

## ■ 建設材料としての FRP

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

准教授 中村一史



FRP(Fiber Reinforced Plastic/Polymer)は文字通り「繊維で強化されたプラスチック/樹脂」であり、力学的性質は強化材である繊維に大きく依存する。FRPの中でもCFRPは、重量に対する比弾性率、比強度が高いことから、航空分野、スポーツ・レジャー産業で利用されている。自動車産業においても燃費向上のために、軽量のCFRPが適用されつつある。造船分野では、腐食しないというFRPの性質を活かして、船体構造に利用している。このようにFRPは各種産業を支える必要不可欠な材料となっている。さて、建設分野ではどうであろうか。まだ不勉強な点も多いが、筆者の研究開発の取り組みや学会活動を踏まえ、建設材料としてのFRPの適用の現状と今後の展望について述べてみたい。

FRPの弾性率と強度は、強化材の配向方向に依存する。そのため一方向材のCFRPが最も効率的であり、建設材料として、ケーブルに適用することがまず考えられる。少し前になるが、CFRPケーブルを適用することで、明石海峡大橋を超える超長大吊橋の実現可能性を検討した。中央支間長5000mとなると、鋼製ケーブルでは不可能であるが、条件付きながらCFRPケーブルでは可能であることがわかった<sup>1)</sup>。また、中央支間長1500mの長大斜張橋にCFRPケーブルの適用を検討した試設計では、ケーブルサグの低減や全体重量の軽減の利点があり、コスト削減も示唆された<sup>2)</sup>。大規模構造物などの限界領域においては不可能を可能にできる材料といえる。しかしながら、落雷による衝撃や施工性などが課題とされ、現状では、ケーブルとしてのCFRPの適用は歩道橋にとどまっているようである。なお、雷損傷については、航空機の機体も同様であるが、表面に銅メッシュを施し、逃がすことで機体を保護している。要するに、対策を考え、活用法を示すことが重要であると思われる。

建設分野におけるFRPの適用性は、その力学的な特性だけでなく、現場での施工性や腐食環境での耐久性にも関係している。軽量であることは、作業性の向上につながることから、例えば、前述のCFRPケーブルは、斜張橋のケーブルの部分的な取替などへの適用も十分に考えられる。一方、CFRPは構造物の補修・補強工法にも多用されている。2000年に土木学会コンクリート委員会から「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」<sup>3)</sup>が発刊され、標準的な工法として普及している。その後、鋼構造物に対する研究開発の成果と適用実績を踏まえ、2018年に土木学会複合構造委員会から「FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)」<sup>4)</sup>が発刊されている。この指針(案)は、鋼・コンクリート構造物および複合構造物を対象とし、さらに最近の研究成果が取り込まれている。筆者は幸いにもこの指針(案)の作成に関わることができた。この指針(案)では、はく離を含む破壊形式に応じた照査法を示したことで、

鋼部材に対する接着強度(はく離)を評価するための試験法を提示したことに特徴がある。つまり、はく離に対して、限界強度の評価法と耐力の算定方法が具体的に示され、設計できるようになった。

CFRP接着による鋼構造物の補修・補強では、鋼部材の発生応力を低減することが基本となる。そこで、剛性を付与するために、高弾性タイプの炭素繊維シートやCFRP板が有効である。しかしながら、炭素繊維シートの場合、現場での積層作業に手間がかかる。また、CFRP板は、溶接継手部など、不連続な部位への適用が困難な場合がある。そこで、大型FRP構造物の製造方法である真空含浸工法(Vacuum assisted Resin Transfer Molding; VaRTM)とよばれる成形技術の応用を提案した<sup>5)</sup>。この工法は、現場で、炭素繊維シートをプラスチックバッグで封入し、真空吸引した後、液体樹脂を注入・含浸して整形すると同時にCFRPと鋼部材を接触して一体化するものである(図-1)。

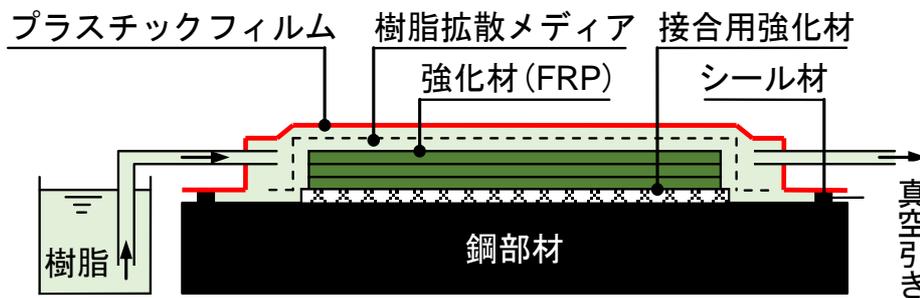


図-1 真空含浸工法の概念図<sup>5)</sup>

CFRPを任意の形状に加工することで、型材や補剛材が構築できるため(図-2)、構造物の汎用的な工法として、土木構造物の補修・補強だけでなく、航空機、自動車や船舶などの様々な分野に応用できると考えている。



図-2 ハイブリッド FRP 部材

他方、FRPは腐食しないことも大きな特長である。最近、構造物の点検のための検査路にGFRPが使われている。腐食環境が厳しい地域にも適用でき、軽量であるため、既設構造物への設置も容易である。GFRPはCFRPよりも安価であるが、弾性率が小さいため、GFRP検査路では、たわみ制限(使用性)が設計で支配的となる。そこで、手すりをトラス形式の構造部材とし、床版は軽量の硬質発泡ウレタンをコア材としたサンドイッチパネルとすることで、合理的なGFRP検査路<sup>6)</sup>を提案した(図-3)。

以上、筆者の限られた専門分野であるが、建設材料としてのFRPの適用について概観した。建設分野においてもFRPの適用は進みつつあるが、FRPは広く一般的な建設材料として認識

され、普及していると言えるであろうか？個人的にはまだ十分ではないと感じている。

土木学会複合構造委員会から発刊された「2014年制定複合構造標準示方書」<sup>7)</sup>に、鋼、コンクリートに並ぶ建設材料として、FRPがはじめて記述された。また、各種構造物の示方書、指針などにおいても、従来の材料以外の新しい材料も要求性能を満たせば適用できるようになってきている。FRPは従来材料に比べて材料コストが割高となるため、全ての構造物に適用することは現実的ではないが、適材適所の要点を見据えて、適用範囲を明示することが建設材料として認識される上で必要と思われる。



図-3 トラス桁形式 GFRP 検査路<sup>6)</sup>

冒頭で述べたように、FRPは繊維と樹脂からなる複合材料であり、その組み合わせは膨大である。設計の自由度が高く、用途に応じて合理的な構造物を作ることができる点にメリットがあるが、一方で、設計しないと使えない材料とも言われ、材料設計の煩雑さが普及の妨げの一要因になっているようにも感じられる。例えば、弾性係数、強度等の機械的性質を、いわゆる「鋼種」のように定める、FRPの規格化も一案であるが、FRPの活用の自由度が狭くなるため、悩ましい面もある。個人的には、規格化による普及と用途に応じてカスタマイズする展開の両輪で進めるのがよいのではないかと考えている。今後もFRPの効果的な活用法を模索しつつ、微力ながら建設分野におけるFRPの普及に貢献できればと考えている。

### 参考文献

- 1)宗澤研郎，前田研一，中村一史，池田虎彦，明嵐政司：オールプラスチック極超長大橋の必要性とその試設計，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，I-637，pp.1273-1274，2002.9
- 2)中村一史，田島遼，前田研一，張治成，謝旭：CFCCを用いた長大斜張橋の試設計と静的構造特性，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.181-186，2007.11
- 3)土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリ101，2000.
- 4)土木学会：FRP接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ09，2018.
- 5)小林洗貴，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.II\_20-II\_31，2017.
- 6)石井佑弥，小泉公佑，中村一史，古谷嘉康，中井裕司，西田雅之：トラス桁形式GFRP製橋梁用検査路の使用性と耐力に関する研究，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72，No.5，pp.II\_33-II\_45，2016.6
- 7)土木学会：2014年制定複合構造標準示方書，原則編，設計編，施工編，維持管理編，2015.

CFCC を緊張材に使用したボックスビーム オハイオ州交通局の事例  
 = オハイオ州ボックスビームプロジェクト =

継続実績より  
**601**

オハイオ州にはボックスビームを連結した橋梁が多数存在しており、冬季に撒く凍結防止剤の影響によるPC鋼材の腐食が問題となっています。オハイオ州交通局は、錆びないCFCCの材料特性に着目し、同州では初めてボックスビームの緊張材としてCFCCを採用しました。本橋は7本のボックスビームからなる橋長57ft(17.4m)、幅員28.5ft(8.7m)のPC橋です。ボックスビームの製作は2016年の夏に実施され、橋梁の工事は2017年の夏に実施されました。施工規模とCFCCの概要を下表に示します。

橋梁の概要				CFCC の仕様			
橋長	幅員	橋長	幅員	橋長	幅員	橋長	幅員
17.4m	8.7m	17.4m	8.7m	17.4m	8.7m	17.4m	8.7m

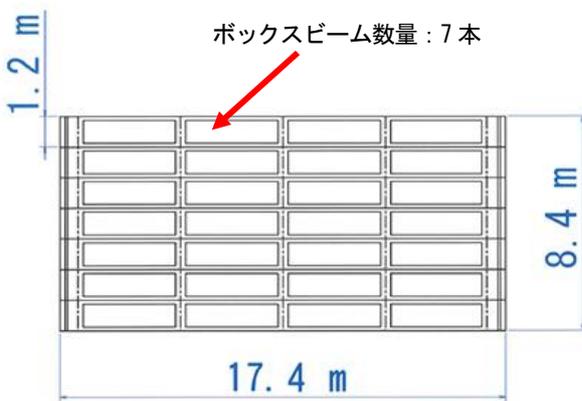


図-1 橋梁の平面図



図-2 ボックスビームの断面図



写真-1 定着金具の取り付け



写真-2 現場でのボックスビーム桁の設置

CFCC を緊張材に使用したバルブ T 桁 ミシガン州交通局の事例

= I-75 SB over Sexton Killfoil Drain =

継続実績より

602

ミシガン州交通局では凍結防止剤の影響によるPC鋼材の腐食が問題となっており、錆びない材料としてCFCCを採用してきました。今回初めて交通量の最も多いI-75という州をまたがる高速道路上の橋でCFCCが緊張材として採用されました。スパンの長さは、137ft(約42m)と現時点では世界で最も長く、桁の高さについても6ft(約1.8m)と最も高い橋梁です。桁の数は10本で、CFCC緊張材の数は1桁当たり63本～69本です。この橋梁は2017年の夏から秋にかけて建設されました。2017年から2025年まで橋梁のパフォーマンスをモニタリングするため、数種類のセンサーが取り付けられています。

橋梁の概要				CFCC の仕様			
橋長	幅員	桁高	桁数	構成	仕様本数	使用数	定着
1.8m	19m	1.8m	10 本	1×7 15.2 φ	63～69 本/桁	31000m/橋梁	接続具

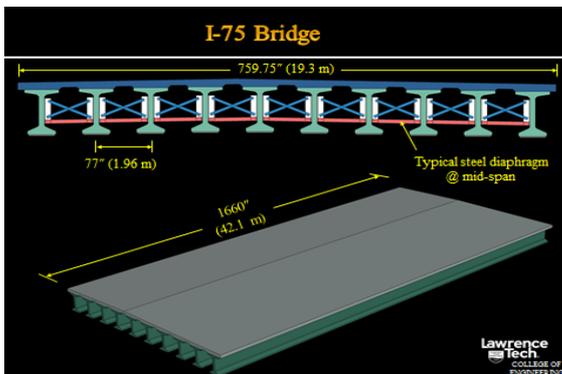


図-1 バルブ T 桁の図面

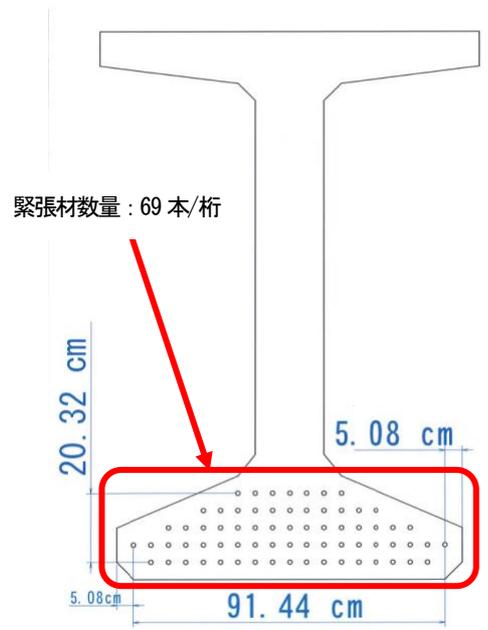


図-2 桁および緊張材の配置



写真-1 桁完成

注) 上記写真および図面は、ローレンス工科大学 Dr グレースのご厚意によりご提供頂きました。

## 高弾性リードラインを使用した張出床版上面補強事例

= 礫(あくご)橋橋梁補強工事 =

継続実績より

603

本橋は鹿児島県薩摩川内市に位置する、元は橋長21.8m、有効幅員8.0mのポストテンション方式PC単純T桁橋に、プレテンション方式PC床版橋による拡幅が行われた橋梁となります(拡幅後、有効幅員10.5m)。旧橋側、張出部上面の鋼板補強に変わり、炭素繊維ロッドを用いた曲げ補強工法が採用となりました。鋼板のような腐食や死荷重増加の懸念がなく、汎用的な炭素繊維シート工法と比べ経済性に優れ、工期短縮効果が大きいことから高弾性CFRPロッド(リードライン)による補強工法が採用されました。本橋で使用されたCFRPロッドは高弾性タイプHM12φで、一般部を120mmピッチ、端部を90mmピッチで配置し、CFRPロッド総延長が221m程度となっております。

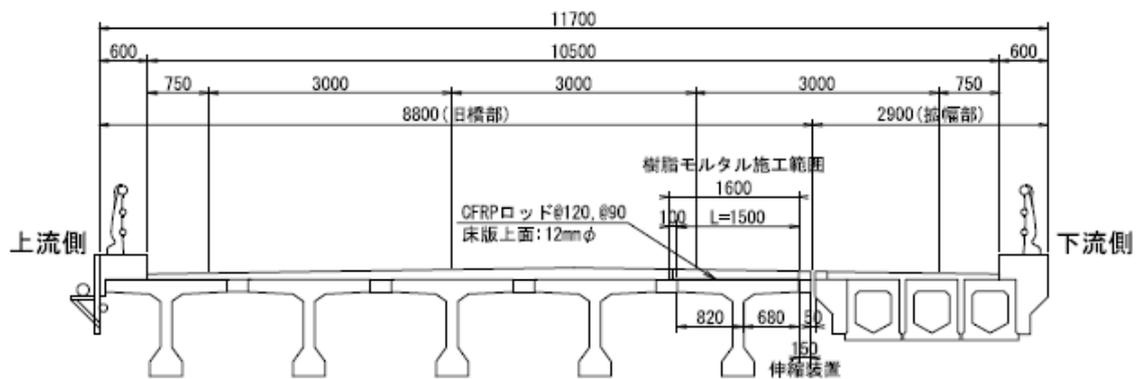


図-1 補強断面図



写真-1 CFRP ロッド設置状況



写真-2 CFRP ロッド設置後状況

# ACC 施工実績一覧表 続報

NO	施主	名称	所在地	規模	用途・緊張方式	使用材料及び使用量	施工
595	ミシガン州交通局	M-100 over Sharp Drain	北米 ミシガン州	桁長10.7m、桁幅0.91m、 桁高0.43m、製作数8本	緊張材(プレテンション)	CFCC 1x7 RB S 15.2 φ L=2000m	2016年6月
596	ミシガン州交通局	M-86 over Prairie Creek	北米 ミシガン州	桁長31.3m、桁幅1.24m、 桁高1.1m、製作数7本	緊張材(プレテンション)	CFCC 1x7 RB S 15.2 φ L=15000m	2016年7月
597	Downtown Commons	Sacramento Downtown Plaza	北米 カリフォルニア 州	補強筋 直線品2760本、 L形1380本	プレキャストパネルのひび割れ防 止	CFCC U RB 3.5 φ L=3574.2m	2016年10月
598	秋田県	地方道路交付金工事(橋梁補 修)小新沢1号橋	秋田県	橋長17.5m 幅員9.8m	RC床版上面補強	高弾性リードライン HM10 φ L=93.5m	2017年4月
599	島根県 出雲県土整備事務所	(主)斐川一畑大社線 瀬橋 防 災安全交付金(橋梁修繕)工事 (経済対策)	島根県	橋長672.1m 幅員12.3m	RC床版上面補強	高弾性リードライン HM12 φ L=955.2m	2017年6月
600	秋田県	地方道路交付金工事(橋梁補 修)赤平橋	秋田県	橋長98.4m 幅員9.7m	PC床版上面補強	高弾性リードライン HM8 φ L=1377.6m	2017年6月
601	ハワイ州交通局	オハイオ州ホックスビームプロ ジェクト	北米 ハワイ州	桁長17.4m、桁幅1.22m、 桁高0.43m、製作数7本	緊張材(プレテンション)	CFCC 1x7 RB S 15.2 φ L=5035m	2017年8月
602	ミシガン州交通局	I-75 SB over Sexton Killfoil Drain	北米 ミシガン州	桁長42.16m、桁高 1.83m、製作数10本	緊張材(プレテンション)	CFCC 1x7 RB S 15.2 φ L=26815m	2017年10月
603	鹿児島県 北薩地域振興局	第22号県単橋梁整備(通常)工 事(磯橋工区)磯橋	鹿児島県	橋長21.8m 幅員11.7m	PC床版上面補強	高弾性リードライン HM12 φ L=221m	2017年11月
604	神奈川県 神奈川土木事務所	平成28年度 港湾改修工事 江 の島大橋	神奈川県	橋長324.0m 幅員12.0m	PC床版上面補強	高弾性リードライン HM12 φ L=12000m	2017年11月
605	下閉伊郡普代村	村道普代駅前1号線(沢山橋) 道路改良工事 沢山橋	岩手県	橋長40.9m 幅員4.8m	RC床版上面補強	高弾性リードライン HM12 φ L=60.9m	2018年2月
606	関東地方整備局 宇都宮国道事務所	新川島橋	茨城県	橋脚2基	AWS橋脚補強 9φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 1836m	2018年4月
607	鹿児島県北薩地域振興局 建設部 甌島支所	道路整備(交付金)工事(蘭牟 田瀬戸架橋第4橋2-2工区)	鹿児島県	橋長383m 幅員6.5m	プレキャストPC床版 (ルーフ継手部) 下縁突起部のRC補強	CFCC U RB 5.0 φ L=2385m	2018年4月
608	東北地方整備局 三陸国道事務所	国道106号 片栗地区道路工 事 下片栗橋	岩手県	プレテンション方式PC単純 中空床版橋 橋長15.0m、幅員15.719 ~14.777m	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=414.2m	2018年5月
609	東北地方整備局 岩手河川国道事務所	国道106号 与部洞トンネル工 事 葛部沢橋	岩手県	橋長15.5m、桁長 15.4m、桁高0.6m、製作 数17本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=371.96m	2018年5月~ 6月
610	鹿児島県北薩地域振興局 建設部 甌島支所	道路整備(交付金)工事(蘭牟 田瀬戸架橋第3橋2-1工区)	鹿児島県	全長1533mのうち第3橋 L=383m(内247.7m)有効 幅員:6.5m、B活荷重	プレキャストPC床版 (ルーフ継手部) 下縁突起部のRC補強	CFCC U RB 5.0 φ L=1670.6m	2018年6~ 10月
611	鹿児島県北薩地域振興局 建設部 甌島支所	道路整備(交付金)工事(蘭牟 田瀬戸架橋第2橋26-1工区)	鹿児島県	PC4径間連続箱桁橋 橋 長550m(うち191m)	プレキャストPC床版 (ルーフ継手部) 下縁突起部のRC補強	CFCC U RB 5.0 φ L=985m	2018年7月
612	鹿児島県 北薩地域振興局	蘭牟田瀬戸架橋P8張出	鹿児島県	施工範囲132m 幅員6.5m	プレキャストPC床版 (ルーフ継手部) 下縁突起部のRC補強	CFCC U RB 5.0 φ L=954m	2018年7月
613	大槌町	安渡地区沢山沢川1号橋梁上 部工工事	岩手県	橋長8.8m、桁長8.631m 桁高0.45m、製作数10本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=151.2m	2018年7月
614	大槌町	安渡地区沢山沢川2号橋梁上 部工工事	岩手県	橋長8.3m、桁長8.2m 桁高0.4m、製作数10本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=126m	2018年8月
615	東北地方整備局 磐城国道事務所	前原橋上部工工事 前原橋	福島県	プレテンション方式PC単純 中空床版橋 橋長14.6m、 幅員14.53m	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=404.42m	2018年10月
616	鹿児島県 熊毛支庁 屋久島事務所	平成30年度 総合流域防災(砂 防)工事(熊太郎川1工区)	鹿児島県	12ヶ所	法面補強工事	CFCC 1x7 RB S 15.2 φ L=664.60m	2018年11月
617	名古屋市	開橋	愛知県	橋脚2基	鉛直プレストレストによる橋脚耐 震補強 9φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 1333m	2018年11月
618	北陸地方整備局 羽越河川国道事務所	府屋大橋	新潟県	橋脚1基	AWS橋脚補強 7φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 637m	2018年11月
619	宇都宮市	旭陵橋	栃木県	橋脚1基	AWS橋脚補強 7φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 599m	2018年11月
620	関東地方整備局 宇都宮国道事務所	新川島橋	茨城県	橋脚2基	AWS橋脚補強 9φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 1947m	2018年12月
621	北陸地方整備局 富山河川国道事務所	茅綱橋2	富山県	橋脚2基	AWS橋脚補強 9φ7.4緊張材	テーパー φ7.4mm 1324m	2018年12月
622	東北地方整備局 山形河川国道事務所	高玉橋外上部工工事 高玉橋	山形県	桁長23.8m、桁高1.2m、 製作本数13本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=277.16m	2019年1月
623	東北地方整備局 山形河川国道事務所	高玉橋外上部工工事 村山北(1)IC橋	山形県	桁長20.3m、桁高0.85m、 製作本数19本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=612.902m	2019年1月
624	東北地方整備局 仙台河川国道事務所	片浜地区上部工工事 気仙沼ICオフランプ橋	宮城県	桁長23.518m、桁高 1.2m、製作本数7本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=180.32m	2019年3月
625	東北地方整備局 三陸国道事務所	近内川橋外上部工工事 山口二線橋	岩手県	桁長17.944m、桁高 0.700m、製作本数14本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=404.208m	2019年3月
626	東北地方整備局 仙台河川国道事務所	片浜地区上部工工事 夜這路川橋	宮城県	桁長23.801m、桁高 1.2m、製作本数14本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=360.64m	2019年3月
627	東北地方整備局 三陸国道事務所	高田地区上部工工事 浜田川橋	岩手県	橋長22.7m、桁長22.6m 桁高1.2m、製作数19本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=504.336m	2019年3月
628	東北地方整備局 三陸国道事務所	高田地区上部工工事 小泉川橋	岩手県	橋長20.7m、桁長20.6m 桁高1.108m、製作数19	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U RB 5.0 φ L=459.306m	2019年4月

## 堀内新技術委員長ってどんな人?

新しく技術委員長に就任した堀内達斗です。

1995年(株)ピー・エス(現:(株)ピーエス三菱)入社以来、橋梁設計をメインに携わっておりました。現場施工経験は3年程度、小規模な現場を渡り歩いておりました。よって若干ひ弱でございます。

最近の変化として2点あります。昨年まで視力1.5をずっと誇っておりましたが、老眼なのか最近、急に近く近くの数値、文字が見えなくなってきました。そのため近々、老眼鏡を購入したいと思っています。眼鏡をかけたことがないので、少し楽しみです。そしてもう1つ、昨年、生まれて初めて、犬を飼いました。散歩時やペットシートの取り替え、フンの処理等の作業が私の心の癒しの時間でございます。

そんな私でございますが、技術委員長として尽力し、ACCならびに関係会社様の発展に少しでもお力になればと思っております。



### 編集後記

会員皆様からの情報を積極的に掲載してまいります。ご寄稿をお待ちしております。

### 建設用先端複合材料技術協会

事務局(瀬尾) 〒103-8306 東京都中央区日本橋 3-6-2 日本橋フロント 東京製綱株式会社内  
Tel:03-6366-7797 Fax:03-3276-6800 E-mail: info@acc-club.jp