

■FRP(連続繊維)研究の「密」

早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 教授

佐藤 靖彦



私が、FRPを用いたコンクリート構造に関する研究を始めたのは大学院修士課程1年の時でした。当時は、土木学会コンクリート委員会が「連続繊維補強材研究小委員会」を立ち上げ、FRPを鉄筋の代替材として用いたコンクリート構造の設計・施工指針の作成を行っていた時期です。私の恩師である北海道大学名誉教授の角田與史雄先生は、その小委員会において設計編の主査を務められており、角田研究室としてFRPに関する研究に着手した時期でした。存知のように、FRPはFiber Reinforced Plasticsの略です。引張に弱いコンクリートの補強材としての捉え方は、樹脂ではなく繊維が主体であるため、「FRP」に代えて「連続繊維」という言葉が作られました。それゆえ、1996年に完成した指針「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」には、「FRP」ではなく「連続繊維」が用いられています。

私は、修士課程と博士課程の5年間で、RC・PCはりおよびスラブのせん断耐力、FRPの局部応力と曲げ成形部強度、連続ばりのモーメント再分配といった数多くの検討を行いました。自身の博士論文には、RCおよびPCはりのせん断耐力に関する検討を取りまとめ、その成果が1996年の指針に採用されました。その後、一度も指針の改訂は行われていませんが、2020年にPC工学会において、「繊維強化ポリマー(FRP)のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針」が作成されました。1996年の指針と内容は大きく変わらず、海外基準との比較がなされたり最近のFRP補強材に関する情報が加えられるなど最新の知見が整理されているようです。

1980年代後半には、FRPのコンクリート構造への新しい適用法として、シート状のFRPを新設構造物ではなく既設構造物に接着して補強する方法が開発されました。私も1996年くらいから炭素繊維シートにより補強したコンクリート構造に関する研究を始めました。25年経った今も研究を続けており、現在は、シート補強鉄筋コンクリート構造の複合構造としての材料性能と部材性能の最適化、シートにより側面を補強したRCはりのせん断設計法(土木研究所との共同研究)、そして、シート接着補強法の国際展開を行っています。

土木学会では、2000年にコンクリート委員会が「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」を作成し、2018年には複合構造委員会が「FRP接着による構造物の補修・補強指針」を作成しました。2000年の指針と2018年の指針では、コンクリート構造の補強に関する記述にほとんど差がありません。2018年の指針の特徴は、コンクリート構造とともに鋼構造の補強を対象としている点にあります。これら指針が実務でどのように活用されているのかとても気になっています。

最近、学生が学会に投稿すると、希望したセッションとは異なるセッションに回されることが何度もありました。なぜそのようなことになるのかと思い調べてみると、論文数そのものが少ないことがわかりました。

図-1は、1986年から2021年までに日本コンクリート工学会年次論文集に掲載されていた「FRP」もしくは「連続繊維」を論文題目に含む論文数の推移を示しています。土木と建築で分けるべきかもしれませんがここでは一括りの数値としています。1998年の27編をピークに論文数が確実に減少しています。全ての分野を含めた論文数も減っていますのでその点を考慮に入れておく必要があります。ただ、この20年で全体として15%程度しか減少していないようですので、FRP（連続繊維）に関する研究論文が著しく減っているとは言えません。図には、先に紹介しました4つの指針作成時期が矢印で示されています。全体的な傾向として、論文数と指針作成時期の間には特に関係はなさそうです。指針の作成が、研究へのモチベーションを高め論文数の増加に寄与すると思ったのですが。ちなみに、2021年の論文数は4件でした。コロナ禍にあり論文数が大幅に減ったようですが、その内の3件が私の研究室の論文でした。

さて、論文数が減少し続ける理由はどこにあるのでしょうか。実務では特に問題を抱えていないのでしょうか。それとも、何が問題なのかを研究者が知らないのでしょうか。研究の継続の重要性は、物理的な成果を蓄積するだけではなく、研究に関わる人々のコミュニケーションを途切らせることなく、議論を蓄積することにあると思います。コロナ禍が収束し、FRP（連続繊維）の研究にも「密」な環境が再構築されることを期待しています。

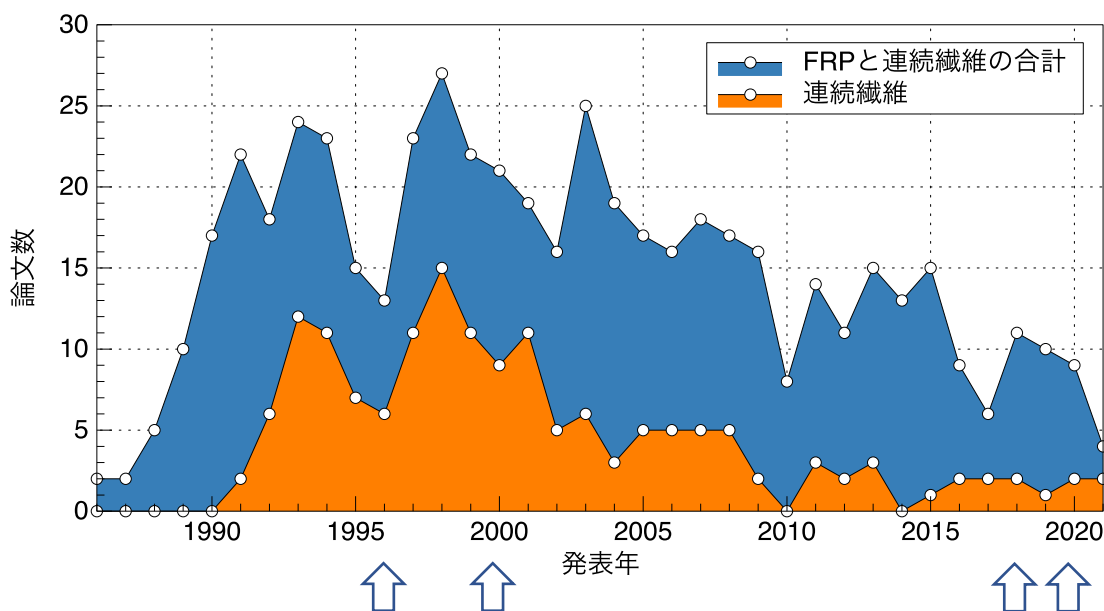


図-1 コンクリート工学年次論文集における論文数の推移

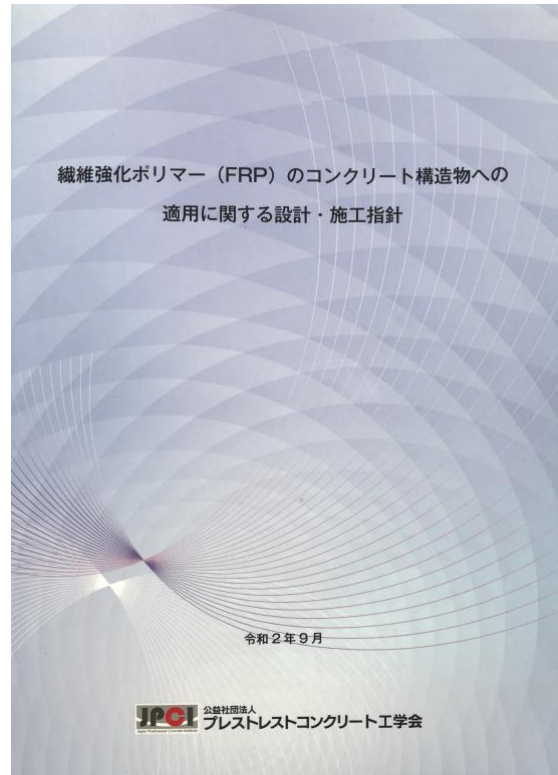
PC工学会によるFRP設計・施工指針(案)刊行 繊維強化ポリマー(FRP)のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針

繊維強化ポリマー(FRP : Fiber Reinforced Polymer)は、鉄筋あるいは PC 鋼材に替わる、コンクリート構造物の補強材として注目を集めてきました。

1996年に土木学会において、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」が刊行されました。本指針は繊維強化ポリマーをコンクリート構造物に適用するための設計施工法および試験法を示した世界で初めての指針でしたが、以降改訂されておられませんでした。

プレストレストコンクリート工学会は、繊維メーカー5社からの委託を受け、「繊維強化ポリマーのコンクリート構造物への適用に関する委員会」を2017年に設置し、指針の作成活動を継続し、2020年11月に刊行の運びとなりました。

この「繊維強化ポリマー(FRP)のコンクリート構造物への適用に関する設計・施工指針」は、24年前に刊行された土木学会の指針に基づいて、我が国および欧米の最新の研究成果および本工学会から刊行された「コンクリート構造技術規準—性能創造による設計・施工・保全—」を新たに取り入れたものです。本指針がコンクリート構造物の耐久性向上に貢献することを期待しております。



睦好委員長(埼玉大学名誉教授)所感

最近、FRPをコンクリート構造物の補強材として適用する動きが我が国および欧米諸国で再燃してきている。このようなことから、本指針は日本語版と英語版で出版された。また、FRPを緊張材に用いた橋梁についての試設計例を充実させた。特に、ライフサイクルコストの試算については鋼材を用いた場合と比較して示している。

本指針が我が国のみならず、世界各国で使われることを切望する次第である。

FRP緊張材を用いたプレテンション部材の自然暴露試験 -経過22年-

連続繊維補強材（FRP）が建設分野のコンクリート補強材に適用されて30年余が経過しています。現在までFRP自体の劣化報告はありませんが、温暖で乾湿の繰返しの影響でコンクリートとのFRPの付着性状の劣化問題が指摘されています。そのためACCでは、FRPを緊張材とするプレストレストコンクリート構造物の長期耐久性を検証するため、1999年から2016年まで東京大学生産技術研究所と共同で、供試体による自然暴露試験を継続して実施していました。

供試体は、図-1に示すように桁高200mm×幅150mm×桁長2000mmの形状で、緊張材にはアラミド（Technora[®]）、カーボン（CFCC[®]）および比較用に鋼より線を使用してプレテンション方式により保証引張強度の60%相当の初期緊張力を導入しています。また、材齢2ヶ月の段階で、曲げ耐力の約60%の荷重を載荷し、ひび割れを発生させた状態で、1999年4月より自然暴露試験を開始しました。

暴露条件は一般環境および海洋環境とし、それぞれ千葉県千葉市の内陸部（年平均気温15℃、年降水量1300mm）および静岡県伊東市の海岸に面した飛沫帯（年平均気温15℃、年降水量2300mm）の2か所でした。2016年（暴露17年）で、共同研究は終了し、その成果を国際会議などで発表しました¹⁾²⁾³⁾。成果は、FRP緊張材および鋼より線を用いた試験体の部材としての曲げ性能に劣化は認められませんでした。内在塩分は、図-2に示すようにかぶり35mmの緊張材位置で4~6kg/m³でしたが、解体調査の結果、鋼より線にわずかな錆が観測されるのみでした。

2016年以降、土木研究所の支援を受け自然暴露試験を継続しています。一般環境としてつくば暴露場（写真-1）、海洋環境として糸魚川暴露場（写真-2）を用いています。

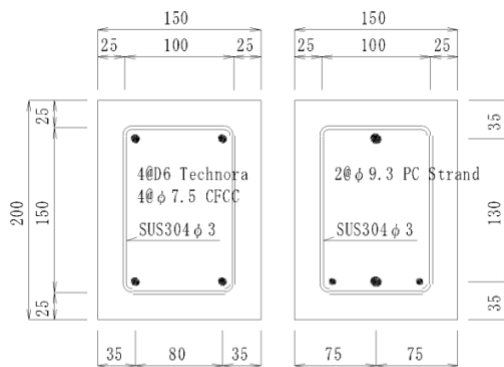


図-1 供試体形状

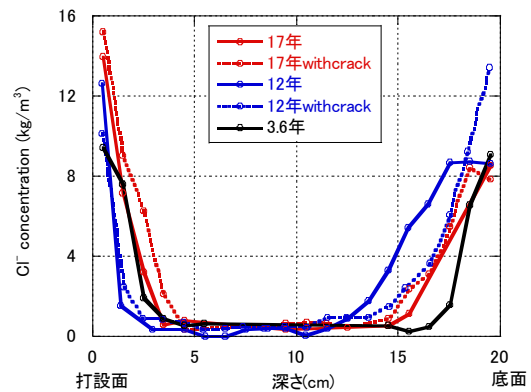


図-2 塩化物イオンの濃度分布



写真-1 一般環境のつくば暴露場



写真-2 海洋環境の糸魚川暴露場

2020年11月につくばおよび糸魚川暴露場に試験体を設置して4年が経過したので、自然電位の計測を行いました。一般環境と海洋環境における自然電位(V:CES)の分布を図-3に示します。一般環境における鋼より線の自然電位は-0.2V以上であり、腐食は開始していないと判定されます。一方、海洋環境に暴露していた試験体における自然電位は、21.6年を経過して初めて、明確に-0.35V以下となり、腐食が生じていると判定されました。これらの試験体に用いられているコンクリートは材齢3年で圧縮強度80N/mm²を有しており、緻密であると想定されます。厳しい塩害環境に暴露されたPC部材の鋼より線の劣化が20年を経過して始まる可能性を示しています。

今後も自然暴露試験を継続し、FRP緊張材を用いる部材のライフサイクルコストが優れていることを明らかにする所存です。

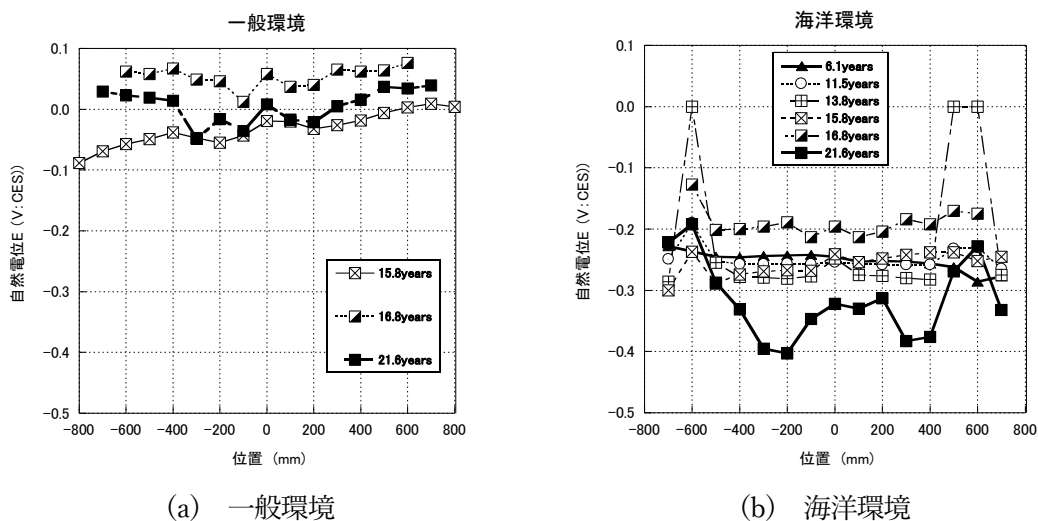


図-3 自然暴露試験体の自然電位の推移

自然電位 E [V]	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 \leq E < -0.20$	不確定
$E < -0.35$	90%以上の確率で腐食あり

図-4 腐食判定基準 (ASTM876)

参考文献

- 1) HIROSHI NAKAI, HIROSHI SAKAI, TSUGIO NISHIMUR, TAKETO UOMOTO : DURABILITY OF ARAMID AND CARBON FRP PC BEAMS UNDER NATURAL AND ACCELERATED EXPOSURE , 6th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, July 2003, Singapore
- 2) 渡部 寛文, 中井 裕司, 榎本 剛, 魚本 健人 : FRP緊張材を用いたPCはりの長期耐久性に関する検証試験, 第4回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2012年11月
- 3) Hirofumi Watanabe, Hiroshi Nakai, Tsuyoshi Enomoto and Taketo Uomoto : Characteristics of FRP Pretensioned Concrete Beams after Long Term Exposure , The 13th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structure, October 2017

アメリカ国内最大級のインフラプロジェクトにCFCCを使用 バージニア州ハンプトンロードブリッジトンネル拡張事業

ハンプトンロードブリッジトンネル拡張事業は、米国内で現在予定されているインフラプロジェクトの中で最大規模を誇り、総工費38億ドル（約4000億円）を投じて、バージニア州のハンプトンとノーフォークを約16kmに渡って結ぶ海上大動脈を大幅に拡張する一大プロジェクトです。現在、片側2車線で交通ピーク時に大規模渋滞の発生が常態化しているハンプトンロードブリッジトンネルを、2倍となる片側4車線に拡張し、渋滞の解消と交通量の大幅な向上を図ります。

材料工学・設計・建設・交通工学など各分野における当代最高レベルの技術と知見が集結するハンプトンロードブリッジトンネル拡張事業において、海上という厳しい使用環境に適する最も優れた材料として、CFCCの「①強度」「②耐腐食性」「③軽量性」「④ライフサイクルコスト」が高く評価された結果、採用が決定しました。同事業においてCFCCは、海上部約8.6kmの桁ならびに杭の緊張材と補強筋として使用され、その総延長は5356kmと推測されます。

米国内では、1960年代に建設されたコンクリート橋梁が一斉に寿命を迎えることが社会問題化しております。特に、海辺の塩害地域や融雪剤を使用する寒冷地域では、鉄筋の腐食等の理由から本来よりも早く寿命を迎えるケースも多々見られます。こうした中で、高い耐食性や強靱性からコンクリート構造物の補強材としてのCFCCのニーズが年々高まっており、2018年には米国全州道路交通運輸行政官協会（AASHTO）によって、CFRP（炭素繊維強化ポリマー）を設計に適用する際の規格も制定されました。

CFCCと関連製品は、既に米国内で9州の運輸局をメインに、43のプロジェクトに採用されていますが、過去最大となるハンプトンロードブリッジトンネル拡張事業が実績となり、更なる普及拡大が期待されます。

【受注概要】

- | | |
|------------|---|
| 1. 納入先 | Coastal Precast Systems, LLC |
| 2. 納入予定時期 | 2021年1月～2023年12月 |
| 3. 受注量(推測) | 緊張材の長さ：3532km、補強筋の長さ：1824km、
合計 5356km |



写真-1 現在のハンプトンロードブリッジトンネル



写真-2 CFCC活用イメージ

アラミドFRPロッド緊張材を適用した世界初の高速道路橋 = 徳島自動車道 別埜谷橋(べっそだにばし) =

継続実績より

644

別埜谷橋は、鉄筋やPC鋼材など腐食の可能性がある材料を一切使用せず、非腐食材料であるアラミドFRPロッド緊張材で構造を成立させた世界初の高速道路橋です。

別埜谷橋では、高強度繊維補強コンクリートを使用したバタフライウェブ構造を箱桁橋の腹板に適用しています。これにより、主桁の作用せん断力をバタフライパネル内で圧縮力と引張力に分解する合理的な設計法が適用され、せん断補強鉄筋の配置を不要としています。引張力が卓越する部位にはアラミドFRPロッドを配置し、プレストレスを導入することで発生応力を制御しています。また全外ケーブル構造を採用し、アラミドFRPロッドの点検・維持管理性を向上しています。なお、壁高欄についてもガラス繊維FRPロッドを鉄筋の代わりに使用したプレキャスト製品を適用し、完全非鉄の橋梁を実現しています。



写真-1 徳島自動車道 別埜谷橋 (2020.12撮影)

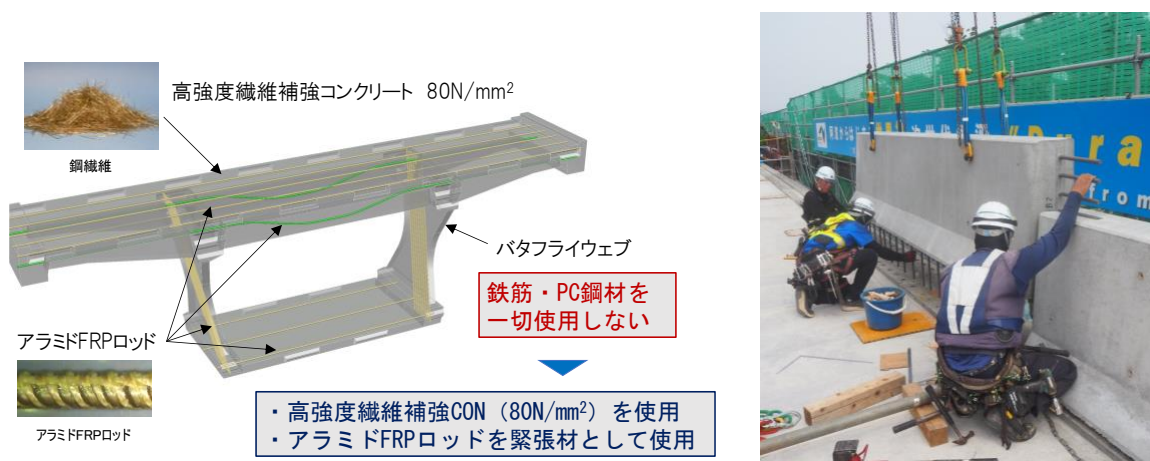


図-1 別埜谷橋の構造概要

写真-2 壁高欄架設

※9ページ施工実績一覧表No.644をご参照下さい。

CFCC®を補強筋に使用したプレキャスト排水溝
 = 徳島南部自動車道 吉野川大橋(仮称)建設工事 =

継続実績より

661

徳島南部自動車道は、徳島市を起点に、阿南市まで自動車道を延伸する主要幹線の一部です。現在建設中の吉野川大橋(仮称)は、四国三郎の異名を持つ大河川吉野川河口にかかる、PC15径間連続箱桁形式(橋長1695.5m)の長大橋であり、環境保全や景観に配慮した様々な対策が取られています。

CFCC®は、厳しい塩害環境下における耐久性を期待できる材料として、シンプルな外観を実現する床版一体型プレキャスト排水溝の補強筋として採用されました。

CFCC U5φ の加工筋35320本34241m、直筋15011本18861m、計50331本53102mを2020年7月～2021年3月の間で製作し、プレキャスト排水溝を製作した日本興業(株)に納入しました。



写真-1 組み立てたCFCC補強筋



写真-2 プレキャスト排水溝



写真-4 設置後排水観



写真-3 排水溝設置状況



写真-5 橋梁の排水溝外

※9ページ施工実績一覧表No.661をご参照下さい。

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
644	NEXCO西日本四国支社	徳島自動車道別荘谷橋工事	徳島県	本線Dura-Bridge	PC上部工	テクノール4φ7.4緊張材φ7.4mm 26000m	2019年4月
645	名古屋市	開橋2	愛知県	橋脚5基	鉛直プレストレスによる橋脚耐震補強	テクノール9φ7.4緊張材φ7.4mm 3866m	2019年10月
646	国土交通省北陸地方整備局	平成30年 富山管内橋梁補修工事 山見橋	富山県	橋長73m 幅員8.1m	床版上面補強	高弾性リードライン HM8 φ 583.2m	2019年10月
647	岩手県北広域振興局農政部二戸農林振興センター	農地整備事業(経営体育成型)鳥海地区第11号工事 町道1号橋	岩手県	プレテンション方式単純床版橋 橋長13.6m 桁数7本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=118.3m	2019年12月
648	埼玉県小川町役場	68号橋補修工事	埼玉県	橋長7.8m 幅員4.0m	床版上面補強	高弾性リードライン HM8 φ 80.6m	2020年1月
649	鹿児島県始良・伊佐地域振興局	令和元年度 林業専用道開設 佐賀利山1号支線 佐賀利山橋梁工事	鹿児島県	橋長10.5m 幅員4.3m	RC床版上面補強	高弾性リードライン HM10 φ 117m	2020年2月
650	東北地方整備局山形河川国道事務所	村山地区橋梁上部工工事	山形県	桁長18.6m 桁高1.0m 製作数13本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=293m	2020年2月
651	NEXCO西日本四国支社	大豊IC～南国IC間耐震補強(Ⅰ)工事	高知県	橋脚1基	AWS橋脚補強	テクノール9φ7.4緊張材φ7.4mm 1512m	2020年5月
652	東北地方整備局福島河川国道事務所	東北地整阿武隈川橋上部工工事 上保原こ道橋	福島県	プレテンション方式PC単純T桁橋 橋長21m 桁数24本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=390.6m	2020年7月
653	東北地方整備局仙台河川国道事務所	波板橋上部工工事 只越橋	宮城県	プレテンション方式PC単純中空床版橋 橋長11m 桁数4本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=92.1m	2020年7月
654	福島県相双建設事務所	道路橋りょう整備(再復)工事(橋梁上部) 新二枚橋	福島県	桁長16.2m 桁高0.6m 桁幅0.7m 製作数16本	プレテンション方式PC単純中空床版桁橋	CFCC U 5.0 φ L=345.6m	2020年8月
655	岩手県沿岸広域振興局大船渡土木センター	一般国道340号線葉山恵蘇地区(仮称)3号橋橋梁上部工工事 恵蘇3号橋	岩手県	プレテンション方式単純T桁橋 橋長24.8m 桁数9本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=280.4m	2020年8月
656	東北地方整備局三陸国道事務所	国道106号線 川井トンネル工事 上川井橋	岩手県	プレテンション方式PC単純中空床版橋 橋長18m 桁数17本	高耐久仕様桁の桁端面補強	CFCC U 5.0 φ L=442m	2020年8月
657	神奈川県県西土木事務所 小田原土木センター	令和元年度地すべり対策工事(公共)当初3号その5	神奈川県	HM6 アンカー長20.74～28.02m	NMクラウドアンカー	CFCC 1X7 12.5 φ L=4743m (クラウドアンカー29本)	2020年9月
658	沖縄県	県道20号線(泡瀬工区)橋梁整備工事(上部工その1)	沖縄県	セグメント製作 12SEG	セグメント補強	CFCC U 5.0 φ L=336m	2020年12月
659	沖縄県	県道20号線(泡瀬工区)橋梁整備工事(上部工その2)	沖縄県	2BL	下床版下面補強	CFCC U 5.0 φ L=332.12m	2020年12月
660	沖縄総合事務局開発建設部	那覇港(泊ふ頭)臨海道路 橋脚下部補強工事P20.21	沖縄県	橋脚2基	鉛直プレストレスによる橋脚耐震補強	テクノール9φ7.4緊張材φ7.4mm 20000m	2020年12月
661	NEXCO西日本徳島工事事務所	四国横断自動車吉野川大橋(仮称)建設工事	徳島県	PC15径間連続箱桁形式 橋長1695.5m	床版一体型プレキャスト排水溝補強筋	CFCC U 5.0 φ L=53102m	2021年3月

村田広報委員長ってどんな人?

このたび広報委員長に就任した村田宣幸です。1995年、住友建設株式会社（現：三井住友建設株式会社）に入社してから、プレストレストコンクリート橋梁の現場・設計・技術に携わってきました。



18年間勤務した東北支店を離れて2017年に東京の本店土木技術部に単身赴任となり、2020年4月より土木営業部に異動となりました。コロナ禍で社外の方との面談も必要最小限に限られ、情報収集もなかなか出来ない中で、ハードルの高い営業予算ノルマに苦しんでおります。

東京での単身赴任も4年になろうとしていますが、早寝早起きで家事をこなすのもだいぶ慣れてきました。週末は、趣味のフルサイズミラーレスカメラを持って、ブラブラ散歩しながら写真を撮るのが定番の過ごし方になっています。

これまで携わった仕事の中で先端複合材料に関するものといえば、AWS工法の開発があります。AWS工法とは、壁式橋脚の中間拘束材としてアラミドFRPロッドを用い、水平方向にプレストレスを与えることにより軸方向鉄筋のはらみ出しを防止し、内部コンクリートの拘束効果を高めて、じん性の改善およびせん断耐力の向上を図る耐震補強工法です。当時20代だった私は、冬の寒い技術研究所の試験棟で朝から晩までひたすら縮小試験体の正負交番載荷試験を行って、アラミドFRPロッドの拘束効果を確認した辛い思い出があります。

今後、広報委員長としてACCならびに会員会社の皆様のお力になれるよう精進いたしますので、ご指導ご鞭撻のほどお願いいたします。

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 東京製綱インターナショナル株式会社内
Tel:03-6366-7797 Fax:03-3270-1776 E-mail: info@acc-club.jp