# 水中施工の可能な FRP を用いた港湾鋼構造物の補強実験

Strengthening of port steel structure by CFRP strand sheet under marine environments

立石晶洋\*, 横田弘\*\*, 岩波光保\*\*\*, 加藤絵万\*\*\*, 小林朗\*\*\*\*, 戴建国\*\*\*\*\* Akihiro Tateishi, Hiroshi Yokota, Mitsuyasu Iwanami, Ema Kato, Akira Kobayashi, Jian-guo Dai

\*工修,日鉄コンポジット㈱,姫路工場技術部(〒671-1123 兵庫県姫路市広畑区富士町1)
\*\*工博,北海道大学大学院教授,工学研究科環境創生工学専攻(〒060-8628 北海道札幌市北区北13 西8)
\*\*\* 工博,港湾空港技術研究所,構造研究チーム(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
\*\*\*\* 工修,日鉄コンポジット㈱,技術部(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)
\*\*\*\*\*工博, The Hong Kong Polytechnic University 助教授(Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

A port steel structure under marine environments often shows structural performance degradation due to loss in steel cross section caused by corrosion. Therefore, repair and strengthening methods that have high potential for use in the sea are needed. In this paper, a conventional FRP bonding method was focused on to investigate its applicability to port steel structures. CFRP strand sheet was bonded with epoxy lining material that is hardened in the water on a steel pile having a purposely decreased section to simulate the real corrosion status. Bond tests on steel plates and bending tests on corroded steel pipes strengthened by CFRP strand sheet were carried out. As a result, it was proved that the bonded CFRP strand sheet through the particular epoxy lining material can reduce the stresses efficiently in corroded steel piles. The effectiveness of the proposed strengthening method was demonstrated.

Key Words: Strengthening, Port steel structure, Steel corrosion, Underwater application, CFRP strand sheet

キーワード:補強,港湾鋼構造物,鋼材腐食,水中施工,CFRP ストランドシート

#### 1. 概要

海洋環境下にある港湾鋼構造物は,飛来塩分や乾湿繰 返し作用を受ける厳しい腐食環境にある.特に,飛沫帯 と干満帯付近に位置する鋼管杭や鋼矢板では,腐食によ る断面減少や孔あきが散見される.断面減少や孔あきが 生じた構造物は耐力や剛性が低下するので,安全性確保 のために補修・補強などの対策が必要となる場合がある. しかし,港湾鋼構造物は,海中と気中の両方に位置して いることが多く,気中施工とするためには海水の締切り や排水など大がかりな施工が必要となることがある<sup>1)</sup>. そのため,海中と気中の両方で簡易に施工可能な補修・ 補強工法を提案することが必要である.

一方,炭素繊維強化プラスチック(以下,CFRP)を用 いた鋼構造物の補修・補強工法は補強材が高強度,高弾 性であるといった特長を有し,薄い断面でも補修・補強 が行える工法として,陸上の構造物を対象に検討が行わ れ、使用されるようになってきた. CFRP による補修・ 補強は、断面が薄く、軽量で人力での施工が可能なため、 重機を用いずに施工ができる. しかし、CFRP の補修・ 補強工法で最も多く用いられている炭素繊維シート接着 工法は、構造物の表面で樹脂を繊維に含浸させる作業が 必要である. 水中での含浸作業は空気や水を接着面から 除去するのが難しく、十分な接着性を確保するのは難し い. そこで本研究では、水中でも接着性に問題のない、 防食工法として実績のある水中施工形被覆工法で用いら れる水中硬化形エポキシ樹脂と、現場で含浸・脱泡の必 要のない CFRP ストランドシートを用いる工法を検討し た.

CFRP ストランドシートは、炭素繊維ストランド(直 径約 10µm の炭素繊維の数千本の束)を1本ずつ樹脂含 浸させたのち硬化させた CFRP ストランドをすだれ状に 加工した補強材である.施工の概略図を図-1 に示す. 施工は、サンドブラストによる下地処理をした鋼材に水 中硬化形エポキシ樹脂を塗布し、CFRP ストランドシートを樹脂の中に埋め込むように接着させ、耐候性のある 上塗り樹脂を最後に塗布することを提案した、鋼板との 界面に存在する水は、水中硬化形エポキシ樹脂の水置換 剤と加水分解作用により除去可能である.また水中硬化 形エポキシ樹脂と CFRP ストランドシートとの界面は、 CFRP ストランドがすだれ状に隙間を持って配置されて いることから空気と水が容易に排出される.これらのこ とから、この工法では十分な接着性が確保できると考え られる.

鋼材の CFRP 補強材による補修・補強に関する検討は、 溶接部のき裂進展の防止、腐食減肉に対する補強<sup>2</sup>など



を対象に行われている.しかし,補強に使用する CFRP 補強材および接着樹脂には様々な種類があり,補強効果 の検証にあたっては,実際に使用する CFRP 補強材と樹 脂の組合せで行う必要がある.本検討で用いる水中硬化 形エポキシ樹脂は CFRP との組合せで使用されたことが ほとんどないため,水中硬化形エポキシ樹脂と CFRP ス トランドシートの組合せにおける補強効果の確認を行う こととした.また,気中での補強工法である炭素繊維シ ート接着工法との補強効果の比較を行った<sup>3</sup>.

加えて、海洋環境下で腐食した鋼管杭の補強を想定し、 鋼管の一部を切削し腐食による減肉を模擬した供試体お よび実際に海洋環境下で腐食が進行した鋼管杭から切り 出した供試体に CFRP を接着して補強した. この補強鋼 管部材の曲げ試験<sup>4)</sup>を行い、減肉形状の違いが CFRP 補 強による鋼管の応力低減効果に及ぼす影響を調べた.

#### 2. CFRP 接着鋼板の引張試験

#### 2.1 供試体および試験方法

CFRP ストランドシートを水中硬化形エポキシ樹脂で 接着した鋼材の応力低減効果および鋼材と CFRP ストラ ンドシートのはく離特性を確認するため図-2 に示すよ うに、鋼板の中央の両面に水中で CFRP ストランドシー トを水中硬化形エポキシ樹脂で接着した供試体の引張試 験を行った. 下地処理は完全にさびを除去した場合とさ びの残った状態の2ケースとした.また、比較として気 中において、プライマーを塗布した後に気中施工用の汎 用の含浸樹脂で炭素繊維シートを接着した鋼板の試験も 行った. 表-1 に供試体の種類と用いた CFRP の物性値 として引張試験結果を示す。B1供試体とB2供試体の差 は製造 Lot の違いによるばらつきである。炭素繊維の種 類は、少ない積層数で効果的に鋼板の応力低減を期待す るため、高弾性型の炭素繊維からなる CFRP を用いた. B1 供試体の CFRP ストランドシートと N1 供試体の炭素 繊維シートの補強量は引張剛性 EA が同等となるように 決定した. B2 供試体では腐食面の凹凸から樹脂はみ出し 防止の枠が付けられず、CFRP の幅を 50mm として試験 した. CFRP 端部は、応力集中を緩和するために各層 25mm ずつ試験体中央方向にずらして接着した<sup>2)</sup>.

鋼板は厚さ 12mm, 幅 60mm, 長さ 800mm の SS400 (降 伏点 283N/mm<sup>2</sup>)を用いた. N1 供試体, B1 供試体では, 事前に鋼板表面の黒皮をサンドブラストで除去して鋼材

表—1	供試体の種類と	用いた	CFRP	の物性値
<u>1X</u> I	IN PARTY / EXEC		UI IU	V 21271 1.11E

供試体		施工	下地	引張	弹性係数	設計	層	幅	断面積	補強量
No.	CFRP の種類	条件	処理	強度	E	厚さ	数		A	$E\!A$
				$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$	(mm)		(mm)	$(mm^2)$	(N)
B1	CFRP ストラント ジート	水中	ブラスト	2,760	728,000	0.406	2	60	48.72	35.5×10 <sup>6</sup>
B2	CFRP ストラント ジート	水中	研掃材	2,410	694,000	0.429	2	50	42.90	$29.8 \times 10^{6}$
N1	炭素繊維シート	乾燥	ブラスト	2,526	667,000	0.143	6	60	51.48	$34.3 \times 10^{6}$



写真-1 研掃材による研磨後の状況(B2供試体)



の光沢面を出し、補強を行った. B2 供試体ではサンドブ ラストした鋼板を乾湿繰返し促進暴露試験機で約3ヵ月 間腐食させた後、手作業で研掃材により鋼板を研磨し、 さびが完全に除去できていない状態(写真-1)で CFRP ストランドシートを接着した.なお、B2 供試体の鋼板の 腐食による減肉はほとんどなかった.

載荷は CFRP を接着していない範囲の鋼板が降伏し, その後 CFRP 接着部まで鋼板の降伏が進展するのを確認 して終了した.測定項目は,荷重, CFRP 中央のひずみ, CFRP 端部のひずみ,鋼材側面(供試体中央, CFRP 接着 端部, CFRP 非接着部)のひずみとし, CFRP の表面にワ イヤーストレインゲージを接着剤で貼付した.供試体は 各3体として引張試験をおこなった.

#### 2.2 引張試験結果と考察

図-3 に CFRP の端部における荷重-ひずみ関係,図 -4 に引張荷重と試験体中央での鋼板側面のひずみの平 均値の関係の代表的な測定結果をそれぞれ示す.図-3 のひずみ増加の勾配の差は,B1供試体の方が界面の樹脂 層が厚く発生ひずみが緩衝されたことと,CFRPを25mm





 (b) B1-1 供試体

 CFRP 側さび

 鋼板側さび

(c) B2-2 供試体 写真-2 破壊後の界面の状況

- 表	-2	指值荷重
1X	- 2	1月1万11月1日

No.	損傷 荷重	代表的な 損傷状況	破壊面
N1	168kN	端部はく離	樹脂と鋼材界面
B1	174kN	端部すべり	樹脂の層内
B2	35kN	端部はく離	さびの層内

ずらした位置でのひずみ分布の勾配が大きいことによる 測定位置のばらつきと考えられる.

図-3に示すようにCFRPストランドシートのB1供試 体は、鋼板の降伏前にひずみが緩やかな低下を示し(こ れを「すべり」と呼ぶ)、鋼板の降伏が CFRP 接着部に進 展した後、はく離に至ることが観察された.一方で炭素 繊維シートの N1 供試体は CFRP の端部からはく離もし くはすべりが生じた後、鋼板の降伏前に全面がはく離し た. 図-4 の鋼板中央のひずみが急激に増加しているこ とから、CFRP 中央の炭素繊維シートのひずみが急激に 低下したことがわかる. 写真-2(a), 写真-2(b)に, 試験 後に CFRP と鋼板を剥がした後の状況を示す.写真上側 が CFRP 側の接着面,写真下側が鋼板側の接着面である. N1 供試体では、鋼板面に樹脂は残らず、 プライマーと鋼 板の界面で完全にはく離した.一方, B1 供試体では水中 硬化形エポキシ樹脂の一部が鋼板に残った. つまり, CFRP と使用樹脂の組合せによってはく離性状が異なる ことがわかった. また, B1 供試体では界面で破壊しない ため、界面の水分の影響はほとんどなく、水中と気中の 施工に差異がないものと考えられる.

表-2に,損傷荷重として,各供試体3体の平均のCFRP 端部でのはく離荷重もしくはすべりが生じた荷重を示す. 損傷の進展は異なるものの,N1供試体,B1供試体もほ ぼ同等の損傷荷重であった.

図-4 中の実線は、鋼板と CFRP の完全合成を仮定で きるとして両者の分担力を計算した式(1)に、B1 供試体 の鋼板と CFRP の断面積を代入して算出した.

$$T = \varepsilon \left( E_s A_s + E_{cf} A_{cf} \right) / 10^9 \tag{1}$$

T:荷重 (kN),  $E_s$ :鋼板の弾性係数 (=200,000N/mm<sup>2</sup>)  $\varepsilon$ : ひずみ ( $\mu$ ),  $A_s$ :鋼板の断面積 (mm<sup>2</sup>)  $A_{cf}$ : CFRP ストランドシートの公称断面積 (mm<sup>2</sup>)  $E_{cf}$ : CFRP の弾性係数 (=640,000N/mm<sup>2</sup>)

N1 供試体では、CFRP 端部ではく離が発生した直後に 鋼板中央まではく離が進展し、鋼板中央のひずみが急増 し無補強鋼板の式(1)の計算値とほぼ等しくなった.これ に対して B1 供試体では、CFRP 端部ですべりが生じた後 も急激なはく離の進展はなく、鋼板ひずみは鋼板の降伏 荷重までほぼ線形に増加した.加えて、はく離に至るま で鋼板のひずみが計算値と一致していることから、B1 供試体では鋼板と CFRP の接着が確保され、両者は完全 合成として計算が可能であるといえる.このことから、 CFRP ストランドシートと水中硬化形エポキシ樹脂の組 合せで鋼板に水中で接着しても乾燥条件下で施工した炭 素繊維シートとほぼ同等の付着特性が得られたといえる.

また、サンドブラスト処理を施さなかった B2 供試体 の CFRP 端部と鋼板中央のひずみと荷重の関係を図-3 と図-4 にそれぞれ示す.サンドブラスト処理した B1 供試体では、鋼板の降伏荷重まではく離は認められなか ったが、B2 供試体では荷重が 35kN のときに端部ではく 離が生じ、荷重を増加させるごとにはく離が鋼板中央ま で進展した.写真-2(c)に B2 供試体のはく離面を示す. CFRP 側の接着面、鋼材側の接着面ともに鋼材のさびが 付着しており、さびの層内ではく離していることがわかる.このことから、さびの層内は樹脂の接着強度に比べると非常に脆弱で、鋼材を補強する場合は必ず腐食層を完全に除去し、鋼材の光沢面を出してから補強材を接着する必要があると言える.

### 3. 鋼管の曲げ試験

#### 3.1 曲げ試験方法

### 3.1.1 供試体と試験方法

CFRP 接着鋼板の引張試験では引張応力を受ける鋼材 と水中硬化形エポキシ樹脂で接着した CFRP ストランド シートの付着特性を確認した.ここでは、鋼管杭など曲 げを受ける部材を想定して、CFRP ストランドシートを 水中硬化形エポキシ樹脂で接着した鋼管の曲げ耐荷特性 を確認することとした.また、腐食損傷の進行した実部 材から切り出した鋼管と腐食による減肉を模擬した鋼管 を用いることで、腐食による減肉量の影響についても検 討を行った.

供試体の概略を図-5 に示す.供試体には外径 318.5mm,厚さ10.3mm,長さ3,000mmの鋼管を用いた. 供試体の載荷点と支点には厚さ16mmの鋼板を溶接し, 供試体端部から600mmの範囲の鋼管内部にモルタルを 充填して,支点部の鋼管の局部変形を防止した.

表-3に供試体の種類を示す. No.1 から No.3 供試体は, 降伏点が 318N/mm<sup>2</sup>, 引張強さが 412N/mm<sup>2</sup>の STK400 の鋼管に, 腐食による減肉を模擬した減肉部を切削加工





No.	腐食程度	補強1(1回目)	補強2(2回目)	
No.1 供試体	模擬減肉 3.65mm	2層	_	
No.2 供試体	模擬減肉 6.12mm	2層	4層(2層+2層)	
No.3 供試体	模擬減肉 5.15mm(円孔)	1 層円孔上幅 100mm	1層全周	
No.4 供試体	実部材使用, 平均減肉 1.82mm, 最大減肉 6.12mm	4層	_	

表-3 曲げ試験の供試体種類



写真-3 No.4 供試体の腐食状況

により設けたものである. No.4 供試体は、実部材から切 り出した腐食鋼管の両側に健全な鋼管を溶接したもので ある. なお、切り出した鋼管の鋼種や機械的性質は不明 であったが、曲げ試験の荷重と鋼管のひずみ関係の測定 結果から、他の供試体と大きな差はないと考え、降伏点 は No.1~3 供試体と同じと考えた.

No.1 供試体 (図-6(a)) と No.2 供試体 (図-6(b)) は, 鋼管の周方向に一様な模擬減肉を供試体中央に設けた. その際,鋼管の腐食程度が CFRP の補強効果に及ぼす影 響を検討するため、減肉量を変化させた. No.3 供試体で は、応力集中が生じる腐食形状での補強効果を確認する ため、φ30mmの円孔を鋼管上面と下面に各1箇所設け た(図-6(c)).円孔の深さは板厚の半分とした.

No.4 供試体は、実際の海洋環境下で腐食が生じた鋼管 における補強効果を確認するために、昭和45年建設の港 湾構造物から切り出した鋼管を用いた. 写真-3 に使用 した鋼管の腐食状況を示す. 全体的に減肉が進んでいる ことに加えて、局所的に著しい腐食(孔食)がまばらに 発生していた.供試体の加工にあたっては、最大減肉 6.12mm の孔食が供試体中央の下面にくるように配置し た. また,板厚を超音波厚さ計により測定した結果,減 肉の平均値は 1.82mm(下面平均 1.86mm,上面平均 1.73mm) であった.

# 3.1.2 補強材料および補強方法

CFRP ストランドシートは、表-1の B2 供試体と同じ ものを用いた. CFRP ストランドシートは、供試体中央 の減肉部分を中心に 500mm の長さにわたって水中硬化 形エポキシ樹脂で接着し、定着長を 250mm とした.端 部は応力集中を緩和するため、各層の端部を 25mm ずつ 中央方向にずらして貼付けた.水中サンドブラスト処理

した鋼板に水中で CFRP を接着した場合の付着性状は既 往の検討<sup>5)</sup>で確認されていることと鋼板と CFRP のはく 離が水中硬化型エポキシ樹脂の凝集破壊となるため、水 中施工と気中施工に差がないものと考えた. そのため, 本実験では気中でサンドブラストによる鋼管の下地処理 を行った後、気中で CFRP の接着作業を行った.既往の 検討<sup>3),5)</sup>で採用したように,通常の場合の樹脂の塗布量 はシート1層につき約3kg/m<sup>2</sup>であるが,本実験では鋼管 上のひずみゲージを避けるなどの実験的要因もあり、樹 脂の塗布量は約4kg/m<sup>2</sup>と標準量より多くなった.

#### 3.1.3 補強量と載荷方法

補強量の算定では、鋼管と CFRP の完全合成を仮定し て計算し、式(2)の 4E,I/DL で表わされる曲げ剛性に着目 した. すなわち、補強量は、減肉によって低下した鋼管 の曲げ剛性を減肉前の値まで回復させるのに必要な CFRP の積層数とした.また、No.4 供試体の補強量は、 最大減肉が全周にあると仮定して算出した.

$$P = 2M / L = \frac{4 \cdot E_s \cdot I}{D \cdot L} \varepsilon$$
<sup>(2)</sup>

$$P:荷重, M:モーメント
 $L: せん断スパン, \varepsilon: ひずみ$   
 $I: 断面 2 次モーメント$   
 $I = I + n : I$$$

$$=I_{s}+n_{cf}\cdot I_{cf} \tag{3}$$

*I*: 鋼管の断面 2 次モーメント

$$I_s = \left(\frac{D}{2}\right)^4 \frac{\pi}{4} - \left(\frac{d}{2}\right)^4 \frac{\pi}{4}$$

※No.3 供試体は、円孔部の I を差し引いた.

- D: 鋼管の外径(減肉量を考慮)
- d: 鋼管の内径

*I*<sub>cf</sub>: CFRP の断面 2 次モーメント

$$I_{cf} = \left(\frac{D'}{2} + n_{ply} \cdot t_{cf}\right)^4 \frac{\pi}{4} - \left(\frac{D'}{2}\right)^4 \frac{\pi}{4}$$

$$n_{cf} : \text{CFRP} の弾性係数比 (= E_{cf} / E_s)$$

$$E_s : 鋼管の弾性係数 (=200,000\text{N/mm}^2)$$

$$E_{cf} : \text{CFRP} の弾性係数 (=640,000\text{N/mm}^2)$$

D':健全鋼管の外径(=318.5mm)

 $t_{cf}$ : CFRP ストランドシートの設計厚さ

 $n_{nb}$ : CFRP ストランドシートの積層数

表-3 に補強量を示す. No.2 供試体では,補強 2 (4 層補強) で曲げ剛性を減肉前の値まで回復する補強量となり, No.3 供試体では,円孔上の幅 100mm の補強で曲げ剛性を減肉前の値まで回復できる補強量となった.

本実験では、補強による鋼管の応力低減効果を確認す るため、各供試体で補強前に弾性範囲内の載荷を行って 鋼管のひずみを測定した後、除荷した状態で CFRP スト ランドシートを接着し、接着剤の硬化後、CFRP の破壊 もしくは荷重が低下するまで補強後載荷を実施した.た だし、No.2 供試体と No.3 供試体では補強量や補強範囲 の影響を検討するため、補強を2回に分けて行った. No.2



(a)No.1 供試体

供試体では補強1(2層補強)の後にも弾性範囲内の載荷 を行い,除荷後,補強1の上から追加で2層補強を行い 補強2(4層補強)とし,破壊するまで載荷した.No.3 供試体では,図-7に示すように,円孔のある鋼管上下 面のみ幅100mmのシートを鋼管軸方向に接着して補強 した後(補強1)に弾性範囲内で載荷し,除荷後側面の み追加で補強して全周補強(補強2)とした後に,破壊 するまで載荷した.載荷は,支間2,400mm,せん断スパ ン850mmの4点曲げ試験とし,1,000kN万能載荷試験機 を用いて,単調増加載荷により行った.

測定項目は、荷重、載荷点と支間中央の変位、鋼管の ひずみ、CFRP ストランドシートのひずみとした.ひず みは、無補強部、CFRP 補強端部、支間中央部、支間中 央から 100mm 離れた補強部において、断面内の分布を 測定するため、最外縁と45°の位置で測定した(図-8). No.4 供試体のみ腐食量が両側面で異なる可能性があっ たため、断面の両側面のひずみ分布を測定した(図-8(d)).また、No.3 供試体と No.4 供試体については、応 力集中の生じる円孔縁についてもひずみを測定した.ひ ずみゲージはすべて粘着テープ型コーティング剤で養生 した.

### 3.2 曲げ試験の結果と考察

### 3.2.1 荷重-ひずみ関係

図-9 に補強前と補強後の荷重と供試体中央の上下面の鋼管ひずみの関係を示す.図中の計算値は,式(2)に減



(b)No.2 供試体



図-8 ひずみゲージ位置



表-4 補強前と補強後の曲げ剛性比								
		No.1 供試体	No.2 供試体 補強1	No.2 供試体 補強 2	No.3 供試体 補強1	No.3 供試体 補強 2	No.4 供試体 上面	No.4 供試体 孔食
計算値	補強後/補強前	1.48	1.79	2.59	1.03	1.16	1.74	1.74
実験値	補強後/補強前	1.34	1.61	1.94	1.11	1.22	1.64	1.59
補強効率	実験値/計算値	0.91	0.90	0.75	1.07	1.05	0.94	0.91

肉部の鋼管と CFRP ストンランドシートそれぞれの断面 積を代入して算出した。No.3 供試体の上下面と No.4 供 試体の下面は孔食縁のひずみとした. 各供試体とも補強 前に比べ、補強後の鋼管ひずみが小さくなっており、 CFRP の補強によって、鋼管の応力が低減されることが わかった.また、追加で全周補強とした No.3 供試体の補 強2の場合においても鋼管ひずみが補強1の段階よりも さらに小さくなっており,鋼管全体の曲げ剛性を上げる ことによって、円孔縁の応力集中位置の応力も低減でき ると考えられる.

実部材を用いた No.4 供試体は、上面に平均的な減肉、 下面は最大減肉の孔食があったが、上下面とも補強によ りひずみが減少した.これより、実部材の平均的な減肉 部も孔食のある箇所も、CFRP による補強によって減肉 部の鋼管の応力を低減することが可能であると言える.

次に計算値に対する実験で得られた補強効果の確認を 行うため,式(2)を用いて算出した曲げ剛性と約150kN以 下の線形な範囲での荷重-ひずみ関係から求めた曲げ剛 性の比較を行った. No.4 供試体では補強前の載荷で鋼管 上面のひずみが平均減肉量から算出した曲げ剛性と良い 相関を得たため、平均減肉量を用いて曲げ剛性を算出し た. 表-4 に補強前と補強後の曲げ剛性比を示す. No.1 供試体, No.2 供試体, No.4 供試体の実験値では曲げ剛性 比が計算値に比べて小さかった. 表-4 の実験値の曲げ 剛性比を計算値の曲げ剛性比で除した値を補強効率と定 義すると、No.1供試体では0.91、No.2供試体の補強1(2 層補強)では 0.90, No.2 供試体の補強 2(4 層補強)で は0.75となり、これらの供試体で補強効率が1を下回る 結果となった.

一方で,円孔のある No.3 供試体では,円孔縁の荷重-ひずみの関係から曲げ剛性を算出したことから、表-4 の実験値は、円孔部の応力集中の回復度合いを示してい る. No.3 供試体での補強効率は補強1(円孔周り100mm) で1.07、補強2(全周)で1.05となった. このことから 計算値(補強の目標値)とほぼ同等の補強効果が得られ たと考えられる. 実部材の No.4 供試体では、平均的な減 肉の上面と孔食縁の下面を分けて示した. 上面では補強 効率が 0.94, 下面では 0.91 となった. 孔食がある場合に おいては補強効率がわずかに小さくなる結果となった.

### 3.2.2 供試体断面のひずみ分布

約150kNの荷重を載荷した時点での各供試体の支間中 央の減肉のある断面のひずみ分布を図-10に示す. No.3 供試体の上下縁の点は円孔の中央のひずみである. No.4 供試体では,下面の応力集中した点を実線で結ばずにひ ずみを点で示した.補強前と補強後のひずみは,各供試体で原点対称となっており,中立軸は断面のほぼ中央にあることがわかる.しかし,補強後の鋼管ひずみとCFRP ひずみ ひずみを比較すると,鋼管ひずみに比べて CFRP ひずみが小さくなった.つまり,鋼管と CFRP の平面保持が成





No.	降伏荷重 実験値 (kN)	降伏位置	CFRP の 初期はく離 荷重 (kN)	初期はく離 位置	最大 荷重 (kN)	破壊状況
No.1	370	下面減肉部	488	上面減肉部	831	上面 CFRP 圧壊
No.2 補強 2	362	上面減肉部	499	上面減肉部	742	上面 CFRP 圧壊
No.3 補強 2	196	下面円孔縁	428	上面円孔縁	800	下面 CFRP 端部はく離
No.4	388	下面孔食縁	468	下面端部	726	下面 CFRP 端部はく離

表-5 補強後の降伏荷重および破壊状況



写真-4 No.1 供試体の破壊状況

り立っていなかったものと考えられる.この原因として はエポキシ樹脂接着層断面内でのせん断変形の影響が考 えられる.

### 3.2.3 CFRP の初期におけるはく離および破壊状況

No.1 供試体では荷重 370kN で引張側の鋼管が降伏し, ついで, 荷重 488kN で減肉部の上面の鋼管が降伏し, 同時に CFRP のひずみに変曲点が生じた(図-11(a)). その後, 最終的に最大荷重時に圧縮側で CFRP の圧壊が生じた(写真-4). ここでは, No.1 供試体と同様に荷重-ひずみ関係で最初に生じた変曲点を CFRP の初期はく離と定義して,各供試体の鋼管の降伏荷重と CFRP の初期はく離荷重,最大荷重を表-5 に示す. 鋼管の降伏荷重は,鋼管の減肉部でのひずみと荷重の関係の変曲点から求めた.

No.1 供試体と No.2 供試体では、最終的に CFRP が圧 壊したことから、鋼管上面のひずみの最初の変曲点位置 で CFRP の局所的な初期はく離が生じたものと推測され る. No.3 供試体は最終的に鋼管下面の CFRP がはく離し て載荷を終了した. 鋼管下面のはく離は、端部だけでな く、大きく中央近傍まで生じ、中央のひずみも減少した. しかし、No.1 供試体と No.2 供試体と同様に鋼管上面の ひずみに最初の変曲点があり、圧縮側で局所的な初期は

## く離が生じたと推測される.

No.4 供試体は鋼管下面のひずみに最初の変曲点があ り、次に鋼管下面のCFRP 端部ではく離が生じ、最大荷 重近傍でも鋼管下面のCFRP 端部で大きなはく離が生じ、 載荷を終了した. No.4 供試体は、300mmの実部材を健 全な鋼管に溶接して作製したことから、溶接位置に段差 が生じた. 段差近傍で局所的に腐食が大きい箇所もあっ たため、CFRP 端部からはく離した可能性が考えられる.

破壊の状況は、供試体により異なるものの、すべての 供試体で減肉部の鋼管が降伏した後に、CFRP のひずみ に変曲点が生じた.鋼管の降伏までは、鋼管とCFRP の 付着は確保されていたと考えられる.

## 4. 補強効率に関する考察

### 4.1 有限要素解析方法

本実験では、CFRP 接着による補強によって鋼管の応 力低減効果が明らかになった.しかし、計算値と比較し た実験値の補強効率は No.1 供試体で 0.91,減肉が大きく かつ補強量の多い No.2 供試体の補強 2 では 0.75 であっ た.鋼管の断面力は、エポキシ樹脂や CFRP のせん断変 形によって CFRP に伝達されるが、せん断弾性係数の小 さいエポキシ樹脂が厚くなるとせん断伝達区間が長く必 要になる.このことから有限要素解析(以下,FE 解析) により鋼材の減肉とエポキシ樹脂が鋼材と CFRP の応力 伝達へ及ぼす影響を検討することとした.

鋼管の曲げ試験の No.1 供試体, No.2 供試体を対象と





要素	厚さ	弾性係数	$(N/mm^2)$	ポアソン比	せん断弾性係数
	(mm)	Ex	Ey	ν	$G (N/mm^2)$
鋼管	10.3	200,000	_	0.3	77,000
水中硬化形球 衫樹脂	2.00	1,090	_	0.38	400
CFRP	2.78	97,000	1,400	0.38	490

表-6 FE 解析の物性値

供試体	郵官ひすみ(μ)	CFRP ( $\mu$ )	鋼官ひすみ(μ)	Cal2/Cal1
No.	Cal1		Cal2	
No.1	835	558	771	0.92
No.2 補強 1	1277	633	1047	0.82
No.2 補強 2	1108	383	752	0.68
	•	•	•	

表-7 減肉部のひずみ(単位:μ)

FE 解析



して、鋼管の等曲げ区間の下面を単純な引張応力場とし てモデル化した.鋼管の減肉部の中心を対称としたモデ ルとし、2次元平面ひずみ要素を用いた.減肉形状と CFRPの貼付け長さは、曲げ試験と同じとし(図-12(a))、 鋼管、減肉部の水中硬化形エポキシ樹脂とCFRPは図-12(b)に示すように配置した.CFRPの厚さは、CFRPス トランドシートの厚さに繊維含有率(V=0.55)と水中硬 化形エポキシ樹脂(比重 2.0g/cm<sup>3</sup>)の塗布量から算出し た厚さの和とした.物性値を表-6に示す.水中硬化形 エポキシ樹脂の物性値は、引張試験(JISK 7113)により 求め、CFRPの物性値は CFRPストランドの物性値と水 中硬化形エポキシ樹脂の CFRP 層内の含有率を考慮して、 直交異方性繊維強化複合材料の弾性係数の複合則<sup>6</sup>から 求めた.

拘束条件は、図-12(a)の x=0 の辺の x 方向の変位と法 線方向の回転、y=0 の辺の y 方向の変位と法線方向の回 転を拘束した.荷重は、減肉部から最もはなれた辺に x 方向に引張応力が作用するようにし、弾性範囲内の計算 結果とするため無補強部の鋼管に 700 μ を発生させた.

計算は、市販のFE解析ソフトLISAを使用して、静弾

性解析を行い,減肉位置でのCFRPストランドシートと 鋼管の発生応力を確認し,減肉位置でのCFRPストラン ドシートと鋼管のひずみ分布を算定し,実験値と完全合 成断面が成り立つと仮定した計算値と比較検討した.

比

#### 4.2 減肉の影響

式(1)

図-13にNo.2供試体の補強2のFE解析による計算結 果と実験値の比較を示す.実験値は CFRP 表面と鋼管の 外周のひずみ, FE 解析結果は, 鋼管の CFRP との接着面 のひずみと CFRP の最外層のひずみを 25mm の段差部も 含めて示した. FE 解析結果においても, 減肉部の鋼管の ひずみが大きく、CFRP のひずみが小さくなり、実験値 と FE 解析結果はほぼ同様の傾向を示し, CFRP のひずみ が小さくなることがわかった. 減肉部では、鋼管のひず みが急増しており、CFRP のひずみが鋼管のひずみに追 従できていない. つまり、減肉部では弾性係数の低い樹 脂があることによって、CFRP に応力が十分に伝達でき ていないと考えられ、減肉部中央では鋼管と CFRP のひ ずみは一致せず、合成断面となっていないといえる. No.1 供試体, No.2 供試体の補強1 についても同様の計算を行 い、FE解析から減肉部での鋼管のひずみ、CFRPのひず みを算出し、式(1)から計算される完全合成断面が成り立 つとした計算値との比較を行った. 表-7 に計算値を示 す. 式(1)の計算値と FE 解析の計算結果の比を Cal2/Cal1 とすると, 減肉量の小さい No.1 供試体が最も計算値に近 く, 減肉量が大きく補強量が大きい No.2 供試体補強 2 が最も合成断面からかい離した. この傾向は、実験で得 られた補強前と補強後の曲げ剛性比(表-4)と同じであ った. このことから、減肉部が深く樹脂厚さが厚くなる と鋼管の応力低減効果が低下し、補強量が多くなると減 肉部での補強効率が低くなると考えられる. 接着樹脂層 が厚くなるほど、また CFRP 層の引張剛性が高くなるほ ど、接着樹脂層のせん断伝達区間が長く必要なため、深 くて短い減肉部では応力伝達が十分に行われなくなるた



図-14 ひずみ分布

表-8	定着長を変ん	とさせた減肉部のひずみ	(単位:	μ)
-----	--------	-------------	------	----

		FE 解析		式(1)	比
供試体	定着長(mm)	鋼管ひずみ(μ)	CFRP ひずみ(µ)	鋼管ひずみ(μ)	Cal2/Cal1
No.		Cal1		Cal2	
No.2 補強 1	250	1277	633	1047	0.82
	300	1275	638	1047	0.82
	350	1274	639	1047	0.82
No.2 補強 2	250	1108	383	752	0.68
	350	1066	445	752	0.71
	450	1054	465	752	0.71
	550	1050	471	752	0.72

めと考えられる.

#### 4.3 定着長の影響

定着長の影響を検討するため, No.2 供試体と同じ減肉 形状および CFRP の貼付け量で, 貼付け長さを大きくし たモデルの FE 解析を行った. 補強1(定着長 250mm) に対して定着長を 300mm, 350mm とした場合, 補強2

(定着長 250mm) に対して定着長 350mm, 450mm, 550mm とした場合について検討を行った. 図-14 に鋼管のひずみ分布と最外層の CFRP のひずみ分布を示し, 表-8 に No.2 供試体の減肉部のひずみの計算値を示す.

No.2供試体の補強1では定着長を変化させても、減肉 部での鋼管のひずみがほぼ一定になっており、定着長が 十分であったことが伺える.一方、補強量の多い No.2 供試体の補強2では、定着長を長くした場合に鋼管のひ ずみの低下と CFRP のひずみの増加がみられた.補強量 が増えたことによって長い定着長が必要となったと考え られる.さらに定着長 350mm と 550mm の CFRP ひずみ の値を比較すると差は 5%、定着長 450mm と定着長 550mm を比較した場合は 1%であった.定着長 450mm 以上の場合、CFRP ひずみがほとんど増加しないことが 分かる.このことから、No.2 供試体の補強2 では 450mm 以上の定着長を取ることが必要であると考えられる.こ の場合の減肉部の鋼管ひずみと式(1)の計算結果との比 Cal2/Cal1 は表-8に示すように0.68から0.72 とわずかに 改善した. このことから,溝状に深い減肉が生じている 場合には,十分な定着長を確保しても,減肉部の鋼管ひ ずみは, CFRP と鋼管の完全合成断面を仮定した計算値 より大きくなるといえる.

No.1 供試体や No.2 供試体のように,円周方向の溝状の減肉に対して本補強方法を適用する場合には,減肉の深さや範囲,エポキシ樹脂接着層の厚さを考慮して,補強効率と定着長を設定する必要があることが確認された.

#### 4.4 円孔と実部材の腐食の影響

本実験において円孔のある No.3 供試体では補強効率 が低下しなかった.図-10(c)に示されるように,円孔中 央の CFRP のひずみが鋼管に比べてわずかに低下してい たが,他の供試体より明らかに CFRP のひずみの低下が 少なかった.これは,鋼管周面での減肉の範囲が少ない ことと,円孔以外の断面で樹脂層が薄いため,CFRP の 負担する断面力が計算値とほぼ一致し,補強効果が発揮 されたためと考えられる.減肉が局所的であれば,深い 減肉でも周辺部で断面力を負担できるものと考えられ, CFRP によって鋼材の応力低減効果が得られると言える.

No.2 供試体の補強2(4層補強)と等しい補強量の実 部材のNo.4 供試体の補強効率は0.91(孔食部)であった. No.4 供試体では局所的に孔食などの深い減肉はあった が, 孔食部以外では均等に減肉が生じており表面の凹凸 は小さかった. そのため, 孔食部以外では, CFRP に鋼 管の応力が有効に伝達したと考えられる. また, 減肉部 が 300mm と長かったため, 減肉部でも鋼管の応力が CFRP に伝達したと考えられ, 補強効率が No.2 供試体ほ ど低下しなかったと考えられる. 全面に腐食が生じ, 局 部的に孔食が生じているような実部材に対しては, 孔食 が深くても, 周辺の減肉部で CFRP が断面力を負担する ため, CFRP を接着することで鋼材の応力低減効果が得 られると考えられる.

以上より,減肉形状や深さ,孔食などの数や範囲が補 強効率に大きな影響を与えることがわかった.部材の局 所的な変形,応力集中も含め,今後さらに検討が必要と 考えられる.

#### 5. まとめ

本検討では、CFRP を接着した鋼板の引張試験および CFRP で補強した鋼管の曲げ試験を行い、水中硬化形エ ポキシ樹脂と CFRP ストランドシートを用いた補強工法 の港湾鋼構造物への適用可能性について検討を行った. 本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) CFRP ストランドシートと水中硬化形エポキシ樹脂 の組合せで鋼板に水中で接着しても乾燥条件下で施 工した炭素繊維シートとほぼ同等の付着特性が得ら れることを引張試験により確認した.
- (2) 鋼材が腐食した層は脆弱であるため、接着補強する 場合は、必ずサンドブラストによる下地処理を行い、 鋼材の光沢面を出す必要がある.
- (3) CFRP ストランドシートを用いて減肉のある鋼管を 補強した結果,鋼管のひずみは補強前に比べ小さく なり,応力低減効果が認められた.また,円孔のあ

る鋼管や実部材から切り出した孔食のある鋼管でも 円孔周辺の鋼管の応力低減効果が認められた.

- (4) 樹脂が厚くなる減肉部では、CFRPのひずみが計算値 と比較して小さくなった.鋼管の円周方向に溝状に ある深い減肉部では、鋼管とCFRPの分担力は合成 断面では計算が行えず、補強効率が低下する.
- (5) 実部材のような平均的な減肉と孔食が組み合わされ た場合では補強効率は 0.91 であった. 孔食の範囲が 円周方向に対して少ない場合は,円周方向に溝状に ある減肉と比較して,補強による鋼材の応力低減効 果が得られると考えられる.

### 参考文献

- 沿岸開発技術研究センター:港湾鋼構造物防食・補修 マニュアル (2009 年版), 2009.
- 杉浦江,小林朗,大垣賀津雄,稲葉尚文,冨田芳男, 長井正嗣:鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維 シート接着方法に関する解析的研究,土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp.806-813, 2008.
- 3) 立石晶洋,小林朗,戴建国,横田弘:水中硬化形エポ キシ樹脂と FRP ストランドシートを用いた補修工法 の付着特性の検討,第63回土木学会年次学術講演会 講演概要集,CS02-49, pp.145-146,2008.
- 4) 立石晶洋,岩波光保,加藤絵万,横田弘,小林朗: FRP 接着による鋼管杭の補強効果に関する実験的検 討,鋼構造年次論文集, Vol.17, pp.681-688, 2009
- 5) 立石晶洋,小林朗,横田弘,岩波光保,加藤絵万:海 洋環境下における鋼板の CFRP ストランドシート接 着補強効果に関する検討,第3回 FRP 複合構造・橋 梁に関するシンポジウム論文集, pp.85-90, 2009.
- 6) 森田幹郎, 金原勲, 福田博: 複合材料, pp.13-24, 1988. (2009 年 9 月 24 日受付)