

海洋鋼構造物の高耐食ステンレス鋼ライニング溶接技術

Welding Technology for Metallic Sheathing of Offshore Steel Structures Using Seawater-resistance Stainless Steel Sheet

河 合 康 博^{*(1)}
Yasuhiro KAWAI

岩 見 博 志^{*(2)}
Hiroshi IWAMI

佐 藤 弘 隆^{*(3)}
Hirohisa SATOH

馬 場 則 光^{*(4)}
Norimitsu BABA

抄 録

耐海水性ステンレス鋼SUS 312Lを用いた海洋鋼構造物の金属ライニング溶接技術を紹介した。厚さ0.4～0.6 mmのSUS 312L鋼を炭素鋼管にインダイレクトシーム溶接法にて重ね溶接することにより、高耐食性金属材料を用いた従来のライニング法に比べ材料費と製作費を大幅に低減できた。さらに、より厳しい腐食環境における隙間腐食対策として、インダイレクトシーム溶接と同時にインコネル625ワイヤを用いてプラズマ溶接する複合溶接法を開発して隙間のない溶接構造を実現した。被覆が損傷した場合のための補修方法についても言及した。

Abstract

Welding technology for metallic sheathing of offshore steel structures in seawater tidal and splash zones was described. Seawater-resistance stainless steel SUS 312L sheets of 0.4-0.6mm in thickness were lap-welded on carbon steel pipes with the indirect seam welding process. Compared to conventional metallic sheathing methods, this method enabled to reduce material and fabrication costs. A combined welding method - indirect seam welding and plasma welding with Inconel 625 filler wire were pre-formed simultaneously - was developed to prevent crevice corrosion at severer environments. In case the metallic sheathes get damaged, a repair welding procedure was established.

1. はじめに

海洋鋼構造物は均質で安定した品質の鉄鋼材料を用いた溶接構造物であり、設計自由度が高く短期間での施工が可能など他の材料による構造物に比べて多くの利点がある反面、鋼材の腐食対策を必要とする。とくに、最も腐食環境が厳しい飛沫・干満部には信頼性の高い防食を施す必要がある。従来、飛沫・干満部の防食には有機材料による被覆防食法が広く適用されてきた¹⁾。しかし、漂流物の衝突による損傷や材料自体の経時劣化などにより、長期間にわたり耐久性を維持するためには防食被覆の補修や更新といったメンテナンスに多大なコストを要している。50年～100年といった超長期の耐用年数を要求される海洋鋼構造物では耐食性金属ライニングによる防食が適用される場合がある²⁾。この方法を用いれば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が大幅に低減できるが、材料費と製作費が被覆防食に比べ高価なため適用が限られていた。

新日鉄エンジニアリング(株)では、厳しい腐食環境下で供用される海洋構造物のライフサイクルコスト最小化の観点から、信頼性が

高く経済的な耐海水性オーステナイトステンレス鋼によるライニング技術を開発、実用化した³⁾。本報では工法を概説した参考文献³⁾で紹介したライニング溶接技術について詳述する。

2. 従来の金属ライニング溶接法の問題点

金属ライニング防食法は、強度が高く耐食性に優れた金属(以下、ライニング材)で鋼材を被覆して鋼部材の表面を腐食環境から遮断する防食工法である。図1にあるように主として海洋鋼構造物の飛沫・干満部の部材を対象にしている。従来の金属ライニング防食法は各種ステンレス鋼やモネル、キュプロニッケルなどをライニング材とし、TIG(Tungsten Inert Gas)溶接または被覆アーク溶接で炭素鋼や低合金鋼部材に張り付ける工法である。ライニング材の厚みは通常1.5～2.0mmであり、溶接継手の形式として図2に示すプラグ溶接(プラグライニング)、ストリップ溶接(ストリップライニング)およびその併用によるものなどが用いられている⁴⁾。

ライニング材料費の最小化や部材への取り付けの容易化のためにはライニング材を薄くしたいが、従来法では溶接施工性の観点から適度な厚みが必要であった。すなわち、ライニング材の厚みが

^{*(1)} 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 技術開発研究所
エンジニアリングサポートセンター 溶接技術室 マネジャー
神奈川県相模原市西橋本5-9-1 〒229-1131 TEL:(042)774-5411

^{*(2)} 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋・エネルギー事業部
海洋・鋼構造ユニット 羽田空港プロジェクト班 マネジャー

^{*(3)} 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 技術開発研究所
エンジニアリングサポートセンター 防食技術室 マネジャー

^{*(4)} 新日鉄エンジニアリング(株) 技術本部 技術開発研究所
エンジニアリングサポートセンター 溶接技術室 室長

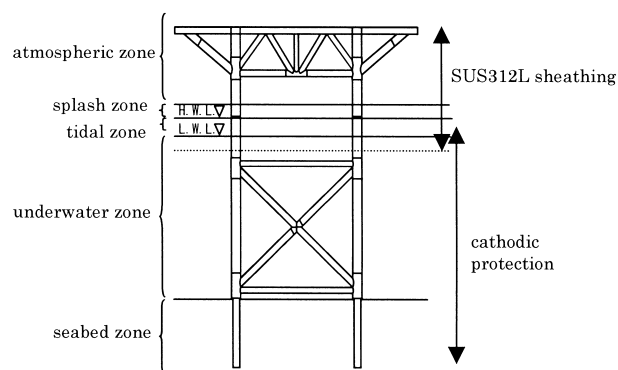


図1 海洋鋼構造物へのSUS 312L鋼ライニングの適用箇所
Application of SUS 312L sheet sheathing to offshore steel structure

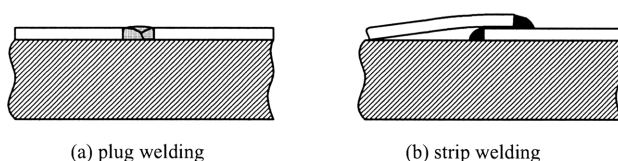


図2 従来のライニング溶接方法
Conventional welding methods for lining

1.0mm以下になると、溶接時の溶接熱によるライニング材の変形が大きくなり、ライニング材同士またはライニング材と部材間の重ね部に隙間が生じてしまう。重ね部に隙間があると溶接中にライニング材が溶け落ちたり穴があいたりする。それを防止するために仮付溶接ピッチを小さくしたり、溶接中に重ね隙間の発生に応じて溶接速度や運棒速度を調節する技量を要し、溶接速度は遅く低エネルギーであった。このように、従来のライニング溶接法ではライニング材の薄肉化、ライニング溶接のエネルギー向上が望めず、ライニングコストが高くならざるを得なかった。

3. 高エネルギー低コストライニング法の開発

3.1 インダイレクトシーム溶接によるライニング

鋼構造物のうちでライニング防食面積の主要部分を占める鋼管部材を対象に、従来法に比べライニング材の大幅な薄肉化と溶接施工性の両立を図ることができる溶接施工法の確立を開発の狙いとした。厚み0.4~0.6mmのライニング材を1.0m/min程度の溶接速度で安定して溶接できるレベルに開発目標を設定した。

まず、抵抗シーム溶接、レーザ溶接、プラズマ溶接など複数の候補から抵抗溶接を選定した。抵抗シーム溶接法は接合すべき部分に直接高電流を通じて、その電流による抵抗発熱で溶接部の温度を上昇させて接合する方法であり、薄いライニング材を高速溶接できる。とくに電極による加圧を与えながら溶接するため、溶接熱による変形の影響を回避できることから、薄板および熱膨張率の大きい材料の溶接には合理的な溶接法である。海洋鋼構造物など比較的大きな構造物のライニング溶接に適用するため、一般に実用されている溶接部を挟んで両側から電極を当てて通電するダイレクト通電方式シーム溶接法ではなく、図3に示すようにライニング材側に2つの電極を当てるインダイレクト通電形式のシーム溶接法（以下、インダイレクトシーム溶接法）を採用した。

通常、インダイレクトシーム溶接法では、溶接する板を貫通するような通電回路を安定的に得るために裏面に銅などのバックバーを配置するが、本法ではライニング材の裏側にある鋼構造材を通して

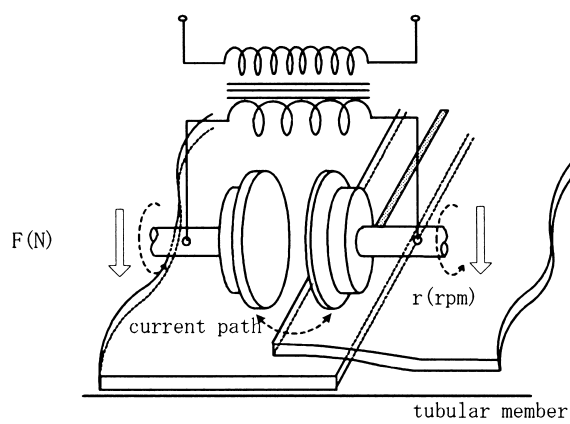


図3 インダイレクトシーム溶接機
Schematic illustration of indirect seam welding

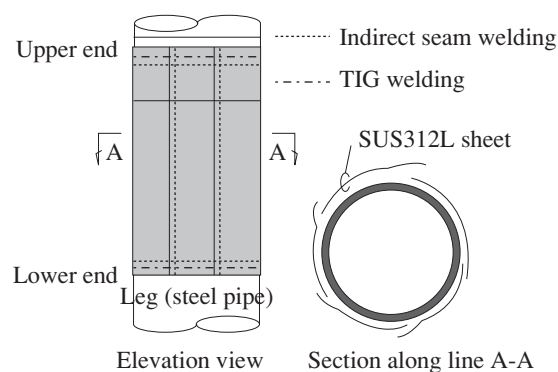


図4 鋼管部材のSUS 312L鋼ライニング例
Example of sheathing of tubular member with SUS 312L sheets



図5 インダイレクトシーム溶接装置
Appearance of the indirect seam welding equipment

通電回路が得られるため、0.5mm厚前後のステンレス鋼を直接部材に溶接することができる。図4に鋼管部材へのライニング要領の一例を示す。図4でインダイレクトシーム溶接部の軸方向の両端部は水密性を確保するためにTIG溶接によりシールする。ライニング後に鋼管とライニングの間にエアを注入してリーク試験を行って接合部の健全性を確認する。図5に実機化されたインダイレクトシーム溶接装置の写真を示す。

3.2 耐海水性ステンレス鋼ライニング部の特性

ライニング材に耐海水ステンレス鋼SUS 312L⁵⁾を用いたライニング法についてインダイレクトシーム溶接性および溶接部の疲労特性について検討した。

表1 SUS 312Lの機械的性質
 Mechanical properties of SUS 312L

	0.2%proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
JIS	≥350	≥650	≥35	
Example	461	843	39	192

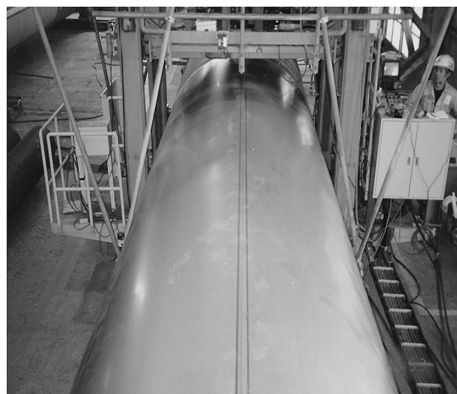
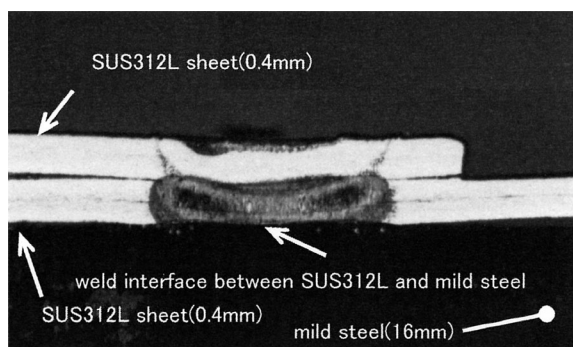
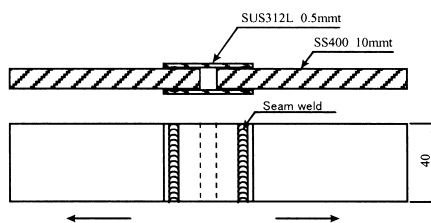
 表2 インダイレクトシーム溶接条件
 Indirect seam welding condition

Current I (A)	Force F (N)	Travel speed v (m/min)
7 000-10 000	1 000-3 000	0.6-1.5

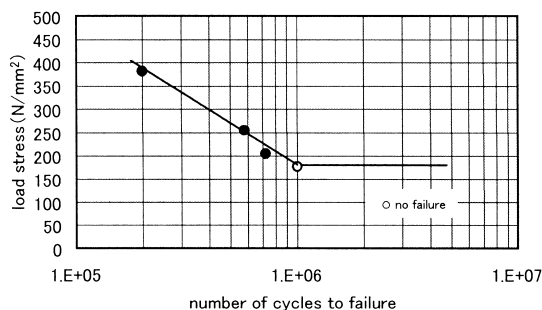
表1にSUS 312L材の機械的性質の規格値と代表例を示す。SUS 312LはSUS 304, SUS 316の約1.5倍の耐力値を有する高強度ステンレス鋼である。また、高硬度なので耐衝撃性、耐摩耗性も優れる。

抵抗シーム溶接ライニング法の溶接条件例を表2に示す。溶接速度最大1.5m/minの高速溶接を達成できた。ダイレクト通電の抵抗シーム溶接法に比べると加圧力分布、電流分布の制約から溶接性がやや劣り、表面溶融が多少見られる。図6にインダイレクトシーム溶接部外観を、図7に溶接部断面状況を示す。

シーム溶接部には風波による繰返し外力が作用することから、溶接部(ライニング材板厚0.5mm)の疲労試験を実施した。図8(a)に示す試験体を作製し、疲労試験条件を、部分片振り(応力比:0.1)、周波数:10Hz、応力振幅制御として実施した。図8(b)に疲労試験により得られたS-N線図を示す。シーム溶接部の疲労特性は、疲労設計指針⁶⁾の疲労設計曲線(せん断応力を受ける継手)にて、A等級継手


 図6 溶接部写真
 Appearance of a weld seam

 図7 シーム溶接部の断面
 Cross section of weld seam


(a) specimen for fatigue testing (SS400:10t,SUS312L:0.5t)



(b) S-N diagram

 図8 インダイレクトシーム溶接部の疲労試験(a)供試試験片, (b)シーム溶接部のS-N線図
 Results of fatigue testing

とはほぼ同等の疲労特性を有している。A等級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、シーム溶接部は良好な疲労特性を有している。

4. 高耐食性ライニング法の開発

インダイレクトシーム溶接によるライニング法を用いればライニング材の薄肉化と溶接の高効率化が達成できる。しかし、接合構造が隙間構造となるので使用環境によっては隙間腐食への耐食性が問題になることが想定された。より耐食性を向上させるため、隙間構造がなく、薄肉のままでも高効率を損なわないライニング溶接法の検討を行い、インダイレクトシーム溶接法とアーク溶接の併用による薄肉ライニング法を開発した。

4.1 インダイレクト・プラズマ複合溶接法

従来のアーク溶接によるストリップライニング法では図9(a)に示すように裏面の普通鋼部への熱拡散はほとんど期待できない。とくに、ステンレス鋼ライニング材は熱伝導率が炭素鋼に比べ小さいためライニング材中の熱拡散が遅く、ライニング材板厚が薄いほど、溶け落ち、穴あきが発生しやすくなる。

一方、図9(b)に示すように、インダイレクトシーム溶接後、アーク溶接を行う熱拡散ストリップライニング法では、アーク熱をインダイレクトシーム溶接部を介して裏面の炭素鋼部材に拡散させることができ、薄肉ライニング材でも溶け落ち、穴あきの防止が可能

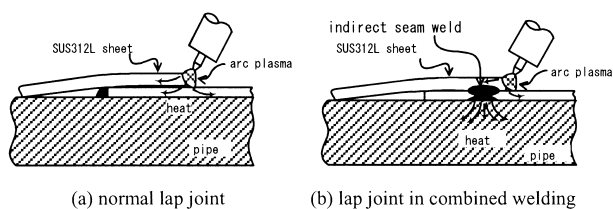

 図9 アーク熱の拡散(想定図)
 Heat transfer from arc plasma to base material

表3 プラズマ溶接条件(フィラーワイヤ:インコネル625, 0.8mm ϕ)
Plasma welding condition (filler wire: Inconel625, 0.8mm ϕ)

Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (m/min)	Wire feed rate (m/min)
80-120	26-30	0.6-1.2	4.0-7.0

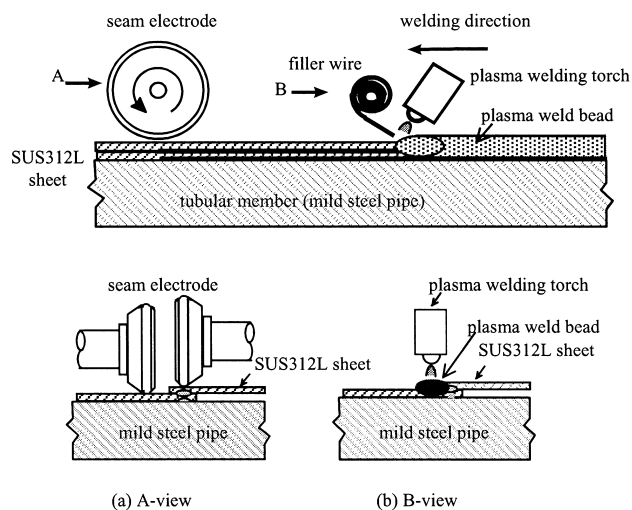


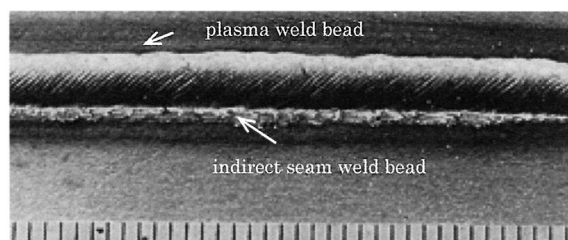
図10 抵抗・アーク複合溶接の模式図
Schematic illustration of combined welding

能となる。表3にプラズマ溶接条件の例を示す。

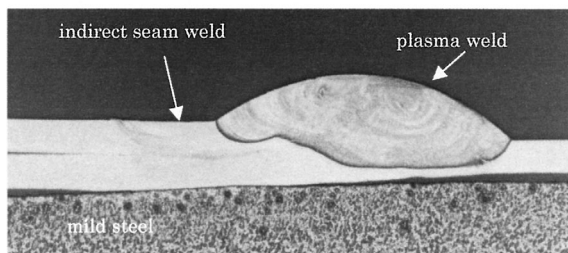
図10にインダイレクトシーム・プラズマ複合ライニング溶接法の模式図を示す。インダイレクトシーム溶接とプラズマ溶接を同時に行うことにより溶接能率を低下させることなくライニングが可能である。表3にプラズマ溶接条件例を示す。なお、この方法は3.1項で述べたTIG溶接部へも適用可能である。

4.2 複合溶接法によるライニング溶接部の特性

前記表2に示したインダイレクトシーム溶接条件と表3に示したプラズマ溶接条件の組み合わせにより溶接した溶接ビード外観、溶



(a) appearance of combined seam weld



(b) cross section of combined seam weld

図11 溶接ビード外観(上)と断面マクロ(下)
Appearance of weld bead (top) and cross section (bottom)

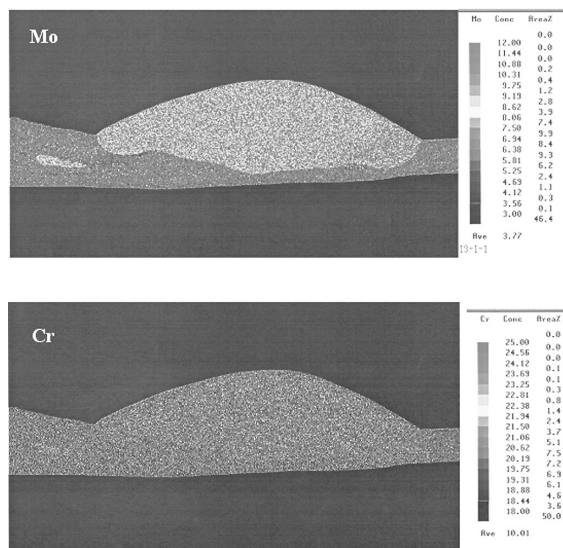


図12 プラズマ溶接ビードのEPMA分析
Surface element analysis of a plasma arc weld by EPMA

接部断面例をそれぞれ図11に示す。

0.4mm厚ステンレス鋼ライニング材にはプラズマ溶接による溶け落ち、穴あきの発生がなく隙間構造のない良好な溶接部が得られた。図12に複合溶接部の断面のCrとMoの濃度分布をX線マイクロアナライザで調べた結果を示す。溶接金属部、溶接熱影響部のCrとMoの分布は母材のそれらと比べて低濃度になっておらず、耐食性上問題ないことが確認された。

5. 補修溶接

漂流物の衝突などにより金属ライニングが損傷し、補修が必要な場合のパッチ当て補修要領を図13に示す。パッチ当て用材料には厚み1.0~1.5mmのSUS312L材を用いる。とくに、損傷部からライニング材と部材の隙間に海水が入っている場合にはパッチ材の中央付近に溶接時の熱による内部水分の逃げ口(水蒸気抜き孔, 5mm ϕ)を取り付ける。補修部近傍が乾燥している場合はこの孔は不要である。周囲をTIG溶接で重ね隅肉溶接した後、水蒸気抜き孔をTIG溶接で塞ぐ。溶接材料にはインコネル625を用い、溶接後浸透探傷試験にてきずがないか検査する。

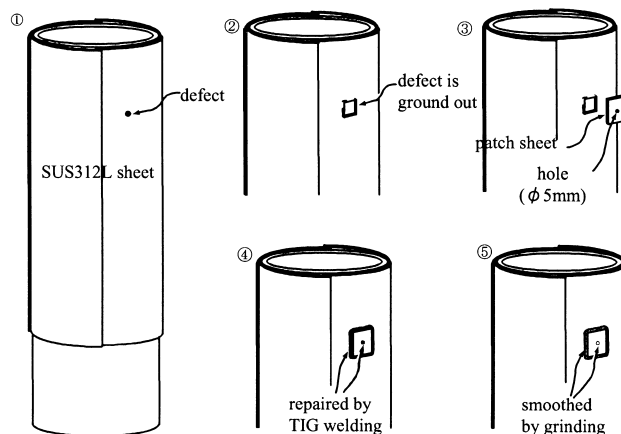


図13 補修溶接施工法
Procedure of repair welding

6. 海洋構造物への適用

参考文献3)に本工法を用いた代表的な構造物の写真が示されている。この適用例のように、耐海水性ステンレス鋼ライニングは、“低い初期コスト+低い維持管理コスト”を実現しており、長期供用時のライフサイクルコスト最小化を図れる防食法を実現した。まもなくプロジェクトが開始されようとしている羽田空港羽田沖再拡張工事では、一部が鋼構造ジャケット構造仕様⁷⁾となっており、鋼構造部の飛沫・干満部の構造部分に耐海水性ステンレス鋼ライニングが施される予定である。

7. まとめ

(1)インダイレクトシーム溶接による金属ライニング法を開発し、0.4～0.6mm厚程度へのライニング材の薄肉化と溶接の高能率化

を達成した。

- (2)耐海水ステンレス鋼SUS 312Lを用いたライニング溶接部が十分な疲労特性を有することを確認した。
- (3)さらに、インダイレクトシーム・プラズマ複合ライニング溶接法により、溶接部に隙間構造のない高耐食性ライニング法を開発した。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術センター:港湾構造物の防食・補修マニュアル, 1997
- 2) 山本ら:チタン, 47(3), 218-226(1999)
- 3) 佐藤ほか:新日鉄技報, (377), 34(2002)
- 4) ステンレス協会:SAS 801ステンレス鋼溶接施工基準
- 5) 宇城:材料と環境, 41, 329(1992)
- 6) (社)日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針, 1993
- 7) 国土交通省:羽田再拡張工事公示書, 2004