

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書【概要版】

- (1) 課 題 名：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
- (2) 研 究 期 間：平成 27～28 年度
- (3) 交 付 申 請 者 名：中村 一史（首都大学東京・准教授）
- (4) 研 究 代 表 者 名：中村 一史（首都大学東京・准教授）
- (5) 共 同 研 究 者 名：松本 幸大（豊橋技術科学大学・准教授）
中村 健太郎（東京工業大学・教授）
水野 洋輔（東京工業大学・助教）
西崎 到（土木研究所・上席研究員）
越智 寛（東レ株式会社・主席部員）
松井 孝洋（東レ株式会社・主任部員）
- (6) 補助金交付総額：39,930,000 円

(7) 技術研究開発の目的

本研究開発では、現場における狭隘な作業環境下で FRP 部材の現場急速成形（以下、VaRTM 成形とよぶ）を可能とし、FRP 部材と鋼部材を合理的に一体化できる成形・接合技術を開発する。さらに、対策後の定期点検等の維持管理業務を軽減するために、FRP 部材にプラスチック光ファイバ（POF）センサを埋め込み、健全度診断のためのモニタリング技術を開発する。

提案工法の妥当性、有用性については、断面欠損を模擬した鋼構造物の部分・縮小模型による載荷実験、および、実構造物への試験施工を実施して、現場での施工性、補修効果、健全度診断の適用性を実験的に検証する。

本研究開発課題は、5つの個別研究開発項目からなり、それぞれの開発目標を以下に示す。

- 1) 狭隘かつ外気温下の建設現場でも高剛性・高品質の FRP 補強材を急速に成形できる VaRTM 成形のプロセス基本条件・施工法を開発し、かつ VaRTM 補強材に特化したプリフォーム基材の標準仕様を決定する。
- 2) 腐食鋼材表面と急速含浸接着された FRP 材との接合強度を評価し、設計用値を定めるとともに、曝露・複合サイクル試験と光ファイバセンシング技術により耐久性を実証する技術を開発する。
- 3) POF の鋼構造物への埋込み法の開発と、POF を用いたのひずみセンシング技術（全長型・分布型）の開発、および、実証実験を目的とする。
- 4) 断面欠損を模擬した鋼構造物の部分・縮小模型に提案工法を適用して、載荷実験を実施することで、竣工時の初期性能の回復に必要な補強用 FRP 部材の設計法および POF センサの実装方法を提案する。
- 5) 実構造物を対象とした試験施工を実施して、施工性、補修効果、費用対効果、健全性診断に着目して、提案工法の妥当性、有用性を検証する。

(8) 技術研究開発の内容と成果

1) 現場に適用可能な VaRTM 成形技術の開発

施工技術の構築のために、接着層と被接着面間の樹脂流動の状況と、樹脂注入中および養生中のエア混入したときの影響を確認した。密封状態の維持が重要であること、真空度の違いは影響しないことがわかった。また、エア混入が接着層、CFRP 層の品位低下に影響を及ぼすことを確認できた。

また、確実な含浸を得るために、接着層に着目し、接着層用基材の種類（サーフェスマット、チョップドストランドマット、PP メッシュシート）、寸法、樹脂の事前塗布の影響評価を実施した。接着層用基材を樹脂注入・吸入側の側面部から 1~2cm 程はみ出させることで、樹脂を確実に接着層まで流動させ、安定した接着性を確保できることを確認した。さらに樹脂流動面積が一番大きい PP メッシュシートを用いることが最も接着強度を発揮させることを確認した。なお、基材の採用は耐久性などを見た上で確認した上で接着層用基材の選定を行う必要がある。

省力可能なプリフォーム (PF) 基材の開発について、PF 試作機を導入し、現場での積層手間を省き、かつ立体補強材の形成を容易に可能とする L 型 PF 基材の開発に着手した。同時に、PF 補強材に適用する熱可塑性材をまぶした補修補強用炭素繊維シートを開発した。そして、L 型 PF 基材を実験的に作るまで実施することができた。

前項で選定した素材による FRP 部材の耐久性評価のために、これを用いた VaRTM 成形 CFRP について、劣化試験（促進耐候性試験、複合腐食サイクル試験）を実施し、耐候性および耐食性を評価した。力学物性は、初期に比べて若干低下するケースが認められたが、大きな変化は観察されなかったが、水中浸せき試験からは、使用した樹脂の 1 種類について、樹脂脱落を疑わせる兆候を認めたことから、より耐久性に優れた樹脂選択の基礎資料を得た。

2) 接合部の安全性・耐久性に関する検討

二面せん断ダブルストラップ形式の引張せん断試験および三点曲げ試験により評価を行った。その結果、接着強度の向上と樹脂の流動性を考慮して、鋼材界面となる層にチョップドストランドガラスマットを配することが、接着強度向上にも大きく寄与することを明らかとした。引張せん断試験では、鋼材と CFRP との軸剛性が 1:2 となる積層数とし、引張せん断強度が 20MPa 程度期待できることを示した。また、成形接着前に樹脂の下塗りを行った試験体の方が平均せん断強度は高く、安定した結果を得た。三点曲げ試験による CFRP の面外ピール強度に対する検討では、定着長および積層数を試験変数として実施し、有限要素解析を併用して各試験体のピール応力を算出し、耐力と破壊モードについての分析を行った。その結果、ピール応力が約 20~25MPa の範囲で CFRP 端部のはく離が生じること、それを下回るような定着長とすることで CFRP の材料破壊を発現できることが明らかとなった。さらに、三点曲げ試験体の CFRP 内部に FBG 型光ファイバセンサを埋設し、内部の局所的な引張ひずみに起因すると考えられる残留ひずみが検出され、負荷後に内部損傷の兆候を検出することができることを実証した。

さらに、VaRTM 成形による鋼部材補強工法の耐久性を、より実際に近い形で評価し、また耐久性に優れたものに改良していくために、腐食した鋼板供試体への素地調整方法、端部の処理方法、成形樹脂の種類について検討を行った。腐食した鋼板供試体は、複合腐食サイクル試験で腐食させることで作製し、スクラッチを入れた部分から顕著な腐食が発生している状態となっている。この腐食部分について、VaRTM 成形法によって CFRP 補強供試体を作製した。その後、再び、複合腐食サイクル試験を実施した。一定時間の試験後に供試体を回収し、外観観察およびプルオフ式付着力試験により評価を行った。その結果、複合腐食サイクル試験 402 サイクルで回収した供試体の観察からは、端部などを含めて、腐食進行などの変化は特に認められなかった。また、プルオフ式付着力試験より、鋼材面の腐食の新たな発生は認められず、選定された含浸接着樹脂 (AUP40) では、良好な付着力が得られることが確認された。

3) 光ファイバセンサによる健全性診断技術の開発

補強材に埋め込んだ光ファイバによる健全性診断技術を開発した。まず、VaRTM 成形中にガラス光ファイバや POF を埋め込む技術を確立した。樹脂硬化の過程で光ファイバは破断せず、圧縮効果による光の伝搬損失の増大は無視できるほど小さいことや、光ファイバの取り出し口には数 10cm 以上の余裕を設けることで測定系との接続が容易になることなどが明らかになった。次に、POF を 1 秒以内の短時間で CFRP 表面に固定する技術を確立した。これにより、VaRTM 成形の樹脂流入の過程で POF が初期配置から移動してしまうことを容易に防ぐことができる。さらに、埋め込んだ光ファイバを用いて、補強材のひずみ分布や損失箇所を測定する技術を確立した。傾斜利用光相関領域反射計 (BOCDR) という最新のひずみ分布測定法を適用し、CFRP 層のはく離の過程をモニタリングすることに成功した。最後に、光ファイバの破断箇所を赤外線放射温度計によりリアルタイムに検出する技術を確立した。伝搬光が熱に変換されることを利用した技術であり、低コストである上、動作原理が極めて分かりやすく、現場適用に適していると考えられる。

4) 断面欠損を模擬した鋼桁端部への適用検討

VaRTM 成形を応用した CFRP 接着による補修・補強工法の妥当性・有用性を検証するために、次の 3 つ観点から検討を行った。

まず、鋼桁橋における桁端の腐食を模擬した試験体を用い、VaRTM 成形で CFRP を断面欠損部に接着することで、性能回復を検証した。実験では、断面欠損部の形状・欠損率、不陸修正の有無、CFRP の種類・接着範囲・形状、プリフォーム (PF) 材の有無をパラメータとして、検討した結果、100% の断面欠損に対しても、欠損部に PF 材を充填して補修すれば、初期性能まで回復することが確かめられた。

次に、鋼板の座屈への適用性を把握することを目的として、VaRTM 成形で CFRP を接着した鋼板の座屈荷重の予測を試みた。その結果、炭素繊維シートを最大 20 層まで積層した試験体の座屈荷重は、10% 以下の精度で予測できることが示された。

さらに、桁端ウェブパネルのせん断座屈に対する補強を目的として、炭素繊維シートをウェブに設置する最適な条件を解析的に検討した。炭素繊維シートの接着範囲、配向角度、PF 材の適用とその範囲をパラメータとして、複合非線形解析を行った。その結果、CFRP 部材の設置は、ウェブの引張側で有効であること、また、適切な配置により、より合理的な対策となることが確かめられた。

5) 試験施工による検証実験

鋼桁断面欠損部の補修対策工事に関する比較調査より、提案工法の特徴、具体的な工期・コストを明確することができた。例えば、工期の観点では、提案工法が最も優れること、作業性、既設部材への影響については、炭素繊維シート接着工法と同等で、鋼当板高力ボルト接合工法よりも優れることがわかり、総合評価でも提案工法が最も優位であることが示された。ただし、維持管理の点検方法が確立されておらず、今後の検討によっては、さらにコスト削減の余地があるといえた。

VaRTM 成形による CFRP 接着工法の既設鋼桁への試験施工では、気温 9℃ の冬季に、実大橋梁鋼桁に対して、桁端部補修および補剛材設置の 2 種類の施工を実施した。その結果、作業姿勢として、施工位置はちょうど人の高さと同程度であったこともあり、施工効率はラボベースと大差はなく、施工は低温下でも問題なく実施できること、また、PF 材の適用より、施工時間が大幅に短縮されることが確かめられた。しかし、低温下での加温方法やシーラントテープの貼る場所等の課題が明らかとなった。これらの課題は、実現性を妨げるものではなく、改良と対策によって十分に対処できるといえた。

これらの検討結果から、提案工法の現場施工に対する妥当性と有用性が示された。

(9) 論文発表等に関する件数

原著論文 (査読あり)	原著論文 (査読なし)	原著論文以外 (新聞・雑誌等)	その他 (パネル・ポスター等)	合計
7件(うち1件 は投稿中)	15件(うち6 件は投稿中)	0件	1件	23件

(10) 知的財産権に関する件数

特許権 (取得)	特許権 (出願)	その他 (実用新案・商標等)	合計
0件	1件	0件	1件

(11) 成果の実用化の見通し

2年間の研究開発期間が終了した現時点で、実用化の見通しは、概ね得られたと判断された。その理由と実用化へ向けた課題は次の通り。

①VaRTM成形による接着接合の開発と施工品質の確保

VaRTM成形時に、鋼材との接合面にガラスマット基材をはみ出して、樹脂吸引層部を設けることで、安定した接着強度を確保できること、施工品質も向上することが確かめられ、VaRTM成形による接合技術を確立した。

②VaRTM成形した補強材料の長期耐久性の検証

成形に適した樹脂を用いて VaRTM 成形された CFRP、および腐食し断面欠損した鋼板を VaRTM 成形により補修した鋼板について、促進耐候性試験、複合腐食サイクル試験を実施した。若干、強度低下の傾向がみられたものの、大きな変化ではないことを確認した。長期耐久性に関して、今後も継続して検討を行う予定である。

③センサの埋め込み技術の開発状況と課題

傾斜利用 BOCDR を用いた補強材のひずみ分布の測定は、大変有用であることが明らかになったが、現時点ではシステムのコスト低減および小型化が課題である。これは、汎用測定機の組み合わせではなく、専用処理系を実現すれば実現可能である。しかし、そのための装置開発には時間と費用がかかるため、本研究の期間内に行うのは困難であった(本研究では、原理・装置構成の考案と動作条件の追究等に集中した)。専用装置化は今後の課題であり、これが達成されたのちに実用化が進むと期待される。赤外線放射温度計を用いた光ファイバの破断箇所検出技術は、低コストかつリアルタイムで動作するため、現場適用に極めて近い位置にいると考えられる。今後は、本技術の存在を各方面にアピールし、現場適用を推進していきたい。

④断面欠損を有する鋼桁端部への適用性

断面欠損に対して、等価な剛性の CFRP を VaRTM 成形により接着することで、鋼桁端部の性能回復を実験的に検証できた。孔食などで、100%断面欠損した場合においても、予め積層加工したプリフォーム材を適用することで、十分な性能回復と施工の合理化が可能となることを確認した。これらのことから、実用性は十分にあると判断された。今後の課題としては、実用性を妨げる問題ではないが、プリフォーム材を実構造や実際の腐食形状へ適用する場合、施工方法等を確認する必要がある。

⑤VaRTM成形による現場施工と積層作業の効率化

最も厳しい冬季施工の条件で、試験施工を行った結果、気温 9℃においても施工できることが確かめられた。また、積層作業の効率化を図るために、予め CF シートを束ねた PF 基材を開発して実装したところ、施工作業の効率化に大きく貢献することがわかり、工期短縮と工費の縮減に寄与することが確かめられた。

(12) その他

2年間の研究開発によって、実用化の目途がついたところであり、今後、試験施工を増やして、実用化を図る予定である。

光ファイバセンサによる健全性診断技術の開発については、研究期間の前半は現場での手荒な扱いに堪えうる POF を中心に研究を進めていたが、ガラス光ファイバの方が信号の質

が優れているため、後半は専らガラス光ファイバを中心に高度な測定法を適用しつつ研究を進めた。今後は、ガラス光ファイバで培った知見を活用しつつ、POFの適用も推進していきたい。

本研究課題の研究グループと今後も継続して、研究開発に取り組む予定であり、本格的な実用化に向けて、新技術情報提供システム（NETIS）への登録や、材料メーカー、設計・施工会社を交えた技術研究会の発足を検討する。