

■ 建設材料に要求される性能とは

埼玉大学レジリエント社会研究センター長・教授

睦好宏史



建設材料と言えはすぐに思い浮かぶのはコンクリートと鉄ではないだろうか。「鉄は国家なり」と言われるように、鉄はあまり悪者にならないようであるが、コンクリートは「コンクリートから人へ」などと揶揄されるように、場合によっては悪者の代名詞になるようである。しかし、社会基盤を支えているのはまさしくコンクリートであり、鉄なのである。コンクリートの歴史は古く、紀元前のローマ時代から、火山灰と石灰、砕石を水で混ぜ合わせることによって硬化し、強くなることをローマ人は知っていたのである。ローマ時代に造られた構造物が今日まで残っていることは憧憬の至りである(図-1)。伝え聞いた話であるが、ヨーロッパで橋梁を調査していたところ、比較的新しい橋が傷んで通行止めになり、その迂回路としてローマ時代に造られた橋を使ったとのことである。



図-1 パンテオン
(ローマ、AD 118~128年建造)

一方、昨今、橋やトンネルなどの構造物が建設後20~30年で劣化し、大きな事故にまで至っている。構造物を設計するときの原則は、「設計耐用期間を通じて、構造物が耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境や景観等に関して要求された性能を満足すること」が原則である。しかし、今日耐久性が大きな問題となっており、その原因の一つは「鉄が錆びる」ということである。先述したパンテオンには鉄筋が使われていない。

鉄筋コンクリートはコンクリートと鉄筋の長所を生かし、短所を補完した優れた構造部材で、コンクリート中の強アルカリ雰囲気では鉄筋は極めて安定した状態なのである。しかし、コンクリート中に塩分が浸透すると鋼材は錆び、錆による膨張によりコンクリートを壊し、腐食が加速されるのである。それでは錆びない補強材はないのだろうか。これまで、ステンレス鉄筋あるいは炭素、アラミド、ガラス繊維を用いたFRP棒材が開発され、錆びないことからその効果は実証済みである。しかし、高価であること、取り扱いが難しい事などのため、広範に普及するには至っていない。一方、鉄筋を樹脂で被覆したエポキシ樹脂塗装鉄筋は、環境の厳しいところでは使われている。

私がFRP棒材の研究を始めたのが1980年代半ばからである。東京製綱のご好意によりCFCCを提供して頂き、これを緊張材として用いたプレストレストコンクリート(PC)部材の実験を数多く行った。その時に問題となったのは、曲げモーメントを受ける場合の破壊モードである。

すなわち、通常の鉄筋コンクリート部材では、鉄筋の降伏を先行させる破壊形式が合理的であるが、FRP は塑性域がないため、FRP の破断か、コンクリートの圧壊のどちらかで、いずれも脆性的破壊である。どうしても靱性的な破壊形式を望むならば、コンクリートを補強筋によって拘束することによりコンクリートを靱性化し、部材の脆性的破壊を防ぐことを提案した。さらに、FRP は錆びないことから、コンクリートの外に配置する外ケーブルについても研究を行った。前者の研究成果に対して、土木学会の吉田賞（論文部門）、後者に対してはプレストレストコンクリート技術協会（現 PC 工学会）論文賞を受賞した。最近は、力学的特性と経済性を考慮した、炭素繊維とガラス繊維から成るハイブリッド FRP 部材(図-2)を開発し、環境の厳しい漁港の渡橋（歩道橋）あるいは急速施工が必要とされる跨線橋を対象にした研究・開発を行っている。2012 年に広島県呉市にハイブリッド FRP 歩道橋を企業と共同で架設した。さらに、FRP 桁と超高強度繊維補強コンクリート（UFC）から成る合成桁を開発した。UFC は鋼に匹敵する高い圧縮強度とこれまでのコンクリートよりはるかに強い引張強度を有する優れた材料である。このような

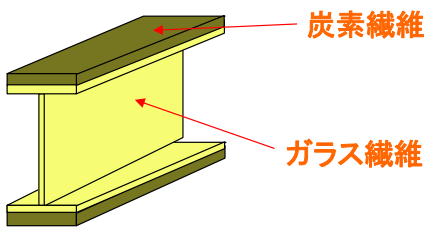


図-2 ハイブリッド FRP 部材

FRP+UFC 合成桁を昨年(2011)の11月に津波で被災した宮城県の女川町の漁港に栈橋間をわたる渡橋として架設した世界で初めての橋梁である(図-3)。被災地の復興にも少しはお役に立てたのではないかと考えている。このような新しい構造材料は高い耐久性（錆びない）と高強度かつ軽量という長所をもっている反面、通常の方法を用いたものと比較して初期コストは高くなる。しかしながら、供用期間の Life Cycle Cost (LCC) を考えればあまり変わらないものとなる。しかし、LCC の考えを初期設計の段階で導入することは一般化されていない。社会基盤の老朽化が叫ばれる今日、初期コストだけではなく、供用期間を考慮した Life Cycle Cost の考え方が定着することを切に希望する次第である。

FRP+UFC 合成桁を昨年(2011)の11月に津波で被災した宮城県の女川町の漁港に栈橋間をわたる渡橋として架設した世界で初めての橋梁である(図-3)。被災地の復興にも少しはお役に立てたのではないかと考えている。このような新しい構造材料は高い耐久性（錆びない）と高強度かつ軽量という長所をもっている反面、通常の方法を用いたものと比較して初期コストは高くなる。しかしながら、供用期間の Life Cycle Cost (LCC) を考えればあまり変わらないものとなる。しかし、LCC の考えを初期設計の段階で導入することは一般化されていない。社会基盤の老朽化が叫ばれる今日、初期コストだけではなく、供用期間を考慮した Life Cycle Cost の考え方が定着することを切に希望する次第である。



図-3 FRP&UFC 合成桁 出島(宮城県)

国際シンポジウム(FRPRCS-13)で論文発表

◇はじめに

昨年10月14、15日の2日間、米国カリフォルニア州アナハイムにある Disneyland Hotel で、FRPRCS-13 (The 13th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: 第13回FRPのコンクリート構造物への適用に関する国際シンポジウム)が開催されました。このシンポジウムはACI Symposium (米国コンクリート工学会シンポジウム)に併設して行われたもので、ACCから渡部技術委員が参加し、「Characteristics of FRP Pretensioned Concrete Beam after Long Term Exposure」のタイトルで、ACCが東京大学生産技術研究所とこれまでに共同で行ってきたプレテンションPCはりの長期自然暴露試験結果について論文発表しました(写真-1)。



写真-1 渡部技術委員による発表



図-1 開催地のアナハイム

◇開催地について

アナハイム(図-1)はロサンゼルス中心部より南東へおよそ45km、北緯33度の位置にあり、10月でも昼間は25℃以上になる温暖な地域です。そこに、Walt Disney氏が自ら設計を手掛けたDisney Resortがあり、メインパークのDisneylandに隣接したDisneyland Hotelのコンベンションホールが会場となりました。ディズニーで学会(?)と不思議な印象を受けるかもしれませんが、米国ではこうした観光地での会議が珍しくなく、このコンベンションホールも通年使用されるそうです(写真-2)。

◇FRPRCSについて

FRPRCSは2年に1度世界の都市で開催されます。20年前の1997年には札幌市の北海道大学でFRPRCS-3が開催されました。今回は、FRPのコンクリート構造物への適用に関する、材料、構造、設計、施工、調査などの技術とこれらの研究開発について、16のセッション、全92編の論文

が報告・発表されました。また、期間中は大ホールにて各社・団体による展示会も催され、およそ 50 のブースが立ち並びました。そして展示会場の一部がイベントスペースとなり、初日は大学対抗コンクリート強度コンテスト(決められた形状のコンクリートを破壊するラムの落下高さを競う)も行われ、会場は大変にぎわいました(写真-3)。



写真-2 FRPRCS-13 が開催された Disneyland Hotel



写真-3 コンテストの様子

◇発表論文について

PC 構造物の緊張材に FRP を使用した場合、FRP とコンクリートの線膨張係数の違い、また FRP の繊維自体やマトリクス樹脂の加水分解により、コンクリートとの付着が長期的に劣化し構造性能が低下する、との指摘が一部の研究者からありました。そこで、ACC は 1999 年より東京大学生産技術研究所と共同で、FRP 緊張材を用いたプレテンション PC はりの長期暴露試験(飛沫帯および内陸部)を実施、期間中に載荷試験や非破壊検査などを行いながら、暴露によるはりの性能変化を調べました。これまでの経過については既催の FRPRCS、土木学会全国大会、コンクリート工学年次大会などにおいて報告してきました。また、ACCトピックス NO.27 および NO.28 には、計画暴露 15 年(実暴露 17 年)を経た試験体の載荷試験結果と、比較のために同時暴露した PC 鋼より線試験体の劣化状況などが詳しく紹介されていますので、ここでは結果の概要のみ示します。

➤ 載荷試験

各緊張材材料および暴露環境の試験体に載荷して、曲げ耐力を測定しました。その結果、暴露前、暴露材齢 4 年および 17 年で曲げ耐力に変化はなく、暴露による緊張材の付着等の劣化は生じていないことが分かりました。

➤ PC 鋼材の腐食状況

載荷試験後の飛沫帯暴露試験体を解体し、PC 鋼より線の腐食状況を観察しました。暴露期間中に行ったコンクリート内部の塩化物イオン量調査で、発錆の予想される量の塩化物イオンが検出されましたが、取り出した鋼より線はほぼ健全であることが分かりました。試験体に用いたコンクリートが非常に緻密であったために、塩化物イオンの存在下でも他の因子(水分や酸素)が不足し、発錆に至らなかったと推測されます。

➤ 試験体の再暴露

この結果を受けて、試験体 6 体を再暴露し、FRP と PC 鋼材の性能変化を明確化することとしました。暴露地点は、国立研究開発法人土木研究所の管理する新潟県糸魚川市の海岸近く、および茨城県つくば市の暴露施設とし、期間を 10 年としました。

◇おわりに

ACC は FRP 緊張材の長期性能の安定性を検証するため、自然暴露試験を実施し、暴露による劣化が生じないことを明らかにして、これを公表しました。17 年もの時空を超えて、FRP 緊張材の実質的な耐久性能を定量評価した報告は世界でも類例がありません。そして、暴露試験はこの今も継続しており、FRP 緊張材が将来にわたって信頼される材料であり続けることに期待します。最後に、魚本健人東京大学名誉教授をはじめとする、本暴露試験の計画および実施にあたりご協力いただいたすべての方に心より謝意を表し、本報告を結びます。



PC ホロー桁への炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の導入
 = 平成 28 年度小名浜港東港地区岸壁(-18m)(耐震)上部工事 =

継続実績より
582

福島県いわき市小名浜港の東港地区において、-18m 耐震岸壁の整備が行われています。その一部として、栈橋式岸壁と東港埋立地の間を結ぶ必要最小限の通路として、岸壁延長370m に対して3箇所に渡橋（ときょう）を設置します。

本工事では、港湾技術パイロット事業として、この渡橋に使用する PC ホロー桁への炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の導入を行う事となり、渡橋A(通常PC)、渡橋B(通常PC+CFRP)、渡橋C(CFRP)の3種類の PC ホロー桁製作を行いました。

鉄筋を使用する従来の PC ホロー桁と異なり、CFRP は錆等の腐食の恐れが無いため、塩害に対する補修作業が不要となることが期待できます。

それぞれの渡橋完成後は、モニタリングを実施して比較を行い、施工性や耐久性等を確認することにより、ライフサイクルコストを考慮した CFRP の設計・施工方法の確立が期待されます。

※本件で使用されている CFRP は、すべて東京製綱製の CFCC です。



写真-1 渡橋施工位置図

	渡橋 A	渡橋 B	渡橋 C
標準断面			
活荷重	T-25荷重(実際は管理用車両が利用)		
鋼材(緊張材)	PC鋼より線(7本よりφ 15.2mm)×31本 (上線:13本、下線:18本)	PC鋼より線(7本よりφ 15.2mm)×20本 (上線:12本、下線:8本)	-
CFRP(緊張材)	-	CFRPより線(7本よりφ 15.2mm)×8本 (下線:8本)	CFRPより線(7本よりφ 15.2mm)×31本 (上線:13本、下線:18本)
センサー	ひずみ計×4個	ひずみ計×4個 EMセンサー×4個	ひずみ計×4個

表-1 渡橋断面比較表



写真-2 PC ホロー桁製作状況



写真-3 PC ホロー桁仮置状況

CFCC を緊張材・補強筋に使用した港湾PC床版 = 平成 28 年度 釧路港西港地区-14m岸壁床版その他工事 =

継続実績より

591

北海道の釧路港は、平成 23 年には穀物の国際バルク戦略港湾に選定され、平成 26 年度から国際物流ターミナルの整備事業が着手されました。西港地区に水深-14mの岸壁を整備する工事が行われています。岸壁にはジャケット式栈橋構造が採用され、上部に施工される床版は、一般部に RC 床版、ベルトコンベアや建屋下等、床版の補修、交換が困難な箇所 41 枚には、CFCC を緊張材・補強筋として使用した PC 床版が採用され、平成 28 年度に製作、設置工事が行われています。

CFCC 床版は、工場で製作されたプレテンション床版を現場近傍のヤードで 3 枚を一体化するポストテンション緊張工事を行い、台船で運搬し岸壁に架設されています。

今回北海道の厳しい自然環境を鑑み、耐久性を考慮した設計の一環として CFCC が採用されました。国内ではこれまでにない大規模な工事であり、今後全国の港湾整備工事等への波及効果が期待されます。



写真-1 栈橋施工位置図

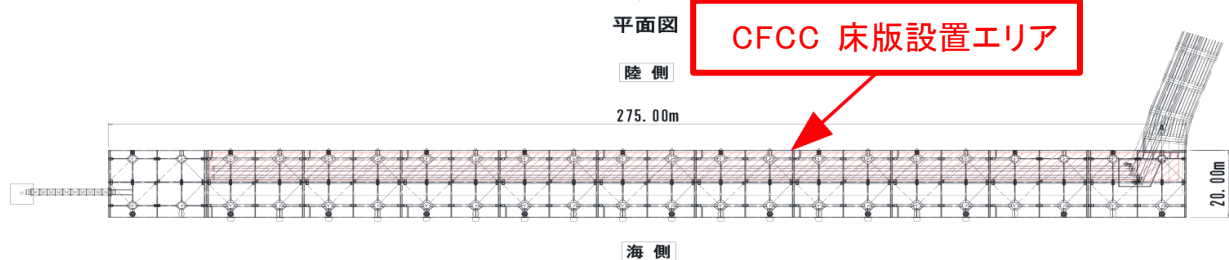


図-1 栈橋詳細図



写真-2 プレテンション方式

写真-3 ポストテンション緊張用端末
(グラウド強度発現後切断)

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
574	北陸地方整備局 新潟国道事務所	切尾橋(上り線P2)	新潟県	橋脚1基	AWS橋脚補強	テケラウ 7.4φ L=875m	2017年1月
575	北陸地方整備局 富山河川国道事務所	茅畑橋	富山県	橋脚1基	AWS橋脚補強	テケラウ 7.4φ L=1310m	2017年2月
576	東北地方整備局 酒田河川国道事務所	余目地区橋梁上部工工事	山形県	1号橋: 橋長 18.3m 幅員 13.5m 2号橋: 橋長 17.2m 幅員 14.3m	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=1038m	2017年2月
577	樺原市	橋梁補修工事28-4 (宮下橋)	奈良県	橋長 32.9m(3径間) 幅員 3.53m (有効幅員 3.05m)	RC床版上面補強 (張出部)	高弾性リッドライン HM12 φ L=482m	2017年3月
578	山梨県	七覚橋床版補強工事	山梨県	橋長 30.32m 幅員 5.8m (有効幅員 5.0m)	PC床版上面補強 (張出部)	高弾性リッドライン HM10 φ L=291m	2017年3月
579	北陸地方整備局 磐城国道事務所	横川高架橋上部工工事	福島県	-	沓座モルタル補強	テケラウ 7.4φ L=120m	2017年5月
580	岩手県大槌町	安渡地区沢山沢川13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 5.0φ L=126m	2017年5月
581	東北地方整備局 南三陸国道事務所	松倉地区外上部工工事 (楳ヶ沢橋)	岩手県	橋長 22m、桁長 21.9m 桁高 1.212m 製作数 14本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=375m	2017年6月
582	東北地方整備局 小名浜港湾事務所	平成28年度 小名浜港 東港地区岸壁(-18m) (耐震)上部工工事	福島県	PCホロ-桁 渡橋タイプB: 主桁緊張材8本/桁 スタップ、製作数11本 渡橋タイプC: 主桁緊張材31本/桁 補強筋、製作数15本	補強筋 プレテンションPC緊張材	CFCC U RB 5.0φ L=9525m CFCC 1x7 RB S 15.2φ L=8589m	2017年6月
583	沖縄県	池間大橋補強工事(H28-2)	沖縄県	1橋脚、コンクリート29m ³ 鉄筋3.24t	開口部補強筋	CFCC U RB 5.0φ L=112m	2017年6月
584	東北地方整備局 磐城国道事務所	甲塚二道橋上部工外工事	福島県	桁長 23.520m 桁高 1.208m 製作数 9本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=264m	2017年7月
585	東北地方整備局 仙台河川国道事務所	大森地区跨道橋工事	宮城県	橋長21.4m、幅員9.5m	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=466m	2017年8月
586	岩手県盛岡広域振興局	田面野木地区地すべり防止(そ の1)工事	岩手県	HM-5 アンカー長 20.50m~ 45.23m	グラウトアンカー (グラウトアンカー5本)	CFCC 1x7 RB S 12.5φ L=143m	2017年9月
587	東北地方整備局 南三陸国道事務所	松倉地区外上部工工事 (松倉第1橋)	岩手県	橋長 23m、桁長 22.9m 桁高 1.207m 製作数 14本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=375m	2017年9月
588	東北地方整備局 岩手河川国道事務所	盛岡地区改良舗装工事 (菓子川添架橋)	岩手県	橋長13.9m、幅員1.7m	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=19m	2017年9月
589	東北地方整備局 南三陸国道事務所	松倉地区外上部工工事 (松倉第2橋)	岩手県	橋長 24m、桁長 23.9m 桁高 1.312m 製作数 14本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=384m	2017年10月
590	東北地方整備局 南三陸国道事務所	大沢第1橋外上部工工事	岩手県	桁長 21.641m 桁高 1.100m 製作数 12本	高耐久桁における桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=293m	2017年10月
591	北海道開発局 釧路開発建設部	釧路港西港地区-14m岸壁 床版その他工事	北海道	CFRP床版 37枚 CFRP合成床版 4枚	プレテンション緊張材 補強筋 ポストテンション緊張材	CFCC 1x7 RB S 12.5φ L=27566m CFCC 1x7 RB S 7.5φ L=19362m CFCC U RB 5.0φ L=18277m	2017年10月
592	鹿児島県	総合流域防災(砂防)工事 (熊太郎川28-2工区)	鹿児島県	100m ²	法面補強工事	CFCC 1x7 RB S 15.2φ L=2150m	2017年12月
593	都市再生機構 岩手震災復興支援本部	平成28年度山田地区 細浦柳沢線他整備工事	岩手県	橋長21.9m、桁高0.85m 製作数 16本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=516m	2018年2月
594	東北地方整備局 仙台河川国道事務所	汐見橋外上部工工事	宮城県	橋長 18.900m 桁長 18.840m 製作数 18本	高耐久仕様桁の桁端面 補強	CFCC U RB 5.0φ L=570m	2018年3月



編集後記

会員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