

## 「連続繊維シート補修・補強材料（FRP シート）の耐久性について」

講演録

講師 西崎 到（一般財団法人土木研究センター 化学技師長 工学博士）

2023年11月13日（月） 一般社団法人繊維補修補強協会第13回定時社員総会講演会

### ◆はじめに

今般の講演の機会をいただき、FRPの耐久性についてこれまで実施してきたことを整理する良い機会となりました。

私は大学では化学科で学び土木とは縁がありませんでしたが、土研に入所後は、コンクリートの塩害対策、表面被覆材等の土木用材料の研究をしてきました。FRPとの出会いは、1988年の新素材総プロです。このプロジェクトは、新しい材料を建設分野にうまく生かしてゆくというもので、その新材料の一つにFRPがあったことで、それ以降、その利用技術や耐久性の研究に取り組むことになりました。FRPの利用技術としては、まずはFRPロッドのPC緊張材への活用に関する研究に係りましたが、1995年にカナダの大学に1年間行かせていただく機会があったことが、FRPシートの耐久性研究に係わる転機となりました。日本のFRP研究と同じくカナダでもFRPに関し維持管理等の研究を非常に熱心にやっておられたところでしたが、私が行ったシェルブルック大学ではFRPシートによるコンクリート補強が研究対象の中心になっていました。FRPシートによる補強は以前から知ってはいましたが、耐久性についてはまだほとんどやっていなかったもので、これに取り組むきっかけとなりました。その後いろいろ研究させていただき、この関連の分野で学位もいただいたので、さらに様々なFRPの耐久性関連の研究に取り組まなくてはいけないという気持ちを新たにしました。



ご存じのようにFRPは土木でもいろいろな形で使われてきています。1988年に世界でも初めてのFRPケーブルを使ったPC橋ができました。このあと、桁をFRPシートで補強する使い方を知って、載荷試験などを行いました。私は構造専門ではないので、使われる状況を観察していましたが、このころからFRPシートの耐久性の研究が必要だろうとは考えていました。さらには、もう少し別の使い方もあるのではないかと、FRPだけで構造物を作ったらどうなのだろうとも考えました。鉄の腐食対策は土木構造物の耐久性の重要な課題の一つであり、私自身も防食技術の検討などもやってきましたが、錆びない材料であるFRPで構造物を作る技術についての検討も進めてきました。FRPをメインに構造物を作

るとなるとコスト的にはガラスの方がよさそうということで、GFRP の橋や水門などの検討も行ってきました。

このように FRP に関していろいろやってきましたが、FRP シートで補強するという使い方は今や標準的工法の一つになってきており、FRP の特徴を生かした良い技術だったと思っています。ただし FRP は劣化しない材料ではないということで、FRP の劣化や耐久性について、一つは補修補強用のシートの耐久性、もう一つは被補強材との付着の耐久性の実験的確認に取り組んだ経験を紹介したいと思います。

#### ◆FRP の耐久性評価の暴露試験

FRP シートによる補修補強が普及したのは 1995 年頃、阪神淡路大震災の復旧のころだと思います。そのころから 30 年ほど経っており今なら実構造物で FRP シートの耐久性を調べる研究もできそうですが、私がカナダに行かせてもらったのは 1995 年ごろでこの技術が使われ始めたころであり、耐久性をどのように評価するかは悩ましい問題でした。先述のように、その前には FRP

ケーブルについて研究していましたが、耐久性について屋外暴露試験を実施していました。駿河湾に試験施設があり腐食環境が厳しいところで緊張したまま暴露試験を行い、強度がどのように変化するかなどを検討したことから、FRP シートについても同様の暴露試験が良いと考えました。私が滞在したカナダのシェルブルックは非常に寒いところで、環境も日本とかなり異なるので、カナダと日本の両方で暴露試験を実施すれば、世界中の様々な環境での FRP の耐久性に役立つデータが得られると考えました。そこでシェルブルック大学構内に暴露場を作ってもらって暴露試験を行うとともに、日本でも、土研の暴露場のあるつくばと沖縄にも同様の試験を行うこととしました。カナダは北緯 45 度・平均気温 4 度、日本ではつくばは北緯 35 度・平均気温 14 度、また沖縄は北緯 26 度・平均気温 22 度で、緯度は 10 度ずつ平均気温も 10 度ずつ差があるので、特徴的な暴露環境であったと思います。

供試体は 3 種類用意しました。一つめは FRP シートで、メーカーの異なる A および B という 2 種。一方向に 4 層を重ねてハンドレイアップ成形しました。マトリックス樹脂はエポキシ系樹脂とし、塗装効果も調べたいので塗装の有るものも 1 種用意しました。この供試体は繊維方向に引張試験を行うことで、炭素繊維そのものが劣化するかの確認を目的としていました。二つめはひし形の形をした供試体で、面内せん断特性を評価するため、直交 4 層を積層し、45 度方向に引っ張り試験を行う供試体です。この供試体は繊維と樹脂



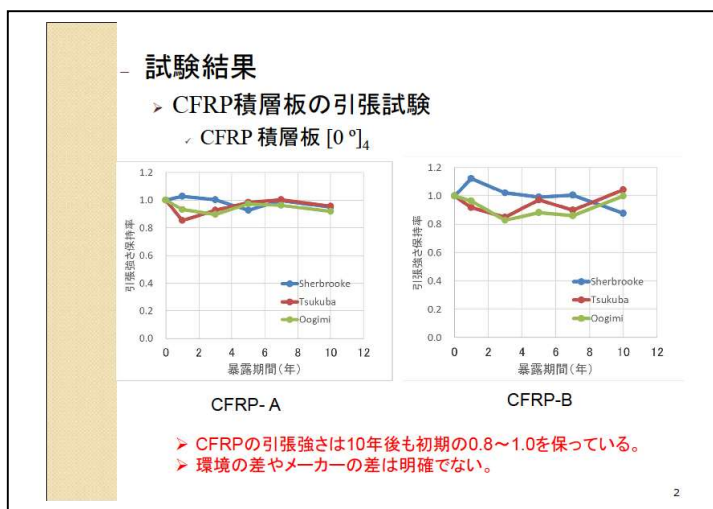
の付着特性の評価を目的としていました。

FRP の構成要素と劣化形態を整理して図に示してみました。繊維層を樹脂が包んでいる状態の断面図で、補強用途では FRP の下に被補強材があります。劣化の種類としては、表面被覆材の劣化、樹脂の劣化、繊維の劣化、繊維・樹脂の界面の劣化に整理でき、補強の時はさらに被補強材への付着の劣化があげられます。今回は繊維の劣化と、繊維・樹脂の界面の劣化評価を FRP 板で、樹脂の劣化はこれとは別に樹脂板を用意し、あわせて 3 種類の供試体での試験・評価することとしました。暴露試験は 1995 年に 10 年計画として始めました。暴露期間は 10 年で十分と考えていて 10 年間で供試体をすべて使ってしまったのですが、今、結果を見ると、10 年より長い場合の情報も欲しくなります。この点、少々残念に思うこともあります。

#### ◆10 年後の評価

さて早速、10 年後の試験結果を見て頂きます。CFRP 積層板の繊維方向の引張試験結果は、主に繊維自体の強度低下を見ていると考えていますが、ほとんど劣化していないことがわかります。強度保持率は 0.8~1.0 の範囲でややばらついています。暴露環境やメーカーの差は明確ではありませんでした。

45 度方向の引張試験で行った面内せん断試験では、繊維と樹脂の付着特性が表れていると考えていますが、これについては多少下がる傾向があります。強度保持率は 0.7~0.9 くらいですが、暴露期間とともに低下が継続するわけではなく、ある程度低下した後は、一定の値を保っている状況とみられますので、実用上の問題はないものと考えられます。判断にあた



ってすこし悩ましいところは亜熱帯の温度や湿度の高いところで、やや低い強度が出ているところがあることをどう評価するかという点くらいかと思います。塗装の効果については、有無によってほとんど差は認められず、CFRP は塗装によって暴露試験中の物性低下が保護されるわけではないということが分かりました。ただしこれをもって塗装が不要というわけではありません。この結果は、私には少々意外なものでした。というのは、ガラスを用いた GFRP では塗装がないと低下が進行するが、塗装があれば進行を抑える保護効果が得られるという実験結果がすでにありましたので、なぜ塗装の有無の効果が出たり、なかったりするかが分からなかったからです。

樹脂板の供試体については、曲げ試験の結果、7 年で 0.4~0.8 に低下していました。樹

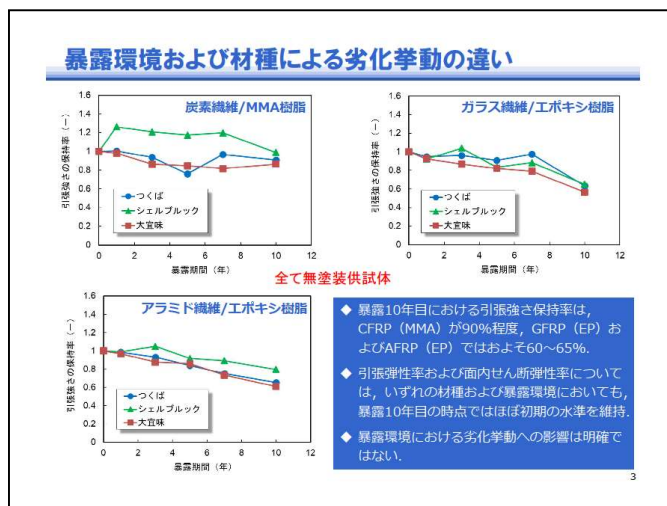
脂の強度低下は繊維と樹脂の付着の低下にも反映されると考えられることから、これが唯一の要因とは言えないまでも面内せん断強度の低下にも影響している可能性があると思います。樹脂板の断面観察の写真を見て頂きたい。上側が南向き表面ですが、南向き表面の凸凹が明瞭になっているのがこの写真からも認められます。製品Aの樹脂板に比べて、製品Bの樹脂版の断面写真では、表面から内部にかけて色が当初の青から黄色に変わっていることが分かります。この製品Bの樹脂では主剤と硬化剤の製造時の混合が良好に行われるように、樹脂の主剤に青色の色素が入れられており、この色素が紫外線の影響で化学変化したものと思われます。樹脂板の断面の色の变化の深さを調べると経年的に進行していることが観察されます。色素と同じく樹脂も表面から化学変化しているとは断定できませんが、何らかの化学的变化の可能性もあるかもしれないと考えました。樹脂板は直射日光の当たる南面の方が色の变化深さが大きいことが分かります。一方で、製品BのCFRPの断面を見ると、表面は変色しているが変色深さは小さく、最外層のCF層までにとどまっています。このことからCFが日射の浸透を遮蔽し樹脂の変色進行を防護している状況が見られます。このような変状はCFでのみで観察され、ガラスを用いたGFRPでは認められません。CFRPの耐久性がガラス繊維を用いたGFRPとは異なることがわかります。

#### ◆追加試験 (CFに加えAF、GF、CFプレート)

今説明した暴露試験による耐久性評価試験は2007年で終了していますが、予定した10年間の耐久性試験を終えた際、このままで終わってよいのかと感じました。この時点ですでに新しい材料が出てきており、これらを評価する必要も感じられました。繊維材料としてはCFについては、低温時施工のニーズに対応した樹脂として、MMAが使われ始めていました。またCFだけでなく、ガラスを用いたGFRPが、日本のメーカーではあまり見られないがカナダ・アメリカはよく使われるようになっていました。またアラミド繊維も注目されていたことから、これらの材料も追加した暴露試験に取り組みました。

供試体は、MMAをマトリックス樹脂としたCFRPについては、常温施工とマイナス10度で製作したものを用意しました。

ガラス繊維とアラミド繊維を用いたFRPについては、マトリックス樹脂はエポキシ樹脂とし、塗装の有るものと無いもののケースを設定しました。一方向4層の供試体と、45度の斜行積層板も、先の試験と同様に製作しました。これに加えて工場製品であるCFRPプレートも、すでに製品化されていたので追加しました。高弾性と高強度の繊維を用いたメー



カーの異なる 2 種を対象としました。CFRP プレートについては斜行の試験体は作れなかったため、繊維と樹脂の付着を見る目的では、90° 方向にクーポンを切り出し、曲げ試験を行うというかなり厳しい試験を行いました。暴露期間は 10 年では足りないとみられたので、さらに長く 15 年と設定しましたが、実際には一部の供試体については現在も試験が継続中です。暴露試験場は、先の試験と同様にカナダ、つくば、沖縄の 3 か所とし、CFRP プレート以外は評価方法も基本的には同じとしました。試験片の暴露前の特性は、MMA を使ったものは強度は十分に高いが面内せん断が低い。ガラスと AFRP の弾性率は低い。CFRP プレートの引張強さはとても大きい値となっています。

10 年暴露後の結果を示します。0° 方向の積層材の引張強度は、CFRP/MMA については、前回の CFRP/EP とほぼ同様に 90% 程度の保持率となりました。ガラスの保持率は 60% 程度、AFRP の保持率は無塗装では 60~80% の状況でした。

塗装の保護効果は、ガラスではもう少し明確な効果が見られも良いと思いましたが、試験結果は多少はあるかな、くらいでした。アラミドも同様でした。塗装の保護効果については、もう少し検討が必要ではないかと思えます。CFRP/MMA で行った施工環境の差の影響は、引張強さについては低温施工ではある程度常温施工との差が出ていますが、実用上十分な程度と思えます。ただし面内せん断強さでは差がもう少し明確なので注意が必要だろうと思えます。CFRP プレートでは、引張強さは 7 年暴露までは変化がありませんが 10 年暴露で多少低下しているものもみられます。もう少し先の経過観察が必要とみられます。

#### ◆補強効果の耐久性評価

ここまで FRP 自体の耐久性の話をしてきましたが、コンクリート補強効果が実際に維持されるのかについての実験も行いました。直径 15cm 高さ 30cm のコンクリート製の円柱に CFRP を 2 層巻いた試験体を製作し暴露試験を行いました。暴露試験場は先ほどと同様にカナダ、つくば、沖縄としました。暴露試験から回収後の供試体を圧縮試験により補強効果を確認しましたが、10 年間暴露後の圧縮強さ保持率は初期とほとんど変わらない状態でした。つくばではそれ以降も引き続き暴露を行い 25 年のデータも得ましたが、それでも変わらない状況です。塗装の有無での差はほとんどないことが分かりました。

#### ◆付着性評価

当初、連続繊維シートは柱の補強の意識が強かったのですが、床版や壁等の補強が使われるようになると付着に関する耐久性が重要になります。しかし、このような試験をこの研究の当初には計画していませんでした。そこで 1992 年ごろ別の目的で行っていた研究で、コンクリートの平板を CF シートで巻いたような試験体を作っていたのでこれを使う計画を立て、4 種類の CF シート材料を比較しました。この試験は当初はプルオフ試験で評価しようと考え実施していましたが、ご存じのようにこれではコンクリートが壊れてしま

い、CFシートとコンクリートの付着特性の変化が観察できません。そこで引きはがしてみたらどうかということで、端部から万能試験機で引きはがす試験を考えると暴露 14 年目と 30 年目の 2 回実施しました。この試験を行うと、4 種類の CF シートの間で様々な異なる破壊モードが観察されることが分かりました。コンクリートで破壊しているもの、界面で破壊しているもの、繊維の中で破壊しているもの、などさまざまです。これらをどのように解釈すれば付着強度やその耐久性などの評価に使えるかを考えていましたが、時間切れで後輩にゆだねることとなりました。ここで示したグラフは、荷重を時間の経過で示していますが、横軸を距離に変換できればはく離破壊エネルギーとして評価できるのでは、などとも検討していました。

#### ◆おわりに

やり残したことの事例としては、付着を検討するのであればということで、引張せん断試験による評価を狙って別の試験体を作って、沖縄で暴露試験を始めたのですが、台風の影響などで供試体が壊れてしまい失敗に終わってしまったことがあります。またコンクリートだけではなく鋼材を母材として調べることも試みたこともあります、鋼材がさびてしまうという課題に直面したこともありました。

今後の展望ですが、連続繊維補修補強技術が普及して 30 年たったので、そろそろ不具合の事例が出てくるかもしれないと思っています。そういった情報収集は非常に重要なので、それらを解析してゆくことが連続繊維補修補強技術の信頼性向上につながると思います。また点検手法の高度化が重要です。打音は良い手段ですが、高所で人が行けない場所でも検査できる方法はないか、写真を撮って評価できるのではなどもあります。また、再補修技術、FRP の塗装仕様などももっと検討が必要と思います。

基準関係では指針類が土木学会より 2000 年に発刊され、2018 年には大垣先生が改定された指針が発刊されていますが、これで終わりではなく引き続き新しい技術の蓄積を積み上げていただきたいと思います。



以上