

海洋環境下における鋼板の CFRP スtrandシート接着補強効果に関する検討

Research on strengthening of steel plate by bonding CFRP strand sheet under marine environments

立石晶洋*, 小林朗**, 横田弘***, 岩波光保****, 加藤絵万****

Akihiro Tateishi, Akira Kobayashi, Hiroshi Yokota, Mitsuyasu Iwanami, Ema Kato

*日鉄コンポジット株式会社姫路工場技術部 (〒671-1123 兵庫県姫路市広畑区富士町 1)

**日鉄コンポジット株式会社社会資本材料事業部技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3-8)

***北海道大学大学院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 条西 8 丁目)

****独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

A port steel structure under marine environments often shows structural performance degradation due to loss in steel cross section caused by corrosion. Decrease in cross section is sometimes remarkable in splash and tidal zones of steel pipes and steel sheet piles. 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 to investigate its applicability to port steel structures. CFRP strand sheet was bonded with epoxy lining material that could be hardened in the water on a steel plate having a purpose-made geometry to simulate the real corrosion. As a result, it was proved that the CFRP strand bonding method reduces the stress of corroded steel plate under marine environments.

Key Words: port steel structure, steel corrosion, strengthening, CFRP strand sheet, underwater application

キーワード: 港湾鋼構造物, 鋼材腐食, 補強, CFRP スtrandシート, 水中施工

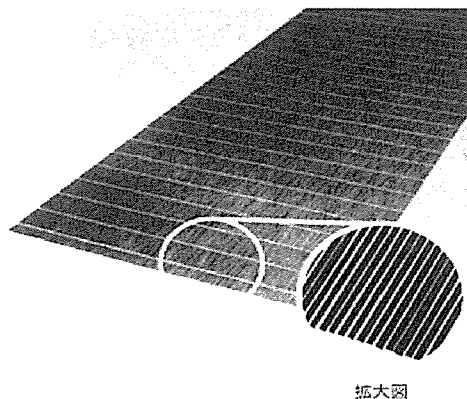
1. はじめに

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、飛沫帯と平均干潮面直下に位置する鋼管杭や鋼管矢板では、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多い。そのため、簡易に行え、海中と気中の両方で施工可能な補修・補強工法を提案することが必要である。

一方、FRP を用いた補修・補強工法は補強材が高強度と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、陸上の構造物で実績を増やしてきた。FRP 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のため、重機を用いずに施工ができる。しかし、FRP の補修・補強工法でもっと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型エポキシ樹脂と、現場で含浸・脱泡の必要のない CFRP スtrandシート (図-1) を用いる工法を検討した。CFRP スtrandシートとは、炭素繊維のStrand (約 10 μ m の炭素繊維の数千本の束) を 1 本ずつ硬化させた CFRP スtrandをすだれ状に加工した補強材である。

既往の研究¹⁾においては、腐食や断面欠損のない鋼板を用いて、気中で炭素繊維シートを接着した試験体と水中で CFRP スtrandシートを接着した試験体の引張試験を行い、これらの接着性と補強効果を比較した。その



拡大図

図-1 CFRP スtrandシート

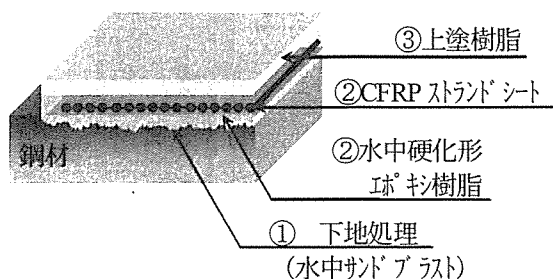


図-2 補強方法概略図

結果、水中で施工した CFRP スtrandシートは、気中で接着した炭素繊維シートと同等の接着性と鋼板の応力低減効果を発揮できることを確認した。

本研究では、腐食により断面欠損した鋼板に対する CFRP スtrandシートの補強効果を確認するために、断面欠損を設けた鋼板に CFRP スtrandシートを水中接着した試験体の引張試験を行い、接着性および補強効果について検討した。なお、既往の実験では気中でブラスト処理した鋼板を用いたが、本研究では水中でブラスト処理した鋼板を用いて引張試験を行い、より実際の水中施工に近い条件で施工した場合の接着性について検討した。

2. 補強方法

補強方法の概略を図-2 に示す。施工は、以下に示す①から③の順序で行うこととした。①補強する鋼材を水中サンドブラストにより、下地処理する。②鋼材面に水中硬化形エポキシ樹脂を塗布し、その中に CFRP スtrandシートを埋め込むように接着する。③最後に耐候性のある上塗樹脂を塗布する。試験体の作製においては、表面にひずみゲージを貼付し、CFRP 表面のひずみを測定するため、③を省略した。

本補強方法では、腐食により断面欠損した港湾鋼構造物と CFRP スtrandシートの一体性が確保できることにより、鋼材の発生応力度が低減され、構造物の耐力や剛性が向上することを目的としている。そのため、下地処理は、接着性を確保する必要があるため、水中施工形被覆工法で行われている水中サンドブラストを採用した²⁾。また、CFRP スtrandシートを採用する場合、樹脂に埋め込む際に CFRP スtrandの隙間から樹脂と水が抜けるため、空気や水分が樹脂内に残存する可能性は低いと考えられる。

試験体の作製においては、実施工と同じ条件となるように水中サンドブラストを大型の水槽内で実施した (図-3)。サンドブラストには3号珪砂と4号珪砂を用いて空気圧 $0.5 \sim 0.7 \text{ N/mm}^2$ で行い、鋼板表面の黒皮がすべて除去されるまで処理した (図-4)。

サンドブラスト処理後は、鋼板を速やかに別の水槽に移し、水中で CFRP スtrand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

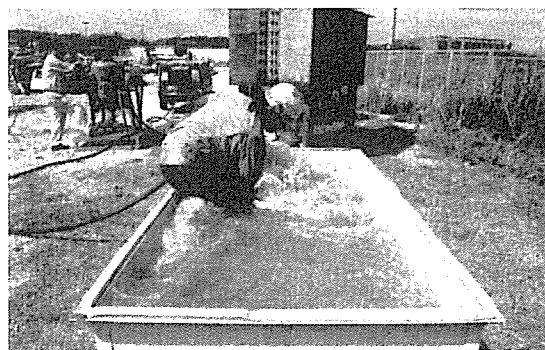


図-3 水中ブラスト状況

図-4 水中ブラスト後の鋼板表面状況

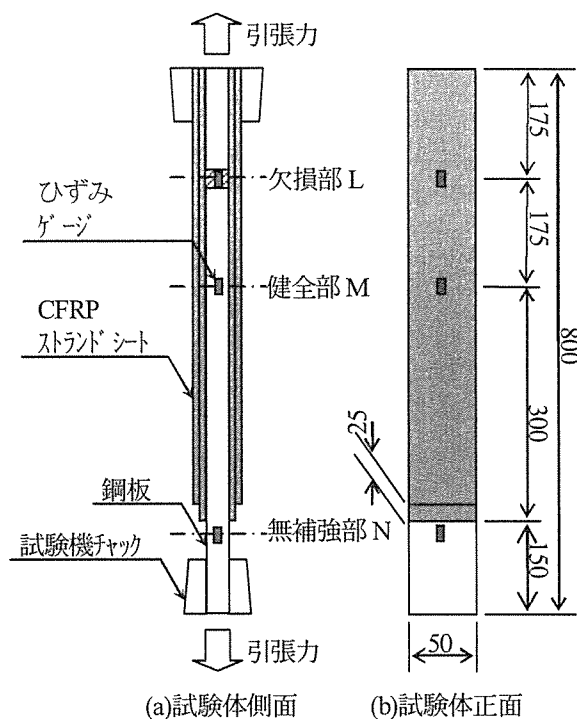


図-5 試験概略図

見られた。そのため、CFRP スtrandシートの接着前に、ナイロン繊維の研掃材でさびを除去した。CFRP 接着後は7日間水中で養生し、その後は気中でひずみゲージの接着等の試験準備を行った。なお、サンドブラスト、接着作業、養生は、水道水の中で行った。

使用した水中硬化形エポキシ樹脂は、CFRP の破断強度までの延性と接着強度を有し、CFRP を埋め込む程度の粘性を持ったパテ状の材料である。そのため、ヘラで施工することができる。

3. 引張試験

3.1 試験概要

CFRP スtrandシートを貼り付けた鋼板の一軸引張試験を行った。試験体は、図-5 に示す幅 50mm、長さ

表-1 試験パラメータ (n=3 の平均値)

No.	板厚 mm	欠損 形状	鋼板		補強量			計算値		
			健全部 断面積 mm ²	欠損部 断面積 mm ²	HM600 層数	HM900 層数	断面積 mm ²	欠損部 降伏荷重 kN	欠損部 破断荷重 kN	健全部 降伏荷重 kN
t12AN	12	A	585.45	184.91	—	—	0	55	—	173
t12A1	12	A	584.57	194.25	—	1層	38.64	94	154	173
t12A2	12	A	582.56	196.40	2層	—	50.04	106	170	172
t12A3	12	A	584.59	195.87	1層目	2層目	63.84	118	200	173
t16AN	16	A	774.41	394.78	—	—	0	111	—	218
t16A1	16	A	775.37	396.54	—	1層	38.64	147	208	219
t16A2	16	A	774.77	396.32	2層	—	50.04	157	224	218
t16A3	16	A	775.23	397.47	1層目	2層目	63.84	170	254	219
t16BN	16	B	794.90	420.74	—	—	0	119	—	224
t16B2	16	B	775.37	362.21	2層	—	50.04	158	224	219

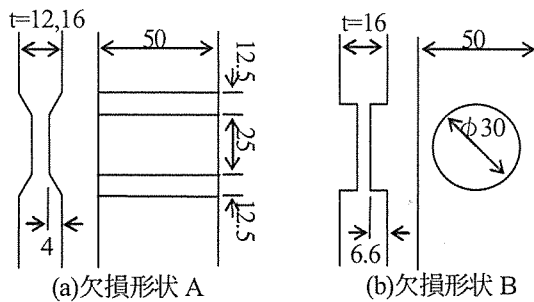


図-6 欠損形状図

800mm の鋼板に CFRP スtrand シートを接着したものとした。この試験体の両端を把持し、試験体の軸方向に引張応力を作用させ、破壊までの挙動を観察した。

鋼板に設けた欠損位置は試験体の上側とし、下側端部の定着長を確保するものとした。そのため、上側の端部ははく離防止として CFRP スtrand シートを試験機チャック部まで貼り付け、チャック部にはガラス繊維を貼り付け保護した。また、CFRP スtrand シートの下側の端部は、図-5 に示したように、応力集中の緩和のため 25mm ずらして貼り付けた³⁾。

試験機には 300kN 万能引張試験機を用い、5kN の漸増载荷により試験を行った。測定項目は、荷重と図-5 に示す測定点での鋼板のひずみと CFRP のひずみとした。

3.2 試験パラメータ

試験パラメータは、表-1 に示すように、鋼板の板厚と欠損形状および CFRP の補強量とした。鋼板には、板厚 12mm と 16mm の SS400 材を用い、欠損形状は図-6(a) に示す一様な鋼材減肉を模擬した欠損形状 A と、図-6(b) に示す孔あきを模擬した欠損形状 B とした。欠損形状 A の片面の切込み深さは、いずれの板厚に対しても 4mm とし、断面欠損率は、板厚 12mm の鋼板で 67%、板厚 16mm の鋼板で 50% とした。欠損形状 B の断面欠損率は 50% とした。

CFRP の補強量は 3 パターンとし、補強量が鋼板の降

表-2 鋼板の物性値

厚さ mm	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
12	296	447
16	282	439

* : 弾性係数 $E_s=200,000\text{N/mm}^2$

表-3 CFRP スtrand シートの物性値

品番	繊維 目付量 g/m ²	公称 断面積 mm ²	引張 強度* N/mm ²	弾性 係数* N/mm ²
FSS-HM-600	600	25.20	2,230	674,000
FSS-HM-900	900	38.64	2,490	700,000

* : 水中硬化型エポキシ樹脂との組み合わせ。

** : 計算には、理論弾性係数 $E_f=640,000\text{N/mm}^2$ を使用。

伏荷重と最大荷重に与える影響を検討した。補強量のパターン 1 は欠損部で CFRP が破断、パターン 2 は欠損部の CFRP 破断と無補強部の降伏が同時に発生、パターン 3 は無補強部が降伏するように設定した。その際、後述する式(1)に鋼板の降伏時のひずみと CFRP の破断ひずみを代入して表-1 に示す各荷重値を求めた。3 パターンとも欠損部の鋼板の降伏荷重がもっとも小さく、欠損部での鋼板の降伏が先行することが予想された。

試験体数は各パラメータにおいて 3 体とし、図-7 のように番号を付けた。

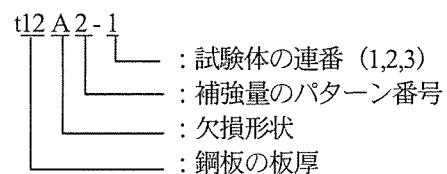


図-7 試験体番号

CFRP スtrand シートには、同じ補強量でも鋼板の応力低減効果が高くなる高弾性の炭素繊維からなるもの

を用いた。用いた鋼板およびCFRP ストランドシートの物性値をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。

4. 試験結果

4.1 荷重-ひずみ関係

図-8~10 に欠損部 (図-5 の L) と健全部 (図-5 の M で欠損部から 175mm 離れた位置)、無補強部 (図-5 の N で CFRP の端部下側) で測定された荷重-ひずみ関係を示す。鋼板ひずみの実験値は、試験体側面 2 点の平均値とし、CFRP の実験値は表裏でばらつきが大きかったため、これらをそれぞれ図に示した。また、補強の場合と無補強の場合の計算値も合わせて示した。計算値は

すべて式(1)に鋼材と CFRP の断面積を代入して算出した。円孔欠損の試験体の場合は、欠損断面積が最大となる直径位置での断面積を用いて計算を行った。実験結果において、鋼板と CFRP の荷重-ひずみ関係の勾配が一致し、また計算値の勾配と一致した場合は、鋼板と CFRP の一体性が確保され、式(1)の完全合成断面としての計算が可能となる。図-10 の欠損形状 B の試験体ではひずみに分布が見られたため、t16BN の鋼板のみの試験体の結果と合わせて示した。また、t16BN は欠損部の鋼板の断面積が t16B2 より大きかったため、断面積の比 0.86 を補正係数として荷重値に乘じた。

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

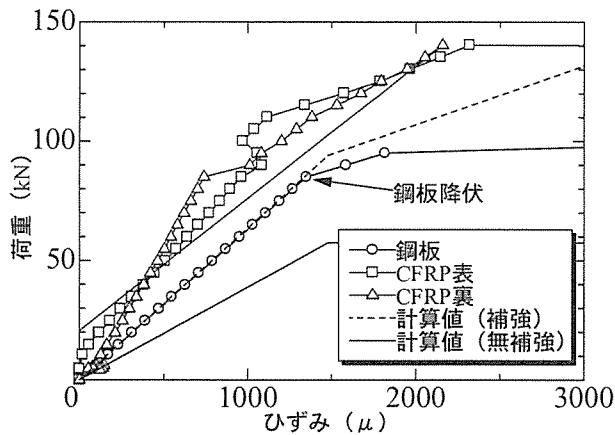


図-8(a) t12A1-1 欠損部の荷重-ひずみ

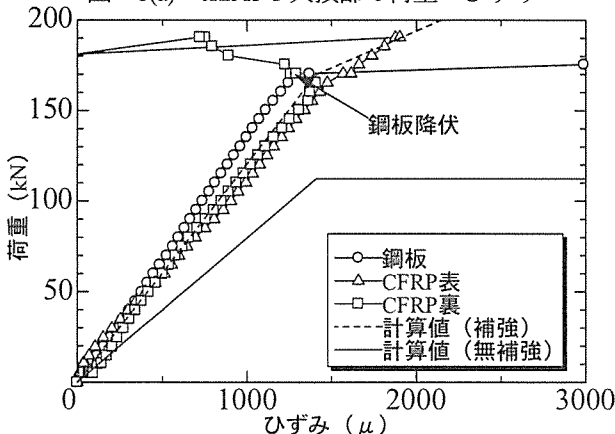


図-9(a) t16A3-1 欠損部の荷重-ひずみ

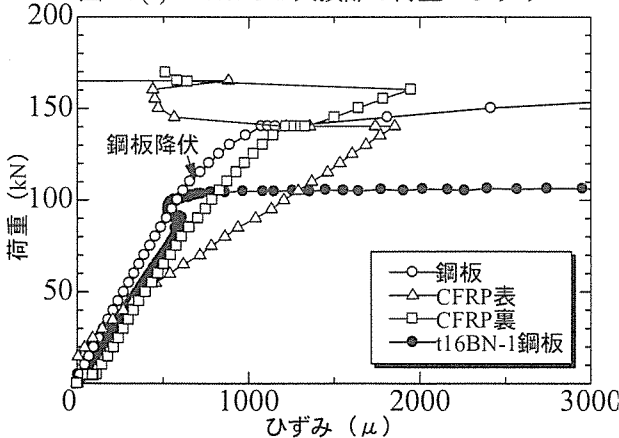


図-10(a) t16B2-1 欠損部の荷重-ひずみ

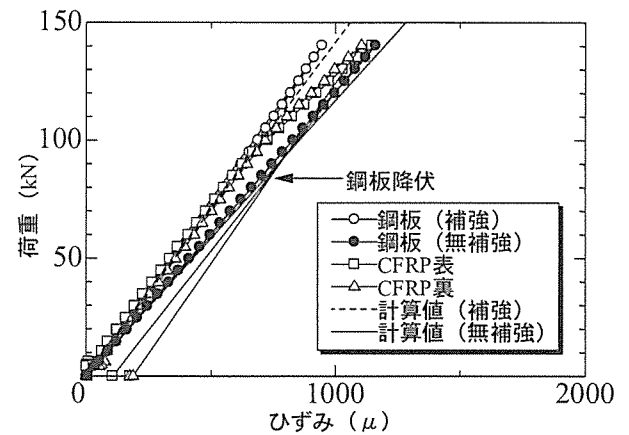


図-8(b) t12A1-1 健全部の荷重-ひずみ

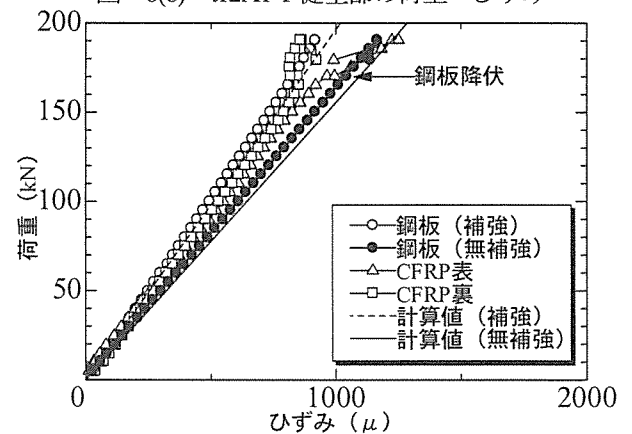


図-9(b) t16A3-1 健全部の荷重-ひずみ

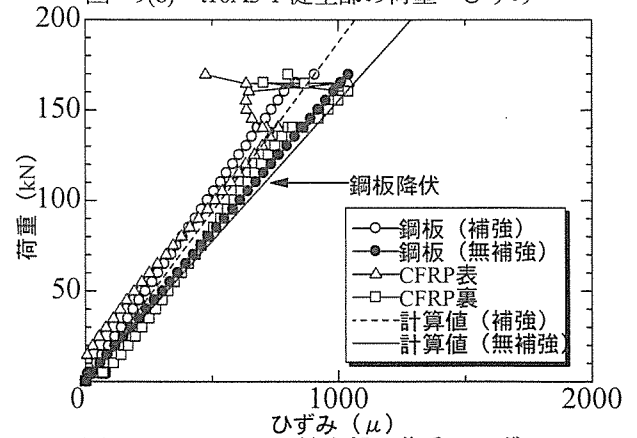


図-10(b) t16B2-1 健全部の荷重-ひずみ

T : 荷重 (kN), E_s : 鋼板の弾性係数 ($=200,000\text{N/mm}^2$)
 ε : ひずみ (μ), A_s : 鋼板の各位置での断面積 (mm^2)
 A_{cf} : CFRP スtrandシート の公称断面積 (mm^2)
 E_{cf} : CFRP の弾性係数 ($=640,000\text{N/mm}^2$)

板厚 12mm の t12A1-1 試験体では、鋼板の荷重－ひずみ関係は、欠損部 (図－8(a)), 健全部 (図－8(b)) ともに無補強の計算値より剛性が高く、鋼板が降伏するまでは、線形性を保ち、降伏荷重の実験値は補強時の計算値と一致した。これより、断面欠損がある場合でも CFRP による補強によって鋼板の剛性が高くなり、鋼板の発生応力度が低減され、降伏までの鋼板のひずみは、鋼板と CFRP が完全合成されているとして計算可能であることがわかった。一方、CFRP の荷重－ひずみ関係についてみると、健全部 (図－8(b)) では CFRP のひずみの実験値は計算値とほぼ一致したが、断面欠損部 (図－8(a)) では、CFRP のひずみの実験値は計算値よりも小さくなった。t12A のシリーズの試験体では補強量によらず、すべて同様の結果を示した。

図－9(a), (b)より板厚 16mm の t16A3-1 の試験体では、欠損部と健全部において、鋼板のひずみと CFRP のひずみは鋼板の降伏まで線形性を保ち、また計算値と一致した。この結果は補強量によらず t16A のシリーズの試験体に共通していた。つまり、t16A のシリーズの試験体では、水中サンドブラストを施し、水中施工した CFRP スtrandシートと鋼板の一体性が鋼板の降伏まで確保され、鋼板の応力度が低減されることがわかった。また、鋼板と CFRP が完全合成断面で計算可能であることが明らかとなった。

一方で、欠損形状 B の場合においては、図－10(b)より、健全部では CFRP 補強により鋼板の応力は低減されていた。また、図－10(a)より欠損部 (円孔部) においては、円孔部の鋼板側面の荷重－ひずみ関係は、補強時 (t16B2-1) の方が無補強 (t16BN-1) に比べてわずかに剛性の増加がみられた。

表－4 降伏荷重 (n=3 の平均値)

No.	欠損部降伏 kN	最大荷重 kN
t12AN	63	85
t12A1	82	138
t12A2	90	147
t12A3	103	171
t16AN	121	175
t16A1	163	203
t16A2	158	178
t16A3	170	193
t16BN	106	170
t16B2	103	172

4.2 降伏荷重

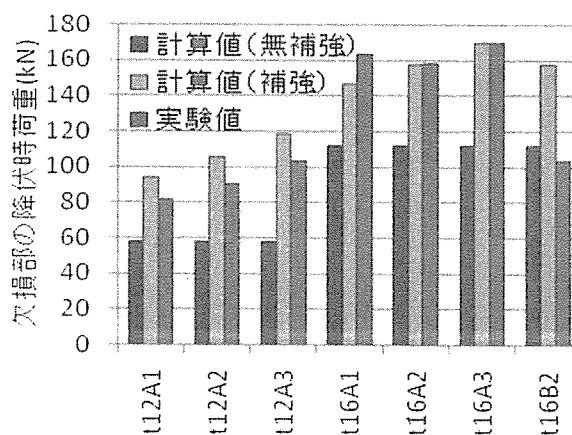
本検討では、図－8(a), 9(a), 10(a)に示す欠損部の荷重－ひずみ関係から、欠損形状 A では、降伏荷重は鋼板側面のひずみが線形性を失ったときの荷重とした。欠損形状 B については、鋼板の降伏が先行する欠損内面にゲージを設置できなかったため、鋼板側面のひずみの変化点を降伏点とした。t16BN では、荷重値が横ばいとなる点とした。また 4.1 と同様に t16B2 に対する断面積の比 0.86 を補正係数として荷重値に乗じた。

その結果を表－4 に、計算値との比較を図－11 に示す。結果は各パラメータ 3 体の降伏荷重の平均値で示した。図－11 より、降伏荷重は補強量に応じて概ね大きくなっており、補強量に応じて補強効果が得られることがわかった。

計算値と実験値の比較においては、t16A の試験体ではばらつきはあるものの、両者は概ね一致した。鋼板の降伏まで式(1)が成り立ち、鋼板と CFRP の完全合成断面として計算が行えるといえる。

しかし、t12A の試験体では、すべての補強量で降伏荷重の実験値が計算値より小さかった。この結果は前述の荷重－ひずみ関係において CFRP のひずみが計算値より小さく荷重分担が小さかったこと、ならびに、CFRP の表面ひずみが表裏で大きく異なっていることから推察されるように、試験鋼板の切削部でそりが発生し試験機にチャッキングした時点で曲げ変形が生じ初期ひずみが発生していたことなどが考えられる。t12A 試験体は、鋼板の断面欠損率が 67%と大きく、このように欠損の大きい鋼板においては、CFRP の荷重の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。この原因として考えられる欠損部からの CFRP の必要定着長さや、補強効率についても今後検討が必要であると考えられる。

円孔の欠損形状 B の試験体では、降伏荷重の実験値は無補強の計算値と変わらなかった。図－10(a)の断面欠損部の荷重－ひずみ関係をみると、無補強の場合は円孔端面で鋼板の降伏後側面のひずみも急激に変化して荷重 106kN でほぼ全断面降伏して剛性を失っていた。これに



図－11 降伏荷重 (n=3 の平均値)

対し、CFRP で補強した場合は、円孔部で降伏した後の鋼板側面のひずみの変化は小さく剛性は緩やかに低下し、荷重 140kN で全断面降伏に至って

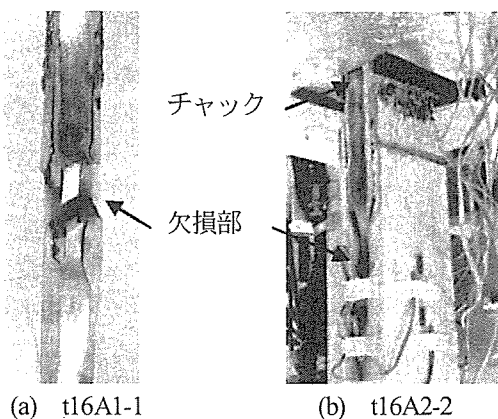


図-12 破壊状況

おり、円孔部で降伏後は補強による効果が見られた。一方、降伏荷重はほとんど変わらず、本検討の範囲では円孔による応力集中を低減する効果は見られなかった。本試験では試験体の幅に対して、円孔欠損の径が大きく、応力集中が生じる円孔から試験体側面までの幅が確保できず、応力集中が顕著となり、十分な補強効果を得られなかったと考えられる。

4.3 最大荷重および破壊状況

表-4 に最大荷重の実験値を示す。欠損形状 A の試験体において、無補強の試験体と補強された試験体を比較すると、補強試験体の方の最大荷重が大きくなった。また、最大荷重は降伏荷重よりも大きく、鋼板の降伏後も CFRP が荷重を負担していることがわかった。欠損形状 B の最大荷重は、無補強試験体と補強された試験体でほとんど変わらなかった。

試験体の破壊状況は、すべての試験体において欠損部の鋼板の降伏が先行し、その後、補強量に拘わらず 21 体中 20 体は、欠損部で鋼板と CFRP の破断もしくは CFRP スtrandシートを把持した上側チャック近傍で CFRP 破壊が生じた。

図-12 の破壊状況が示すように、破断が生じた試験体 (a) と上側チャック近傍で破壊が生じた試験体 (b) とともに欠損部で鋼板と CFRP のはく離が生じており、鋼板の降伏後に欠損部で変形が大きくなったと考えられる。図-8(a) および図-9(a) において鋼板の降伏後に鋼板のひずみが計算値にくらべ大きく増加していることから、鋼板の降伏後は欠損部の鋼板の変形が大きくなったことがわかる。補強量の多い試験体の t12A3 と t16A3 の最大荷重の実験値は、欠損部の降伏後に CFRP 端部の降伏が生じる計算耐力とほぼ等しかったが、t12A3-3 のみ CFRP 端部で鋼板が降伏し、CFRP がはく離した。また、t12A3-3 のみ CFRP 端部がはく離し破壊に至ったものの、図-13 より鋼板の降伏後の荷重-ひずみ関係は、ひずみが大きく増加し、鋼板と CFRP の一体性が確保されなかった。

欠損を有する鋼板の補強においては、鋼板の降伏以後も CFRP の荷重分担がみられ、試験体の最大荷重は増加した。このことは耐荷力の向上には有用と考えられる。

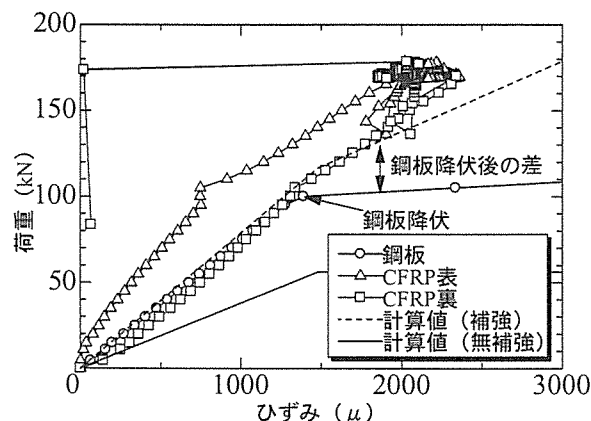


図-13 t12A3-3 欠損部の荷重-ひずみ

しかし、鋼板の降伏以後は、CFRP のはく離を生じる可能性があることや鋼板の塑性ひずみの算定方法や塑性繰返し補強効果やはく離性状に与える影響など設計上の課題も多い。したがって現状では、欠損部(補強部)での鋼板の降伏を生じさせないように設計する必要があると考えられる。

5. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を示す。

- (1) 一様な研削の欠損形状 A の試験体では、水中で施工した CFRP スtrandシートと鋼板の接着性が確保され、CFRP スtrandシートの補強によって鋼板の応力度が低減されることがわかった。また、鋼板の降伏荷重は、補強量に応じて増加することがわかった。
- (2) 断面欠損率 67% の t12A 試験体では、降伏荷重の実験値は計算値よりも小さくなった。荷重-ひずみ関係において CFRP のひずみが計算値より小さく、CFRP の負担荷重が小さくなり、その結果降伏荷重も小さくなったと考えられる。一方で欠損率 50% の t16A 試験体では、鋼板と CFRP の荷重-ひずみ関係は計算値とほぼ一致した。また、降伏荷重の実験値も計算値と一致し、鋼板と CFRP スtrandシートが完全合成断面として計算可能であることがわかった。
- (3) 欠損部の鋼板の降伏後も、CFRP の荷重分担がみられた。しかし、欠損部の鋼板の降伏後は、鋼板と CFRP の合成は成り立たないことがあることがわかった。

参考文献

- 1) 立石晶洋ら：水中硬化型エポキシ樹脂と FRP スtrand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。
- 2) 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（改訂版），1997。
- 3) 杉浦江ら：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。