

熱可塑性FRP緊張材の耐アルカリ性能の評価 および長期耐久性能の予測

川島陽子・櫻庭浩樹・西崎 到

1. はじめに

連続繊維補強材である繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic, FRP)は高強度、高耐食性、軽量などの特徴を有しており、プレストレスコンクリート(PC)構造物の緊張材として利用されてきた。1996年には「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)」が発刊され、熱硬化性樹脂を用いたFRP材料を土木分野に普及するための指針などが整備された。軽量さや耐塩害性を期待した適用例は増えつつある¹⁾がさらなる普及のためには、加工性やコスト等の改良や適切な性能評価が必要と考えられる。近年、加工性や生産性の向上が期待される熱可塑性樹脂を用いたFRPが注目されている。これは、従来の熱硬化性FRPと比べて、製造の効率を大幅に向上させて、コストの問題を解決できる可能性がある。

土木研究所では、文部科学省・科学技術振興機構によるCOI(Center of Innovation)プログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築」(研究代表：金沢工業大学)に参加し²⁾、PC構造物の緊張材として熱可塑性FRPの適用性を検討するため、コンクリートに埋設して使用することを想定した各種物性試験を実施している。本報では、強アルカリ性であるコンクリート内での耐久性を評価するために、熱可塑性FRP緊張材の耐アルカリ性能やそれに基づく長期耐久性評価について述べる。

2. 熱可塑性FRPの特徴

熱可塑性FRPは、加工性に優れた熱可塑性樹脂と強化繊維を組み合わせたものであり、加熱軟化による再加工が可能である。この特長を利用すれば、例えば長尺の部材を巻いた状態で搬入して、現場で加熱軟化して使用することが可能となるため、部材の輸送コストの低減や現場加工による施工性の向上も期待できる²⁾。

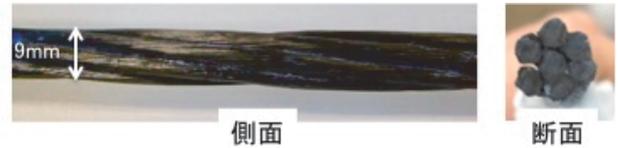


図-1 CFRTPの外観

表-1 樹脂と炭素繊維の物性

項目	数値
樹脂の引張強度	59 MPa
樹脂の曲げ弾性係数	2.8 GPa
炭素繊維の引張強度	4900 MPa(公称値)
炭素繊維の引張弾性係数	230 GPa(公称値)

本研究で使用した熱可塑性FRPは炭素繊維と熱可塑性樹脂より成るCFRTP(Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics)というものである。本研究では、緊張材としての利用を想定しており、熱可塑性のエポキシ樹脂と炭素繊維から成る素線を7本撚りにしたものをを用いた。その外観は図-1に示す通りであり、CFRTPの直径は9mm、有効断面積は49.0mm²である。また、樹脂と炭素繊維の物性は表-1の通りである。

3. 耐アルカリ性の評価

3.1 試験方法

3.1.1 耐アルカリ試験

本耐アルカリ試験は、CFRTP緊張材をコンクリートの細孔溶液を模したアルカリ水溶液中に浸漬して実施した。アルカリ水溶液は、JIS A 1193に準拠し、1Lあたり水酸化カルシウムを2g、水酸化ナトリウムを10g、水酸化カリウムを14g含有する溶液とした。調整したアルカリ水溶液は14.6℃でpH13.7であった。これは、コンクリート中の細孔溶液を模したアルカリ水溶液の標準pH12.8より高いが、耐アルカリ性を比較的短期間で判断するため、促進的条件とし行った。浸漬は、60℃の恒温槽で30日間とした。なお、CFRTPは、全長1300mmに切り出して浸漬した。

3.1.2 引張試験

アルカリ水溶液への浸漬によるCFRTP供試体の引張特性の変化を調べるため、浸漬試験後の供試体の引張試験を実施した。試験方法はJSCE-E 531-2010に準拠した。CFRTP供試体の両端に長さ400mmの定着具を取り付けて試験区間500mmとした。また、供試体の伸びおよびひずみを得るため、試験区間中央部において、標点距離300mmとして標点間の変位を測定した。



図-2 アルカリ浸漬した供試体の引張試験後の様子

3.1.3 断面観察および面分析

アルカリ浸漬による内部の変状を確認するため、CFRTPの素線1本の断面を対象に、走査型電子顕微鏡(SEM)による表面観察および電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)による面分析を行った。面分析とは、ある一定範囲内における元素分布を計測することである。

表-2 引張試験の結果

	浸漬無し	浸漬有り
引張耐力(kN)	109 (2.0%)	98.5 (2.0%)
引張弾性係数(GPa)	112 (4.2%)	111 (10.9%)

*()内の値は変動係数

3.2 試験結果と考察

3.2.1 アルカリ浸漬による引張強度の変化

30日間アルカリ浸漬後の供試体において、外観ではひび割れ等の変状は見られなかった。また、引張試験後の試験体の様子を図-2に示す。5本の供試体のうち、素線すべてが破断したものや数本のみ破断したのものが、破壊状態にばらつきが見られることが分かった。

引張試験の結果を表-2に示す。引張耐力の平均値は109kN、引張弾性係数の平均値は112GPaであった。また、アルカリ浸漬有りの供試体については、引張耐力の平均値は98.5kN、引張弾性係数の平均値は111GPaであった。浸漬後の引張耐力の平均値をアルカリ浸漬前の引張耐力の平均値で除した最大荷重保持率は、0.90となった。これは、「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」で示されている熱硬化性CFRP緊張材の最大荷重保持率(0.93)と同程度の最大荷重保持率であったと言える。そのため、CFRTPは熱硬化性CFRPと同等の耐アルカリ性能を有していることが示された。

3.2.2 内部構造の変化

EPMAによる面分析と電子顕微鏡による素線断面の観察結果を図-3および図-4に示す。アルカリ浸漬をしていない場合、電子顕微鏡により35倍で観察した場合、製造時に生じる空隙を除いて目立った変状は確認されなかった。また、EPMAによる面分析の結果では、カリウム(K)元素はほと

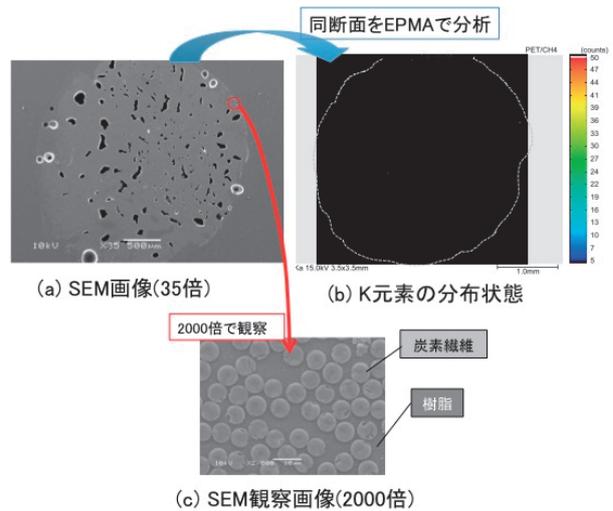


図-3 EPMAおよびSEM観察(アルカリ浸漬無)

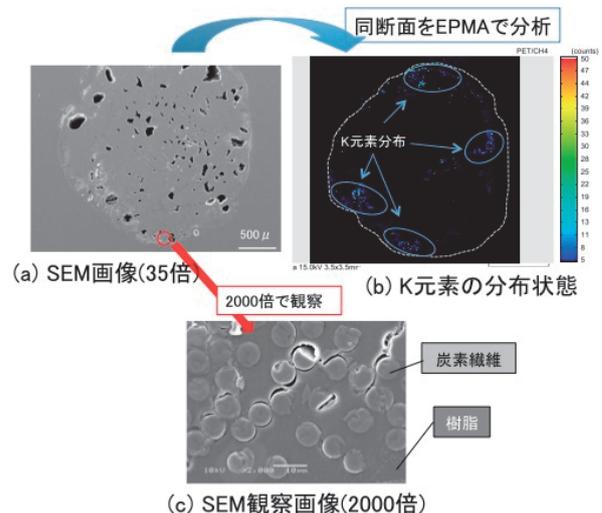


図-4 EPMAおよびSEM観察(アルカリ浸漬有)

んど検出されなかった。一方、アルカリ浸漬した場合には、CFRTP素線の表層近傍でカリウム元素が検出され、その部分をSEMで2000倍に拡大して観察したところ、炭素繊維と樹脂の界面の微細な割れが確認された。アルカリ水溶液への浸漬なしの場合ではこのような変状が確認されなかったことから、カリウム元素などのアルカリ作用によって劣化したものと考えられる。このような微細な変状が、アルカリ浸漬による引張強度の低下の要因となったことが示唆された。

4. 長期耐アルカリ性能の予測

4.1 概要

FRP 材料を土木構造物に適用する場合、様々な環境下で長期間供用することを想定し、例えば実環境での暴露試験による長期耐久性が報告されている³⁾。本研究で対象としている CFRTP は、PC 構造物への適用を想定しているため、長期間コンクリートに埋設した場合の長期耐久性評価が必要と考えられる。既往研究⁴⁾において、熱硬化性 CFRP 緊張材について、温度を変えた耐アルカリ試験を行い、アレニウス法による長期耐久性評価手法について報告されている。アレニウス法とは、化学反応の速度定数の温度変化に関する式であるアレニウスの式に基づく方法である。実験的には、実際の使用温度より高めの温度において促進劣化試験を行い、各温度において、例えば強度が 1/2 になる時間を調べ、絶対温度の逆数と所定の強度を保持する期間との相関から、実際の使用温度における材料の耐用年数を予測するものである。本研究でも、既往研究⁴⁾と同様の手法により、CFRTP 緊張材の長期的な耐アルカリ性能予測モデルの構築を試みたので紹介する。

4.2 アルカリ浸漬試験

長期間の耐アルカリ浸漬用の水溶液は、既往研究⁴⁾と比較するため、1L あたり水酸化カルシウムを 2g、水酸化ナトリウムを 0.9g、水酸化カリウムを 4.2g 含有するものとした。また、浸漬は 20、40 および 60℃の恒温槽で実施した。それぞれの温度において、調整したアルカリ水溶液の開始時の pH は 12.7~12.8 であり、コンクリート中の細孔溶液を模したアルカリ水溶液と同程度とした。

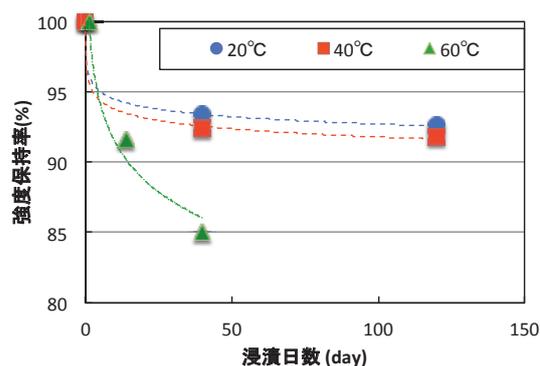


図-5 長期アルカリ浸漬後の強度保持率

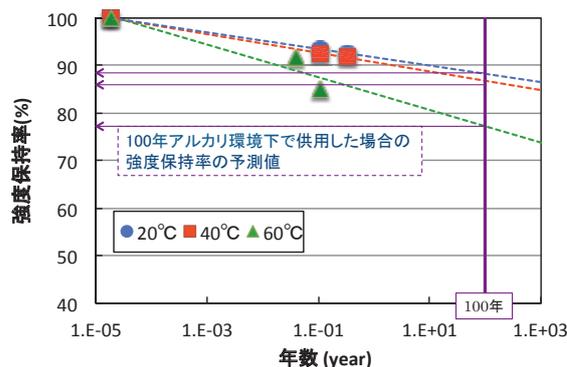


図-6 強度保持率の予測

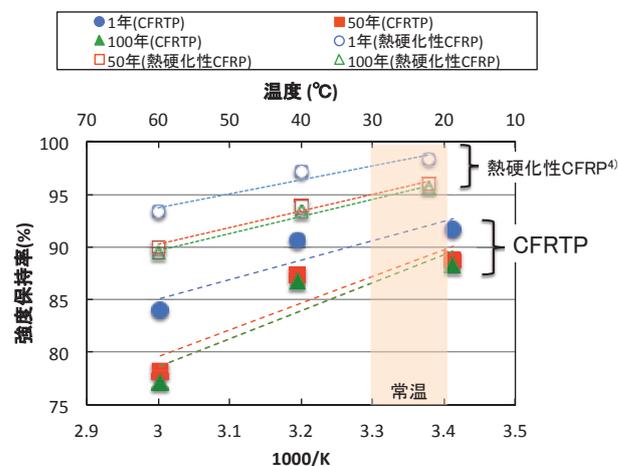


図-7 長期間浸漬後のCFRTPの耐アルカリ性予測

4.3 結果

各温度条件下でアルカリ浸漬した CFRTP 供試体(6 体)に対して、引張試験によって強度を測定し、平均値を算出した。強度の変化を表すために、アルカリ浸漬後の強度を浸漬していない状態の供試体の強度で除して、強度保持率を算出した。強度保持率の結果を図-5 に示す。20℃や 40℃の養生温度であっても、アルカリ浸漬したことで初期値よりも 7%程度強度の低下が見られた。また、60℃の場合では、強度保持率の変化が著しく、同じ養生期間でも強度保持率が他の温度よりも低

下していた。

現時点での結果に対して近似線を引き、強度保持率の経時変化を予測した(図-5 点線)。なお、初期値の浸漬年数は便宜上、引張試験時の载荷相当時間から算出した。この近似線に基づき、アルカリ環境下で所定の期間浸漬した場合の、強度保持率を算出した(図-6)。図-6の近似線から算出した1年、50年、100年アルカリ浸漬後の強度保持率と絶対温度の関係を図-7に示す。既往研究⁴⁾の熱硬化性CFRPの結果と比較すると、CFRTPの強度保持率の方が低い傾向にあるが、20~30℃程度の常温下では、100年間の浸漬を想定した場合でも強度保持率は85%以上あり、十分な耐久性が見込まれると考えられた。ただし、今回の結果は比較的短期間のアルカリ浸漬(最大120日間)での結果によるものなので、今後さらに浸漬期間を伸ばし、長期間のアルカリ環境下での耐久性評価の精度向上を目指す。

5. まとめ

本研究は熱可塑性FRP材料の耐アルカリ性能の評価および、耐アルカリ性能に基づき長期耐久性の予測を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) アルカリ浸漬後のCFRTPの最大荷重保持率は0.9であり、既往の熱硬化性CFRPと同程度であった。
- 2) アルカリ浸漬による顕著な変状は見られなかったが、電子顕微鏡による断面観察の結果、炭素繊維と樹脂の界面に微細な割れが生じていることがわかった。
- 3) 長期的な耐久性を評価するためにアレニウス法による耐アルカリ性能予測を実施したところ、常温条件では十分な耐久性が得られる可

能性が示唆された。

熱可塑性FRP緊張材はPC構造物への緊張材としてプレテンション方式での検討を進めており、本報告で示した耐アルカリ性能の他に、従来材料であるPC鋼線と比較した付着性などの物性も別途検討している^{5,6)}。また、PC構造物への適用を想定した試験や部材としての耐久性評価についても検証している。今後、これらの成果をまとめて物性を整理し、CFRTPの適用拡大によるPC構造物の耐食性技術の向上を目指す。

なお、本研究は、文部科学省・科学技術振興機構によるCOIプログラム「革新材料による次世代インフラシステムの構築～安全・安心で地球と共存できる数世紀社会の実現～」により進められたものである。

参考文献

- 1) 建設用先端複合技術協会HP、<http://acc-club.jp>
- 2) 鶴沢潔、斎藤義弘、保倉篤：土木・建築分野への複合材料利用・先進材料と革新製造技術による新たな取り組み、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.73、No.5、II_1~II-9、2017
- 3) Sasaki,I., Nishizaki, I. : Tensile Load Relaxation of Frp Cable System During Long-Term Exposure Tests, Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE-6),2012
- 4) Benmokrane, Ahmed H. Ali, Hamdy M Mohamed, Mathieu Robert and Adel EISafty.: Durability Performance and Service Life of CFCC Tendons Exposed to Elevated Temperature and Alkaline Environment, J. Compos. Constr.、10.1061/ (ASCE)CC. 1943-5614.00000606.、04015043-1-04015043-13、2015
- 5) 櫻庭浩樹、川島陽子、西崎到：CFRTP緊張材の付着、引張および耐アルカリ試験、第13回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、2019
- 6) 櫻庭浩樹、川島陽子、西崎到：PC部材の曲げ上げ部を模擬したCFRTP緊張材の引張試験、第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム、2018

川島陽子



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 主任研究員、博士(農学)
Dr.KAWASHIMA Yoko

櫻庭浩樹



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ 主任研究員、博士(工学)
Dr. SAKURABA Hiroki

西崎 到



土木研究所先端材料資源研究センター材料資源研究グループ長、博士(工学)
Dr. NISHIZAKI Itaru