

# 腐食した鋼矢板へ適用する片面当て板補修工法の耐力回復効果に関する基礎的研究

王 涛<sup>1</sup>・谷口 修<sup>2</sup>・内藤 英晴<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: tao.wang@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: osamu.taniguchi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup> フェロー会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: hideharu.naitou@mail.penta-ocean.co.jp

港湾施設における鋼矢板では、集中腐食により干潮面直下付近に孔開きや肉厚減少が生じやすく、それがエプロンの沈下や陥没及び鋼矢板耐力の低下に結びつくため、腐食により劣化した部材の力学性能を回復することは喫緊の課題である。本研究では、孔開きや肉厚減少が生じた鋼部材に対し、ワンサイドボルトを用いた当て板補修を行った場合の、引張耐力の回復効果と接合方法の有効性の確認を目的として、実験と解析の両面から検討を行った。その結果、ワンサイドボルトで当て板を母材に取り付ける補修方法により、補修後の耐力と部材剛性は無補修の場合に比べて大きな改善効果を得ることができた。また、数値解析による検証では、当て板の肉厚を増した場合よりリブ補強を行う方が耐力の向上効果は大きいことを確認した。

**Key Words :** *steel sheet pile, intensive corrosion, reduction of the cross-section, hole in the sheet pile wall, steel patch plate, recovery of capacity of force, effectiveness of the joint*

## 1. はじめに

高度経済成長期以降に集中的に整備された港湾施設では老朽化が大きな問題となっている。現在、係船岸の約半分は鋼構造物が占めており、その多くは港湾という厳しい環境下で長期間に渡って使用されている。特に、干満帯付近の激しい腐食性環境にある無防食状態の鋼矢板等では、集中腐食による断面欠損や孔開きなどの変状が発生しやすい<sup>1)</sup>。これらの変状は鋼矢板の耐力を低下させるだけでなく、孔開きからの裏埋め材の流出によるエプロンの沈下・陥没を引き起こすことにもなり<sup>2)</sup>、使用性や安全性の大きな低下に繋がることになる。そのため、腐食の進行した鋼矢板などは補修対策を講じる必要がある。

「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」<sup>3)</sup>では、劣化した鋼構造部材の補修・補強方法として鉄筋コンクリートあるいは鋼板を用いて劣化した鋼材表面を被覆する工法が示されている。しかし、鉄筋コンクリート被覆では複数本の水中スタットジベルを鋼管杭や鋼矢板に溶接後、鉄筋と型枠を組立てて水中コンクリートを打ち込むとい

った作業を行うため、小規模な補修に対しては煩雑で非効率なものとなる。

鉄筋コンクリート被覆以外の方法として、鋼部材の腐食部分に鋼板(当て板)を高力ボルトや溶接により取付ける方法がある。しかし、溶接による場合は、腐食により凹凸の生じた鋼部材表面では当て板との高い密着性を得られにくく、高い溶接品質の確保が難しい。また、水中溶接での強度低下や繰返し荷重による疲労強度の低下にも配慮が必要である。

一方、高力ボルトによる摩擦接合では、接合面での接触が十分に確保できず、設計で想定した荷重伝達を得られないことが懸念される。さらには、一般に高力ボルトの施工では、劣化した鋼材の両面から当て板を締付ける必要があるため、海水側からの作業が主となる護岸などの鋼矢板の補修・補強では適用は困難である。しかし、この高力ボルトによる当て板の締付けを片側からのみ行えれば、施工での大きな効率化を図ることができる。

そこで本研究では、摩擦接合と接着接合とを併用すれば腐食鋼材と当て板間のより確実な力の伝達を確保できると考え、片側からの締付けが可能な片側施工高力ボル

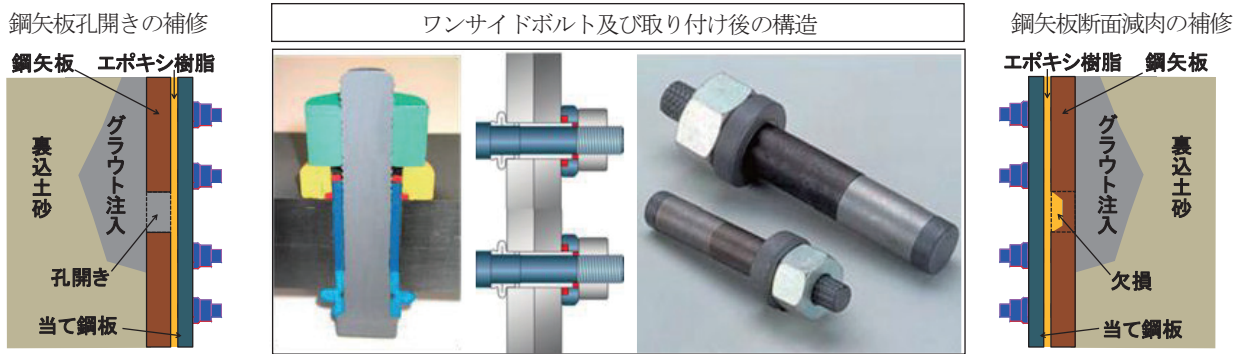


図-1 併用接合方法による補修の概略図

ト（以下、ワンサイドボルトと呼ぶ）を用いた摩擦接合と、エポキシ樹脂による接着接合の併用接合方法について、その効果について検討することとした。

図-1にその併用方法の概念図を示すが、母材（鋼矢板）と当て板との間にエポキシ樹脂を塗布した後、ワンサイドボルトを締付ける機構となっている。

検討対象とする劣化による損傷としては、腐食により鋼材肉厚が50%減少した場合と、部材平面積の50%の孔開きが生じた場合とした。

丹波らが行った接着剤を用いた当て板補修に関する研究<sup>4)</sup>を参考に、断面欠損した鋼材へ当て板補修を行った場合の耐力の改善効果について、引張載荷試験により検討した。さらには、当て板にリブを設けて剛性を高めた場合の補強効果について解析的検討を加えた。

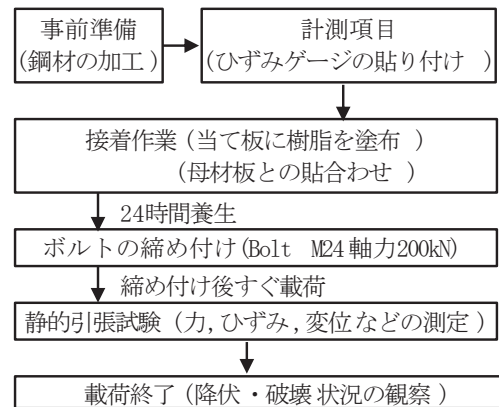


図-2 試験のフロー図

表-1 試験ケースと試験体の概要

試験体	母材の断面の板厚さ			当て板厚 鋼板
	健全	肉厚減	腐食孔	
	mm	mm	mm	mm
C1-F	13	-	-	-
C2-D	-	7	-	-
C3-H	-	-	□40×80	-
C2-D-S	-	7	-	8
C3-H-S	-	-	□40×80	8

健全	肉厚減少	孔開き	肉厚減少補修	孔開き補修
C1-F	C2-D	C3-H	C2-D-S	C3-H-S

## 2. 実験概要

本実験では、腐食劣化により肉厚減少および孔開きが生じた鋼材に対して、当て板補修による耐力の改善効果を引張載荷試験により確認することを主たる目的とした。その試験フローを図-2に示す。

### (1) 試験体の概要

試験ケースおよび試験体の概要を表-1に示す。試験で用いた母材鋼板は幅80mm、板厚13mm、長さ600mmである。当て板は幅80mm、板厚8mm、長さ300mmとし、母材および当て板の材質はともにSS400材とした。この鋼材の降伏点および引張強さは、295N/mm<sup>2</sup>および440N/mm<sup>2</sup>であった。

肉厚減少および孔開きなどの断面欠損を想定した鋼材に対する当て板の耐力改善効果を検証するため、これら断面欠損したときの降伏耐力が健全断面の50%程度となるよう、肉厚減少の厚さは6mm、孔開きの大きさは幅40mm×長さ80mmとした。なお、護岸の鋼矢板では一般に海水と接する側の腐食が激しくなる。そのため、表-1の肉厚減少(C2-D)ケースに示すように、鋼材の肉厚減少は片面側にのみ設定した。なお、「港湾鋼構造物防食・

補修マニュアル」における補修・補強用鋼板の最小板厚の規定に従い、当て板の厚さは8mmとした。ワンサイドボルトとしてはF8T相当の引張強度を有する呼び径24（最大外径24.9mm、最小外径24.5mm）のものを使用

表-2 エポキシ樹脂の仕様

主成分	変性エポキシ
可使時間	30 分
圧縮強度	(1day) 40N/mm <sup>2</sup> (7day) 85N/mm <sup>2</sup>
曲げ強度	45N/mm <sup>2</sup>
引張強度	30N/mm <sup>2</sup>
圧縮弾性率	4500N/mm <sup>2</sup>

(メーカーカタログより)

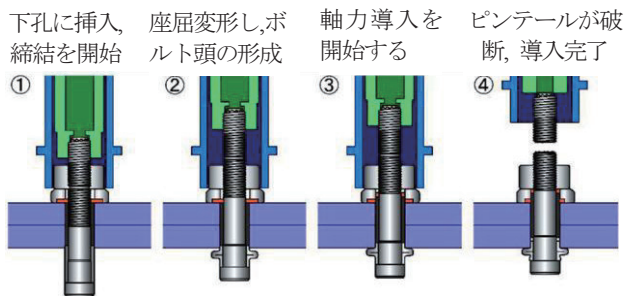


図-2 高力ワンサイドボルト締結概要図

した。

## (2) 試験体の製作

樹脂接着接合に使用した接着剤は2液混合型の常温硬化タイプのエポキシ樹脂であり、その物性を表-2に示す。潮位の影響を受ける港湾での補修・補強工事の施工性を考慮して、強度発現までの時間が比較的短いタイプのものを使用した。当て板は母材鋼板の中央の300mm×80mmの範囲に接着させたが、接着させる面にはブラストなどの処理は行っていない。

ワンサイドボルトによる締付け手順を図-2に示す。まずボルトを下孔に挿入し、専用シアーレンチで緊張してバルブスリーブを座屈変形させることでボルト頭を形成する。さらに締付けることでボルトに軸力を導入し、最後にピンテールの破断により締付けが完了する。

試験体の組立てに際して、母材と当て板とは常温環境下でエポキシ樹脂により接着させ24時間の養生を行った。エポキシ樹脂の硬化後、ワンサイドボルトを所定軸力(200kN)まで締付けを行うことで、接着接合と摩擦接合により母材と当て板を一体化させた。

## (3) 荷重方法と計測項目

引張試験は100tf万能試験機により漸増荷重により行ったが、その状況を写真-1に示す。荷重試験での測定項目は、母材鋼材と当て板の軸方向ひずみである。ひずみゲージの貼付位置を図-3に示す。なお、ひずみゲージが母材鋼材と当て板の接合に影響しないよう、鋼材表面に矩形の小さな溝を掘り、その中にひずみゲージを貼り付けた。

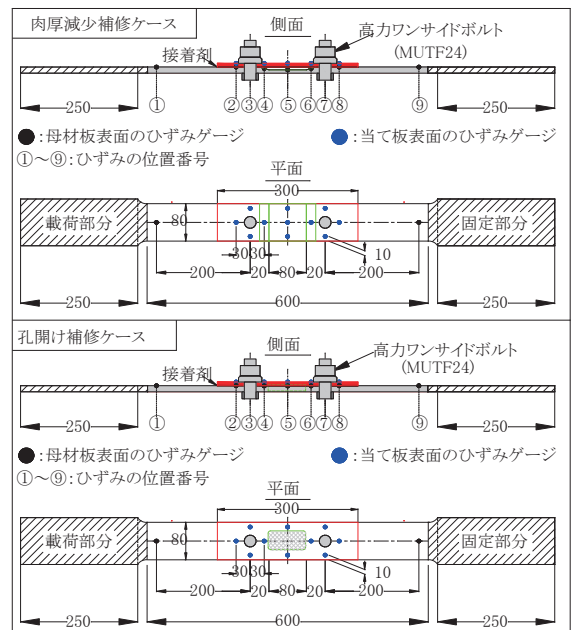


図-3 試験体の寸法及びひずみゲージの位置

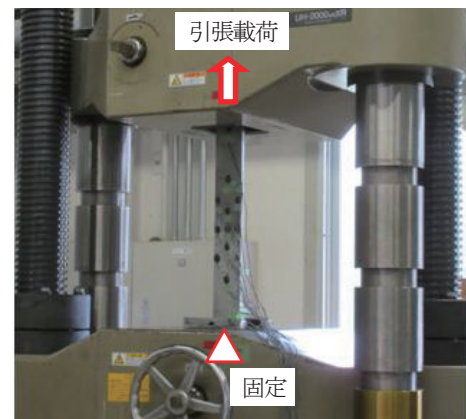


写真-1 健全試験体の荷重写真

## 3. 実験結果と考察

### (1) 剛性及び降伏耐力

当て板補修したケース(C2-D-S, C3-H-S)では母材鋼材の中央断面でのひずみが2%となるまで荷重し、無補修のケース(C1-F, C2-D, C3-H)では断面が破断するまで荷重した。全ケースにおける母材について得られた荷重とひずみの関係を図-4と図-5に示す。ここで縦軸の荷重比率とは、無補修の健全試験体(C1-F)の最大荷重(329kN)に対する各ケースでの荷重の比を表す。また、横軸のひずみは母材鋼材の中央位置におけるひずみの平均値を表している。

最大荷重は図-4と図-5中の凡例の末尾に示している。さらに、剛性とは降伏前の荷重とひずみ関係がほぼ直線的な弾性挙動を示す範囲での勾配と定義した。



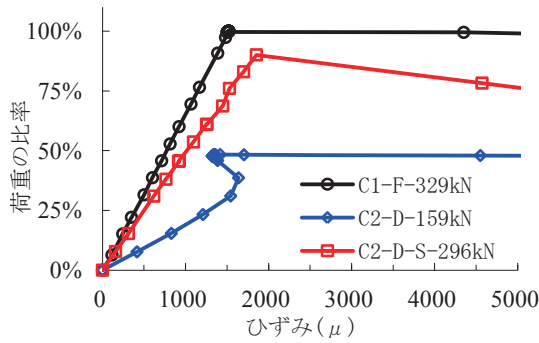


図-4 健全と断面減肉及び補修のひずみ-荷重の関係

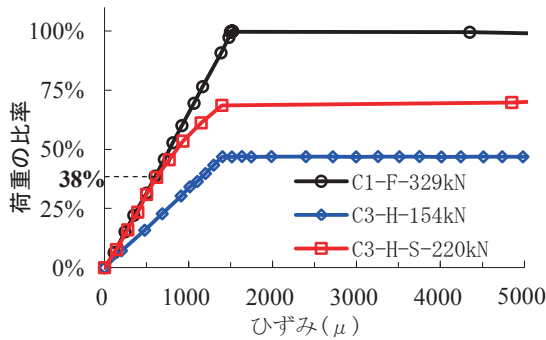


図-5 健全と孔開け及び補修のひずみ-荷重の関係

図-4 の C2-D では、最大荷重に達する前（塑性変形を示す前）に、荷重の増加に対してひずみの減少が見られる。これは引張荷重の偏心作用の影響と考えられる。すなわち、荷重作用線と減肉した断面の中心軸とが一致しないために引張荷重に加えて偏心モーメントが発生したと考えられる。その結果、断面が一様に降伏せず片端から順次降伏したために、全断面が降伏するまでの間は平均ひずみとしては見掛け上減少したようになるが、全断面が降伏した後は塑性ひずみの増加により、見掛け上のひずみの減少は無くなっている。

断面減肉に対する補修ケース(C2-D-S)の剛性（荷重とひずみ関係が弾性的な範囲での勾配）は健全ケース(C1-F)の剛性の 73%となった。当て板の補修をすることにより断面減肉ケース(C2-D)の剛性と比べ、大幅に改善されたことが分かる。また、C2-D-S の降伏荷重は 296kN で健全ケース(C1-F)の降伏耐力(329kN)の 90%となり、減肉ケース(C2-D)の降伏荷重 159kN(健全ケース降伏耐力の 48%)と比較し、42%ほど高いものとなった。

図-5 に示す孔開きの補修ケース(C3-H-S)の剛性は、荷重が約 150kN までほぼ健全ケース(C1-F)と一致しており、剛性の回復が見られる。しかし、約 150kN を超えると剛性が少し低下している。この原因としては、当て板と母材の間の付着が低下し、すべり始めたためと考えられる。また、最大荷重は 220kN で健全ケース(C1-F)の 67%であるが、孔開きケース(C3-H)の降伏荷重 154kN(健全ケース降伏耐力の 47%)と比較し、約 20%高くなった。

いずれの補修ケースにおいても耐力は健全状態の概

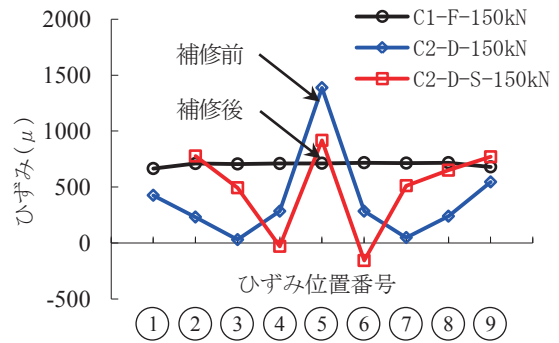


図-6 断面減肉における母材の応力低減

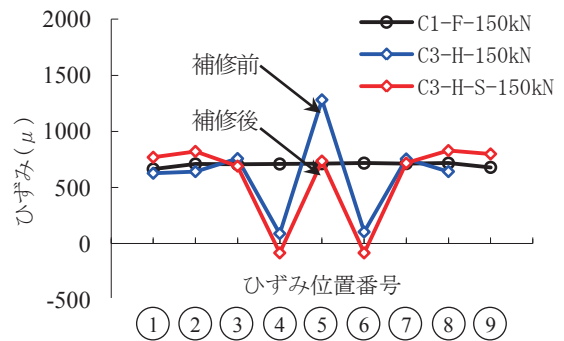


図-7 断面孔開けにおける母材の応力低減

ね 70%~90%まで回復し、剛性は 70%以上に改善された。ここで、母材の力学性能回復には接合面におけるせん断伝達が重要であることが分かる。

## (2) 補修の効果

図-6 と図-7 に、荷重が 150kN における試験体（母材）の引張方向におけるひずみ分布（図-3 中の①~⑨）を示す。なお、同一断面に 2 つあるいは 3 つのひずみゲージがある場合には、それらの平均値としている。

両図において、黒線は健全ケース(C1-F)のひずみ分布であり、いずれの位置においてもほぼ一定値（約 700 μ）である。また、青線と赤線はそれぞれ補修前と補修後のひずみの分布である。いずれの補修ケースにおいても、試験体中央の位置番号⑤での補修後のひずみは健全試験体のひずみに近い状態となった。また、位置③と⑦はボルト中心と同じ断面であり、位置番号④と⑥は開口部直近（C3-H-S）や断面厚の変化部（C2-D-S）でやはりボルトの近くにあり、いずれもボルトの支圧力の影響によって、それらの位置ではひずみが小さくなる特異性が現れたと考えられる。

ここで、2 つの補修ケース（C2-D-S、C3-H-S）について、実験で得られた最大荷重  $P$  と、母材のひずみから求めた母材の分担力  $P_1$  および当て板の分担力  $P_2 (=P-P_1)$  との関係を表-3 に示す。断面欠損の違いにより、母材と当て板との荷重分担率は異なったが、当て板が耐力向上

に寄与していることが分かる。ただし、母材のひずみから求めた分担力には荷重の偏心作用の影響が含まれているため、より正確な荷重分担には更なる検討を要する。

表-3 母材および当て板の荷重分担

Case	最大荷重 P(kN)	母材の分担力 P1 (kN)	当て板の分担力 P2 (kN)	分担率 P2/P
C2-D-S	296	177	119	0.40
C3-H-S	220	164	56	0.25

#### 4. FEM解析による考察

本解析の目的は、実験結果と比較することで解析モデルの妥当性を検証するとともに、当て板の剛性の大きさが補修効果に及ぼす影響を把握できるようにしたことである。なお、当て板の剛性を高める方法として、当て板の増厚とリブ補強について検討を行った。

##### (1) 解析の概要

解析の対称性から、その1/2モデルを図-8に示す。解析は2つのステップで行った。まずステップ1では、ボルトに所定の設計ボルト軸力(200kN)を導入し、母材と当て板とを接合した。ステップ2では、ボルトの軸力を保ちながら母材の引張端に強制変位を与えることで引張力を導入した。本解析で用いた材料特性を表-4に示す。母材と当て板およびボルトとの接触面にはインターフェース要素を配置した。母材と当て板の間は非線形弾性摩擦で粘着力が $0\text{N/mm}^2$ 、摩擦角は $31^\circ$ とした。ボルトのナットと鋼材の間は完全結合、ボルト軸と鋼材との間のせん断方向及び法線方向の剛性はゼロとした。これによってボルトの摩擦接合のみで母材と当て板の間に応力を伝達する機構とした。

##### (2) 解析の結果

解析による荷重-ひずみの関係を図-9に、表-5に実験と解析で得られた最大荷重を示す。なお、ここでは便宜的に荷重がほぼ一定となったひずみが $5000\mu$ での荷重を最大荷重とした。これより、最大荷重については、解析結果と実験結果とは比較的良く一致した。解析値と実験値との適合性から、本解析での母材と当て板との摩擦接合のパラメータの設定方法は概ね妥当と考える。ただし、解析の精度をより向上するためには、玉越らの研究<sup>9)</sup>により接合面に作用する支圧応力度とすべり時のせん断強度の関係を明らかにし、適切な境界条件を設定する必要がある。

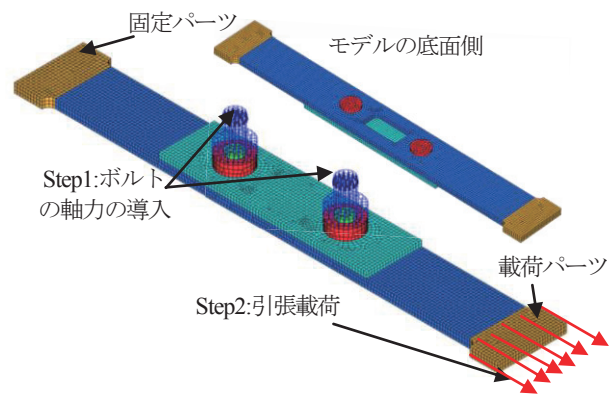


図-8 当て板補修の解析モデル

表-4 鋼材とボルトの材料特性

項目	降伏応力 N/mm <sup>2</sup>	ポアソン比	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>
鋼板	294	0.3	$2 \times 10^5$
ボルト	900		

表-5 実験と解析の降伏荷重の比較 (単位: kN)

No.	1	2	3	4	5
Case	C1-F	C2-D	C3-H	C4-D-S	C5-H-S
実験	329	159	154	273	220
解析	319	157	158	246	229

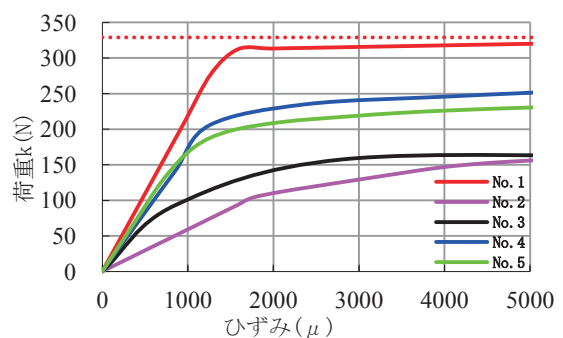


図-9 解析による各ケースのひずみと荷重の曲線

##### (3) 当て板の剛性が降伏耐力の検証

当て鋼板の剛性を高める方法としては、増厚し( $t=20\text{mm}$ )やリブ補強が考えられる。リブの高さは母材、当て鋼板およびリブで構成された断面の図心がリブと当て板の接合面位置となるように設定する。これは母材と当て板の引張応力が過大ならないように配慮したものである。また、当て板の板厚とリブの高さを加えたものは $100\text{mm}$ を超えない範囲とすることにより、船舶の接岸に対する支障にはならないものである。リブ補強をしたケースの解析モデル例を図-10に示す。当て板補強を行った場合について、解析で得られた中央断面位置での荷重-ひずみ関係を図-11に示す。黒の破線が健全試験体の実験値であり、実線がリブ付きケースの解析値であり、また点線が増厚しケースの解析値である。増厚したケース

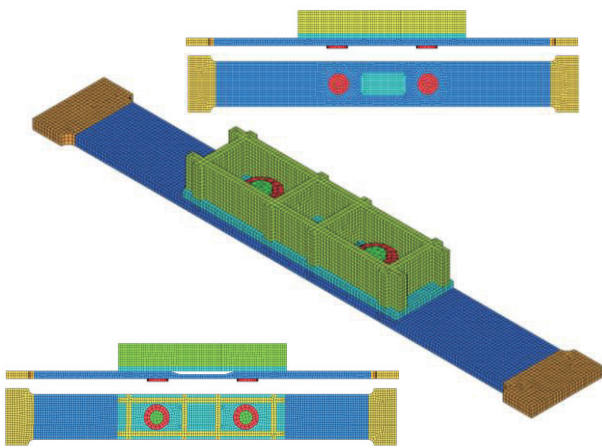


図-10 当板のリブ付きによる解析モデル

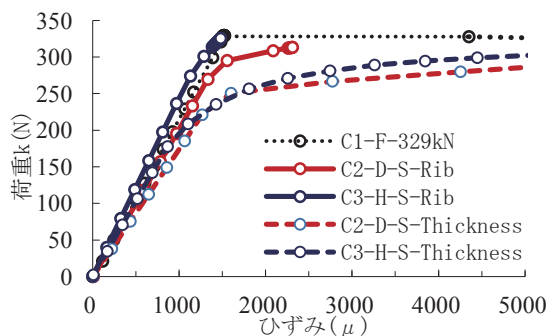


図-11 当板のリブ付きと増厚しによる補強のひずみー荷重

(破線)では中央断面で降伏が生じ、ひずみが大きく増加している。これに対して、リブ補強したケースでは中央断面位置より先に補強範囲外の母材で降伏したため、ひずみの大きな増加は見られない。

当て鋼板の剛性を高めた、いずれのケースにおいても、試験体の剛性と最大耐力は健全ケースとほぼ同様となり、補修効果を有することが確認できる。また、増厚しよりリブ補強の方が、耐力の向上効果は大きくなることが解析で得られた。

## 5. まとめ

本研究では、肉厚減少や孔開きが生じた鋼材に対して、接着接合とワンサイドボルトを用いた摩擦接合とを併用した当て板補修工法を行った場合の耐力の向上効果について検討した。その結果、

- ・腐食により肉厚減少した場合や孔開きの場合のいずれに対しても、ワンサイドボルトを用いた補修方法による耐力および剛性の向上を確認できた。
- ・数値解析モデルについては、実験結果との比較から材料物性値の設定など、そのモデル化はほぼ妥当と考える。
- ・当て板の剛性（増厚とリブ補強）を高めることで、健全状態の部材と同じレベルの剛性と耐力の回復を図れることを解析により確認した。この場合、増厚よりリブ補強の方が耐力の向上効果は大きくなった。

今後、実験や数値解析を重ねることで、接合面のせん断強度等を検証するとともに、当て板補修工法に関する簡便で実務的な設計手法を導くことが必要と考える。

また、ここで述べた力学性能の他、母材や補修材も含め長期耐久性を確保する手法についても検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 阿部正美, 横井聡之, 大即信明, 山本邦夫: 港湾鋼構造物の腐食調査資料集, 港湾空港技術研究所資料, No.628, 1988.
- 2) 佐藤徹, 加藤絵万, 川端雄一郎, 岡崎慎一郎: 港湾施設の空洞化調査に関する報告, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.70, No.2, I\_552-I\_557, 2014.
- 3) 財団法人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, pp.285-330, 2009.
- 4) 丹波寛夫: 接着剤を併用した鋼橋のあて板補修・補修技術に関する研究, 博士論文, 京都大学, 2014.
- 5) 玉越隆史, 白戸真大, 横井芳輝, 山崎健次郎, 水口知機: 鋼道路橋への適用に向けた超高力ボルトを用いた摩擦接合継ぎ手の継ぎ手強度に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第 827 号, 2015.

(2018.2.8 受付)

## BASIC STUDY ON RESTORATION OF CAPACITY PERFORMANCE FOR ORRODED STEEL SHEET PILE BY REPAIRING WITH PATCH PLATE ON ONE SIDE

Tao WANG, Osamu TANIGUTI and Hideharu NAITOU

Holes and section defects were caused on the steel sheet pile wall near the low tide surface due to concentrating corrosion. There was concern about the collapse of the apron and a decrease in the sheet pile capacity. It is an urgent task to recover the mechanical performance of degraded parts. In this study, experiments and analysis were carried out in order to confirm capacity performance and the effectiveness of the joining by the method of patch plate. As a result, the stiffness and capacity of members after repair were able to obtain a great improvement effect compared with the case without repair. Moreover, through verification by numerical analysis, it was confirmed that the performance by the rib reinforcing to the patch plate was greater than when the thickness of the patch plate was increased.