

様式第 11 別紙 2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

- (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

i) 施工技術の構築

VaRTM 工法によって形成された CFRP による補強効果を発揮させるためには、接着層に樹脂が確実に回りこむことが重要である。また、これまでの実験では、成形中もしくは養生中にエアが混入したために、CFRP の浮きが確認された。そこで、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試験にて確認した。影響確認の試験水準を表-1.1 に示す。

表-1.1 試験水準

試験体名	CFシート	積層数	接着層	真空度 (kPa)	初期樹脂塗布	備考
N100-NR	UT70-30G	5	なし	-100	なし	
SM100-NR			サーフェスマット	-100		
GM100-NR			GFマット	-100		
GM100-PR			GFマット	-100	あり	
GM090-NR			GFマット	-90~95		
GM100-NR-A			GFマット	-100	なし	注入時エア混入→封鎖
GM100-NR-CA			GFマット	-100		養生中エア混入→封鎖

試験体は、接着面の樹脂流動状況および樹脂効果後の状態を目視確認できるように、アクリル平板の上に VaRTM 成形することとした。まず、初期樹脂塗布の影響を確認する試験体では、接着層を置く前に約 $100\text{g}/\text{m}^2$ となる樹脂を、中央部から基材端 1cm 付近まで満遍なく塗布した後に VaRTM 成形することとした。次に、真空度の影響を確認する試験体では、バギング時に真空度を計測し、 $-90\sim-95\text{kPa}$ 程度になったところで、吸引側パイプをバイスで締め、真空度が下がらないことを確認し、この状態で樹脂注入を開始することとした。

一方、樹脂注入時エアを混入する試験水準では、メディアの端に樹脂が到達した時点で樹脂注入側のフィルム表面に針で穴を開け、エアを故意に混入し、3分後に穴をシーラントテープで塞ぐことで再現した。養生中にエアが混入する試験水準では、注入側パイプ付近のフィルムに針で穴を開け、そのまま樹脂が硬化するまで養生することとした。

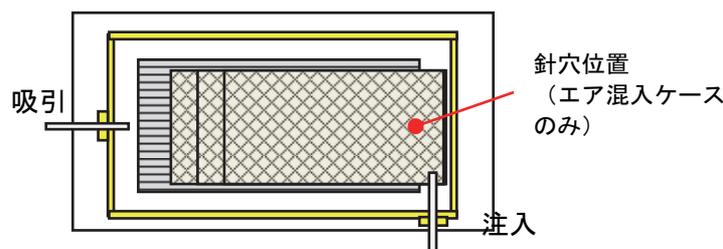
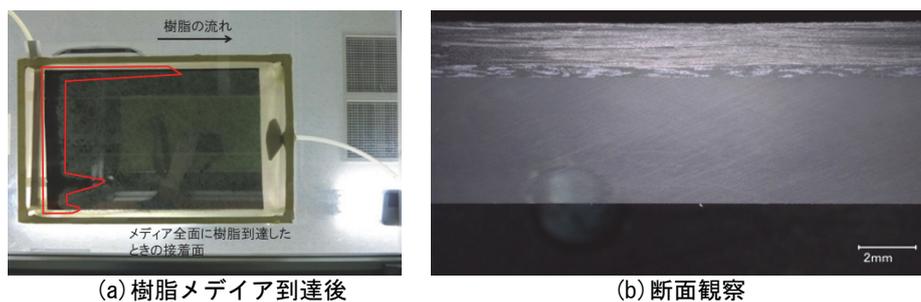


図-1.1 試験体図

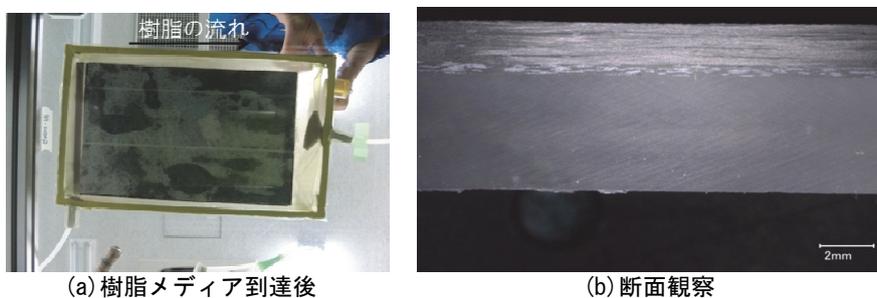
試験体 N100-NR、SM100-NR、GM100-NR の状況を図-1.2 に示す。はじめに、CF シート表面に設置した樹脂流動基材であるメディアに一気に流れ、後を追いかけるかのように樹脂が下へしみ込み、かつ徐々に接着層に樹脂が注入側から吸引側に向かって流れていくことが確認された。ただし、3 水準の違いは明確に確認できなかった。また、断面観察においても、いずれの試験体中にはエア起因によるボイドは確認されなかった。差異が明確でなかった理由として、CF シートが 5 層程度となる厚み (合計 $1500\text{g}/\text{m}^2$) ではその差異が現れなかったものと推察する。



(a) 樹脂メディア到達後 (b) 断面観察

図-1.2 試験体 GM100-NR の状況

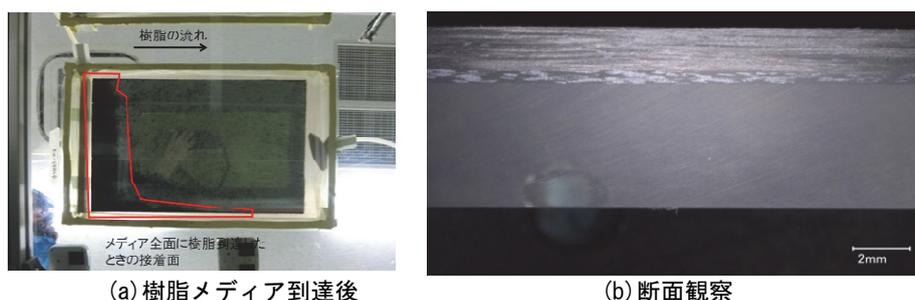
次に、試験体 GM100-PR の状況を図-1.3 に示す。樹脂を事前塗布したため、樹脂注入時の初期の段階で接着層全体に樹脂が染み渡っているのが確認された。CF 全体に樹脂が染み渡った時点では、樹脂事前塗布のありなしの差は見られなかった。また、断面観察においても、エア起因によるボイドは確認されなかった。



(a) 樹脂メディア到達後 (b) 断面観察

図-3 試験体 GM100-PR の状況

試験体 GM090-NR の状況を図-1.4 に示す。真空度が -90kPa 程度の状態で、樹脂注入、吸引側のパイプを締め切り、真空度が維持され、かつエア漏れが生じていないことを確認したところで、樹脂を注入した。その結果、樹脂の流動、断面観察結果も前述の水準と差はなかった。つまり、真空度 -90kPa でも、フィルムで確実に密封されていれば、高い品質での VaRTM 補強が可能である。



(a) 樹脂メディア到達後 (b) 断面観察

図-1.4 試験体 GM090-NR の状況

試験体 GM100-NR-A の状況を図-1.5 に示す。エア混入 1 分後に穴を封印したが、いったん入ったエアは接着層に残った。さらに接着層のボイド部の断面観察の結果、多くのボイド（エア）が残置していることが確認された。つまり、成形中のエア混入は、CFRP の品質だけでなく、CFRP と鋼材の接着に影響を及ぼすことを確認できた。エア混入しないようにすることが重要であるが、万一入った場合は早急に発生源を特定し、封印することが重要である。

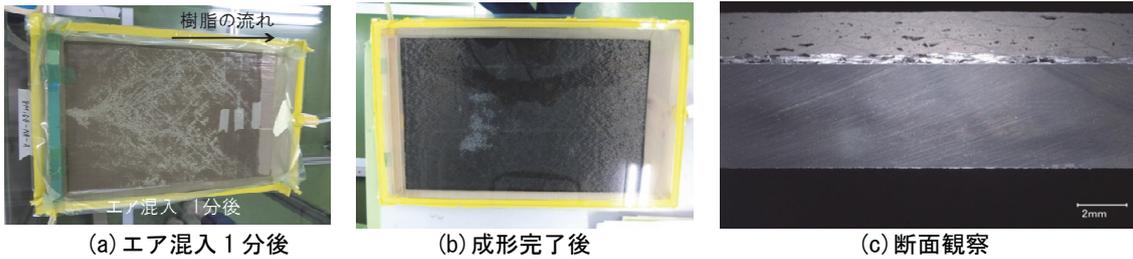


図-1.5 試験体 GM100-NR-A の状況

試験体 GM100-NR-CA の状況を図-1.6 に示す。養生中にエアを混入させ、そのまま養生した結果、成形中のエア混入同様に CFRP 層と接着層中にボイドが確認された。また、接着層については CFRP の端部にボイドが残ることが確認された。



図-1.6 試験体 GM100-NR-CA の状況

以上の結果から次のことがいえた。

- ① 5層程度の厚み（CF 設計厚 1mm）では、吸引層はなくても、樹脂層まで樹脂が届いている。接着層の有無、違いについて明確な差はなかった。
- ② 空度が十分でなくても（今回は-90kPa 程度）、成形中にエア混入がなければ、接着層にエアが混入することはなかった。
- ③ 成形中、養生中にエアが混入すると、接着層や CFRP 層内にエアが残留することが確認された。特に、成形中のエア混入は、補強材中央部にエアが多数残留する恐れがある。

次に、接着層に着目し、接着層用基材の種類、接着層用基材の寸法、樹脂の事前塗布の影響を見るため、各々の接着強度を比較評価した。なお、接着層用基材は、ガラス繊維ベースで繊維目付け量や基材形態が異なる、サーフェスマットとチョップドストランドマットを、また、ポリプロピレンベースでのメッシュシートを用いた。接着層用基材の寸法は、CF シートと同じ長さとしたものと、安定した吸引を確実なものとするために CF シートより両端 2cm はみ出したものの、2種類とした。評価は、接着剤の水平方向力（せん断力）を検証する引張せん断接着試験（図-1.7、図-1.8）と、接着剤の垂直方向力（ピール力）を検証する建研式接着試験法（図-1.9、図-1.10）の2つの方法を用いた。

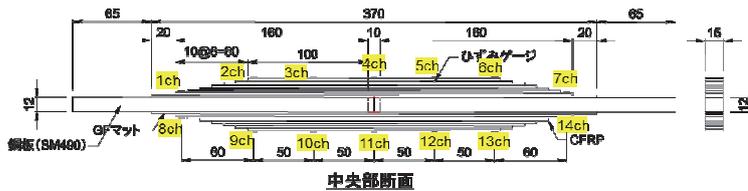


図-1.7 引張せん断接着試験体



図-1.8 試験状況

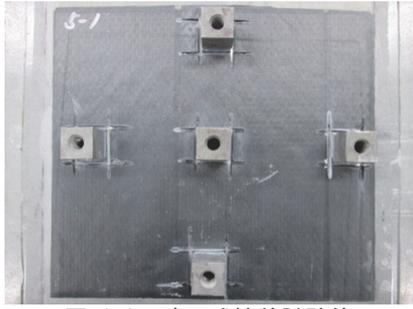


図-1.9 建研式接着試験体



図-1.10 建研式接着試験機

試験の結果を、表-1.2 に示す。また、引張せん断接着試験の一例として、水準 4-1 の断面観察試験を図-1.11 に、試験の破壊状態を図-1.12 に示す。

表-1.2 接着試験結果一覧

水準	仕様			引張せん断接着強度(N/mm ²)					建研式接着強度(N/mm ²)					備考
	接着層基材	基材範囲	備考	CFシート	樹脂	AVE.	STDEV.	C.V.(%)	CFシート	樹脂	AVE.	STDEV.	C.V.(%)	
1-1	ガラスマット	接着層長さがCFと同じ		UM46-40 × 7層	AUP40	17.2	0.76	4.4	UT70-30G × 5層	AUP40	5.4	1.7	31.5	
1-2	サーフスマット	接着層長さがCFと同じ		UM46-40 × 7層	AUP40	20.2	1.20	5.9	UT70-30G × 5層	AUP40	2.9	0.3	10.3	
2-1	ガラスマット	接着層長さがCFより長め		UM46-40 × 7層	AUP40	18.3	0.57	3.1	UT70-30G × 5層	AUP40	6.2	1.4	22.6	
2-2	ガラスマット	接着層長さがCFより長め	事前塗布・未硬化	UM46-40 × 7層	AUP40	19.0	0.45	2.4	UT70-30G × 5層	AUP40	9.2	1.1	12.0	
3-1	ガラスマット	接着層長さがCFより長め							UT70-30G × 5層	AUP40T1	6.5	0.9	13.8	未実施
3-2	ガラスマット	接着層長さがCFより長め		UM46-40 × 7層	AUP40T1	16.2	0.96	5.9	UT70-30G × 5層	AUP40T1	8.2	0.9	11.0	DL試験:A面でF7漏れ
4-1	メデイア	接着層長さがCFより長め		UM46-40 × 7層	AUP40	22.2	0.44	2.0	UT70-30G × 5層	AUP40	7.0	1.2	17.1	
4-2	メデイア	接着層長さがCFより長め							UT70-30G × 5層	AUP40	7.6	1.4	18.4	未実施
5-1	ガラスマット	接着層長さがCFより長め	事前塗布・硬化	UM46-40 × 7層	AUP40	18.6	0.44	2.3	UT70-30G × 5層	AUP40	7.2	0.2	2.8	

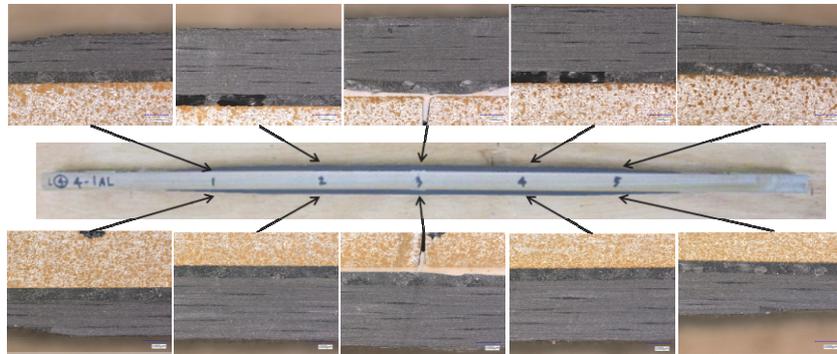


図-1.11 試験体の断面観察



図-1.12 試験後の破壊状態

評価の結果、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。また、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。事前塗布すると若干接着強度は上がるものの、硬化・未硬化の差異はなかった。今後は、耐久性評価結果を確認した上で接着層用基材の選定を行う必要がある。

ii) 省力可能なプリフォーム（PF）基材の開発

VaRTM 成形による補修補強工法は、多積層に積み重ねた炭素繊維一度に多積層の樹脂注入・補強が可能のため、工期の大幅な短縮が期待できる。しかしながら、VaRTM 工法は、現場での基材積層作業は非常に手間がかかったり、かつ作業中に基材がずれたりすることによって施工性の悪化や補強品位の低下が懸念される。また、鋼構造を効率的に補強するには、炭素繊維シートのように平板形状ではなく、剛性（断面 2 次モーメント）で有利となる L 型や T 型等の立体形状をなす CF 補強材による補強が合理的であると考えられる。すなわち、既に積層・形態付与されている PF 補強材を VaRTM 工法に適用することで、現場での作業性の向上および合理的な補強を実現することが可能となる。

そこで本検討では、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し、かつ検討が容易でかつ組合せが容易な L 型 PF 基材の開発を実施した。

①PF 補強材の試作機の導入

PF 補強材を機械的に試作するために、装置を設計し、導入した（図-1.13）。また、連続して L 型の断面形状を作るために、加熱部と冷却部を要するプレスユニットと連結できる PF 試作用金型も同時に導入した（図-1.14）。

この試作機で製作可能な L 型 PF 補強材の仕様は、L-100×100、最大積層は 9 層である。使用できる炭素繊維シートは、幅 25cm、50m 巻きのものである。なお、PF 補強材の長さ制限はないが、要求に応じてカットできるようにした。



図-1.13 PF 試作機



図-1.14 L 型の金型

②PF 補強材用炭素繊維シートの検討

L 型 PF 補強材は、炭素繊維シートの積層体となる。しかしながら、炭素繊維は無機繊維であり、炭素繊維自身の接着性は全くないため、炭素繊維シートを積層しても一体化はできず、形状も保持できない。そこで、炭素繊維シート同士を仮固定（接着）するとともに、PF 後も形状を保持できる PF 補強材用炭素繊維シートの開発を実施した。

PF 補強材で用いる炭素繊維シートは、RC 構造物の補強で用いられている一方向炭素繊維シートとした。また、シート間の付着特性を付与するために、熱で熔融し、付着する熱可塑性樹脂材に着目し、それを粒子状に加工した、熱可塑性粒子材をシート表面に散布した粒子付 PF 補強材用炭素繊維シートを開発した（図-1.15）。

これを使って PF 補強材の試作検討を実施したところ、一方向材だけで積層すると L 型形状が保持しにくいことが、課題として挙げられた。

そこで、この課題を解決するために繊維直角方向の剛性を付与するために、粒子付二方向炭素繊維シートを開発した。これを PF 補強材の積層中に少なくとも 1 層挿入することで、L 型の断面形状を長手方向に向かって保持できることがわかった。

つまり、PF 補強材には、一方向炭素繊維シートと二方向炭素繊維シートの 2 種類が少なくとも必要であることがわかった。

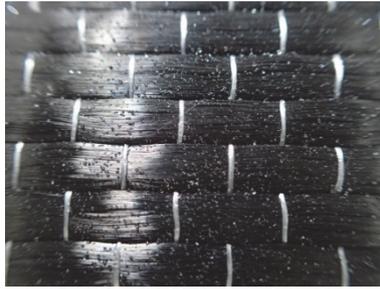


図-1.15 粒子付補強用炭素繊維シート

③PF 補強材の試作結果と今後の課題

上述の2種類の粒子付炭素繊維シートを原材料に、今回新規導入したL型PF基材試作機を使って、L型PF基材を実験的に試作した。

所定の粒子付炭素繊維シートをシートラックに置いた後に、重ねたシート端部をL型PF試作機の金型入り口に向かって引き取りをさせた。金型入り口にシートを送りこんだ後には、加熱と冷却による間欠プレスでL型形状を形成させ、金型出口からL型PF補強材が送り出された(図-1.16)。そして、設計通りL型PF補強材を作ることができた(図-1.17)。

今後の検討について、PF補強材を連続して作っていくために、温度と時間、引き取り速度と時間の関係を明らかにし、連続的に製造できる生産技術検討の確立とPF補強材の普及が課題となる。

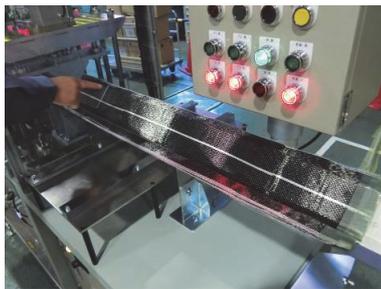


図-1.16 PFの試作状況

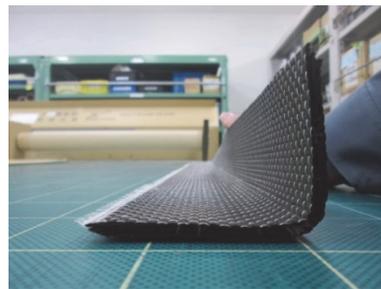


図-1.17 L型PF基材

iii) VaRTM成形CFRPの耐久性の評価

前項での検討によりVaRTM成形に適していることが明らかとなった、VaRTM成形されたFRP部材の環境中における耐久性(材料劣化特性)の評価試験を実施した。

①供試体と物性試験の方法

前項の検討でVaRTM成形に適しているとされた2種類のマトリックス樹脂(AUP40およびE206)を用いたCFRPとした。また、形状は、評価試験方法にあわせて、①引張試験用(300×89mm)、②圧縮試験用(150×70mm)、③層間せん断試験用(65×32mm)の3種類とし、各7枚を製作した。厚さは約3mmとした。力学物性試験は各供試体からクーポン片を切り出して、JIS K 7165、JIS K 7076、JIS K 7078により行った。

②耐久性の評価試験の方法

a) 促進耐候性試験

前項の供試体のうち各4枚(引張試験用は各3枚)について、キセノンウェザーメータを用いた促進耐候性試験を実施した。120分中に18分散水するサイクルを用いた。また、光沢の多い面(通常は鋼材に接する面)を、直接光の当たらない向きに試験を実施した。

促進耐候性試験2220時間および4991時間に、1セットずつ供試体を回収し、物性評価試験に供した。

b) 複合腐食サイクル試験

前項の供試体のうち各3枚を、複合腐食サイクル試験機による劣化試験に供した。試験条件は、JIS K 5600-7-9 : 2006 「塗料一般試験方法—第7部：塗膜の長期耐久性—第9節：サイクル腐食試験方法—塩水噴霧/乾燥/湿潤」 附属書1に規定されるサイクルDに準拠した(1サイクル6時間)。4440時間(733サイクル)で供試体を全て取り出し、1セットについては力学物性試験を実施した。また、残りは長期耐久性を評価するための屋外暴露試験に供した。

c) 水中浸せき試験

VaRTM成形に適した樹脂を用いたCFRPの長期安定性を調べるために、促進耐候性試験(2220時間)を終了した供試体の一部を用いて、40℃水中への浸せき試験を実施し、質量変化を計測した。比較対象として未劣化のものについても試験を実施した。

④ 外観観察の結果

劣化試験後の外観を目視およびレーザー顕微鏡で観察した。複合サイクル試験後の外観には特に変化は認められなかった。促進耐候性試験後の供試体は、表面の樹脂が脱落し、補強繊維が露出している状態である事を確認した。実際の適用にあたっては、保護のための表面被覆が必要であると考えられる。

⑤ 力学物性試験および水中浸せき試験の結果

力学物性試験の結果を図-1.18~1.21に示す。多少のばらつきは認められるものの、顕著な物性の変化は、複合腐食サイクル試験4400時間および促進耐候性試験4991時間では認められなかった。促進耐候性試験で照射される紫外線量は、通常の外環境の10年以上に相当すると考えられること、および今回の試験がCFRPを保護する表面保護層無しで実施していることなどから、CFRP自体の環境耐久性は非常に優れていると判断できる。

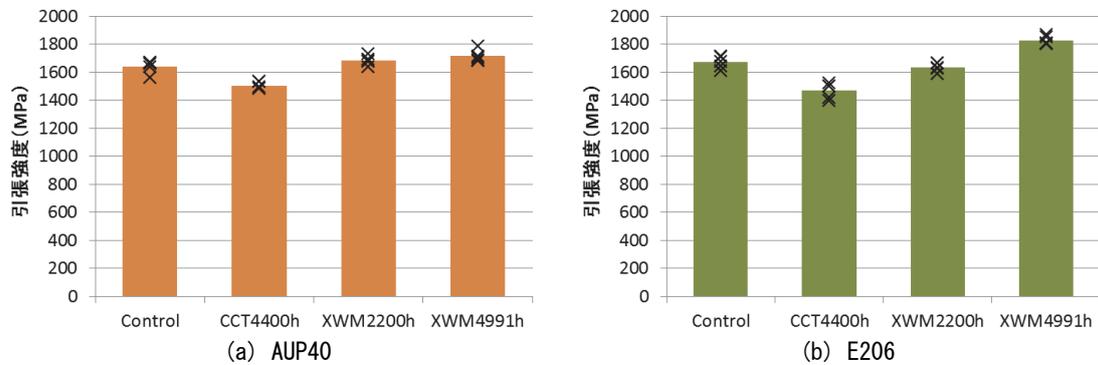


図-1.18 劣化試験後の引張強度

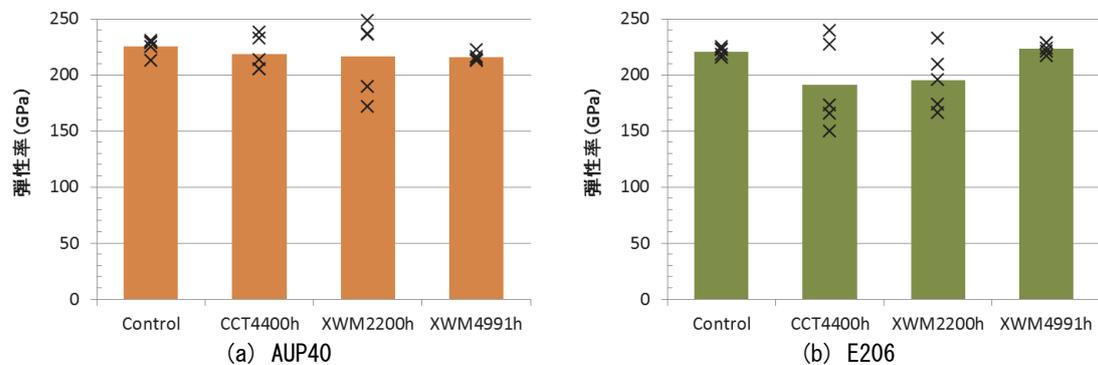


図-1.19 劣化試験後の引張弾性率

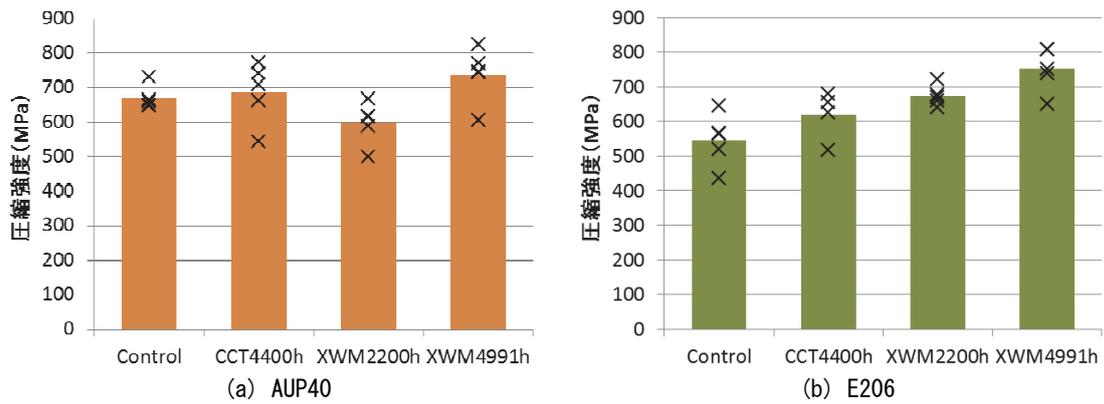


図-1.20 劣化試験後の圧縮強度

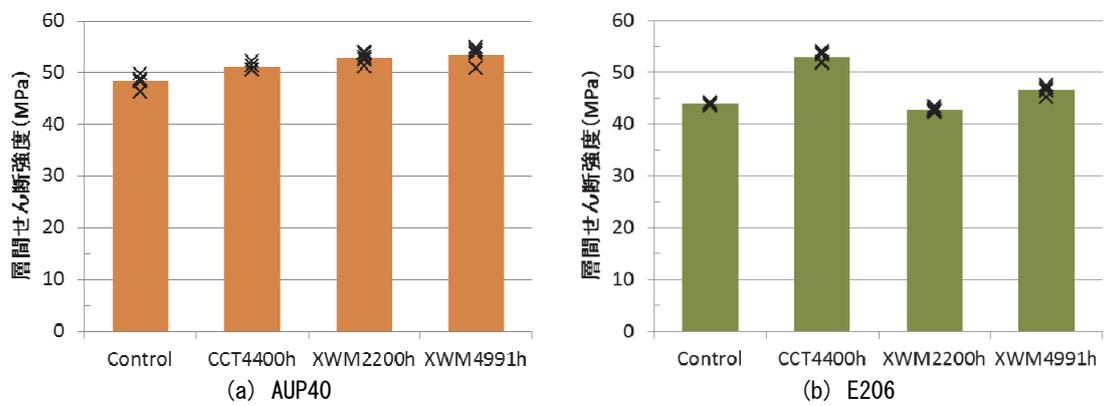


図-1.21 劣化試験後の層間せん断強度

水中浸せき試験結果を図-1.22 に示す。水中浸せきにより、CFRP 中への水の浸入特性が観察されたが、1 種類の樹脂については、50 日間に降より質量減少が認められ、CFRP からの樹脂脱落の兆候が疑われた。この結果から、AUP40 の方が、耐水性が求められる環境ではより安定で、屋外環境での使用に適していると考えられた。

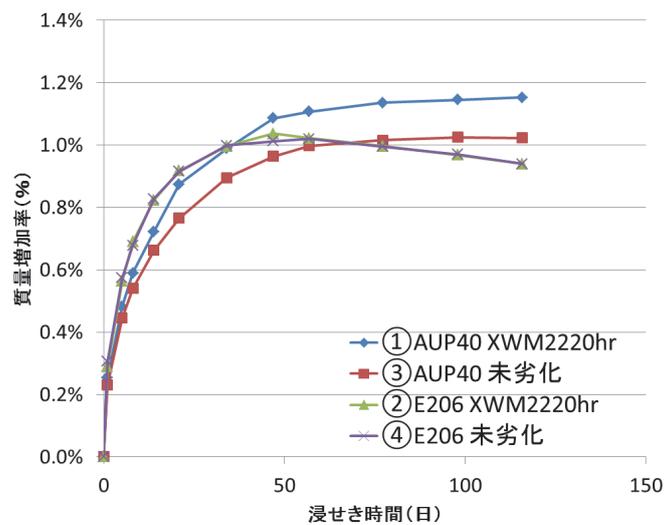


図-1.22 40°C水中浸せき試験による質量変化

2) 接合部の安全性・耐久性に関する検討

本個別要素技術の開発では、(i) VaRTM 成形・同時接着工法における接着界面の施工技術と引張せん断強度評価、(ii) VaRTM 成形・同時接着工法におけるピール強度評価、(iii) CFRP 内に埋め込んだ光ファイバを用いて内部の損傷をモニタリング・評価する技術を開発した。さらに、(iv) VaRTM 成形された FRP で補強された腐食鋼材の環境耐久性を評価した。以下、それぞれの詳細を記述する。

(i) VaRTM 成形・同時接着工法における接着界面の施工技術と引張せん断強度評価

図-2.1 に成形時の寸法等を示す。鋼板は厚さ 12mm の SS400 材とし、成形毎のバラツキを避けるために両面同時に成形を行った。ダブルストラップ形式とするため鋼板を中央部で切断後、両端でボルト締めされている。試験体パラメータは樹脂の下塗りの有無とした。樹脂の下塗りとは施工性の向上のために積層前に含浸樹脂と同樹脂を予め塗っておくことである。CF シートは鋼材と CFRP との軸剛性が 1:2 となるように積層数は片側 7 層とし、端部に応力集中させないよう 10mm/layer のテーパ状積層とした。引張試験による破壊面を図-2.1 中の下側とするために最下層の上側を下側よりも 40mm 延長させている。破壊が生じる前に鋼材の降伏を免れるため、成形後に幅 50mm の試験体として切断し引張試験を行った。試験体名は図-2.2 に示す通りとする。

図-2.3 に試験体成形時の様子を示す。まず、鋼板表面をロータリー式ブラスターによって下地処理を行った。その後、下地処理面の粗さ測定を行い十点平均粗さが 20 μ m 以上であることを確認後、切断部からの空気漏れを防ぐためにエポキシ樹脂系接着剤によって切断部から上下幅 10mm について封をした。その後、補修部分の周りを、プラスチックフィルムを貼りつけるためのシーラントテープによって囲み、樹脂の下塗り作業を行った。下塗り作業後に基材であるチョップドストランドマット(CM)および CF シートを積層し、脱型時に CFRP 以上を分離させる役目を担うピールプライ、樹脂流動媒体であるメディアを重ねる。その後、プラスチックフィルムを用いてバギングし、小型ポンプによって真空状態にさせる。真空度は-100kPa とし、図-2.3(e)に示すように、樹脂を十分に含浸させながら真空吸引するために試験体上側にポンプの吸引口、下側に樹脂の導入口を設けることで、樹脂が含浸していく。

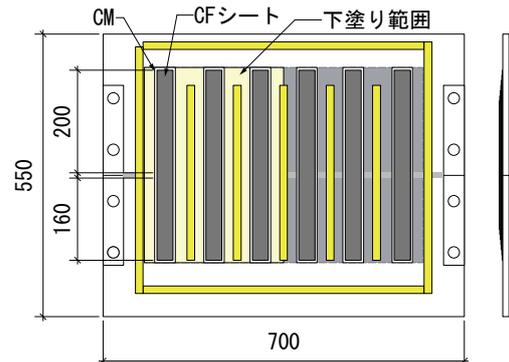


図-2.1 成形段階の寸法 [mm]

PL12-EP-7-d or w-1

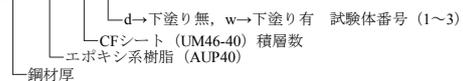


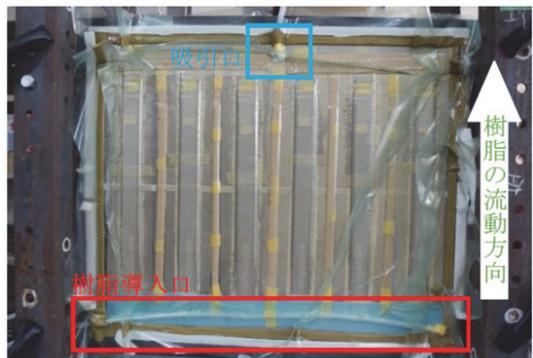
図-2.2 試験体名



(a) 下地処理 (b) 樹脂下塗り (左側のみ)



(c) CM設置 (d) 基材設置完了



(e) 含浸時

図-2.3 成形の流れ

各試験体についてCFRP厚を膜厚計によって計測し表-2.1に示すよう繊維体積含有率を算出した。算出方法はCFRP+CM厚からCM厚を差し引くことでCFRP厚を算出、使用したCFシート(UM46-40)の1層あたりの厚さが公称値0.217mmより、総CFシート厚をCFRP厚で除することで繊維体積含有率を両面の平均として算出した。CM厚については樹脂の含浸後で0.56mmとなっていた。表-2.1から平均繊維体積含有率が下塗りの有無に関わらず50%を超える高い結果となり、変動係数が1%以下と安定した施工を行えたことも確認した。

図-2.4に試験時の様子、図-2.5に本試験体の試験体寸法、ひずみゲージ位置を示す。また、接着面をA面からD面と呼ぶ。表-2.2に各試験体の最大荷重、破壊面および平均せん断強度を示す。平均せん断強度は両面に均等に荷重が分配されていると仮定し、最大荷重の半分を7層が積層されている定着長100mm、CFRP幅30mmの接着面積である3000mm²で除した値とする。d-1、d-2では本来破壊させるはずのA面とB面ではなく、C面が破壊したため、接着面積をB面とC面の平均として算出した。二面引張せん断試験の結果、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、安定した結果となった。CFRP厚に差は無いものの、事前に鋼材とCM層との界面の接着性が向上したことがこのような結果に繋がった要因と考えられる。特に、前年度の試験で1層目にサーフェスマットを採用した場合と比較すると、倍以上の引張せん断強度の向上を実現した。図-2.6に破壊面の例として試験後の接着面を示す。下塗り無しの場合は破壊モードが鋼材とCM界面のはく離となり、下塗り有りの場合はCFRPの層間破壊もしくはCFRP界面の破壊が観察された。下塗り有りの場合は材料破壊となったことから耐力の安定性へと繋がったものと考えられる。

図-2.7に平均せん断応力度-ひずみ関係をひずみゲージ位置毎に示す。(a),(b)はCFRP表面、(c),(d)は鋼材表面のひずみを表している。破壊が近づくにつれてCFRPのひずみが増加し、鋼材のひずみは減少している。破壊は鋼材切断部から進展すると考えられることから先行して中央から55mm位置のひずみに変化が現れる。下塗りの有無に関わ

表-2.1 繊維体積含有率

	CFRP厚 [mm]	繊維体積含有率		
		含有率	平均	変動係数
		[%]		
d-1	3.48	52.11	52.7	0.86
d-2	3.42	53.17		
d-3	3.43	52.93		
w-1	3.46	52.32	52.5	0.3
w-2	3.44	52.71		
w-3	3.46	52.47		



図-2.4 引張せん断試験

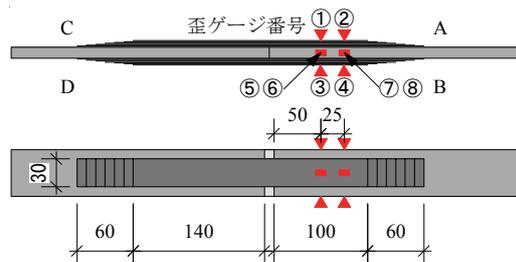


図-2.5 試験体寸法、歪ゲージ位置および接着面の名称 [mm]

表-2.2 平均せん断強度

	最大荷重 [kN]	破壊面	平均剪断強度		
			[MPa]	平均 [MPa]	変動係数 [%]
d-1	146.58	B,C	20.36	20.22	9.88
d-2	127.52	B,C	17.71		
d-3	135.58	A,B	22.60		
w-1	139.20	A,B	23.2	23.39	2.07
w-2	144.33	A,B	24.06		
w-3	137.49	A,B	22.91		



(a) d-2 (B面) (b) w-2 (A面)

図-2.6 試験後の接着面

らず中央から 55mm 位置の CFRP のひずみ (a) と (b)、鋼材のひずみ (c) と (d) のひずみの変化が中央から 75mm 位置に比べ先行していた。下塗りの有無を比較すると、後者の方が高い平均せん断応力度まで線形性を保持することが明らかとなった。

(ii) VaRTM 成形・同時接着工法におけるピール強度評価

本試験は曲げスパン 500mm の三点曲げ試験とし、単純载荷による耐力と破壊モードについての分析・評価を行った。試験パラメータは積層数と接着長とした。表-2.3 にパラメータの一覧を示す。試験体名は L 定着長-積層数-試験体番号とする。試験体は VaRTM によって鋼材に CFRP を成形、接着接合を施した。

CFRP 幅および鋼材幅は約 40mm とした。強化材は CM および CF シート (UM46-40G) を積層する。積層は端部への応力集中を避けるため 10mm/layer でテーパ状の積層としている。図-2.8 に試験体の寸法およびひずみゲージ位置、FBG の埋設位置等を示す。

図-2.9 に各試験体の最大耐力と最大変形量を示す。破壊モードは L220 試験体、L320 試験体は CFRP 端部のはく離となり、L400 試験体は CFRP 中央部での破断となった。これらの結果から L400 試験体の最大耐力は CFRP の破断時の耐力とし、最大変形量については記載しない。各パラメータでの最大耐力と最大変形量は概ね安定した結果となった。接着長が長くなるにつれて耐力、変形量が大きくなり、同接着長試験体については耐力に大きな差は見られず、積層数の増加に伴い L220 試験体では僅かに最大変形量も増加しているが、L320 試験体は減少する結果となった。

図-2.9 に示した結果から接着長と積層数の変化が耐力及び破壊モードに影響といえるため、異なる破壊モードである CFRP 端部のはく離と CFRP 中央部の破断は接着面に対して鉛直方向に生じる応力 (以下、ピール応力) と CFRP 破断ひずみの関係を分析する必要がある。しかしながら、ピール計測・応力の算出は困難であることから有限要素解析 (FEA) を用いて各試験体のピール応力を推定し耐力と破壊モードについての分析を行う。ピール応力の算出位置は CF の 1 層目と 2 層目のテーパ部境界とする。これは CFRP 端部に生じた破壊モードが CM と鋼材界面でののはく離または CFRP1 層目と 2 層目の層間破壊が生じていたことによる。解析条件は 2 次元モデル、要素は平面応力要素とした。解析に用いた各材料特性を表-2.4 に示す。CFRP は異方性材料とし、繊維軸方向弾性係数、繊維直交方向弾性係数、せん断弾性係数

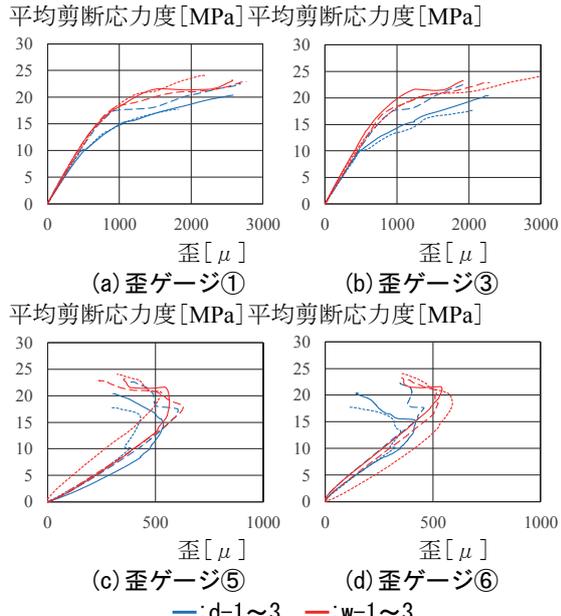


図-2.7 平均剪断応力度-歪関係

表-2.3 三点曲げ試験変数一覧

	定着長 [mm]					
	220		320		400	
積層数	7	11	7	11	7	11
試験体数	2	2	2	2	4	4

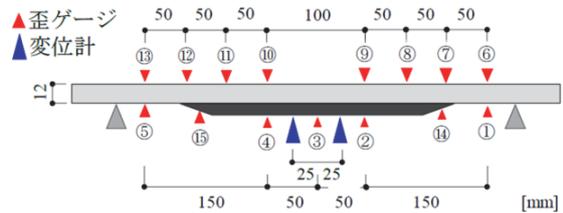


図-2.8 試験体寸法

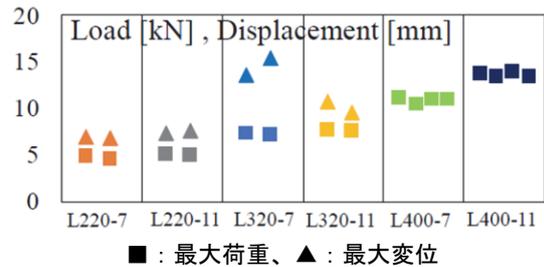


図-2.9 三点曲げ試験結果 (最大耐力・変形)

は複合則を用いて算出した。図-2.10 に有限要素解析結果と実験値を比較した荷重-ひずみ関係、図-2.11 に有限要素解析によって推定したピール応力-変位計位置の変形量関係を示す。荷重-ひずみ関係に用いるひずみは図-2.8 に示したひずみゲージ③、⑨と⑩の平均値とする。最大荷重時のひずみゲージ③における解析値/実験値は平均で91.3%となり、解析値と概ね一致する結果であることを確認した。図-2.10 から L220 試験体は弾性域内、L320 試験体は塑性域での破壊となった。L400 試験体では7層、11層ともに CFRP の破断ひずみである約 8000 μ に到達している。図-2.11 から L220 試験体について差はほとんど見られないが、単位変形あたりのピール応力が接着長および積層数の増加に伴い減少していることがわかる。この結果、本試験体における耐力と破壊モードは変形量によって評価できると考えられる。L220、L320 試験体はピール応力が約 20~25MPa の範囲で CFRP 端部のはく離が生じている。CFRP 中央部の破断が生じたと思われる荷重時のピール応力に着目すると7層試験体では13.65MPa、11層試験体で24.5MPa となった。7層試験体は CFRP 端部ではく離が生じるピール応力に到達せずに CFRP 中央部が破断ひずみを迎えている。

表-2.4 FEA に用いた材料物性値

	弾性係数 [GPa]	ポアソン比	降伏応力度 [MPa]
鋼材	205	0.3	296
CM 層	8	0.3	-
CFRP	222	0.3 / 0.02	-

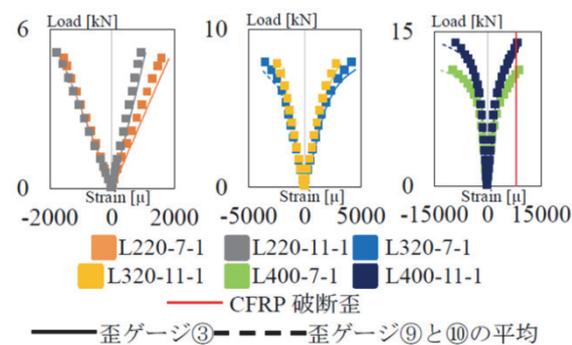


図-2.10 有限要素解析と実験より得られた荷重-歪関係の比較

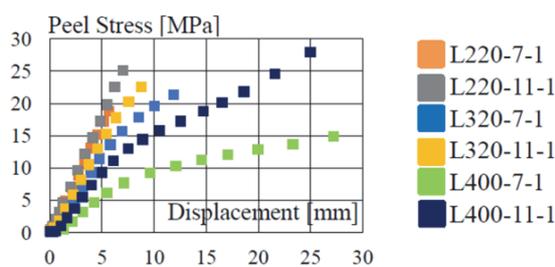


図-2.11 ピール応力-変形量関係

(iii) CFRP 内に埋め込んだ光ファイバを用いて内部の損傷をモニタリング・評価する技術

鋼/CFRP 試験体の耐力と破壊性状を明らかにしたことを踏まえ、CFRP 積層部内部に FBG センサを埋設し損傷センシングを実施し、得られた光パワースペクトルについて補修・補強部内部の応力状態の解明のため、分析および評価を行った。FBG センサは光ファイバのコアに屈折率の周期的な変化をもたらせるため、ブラッグ回折格子が書き込まれたもので、この回折格子間隔に依存して入射された光のある特定の波長成分の光のみを反射し、他の波長成分の光を透過させる役割をもつ。この特性から、図-2.12 のように接着層内に埋設された FBG センサは接着剤のクラック等によりひずみが不均一になると反射波長のスペクトルが複数ピーク型に変化することが明らかとなっており、補強材内部の損傷検出等に应用できる可能性がある。試験は、(ii)と同様の曲げスパン 500mm の3点曲げ試験とし、試験体は定着長 320mm、積層数 7層とし、負荷除荷載荷による損傷センシングと得られた光パワースペクトルの分析・評価を行う。載荷サイクルは 3kN、5kN、以降は 1kN 毎に増加、7kN 以降は 0.5kN 毎に増加、9kN までの荷重制御、以降は変形量を 1mm 毎に増加させる変位制御によって全 16 サイクル行った。試験体は VaRTM によって鋼材に CFRP を成形、接着接合を施す際に FBG センサを埋設した。CFRP 幅は 40mm、鋼材幅は 65mm とした。使用材料および成形方法等はその 1 で示したものと同様としている。図-2.13 に FBG の埋設位置を示す。

図-2.14 に有限要素解析によって算出した FBG センサ部 10mm 区間のひずみ分布を示す。X=0mm のひずみは有限要素解析によって生じる応力集中の影響を考慮して除くこととした。

その結果から、 $X=8\text{mm}$ で最も高く、 $X=1.5\text{mm}$ で最も低い値となった。 $X=10\text{mm}$ でのひずみの増加は次の CFRP 層の端部に生じている応力集中の影響であると考えられる。

図-2.15 に、図-2.14 より得られたひずみの最大位置 ($X=8\text{mm}$)、最小位置 ($X=1.5\text{mm}$)、この区間内中央位置 ($X=5\text{mm}$) と各载荷サイクルの光パワースペクトルで得られたひずみをプロットしたものの、その载荷サイクルの光パワースペクトルの波形変化を示す。光パワースペクトルの波形変化は载荷前の初期波形、 $P=4\text{kN}$ 時、各载荷サイクルの最大荷重時および除荷時、後述する荷重時の波形を示している。荷重-ひずみ関係から 3kN 载荷サイクルでは単一のひずみ増加のみが生じ、 $X=8\text{mm}$ の有限要素解析結果に対応が見られる。 5kN 载荷サイクルでは $P=4\text{kN}$ 時に初めて複数ピーク型への光パワースペクトルの波形変化が見られた。 8.5kN 载荷サイクルでは、この境界において増加し続けていたひずみ成分が並び、 $X=1.5\text{mm}$ の有限要素解析結果に対応が見られるひずみ成分が生じた。 9kN 载荷サイクルでは $P=4\text{kN}$ 時よりも低い荷重時に複数のひずみ成分が生じている。これは以前の载荷サイクルでは発現していなかったひずみ成分であることから負荷除荷による損傷ひずみ成分であると考えられる。このひずみ成分は载荷を繰り返す毎に徐々に低い荷重時においても生じることを確認した。変形量 14mm 载荷サイクルでは $P=0.5\text{kN}$ 時に損傷ひずみ成分が生じ、

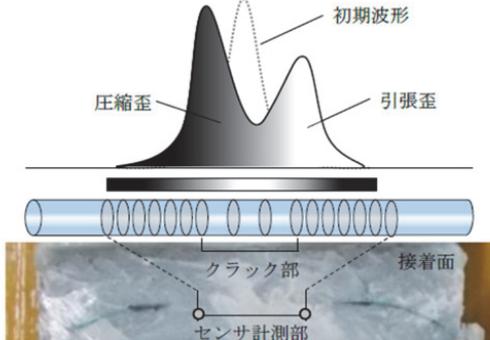


図-2.12 FBG センサによる損傷検出のイメージ

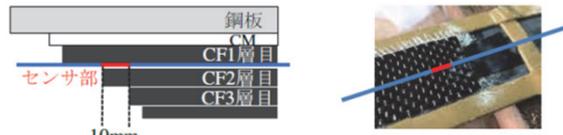


図-2.13 FBG センサ埋設位置と埋設状況

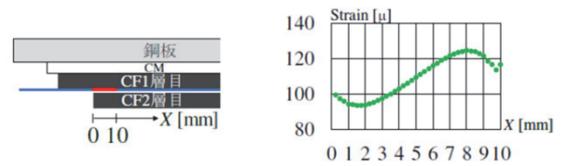
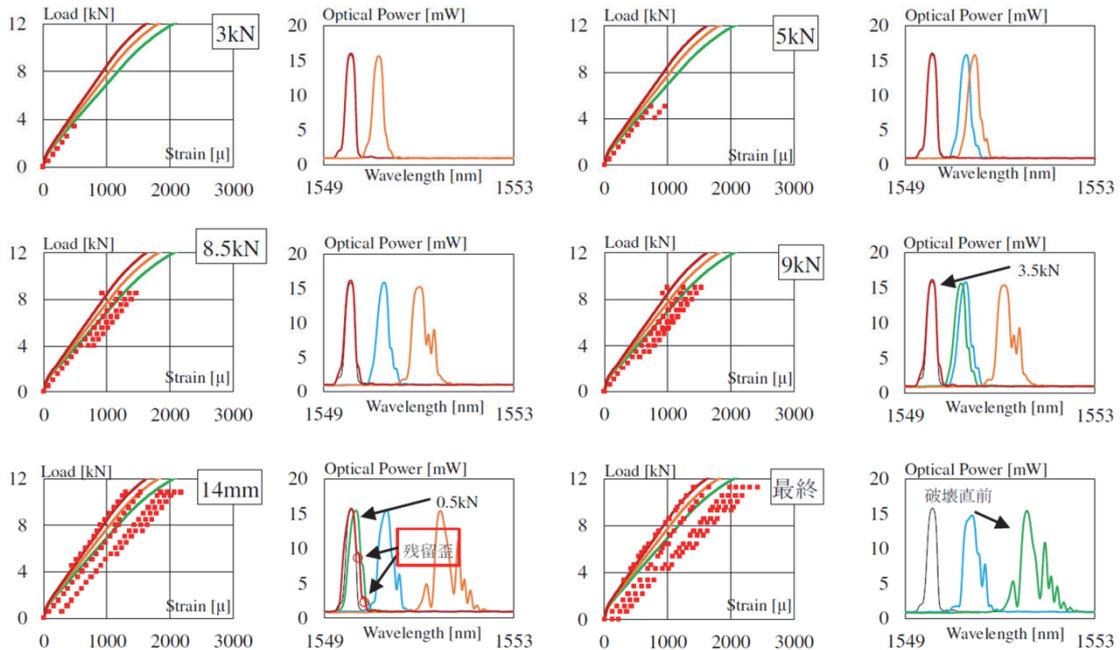


図-2.14 FBG センサ部区間における歪分布 (1.5kN 時)



荷重-歪関係
光パワースペクトル
図-2.15 各载荷サイクルの荷重-ひずみ関係と光パワースペクトルの波形変化

— $X=1.5\text{mm}$ — $X=5\text{mm}$ — $X=8\text{mm}$ ■ FBG
— 初期波形 — $P=4\text{kN}$ — 最大荷重時 — 除荷時

P=4kN 以降には 8.5kN 載荷サイクルで生じた X=1.5mm の有限要素解析結果に対応するひずみ成分が現れている。この時のピール応力は 19.91MPa となっており、(ii)で示した CFRP 端部のはく離が生じる約 20~25MPa の範囲の直前である。そして、この載荷サイクルにおいて初めて除荷時に残留ひずみが見られた。その後、P=4kN 以下でのひずみ成分が増加し続け最終サイクルへ至った。最終載荷サイクルは 3 つの残留ひずみ成分から載荷が開始され、他の載荷サイクルと同様にひずみ成分、ひずみの増加を生じ破壊へと至った。破壊に至った荷重時の推定されるピール応力は 24.42MPa であった。破壊前の光パワースペクトルに大きな波形変化が見られないのは FBG センサ部反対側において破壊が生じたためであると考えられる。

(iv) VaRTM 成形された FRP で補強された腐食鋼材の環境耐久性

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。

①実験条件の検討

・素地調整方法

2 種類の素地調整方法(ブラスト面形成動力工具、ディスクサンダー(サンドペーパー))について検討を行った。ブラスト面形成動力工具は、素地調整 1 種相当の表面が得られるとされる動力工具であり、ディスクサンダーとの耐久性への影響の相違を検討する(図-2.16)。



図-2.16 検討した素地調整方法(左:ブラスト面形成動力工具、右:ディスクサンダー)

・端部処理方法

VaRTM 成形による補強を行った場合、端部に樹脂が充填されずに残る部分が生じる可能性がある。この場合は端部について図-2.17 の様に補修塗装を行うこととした。補修塗膜の仕様としては、①厚膜形エポキシ樹脂塗料(300 μ m)の塗装が提案できるが、より防食性能の高い方法として、②その前に有機ジンクリッチペイント(30 μ m)を塗装しておく方法もあることから、この 2 種類について部位による塗り分けを行い、適性を検討することとした。

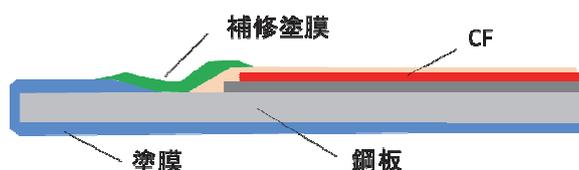


図-2.17 端部の補修塗装

②供試体および試験方法

供試体には複合腐食サイクル試験で腐食させた塗装鋼板供試体(150×70mm)を用いた。

この塗装鋼板は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（図-2.18）。この塗装鋼板の腐食部分の50×100mmの範囲（図-2.18の赤線枠内）について、表-2.5のようにVaRTM成形法によるCFRP補強供試体を作製した。促進劣化試験方法にはCFRPの耐久性試験と同じ複合腐食サイクル試験を実施した。さらに、一定時間の試験後に供試体を回収し、外観および20×20mmのアタッチメントによるプルオフ式付着力試験により評価を行った。

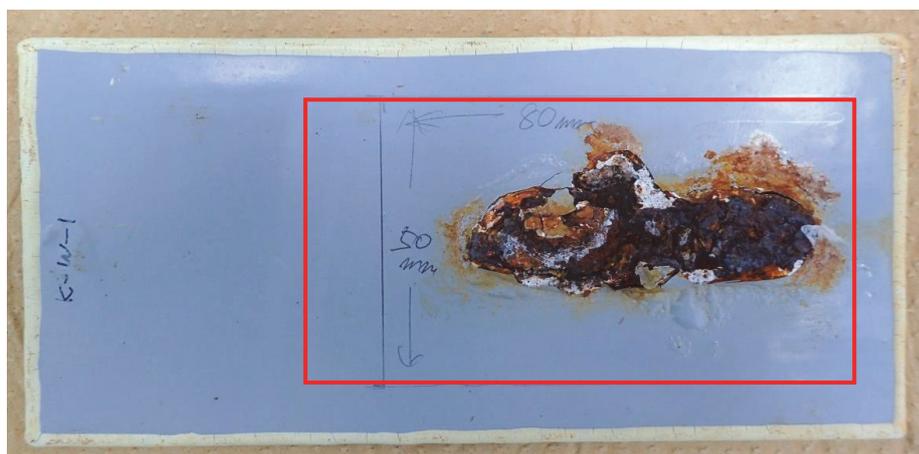


図-2.18 VaRTM成形による補強前の供試体

表-2.5 供試体の種類

記号	素地調整方法	樹脂	製作枚数
B1	ブラスト面形成動力工具	AUP40	7枚
B2	ブラスト面形成動力工具	E206	7枚
P1	ディスクサンダー	AUP40	4枚

注：補強部長辺はジンクリッチペイント無し、短辺：ジンクリッチペイントあり、とした。

③複合腐食サイクル試験の結果

複合腐食サイクル試験402サイクルで回収した供試体1セットの写真を図-2.19に示す。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。この結果から、ジンクリッチペイントの効果は402サイクルの時点においては明確に認められない結果となった。



図-2.19 複合腐食サイクル試験（402サイクル）後の供試体の外観（左から、B1、B2、P1）

④プルオフ式付着力試験の結果

複合腐食サイクル試験を402サイクル実施した供試体3枚の、各表面2か所ずつ（上部：

腐食の無かった部分、下部：腐食していた部分) について、20×20mm のアタッチメントを用いてプルオフ式付着力試験を実施した。その結果を表-2.6 に示す。アタッチメントの接着にはエポキシ系接着剤を用いたが、CFRP と接着剤の界面での破壊したケースが多かったことから、これらについては、接着剤の種類を変えて2回目の試験を実施した。

付着力は接着剤界面での破壊のケースを除くと、いずれのケースでも2MPa以上となった。B1 および B2 では鋼材に接する繊維層に樹脂が十分に回っていないケースが認められた。特に B2 ではその面積率が大きかった。この結果から B2 に用いた樹脂よりも、B1・P1 に用いた AUP40 の方が、安定に含浸しやすく良好な付着力を得やすい傾向が示唆される。

表-2.6 プルオフ式付着力試験の結果

供試体	部位	1回目		2回目	
		付着力(MPa)	破壊モード	付着力(MPa)	破壊モード
B1	上部	2.25	接着剤/CFRP 界面	3.85	2/3: CFRP/鋼材界面 1/3: 含浸不十分層
	下部	4.35	接着剤/CFRP 界面	4.70	4/5: CFRP/鋼材界面 1/5: 含浸不十分層
B2	上部	2.13	接着剤/CFRP 界面	3.40	含浸不十分層内
	下部	1.0	接着剤/CFRP 界面	2.68	2/3: CFRP/鋼材界面 1/3: 含浸不十分層
P1	上部	3.10	CFRP/鋼材界面	—	
	下部	1.93	接着剤/CFRP 界面	2.13	CFRP/鋼材界面

図-2.20 に2回目の試験後の供試体状況を示す。いずれのケースでも、鋼材面の腐食の新たな発生は認められなかった。P1 は概ね CFRP と鋼材界面で破壊していたが、孔食が残っている部分には、内部にまで含浸樹脂が充填されていたことが分かる。

本試験の結果から、本工法は今回の条件においては、検討したどの素地調整方法についても良好な耐食性を示することが明らかとなった。なお、より長期の耐久性については、今後さらに検討を進めることが必要であり、そのための検討を継続して行っている。

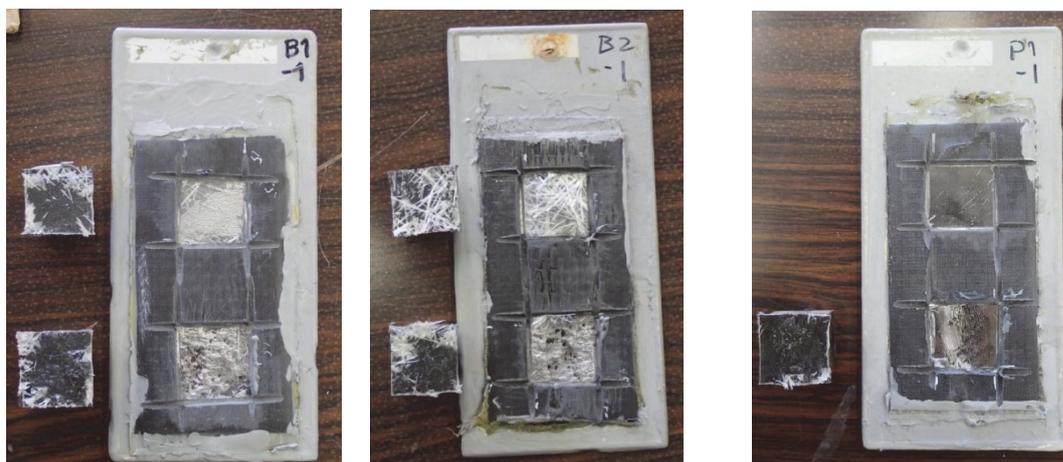


図-2.20 複合腐食サイクル試験(402サイクル)後の付着力試験後の外観(左から、B1、B2、P1)

3) 光ファイバセンサによる健全性診断技術の開発

本個別要素技術の開発では、(i) VaRTM 成形の過程で光ファイバを CFRP に埋め込む技術、(ii) POF を CFRP 表面に固定する技術、(iii) 埋め込んだ光ファイバを用いて補強材のひずみ分布や CFRP 層のはく離をモニタリングする技術、および、(iv) 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、を開発した。以下、それぞれの詳細を記述する。

(i) VaRTM 成形の過程で光ファイバを CFRP に埋め込む技術

VaRTM 成形中、樹脂を流入させる前に補強対象となる構造物に光ファイバを貼り付けておくことで、POF およびガラス光ファイバを補強材に埋め込む技術を確立した。繰り返し実験を行う中で得られた知見は、(a) 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、(b) 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、(c) 樹脂流入の過程でコネクタ加工の施された光ファイバを養生するのは煩雑であり、コネクタ内部に入り込んだ樹脂をリユーターにより除去する必要がある場合があること、などが挙げられる。また、代わりに、コネクタ未加工の光ファイバを細径チューブなどで養生し、硬化後に光ファイバの端面にコネクタを後付する方が、利便性が高く安定したサンプルが作製できることも明らかになった。

(ii) POF を CFRP 表面に固定する技術

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防ぐため、POF を CFRP 表面に固定する手法を開発した。接着剤を用いる手法では、硬化までに時間がかかる、CFRP の変形を接着剤層が吸収してしまう、などの問題点があった。そこで、超音波溶着技術を用いた手法を提案、実証した。図-3.1(a) に示す構成の超音波溶着装置を用いた。また、接着力の評価は図-3.1(b) により行った。図-3.2(a) は、異なる前負荷を印加

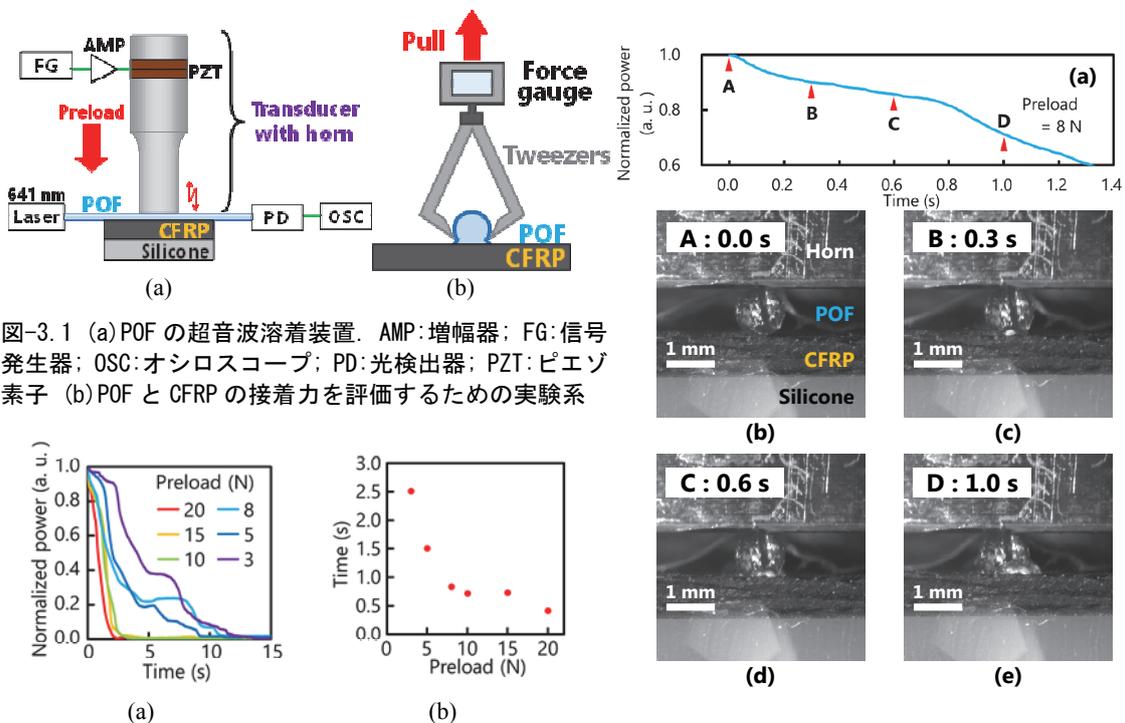


図-3.1 (a) POF の超音波溶着装置. AMP:増幅器; FG:信号発生器; OSC:オシロスコープ; PD:光検出器; PZT: piezo素子 (b) POF と CFRP の接着力を評価するための実験系

図-3.2 (a) 異なる前負荷下における、規格化透過光パワーの溶着時間依存性 (b) 前負荷と透過パワーが80%になるまでの経過時間の関係

図-3.3 (a) 予圧 8 N のときの規格化透過パワーの溶着時間依存性、(b-e) 高速カメラによる POF 断面形状の変化の様子

した場合の透過パワーの溶着時間依存性であり、図-3.2(b)は透過パワーが80%になるまでの経過時間の前負荷に対する依存性である。また、図-3.3(a)～(e)は、溶着時間に対するPOFの光伝搬損失やPOF断面の形状の変化である。さらに、図-3.4は、溶着時間を1秒としたときの接着力の前負荷依存性である。以上の測定結果は、1秒以内の短時間でPOFをCFRPに固定することができることを示している。本手法は安価な超音波振動子が1つあれば実現できるため、現場でのVaRTM成形に適した要素技術であるといえる。

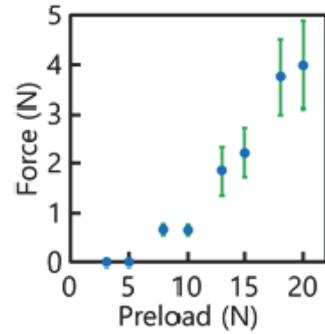
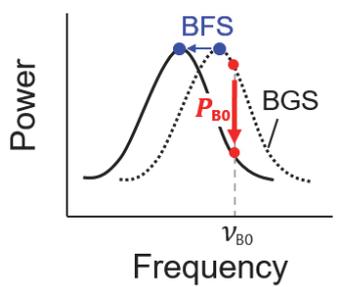


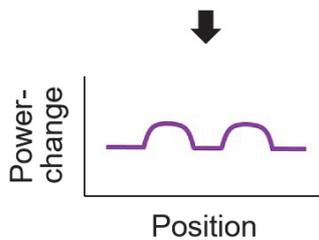
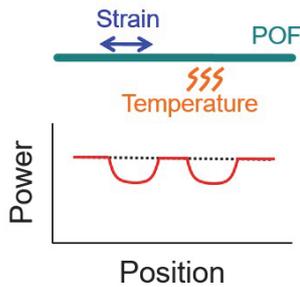
図-3.4 溶着時間1秒のときのPOF-CFRP間接着力の前荷重依存性。

(iii) 補強材のひずみ分布やCFRP層のはく離をモニタリングする技術

ブリルアン光相関領域反射計 (BOCDR) は、光ファイバに印加されたひずみと温度の分布を光ファイバの片端から光を入射することにより高空間分解能で測定できる技術である。現在まで様々な構成のBOCDRが提案されているが、特に、散乱スペクトルの傾斜を用いたSlope-assisted BOCDR (SA-BOCDR) はより高速かつ高空間分解能での測定が可能であるため、CFRPの診断に適していると考えられる(動作原理を図-3.5(a)(b)に示す)。ひずみと温度に加え、損失の検出も可能であるという特徴をもつ。



(a)



(b)

図-3.5 (a) SA-BOCDRの原理. (b) 最終出力.

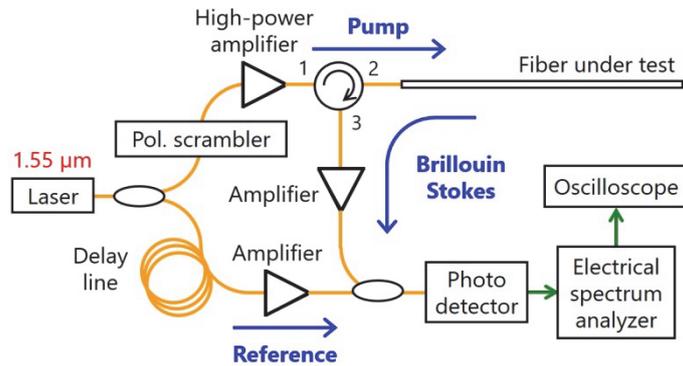
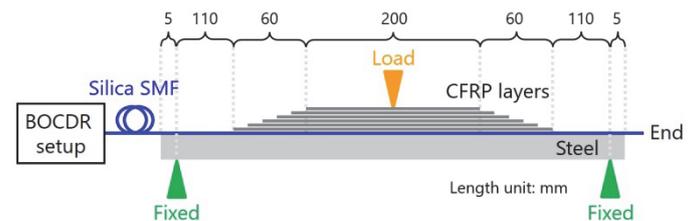


図-3.6 SA-BOCDRの実験系



(a)



(b)

図-3.7 (a) 測定ファイバ周辺の写真 (b) 測定ファイバの構造.

今回用いた実験系を図-3.6に示す。通信波長帯のレーザの出力を二分し、一方を励起光、もう一方を参照光とした。励起光は偏波状態を平均化し、パワーを増幅した上で、測定ファイバに入射した。次に、ブリルアン散乱により反射された一部の光をさらに増幅し、参照光と合波させた。最後に光検出器によって電気信号に変換し、電気スペクトルアナライザにより反射スペクトルの傾斜パワーを抽出しオシロスコープに出力した。レーザの出力光に周波数変調を印加することで、測定ファイバに沿ったブリルアン周波数シフト（ひずみや温度に対応）の分布を得ることができる。以下の実験では、空間分解能を約70mmに設定した。

測定ファイバの構造を図-3.7(a)(b)に示す。鋼材とCFRPの奥行きはともに39mm、鋼材の厚みは12mm、CFRP層の厚みは合計で3mmとした。光ファイバは鋼材とCFRP層の境界に埋め込んである。その長手方向に沿った位置は中央ではなく、中央から一方に9mm寄っている(図-3.7(a)では手前側)。図-3.8(a)のように、ねじ(ピッチ2mm)を回転させ荷重を加えることでシリカ光ファイバ(SMF)に圧縮ひずみを印加していった。CFRP層の破断が想定される回転数以上では、安全のため、図-3.8(b)のように試験体全体にビニールをかぶせて荷重を印加した。荷重を印加するジグの先端は直径30mmの円形とした。最終的にはCFRP層ははく離し、光ファイバは破断した。

ねじ回転数を0, 1.5, 3.0, 4.5, 5.3, 5.5, 6.0回転(中央部の最大圧縮ひずみ0, 600, 1200, 1800, 2120, 2200, 2400 $\mu\epsilon$ に相当)と増大させていったときの出力の変化を図-3.9に示す。横軸はファイバに沿った位置、縦軸は規格化した出力電圧を表す。まず、荷重が印加されるにつれ、

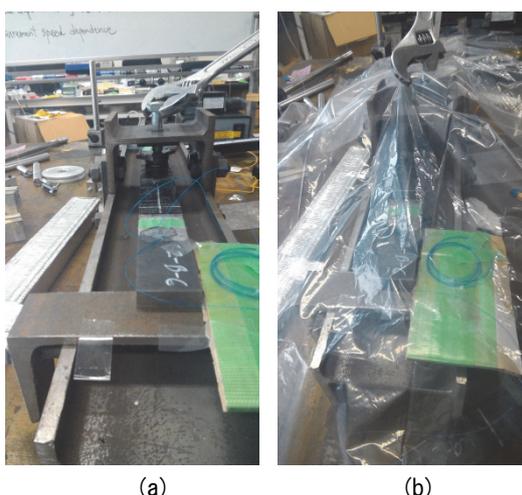


図-3.8 ねじを回して荷重を印加している様子
(a) 5.3回未満. (b) 5.3回以上

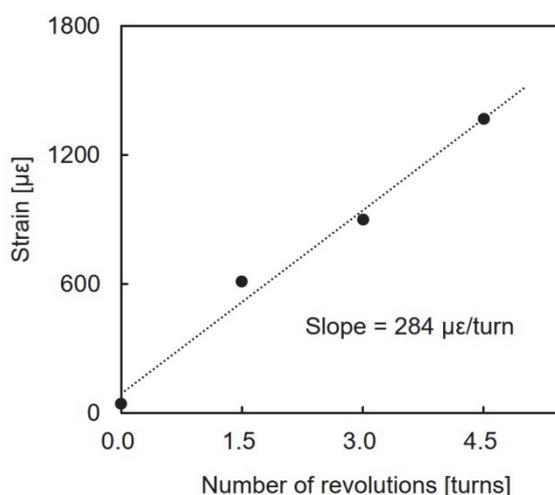


図-3.10 ねじ回転数に対する最大圧縮歪(測定値)

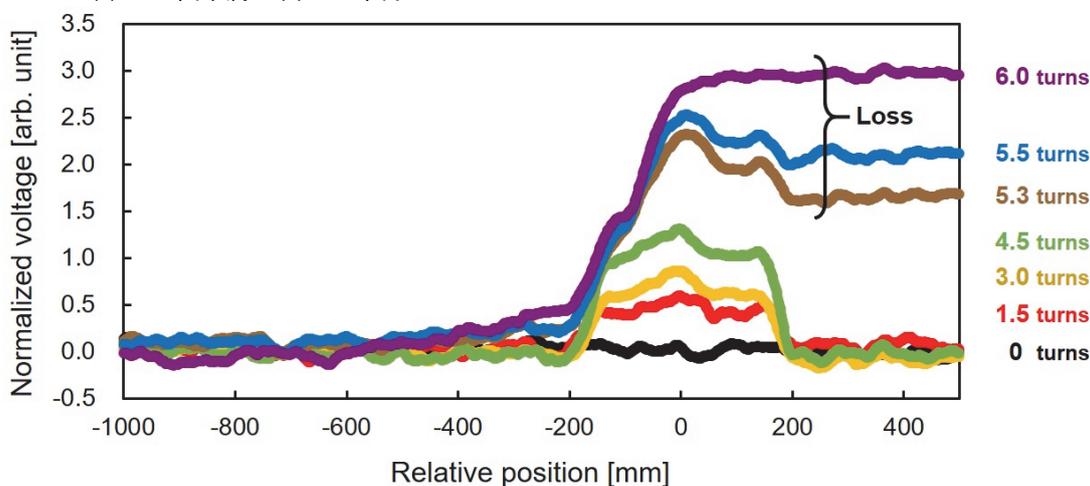


図-3.9 各荷重に対する歪分布測定の結果

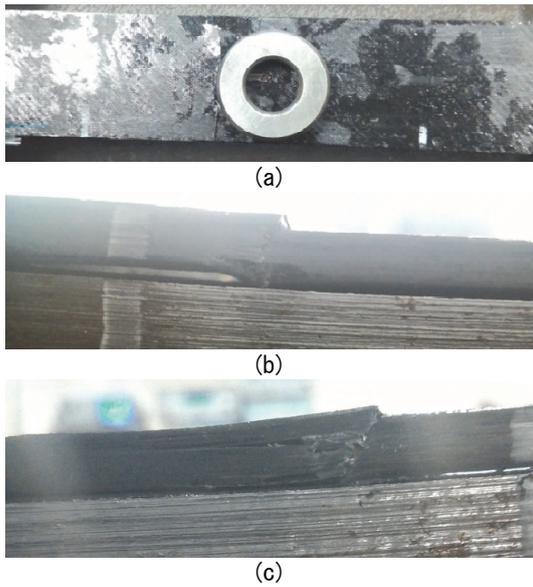


図-3.11 上・左・右から見た破断箇所の様子

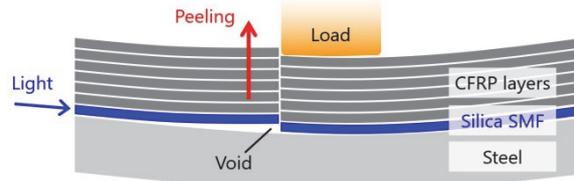


図-3.12 CFRP 層剥離および光ファイバ破断の模式図

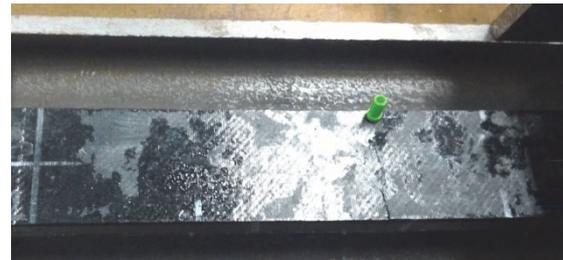


図-3.13 破断点に立てたマーカー

埋め込まれている部分のファイバに局部的に圧縮ひずみが印加されていることがわかる。出力に変動がある区間の長さ（約 390 mm）は、理論的には実際のひずみ印加区間（320 mm）に空間分解能（約 70 mm）を合算した値となっており、妥当である。ねじ回転数 4.5 回までについて、縦軸を圧縮ひずみの値に変換した結果を図-3.10 に示す。ねじ回転数と印加されるひずみはほぼ比例することがシミュレーションからわかっているが、この分布測定の結果からも、（ねじ回転数 4.5 回までは）多少の誤差はあるもののその通りとなっている。ねじ回転数 5.3 回になると、パキッパキッという音がして CFRP 層の破断が始まった。しばらくして、出力のひずみ印加箇所の右側が増大し始めた。これは、損失の増大に対応する。ねじ回転数 6 回になると CFRP 層の破断の音は収まり、CFRP 層の一部は完全にはく離したと思われる。その際、出力の右側は増大して飽和していた（このシステムで測れる最大の損失に対応）ため、光ファイバは完全に破断されたと解釈できる。

その後、荷重を取り去ったとき（ねじ回転数を 0 回に戻したとき）の、CFRP 層がはく離した部分の写真（上および左右から撮影）を図-3.11 (a) (b) (c) に示す。また、このはく離の様子を模式的に表したのが図-3.12 である。荷重を印加しているジグ先端の縁（光入射側）で CFRP 層が破断し、光



(a)



(b)

図-3.14 (a) (b) 赤外線放射温度計で破断点を検出している様子

入射側では数 cm に渡って完全に鋼材とはく離していることが確認された。光ファイバもこの部分で破断したと考えられる。光ファイバが、鋼材よりも CFRP 層により強固に貼り付いている可能性が考えられる。

以上のように、本システムにより、実際の試験体に埋め込んだ光ファイバへのひずみ印加の様子と破断点の検出が行えることを実証した。これは、極めて高い分解能を有し、ひずみと損失を同時に測定できる本システム特有の成果であるといえる。

(iv) 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

光ファイバが破断した箇所では、光が構造物(この実験では CFRP 層)に直接照射される。細い光ファイバ中の光はパワー密度が極めて高いため、その箇所で熱が発生する。そこで、この熱を赤外線放射温度計によって検出すれば、ファイバの破断点(構造欠陥に箇所に対応)を極めて容易かつリアルタイムに検出できるものと考えられる。

まず、**図-3.13**のように、破断点にマーカー(観測結果に影響を与えないプラスチック製)を立てた。光ファイバに約 300 mW の光を入射したときの破断点を赤外線放射温度計によって観測したときの写真を**図-3.14(a)(b)**に示す。一番温度が高くなっている箇所がマーカーを置いた箇所と一致していることがわかる。また、埋め込んだ光ファイバが(実験系の箇所ですでに述べたように)長手方向の中央ではなく**図-3.13**での手前側であることも明確にわかる。以上より、破断点の箇所が極めて容易にリアルタイムで検出できることが確認された。本手法は、現場における構造物の破断点の探査に最適であると考えられるとともに、赤外線放射温度計は近年安価になっていることを考慮すると、実用化への壁もそこまで高いものではなく、今後の展開が期待される。

4) 断面欠損を模擬した鋼桁端部への適用検討

本個別要素技術の開発では、(i) 断面欠損を考慮した鋼桁端部の性能回復と施工性の検討、(ii) CFRP 部材の VaRTM 施工による面欠損した桁端柱部材の性能回復の検証、(iii) 鋼板の座屈補強に関する検討を行って、鋼桁端部へ適用性を確かめた。以下、それぞれの詳細を記述する。

(i) 断面欠損を考慮した鋼桁端部の性能回復と施工性の検討

①VaRTM 成形の概念

図-4.1 に、VaRTM 成形の概念図を示す。これは真空含浸工法とも呼ばれ、炭素繊維等の強化材をプラスチックフィルムで封入し、真空吸引した後、液状の樹脂を注入・含浸して硬化させ、FRP を成形する技術である。その特徴は、大掛かりな設備が不要で、大型構造物の一体成形が容易であること、繊維含有率が高く、高品質な FRP を成形できることである。現場に適用する場合、FRP 成形と接着接合の施工を同時にできる利点があり、積層数が多い炭素繊維シート接着工法に比べて、工期を大幅に短縮できる利点がある。

②桁端柱部材と腐食による断面欠損のモデル化

鋼桁の支点近傍の腐食損傷を補修の対象として、図-4.2 に示すように桁高、ウェブ厚を縮小して部分的にモデル化する。支点上の鉛直反力が作用する柱部材の耐力に着目するため、鉛直方向に荷重を載荷することとした。ここでは、垂直補剛材、ウェブの下端の断面欠損が柱部材の耐力の低下に及ぼす影響を把握するとともに、断面欠損した柱部材の CFRP 接着による性能の回復について、検討を行った。

腐食による断面欠損は、垂直補剛材、ウェブの下端 100mm の範囲 (図-4.2 のハッチング部) とし、フランジの腐食は考慮しない。腐食形状は、垂直補剛材、ウェブの厚さの欠損率を、下端で 75%、上端で 0% とした、テーパ状 (直線勾配) でモデル化した。

③炭素繊維シートの数量と VaRTM 成形による補修方法

補修の方針として、最大の断面欠損部 (75%) を、鋼の弾性係数で換算した等価な CFRP の剛性で補うこととした。炭素繊維シートには、中弾性タイプ (シート厚さ 0.163mm、引張強度 2.4kN/mm²、弾性係数 440kN/mm²) を用い、繊維体積含有率を 50% とした。その結果、表-4.1 に示すように、片側あたり、ウェブには厚さ 2mm、垂直補剛材には厚さ 4mm の CFRP を VaRTM 成形によって接着することとした。補修範囲は、欠損部の高さ 100mm に対して十分な定着長を確保するため、高さ方向に 300mm とした。また、高さ方向の上端の応力緩和のために、10mm のずれを設け、テーパ状と

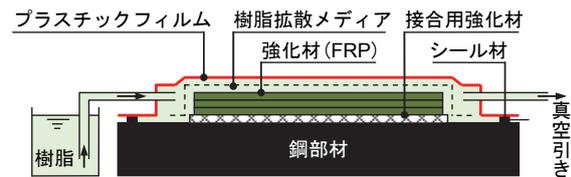


図-4.1 VaRTM 成形の概念図

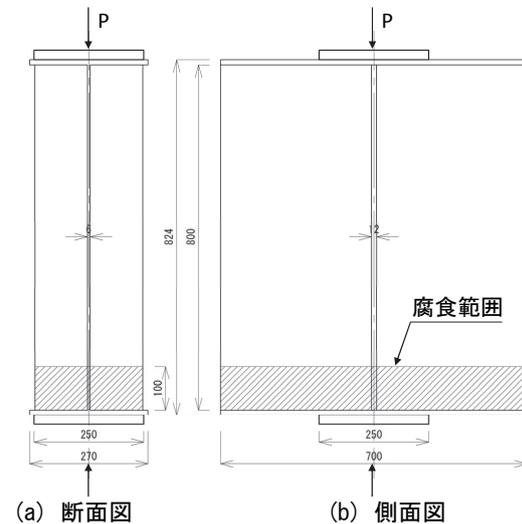


図-4.2 桁端柱部材のモデル化

表-4.1 鋼換算補修における炭素繊維量

項目	単位	垂直補剛材	ウェブ
鋼材健全部の厚さ	mm	12.0	6.0
鋼材腐食部の最小厚さ	mm	3.0	1.5
鋼部材の必要厚さ	mm	9.0	4.5
CF シートの積層数	ply	26	14
繊維体積含有率	%	50	50
CFRP の実際の厚さ	mm	8.18	4.09
解析時の CFRP の厚さ	mm	8.0	4.0

した。鋼板の素地調整はブラスト面形成動力工具を用いて行い、欠損部にエポキシ樹脂パテ材を充填して、表面を平坦に整えた。図-4.3に、VaRTM成形時の状況を示す。なお、予めFBGセンサをウェブ、垂直補剛材に、それぞれ1箇所ずつCFRPの1層目に埋め込み、一体化させて、CFRPの内部のひずみを計測した。

④実験結果と考察

図-4.4に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。まず、無補修モデルの耐力は、健全体モデルと比べ、38.3%低下した。これはウェブと垂直補剛材の腐食部の最小厚さが、それぞれ1.5mm、3mmと薄いため、早い段階で降伏し、局部的に座屈したためである。また、健全体モデルの剛性は、無補修モデルに比べて低くなった。これは健全体モデルの初期たわみが最大で5mmと大きかったことによるものと考えられた。



(a) 炭素繊維シートの配置 (b) 真空引きの状態
図-4.3 VaRTM成形時の状況

一方、補修モデルでは、健全体モデルに比べて、柱部材としての最大荷重は3.9%高くなり、初期性能まで十分に回復していることがわかる。また、補修モデルでは、剛性も健全体モデルより高くなるのがわかる。

図-4.5に、荷重とひずみの関係を示す。ひずみは、ウェブ、補剛材の同じ位置に設置された、ひずみゲージ、FBGセンサによるひずみの値を示している。図より、荷重が500kN以下では全てのセンサで、ほぼ同じひずみの値であるが、それ以上の荷重では、垂直補剛材よりウェブのひずみの値が大きくなるものの、同じ位置においては、ひずみゲージ、FBGセンサともに、ほぼ同じ値であることがわかる。したがって、CFRP中に埋め込んだFBGセンサによってもひずみの評価が可能であることが確かめられた。

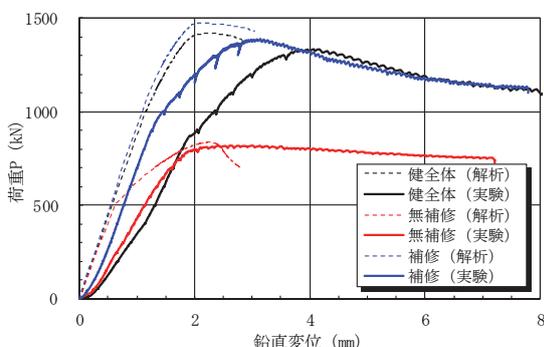


図-4.4 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

図-4.6に、荷重と垂直補剛材の曲げひずみの関係を示す。曲げひずみは、下フランジからの距離に応じて、表裏のひずみゲージの差より算定している。図より、無補修モデルでは、荷重が小さい段階から、下フランジから15、50mmにおいて、大きな曲げひずみが生じていること、また、110mmの位置では、曲げひずみが進行しないことから、局部的に座屈が生じていると考えられる。補修モデルは、健全体モデルに比べて、曲げひずみが抑えられており、十分な効果があるといえた。

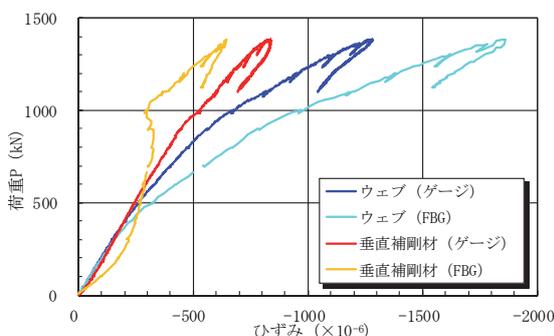


図-4.5 補修モデルにおける荷重とひずみの関係

図-4.7に、試験体の座屈変形を示す。無補修モデルでは、垂直補剛材の下端に局部座屈が、また、健全体、補修モデルでは、垂直補剛材の座屈が生じているが、補修モデルでは、

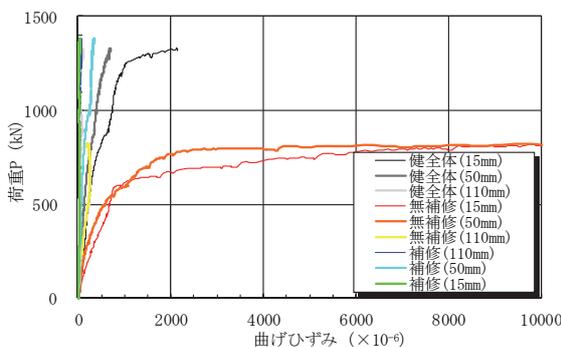


図-4.6 荷重と補剛材の曲げひずみの関係

最大の面外変形が生じる位置が、若干上側になることがわかる。なお、CFRP のはく離や破壊は生じなかった。

⑤まとめ

以上のことから、鋼換算で補修した場合、健全体よりも高い剛性が得られること、また、耐力も十分に回復することから、VaRTM 成形による CFRP 補修は十分な効果があるといえる。また、予め埋め込んだ FBG センサを用いて、ひずみの計測が可能であることも確かめられた。

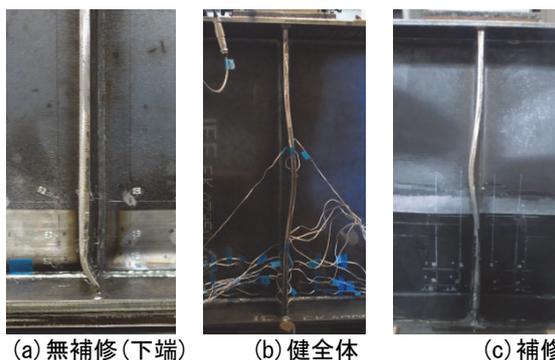


図-4.7 試験体の座屈変形

(ii) CFRP 部材の VaRTM 施工による面欠損した桁端柱部材の性能回復の検証

①断面欠損した桁端柱部材へのプリフォーム材の適用

本検討では、50%、100%欠損した桁端柱部材を対象に、CFRP 部材による耐力の性能回復の可能性について実験的な検討を行った。また、多積層の場合、施工を効率化するために、予め炭素繊維（以下、CF とよぶ）シートを工場で作ったプリフォーム（以下、PF とよぶ）材の適用と、施工時のセットボルトとの干渉の回避を試みた。

②桁端柱部材のモデル化と実験方法

支点上の鉛直反力が作用する柱部材の耐力に注目するため、鉛直方向に荷重を載荷することとした。図-4.8 に、桁端柱部材のモデル化とセットアップを示す。腐食損傷のモデル化として、ウェブ・垂直補剛材の断面欠損の組合せを、50-50%、50-100%の2ケースとした。断面欠損の範囲は、垂直補剛材、ウェブの下端から100mm（ハッチング部）とした。なお、ひずみゲージは、ウェブ・垂直補剛材の下端部から15、20、50、110、274mmの位置にそれぞれ配置している。図-4.9(d)に、セットアップ図を示す。荷重には油圧ジャッキ（荷重容量 2,000kN、最大ストローク 200mm）を使用した。

補修の方針として、鋼部材の欠損厚さから CFRP の弾性係数を考慮した等価な剛性を付与することとして、必要厚さを算出した。CF シートは高強度タイプ（シートの厚さ 0.167mm、引張強度 3.4kN/mm²、弾性係数 245kN/mm²）を用い、繊維体積含有率を 50%とした。図-4.9 に、補修方法を示す。表-4.2 に示すように、片側あたり、50%欠損で 4.9mm、100%欠損で 9.8mm の CFRP を VaRTM 成形によって接着することとした。

さらに、PF 材を用いた補修では、CF シートは中弾性タイプ（シートの厚さ 0.217mm、引張強度 2.4kN/mm²、弾性係数 440kN/mm²）

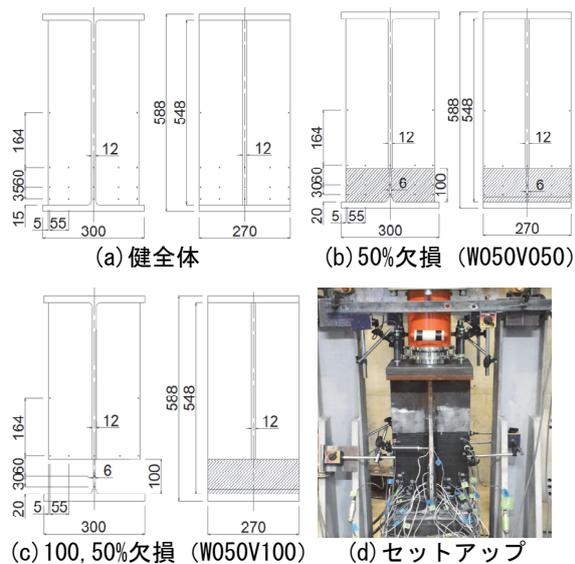


図-4.8 桁端柱部材のモデル化とセットアップ

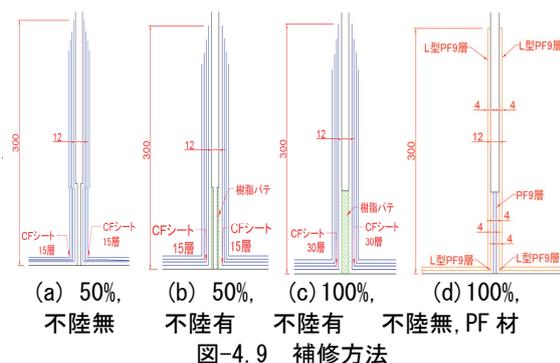


図-4.9 補修方法

を用いた。PF 材の積層数は 9 層とした。これは 9 層を基本に機械加工で束ねることを想定しているためである。欠損部は、平面状の PF 材を充填することで補修に必要な数量となるが、はく離防止のため、最外層に PF アンクル材を配置している。

補修範囲は、既設のガセット等を考慮して、高さ方向に 300mm とした。また、高さ方向の上端の応力緩和のために、50%欠損では 10mm、100%欠損では 5mm の段差をそれぞれ設け、テーパ状とした。補修工程は、下地処理、プライマー塗布、不陸修正、炭素繊維シートを仮止め、副資材の設置、真空含浸の手順である。図-4.10 に、代表的な補修の状況を示す。施工時には CF シートがセットボルトと干渉しないように切欠きを設けた。また、含浸時にボルトが樹脂で固着しないように、ボルトを養生した。表-4.3 に、実験パラメータを示す。

③実験結果と考察

図-4.11 に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。無補修の W050V050 と W050V100 の耐荷力は、健全体と比べ、それぞれ 46%、75%低下した。これは、ウェブと垂直補剛材の欠損部で、早い段階で降伏し、局部座屈が生じたためである。

一方、不陸修正を施して補修した W050V050RE では、健全体モデルに比べて、柱部材としての最大荷重は 1%高くなり、剛性も初期性能まで十分に回復していること、また、不陸修正なしで補修した W050V050RN では、剛性、耐荷力ともに初期性能まで回復しないことがわかる。さらに、不陸修正を施して補修した W050V100RE では、W050V050RN と同様に、十分に回復しなかった。W050V050RN では、不陸修正がないため、欠損部で CFRP に局所的な曲がりが生じて、弱点となったこと、W050V100RE では、不陸修正されたが、100%欠損部は樹脂充填のみであり、荷重伝達が不十分であったことが要因と考えられる。これに対して 100%欠損部に PF 材を充填して補修した W050V100PN では、最大荷重が健全体と同レベルまで回復していることがわかる。

図-4.12、図-4.13 に、荷重とウェブあるいは補剛材の下端から 50mm 位置の軸ひずみの関係をそれぞれ示す。W050V050RE、

表-4.2 鋼換算補修における炭素繊維量

項目	単位	50%欠損	100%欠損
鋼材の健全部の厚さ	mm	12.0	12.0
鋼部材の必要厚さ	mm	6.0	12.0
CF シートの積層数	ply	30	60
繊維体積含有率	%	50	50
CFRP の実際の厚さ	mm	9.8	19.6



図-4.10 補修の状況

表-4.3 実験パラメータと最大荷重

モデル名	状態	不陸修正	最大荷重 P_{max} (kN)	健全体に対する割合 (%)
W000V000	健全	—	2097.2	1.000
W050V050	無補修	—	1135.6	0.541
W050V100		—	533.8	0.255
W050V050RE	補修	有	2126.5	1.014
W050V050RN		無	1670.0	0.796
W050V100RE		有	1845.9	0.880
W050V100PN		無	2117.8	1.010

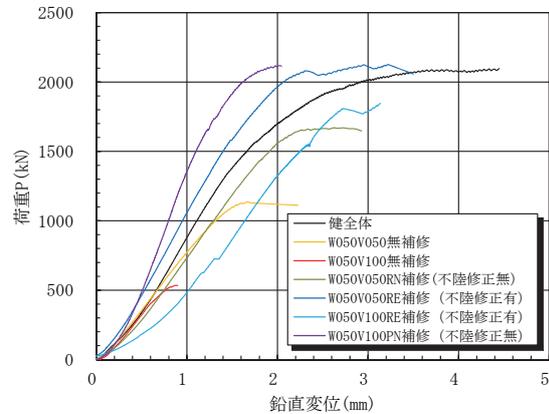


図-4.11 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

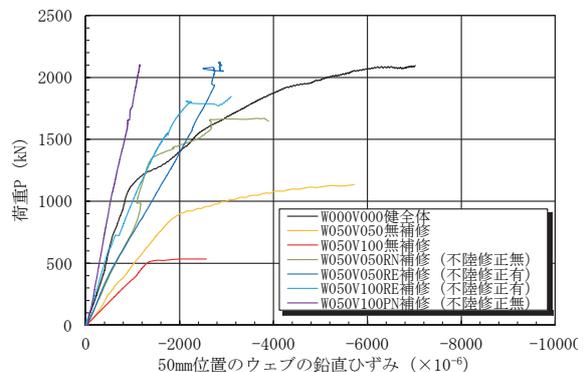


図-4.12 荷重と軸ひずみの関係 (ウェブ 50mm)

W050V100PN では、ひずみは、最大荷重付近までウェブ、補剛材ともに直線的に増加し、最終的に健全体よりも軸ひずみが抑制されることがわかる。W050V100RE においても、ひずみは最大荷重付近まではほぼ直線的に増加し、健全体よりも抑制されるものの、最大荷重付近で急激に不安定となり破壊している。一方、W050V050RN では、同様にひずみは抑制されるものの、1300kN 付近からひずみが増加し、耐力が低下した。

図-4.14 に、試験体の座屈変形を示す。健全体は全断面の塑性後に、上部に局部座屈が生じた。すべての補修モデルでは、欠損部で、CFRP ではく離が生じ、局部座屈が生じた。

④まとめ

以上のことから、50%欠損では不陸修正を施した上で鋼換算した CFRP による補修で、また、100%欠損では欠損部を CFRP で充填した補修で、耐力が回復することが確かめられた。さらに、セットボルトを回避した補修、両面で 60 層の多積層の場合の補修が可能であること、また、PF 材を利用すれば効率的な施工が可能であることを確認した。

(iii) 鋼板の座屈補強に関する検討

①検討方法と VaRTM による補強方法

実験は、鋼板 (1200×150×9mm) を用いた両端ピン支持条件下での圧縮載荷実験によって行い、CFRP 接着による座屈の補強効果を確認した。図-4.16 に、試験体図を示す。ピン支持条件とするナイフエッジの治具を取り付けるため CF シートの接着範囲は 1000×150mm とし、座屈前に CFRP がはく離することを防止するため、CFRP 端部に各層で 5mm の段差長を設けた。

試験体の作製は、まず、鋼板表面をケレン後、表面にエポキシ樹脂を薄く塗布するプライマー処理および加温養生を行い、樹脂を硬化させる。次に、CF シートを積層して資材を配置し、プラスチックフィルムでバギングする。その後、写真-4.2 に示すように真空化し、エポキシ樹脂を含浸させて、加温養生を行うことで作製した。養生条件は 40℃で 24 時間とした。樹脂の含浸方向は、5 層試験体では長手方向、それ以外は幅方向とした。

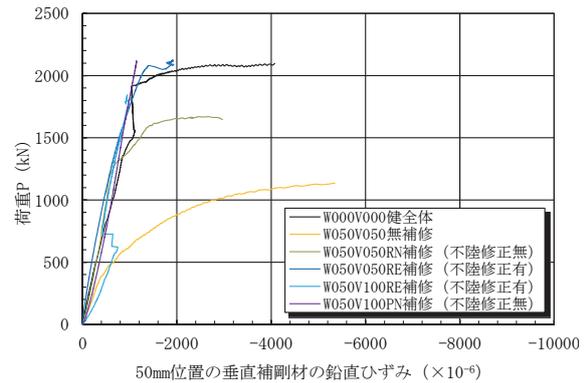


図-4.13 荷重と軸ひずみの関係 (補剛材 50mm)



(a) 健全体 (b) W050V050 (c) W050V050RE (d) W050V050RN
図-4.14 試験体の座屈変形

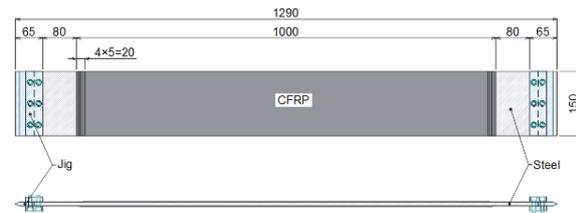


図-4.15 治具設置後の試験体の概略図

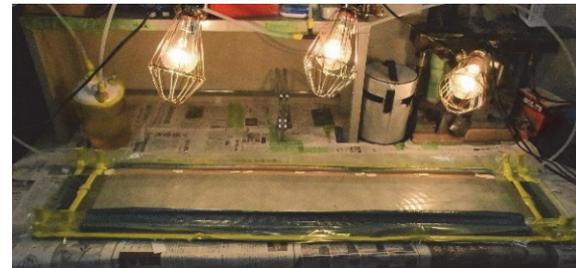


写真-4.1 VaRTM 工法による CFRP 接着の状況

表-4.4 材料物性値

	厚さ [mm]	弾性係数 [N/mm ²]	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
鋼板 (SS400)	7.8	208,700	330.2	462.5
CF シート (UT70-30G)	0.167 (1ply)	245,000	-	3400

表-4.5 実験パラメータ

CF シートの積層数 (ply)	片側のテーパ長さ (mm)	定着長 ²⁾ (mm)
0	0 (無補強)	0
5	5×4=20	35
10	5×9=45	71
15	5×14=70	106
20	5×19=95	131

使用したCFシートは高強度タイプ (UT70-30G)、鋼材はSS400材である。表-4.4に、材料物性値を示す。表-2に、実験パラメータを示す。試験体はCFシート5層ごとに20層まで、無補強を含めて5体用意した。表中の定着長は、作用力が鋼部材からCFRPへ接着剤を介して伝達される区間である。

圧縮荷重実験では、支持条件を両端ピンとし、変位制御 (1mm/min) で荷重を行った。一軸ひずみゲージを、図-4.16のように表裏で対称となるように設置した。写真-4.3に試験体セットアップ図を示す。

②検討結果と考察

図-4.17、表-4.5に、荷重と荷重点直下の鉛直変位の関係、座屈荷重の理論値、解析値、実験値をそれぞれ示す。座屈荷重の理論値は文献1)に基づいて、CFRPの段差部分を無視することで簡易的に算出した。解析値は、汎用有限要素解析ソフトウェア Marc/Mentat 2013 を使用して、鋼板全長の1/500の正弦半波の初期たわみを考慮した平面応力問題で、弾塑性有限変位解析を行うことによって得られた値である。

図-4.18、表-4.3より、実験値に対して最大で11%の誤差が発生するが、最大荷重はCFシート20層までに対して、十分な精度で予測できることが確認できた。また、10層以上の試験体でCFRPの端部からのはく離が発生すること、また、図を略したが、積層数の増加とともに、はく離発生までの面外変形量が小さくなることがわかった。これは、CFシートの積層数が多くなると断面剛性が増加し、面外変形に対する抵抗が増加するためである。

図-4.18は、荷重と20層試験体鋼板中央部におけるひずみの関係である。図より、実験では60kN付近から大きなひずみが発生しているのに対して、解析では初期の段階から実験値よりも大きなひずみを示していることがわかる。ひずみ挙動の差異については、今後、さらに検討の必要があるが、座屈荷重を比較した表-4.3より、解析値と実験値との差は10%以下に収まることがわかる。

最大荷重の到達後の挙動としては、積層数10層以上の試験体では、CFRP端部からのはく離が発生した。写真-4.3に、10層試験体の座屈後の変形を示す。はく離の発生後、

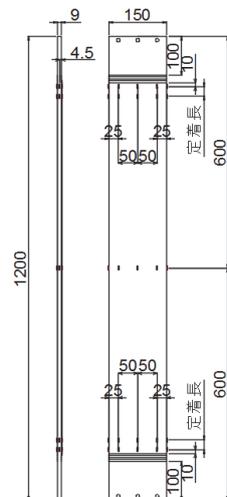


図-4.16 ゲージ位置

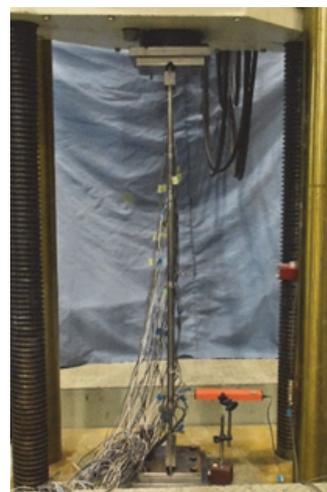


写真-4.2 セットアップ図

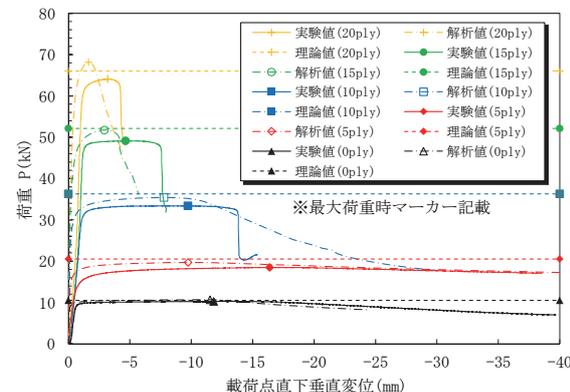


図-4.17 荷重-荷重点直下垂直変位関係

表-4.3 座屈荷重の理論値、解析値、実験値

積層数	理論値 P_{cr1} [kN]	解析値 P_{cr2} [kN]	実験値 P_{cr3} [kN]	P_{cr1}/P_{cr3}	P_{cr2}/P_{cr3}
0	10.53	10.52	10.28	1.02	1.02
5	20.51	19.69	18.47	1.11	1.07
10	36.30	35.41	33.38	1.09	1.06
15	52.12	51.72	49.19	1.06	1.05
20	65.99	68.12	64.10	1.03	1.06

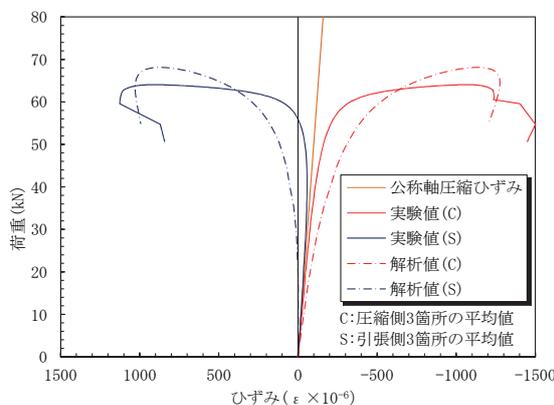


図-4.18 20層試験体における鋼板中央ひずみ挙動

CFRPの端部で、鋼板が局部的に折れ曲がるような形状であった。CFRPのはく離は、上下端の片側のみで発生し、はく離が発生した側で局部的な折れ曲がりが生じた。一方、解析では、はく離の影響を考慮していないが、最大荷重後に局部曲げが上下端の両側で生じたが、実験と同様の挙動を示した。

③まとめ

本研究では、真空含浸工法を応用して、CFRPを鋼板に接着して作製した試験体の座屈に対する補強効果を実験的に検討した。その結果、CFRPは座屈するまではく離しないこと、また、CF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確かめられた。



(a) CFRP 端部近傍の局部座屈 (b) 全体図
写真-4.3 10層試験体の座屈後の変形

(iv) 鋼桁端腐食部の補修・補強に関する解析的検討

①鋼桁端部と腐食による断面欠損のモデル化

図-4.19に、鋼桁のモデル化と腐食を考慮する範囲、また、表-4.4に、検討モデルの諸元をそれぞれ示す。鋼桁橋の端部を解析対象として、アスペクト比を1.0とし、支間長1,700mmの3点曲げ載荷試験を想定している。今後、実験により補修・補強効果を検証するために、スパン、桁高、ウェブ厚等を小型化したモデルとしている。

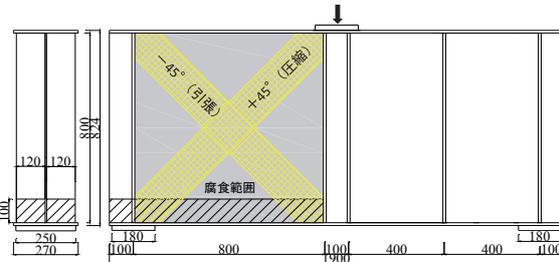


図-4.19 鋼桁のモデル化と腐食を考慮する範囲

腐食による断面欠損のモデル化については、垂直補剛材、ウェブの下端100mmの範囲(図-4.19の斜線部)とし、フランジの腐食は考慮していない。断面欠損部の形状は、垂直補剛材、ウェブの厚さに対する欠損率を、下端で75%、上端で0%(欠損なし)とし、高さ100mmの範囲で直線のテーパ形状とした。解析モデルは、シェル要素でモデル化し、腐食範囲の要素分割は、高さ方向に10分割とした。初期たわみは、ウェブの高さ方向に対して面外方向に1/250とした。鋼種はSM400であり、材料試験から降伏強度は、腹板で303.6MPa、上下フランジ、端垂直補剛材で297.1MPaであった。数値解析では、汎用有限要素解析プログラムMarc2013による弾塑性有限変位解析を行った。端垂直補剛材、ウェブの下端近傍の断面欠損を考慮したモデル(断面欠損モデル)および断面欠損がないモデル(健全体モデル)の曲げ耐力を、3点曲げ載荷の実験・解析により検討した。

表-4.4 検討モデルの諸元

部位	記号	単位	値
桁長	L	mm	1900
フランジ幅	b_f	mm	270
フランジ厚	t_f	mm	12
アスペクト比	h_w/L	-	1.0
ウェブ高さ	h_w	mm	800
ウェブ厚さ	t_w	mm	6
端垂直補剛材幅	b_s	mm	120
端垂直補剛材厚さ	t_s	mm	12

結果の一部として、図-4.20に、荷重と変位の関係を示す。健全体と断面欠損モデルの最大荷重が同じ値であり、破壊モードはウェ

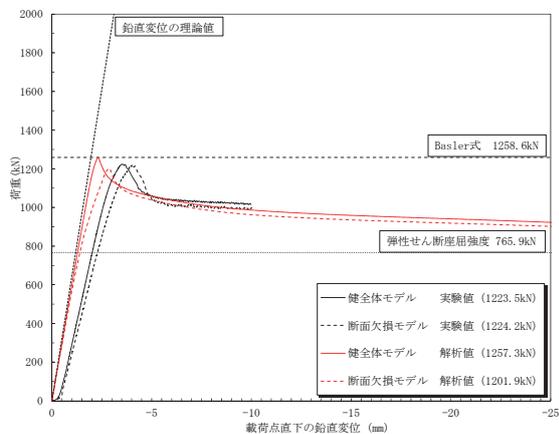


図-4.20 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

ブのせん断座屈であった。解析とよい一致を示したが、模擬した断面欠損は、耐力に及ぼす影響は小さいといえた。そこで本研究では、健全体モデル（以下、無補強モデルと呼ぶ）を対象に、桁端パネルのせん断座屈耐力の向上を目的として、図-4.19 に併記したように、CFRP の積層数、配向方向、接着範囲をパラメータとして、CFRP 部材による補強方法を解析的に検討することとした。

②CFRP 部材による補強方法とモデル化

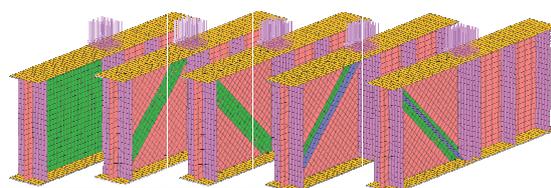
補強モデルでは、(1) 炭素繊維（以下、CF とよぶ）シート積層（全面接着モデル、部分接着モデル）、(2) プリフォームアングル（以下、PF とよぶ）材による 2 ケースを検討する。PF 材とは、CF シートを予め積層して所定の形状を保持した中間機材である。CF シートには、中弾性タイプ（シート厚さ 0.217mm、引張強度 2.4kN/mm²、弾性係数 440kN/mm²）を用い、繊維体積含有率を 50%、繊維の配向は鉛直（90°）方向、±45°方向とした。次に各補強モデルを示す。

1) CF シート積層による補強（全面接着、部分接着モデル）

このモデルでは、CF シート数（1～7 層）と、接着する範囲をパラメータとして、補強モデルを作成した。図-4.21 (a) は、ウェブの全面に、図-4.21 (b)、(c) は、ウェブの引張と圧縮方向に、それぞれ補強した解析モデルである。さらに、部分接着モデルにおいては、CFRP をシェル要素に加え、トラス要素を用い、幅（150、120、80mm）と長さ（1130、880、800、720）をパラメータとして検討した。

2) PF 材による補強（PF モデル）

図-4.21 (d)、(e) に示すように、積層数を変えた PF 材（H60×B120×Lmm）をウェブの引張と圧縮方向に設置した。



(a) 全面接着モデル (90°、±45°) (b) 部分接着モデル (+45°) (c) 部分接着モデル (-45°) (d) PF モデル (+45°) (e) PF モデル (-45°)

図-4.21 補強の解析モデル

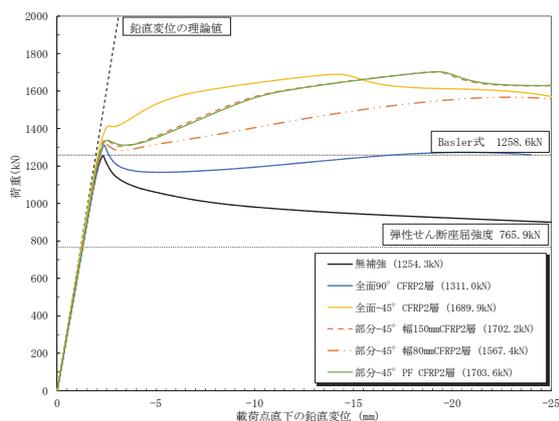


図-4.22 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係（引張方向）

③解析結果と考察

図-4.22、23 に、解析結果の一部として、CFRP を 2 層積層したときの荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を示す。図中に Basler 式によるせん断耐力の推定値を併記した。まず、Basler 式による推定値と無補強モデルの最大荷重が概ね一致することがわかる。図より、変位は 1200kN 付近まで線形的に増加し、全てのモデルでほぼ同じ傾向であることがわかる。また、圧縮力が生じる方向に CFRP を接着して補強した場合、補強効果はほとんどなかった。一方、引張力が生じる方向に CFRP を接着した場合、最大荷重が 1700kN 付近まで増加し、補強前に比べて、最大荷重は約 35%向上することがわかった。次に、引張力が生じる方向に CFRP を部分的に接着した場合、幅を小さくする

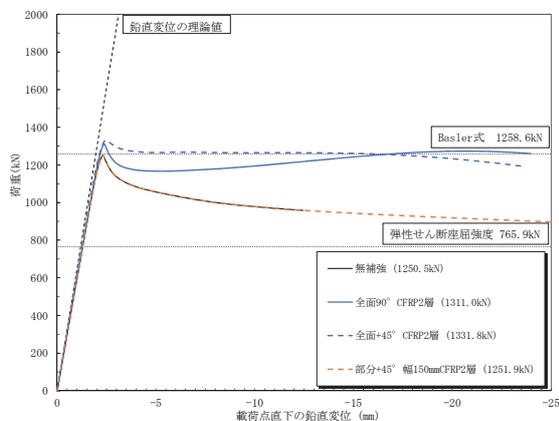


図-4.23 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係（圧縮方向）

と補強効果が低下した。したがって、斜張力場の引張応力の低減が、ウェブのせん断座屈の抑制に効果的であるといえた。

図-4.24 に、補強効果とCFシート量の関係を示す。補強効果は、無補強に対する最大荷重の増加率である。CFRPを全面接着して補強したモデルでは、積層数の増加とともに、補強効果が増加するが、35%付近から頭打ちとなる。これは、CFRPの積層数の増加によって、ウェブの面外変位が小さくなり、せん断座屈耐力が上昇するが、35%付近で補強されていない側のウェブがせん断座屈するためである。また、CFRPを引張側に接着して、部分的に接着した場合においても、全面に接着した場合と同等の最大荷重が得られることから、CFRPを引張側に部分的に配置することにより、数量を低減でき、合理的な補強が可能であるといえた。

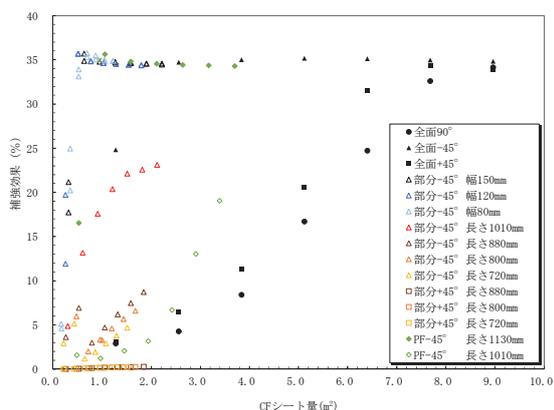


図-4.24 補強効果とCFシート量の関係

④まとめ

以上のことから、桁端ウェブパネルのせん断座屈に対する補強では、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。今後はこれらの補強効果を実験的に検証する予定である。

5) 試験施工による検証実験

本個別要素技術の開発では、(i) 鋼桁断面欠損部の補修対策工事に関する比較調査、(ii) VaRTM 成形による CFRP 接着工法の既設鋼桁への試験施工を行って、提案工法の有用性・実用性を確かめた。以下、それぞれの詳細を記述する。

(i) 鋼桁断面欠損部の補修対策工事に関する比較調査

鋼桁断面欠損部の補修対策工事に関する比較調査を実施した。補修対象は、鋸桁下フランジ（一般部）、端横桁上下フランジ（一般部）とし、補修範囲は $0.5\text{m}^2/\text{箇所}$ とした。比較する工法は、表-5.1 に示すように、従来工法である、A.鋼当板高力ボルト接合法、B.炭素繊維シート接着工法、C.VaRTM 工法（提案工法）の 3 ケースである。また、比較内容は、①準備工、②作業性、③維持管理性、④有効性、⑤既設部材への影響、⑥コスト（初期費用、LCC）である。なお、実績がない項目については、本研究の開発を前提として試算することとした。評価点は、それぞれ◎：10、○：7、△：5、×：1 とし、重要度係数として、比較項目ごとの評価点を、一般の場合、1.0 倍、重要の場合、1.5 倍とした。

比較設計の成果の一部として、表-5.2～表-5.7 に、準備工、作業性、維持管理性、補修の有効性、既設部材への影響およびコストの比較結果をそれぞれ示す。また、評価項目を数値化して、各工法の優位性を総合的に評価することを試みた。図-5.1 に、各工法の総合的な比較結果を示す。

これらの結果より、工法の特徴、具体的な工期・コストが明確になった。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法よりも優れることがわかり、総合評価でも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。

これらの検討結果から、提案工法の鋼桁断面欠損部の補修に対する妥当性と有用性が示された。

表-5.1 比較対象とした補修工法

工法名	鋼当板高力ボルト接合法	炭素繊維シート接着工法	VaRTM工法
事例			
特徴	鋼板、高力ボルト、摩擦接合	炭素繊維シート、接着接合	真空含浸、接着接合、センサー

表-5.2 準備工の比較結果

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法		B. 炭素繊維シート接着工法		C. VaRTM工法	
		内容	評価	内容	評価	内容	評価
調査工	一般	腐食物撤去、計測（範囲、板厚など） 設計技師2名	△	A同様 設計技師2名	△	A同様 設計技師2名	△
	1.0		5		5		5
設計工	一般	調査報告、方針協議、当板図面（製作及び施工に必要） 設計技師3.9名	△	A同様 設計技師2名	△	A同様 設計技師2名	△
	1.0		5		5		5

表-5.3 作業性の比較結果
(a) 施工の容易さ等

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
運搬	重要	手運び:補強材35kg~,発電機30kg,工具類30kg 橋梁世話役1名、橋梁特殊工1名、普通作業員1名	× 手運び:補強材1kg~,発電機30kg,工具類6kg 橋梁世話役1名、橋梁特殊工1名、普通作業員1名	◎ 手運び:補強材1kg~,発電機30kg,工具類6kg 橋梁世話役1名、橋梁特殊工1名、普通作業員1名
	1.5	1.5	15	15
現場設備	一般	◎ 発電機のみであるため、比較的、簡易設備	○ 発電機のみであるため、比較的、簡易設備	○ 発電機のみであるため、比較的、簡易設備
	1.0	7	7	7

(b) 施工性

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
準備工	重要	3種ケレン 腐食部は不陸修正 グラインダーケレン	◎ 1種ケレン、プライマー 腐食部は不陸修正 ブラスト面形成動力工具	△ 1種ケレン、プライマー 腐食部は不陸修正 ブラスト面形成動力工具
	1.5	15	7.5	7.5
本施工	重要	△ 高力ボルト接合(シャーレンチ、トルク管理) キャリブレーション試験が必要	× 接着接合(プライマー、バテ、含浸、シート) 養生時間が長く、連続作業は不可、管理項目多い	○ 接着接合(各種シート、バギング、真空、含浸) 連続作業可能、熟練度必要
	1.5	7.5	1.5	10.5

(c) 工程

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
日数	重要	× 1日施工+塗装4日=5日間 高力ボルト、鋼材より、重防食は必須	× 4日施工+塗装1日=5日間 プライマー、接着工程が多い、塗装は上塗りのみ	◎ 1.5日施工+塗装0.5日=2.0日間 仕上げ後に上塗り実施=0.5日
	1.5	1.5	1.5	15

(d) 施工の信頼性

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
施工の信頼性	重要	◎ 高力ボルトの軸力管理(機械管理)で同品質	△ 作業者の経験、技量の影響が大きい	○ 作業者の経験、技量の影響が大きい、製作の品質は高い
	1.5	15	7.5	10.5

表-5.4 補修の有効性の比較結果

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
応力低減	一般	○ 既往の文献により補強効果あり(すべり耐力確保) 活荷重、地震時	△ 既往の文献により補強効果あり(実績少ない) 活荷重、地震時	△ 実績無し、実験にて確認 活荷重、地震時
	1.0	7	5	5
防食効果	一般	◎ 塗装の耐久性にて決まる	◎ 塗装の耐久性にて決まる	◎ 塗装の耐久性にて決まる
	1.0	10	10	10

表-5.5 既設部材への影響の比較結果

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
安全性	重要	× 孔明けの断面欠損、検証、パイパスなど必要	○ 孔明け無し、軽量、パイパス等も不要	◎ 孔明け無し、軽量、パイパス等も不要
	1.5	1.5	15	15

表-5.6 維持管理性の比較結果

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法
耐久性	重要	塗装の耐久性、高力ボルトの軸力より、極めて高い	◎ 塗装の耐久性、接着補強の耐久性は不明確	△ 塗装の耐久性、接着補強の耐久性は不明確
	1.5		15	7.5
点検	一般	目視点検のみ	◎ 目視点検・赤外線カメラ点検	△ 目視点検・内蔵POFセンサにてモニタリング可能
	1.0		10	5
復旧性	一般	再補修：塗替え、ボルト交換 取替：設置同様	○ 再補修：注入、取替：設置同様 取替えの場合、撤去に時間を要する	△ 再補修：注入、取替：設置同様 取替えの場合、撤去に時間を要する
	1.0		7	5
補強等	一般	共締め補強可能、塗替え塗装可能	◎ 設置不可、保護層（アラミド繊維）の損傷が懸念 グラインダーケレンは避けたい	× 設置不可、表面樹脂の損傷 グラインダーケレンは避けたい
	1.0		10	1

表-5.7 コストの比較結果

比較項目	重要度係数	A. 鋼当板高力ボルト接合法	B. 炭素繊維シート接着工法	C. VaRTM工法			
初期費	一般	1.00	◎	2.03	×	1.40	○
	1.0		10	1	7		
LCC	重要	1.00 (30年) 1.94 (50年)	◎	3.83 (30年) 6.95 (50年)	×	1.87 (30年) 3.49 (50年)	○
	1.5		15	1.5	10.5		

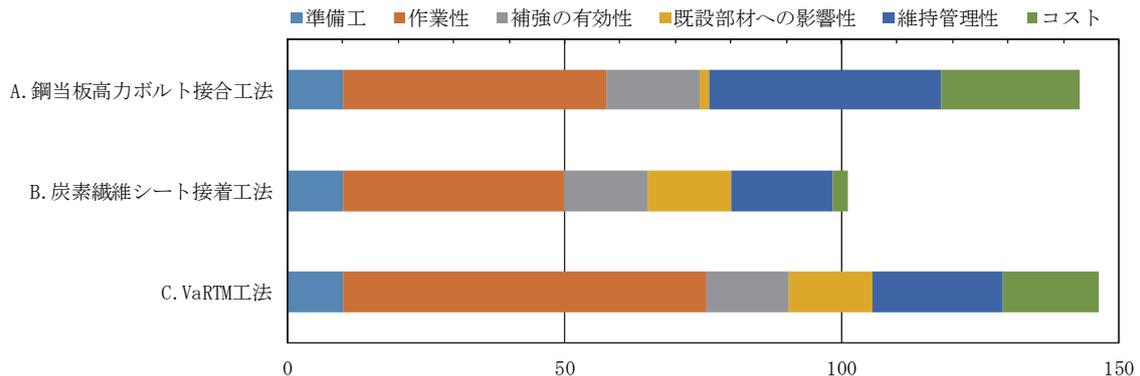


図-5.1 各工法の総合的な比較結果

(ii) VaRTM 成形による CFRP 接着工法の既設鋼桁への試験施工

① 施工試験の概要

開発した VaRTM 成形による CFRP 接着工法（現場 VaRTM 工法）の施工性を検証することを目的として、既設鋼桁に本工法を適用して、施工の妥当性、有用性を検証した。

主に、作業員への施工指導と施工性（工数、作業時間、難易度、課題の抽出など）の確認に着目するため、試験施工の条件は以下の通りとする。

- ① 工期は、施工教育と現場での準備工から仕上げまでの全工程でとし、3日間とする。
- ② 高所作業車上からの施工を基本とするため、架設足場は設けない。
- ③ 鋼材の素地調整は、1種ケレン相当とする。

② 施工道具・資材

施工設備は、①真空ポンプ、②真空計、③樹脂粘度計（使用せず）、④施工道具一式（ピンチオフプライヤー（バイス）、剪定ハサミ、樹脂ローラー、スクレーパー、金槌）である。

現場 VaRTM 用副資材は、①ピールプライ、②メディア、③バギングフィルム、④シーラントテープ、⑤チューブ、⑥チューブ継手、⑦スパイラルネットである。

③施工内容

施工箇所として、図-5.2に、横桁の垂直補剛材と一般部を示す。



図-5.2 横桁の垂直補剛材と一般部

試験施工箇所は、2箇所であり、(1)桁端部補修と(2)補剛材設置補強とした。図-5.3に、桁端部補修、図-5.4に、補剛材設置補強をそれぞれ示す。

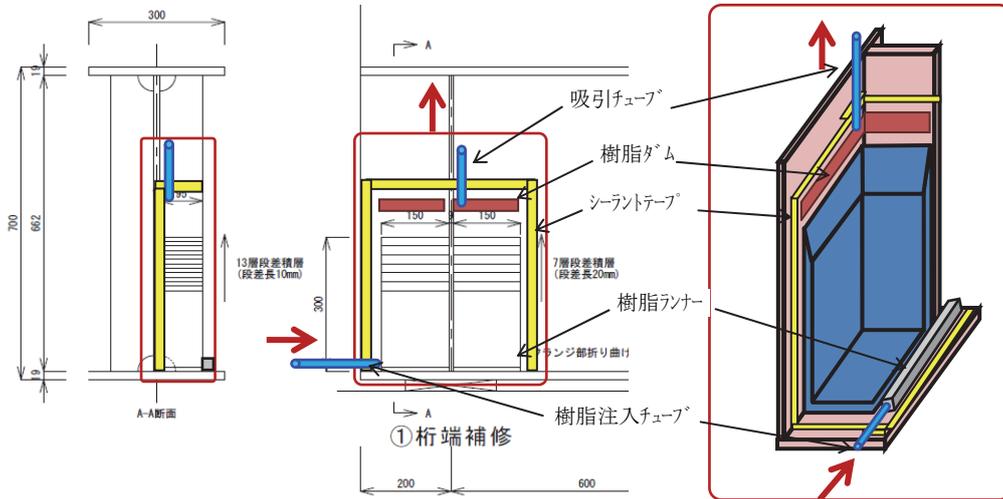


図-5.3 桁端部の補修図

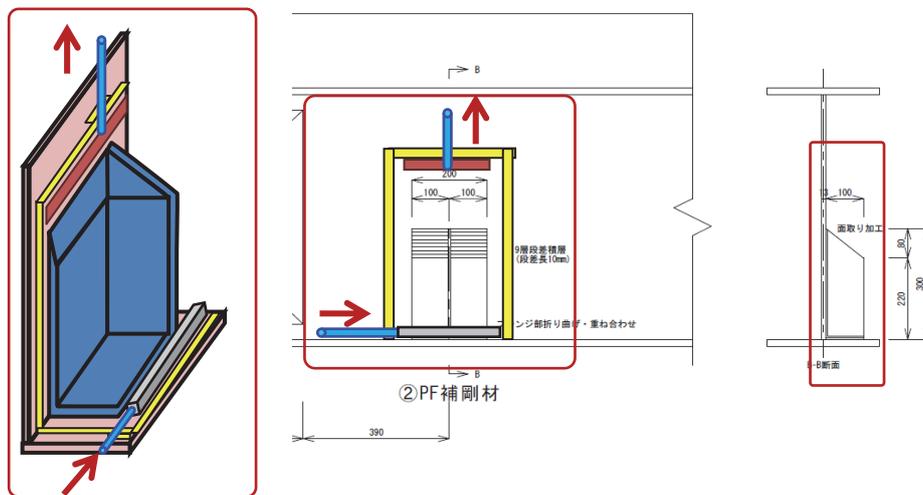


図-5.4 補剛材設置の補強図

④施工要領

標準施工は、図-5.5 に示す施工フローにて行う。

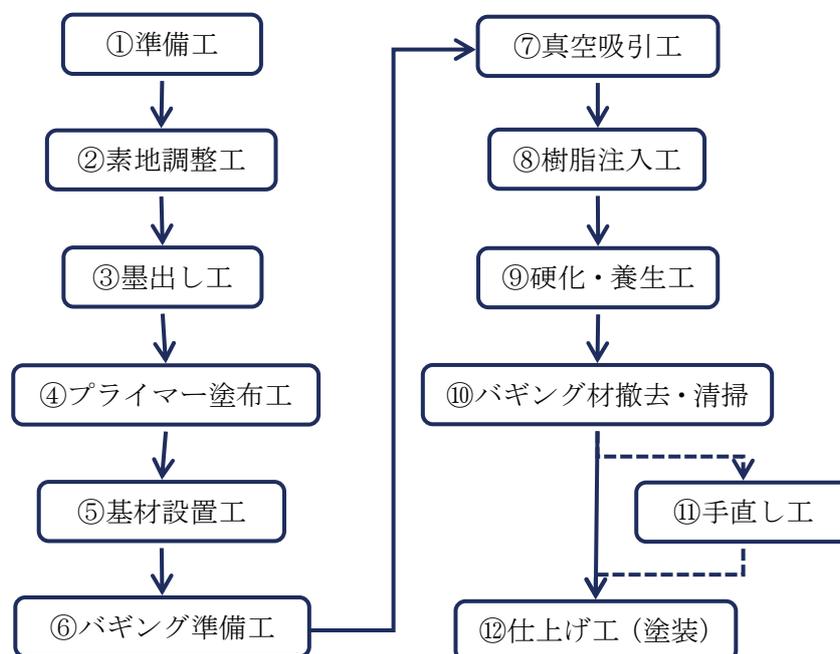


図-5.5 施工フロー

⑤施工状況

試験施工の各工程の状況は以下の通り。

1) 準備工

準備工としては、数量確認、資材搬入、飛散対策の養生などを行った。真空ポンプの電源確保（延長コードによっては、電圧の低下が生じるので注意）も必要である。冬季施工では加温対策も含めるとよい。VaRTM 資材（炭素繊維シート、ガラスマット（GM）、ピールプライ、樹脂拡散メディア、シーラントテープ、樹脂ホース）を、設計図にしたがって、採寸、切断した。熱可塑性粒子付き炭素繊維シートを、アイロンで加熱して、PF 材化した。準備工は、前日と当日の施工前に行った。

2) 素地調整工

素地調整は、はじめに、乾式ダイヤモンドブレードのディスクグラインダーでケレンを行い、その後、ブラスト面形成動力工具（ブリストルブラスター）を使用して、1種ケレン相当とした。ケレン後に素地の状態を確認する。溶接ビード部、腐食（孔食）部についても確認する。ビード部、スッカーラップ部で、既存塗料、錆などが除去できない場合には、ベルトサンダーで除去した。素地調整の範囲は、バギングする範囲を想定して、炭素繊維シートの設置範囲より大きく取る。

処理後の素地状態は、拡大鏡を用い、見本と比較して検証するが、省略した。素地調整後、有機溶剤（アセトン）を用いて、ケレンした面を十分に清掃し、脱脂する。

3) 墨出し工

炭素繊維シートの接着範囲、パイプ、バギングの配置を決めるために罫書きを行うが、桁端部は補剛材に合わせるため、ほとんど不要であった。

4) プライマー塗布工

脱脂後、発錆しないように、速やかにプライマーを塗布した。塗布後は、加温等は行わなかった。プライマーの塗布は VaRTM 成形の前日に行った。

5) 機材設置工

準備工で準備した PF 基材を、設計図にしたがって設置した。

6) バギング準備工

バギングフィルムを配置し、シーラントテープで封止した。

7) 真空吸引工

ベント側ホースを真空ポンプに、樹脂側ホースに真空計をつないだ後、真空ポンプで、真空化する。資材のずれ、めくれなどがなく、所定の位置に配置されているかどうかを確認する。リークチェックを行って、エア漏れがないことを確認した。エア漏れがある場合には、樹脂ローラーを用いて、シーラントテープをしごいて、封止を十分に行った。表-5.8 に、現場施工時の真空度を示す。桁端補修側ではほぼ真空度であったが、補剛材設置補強側は、低真空度であった。その要因として、塗装表面へのシール材の接着性に問題があったと考えられた。

表-5.8 真空度

部位	真空度 (kPa)	気温 (°C)
桁端補修	-100.8	9~11
補剛材設置補強	-92.0	

8) 樹脂注入工

含浸接着樹脂の設計にしたがって計量する。主剤と硬化剤を混ぜて十分に攪拌する。温度、粘度、時刻を計測して、記録したが、粘度は計測しなかった。

桁端補修では、低温であったため、エポキシ樹脂を容器ごと湯煎して、33.2°Cとした。しかしながら、冬季施工用樹脂（使用温度：15~20°C）であったため、硬化が促進されて発熱した。途中で樹脂を交換した。

補剛材設置補強では、常温（10°C）で吸引を行った。粘度は高く、吸引は遅かったが、含浸に特に問題はなかった。含浸・注入中に、電気毛布で加温を開始した。表面温度は約 15°Cであった。

9) 硬化・養生工

樹脂が硬化するまで、養生を行った。気温は 10°C程度であったため、電気毛布で加温し、15°C程度となるようにした。夜間は無人となるため、停止した。夜間の温度は計測していないため、不明である。なお、養生中に、エアが侵入した。原因は、塗装面へのシーラントテープの付着力不足が考えられた。

10) 資材撤去、清掃

翌日、樹脂の硬化を確認したが、夜間の気温が低かったため（5°C程度）、もう 1 日養生することとした。2 日後の午後に、余分な資材（バギングフィルム、樹脂拡散メディア、チューブ、ピールプライ、シーラントテープ）を除去した。

所定の形状となっていない箇所については、サンダー等を用いて切削し、形状を整えた。

11) 仕上工（塗装）

試験施工の 3 日間では、仕上げを省略した。

表-5.9 に、各工程の作業時間のまとめを、図-5.6 に、作業時間の内訳をそれぞれ示す。作業性は、垂直補剛材のない、補剛材設置補強側の方がよかったため、素地調整工の時間が少なくなり、全体としても時間が短かった。なお、樹脂注入工は、接着剤の可使時間（1.5時間程度）の上限まで実施したため、作業時間の中で最も多くを占めている。

図-5.7 に、資材撤去後の状況を示す。養生中にエアが混入したため、表面に凹凸が生じたが、全体としての仕上がりは良好であった。打音検査で確認した範囲では、ボイド等の存在は認められなかった。

表-5.9 作業時間（分）のまとめ

工程	①桁端補修側	②補剛材設置補強側
②素地調整工	73	39
③墨出し工（片付け）	20	20
④プライマー塗布工	18	18
⑤機材設置工	38	5
⑥バギング準備工	17	31
⑦真空吸引工	16	19
⑧樹脂注入工	89	90以上
合計	271	222

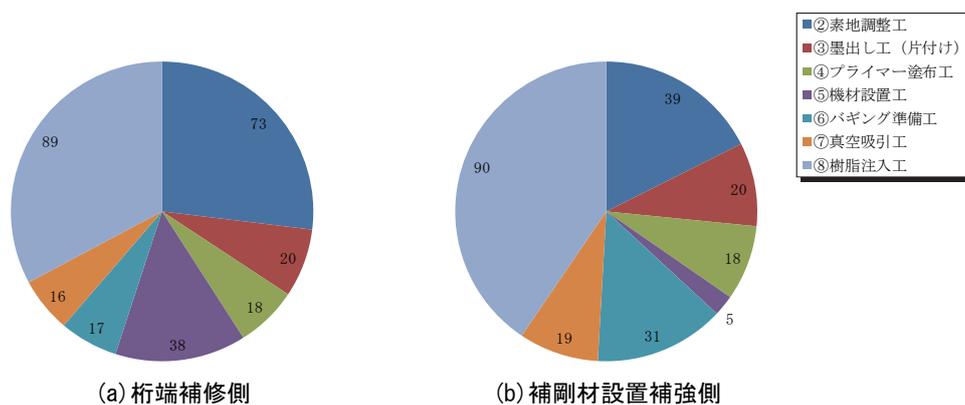


図-5.6 作業時間（分）の内訳

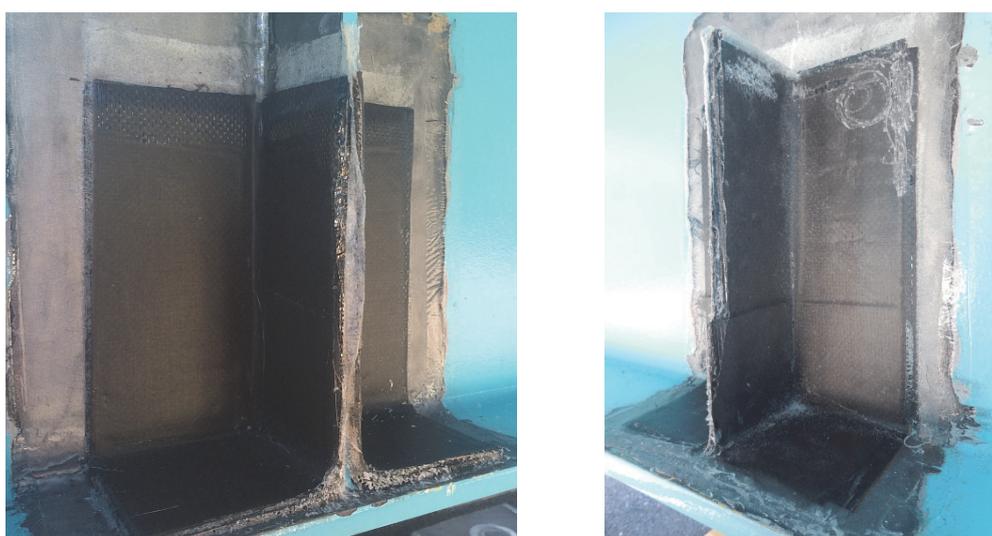


図-5.7 資材除去後の状況

⑥試験施工のまとめと今後の課題

気温 9℃の冬季に、実大橋梁鋼桁を対象に、桁端部補修および補剛材設置の 2 種類の試験施工を実施した。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。今後、明らかとなった課題を整理し、施工マニュアルへ反映させる。試験施工を踏まえた、課題は次の通りである。

- 1) 環境温度 (7~30℃を想定) に対する施工・養生条件の整理
- 2) シーラントテープの貼付け位置 (塗装部は不可) と処理方法
- 3) リークチェックの判断基準とリーク対応のマニュアル化
- 4) 真空ポンプの仕様 (電圧の問題、低真空 (-90kPa) 下での連続運転)

(9) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は雑誌名 (巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
2016年(平成28年)春季第63回応用物理学関連連合講演会(プラスチック光ファイバの複合材料への超音波溶着、20p-S322-6、東京工業大学大岡山キャンパス)	H28.3.20	応用物理学学会	島田俊平、田中宏樹、長谷部和彦、林寧生、越智寛、松井孝洋、西崎到、松本幸大、田中洋介、中村一史、水野洋輔、中村健太郎
第57回 光波センシング技術研究会講演論文集(FBG センサによる接着接合内部の損傷モニタリングに関する基礎検討)	H28.6.14	応用物理学学会	織笠千春、吉岩明彦、水野洋輔、中村健太郎、中村一史、松本幸大
21st OptoElectronics and Communication Conference and International Conference on Photonics in Switching 2016 (OECC/PS 2016) (Ultrasonic welding of plastic optical fibers onto composite materials, paper ThC3-3, Niigata, Japan)	H28.7.3	OptoElectronics and Communication Conference	S. Shimada, H. Tanaka, K. Hasebe, N. Hayashi, Y. Ochi, T. Matsui, I. Nishizaki, Y. Matsumoto, Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Mizuno, and K. Nakamura
Electronics Letters (Ultrasonic welding of polymer optical fibres onto composite materials, Vol.52, No.17, pp.1472-1474, 2016)	H28.7.22	Institution of Engineering and Technology	S. Shimada, H. Tanaka, K. Hasebe, N. Hayashi, Y. Ochi, T. Matsui, I. Nishizaki, Y. Matsumoto, Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Mizuno, and K. Nakamura
首都大学東京 第8回施策提案発表会(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)	H28.7.28	首都大学東京	中村一史
土木学会第71回年次学術講演概要集(VaRTM成形を応用したCFRPによる鋼桁端腐食部の補修に関する検討)	H28.9.7	土木学会	小林洸貴、近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
土木学会第71回年次学術講演概要集(CFRP部材による鋼桁端腐食部の補修方法と性能回復に関する解析的検討)	H28.9.7	土木学会	近藤諒翼、小林洸貴、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
25th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2016) (Refractive index sensing using ultrasonically crushed plastic optical fibers, paper OP37, Birmingham, UK)	H28.9.13	International Cooperative of Plastic Optical Fibers	S. Shimada, H. Lee, M. Shizuka, H. Tanaka, N. Hayashi, Y. Matsumoto, Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Mizuno, and K. Nakamura
第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム(VaRTM成形を応用したCFRPによる鋼桁端腐食部の補修)	H28.11.13	土木学会	小林洸貴、近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
第6回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム(CFRP部材による鋼桁端腐食部の補修方法と性能回復に関する基礎的検討)	H28.11.13	土木学会	近藤諒翼、小林洸貴、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
Applied Physics Express (Refractive index sensing using ultrasonically crushed polymer optical fibers, Vol.10, No.1, 012201, 2017 [Featured in "Spotlights"])	H28.11.24	Japan Society of Applied Physics	S. Shimada, H. Lee, M. Shizuka, H. Tanaka, N. Hayashi, Y. Matsumoto, Y. Tanaka, H. Nakamura, Y. Mizuno, and K. Nakamura
第58回光波センシング技術研究会(LST-58)講演論文集(超音波振動によ	H28.12.8	応用物理学学会	島田俊平、李熙永、閑誠、田中宏樹、林寧生、松本幸

り潰したプラスチック光ファイバを用いた屈折率センシング、pp.67-72、東京理科大学神楽坂キャンパス)			大、田中洋介、中村一史、水野洋輔、中村健太郎
CICE2016 (Development of repair and strengthening method of steel members using VaRTM technology)	H28.12.14	IIFC	H. Nakamura, R. Kondo, T. Matsui and Y. Matsumoto
第30回光通信システム(OCS)シンポジウム(局所的に潰したプラスチック光ファイバを用いた屈折率センシング、P-7、三島東レ総合研修センター)	H28.12.20	電子情報通信学会	島田俊平、李熙永、閑誠、田中宏樹、林寧生、松本幸大、田中洋介、中村一史、水野洋輔、中村健太郎
日本建築学会東海支部研究報告集(VaRTM成形を応用したCFRPと鋼材との接着強度)	H29.2.21	日本建築学会	三枝玄希、Cao Minh、中村一史、松井孝洋、越智寛、松本幸大
土木学会論文集A1(真空含浸工法を応用したCFRP接着による鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討、第4巻)	H29.5.30 (登載決定)	土木学会	小林洸貴、近藤諒翼、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
APFIS2017 (Experimental Study on Repair of Section Loss in Girder End by Externally Bonded Carbon Fiber Sheets Using VaRTM)	H29.7.19 (投稿中)	IIFC	H. Nakamura, K. Kobayashi, R. Kondo, V. Thay, Y. Matsumoto, T. Matsui and Y. Ochi
日本建築学会大会学術講演梗概集(炭素繊維強化樹脂と鋼材との接着接合部応力性状と損傷センシング その1 3点曲げ試験による耐力と破壊性状分析)	H29.8.30 (投稿中)	日本建築学会	Cao Minh、三枝玄希、松井孝洋、松本幸大、中村一史
日本建築学会大会学術講演梗概集(炭素繊維強化樹脂と鋼材との接着接合部応力性状と損傷センシング その2 FBG型光ファイバセンサを用いたCFRP内部の損傷センシング)	H29.8.30 (投稿中)	日本建築学会	三枝玄希、Cao Minh、松井孝洋、松本幸大、中村一史
土木学会第72回年次学術講演概要集(複合応力を受ける接着接合部のFBGセンサを用いた損傷モニタリング)	H29.9.11 (投稿中)	土木学会	松本幸大、織笠千春、三枝玄希、中村一史、水野洋輔、中村健太郎
土木学会第72回年次学術講演概要集(CFRP部材による鋼桁端腐食部の補修・補強に関する解析的検討)	H29.9.11 (投稿中)	土木学会	近藤諒翼、小林洸貴、タイウイサル、中村一史、松本幸大、松井孝洋、越智寛
土木学会第72回年次学術講演概要集(VaRTM成形で接着されたCFRP部材による断面欠損した桁端柱部材の性能回復について)	H29.9.11 (投稿中)	土木学会	松山晃大、タイウイサル、中村一史、松井孝洋、松本幸大
土木学会第72回年次学術講演概要集(VaRTM成形で接着されたCFRP部材による鋼板の座屈補強に関する実験的研究)	H29.9.11 (投稿中)	土木学会	佐藤潤、タイウイサル、中村一史、松井孝洋、松本幸大

(10) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
構造物へのFRP材の接着構造とその接着方法	特願 2017-86066	H29. 4. 25	(出願中)	東レ、首都大学東京、豊橋技術科学大学

(11) 成果の実用化^{*}の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

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。

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、多数の炭素繊維基材による補強を施工する場合においても樹脂含浸・成形が適切に行えることや、接着層に相当する GFRP 層が安定して形成されることで、極めて安定した接着強度を確保できることが確認できた。以上のような施工・成形・力学の他方面からの品質の向上技術を開発することができ、実用性の高い VaRTM 成形・同時接着による高性能な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 を用いた補強材の歪分布の測定は、印加歪の進展のモニタリングや CFRP 層の剥離の検出等に大変有用であることが明らかになった。しかし、社会実装のためには、システム全体のコスト低減および小型化が急務である。現状では、比較的高価かつ大型装置である電気スペクトラムアナライザやレーザの駆動・変調用機器など、汎用測定器を組み合わせて使用しているが、実際に使用されている機能はごく一部に過ぎない。そこで、必要な機能をローカルな電気回路で実装するなどして専用の処理系を実現できれば、システムの低コスト化と小型化が同時に促進できると期待される。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期間内に行うのは困難であり、今回は原理・装置構成の考案と動作条件の追究等に集中した。2年後を目途に、専用装置化により持ち運びが容易なプロトタイプを製作し、現場適用データを積み重ね、社会に対して有用性を示していきたい。一方、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、すでに現場適用に極めて近い位置にいると考えられる。今後は、光ファイバが埋め込まれている状況（材質や深さ）によって、必要となる光パワーがどのように変化するかを実験的に検証した上で、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。