

(2) 断面欠損を有する溶融亜鉛メッキ鋼管のCFRPによる補修

松井 孝洋¹・松本 幸大²・古賀 惟彬³・山口 信之⁴・服部 明生⁵・山田 勝⁶

¹土木学会 正会員 東レ コンポジット技術第1部 (〒455-8502愛知県名古屋市中区大江9-1)
E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

²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

³日本建築学会 正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻
E-mail: t103615@edu.imc.tut.ac.jp

⁴美貴本 営業支援グループ (〒550-0003大阪府大阪市西区京町堀3丁目9番8号)
E-mail: yamaguchi@mikimoto-japan.co.jp

⁵日本建築学会 正会員 東レ建設 技術部 (〒103-0023東京都中央区日本橋本町1-6-5)
E-mail: Akeo_Hattori@tcc.toray.co.jp

⁶関西電力 電力技術研究所 (〒661-0974兵庫県尼崎市若王寺3丁目11番20号)
E-mail: yamada.masaru@c5.kepco.co.jp

高度成長期から50年以上を経た我が国の構造物において、構造部材の腐食やそれに伴う性能劣化が懸念されている。こうした背景から、腐食により断面が欠損した構造部材の耐力評価やその対策は緊要な社会的課題となっている。腐食鋼部材の耐力評価や補強に関しては、H形や山形断面に対して、FRPによる補強の有効性についての報告が報告されている。一方、本研究では、最近の内部調査事例で腐食・断面欠損の現状が極めて深刻であるという指摘がなされている円形鋼管を対象とし、CFRPによる補修補強法を検討する。すなわち本論では、まず、曲面状の表面を有する鋼管への補修法ならびに補修設計法を提案し、次に、断面欠損が生じた鋼管部材に対して鋼管部材に対する残存耐力と補修法の効果・可能性を引張・圧縮実験によって検証し、補修法の妥当性と効果を整理し、報告する。

Key Words : CFRP, repair, galvanized steel, circular steel pipe, corrosion

1. はじめに

高度成長期から50年以上を経た我が国の様々な構造物において、構造材料の経年劣化やそれに伴う構造的な性能低下が指摘されてきており、重大な事故に繋がっている例も存在する。鋼構造分野における経年による劣化の代表は腐食であり、防錆処理が施された鋼材であっても、立地条件などによっては数十年経過することで著しい腐食が生じている例が報告されている。こうした状況において、人々が生活する上で重要な社会基盤構造物の維持管理は極めて喫緊かつ早急に対策を行う必要があると言える。一方で、高度成長期に大量に建設された構造物を短期間で補修・補強また更新することは困難であり、個々の構造物の重要度や残存強度ならびに施工性等を調査し

て管理運用を行う、所謂アセットマネジメントが必要である。その際、短時間かつ特別な施工機械を必要としない簡便な延命化技術が確立されることで、合理的なアセットマネジメントの一助となりうると考えられる。

腐食した鋼部材の耐力評価やCFRPによる補強に関しては、H形鋼や山形鋼等の開断面かつ、部材表面に平面を多く有する鋼材に対する補強効果が述べられてきている。一方、構造部材として、円形鋼管が用いられている構造物も多数存在するが、こうした曲面状の鋼部材に対する補強法は、開断面部材に比べ知見が少ないと言える。さらに、鋼管部材内部の深刻な腐食も近年の調査結果から明らかとなっており、延命化技術の開発が望まれている。

以上を踏まえ、本研究では、鋼構造物として国内に膨

大な数が存在し、インフラ設備として重要な送電用鋼管鉄塔を対象として、その経年劣化対策のための延命化技術を提案し、実験によって検証するものである。特に、送電用鋼管鉄塔部材の表面に防錆処理を施すことが一般的で、代表的なものとしては溶融亜鉛メッキが挙げられる。これらの実情を勘案したうえで、メッキ表面からCFRPによって補修することの可能性も確認することも目的の一つとしている。また、設計法としては許容応力度設計が適用されていることから、弾性範囲内に注目して結果を述べる。

2. 試験体の概要

試験に用いた鋼管は、溶融亜鉛メッキ（HDZ45）を施した、 $\phi 89.1 \times 3.2$ のSTK400材とした。腐食については図1に示すようにルーズホール型の開口にモデル化したものを採用した。鋼管外面に接着する炭素繊維シートは、軸方向繊維にUM46-40G、周方向繊維にUT70-20Gを採用し、樹脂はエポキシ系含浸樹脂E2500（コニシ製）、エポキシ系プライマーE810L（コニシ製）を用いた。以下にCFシート及び樹脂含浸後のCFRPとしての特性を示す。補修範囲は断面欠損部の両側に80mmとしており、これは

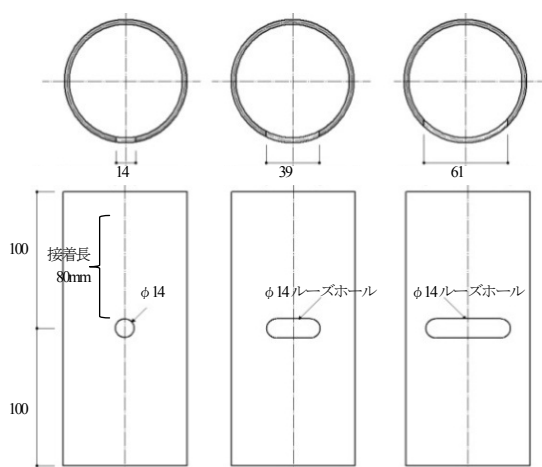


図1 モデル化した腐食鋼管の概要

表1 炭素繊維シート の材料定数

名称	厚さ [mm]	引張強度 [MPa]	ヤング率 [GPa]
UM46-40G	0.217	2400	440
UT70-20G	0.111	3400	245

表2 CFRP の材料定数

名称	繊維含有率 [%]	厚さ [mm]	ヤング率 [GPa]
UM46-40G	24.5	0.884	115

鋼管の許容応力度を235MPaとしたときの公称耐力が203kNであることと、接着部の引張剪断強度を10MPaとしたときの剥離耐力がこれを上回ることから、本研究の弾性範囲内の分析における接着長さとして採用した。

3. 補修量の算定法

本研究で対象とする鋼管トラス構造は部材に作用する力は主として軸力であるため、引張耐力または座屈耐力によって部材の耐力が定まる。しかしながら、断面内の一部に腐食による欠損が生じた場合、断面積の減少による耐力の低下だけではなく、中立軸の移動により軸力による曲げ変形が生じる。これは、圧縮耐力に大きな影響を及ぼすと考えられることから、補修により中立軸位置も健全状態に回復させられることが望ましい。以上の観点から、本研究では、曲げ剛性に注目した補修量の算定法を採用した。具体的には、断面欠損によって失われた



(a) 部分補修 (b) 全周補修

■: 鋼管断面, ■: 軸方向繊維, □: 周方向繊維

図2 補修方法の概略

表3 軸方向繊維積層数[層]

欠損率	5%	15%	25%
部分補修	2	4	5
全周補修	1	2	3

表4 試験体の剛性の理論値

—	軸剛性[GPa]				曲げ剛性[Nmm ²]			
	0%	5%	15%	25%	0%	5%	15%	25%
補修無	205	194	175	159	164	146	122	112
部分補修		204	203	203		164	174	189
全周補修		228	313	261		175	249	205

例；NG15CL-T01

→ 試験体の通し番号
→ T；引張試験，C；圧縮試験
→ 補修法；CLは部分，CAは全周
→ 断面欠損率[%] (0は欠損無)

図3 試験体名

曲げ剛性を、CFRPによる補修によって増加する曲げ剛性が上回る設計とする。また、補修範囲については図2に示すように、欠損部周辺のみを補修した部分補修と、全周に亘って補修する全周補修について検討を行った。曲げ剛性確保と中立軸位置の回復の観点からは、部分補修が合理的であるが、接着による定着面積の不足が懸念されることから全周補修も検討を行った。以上を踏まえ、試験体名は図3のように表記する。表3に計算された補修層数を、表4に補修前後の軸剛性・曲げ剛性の値を示す。

3. 圧縮試験による補修効果の検証

(1) 試験体と試験方法

圧縮試験は図1に示す断面欠損から、欠損率15%と25%について実施した。表5に試験体一覧を示す。試験は、図4、写真1に示すように治具で挟み込んだ試験体とロードセルを球座耐圧盤で挟み、圧縮荷重を作用させ行った。

表5 圧縮試験体一覧

試験体名称	断面欠損率	補修	ロット
NG0-C01	無	無	A
NG0-C02			
NG15-C01	15%	無	B
NG15CL-C01		部分	
NG15CA-C01		全周	
NG25-C01	25%	無	A
NG25CL-C01		部分	
NG25CA-C01		全周	

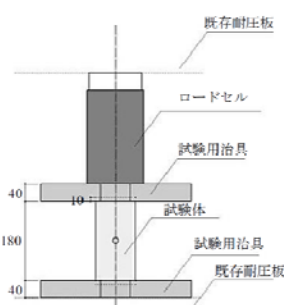


図4 圧縮試験方法



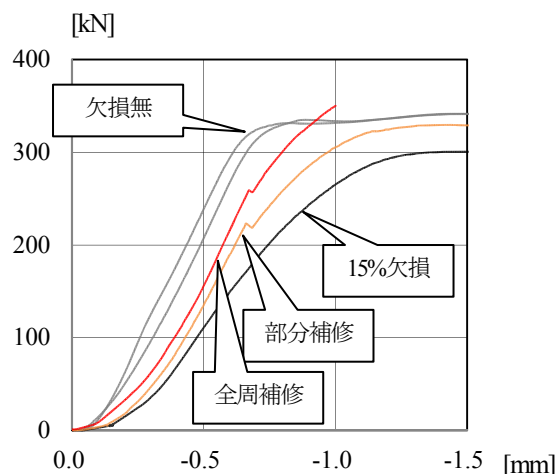
写真1 圧縮試験の様子

(2) 試験結果と考察

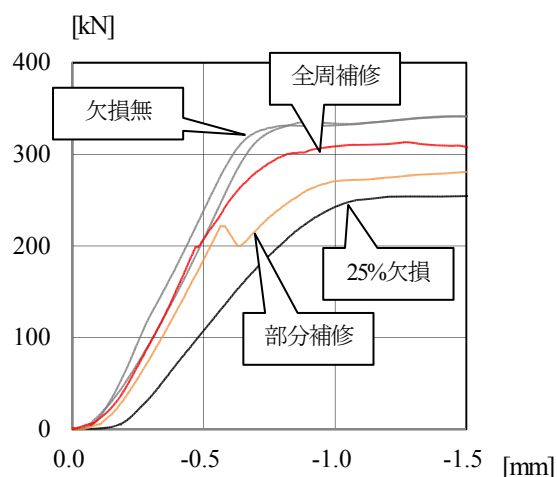
図5に試験から得られた荷重—変位関係を示す。変位は図4の下側既存耐圧板と上部試験用治具との変位差としている。なお、NG15CA-C01においては、荷重が350kNに達した後に除荷を行った。補修を行った試験体において、200～250kN付近で荷重が低下している原因は、補修材の剥離が原因であるが、本試験で採用した接着長80mmにおいては概ね欠損の無い鋼管の公称耐力である

203kNを上回っていることが分かる。

表6に図5に示す荷重—変位関係より得られた弾性範囲における軸剛性を示す。また、同表の増加率は、断面欠損無を基準とした軸剛性の増加率を示している。軸剛性は補修を施すことによって向上するが、欠損無試験体の軸剛性を超えた試験体はNG25CA-C01のみであったが、補修無試験体と比較すると、部分補修試験体においては20～40%全周補修試験体では21～56%程度軸剛性が向上している。この値は表4の理論値とは整合しないが、原因としては、応力集中による欠損部周辺が降伏した後、局部座屈が生じることにより局所的な剥離と、それに伴うFRPの接着面の浮き上がりが生じ、補修の効果が上手く寄与しなかったことが原因として考えられる。こうした影響を低減させ、より部材全体の挙動を把握するため、今後、長柱試験体によって分析を進める予定である。



(a) NG0およびNG15の結果



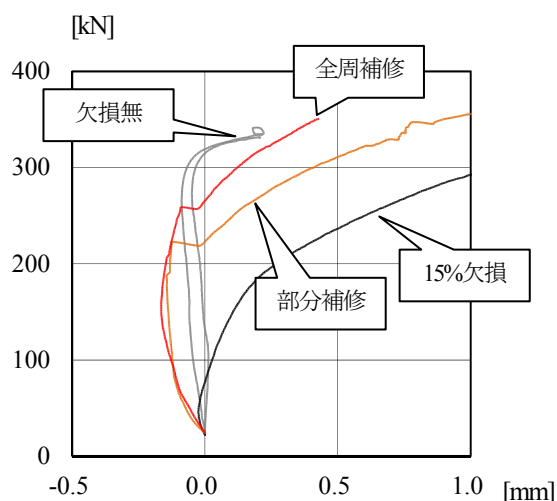
(b) NG0およびNG25の結果

—：欠損無，—：欠損有補修無
—：欠損有部分補修，—：欠損有全周補修

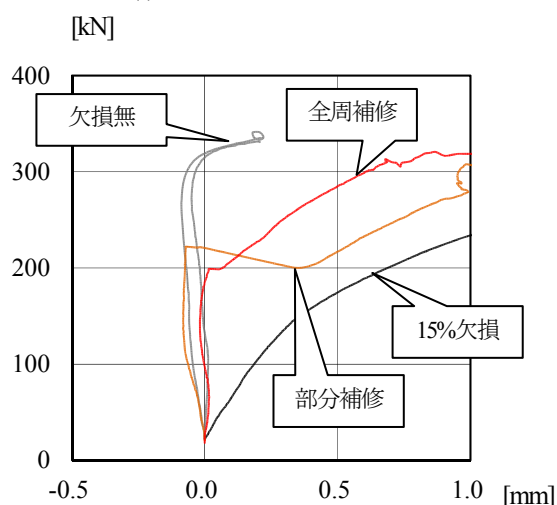
図5 荷重—変位関係（圧縮試験）

表6 軸剛性及び増加率（圧縮試験）

試験体名	軸剛性[GPa]	増加率[%]
NG0-C01	120	0
NG0-C02	136	
NG15-C01	93	-27
NG15CL-C01	112	-13
NG15CA-C01	113	-12
NG25-C01	82	-34
NG25CL-C01	115	-10
NG25CA-C01	129	1



(a) NG0およびNG15の結果



(b) NG0およびNG25の結果

—：欠損無，—：欠損有補修無

—：欠損有部分補修，—：欠損有全周補修

図6 偏心圧縮による曲げ変形の様子（圧縮試験）

図6に試験体両側の変位差を示す。すなわち，断面欠損側およびその反対側の変位を測定し，その差を示したものである。なお，実験治具の関係上，載荷初期時は変位が不安定なため，荷重が20kNに達した時点の変位差を0としている。また，開口側の変位が先行している場

合，変位差は正側となる。図より，補修を行うことによって開口による偏心が抑制されており，欠損無と同じ試験誤差程度の変位差まで低減できている。これは，曲げ剛性を補修基準とした本補修設計法の効果であると言え，弾性剛性ならびに座屈に影響を及ぼす偏心の影響を効果的に回復できていることが考察できる。

4. 引張試験による補修効果の検証

(1) 試験体と試験方法

表7に引張試験を行った試験体一覧を示す。試験は，図7，写真2に示すように鋼管の両端部にネジ切り加工を施したノーズコーンを溶接し，このネジ穴に通した鋼棒を掴み載荷を行った。

表7 引張試験体一覧

試験体名称	断面欠損	補修	ロット
NG0-T1	無	無	A
NG0-T2			B
NG5-T01	5%	無	B
NG5CL-T01		部分	
NG5CA-T01		全周	
NG15-T01	15%	無	A
NG15CL-T01		部分	
NG15CA-T01		全周	
NG25-T01	25%	無	B
NG25CL-T01		部分	
NG25CA-T01		全周	

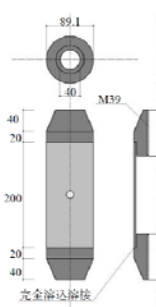


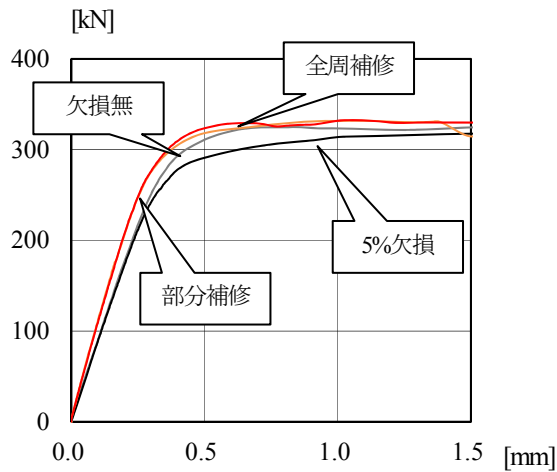
図7 引張試験方法



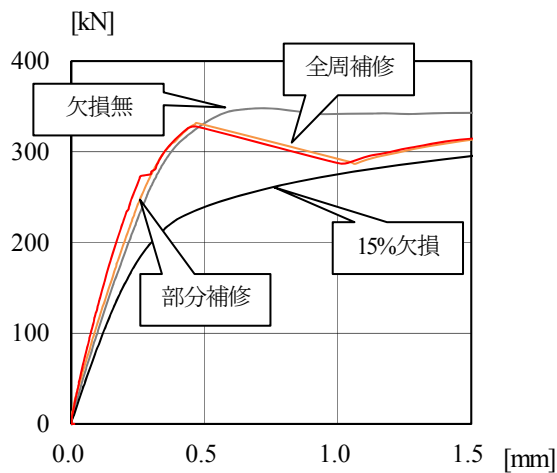
写真2 引張試験の様子

(2) 試験結果と考察

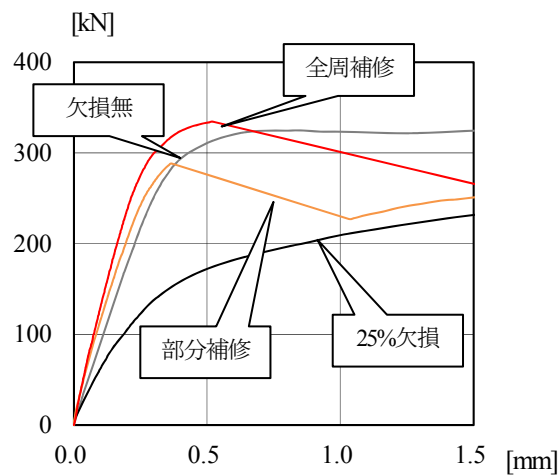
図8に試験から得られた荷重—変位関係を示す。変位は写真2に示すように試験体上下のノーズコーンの相対変位としている。引張試験における，補修材の剥離に伴う荷重の低下は250kN以上となっており，圧縮試験と比較して高い荷重まで接着が保持されていること，同時に，鋼管の公称耐力である203kNでは剥離は生じないことが明らかとなった。また，断面欠損率5%程度では鋼管全



(c) NG0およびNG5の結果



(c) NG0およびNG15の結果

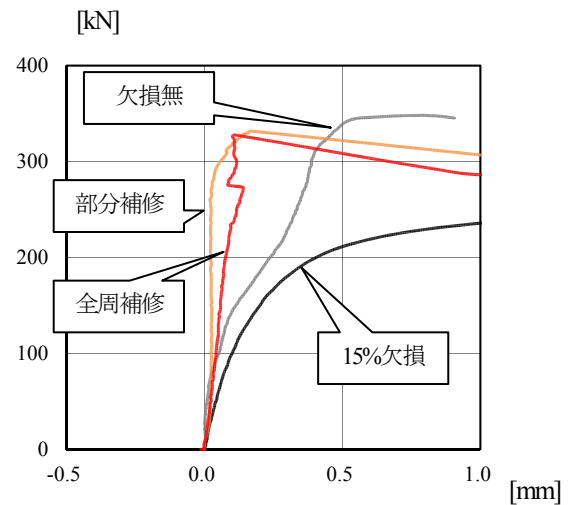


(c) NG0およびNG25の結果

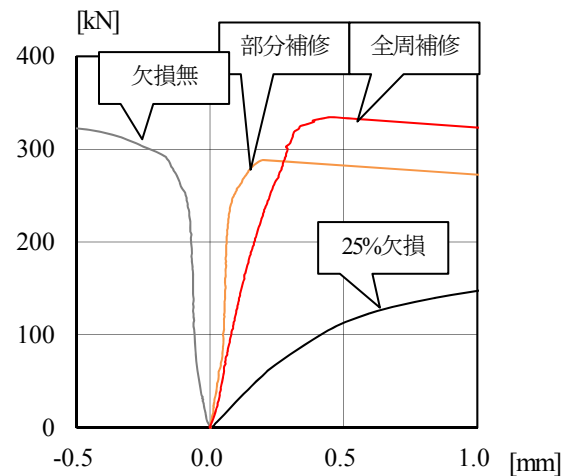
—：欠損無，—：欠損有補修無
 —：欠損有部分補修，—：欠損有全周補修
 図8 荷重—変位関係（引張試験）

表8 軸剛性及び増加率（引張試験）

試験体名	軸剛性[GPa]	増加率[%]
NG0-T01	212	0
NG0-T02	203	0
NG5-T01	201	-1
NG5CL-T01	244	20
NG5CA-T01	239	18
NG15-T01	178	-16
NG15CL-T01	225	6
NG15CA-T01	278	31
NG25-T01	105	-48
NG25CL-T01	205	23
NG25CA-T01	290	43



(a) NG0およびNG15の結果



(b) NG0およびNG25の結果

—：欠損無，—：欠損有補修無
 —：欠損有部分補修，—：欠損有全周補修

図9 偏心圧縮による曲げ変形の様子（引張試験）

体の挙動に及ぼす影響は小さいことが分かる。

表8に図8に示す荷重—変位関係より得られた弾性範囲における軸剛性と欠損無と比較した増加率を示す。引張試験においては、欠損有試験体と同ロットの欠損無試験

体との対応に応じて算出している。引張試験では、全ての補修試験体において、欠損によって失われた軸剛性を補修によって回復し、欠損無試験体以上の軸剛性を保持

することがわかった。

図9は圧縮試験における図6に対応する、偏心軸力による変位差を示したものである。引張载荷においても補修を施すことで偏心が抑制され、欠損無の場合と差がない状態まで回復していることが確認できる。

5. 結論

本研究では腐食した鋼管部材の外周補修法の弾性範囲内での効果・可能性を整理するために、断面欠損を有する鋼管に対してCFRPによる補修を施し、圧縮・引張载荷試験を行った。本試験において得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 圧縮試験・引張試験を通して、鋼材の許容応力度レベルまではCFRPの剥離は生じず、軸剛性の上昇ならびに偏心による曲げ変形を低減させられることを明らかとした。
- 2) 圧縮試験より、欠損部周辺の降伏および局部座屈によりCFRPの浮き上がりが生じたため、弾性剛性の回復の観点から課題が明らかとなった。
- 3) 溶融亜鉛メッキ表面へのCFRP補修では、剥離時の平均引張剪断応力として10MPa程度が期待できることが明らかとなった。
- 4) 剥離荷重は欠損率には影響されないが、圧縮時に比べ引張時の方が高い傾向があることが明らかとなった。

以上のように、断面欠損を有する鋼管の圧縮・引張試験を実施し弾性時挙動を分析した結果、有効な補修法であることを示した。

謝辞

本研究は山田聖志教授の懇切丁寧なご指導を頂いたものである。実験では元豊橋技術科学大学 工学部建設工学課程 日比生和樹氏の協力を得た。本研究を遂行するにあたり、美貴本 相見和徳氏、東レ 山本展久氏、東レ建設 灰谷徳治氏、金子久晃氏、大津敬志氏には研究全般に亘りご助言頂いた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 電気学会：電気学会技術報告 架空送電設備の鋼材腐食・摩耗現象，2009.7
- 3) 森猛，渡邊一，正井資之：腐食した鋼板の表面形状シミュレーションと腐食鋼桁の曲げ耐力，構造工学論文集 Vol.49A，2003.3
- 4) 西村宣男，竹内修治，村上茂之，田渕敦彦，伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の残存強度の評価法，鋼構造年次論文報告集 第9巻，2001.11
- 5) 西村宣男，竹内修治，村上茂之，竹下主義，軸屋一美，伏見義仁：断面に欠損を生じた円形鋼管部材の座屈強度特性，鋼構造論文集 第6巻 第21号，1999.3
- 6) 杉浦江，小林朗，稲葉尚文，本間淳史，大垣賀津雄，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集 F，pp.106-118，2009.3
- 7) 玉井宏章，高松隆夫，原伸幸，灰谷徳治，服部明生：炭素繊維プレートによる鋼構建造物小ばりの曲げ補強について，鋼構造年次論文報告集，第13巻，pp.553-530，2005.11.
- 8) 服部明生，玉井宏章，高松隆夫，山西央朗，小澤吉幸：炭素繊維プレートによる化学プラント架構小梁補強の実施工例，日本建築学会技術報告集 第18巻 39号，pp.559-564，2012.6.

REPAIR WITH CFRP FOR GALVANIZED STEEL PIPES HAVING PARTIAL LOSS OF AREA

Takahiro MATSUI, Yukihiro MATSUMOTO, Tadaaki KOGA, Akeo HATTORI,
Nobuyuki YAMAGUCHI and Masaru YAMADA

CFRP which has some properties of light weight, high strength and high durability, has been applied to many concrete structures as repair, reinforcement and seismic retrofitting. In recent years, the studies on its application to steel structures have also been developing for opened sectional members such as H-shaped beams or L-shaped members. Also, the reinforcing of the corroded steel pipes on the outside section is particularly required and CFRP is expected to apply in reinforcing and strengthening procedure. In this paper, the effects of reinforcement with CFRP for steel pipes having partially cut-out are investigated through axial loading tests. Firstly, the axial compression and tensile tests of steel pipes having partially cut-out are carried out. Secondly, the quantity behaviors on axial stiffness, strength, yield stress and stress concentration are made clear. Finally, it is confirmed that axial stiffness and yield stress increase using CFRP even if it is adhesively bonded to steel pipes on the outside section.