

## ■FRP 補強材の有効利用

国立研究開発法人 土木研究所 理事長 魚本 健人

### 1. はじめに

少子高齢化が進行している我が国では、道路、鉄道、港湾等に代表される社会インフラ設備の老朽化も大きな問題になりつつある。これは施設の老朽化だけの問題にとどまらず、気候温暖化に伴う自然災害の多発、我が国の人口減少や経済成長の鈍化などとも相まって、様々な分野において今後多くの問題を引き起こす可能性がある。



### 2. これからの問題とは

現在進行中の我が国の種々の変化を列記すると以下のようなになる。

- 1) 若年層の減少は企業等の生産人口の減少に直結するため、維持管理分野などで特に技術の 担い手を確保するためには自動化・ロボット化などを活用して一人当たりの作業量負担軽減と生産性の増大が重要となる。また、高齢者に対する介護の体制が特に重要となる。
- 2) 社会インフラの老朽化の原因は様々であるが、その多くは設置されている場所の環境にある。たとえば、寒冷地では、冬期の路面凍結に伴う凍結防止剤の散布が原因となり、構造物内部の鋼材等が著しい腐食を発生し、構造物は種々の損傷を受けることになる。
- 3) 経済成長の鈍化に伴い、老朽化する公共施設の維持管理に必要な費用を十分に確保できなくなる。このため、既設構造物の補修・補強に際しても多くの費用や手をかけずに 50 年、100 年を見通した工事を行わざるを得ない。従来では費用がかかると考えられてきた新しい材料やシステムをいかに導入していくかが課題である。
- 4) 今まで当たり前のように利用されてきた構造物も、維持管理費が不足すると残存性をなどを考慮して利用制限を加える場合も必要となる。場合によっては利用の中止まで考えなければならない。このような状況になると、地域に住む市民や利用している国民にとっては不便な状況に陥ることもあるが、地域の了解を得ながら対処しなければならない。

これらの事項はいずれもこれからの重要な問題であるが、建設分野においては特に3) に示したような新しい材料やシステムを活用する手法は、新しい展開につながる可能性が高い。

### 3. FRPの有効利用など

本文ではその一例としてFRP補強材の有効利用を取り上げる。今日まで、我が国の社会インフラ整備では数多くの鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物が利用されてきたが、建設後 50 年以上経過すると劣化の進行により、補修補強対策が必要となる場合がある。特にコンクリート中に配置されている鉄筋や PC 鋼材といった補強材の腐食は深刻なものであり、安全性確保のため慎重な補修補強対策を要する。このため、橋梁などでは通行を一時制限して工事を行ったりしているが、腐食しない材料を活用するなどすればこの種の問題が発生しない。事実、適切な性能を有するFRP補強材を利用した場合には劣化はほとんど進行しないと考えられ、50 年、100 年経過後も特別な維持管理を行わずとも継続的に利用することが期待できる。即ち、建設時にはそれなりのコストがかかるが、その後は殆どコストがかからないというメリットが存在する。特に、FRP補強材を鉄筋またはPCストランドとしてコンクリート内部に埋め込む場合には、合成高分子材料の紫外線劣化等も防ぐことができるため、その効果には著しいものが認められる。モニタリングシステムなども最弱断面の抽出とその計測をうまく組み合わせることによりメリットが出せるものと考えられる。

以上述べたように、FRPの有効利用などを図ると、初期の投資コストは増大するものの、その後のコストは殆ど増大しない点が大きなメリットとなる。このような性能評価は従来あまり注目されてこなかったが、今後はLCC等を考慮した新しい考え方に結びつくものといえよう。

### 4. おわりに

今まではFRPのような新しい材料やシステムを十分生かすチャンスがなかったが、今後は建設後 100 年以上をメンテナンスフリーで利用するための、設計・施工方法の開発を推し進めることが時代のニーズに見合った技術になると考えられる。この場合に大切な点は 100 年後にその構造物がどのように利用されるかを予め計画しておくことで、この点をないがしろにすると経費の無駄に繋がる。

## FRP 緊張材を用いた PC はりの長期暴露試験

＝17 年暴露後の載荷試験による評価・・・さらなる長期暴露へ展開＝

## ◇はじめに

ACCでは 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PCはりの長期暴露試験を実施してきました。昨年 12 月から今年 1 月にかけて、計画暴露期間 15 年を耐え抜いた試験体を暴露施設より回収し、暴露によるはりの性能変化を調べるため、載荷試験等を行いました。

## ◇暴露試験実施の経緯

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、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。このため、PCはり試験体を2種類製作し、一つは海岸の飛沫帯と内陸部での自然暴露、もう一つは水槽内で温水の浸漬と室温乾燥を繰り返す促進暴露を実施、暴露前後でPCはりの載荷試験等を行うことで、付着劣化が本当に起こるのか検証しました。本報告では、自然暴露17年後の試験体についての結果を紹介します。

## ◇自然暴露試験体

自然暴露試験体は長さ2.0mで、断面は図1に示す形状です。FRP緊張材は、アラミドにテクノーラ、カーボンにCFCCを使用し、比較用のPC鋼より線試験体と合わせ 24 体を製作しました。暴露による緊張材への影響をより明確にするため、すべての試験体に一次載荷として、曲げ耐力の 60% (14kNm) をかけてひび割れを発生させ (PC構造なので荷重を除くとひび割れは閉じます)、その後暴露しました。暴露施設は、飛沫帯が静岡県伊豆海洋公園、内陸部が東大生産技術研究所千葉実験所としました。

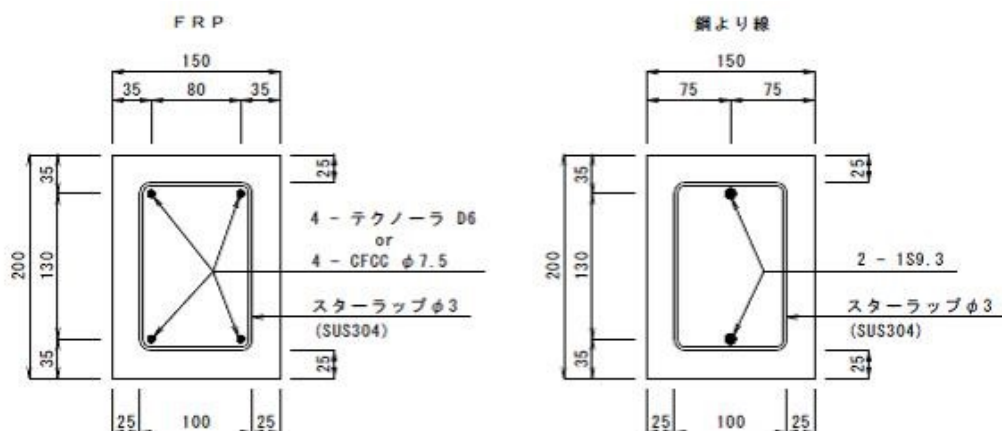


図-1 試験体の形状





写真-1 飛沫帯の暴露状況



写真-2 内陸部の暴露状況

## ◇試験体の回収

1999年より暴露を開始した試験体は、3年後の2002年にその半数(飛沫帯、内陸部各6体)を回収し、東大生産技術研究所にて破壊試験、疲労試験、塩分量測定、SEM分析等の経過調査を行っています。また、暴露期間中にも数回現地へ赴き、自然電位測定等を行ってきました。今回、暴露施設の利用期間が終了することもあり、暴露用の支持台やテストピースも含めた残り全数を回収しての試験となりました。飛沫帯の施設は波打ち際の岩場にあるので、足場を組み、ウインチを使用して1体150kgの試験体を2日かかりで運び出しました。



写真-3 飛沫帯試験体回収状況

### ◇コンクリート圧縮強度

載荷試験に先立ち、テストピースによりコンクリートの圧縮強度を測定しました。呼び強度 50N/mm<sup>2</sup>(表 1)として製造したコンクリートは、17年を経た今もなお、わずかずつですが強度が増進し、80N/mm<sup>2</sup>を超えています(図 2)。このように高強度のコンクリートは組織も緻密であり、塩分の浸入に対し高い抵抗性を持っていると考えられます。

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/A (%)	空気量 (%)	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )
50	37.2	41	2	430	160	731	1060	4.73

表-1 コンクリートの配合

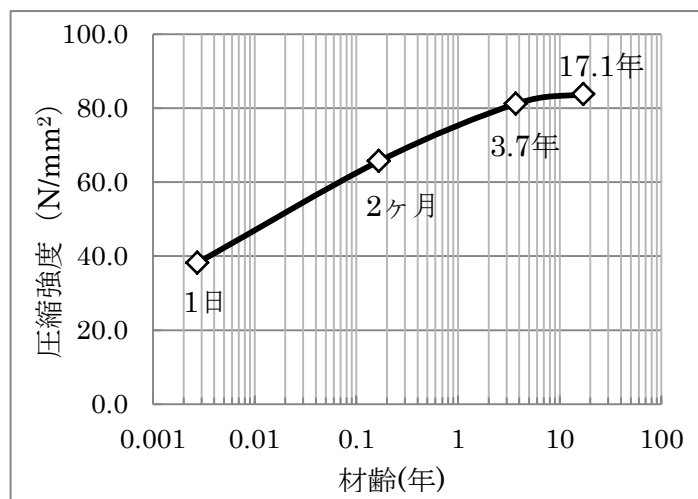


図-2 コンクリート圧縮強度の推移

### ◇載荷試験

載荷試験は、ACCの会員会社である川田建設(株)の技術研究所にて行いました。載荷装置を図 3 に示します。試験体は緊張材や暴露位置により 6 種類に分けられ、種類ごとに 2 体ずつあります。そこで、各試験体を曲げ耐力の 80% (18kNm) まで載荷してから除荷し、その後各種類 1 体ずつを破壊荷重まで載荷しました。残った試験体は現在同研究所内に仮置き中で、今後土木研究所の暴露試験所で再暴露する予定です。

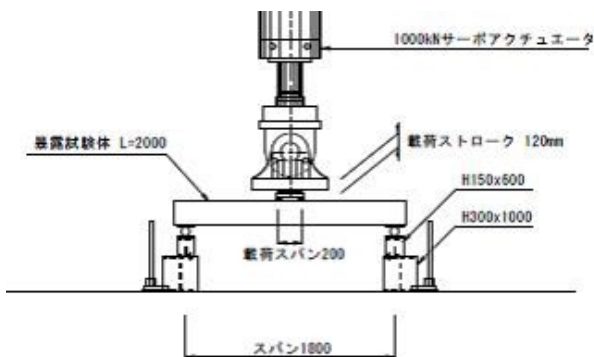


図-3 載荷装置



写真-4 載荷試験状況

載荷試験の最大荷重から求めた曲げ耐力とその時の変位を、未暴露(材齢 2 ヶ月)、2002年(3.7年)そして2016年(17.1年)で比較し、表 2 に示します。

緊張材の種類			アラミド		カーボン		鋼より線	
実施年	材齢	暴露場所	曲げ耐力 (kNm)	終局変位 (mm)	曲げ耐力 (kNm)	終局変位 (mm)	曲げ耐力 (kNm)	終局変位 (mm)
—	—	解析値	21.5		20.6		23.8	
1999	2 ヶ月	未暴露	22.4	24.9	23.3	13.1	24.2	27.3
2002	3.7 年	飛沫帯	21.7	23.4	22.5	10.6	23.5	24.2
		内陸部	21.7	24.4	23.4	12.2	23.5	24.9
2016	17.1 年	飛沫帯	22.2	25.6	23.2	12.5	23.5	26.9
		内陸部	22.7	27.6	23.7	15.5	23.2	25.8

表-2 暴露期間ごとの載荷試験結果

いずれの試験体種類においても経時的な数値の変化はほとんどありません。特に曲げ耐力については、緊張材の種類ごとに統計処理して求めた変動係数がいずれも 2%以下となり、安定しています。この結果から、暴露により劣化が生じているとは考えにくいと言えます。

各試験体の曲げ—変位特性は、破壊まで載荷した方の飛沫帯(青線)と内陸部(赤線)に、比較用として未暴露(黒線)を重ね、図 4 に示します。

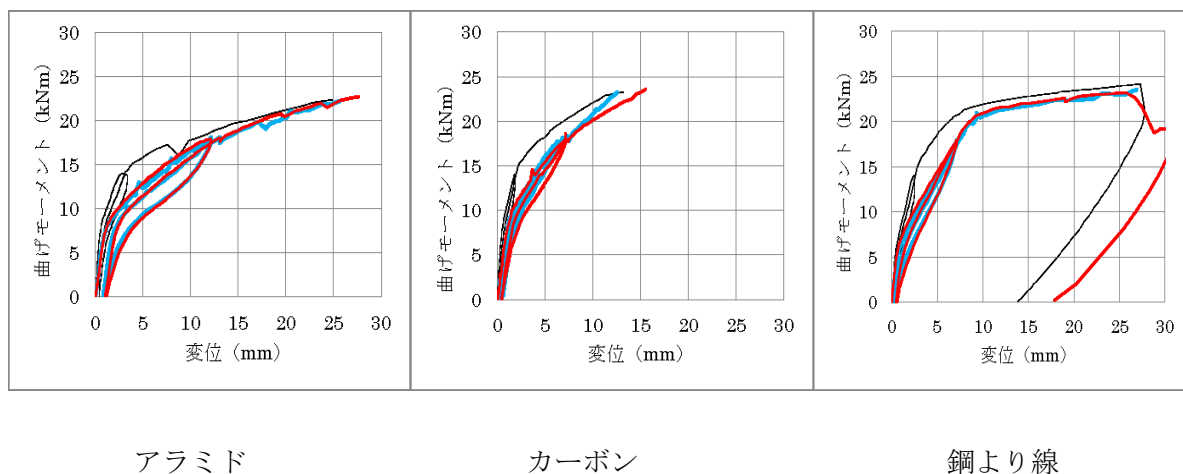


図-4 破壊載荷試験体の曲げ—変位特性

#### ◇自然電位測定

今回の試験に際して、東京理科大学工学部土木工学科 加藤研究室にご協力いただき、載荷前の鋼より線試験体 4 体について、自然電位測定を行いました。

測定結果を図 5 に示します。飛沫帯試験体(赤線)の電位分布は、内陸部試験体(黒線)に比べ全体的に卑(マイナス)側に移動しています。値の範囲は CSE 換算でおよそ-0.15V~-0.25V で、鋼材腐食の判定としては「不確定」(どちらともいえない)になりました。



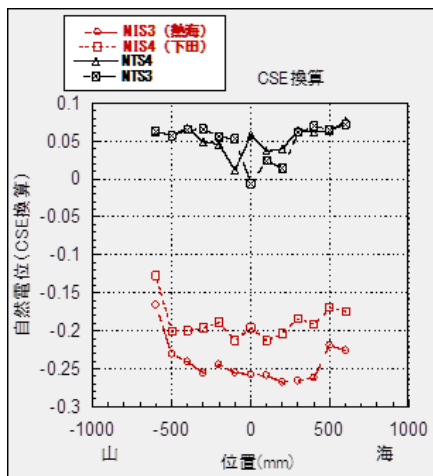


図-5 自然電位分布



写真-5 鋼材表面のさび(赤マル部分)

そこで、鋼材腐食状況を実際に確かめるため、破壊試験の終了した鋼より線試験体を切断し、鋼材を取り出して観察しました。すると、ひび割れ付近にわずかな表面さびが見られるものの、全体としてはほぼ健全であることが分かりました(写真 5)。その理由として、試験体に用いたコンクリートの、塩分等外来因子に対する遮へい能力が高く、鋼材が腐食するには至らなかったことが考えられます。

#### ◇まとめ

FRP緊張材を用いたPCはりの長期暴露試験を実施し、17年暴露後に載荷試験を行いました。その結果、飛沫帯、内陸部ともに耐荷性能は低下しておらず、FRPとコンクリートの付着劣化は生じていないことが分かりました。

#### ◇おわりに

FRP緊張材の付着性能が経時的に低下するものでないことが分かり、FRPをコンクリート構造物に適用するにあたって一部の研究者から指摘のあった不安は、解消しました。この結果が、FRP技術の発展に寄与できれば幸いです。

最後に、今回の試験実施にご協力いただいた東京大学生産技術研究所、東京理科大学ならびに関係各位に感謝申し上げます、本報告を終えます。

## 水中グリッド(CFRP 格子筋)工法を用いた橋脚補強例 ＝川尻橋 耐震補強工事＝

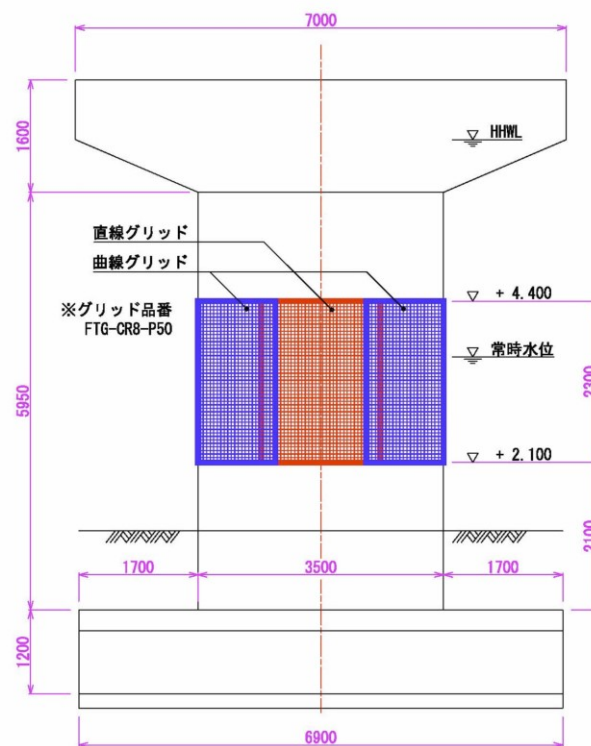
継続実績より

548

本工事は河川内橋脚を耐震補強するものです。耐震照査すると、段落し補強が必要であることがわかり、また、段落し部が常時水位以下であったため、耐食性・長期耐久性・施工性に優れる「水中グリッド工法」\*が採用されました。

本工事で使用されたトウグリッドは約 30 m<sup>2</sup>で、水中硬化型エポキシ樹脂で一体化されました。型枠は、流木等の衝撃から補強層を保護する目的で金属製永久型枠を使用しました。

\*)水中グリッド工法は日鉄住金防蝕棟の開発技術です。



側面図 S-1/60



施工中



施工完了後



## CFCC を緊張材及び補強筋に使用したバルブ T 桁 =Route 49 over Aaron's Creek=

継続実績より

552

米国バージニア州の Route 49 over Aaron's Creek 橋は、老朽化が進み架け替えられることとなりました。その際、冬季に撒かれる凍結防止剤による補強鋼材の劣化を避けるため、桁の全ての緊張材及び補強筋に錆びない CFCC が採用されました。本橋は 2 スパン全 8 個のバルブ T 桁からなる橋長 168.8 feet (51.5m)、幅員 32.5 feet (9.91m) の PC 橋です。桁の緊張材には CFCC 1×7 15.2 φ が延べ約 10000m 使用され、補強筋には CFCC 1×7 15.2 φ と 17.2 φ がそれぞれ 6500m と 150m 使用されました。

塩害対策としての CFCC 適用プロジェクトは、バージニア州交通局にとって非常に重要です。何故なら冬季の凍結防止剤による塩害に加え、州東部の沿岸地域にある橋梁では、度々海水にさらされることにより深刻な塩害を受ける環境にあるからです。

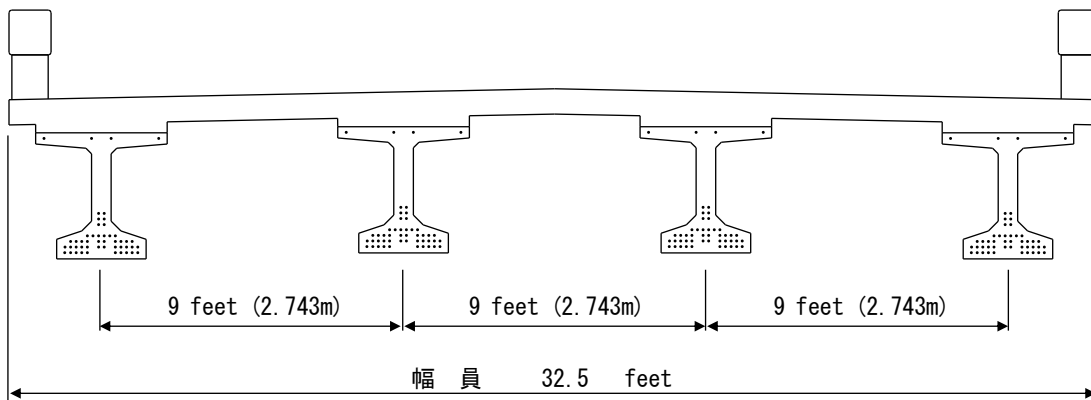


図-1 橋梁断面

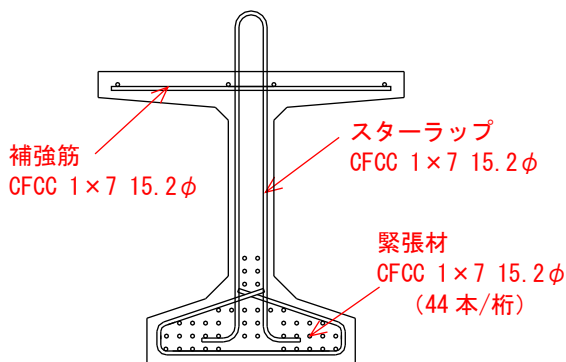


図-2 バルブ T 桁断面

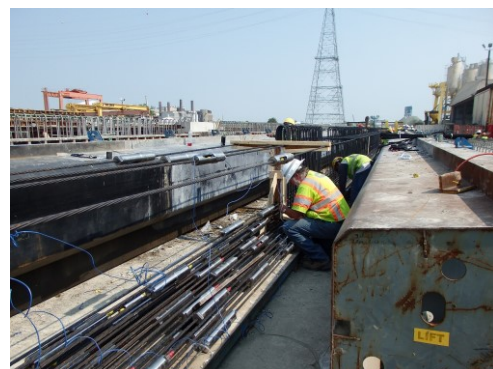


写真-1 定着具(専用カップラー)取付作業



写真-2 CFCC 補強筋組立状況



写真-3 桁完成

## アラミド(テクノーラ®)FRP 緊張材を用いた バタフライウェブ構造の橋梁 =Dura-Bridge 実証橋=

継続実績より

556

Dura-Bridge は、鉄筋やPC 鋼材などの鋼材を使用しない耐久性を大幅に向上したプレストレストコンクリート橋です。コンクリートには高強度繊維補強コンクリートを用いてせん断強度の向上を図り、せん断補強鉄筋(スターラップ)は配置していません。曲げモーメントや軸引張力によって発生する引張応力に対しては、アラミド(テクノーラ®)FRP 緊張材を用い、PC 鋼材及び鉄筋を用いない構造を実現しました。さらに、桁形式の橋梁にはウェブに蝶型のコンクリートパネルを用いたバタフライウェブ構造を適用し、軽量化とせん断補強の合理化を図っています。

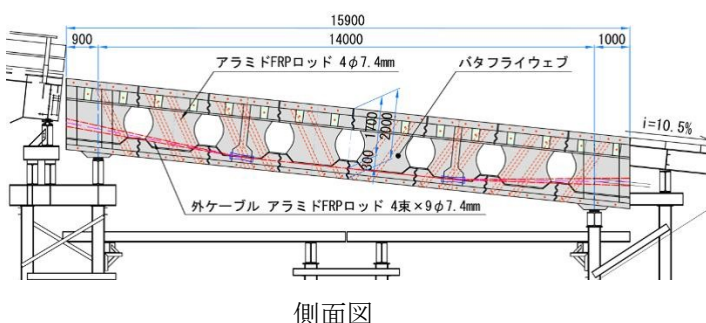
長崎自動車道(長崎多良見 IC~長崎芒塚 IC)の 4 車線化に伴う工事用道路の仮栈橋の一部に Dura-Bridge 実証橋が完成しました(2015 年 9 月)。橋長 15.9m、支間長 14.0m、総幅員 6.0m の PC 箱桁橋です。アラミド FRP 緊張材は、 $\phi 7.4\text{mm}$  ロッドを 4 本束ねたケーブル(4 $\phi 7.4$ )を上・下床版横締め、上床版リブ、バタフライウェブ、および偏向部に使用し、9 $\phi 7.4$  ケーブルを端支点横桁および外ケーブルに使用しています。緊張の際には鋼製付着型の定着具を使用していますが、構造体に定着具が残らないプレテンション方式で躯体に定着しています。工場にてセグメントを製作し、現地で組み立て、外ケーブルで一体化しています。本橋では橋梁全体の安全性や設計・施工の妥当性を検証するため、定期的な点検と常時モニタリングを行っています。



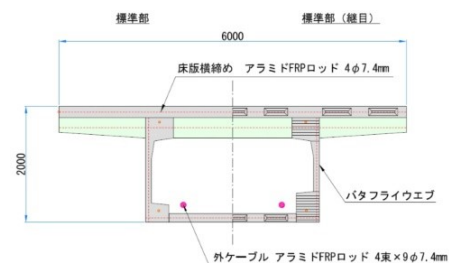
写真-1 Dura-Bridge 実証橋全景



写真-2 アラミド FRP 外ケーブル



側面図



断面図

Dura Bridge 実証橋構造図

## 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
547	ルイジアナ州交通局	I-10 New Orleans East Girder Repairs	米国ルイジアナ州	橋長 18.8mx6桁	外ケーブル補強	CFCC 1x7 φ 17.2 19.3mx12本	2014年6月
548	富山県 水見土木事務所	川尻橋橋脚耐震補強工事 水中グリッド工法	富山県	トウグリッド 30㎡	段落とし補強(引張補強部材)	炭素繊維格子筋 (トウグリッド) + 水中硬化樹脂 (NTAC-SGR)	2014年11月
549	国土交通省 東北地方整備局 秋田河川国道事務所	(国道7号) 荒磯橋上部工外工事	秋田県	橋長 45.0m 総幅員 16.87m 21主桁×2径間 PC2径間単純 プレテンション中空床版橋	プレテンション桁端面ひび割れ 補強	CFCC φ 5.0 1813m 主桁42本	2014年度～ 2015年度
550	愛媛県南予地方局 西予土木事務所	防道改第23号の1 (国)378号道路改築工事 新宮崎橋	愛媛県	橋長 25.30m	支承部沓座モルタル補強	CFCC U φ 5.0 0.5mx0.5m	2015年 1月
551	神奈川県 県西土木事務所	足柄大橋	神奈川県	橋脚1基	橋脚RC巻き立て補強	テーパー 9φ 7.4mm 784m	2015年6月
552	バージニア州交通局	Route 49 over Aaron's Creek Bridge	米国 バージニア州	橋長 51.5m 幅員 9.9m	Bulb-T Beam プレテンション緊張材および 補強筋	緊張材合計長さ 10000m 補強筋合計長さ CFCC 1x7 φ 15.2 6500m CFCC 1x7 φ 17.2 150m	2015年6月
553	ミシガン州交通局	I-94 Bridge over Lapeer Road Bridge (West bound)	米国 ミシガン州	橋長 50.0m 幅員 18.8m	横締めケーブル	CFCC 1x37 φ 40.0 19.29m 20本	2015年6月
554	群馬県吾妻振興局 中之条土木事務所	万座災害復旧工事 単独災害復旧事業	群馬県	HM-2 アンカー長 18.74m～ 9.24m	グラウトアンカー	CFCC 1x7 φ 12.5 延べL= 114.94m NMグラウトアンカー 6本 エポキシ樹脂	2015年6月
555	ミシガン州交通局	M-66 over West Branch River	米国 ミシガン州	橋長 7.3m 幅員 12.3m	プレテンション緊張材(ホロ-桁)	CFCC 1x7 φ 15.2 緊張材合計長さ 670m	2015年7月
556	西日本高速道路株式会社	Dura-Bridge 実験橋	長崎県	PC箱桁橋 橋長 15.9m 支間長 14.0m 総幅員 6.0m	プレキャスト部材:プレテンション 連結ケーブル:ポストテンション	テーパー φ 7.4 4φ 7.4 2840m 9φ 7.4 1440m	2015年9月
557	嵯郷土開発	ハイテク東谷山 宅地造成工事	鹿児島県	地山補強土 42本 L=3.0m	地山補強	CFCC U φ 5.0 L=2500mm 84本	2015年9月
558	高知県幡多郡大月町 建設環境課	防安第2号町道古満目線 上部工設置工事 浦尻橋	高知県	橋長 14.20m 幅員 6.20m	支承部沓座モルタル補強	CFCC U φ 5.0 134.2m	2015年10月
559	国土交通省 東北地方整備局 南三陸国道事務所	大沢第3橋外上部工工事 不動沢橋	岩手県	橋長 19m 有効幅員 13.5m 主桁本数 14本	プレテンションT桁 端面ひび割れ補強	CFCC U φ 5.0 11.2m 桁端面 使用全数量314.4m	2015年10月
560	(株)プリンスホテル	万座ハイウェイ道路崩落箇所 復旧工事	群馬県	HM-2 アンカー長 11.71m～ 18.71m	グラウトアンカー	CFCC 1x7φ 12.5 延べL=870.44m NMグラウトアンカー 32本 FFU受圧板 セメント	2015年11月
561	神奈川県 厚木土木東部センター	座架依橋	神奈川県	橋脚1基	橋脚RC巻き立て補強	テーパー 9φ 7.4 3084m	2016年1月
562	中部地方整備局 名古屋港湾事務所	平成27年度 名古屋港 飛島ふ頭南岸壁(-16m) 舗装補修工事	愛知県	舗装面積=67.5m <sup>2</sup> 舗装厚=0.35m	コンクリート舗装版ひび割れ 補強	CFCC U φ 5.0 982.3m 敷設面積 14.8mx4.3m	2016年2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.03-3276-6870 E-mail: info@acc-club.jp