

## ■サステナブル思考へ

東京理科大学 理工学部土木工学科 コンクリート工学研究室教授

加藤 佳孝



今から 20 年前の 1997 年に、自身として初めての国際会議 (FRPRCS-3) に” Computational Model for Deterioration of Aramid Fiber by Ultraviolet Rays”を投稿した。当時、東京大学生産技術研究所の魚本教授の助手であった筆者は、西村技術職員や学生が実施済みのデータを分析して論文に投稿するという役目だった。国内会議の論文投稿・発表は経験済みであったが、初めての国際会議が、まさか自分で実験した研究成果ではないことになるとは思ってもいなかった。正直、日本語で聞かれたところで質問に答えられるのか？という不安感しかなかった。翌年の 1998 年の国際会議 (Durability of FRP Composites for Construction) にも論文投稿・発表したが、当時、魚本研ではワイブルの weakest-link 仮説を活用したデータ分析をしており、先輩の山口氏 (現、鹿児島大学教授) もあわせて、ある 1 人の研究者から厳しい質問を受けたことを覚えている (内容は覚えていないが、いつも同じ人が、同じ様な質問をするな～という記憶が残っている)。生涯で、FRP の論文を投稿・発表したのは、この 2 件である。そんな筆者が、建設用先端複合材技術協会 (ACC) の文章を書く依頼を受けた。なぜか。2015 年度に、FRP 緊張材を用いたプレテンション部材の塩害劣化の評価 (当時、17 年暴露) の一環として、比較用の試験体である PC 綱より線を用いた試験体の電気化学測定を実施したことが理由のようである。昔も今も、魚本東京大学名誉教授の傘の下に居ることを痛感する。ありがたい限りであるが、実力以上の評価を受けていると感じることも多い。

さて、こんな筆者であるので、過去のトピックスの巻頭言メンバー (何の因果か？昨年度は恩師の魚本先生、その前年は京都大学の宮川教授、その前は北海道大学の横田教授) を知ったとき、今回の依頼を簡単に引き受けるべきではなかった、と後悔しかない。

ここ 10 年位、鋼材腐食を研究テーマの 1 つの柱にしているが、研究を本格的に始めたとき、建設技術者向けの電気化学理論の教科書がないことに気づいた。そこで、日本コンクリート工学会 (JCI) の研究委員会として「物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会 (2013-2014 年度)」を立ち上げ、電気化学理論から実践の導入までをつなげた 300 ページを超える報告書をまとめた。個人的には、鋼材腐食の研究は面白いが、実構造物を対象に電気化学測定を実施し、その結果を適切に解釈することは、極めて難しいと思っている (だからこそ、大学の研究者としては面白みを感じるが)。できれば、その苦労は無い方が良く、つまり、鋼材腐食を考えなくてすむ構造物が実用的である。設計耐用期間中、鋼材腐食が発生しないことを限界状態の標準としている現在の土木学会コンクリート標準示方書も、鋼材腐食を考えなくてすむといえるが、実構造物では鋼材が腐食している場合もあり、理想と現実の

ギャップを感じざるを得ない。やはり、根本的な解決策は、腐食を考えなくてよい材料(腐食しない材料)を使うのが、一番シンプルでわかりやすい方法である。その1つの選択肢にFRPがあるが、なぜ、あまり使われないのだろうか？旧態依然とした考え方に捕らわれているからだろうか？それとも、決定的な欠点があるのだろうか？

人々が安全・安心で豊かな生活を営み、社会の持続的な発展を支えるために社会基盤施設は整備されているが、一方で、整備に伴い環境に影響を与えることもまた事実である。そのため、環境性、経済性、および社会性という「3側面」を要素とする人間活動の持続性を表す概念である持続可能性(サステナビリティ)を念頭に置き、整備を進めていくことが重要である。国土交通省も、2009年3月に「公共事業の構想段階における計画策定プロセスガイドライン」を策定しており、この考えに基づいたものである。サステナビリティと聞くと、環境負荷低減、さらにはCO<sub>2</sub>排出量削減と誤解する人が多いが、社会性の一つである人々の安全・安心や、経済性の一つである豊かさの実現等も含んだ概念であり、環境性は単なる一側面に過ぎない。また、持続可能性／サステナビリティ等の新しい概念が現れると、それだけで抵抗感を抱く人も多い。確かに、持続可能性等は1987年のOur Common Futureで定義された言葉で比較的新しい概念ではあるが、言葉や概念が定義される前から、公共事業などでは社会性、経済性、環境性を考慮して進められてきたはずである(古くは環境性への配慮が低かったのは事実だと思うが)。人々が子孫のことを思って活動すれば、当たり前概念なのである。体系的な整理や、持続可能性という言葉自体を意識した活動では無かったと思う。最近では、JCIを含む7団体による「コンクリートサステナビリティ宣言:2012年4月」、コンクリート構造物のサステナビリティ設計(技報堂)等、建設・コンクリート関連でも持続可能性を意識した活動が進められている。環境性に偏った印象はあるが、建設分野では建築の方がサステナビリティをキーワードとしてうまく活動しているように見える(例えば、日本建設業連合会のサステナブル建築など)。一方で土木分野では、残念なことに実務では浸透していないし、場合によっては拒否反応を示しているように思える。これは、具体的なサステナビリティ設計法が存在しないことも理由であろう。前述したようにサステナビリティ=環境性との認識は誤りであり、特に、近年の未曾有の災害を受けて、設計で想定する安全性の設定(想定外への対応)が重要視されている。コストを考えなければ、想定外力の数倍も安全な構造物を構築することは技術的には可能であるが、現実的な”解”ではないだろう。当たり前のことだが、安全性、経済性、環境性等を総合的に考える必要があり、従来の思考に捕らわれることなく、新材料・新工法等を積極的に採用することがキーポイントになる。例えば、東北地方整備局では東日本大震災復興事業で、構造物の高品質化・高耐久化を実施している。これは、今までに経験したことのないほどの短期間集中のインフラ整備に対して、従来通りの思考に捕らわれていれば、将来の修繕・更新時期も集中することになる。震災復興で予算が確保できる今は良いが、将来の修繕・更新に予算が確保できる保証は全くない(どちらかといえば、予算は確保できないだろう)。まさに、将来を見据えた行動であり、サステナビリティに基づく決断と言える(当事者はサステナビリティという用語を意識して無いと思うが)。適切な材料・工法等を採用することが技術革新を推進し、その技術革新が、サステナブルなインフラ整備を実現させる(例えば、安全性を高め、コストと環境負荷を低減する)。高耐久材料であるFRPも、サステナブルなインフラ整備の実現に重要な役割を担っていることから、LCC評価から更に進んだサステナビリティ設計法の構築に向けて、建設用先端複合材技術協会には、具体的な検討を進めるとともに、第三者にも理解しやすい資料・事例を整備することを期待している。

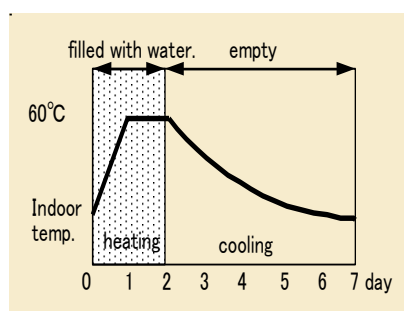
## FRP 緊張材を用いた PC はりの長期暴露試験(17年)の さらなる継続、および、学会発表

### 1. はじめに

当協会が行っている「FRP 緊張材を用いた PC はりの暴露試験」は、1999 年から始まった。きっかけは、当時東京大学生産技術研究所の魚本健人教授が示した「Durability of Aramid Fiber Reinforced Plastic Pretensioned Elements Tidal/Thermal Cycles by Professor Rajan Sen at the University of South Florida and else: ACI Structural Journal, V.96, No.1, January-February 1999」である。この論文には、海外製の FRP 緊張材を用いたプレテンションパイルにひび割れを生じさせ wet/dry と hot/cold の環境外力を週 2 回与えて 33 カ月間暴露した場合、ひび割れの進展と付着の劣化が生じ、その結果、曲げ耐力が半減したとしている。

当時日本ではすでに 150 件余りの FRP 緊張材や補強材を用いた実構造物が構築されており<sup>1)</sup>、また、大規模な沖ノ鳥島における FRP 材料の暴露試験<sup>2)</sup>が終了しており、FRP を用いたコンクリート構造物の耐久性が高いことが認められていた。日本製 FRP 緊張材を用いて、米国フロリダにおける試験を明確に否定する必要があった。

魚本研究室と当協会の計画した暴露試験は、wet/dry と hot/cold の環境外力を与える促進暴露試験(図-1)と、内陸部と海水の飛沫帯での自然暴露試験(図-2)の 2 シリーズである。促進暴露試験は 102 カ月間 300 サイクルの環境外力を与えたが、FRP 緊張材を用いたプレテンションはりに劣化は認められなかった<sup>3)4)</sup>。17 年間の自然暴露試験は、含有塩分量 や自然電位の調査、曲げ耐力の変化などを試験した。結果は FRP 緊張材の健全性が確認された<sup>5)6)7)8)9)10)</sup>。これらの一連の暴露試験の評価を通じて、日本製の FRP 緊張材の長期耐久性が明らかになった。



(環境外力のサイクル)



(促進槽)



図-2 飛沫帯での自然暴露(伊豆)

図-1 促進暴露試験の情況



## 2. 長期暴露試験の継続

自然暴露試験は、既存のPC鋼より線とFRP緊張材の比較も行っている。厳しい塩害環境に17年間暴露して、図-3に示すように塩化物イオンの含有量はPC鋼線のある3.5cmの位置で $5\text{kg/m}^3$ であるが、PC鋼より線に有害な錆は生じていない。また、両者の部材性能にも有意な差異は生じていない。そこで、国立研究法人土木研究所の協力を得て、同研究所の自然暴露場にさらなる自然暴露を開始した。飛沫帯環境としては日本海側の糸魚川でテトラポットの敷設されている堤防内(図-4)に、内陸部としては筑波の暴露場(図-5)に試験体を設置した。設置期間はさらに10年程度を想定している。

この研究がFRP緊張材の世界での実装に役立つことを願っている。

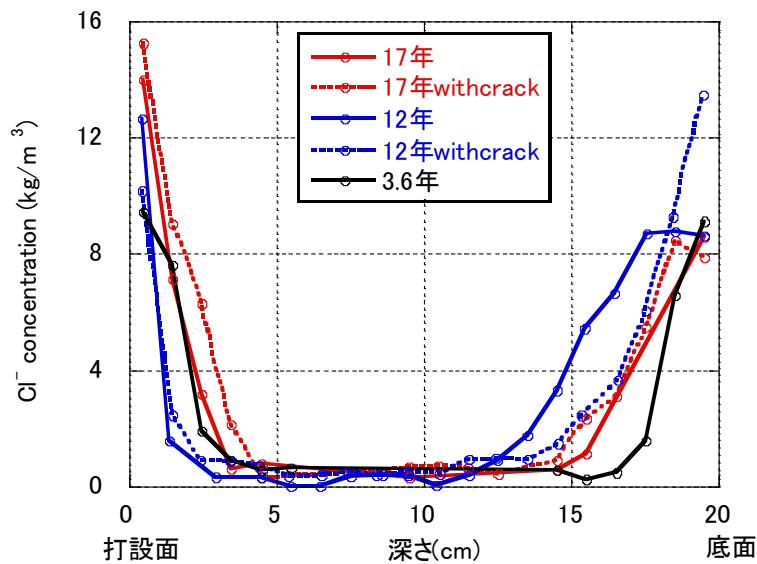


図-3 飛沫帯に暴露した試験体の塩化物イオンの分布



図-4 飛沫帯への試験体の設置状況



図-5 内陸部への試験体の設置状況

## 【参考文献】

- 1) ACC 建設用先端複合材技術協会:<http://acc-club.jp/10.html>
- 2) Fuminori TOMOSAWA, Teruyuki NAKATSUJI, Kozo KIMURA, Koji SAKA, Hiroyasu KAWAGUCHI: Evaluation of ACM reinforcement durability by exposure test, ASME, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE98-4361), 1998
- 3) 中井裕司, 渡部寛文, 西村次男, 魚本健人:連続繊維補強材を用いた PC はりの促進暴露試験;コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30.2, pp547-552, 2008.6
- 4) Hiroshi Nakai, Hirofumi Watanabe, Tsuyoshi Enomoto, Taketo Uomoto: Durability of Aramid and Carbon FRP PC Beams under Tidal and Thermal Accelerated Exposure; APFIS2012,Hokkaido University
- 5) 中井裕司, 酒井博士, 西村次男, 魚本健人:各種連続繊維補強材を用いた PC はりの暴露試験の中間報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.335-340, 2003.7
- 6) Hiroshi Nakai, Hiroshi Sakai, Tsugio Nishimura, Taketo Uomoto: Durability of aramid and carbon FRP PC beams under natural and accelerated exposure, FRPRCS-6, July 2003
- 7) 中井裕司, 渡部寛文, 榎本剛, 魚本健人:17 年間自然暴露した FRP 緊張材を用いたプレテンションはりの有効プレストレス;土木学会第 71 回年次学術講演会, V-510, 2016
- 8) 渡部寛文, 中井裕司, 志道昭郎, 魚本健人:17 年間自然暴露した FRP 緊張材を用いたプレテンションはりの曲げ破壊性状;土木学会第 71 回年次学術講演会, V-511, 2016
- 9) 染谷望, 加藤佳孝, 中井裕司, 渡部寛文:PC 鋼より線を用いた暴露はり試験体の電気化学的測定;土木学会第 71 回年次学術講演会, V-418, 2016
- 10) ACCトピックス Vol.27:[http://acc-club.jp/pdf/06\\_05\\_27.pdf](http://acc-club.jp/pdf/06_05_27.pdf)

## 高弾性リードラインを使用した張出床版上面補強事例 ＝落合第一歩道橋補強工事＝

継続実績より

# 564

本橋は東京都多摩市に位置する橋長 17.97m、有効幅員 5.0m の歩道橋です。建設当初は歩道橋としての使用でしたが、車両通行の可能性が発生したことから設計の見直しを行い、張出床版(桁端部のみ)の補強を行う事になりました。汎用的な炭素繊維シート工法と比べ経済性に優れ、工期も短縮できることから高弾性 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 HM8 φ で、150mm 間隔で配置され、CFRP ロッド総延長が 350m 程度となっております。



写真-1 落合第一歩道橋

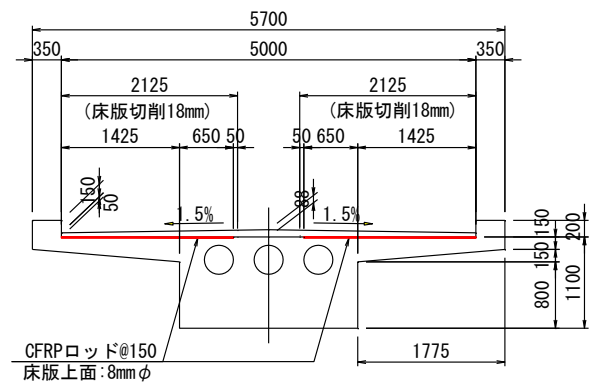


図-1 補強断面図



写真-2 施工状況(プライマー塗布)

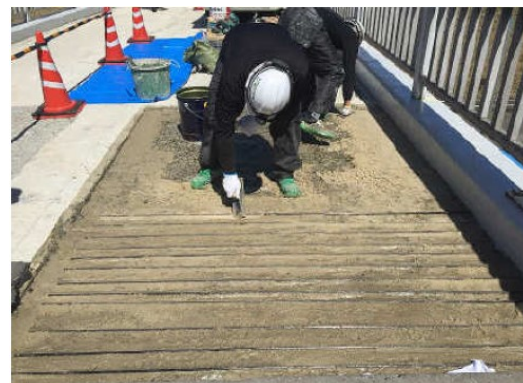


写真-3 施工状況(CFRP ロッド設置)



## アラミド(テクノーラ®)FRP 補強筋を用いた非磁性部材 ＝路面電车用トランスポンダの誤動作防止＝

継続実績より

568

トランスポンダは、2点間で情報の送受信を行う機器です。例えば、通信衛星・放送衛星に搭載し地上から電波を受信し地上に送り返すための中継器、航空交通管制用の自動応答装置、鉄道の自動列車停止装置 (ATS)などがあります。ここでは、福井電鉄の路面電車において列車番号や進路設定などの情報をやり取りするトランスポンダの設置に関わる工夫です。

地上側のトランスポンダは、鉄筋コンクリート製の軌道版の中にループコイルが埋設されていましたが、鉄筋への干渉のため不具合が生じていました。そこで、補強筋をアラミド FRP に変更することにより、トランスポンダの誤動作を防止することを目的としました。

設計条件は、等分布満載荷重( $q=10\text{kN/m}^2$ )が作用する支間 3.5m の 2 辺単純支持版を仮定しました。アラミド FRP 補強筋の許容ひずみは  $1000\mu$  とし、有害なひび割れが生じないように配慮しました。設計の結果、版厚 200mm、有効高さ 170mm で、 $4\times\text{AFRP } \phi 7.4$  を CTC=50mm で主筋としました。

施工は、一夜にて、掘削、AFRP 配筋、ジェットコンクリート打設を行い、無事施工を完了しました。施工後はトランスポンダの不具合は解消され、順調に供用されています。



写真-1 ジェットコンクリート打設状況

### アラミド FRP 補強材の特性値

呼称	: $\phi 7.4$
有効断面積	: $A_f=42.4\text{mm}^2$
保証強度	: $f_{tuk}=1800\text{N/mm}^2$
ヤング率	: $E_f=53\times 10^3\text{N/mm}^2$

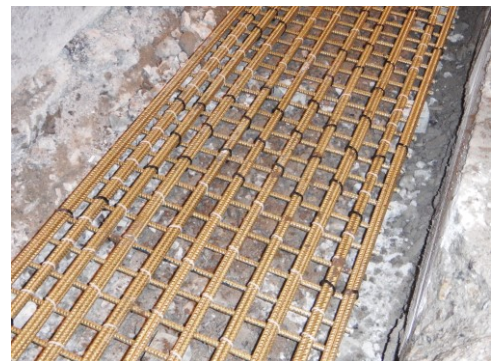


写真-2 配筋状況

## 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
563	沖縄総合事務局	恩納南BP4号橋 上部工(下り)工事	沖縄県	4本×2ヶ所×4径間 =32ヶ所 約1.0m×1.0m/ヶ所	沓座コンクリート補強筋	CFCC Uφ 5.0 L≒1.0m、 N=25本/ヶ所×4×8 ≒800m	2015年3月
564	多摩市役所	落合第1歩道橋外1橋 耐震補強等工事	東京都	橋長 17.97m 幅員 5.0m	RC床版上面補強	高弾性リトライン Hm8φ L=530m	2015年3月
565	山形市	平成27年度 橋梁長寿命化修繕事業 市道前田双月線双月橋 上部工床版補強工事	山形県	橋長 142m うち2径間(28m×2)	RC床版上面補強	高弾性リトライン Hm12φ L=500m	2015年9月
566	University of Miami	Innovation Bridge	米国 フロリダ州	径間 21.3m 幅員 2.2m	プレテンションPC緊張材	CFCC 1×7 15.2φ L=775m	2016年5月
567	東北地方整備局 福島河川国道事務所	広前橋外上部工工事	福島県	桁長 19.1m 桁高 1.008m 製作本数 6本 格子筋 12組	桁端面補強	CFCC Uφ 5.0 L=139.63m	2016年5月
568	福井鉄道株式会社	軌道版改良工事	福井県	トランスポンダ 1基	非磁性の補強材	テクノラ φ 7.4mm L=3.4m×44本 L=0.5m×69本	2016年10月
569	沖縄県宮古土木事務所	池間大橋補強工事(H27-1)	沖縄県	ひび割れ補修工1式 断面修復工1式 支承補修工1式 表面保護工1式 電気防食工1式 支承補強工1式 支承補強支保工1式 ダンパー設置工1式 吊足場工1式 運搬処理工1式	ダンパー設置工に於ける 調整モルタル部圧縮補強用 鉄筋代替品	CFCC Uφ 5.0 L=427m	2016年10月
570	新潟地域振興局 新潟港湾事務所	新潟港(東港区) 七国架道橋補修工事	新潟県	0.83m×0.53m 4箇所	沓座モルタル補強	CFCC 1×7 φ 7.5 L=10.88m	2016年11月
571	中部地方整備局 名古屋港湾事務所	平成28年度 名古屋港飛鳥ふ頭岸壁 舗装補修工事	愛知県	舗装面積 67.5m <sup>2</sup> 舗装厚 0.35m 敷設面積 14.8m×4.3m	鉄網代用品	CFCC Uφ 5.0 L=982.3m	2016年12月
572	岩手県盛岡広域振興局	田面野木地すべり防止工事	岩手県	HM-5 アンカー長 21.60m~42.75m	グラウトアンカー	CFCC 1×7 φ 12.5 L=374.35m (グラウトアンカー 12本)	2016年12月 ~2017年1月
573	東北地方整備局 山形河川国道事務所	藤泉橋上部工工事	山形県	橋長 20.3m 幅員 20.2m 桁高 1.125m	ECFストラット使用に伴う プレテンション桁端面ひび割れ 抑制	CFCC Uφ 5.0 L=0.278m×560本 L=1.037m×168本	2017年1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