

CFRP 接着による鋼構造物の補修・補強に関する研究開発事例と今後の展開

講演録

講師 中村一史（東京都立大学 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 准教授）

2024年11月18日（月）一般社団法人繊維補修補強協会第14回定時社員総会講演会

■はじめに

本日は、はじめに私の研究略歴、その後、CFRP 接着による鋼構造物の補修補強の概要、三つ目に、私どもの研究開発例として、CFRP 接着による補修補強、特に接着接合部に着目した評価について紹介したい。最後に、今まで取り組んできたことの評価と、これからの課題を挙げさせていただきたい。



■研究と略歴

私の研究のバックボーンは、超長大吊形式橋梁の力学的検討であり、若干連続繊維に関わるもので CFCC（炭素繊維コンジットケーブル）の適用検討、2500m 級の吊橋の主ケーブルあるいは 1500m 級の斜張橋の斜ケーブルに使えないかを検討した。この他、極超長大吊橋として 5000m 級の橋を作るとしたら FRP を用いないと実現できないということも検討したことがある。ライフワーク的なところでは、歴史的鋼橋の保全の取り組みとして、そのデータベース化を行って、Web サイト（www.kanenohashi.com）で紹介しているのでご覧いただきたい。

三つ目の話題である FRP の構造物への適用検討では、土木分野では、新設構造物の開発から保全・補修補強あるいは維持管理という方向になってきたということもあり、耐久性の高い新素材に着目して、どのように構造物に適用するかを検討する方向に変わってきた。その中で FRP の歩道橋、ハイブリッド FRP 桁の線路上空自由通路、あるいはトラス桁形式 FRP 検査路の開発なども行ってきた。さらに FRP 水門扉、最近では FRP を用いた RC 床版の補修補強方法にも着目して検討を行っている。本日メインになる CFRP 接着による鋼橋の補修補強については、2000 年頃から約 20 年検討を進めている。当初は本当に使えるか不明な点もあったが、CFRP 接着による疲労き裂補修から研究を開始した。

■ CFRP による鋼構造物の補修・補強の概要

FRP 接着による金属系材料の補修・補強は、実は航空機分野で開発、発展したといわれている。ジェット機の機体のパッチ補修で、タイムスケジュールの厳しい中で施工する技術などがあり、これが最初かと言われている。軽量の FRP は現場でのハンドリングが良いこともあり、鋼橋の分野では、補修補強といった延命化技術として使えないかと国内外で研究開発が行われてきた。2010 年以降、マニュアルとか技術資料が整備され、「FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端」、「炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・

補強工法設計・施工マニュアル」のほか、「FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術」は、事例集と FRP 部材の接合にも着目してまとめられている。さらに、「複合構造標準示方書」に標準的な方法として掲載され、2018 年に発刊された「FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）」では、鋼・コンクリート構造物を対象とした FRP 接着による補修・補強の指針案として策定した。種々の荷重作用を受ける鋼部材に CFRP を接着して補修・補強できることが示され、例えば、曲げモーメント、軸力を受ける部材、あるいは地震荷重とか、活荷重、風荷重等の繰返し荷重に対しても適用できることがわかってきた。また、土木分野における補修・補強の用語は、劣化した部材の機能回復において原状回復まで目指すものを「補修」、さらに機能向上、例えば耐荷力向上といった時には「補強」と定義した。

●施工事例

作用別に補修・補強に分類した施工事例では、曲げモーメントを受ける部材、荷重変更による耐荷力の向上に対しては CFRP プレートが、あるいは断面欠損なども曲げモーメント部材、工場の小梁についても CFRP プレートが適用されている。

軸力を受ける部材については、断面欠損のある引張部材の補修を対象にしてトラスの下弦材や斜材、アーチ、歩道橋の吊材など、一様な力が全面に伝わるので、はく離対策として、ある程度ずらしながら接着できるシート系が使われている。

地震荷重について、レベル 2 地震に対する耐震補強の事例として、円形鋼製橋脚へのシートの適用例がある。

繰返し荷重では、疲労対策の試験施工において、シート系が使われている。

この事例では、荷重変更に対する耐荷力の向上に用いている。12 層の積層 CFRP 板を下フランジの下面に接着している。腐食について、軸力を受けるトラスの下弦材、斜材についてはスランドシートや炭素繊維シートが使われている。耐震補強は、阪神高速道路においてシートを巻きたてる方法がある。疲労き裂の補修方法として、溶接ビード部から発生した疲労き裂を補修した事例で、試験施工で問題ないことを確認した。このように試験施工を通じて、実用化が進められきた。

●鋼部材の FRP 補強の概念

軸力を受ける部材では、鋼材の両面に CFRP を接着する場合、定着箇所では荷重が鋼部材から FRP に分担されることになる。定着箇所は一様な合成断面にならない。ここは補修補強対象外とされる。同じように曲げを受ける部材では、I 形断面の下フランジへの事例が多い。ここでも一部定着があつて、補強対象に入らないでいうことになっている。この定着長の計算方法は、前述の「FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）」に具体的に記載されている。なお、この端部ではどうしてもはく離が生じるため、この部分では垂直応力とせん断応力の二つの応力が支配的になるので、これらを主応力に換算して評価されている。

●接着接合の破壊形式

土木学会指針では、接着接合の破壊形式を全部で 8 つに分類している。一般に、接着接合の破壊は、鋼部材側の界面 1 あるいは FRP 側の界面 2 の破壊、凝集破壊 3（接着剤の材料破壊）層間破壊 4（FRP の積層間の破壊）が挙げられる。土木学会指針

では、主に、破壊形式の1、2、3が評価できるようになっている。ただし、破壊形式の1、2は、ばらつきが大きい。できればこの凝集破壊に制御する設計が理想的で、この破壊形式となるように、適切な材料を選定して、設計・施工を行っていただきたい。例えば、端部では、大きな応力集中を受けて、破壊が生じるため、段差を設計する必要がある。この段差処理では、一枚一枚をずらすとか、あるいは板だったらテーパ処理するなどがある。この段差処理が一番多く、通常は、これにより概ね解消される。

■研究事例紹介

次に、我々の研究開発の事例を説明したい。CFRP 接着による補修・補強では、鋼部材中の二大損傷といわれる、疲労き裂と腐食による断面欠損に対する適用検討を行ってきた。

●疲労き裂の補修②（番号は後ろに掲載の研究事例番号。以下同じ）

繰返し荷重を受けて疲労き裂が生じた時、CFRP の接着により、性能回復できるかどうかを検討してきた。最初の頃から着目して検討してきたが、以下では、恒久的な補修、つまり、CFRP 接着で本当に疲労き裂の進展を止められるかどうかについて紹介したい。

●圧縮力を受ける桁端部の柱部材の補修・補強③①

鋼桁の端部は、水が滞水しやすい環境で、腐食損傷の事例が多い。そこで、三面 CFRP 板と低弾性接着剤で欠損した端部部材に適用した事例、首都高速道路ほかとの共同研究により実施した事例です。あと CF シート接着による断面欠損した桁端柱部材の補修、真空含浸成形技術（バータム）を応用して実施した例である。この技術の適用性を検討したテーマも多いため、後ほど紹介したい。

●曲げモーメントを受ける部材の補修補強

CFRP 接着による曲げ補強、下面に接着したときに効果があるか、曲げせん断、ウェブに接着したときの性能回復や、CF シート接着による断面欠損した補剛材近傍の曲げ補強などの検討を行ってきた。これは、石油掘削のプラットフォーム（FPSO）で、中古のタンカーをベースとして使用するため、ドライドックでの補修ができず船上作業とせざるを得ないということを開発したものである。これも曲げ補強ができることを確認している。

●軸方向力を受ける鋼部材の補修

引張圧縮を受ける部材の断面欠損した部材の性能回復を確認した。

●繰返し弾塑性履歴を受ける鋼構造物の耐震補強

円形鋼製橋脚への適用、また座屈拘束ブレースを CFRP で作ると軽くて現場適用ができるものを開発している④。

またバータム技術については、国土交通省の建設技術開発助成を受け、平成 27 年～ 28 年の二年間で開発したので、これについても紹介したい①。

接着接合部の評価では、主に接着強度について、土木学会指針案では4つの評価法を示しているが、種々の応力状態の接着強度の特性について、簡易的な装置を学生と開発して評価したことなどを紹介したい⑤。接着接合部の疲労強度は、引張や曲げ応力を受ける鋼板、

CFRP や鋼板の種類や、接着剤によってどのように変わるか。統一的に評価できそうであることがわかってきた。

クリープ破壊については、どれぐらいの持続荷重で破壊するのかを検討している⑥。H 形鋼をシーソーのように先端に試験体を取り付け荷重がかかる装置を使い、荷重や温度を変えて、横軸を時間、縦軸をコンプライアンス（弾性係数の逆数）として評価した。現在、検討中であるが、20°C換算すると約 500 年の耐久性があることを示している。

研究事例①. FRP 部材による断面欠損した桁端柱の補修

研究事例②. ガセットプレート溶接部のき裂補修

研究事例③. 桁端柱部材の CFRP 板と低弾性接着剤による性能回復

研究事例④. CFRP 座屈拘束ブレース

研究事例⑤. 接着接合部の評価

研究事例⑥. 疲労強度について

（後半の個別研究事例紹介をご参照ください。）

■おわりに

最近、応急措置まで持てばよいか、次の五年間まで持てばよいといわれている。鋼構造物に対する要求性能が多様化しており、その中で CFRP 接着工法の適用範囲も拡大できるとよいと考えている。

研究開発が活発に行われ、マニュアル、指針も整備されてきたこともあり、少しずつ普及している感触は持っているが、一方、検討が不十分と感じるのは、設計・施工の妥当性の評価については、もう少し蓄積が必要と思われる。信頼性設計法として確立するためには、データを収集しなければならない。一つは試験結果と実構造物の対比で、部分安全係数の妥当性の検証で、どれだけの耐久性を確保できるかどうかなどが挙げられる。あるいははく離に対する検証法やはく離後の補修方法の確立なども必要と考えられる。

もう一つは、複合応力によるはく離の評価が難しいことを述べた。はく離は、主応力で評価することができることはわかっているが、実際の構造物のはく離挙動は示されていない。さらに、施工の合理化を考え、バータム技術に着目して CFRP 接着工法の適用性を検討してきた。その中でキーワードとしては CFRP を部材として捉えて立体化すると、現場でできることに非常にメリットがあって、高剛性化が容易になる。鋼材では作用応力を下げることが主目的であるため、このような検討は鋼部材の補修・補強で効果的であると考えられる。さらに、現在、開発を進めているが、RC 床版の補強に、FRP 部材を床版の下に配置して、鋼桁でそれを支える構造を検討している。FRP 部材を含めてもう少し幅広くとらえることより合理化できるのではないかと考えている。

本日の話題提供が、今後の検討の参考になれば幸いである。以上で、私からの話題提供を終わらせていただきたい。



【個別研究事例の紹介 概要】

◆研究事例① FRP 部材による断面欠損した桁端柱の補修

S12. 本事例は、シート接着による断面欠損した桁端柱の補修に関わる研究で、国土交通省の建設技術研究開発助成制度を受け実施した。「現場急速成形法と埋め込み型センシングを併用した FRP 部材による鋼構造物の補修補強技術の開発」で、豊橋技術科学大学、東京工業大学、土木研究所、東レとの共同研究により行った。研究の目的は、現場での CFRP 接着を狭い環境で急速施工でき、炭素繊維シートの多積層化と接着による鋼部材との一体化を合理的に実施するために、真空含浸法 (Vacuumed assisted Resin Transfer Molding, VaRTM) の技術を応用することとした。

S14. 従来の鋼部材の当て板による補強工法では、孔明けによるボルト締めや、溶接による接合のため、重機や特殊技術が必要で、施工が煩雑となる。また、孔明けや溶接により対象部材 (母材) をさらに傷めることに繋がる。これに対して CFRP 接着工法は、軽量でハンドリングがよい、母材に損傷を与えない、CFRP は耐腐食性が高いなどの特徴がある。一方、技術的課題として、平面な配置で剛性を得るには積層化が必要であること、部材間の不陸や連結部・溶接ビード部では炭素繊維シートによる接着とする必要があるが、1 枚毎の施工では効率が悪く、合理的でないことが挙げられる。そこで、多層の炭素繊維シートを 1 回で施工でき、さらに任意の形状に加工できる工法として提案した。

S15. 真空含浸工法は、大型の FRP 構造物を工場で一体成形する技術で、繊維体積含有率 Vf が約 50%で、安定した高い品質が得られる点に着目した。鋼部材の上にドライシートを重ね、この中に樹脂を流すための資材を入れ、表面をプラスチックフィルムでラッピングしてシール材で完全に密閉した状態とし、一方から樹脂を入れた管を入れ、他方を真空ポンプで真空引きすると、樹脂が内部に充填される仕組みである。これを現場に適用できるようにする技術を開発した。

S23. 検証実験では、鋼桁の端部で断面欠損した部位の性能回復に適用できるかどうかを検討し、実際に施工部位に樹脂が含浸されることを確認した。もう一つは、現場で炭素繊維シートを一枚一枚重ねるのは大変なため、プリフォームという、ドライの炭素繊維シートの状態で予め積層したものを用意し、それを現場へ持ち込んでラッピングするだけで簡略化するため、試作を行って開発した。鋼部材との接着接合部を評価するため、貼り付けた部材に対して引張試験を行って確認した。また、適切な表面処理等を実施して、通常の CFRP 接着と同様の結果で実施できることを確認した。

さらに、実構造物の桁端部には、アンカーボルトがあるため、それを回避しながら成形できるかどうかを確認した。シール材を使って縁を切り、そのまま全部をバギングすることで、樹脂が含浸できることを確認している。

S24. この VaRTM による施工手順は、①素地調整 (1 種ケレン相当) 後、プライマーを塗り、②炭素繊維シート、副資材を配置し、③バギングフィルムでラッピングし、④真空ポンプで真空引きする。この検討例では、経済的に (炭素繊維シートの数量を減らして) 剛性を上げ

るため、内部に硬質発泡ウレタンを入れて中空にすることとした。三角形の硬質発泡ウレタンを入れても十分にバギングすることができ、成形することができた。

S25. 性能回復を実験的に確認した。断面欠損を与えているものは耐荷力が低下し、欠損部で座屈するが、健全な試験体は、補剛材の中央付近が座屈する。積層した炭素繊維シートで接着したケース、三角形のリブとしたケース両方とも、健全体と同等の性能（耐荷力、破壊形式）であることを確認した。

S26. その他、施工方法の特徴を示すため、従来の鋼当て板工法、炭素繊維シート接着工法、提案する現場 VaRTM 工法のコスト、時間、工期などを比較して、優れた工法であることを確認した。冬季施工については、通常の一液性常温硬化型エポキシ樹脂接着剤を用いているため、10°Cで多少加温が必要であったが、可使時間（約 1 時間）以内に樹脂の含浸ができることを確認した。

◆研究事例② ガセットプレート溶接部の疲労き裂の補修

S33. 疲労き裂の補修への適用検討で、VaRTM 技術を用いて接着することで、例えば、鋼橋の補修への検討した事例である。典型的な溶接継手の一つである面外ガセットは、鋼橋では一般的な溶接継手であり、軸方向の繰返し応力により疲労き裂が発生する事例がある。この部位への補修への適用性を検討した。溶接継手試験体では、き裂発生箇所は両側に 2 箇所あるが、非着目側の溶接止端を仕上げて片側き裂のみとし、着目点から幅方向に 20 mm の貫通き裂を発生させた上で、CFRP 接着による補修を施して、疲労き裂が進展しないかどうかを検討した。

S34. 作用応力の軽減効果は、鋼母材と CFRP の剛性比で簡単に計算でき、図よりおよそ 50 層接着すると約 23%に下げられ、約 8 割の応力を低減することができる。

S35. 専門的となるが、き裂進展の限界値としての下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は日本鋼構造協会が 4.8 とされている。これを根拠に、作用応力（応力範囲）が 60~100MPa で、必要な炭素繊維シートの必要数量を求める。

応力拡大係数の低減効果は、FEM 解析により計算した。また、次に述べる簡便式との比較も行った。

S38. これは海外で提案されている簡便式で、き裂長さ（断面欠損）と公称応力の関係、CFRP の剛性の寄与、有限幅の補正で構成されている。それに基づけば、CFRP 接着による応力拡大係数の低減効果を簡単に計算できる。

S41. 例えば、応力範囲 60~100MPa で、 $\Delta K_{th}=4.8$ を満たすために必要な CFRP の積層数は 25~50 層となる。作用応力の応力範囲の大きさに応じて CFRP の積層数は変化する。

S42. 次に、50 層接着した場合、完全剛性断面として適切に応力を低減するための段差設計が必要である。FEM で検討した結果、接着長さを約 110mm とすれば、CFRP 端部の接着剤に生じる応力が十分低減できることを確認している。

S43. この検討例では、CFRP を 25 層とし、段差を設けた試験体を作製した。

S45. 疲労試験の結果は、縦軸が応力範囲、横軸が繰返し回数で示すと、無補強の場合、直線

関係となる。実験値として、80MPaで約10万回、60MPaで約20万回弱である。これは、き裂長さが20mmから破断までの繰返し回数である。一方、25層のCFRPで補修した場合、応力範囲が60、80MPaでは1000万回を超えても破壊しなかった。100MPaでは2000万回まで作用させても破壊しなかった。それ以上では、掴み部で破壊が生じたため実験を終了し、き裂が進展しないことを確認した。予想以上の効果があった理由として、樹脂を真空含浸するとき、き裂の中に樹脂が充填された可能性がある。き裂の内部に詰めものがあると、き裂の進展速度が低下することも研究でわかっているため、その効果もあることが示唆された。また、き裂が生じていた場合でも、き裂進展が非常に遅くなって、検出されていない可能性もある。引き続き検討する必要もあるが、研究目的である、き裂進展の防止を確認できたといえる。

◆研究事例③ 桁端柱部材のCFRP板と低弾性接着剤による性能回復

S48. 立体成形CFRPと低弾性接着剤の適用検討の例を紹介する。高速道路会社との共同開発で、短工期（一日）での施工をCFRP接着補修でできないかという現場での要求がモチベーションとなっている。

S50. 使用した接着剤は、MMA樹脂系接着剤と呼ばれている低弾性のアクリル系樹脂である。二液性接着剤をハンドガンのノズルから押し出すことで攪拌させ、接着する施工法である。接着剤は、ダレずに粘度が高いという特徴がある。空隙が多いことが懸念点であったが、物性値が安定していること、急速施工が可能であるため、検討した。

補修対象は鋼桁端部とし、断面欠損部は、補剛材の下端をテーパ状に切削加工して模擬した。解析モデルは、欠損部は細かく要素分割を行い、三面の立体CFRPはVaRTM成形により作製するもので、シェル要素でモデル化した。接着剤をばねでモデル化し、これを接着不良あり・なしで検討した。接着不良は、非破壊検査でチェックすると20%程度になる可能性があること、接着したCFRPを一度取り外してやり直すことを想定して、約40%の接着不良も検討した。

S61. 施工は、鋼桁端部に対して1種ケレン相当で下地処理した後、CFRPを接着し、クランプで固定する。接着不良は、一度無理やりはがして、再度押し付けることで再現した。接着不良の再現性は難しいが、あえて空隙を入れたケースとして比較することとした。概ね4割の空隙が入ることを非破壊検査で確認している。

S63. 検討結果は、無補強の耐力は、健全と比べて半分以下となる。これに対し、補強した場合、健全のケースとほぼ同程度に回復している。接着不良の有無で、両者はほぼ同じで、変わらなかった。接着不良ありでは、変位が若干伸びるが、耐荷力は改善されている。剛性も回復するため、十分対応できることがわかった。

S66. 破壊形式は、無補強では欠損部が壊れるが、補強の場合、補剛材の中央部で座屈しており、十分に回復することが確かめられた。

◆研究事例④ CFRP座屈拘束ブレース

S73. 繰返し荷重を受ける鋼部材の耐震補強の一例として、CFRP の座屈拘束ブレースの開発事例を紹介する。

S74. 座屈拘束ブレースは、例えば、アーチ橋、トラス橋の二次部材が橋軸直角方向に地震力を受けて座屈すると用をなさなくなるため、鋼製の座屈拘束ブレースを取付けることなどが行われ、耐震補強が行われている。鋼管状の部材の中にブレース材を、縁を切って通しておき、圧縮力を受けた場合、ブレース材が座屈して膨らむのを抑える構造である。既設部材に座屈拘束ブレースを設置するのは大変であるので、軽量化を検討した。座屈拘束ブレースを現場で容易に施工できるようにするため、軽量の CFRP の適用を検討するが、CFRP に対する設計法がない。本事例では簡便な方法として、まず既往の設計法に基づいて、鋼製の座屈拘束ブレースを設計し、鋼と同等の剛性を有する CFRP ブレース材を設計する方法とした。形状はリブ付きと箱形の 2 種類を検討した。

ブレース材は幅 60mm、板厚 6mm の鋼材とした。両端部の座屈を防止するため、補剛材を設置した。検討例では、鋼リブ付きを基本として、CFRP リブ付き、CFRP 箱形の 3 ケースについて、細長比と曲げ剛性が同程度になるように設計した。鋼リブ付きのケースは、アンボンド材としてゴムを入れて縁を切り、フィラープレートを入れてボルトで閉じるという構成とした。

S78. 鋼リブ付きと同じ剛性を持つように、2 種類の CFRP のケースを設計した。設計の考え方は、軸方向の CFRP で剛性を上げて曲げ剛性を付与すること、さらに 45 度方向にも CFRP を配置して、せん断方向に対しても寄与するように、鋼と同じせん断剛性を持つものとして CFRP を 45 度方向に積層している。

S81. CFRP 箱形は、合理化を図るため、内部に硬質発泡ウレタンを入れることで曲げ剛性を効率的に上げる方法を検討した。これらは VaRTM 成形により作製した。

繰返し荷重は、3%の塑性ひずみ、全体で 70%の累積塑性ひずみを目標値とし、最大相対変位では $\pm 17 \delta y$ 相当の圧縮・引張の作用とした。実験では、繰返し荷重に対して、十分に適用できることがわかった。

S86. 荷重と変位の関係では、鋼リブ付き、CFRP 箱形では、問題なく $\pm 17 \delta y$ まで作用させることができた。一方、CFRP リブ付きでは、 $6 \delta y$ の圧縮側で破壊した。破壊の状態を見から未含浸があり、重さが軽く試験体として良くない状態であった。また、重量比は鋼リブ付きに対して、設計では 1/6 であるが、計測では 1/7 であり、未含浸があったと考えられた。また、重量は数分の一に軽量化できることから、実構造物への適用にあたり重量の点から優位性が確認された。

◆研究事例⑤ 接着接合部の評価

S96. 最後のトピックとして、接着接合部の評価について紹介する。土木学会の指針では、設計に適用できる評価法を提案することを目指して、当て板の接着接合部における接着強度の評価方法案が示されている。設計照査に用いる指標は、エネルギー解放率、主応力としている。(ここでの詳細は割愛し、土木学会の指針案を参照していただきたい)

◆研究事例⑥ 接着接合部の疲労耐久性について

S128. 最後に、接着接合部の疲労耐久性について紹介する。接着接合部の疲労耐久性は、静的強度とともに、設計で重要な問題となる。検討では、引張力と曲げモーメントの作用に対して、接着剤や当て板の種類の影響を実験的に評価した。これらの作用に対して、CFRP 端部の接着剤の応力が高くなり、その主応力で評価することとした。既往の引張力の検討で、静的荷重で破壊する時の主応力に対する、主応力範囲の比率を表した S-N 線図から、概ね線形関係にあることが確認されている。それに対して、曲げ作用を受けたとき、片持ちりの端部に当て板を接着したとき、引張力の S-N 線図との比較を行った。

S134. 試験片（母材）は幅 75mm、板厚 22mm、当て板は厚さ 16mm で、静的試験、振動の曲げ疲労試験を行った。接着剤は二種類を実施し、凝集破壊、界面破壊が生じることを確認した。

S138. 疲労試験結果より、主応力範囲の比率で、3 割程度で約 1000 万回の疲労耐久性があること、実験データは 95%信頼性区間に概ね入ることを確認した。

S139. 界面破壊と凝集破壊を全て合わせて評価するとばらつきが大きくなるが、全体的には 95%信頼性区間に入るため、大きな問題はないと思われる。凝集破壊だけに絞るとばらつきが小さくなり、ある程度の範囲に収まる傾向がみられたことから、破壊形式については議論の余地も残された。また、引張作用を重ねると、曲げ作用とほぼ同様になる傾向もみられるので、曲げ作用、引張作用に関係なく評価できることも確認できた。

S145. 当て板の種類を、鋼板、CFRP で比較したところ、これらも先ほどの信頼性区間 95%以内にあるため、当て板の種類にも関係なく、評価できるといった。疲労限設計も可能であり、作用力を破壊時荷重の 2 割以下として、接着端部に作用する応力を限界値として設計をすれば疲労限設計が可能であるといった。

以上

【講演で紹介したスライド要旨】

【講演で紹介した文献情報】

1. 設計・施工に関する基準・指針、参考図書

- 1) 土木学会複合構造委員会：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，2012.6

<https://www.jsce.or.jp/publication/detail/detail.asp?id=2594> （目次情報）

- 2) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル，2013.10

<https://shop.ri-nexco.co.jp/item/363/> （目次情報）

- 3) 土木学会複合構造委員会：FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，複合構造レポート 09，2013.11

<https://www.jsce.or.jp/publication/detail/detail.asp?id=2698> （目次情報）

- https://doi.org/10.2208/jscejsee.70.II_120 (概要紹介)
- 4) 土木学会複合構造委員会：2014年制定 複合構造標準示方書，2015.5
<https://www.jsce.or.jp/publication/detail/detail.asp?id=2827> (目次情報)
https://doi.org/10.2208/jscejsee.72.II_156 (概要紹介)
- 5) 土木学会複合構造委員会：FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)，複合構造シリーズ09，2018.7
<https://www.jsce.or.jp/publication/detail/detail.asp?id=3077> (目次情報)
https://doi.org/10.2208/jscejsee.75.II_44 (概要紹介)

2. 研究事例の引用文献、報告書等

- 1) 中村一史，松本幸大，中村健太郎，水野洋輔，西崎到，越智寛，松井孝洋：現場急速成形法と埋込み型センシングを併用したFRP部材による鋼構造物の補修・補強技術の開発，国土交通省，建設技術研究開発費補助金総合研究報告書，43pages，2018.2
<https://www.mlit.go.jp/tec/gijutu/kaihatu/josei/170seika.pdf>
- 2) 小林洸貴，近藤諒翼，タイウイサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM成形を応用したCFRP部材による鋼桁端部の補強に関する研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.74，No.5，pp.II_44-II_55，2018.5
https://doi.org/10.2208/jscejsee.74.II_44
- 3) 松山晃大，佐藤潤，タイウイサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM成形を応用したCFRP部材による圧縮力を受ける鋼部材の補修・補強に関する研究，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.74，No.5，pp.II_67-II_80，2018.5
https://doi.org/10.2208/jscejsee.74.II_67
- 4) Visal Thay, Takumi Ozawa, Hitoshi Nakamura and Takahiro Matsui: Permanent Repair of Fatigue Cracks of Welded Gussset Joints by Externally Bonded Carbon Fiber Sheets Using VARTM Technique, JSCE, The 13th Symposium on Research and Application of Hybrid and Composite Structures, pp.268-276, Nov. 2019.
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00023/2019/13-0268.pdf>
- 5) タイウイサル，小沢拓弥，譚暢，中村一史，松井孝洋：積層した炭素繊維シートのVaRTM成形・接着による面外ガセット溶接継手の疲労耐久性の向上，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第27巻，第105号，pp.29-41，2020.3
https://doi.org/10.11273/jssc.27.105_29
- 6) 今井貴也，中村一史，平野秀一，増井隆，上條崇，政門哲夫，鈴木啓之，中川健太：断面欠損した鋼桁端柱部材のCFRP板と低弾性接着剤による性能回復に関する検討，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，複合構造論文集第6巻，75巻，5号，pp.II_6-II_18，2019.5
https://doi.org/10.2208/jscejsee.75.II_6
- 7) 手塚理史，中村一史，松井孝洋：CFRP座屈拘束ブレースの作製と繰返し載荷実験，

第 10 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2024. 11

- 8) タイウイスル, 中村一史, 林帆, 堀井久一: 当て板がエポキシ樹脂で接着された鋼板の接着接合部の疲労強度の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 74, No. 5, pp. II_56-II_66, 2018. 5
https://doi.org/10.2208/jscejsee.74.II_56
- 9) 高橋京祐, 中村一史, タイウイスル, 堀井久一: 当て板と鋼板の接着接合部の疲労強度とはく離進展特性に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1, 特集号 (複合構造) 論文, 79 巻, 14 号, 22-14002, 2023. 5
<https://doi.org/10.2208/jscej.22-14002>
- 10) 高橋京祐, 中村一史, タイウイスル, 松井孝洋, 堀井久一: 当て板と鋼板の接着接合部の曲げ疲労強度と疲労耐久性の評価, 土木学会論文集 A1, 特集号 (複合構造) 報告, 80 巻, 14 号, 23-14013, 2023. 5
<https://doi.org/10.2208/jscej.23-14013>