

# 塩分環境下で暴露したコンクリート梁の電気化学的測定および曲げ耐荷力に関するFRTPロッドと鉄筋の比較

保倉 篤<sup>1</sup>・宮里 心一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 金沢工業大学 革新複合材料研究開発センター (〒924-0838 石川県白山市八東穂2-2)

E-mail: hokura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 金沢工業大学教授 工学部環境土木工学科 (〒924-0838 石川県白山市八東穂3-1)

E-mail: miyazato@neptune.kanazawa-it.ac.jp

過酷な塩害環境下では、鉄筋の代替品としてFRPロッドが適用される場合がある。しかしながら、コンクリート中に埋設されたCFRTPの劣化に対する非破壊モニタリングに着目した事例はない。また、塩分環境下に暴露後の曲げ耐力を検証した事例もない。そこで本研究では、鉄筋およびCFRTPを補強筋として、電気化学的測定、曲げ載荷試験および補強筋の外観観察を行った。その結果、1)鉄筋と同様にCFRTPに対しても、交流インピーダンス法により電気化学的測定ができ、分極抵抗が小さい程、自然電位は低くなった。2)塩分環境下に暴露後の曲げ耐力は、暴露前の初期値と比較して、鉄筋では低下し、一方CFRTPでは低下しなかった。3)鉄筋では、ひび割れ部への塩分浸透に伴う局部腐食や、内在塩分による全面腐食が生じたが、同環境下に暴露されたCFRTPでは腐食は生じなかった。

**Key Words:** CFRTP, rebar, chloride environment, electrochemical measurement, bending load test

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートは耐久性が高く、これまで多くの社会基盤に利用されている。しかしながら、沿岸部や凍結防止剤が多量に散布される地域においては、過酷な塩害環境下におかれるため、鋼材に腐食が生じることにより、性能が早期に低下する。ここで、鋼材の腐食速度や腐食状況を判断する方法として、電気化学的測定がある。

また、鋼材の腐食を防止するため、代替品として高耐食性を有するFRPロッドが適用される場合がある。ここで、一般的に使用されている熱硬化性FRP(Fiber Reinforced Thermosetting Plastics, 以下FRTSと称す)を対象に、多くの取り組みがなされてきた。例えば、建設用先端複合材技術協会(旧ACC倶楽部)から、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計・施工マニュアル(案)(6訂版)」が制定された。また、土木学会の連続繊維補強材研究小委員会から、「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)」が制定された。しかしながら、従来のFRTSでは高いコストが弊害になり、普及には至っていない。そこで、FRTSと比較して熱可塑性FRP(Fiber Reinforced Thermoplastics, 以下FRTPと称す)では、製造工程が少なく、成形速度が速いため、

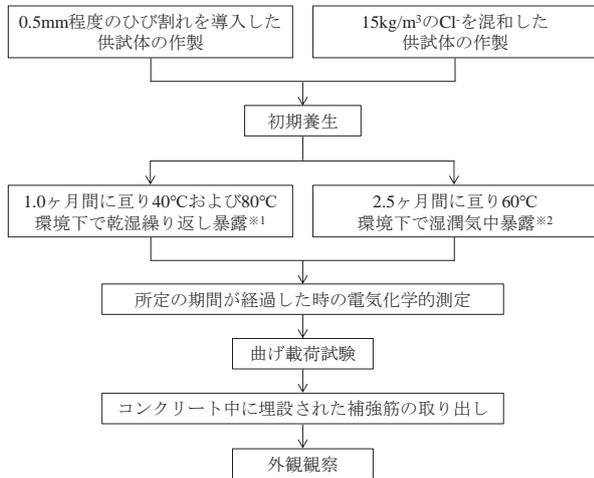
大量に製造することが可能である。これにより、コストの低減が期待できる。そこで著者らは、FRTPを土木分野への適用に向けて取り組んでいる<sup>2)</sup>。しかしながら、これまでFRTPを埋設したコンクリートに着目した研究は少ない<sup>3)</sup>。特に、FRTPの耐食性は高いと言われているが、コンクリートに埋設した部材を塩分環境下に暴露した後の耐力を実験的に検証した事例はない。また、FRTPを補強筋に適用した時の維持管理方法も検討すべき課題である。ここで、富山らの研究では<sup>4)</sup>、加水分解を含めて腐食性環境下において化学的に劣化することを「FRPの腐食劣化」と定義して、電気抵抗をモニタリングにより評価している。しかしながら、腐食劣化の評価はFRTSのみを対象としている。したがって、コンクリートに埋設されたFRTPの腐食劣化の状況を評価する基礎研究は皆無である。

以上の背景を踏まえて本研究では、鉄筋あるいはFRTPを補強筋としたコンクリートを、塩分環境下に暴露し、電気化学的測定の試行と、実際に塩分がコンクリート中に浸透した供試体を用いた曲げ破壊荷重を評価した。すなわち、図-1に示す実験フローのとおり、はじめに0.5mm程度のひび割れを導入させたケースと、コンク

表-1 使用材料の物性

補強筋種類	材質	直径 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 <sup>※3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 <sup>※3</sup> (kN/mm <sup>2</sup> )	熱膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	外観
鉄筋	D6-SD295A	6.4	31.7	501.6	199.0	0.5	
CFRTP	炭素繊維/熱可塑性エポキシ樹脂	6.9	29.1	1648.4	116.4	10.0	

※3:実測値を記載



※1:NaCl3.0%の浸漬56時間，相対湿度90%相当の乾燥112時間を1サイクル  
 ※2:相対湿度90%相当

図-1 実験フロー

リート中に塩分を混和したケースの供試体を2種類作製した。所定の暴露に供した後，電気化学的な測定により劣化状況を非破壊で評価した。その後，荷重試験により荷重-変位の関係を測定し，力学性能を評価した。さらに，コンクリート中に埋設された補強筋を取り出し，外観観察を行った。

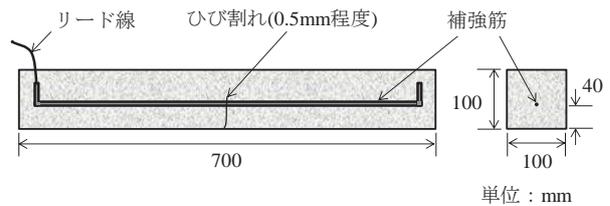
## 2. 実験手順

### (1) 供試体概要

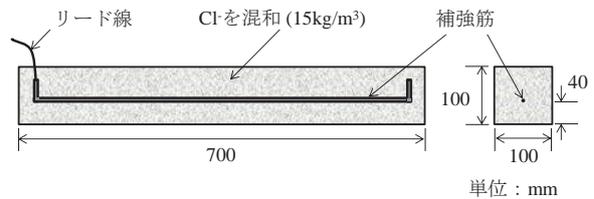
使用材料の物性を表-1に，コンクリートの配合を表-2に，供試体概要を図-2に示す。補強筋は鉄筋およびCFRTPの2種類を用いた。セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。また，100×100×700mmのコンクリート供試体に，補強筋を1本のみ埋設した。補強筋端部にはリード線をはんだ付けし，エポキシ樹脂で被覆した。なお，供試体は乾湿繰り返し暴露用および湿潤気中暴露用の2種類を作製した。ここで，乾湿繰り返し暴露用供試体では，局所的に塩分浸透させるため，供試体中心部に幅0.5mm程度のひび割れを設けた。一方，湿潤気中暴露用供試体では，全面的に塩分を含有させるため，混練水にNaClを溶かし，15kg/m<sup>3</sup>のCl<sup>-</sup>をコンクリート中に混和した。

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
55.0	44.8	175	318	788	970



a) 乾湿繰り返し暴露用供試体



b) 湿潤気中暴露用供試体

図-2 供試体概要

表-3 暴露温度と暴露期間の組合せ

暴露期間 (ヶ月)	暴露温度(°C)		
	40	60	80
1.0	○	—	○
2.5	—	●	—

○:乾湿繰り返し暴露，●:湿潤気中暴露 (相対湿度 90%)

### (2) 暴露方法

暴露温度と暴露期間を表-3に示す。すなわち，コンクリートの打込みから24時間後に脱型し，材齢14日目までの初期養生後，アレニウス則により腐食反応が促進されることを期待して，40°C，60°Cおよび80°Cの高温環境下に暴露した。ここで，乾湿繰り返しは，56時間に亘るNaCl3%水溶液への浸漬と，112時間に亘る湿潤気中(相対湿度90%相当)での静置を1サイクルとした。

### (3) 電気化学的測定方法

所定の期間が経過後，20°Cの乾燥環境下(相対湿度60%)で電気化学的測定を行った。すなわち，分極抵抗は，供試体底面の中心部に長さ5cmの対極板(ステンレス)を設置し，交流インピーダンス法を適用した。周波数は，10000Hzから0.0005Hzまでの範囲内において，

図あるいはコールコールプロットを描き、分極抵抗を算出した。また、自然電位は、供試体底面に参照電極（銀/塩化銀電極）を当てて測定した。なお、表-4および表-5の判定基準は、鉄筋コンクリートを対象にしたものであり、CFRTPの評価には適用できない。したがって本研究では、CFRTPを補強筋とした場合に対する腐食劣化の傾向を判断しないが、将来的には同様な判断基準の構築が望まれる。また、コンクリートに埋設されていないCFRTP単体に対しても、分極抵抗を測定し、参考値とした。

#### (4) 曲げ載荷試験方法

図-3に曲げ載荷試験の概要を示す。20°Cの乾燥環境下において、支点間隔 600mm、載荷点間隔 150mm で4点曲げ載荷により試験を行った。また、変位計は供試体中央部に設置した。ここで、破壊性状を理論計算により推測すると、鉄筋を補強筋とした場合は曲げ破壊が、CFRTPを補強筋とした場合はせん断破壊が先行する。これは、引張強度により影響される。したがって、補強筋の種類に拘わらず、曲げ破壊に統一されるように、CFRTPを補強筋として用いた供試体のみ、載荷点と支点の間の両側面に繊維シートで補強した。ここで、繊維シートは補強効果が大きく、じん性の小さい炭素繊維を用いた。なおプライマーの塗布後、熱硬化性エポキシ樹脂を用いて繊維シートを貼付けた。曲げ載荷試験後、供試体を解体して、補強筋の外観観察を行った。

### 3. 実験結果

#### (1) 電気化学的測定

図-4にボード線図およびコールコールプロットの線描例を示す。ここでは、コンクリート中のCFRTPに対する交流インピーダンス法の適用は初めての取組のため、全てのケースの描写例を示す。これによれば、炭素繊維

が可能であったと判断できる。

次に、図-5に分極抵抗と暴露温度の関係を示す。これによれば、鉄筋を用いた乾湿繰り返し暴露用供試体では、40°Cと比較して80°Cで暴露した方が、分極抵抗は小さくなることが認められる。一方、CFRTPを用いた乾湿繰り返し暴露用供試体では、40°Cと比較して80°Cで暴露した方が、分極抵抗は小さくなることが認められる。ま

表-4 CEBによる腐食速度の判定基準

腐食速度の判定	分極抵抗測定値 (kΩ・cm <sup>2</sup> )
不動態状態（腐食なし）	130～260より大
低～中程度の腐食速度	52～130
中～高程度の腐食速度	26～52
激しい、高い腐食速度	26未満

表-5 ASTM C876による腐食判定基準

腐食の確率	自然電位 (mV vs Ag/AgCl)
90%以上腐食なし	-80より貴
不確定	-80～-230
90%以上腐食あり	-230より卑

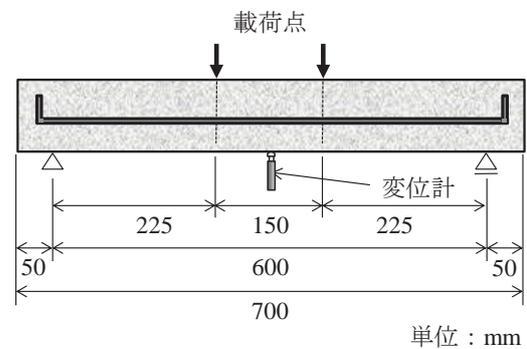
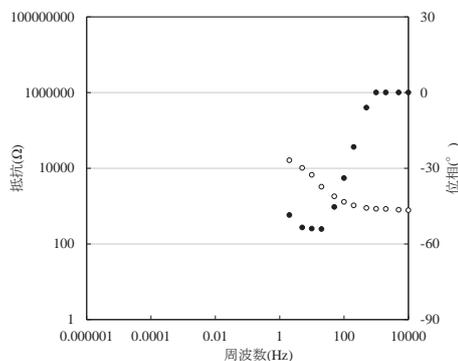
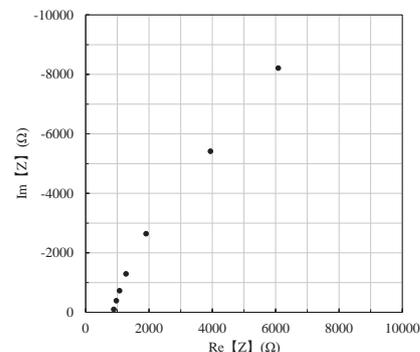


図-3 曲げ載荷試験概要

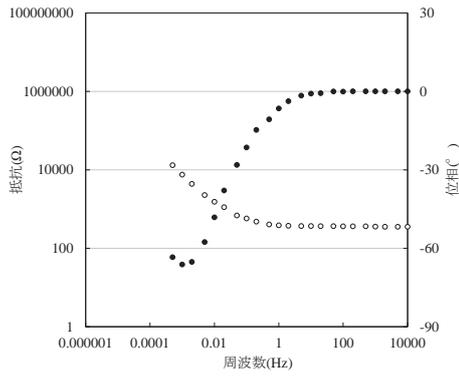


a) ボード線図 (CFRTP-単体)

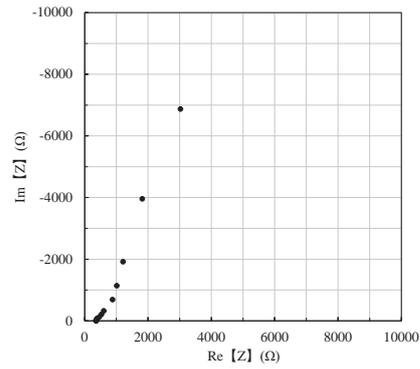


b) コールコールプロット (CFRTP-単体)

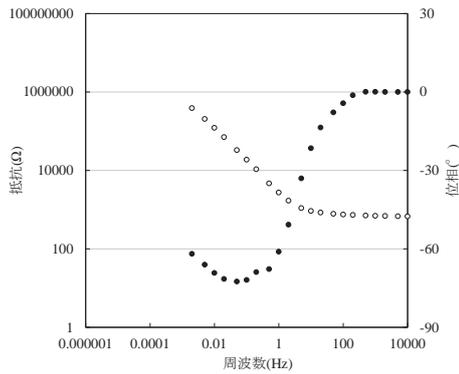
図-4 分極抵抗の測定例 (その1)



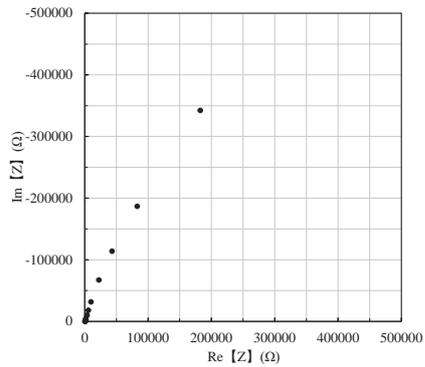
c) ボード線図 (鉄筋-暴露 1.0ヶ月-40°C)



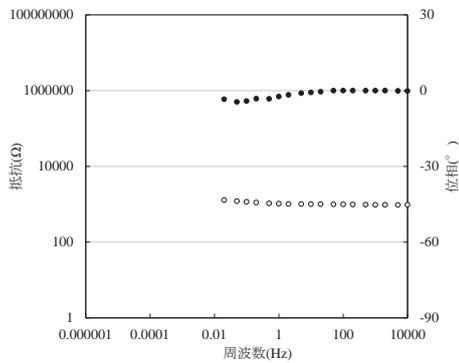
d) コールコールプロット (鉄筋-暴露 1.0ヶ月-40°C)



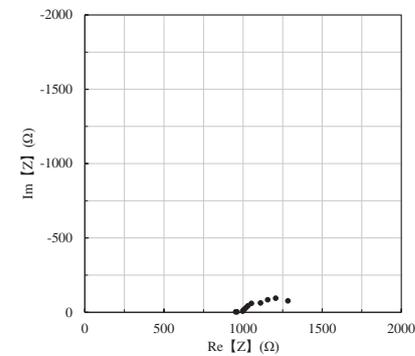
e) ボード線図 (CFRTP-暴露 1.0ヶ月-40°C)



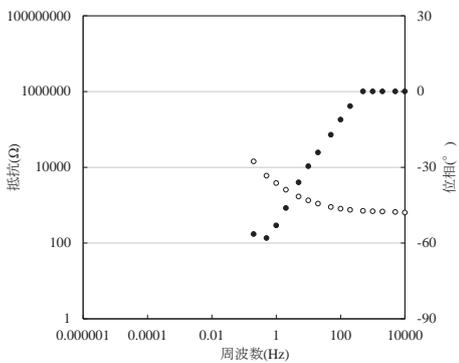
f) コールコールプロット (CFRTP-暴露 1.0ヶ月-40°C)



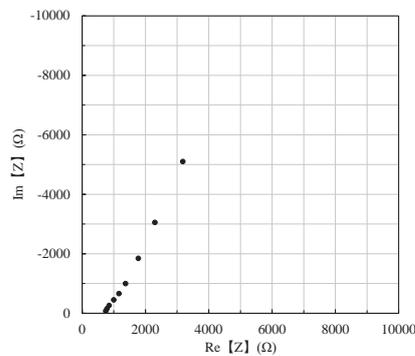
g) ボード線図 (鉄筋-暴露 2.5ヶ月-60°C)



h) コールコールプロット (鉄筋-暴露 2.5ヶ月-60°C)

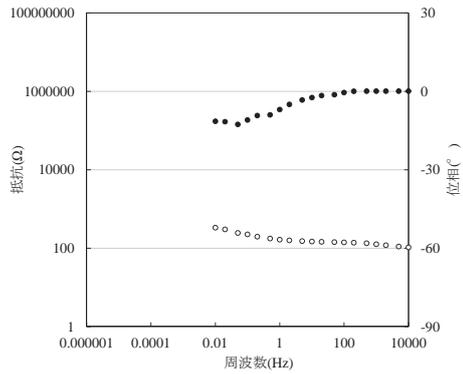


i) ボード線図 (CFRTP-暴露 2.5ヶ月-60°C)

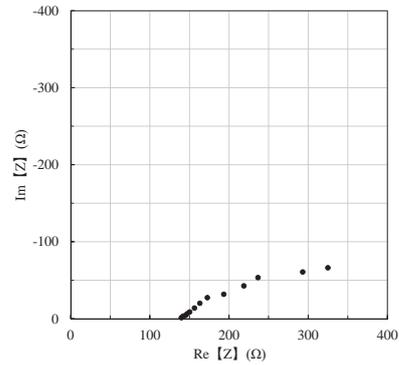


j) コールコールプロット (CFRTP-暴露 2.5ヶ月-60°C)

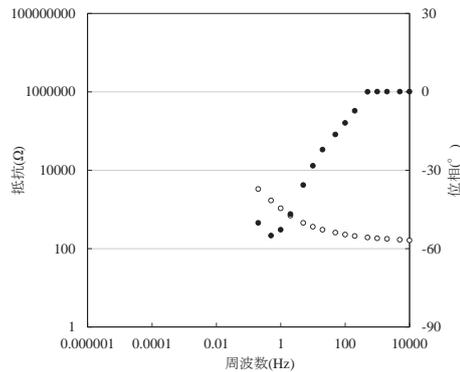
図4 分極抵抗の測定例 (その2)



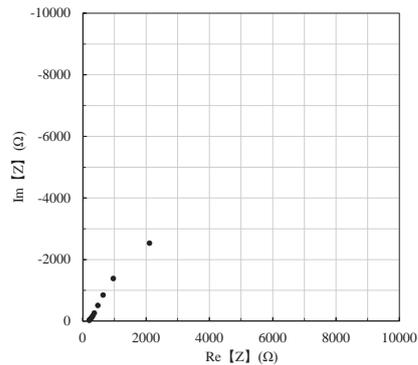
k) ボード線図 (鉄筋-暴露 1.0ヶ月-80°C)



l) コールコールプロット (鉄筋-暴露 1.0ヶ月-80°C)



m) ボード線図 (CFRTP-暴露 1.0ヶ月-80°C)



n) コールコールプロット (CFRTP-暴露 1.0ヶ月-80°C)

図4 分極抵抗の測定例 (その3)

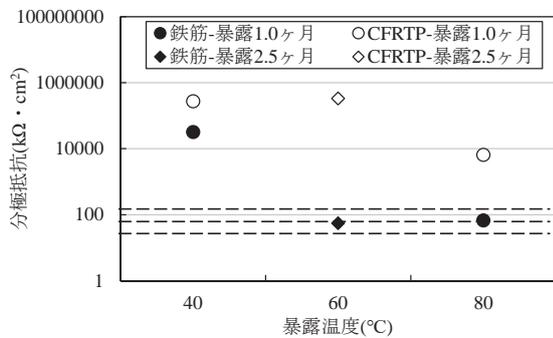


図5 分極抵抗と暴露温度の関係

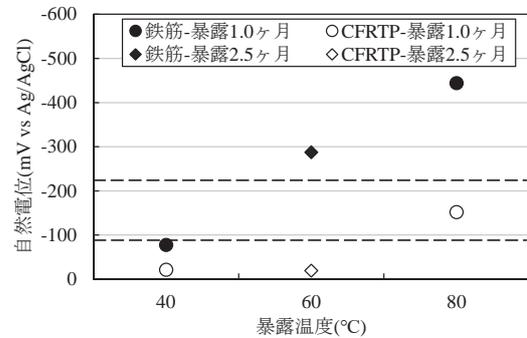


図6 自然電位と暴露温度の関係

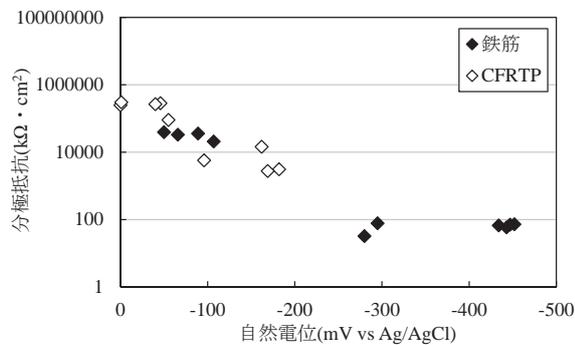


図7 分極抵抗と自然電位の関係

た、図-6 に自然電位と暴露温度の関係を示す。これによれば、分極抵抗と暴露温度の関係と同様に、乾湿繰り返し暴露用供試体においては、40°Cと比較して80°Cで暴露した方が、自然電位は低く、腐食は進行していることが認められる。また、図-7 に分極抵抗と自然電位の関係を示す。これによれば、分極抵抗が低くなる程、自然電位は卑の傾向になることが認められる。

以上の結果を踏まえると、ボード線図およびコールコールプロットの測定結果から、CFRTPを補強筋とした場合でも腐食劣化の傾向を判断できる可能性が示唆された。CFRTPの劣化を電気化学的に測定し評価する試みは少なく<sup>5) 6)</sup>、精緻なメカニズムは解明されていない

が、加水分解に伴う非導電性の低下により分極抵抗が小さくなり、またマイナスイオンの増加により自然電位が低くなった可能性が考えられる。ただし、本研究では暴露期間が短く、供試体数が少ない。したがって、腐食劣化に対する電気化学的測定を確立するためには、継続的にモニタリングを行う必要がある。

## (2) 曲げ載荷試験

図-8に鉄筋を補強筋とした荷重と支間中央変位の関係を、図-9にCFRTPを補強筋とした荷重と支間中央変位の関係を示す。これらによれば、鉄筋を用いた供試体と比較して、CFRTPを用いた供試体の方が、立ち上がりの勾配は緩やかなことが認められる。これは、表-1に示すとおり、鉄筋と比較してCFRTPの方が弾性係数は低いいためと考えられる。また、CFRTPを用いた供試体では、曲げ載荷時において、一時的に荷重が低下することが認められる。これは、文献7によれば、補強筋の表面形状が複雑な程、コンクリートとの付着強度は大きくなることが報告されている。また、文献8によれば、CFRTPの表面をガラス繊維で被覆加工することにより、コンクリートとの付着性は向上することが報告されている。さらに、文献3によれば、表面をガラス繊維で被覆加工したCFRTPを用い、コンクリートに埋設して曲げ載荷試験した結果、一時的な荷重の低下は生じていない。本研究では、コンクリートの高アルカリによりガラス繊維が劣化することを懸念して、被覆加工を施していないCFRTPを補強筋として用いた。これにより、CFRTPの表面に凹凸が少なくなり、曲げひび割れ発生時において、コンクリートとの付着切れが生じ、荷重が低下したと考えられる。今後は、耐アルカリ性を有する材料を表面に被覆加工したCFRTPが必要と考えられる。

次に、最大荷重を図-10に示す。これによれば、鉄筋を用いた供試体と比較して、CFRTPを用いた供試体の方が、最大荷重は大きいことが認められる。これは、表-1に示すとおり、鉄筋と比較してCFRTPの方が、引張強度と断面積の積により算定される引張耐力が高いためと考えられる。また、乾湿繰り返し暴露用供試体では、40℃と比較して80℃の方が、最大荷重は低下することが認められた。これは、図-5および図-6に示すとおり、暴露温度に比例して、分極抵抗は小さく、また自然電位は低く、鉄筋が腐食したためと考えられる。一方、CFRTPを用いた乾湿繰り返し暴露用供試体では、初期値と比較して、80℃に暴露したケースのみで最大荷重は低下することが認められた。ここで、熱可塑性樹脂は、ガラス転移温度を超えると軟化する性質を持つ。したがって、コンクリート内部が高温環境下になったため、CFRTPの熱可塑性エポキシ樹脂の一部は軟化したと考えられる。加えて、熱膨張係数を踏まえて考察する。ここで、コン

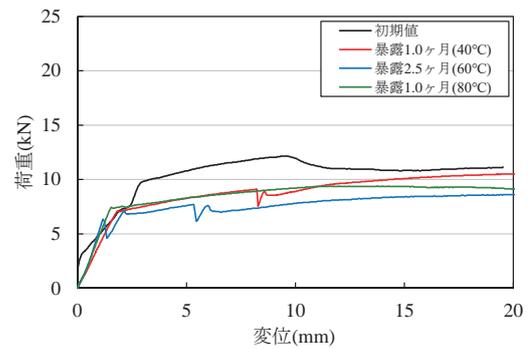


図-8 荷重と支間中央変位の関係（鉄筋）

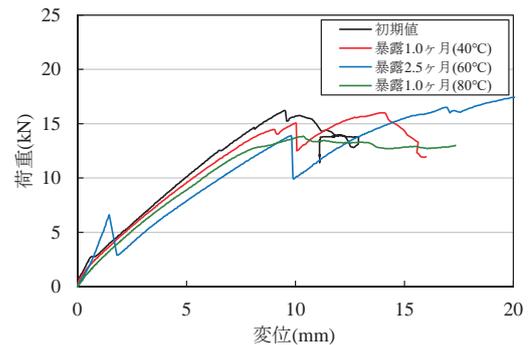


図-9 荷重と支間中央変位の関係(CFRTP)

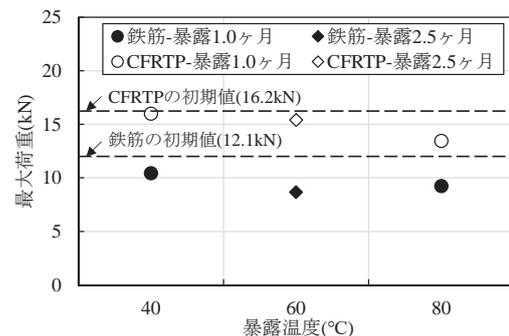


図-10 最大荷重

クリートの熱膨張係数は  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  と仮定する<sup>9)</sup>。また、鉄筋およびCFRTPの熱膨張係数は表-1に示すとおり、 $10.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  および  $0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  である。したがって、コンクリートとFRPロッドの熱膨張係数の差は大きいため、付着力を低下させたと考えられる。なお、いずれの考察も、CFRTPとコンクリートの界面性状を悪化させることになる。これらの現象を、前節3(1)のCFRTPに対する電気化学的測定では捉えていた可能性も考えられる。

## (3) 外観観察

表-6に曲げ載荷試験後に供試体から取り出した補強筋の外観を示す。これによれば、鉄筋は1.0ヶ月間40℃で暴露しても腐食していないことが認められる。また、1.0ヶ月間80℃で暴露した場合は、供試体中央部において、局所的に腐食していることが認められる。これは、

表-6 曲げ載荷試験後に供試体から取り出した補強筋の外観

暴露期間 (ヶ月)	暴露温度 (°C)	補強筋	外観
1.0	40	鉄筋	
		CFRTP	
	80	鉄筋	
		CFRTP	
2.5	60	鉄筋	
		CFRTP	

乾湿繰り返しにより、供試体中央部に設けたひび割れから、塩水および酸素が浸入したためと考えられる。また、2.5ヶ月間60°C環境下で暴露した場合は、供試体全体において、腐食していることが認められる。一方、CFRTPは暴露期間および暴露温度に拘わらず、劣化している様子は見受けられなかった。また、表-7に測定項目に対する総合評価を示す。すなわち、分極抵抗が小さく、また自然電位が低い場合、最大荷重は小さくなることが認められた。また、鉄筋を用いた供試体では、鋼材の腐食が発生していることが認められた。

#### 4. まとめ

本研究では、塩害環境下を対象に、鉄筋またはCFRTPを補強筋として埋設したコンクリート供試体を乾湿繰り返し暴露あるいは湿潤気中暴露した。その後、電気化学的測定、曲げ載荷試験およびコンクリートから取り出した補強筋の外観観察を行った。得られた結果を下記に示す。

- 1) 鉄筋と同様にCFRTPに対しても、交流インピーダンス法により電気化学的測定ができた。なお、分極抵抗が小さい程、自然電位は低くなった。
- 2) 塩分環境下に暴露後の供試体の曲げ破壊荷重は、暴露前の初期値と比較して、鉄筋では低下し、一方CFRTPでは低下しにくかった。
- 3) 塩分環境下に暴露後、鉄筋では、ひび割れ部への塩分浸透に伴う局部腐食や、内在塩分による全面腐食が生じた。一方、CFRTPでは腐食は観察されなかった。

謝辞：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」(JPMJCE1315)により進められた。ここに記して、深く感謝致します。

表-7 測定項目に対する総合評価

【鉄筋】	
分極抵抗	60°Cと80°C環境下において、分極抵抗は小さくなる
自然電位	60°Cと80°C環境下において、自然電位は低くなる
曲げ耐力	暴露温度が高い程、最大荷重は小さくなる
外観観察	1.0ヶ月間80°C環境下で暴露すると、供試体中央部で腐食が生じる 2.5ヶ月間60°C環境下で暴露すると、供試体全体で腐食が生じる
【CFRTP】	
分極抵抗	80°C環境下において、分極抵抗は小さくなる
自然電位	80°C環境下において、自然電位は低くなる
曲げ耐力	80°C環境下において、最大荷重は小さくなる
外観観察	目視では劣化なし

#### 参考文献

- 1) 寺田幸平：炭素繊維強化熱可塑性プラスチック—現状、応用分野および課題—，精密工学会誌，Vol.81，No.6，pp.485-488，2015.
- 2) 斉藤義弘，鶴澤潔，保倉篤：土木・建築分野への複合材料の適用，第7回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.61-67，2018.
- 3) 保倉篤，宮里心一：熱可塑性FRPロッドのコンクリート用補強筋への適用可能性の評価，材料，Vol.69，No.4，pp.335-342，2020.
- 4) 富山禎仁，仙北谷英貴，久保内昌敏，津田健：高分子系材料の腐食劣化を対象とした非破壊モニタリング，マテリアルライフ学会誌，Vol.15，No.3，pp.77-81，2003.
- 5) 轟章，森原理絵：繰り返し荷重負荷下におけるCFRPの電気抵抗変化の測定，埼玉ブロック大会（講演会）講演論文集，pp.123-124，2005.
- 6) 島村佳伸，占部貴之，轟章，小林英男：交流電気特性変化を用いたFRPの吸湿率測定，日本複合材料学会研究発表講演会予稿集，pp.53-54，2003.
- 7) 小林一輔：高張力異形鉄筋の実験的研究，土木学会論文集，第89号，pp.11-30，1963.
- 8) 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，pp.313-318，2019.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，p.44，2017.

(Received August 28, 2020)

# COMPARISON ABOUT BENDING CAPACITY AND ELECTROCHEMICAL MEASUREMENT OF CONCRETE BEAM WITH FRTP ROD AND REBAR UNDER CHLORIDE ENVIRONMENT

Atsushi HOKURA and Shinichi MIYAZATO

Under severe chloride attack environment, FRP rods are applied as a substitute for reinforcing bars in some cases. However, there are no cases that focus on nondestructive monitoring for corrosion deterioration of concrete with CFRTP embedded. Additionally, there is no case of verifying bending strength after exposure in chloride environment. In this study, therefore, electrochemical measurements, bending strength, and appearance observation of reinforcing bars embedded in concrete were carried out using rebar and CFRTP as reinforcement. As a result, 1) Similar to rebar, CFRTP could be measured electrochemically by AC impedance method, and the smaller polarization resistance, the lower potential. 2) The bending strength after exposure in chloride environment was lower in rebar than in the initial value before exposure, but not in CFRTP. 3) Reinforcing bars suffered local corrosion due to chloride permeation into a crack and general corrosion due to internal chloride, but no corrosion occurred in CFRTP exposed in the same environment.