

(9) VaRTM成形接着によりCFRP補強された鋼板の曲げ挙動と損傷センシング

三枝 玄希¹・Cao Minh²・松本 幸大³
中村 一史⁴・松井 孝洋⁵・越智 寛⁶

^{1,2}日本建築学会 正会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:g155503@edu.imc.tut.ac.jp , c153552@edu.imc.tut.ac.jp

³土木学会 正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail:y-matsum@ace.tut.ac.jp

⁴土木学会 正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域

(〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail:hnaka@tmu.ac.jp

⁵土木学会 正会員 東レ ACM技術部 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町2-1-1)

E-mail:Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁶東レ アドバンスドコンポジットセンター (〒455-0024 愛知県豊橋市名古屋市港区大江町9-1)

E-mail:Yutaka_Ochi@nts.toray.co.jp

高度経済成長期に建設された鋼構造物を構成する鋼材が腐食・減肉し、構造性能の低下が多数報告されている。その対策として炭素繊維強化樹脂（以下、CFRP）を腐食・減肉部へ接着することで補修・補強を行う接着接合法が研究・開発されている。しかし、この工法には接着層での脆性破壊や施工後の維持管理が困難という問題点がある。そこで、Fiber Bragg grating optical fiber sensor（以下、FBGセンサ）を真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding）によりCFRP積層部内部に埋設と鋼材への接着成形接合を同時に行い3点曲げ試験を行った。同時にCFRP内部の損傷センシングを実施し、FBGセンサから得られた光パワースペクトルについて分析と評価を行った。

Key Words : CFRP, VaRTM, Bending test, FBG sensor, Damage sensing

1. はじめに

高度経済成長期から約60年、当時建設された膨大な構造物が徐々に経年劣化し社会問題となっている。鋼構造物に関しては構造物を構成する鋼材が腐食・減肉し、鋼構造物の構造性能低下が多数報告されている^{1,2)}。現在、これらの対策として繊維材料を樹脂によって接着し、補修・補強を行う接着接合法技術が研究・開発されている^{3,4)}。しかし、同工法には接着層界面において急激に破壊が生じる脆性的な破壊モードを有していること、施工後の維持管理について困難である状況にあることが問題点として挙げられる。これらは接着接合部内部の応力状

態の解明と健全性モニタリングによって改善されると考えている。鋼構造物に対する接着接合法による補修・補強方法は構造体の重量を抑制すること、鋼材に匹敵する高強度・高弾性である等の要求がある。これらの要求を満たすものとして、炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Polymer : 以下、CFRP）による補修・補強提案が多くなされている。また、筆者らが注目しているFiber Bragg grating optical fiber sensor（以下、FBGセンサ）を用いた構造ヘルスマニタリングは維持管理分野において近年発展の途を辿っている⁵⁾。そこで、鋼構造物に対するCFRPによる補修・補強方法とFBGセンサによる構造ヘルスマニタリングの2つについて聯立を図った。CFRPに

よる補修・補強方法はハンドレイアップ成形接着法やCFRP板の接着接合法によるものが従来多くを占めているが、多積層・広範囲成形や不陸面への追随性を考慮した場合に施工期間の長期化や施工性に困難が生じる。FBGセンサについては歪・温度変化の計測や塑性化検知の研究は行われているが、先端複合構造における補修・補強部内部の歪計測、損傷センシングへの適用研究は少ない。そこで本研究では、風力発電用のブレード等の成形に用いられている真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding 以下、VaRTM）を鋼構造物に対する補修・補強方法⁶⁾へ応用した。同工法は多積層・広範囲成形が容易で施工期間の短縮化へ繋がる。既往研究⁷⁾では二面引張剪断試験による剪断強度を評価した。本研究では補修・補強後の面外力下における挙動を評価するため3点曲げ試験を行い、曲げ挙動の分析と評価およびCFRP内部に埋設したFBGセンサを用いて損傷センシングを実施し、得られた光パワースペクトルの分析を行った。

2. VaRTMの概要と特徴

VaRTMはインフュージョン成形法に属しており、真空減圧を利用して樹脂を含浸させる成形法である⁸⁾。この成形法の特徴は、作業環境に優れ、強化材含有率の高い成形が可能、信頼性および再現性に優れる等の長が挙げられる。応用例には風力発電用のブレード、掃海艇、舟艇などがある。成形は下型が高剛性で、上型には真空状態で強化材に形状が追随するフィルム等を用いて気密性を保ち、下型の上に必要であればゲルコート塗布し、その上に強化材を配置、ピールプライ、ニットやメッシュ形状のフローメディア（樹脂流動媒体）を載せて、シーラーフィルムによって密封し真空減圧をする。所定の真空圧（約-100kPa）に達した時点で硬化剤を混合した樹脂を周囲から吸引賦形し、硬化後フィルム等を剥がし脱型する成形法である。本研究では構造体の補修・補強への応用を目的としているため、被補強材の鋼材を下型として用いている。図-1に模式図を示す。

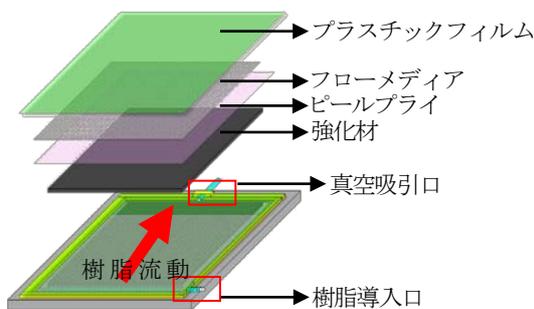


図-1 VaRTM模式図

3. FBGセンサの概要

光ファイバは材料の全反射を利用した光の伝送路である。内部は光が伝搬するコアとそれを保護するクラッドから構成されている。この光ファイバを歪センサとして利用できるよう加工を施したものがFBGセンサである⁹⁾。センサ部に電気を使用しないため、防爆性に優れる、腐食による劣化がないため、耐久性が高い、小型で建築材料への埋込が可能である等の特徴をもつ。FBGセンサは光ファイバのコアに図-2のような屈折率の周期的な変化をもたらせるため、ブラッグ回折格子を書き込んでいる。この回折格子間隔と反射波長が比例することにより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。従って、図-3のようにブラッグ回折格子による反射光には2種類の形状があり、外力による歪や温度変化によってセンサ部周辺の材料に応力変化が生じた場合は波形およびピーク数が変化する。センサ部周辺の応力変化が均一変化の場合は光パワースペクトルが単一ピーク型のまま反射波長のみ変化する。また、センサ部周辺材料の降伏等による応力の不均一変化の場合はブラッグ回折格子の反射波長が複数に至り、複数ピーク型での変化となる。この波形変化は除荷後においても残留歪やクラックにより元に戻らないことが明らかとなっている¹⁰⁾。

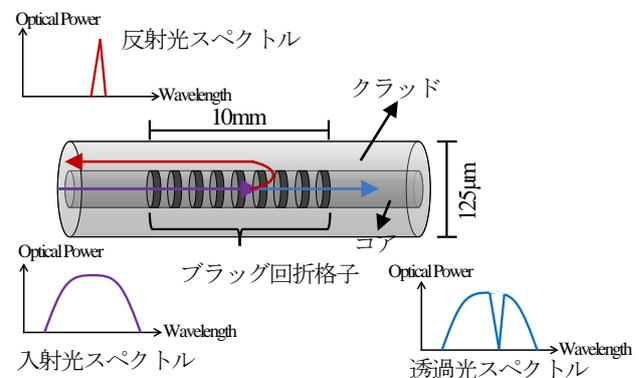


図-2 FBGセンサ部の概要図

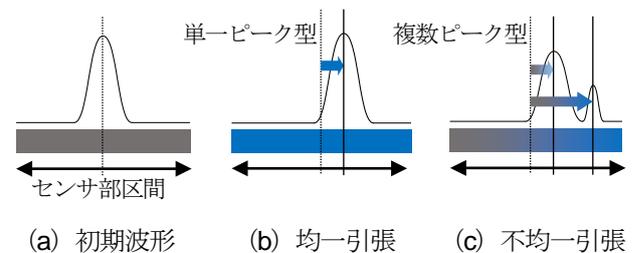


図-3 応力分布と光パワースペクトルの波形形状の例

4. 試験体および試験概要

表-1に試験体パラメータを示す。試験パラメータは既往研究⁷⁾より7層および11層の積層数、220mmおよび320mmの接着長を用い、本研究では接着長400mmの試験体を加えた。試験体名はL接着長-FまたはNF-積層数-試験体番号とする。FはFBGセンサの埋設、NFはFBGセンサの非埋設を表している。F試験体はL320-F-7の2体とした。全試験体はVaRTMによって鋼材にCFRPを成形および接着接合を施した。図-4に試験体の成形時の様子を示す。図-4に示すようにNF試験体は各接着長で一体成形を行い、脱型後に約40mm幅で切断した。また、F試験体は鋼材幅を65mm、CFRP幅を40mmで個々に成形を行った。CFRPは炭素繊維シート(UM46-40、公称値厚さ0.217mm/層)とプライマー用エポキシ系樹脂(AUP40)を使用した。鋼材とCFRP間には目付量400gsmのチョップドストランドガラスマット(計測厚さ0.36mm:以下、CM)を配した。各材料の物性値を表-2に示す。なお、表-2に示している物性値は後述する有限要素解析に用いるため、公称値や仮定値を含んでいる。積層方法にはCFRP端部への応力集中を避けるため10mm/層のテーパ状積層を採用した。FBGセンサの埋設はCFRPの1層目と2層目のテーパ部とした。図-5に試験体の寸法、歪ゲージ位置、FBGセンサの埋設位置を示す。

試験は曲げスパン500mmの3点曲げ試験とし、NF試験体は単純荷重による耐力と破壊モードについての分析および評価、F試験体は各試験体につき負荷除荷荷重および単純荷重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および評価を行った。図-6に試験時の様子を示す。

表-1 試験パラメータ

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



(a) L400試験体 (L400-NF-7)



(b) FBG埋設試験体 (L320-F-7)

図-4 VaRTM成形時の試験体状況

表-2 各材料の物性値

(a) 鋼材 (SS400材)		
弾性係数 [GPa]	降伏点 [MPa]	ポアソン比
200	296 ^{※1}	0.3
(b) CM		
弾性係数 [GPa]	ポアソン比	
8 ^{※2}	0.3 ^{※2}	
(c) エポキシ樹脂およびCFシート		
	弾性係数 [GPa]	剪断弾性係数 [GPa]
エポキシ樹脂	3.9 ^{※2}	1.5 ^{※2}
CFシート	440 ^{※1}	20 ^{※2}

※1:公称値, ※2:仮定

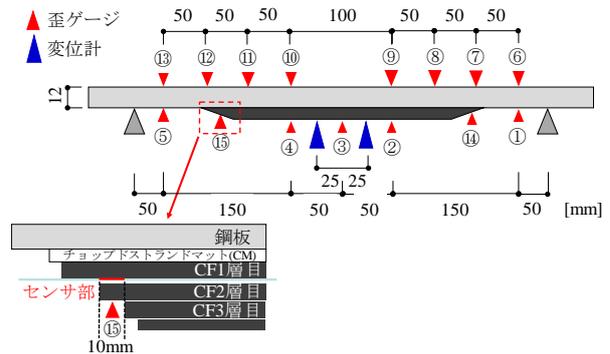


図-5 試験体寸法等



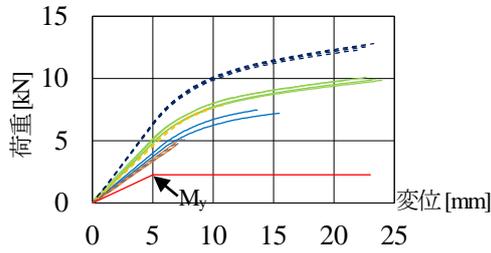
図-6 試験時の様子 (L320-F-7)

5. NF試験体

(1) 試験結果

図-7に3点曲げ試験による荷重-変位関係、図-8に最大荷重と変形量、図-9に試験後の写真を示す。変位は図-5に示す変位計の平均値とした。また、表-2(a)に示した鋼材の物性値を用いた計算値を加えている。図-8から、各パラメータでの耐力および変形量は概ね安定した結果となった。表-3に図-7より得られた各試験体の剛性を示す。これらの結果から接着長および積層数の増加によって剛性の増加が確認された。図-9に示すように、破壊モードはL220およびL320試験体はCFRP端部での剥離が生じ、L400試験体はCFRP中央部におけるCFRPの破断となった。そのため、図-7に示すL400試験体の結果はCFRPの破断

が生じた荷重ステップまでの結果とする。CFRP端部の剥離が生じたL220とL320試験体では積層数の増加に伴いL220試験体では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。



—L220-NF-7 --L220-NF-11 —L320-NF-7 --L320-NF-11
—L400-NF-7 --L400-NF-11 —無補強の計算値

図-7 荷重-変位関係

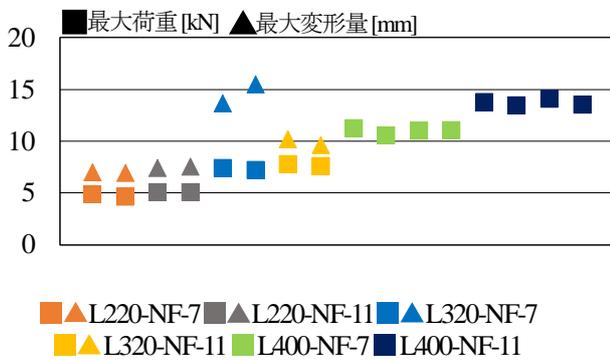


図-8 各試験体の最大荷重と変形量

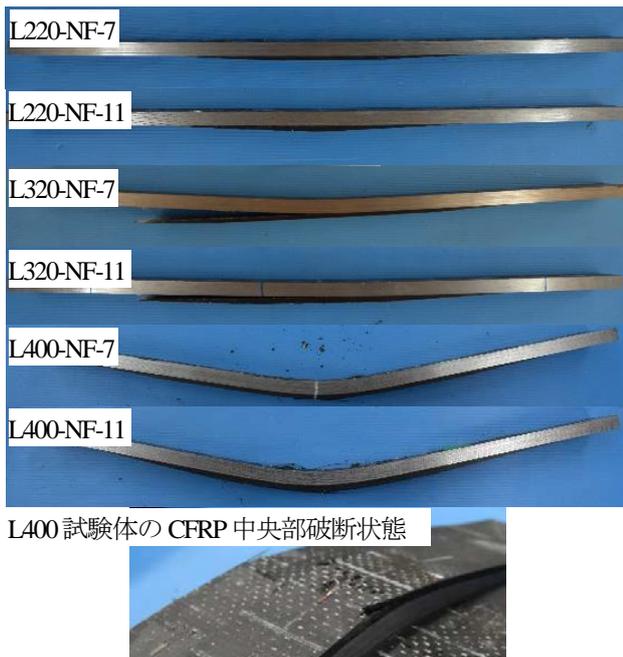


図-9 各試験体の破壊モード

表-3 各試験体の剛性

試験体名	剛性 [kN/mm]	鋼材に対する比
鋼材 (計算値)	0.46	1.00
L220-NF-7	0.67	1.46
L220-NF-11	0.69	1.50
L320-NF-7	0.77	1.67
L320-NF-11	0.92	2.00
L400-NF-7	0.99	2.15
L400-NF-11	1.25	2.72

(2) 有限要素解析による耐力と破壊モードの分析

試験結果より、異なる破壊モードである CFRP 端部剥離と 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）を分析する必要がある。しかし、ピール応力の計測は困難であることから有限要素解析を用いて各試験体のピール応力を推定し、耐力と破壊モードの分析を行った。ピール応力の算出位置は CFRP 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 と鋼材界面での剥離または CFRP1 層目と 2 層目の層間破壊で生じていたことを考慮し決定した。解析条件は 2 次元モデル、要素は平面応力要素（2 次要素四角形メッシュ）とした。解析に用いた各材料特性は表-2 に示す通りである。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、剪断弾性係数は複合則を用いて算出した。解析結果は各パラメータから 1 体を抜粋し記述する。図-10 に有限要素解析結果と実験値を比較した荷重-歪関係、図-11 に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-歪関係に用いる歪は図-5 に示した歪ゲージ③、⑨と⑩の平均値とする。図-10 から L220 試験体は弾性域、L320 試験体は塑性域での CFRP 端部の剥離となった。L400 試験体では 7 層、11 層ともに CFRP の歪が約 8000 μ に到達し中央部の破断が生じている。図-11 より、単位変形量あたりのピール応力が接着長の増加に伴い減少していることがわかる。各接着長別で着目すると L220 試験体について差はほとんど見られないが、L320 試験体では積層数増加に伴い単位変形量当たりのピール応力が増加していることがわかる。L220 試験体でこのような結果となったのは 7 層と 11 層の積層において、曲げ剛性がほぼ変わらないことが原因だと考えられる。11 層積層の場合、最上層の CFRP は 20mm であり、ほぼ荷重負担を行わなかったためと予想される。図-10 から L220-NF-7 よりも L220-NF-11 の方が引張歪が生じていないことから接着長が極めて短いものは効果を発揮していないことがわかる。この原因を踏まえ、図-8 に示した L220, L320 試験体についての耐力はほぼ同程度であるが、最大変形量に差異が生じている結果に対応を示している。

次に、破壊モードの分析を行う。CFRP端部の剥離が生じたL220, L320試験体の最大荷重時におけるピール応力は約20~25MPaの範囲となっている。この結果からCFRP端部に約20MPaのピール応力が生じると剥離へ繋がるかと推定される。CFRP中央部の破断が生じたL400試験体について、破断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となっている。7層試験体はCFRP端部での剥離が生じる20MPaに到達せずにCFRP中央部が破断を迎えている。11層試験体はCFRP端部での剥離が生じるピール応力へと到達しているがCFRPの破断が先行して生じた。

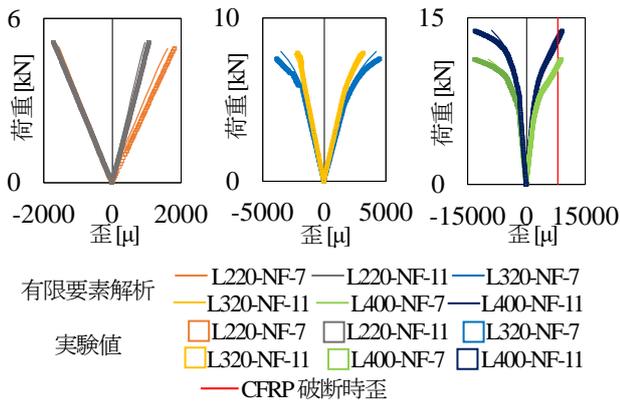


図-10 有限要素解析による荷重-歪関係

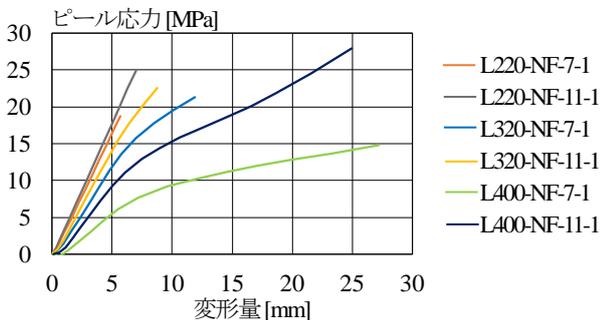


図-11 有限要素解析によるピール応力-変位計位置の変形量関係

6. CFRP内部の損傷センシング

まず、FBGセンサから得られる光パワースペクトルの分析方法を示す。分析は前章と同様に試験を実施したL320-F-7について有限要素解析を行い、得られたCFRP内部の歪分布と光パワースペクトルから得られる歪成分との比較を行う。光パワースペクトルから歪への変換は式(1)を用いて算出する。図-12に示すように、 i ステップ時の荷重における最大光パワー $P_{i\max}$ に対して $0.1P_{i\max}$ 以上のピークについてを歪成分として算出を行った。図-12の場合を例にとると、 $0.1P_{i\max}$ 以上のピーク数は3つ存在するため歪成分もまた同荷重ステップ時に3成分となる。

$$\varepsilon_n [\mu] = \frac{(\lambda_{n\text{ peak}} - \lambda_{0\text{ peak}})}{0.0012} \quad (1)$$

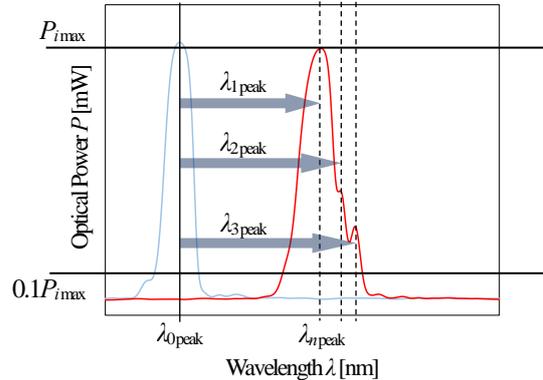


図-12 光パワースペクトルの概要

(1) CFRP積層部内部の応力性状

図-13に有限要素解析によって算出したFBGセンサ部10mm区間の歪分布を示す。X=0mmの歪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。この結果から、X=8mmで最も高く、X=1.5mmで最も低い値となった。

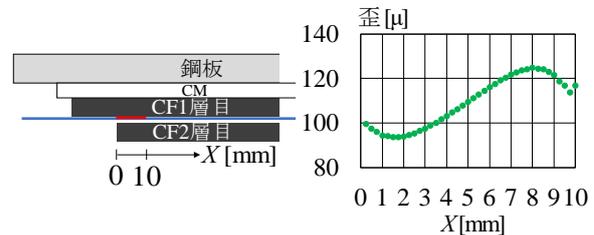


図-13 有限要素解析によるFBGセンサ部10mm区間における歪分布 (P=1.5kN)

(2) 有限要素解析と光パワースペクトルとの比較

a) 単純荷重試験による損傷センシング

図-14に図-13より得られた歪の最大位置 (X=8mm), 最小位置 (X=1.5mm), この区間内中央位置 (X=5mm) と各荷重サイクルの光パワースペクトルで得られた歪成分をプロットしたもの、図-15に荷重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変化は約2.0kN毎とした。これらの結果から、P=2kNを境に光パワースペクトルが単一ピーク型から複数ピーク型へ移行した。P=4kN以前に生じている歪成分はX=8mmの有限要素解析結果との対応を示している。P=4kN以後にはX=8mmと対応を示す歪成分に加え、X=1.5mmに対応を示す歪成分も発現した。約P=9kN時にX=1.5mmに対応を示す歪成分が消え、X=8mmと対応する歪成分がX=5.0mm側に移行している。これは光パ

ワースペクトルの両ピークが1つのピークになったためであると考えられる。以降、 $P=9\text{kN}$ 以上では $X=5.0\text{mm}$ に対応を示している。破壊直前には歪成分が大きく引張側に移行するのを確認したが、破壊はセンサを埋設した端部の反対側で生じた。

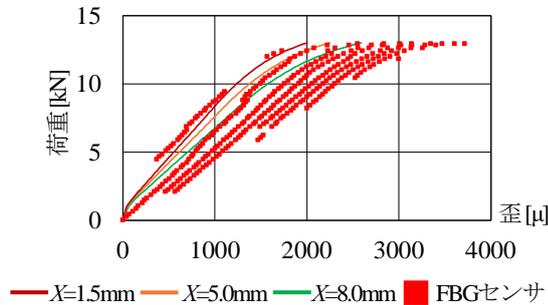


図-14 単純荷重試験による荷重-歪関係

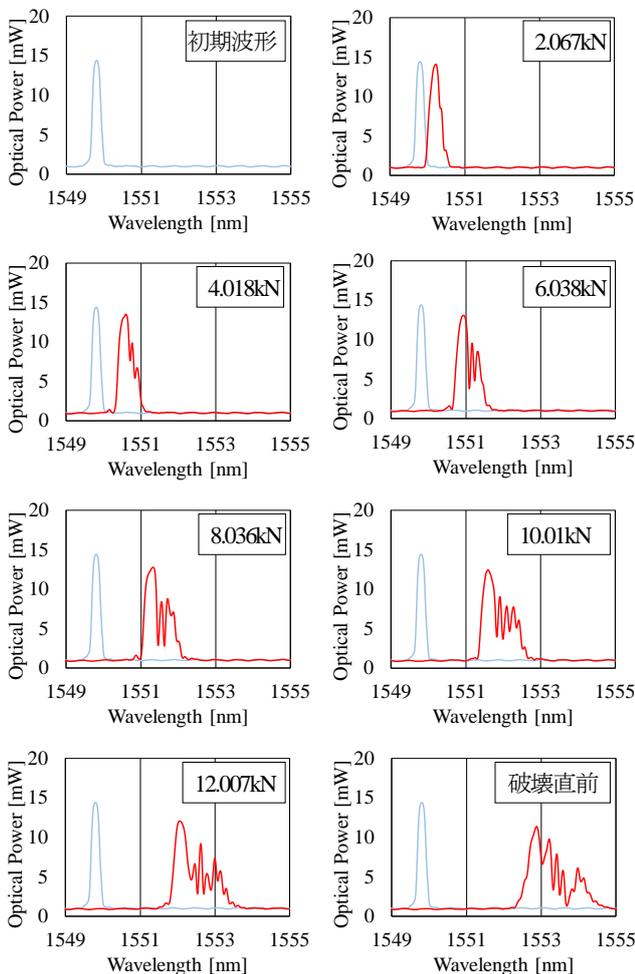


図-15 単純荷重試験による光パワースペクトルの変化

b) 負荷除荷載荷試験による損傷センシング

表-4に負荷除荷載荷試験の荷重サイクルを示す。表-4にも示す通り、8サイクルまでは荷重制御、以降は変位制御として試験を行った。図-16に図-14、-15と同様に描いた荷重-歪関係および光パワースペクトルの変化を示す。光パワースペクトルの波形変化は荷重前の初期波形、 $P=4\text{kN}$ 時、各荷重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。

表-4 負荷除荷載荷試験の荷重サイクル

荷重サイクル	荷重 [kN], 変形量 [mm]
荷重制御	
1サイクル目	3.0
2サイクル目 (7.0kNまで1.0kN毎に増加)	5.0
4サイクル目 (9.0kNまで0.5kN毎に増加)	7.0
8サイクル目	9.0
変位制御	
9サイクル目 (破壊まで1.0mm毎に増加)	8.0
15サイクル目	14.0
最終サイクル (16サイクル目)	———

荷重-歪関係から 3kN 荷重サイクルでは光パワースペクトルが単一ピーク型のみでの移動となった。生じた歪成分は、 $X=8\text{mm}$ の有限要素解析結果に対応が見られた。 5kN 荷重サイクルでは $P=4\text{kN}$ 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。 6kN 荷重サイクルで最大荷重時に3つ目の歪成分が生じた。 8kN 荷重サイクルで示しているように、 6kN 荷重サイクル以降、荷重を繰り返す毎に初めて複数ピーク型へ移行した $P=4\text{kN}$ 時を境界として歪成分が増加していることがわかる。そして 8.5kN 荷重サイクルでは、この境界において増加し続けていた歪成分が並列する結果を得られた。最大荷重時には新たに $X=1.5\text{mm}$ の有限要素解析結果に対応が見られる歪成分が生じた。 9kN 荷重サイクルでは $P=4\text{kN}$ 時よりも低い荷重時に光パワースペクトルが複数ピーク型へ変化した。これは以前の荷重サイクルでは見られなかった変化であることから負荷除荷載荷によって何らかの損傷が生じたと考えられる。この損傷歪成分は以降で荷重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 荷重サイクルでは $P=0.5\text{kN}$ 時という低い荷重ステップ時に損傷歪成分が生じ、 $P=4\text{kN}$ 以降には 8.5kN 荷重サイクルで生じた $X=1.5\text{mm}$ の有限要素解析結果に対応する歪成分が現れている。この時のピール応力は有限要素解析の結果から 19.91MPa となっており、前章で示した CFRP 端部の剥離が生じる約 $20\sim 25\text{MPa}$ の範囲の直前である。そし

て、この荷重サイクルにおいて初めて除荷時に残留歪が見られた。その後、 $P=4\text{kN}$ 以下の歪成分が増加し続け最終サイクルへと至った。最終荷重サイクルでは3つの残留歪成分が生じている状態から荷重が開始され、他の荷重サイクルと同様に歪成分、歪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 であったことから FBG センサを埋め込んだ場合においても破壊性状は変わらない結果となることも確認した。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 CFRP 端部の剥離が生じたためであると考えられる。

7. おわりに

本研究では鋼材に VaRTM を用いて CFRP 成形同時接着を行い、3点曲げ試験を実施した。有限要素解析によ

る耐力と破壊モードの分析および FBG 型光ファイバセンサから得られた光パワースペクトルの分析を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 試験結果より VaRTM を用いて鋼材に CFRP を成形および接着した試験体について曲げ剛性の増加を示した。
- 2) 接着長および積層数を変化させた試験体のピール応力を有限要素解析から推定した。結果、ピール応力が約 20MPa で CFRP 端部の剥離が生じる。また、接着長や積層数の増加で CFRP 端部の剥離より前に中央部において破断が生じることも示した。
- 3) FBG 型光ファイバセンサを CFRP 積層部内部に埋設し、得られた光パワースペクトルの波形変化から有限要素解析による歪と比較を行った。そこから有限要素解析と対応した歪成分を確認することができ、積層部内部の歪計測に FBG が適用可能であることを示した。

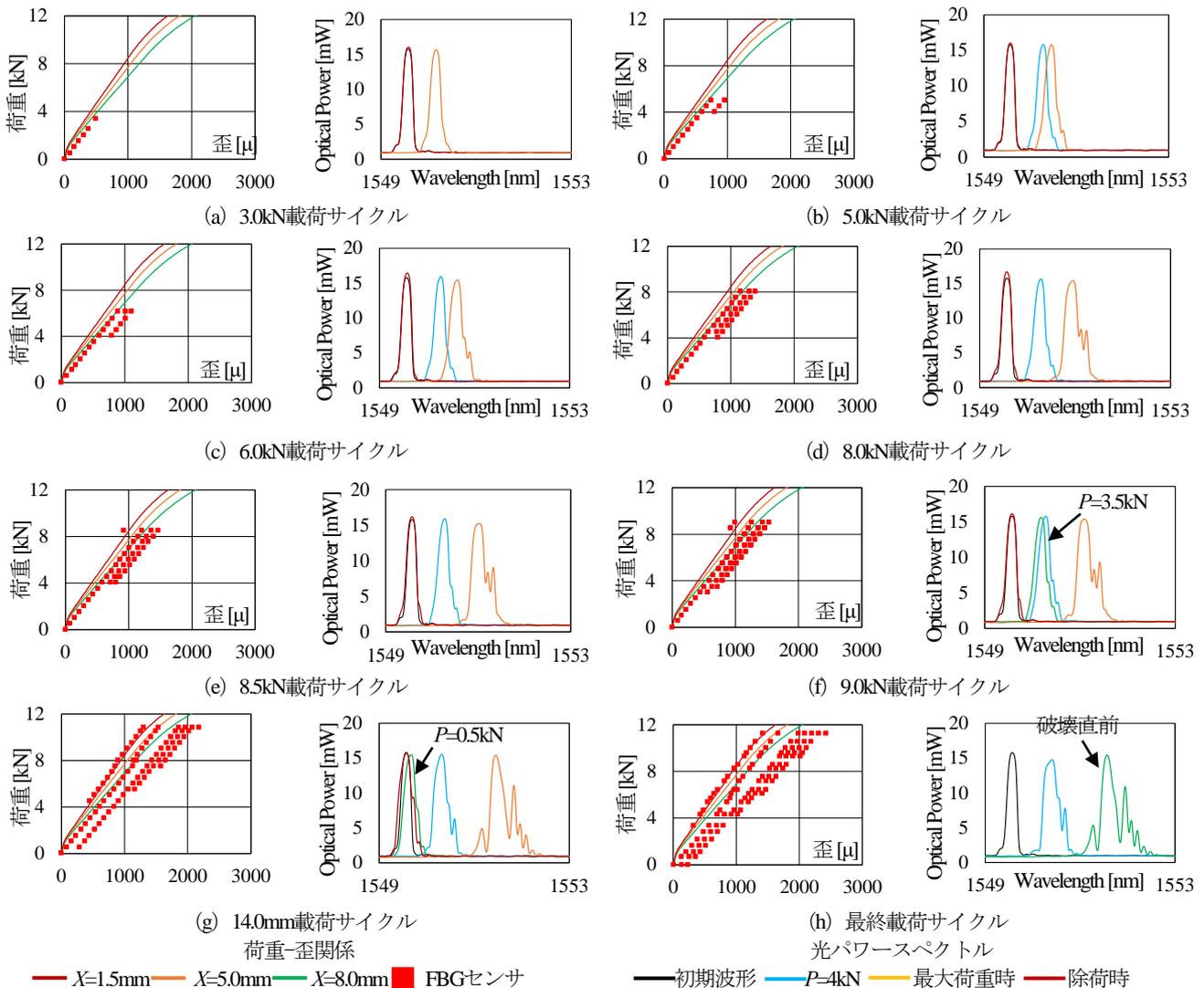


図-15 負荷除荷荷重試験による荷重-歪関係と光パワースペクトルの変化

謝辞：本研究は国土交通省建設技術研究開発助成制度（平成27, 28年度）の一部として行われました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 電気学会：電気学会技術報告書，第 1163 号，pp.23-30, 2009
- 2) 土木学会：鋼構造シリーズ 18 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，2009
- 3) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計指針案，2002
- 4) 土木学会：複合構造レポート 05 FRP 接着による鋼構造物補修・補強技術の最先端，2012
- 5) Branko Glisic and, Daniele Inaudi : FIBRE OPTIC METHODS FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 2007
- 6) 近藤諒翼, 中村一史, 松井孝洋, 松本幸大：VaRTM成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する実験的検討，土木学会，第11回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.192-201, 2015
- 7) 三枝玄希, カオミン, 中村一史, 松井孝洋, 越智寛, 松本幸大：VaRTM 成形を応用した CFRP と鋼材との接着強度，2016 年度東海支部研究集会梗概集(CD-ROM), pp.97-100, 2017.2
- 8) 強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP, pp.56-58, 2016
- 9) 光防災センシング振興協会：光ファイバセンサ入門，pp.118-125, 2012
- 10) 山田聖志, 中澤博之, 小宮巖：FRP 形材を骨組みとした膜構造のクランプ部破壊性状と光ファイバセンサによる内部損傷モニタリング，日本建築学会 構造系論文集，第 564 号，pp.71-77, 2003.2

BENDING BEHAVIOR AND DAMAGE SENSING FOR CFRP STRENGTHENED STEEL PLATES BY VARTM

Genki Mieda, Minh Cao, Yukihiro Matsumoto, Hitoshi Nakamura,
Takahiro Matsui and Yutaka Ochi

Steel members constituting steel structures constructed during the period of high economic growth have been corroded and thinned, and deterioration of structural performance has been reported. For that, an adhesive bonding method for repair and reinforcement by bonding carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to a corroded / thinned part has been researched and developed. However, this method has some problems that brittle fracture in the adhesive layer and maintenance and management after bonding are difficult. Therefore, three-point bending test was conducted by embedding fiber Bragg grating optical fiber sensor (FBG sensor) inside the CFRP laminated part by vacuum assisted resin transfer molding and molding and bonding to the steel surface at the same time. Through the test, it was analyzed relations between destruction modes and strength. Moreover, Optical power spectrum obtained from the FBG sensor was analyzed and evaluated.