

傾斜板式防波堤に適用した 耐海水ステンレス鋼ライニングの耐久性について

DURABILITY OF SEAWATER RESISTANCE STAINLESS STEEL LINING
APPLIED FOR "INCLINED LEVEE BODY TYPE BREAKWATER"

佐藤弘隆¹・河合康博¹・岩見博志¹・石田雅己¹・金井久¹・盛高裕生²

Hiroataka SATO, Yasuhiro KAWAI, Hiroshi IWAMI, Masami ISIDA, Hisashi KANAI, Hiroo MORITAKA

¹ 正会員 新日本製鐵株式会社 相模原技術開発部 (〒229-1131 神奈川県相模原市西橋本 5-9-1)

² 正会員 新日本製鐵株式会社 鉄構海洋事業部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

A new corrosion prevention method for offshore steel structure using seawater resistance stainless steel sheets has been developed. The seawater resistance stainless steel sheets are welded to the structures by the indirect seam welding method.

This stainless steel lining was applied to the splash and the tidal zones of the inclined levee body type breakwater. Since the breakwater faces an open sea, the splash and the tidal zones are subjects to corrosion by wind brown salt, damage due to occasional impacts with floating debris and fluctuating stress by wind and wave. The experimental results indicate good corrosion resistance in seawater, good impact resistance and good mechanical properties, therefore this stainless steel lining will give successful and economical corrosion protection of steel structures.

Key Words : Corrosion prevention, breakwater, seawater resistance stainless steel, stainless steel lining, indirect seam welding, jacket structure

1. はじめに

海洋構造物は重要な社会資本である場合が多く、長期の耐用年数が求められる。海洋は鋼材にとって厳しい腐食環境であるため、海洋鋼構造物の防食対策はきわめて重要である。特に飛沫・干満部は、最も腐食が激しく、電気防食の適用も困難なため、海洋鋼構造物の機能維持には、信頼性の高い防食法を適用することが不可欠である^{1), 2), 3), 4), 5)}。

飛沫・干満部の防食法としては、重防食塗装や有機ライニングといった塗覆装が広く適用されている。塗覆装による防食は、初期コストが比較的安価であり、美観の維持も可能であるため優れた防食法と言える。ただし、供用年数が長期化すると、点検・補修・再塗装といったメンテナンスに多大なコストが必要となる。

50年～100年といった超長期の耐用年数を期待される海洋鋼構造物では、チタンクラッド鋼やモネル、キュプロニッケル、ステンレス鋼等の耐食性金属ライニングによる防食が適用される場合もある^{6), 7), 8)}。耐食性金属ライニン

グは、供用期間中の補修がほとんど不要となるため、メンテナンス費用の低減が可能となる。ただし、材料費を含めた施工コストが重防食塗装に比べて高くなるため、適用箇所が限られていた。

そこで、信頼性の高い防食法である耐食性金属ライニングの施工コスト低減を目的として、耐海水ステンレス鋼ライニング防食法を開発した。本防食法は、常温域ではチタンと同等の耐食性を有する耐海水ステンレス鋼^{9), 10)}をインダイレクトシーム溶接法により普通鋼に直接ライニングする防食法である。従来法よりも施工能率が高く、しかも長期の耐用年数が期待できる。

この耐海水ステンレス鋼ライニング防食法をジャケット構造型傾斜板式防波堤の飛沫・干満部に適用した。本防食法を適用した防波堤¹¹⁾は外洋に面しており、海水飛沫による腐食、漂流物の衝突、風波による疲労等が懸念される。本報では耐海水ステンレス鋼ライニングの施工法を述べ、さらに耐食性、耐衝撃性および疲労特性について検討した結果を報告する。

2. 傾斜板式防波堤¹¹⁾の防食仕様概要

長崎県西彼杵（にしそのぎ）郡高島町の南風泊（はえどまり）漁港西沖防波堤は、傾斜板式防波堤とスリットケーソンから構成され、傾斜板式防波堤はさらに2基のジャケットからなる。期待耐用年数は30年である。ジャケットの防食仕様を表-1に示す。

表-1 傾斜板式防波堤の防食仕様

| | |
|-------|---|
| 大気部 | 超厚膜型エポキシ塗装 (2.5mm ¹⁾) |
| 飛沫干満部 | 耐海水ステンレス鋼ライニング (0.4mm ¹ , 1.5mm ¹) |
| 海中部 | アルミ陽極による電気防食 |

3. ステンレス鋼ライニング施工法

耐食性金属ライニング法とは、耐食性金属シート（板厚2mm程度）により構造部材表面を被覆し、酸素、水分、塩分等の腐食因子から構造部材を遮断し防食する方法である。ライニング施工には、現在まではアーク溶接、主にTIGアーク溶接により接合する施工法が一般的に適用されているが、溶接施工能率の低さから施工コストが非常に高くなっていた¹⁾。

そこでライニング施工の高効率化を目指し、①半自動アーク溶接法によるライニング施工法、さらに②インダイレクトシーム溶接法による極薄板ステンレス鋼ライニング施工法を開発し、適用した。本章では、インダイレクトシーム溶接法による施工法を中心に記述する。

(1) ライニング適用範囲

耐海水ステンレス鋼ライニングを適用した構造物は、基礎構造部が、高さ23m×幅16m×長さ46m、鋼重量650トンのジャケット式鋼構造物に、コンクリートスラブ製の防波板を取り付ける鋼製傾斜板式防波堤で、写真-1に基礎構造部の全体写真を示す。

ステンレス鋼ライニングの適用範囲は、その基礎構造部



写真-1 傾斜板式防波堤 基礎構造部

の腐食環境が激しい飛沫・干満帯（D.L. -1000mm以上）のレグ・ブレース材鋼管直管部に適用した。そのライニング面積は、合計約380m²（φ1330, 356mm：各18本）である。図-1にライニング適用範囲を示す。

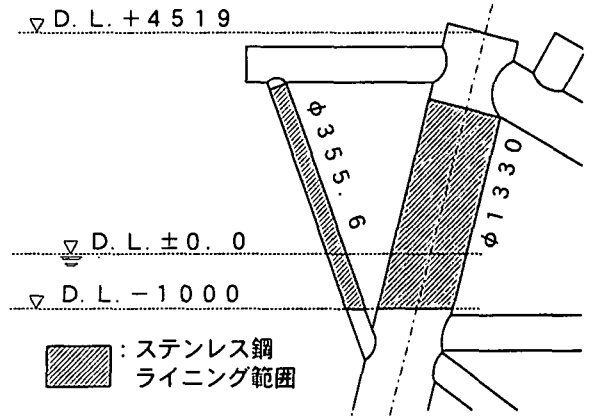


図-1 ライニング適用範囲

(2) ライニング施工手順

ライニング材には、オーステナイト系の耐海水ステンレス鋼（0.4mm¹板厚×1.0m幅）を選定、鋼管部材の長手方向とステンレス鋼コイルの長手方向が一致するように被覆した。鋼管部材（φ1330mm）のライニング被覆要領を図-2に示す。

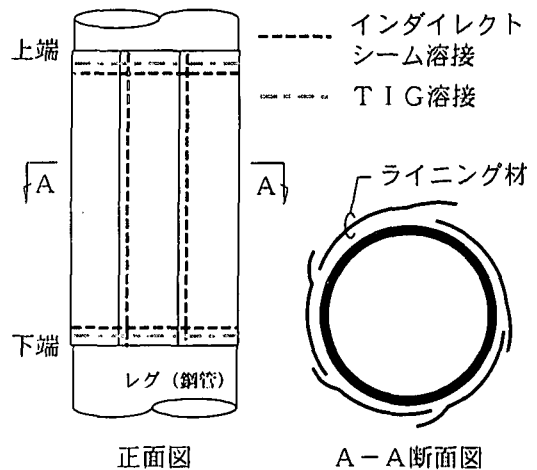


図-2 ライニング要領

図-3にライニングの施工フローを示す。鋼管の長手方向とステンレスコイルの長手方向が一致するように①巻付け、スポット溶接により仮付溶接を実施する。その後、②鋼管の長手方向をシーム溶接後（図-2 破線部）、③ライニング上下端部をシーム溶接する。さらに、ライニング上下端部は、『ステンレス鋼板が二枚重ねとなる段差部』の水密性を確保するため、④TIG溶接（図-2 一点鎖線部）により接合し、飛沫・干満帯を密封シールする。ライニング溶接部の検査として、⑤水密性を確認するためリーク試験を、⑥TIG溶接部の表面欠陥を検査するため浸

透探傷 (PT) 試験を実施、リーク、及び表面欠陥が確認された場合は、その部位をTIG溶接補修後、再検査し、ライニング溶接部の健全性を確認した。

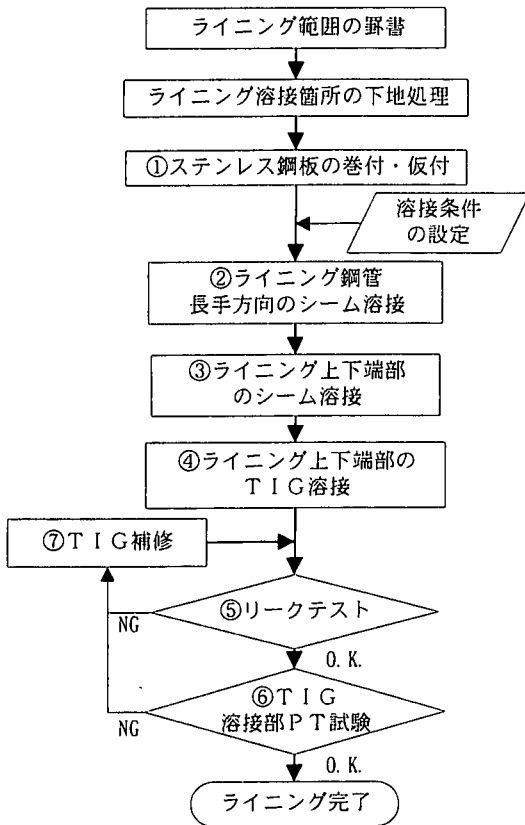


図-3 ライニング施工フロー

(3) インダイレクトシーム溶接法

インダイレクトシーム溶接 (以下、単にシーム溶接と記述) とは、図-4 に示すように、電極に円盤状の電極輪を使用し電極間に短時間・大電流を通電し、その溶接箇所の抵抗発熱により接合面のみ直接熔融、又は、高温状態に至らしめ加圧・接合する方法である。この方法により、ステンレス鋼シートを約 1.0 m/min 程度の高速で接合することができる。

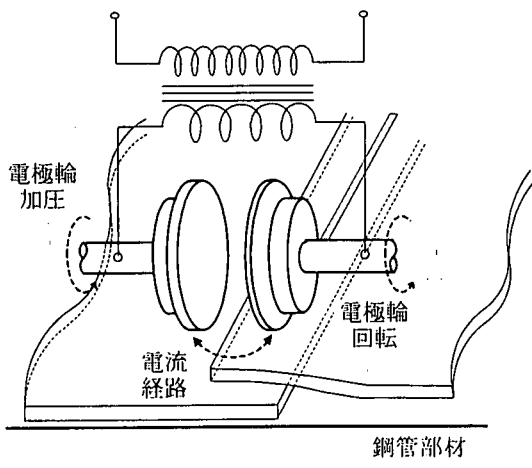


図-4 インダイレクトシーム溶接法

(4) シーム溶接状況

抵抗溶接において、その溶接状況を決定する重要な要因は、①溶接電流、②加圧力、③溶接速度である。高島町の南風泊漁港の傾斜板式防波堤に使用した溶接条件を、その溶接箇所毎に表-2 に示す。表中の通電サイクルとは、溶接電流を通電-休止するサイクル数であり、1 サイクルが約 1/60 秒である。

表-2 シーム溶接条件表

| 溶接方向 | 溶接電流 (A) | 通電サイクル | | 加圧力 (kN) | 溶接速度 (m/min) |
|------|-------------------|---------|---------|----------|--------------|
| | | 通電 | 休止 | | |
| 長手方向 | 6,500 ~ 8,000 | 2 ~4 | 2 ~4 | 3.0 | 0.8 ~1.5 |
| 円周方向 | 7,000 ~ 10,000 | 2 ~4 | 2 ~4 | 3.0 | 0.8 ~1.2 |

写真-2 に、鋼管の長手方向のステンレス鋼板同士のシーム線に直角方向の接合状況を断面マクロで示す。内部欠陥の無い良好な接合状況であることを確認した。



写真-2 シーム溶接部接合状況

4. ステンレス鋼ライニングの耐久性

(1) 耐海水ステンレス鋼の耐食性

ライニングに供したステンレス鋼は、高クロム鋼に十分なモリブデンを添加し、窒素と銅を加えることにより、耐食性を向上させたオーステナイト系の耐海水性ステンレス鋼^{12), 13)}で、代表成分は 20Cr-18Ni-6Mo-0.2N-0.7Cu である^{9), 10)}。海洋環境では塩分による孔食、ステンレス鋼シートの重なり部や貝類の付着箇所での隙間腐食が懸念されるため、耐孔食性、耐隙間腐食性を評価した。

a) 耐孔食性評価

JIS G 0578 「ステンレス鋼の塩化第二鉄腐食試験方法」に従い母材部、溶接部の耐孔食性を評価した。6%FeCl₃+N/20 HCl 溶液に試験片を 24 時間浸漬し、試験終了後、洗浄・乾燥して腐食減量を求めた。各試験温度における腐食速度を図-5 に示す。耐海水ステンレス鋼が孔食を起さない上限温度 (孔食発生限界温度) は 70℃であった。

b) 耐隙間腐食性評価

ステンレス鋼の表面は化学的に安定な不動態皮膜に覆われており、金属の溶出 (腐食) が抑制されているが、隙間部では不動態皮膜修復のための酸素の供給が制限され、さらに、金属イオンの加水分解により酸性雰囲気形成されるため腐食が進行しやすくなる。

この隙間腐食の評価として、テフロンワッシャにより隙

間を形成させたサンプルでa)と同様の試験を行った。各試験温度における腐食速度を図-6に示す。本耐海水ステンレス鋼が隙間腐食を起さない上限温度（隙間腐食発生限界温度）は50℃であった。

表-3に本耐海水ステンレス鋼、純チタン、SUS316Lの孔食発生限界温度、隙間腐食発生限界温度を示す。

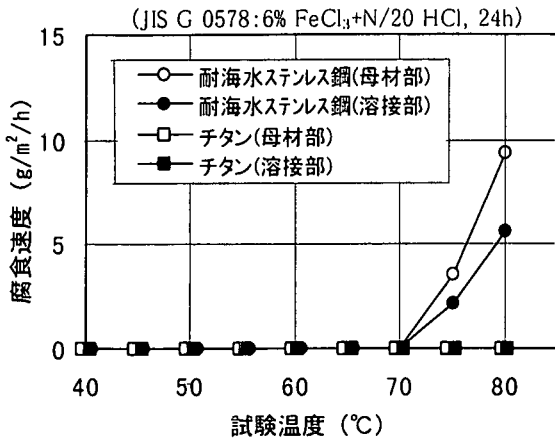


図-5 耐孔食性試験結果

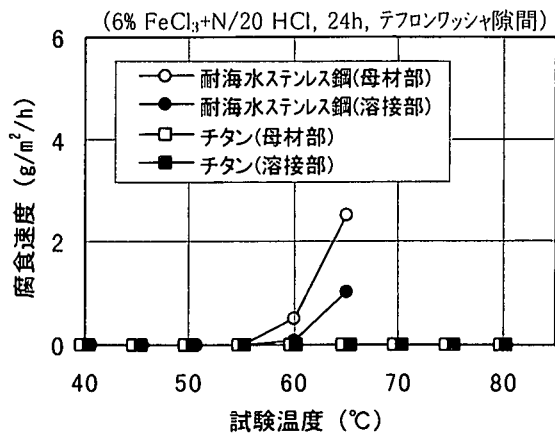


図-6 耐隙間腐食性試験結果

表-3 孔食発生限界温度および隙間腐食発生限界温度

| | 耐海水ステンレス鋼 | 純チタン | SUS316L |
|----------------|-----------|------|---------|
| 孔食発生限界温度(°C) | 70 | > 80 | 15 |
| 隙間腐食発生限界温度(°C) | 50 | > 80 | 0 |

c) 実暴露試験によるステンレス鋼ライニングの耐食性評価

図-7に示すような耐海水ステンレス鋼ライニングを施した試験体を作成し、北九州市若松区の岸壁に2年間暴露した。ステンレス鋼ライニング部分は溶接部、海洋生物が付着した隙間部分等を含め腐食は認められなかった。また、海中中部における異種金属接触腐食による普通鋼の腐食も電気防食の併用で防止できることを確認した^{13), 14), 15)}。ケレン後のライニング部を写真-3~写真-5に示す。

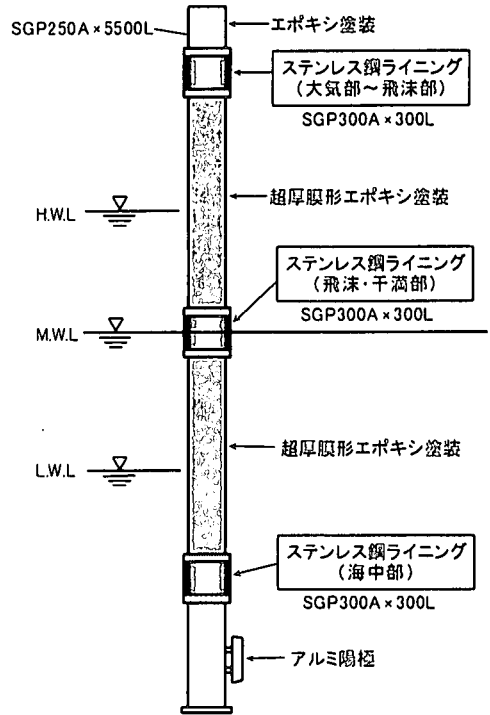


図-7 耐海水ステンレス鋼ライニング暴露試験体

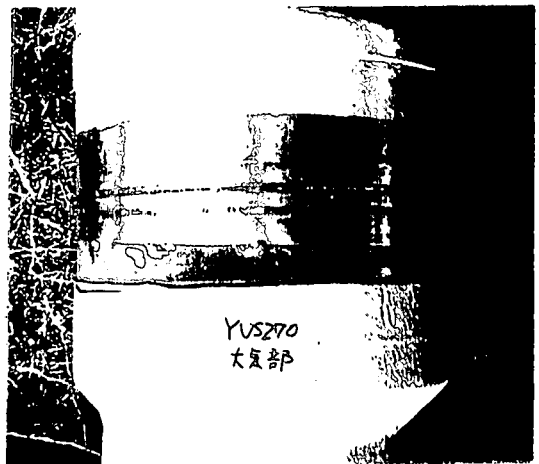


写真-3 耐海水ステンレス鋼ライニング（大気部）の暴露2年後の状況



写真-4 耐海水ステンレス鋼ライニング（飛沫・干満部）の暴露2年後の状況

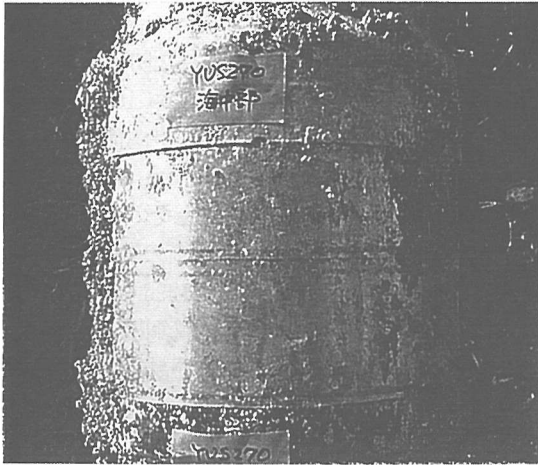


写真-5 耐海水ステンレス鋼ライニング（海中部）の暴露2年後の状況

a), b)の試験より、強酸化性、強酸性 (pH 1.1), 高温と実海洋環境より過酷な条件においても、耐海水ステンレス鋼が十分な耐食性を有していることが確認できた。さらにc)の実暴露試験においても海洋環境でも腐食は認められなかった。これらの結果より、本ステンレス鋼は常温域において、チタンと同様に十分な耐海水性を有していると言える。

(2) 耐衝撃性の検討

ステンレス鋼ライニングの優れた耐衝撃性を確認するために、図-8のような落錘衝撃試験を実施した。ステンレス鋼ライニングの平面部、溶接部に1000N・mの衝撃エネルギー（質量25kgの錘を高さ4mから落下）を加えた時の試験片の断面写真を右図に示す。母材部の変形を伴ったにも関わらず、貫通疵は発生しなかった。

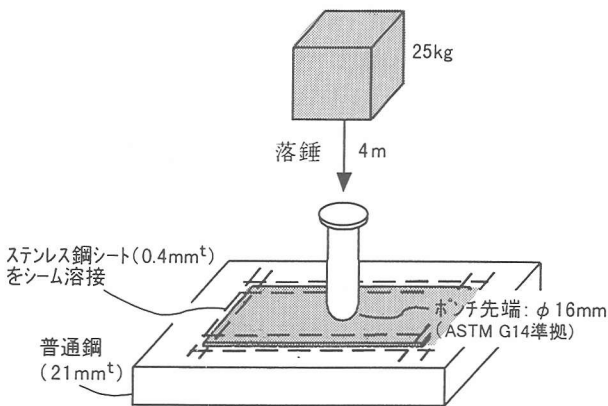


図-8 落錘衝撃試験の概略図

本衝撃試験では先端径φ16mmの鋼製ポンチを用いたが実環境ではステンレス鋼ライニングと衝突物の接触面はφ16mmよりも広範囲かつ大きな曲率の場合がほとんどと

考えられる。1000N・mのエネルギーは、総トン数20トンの小型船が0.2m/sで接触した時のエネルギーにほぼ相当する¹⁷⁾が、衝突エネルギーがさらに大きい場合でもライニングに貫通疵が発生する可能性は小さいと推定できる。

比較として、一般的に使われている他の防食被覆での衝撃試験結果を表-4に示す。

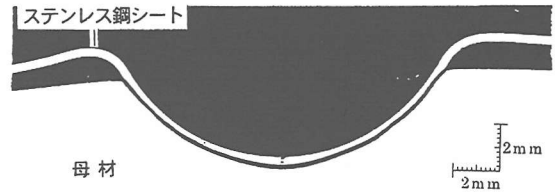


写真-6 衝撃試験片の断面拡大写真（平面部）

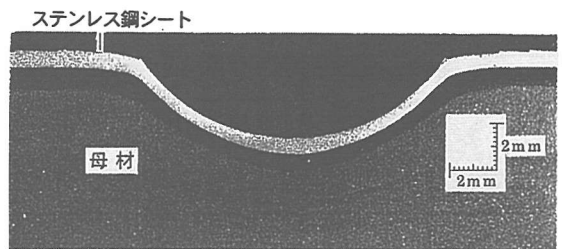


写真-7 衝撃試験片の断面拡大写真（溶接部）

表-4 他の被覆との貫通エネルギーの比較 (ポンチ径16mm)

| 被覆の種類 | 被覆厚 (mm) | 貫通に要するエネルギー (N・m) |
|-------------|----------|-------------------|
| ステンレス鋼ライニング | 0.4 | >1000 |
| ポリエチレンライニング | 2.5 | 約25 |
| ポリウレタンライニング | 2.5 | 約20 |
| タールエポキシ塗装 | 0.3 | 約5 |

(3) シーム溶接部の機械的特性

シーム溶接部には、海洋構造物設置時に静的外力が、使用期間中には風波による繰返し外力が作用することから、図-9に示す試験体を表-2のシーム溶接条件で作製し、溶接部（ライニング材板厚0.4mm^t）の引張試験と疲労試験を実施した。疲労試験条件を、部分片振り（応力比:0.9）、周波数:10Hz、応力振幅制御として実施した。

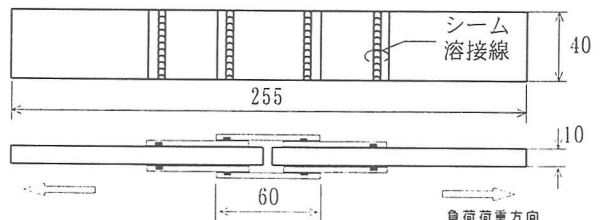


図-9 疲労試験片形状

表-5に、その結果の一覧表を、図-10に疲労試験により得られたS-N線図を示す。引張試験において、溶接試験体の引張強度はステンレス鋼板の母材規格値(650MPa)より高く、その破断位置は溶接部ではなく、母材部であることより、シーム溶接部が十分な静的強度を有していることを確認した。

さらに、シーム溶接部の疲労特性は、疲労設計指針¹⁸⁾の疲労設計曲線(せん断応力を受ける継手)にて、A継手とほぼ同等の疲労特性を有している。A継手の疲労特性は表面を機械仕上げした帯板(表面、および端面、機械仕上げ)と同等であり、シーム溶接部がきわめて良好な疲労特性を有していることを確認した。

表-5 疲労試験結果

| | 0.2% 耐力 (Mpa) | 引張 強さ (Mpa) | 破断 伸び (%) | 破断位置 |
|------|------------------------------|-------------------|-----------------|------|
| 引張試験 | 466 | 763 | 25 | 母材部 |
| | 疲労強度 (2×10^6 回) | | 破断位置 | |
| 疲労試験 | 184 | | 母材部 | |

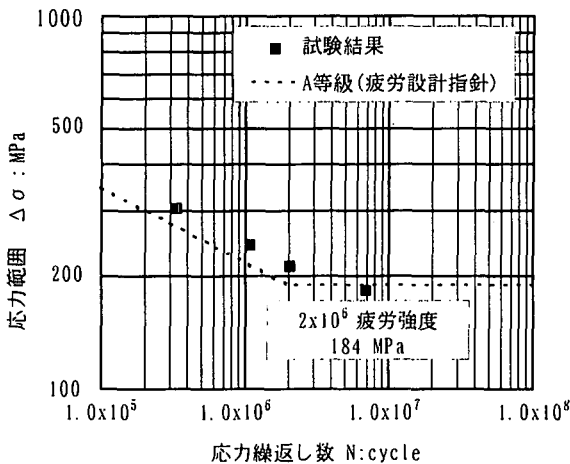


図-10 S-N線図

5. まとめ

信頼性の高い防食法である耐食性金属ライニングの施工コスト低減を目的として、耐海水ステンレス鋼をインダイレクトシーム溶接法により普通鋼に直接ライニングする耐海水ステンレス鋼ライニング防食法を開発した。そして、ジャケット構造型傾斜板式防波堤の飛沫・干満部に適用した。耐海水ステンレス鋼ライニングは、①常温域において優れた耐海水性を有し、②耐衝撃性、疲労特性も優れているため、供用期間中の補修・再被覆等のメンテナンス費用の低減が期待できる。

参考文献

- 1) 金井 久, 石田雅己: 産業分野別に見た防錆技術—海洋構造物—, 防錆管理, Vol. 43, No. 5, pp. 167-185, 1999.
- 2) 伊藤陽一: 土木施設の腐食と防食IV—港湾構造物の腐食と防食—, 防錆管理, Vol. 38, No. 11, pp. 424-437, 1994.
- 3) 玉田明宏: 長寿命重防食技術の開発とその耐海水性支配因子の効果—最近の海洋超重防食技術の動向—, 材料と環境, Vol. 45, No. 4, pp. 244-255, 1996.
- 4) (財) 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), (財) 沿岸開発技術研究センター, 1997.
- 5) 阿部正美, 横井聡之, 大即信明, 山本邦夫: 港湾構造物の腐食調査資料集, 港湾技研資料, No. 628, 1988.
- 6) 山本章夫, 長谷泰治, 高橋康雄: チタンクラッド鋼板による海洋鋼構造物防食技術の開発, チタン, Vol. 47, No. 3, pp. 218-226, 1999.
- 7) Jones, B. L, Sansum, A. J. : Review of protective coating systems for pipe and structures in splash zones in hostile environments, *Corrosion Management*, pp. 9-14, 1996.
- 8) Kirk, W. W. : METALLIC SHEATHING FOR PROTECTION OF STEEL IN SEAWATER, *Corrosion* 87, pp. 355/1-11, 1987.
- 9) 新日本製鐵株式会社: 耐海水ステンレス鋼 YUS270, Cat. No. SS 107, 新日本製鐵株式会社, 1990.
- 10) 吉田 健: 東京湾アクアライン海ホテル建設記念碑「カッターフェイス」と耐海水性ステンレス鋼について, 防錆管理, Vol. 42, No. 9, pp. 330-334, 1998.
- 11) 中山哲蔵, 白石郁生, 木田英之, 関口太郎, 大久保寛, 中泉昌光: 外洋波を受ける海域への傾斜板式防波堤の適用について, 海洋開発論文集, Vol. 14, pp. 95-100, 1998.
- 12) Wallen, B, Bergqvist, A. : THE SEAWATER RESISTANCE OF A SUPERAUSTENITIC 7 Mo STAINLESS STEEL, *Corrosion Reviews*, Vol. 17, No. 2, pp. 77-98, 1999.
- 13) 宇城 工: 耐海水ステンレス鋼の最近の動向, 材料と環境, Vol. 41, No. , pp. 329-340, 1992.
- 14) 増田一広, 吉田耕太郎, 山本正弘, 川上誠, 佐々木信博, 溝口茂: ステンレス被覆と電気防食を併用した海洋構造物の防食特性, 土木学会 第47回年次学術講演会講演概要集 第5部, V-192, pp. 14-415, 1992.
- 15) 山本正弘, 増田一広, 吉田耕太郎, 加藤忠一: 干満帯にステンレス被覆を施した鋼材の電気防食特性, 第39回腐食防食討論会講演集, B-107, pp. 61-164, 1992.
- 16) 山本正弘, 伊藤陽一, 増田一広: 干満帯をシュミレートした系での各種鋼材の電気防食特性, 第40回腐食防食討論会講演集, D-106, pp. 57-560, 1993.
- 17) 渡部彌作: 新版港湾工学, コロナ社, 1979.
- 18) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針, 1993.