

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1217 June 2010

炭素繊維強化複合材を用いた
港湾鋼構造物の補修・補強工法に関する検討

加藤 絵万
立石 晶洋
岩波 光保
横田 弘
小林 朗

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 研究の目的	4
1.2 本研究における補強の定義	4
2. 港湾鋼構造物を対象としたGFRPシート接着工法の提案	4
2.1 提案工法の概略	4
2.2 従来の炭素繊維シート接着工法と提案工法の比較	5
2.3 提案工法による鋼板の応力低減効果の確認	7
2.4 まとめ	10
3. 提案工法による鋼管杭の補強効果に関する検討	10
3.1 鋼管供試体の曲げ載荷試験の概要	10
3.2 鋼管供試体の曲げ載荷試験結果	13
3.3 鋼管供試体の補強効果に関する検討	15
3.4 補強効果の影響要因に関する考察	16
3.5 まとめ	18
4. まとめ	18
5. おわりに	18
謝 辞	19
参考文献	19
付 録	19

Repair and Strengthening of Port Steel Structures Using Carbon Fiber Reinforced Polymer

Ema KATO*

Akihiro TATEISHI**

Mitsuyasu IWANAMI ***

Hiroshi YOKOTA****

Akira KOBAYASHI**

Synopsis

This paper aimed to develop a new strengthening method using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strand sheet for port steel structures of which structural performance had been degraded by corrosion. Because CFRP strand sheet is bonded to steel members with specially-purposed epoxy lining material, the proposed method can be applied to the steel members submerged in sea water. From the result of the axial tension test, the bond capacity between steel plate and CFRP strand sheet showed enough performance to resist the axial tension stress when the corrosion products are perfectly removed from the plate surface before bonding. The strengthened plate was possible to consider as a steel-CFRP composite member if the cross-sectional loss of steel plate was less than 50%. In addition, the sectional stress generated by the bending test of corroded steel pipe was decreased by applying the proposed method. However, the effect of strengthening by proposed method was greatly affected by the condition of stress transmission between steel pipe – epoxy lining material – CFRP strand sheet.

Key Words: Port steel structure, strengthening, steel corrosion, CFRP strand sheet

* Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Nippon Steel Composite Co., Ltd

*** Head, Structural Mechanics and Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

**** Visiting Senior Researcher (Professor, Hokkaido University)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail: katoh-e@pari.go.jp

炭素繊維強化複合材を用いた 港湾鋼構造物の補修・補強工法に関する検討

加藤絵万*・立石晶洋**・岩波光保***・横田弘****・小林朗**

要 旨

本研究では、鋼材腐食により部材の剛性や耐力が低下した港湾鋼構造物を対象として、水中硬化形エポキシ樹脂を用いた炭素繊維強化複合材（CFRP）ストランドシート接着工法を提案し、その補強効果について検討した。提案工法により補強した鋼板試験体の引張試験の結果、水中施工を行う場合においても、鋼板の錆層を完全に除去すれば、従来から陸上構造物に適用されている炭素繊維シート接着工法と同等の鋼板－シート間の一体性が確保できること、また、元の鋼材断面積の50%以上が残存していれば、断面欠損部の降伏以前までは鋼板とCFRPストランドシートの完全合成断面として取り扱うことが可能であることが分かった。さらに、人工的に断面欠損を設けた鋼管や実構造物から切り出した鋼管を提案工法により補強し、曲げ載荷試験を行った結果、鋼管の断面欠損部あるいは孔食部の降伏以前までは補強による応力低減効果を得ることができた。しかし、鋼管の断面欠損深さが大きい、あるいは補強によるCFRPストランドシート層の引張剛性が大きくなるほど、鋼管－水中硬化形エポキシ樹脂－CFRPストランドシート間の応力伝達が十分に行われず、提案工法による応力低減効果は低下することが分かった。

キーワード：港湾鋼構造物，補強，鋼材腐食，CFRPストランドシート

* 地盤・構造部構造研究領域構造研究チーム主任研究官
** 日鉄コンポジット株式会社
*** 地盤・構造部構造研究領域構造研究チームリーダー
**** 客員研究官（北海道大学 教授）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail: katoh-e@pari.go.jp

1. はじめに

1.1 研究の目的

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、飛沫帯から干満帯近傍においては、鋼管杭や鋼矢板に著しい腐食が発生することが知られている。現在、港湾鋼構造物は電気防食や被覆防食により、防食対策が施されるのが一般的である。しかし、漂流物の衝突による防食工の脱落など、予測不可能な原因により無防食状態にあるものや、建設当初から腐食しるを考慮することで防食工を施していないものが数多く存在することも事実である¹⁾。鋼管杭や鋼矢板の腐食による肉厚減少は、部材の剛性や耐力の低下を招き、結果として、構造物全体の使用性や安全性に影響を及ぼすこととなる。構造物のライフサイクルマネジメント²⁾の観点からは、点検診断に基づいて評価・予測される部位・部材の劣化・変状程度に応じて、補修・補強などの適切な対策を施し、予定供用期間中の使用性・安全性等を確保することが重要となる。

ここで、近年、陸上構造物の補修・補強対策として、高強度・高弾性・高耐久性・軽量などの利点から、繊維強化複合材（FRP）を用いた工法が多く開発され適用されている。なかでも、連続繊維シート接着工法は、部材の表面に接着貼付したFRP連続繊維シートに応力を負担させることで部材を補修・補強する工法であり、重機による施工制限のある箇所においても人力のみで施工することが可能である。このため、施工条件の厳しい港湾構造物にも有効な補修・補強工法であると考えられる。

そこで、本研究では、腐食が生じた港湾鋼構造部材の耐久性を高め、かつ剛性や耐力を向上させるため、FRP連続繊維シートの接着による鋼構造部材の補修・補強工法を提案し、特に、その補強効果について検討を行った。

1.2 本研究における補強の定義

土木学会コンクリート標準示方書〔維持管理編〕³⁾によれば、‘補修’および‘補強’は以下のように定義されている。

補修：第三者への影響の除去あるいは、美観・景観や耐久性の回復若しくは向上を目的とした対策。

ただし、建設時に構造物が保有していた程度まで、安全性あるいは、使用性のうちの力学的な性能を回復させるための対策も含む。

補強：建設時に構造物が保有していたよりも高い性能まで、安全性あるいは使用性のうちの力学的な

性能を向上させるための対策。

また、港湾の施設の維持管理技術マニュアル²⁾では、両者は以下のように定義されている。

補修：変状により性能が低下した部材あるいは構造物の力学性能や耐久性を当初の水準までに回復させる行為。なお、本マニュアルでは、特に力学性能に着目して補修を行うことを補強と称することもある。

補強：構造物や部材が当初に保有していた水準を超える力学性能を付与する行為。

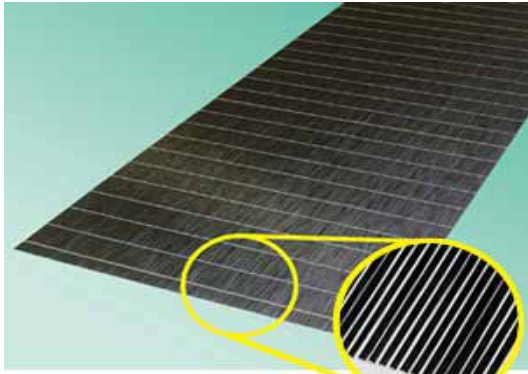
いずれの場合においても、‘補強’は、構造物あるいは部材に初期性能を超える力学的性能を付与する行為と定義されている。本研究では、維持管理技術マニュアルにおける定義をふまえて、変状により性能が低下した部材の力学性能を現有性能以上に向上させる行為を‘補強’とし、変状により性能が低下した部材の耐久性を当初の水準までに回復させる行為を‘補修’と定義して、以降の議論を進める。

2. 港湾鋼構造物を対象としたCFRPシート接着工法の提案

2.1 提案工法の概略

陸上構造物の補修・補強工法として適用実績が多い連続繊維シート接着工法では、対象とする構造物の表面で連続繊維シート中に樹脂を含浸させる必要がある。これは、シートと対象構造物の界面から空気を除去し、十分な接着性を確保することを目的としたものである。従来の連続繊維シート接着工法を港湾鋼構造物に適用する場合、海水の締切りや排水など施工条件を気中とするための準備が必要となる。補修・補強に係る費用と労力を考慮すれば、港湾鋼構造物に従来工法を適用することは現実的ではなく、独自の工法の開発が必要である。そこで、本研究では、港湾鋼構造物の防食のため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、含浸・脱泡作業を必要としない炭素繊維強化複合材（Carbon-Fiber Reinforced Polymer, CFRP）ストランドシート（写真－2.1）を組み合わせて使用する工法を提案した。

CFRPストランドシートは、炭素繊維ストランド（直径約10 μm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直径1mm程度の棒材をすだれ状に加工した補強材である。工法の概略は図－2.1に示すとおりで



拡大図
写真-2.1 CFRP スtrandシート

あり、施工手順は、1) サンドブラストにより下地処理を施した鋼材に水中硬化形エポキシ樹脂を塗布する、2) CFRPストランドシートを樹脂の中に埋め込むように接着する、3) 耐候性のある上塗り樹脂を塗布する、である。使用する水中硬化形エポキシ樹脂は、CFRPストランドの破断強度までの延性と接着強度を有するパテ状の樹脂である。鋼板とCFRPストランドシートの界面に存在する水は、水中硬化形エポキシ樹脂に含まれる水置換剤と加水分解作用により除去される。また、界面に存在する空気と水はCFRPストランドの間から容易に排出される。これらにより、提案工法では、CFRPストランドシートと鋼材の一体性を確保できることが期待される。

なお、鋼材の炭素繊維シートによる補強に関しては、これまで、溶接部のき裂進展の防止、腐食による断面減少に対する補強などの検討例がある⁴⁾。しかし、本研究で提案するCFRPストランドシートと水中硬化形エポキシ樹脂による水中での補強工法については、これまで検討された例はない。

本章では、港湾鋼構造物への提案工法の適用性の確認を目的として、2.2では従来工法である炭素繊維シート接着工法を適用した鋼板供試体と、提案工法を適用した鋼板供試体の引張試験結果について、また、2.3では全工程を水中で行ったCFRPストランドシート接着鋼板の引張試験結果について述べる。それぞれ、CFRPストランドシートと鋼板の一体性と、CFRPストランドシート接着工法による部材の力学性能の向上、すなわち補強効果に着目して検討を行った。

なお、提案工法による部材の耐久性の向上、すなわち補修効果については、本研究の対象外とするが、水中施工形被覆工法で一般的に用いられる水中硬化形エポキシ樹脂を用いていることから、部材の耐久性の向上が期待

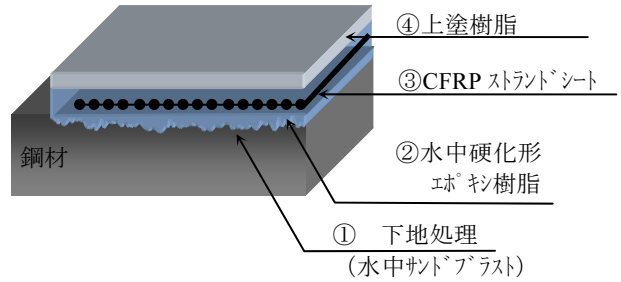


図-2.1 提案工法の概要

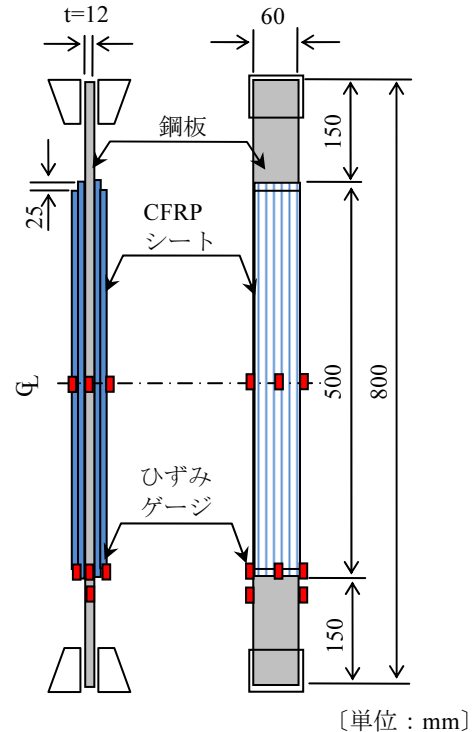


図-2.2 引張試験用供試体 (B1 供試体)

できる。耐久性向上、すなわち補修効果とその持続性については、港湾空港技術研究所内海水シャワー曝露場における長期曝露試験の実施により、現在、検討中である。

2.2 従来の炭素繊維シート接着工法と提案工法の比較

(1) 実験概要

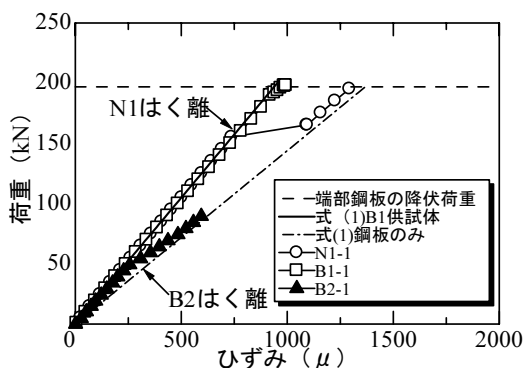
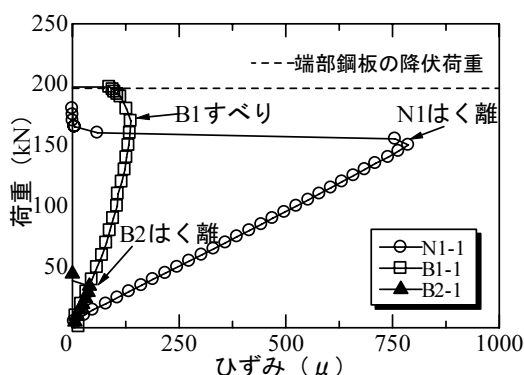
図-2.2に引張試験用供試体の概要を示す。供試体は、厚さ12mm、幅60mm、長さ800mmのSS400鋼板（降伏点283 N/mm²）の中央部500mmの範囲にCFRPシートを接着したものである。シートの端部は、応力集中を緩和するために各層25mmずつ試験体中央方向にずらして接着した⁴⁾。N1供試体では気中施工用の含浸樹脂で炭素繊維シートを接着し、B1供試体およびB2供試体では水中硬化形エポキシ樹脂でCFRPストランドシートを

表-2.1 供試体の種類と CFRP の物性値

供試体 No.	CFRP の種類	施工条件	下地処理	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 E (N/mm ²)	設計厚さ (mm)	層数	幅 (mm)	断面積 A (mm ²)	引張剛性 EA (N)
B1	CFRP スtrandシート	水中	ブラスト	2,760	728,000	0.406	2	60	48.72	35.5×10 ⁶
B2	CFRP スtrandシート	水中	研掃材	2,410	694,000	0.429	2	50	42.90	29.8×10 ⁶
N1	炭素繊維シート (従来工法)	気中	ブラスト	2,526	667,000	0.143	6	60	51.48	34.3×10 ⁶

表-2.2 損傷荷重

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



(a) N1-3 供試体



(b) B1-1 供試体



(c) B2-2 供試体

写真-2.2 鋼板-CFRP シート界面の状況

接着した。

B1 および N1 供試体は、健全な鋼板に気中でサンドブラスト処理を施した後に、B1 供試体は水中で、N1 供試体は気中で、それぞれ幅 60 mm のシートを接着した。

B2 供試体は、気中で鋼板にサンドブラスト処理を施し、約 3 ヶ月間、乾湿繰返し曝露試験機で鋼板の腐食を促進させた。その後、研掃材により鋼板をある程度研磨し、錆を完全に除去しない状態で、水中で幅 50 mm の CFRP スtrandシートを接着した。なお、曝露試験後の B2 供試体には、平坦な全面腐食が表面付近に発生したのみであり、腐食による肉厚の減少は顕著ではなかった。

表-2.1 に供試体の種類と各供試体に用いた CFRP の物性値を示す。B1 供試体と B2 供試体で用いた CFRP スtrandシートの物性値の差は、製造ロットの違いによるばらつきの範囲内である。B1 供試体の CFRP スtrandシ

ートと、N1 供試体の炭素繊維シートの補強量は、それぞれの引張剛性 EA が同等となるように決定した。

引張試験は、シートを接着していない範囲の鋼板が降伏した後、シート接着部まで鋼板の降伏が進展したことを確認するまで行った。測定項目は、荷重、シート中央のひずみ、シート端部のひずみ、鋼板側面 (供試体中央、シート接着端部、シート非接着部) のひずみである。各ひずみは、シートまたは鋼材の表面に貼付したワイヤーストレインゲージにより測定した。引張試験は、各供試体について 3 体ずつ行った。

(2) 引張試験結果

図-2.3 および図-2.4 に、シート端部における CFRP のひずみおよび供試体中央における鋼板側面のひずみの平均値と、荷重の関係の代表的な結果を示す。N1 供試体では、シート端部からはく離が生じた後、急激にシート

端部の CFRP のひずみが低下し、鋼板の降伏前にシートが全面はく離した。B1 供試体では、鋼板の降伏前にシート端部における CFRP のひずみが緩やかな低下を示し（これを「すべり」と呼ぶ）、鋼板の降伏がシート端部で発生した。その後、降伏範囲がシート接着部まで進展した後、シートのはく離が生じた。また、中央における鋼板のひずみは、鋼板の降伏荷重までほぼ線形に増加した。B2 供試体では、荷重が 35kN 時点でシート端部にはく離が生じ、その後、荷重を増加させるにつれてはく離が供試体中央まで進展した。

表-2.2 にシート端部での平均はく離荷重、もしくはすべりが生じた荷重を、それぞれの供試体における損傷荷重として示す。損傷過程は異なるものであったが、N1 供試体と B1 供試体ではほぼ同等の損傷荷重であった。また、B2 供試体は、他と比べて著しく損傷荷重が小さくなった。

写真-2.2 に、試験後にシートと鋼板を剥がした後の状況を示す。写真上側がシートの接着面、写真下側が鋼板の接着面である。N1 供試体では、鋼板に樹脂は残らず、プライマーと鋼板の界面でシートが完全にはく離していた。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る凝集破壊となった。このことから、B1 供試体のシート-鋼板間の一体性には、施工環境（水中）の影響はほとんどなかったことが推測される。B2 供試体では、シートの接着面、鋼材の接着面ともに錆が付着しており、錆層内ではく離が生じていた。このことから、腐食した鋼材では、錆層を完全に除去した後にシートを接着しないと、シートと鋼材の一体性は確保できないことが考えられる。

ここで、鋼板とシートの完全合成が仮定できるとすると、荷重-ひずみ関係は式(1)により算出することができる。

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

T: 荷重 (kN)

E_s : 鋼板の弾性係数 (=200,000 N/mm²)

ε : ひずみ (μ)

A_s : 鋼板の断面積 (mm²)

A_{cf} : CFRP スtrandシート の公称断面積 (mm²)

E_{cf} : CFRP の弾性係数 (=640,000 N/mm²)

図-2.4 中の実線はこの関係を B1 供試体および鋼板のみについて算出した結果である。N1 供試体では、シート端部ではく離が発生した後に鋼板中央のひずみが急増

し、荷重-供試体中央における鋼板ひずみ関係は、式(1)により算出した鋼板のみの計算値とほぼ等しくなった。

これは、N1 供試体では、シート端部に剥離が発生するまでは、供試体全体におけるシートと鋼板は、完全合成として取り扱うことができることを示している。B1 供試体では、シート端部ですべりが生じた後も鋼板のひずみは降伏荷重までほぼ線形に増加し、はく離に至るまでのひずみは、式(1)による鋼板とシートの完全合成を仮定した計算値とほぼ一致した。このことから、提案工法を適用した B1 供試体では、従来工法を適用した N1 供試体と同程度以上に鋼板とシートの一体性が確保されているといえる。

以上より、CFRP スtrandシートと水中硬化形エポキシ樹脂を鋼板に接着する提案工法では、鋼板の錆層を完全に除去した後にシートを接着すれば、水中で施工した場合も、従来から陸上構造物に適用されている CFRP シート接着工法とほぼ同等の鋼板-シート間の一体性が確保できることが確認された。

2.3 提案工法による鋼板の応力低減効果の確認

(1) 実験概要

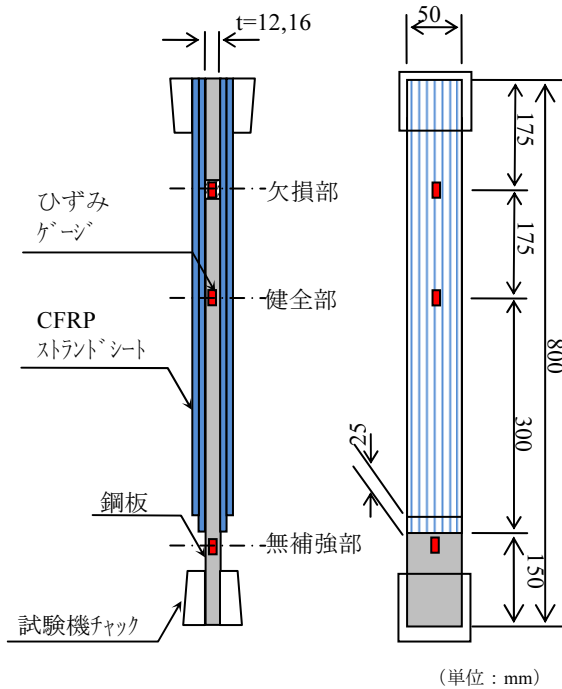
ここでは、腐食による肉厚減少が生じた鋼板に対する提案工法の補強効果を確認することを目的とした。

図-2.5 に供試体の概要を示す。鋼板は幅 50 mm、長さ 800 mm、肉厚 12 mm および 16 mm の SS400 を用いた。各鋼板の降伏点および引張強さは、肉厚 12 mm で 296 N/mm² および 447 N/mm²、肉厚 16 mm で 282 N/mm² および 439 N/mm² である。鋼材の腐食を模擬するため、鋼板には図-2.6 に示す断面欠損部を設けた。鋼板の断面欠損率は、肉厚 12 mm で 67%、肉厚 16 mm で 50% である。

2.2 では鋼板のサンドブラスト処理は気中で、CFRP スtrandシートの接着は水中で実施したが、実際の施工条件を想定し、全工程を水中（水道水を使用）で実施し供試体を作製した。水中サンドブラスト処理は写真-2.3 に示すように大型の水槽内で実施した。サンドブラストは 3 号珪砂と 4 号珪砂を用いて空気圧 500~700 kPa で、鋼板表面の黒皮がすべて除去されるまで行った。

サンドブラスト処理後、鋼板を速やかに別の水槽に移し、水中でシートを接着した。施工する水槽内で 1 時間放置すると鋼板表面に軽微な発錆が見られたため、シート接着前に、ナイロン繊維の研掃材で錆を除去した。シート接着後は 7 日間水中で養生し、その後、気中でひずみゲージの接着などの試験準備を行った。

表-2.3 に CFRP スtrandシートの物性値を示す。シートによる鋼板の補強量は、繊維目付量 600 g/m² 相当



(a) 鋼板側面 (b) 鋼板正面
 図-2.5 引張試験用供試体

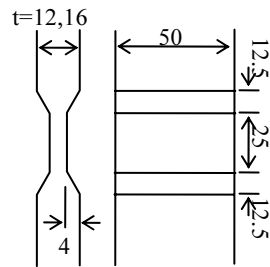


図-2.6 断面欠損の形状



写真-2.3 サンドブラストの状況

表-2.3 CFRP スtrandシートの物性値

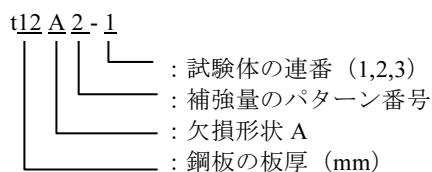
繊維 目付量 (g/m ²)	設計 厚さ (mm)	引張 強さ (N/mm ²)	弾性 係数 (N/mm ²)
600	0.252	2,230	674,000
900	0.386	2,490	700,000

表-2.4 引張試験用供試体の概要

No.	肉厚 (mm)	n=3 の平均値		補強量			計算値		
		健全部 断面積 (mm ²)	断面欠損部 断面積 (mm ²)	600 g/m ² 相当	900 g/m ² 相当	断面積 (mm ²)	断面欠損部 降伏荷重 (kN)	断面欠損部 破断荷重 (kN)	健全部 降伏荷重 (kN)
t12AN	12	585.45	184.91	—	—	0	55	—	173
t12A1	12	584.57	194.25	—	1層	38.64	94	154	173
t12A2	12	582.56	196.40	2層	—	50.04	106	170	172
t12A3	12	584.59	195.87	第1層	第2層	63.84	118	200	173
t16AN	16	774.41	394.78	—	—	0	111	—	218
t16A1	16	775.37	396.54	—	1層	38.64	147	208	219
t16A2	16	774.77	396.32	2層	—	50.04	157	224	218
t16A3	16	775.23	397.47	第1層	第2層	63.84	170	254	219

の炭素繊維シートと、900 g/m²相当の炭素繊維シートを組み合わせて決定した。

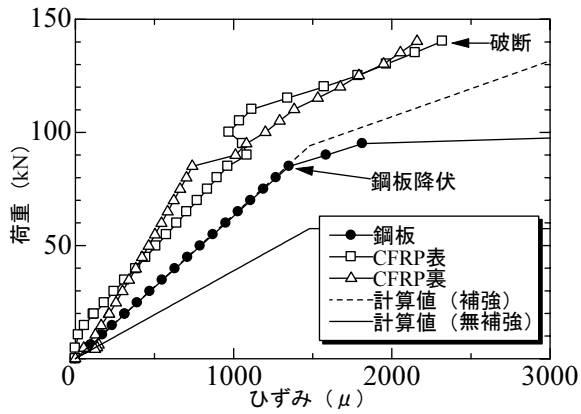
表-2.4 に各供試体の肉厚、欠損形状、補強量を示す。各供試体の供試体 No. は、次のように設定した。



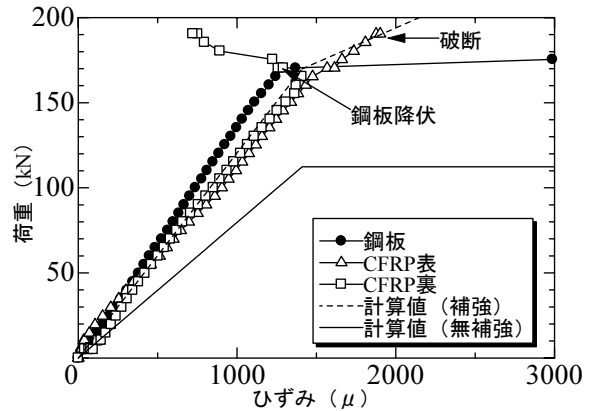
また、表-2.4 中の計算値は、式(1)に鋼板降伏時のひ

ずみと、CFRP スtrandの破断ひずみを代入して求めたものである。その結果、いずれの供試体においても、引張試験時は、鋼板欠損部の降伏が先行することが予測された。

鋼板に設けた断面欠損は、引張試験時に供試体の上側となるようセットした。そのため、供試体の上側端部では、はく離防止としてシートを試験機チャック部まで接着し、保護のためチャック部にガラス繊維を貼り付けた。また、供試体の下側端部のシートは、応力集中の緩和のため 25 mm ずつずらして接着した⁴⁾。

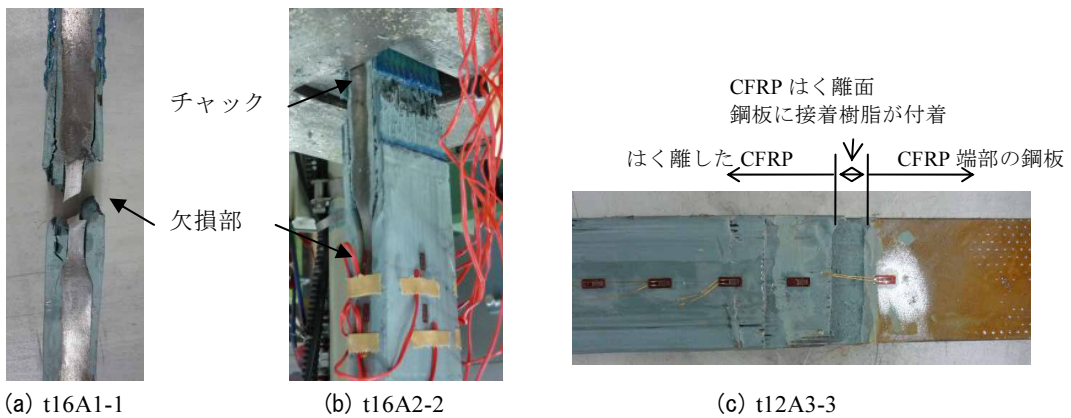


(a) t12A1-1 供試体



(b) t16A3-1 供試体

図-2.7 断面欠損部の荷重-ひずみ関係



(a) t16A1-1

(b) t16A2-2

(c) t12A3-3

写真-2.4 供試体の破壊状況

引張試験時の測定項目は、荷重と図-2.5 に示す測定点での鋼板のひずみおよび CFRP スtrandシート のひずみとした。各供試体について、それぞれ3体ずつ引張試験を行った。

(2) 引張試験結果

図-2.7 (a) および (b) に代表的な供試体の断面欠損部の荷重-ひずみ関係を示す。図中には、式(1)に、鋼材の断面積のみを入力した計算値(無補強)と、CFRP スtrandシート の断面積も代入した補強した場合の計算値(補強)を示した。

t12A1-1 供試体では、鋼板のひずみが無補強の場合の計算値よりも小さくなり、シートの接着による応力低減効果がみられた。ただし、シートのひずみは計算値よりも小さくなった。この傾向は補強量の違いによらず全ての t12A 供試体で見られた。

t16A3-1 供試体においても、鋼板のひずみは無補強の場合の計算値よりも小さくなり、シート接着による応力低減効果がみられた。また、鋼板のひずみとシートのひずみは鋼板の降伏まで線形性を保ち、荷重-ひずみ関係の計算値と実験値はほぼ一致した。この結果は、補強量の

違いによらず全ての t16A 供試体で共通していた。

供試体の破壊状況を写真-2.4 (a) ~ (c) に示す。すべての補強試験体において断面欠損部の鋼板の降伏が先行し、その後、補強量の違いによらず計 18 体中 17 体は、断面欠損部で鋼板が破断し(写真-2.4 (a))、シートがチャック部もしくは欠損部で破断した(写真-2.4 (b))。1 体は、断面欠損部で鋼板が降伏した後、シート端部でシートと鋼板のはく離が生じた(写真-2.4 (c))。破断箇所およびはく離部では、鋼板に水中硬化形エポキシ樹脂が付着した状況でシートがはく離していたため、鋼材-CFRP スtrandシート間には、いずれの供試体においても接着が確保されていたことが推測された。

CFRP スtrandシートによる鋼板の補強効果を確認するため、断面欠損部の降伏荷重の計算値と、断面欠損部の荷重-ひずみ関係の変曲点から得られた降伏荷重および最大荷重を表-2.5 に示す。t16A 供試体では降伏荷重の計算値と実験値は概ね一致した。

ここで、図-2.7 において、実験結果における鋼板とシートそれぞれの荷重-ひずみ関係が一致し、またそれらが式(1)による計算値と一致する場合、鋼板とシートの

表-2.5 降伏および最大荷重

No.	計算値	実験値 (n=3 の平均)	
	断面欠損部 降伏荷重 kN	断面欠損部 降伏荷重 kN	最大荷重 kN
t12AN	55	63	85
t12A1	94	82	138
t12A2	106	90	147
t12A3	118	103	171
t16AN	111	121	175
t16A1	147	163	203
t16A2	157	158	178
t16A3	170	170	193

一体性が確保され、完全合成断面として取り扱うことが可能である。図-2.7(b)および表-2.5の結果から、t16A 供試体では、鋼板とシートの一体性が確保されていたことが考えられる。一方、t12A 試験体では、すべての補強量で降伏荷重の実験値が計算値より小さくなった。これは、図-2.7(a)において、シートのひずみが計算値よりも小さい、つまり、シートの荷重分担が小さかったこと、また、シート表面のひずみが表裏で異なっていることから、鋼板を試験機にチャッキングした時点で、断面欠損部にそりが生じていたことによる影響も考えられる。また、t12A 供試体では鋼板の断面欠損率が 67% であり、t16A 供試体と比較して大きい。このことから、断面欠損の大きい鋼板では、シートの荷重負担割合が大きくなるため、十分な補強効果が得られない可能性があると考えられる。

表-2.5 に示す最大荷重の実験値は、鋼板のみの場合 (t12AN および t16AN 供試体) よりも、シート接着による補強を施した供試体の方が大きくなった。このことから、鋼板の降伏以降もシートが引張荷重を負担していたことが考えられる。

2.4 まとめ

本章では、港湾鋼構造物を対象として、水中硬化形エポキシ樹脂を用いた CFRP スtrandシート接着工法を提案し、その補強効果について検討した。その結果、提案工法を水中の鋼部材に適用する場合、鋼板の錆層を完全に除去した後にシートを接着すれば、従来から陸上構造物に適用されている炭素繊維シート接着工法とほぼ同等の一体性が確保できることが確認された。また、提案工法による補強を施した鋼板では、鋼板の降伏までは、鋼板と CFRP スtrandシートの完全合成断面として取り扱うことができ、鋼板の降伏以後もシートが荷重を負担するため、鋼板全体の耐荷力を向上させることが可能

である。しかし、腐食により肉厚が著しく減少した鋼板では、完全合成断面として取り扱うことが不適切な場合があり、鋼板の降伏以後は鋼材とシートのはく離が生じる可能性があることが分かった。なお、本研究の範囲では、断面欠損率 50% までは、降伏以前まで完全合成断面として取り扱うことができた。

3. 提案工法による鋼管杭の補強効果に関する検討

本章では、提案工法による補強効果を部材レベルで確認することを目的として、鋼管の一部を切削し腐食による断面欠損を模擬した供試体と、実際の港湾構造物の下部工から切り出した鋼管杭に提案工法を適用し、部材の補強効果について実験的検討を行った。また、供試体の一部をモデル化した有限要素解析により、断面欠損やその形状、およびシートの定着長が、部材の補強効果に及ぼす影響について検討した。

3.1 鋼管供試体の曲げ載荷試験の概要

(1) 供試体概要

鋼管供試体の概略を図-3.1 に示す。供試体には外径 318.5 mm、厚さ 10.3 mm、長さ 3000 mm の鋼管を用いた。供試体の載荷点と支点には厚さ 16 mm の鋼板を溶接し、供試体端部から 600 mm 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-3.1 に供試体の種類を示す。No.1 から No.3 供試体は、降伏点が 318 N/mm^2 、引張強さが 412 N/mm^2 の STK400 の鋼管に、腐食による肉厚の減少を模擬した断面欠損を切削加工により設けたものである。No.4 供試体は、実際の港湾構造物から切り出した鋼管杭の両側に健全な鋼管を溶接したものである。

No.1 供試体と No.2 供試体には、供試体の全周に一律な断面欠損 (溝状) を設けた (図-3.2(a) および (b))。断面欠損深さは、No.1 供試体で最大 3.65 mm、No.2 供試体で最大 6.12 mm である。No.3 供試体は、孔食を模擬して、鋼管上下面に $\phi 30 \text{ mm}$ の円孔を各 1 箇所ずつ設けた (図-3.2(c))。円孔の深さは 5.15 mm である。

No.4 供試体は、建設後 38 年が経過した港湾構造物の下部工から切り出した鋼管杭を用いた。写真-3.1 に鋼管杭の腐食状況を示す。全体的に凹凸の激しい全面腐食が発生していることに加えて、著しい孔食が発生している箇所も見られた。供試体は、最大深さ 6.12 mm の孔食 (最小肉厚 4.18 mm) が載荷時に供試体中央の下面 (引張側) に位置するよう加工した。超音波厚さ計により肉厚を測定した結果、断面欠損深さの平均値は 1.82 mm (下

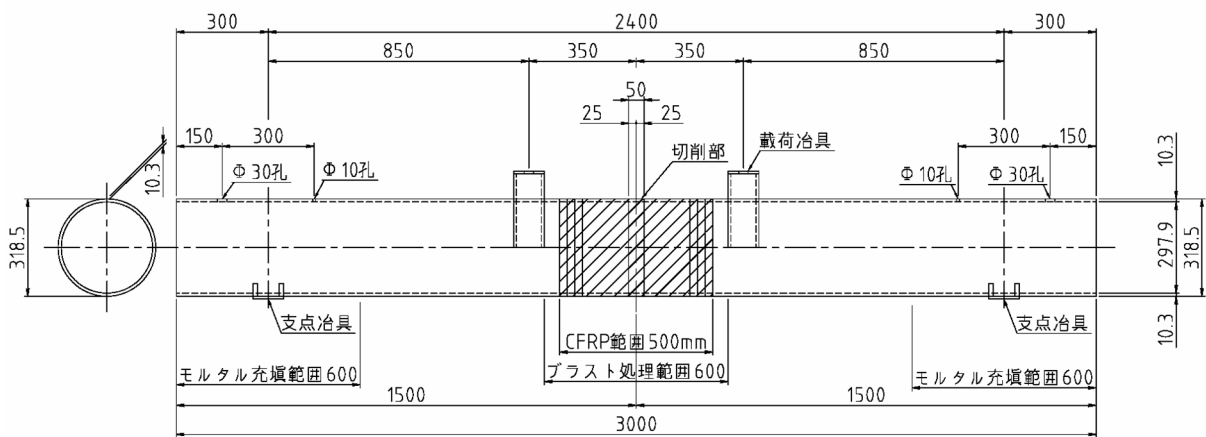


図-3.1 鋼管供試体の概略 (No.2 供試体) (単位: mm)

表-3.1 鋼管供試体の種類

供試体 No.	断面欠損	補強 1 (1 回目)	補強 2 (2 回目)
No.1	切削加工 (全周)	2 層	—
No.2	切削加工 (全周)	2 層	4 層 (2 層+2 層)
No.3	切削加工 (円孔)	1 層 (円孔上, 幅 100 mm)	1 層全周
No.4	腐食	4 層	—

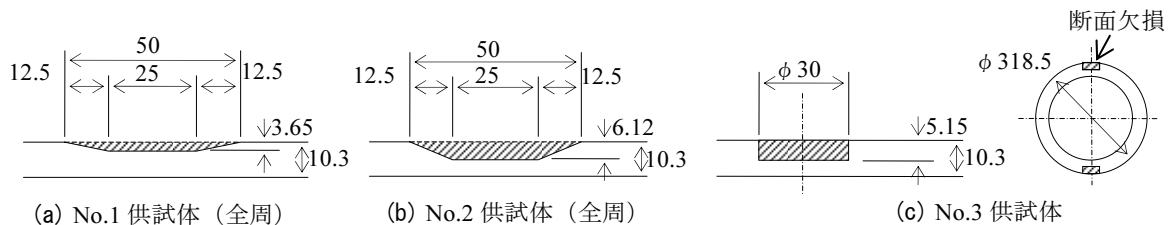


図-3.2 鋼管供試体の断面欠損形状 (単位: mm)

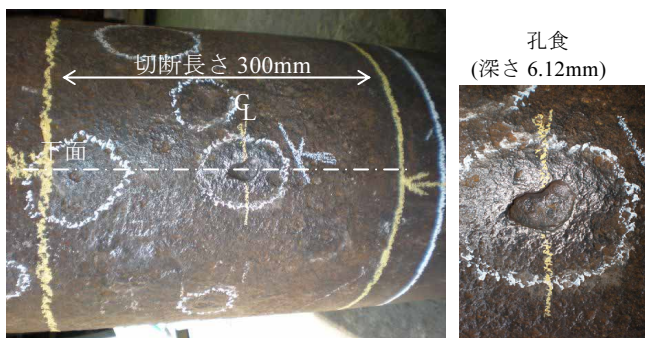


写真-3.1 No.4 供試体の腐食状況

面平均 1.86 mm, 上面平均 1.73 mm) であった. なお, 切り出した鋼管杭の鋼種や機械的性質は不明であるが, 後述する曲げ載荷試験時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 供試体と同等として取り扱うこととした.

(2) 補強方法

サンドブラストによる鋼管の下地処理を行い, 表-2.1

のB2供試体と同じCFRPストランドシートを, 繊維方向を鋼管軸方向として接着した. シートは, 供試体中央の断面欠損部を中心として, 長さ500 mm範囲に水中硬化形エポキシ樹脂により接着した. なお, 下地処理および接着作業, 養生は全て気中で行った. シートの定着長は250 mmとし, 各層のシート端部を25 mmずつ中央方向にずらして接着した. 通常, 水中硬化形エポキシ樹脂の塗布量はシート1層につき約3 kg/m²であるが, 本実験では, 鋼管上に貼付したひずみゲージおよびリード線などの影響により, 樹脂の塗布量は約4 kg/m²となった.

補強量は, 鋼管と CFRP ストランドシートの完全合成を仮定して, 式(2)の $4E_s J/DL$ で表わされる曲げ剛性により決定した. すなわち, 補強量は, 断面欠損によって低下した鋼管の曲げ剛性を断面欠損前まで回復させるために計算上必要なシートの積層数とした. なお, No.4 供試体については, 最大深さ 6.12mm の孔食が鋼管の全周にあると仮定して曲げ剛性を算出し, 補強量を決定した.

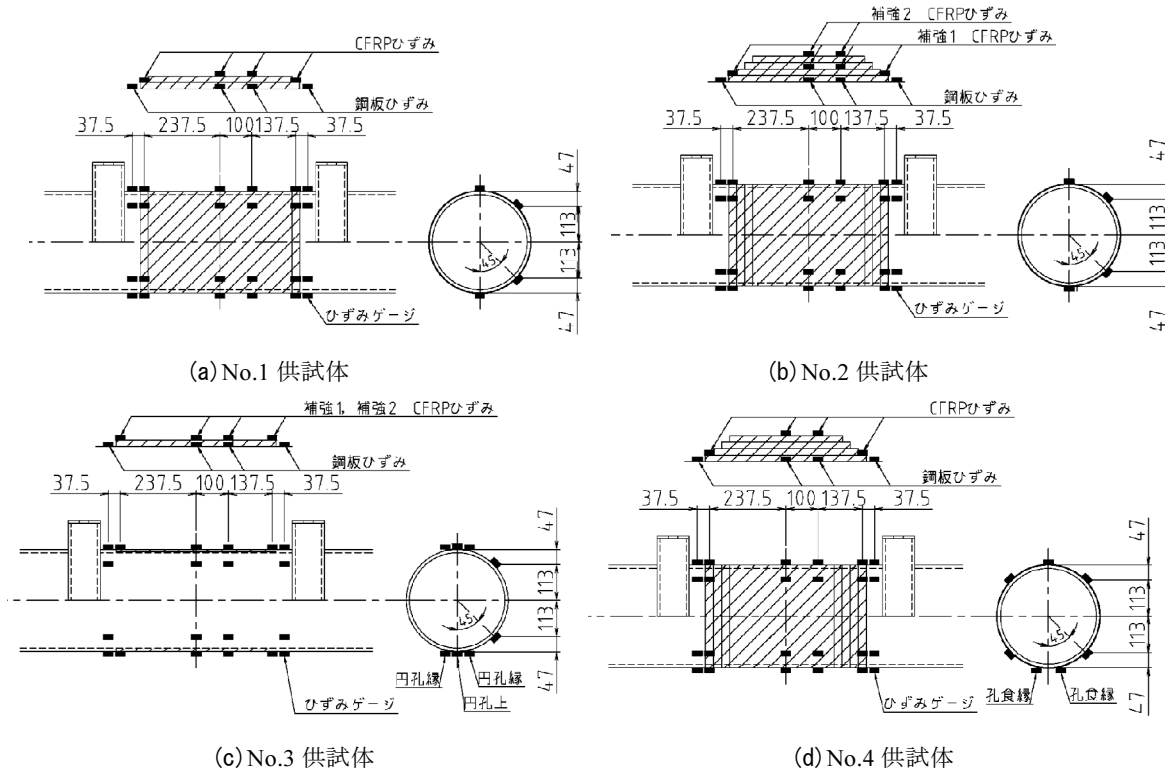


図-3.3 ひずみ測定位置 (単位: mm)

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

P : 荷重, M : モーメント, L : せん断スパン
 ε : ひずみ, I : 断面 2 次モーメント

$$I = I_s + n_{cf} \cdot I_{cf} \quad (3)$$

I_s : 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 供試体では、断面欠損部の I を差し引いた。

D : 鋼管の外径 (断面欠損量を考慮)

d : 鋼管の内径

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

D' : 健全な鋼管の外径 ($= 318.5 \text{ mm}$)

t_{cf} : CFRP スtrandシート の設計厚さ

n_{ply} : CFRP スtrandシート の積層数

表-3.1 に各供試体における補強量を示す。No.1 供試体では鋼管全周にシートを 2 層接着することにより、No.2 および No.4 供試体では全周に 4 層、No.3 供試体で

は全周に 1 層接着することで、鋼管の曲げ剛性を断面欠損以前 (健全時) 程度まで回復させた (表-3.3 EI_{s-cal} / EI_0 参照)。

(3) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、支間 2,400 mm, せん断スパン 850 mm の 4 点曲げ試験とし単調載荷により行った。

補強による鋼管の応力低減効果を確認するため、まず、補強前に各供試体の弾性範囲内で曲げ載荷試験を行った。その後、荷重を除荷した後にシートを接着した。補強は、1 回あるいは 2 回に分けて行い、その内訳は表-3.1 の補強 1 および補強 2 として示すとおりである。No.2 供試体では、補強 1 (2 層補強) の後に弾性範囲内である荷重約 150kN まで曲げ載荷を行った。除荷後、補強 1 の上から追加で 2 層補強を行い 4 層補強 (補強 2) とした。No.3 供試体では、円孔のある鋼管上下面のみ幅 100 mm のシートを鋼管軸方向に接着した後 (補強 1) に弾性範囲内である荷重約 150kN まで曲げ載荷を行った。除荷後、側面にのみシートを追加して 1 層全周補強 (補強 2) とした。補強後は、シートの破壊、もしくは荷重が低下するまで曲げ載荷を実施した。

載荷試験時の測定項目は、荷重、載荷点および支間中央の変位、鋼管およびシートのひずみである。ひずみは、鋼管表面 (無補強部)、シート接着端部、支間中央部、支

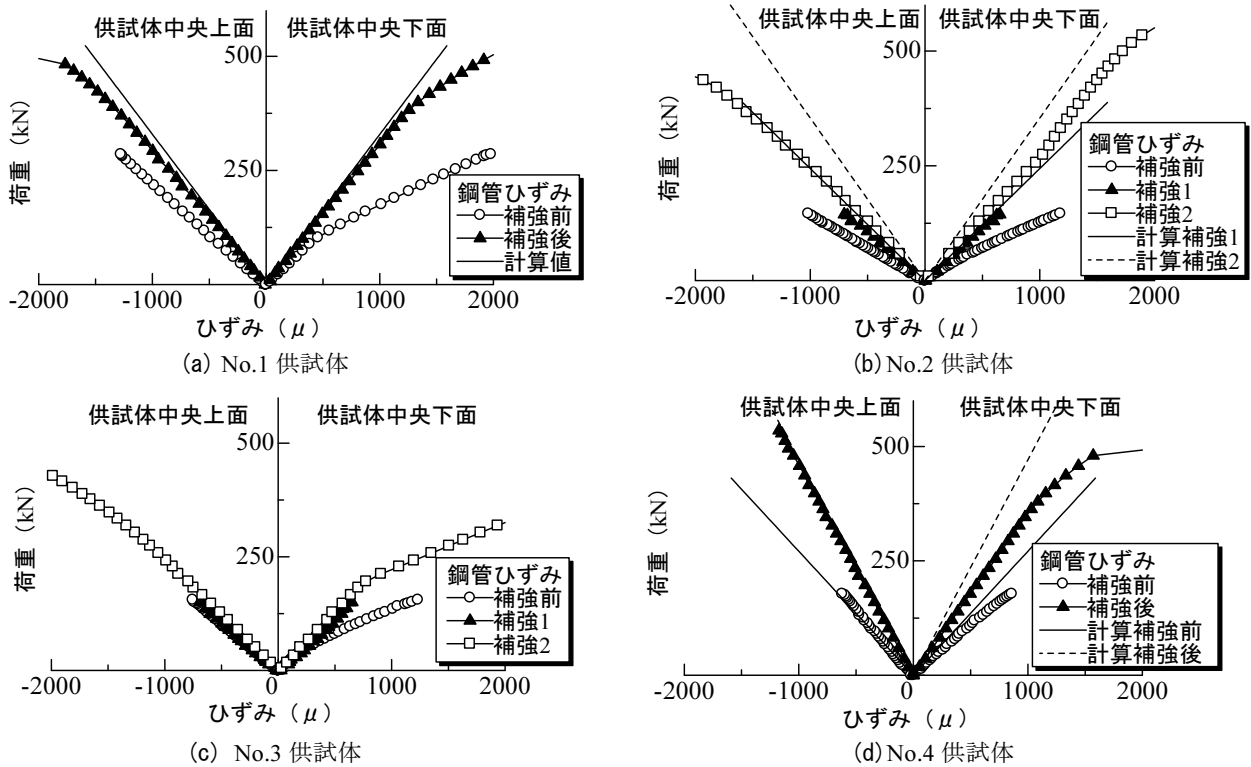


図-3.4 荷重-ひずみ関係 (補強前後)

間中央から 100mm 離れたシート接着部 (補強部) において、供試体半断面の 0° 、 45° 、 135° 、 180° の位置で測定した (図-3.3(a)~(c))。断面欠損形状が非対称である No.4 供試体では、 0° 、 45° 、 135° 、 225° 、 315° におけるひずみを測定した (図-3.3(d))。また、No.3 供試体と No.4 供試体については、応力集中が生じる可能性がある円孔および孔食縁についてもひずみを測定した。ひずみゲージは、貼付後、粘着テープ型コーティング材で養生した。

3.2 鋼管供試体の曲げ載荷試験結果

(1) 鋼管の荷重-ひずみ関係

図-3.4(a)~(d)に、各供試体における補強前後の荷重と、支間中央の上下面における鋼管ひずみの関係を示す。図中の計算値は、式(2)に鋼管の断面欠損部と CFRP スtrandシート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 供試体の下面のひずみは、円孔および孔食縁におけるひずみの測定値である。

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、シートの接着によって、鋼管の発生応力が低減されたことが分かる。また、全周にわたってシートを接着した No.3 供試体の補強 2 においては、補強 1 の場合よりも鋼管ひずみがわずかではあるが小さくなった。このことから、鋼管全体の曲げ剛性を上げることに

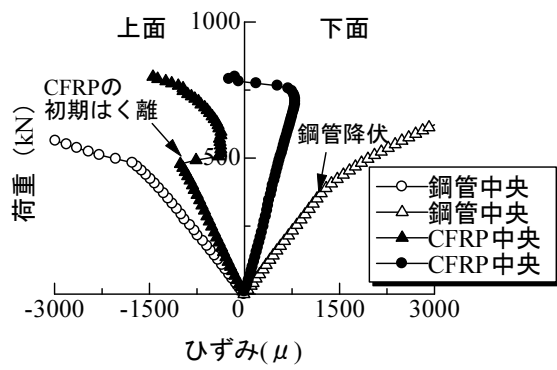
よって、円孔への応力集中が低減される可能性があることが考えられる。

実部材から切り出した鋼管杭を用いた No.4 供試体では、載荷試験時上下面の肉厚減少や孔食の発生程度は異なっていたが、他の供試体と同様に、いずれの面においてもシートの接着による応力低減効果が確認された。

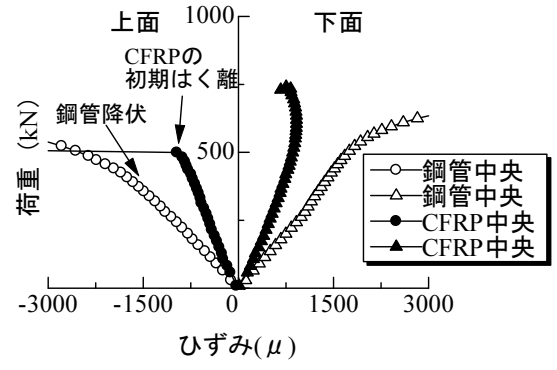
(2) 破壊状況

図-3.5(a)~(d)に、各供試体における補強後の荷重と、支間中央の上下面における鋼管およびシートのひずみの関係を示す。また、各供試体の鋼管降伏時の荷重とシートにはく離が生じた荷重、および部材の最大荷重を表-3.2 に示す。シートにはく離が生じた荷重については、荷重-シートのひずみ関係において、線形関係が失われた点と定義した。

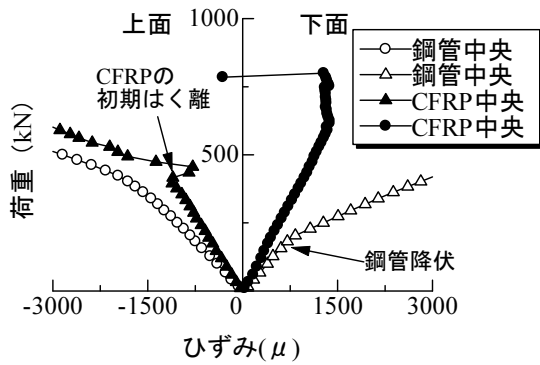
No.1 供試体では、荷重 370kN で鋼管下面側、荷重 488kN で鋼管上面側の断面欠損部が降伏し、上面側の降伏と同時にシートのはく離が生じた。その後、最大荷重 831kN で上面側にシートの圧壊が生じた (写真-3.2)。No.2 供試体は、鋼管上面の断面欠損部が降伏した後、上面側でシートのはく離が生じた。その後、最大荷重 742kN で上面側にシートの圧壊が生じ破壊に至った。No.3 供試体では、鋼管下面に設けた円孔縁の降伏後、上面円孔縁においてシートのはく離が生じた。その後、最終的に、下面



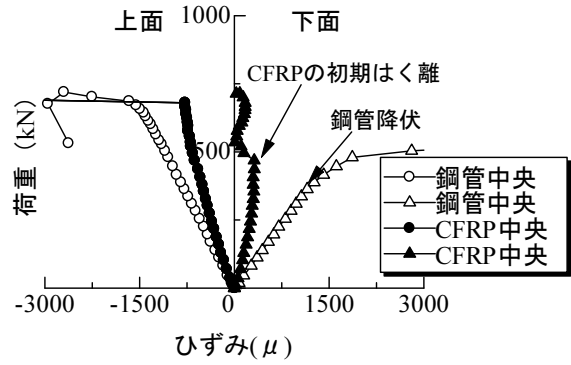
(a) No.1 供試体



(b) No.2 供試体



(c) No.3 供試体



(d) No.4 供試体

図-3.5 荷重-ひずみ関係 (補強後)

表-3.2 曲げ載荷試験結果 (荷重)

No.	降伏荷重 (kN)	降伏位置	はく離荷重 (kN)	はく離位置	最大荷重 (kN)
No.1	370	下面断面欠損部	488	上面断面欠損部	831
No.2	362	上面断面欠損部	499	上面断面欠損部	742
No.3	196	下面円孔縁	428	上面円孔縁	800
No.4	388	下面孔食縁	468	下面端部	726



写真-3.2 破壊状況 (No.1 供試体)

のシート接着端部におけるシートのはく離により荷重を終了した。No.4 供試体は下面の孔食縁が降伏した後、その位置でシートのはく離が生じた。その後、徐々に下面のシート接着端部においてシートのはく離が進行し荷重を終了した。No.4 供試体は、300mm の鋼管杭を健全な鋼管に溶接して作製している。溶接箇所近傍で凹凸の激しい局部腐食が生じていたため、これに起因したシート接着端部のシートのはく離が進行した可能性がある。

以上をまとめると、破壊の状況は供試体により異なるものの、すべての供試体で断面欠損部の鋼管が降伏した後に、CFRP ストランドシートの局所的なはく離が生じた。つまり、いずれの供試体においても、鋼管の降伏までは、鋼管とシートの一体性はシート接着面全面にわたって良好に保たれていたといえる。

(3) ひずみ分布と平面保持に関する考察

図-3.6(a)~(d)に荷重約 150kN 時の各供試体における支間中央断面のひずみ分布を示す。No.1 および No.2 供試体は円周上に設けた断面欠損部におけるひずみを示し、No.3 供試体の最上下のプロットは円孔中央のひずみを、No.4 供試体の最下のプロットは孔食縁のひずみを示す。いずれの供試体においても補強前後のひずみはほぼ原点对称となっており、中立軸は断面の中央に位置することが分かる。しかし、補強前後の鋼管とシートのひずみを比較すると、特に No.1 および No.2 供試体では、全断面において鋼管に比べてシートのひずみが小さくなった。また、No.3 供試体では、最上下以外、つまり円孔中央以外での鋼管とシートのひずみはほぼ一致しているが、円孔中央では鋼材よりもシートのひずみが小さくなった。

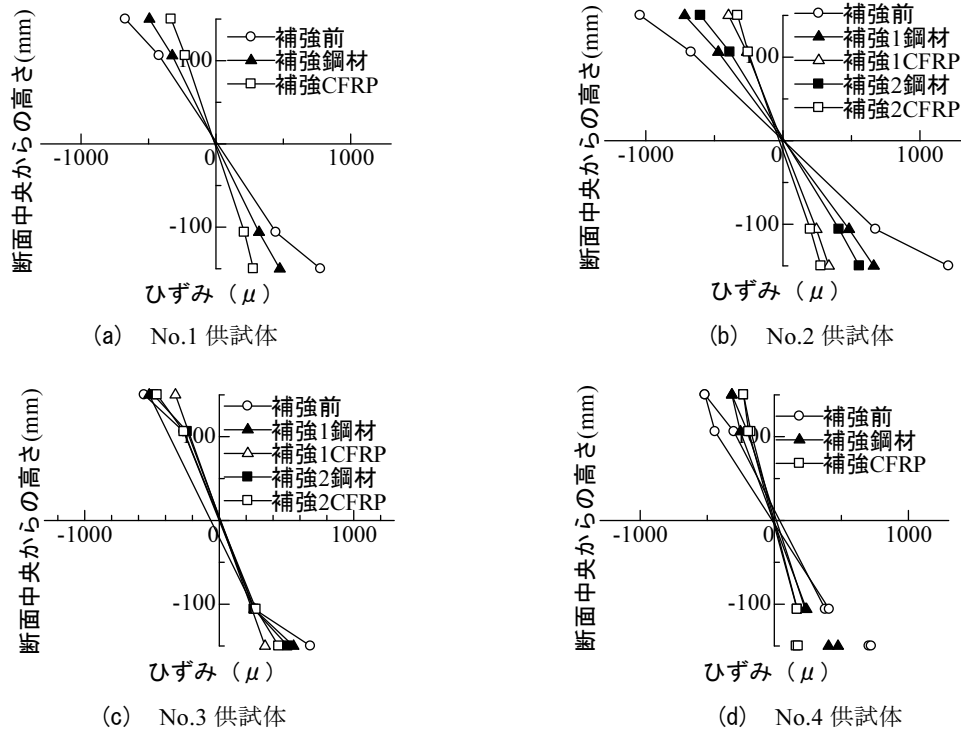


図-3.6 供試体断面のひずみ分布（補強前後，荷重約 150kN）

表-3.3 補強前後の曲げ剛性比

	No.1	No.2		No.3		No.4
		補強 1	補強 2	補強 1	補強 2	
EI_s / EI	1.34	1.61	1.94	1.11	1.22	1.64
EI_{s-cal} / EI_0	0.92	0.67	0.97	0.97	1.09	1.40
EI_s / EI_{s-cal}	0.91	0.90	0.75	0.65	0.64	0.94

No.4 供試体では、No.3 と同様に、特に最上下において鋼管とシートのひずみに差異が見られた。補強後の鋼管とシートのひずみに違いが生じるということは、鋼管とシートの完全合成が成り立っていなかったことを示している。しかし、No.3 供試体の非円孔部では両者のひずみの一致がみられたことから、特に、断面欠損部において、平面保持が成り立たなかったことが考えられる。以上より、提案工法により補強された鋼管の平面保持の成立は、断面欠損部あるいは孔食の内部に充填された水中硬化形エポキシ樹脂のせん断変形に影響されることが推測される。

3.3 鋼管供試体の補強効果に関する検討

ここでは、提案工法による鋼管の補強効果を定量的に評価するために、補強前後の曲げ剛性の変化に着目して検討した。

表-3.3 に各供試体における補強前後の曲げ剛性比を示す。各供試体の曲げ剛性は、図-3.4 (a)～(d) に示した

補強前後の荷重-ひずみ関係において、両者の関係が線形を示す荷重 150kN 以下の範囲から求めた。曲げ剛性比は、補強前の曲げ剛性 EI 、補強後の曲げ剛性 EI_s 、断面欠損以前（健全時）の曲げ剛性 EI_0 をそれぞれ比較したものである。健全時の曲げ剛性 EI_0 は式(2)により算出した。

ここで、1.2 において、変状により性能が低下した部材の力学性能を現有性能以上に向上させる行為を‘補強’と定義した。これに従うと、提案工法による補強効果は EI_s / EI と表すことができる。補強 2 までシートを接着した場合、曲げ剛性は最小で約 2 割、最大で約 2 倍向上した。しかし、シート接着による曲げ剛性の向上の程度は、鋼管の断面欠損形状に応じて異なり、特に、円孔状の断面切削を施した No.3 供試体においては、円周状に断面欠損を設けた No.1 および No.2 供試体、および実部材から切り出した鋼管杭を用いた No.4 供試体よりも補強効果は小さくなった。

表-3.3 の EI_{s-cal} / EI_0 は、各供試体の補強量決定の根拠とした値であり、 EI_{s-cal} は補強後の各供試体の曲げ剛性の計算値である。補強後の曲げ剛性の実験値と計算値を比較すると、円周方向に断面欠損を設けた供試体では断面欠損深さが深いほど EI_s / EI_{s-cal} が小さくなった。また、 EI_s / EI_{s-cal} は、円孔を設けた No.3 供試体で最も小さく、上面に平均的な断面減少を、下面に著しい孔食を有する No.4 供試体で最も大きかった。これらは、完全合成を仮

定して式(2)により補強量を決定したことに起因する。つまり、断面欠損部あるいは孔食部における応力集中と、他の箇所と比較して両者内に厚く充填される水中硬化形エポキシ樹脂のせん断変形のために、補強された鋼管供試体断面の平面保持が成立せず、当初期待していた剛性の向上が得られなかったことが考えられる。

以上のことから、提案工法を断面欠損が生じた鋼管に適用した場合、鋼管の曲げ剛性を向上させることができる。しかし、その補強効果は鋼管に生じた断面欠損の形状や分布状況に応じて異なり、これは断面欠損部の存在により、CFRP ストランドシートの荷重分担や鋼管とシートの一体性に変化が生じることによるものであると考えられる。

3.4 補強効果の影響要因に関する考察

提案工法により補強した鋼管供試体の曲げ荷重試験から、補強効果は断面欠損部への応力集中の状況により異なることが考えられた。本節では、No.1およびNo.2供試体を対象とした有限要素 (FE) 解析により、断面欠損が部材の補強効果に及ぼす影響について、鋼管-水中硬化形エポキシ樹脂-CFRP ストランドシート間の応力伝達の観点から検討した。あわせて、CFRP ストランドシートの定着長が補強効果に及ぼす影響についても検討した。

(1) 解析方法

本研究では、市販のFE解析ソフトLISAを用いた静弾性解析を行った。解析は、No.1供試体およびNo.2供試体の補強1および補強2 (表-3.1参照) について行い、それぞれ曲げ荷重試験における等曲げ区間の下面側を対象とした。鋼管の下面側を単純な引張応力場として、2次元平面

ひずみ要素を用いて、断面欠損部の中心からシート接着端部までをモデル化した (図-3.7(a))。断面欠損部における水中硬化形エポキシ樹脂とCFRP ストランドシートの解析要素は、図-3.7(b)のように配置した。FE解析に用いた各要素の物性値を表-3.4に示す。CFRP要素の厚さは、CFRP ストランドシートの厚さと、繊維含有率 ($V_f = 0.55$) と水中硬化形エポキシ樹脂 (比重 2.0 g/cm^3) の塗布量から算出した厚さの和とした。CFRP要素の物性値は、CFRP ストランドの物性値と水中硬化形エポキシ樹脂のCFRP ストランドシート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⁹⁾から求めた。エポキシ樹脂要素の物性値は、JIS K 7113に定められた引張試験により求めた。

解析の拘束条件は、図-3.7(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である。荷重は、断面欠損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、弾性域の剛性評価のため、無補強部の鋼管要素にひずみ 700μ を発生させた。これは、No.2 供試体の補強1後に行った曲げ荷重試験時の鋼管の最大ひずみと同等である。

断面欠損位置における鋼管要素とCFRP要素の発生応力から、それぞれのひずみ分布を算定し、実験結果との比較を行った。

(2) 断面欠損が補強効果に及ぼす影響

図-3.8にNo.2供試体の補強2の場合における実験値とFE解析結果を示す。実験値は鋼管とCFRP ストランドシート表面の外周のひずみを示し、FE解析結果では、鋼管要素とCFRP要素の接着面におけるひずみとCFRP要素の最外層のひずみを示した。

表-3.4 解析要素の物性値

要素	厚さ (mm)	弾性係数 (N/mm ²)		ポアソン比 ν	せん断弾性係数 G (N/mm ²)
		E_x	E_y		
鋼管	10.3	200,000	—	0.3	77,000
水中硬化形エポキシ樹脂	2.00	1,090	—	0.38	400
CFRP	2.78	97,000	1,400	0.38	490

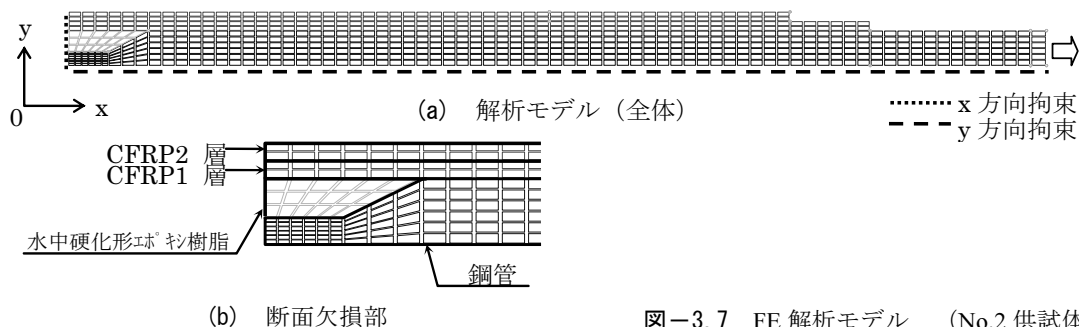


図-3.7 FE解析モデル (No.2 供試体)

表-3.5 断面欠損部のひずみ

供試体 No.	鋼管要素 (μ) ϵ_{s-FM}	CFRP 要素 (μ)	鋼管ひずみ(μ) ϵ_{s-E}	$\epsilon_{s-FM} / \epsilon_{s-E}$
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

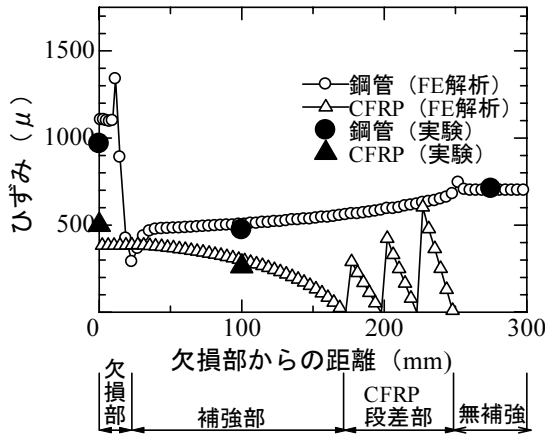


図-3.8 ひずみ分布 (No.2 供試体補強 2)

FE 解析結果と実験結果はほぼ一致しており、断面欠損部における CFRP 要素のひずみは、鋼管要素のひずみに追従できていないことが分かる。このことから、断面欠損部では、弾性係数の小さい水中硬化形エポキシ樹脂の存在によって、鋼管に発生した応力が CFRP スtrandシートに十分に伝達されていないと考えられる。つまり、断面欠損部中央では鋼管と CFRP スtrandシートの完全合成は成り立っていないといえる。

No.1 供試体および No.2 供試体の補強 1 についても同様の解析を行い、断面欠損部における鋼管要素のひずみ ϵ_{s-FM} と CFRP 要素のひずみを算出した。結果を表-3.5 に示す。また、完全合成断面の成立を仮定して式(1)により算定した鋼管ひずみ ϵ_{s-E} 、また、 ϵ_{s-FM} と ϵ_{s-E} の比を同表に示した。 $\epsilon_{s-E} / \epsilon_{s-FM}$ は、断面欠損深さの小さい No.1 供試体で大きく、断面欠損深さが大きい No.2 供試体で補強量が多い場合 (補強 2) で最も小さくなった。つまり、断面欠損深さが大きくかつ補強量が多いほど、部材は鋼管-CFRP スtrandシートの完全合成断面から乖離するといえる。 $\epsilon_{s-E} / \epsilon_{s-FM}$ の大小の傾向は、表-3.3 に示した補強後の曲げ剛性の実験値と計算値との比 EI_s / EI_{s-cal} と同様であった。このことから、断面欠損深さが大きいために水中硬化形エポキシ樹脂層が厚くなる、あるいは積層により CFRP スtrandシート層の引張剛性が大きくなるほど、鋼管-CFRP スtrandシート間の応力伝達が十分に行われず、結果として、シート接着によ

る鋼管の応力低減効果が低下することが考えられる。

ここで、図-3.6(c)に示したように、No.3 供試体では、円孔以外の箇所に貼付した鋼管のひずみと、CFRP スtrandシートひずみはほぼ一致していた。これは、鋼管周面に断面欠損が無い場合、水中硬化形エポキシ樹脂層は薄くなるため、鋼管-CFRP スtrandシートの応力伝達が良好となることによると考えられる。しかし、表-3.3 に示したとおり、曲げ剛性に対する補強効果は他と比較して最も小さかった。これより、断面欠損がごく局部的に生じている場合、断面欠損部への応力集中に加えて、鋼管-CFRP スtrandシート間の応力伝達が局部的に不十分となることにより、部材の曲げ剛性の向上、すなわち補強効果が計算値よりも低下することが考えられる。

一方、実部材から切り出した鋼管杭を用いた No.4 供試体では、補強対象区間全域にわたって、局部腐食 (孔食) と全面腐食が散在していた。表-3.3 の結果から判断すれば、孔食と全面腐食が散在する鋼管に対しては、局所的な切削により断面欠損を設けた鋼管よりも、提案工法による補強効果が発揮されやすかった。しかし、補強効果の程度は、孔食の程度や位置・数量、また部材の全体的な腐食傾向に大きく影響されることが考えられるため、提案工法による補強効果については、今後さらなる検討が必要である。

(3) 定着長が補強効果に及ぼす影響

No.2 供試体を対象として、CFRP スtrandシート端部の定着長を変化させた FE 解析を行った。補強 1 (定着長 250mm) について定着長を 300 mm, 350 mm とした場合、補強 2 (定着長 250 mm) について定着長 350 mm, 450 mm, 550 mm とした場合について検討した。

図-3.9 に定着長と、断面欠損中央部における鋼管要素のひずみと最外層の CFRP 要素のひずみの関係を示す。補強 1 では、定着長によらず、断面欠損部中央の鋼管要素および CFRP 要素のひずみがほぼ一定であったことから、定着長は実験で用いた 250 mm で十分であったことが伺える。一方、補強 2 では、定着長が長いほど、鋼管要素のひずみは低下し、CFRP 要素のひずみが増加する傾向であり、定着長 450 mm 以上で両者はほぼ一定とな

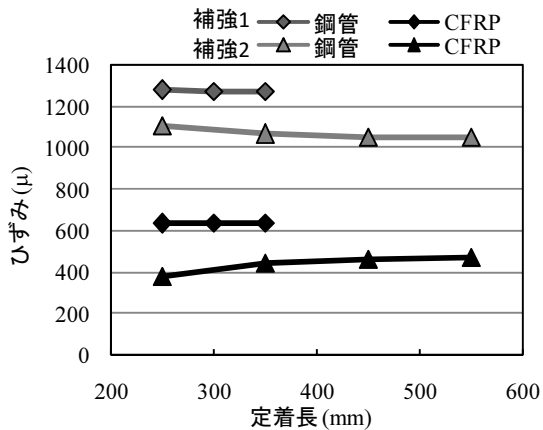


図-3.9 定着長の影響 (No.2 供試体)

った。このことから、部材の補強量に応じて、期待される補強効果を発揮するための最適な定着長を設定する必要があることが考えられる。しかし、最適な定着長についても、部材に生じる断面欠損の程度や位置・数量等に大きく影響されることが考えられるため、必要定着長の設定方法についても、今後の検討が必要である。

3.5 まとめ

本章では、水中硬化形エポキシ樹脂を用いた CFRP ストランドシート接着工法による補強効果を部材レベルで確認することを目的として、断面欠損を設けた鋼管供試体と、実際の港湾構造物から切り出した鋼管杭に提案工法を適用し、部材の耐荷力および曲げ剛性の向上等の補強効果について実験的検討を行った。その結果、鋼管供試体の曲げ載荷試験の結果、腐食を模擬した断面欠損部あるいは孔食部の鋼管の降伏以前までは、鋼管とシートは接着面全面にわたって良好な接着を保ち、シート接着による応力低減効果が確認された。また、シートに局所的なはく離が生じた後も、引張側のシート接着端部にはく離が生じるまで、あるいは圧縮側のシートに圧壊が生じるまでは、シートが荷重を負担するため、補強した部材の耐荷力は補強前と比べて向上することが確認された。

また、有限要素解析により、断面欠損の形状が部材の補強効果に及ぼす影響について検討した結果、断面欠損深さが大きいために水中硬化形エポキシ樹脂層が厚くなる、あるいは補強によりシート層の引張剛性が大きくなるほど、鋼管-シート間の応力伝達が十分に行われず、結果としてシート接着による鋼管の応力低減効果が低下することが明らかになった。加えて、シートの必要定着長について検討した結果、部材の補強量に応じて最適なシートの定着長を設定する必要があることが示された。しかし、提案工法による補強効果の程度および最適な定

着長については、部材に存在する孔食の程度や位置・数量等の全体的な腐食傾向に大きく影響されることが予測される。このため、提案工法による補強効果の定量評価、および最適な定着長の設定などの補強設計手法については、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、港湾鋼構造物を対象とした補強工法として、水中硬化形エポキシ樹脂を用いた CFRP ストランドシート接着工法を提案し、その補強効果について検討した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼板の錆層を完全に除去した後に提案工法を適用すれば、従来の炭素繊維シート接着工法とほぼ同等の鋼板とシートの一体性が確保できる。
- (2) 提案工法により補強した鋼板供試体は、断面欠損率 50%以下であれば、断面欠損部の降伏以前まで鋼板と CFRP ストランドシートの完全合成断面として取り扱うことが可能である。
- (3) 提案工法により補強した鋼管供試体では、鋼管の断面欠損部あるいは孔食部の降伏以前までは、補強による応力低減効果が期待できる。
- (4) 断面欠損深さが大きい、あるいは補強により CFRP ストランドシート層の引張剛性が大きくなるほど、鋼管-CFRP ストランドシート間の応力伝達が十分に行われず、提案工法による応力低減効果は低下する。
- (5) 部材の補強量に応じて、最適な CFRP ストランドシートの定着長を設定する必要がある。

5. おわりに

本研究は、日鉄コンポジット(株)との共同研究「FRPを用いた港湾構造物の補修・補強に関する共同研究」により実施したものである。

本研究では、水中での施工が可能な港湾鋼構造物の補強工法を提案し、実際の環境下で腐食した鋼管杭の部材剛性が提案工法により向上できることを示した。しかし、今後、提案工法の実構造物への適用を実現するためには、本研究により明らかとなった種々の技術的課題の解決に加えて、鋼材塑性域における部材の力学的挙動や、動的応力が作用する場合における補強効果の変化などを把握する必要がある。あわせて、長期曝露試験による耐久性評価についても実施する必要がある。

さらに、今後ますます増えていくことが予測される港

湾鋼構造物の補修・補強ニーズに応えるためには、本研究で提案した工法に限らず、補修・補強工法の選定スキームの確立や、画期的な補修・補強技術の開発に引き続き取り組んでいくことが重要である。

(2010年1月27日受付)

謝辞

共同研究「FRPを用いた港湾構造物の補修・補強に関する共同研究」の実施にあたってご協力いただいた戴建国氏（元 港湾空港技術研究所 LCM研究センター 研究官，現 香港理工大学 助教授）に謝意を表す。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版），沿岸技術ライブラリーNo.35，2009年。
- 2) 港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術ライブラリーNo.26，沿岸技術研究センター，2007年。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2007年。
- 4) 杉浦江，小林朗，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，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.4，2008年，pp.806-813。
- 5) 森田幹郎，金原勲，福田博：複合材料，1988年，pp.13-24。

付録A 鋼板供試体の引張試験結果

付録B 鋼管杭の腐食状況

付録 A 鋼板供試体の引張試験結果

図-A.1(a)～(c)に、従来の炭素繊維シート接着工法と提案工法を適用した鋼板供試体の荷重と供試体中央における鋼板のひずみの関係を示す。また、各鋼板供試体の損傷荷重と損傷状況を表-A.1に、破壊面の状況を写真-A.1に示す。

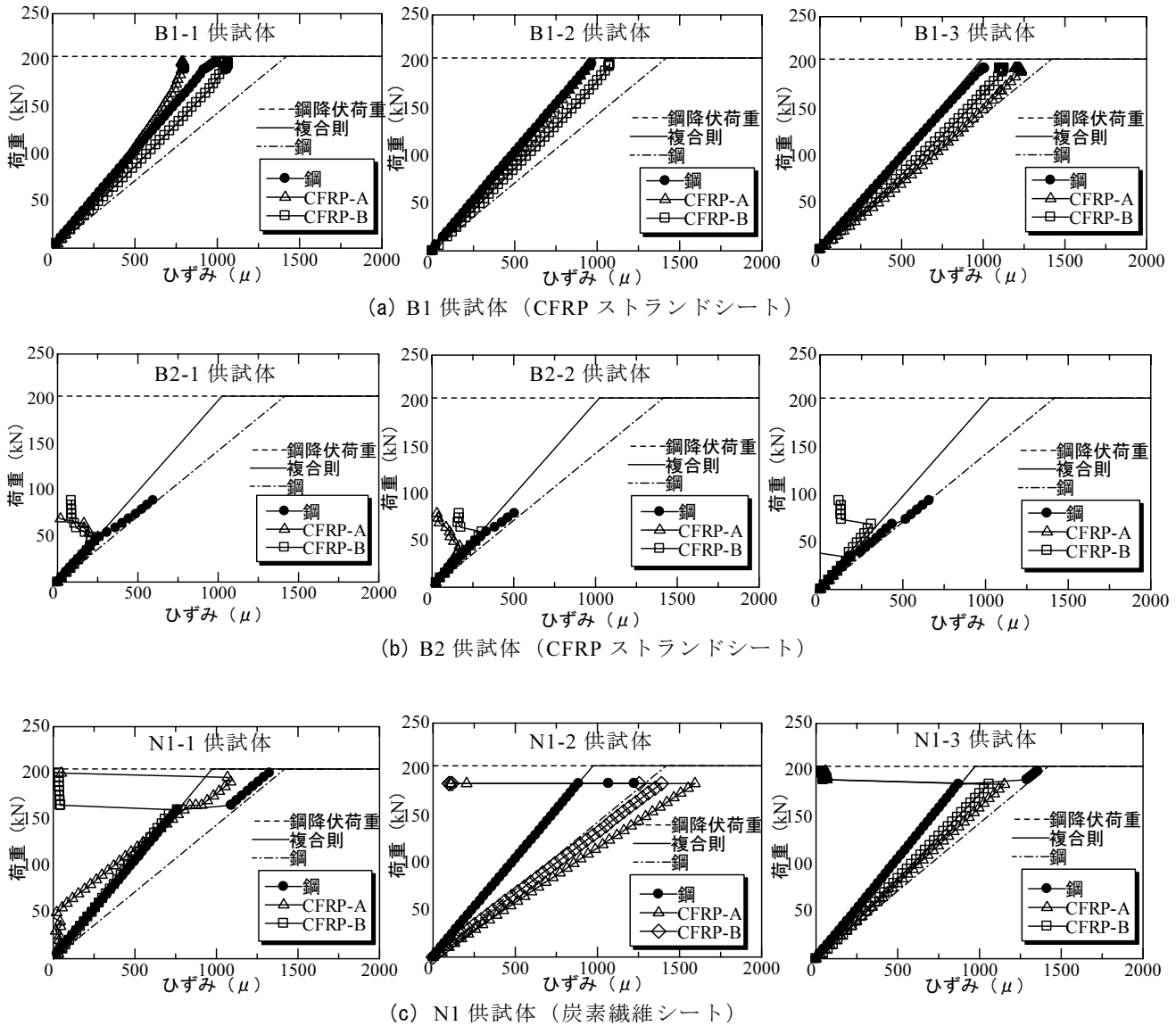


図-A.1 引張試験用鋼板供試体の中央における鋼板のひずみと荷重の関係

表-A.1 鋼板供試体の損傷荷重と損傷状況

供試体 No.	損傷荷重	損傷状況	破壊面
N1-1	155kN	端部はく離	樹脂と鋼板界面
N1-2	165kN	端部すべり	樹脂と鋼板界面
N1-3	185kN	端部はく離	樹脂と鋼板界面
B1-1	170kN	端部すべり	樹脂の層内
B1-2	160kN	端部すべり	樹脂の層内
B1-3	193kN	端部すべり	樹脂の層内
B2-1	40kN	端部すべり	錆の層内
B2-2	35kN	端部すべり	錆の層内
B2-3	30kN	端部すべり	錆の層内



B1-1 供試体



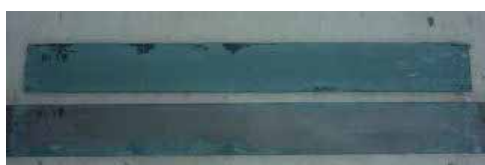
B2-1 供試体



B1-2 供試体



B2-2 供試体



B1-3 供試体



B2-3 供試体

(a) B1 供試体

(b) B2 供試体



N1-1 供試体



N1-2 供試体



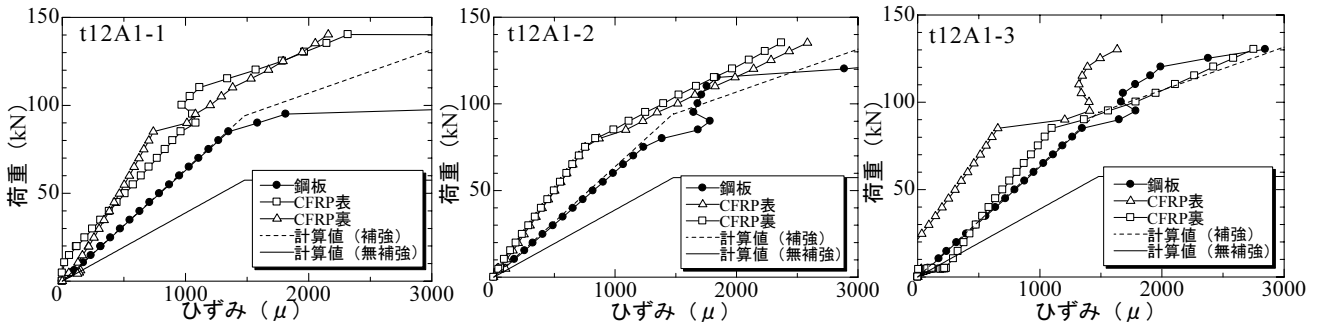
N1-3 供試体
(c) N1 供試体

写真-A.1 鋼板供試体の破壊面の状況
(各写真上：シート，下：鋼板)

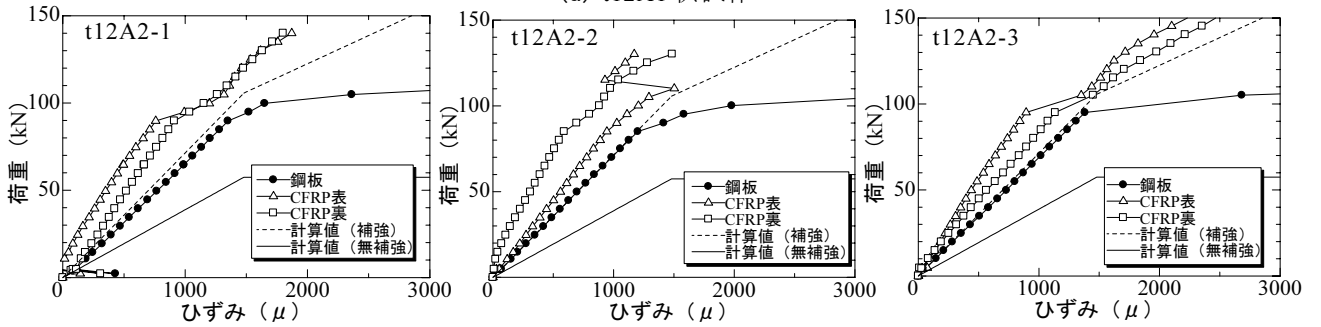
表-A.2 に、断面欠損を設けた鋼板供試体の諸元と降伏および最大荷重を示す。また、各供試体における荷重-断面欠損部のひずみ関係を図-A.2(a)～(g)に示す。ここでは、本編 2.3 に示した引張試験用供試体に加えて、φ30 mm、欠損深さ 6.6 mm の円孔を有する鋼板供試体 (t16B2 シリーズ) に関する実験結果も掲載する。

表-A.2 鋼板供試体の諸元および降伏・最大荷重

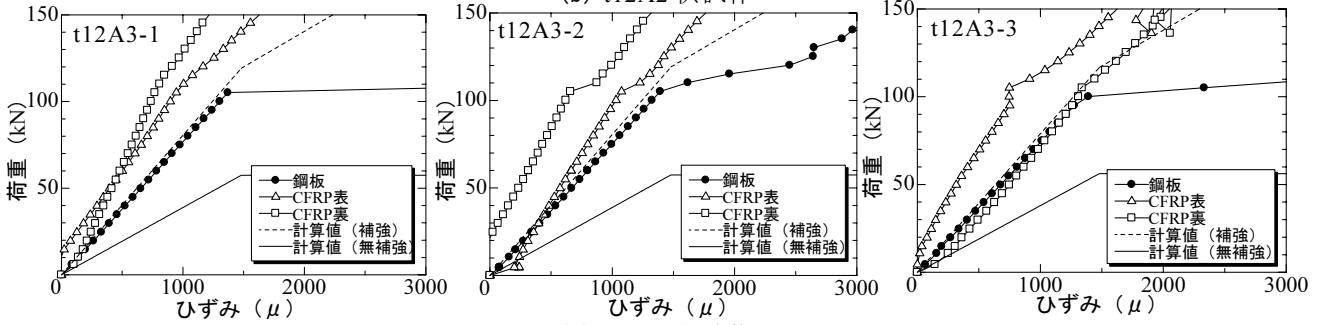
供試体名	諸元		計算値			実験結果		
	健全部 断面積 mm ²	欠損部 断面積 mm ²	健全部 降伏荷重 kN	欠損部 破断荷重 kN	欠損部 降伏荷重 kN	欠損部 降伏荷重 kN	最大荷重 kN	破壊状況
t12A1-1	585	194	173	154	94	85	145	欠損部 CFRP 破断
t12A1-2	584	197	173	155	95	75	140	欠損部 CFRP 破断
t12A1-3	584	192	173	153	93	85	135	欠損部 CFRP 破断
t12A2-1	585	196	173	170	106	90	150	欠損部 CFRP 破断
t12A2-2	582	192	172	169	105	85	132	欠損部 CFRP 破断
t12A2-3	580	201	172	172	107	95	160	欠損部 CFRP 破断
t12A3-1	584	200	173	201	120	105	174	欠損部 CFRP 破断
t12A3-2	585	198	173	201	119	105	170	欠損部 CFRP 破断
t12A3-3	584	190	173	198	117	100	170	端部 CFRP 剥離
t16A1-1	776	396	219	208	147	155	215	欠損部 CFRP 破断
t16A1-2	775	396	219	208	147	165	189	タブ内 CFRP 破断
t16A1-3	775	397	218	208	147	170	205	欠損部 CFRP 破断
t16A2-1	775	398	219	224	158	165	175	欠損部 CFRP 破断
t16A2-2	775	398	218	224	158	150	195	タブ内 CFRP 破断
t16A2-3	774	393	218	223	156	160	165	タブ破断
t16A3-1	778	398	219	255	170	170	195	タブ近傍 CFRP 破断
t16A3-2	774	395	218	254	169	160	170	タブはく離
t16A3-3	774	399	218	255	170	180	215	タブはく離
t16B2-1	775	358	218	222	155	110	140	タブはく離
t16B2-2	776	364	219	225	158	100	182	タブはく離
t16B2-3	772	362	218	225	158	100	195	CFRP 破断



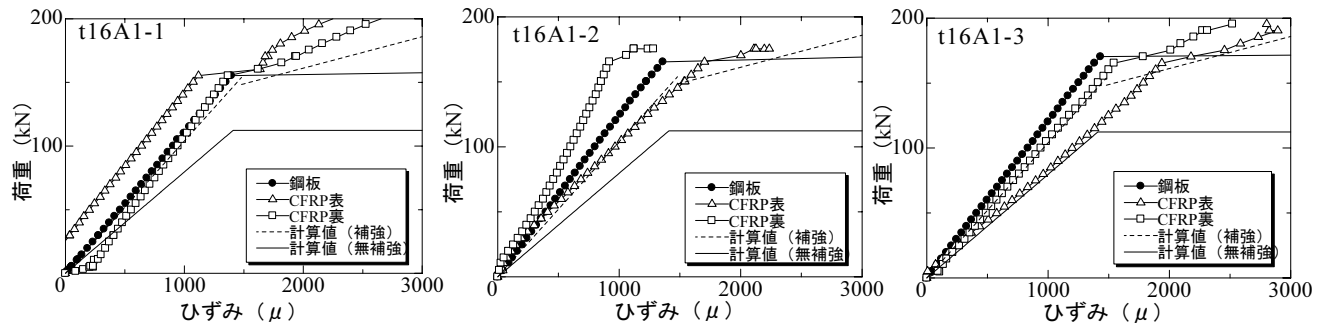
(a) t12A1 供試体



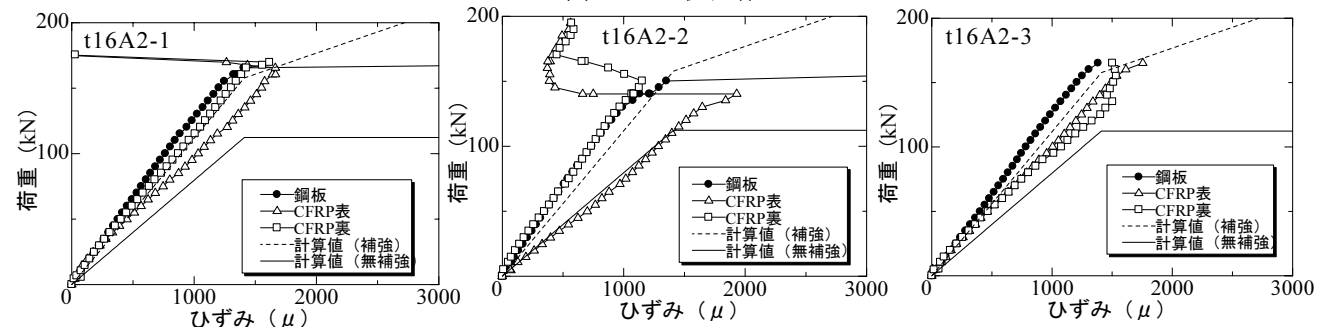
(b) t12A2 供試体



(c) t12A3 供試体



(d) t16A1 供試体



(e) t16A2 供試体

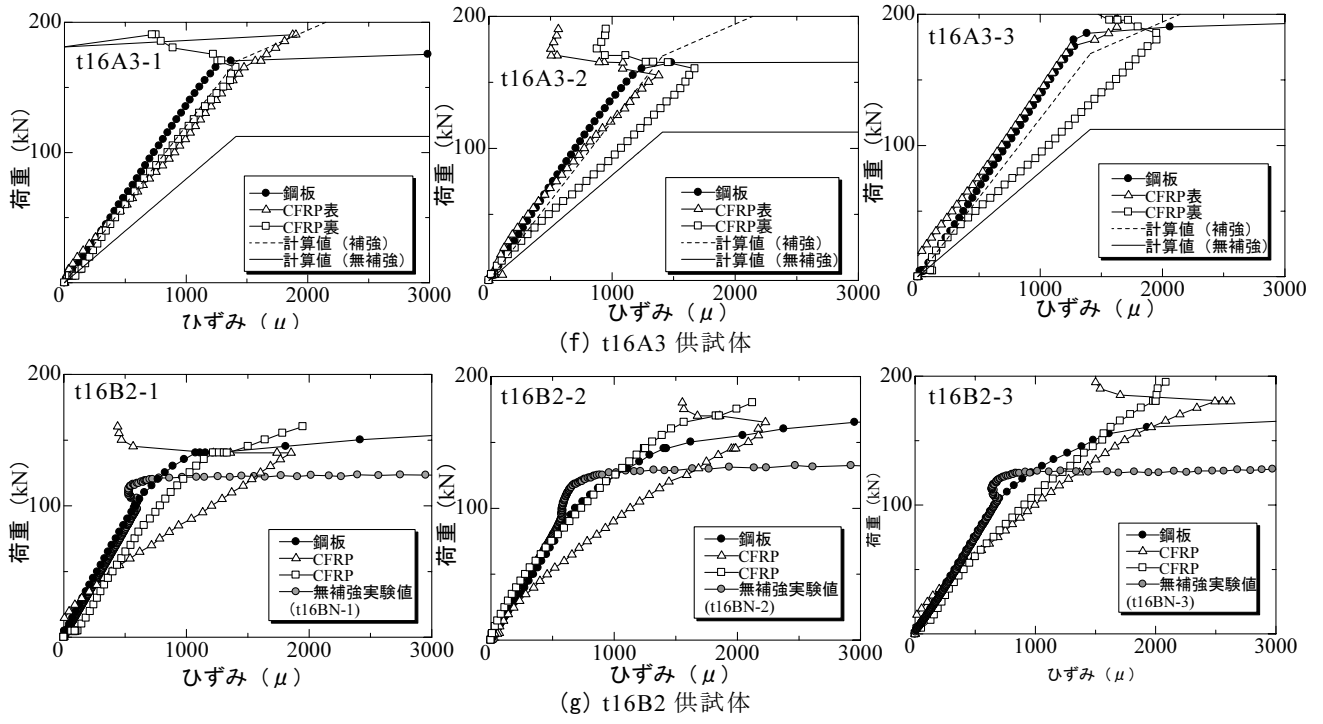


図-A.2 断面欠損部における荷重-ひずみ関係

付録 B 鋼管杭の腐食状況

写真-B.1 (a)～(c)に鋼管の曲げ荷試験に用いた No.4 供試体の腐食状況を示す.



(a) 曲げ荷試験時の下面側



(b) 曲げ荷試験時の上面側



(c) 曲げ荷試験時の側面



写真-B.1 鋼管杭の腐食状況

港湾空港技術研究所資料 No. 1217

2010.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。