

熱硬化型プリプレグシートを用いる 柱状鋼構造物の補修・補強法

松村 政秀¹・陳 晨²・中尾 亮介³・竹本 香織⁴・杉浦 邦征⁵

¹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

²学生員 京都大学大学院 工学研究科修士課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: evachan.ccc@gmail.com

^{3,4} 積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー 開発研究所 (〒601-8105 京都市南区上鳥羽
上調子町2番地2)
E-mail: nakao018@sekisui.com, takemoto027@sekisui.com

⁵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

鋼構造物への繰返し応力の作用による疲労き裂の発生が維持管理上の問題となっており、照明・街路柱などの柱状鋼構造物では基部および地際部付近の腐食による板厚減少も確認され、強度の不足や耐疲労性の低下など倒壊リスクも高まっている。また、このような柱状鋼構造物のストック数は膨大であり、現場にて短期間で施工可能で補強効果の発現が期待できる補修・補強法の開発が有用である。そこで、著者らは、従来用いられてきた紫外線硬化型や常温硬化型の接着剤とは異なり短期間で施工可能な熱硬化型炭素繊維プリプレグシートを用いる補修・補強法の開発に向けて検討を進めている。本報告では、熱硬化型プリプレグシートを用いる補修・補強工法、その実用化に向けて実照明柱を対象に実施した施工試験とそれから得られた課題について報告する。

Key Words : *columnar structures, corrosion, repair, thermosetting prepreg sheet, workability test*

1. はじめに

応力の繰返し作用によって生じる疲労き裂の発生が鋼構造物の維持管理上の問題となっている。柱状の鋼構造物では、高架橋の上にある照明柱や標識柱の基部や開口部周辺に、自動車荷重や風荷重の繰返し作用により生じた疲労き裂が進展し、転倒に至る事故が発生している¹⁾²⁾。地面に設置された道路、街路、公園などの鋼製照明用柱においても、基部や地際部において腐食の発生と腐食に伴う板厚減少が観察されている³⁾。落ち葉の堆積により堆肥化した土砂等による埋設箇所や埋戻しコンクリートと柱の境界部で長時間湿った状態が保たれる箇所などの柱地際部において腐食に伴い板厚が減少し、転倒した事例も見られる。

地面に設置された鋼製柱地際部での腐食に伴う断面積の減少は、必要強度の不足だけでなく疲労に対する弱点にもなることから、基部腐食への両者に対する対策および腐食要因の遮断が必要である。また、このような柱状鋼構造物のストック数は膨大であるのに対して、補修・

補強のための柱1本あたりの施工量は少ないことから、施工性や経済性に有利な迅速な対策が求められている。

このような中、著者らは、炭素繊維シートの接着により板厚減少に対する補強と同箇所への応力低減による疲労耐久性の向上が期待できる⁴⁾ことから、熱硬化型の接着剤および同接着剤を用いる炭素繊維プリプレグシートの開発を進めている。従来用いられてきた紫外線硬化型や常温硬化型の接着剤と異なり、短期間で施工可能で、かつ確実な接着効果が期待できる補修・補強工法が実用化できると、鋼構造物の点検実施時において腐食等の損傷が発見された場合に直ちに現場にて補修・補強を行うなど、鋼構造物の維持管理の効率化をはかる上でも有効と考えられる。また、迅速な対策実施は鋼構造物の更新計画を考慮した上での予防保全的な対策としても有効と考えられる。

本報告では、地面に設置された道路、街路、公園などの鋼製照明用柱への同補修・補強工法の適用に向けて、静的載荷実験および施工試験を実施して得られた補強効果に関する基礎的な知見と課題について報告する。なお、

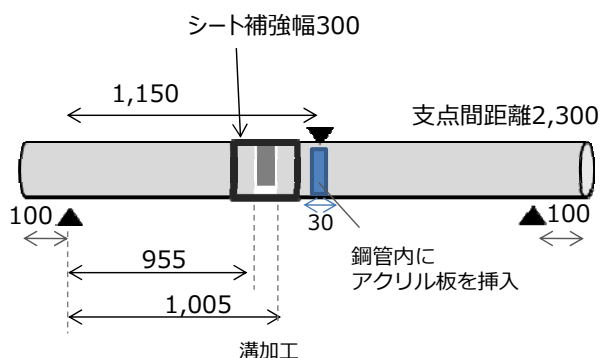


図-1 試験の実施概要 (単位: mm)

表-1 炭素繊維プリプレグシートの諸元

項目	構成・特性
シート寸法 高さ(繊維方向)x幅x厚み	300x500x1 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	314 g/m ²
CFRP 硬化体の引張物性 (CF 断面積換算)	引張強度: 3.1 GPa 弾性率: 270 GPa

表-2 パテの諸元

項目		構成・特性
接着材種別		二液混合型エポキシ樹脂
主成分	主剤	主剤：エポキシ
	硬化材	ポリアミドアミン 脂環式ポリアミン
可使時間		40～60 分（20℃， 300 g）
垂直接着強度（鋼材面）		3.2 MPa

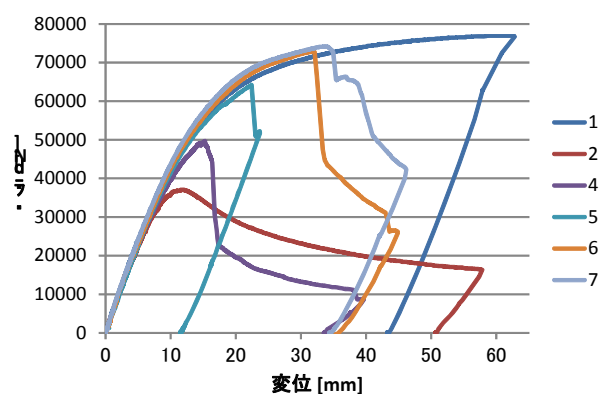
載荷実験では腐食に伴う断面積減少と強度の回復性に着目しており、耐疲労性の向上効果については別の機会に報告したいと考えている。

2. 静的載荷実験

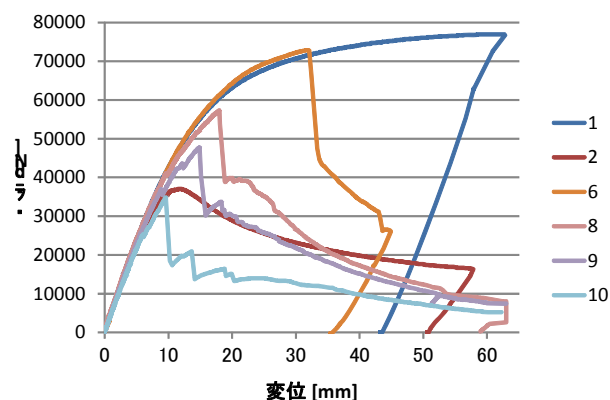
(1) 試験体

腐食損傷を模した損傷試験体を用いて提案工法による補強効果を検討する。

試験体は外径165.2 mm、板厚4.5 mm、全長2.5 mの鋼管 (SS400) であり、図-1に示すように、両端から100 mmの位置に支点を設け試験体中央に鉛直下向きに荷重を載荷する。試験体には、支間中央の載荷点から270 mmの位置を中心に、鋼管外面から全周にわたり幅±25 mm (50 mm)、深さ2.25 mmの溝加工を施し、腐食による板厚減少を模して与えた損傷試験体を用い、炭素繊維プリプレグシートを貼付して補強する。腐食による損傷が著



(a) 残存板厚による違い



(b) スリット孔による違い

図-2 荷重変位関係

しい場合を想定して、損傷試験体の溝加工の中央部分に幅20 mmのスリット孔を設ける損傷試験体も設定する。

炭素繊維プリプレグシート (表-1) を用いる補強手順は後述する施工内容に沿ったものであり、2液混合エポキシ系パテ (表-2) により深さ2.25 mmの溝加工部を埋め戻した後、溝加工部中心より±150 mm (300 mm) の範囲に2層の一方方向プリプレグシート (繊維方向は部材長手方向と一致) を加熱により硬化・貼付する。

表-3には試験体の一覧を示す。載荷実験における主な着目項目は、残存板厚 (元の板厚に対する溝加工後の板厚(%))、鋼管表面のケレン方法 (GP: ディスクサンダー, 刃: トラスコ中山(株)製GPトップ, アランダム砥粒, 粒度60, BB: MBX® Bristle Blaster)、スリット孔の有無 (有の場合には、全周に占めるスリット孔の周長割合(%))、加熱方式 (熱風, バンドヒーター) である。ただし、鋼管表面のケレン方法 (後述する試験体3 (GP) と試験体6 (BB)) による違いは顕著に認められなかったことから、以下ではBBの結果を提示している。また、熱風による温度・時間変化と同等な加熱条件でパテと鋼材ケレン面の垂直接着力を評価した結果、接着強度は

表-3 試験体の一覧

試験体No	残存板厚 (%)	ケレン方法	円周に対するスリット 孔長の割合(%)	加熱方式	最大荷重 (kN)	備考
1	100	-	-	-	76.9	新管（無損傷・無補強）
2	50	-	-	-	37.1	補強無し
3		GP	なし	熱風発生機	73.6	補強
4	BB	49.6				
5		64.2				
6		73.6				
7		74.2				
8		57.3				
9		47.8				
10		34.8				
11	50		なし	バンドヒーター	73.4	

GP: ディスクサンダー、刃GPトップ, BB: プリストルブラスター



写真-1 圧壊・剥離の発生例

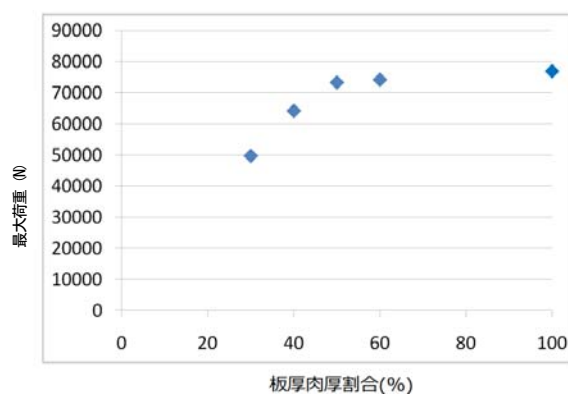


図-3 最大荷重と板厚の関係

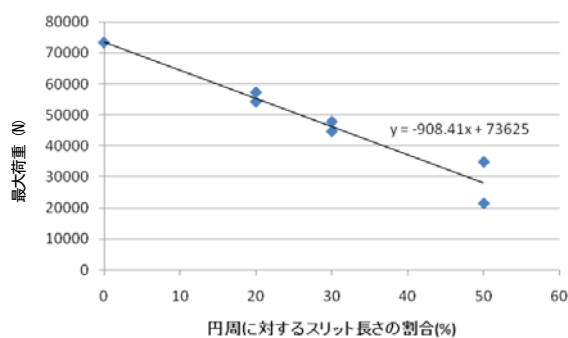


図-4 最大荷重とスリット長さの関係

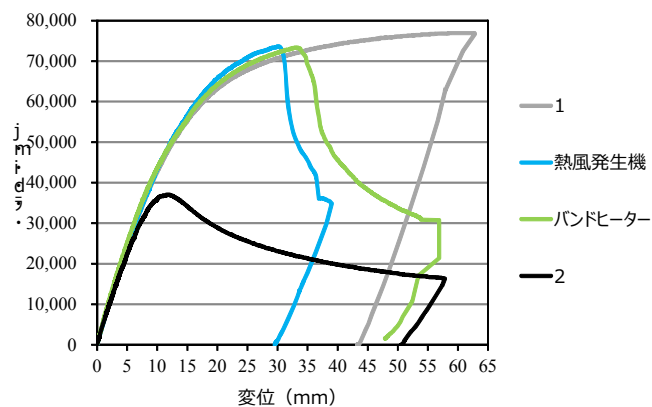


図-5 加熱方式による違い

3.2MPaであり、破壊形態はパテの凝集破壊であった。

(2) 試験結果

図-2には荷重変位関係を示す。同図(a)は損傷試験体の残存板厚が補強効果に与える影響、同図(b)はスリット孔の周長割合が補強効果に与える影響を、それぞれ、無

損傷・無補強の試験体1および残存板厚50%で無補強の試験体2の結果とともにプロットしている。変位は载荷点位置における鉛直方向変位である。

写真-1には試験終了後の補強試験体の破壊状況の一例を示す。写真-1に示すように、圧縮側において溝加工部近傍で凸となるシートの圧壊や剥離が観察された。図-2

に示した荷重変位関係では、写真-1に示した溝加工部の鋼管の座屈とシートの圧壊や剥離により最大荷重を迎え、最大荷重点以降の耐力の低下が顕著である。

図-3には、図-2(a)より求まる最大荷重と残存板厚(%)の関係を示す。残存板厚100%は無損傷・無補強の試験体1であり、その他の試験体は残存板厚30～60%に対する補強試験体（スリット孔無し）であり、ケレン方法はBB、加熱方式は熱風発生機により、155～170℃で約40分加熱する。同図より残存板厚が50%以上の試験体6と7ではほぼ同等な最大荷重となり、元の板厚から50%減までの腐食損傷に対して本補強を施すことによって無損傷・無補強と同程度まで最大荷重を回復することが可能である。なお、残存板厚50%で補強を施さない損傷試験体2の最大荷重は、無損傷・無補強の試験体1の約50%であり、本補強法により残存板厚40%以下の場合にも、ある程度の補強効果が認められるが、残存板厚40%の試験体5では83%、30%の試験体4では64%の回復率であった。

図-4には、図-2(b)より求まる最大荷重と全周に対するスリット長さ(%)の関係を示す。例えば、スリット長さ0%はスリット孔の無い補強試験体6、50%は半周にわたりスリット孔を有する試験体10であり、いずれもケレン方法はBB、加熱方式は熱風発生機による加熱である。同図より幅20 mmのスリット孔の加工範囲が広がると試験結果のばらつきが大きくなることが確認できるが、火広範囲に応じて最大荷重が減少する傾向が認められる。スリット孔が全周の20%の試験体8、本実験では103.7 mm程度までのスリット孔であれば、残存板厚30%でスリット孔無しの試験体4とほぼ同じ最大荷重を示した。

図-5には加熱方式の違いによる荷重変位関係を示す。熱風発生機による加熱では20分程度で、バンドヒーターによる加熱では5分程度で、それぞれ160℃に到達させ、到達後に20分程度温度を維持した。温度は管端からの位置や上下位置により異なり、最低温度部で約130℃以上、最高温度部は約170℃であった。いずれも残存板厚50%に対する補強試験体（スリット孔は無し）、ケレン方法はBBである。同図に示すように、加熱方式が異なる試験体6と11とは、本加熱条件においてほぼ同等な最大荷重を得た。

3. 現場施工実験

本開発工法の施工性および一連の処理に要する作業時間を確認する目的で、実照明柱を対象とした施工試験を実施した。施工試験は2月に実施し、天候は快晴、気温は約12℃であった。また、対象とした照明柱は、試験施工後に撤去・更新が計画されていたことから、試験施工後は仮埋め状態に復旧させた。

表-4 照明柱の諸元等

支柱形式	テーパーポール型8-18B
路面境界部の 外径、板厚	φ167 mm, t 4 mm
基礎形式	ベースプレート型、三角リブ
路面境界状況	コンクリート

表-5 補強仕様

シート寸法	幅（巻付け方向）500 mm, 高さ 300 mm
貼付位置	路面境界部より±150 mm
貼付層数	2層
繊維方向	高さ方向、一軸
接着仕様	2液混合型エポキシ系パテ による接着
塗装仕様	ポリウレタン系樹脂塗装

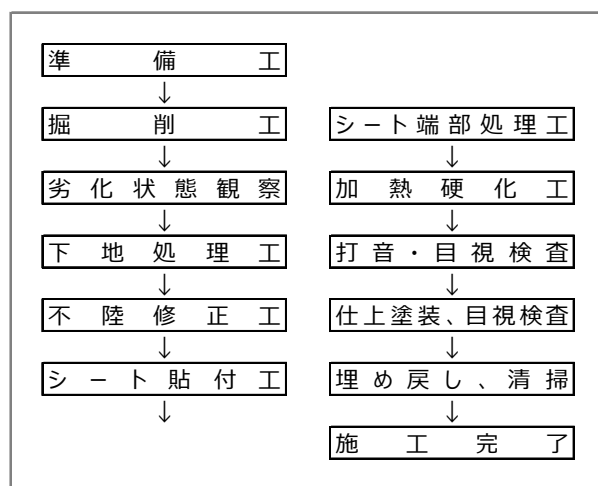


図-6 施工手順

(1) 施工対象物および補強仕様

照明柱の諸元を表-4に示す。テーパー付きポールの基部付近の管径は167 mm、板厚は4 mmであり、前述した載荷実験に用いた試験体とほぼ同じ形状である。また、柱基部はベースプレート型であり高さ約180 mmの三角リブが溶接されている。柱基部は地表面から約250 mm下に基礎コンクリートが打設されており、基礎コンクリートから地表面まではコンクリートにより埋め戻された状態であったため、ポールとコンクリートとの境の地際部において腐食箇所が認められた。

補強仕様は表-5に示すとおりであり、路面境界部を中心に±300 mmの範囲に2層のプリプレグシートを熱風発生機を用いて加熱し接着する。

(2) 施工内容

施工は監督者1名、作業員2名にて実施した。施工手順



図-7 施工対象の照明柱（掘削後）



図-8 下地処理工



図-9 パテによる不陸修正工

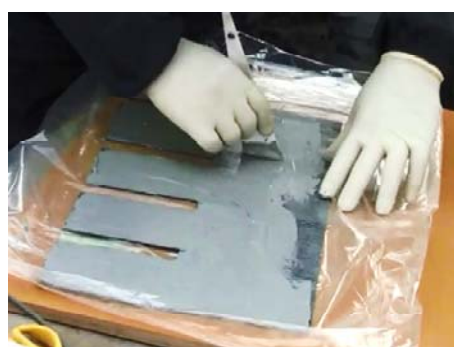


図-10 シートへのパテ塗布



図-11 シート貼付工



図-12 シート端部処理工

を図-6に示す。以下では主要工程の概要をまとめている。

a) 掘削工

柱基部周りの埋戻しコンクリートは事前の点検時に掘削済みであり、試験施工の当日は仮埋めの常温型アスファルトおよび碎石の除去作業を行った（図-7）。掘削寸法は600 x 600 x 250 mm程度であった。

b) 下地処理工

路面境界部より ± 160 mmの範囲の塗装と錆をディスクサンダー（刃：GPトップ）を用いて除去するケレンを行った（図-8）。

c) 不陸修正工

地際部には円周に沿って腐食による板厚減少が観察され、顕著な箇所では最大で23 mmの板厚減少が見られた。

腐食による板厚減少箇所にパテを塗布し不陸修正を行った（図-9）。

d) シート貼付工

シート接着に先立ち、三角リブに対応する箇所にはシートヘスリット加工を施し、シート接着面片面にパテを塗布した（図-10）。シートは方端から順に巻付けていくことで気泡の巻き込みを抑制し、さらにローラー掛けを行うことでパテと同時に脱泡させた。シートは2層を貼り、端部はラップさせ、1層目と2層目でラップ位置を180°ずらして貼付した（図-11）。

e) シート端部処理工

貼り付けたシートの上下端部の段差修正のため、パテを塗布し水切りを形成した（図-12）。



図-13 加熱硬化工



図-14 打音検査



図-15 仕上塗装工



図-16 埋め戻し後

f) 加熱硬化工

支柱路面境界部に向けて熱風を噴出する構造を有した配管および断熱シートを用い、支柱に貼付したシート全体を加熱した。熱源には熱風発生器を用い、シート表面温度分布が $155\sim 170^{\circ}\text{C}$ となるように管理し、昇温時間を含め計40分間の加熱を行った（図-13）。

g) 打音・目視検査

熱硬化後、目視および打音検査により硬化状態とシートの浮き発生有無を確認した。後述のとおり、一部に加熱不良箇所（浮き）が見られたので追加加熱処理を実施した（図-14）。

h) 仕上塗装工

表面温度計にてシート表面が 80°C 以下であることを確認後、塗装処理を行った（図-15）。塗装はエポキシ樹脂をUVから遮蔽する目的で行い、ポリウレタン系の塗装材を用いた。

i) 埋め戻し、清掃

塗装の指触乾燥後に砕石、および常温型アスファルトにて埋め戻しを行った（図-16）。

(3) 結果と考察

a) 施工所要時間

工程別の施工所要時間を表-6に示す。一連の貼り付け工程の実施には、事前の室内実験より120分の所要時間

を予定したが、試験施工ではシート貼付工および加熱硬化工に時間を要したため計205分の時間を要した。

シート貼付工においては、三角リブ位置のシートへの転写、およびスリット加工後のシートへのパテ塗布に、加熱硬化工においては、加熱用配管の組み立て不備により、三角リブ付近の一部に加熱不良箇所が見られ、熱風を当て追加加熱処理を実施したため、それぞれ予定時間を超過した。

埋め戻し、清掃における時間の超過は、現場における搬入資材、機器類の準備・整理、運搬に時間を要したことが主な要因であり、正味の埋め戻し、清掃に要した時間は計画時間とほぼ同等であった。

b) 施工性

シートの柔軟性よりスリット加工が鋏で簡単に行え、支柱への巻付け動作が容易であることが確認できた。

貼り付けを行うシートの片面に予めパテを塗布することによって、貼付後の位置修正や貼り剥がしが可能となり、高い現場適応性を有していることが確認できた。

c) 品質検査

打音・目視検査において、直径 $10\sim 30\text{ mm}$ の浮きが3カ所で見られた。補強性能に影響しない浮き寸法、数であることは別途確認できたが、施工者の習熟度に依存しない貼り付け方法もしくは加熱プロセスの改善が望まれた。

表-6 工程別の施工所要時間（単位：分）

工程	計画	結果
準備工，掘削工	15	10
劣化状態観察	5	5
下地処理工	15	10
不陸修正工	10	13
シート貼付工	15	40
シート端部処理工	5	8
加熱硬化工	40	92
打音・目視検査	5	5
仕上塗装，目視検査	5	5
埋め戻し，清掃	5	18
合計時間（分）	120	205

表-7 改良後の施工所要時間（単位：分）

工程	計画	結果
準備工，掘削工	15	8
劣化状態観察	5	2
下地処理工	15	5
不陸修正工	10	5
シート貼付工	15	12
加熱硬化工	40	39
打音・目視検査	5	1
シート端部処理工	5	13
仕上塗装，目視検査	5	15
埋め戻し，清掃	5	5
合計時間（分）	120	105

(4) 施工プロセスの改良検討

施工時間の短縮を目標に，現場施工試験にて抽出された課題に対して，下記の通り施工プロセスを改良した。また，同様な構造を有する部の照明柱基部を対象に再度，施工実験を実施した。実施時期は8月である。表-7に改良プロセスの施工所要時間を示す。その結果，総所要時間は105分へと短縮でき，浮きの発生も生じていないことが確認できた。

a) シート準備，貼付方法

三角リブ位置のスリット加工を支柱に貼付ながらカッターナイフで加工するよう変更することで，三角リブ位置の転写が不要となり，さらに，シートへのパテ塗りの際にスリットが無い場合一度にパテを塗布できるように改良された。

b) 加熱硬化工

熱風による加熱では，所定温度に到達するまで約20分を要したため，バンドヒーターで直接熱伝達する方法に変更した。これにより昇温時間が5分程度に，加熱の合計時間も20分程度に短縮できた。さらにバンドヒーターを設置する際の締め付け工程が脱泡にも有効であったことから，シートの浮きの発生が見られなくなった。

c) シート端部処理工

上述のように加熱硬化工は改善されたが，バンドヒーターの締め付けにより，シート面のパテが端部から排出されるため，予めパテで水切りを形成しても形状が維持されないといったデメリットが見られた。したがって，シート端部処理工は加熱硬化後に行うこととし加熱後の冷却を待つ時間を要することとなった。仕上塗装も冷却を待つ必要があるが，改良プロセスの施工実験は8月に実施したため，実施工実験よりも冷却に長い時間を要している。

d) 作業者の段取り

実施工試験では2名の作業者の内，1名が手空きで待機状態となることがあったので2名の作業分担を予め明確にし作業効率を上げた。

4. 結論

本報では，現在開発を進めている，短期間に施工可能で確実な接着効果が期待した熱硬化型炭素繊維プリプレグシートとそれを用いる補修・補強工法の実用化に向けて試験体を用いる静的載荷実験および実照明柱を対象とした施工試験を実施した。主な結論は次のとおりである。

- 1) 155～170℃で約40分熱風発生機により加熱することによって硬化する熱硬化型プリプレグシートにより板厚減少箇所を補強した。補強箇所に曲げモーメントを漸増させる静的載荷実験の結果，元の板厚から50%程度まで板厚減少箇所に対して本補強を施すことによって無損傷・無補強と同程度まで最大荷重を回復することができた。
- 2) 腐食が進行した場合を想定して，板厚減少に加えスリット孔を有する場合には，鋼管全周に対する孔の長さに応じて最大荷重が減少するが，孔の長さが全周の20%程度までであれば板厚が30%減少した場合とほぼ同等な最大荷重まで回復可能であった。
- 3) 本補修・補強法の施工性を実照明柱を対象とした現場施工試験により確認した。その結果，1照明柱あたりの施工時間は当初計画で120分，実所要時間はシート貼付工および加熱硬化工に時間を要し205分であった。その後，施工プロセスを改良することによって，当初計画よりも短期間な105分で施工できることを確認した。

上述のとおり，基礎的な補強効果および迅速な施工性について確認できたことから，本補修・補強法の実用化に向けて，腐食箇所の強度回復のみならず耐疲労性や腐食要因の遮断効果についても引き続き検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策，2002.3
- 2) 本州四国連絡高速道路(株)：本四技報，Vol.37，No.119，道路照明柱の基部腐食問題への対応～判断基準等の策定～
- 3) 玉越隆史，星野 誠，市川明弘：道路附属物支柱等の劣化・損傷に関する調査，国土技術政策総合研究所資料第 685 号，2012.
- 4) 土木学会：腐食した鋼構造物の残存性能評価および性能回復技術，2007.5

REPAIR AND STRENGTHENING TECHNIQUES OF STEEL COLUMNAR STRUCTURES BY THERMOSETTING PREPREG SHEET

Masahide MATSUMURA, Chin SHIN, Ryosuke NAKAO,
Kaori TAKEMOTO and Kunitomo SUGIURA

Decreasing of plate thickness due to corrosion at part near ground of steel columnar structures like illumination pole causes lack of their strength and/or fatigue resistance. To reduce risks of their breaking, a repair and strengthening technique operated and expected a reliable strengthening effects in a short period of time can be keys. Then the authors are newly developing thermosetting epoxy resin prepreg sheet of carbon fiber for the repair and strengthening of steel structures. The thermosetting epoxy resin prepreg sheet will provide a shorter period to obtained an expected strengthening effect, different from ultraviolet-curing type adhesive conventionally used.

This report presents results of static loading test a repair and strengthening technique using the newly developed thermosetting prepreg sheet and a workability test of the technique to a real illumination pole at the site..