

FRP 材料の特性を活かした補修・補強・構造設計について

国立大学法人豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所
建築・都市システム学系（兼務）
教授 松本幸大 氏

私の研究室では FRP 材料を使った建設分野への応用、補修補強材料の適用を主に研究しております。所属する研究所の名称がちょっと専門分野と離れていますが、もともとは建築・都市システム学系です。

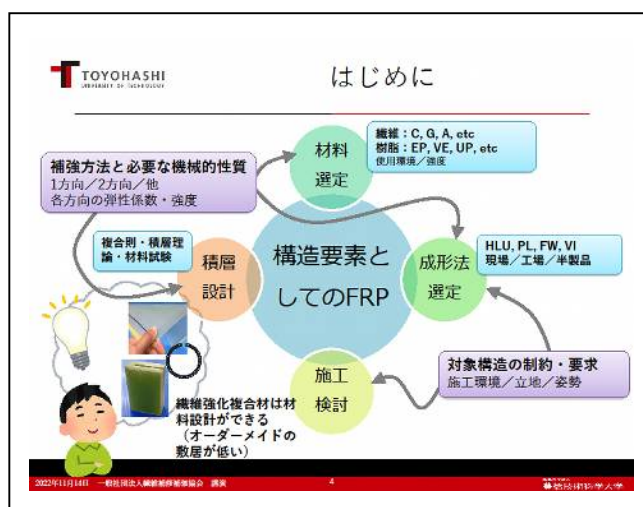
本日は、初めに FRP 材料に対して思うことと申しますか、普段私がこういうことを考えてやっていますということの後に、研究室で行っているいくつかの事例について紹介させていただきます。それらをまとめて最後に今後の展望のような形でまとめられればと思っております。



■はじめに（FRP 材料に対して思うこと）

FRP 材料を建設の構造材料として使うときに、圧延鋼材などのようにリストから選択して構造材料として骨組みを選択して組み合わせるのとはちょっと毛色の違ういろいろな内容が含まれてくるのがこの FRP という材料の難しさでもあり楽しいところでもあると思います。具体的には、まずは材料を強化繊維の材料とか樹脂材料から選ぶということですが、通常の補修補強でよくつかわれている UD（一方向性）の繊維だけではなくて目的によっては多軸だとか二方向、ランダムなどいろいろな材料を選択しなければなりません。そうすると弾性係数も異なるし、いろいろな方向で強度も変わってきます。さらに FRP を作るという観点では、成形法もいろいろあるし、それだけを見てもここ数年様々な方法が使われ発展してきている部分でもあります。それからこれは建設分野ならではと思いますが、施工の検討ということで特に補修補強の分野では現場で作るのが前提になってきますのでそれに適した方法であるとか、それによって積層設計にも影響が出てくる場合があり、場合によっては材料の選定も絡んでくることになります。そうすると 4 つほど項目を挙げているのですが（図 1）、これらが独立して考えられるのではなく関連性をもってそれぞれ最適なものを選んで行く必要があります。広い意味で、繊維強化複合材料というのは材料設計をしなくてはいけない材料なんだということを感じています。それが難しさを感じさせているのかもしれない。

その中で成形法を俯瞰してみたいと思いますが、現場成形で使われるハンドレイアップは自由な形状で、基材構成も比較的自由に選べる等かなりハンドリングの良い成形法であることはよくご存じだと思います。一方で、手で樹脂を含浸してゆくの機械的性質や安定性はやや低めで、ものによっては後で加圧などして Vf (繊維体積含有率) を改善する方法もありますが、一般的には安定性、機械的性質、性能に劣る方法で



す。生産性も当然低いと言えます。工場生産などに適した方法としては、連続引き抜き成形だとかフィラメントワインディング等があって、こちらは Vf が高めですし、生産性も高めですが、形状の自由度はやや制約があります。欲しい機械的性質や物量、形状などに応じて、こういったものから取捨選択をしてゆかなければならないというのも FRP の一つのテクニックになるかと思います。最近私のところで取り組んでいるのが真空樹脂含浸で、バキュームインフュージョンとも呼ばれる方法があります。ハンドレイアップを半機械化したような方法で、ハンドレイアップの良さをそのままに工場生産品のような機械的性質の良さを発揮できる成形法で、生産性はそこまで高くはないですが、バランスの取れた方法と言えます。この後紹介するいくつかの事例はこの方法で行ったものです。

いろいろな成形法から良いところをくみ上げて FRP 材料を補修補強に使うもしくは構造要素として使うということを改めて考えてみると、いろいろな情報を持っているとそれらをうまく組み合わせるとよいアイデアが生まれてくるのではないかと思います。すると材料設計しなければいけないというネガティブな意識から、材料設計ができるというポジティブな意識に変換できると考えています。さらに、オーダーメイドの敷居が低いというのも FRP 材料の特徴だと思いますので、一品生産の良さ、大量生産の良さなどを活かして建設分野に応用してゆきたいと考えています。

以下、具体的事例をいくつか紹介させていただこうと思います。

■事例 1. 接着補強 (真空樹脂含浸成形 (VaRTM) 接着法による鋼構造ブレース接合部の補強法)

これは補修補強で接着を使ったものです。真空樹脂含浸成形 (VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれている方法で、これを接着補強に応用する内容です。目的としては鋼構造の非保有耐力接合部の補強にこの方法を使うことで、メリットとして CFRP の接着補強なので火が出ない、軽い、多積層であっても迅速で成形性に優れる手法

になったと考えています。

工程ですが、まず鋼の表面の下地処理をします。黒皮をとって表面粗さを出し、プライマーを塗布します。この後が特徴となっていますが CF 繊維を、この時は一方向と二方向クロスを使っていますが、必要な積層分だけシートを切って重ねておいて熱可塑性樹脂のパウダーをつけると、アイロンで溶けてくっついてくれます。この状態

であっても CFRP にすることができるというのが真空樹脂含浸の良いところで、ドライの基材を補強対象の部位に乗せ、ここから VaRTM ですが、フィルムでパッキングして真空ポンプで引き、中を真空化します。上が真空ポンプにつながっていて、下は樹脂のポットにつながっており大気圧によって勝手に樹脂がしみこんでいって、硬化後にフィルムを外すと CFRP が出来上がっているという方法です。このブレース材というのは補強するにあたってボルトはとればよかったのかもしれませんが、機械接合は信頼性もあるのでそのまま残したいと考え、ボルトの上からカーボンを適用する方法になっています。そのためボルトの頭の上が凸凹しているので、そのあたりをカーボンの基材を使って不陸調整も同時に実施しています。この状態ですと補強層が 20~30 層ほどになっていますが、成形は 1 回で 1 時間もかからないで終わってしまいます。迅速かつ成形精度も優れた方法というソリューションに結び付いています。こういった VaRTM を使って成形と接着を同時に行う手法を 5 年ほど前から取り組んでおり、接着条件、成形条件を変えて検討した結果、方法自体は落ち着いてきており、すでに実装の段階に入っているといえます。



最近の成果の一つとしては、ブレース端部に応用するという事で、両端ピン支持の不安定な加力架構にブレースを一本入れて実大に近い規模の接合部の試験体を作り、正負交番の繰り返し载荷を行い、性能確認をしています。

基材構成が複雑であっても、机上で事前に CF を切って組み合わせることができるので、オーダーメイドに即した基材に対応できる特長があり、この例では肉厚はボルト頭を隠すためのボルト頭分修正用基材と呼ばれるものを 22 層、その上に応力伝達用基材というものを乗せています。かなり積層数が多いですがテーパ形状にして応力の流れを均一化させています。このボルト頭修正用基材というものは事前にカーボンに穴をあけてボルトにかぶせられるようにしてあります。こういったものを事前に用意しておけば、現場に持ってきて、設置して、真空樹脂含浸することで補強ができてしまうという、迅速で成形の品質の高いものになっています。

こういった成形法の話をする、なかなか難しいのではという反応がありますが、学生

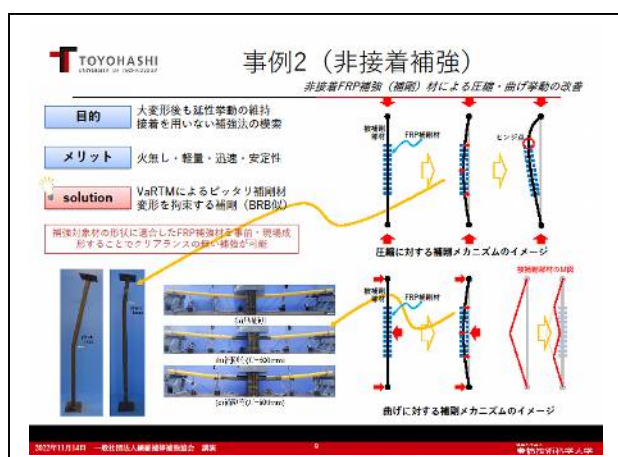
でも実際に接合作業をやっています。研究室に入ってきた学生はまず FRP の成形の勉強をしますが、三回目には自分で作業できる状況にあるなど、研究室内でも技術の伝承がうまく続く方法で、補強法を実証して加力試験を進めています。

加力実験では、通常第一ボルトの有効断面部で破断しますので、破断部での応力緩和のためにカーボンを貼付け、ボルト頭を隠すように張り付けて補強します。この設計については、応力伝達用基材として CF は折り曲げることができないので、ボルト頭修正用基材というものをを用いて、まず平滑にしてあげて応力伝達用基材を乗せます。この 22 層というのはボルト頭部の厚みからきていて、7 層というのは不足している耐力からきているものになります。

実際にこういった手法を適用して正負交番载荷をすると予想通りというか、赤・オレンジが補強後の荷重変位関係、黒が非保有耐力状態で、第一象限が引張側、第三象限が圧縮側になり、こちらは座屈してしまいますのでこういった履歴になります。無補強ですとすぐ切れるということになりますが、補強すると最大耐力は全断面降伏耐力まで到達するだけではなく、そのあと十分な軸部の伸びという非補強部の全断面降伏を進行させることができ、塑性率も 15 以上くらいまで伸びています。どんどん伸ばしてゆくとカーボンの補強部まで大きな塑性ひずみが進行して行って、そこまで行くとさすがに接着剤が伸びに耐えられなくなってゆくの、最終的にはカーボンがこの辺りではがれてきます。はがれると非保有耐力接合状態に戻ってしまうので最終的にはここで破断します。一方でうまくカーボンで補強して応力低減を図る、かつ塑性ひずみを発揮させるために応力集中を避ける、テーパ状で滑らかに応力伝達をさせることで、カーボンを適用していない部分で十分に伸びて性能は発揮できることがわかってきました。

■事例 2 非接着補強（非接着 FRP 補強（補剛）材による圧縮・曲げ挙動の改善）

接着剤を使うと相手が鋼の場合、塑性ひずみによっていつかははがれることになります。鋼構造の方に 3%までは大丈夫という、3%は小さいとご指摘いただくわけです。設計上はこれだけ出れば十分であったわけですが、もう少し違ったアプローチはないかということで、2~3 年前から始めている接着を使わなくても部材の挙動や崩壊メカニズムによっては耐力が上がることに注目して、かつ FRP の成形法も適



切なものを選んだら効果が出るのではないかということで進めているのが、この FRP を使った非接着の補強です。厳密には補剛ということになりますが、これによる部材耐力の向

上について話をします。目的は、接着を使うと大変形時に接着層にダメージが生じる恐れがある、相手が鋼の場合、鋼の塑性変形能力もうまく生かしつつ耐力を上げたい、非接着でも構造部材とうまく協働できないかということです。ここでも真空含浸が出てくるのですが、真空圧で圧縮するので、くっついていなくても相手にピッタリ添わせることができます。そうすると、接着を使わずに耐力を上げるメカニズムを二つ実証研究しています。補剛のメカニズムでは、いかにクリアランスを制御できるかということが重要なファクターとなってくるので、これを実現するために真空含浸を使っているわけです。

一つ目が圧縮です。細長い部材に圧縮力が加わるとサイン波形状で座屈したがるわけですが、少し変形が出ると補剛材が曲げを受けるような、小さい赤印ですが、反力が生まれます。FRP 補剛材の剛性と強度を適切に設計すると、この真ん中でおれる座屈モードは生じずに座屈モードが変わって非補剛区間内の塑性ヒンジが発生するような崩壊メカニズムに代わり、結果的に座屈耐力も上がってきます。こういった手法をアングル材に対して実証研究を進めています。無補強ですと中央で折れますが、部分的に FRP を適用すると少し外れたところにヒンジができて耐力も上がるという内容になります。鋼の黒皮とカーボンの黒で見分けが付きにくいですが、折れているところが違うのは確認いただけると思います。

圧縮だけではなく曲げにも適用してみると、通常の三点曲げ状態に補剛材を入れると、補剛材に曲げが入るので、その分の内部反力が生じます。そうすると、当然変形量も小さくなり、被補強材のモーメント図を描いてみると通常ですと三点曲げ状態で、補剛材を入れるとその分だけ補剛区間内のモーメントが減少する形状になります。最大モーメントも減少するので耐力としても上がることになります。

実際の施工内容ですが、まずは軸圧縮です。作り方はアングル材を対象にしたものと、非接着を実現するために鋼材と FRP の間に、ピールプライと呼ばれる接着しない基材があって、それを一層入れ縁を切っています。さらに炭素繊維シートでぐるぐる巻きにして、VaRTM 成形に必要な資材を配置し、真空パックをして含浸するのは同様です。軸方向繊維だけではなくて、曲がると局所的な支圧力が働いたり、せん断剛性も必要であることから二方向クロスを使っています。二方向クロスを使うのは効率化の課題も残っていますが、現状はこの結果となっています。

設計は、部分的に剛性の上がった圧縮材ですのでそれほど難しいものではありません。耐力評価の流れは、元部材の細長比があって、それに対応する線形座屈荷重があります。補強すると部分的に強くなるので、その部分を重ね梁として曲げ剛性を評価して線形座屈荷重を出し、対応するオイラー曲線に入れて等価な細長比を出します。等価な細長比に対応する建築学会の短期座屈耐力などの評価ができるので補剛後の耐力評価ができるという設計法を提案し、実際に実験をして計算を確認しています。

試験体の変数としては 1.6m 程度の 65×6 アングルを使ったものと、同じアングルですが 1.2m の部材長にしたもの、両者とも境界条件は両端ピンとなっています。これに対し

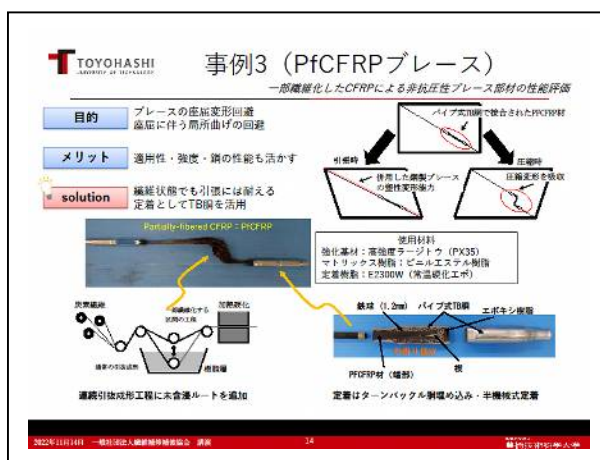
て二方向クロスを 10 層から最大 30 層巻き付けて剛性を変えて耐力を検証しています。厚さだけではなく長さもパラメータになるので、短くする分厚くする等のパラメータを一通り実施して、先ほどの耐力の考え方が成り立っているかというのを確認しています。こちらが線形座屈のオイラーの式、建築学会の短期許容耐力、F 値は鋼材の実力の応力度で調整しています。黒の●と▲が無補強で、非接着の FRP で巻くと当然耐力は上がります。なおかつ上がり具合も設計式に対応しているので、十分評価できそうであると結論づけています。各試験体の座屈モードを示していますが、ほとんどの試験体で、FRP で巻いた部分のすぐ上ないすぐ下で折れ曲がるようなモードに変わるといことで考え方としても設計法としても実証することができました。

ここでは圧縮に関して接着しなくても効果を得られますが、部材に密着しなければいけないので、真空含浸で密着した補剛材を成形すること、これと並行して非接着工法による設計法を現状の建築学会の設計式に入れて対応できることを示しています。

同じ非接着で曲げに対する補強も、今年から始めたものですが、現状補強の対象は FRP のパイプになっています。先ほどの圧縮が曲げに変わったものですが、設置を楽にしたいと考えています。黄色いパイプは 49φ で単管と同程度のもので、この補強を考えています。丸断面にシートを巻き真空圧を掛けるとしわができてしまいます。しわも制御できるので大きな問題にはなりません、設置の時間を短くしたいと考えています。VaRTM の良さも生かしたいので、補強対象部材を使って、スリットを入れるとしわができなくなるので、目の検査のような断面の FRP を何層か巻いて VaRTM 成形をします。工夫したところは、一層当たり黒と灰色で表されていますが、二方向のガラスと軸方向の CF のハイブリッド FRP が何層かに分かれて成形されています。そうするとスリット入り円筒形状の GC (ガラス、カーボン) のパイプができます。間にピールプライを挟んでいるので、1 回成形すると、この場合 8 個のだんだん大きくなるパイプができます。FRP のもう一つの特徴としては、強度が高くてヤング率が小さい、弾性変形性能に富んでいるという言い方もできますが、間にスリットを入れると、開いてはめ込めるというメリットが出るというアイデアで進めています。スリットを集中させると心配なので、180 度回転させながら積層してゆくと、部分的な非接着補強ができると考えています。非接着とは言っていますが、黄色い被補剛材と補剛材とは接着されていませんが、スリット入りのパイプの間には接着剤が入っていますので、重ねていったもの同士は一体化されています。実際に元の FRP パイプの変形の 20%程度低減させる設計としたスリットパイプ 8 層、補強長さ 500 mm の試験体、40%低減を目標に設計した補強長さ 800 mm の試験体に対し、それぞれ曲げ試験を行うと、無補強に対し 20%減を目標としたものは 28%ほどの減、40%減を目標としたものは 50%ほど減の結果となり、おおむね設計とも対応している結果となっています。当初のモーメント図通りひずみが生じているかをひずみゲージの値からモーメントに換算してグラフを書いてみると、想定したメカニズムで補剛できたことが確認できました。

■事例3 PfCFRP ブレース（一部繊維化した CFRP による非抗圧性ブレース部材の性能評価）

事例3ではPfCFRP（Partially-fibered CFRP）ブレースと呼んでいます。一部繊維化したということで、パーシャルファイバードと呼んでいます。先ほどのブレース材と同様に、基本的には引張性能を発揮させることが目的ですが、圧縮されると面外に変形をして場合によっては周囲のものを傷めることがあるので、これを回避するためにCFRPをうまく使えないかと考えたものです。座屈すると両端に曲げによる局所ひずみが生じるので繰り返し载荷があった場合の耐久性の改善にもなります。CFRP部材は一方向だけ強ければよく、引き抜き材UDのCFにはコスト感も必要なので高強度型のラージトウを使っています。成形方法は通常の引き抜き成形ですが、加熱硬化させる直前の部分、樹脂含浸する工程で一部含浸しない部分を作って、CFRPの部分とファイバーが交互にできる様、製造してもらったことが今回のポイントです。また、FRPは接合に気を遣う材料ですが、ここでは棒材の定着方法として既存のターンバックルのパイプ式胴を使って、棒部分を差し込み後ろからくさびでメカニカルに止めることとしました。初めは樹脂で埋めていましたが樹脂では柔らかすぎて定着が取れないので、樹脂+鉄球ブラスト材を用いて剛性を高め、機械的抵抗力を上げて定着を図っています。こうすると反対側のターンバックルのねじが接合にそのまま使えるので、つなぎ方も簡単になっています。CFRPの成形と定着方法がこの事例の成果となっています。



と両端に曲げによる局所ひずみが生じるので繰り返し载荷があった場合の耐久性の改善にもなります。CFRP部材は一方向だけ強ければよく、引き抜き材UDのCFにはコスト感も必要なので高強度型のラージトウを使っています。成形方法は通常の引き抜き成形ですが、加熱硬化させる直前の部分、樹脂含浸する工程で一部含浸しない部分を作って、CFRPの部分とファイバーが交互にできる様、製造してもらったことが今回のポイントです。また、FRPは接合に気を遣う材料ですが、ここでは棒材の定着方法として既存のターンバックルのパイプ式胴を使って、棒部分を差し込み後ろからくさびでメカニカルに止めることとしました。初めは樹脂で埋めていましたが樹脂では柔らかすぎて定着が取れないので、樹脂+鉄球ブラスト材を用いて剛性を高め、機械的抵抗力を上げて定着を図っています。こうすると反対側のターンバックルのねじが接合にそのまま使えるので、つなぎ方も簡単になっています。CFRPの成形と定着方法がこの事例の成果となっています。

FRPは繊維だけでは強度が出ませんが、引張だけであれば繊維だけでも良いのではないかと、まず材料強度の確認から始めましたが、思ったより下がってしまいました。一部繊維化した時の強度が、約40%減から場合によっては半分まで下がったのですが、CFRPはもともと2GMPaの強度を持っていますので、半分に落ちてでも鋼材より高い強度を持っています。それが幸いして鋼のブレースと比べても、まだ十分な強度を持っています。定着についてもターンバックルを使うことで強度が十分確保できるということが分かりました。

こちらでも実大強度試験を行っています。履歴については鋼のターンバックル形式と同じなので、X字型にブレースを入れ、鋼のみの場合と、M12に対して5mのブレースの1m分だけ一部繊維化したCFRPとしたもの、M16に対して1m分のもので750mm分だけCFRPとしたもので評価しました。マクロにみるとほとんど変わりませんが、詳しく見るとヤング率に劣るCFRPが間に入っているため、若干弾性剛性が下がるという結果は計算通りとなっています。

もともとの目標であった座屈による変形回避ができたのかということですが、圧縮力が

入ると下に下がるだけなので、鋼材より面外変形は抑えられており、少なくとも柱の面から飛び出すことはないといえます。

ここでの目標は、周りに影響を与えないよう、鋼の性質は残しつつ FRP をうまく利用したいということは、一部繊維化部材を使うことで実現できました。繊維の可とう性を活かすとともにモルダーさんのご協力をいただいた結果と思います。また、既存製品をうまく使うことが FRP 製品を使ううえで重要だと感じました。

■事例4 GFRP 接合部 (GFRP 部材ボルト接合部の強度改善)

最後の事例四です。GFRP がメインですが歩道橋などへの適用が最近、数件の事例があり、これらの部材は引き抜き成形で作られています。等断面長尺部材が作りやすいのでこういった骨組み構造に応用する FRP ですと引き抜き成形材になります。引き抜き成形材では軸方向繊維はたくさん入れられますが、クロスとかマットは、たくさん入れると生産性に劣るだけでなく、軸方向繊維を減らして違

う方向の繊維を入れるということは、もともと GFRP は弾性率が 20 から 30 くらいなのに、さらに弾性率が小さくなり変形が大きくなってしまいます。せん断強度が低いのはわかっていますが、それを上げるために部材全体の基材構成を変更するのは不合理であると考えています。ならば接合部だけ補強すればよいのではないかと、ということで GFRP の接合部の挙動改善を同じように FRP で補強するという目的で行っています。

UD の引き抜き材、この接合面の脆弱性をうまく回避する方法がないかということです。ここでは多軸基材を基材接合部とその周辺に接着で当て板し、最小限の板厚増加でかつ引き抜きの良さも損なわないような接合部ができないかということで進めています。

実際に進めていることは、ボルト穴を一個あけて板をボルトに通して引っ張ることで評価しています。通常の引き抜き製品ですと、端空きを 3d とってもせん断で破壊します。ものによっては 5d とってもせん断破壊して急激に耐力が落ちますので、この部分だけに多軸基材をいれて補強します。結果を先に言いますと、そんなに厚肉の補強をしなくても数ミリの基材を入れることで耐力が上がるのがわかりました。この写真でこれは 0/90 のロービングクロスを成形したもので、非常に薄いものです。これをボルト穴周辺に接着で当て板し、それぞれ引き抜き材と多軸基材のボルト接合部の挙動がどうなるかを確認しました。引き抜き材は最大強度に達するとすっと抜けて荷重が下がるのに対してチョップドストランドマットだけで板を作って試験をやってみると、すぐに下がるわけではなく粘り強い動きをします。同様に、±45 基材も同じような性能をもっているんで、急に耐力は

下がりません。粘り強さも上げられたらいいという観点で、少し厚めですがガラスチョップだけや、±45 や 0/90 などの板を使って性能を検証しています。

重要なところはこの赤、一番上のトータルの厚さに対する効果です。横軸については接着した補強材の基材構成が、0/90、±45、チョップドストランドマット (CSM) の三種、下付きの数字が層数になっていて 2, 4, 8 の順に並んでいます。だいたい 1 層あたりの厚さが 0.5 mm はないくらいになりますので、層数 2 では両側に貼っているので 1 mm くらいになります。そうすると 1.6 mm くらいの厚さ増加で元材は 6.5 mm ですが、1 層貼っただけで 80% くらい耐力が増加しますので、優れた肉厚対効果があるというのがわかりました。これを厚さあたりで評価するとほぼ一定になりますので、断面を増やせば増やすほど効果は線形的に上がってゆく結果になっています。ロービングクロスと CSM の金額を考えると CSM はコストパフォーマンスが良いといえるので、こういった補強もありうるということを実証してきました。

引き抜き材は非常に便利な材料で生産性もいいし、大量生産するにはこれしかないとは思いますが、基材構成が偏っているので接合部分はうまく補って、繊維の向きによって発揮できる特長もうまく利用してあげる、そうするといい構造物ができると考えています。

■終わりに

以上、本日 4 つの話題を紹介させていただきました。

最初、接着補強については、事前にドライの基材を対象物に合わせて整える、事前成形などと言っていますがそういった技術も生かしつつ、かつ一括成形技術も生かしながら、より効率的で効果を発揮できる補強法につなげました。結果としては 3% くらいの鋼のひずみまでは追従できそうだとことが分かり、鋼構造の通常の塑性率の範囲であれば十分追従できる範囲であると思っています。

二つ目の非接着について、成形法が同じ VaRTM であり、非接着といえども対象物にピッタリ成形することが大事なので対象物の表面に適合する成形技術について応用した事例です。この曲げの補強では、材料が変形しやすいことがほとんどの場合デメリットになりますが、弾性変形をうまく生かしてあげると設置の際に大きなメリットになりそうで、これを活かした設置方法を提案しました。

三つ目、ブレースについては、かなりきわものの提案をしましたが、引き抜き成形というのは汎用的ですが、成形技術者と応用を考えてゆくと新しいものが生まれるのではないかという事例を示しました。また FRP だけではどうにもならない部分、例えば塑性変形能力などはどうにもならないので鋼に頼るという使い方もあるのではないかという観点を示しました。

四つ目、成形法のそれぞれの良さを生かすと基材構成につながり、重量制限とか重量対効果などにうまくつながるような事例として GFRP のボルト接合部の補強方法を紹介しました。

材料の適材適所というのは、木、鋼、コンクリート等さまざまですが、必要なところに必要なものを選定できることが必要で、この中に FRP が今後どんどん入ってゆけば良いと思います。その場合この基材構成も含めた適材適所を考えてゆく必要があると同時にこの基材構成に関連して成形方法の取捨選択もあるので、それぞれ適した方法でうまく使ってゆくことが繊維系材料を使った補修補強を考える上での重要な観点と思います。

本日の話の謝辞と合わせて、既発表の文献の URL を示させていただきましたので、共同させていただいた方々に対しこの場を借りて御礼申し上げたいと思います。また FRP 関係の国内シンポジウムの URL を示しています。概要集が DL できますのでご利用ください。

以上

【参考論文】

事例 1 : <https://doi.org/10.3130/aijt.25.703>

事例 2 : <https://doi.org/10.3130/aijt.28.691>

事例 3 : <https://doi.org/10.3130/aijt.28.1248>

事例 4 : <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112896>

【FRP 関係国内シンポジウム】

〔複合・合成構造の活用に関するシンポジウム〕

<http://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/00023/index.htm>

〔FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム〕

<http://www.jsce.or.jp/library/open/proc/maglist2/01829/index.htm>