

# 熱硬化型二軸炭素繊維プリプレグシートによる 腐食鋼管柱の補修・補強

竹本 香織<sup>1</sup>・中尾 亮介<sup>2</sup>・松村 政秀<sup>3</sup>・陳 晨<sup>4</sup>・杉浦 邦征<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup>正会員 積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー総合研究所 (〒601-8105

京都市南区上鳥羽上調子町2番地の2)

E-mail: takemoto027@sekisui.com, nakao018@sekisui.com

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: matsumura.masahide.4s@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup> 株式会社横河住金ブリッジ 設計部東京設計グループ (〒273-0026 千葉県船橋山野町47-1)

E-mail: chin-sn@ysbc.co.jp

<sup>5</sup>正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

腐食減肉部を有する柱状構造物の耐力回復を目的として、炭素繊維に予め樹脂を含浸させたプリプレグシートを貼り付け、加熱接着する補修・補強工法を提案してきた。これまで一軸繊維シートを用いて補強効果を検証してきたが、今回新たに、縦方向の目付量は同等で、周方向繊維を追加した二軸繊維シートを作製し、減肉部を有する鋼管への補強効果を静的載荷試験により検討した。その結果、二軸繊維シートを用いると、一軸繊維シートを用いる場合と比較して初期剛性が1.1倍以上、周方向繊維により鋼管の座屈変形が抑制され、最大荷重が約1.3倍に向上した。また、減肉部のCFRPのひずみ測定およびFEM解析により、二軸繊維シートを使用した場合に、より効率よくCFRPが応力を分担することを確認した。

**Key Words :** corrosion, thermosetting prepreg sheet, steel columns, repair

## 1. はじめに

照明柱や標識柱などの鋼管柱の地際部に腐食による板厚減少が観察され、転倒事故による第三者被害も報告されており、全国で対応が急務になってきている<sup>1)</sup>。地際部における腐食は、支柱露出部だけではなく路面下にも生じている場合があり、この原因には、埋戻し土やコンクリートと鋼管柱の境界部への雨水や犬の尿の滞留や、堆肥化した土砂や粉塵の堆積により埋設部が湿潤状態に保たれることなどが挙げられる。

腐食に伴う断面積の減少は、強度不足だけでなく疲労に対する弱点にもなるため、鋼管柱の地際部の腐食には両者に対応できる補強法の適用が有効である。また、このような鋼管柱のストック数は膨大であるのに対して、1本当たりの施工面積が小さいことから、迅速で効率かつ確実な補強工法の開発が求められている。

このような鋼管柱の地際部に生じる腐食損傷対策として、筆者らは熱硬化型の炭素繊維プリプレグシート（以下、繊維シートと略す）を用いる補強工法を提案し、そ

の補強効果を検証してきた<sup>2)</sup>。これまでに、実験結果にもとづいて、鋼管柱基部の三角リブ上方に、部材軸方向に20 mm程度、元板厚から50%程度までの板厚減肉箇所に一軸繊維シートを部材軸方向に2層貼付する補強法が適用できることを明らかにした。しかし、この板厚減肉箇所の座屈により耐力が決定されたことから本補強法の適用範囲の拡大に向けて、本研究では、一軸繊維シートに周方向繊維を追加した二軸繊維シートを作製し、同箇所への補強効果を静的載荷試験により検討した。

## 2. 補強のコンセプト<sup>2)</sup>

照明柱の点検要領<sup>3)</sup>には、腐食部の全性の指標として限界板厚が設定され、限界板厚を確保できない場合には対策を必要とする。限界板厚は設計荷重による応力が許容応力度を超過しない残存板厚であり、(社)日本照明器具工業会「JIL 1003 照明用ポール強度計算基準<sup>4)</sup>」によると、風速が60 m/s、風力係数が0.7、鋼材がSS400の条件で

照明柱の形式や鋼管径，照明器の種類などに応じて元板厚の約50-90%と算出される。

限界板厚を満足しない腐食損傷の著しい老朽化支柱への対策には，当初の性能向上を期待する対策，応急的な対策，延命効果を期待する対策の三種類が考えられ，いずれにおいても経済的かつ効率的な対策が好ましい。

従来の弾性設計に基づく補強コンセプトでは，減肉した鋼材の弾性率分を補うために十数層のCFRPを貼付することとなり，経済的また効率の観点で必ずしも現実的でない。また，CFRPを貼付した部位の弾性が大幅に高くなると，鋼管の変形に追従できずCFRPの剥離が生じやすい傾向があり，多層のシートを貼付する対策は必ずしも最良ではない。

そこで，文献2)と同様に本研究においても，腐食損傷が著しい場合にも数年～10年程度の建て替えまでの残存期間を対象として耐力回復を図る応急的な対策として，材料コスト，施工時間に照らし合わせて現実的な貼付層数として二層の炭素繊維シートを貼り付ける工法に注目し，腐食断面が板厚80%（元板厚から20%減肉した鋼管）の強度を耐力回復の目標値として設定する。

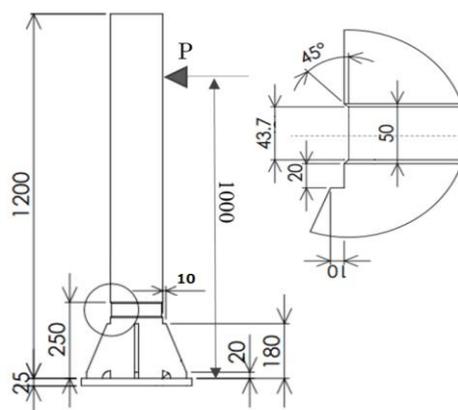


図-1 静的試験 試験体概要と溝加工部詳細（単位：mm）



図-2 炭素繊維プリプレグシート 図-3 硬化時のヒーター

### 3. 静的載荷実験

#### (1) 試験体<sup>2)</sup>

試験体は実照明用柱にもみられる，外径165.2 mm，板厚4.5 mmのSTK鋼管（材料試験によると0.2%オフセット耐力は353.9 MPa）に4本の三角リブ（=4.5 mm）と底鋼板（SM400）をすみ肉溶接した鋼管柱であり，図-1に示すように高さ1 mの位置に水平荷重を載荷する。水平変位の載荷速度は0.05 mm/secであり，公称降伏点 $\sigma_y=235$  MPaを用いて算出される試験体の降伏荷重 $H_{fy}$ は36.3 kNである。三角リブ上に地際部を想定し，地際部に腐食による板厚減少を模擬した模擬腐食部を設けた損傷試験体に，接着パテ1.4 kg/m<sup>2</sup>を塗布した各炭素繊維シート（表-1，2）を二層貼り付け，バンドヒーターにて締め付け，加熱硬化する。三角リブ上端から45 mm上方を損傷位置とし，模擬腐食は支柱外面から全周に渡り溝加工を施し導入する。高さ方向の腐食範囲としては，広い範囲を想定した幅±25 mm（全腐食幅50 mm）及び狭い範囲を想定した±10 mm（全腐食幅20 mm）とした。補強範囲は溝加工部中心より±150 mm（全300 mm）の範囲とし，溝加工部を2液混合型エポキシ接着パテ（表-3）により埋め戻した後に二軸繊維シートを貼付する。三角リブ近傍ではシートにスリット加工を施し，リブ上には補強材を接着せず，円柱断面にのみ補強材を貼付する。

表-1 一軸炭素繊維プリプレグシート 諸元<sup>2)</sup>

項目	構成・特性
シート寸法 高さ（繊維方向）×幅×厚み	300 mm×600 mm×1 mm
炭素繊維シート基材種	PAN系高強度タイプ UDシート
炭素繊維目付量	300 g/m <sup>2</sup>
CFRP硬化体の引張物性 （繊維重量率:25%）	*引張強度 3.1 GPa *弾性率 270 GPa

\*土木学会基準JSCE-E-541-2000準拠

表-2 二軸炭素繊維プリプレグシート 諸元

項目	構成・特性
シート寸法 高さ（繊維方向）×幅×厚み	300 mm×600 mm×1 mm
炭素繊維シート基材種	PAN系高強度タイプ 平織
炭素繊維目付量	縦方向 300 g/m <sup>2</sup> 横方向: 200 g/m <sup>2</sup>
CFRP硬化体の引張物性 （繊維重量率:30%）	*引張強度 1.8GPa *弾性率 158 GPa

表-3 接着パテ諸元<sup>2)</sup>

項目	構成・特性	
接着剤種別	2液混合型エポキシ樹脂	
主成分	主剤	エポキシ樹脂
	硬化剤	ポリアミドアミン 脂環式ポリアミン
可使時間	40～60分(20℃, 300g)	

## (2) 一軸繊維シートを用いる場合

一軸繊維シートによって補強した鋼管の静的荷重試験の結果のうち、破壊後の圧縮側と引張側の破壊形態を図-4, 5に、図-6, 7に荷重変位関係を、各肉厚と最大荷重の関係を図-8に示す。荷重低下の起点となる現象は二種類あり、一つは圧縮側溝加工部の座屈によるCFRPの剥離及び圧壊、もう一つは引張側のCFRPの剥離であった。両者が同時に発生することはないが、どちらかを起点として荷重は減少する。



図-4 圧縮側CFRP圧壊



図-5 引張側CFRP剥離

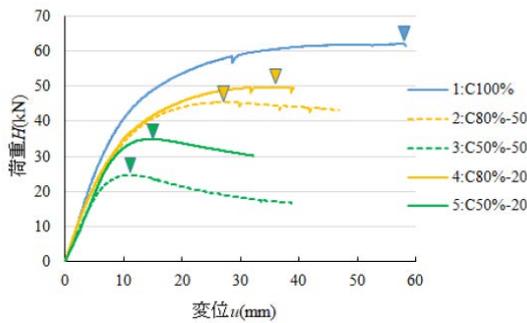


図-6 荷重-変位曲線 (鋼管)

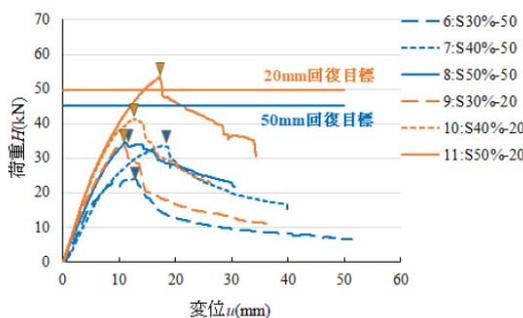


図-7 荷重-変位関係 (補強: 一軸繊維シート)

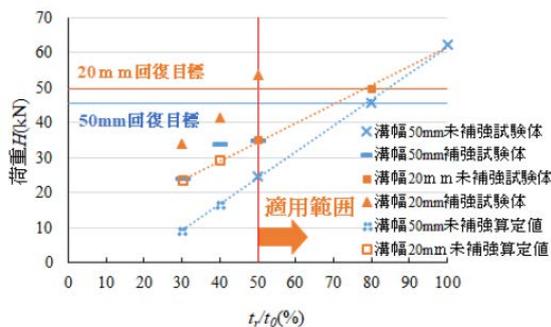


図-8 各試験結果における板厚と最大荷重の関係

図-8より、板厚残存率 $t_r/t_0$ と鋼管の最大荷重は線形関係を示したことから、限界板厚である $t_r/t_0=80\%$ の最大荷重は、腐食幅20 mmのとき49.6 kN、50 mmのとき45.4 kNと推算できる。また同図より、一軸繊維シートでは腐食幅50 mmの場合50%板厚以下では目標荷重に到達しないこと、腐食幅20 mmの場合には50%板厚以上で目標荷重を満足することがわかった。

## (3) 二軸繊維シートを用いる場合

表-2に示した二軸繊維シートを用いて同様に補強した鋼管の静的荷重試験を行った。

腐食幅50 mmの各板厚について補強した場合の荷重変位関係を図-9に示す。いずれも二軸繊維シートを用いると一軸繊維シートを用いる場合から最大荷重が向上し、残存板厚が50%で腐食幅50 mmの場合にも補強後の目標荷重を満足することが確認できる。最大荷重時の変位は残存板厚が50%の場合では大きく改善したものの、板厚30%と40%では改善が見られなかった。また、表-4に示すとおり、二軸繊維シートを用いると初期剛性も向上することが確認できた。

破壊の形態を図-10, 11に示す。一軸繊維シートの場合は模擬腐食部分の座屈によってCFRPが剥離・座屈したのに対し、二軸繊維シートを用いる場合は周方向繊維によって模擬腐食部の座屈を抑制でき、この箇所でもCFRPは損傷しなかった一方、腐食幅の上下部分のCFRPの圧壊・損傷が観察された。

さらに各試験体でCFRP上のひずみを比較した。ひずみの測定点を図-12に、各板厚での測定結果を図-13~15に示す。aが一軸繊維シート、bが二軸繊維シートを示す。

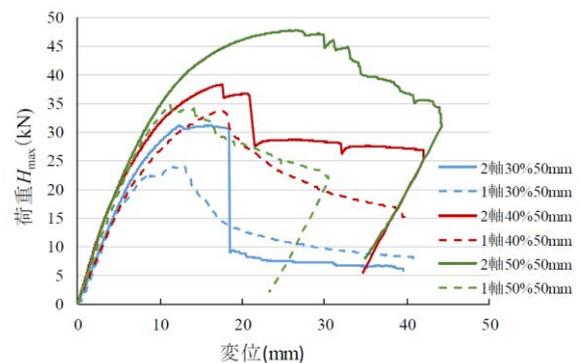


図-9 荷重-変位関係 (補強: 二軸繊維シート)



図-10 圧縮側破壊 (一軸)



図-11 圧縮側破壊 (二軸)

表4 補強効果の比較

残留板厚	繊維	最大荷重 kN	初期剛性 kN/mm	剛性変化率 (2軸/1軸)
30%	2軸	31.18	3.56	1.06
	1軸	24.10	3.37	
40%	2軸	38.35	4.86	1.46
	1軸	33.81	3.32	
50%	2軸	47.80	4.60	1.07
	1軸	34.73	4.30	

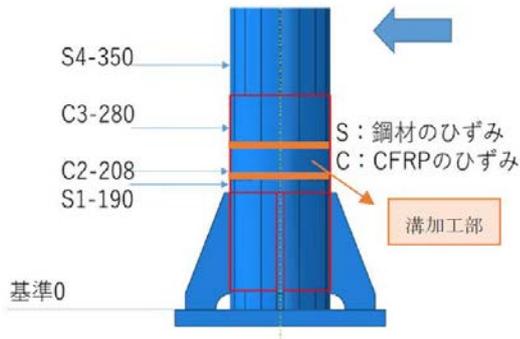


図-12 ひずみ測定位置

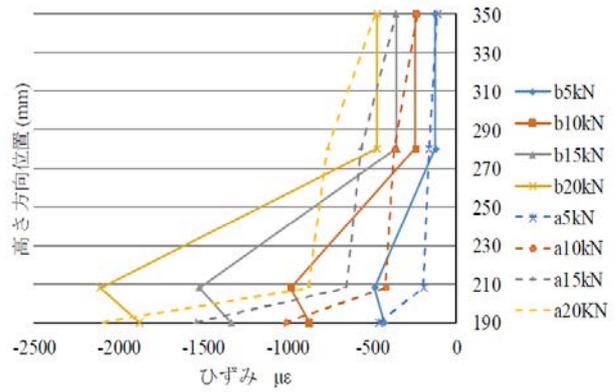


図-15 ひずみ分布 ( $t/t_0=50\%$ , 溝幅50 mm)

いずれの板厚の結果についても、二軸繊維シートを用いる場合、溝加工部のCFRP上の軸方向ひずみは一軸繊維シートの場合を上回っていることが確認できる。

以上より、二軸繊維の場合、減肉部の座屈によるCFRPの座屈を周方向繊維が抑制し、残留板厚50%で溝幅50 mmまで補強できることがわかった。なお、一軸繊維シートに対する二軸繊維シートの剛性変化率、高さ方向のひずみ分布とも、板厚40%の結果が、50%と30%の傾向と異なっており、この原因については検討を進めている、

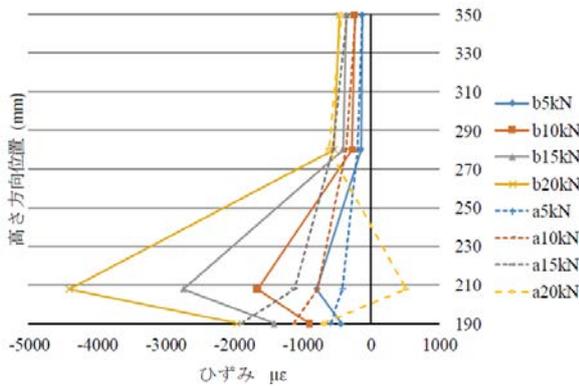


図-13 ひずみ分布 ( $t/t_0=50\%$ , 溝幅30 mm)

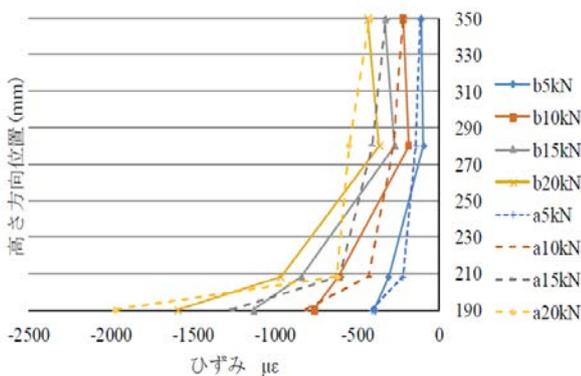


図-14 ひずみ分布 ( $t/t_0=50\%$ , 溝幅40 mm)

#### 4. 実大柱のFEM解析

前章では実大柱の静的載荷試験により二軸繊維シートを用いる場合にCFRPの応力分担が増加していることが確認できた。そこで、実大柱の弾性解析を行い、鋼材のひずみの低減効果について検討する。解析は汎用構造解析コードAbaqus/Standard Ver.6.14を使用した。

##### (1) FEM解析モデル

図-1に示した試験体寸法に基づいて解析モデルを作成した。計算効率を考慮し、静的載荷実験での載荷点高さより上部は省略した。また頂点の断面に円形状の剛な板要素を剛結し、その円形板の中心点に水平荷重をX方向に載荷する。

解析モデルは無補強試験体モデルと補強試験体モデルの二種類である(図-14, 15)。無補強試験体モデルの要素特性はすべての鋼部材を線形六面体ソリッド要素(C3D8R)でモデル化した。材料特性を表-5に示す。

補強試験体モデルでは、接着パテを厚さ1 mmの六面体ソリッド要素でモデル化する。板厚方向のメッシュは6分割、溝模擬部のメッシュサイズは1 mmである。二枚の炭素繊維シートと厚さ1 mmのエポキシ樹脂から構成される複合構造を複合材タイプの4節点低減積分要素のシェル要素(S4R)でモデル化する。シェル要素の断面積分にはSimpson則を適用し、板厚方向の積分数は5である。複合材シェル要素でモデル化する理由として、実

大柱の荷重試験の結果から、炭素繊維シートの剥離が鋼管と内側のエポキシ樹脂層内に発生しており、内側と表面側の炭素繊維管のエポキシ樹脂層には剥離が発生しなかったためである。またこれまで行った材料の垂直接着試験の結果<sup>2)</sup>においても、鋼材表面から数えて一層目の接着パテの凝集破壊が支配的であったためである。

なお、鋼部材、エポキシ樹脂および炭素繊維シートはすべて弾性、部材間の接合は剛結と仮定した。

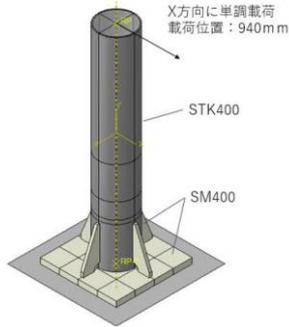


図-14 無補強試験体モデル

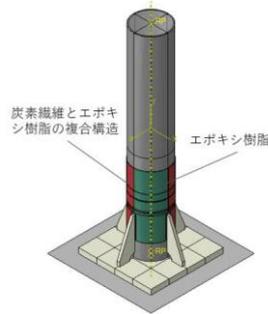


図-15 補強試験体モデル

表-5 材料の物性値

	SM400	STK400	エポキシ樹脂
弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )	200,000	200,000	3,000
ポアソン比	0.3	0.3	0.3

表-6 CFRPの機械的性質

E <sub>x</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>y</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	γ <sub>xy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	G <sub>xy</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	G <sub>xz</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	G <sub>yz</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
41,000	4,240	0.3	2,750	2,750	1,630

ここに、E<sub>x</sub>, E<sub>y</sub> : CFRPの弾性係数, G<sub>xy</sub>, G<sub>xz</sub>, G<sub>yz</sub> : CFRPのせん断弾性係数, γ<sub>xy</sub> : CFRPのポアソン比, x : 繊維方向, y : 厚さ方向, z : 繊維直角方向

荷重実験では、鋼管柱は底板 (350×350×25 mm)の四隅に直径30 mmのボルトを配置し床面と固定した。解析モデルでも同様に、鋼管柱モデルの底板ではボルト孔と同サイズの円形領域で底板下の剛体板と剛結し、底板と剛体板の間では接触条件を考慮する。

ひずみの測定位置と名称を図-16,17に示す。底板上面を基準とし、190, 208, 280, 305 mm位置のひずみについて、実験値と解析の比較を行った。鋼管のひずみ測定点をE, CFRPひずみ測定点をCF, で示す。補強体の208 mm部位はリブの三角リブ溶接部の直上でありCFRP貼り付け時にスリット加工を行いCFRPを貼付しておらず、鋼管上のひずみを測定する。

表-7には板厚残存率や溝加工の幅の設定を異ならせた解析ケースの一覧を示す。図-18~20には、新管、残存板厚30%で溝幅が20 mmおよび50 mmを例に、変位6 mmまでの荷重変位関係を示す。表中で青字のケースにおい

て解析と実験を比較すると、補強の有無に関わらず、約15 kN以上では、材料全てを弾性と仮定している解析結果が実験結果を上回るものの、10 kN以下では両者の初期剛性がほぼ一致していることが確認できた。

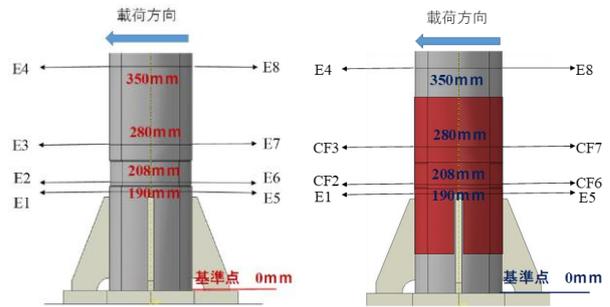


図-16 未補強体ひずみ

図-17 補強体ひずみ

表-7 解析ケース一覧

解析ケース	
無補強 : C	補強 : S
C100%	-
C80%20mm	-
C80%50mm	-
C50%20mm	S50%20mm
C50%50mm	S50%50mm
C40%20mm	S40%20mm
C40%50mm	S40%50mm
C30%20mm	S30%20mm
C30%50mm	S30%50mm

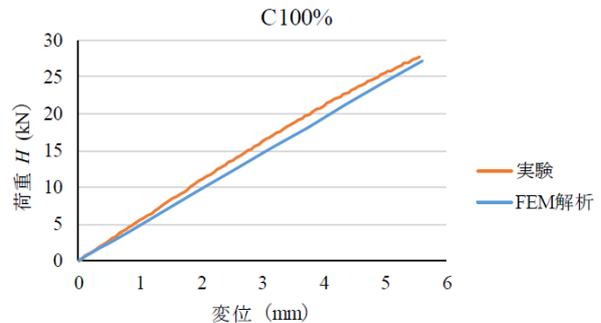


図-18 荷重変位関係 (新管)

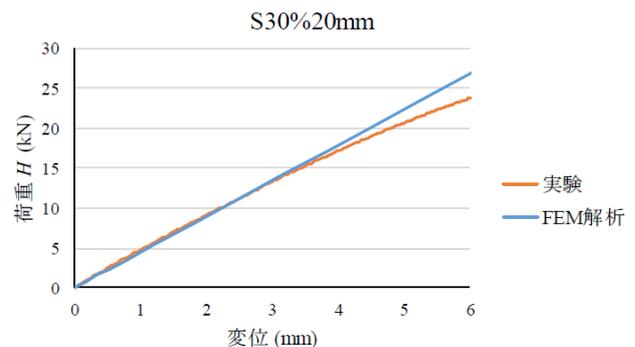


図-19 荷重変位関係 (補強, t<sub>r</sub>/t<sub>0</sub>=30%, 溝幅20 mm)

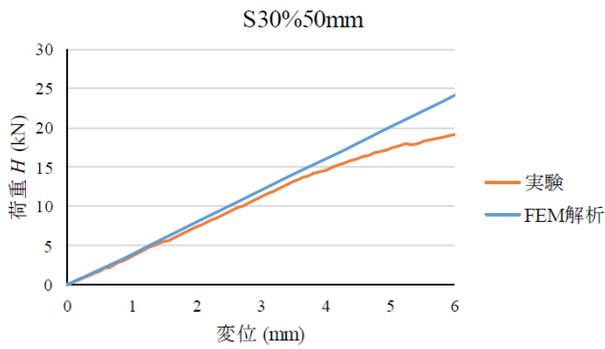


図-20 荷重変位関係 (補強無,  $t/t_0=30\%$ , 溝幅50mm)

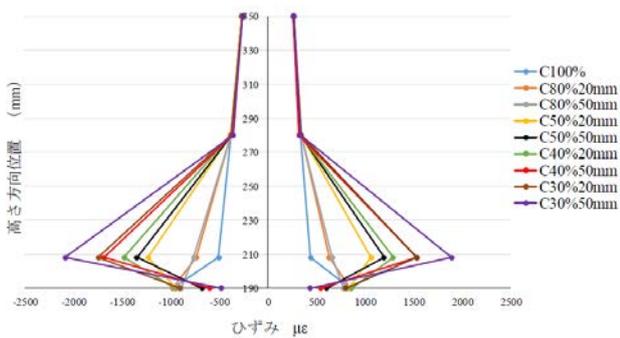


図-21 荷重が10kNのときの高さ方向のひずみ分布

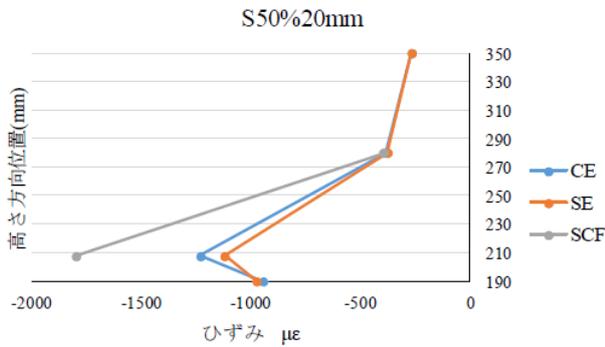


図-22 ひずみ分布 (補強,  $t/t_0=50\%$ , 溝幅20mm)

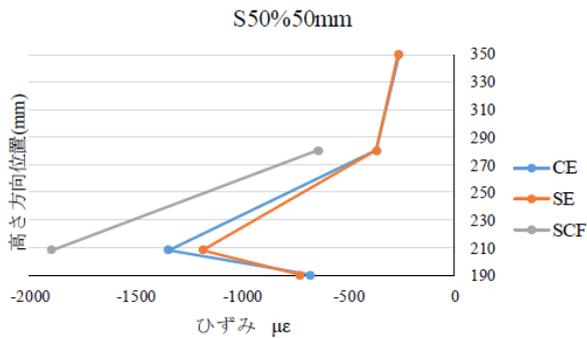


図-23 ひずみ分布 (補強,  $t/t_0=50\%$ , 溝幅50mm)

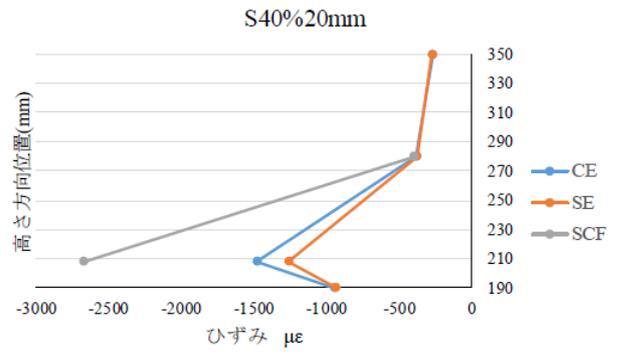


図-24 ひずみ分布 (補強無,  $t/t_0=40\%$ , 溝幅20mm)

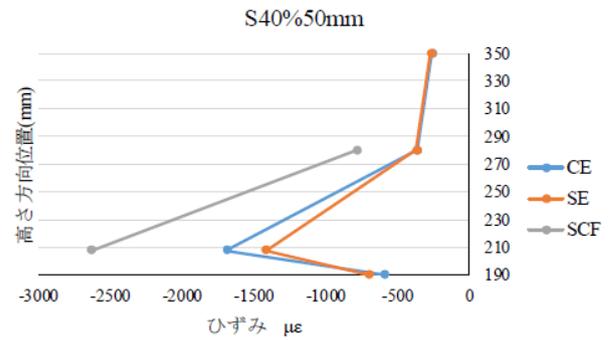


図-25 ひずみ分布 (補強,  $t/t_0=40\%$ , 溝幅50mm)

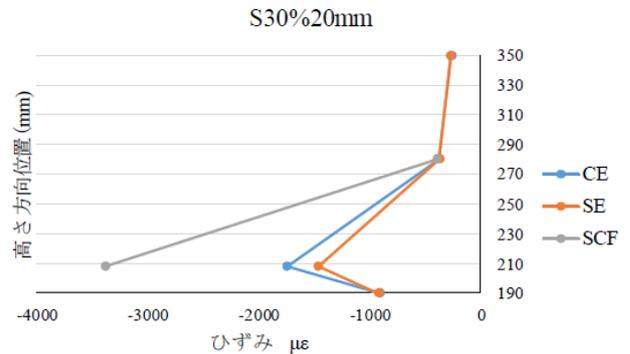


図-26 ひずみ分布 (補強,  $t/t_0=30\%$ , 溝幅20mm)

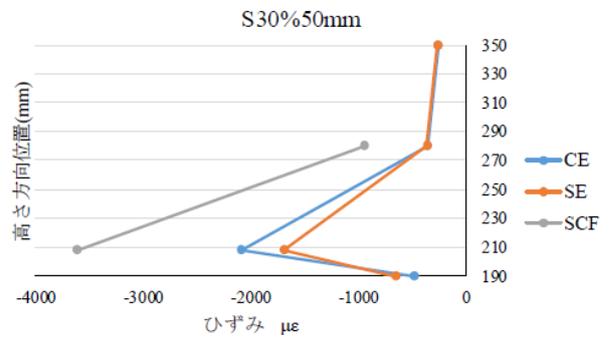


図-27 ひずみ分布 (補強,  $t/t_0=30\%$ , 溝幅20mm)

表-8 10kN載荷時の各試験体のひずみ

解析パターン	ひずみ場所	高さ位置 (mm)			溝部のひずみ逓減率
		190	208	280	
S50%20mm	CE	-944	-1,230	-381	10%
	SE	-972	-1,118	-377	
S50%50mm	CE	-679	-1,349	-370	12%
	SE	-725	-1,186	-369	
S40%20mm	CE	-948	-1,479	-380	15%
	SE	-936	-1,259	-375	
S40%50mm	CE	-595	-1,169	-363	16%
	SE	-700	-1,415	-367	
S30%20mm	CE	-904	-1,744	-377	16%
	SE	-923	-1,465	-374	
S30%50mm	CE	-477	-2,087	-356	19%
	SE	-651	-1,691	-363	

表-9 10kN載荷時の鋼管とCFRPの応力分担

解析パターン	応力箇所	応力 N/mm <sup>2</sup>	CFRP/steel
S50%20mm	Steel	-223.62	33%
	CFRP	-73.56	
S50%50mm	Steel	-237.27	33%
	CFRP	-77.73	
S40%20mm	Steel	-251.73	44%
	CFRP	-109.56	
S40%50mm	Steel	-282.99	38%
	CFRP	-107.88	
S30%20mm	Steel	-293.05	47%
	CFRP	-138.66	
S30%50mm	Steel	-338.16	44%
	CFRP	-148.05	

10kN程度までは、設定した解析モデルにより実験結果を再現できたことから、載荷荷重が10 kNのときの高さ方向のひずみの分布を図-21に、無補強体の鋼管(CE)、補強体の鋼管(SE)、補強体のCFRP(SCF)のひずみを比較して図-22~27に示す。いずれの試験体についても溝加工部上の基準点から208 mmの部分ではSEがCEよりも小さく、CFRPによって鋼管への応力分担が軽減されていることがわかる。また、同一の板厚で比較すると溝幅が大きいほど、同じ溝幅で比較すると板厚が薄いほど、ひずみが低減できることが確認できた。

表-8に示す各溝加工部のひずみに弾性係数を乗じて、鋼管とCFRPの応力分担を算出した結果を表-9に示す。同表より、CFRPは鋼管が負担する応力の33~47%を負担していることがわかる。

## 5. まとめ

筆者らは炭素繊維プリプレグシートを用いる腐食鋼柱の補強工法を提案し、補強効果の検討を行った。補強可能範囲について模擬腐食を施した管の静的載荷試験により検討した結果、一軸繊維シートの補強可能範囲は残留板厚50%で腐食幅20 mmまでに留まっていたが、二軸繊維シートを用いると、減肉部の座屈によるCFRPの座屈を周方向繊維が抑制し、残留板厚50%で腐食幅50 mmまでの腐食部に対して本補強法が適用できることがわかった。また、二軸繊維シート補強により初期剛性の改善も期待できることがわかった。

FEM解析によって試験体をモデル化し、鋼管への作用ひずみを算定したところ、二軸繊維シートによって補強した場合には、一軸繊維シートと比較して、鋼管のひずみが小さくなりCFRPが応力をより分担することがわかった。また、弾性内で鋼管とCFRPの応力分担比率を算定したところ、CFRPは鋼管の33~47%の応力を分担することがわかった。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本公共施設保守点検研究所:NEWS (事故情報・関連ニュース), <http://www.jmrc.or.jp/category/照明灯/およびhttp://www.jmrc.or.jp/category/標識/>
- 2) 松村政秀, 陳 晨, 中尾亮介, 竹本香織, 杉浦邦征, 熱硬化型炭素繊維プリプレグシートにより腐食部を補強した鋼管柱の静的載荷実験, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.5, pp.42-II\_51, 2017.5
- 3) 国土交通省, 道路局, 国道・防災課: 附属物 (標識、照明施設等) 点検要領, 2014.
- 4) 社団法人日本照明器具工業会「JIL 1003 照明用ポール強度計算基準」, 2009.

## REPAIR AND STRENGTHENING OF CORRODED STEEL PIPE USING THERMOSETTING BIAXIAL CARBON FIBER PREPREG SHEETS

Kaori Takemoto, Ryosuke Nakao, Masahide Matsumura, Chen Chen and Kunitomo Sugiura

Steel columnar structures causes lack of their strength because of corrosion at part near ground, so the author has proposed a repair and strengthening technique using thermosetting epoxy resin prepreg sheet of carbon fiber. In this paper, the difference of fabric was examined and the FEM analysis was conducted

to confirm the effect of reinforcement by CFRP.

By static loading test, the biaxial carbon fabric prepreg sheet was effective to widen reinforcing part of corrosion than uniaxial fabric, because circumferential fiber prevents buckling of the corroded part of steel column structure. From FEM analysis, stress of steel and CFRP were calculated, and CFRP incurred stress 33-47% of the stress of steel.