45,48-50,57,59,67,69-72,79-81,90,91,94,95,97,98,100)}。工場でのハンドレイアップ成形FRP材をFRP構造に用いている例^{88,110,111)}も報告されており、中でも含浸後に金型を用いて加圧することで繊維体積含有率や寸法精度を大幅に改善したハンドレイアップ成形法も応用されている。ハンドレイアップ成形は設計・形状自由度の高さから特殊形状や量産用途ではない場合などに極めて有効であり、今後もFRP材の建設用途として期待される。

(2) 引抜成形の応用事例

引抜成形は等断面長尺のFRP部材を成形するために適した成形法であり、補修・補強用のCFRP板材やロッド材の成形をはじめ、箱形・パイプ・H・I形断面材などの断面寸法がJISにより整理されており、これらの断面がトラス部材や桁材などとしてFRP構造物の主構造部材として用いられている。主構造部材への応用事例では、鋼構造に類似していると言え、規格断面のFRP部材を組み立てて構造物を構築する手法となる。また、コンクリートの補強用途として用いられるリブ付棒材や組紐状の棒材も引抜成形法により成形されている。

等断面FRP部材の有効利用としては、構造システムを共通化するなどし、部材種類を限定した用途が考えられ、GFRPトラス歩道橋⁸⁹⁾やGFRP検査路⁸⁷⁾では実用化が進んでいる。

(3) その他の成形法

前述の二種の成形法と基材構成との関係を考えて、

ハンドレイアップ成形は自由な基材構成や形状が可能な手法である。また、引抜成形は工場生産ゆえ、極めて安定した機械的性質が得られる量産向けの成形法である。これら双方の利点を組み合わせた手法として、プリプレグ基材を用いたFRP材や真空樹脂含浸成形によるFRP材の応用事例が見られる。

前者は半硬化状態の熱硬化樹脂が含浸されたFRP材を用いるものであり、積層やある程度の形状変更が可能であることから、所望の基材構成・形状とした後に加熱硬化することでFRP材の成形が可能となる。FRP材の力学特性分析や補修・補強への応用事例が報告されているとともに、それらの形状・力学性能の安定性は工場生産品と同等である。この手法を応用し、プリプレグ基材を接着・加熱硬化することで既存構造物と一体化する手法や延性的な破壊挙動を実現させる基材構成に関する研究が進められている^{33,43,58,112)}。

後者は、ハンドレイアップ成形時の含浸・脱泡作業を真空圧により行う成形法であると言え、ハンドレイアップ成形では一般に繊維シート一枚ずつ含浸・脱泡が必要なのに対し、必要量の強化基材をバギングし、真空圧を利用して一度に含浸が可能な手法である。真空樹脂含浸成形法は、現場成形も可能であることから、ハンドレイアップ成形の代替として多軸且つ多積層の含浸接着手法としての応用が進められている^{18,31,40,41,55,56,60,61,63,66,70)}。何れの手法も、航空分野・自動車分野などのFRP部材成形手法として応用されてきた実績があり、寸法・機械的性質の安定性や含浸時間の短縮、また作業環境の改善に繋がることが期待できる。

5. 施工や環境面に関する状況

(1) 用途と施工

FRP材の軽量性を活かした用途・施工の好例としては、一括架設による施工の合理化が挙げられる。工場でFRP部材を組み立てFRP構造とした後、現場まで運搬し一括架設を行うことが出来ることは、施工の安全性・構造物としての不整の低減、施工時間の短縮など、様々な利点につながる。文献^{4,88)}では、GFRP歩道橋を一括架設により施工した事例が報告されている。また、離島や山岳地など重機が入れないような場所での大型構造物の施工に関しては、FRPの軽量性が最大限に活かせると考えられる。

補修・補強においても、人力運搬可能な施工方法であることは、施工可能な環境を広げるとともに重機使用の低減にも繋がることから、今日の建設構造物の維持管理に大きく寄与できる材料・施工法に繋がっている。

(2) 耐候性・耐久性

長期の供用を要求される建設構造物においては、既往のFRP材の応用分野より長期の耐候性評価や繰返し荷重下における耐久性、また化学的作用による変状の有無などを考慮する必要がある。近年では、FRP材の建設構造物への応用が進んでいるが、同時にこれらの長期性能についても様々な研究成果が蓄積されつつある。文献113)では、干満帯などの腐食環境の厳しい環境におけるFRP材の応用事例について、その材料劣化の検討が報告されており、顕著な性能低下は無いことが報告されている。また、文献114-116)では、屋外実曝露試験に基づくFRP材の劣化状況が報告されており、外観は樹脂痩せ・外層の強化繊維露出などが生じているものの、機械的性質に大きな低下が無いこと、一方で顕著な強度低下が生じてしまう環境条件などが報告されている。また、接合部において鋼構造と同様の摩擦耐力を期待する接合部においては、樹脂材料の粘弾性特性によりクリープ変形が生じ、ボルト軸力が経時的に低下することが知られていることから、その把握および軸力低減の改善手法が提案されている^{117,118)}。FRP材は耐食性を期待されて用いられることも少なくないが、それを実証する意味でも、今後、FRP構造物の長期構造性能の把握を行う必要があると考えられる。また、災害や事故なども含めたFRP材自体の変状や劣化と性能との定量的関係や、補修・補強方法についても今後検討されるべきと考えられる。

6. おわりに

本稿では、FRP材の材料設計・選定に関わる観点で近年のFRP材関係研究を俯瞰した。FRP材は、多種多様な材料選定・成形法を用途に応じて最良のものを選択する必要があることを念頭に、今後の応用可能性をパネルディスカッションで議論し、まとめとしたい。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP60年の歩み、2015
- 2) 強化プラスチック協会：FRP構造設計便覧、1994
- 3) 土木学会：複合構造標準示方書 設計編、2015
- 4) 土木学会：土木学会：複合構造シリーズ 04 FRP 歩道橋設計・施工指針（案）、2011
- 5) 土木学会：土木学会：複合構造シリーズ 06 FRP 水門設計・施工指針（案）、2014
- 6) 日本建築学会：FRP 材を用いた合成構造に関する動向と将来への展望、日本建築学会大会構造部門パネルディスカッション資料、2014
- 7) 土木学会：複合構造レポート 05 FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端、2012
- 8) 土木学会：複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）、2018
- 9) (株) 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、pp.52-53、2013
- 10) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案、2002
- 11) 土木学会：複合構造レポート 09 FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術、2013
- 12) 奥山雄介、宮下剛、小林朗、秀熊佑哉：残留変形を有する鋼部材への炭素繊維シート接着による補修工法に関する基礎検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I103、2016
- 13) 上原佑也、田中幹基、和田新、秀熊佑哉、小林朗、宮下剛：腐食損傷した鋼部材接合部における CFRP および CF アンカー補修の検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I109、2016
- 14) 秀熊佑哉、小林朗、大垣賀津雄：局部座屈した H 形鋼短柱の炭素繊維シートを用いた補強方法に関する基礎検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I112、2016
- 15) 岡崎直斗、中村一史、岸祐介、松井孝洋：座屈損傷を受けた円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立てによる補修効果、土木学会第 71 回年次学術講演会、I258、2016
- 16) 金山由布子、判治剛、館石和雄、清水優、服部真未子、牛田健友：溶接継手に生じた疲労き裂に対する CFRP 接着補修の効果に関する研究、土木学会第 71 回年次学術講演会、I390、2016
- 17) 近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛：CFRP 部材による鋼桁端腐食部の補修方法と性能回復に関する解析的検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I441、2016
- 18) 小林洗貴、近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛：VaRIM 成形を応用した CFRP による鋼桁端腐食部の補修に関する検討、土木学会第 71 回年次学術講演会、I442、2016
- 19) 伊藤寛弥、Thay Visal、中村一史：溶接継手部から発生した疲労き裂のプレテンションを導入した CFRP 板接着による補修効果、土木学会第 71 回年次学術講演会、I443、2016
- 20) 小森徹、加賀谷悦子、黒木孝司、宮下剛：鋼板桁橋桁端部への炭素繊維シート補修工法の適用について、I444、土木学会第 71 回年次学術講演会、2016
- 21) 森下雅也、呉偉棟、村上由祐、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、山口信、久部修弘：CFRP メッシュ埋設補強 RC 梁に関する実験的研究 その 1 セン断補強効果、日本建築学会学術講演梗概集、1664、2016
- 22) 呉偉棟、森下雅也、村上由祐、村上聖、武田浩二、佐藤あゆみ、山口信、久部修弘：CFRP メッシュ埋設補強 RC 梁に関する実験的研究 その 2 曲げ補強効果、日本建築学会学術講演梗概集、1665、2016
- 23) 八神紗良、瀧野敦夫：根継ぎ部に炭素繊維補強を施した柱の曲げ実験、日本建築学会学術講演梗概集、2203、2016
- 24) 藤本信介、高松隆夫、玉井宏章、岩瀬貴信：継手を有する炭素繊維プレートによる H 形鋼梁の補強工法に関する実験的研究、日本建築学会学術講演梗概集、2252、2016
- 25) 堀井久一、御厨健太、玉井宏章、高松隆夫、山西史朗、藤本信介、陣川晃司：炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その 1 予備疲労試験の概要、日本建築学会学術講演梗概集、2254、2016
- 26) 御厨健太、玉井宏章、高松隆夫、山西史朗、藤本信介、堀井久一、陣川晃司：炭素繊維プレート接着補強鋼部材の接着剤疲労試験 その 2 予備疲労試験結果、日本建築学会学術講演梗概集、2255、2016
- 27) 王智睿、新藤忠徳：炭素繊維シートの補強効果に関する実験的研究 両面補強と片面補強の相違について、日本建築学会学術講演梗概集、2306、2016
- 28) 金澤優樹、鈴木健太、林和宏、松井智哉、齊藤大樹：炭素繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート造柱なし壁の変形性能に関する研究（その 1 炭素繊維シートで補強された角柱体コンクリートの力学的特性）、日本建築学会学術講演梗概集、2301、2016
- 29) 鈴木健太、金澤優樹、林和宏、松井智哉、齊藤大樹：炭素繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート造柱なし壁の変形性能に関する研究（その 2 RC 造補強壁の変形性能の評価に関する考察）、日本建築学会学術講演梗概集、2302、2016
- 30) 岡崎直斗、中村一史、岸祐介、松井孝洋：座屈損傷を受けた円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立てによる補修に関する実験的検討、第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2016
- 31) 小林洗貴、近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛：VaRIM 成形を応用した CFRP による鋼桁端腐食部の補修、第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2016
- 32) 近藤諒翼、小林洗貴、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛：CFRP 部材による鋼桁端腐食部の補修方法と性能回復に関する基礎的検討、第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2016
- 33) 松村政秀、陳晨、中尾亮介、竹本香織、杉浦邦征：熱硬化型プリブレグシートを用いる柱状鋼構造物の補修・補強法、第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2016
- 34) 横田龍一、藤井堅、秀熊佑哉：腐食損傷した鋼板への部分補修における CFRP 接着工法の適用性、第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2016
- 35) 秀熊佑哉、小林朗、大垣賀津雄、菊地新平、宮下剛、奥山雄介：炭素繊維シート接着により補強された鋼短柱の局部座屈強度に関する実験研究、土木学会第 72 回年次学術講演会、I044、2017
- 36) 服部雅史、広瀬剛、大垣賀津雄、宮下剛、奥山雄介、小林朗、秀熊佑哉：炭素繊維シートで補強した 2 軸対称プレートガーダーの曲げ耐力実験、土木学会第 72 回年次学術講演会、I242、2017
- 37) 近藤諒翼、小林洗貴、タイウィサル、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛：CFRP 部材による鋼桁端腐食部の補修・補強に関する解

- 析的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I243, 2017
- 38) 今井隆博, 宮下剛, 広瀬剛, 服部雅史, 大垣賀津雄, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗: 鋼構造物の炭素繊維シート接着工法における積層数の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I244, 2017
- 39) 森久慶祐, 宮下剛, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 小林朗, 秀熊佑哉: 残留変形を有する鋼部材の炭素繊維シート接着補修に関する研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I245, 2017
- 40) 佐藤潤, タイウィサル, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大: VaRIM 成形で接着された CFRP 部材による鋼板の座屈補強に関する実験的研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I246, 2017
- 41) 松山晃大, タイウィサル, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大: VaRIM 成形で接着された CFRP 部材による断面欠損した桁端柱部材の性能回復について, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I247, 2017
- 42) 奥山雄介, 広瀬剛, 服部雅史, 大垣賀津雄, 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗: 鋼トラス橋下弦材腐食部の炭素繊維シートによる補修工法の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I248, 2017
- 43) 陳晨, 松村政秀, 中尾亮介, 竹本香織, 杉浦邦征: 熱硬化型炭素繊維ブリプレグシートにより腐食部を補強した照明柱の静的載荷実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I249, 2017
- 44) 山本昂平, 岩田照夫, 山崎百花, 村上茂之: 吊形式人道橋の補強方法に関する基礎的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I250, 2017
- 45) 船木隆史, 岸徳, 栗橋祐介, 小室雅人, 三上浩: CFRP シート接着工法により曲げ補強した RC 梁の衝撃荷重載荷実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I404, 2017
- 46) 岸徳光, 栗橋祐介, 小室雅人, 三上浩: CFRP ロッドを下面埋設した RC 梁の衝撃荷重載荷実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I405, 2017
- 47) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 栗橋祐介: CFRP ロッドを下面埋設した RC 梁の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I418, 2017
- 48) 岡崎直斗, 中村一史, 岸祐介, 松井孝洋: 炭素繊維シート巻立てによる円形鋼製橋脚の補修・補強に関する解析的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I484, 2017
- 49) 石村利明, 砂金伸治, 日下敦: 炭素繊維シートを鋼材により固定した場合のトンネル補強効果に関する実験的検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, III-383, 2017
- 50) 高橋義裕, 立石晶洋, 荒添正棋, 佐藤靖彦: 炭素繊維シートで補強された RC 桁のせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会第 72 回年次学術講演会, V-163, 2017
- 51) 井本悠介, 北川貴大, 持田泰秀: 熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維スタンロッドの実用化に関する研究 *fabo* (ファーボ) 耐震補強対応を事例とした施工生産性の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 8160, 2017
- 52) カオミン, 三枝玄希, 松井孝洋, 松本幸大, 中村一史: 炭素繊維強化樹脂と鋼材との接着接合部応力性状と損傷センシング その 1 3 点曲げ試験による耐力と破壊性状分析, 日本建築学会学術講演梗概集, 22759, 2017
- 53) 松野一成, 中野凌, 小宮巖, 仁保裕, 光井周平: CFRP 補強を用いた特殊配筋の RC 部材の付着剥離強度増大効果 その 3 鉄筋径による影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 23108, 2017
- 54) 中野凌, 松野一成, 小宮巖, 仁保裕, 光井周平: CFRP 補強を用いた特殊配筋の RC 部材の付着剥離強度増大効果 その 4 実験結果および考察, 日本建築学会学術講演梗概集, 23109, 2017
- 55) 小林光貴, 近藤諒翼, タイウィサル, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRIM 成形を応用した CFRP 部材による鋼桁端部の補修・補強に関する検討, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 56) 三枝玄希, カオミン, 竹本耀, 松本幸大, 中村一史, 松井孝洋, 越智寛: プリフォーム基材と VaRIM 成形接着技術を応用した CFRP 補強鋼板の曲げ挙動, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 57) 奥山雄介, 広瀬剛, 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗, 大垣賀津雄: 鋼トラス橋の下弦材腐食部に対する CFRP 補修に関する研究, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 58) 陳晨, 松村政秀, 中尾亮介, 竹本香織, 杉浦邦征: 熱硬化型炭素繊維ブリプレグシートにより補強した腐食部を有する照明柱の静的載荷実験, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 59) 菊地新平, 大垣賀津雄, 飯塚正貴, 小林朗, 秀熊佑哉, 宮下剛, 奥山雄介: 鋼製梁を補強した CFRP シートの接着限界に関する実験研究, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 60) 松山晃大, タイウィサル, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRIM 成形を応用した CFRP 部材による断面欠損した桁端柱部材の性能回復, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 61) 佐藤潤, タイウィサル, 中村一史, 松本幸大, 松井孝洋, 越智寛: VaRIM 成形で接着された CFRP 部材による鋼板の座屈補強に関する実験的研究, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 62) 藤井裕也, 松本幸大, 藤本信介, 小原優明: 既存鋼管トラス屋根構造部材の CFRP による圧縮補剛, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 63) 三枝玄希, Cao Minh, 松本幸大, 中村一史, 松井孝洋, 越智寛: VaRIM 成形接着により CFRP 補強された鋼板の曲げ挙動と損傷センシング, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 64) 中野大希, 三枝玄希, 松本幸大, 藤本信介, 松井孝洋: CFRP によって補修された鋼管構造部材の曝露試験と力学的性能評価, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 65) Phan Viet Nhat, Yukihiko MATSUMOTO: THE EFFECTS OF THE ANGLE OF CARBON FIBER FOR THE STRENGTHENING OF STEEL STORAGE TANKS UNDER BENDING SHEAR LOAD, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CS2-001, 2018
- 66) 三枝玄希, 中村一史, 松井孝洋, 越智寛, 松本幸大: VaRIM を用いた CFRP 成形接着補強法に関する基礎的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CS6010, 2018
- 67) 岩田龍也, Pham Ngoc Vinh, 宮下剛, 秀熊佑哉, 長山智則, 武田智信: 高弾性型炭素繊維シートを用いた鋼橋の振動制御に関する基礎研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I099, 2018
- 68) タイウィサル, 譚暢, 中村一史, 松井孝洋: 炭素繊維シートの真空含浸・積層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 73 回年次学術講演会, I451, 2018
- 69) 船木隆史, 岸徳光, 栗橋祐介, 小室雅人, 三上浩: CFRP シートおよびロッドを用いて曲げ補強した RC 梁の耐衝撃性に関する実験的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I236, 2018
- 70) Daniel Medina Contreras, Pham Ngoc Vinh, 森久慶祐, 宮下剛, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 小林朗, 秀熊佑哉, 広瀬剛, 原田拓也: 腐食欠損した鋼構造物連結部の炭素繊維シートによる補修一不陸正材のテーパ長の影響一, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I447, 2018
- 71) 三浦和馬, Pham Ngoc Vinh, 森久慶祐, 宮下剛, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 小林朗, 秀熊佑哉, 広瀬剛, 原田拓也: 腐食損傷した鋼構造物連結部の炭素繊維シートによる補修一高伸度弾性バネ材の配置位置の影響一, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I448, 2018
- 72) 奥山雄介, 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗, 大垣賀津雄, 広瀬剛, 原田拓也: 残留変形を有した鋼部材に対する炭素繊維シート接着工法の適用に関する実験的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I449, 2018
- 73) 松山晃大, タイウィサル, 中村一史, 松井孝洋: CFRP 部材による断面欠損した桁端柱部材のモデル化と性能回復に関する解析的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I450, 2018
- 74) 増井隆, 上條崇, 中村一史, 平野秀一, 政門哲夫, 鈴木啓之, 中川健太: CFRP 板接着工法により補強した桁端断面欠損部の静的載荷試験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I451, 2018
- 75) 中村一史, 王俊傑, 増井隆, 上條崇, 平野秀一, 政門哲夫, 鈴木啓之, 中川健太: 断面欠損した鋼桁端柱部材の CFRP 板接着補修における接着不良のモデル化と性能回復, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I452, 2018
- 76) ニヤムバヤルトゥワン, タイウィサル, 小林光貴, 中村一史, 松井孝洋: 断面欠損した鋼桁端部の VaRIM 成形を用いた CFRP 接着による補修・補強, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I455, 2018
- 77) 福田洋顕, 藤井堅: 降伏応力近い初期応力作用下で CFRP 接着補修した鋼引張腐食部材の引張耐荷力, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I456, 2018
- 78) 高森政也, 奥山雄介, 広瀬剛, 原田拓也, 宮下剛, 秀熊佑哉, 小林朗, 大垣賀津雄: 鋼トラス橋下弦材の腐食損傷に対する FRP 接着補修工法に関する一検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I457, 2018
- 79) 岡崎直斗, 中村一史, 岸祐介, 松井孝洋: 炭素繊維シートが巻立てられた円形鋼製橋脚のモデル化と漸増繰返し水平力による弾塑性挙動, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I479, 2018
- 80) 原田拓也, 広瀬剛, 大垣賀津雄, 菊地新平, 宮下剛, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉: 炭素繊維シートで補強した 1 軸対称プレートガーダーの曲げ耐荷力実験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I547, 2018
- 81) 広瀬剛, 原田拓也, 大垣賀津雄, 菊地新平, 宮下剛, Ngoc Vinh PHAM, 奥山雄介, 小林朗, 秀熊佑哉: トラス橋下弦材格点ガセットプレート腐食部の CFRP による補修工法に関する実験研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I572, 2018
- 82) 中田恵理, 林田道弥, 吉澤弘之: CFRP ロッドを用いて接合したプレキャスト部材の曲げ試験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-514, 2018
- 83) 田島瑞規, 上坂龍平, 竹友規, 大塚祐哉: 炭素繊維シートの円形プレキャスト板化による狭部での RC 円柱耐震補強, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-287, 2018
- 84) 高倉克彦, 新藤竹文, 河村圭亮, 池山正一: 炭素繊維シート複合パネルによる梁の曲げ補強効果に関する研究, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-309, 2018
- 85) 上村昌平, 藤井山啓真, 村上聖, 武田浩二, 佐藤あゆみ, 久部修弘: CFRP メッシュ埋設による RC 梁のせん断補強工法に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 1377, 2018

- 86) 松本幸大, 藤本信介, 実石明: CFRPによる鋼管トラス部材の圧縮耐力向上法, 日本建築学会学術講演梗概集, 2052, 2018
- 87) 小泉公佑, 石井佑弥, 中村一史, 古谷嘉康, 中井裕司, 西田雅之: トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路の安全性・使用性と 10m 級スパンへの適用に関する検討, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 88) 林蔵, 橋本国太郎, 鈴木康夫, 金哲祐, 杉浦邦征, 日比英輝: GFRP 歩道橋の構造安全性と使用性に関する実験的研究, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 89) Nguyen Duc Hai, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto, Takahiro Masui: Structural behavior of hybrid FRP composite beam, Construction and Building Materials, 24956-969, 2010
- 90) 鈴木健太郎, 小室雅人, 今野久志, 川瀬良司, 岸徳光: AFRP シートで下面補強した扁平 RC 梁の耐衝撃挙動に関するファイバー要素解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-497, 2016
- 91) 今野久志, 栗橋祐介, 山澤文雄, 保木和明, 西弘明, 岸徳光: AFRP シート補強を施した実規模 RC 製ロックシェッドの三次元的骨組解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-498, 2016
- 92) 岸徳光, 栗橋祐介, 三上浩, 小室雅人: AFRP ロッド埋設工法により曲げ補強した RC 梁の耐衝撃挙動に関するファイバー要素解析, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-509, 2016
- 93) 酒井啓介, 栗橋祐介, 今野久志, 三上浩, 岸徳光: 損傷度の異なる扁平 RC 梁の AFRP シート補強による耐衝撃性向上効果, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-510, 2016
- 94) 山澤文雄, 栗橋祐介, 今野久志, 三上浩, 西弘明, 岸徳光: AFRP シート補強を施した実規模 RC 製ロックシェッドの重錘落下衝撃実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会, I-511, 2016
- 95) 鈴木信勝, 福地佳典, 山下章, 太田翔: 二方向アラミド繊維シート補強による床版の疲労耐久性について, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-639, 2017
- 96) 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 栗橋祐介: AFRP ロッドを用いて下面埋設曲げ補強を施した RC 梁の衝撃応答解析, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-222, 2018
- 97) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 栗橋祐介: AFRP シートを用いて下面接着曲げ補強を施した RC 梁の衝撃応答解析, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-224, 2018
- 98) 木内洋介, 栗橋祐介, 河野克哉, 小室雅人, 安田瑛紀: AFRP シートで曲げ補強した鋼繊維補強無孔性コンクリート梁の耐衝撃性, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-235, 2018
- 99) 木内洋介, 栗橋祐介, 河野克哉, 小室雅人, 安田瑛紀: アラミド FRP を用いたアンカー式定着工法の実験的検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-515, 2018
- 100) 大城壮司, 中村誠, 茅原周平, 吉田直弘, 松田宏, 福井健太: 連続繊維補強筋を用いた RC 構造物の載荷実験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, V-517, 2018
- 101) 渡部洋平, 大西弘志, 出戸秀明, 天野順弘, 松原澄行: AFRP ロッドを適用した π 形断面 RC 梁の静的載荷による曲げ強度の検討, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 102) 柏翔梧, 大西弘志, 天野順弘, 松原澄行, 工藤孝廣, 岩根颯太郎: AFRP ロッドを適用した π 形断面 RC 梁の疲労試験, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 103) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: CFRP パイプを構造成造材料に適用するための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 66 巻 第 542 号, pp.195-202, 2001
- 104) 強化プラスチック協会: 強化プラスチック, Vol.64, No.9, 2018
- 105) 保倉篤, 宮里心一: 土木分野における付帯物および仮設物を熱可塑性 FRP で製造する利点の整理, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 106) 持田泰秀, 櫻井祥人, 井本悠介: 熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維ストランドロッドの開発, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 107) 上山裕太, 北根安雄, 松井孝洋, 館石和雄, 後藤基浩: ハイブリッド FRP 引抜成形 I 形断面より部材の曲げ挙動に関する実験的研究, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 108) 高橋義裕, 小林朗, 荒添正樹, 佐藤靖彦: ストランドシートで下面補強された RC 桁の曲げ耐力に関する実験的研究, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-512, 2016
- 109) 秀熊佑哉, 角南有紀, 小林朗: 炭素繊維ストランドシート接着により補強された鋼板の低温環境下における補強効果および剥離に及ぼす緩衝層の物性の影響, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-444, 2018
- 110) 若荷将浩, Mohammad Abdul KADER, 北根安雄, 伊藤義人, 日比英輝: ハンドレイアップ GFRP 部材を用いた単ボルト接合実験による接合部耐力評価, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 111) 橋本国太郎, 日比英輝, 杉浦邦征: 鋼・GFRP 合成の終局強度に関する実験的研究, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 112) 松本高志, 細目貴之, 石澤郁馬, 近藤健太: らせん積層 CFRP の曲げ挙動と破壊形態, 第 12 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2017
- 113) 星野雅彦・松本幸大・福本昌宏: 港湾環境で使用されるペトロラタム被覆防食用 FRP の劣化機構および耐久性評価, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 114) 櫻庭浩樹, 西崎到, 宇佐美悠, 石田雅博: GFRP 引抜成形材の耐アルカリ性に関する屋外暴露および浸漬試験, 第 6 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2016
- 115) 米丸啓介, 桑原圭介: フェノール GFRP の長期耐久性に関する研究暴露 10 年までの外観と力学的特性の変化, 日本建築学会学術講演梗概集, 22762, 2017
- 116) 米丸啓介, 桑原圭介: CFRP 板の長期耐候性試験 銚子における暴露 31 年の試験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 22756, 2018
- 117) 岩崎初美, 松井孝洋, 近藤富士夫, 齋藤舜, 中村一史: ハイブリッド FRP 部材と鋼部材の高力ボルト摩擦接合に関するリラクゼーション試験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CS6-012, 2018
- 118) 齋藤舜, 中村一史, 岩崎初美, 松井孝洋, 近藤富士夫: ハイブリッド FRP 板と鋼板の一面せん断高力ボルト継手の張試験, 土木学会第 73 回年次学術講演会, CS6-013, 2018

RECENT APPLICATION OF FRP MATERIALS IN CIVIL AND BUILDING STRUCTURES

Yukihiro MATSUMOTO and Kunitaro HASHIMOTO

The use of FRP materials for civil structures has been remarkably researched and developed in recent years. FRPs have been used to repair / reinforcement materials for existing structures because of its light-weight and excellent corrosion resistance characteristics. And, FRP hybrid structures with steel, RC and timber materials are also proposed because it can provide higher functional structures. It is well known that the FRP material is a composite material of fiber and matrix resin. Then, there are some design considerations different from those of steel and concrete such as the selection of each material, molding method as well as material design. In this paper, we focus on the material characteristics and the use of FRPs, and summarize the research and application examples. Then, the future perspective of FRP structures will be suggested and discussed.