【鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板】防食ハンドブック

【鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板】

防食ハンドブック

― 設計・施工・維持管理 ―

平成２３年３月

平成23年3月　一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会

一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会

（写真－１）[1)]

（写真－２）[1)]

（写真－３）[2)]

＜写真の出典＞

１）鋼管杭協会：［海洋環境下における］鋼製護岸・岸壁の防食システム（1995）

２）建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部：土木鋼材用重防食被覆材料の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅰ）（1995）

改訂にあたって

鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板は、高い強度や安定した品質、優れた施工性などの特長を有し、社会基盤整備のための主要な建設資材として広く使用され、港湾・海洋・河川構造物などに多く採用されています。平成８年の兵庫県南部地震では、これらの鋼材を使用した施設の被害が少なかったことから、改めてその強度と靭性に裏付けられた高い安全性が再認識されました。しかし、鋼材を厳しい環境に使用する場合には腐食するという性質があるため、その機能を充分に発揮するためには適切な防食技術が必要です。

鋼管杭・鋼矢板技術協会（旧 鋼管杭協会）では昭和46年の設立以来、鋼管杭の品質向上、利用技術の開発・普及に努めてまいりました。その活動の一環として、協会内に「防食委員会（現 港湾技術委員会・防食ＷＧ）」を設け、各種防食法の調査研究を長期間にわたり実施しております。関係機関との共同研究として10余年にわたり行った千葉沖や20余年にわたり行っている阿字ヶ浦沖・波崎沖での実杭による海洋暴露試験はその一例です。これらの調査研究の成果のひとつとして、「重防食製品」（ポリエチレンやウレタンエラストマー樹脂を工場で被覆した鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板）は、耐久性や施工性、経済性に優れた防食法として位置付けられました。当協会では、「重防食製品」を広くご利用いただくために、仕様の標準化を図るとともに、各種マニュアルを整備致しました。

今般、これまでの調査研究成果と関連技術を一冊にまとめ需要家の皆様の便利を図ることを目的に、鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板を対象とした「防食ハンドブック」を改訂するにあたり、作成時点の趣旨を踏襲するとともに昨今の実情を加味すべく尽力致しました。
港湾・漁港・河川等の鋼構造物の設計・施工・維持管理に日頃携わっておられる全国の技術者の方々におかれましては、本ハンドブックを手近に置いていただき、参考書として活用していただければ幸いです。

最後に、本ハンドブック作成にあたりご指導をいただいた関係官庁の方々や、貴重な資料をご提供いただいた防食補修工法研究会の方々に改めて感謝の意を表します。

平成23年３月

一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会

代表理事
岡 原　美 知 夫

編　集

一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会

港湾技術委員会　防食ＷＧ

ＷＧ長	喜田　浩	住友金属工業（株）
委　員	中川　敬	（株）クボタ
委　員	横幕　清	ＪＦＥスチール（株）
委　員	岸　慶一郎	ＪＦＥスチール（株）
委　員	原田　佳典	新日本製鐵（株）
委　員	前野　浩司	新日本製鐵（株）
委　員	清水　一夫	日本防蝕工業（株）
事務局	大槻　貢	一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会

［平成22年3月現在］

目　　次

頁

改訂にあたって

第１章　概説 ―――――――――――――――――――――――――― １－　１
１．１　需要動向と防食技術の変遷 ―――――――――――――――― １－　１
１．２　ハンドブックの目的と内容 ―――――――――――――――― １－　４
１．３　参考にした防食基準・指針など ―――――――――――――― １－　６

第２章　腐食防食の基礎 ―――――――――――――――――――― ２－　１
２．１　腐食一般 ―――――――――――――――――――――――― ２－　１
２．１．１　鋼材の腐食 ―――――――――――――――――――― ２－　１
２．１．２　腐食の形態 ―――――――――――――――――――― ２－　２
２．１．３　腐食におよぼす環境因子の影響 ―――――――――― ２－　３
２．１．４　腐食におよぼす材料因子の影響 ―――――――――― ２－　８
２．２　海洋環境における腐食 ―――――――――――――――― ２－１０
２．２．１　海洋鋼構造物の腐食環境 ―――――――――――― ２－１０
２．２．２　港湾における鋼材の腐食速度 ―――――――――― ２－１２
２．２．３　内港、外港、河口での腐食の違い ―――――――― ２－１３
２．２．４　港湾における集中腐食 ―――――――――――――― ２－１４
２．３　河川環境における腐食 ―――――――――――――――― ２－１８
２．３．１　一般河川の腐食 ―――――――――――――――― ２－１８
２．３．２　河川の感潮部の腐食 ―――――――――――――― ２－１９
２．４　土壌環境における腐食 ―――――――――――――――― ２－２０
２．４．１　土中での一般の腐食速度 ―――――――――――― ２－２０
２．４．２　地下水位の影響 ―――――――――――――――― ２－２１
２．４．３　フーチングの影響 ―――――――――――――――― ２－２３
２．４．４　土壌の違いによる影響 ―――――――――――――― ２－２５
２．５　杭内面の腐食 ―――――――――――――――――――― ２－２７
２．６　防食の基礎 ―――――――――――――――――――――― ２－２９
２．６．１　防食法の分類 ―――――――――――――――――― ２－２９
２．６．２　有機被覆の劣化過程とその防止対策 ―――――――― ２－３５
２．６．３　鋼製施設の防食工法の最近の動向 ―――――――― ２－３７

第３章　防食設計 ―――――――――――――――――――――― ３－　１
３．１　適用防食法 ―――――――――――――――――――――― ３－　１
３．１．１　重防食被覆 ―――――――――――――――――― ３－　１
３．１．２　電気防食 ―――――――――――――――――――― ３－　２
３．１．３　腐食しろ ―――――――――――――――――――― ３－　４

頁

３．２　海洋環境 ―――― ３－　６
３．２．１　防食設計の考え方 ―――― ３－　６
３．２．２　港湾鋼構造物の設計 ―――― ３－　８
３．２．３　漁港鋼構造物の設計 ―――― ３－１１
３．２．４　海洋鋼構造物の設計 ―――― ３－１２
３．２．５　防食設計手順と設計例 ―――― ３－１３
３．３　河川環境 ―――― ３－２６
３．３．１　防食設計の考え方 ―――― ３－２６
３．３．２　河川鋼構造物の設計 ―――― ３－２７
３．３．３　防食設計例 ―――― ３－２８
３．４　土壌（陸上）環境 ―――― ３－３１
３．４．１　防食設計の考え方 ―――― ３－３１
３．４．２　鋼管杭基礎の設計 ―――― ３－３２
３．４．３　防食設計例 ―――― ３－３３

第４章　防食材料（重防食製品） ―――― ４－　１
４．１　重防食製品の概要 ―――― ４－　１
４．１．１　鋼材規格 ―――― ４－　１
４．１．２　重防食製品 ―――― ４－　１
４．２　各性状の試験方法 ―――― ４－　４
４．３　被覆材料の性能 ―――― ４－　５
４．４　重防食製品の製造方法 ―――― ４－１０
４．５　製品設計上の留意点 ―――― ４－１３
４．６　重防食製品の外観および寸法 ―――― ４－１９
４．６．１　鋼管杭・鋼管矢板 ―――― ４－１９
４．６．２　鋼矢板 ―――― ４－２０
４．７　重防食製品の検査 ―――― ４－２３
４．７．１　鋼管杭・鋼管矢板 ―――― －４－２３
４．７．２　鋼矢板 ―――― ４－２５

第５章　施工 ―――― ５－　１
５．１　重防食製品の施工 ―――― ５－　１
５．１．１　運搬・保管 ―――― ５－　２
５．１．２　打込み工 ―――― ５－　６
５．１．３　高止り・打ち過ぎ時の対応 ―――― ５－１３
５．１．４　上部工打設時 ―――― ５－１６

頁
５．１．５　溶接 ―― ５-１８
５．１．６　前面地盤の掘削、捨石 ―― ５-１９
５．１．７　補修 ―― ５-２０
５．２　電気防食の施工 ―― ５-２１
５．２．１　現場作業者 ―― ５-２１
５．２．２　作業準備 ―― ５-２１
５．２．３　施工方法の選定 ―― ５-２１
５．２．４　施工手順 ―― ５-２１
５．２．５　安全対策 ―― ５-２４
５．２．６　検査 ―― ５-２４

第６章　維持管理 ―― ６－　１
６．１　維持管理の手順 ―― ６－　１
６．２　重防食被覆の維持管理 ―― ６－　５
６．２．１　点検・調査の方法 ―― ６－　５
６．２．２　重防食被覆の補修 ―― ６－　８
６．３　電気防食の維持管理 ―― ６-１１
６．３．１　点検・調査の方法 ―― ６-１１
６．３．２　電気防食装置の補修 ―― ６-１５
６．４　無防食鋼構造物（腐食しろで対応した鋼構造物）の維持管理 - ６-１５
６．４．１　対象と目的 ―― ６-１５
６．４．２　点検および健全度評価 ―― ６-１６
６．４．３　補修・補強 ―― ６-２２

付　　録

付　１　製品概要 ―― １
付　２　海洋環境下の長期暴露試験 ―― ７
付　３　海上橋上部工の重防食塗装 ―― ２１
付　４　下部工の超長期防食法 ―― ２７
付　５　素地調整 ―― ３３
付　６　防食被覆材料の試験法 ―― ３７
付　７　水中切断・溶接 ―― ４３
付　８　外部電源方式による電気防食 ―― ４７
付　９　防食工の積算 ―― ５７
付１０　腐食・防食の用語集 ―― ６１
索引 ―― ７３

第１章　概説

１．１　需要動向と防食技術の変遷 ―――――――――――――――――――― １－　１
１．２　ハンドブックの目的と内容 ―――――――――――――――――――― １－　４
１．３　参考にした防食基準・指針など ―――――――――――――――――― １－　６

第１章　概説

１．１　需要動向と防食技術の変遷

（１）需要動向

我が国で鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板が橋梁・建築基礎、河川・港湾施設などに使用されてからおよそ45年になる。昭和30年代後半から40年代にかけての高度経済成長に伴い建設用鋼材の需要は増大し、鋼管杭・鋼管矢板や鋼矢板の需要は40年代後半から10年間はそれぞれ約100万トン／年に及んだ。平成以降の鋼管杭の需要動向を図1.1-1に示すが、最近の需要量は50～60万トン／年で推移している。

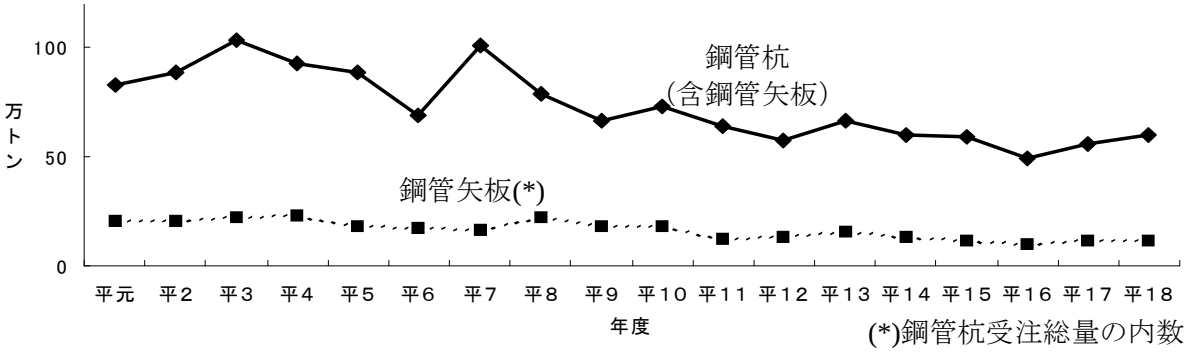


図1.1-1　鋼管杭・鋼管矢板の需要動向

また、最近の鋼管杭・鋼管矢板の部門別需要内容を図1.1-2 に示す。鋼管杭の土木と建築の使用割合は昭和43年ごろまではほぼ同じであったが、最近では官需を主体とする土木分野の需要が大半を占めている。そのなかでもとりわけ厳しい腐食環境に晒される港湾分野における需要も２割程度ある。

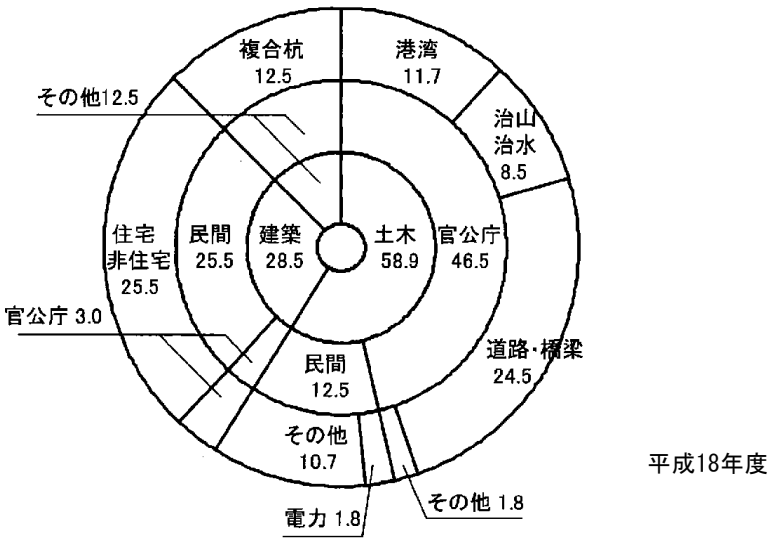


図1.1-2　鋼管杭・鋼管矢板の部門別需要（%）

（２）防食技術の変遷

近年、社会資本が整備されるなかで鋼構造物は大型化し、その設置環境は広域化して過酷な腐食環境である臨海地帯、さらには海上沖合にまで拡がり、腐食対策が重要な課題となってきている。桟橋や係船岸壁、護岸などの港湾鋼構造物は、腐食対策として当初は腐食しろで対応することが多かった。海洋環境のなかでもっとも激しい腐食が生じる部位は飛沫・干満帯であり、1970年後半に腐食問題が顕在化してからは塗覆装や電気防食による防食法が採用されてきている。当時の防食技術はタールエポキシ樹脂塗装であった。その後ペトロラタムやセメントモルタルをＦＲＰ保護カバーで覆う現地施工型の防食工法を経てポリエチレンやウレタンエラストマーを工場で被覆するプレ防食型の重防食製品へと比重が移ってきている。

また、最近では、例えば、羽田空港再拡張工事での桟橋部のジャケット構造への耐海水ステンレス被覆の適用等、大型かつ重要な構造物に対してもプレ防食型の重防食製品が活用され、100年の長期耐久性を期待できる防食工法も開発・適用されつつある。

これらの長期耐久性防食技術は施設管理者、建設会社、防食会社、学協会など関係者の永年の努力が実って、著しく進展した。また、併せて公的機関における防食の基準も整備されてきている。

（３）鋼管杭・鋼矢板技術協会の防食分野での取り組み

当鋼管杭・鋼矢板技術協会は設立当初より腐食防食技術に関する調査・研究や規格・基準の整備に取り組んできており、その成果を各種防食技術資料として提供してきた（表1.1-1 参照）。

表1.1-1　鋼管杭・鋼矢板技術協会の発行または共同研究した腐食防食関連資料

資　　料　　名	発行年度	共　同　研　究　機　関
1．　鋼管杭－その設計と施工－	2009改訂	
2．　鋼管杭の防食法に関する研究 総括報告書	1995	運輸省港湾技術研究所 (財)沿岸開発技術研究センター
3．　海洋鋼構造物の防食指針・ 同解説(案)（飛沫帯・干満帯編）	1990	建設省土木研究所
4．　防食鋼管杭の開発とその海洋暴露 試験記録（その１～その12）	1975～ 1989	建設省土木研究所 (財)国土開発技術研究センター
5．　防食鋼管杭の開発とその海洋暴露 試験報告書　千葉沖・阿字ヶ浦沖	1992	建設省土木研究所 (財)国土開発技術研究センター
6．　熱帯海域における鋼材と防食材の 暴露試験10年の結果報告	1997	
7．　重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書	2011改訂	
8．　重防食鋼矢板製品仕様書	2011改訂 （予定）	
9．　重防食鋼管杭・鋼管矢板 施工の手引き	2011改訂 （予定）	
10.　重防食鋼矢板の施工の手引き	2011改訂 （予定）	
11.　[海洋環境下における]鋼製護岸・ 岸壁の防食システム	1995	
12.　鋼管杭の防食法に関する研究 20年 の長期暴露試験 総括報告書	2006	(独)港湾空港技術研究所,(財)沿岸技術研究センター，関西ペイント(株)，関西ペイント販売(株)，(株)ナカボーテック，日本防蝕工業(株)，(株)日鉄防蝕(株)ブリジストン，吉川海事興業(株)，石川島建材工業(株)，大日本塗料(株)，日本ペイント(株)，神東塗料(株)，日本アマーコート(株)，神戸ペイント(株)，昭和シェル石油(株)，三井造船(株)，日鉱防蝕(株)，住鉱エコエンジ(株)，(株)中山製鋼所，日本冶金工業(株)，太平洋セメント(株)

１．２　ハンドブックの目的と内容

（１）目的

鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板は橋梁・建築基礎、港湾、漁港、人工島・沖合施設、治山、治水などのさまざまな分野における鋼製施設に使用されている。これらの施設で求められる防食技術は、それぞれの用途や腐食環境によって異なっている。

本書「防食ハンドブック」は、建設用鋼材の各種使用分野の腐食・防食について広く横断的にまとめ、鋼製施設の設計・施工・維持管理の実務に利用してもらうことを目的とし、腐食・防食における集大成として整備したものである。

（２）内容

鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の使用環境は、大別して海洋、河川、土壌と、それぞれ異なっている。本書ではこれらの環境別に腐食防食の基礎、設計、施工、維持管理における考え方や方法について公的機関の基準等に照らし合わせて記述している。とくに使用環境のなかで過酷な腐食環境である海洋環境を重点的にとりまとめ、さらに河川や土壌についても詳述している。

また、防食工法としてポリエチレンやウレタンエラストマーを被覆した重防食製品と電気防食の適用を中心に記述している。

なお本書の構成は本文６章からなり、

概説を	第１章
腐食・防食の基礎編として	第２章
新設鋼構造物を対象とした設計・材料・施工編として	第３章～５章
新設、既設を含む鋼構造物の維持管理編として	第６章

にそれぞれ記述し、巻末に付録として腐食防食に関する参考資料を収録した。

本書の利用にあたっては図1.2-1 の構成フローを参考にされたい。

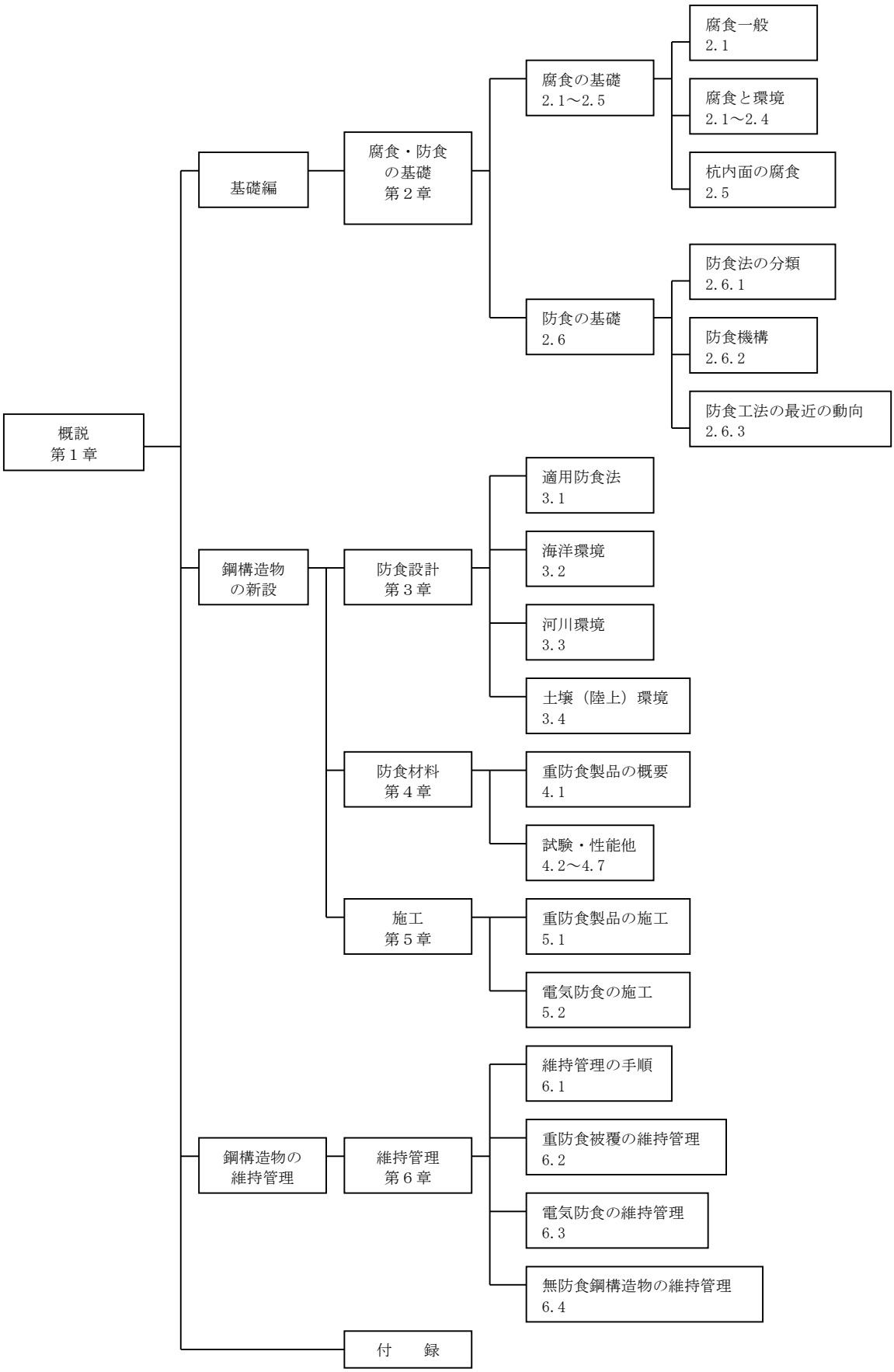


図1.2-1　ハンドブックの構成

１．３　参考にした防食基準・指針など

本ハンドブックにおいて参考にした防食基準・指針はつぎのとおりである。

（１）土木関係

①「海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）（飛沫帯・干満帯編）」、
（建設省土木研究所、1990）

②「道路橋示方書・同解説 Ⅳ 下部構造編」、（（社）日本道路協会、2002）

③「設計要領第二集」、（高速道路総合技術研究所、2006）

④「鉄道構造物等設計標準・同解説　基礎構造物・抗土圧構造物」、
（（財）鉄道総合技術研究所、2000）

⑤「土木工事一般仕様書･土木工事必携」、（日本下水道事業団、2008）

（２）港湾、漁港関係

①「港湾の施設の技術上の基準・同解説」､((社)日本港湾協会､2007)

②「東京港腐食対策手引書（改訂版）」、（東京都港湾局、1998）

③「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」、
（（財）沿岸技術研究センター、2009）

④「漁港･漁場の施設の設計の手引」、（（社）全国漁港漁場協会、2003）

（３）建築関係

①「国土交通省告示1113号」、（平成13年）

②「建築基礎構造設計指針」、（（社）日本建築学会、2001）

③「東京都建築構造設計指針」、（東京都、2001）

（４）治山・治水関係

①「土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書　技術書」、
（農林水産省農村振興局、2001）

（５）河川関係

①「災害復旧工事の設計要領」（（社）全国防災協会、2010）

第２章　腐食防食の基礎

２．１　腐食一般 ---------- ２－　１
　２．１．１　鋼材の腐食 ---------- ２－　１
　２．１．２　腐食の形態 ---------- ２－　２
　２．１．３　腐食におよぼす環境因子の影響 ---------- ２－　３
　２．１．４　腐食におよぼす材料因子の影響 ---------- ２－　８
２．２　海洋環境における腐食 ---------- ２－１０
　２．２．１　海洋鋼構造物の腐食環境 ---------- ２－１０
　２．２．２　港湾における鋼材の腐食速度 ---------- ２－１２
　２．２．３　内港、外港、河口での腐食の違い ---------- ２－１３
　２．２．４　港湾における集中腐食 ---------- ２－１４
２．３　河川環境における腐食 ---------- ２－１８
　２．３．１　一般河川の腐食 ---------- ２－１８
　２．３．２　河川の感潮部の腐食 ---------- ２－１９
２．４　土壌環境における腐食 ---------- ２－２０
　２．４．１　土中での一般の腐食速度 ---------- ２－２０
　２．４．２　地下水位の影響 ---------- ２－２１
　２．４．３　フーチングの影響 ---------- ２－２３
　２．４．４　土壌の違いによる影響 ---------- ２－２５
２．５　杭内面の腐食 ---------- ２－２７
２．６　防食の基礎 ---------- ２－２９
　２．６．１　防食法の分類 ---------- ２－２９
　２．６．２　有機被覆の劣化過程とその防止対策 ---------- ２－３５
　２．６．３　鋼製施設の防食工法の最近の動向 ---------- ２－３７

参考文献 ---------- ２－３８

第２章　腐食防食の基礎

２．１　腐食一般

２．１．１　鋼材の腐食

鋼構造物は、海洋、河川、土壌など多様な環境に設置されている。これらの環境で、海水、淡水、大気、土壌などのpHがほぼ中性な環境では、水と酸素が関与し、電気化学的反応により腐食が進行する。

鋼材を中性の水溶液に浸すと、その表面には種々の理由からアノードとカソードが存在し、局部電池（腐食電池）が形成される。このアノードとカソードでは相互に電子を授受しながら（１）式および（２）式で表される反応が進行する。

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e \qquad \text{アノード反応} \quad (1)$$

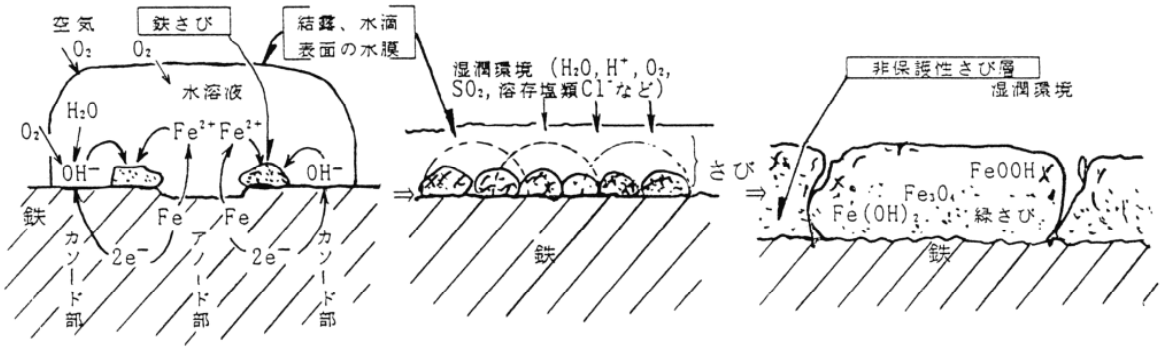
$$1/2O_2 + H_2O + 2e \longrightarrow 2OH^- \qquad \text{カソード反応} \quad (2)$$

（１）式のアノード反応では鉄の溶解、また(２)式のカソード反応では酸素の還元が起こり、鋼の腐食反応は(１)式と(２)式をまとめた(３)式で表せる。

$$Fe + 1/2O_2 + H_2O \longrightarrow Fe(OH)_2 \qquad (3)$$

（３）式の $Fe(OH)_2$ は鋼表面に沈殿したのち、さらに酸化や脱水等を経て「さび」と呼ばれる複雑な水和酸化鉄になる。なお、図2.1-1 にさびの生成模式図を示す。

また、鋼の表面に形成されるアノードとカソードが相互に入り混じって分布するときと、やや明瞭にその領域が区別できる程度のマクロ的集落を作って分布する場合がある。前者では鋼は均一に腐食するが、後者の場合は不均一に腐食する。腐食電池のアノードとカソードがマクロ的に形成する例としては、異種金属との接触、酸素の濃淡や通気差などが知られている。



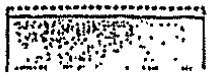
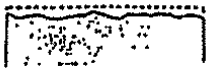
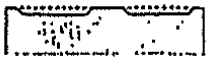
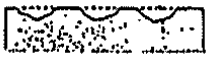
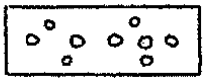
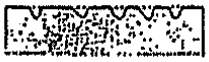
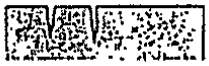
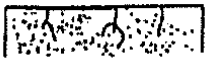
（ａ）水滴下の局部電池　　（ｂ）さびはさびを呼ぶ（腐食促進作用）　　（ｃ）さび層の形成

図2.1-1　さびの生成模式図[1)]

２．１．２　腐食の形態

腐食の形態を大別すると、表2.1-1 に示すように鋼の全面にわたってほぼ均一に腐食する全面腐食と、鋼のある特定の部分に腐食が集中する局部腐食に大別される。

表2.1-1　腐食の形態[2)]

略号	腐食形態		
Ge		even general corrosion 比較的平担な全面腐食	
Gu		uneven general corrosion 凹凸の激しい全面腐食	
Le		even local corrosion 比較的平担な局部腐食	
Lu		uneven local corrosion 凹凸の激しい局部腐食	
W		wide pits 広口の孔食	
M		medium pits 普通の孔食	
N		narrow pits 深い孔食	
K		cracking 割　れ	
	曝露面(影の部分は腐食面)		断面(中心線に沿って)

２．１．３　腐食におよぼす環境因子の影響

（１）pH

図2.1-2 に示すように、pHが４～10の範囲では腐食速度はpHに関係なく、鋼材表面に到達する酸素量によって決定される。pH４以下の低pH領域では、腐食速度が著しく増大する。しかし、通常の河川や海水ではこのような低pHになることはなく、腐食速度に影響を及ぼすことは少ない。ただし、酸性河川や汚染海域では注意を要する。

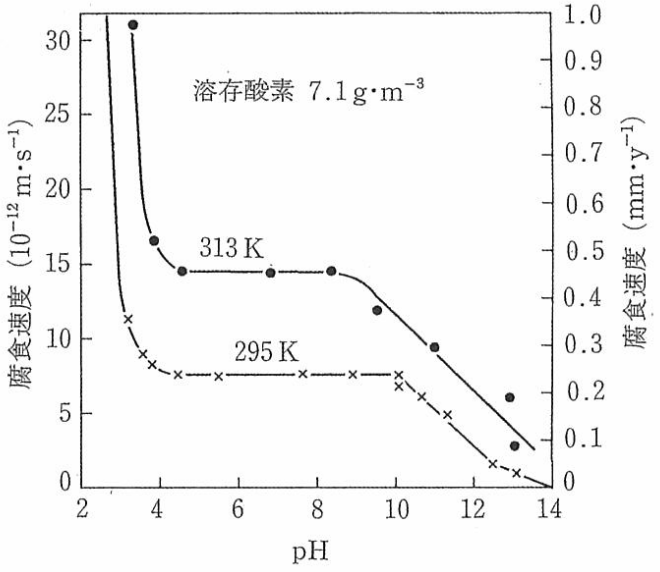


図2.1-2　鋼材の腐食速度と pH の関係[3)]

（２）温度

温度が上昇すると鋼材表面への酸素の拡散速度が増大し、同時に鋼材表面におけるアノード反応及びカソード反応の速度も増すので腐食速度は大きくなる。その結果を図2.1-3 に示す。開放系では温度の上昇に伴い溶存酸素量が減少するため、ある温度以上では、温度上昇による拡散速度の増加と溶存酸素量の減少との兼ね合いから腐食速度は急激に低下する。給水配管や海水配管などのような密閉系では温度上昇による溶存酸素の減少がないことから、腐食速度は温度の上昇に伴って増加する。

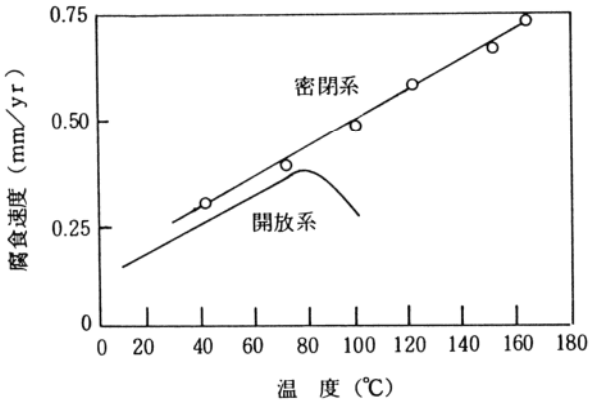


図2.1-3　鋼材の腐食速度と水温の関係[4)]

（３）溶解成分

①海水中の溶解成分

海水中には表2.1-2 に示すように塩化物などの塩類が多量に溶解している。また、海水の塩分濃度は地域的に多少の変動があるものの、概ね3.2～3.6%の範囲にあり、溶解成分の濃度による腐食速度の影響は小さい。

ただし、海水と河川水との混合域では、塩類濃度（NaCl 濃度）が大幅に低下することがあるが、この時塩類濃度が低下すると、鋼材の腐食速度は若干大きく（極大値）なる場合がある。(頁2-19、図2.3-1 参照)

また、汚染海水の場合には、pH の低下、化学的酸素要求（COD）量の増加、アンモニウムイオン（NH_4^+）の増加や硫化物イオンの検出が認められることが多く、鋼材の腐食に対してはこれらの影響を総合的に受けるため、汚染の程度（水質分析値）と鋼材の腐食速度との定量的な関係は得られていない。

②淡水中の溶解成分

淡水では、溶解塩類が腐食に及ぼす影響は一般に小さい。しかし、$CaCO_3$が過飽和であれば、$CaCO_3$が析出し鋼面に被膜が生成され、溶存酸素の拡散の有効な障壁となって腐食を抑制する場合がある。このことから、水が $CaCO_3$と平衡にある pH (pHs)を実際の pH から差し引いた値をランジェリア指数（飽和指数）と呼び、$CaCO_3$の被膜生成による腐食抑制効果の指標にしている。しかし、日本の河川水では、表2.1-3 に示すようにCa^{2+}濃度が低く、析出による腐食の抑制効果は期待できない。

③土壌の溶解成分

土壌中には K^+、Na^+、Mg^{2+}や Ca^{2+}などの陽イオンをはじめ多種類の成分が溶解しているが、その量は100～1500ppm と少ない。それぞれの塩化物や硫酸塩等の塩類は一般に金属の腐食を増大させるが、Ca や Mg の塩類は中性条件では不溶性の酸化物や炭酸塩を析出し金属表面に保護被膜を形成する場合もある。

表2.1-2　海水中の溶存塩の主要成分[5)]

カチオン		アニオン	
Na^+	10556	Cl^-	18980
Mg^{2+}	1272	SO_4^{2-}	2649
Ca^{2+}	400	HCO_3^-	140
K^+	380	Br^-	65
Sr^{2+}	13	BO_3^{3-}	26
		F^-	1

表2.1-3　河川水の水質

	代表値
ｐＨ	6.6～7.6
ｱﾙｶﾘ度(ppm $CaCO_3$)	10～50
Ca^{2+} (ppm)	4～13
Mg^{2+} (ppm)	1～ 4
Cl^{-} (ppm)	2～12
SO_4^{2-} (ppm)	3～15

（４）　溶存酸素の影響

一般の水溶液中での鋼の腐食は周囲の環境から鋼表面に移動する溶存酸素の拡散速度により決まる。したがって、溶液中の溶存酸素濃度が増大すると、鋼表面に供給される酸素量が直線的に増加し、図2.1-4、図2.1-5 に示すように海水中でも淡水中でも同じような傾向を示す。また、汚染海水などの場合は溶存酸素濃度が４ppm 以下になることがあり、前述のように溶存酸素量の減少は腐食速度の低下につながることになるが、実際の汚染海水中では溶存酸素の低下に伴って嫌気性バクテリアの活動が活発になり、逆に腐食速度が大きくなることがある。

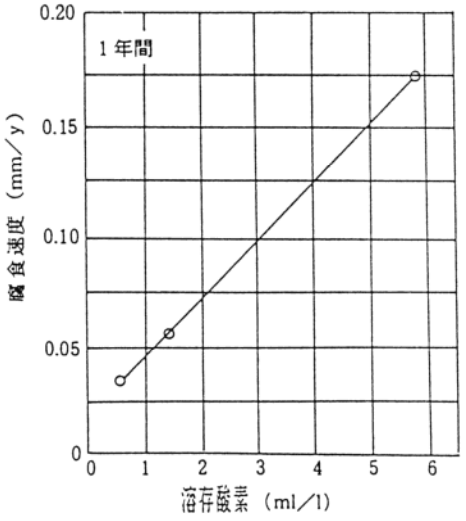


図2.1-4　鋼材の腐食と溶存酸素の関係[6)]（太平洋）

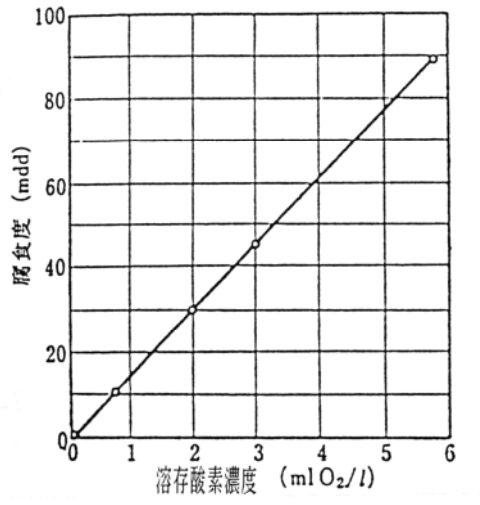


図2.1-5　軟鋼の腐食に及ぼす溶存酸素濃度の影響[7)]（淡水）

（５）流速の影響

一般の水溶液中での鋼の腐食は、周囲の環境から鋼の表面に移動する溶存酸素の拡散速度に大きく影響される。従って、流速の増加とともに、鋼材表面への酸素拡散層の厚さが減少し、また表面被膜（さび）が鋼材の表面から除去され易くなるなど、鋼材表面への酸素の供給が増しその結果腐食速度が一般的に増加する。図2.1-6 に流速と腐食速度の関係の模式図を示した。海水については、図2.1-7 に示すように流速の増加と共に腐食速度は増加する。しかし、中性の淡水の場合は、酸素の供給速度が限度以上に大きくなると鋼表面に不動態が生じ腐食速度が低下する場合がある。この結果を図2.1-8 に示す。しかし河川水等は種々の溶存イオンが存在することから、通常は海水と同様に流速の増加と共に腐食速度が増加する。

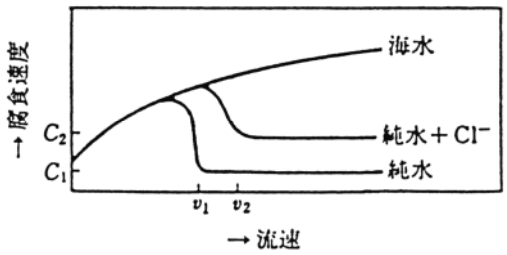


図2.1-6　流速と腐食速度の関係に対する
水質の影響（模式図）[8)]

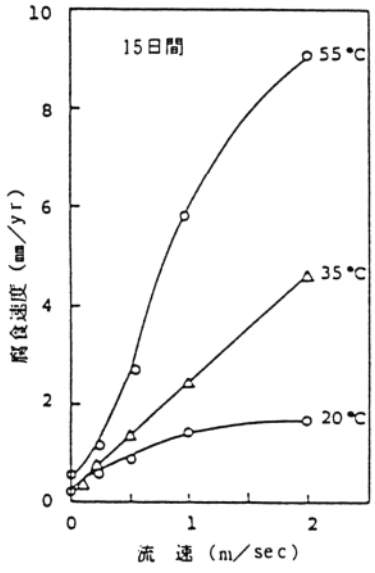


図2.1-7　鋼材の腐食速度と流速
及び温度との関係[9)]
（３％ NaCl 溶液）

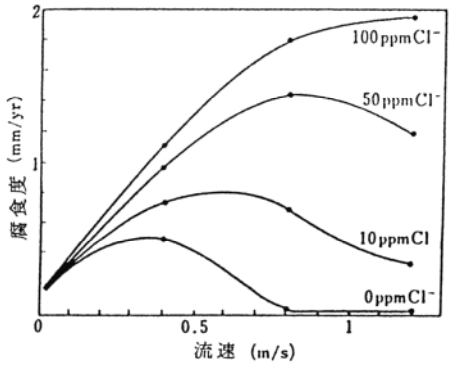


図2.1-8　淡水中の Cl^- の影響[8)]

（6）微生物による腐食

微生物は、多種多様な物質の合成や分解を繰り返し周囲の環境に影響を与えている。この微生物のうちあるものは、金属の腐食に関与している。それは、微生物が直接金属を摂取するのでなく、その繁殖により周囲の環境を変化させ、金属が腐食しやすい環境を作りだし､腐食反応を促進させる。表2.1-4 に土壌腐食に関係するバクテリア種を示す。微生物腐食で大きな影響を及ぼす硫酸塩還元バクテリアの場合は、有機物中の水素を酸化することによりエネルギーを得、その結果として硫化水素を生成する。この硫化水素により鋼の腐食が促進される。海中での腐食において海底近傍の腐食量が大きい場合は、ヘドロ中に生息する硫酸塩還元バクテリアの影響を受けている場合が多く、腐食生成物が黒色で腐卵臭を感じた場合は硫酸塩還元菌によることが考えられる。表2.1-5 に酸化還元電位による硫酸塩還元バクテリアの腐食傾向を示す。

表 2.1-5　酸化還元電位と硫酸塩還元バクテリア腐食の傾向[11)]

酸化還元電位（ＳＨＥ）	腐食の傾向
＜100mV	強　い
100～200	中程度
200～400	弱　い
＞400	殆どない

表2.1-4　土壌腐食に関係するバクテリア種[10)]

微生物	硫酸塩還元菌 ＳＲＢ	メタン生成菌 ＭＰＢ	鉄酸化細菌 ＩＯＢ	イオウ酸化細菌 ＳＯＢ	鉄　細　菌 ＩＢ
分　類	嫌 気 性 菌		好　気　性　菌		
生息環境	嫌気性の粘土、埋立地、ヘドロ、錆こぶの中で繁殖しやすい。		好気性の硫酸酸性の環境で繁殖しやすい。	好気性の土壌、油田、イオウ鉱床、汚水などの中で繁殖しやすい。	主としてＦｅ、Mn 等を含んだ井水、泉水、湧き水等の地下水に多く繁殖する。
至適ｐＨ	5.0～9.5	中性域	2.0～2.5	2.0～3.5	6～8
栄養物	SO_4^{2-} 乳酸等	酢酸等	Fe^{2+}	Ｓ、ＦｅＳ	Fe^{2+}、Mn^{2+} HCO_3^-、CO_3^{2-}
生物活動	SO_4^{2-}を S^{2-}に還元する。	メタンを生成する。	Fe^{2+}をFe^{3+}に酸化する。生成する硫酸鉄は加水分解され硫酸を生成する。	イオウあるいは硫酸鉄を硫酸にする。	水酸化鉄を溶存酸素により酸化し､FeOOH､Fe_3O_4等を沈殿させ錆こぶを形成する。

２．１．４ 腐食におよぼす材料因子の影響

（１）ミルスケール

鋼材表面のミルスケール（黒皮）は緻密な錆でありいくらかの保護作用を有している。しかし、不可避的に割れや細孔を持っているため、この部分で素地鋼材の腐食が始まり周辺部へと拡がってゆき、最終的にはミルスケールはすべてとれてしまう。ミルスケールは貴な電位を持ち、鋼材に対してカソードとして働くため、海水中での最大侵食深さはミルスケールが付着している鋼材の方がミルスケールなしの鋼材より大きくなる場合が多い。

しかし、ミルスケールは一般に半年から１年で消滅してしまう。

（２）溶接

溶接部では、溶着金属部、熱影響部、母材部でそれぞれ金属組織が異なる。また、使用する溶接材料により母材部と溶着金属部との化学成分が異なる。したがって、これらの組織あるいは、化学成分の違いにより局部電池が形成され、溶着金属部、熱影響部あるいは母材部のいずれかが単独の腐食速度より大きな腐食速度となる場合がある。

しかし、波崎海洋研究施設破砕帯観測桟橋（旧運輸省、現（独）港湾空港技術研究所）で10年間使用された鋼管杭を切り取り回収した結果を写真2.1-1 示すが、スパイラルシーム溶接部近傍には特に孔食も見られず、母材と同等の腐食状況であった。

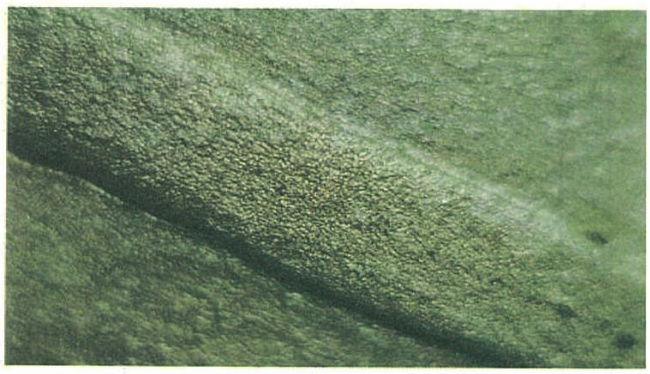


写真2.1-1　スパイラル溶接部の外観[5)]

（３）異種金属との接合

２種類の異なる金属が海水、淡水、空気中の結露水や土壌などの連続した電解質中で接触している時、両者の腐食電位の違いにより卑な電位の金属の腐食がより促進されて生じる腐食を異種金属接触腐食という。一方、貴な金属の方は腐食が抑制される。異種金属を接触させたときの腐食傾向は、電解質中（海水や淡水など）における腐食電位列の位置、電解質の電気伝導度や異種金属の面積比により決まる。

①腐食電位列

表2.1-6 に海水中の腐食電位列を示す。例えば、普通鋼とステンレス鋼を接触（例えば溶接）させて海水中で使用すると、卑な電位を持つ普通鋼は単独で使用するよりも腐食は加速される。しかし、貴な電位をもつステンレス鋼は腐食しにくくなる。

②電解質の電気伝導度

接触している電解質の電気伝導度が小さい場合（電気が流れにくい場合）異種金属接触腐食の程度は小さくなる。

③異種金属の面積

接触している異種金属の面積により腐食の程度は異なる。例えば、広い面積を持つ貴な金属に、狭い面積を持つ卑な金属が接触すると、卑な金属は著しく腐食する。

表2.1-6　海水中における金属および合金の自然電位列（抜粋）[5)]

流速 13f/s、25℃

金　　属	電位（V vs S.C.E.）
（カソード側，貴（プラス側））	
白金	+0.26
黒鉛	+0.25
316 ステンレス鋼（18%Cr, 12%Ni, 3%Mo）（不動態）	−0.05
モネル	−0.08
304 ステンレス鋼（18%Cr, 8%Ni）（不動態）	−0.08
チタン（工業用）	−0.15
410 ステンレス鋼（13%Cr）（不動態）	−0.15
ニッケル	−0.20
70 - 30 キュプロニッケル	−0.27
銅	−0.36
スズ	−0.42
鉛	−0.50
410 ステンレス鋼（13%Cr）（活性）	−0.52
304 ステンレス鋼（18%Cr, 8%Ni）（活性）	−0.53
炭素鋼	−0.61
鋳鉄	−0.61
アルミニウム 3S - H	−0.79
アルミニウム（Al　clad）	−0.94
亜鉛	−1.03
マグネシウム	−1.50
（アノード側，卑（マイナス側））	

２．２　海洋環境における腐食

２．２．１　海洋鋼構造物の腐食環境

港湾鋼構造物の設置される海洋環境は、鋼の腐食傾向から海上大気部、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部、および背面土中部の６種類の腐食環境に区分できる。海洋鋼構造物は、これらの腐食環境のすべてにまたがって構築されるのが一般的である。この海洋環境の腐食性の特徴を表2.2-1 に示す。

図2.2-1 に海洋環境における腐食試験の結果の一例を示す。これは、裸鋼材の長尺試験片と小型試験片による腐食量の調査結果である。海洋環境に設置される鋼管杭などはこの長尺試験片と同様な腐食環境にあるが、この調査によると長尺試験片は干満帯と干満帯直下との間にマクロな酸素濃淡電池（マクロセル）が形成されることにより干満帯の腐食速度は小さくなっている。一方、小型試験片は干満帯と干満帯直下とのマクロセルが形成されないため、干満帯は飛沫帯と同程度の腐食速度を示す。また、一般的には塗装された鋼材と未塗装の鋼材の間ではマクロセルを形成し未塗装の鋼材部分の腐食速度が大きくなる。しかし、有機被覆鋼管杭のように被覆層が厚く、電気抵抗が非常に大きい場合マクロセルは形成されない。

表2.2-1　代表的な腐食環境の特徴[5)]

環　　境	環　境　の　特　徴	腐　　食　　特　　性
海上大気部	風が微細な海塩粒子を運ぶ。 (海面からの距離により環境の腐食性は変化する。風速、風向き、降雨、気温、日射量、埃、季節、汚染などの腐食因子)	日陰で降雨洗浄されない部位は、湿潤、高付着塩分となり、腐食速度が大きい。
飛　沫　帯	鋼表面は、十分に酸素を含む薄い水膜で濡れている。生物付着はない。	腐食速度は、最も大きい。
干　満　帯	海水の潮汐により乾湿がくり返される。	干満帯から海中部に連続している構造物では、M.S.L.付近が酸素濃淡電池のカソードとして作用する。防食被覆を施した鋼材では被覆の損傷部での腐食速度は大きい。
海　中　部	生物付着、流速などが腐食因子として作用する。	干満帯から海中部に連続している構造物では、M.L.W.L.直下付近が酸素濃淡電池のアノードとして作用し、腐食速度が大きい。
海底土中部	硫酸塩還元バクテリアなどが存在することもある。	硫化物は、鋼の腐食や電気防食特性に影響を及ぼす。
背面土中部	残留水位より上では土壌環境とほぼ同じ。	土壌環境に類似している。
	残留水位より下では海底土中部とほぼ同じ。	海底土中部に類似している。

注.（財）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）」pp.14, 表-2.2.1を基に加筆・修正して作成

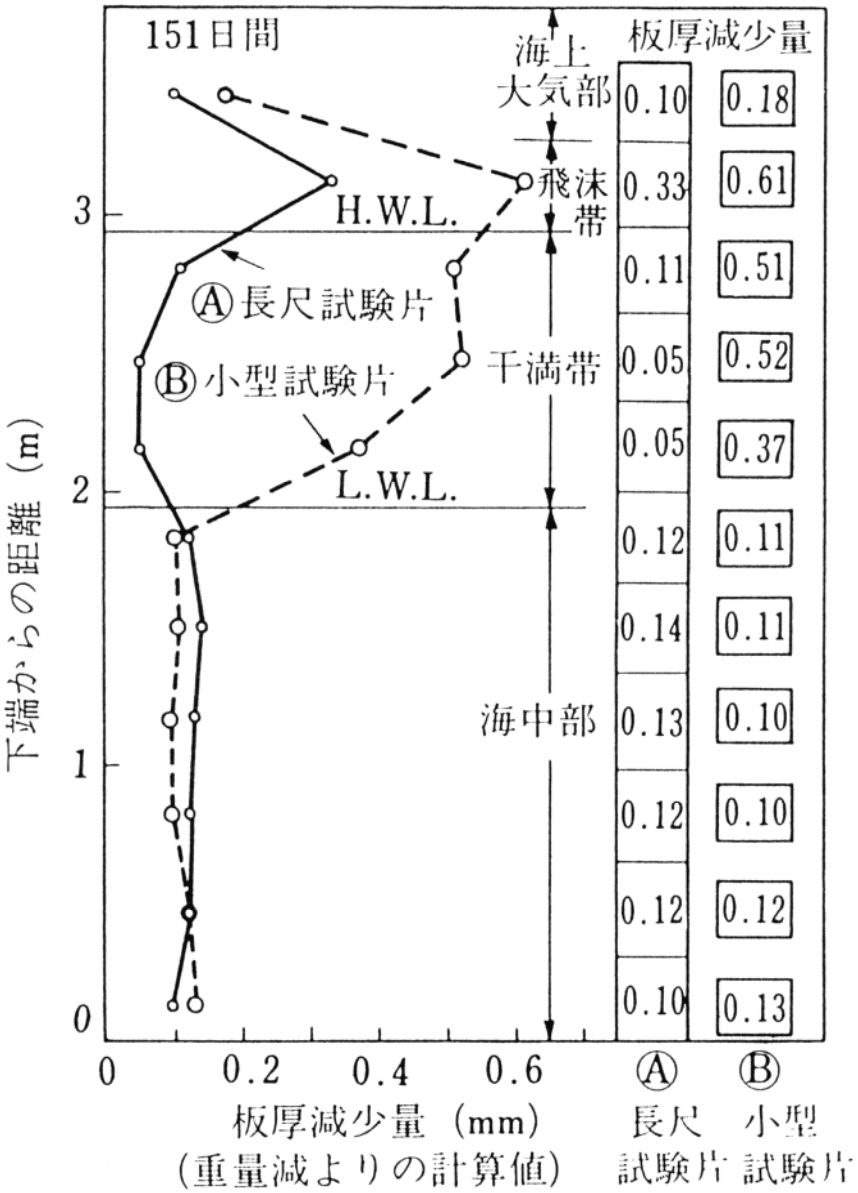


図2.2-1　海洋環境における鋼材の腐食試験結果の一例[12)]

２．２．２　港湾における鋼材の腐食速度

港湾における鋼構造物施設の中で電気防食や防食被覆を施さない施設のみの腐食調査を実施し、表2.2-2 に腐食速度としてまとめた。表より最も大きい腐食速度を示す海洋環境は、一般に飛沫帯であり図2.2-2 に示したプロフィールを示すことが知られている。しかし、実際の港湾鋼構造物の飛沫帯は、主として構造上の理由から、その大部分がコンクリートなどで被覆されている。そのため、港湾鋼構造物の腐食が実際に問題となる環境としては干満帯より低いレベルであることが多く、M.L.W.L.直下の局部腐食（集中腐食）などが問題になる。

表2.2-2　港湾における鋼材の腐食速度の標準値[13)]

腐食環境	腐食速度（mm／y）
1）H.W.L.以上	０．３
2）H.W.L.からL.W.L.－１．０ｍまで	０．１～０．３
3）海水中	０．１～０．２
4）海底土中部	０．０３
5）背面土中部	
a　残留水位より上	０．０３
b　残留水位より下	０．０２

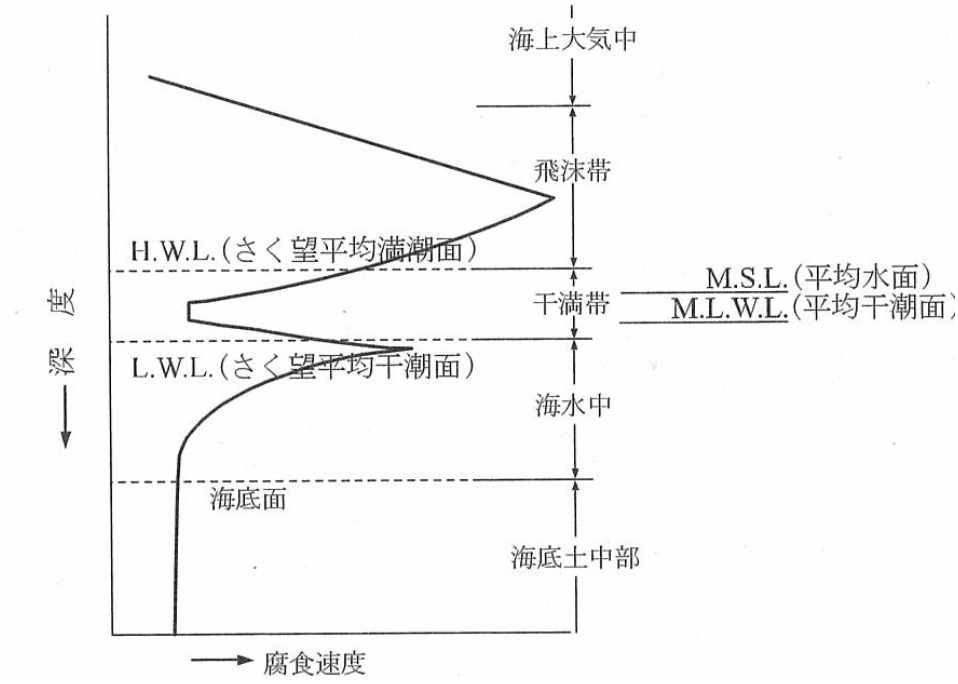


図2.2-2　鋼管杭の板厚減少のプロフィール[5)]

２．２．３　内港、外港、河口での腐食の違い

海洋環境に建設した無防食施設の腐食状況を内港域、外港域および河川水の影響を受ける河口域の３地域に区分して調査した結果[14)]を表2.2-3 に示す。なお、調査区分としては表2.2-4 によった。

表2.2-3 の河口域では、M.L.W.L.における平均腐食速度は0.13㎜／年で、L.W.L.以深では0.1～0.12㎜／年であり、殆ど水深による差は見られない。

内港では、M.L.W.L.と L.W.L.の腐食速度は0.2～0.22㎜／年と大きく、水深が深くなるにしたがって0.15㎜／年まで小さくなる傾向になる。また、最大腐食速度は河口域や外港に比べ約２倍程度大きな値を示している。

外港での平均腐食速度は0.09～0.14㎜／年であり、内港域に比べ全般的に小さい。しかし、一般の海洋環境の腐食の特徴と同様に L.W.L.-1m で0.14㎜／年と外港域の中では大きな腐食を示している。

上記の結果より、内港のように海水汚染の大きな海域では海水汚染の小さい地域（外港）に比べ概ね２倍程度の腐食速度になり、腐食・防食の分野では十分な注意が必要である。また、河川水による海水の希釈が大きい河口域は、通常の河川と大幅に異なり、海洋の腐食速度に近い値になることから注意が必要である。

表2.2-3　河口、内港、外港別腐食速度（㎜/y）

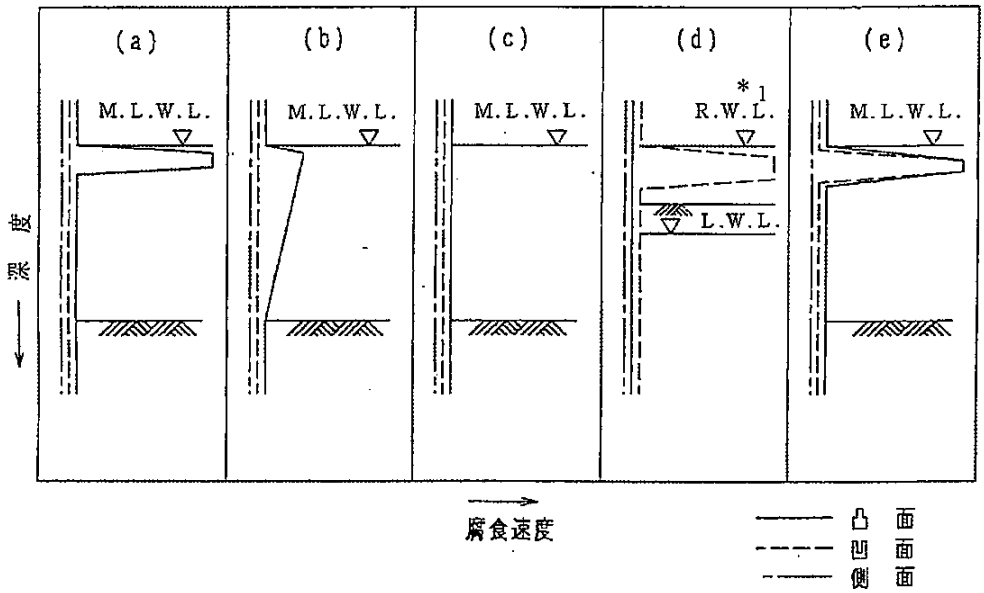
	河口施設		内港施設		外港施設	
水　　深	平　均	最　大	平　均	最　大	平　均	最　大
M.L.W.L.	0.127	0.455	0.223	0.716	0.123	0.526
L.W.L.	0.124	0.382	0.201	0.666	0.113	0.363
L.W.L.-1m	0.090	0.326	0.152	0.547	0.142	0.426
L.W.L.-2m	0.099	0.254	0.152	0.511	0.090	0.198
L.W.L.-3m	0.122	0.190	0.140	0.310	0.103	0.249

表2.2-4　調査区分

河口域	河川水による表層水の希釈割合が大きい施設
内港域	内港付近に位置し海水汚染の程度が比較的大きい施設
外港域	外港付近に位置し海水汚染の程度が比較的小さい施設

２．２．４　港湾における集中腐食[15)]

全国の港湾鋼構造物を広範に調査した結果、「集中腐食」の発生条件が詳細に解析し、報告されている[5)]。鋼矢板の腐食パターンは図2.2-3に示す(a)～(e)の通り、鋼管杭の腐食パターンは図2.2-4に示す(a)～(c)の3通りに整理できる。集中腐食の発生に寄与する因子としては酸素濃淡電池の形成、構造物の形状、水深の大小、コンクリートコーピングレベル、錆層の局部的連続破壊などがある。



*1　R.W.L.（Residual Water Level）は残留水位である.

図2.2-3　鋼矢板の腐食パターン[5)]

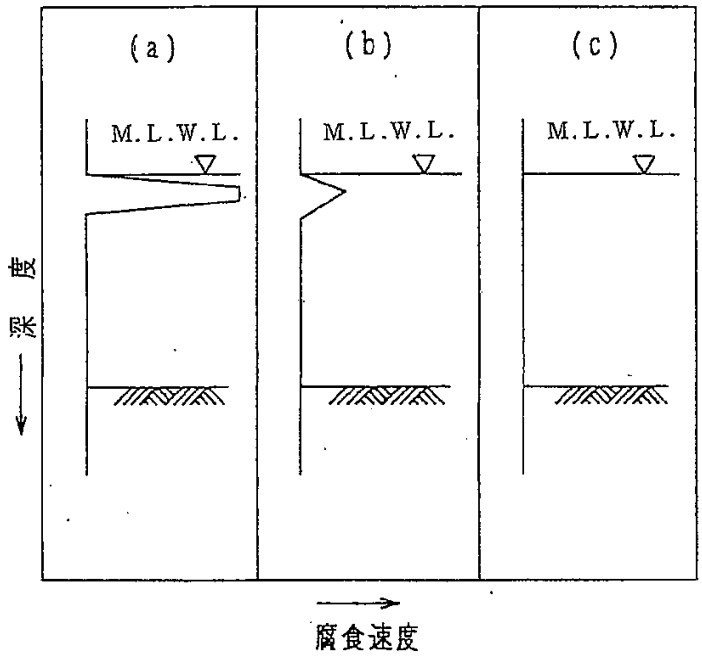


図2.2-4　鋼管杭の腐食パターン[5)]

（１）潮位差の有無

腐食傾向における集中腐食の発生は、M.L.W.L.直下付近であり、これは M.L.W.L.面を挟んで上下方向にマクロ腐食電池が形成されることから M.L.W.L.直上部がカソード、M.L.W.L.直下がアノードとなるためである。したがって、集中腐食がマクロ腐食によるものであればマクロ腐食電池の発生にはカソード域が必要であるが、図2.2-5 に示すように干満における潮位差によりカソード部の面積が異なる。例えば、松江港での調査結果をみると集中腐食の発生しやすい他の条件が揃っているものの干満による潮位の変動がほとんどないため集中腐食は発生していない。このことから、潮位の変動がほとんど無いために、マクロ腐食電池のカソード域が発生しなかったことにより、集中腐食の発生がなかったことが推測される。

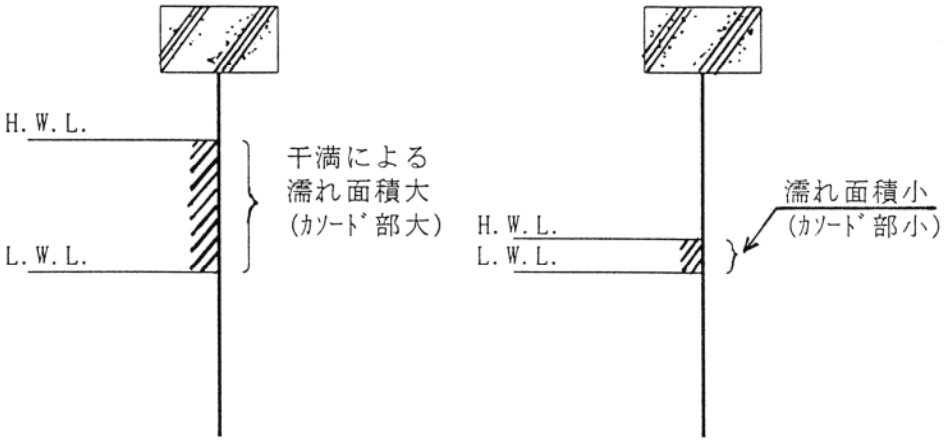


図2.2-5　潮位差によるカソード部の大きさ

（２）鋼矢板の形状

鋼矢板は、図2.2-6 に示すように打設されるため断面方向に凹面凸面および側面が生じる。このため、凸面の表面積は鋼矢板表面積の約1/4 に相当する。M.L.W.L.直下の集中腐食は M.L.W.L.を挟んで上下方向にマクロ腐食電池が形成されるが、マクロ腐食電池は凸面から流出しやすい。そのため、凸面に集中腐食が生じやすい。また、この集中腐食は凸面の隅角部より発生し凸面の平坦部へと拡がる。この状況を写真2.2-1 に示す。

したがって、全表面積に対して凸面の占める割合の小さい（突出の著しい）ほど、突出部から流出するマクロ腐食電流は大きくなり、集中腐食が激しくなる。この結果、断面方向に突起のない鋼管杭（円形材）に比べて鋼矢板は、同一条件下でも数倍大きい集中腐食が発生することが多い。また、山形鋼や溝型鋼などの突出の著しいものは、集中腐食の発生は鋼矢板に比べ一層顕著である。

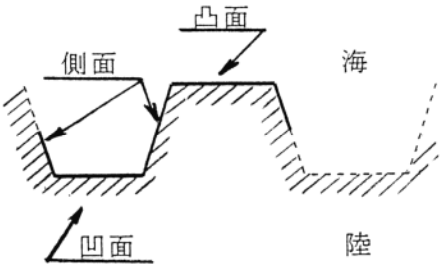


図2.2-6　鋼矢板の断面状況

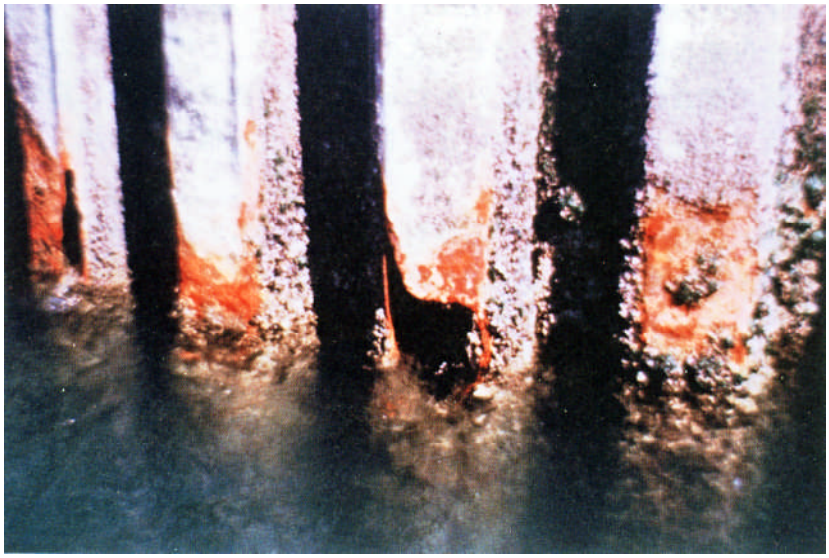


写真2.2-1　鋼矢板の集中腐食の例

写真2.2-2　鋼矢板護岸の前面に打設された
鋼管杭の集中腐食の例

（３）鋼矢板護岸等の構造物の前面に打設された鋼管杭の集中腐食

直線鋼矢板を円筒状に打ち込んだセル式の構造物で、この構造物のアーク部前面に打設された鋼管杭の腐食状況を写真2.2-2 に示す。この調査の結果、鋼管杭の M.L.W.L.直下付近に集中腐食が著しく発生していた。しかし、セル構造物の鋼矢板は M.L.W.L.直下の集中腐食は、殆ど見られなかった。

この様な構造物の集中腐食に対する検討として、図2.2-7 に示す設備で供試体の個々の電流の流出、流入や電位変化を測定した結果、板状供試体の前に設置したパイプ状の供試体の L.W.L.付近がアノードを形成し板状供試体とマクロセルが形成されることを確認している[16)]。このことからセルと鉄筋で繋がれた前面の鋼管杭がセル構造物に対して突出部の構造となり、鋼管杭の M.L.W.L.直下のアノード部に対して、セル部と鋼管杭の M.S.L.近傍の両方がカソード部として働き、このカソード部の面積が鋼管杭単独の場合より非常に大きくなったため、通常の集中腐食より厳しい腐食になったと考えられる。以上のことから、構造物の前面に鋼管杭等がある構造形式の場合には、その M.L.W.L.直下付近に大きな集中腐食が発生しやすいことに十分注意する必要がある。

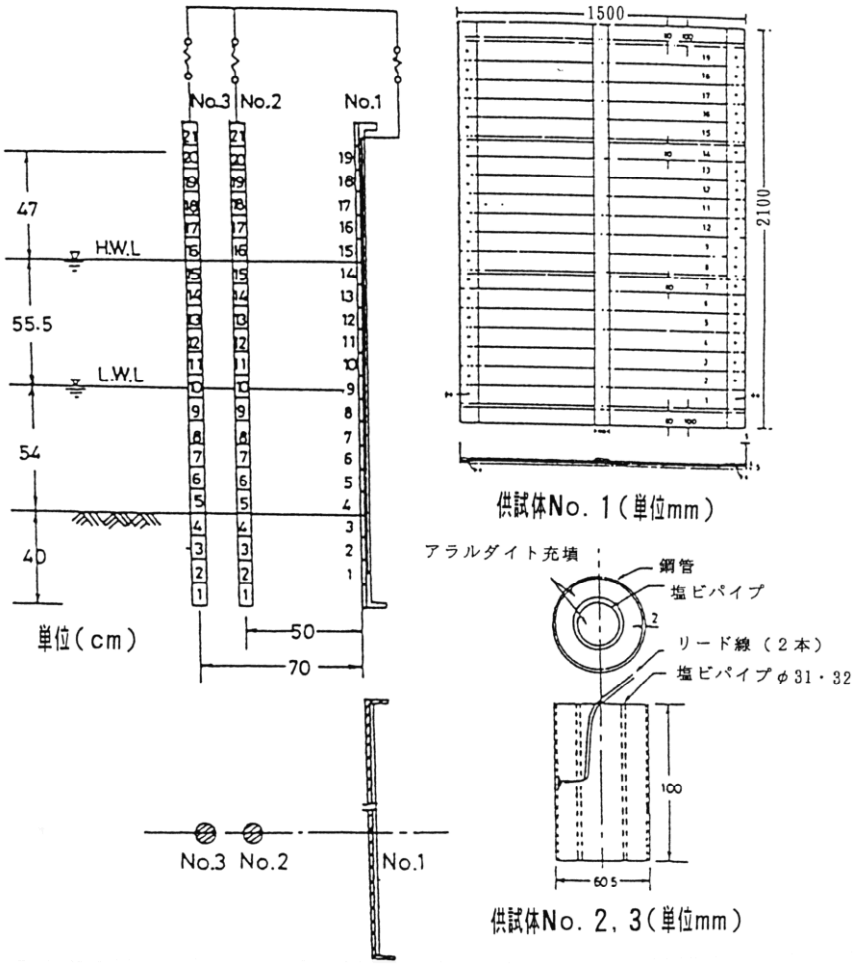


図2.2-7　水槽試験に用いた供試体の寸法及び設置状況[16)]

２．３　河川環境における腐食

２．３．１　一般河川の腐食

（１）河川水の溶解成分と pH

河川水には大気からの降下物（海塩粒子、亜硫酸ガス等）、温泉、鉱泉、生活排水、工業廃水、農業排水や岩石、土壌などに由来する諸元素がとけ込んでいる。我が国の河川水は降水量が多く、土地が急峻であるため表2.3-1 に示すように総塩類は少ない。また、世界河川平均に比較して SiO_2が多く、Ca が少なく、一般的に軟水と呼ばれている。Ca が少ない場合、鋼材表面に炭酸カルシウムが析出することによる腐食抑制効果は望めない。

また、天然水の pH を表2.3-2に示す。雨水や融雪は大気中の二酸化炭素がとけ込んでいるため弱酸性である。湖沼水や河川水はほぼ中性であり、海水は pH 8.0程度の弱アルカリ性である。

表2.3-1　日本と外国の河川が含有する化学成分の組成比較[17)]

	Ca %	Mg %	Na %	K %	CO_3 %	SO_4 %	Cl %	NO_3 %	SiO_2 %	Fe_2O_3 %	計 %	無機塩類の合計 mg/l
世界河川平均	20.39	3.41	5.79	2.12	35.15	12.14	5.68	0.90	11.67	2.75*	100.00	99.9
日本225河川の平均	12.51	2.72	9.51	1.68	21.60	15.11	8.19	1.48	26.73	0.47	100.00	70.2
ﾀｲ国30河川の平均	18.05	3.37	9.75	2.28	37.01	3.01	11.58	0.32	14.58	0.05	100.00	109.7

*$(Fe,Al)_2O_3$

表2.3-2　天然水の pH（概略値）[18)]

雨水、融雪など	５．６～６．０
湖沼水	６．８～７．６
河川水	６．６～７．２
伏流水	６．２～６．８
浅井戸水	５．６～６．６
深井戸水	６．８～７．８
海水	８．０～８．２

（２）一般河川の腐食速度

表2.3-3に国土交通省（旧建設省）が平成8年度、9年度に実施した腐食実態調査結果[19)]を示す。塩素イオン濃度が増大すると腐食速度が増大する傾向がある。特に塩素イオン濃度1000～2000ppm 付近で大きく腐食速度が増大する傾向があり、このことから塩素イオン濃度1000～2000ppm が一般河川と感潮河川との境界と考えられる。塩素イオン濃度1000ppm 未満の一般河川の平均腐食速度は0.01～0.11mm/y であり、最大腐食速度は0.03～0.18mm/y と海洋環境に比べて小さい。

表2.3-3　河川環境の区分と腐食傾向[19)]

No.	調査年度	地理名	流域区分	※1 調査箇所 (km)	形状・長さ	施工年月	※2 調査区分	経過年数	塩素イオン濃度 (PPM)	腐食量 平均 (mm)	腐食量 標準偏差 (mm/y)	腐食速度 平均 (mm/y)	腐食速度 標準偏差 (mm/y)	最大腐食量 (mm)	最大腐食速度 (mm/y)	実最大孔食深さ (mm)	実最大孔食深さの腐食速度 (mm)	備　考
1	平成9年度	北海道	感潮	左岸 3.0	Ⅱ	S. 57	一般	15.0	41	0.100	0.04	0.007	0.002	0.470	0.031	0.7	0.05	鋼矢板に泥が付着（10～15mm）
2		北海道	感潮	左岸 4.3	Ⅱ・6m	S. 57	一般	15.0	180	1.330	0.93	0.089	0.062	2.630	0.175	2.67	0.18	
3		北海道	感潮	左岸 2.0	Ⅳ・13m	S. 62	一般	20.0	166	0.520	0.19	0.026	0.010	1.330	0.067	1.32	0.07	
4		北海道	感潮	左岸 1.4	Ⅳ・13m	S. 48	一般	24.0	54	0.590	0.20	0.025	0.008	1.710	0.071	1.95	0.08	
5		北海道	淡水	8.2	Ⅱ・7m	S. 53	一般	19.0	6	1.180	0.12	0.062	0.014	1.600	0.084	2.03	0.23	
6		北海道	淡水	全区間 －	Ⅱ・9m	S. 53	一般	19.0	81	2.070	0.12	0.109	0.006	2.490	0.131	3.06	0.16	
7		中部	淡水	右岸 18.4	Ⅲ	S. 53	重点	19.0	15	0.920	0.35	0.048	0.019	1.570	0.083	3.25	0.17	
8		中部	感潮	右岸 －0.5	Ⅲ	S. 51	重点	21.0	1100	1.840	1.14	0.088	0.054	5.140	0.245	7.91	0.38	
9		中部	淡水	右岸 40.4	Ⅳ	S. 53	重点	19.0	8	0.880	0.87	0.046	0.046	2.130	0.112	2.91	0.15	
22		中部	感潮	左岸 4.7	Ⅱ	S. 53	重点	19.0	1100	1.410	1.06	0.074	0.070	2.130	0.112	4.67	0.31	
11		中国	感潮	左岸 1.5	Ⅱ	S. 63	一般	9.1	9100	1.210	※3	0.133	※3	2.630	0.289	※4	※4	※3　データ数不足の為計算せず
12		中国	淡水	左岸 0.1	Ⅱ	S. 43	重点	22.3	33	0.750	〃	0.034	〃	2.330	0.104	〃	〃	※4　孔食軽微の為計測せず
13		九州	淡水	左岸 28.5	Ⅲ・9m	S. 54	一般	18.3	10	0.510	0.28	0.028	0.019	1.170	0.064	〃	〃	
14		九州	感潮	左岸 10.5	Ⅱ・8m	S. 58	一般	14.3	1090	0.520	0.40	0.036	0.028	0.650	0.045	〃	〃	
15		北陸	感潮	左岸 7.4	Ⅲ・13m	S. 62	引抜	10.0	240	0.480	0.05	0.048	0.005	0.810	0.081	2.15	0.22	
16		北陸	感潮	右岸 4.0	Ⅱ・11m	S. 39	引抜	33.0	20	1.120	0.41	0.034	0.012	2.240	0.068	7.06	0.21	
17		北陸	淡水	左岸 16.8	Ⅲ・13m	H. 4	引抜	5.0	15	0.400	0.02	0.080	0.003	0.690	0.138	1.99	0.4	
18		北陸	淡水	右岸 28.8	LSP3C・6m	S. 42	一般	30.0	29	2.120	0.88	0.071	0.029	3.190	0.106	4.22	0.11	
27		北陸	淡水	右岸 43.0	Ⅳ・15m	S. 55	一般	16.0	5	0.620	0.08	0.039	0.005	1.240	0.078	3.02	0.19	
30	平成8年度	関東	淡水	右岸 25.0	Ⅱ・6m	S. 54	一般	17.3	130	0.364	※3	0.021	※3	1.020	0.059	※5	※5	※5　計測データなし
31		関東	淡水	右岸 38.6	Ⅱ・10m	S. 52	一般	13.8	68	0.317	〃	0.023	〃	0.640	0.046	〃	〃	
32		関東	淡水	右岸 128.4	Ⅱ・7m	S. 53	一般	18.8	※6	0.910	0.65	0.049	0.034	2.210	0.117	〃	〃	※6　測定せず
33		関東	淡水	右岸 133.1	Ⅱ・6m	S. 62	一般	10.0	〃	0.160	0.06	0.016	0.005	0.390	0.039	〃	〃	
34		関東	感潮	右岸 2.0	Ⅳ・23m	S. 58	一般	13.6	7340	0.490	0.09	0.036	0.007	1.270	0.094	〃	〃	
35		関東	感潮	右岸 13.0	Ⅲ・8m	S. 51	一般	21.0	2930	0.260	0.10	0.013	0.004	1.170	0.056	〃	〃	
36		関東	感潮	右岸 26.0	Ⅲ・9m	S. 58	一般	14.0	87	0.430	0.25	0.031	0.019	1.120	0.080	〃	〃	
37		関東	感潮	左岸 26.8	Ⅲ・13m	S. 55	一般	17.0	68	0.360	0.14	0.022	0.007	0.900	0.053	〃	〃	
38		関東	感潮	左岸 13.0	Ⅱ・6m	S. 42	一般	30.0	2420	0.790	0.09	0.026	0.003	1.250	0.042	〃	〃	
39		関東	感潮	16.0	Ⅱ・7m	S. 43	重点	29.0	910	1.020	0.29	0.035	0.010	1.650	0.057	〃	〃	
40		関東	感潮	16.0	Ⅱ・9m	S. 51	一般	21.0	1820	0.500	0.13	0.024	0.006	0.990	0.047	〃	〃	
41		関東	感潮	25.5	Ⅲ・16m	S. 60	一般	12.0	67	0.340	0.11	0.028	0.010	0.940	0.079	〃	〃	
42		関東	淡水	22.5	Ⅱ・10m	S. 57	重点	15.0	40	0.630	0.31	0.042	0.021	1.330	0.089	〃	〃	
43		関東	淡水	30.0	Ⅱ・9m	S. 58	一般	14.0	43	0.400	0.17	0.028	0.013	1.060	0.075	〃	〃	
48	既存データ	関東	感潮	3.5	Ⅲ	S. 39	※7	19.0	9700	2.489	※5	0.131	※6	6.460	0.340	〃	〃	※7　区分についての記録なし
49		関東	感潮	8.8	Ⅲ	S. 37	〃	20.5	6400	1.907	〃	0.093	〃	5.084	0.248	〃	〃	〃
50		関東	感潮	12.8	Ⅲ	S. 39	〃	18.5	2100	1.702	〃	0.092	〃	5.032	0.272	〃	〃	〃
51		関東	感潮	19.0	Ⅲ	S. 45	〃	13.0	130	0.455	〃	0.350	〃	1.768	0.136	〃	〃	〃
52		関東	感潮	3.2	Ⅳ	S. 67	〃	4.0	6300	0.260	〃	0.065	〃	0.732	0.183	〃	〃	〃
53		関東	感潮	6.4	Ⅳ	S. 55	〃	6.0	630	0.174	〃	0.029	〃	0.360	0.050	〃	〃	〃
54		関東	感潮	0.8	Ⅲ	S. 56	〃	5.0	5500	0.285	〃	0.057	〃	0.690	0.138	〃	〃	〃
55		関東	感潮	6.8	Ⅲ	S. 56	〃	5.0	60	0.185	〃	0.037	〃	0.540	0.108	〃	〃	〃

２．３．２　河川の感潮部の腐食

河川水の塩分含有量は0.01～0.03％であり、海水（外洋）は平均して3.5％程度であるが河川水の混入する場所においては海水の塩分濃度が希釈される。一般に塩分濃度（NaCl濃度）が低くなるほど腐食速度は小さくなるが、図2.3-1 に示すように海水濃度よりも若干低い濃度で鋼の腐食速度が最大になることもある。

また、感潮部では表層部の河川水と海水との比重差により不均一な混合状態になり種々の局部腐食が考えられる。

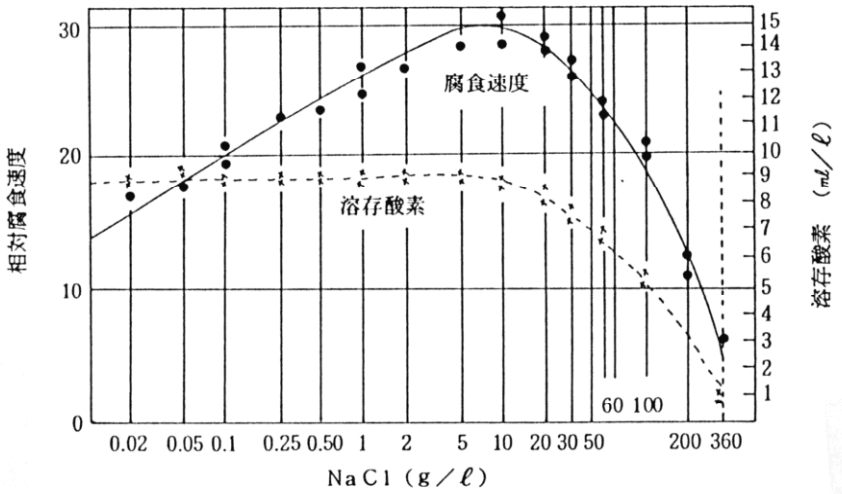


図2.3-1　鋼材の腐食速度と NaCl 濃度との関係[20)]

２．４　土壌環境における腐食

土壌環境による腐食は、海洋や河川と異なり種々の条件に曝されているため、図2.4-1 に示すように、土壌の攪乱、地下水の有無、構造物との接触（フーチングの鉄筋との導通）や土壌の違い等による影響を受け局部腐食が生じやすい。

しかし、鋼ぐいは土壌の攪乱が無く垂直に打設されるため、鋼ぐい表面に均一に土壌が接する。このため埋設配管の場合と異なり、マクロセル電流の流出が均一であり、局部的な腐食が生じにくい。以下に一般の腐食速度と、局部腐食についての腐食調査結果[18)]を参考に述べる。

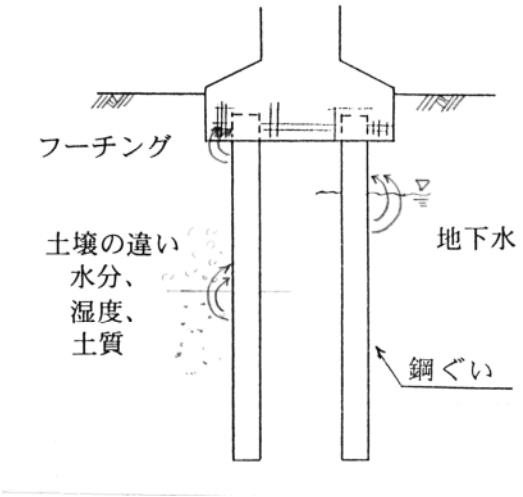


図2.4-1　土中のマクロセルの考え方

２．４．１　土中での一般の腐食速度

全国10箇所におけるＬ型鋼を用いた土中の腐食試験結果[21)]から、１回目（２年目）、２回目（５年目）及び３回目（10年目）の腐食量を図2.4-2 及び図2.4-3 に示す。図より、腐食量は経過年数に比例せず、腐食速度が時間とともに減少する傾向を示している。これは、外観観察でも見られたように、杭表面には錆が土砂と共に固着している事が観察されている。土中での腐食により生成した錆は、海洋や河川環境と異なり、剥離や溶出などが無く、表面にとどまることから、大気中の腐食と同様に錆による遮蔽効果が働き経過年とともに腐食速度が小さくなると考えられる。

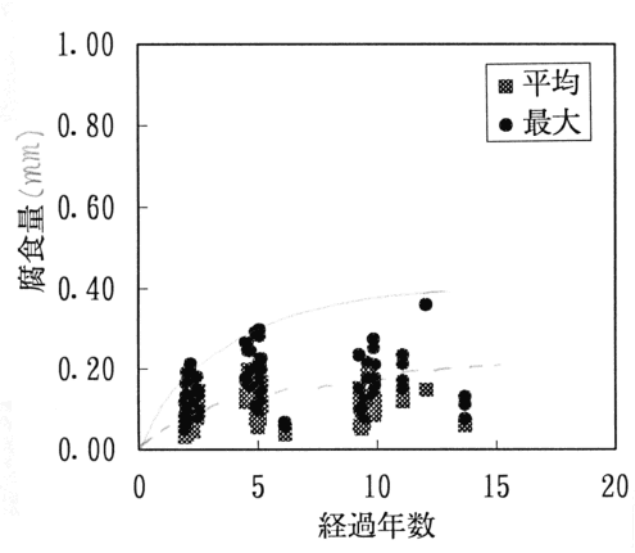


図2.4-2　土中での腐食量
（両面）

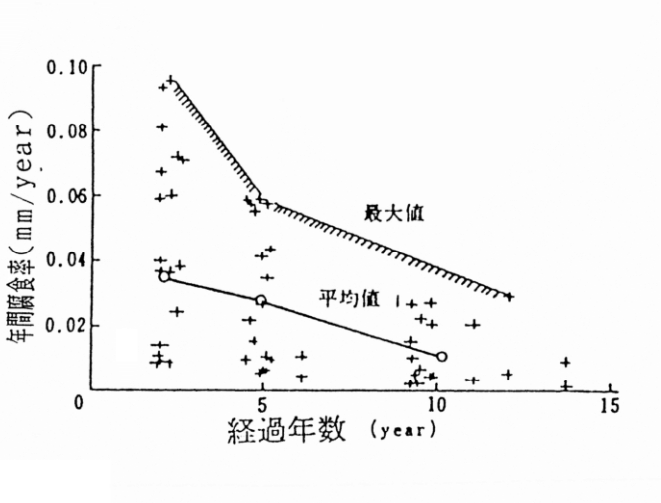


図2.4-3　土中での腐食速度の
（両面）の経年変化[21)]

２．４．２　地下水位の影響

鋼ぐいの場合、地下水位の上の部分は水分が少なく比較的通気が良いが、地下水位以下の部分は水分が飽和し通気性が悪い。このことから、図2.4-4 に示すように地下水位上下で通気差電池が形成される可能性がある。約10年経過後に回収した試験体の腐食速度の結果を図2.4-5 に示す。この試験での地下水位は地表面下0.5ｍ～２ｍであるが、図より地下水位のある杭頭部近傍の腐食速度は最大0.03㎜/y（両面）以下と小さい。これは、カソードとなる地下水位より高い部分の面積と比較してアノードとなる地下水位より低い部分の面積が大きいことから、カソード／アノード面積比が小さくなり、通気差電池による腐食の影響が小さくなったと考えられる。

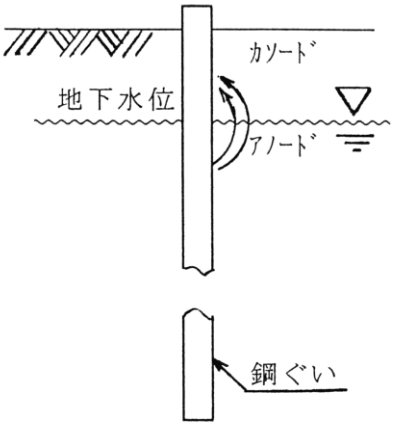


図2.4-4　地下水によるマクロセルの模式図

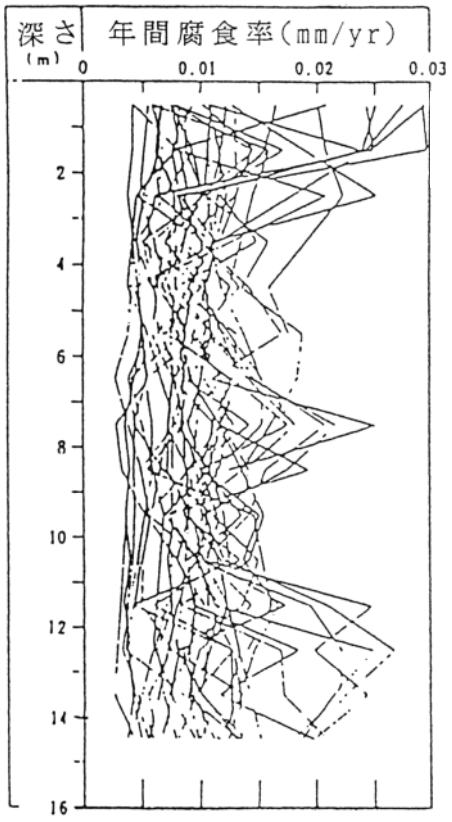


図2.4-5　約10年経過後の回収材の腐食速度[21)]

また、地下水位が低く、かつ変動する場所での調査結果を図2.4-6 に示す。地下水位の変動は図2.4-7 に示した様に、地表面下6.8ｍから10.5ｍまでの範囲であるが、腐食速度については特に大きな値を示す傾向は見られない。

以上のことから、腐食速度に対する地下水の影響は一般に小さく、最大でも0.03㎜/y（両面）以下の腐食速度である。

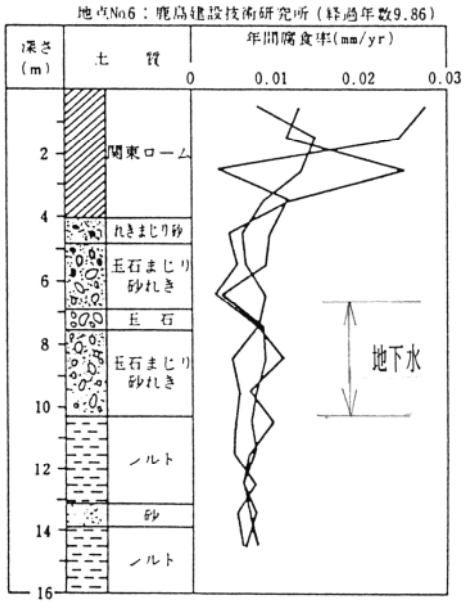


図2.4-6　地点No.6における腐食速度（両面）[21)]
（経過年数9.86年）

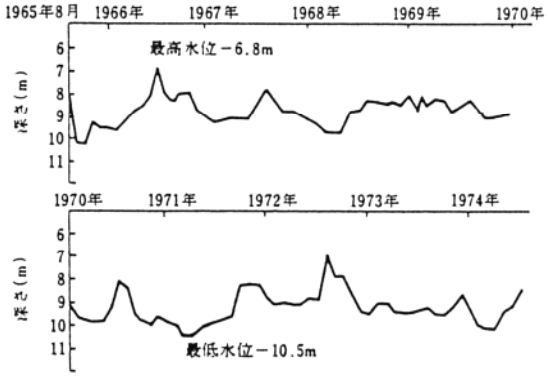


図2.4-7　地下水位の変化[21)]

２．４．３　フーチングの影響

杭頭結合部は図2.4-8に示すように鋼ぐいとフーチング中の鉄筋が直接接合される場合がある。その場合、鋼ぐいとコンクリート中の鉄筋との間にマクロセルが形成されると考えられる。４本の鋼ぐいを鉄筋で接続しフーチングの影響について調査を行った結果を図2.4-9 に示す。図より明らかなように、理論的にはマクロセル腐食が考えられるが、実際の調査結果では影響が見られなかった。

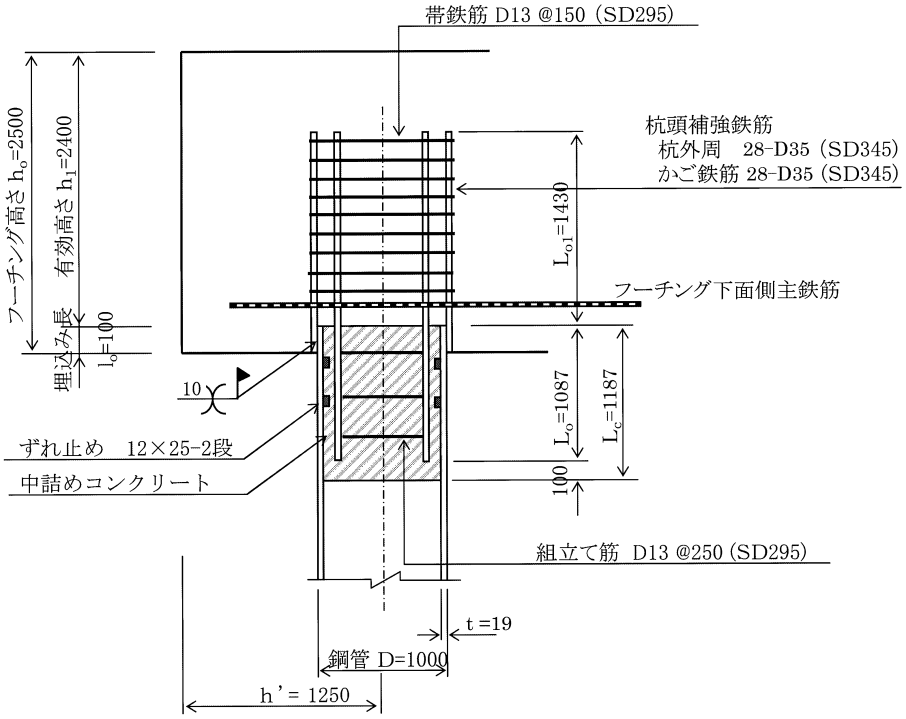
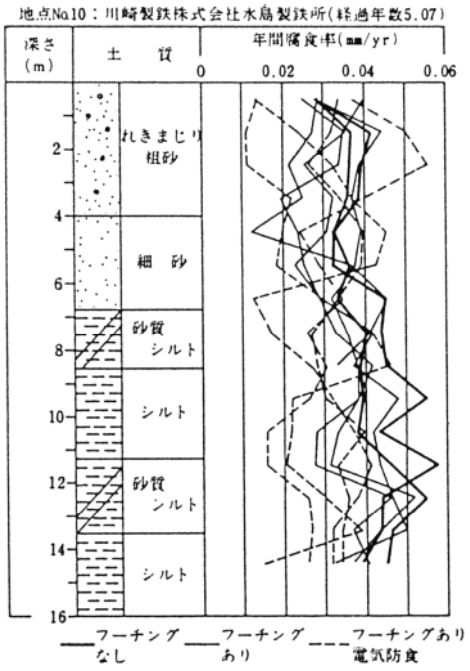
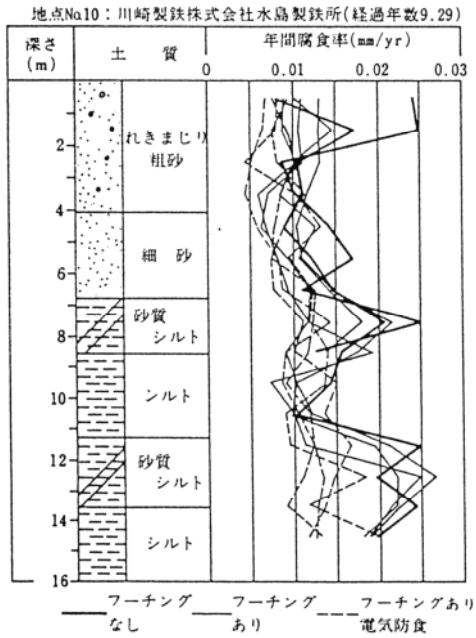


図2.4-8　フーチング取り付け図[22]



第２回目引き抜き結果
（5.07年経過）



第３回目引き抜き結果
（9.29年経過）

図2.4-9　フーチングの有無による腐食速度（両面）の影響[21)]

２．４．４　土壌の違いによる影響

（１）水分の影響

土壌に含まれている水分には色々な成分が溶存しているが、基本的には水による湿食と考えてもよい。土壌に含まれる水分は以下の二種類に区分できる。

（イ）結合水・・・土壌を構成するための成分

（ロ）間隙水・・・土壌の粒子間に存在する水

金属の腐食に関与する水は間隙水であり水と金属の界面で腐食が生じる。このため含水率が増加するにつれて鋼材の腐食量も増大することが考えられる。水分で飽和された土壌では、水分に含まれる酸素は限られるので腐食量は小さくなる。しかし、図2.4-10に示すように実際の測定結果では、明確な傾向が現れず、含水率との相関性は見られない。

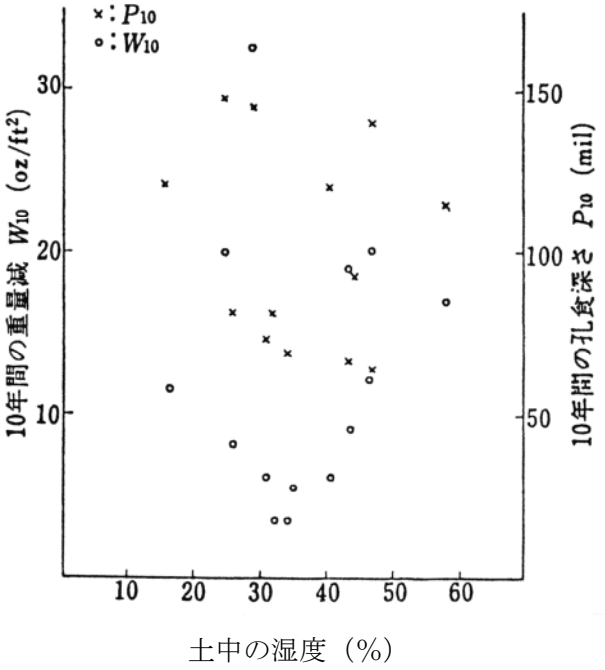


図2.4-10　土壌の湿度と炭素鋼の腐食量の関係[23),24)]

（２）土壌の影響

一般に表層の土壌は、比較的微細な粒子からなり、有機物も含まれている。この表層土は粒子間の間隙が大きく水分の保持性が大きいのと、通気性も大きい部位である。通気性の大きい部位は酸素の供給量が多く腐食性の大きな環境といえる。しかし、図2.4-11に示すように実際の腐食事例調査では通気性と腐食量の相関性は少ない。

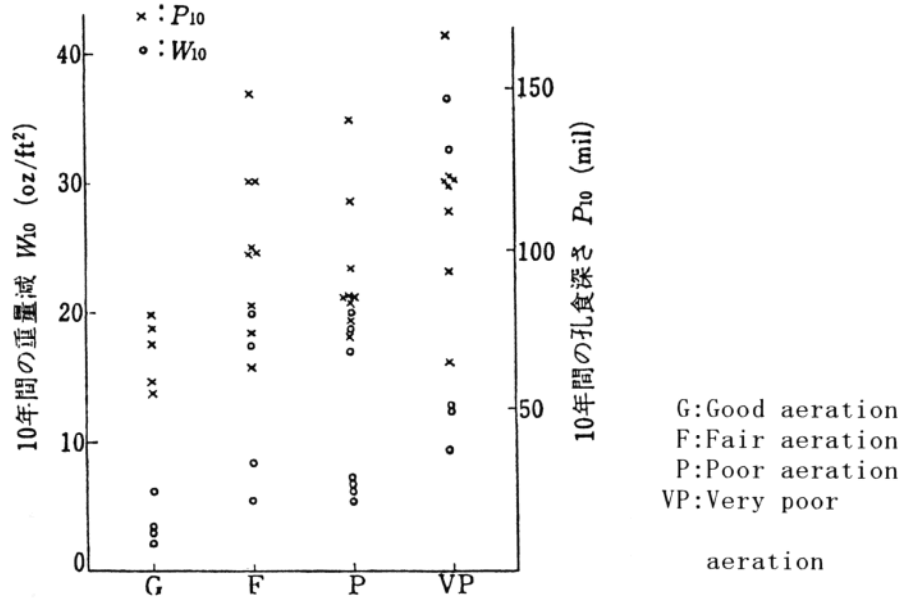


図2.4-11　土壌の通気性と炭素鋼の腐食量の関係[23),24)]

（３）土質の影響

土質と腐食量および孔食の関係を図2.4-12に示す。土質によって大きなバラツキが見られるが、ローム質は腐食性が小さくシンダーが最大であるが、その他の土質についてはバラツキが大きく殆ど差が見られない。

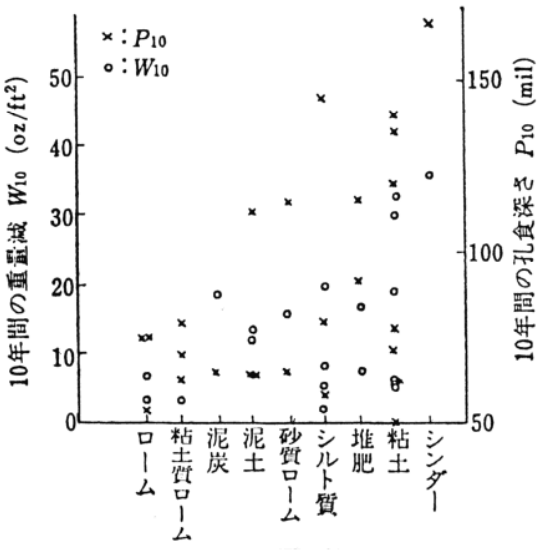


図2.4-12　土質と腐食性の関係[23),24)]

２．５　杭内面の腐食

（１）陸土中の鋼管杭内部の腐食調査結果

陸土中の鋼管杭の腐食状況調査（打設４年目）によると、表面（鋼管杭外面）には写真2.5-1 に示すように腐食の痕跡が見られるが、試験片裏側（鋼管杭内面）には写真2.5-2 に示したようにスパイラル鋼管製造時の成形ロールマークが明瞭に認められ、腐食はほとんど見られない。

写真2.5-1　鋼管杭外面[22)]

写真2.5-2　鋼管杭内面[22)]
（斜線は製管時のロールマーク）

（２）海中の鋼管杭内面

千葉沖での防食鋼管杭の実地試験の一環として裸鋼管杭（暴露5.5年目）より図2.5-1 に示す位置で切り出した試験片の測定結果を表2.5-1 及び写真2.5-3 に示す。この結果から明らかなように海上部及び海中部とも内面の腐食の進行は認められない。

表2.5-1　切取り試験片の凹凸測定結果[22]

位　置		凹凸*1 (mm)	
		平均	最大*2
海上部 D.L.+2.4m	鋼管杭外面	0.21	0.51
	鋼管杭内面	0.08	0.42
海中部 D.L.-4.5m	鋼管杭外面	0.40	1.13
	鋼管杭内面	0.07	0.33
圧延のまま（造管時）		0.07	0.30

*1　ダイアル・デプス・ゲージで測定
*2　上位10点の平均値

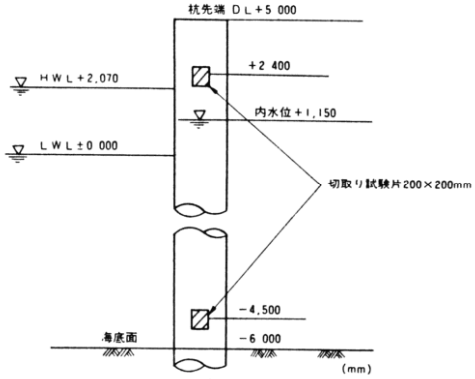
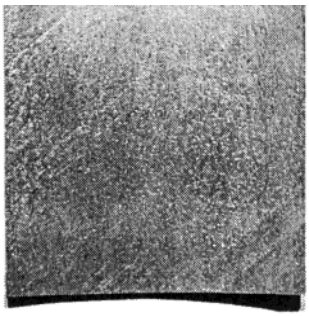
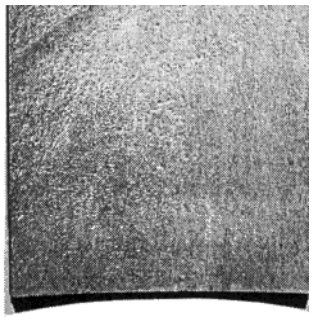


図2.5-1　切取り試験片の位置[22]



海上部（D.L＋2.4m）



海中部（D.L－4.5m）

写真2.5-3　切取り試験片（鋼管杭内面）の除錆後の外観[22]

（3）杭内部の腐食量の計算

完全な密閉状態にあり、外部からの酸素の供給がない鋼管杭の場合を想定し、腐食に必要な酸素量から板厚減少量を推定した。その結果は表2.5-2 のようになり、いずれの場合も非常に小さい値であることが判る。

表2.5-2　杭内部の腐食[22]

	①杭内部が空気の場合	②杭内部が海水の場合	③杭内部が土壌の場合
i）腐食生成物 その他の仮定条件	Fe_3O_4のみと仮定 ($3Fe+2O_2=Fe_3O_4$)	Fe_3O_4のみ 海水中の溶存酸素濃度を10ppmと仮定。	Fe_3O_4のみ 土壌中の含水率30% 地下水中の溶存酸素濃度10ppm 空気の含有率0%
ii）杭内部のO_2量	$\frac{0.28\times10^3\times0.21}{22.4}=2.63\mathrm{g\cdot mol}$	$\frac{0.28\times10^3\times[\mathrm{ppm}]\times10^{-6}}{22.4}=1.25\times10^{-4}\mathrm{g\cdot mol}$	$1.25\times10^{-4}\times0.3=0.375\times10^{-4}\mathrm{g\cdot mol}$
iii）杭内部の腐食量	$\frac{3}{2}\times2.63\times55.85=220\mathrm{g}$	$\frac{3}{2}\times1.25\times10^{-4}\times55.85=0.0105\mathrm{g}$	
iv）杭内部の板厚減少量		$\frac{0.0105[\mathrm{g}]\times10}{7.85[\mathrm{g/cm^3}]\times10^4\times1.88[\mathrm{m^2}]}=7.1\times10^{-7}\mathrm{mm}$	

２．６　防食の基礎

２．６．１　防食法の分類

鋼材を自然環境中で長期間安定して用いる場合には、腐食対策を施す必要がある。

腐食対策として主に用いられる方法を図2.6-1 に示す。腐食対策には防食法と腐食しろがある。防食法には大きく分けて被覆防食法、電気防食法の２つの方法がある。腐食しろは使用環境での供用期間の腐食量に見合った鋼材の板厚を付加する方法である。海洋構造物においては干潮面直下で集中腐食などの激しい腐食の恐れがあるため、防食法が主に適用される。

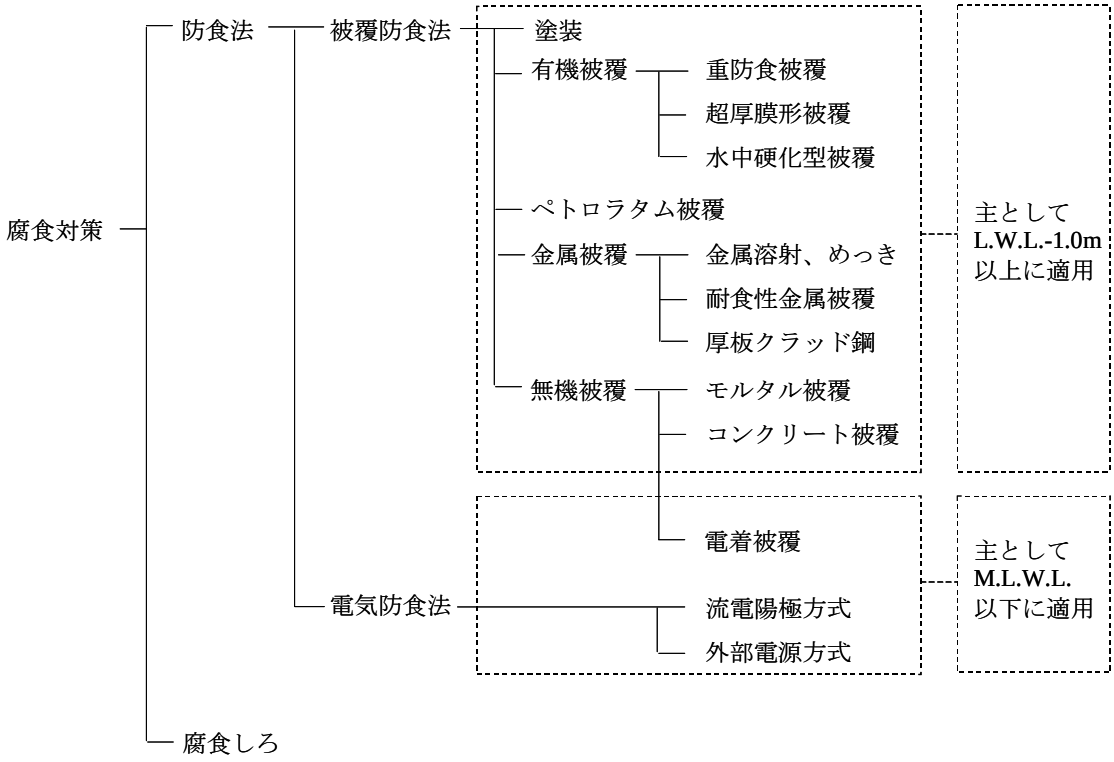


図2.6-1　各種腐食対策法[5)]

注.（財）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）」pp.36, 図-1.1.1を基に加筆・修正して作成

この中で鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板を海洋、河川、土壌環境で用いる場合に適用される腐食対策としては被覆防食法、電気防食法および腐食しろがある。

被覆防食法には、塗装、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、金属被覆がある。有機被覆には重防食被覆、超厚膜形被覆、水中硬化型被覆がある。金属被覆には、アルミニウムなどの金属溶射、モネル、チタン、ステンレスなどの耐食性金属被覆や厚板クラッド鋼がある。無機被覆にはモルタル被覆やコンクリート被覆、電着被覆がある。

電気防食法は、被防食体である鉄を腐食、すなわちアノード溶解しない電位に電気化学的に設定する方法であり、流電陽極方式と外部電源方式がある。

（1）被覆防食法

被覆防食法は、鋼材表面を各種材料で被覆することにより鋼材表面への腐食因子の到達を抑止する防食する方法である。被覆防食法の分類を表2.6-1 に示す。

表2.6-1　被覆防食法の分類[5)]

被覆防食法		種類
塗装	海洋塗装系	・海洋厚膜エポキシ塗装系
		・海洋エポキシガラスフレーク塗装系
	その他塗装	・タールエポキシ樹脂塗装*3
		・ポリウレタン樹脂塗装
		・ポリエステル樹脂塗装
有機被覆	重防食被覆	・ポリエチレン被覆
		・ウレタンエラストマー被覆
	超厚膜形被覆	・超厚膜形エポキシ樹脂系被覆
		・超厚膜形ポリウレタン樹脂系被覆
		・超厚膜形アクリル樹脂系被覆
	水中硬化型被覆	・ペイントタイプ
		・パテタイプ
		・湿潤面タイプ
	その他有機被覆	・防食テープ被覆
		・FRP 被覆
		・ゴム被覆
ペトロラタム被覆		・樹脂製保護カバー方式
		・耐食性金属保護カバー方式
無機被覆	モルタル被覆	・型枠を外す方法
		・樹脂製保護カバー方式
		・耐食性金属保護カバー方式
	コンクリート被覆	・型枠を外す方法
	電着被覆*1	・厚膜被覆方式
		・薄膜電気防食併用方式
金属被覆	金属溶射，めっき*2	・金属溶射・塗装併用方式
		・めっき・塗装併用方式
	鋼板被覆	・犠牲鋼板巻き
	耐食性金属被覆	・モネルメタル被覆
		・ステンレス鋼被覆
		・薄板チタンクラッド鋼被覆
		・耐海水性ステンレス鋼被覆
	厚板クラッド鋼	・耐海水性ステンレスクラッド鋼

注．＊1：電着被覆は、海水中の海水中の鋼材を対象とすることから、電気防食法と同じ範疇として整理することもある
＊2：金属溶射、めっきは、海洋環境では耐久性が十分ではないことから、塗装を併用して適用するが、海上大気中に限定するのが一般的である。
＊3：タールエポキシ塗料のタールには、発がん性が疑われるベンツピレンを含む場合が多いことから、本書では塗装系から除外し、詳細は記述しない。
（財）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）」pp.42，表-1.2.2を基に加筆・修正して作成

①塗装

塗装は比較的安価で簡便な防食法であり、陸上鋼構造物や海洋鋼構造物の大気部は比較的腐食の程度は小さく、施工や塗替えによる補修が容易なので、薄膜の防食被覆法として古くから多く使用されてきている。

1980年代後半までは一般の塗装系は、陸上鋼構造物では鉛系錆止め塗料＋フタル酸塗料系であり、海洋鋼構造物の上部工では下塗りとして亜鉛の犠牲陽極による防食効果を利用したジンクリッチペイントを使用し、中塗り、上塗りには、塩化ゴム系塗料、アルキド樹脂塗料、タールエポキシ樹脂塗料およびエポキシ樹脂塗料を組み合わせた塗装系が用いられていた。

1980年代後半から下塗りに厚膜無機ジンクリッチペイント、中塗りにエポキシ樹脂塗料、上塗りにポリウレタン樹脂塗料を合計膜厚225μm以上塗装する重防食塗装仕様が海上橋梁の上部工へ適用され実績も増加してきている。さらに最近では、耐候性の優れたふっ素樹脂塗料が上塗りとして使用され、塗膜の耐久性も15～20年以上が期待されることから、重防食塗装仕様は増加の傾向にある。

下部工の鋼構造物では、塗装は仮設構造物のような短期間の防食や、電気防食と併用して用いられる。

②有機被覆

有機被覆は塗装と同様有機樹脂を被覆する方法である。その膜厚は1.5～10 ㎜ であり塗装に比べて厚く、防食性や耐衝撃性・耐摩耗性に優れている。

重防食被覆はポリエチレン被覆やウレタンエラストマー被覆があり、鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板に工場で被覆される。現地施工方法に比べ品質、コスト面で優れており、重防食製品として広く利用されている。一方、現地施工のケースでは、一般的には施工性、補修性は塗装より劣り、施工時のコストは塗装に比べ高くなる。しかし、飛沫帯や干満帯など補修が難しい環境では、初期コストが割高になっても補修費用を軽減させる目的で初期膜厚を厚くし、被覆の寿命を延ばすことによって、トータルコストを押さえられる。

超厚膜無溶剤被覆は、塗料と同じ塗装法で一度に１～５㎜ という厚膜を形成させ、厚膜による高い耐衝撃性と環境遮断性から長期の防食を期待したものである。

水中硬化型被覆は主に水中硬化形エポキシ樹脂を用いて干満帯や海水中の鋼材を被覆する方法であり、一般には鋼管杭または鋼管矢板を含む既設の構造物の防食に適用されることが多い。

ゴム被覆やレジンモルタル被覆は以前は海洋構造物に使用されていたが、最近では適用されるケースは少ない。

③ペトロラタム被覆

ペトロラタム被覆は石油ワックスの一種であるペトロラタム系の防食材料を被覆する方法である。耐衝撃性を確保するため保護カバーを取り付ける。保護カバーには保護カバー方式と耐食性金属保護カバー方式がある。ペトロラタム被覆は、新設、既設を問わず海洋構造物に適用でき、一部の方法を除いては水中での施工も可能である。また、素地調整が比較的簡単で施工後の養生時間を必要としない。

④無機被覆

無機被覆はモルタル被覆、コンクリート被覆などの無機材料を被覆する方法である。代表的なモルタル被覆は既設の海洋構造物の防食補修・補強工法として用いられ、耐食性、耐衝撃性に優れており使用実績も多く、また歴史も古い。この工法はモルタルを打設する際の型枠を保護カバーとして用いる方法が一般的である。保護カバーには樹脂製と耐食性金属のカバーがある。樹脂製のものとして繊維強化プラスチック（FRP、FRPP）が一般的に使用されている。金属性のカバーにはチタンや耐海水性ステンレス鋼板が使用されている。

電着被覆は海水中を対象とした防食法であり、鋼材に海水中に設置した電極から直流電流を流し、海水中の Ca^{2+}や Mg^{2+}を陰極となる鋼材面に $CaCO_3$や $Mg(OH)_2$として析出させて鋼材表面を被覆する方法である。その他の被覆防食法と併用するのが一般的である。

⑤金属被覆

金属被覆には金属溶射やめっきのように金属を溶融させて鋼材の表面に被覆する方法や耐食性金属などの金属板を取り付けて被覆防食する方法がある。後者は他の被覆防食法に比べて機械的強度が大きく、耐衝撃性、耐摩耗性に優れ、長期の耐久性が期待できる。そのため長期の耐用年数が求められる場合やライフサイクルコストの観点から近年使用が増えつつある。

耐食性金属被覆に用いられる耐食性金属としてはアルミニウムやステンレス鋼、チタン、モネル、キュプロニッケルなどがある。アルミニウム、ステンレス鋼およびチタンは不動態皮膜を形成し優れた耐食性を示す材料である。ステンレス鋼は長期海洋暴露試験の結果[25]から大気部、飛沫帯では発錆は若干起こるが、腐食速度は小さく防食効果が優れている。しかし干満帯や海中部では異種金属接触腐食によるステンレスと接する鋼の腐食、生物付着や構造上の隙間で発生する隙間腐食などがある。これに対し上記の異種金属接触腐食、隙間腐食は電気防食により防止されることが確認されている[26)、27)]。また一般のステンレス鋼に比較して Cr、Ni、Mo などの耐食性合金元素を増量させて飛躍的に耐食性を向上させた耐海水ステンレス鋼が海洋構造物の長期耐久性を目的に使用されている。ステンレス鋼による被覆は、モネルやチタンなどに比べて比較的安価である。チタンは孔食、隙間腐食、応力腐食割れに強い金属材料である。チタンクラッド鋼が開発され、橋脚や構造物の下部工の長期防食法として採用されている。モネル・キュプロニッケルは耐食性に優れているとともに、防汚効果もあり生物の付着が少なくなるので波浪による抵抗が減少される。いずれも海外で海洋構造物の飛沫、干満帯の防食法として古くから実績のある方法である。

厚板クラッド鋼は構造用鋼材を母材として、耐食性金属であるステンレス鋼、チタンを熱間圧延法や爆発圧着工法などにより接合させた厚板を、そのまま構造材料として使用するものである。

鋼板被覆は腐食しろを付与する目的で普通鋼や低合金系耐海水性鋼などの鋼板を巻きつける方法である。しかし海洋構造物では干潮面直下で集中腐食などの激しい腐食の恐れがあるため、近年その適用は少ない。

アルミニウムや亜鉛による溶射は塗装と同様に現地施工型で被覆される場合が多い。

海洋大気環境では直接あるいは重防食塗装の下地として使用されるが、海水中では溶解速度が大きいので直接溶射のままで適用されるケースは少ない。

（２）電気防食法

電気防食の原理を図2.6-2 に示す。鋼材を水中（海中など）に浸漬したときの電位はＢ点すなわちＥ$_{corr}$と呼ばれる値を示す。この時鋼材の溶解速度(腐食速度）は i$_{corr}$と呼ばれる値になる。鋼材はこの速度で水中に溶け出している。ここで外部から強制的に鋼材の電位を卑（図中では左）な方向であるＢ’点にすると鋼材の腐食速度は i$_{c'}$になり i$_{corr}$ よりも小さくなる。このとき、鋼板 には、i$_{p'}$の電流が流れ込む。さらに電位を卑（左方向）なＢ″点にすると、鋼材の溶解速度は０になる。このとき、鋼材に流れ込む電流は i$_{p}$（防食電流）になる。Ｂ″点の電位が防食電位となる。

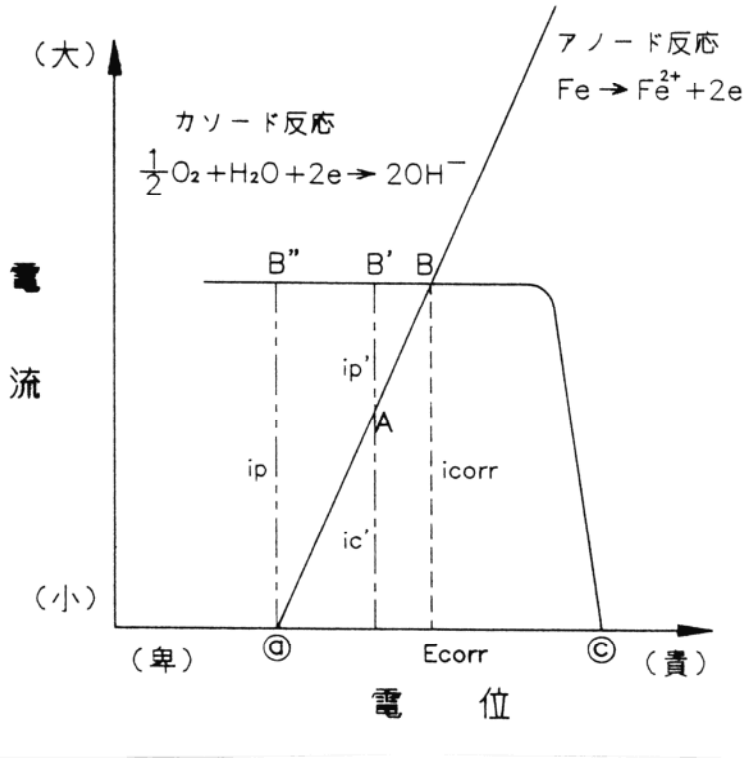


図2.6-2　鉄の電気防食の原理

電気防食法の特徴としては以下のことが挙げられる。

（ａ）防食管理電位（-800mV）を維持することにより、腐食を実用上無視できる程度に抑制できる。

（ｂ）異種金属接触腐食、孔食、隙間腐食や応力腐食割れの防止に有効である。

（ｃ）新設、既設の鋼構造物を問わず適用でき、流電陽極方式では陽極の寿命を任意に設計することが可能である。

（ｄ）電気防食による防食効果は電位測定によって容易に確認することができる。また、定量的な防食効果の確認はテストピースによって行われている。

電気防食法には流電陽極方式と外部電源方式の２種類があり、それらの方式を図2.6-3に、また、その特徴を表2.6-2 に示す。

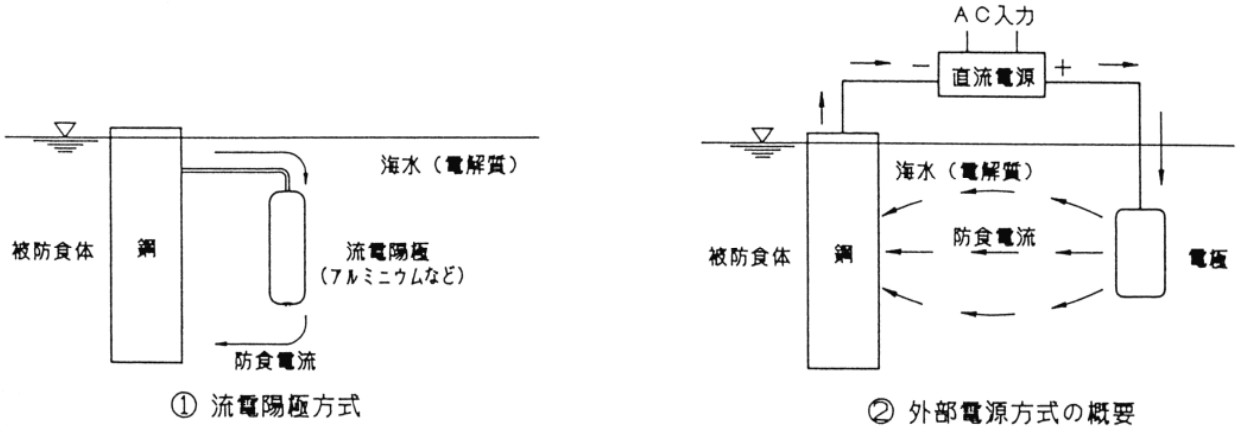


図2.6-3　電気防食法の方式

表2.6-2　電気防食方式の特徴[5)]

方　式	長　所	短　所
流電陽極方式	・メンテナンスが容易である. ・施工が容易である. ・陽極寿命を任意に設定できる. ・小規模，独立した施設では，割安である. ・電源のない場所で適用できる.	・河川などの高抵抗率環境には適さない. ・防食電流の調整ができない. ・陽極が寿命に達した時には取替える必要がある.
外部電源方式	・出力電圧を任意に調整できる. ・高流速下，河川水混入下など，変化の激しい特殊な環境にも対応できる.	・電源のない場所では，適用が困難である. ・維持電力費を必要とする. ・過防食や隣接鋼構造物への影響を留意する必要がある.

電気防食の分野では、維持管理の容易さや安全性から従来、流電陽極方式が多用されてきた。

流電陽極方式は犠牲防食と同じ原理で、鋼材に対し卑な電位をもつアルミニウムや亜鉛などの合金を陽極として鋼材に接続し、鋼材が腐食しない電位にするために必要な電流を鋼材に流し込む方式である。現在海洋鋼構造物に最も多く用いられており、陽極にはアルミニウム合金陽極が多用されている。

外部電源方式は、直流電源装置から海中に設置した電極を通じて鋼材に強制的に電流を流し込む方式である。電位に応じて電流を調整できるという特徴があり、流速や抵抗率が変化する環境にも適用できる。ただし、常に維持管理を行う必要がある。最近ではコンピュータを用いて防食電位・電流等を常時モニタリングし、フィードバックコントロールするリアルタイム管理型の外部電源方式が開発されている。

２．６．２　有機被覆の劣化過程とその防止対策

鋼管杭や鋼管矢板・鋼矢板に広く使用されている有機被覆と電気防食の防食機構を以下に示す。

比較的薄膜の塗装ではその劣化過程と防食機構についての多くの研究結果があるが、これらよりも膜厚がおよそ１桁大きい鋼管や鋼管矢板・鋼矢板に広く使用されている有機被覆鋼材の劣化については、直接的な研究結果は少ない。したがってここでは塗装の検討結果から、現段階で考えられている防食機構について記す。

比較的薄い有機被覆の塗膜下腐食による塗膜のふくれ、剥離等は図2.6-4 に示すような過程で進行する[28]。

使用環境中の水(H_2O)や酸素(O_2)などの腐食因子が被覆層を透過して金属表面まで浸入し、カソード反応によって発生したアルカリと、腐食により発生した錆の塗膜の押し上げ効果により被覆が剥離に至る。被覆層の劣化や傷等の欠陥があると、金属表面の腐食は早まり、被覆の剥離は更に促進される。

また、被覆端部のある場合の被覆の劣化は図2.6-5に示すような過程で進行する。

被覆端部付近の露出した鋼面がアノードとなり、その周囲の被覆層下の鋼面がカソードとなり、露出した鋼面の腐食が進行すると考えられる。また、このカソード反応によって発生したアルカリにより有機被覆が加水分解作用を受け剥離が生じると推定される。この時被覆層下の溶液がアルカリ性を保つこともあり、鋼材が不動態化するため、腐食は生じないと考えられる。被覆層下の腐食は剥離が進展することで被覆層端部に浮きが生じ，防食効果が失われた時点で腐食が発生すると考えられる。被覆層下で腐食が生じることによりさらに被覆の剥離が進展する。

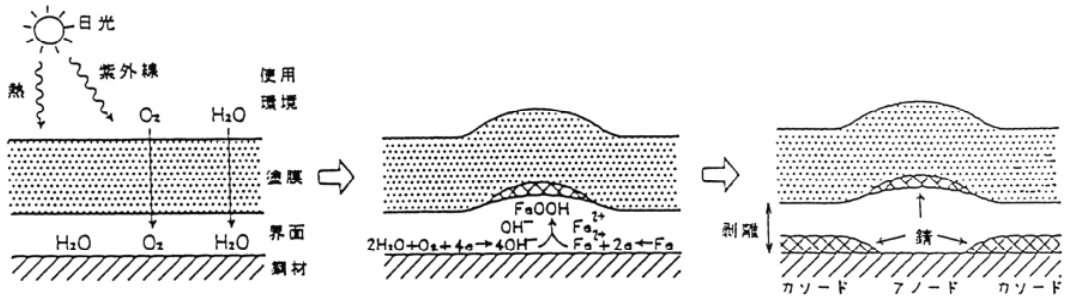


図2.6-4　塗膜下腐食による塗膜のふくれ、剥離等の劣化過程

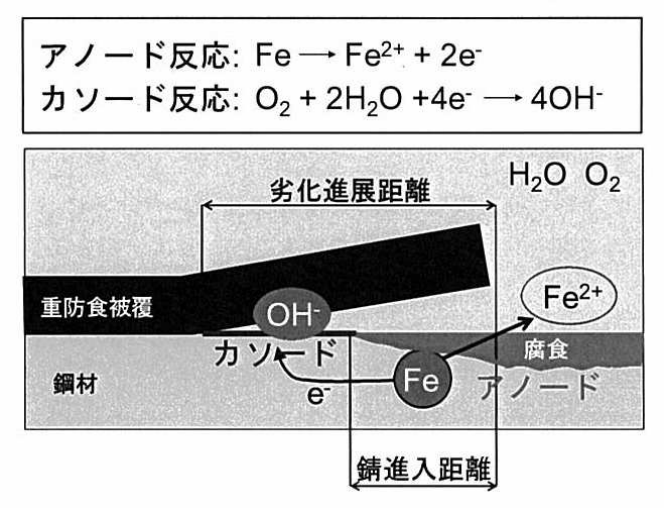


図 2.6-5　被覆端部からの有機被覆の劣化過程[29)]

各被覆劣化過程に対する対策としては以下のようなものが挙げられる。

①有機被覆の環境による劣化防止

耐候性、耐熱性、耐水性、耐衝撃性が優れ、変質しにくい有機被覆材を選定する。

②腐食因子の侵入の防止

有機被覆を通して腐食因子が金属表面へ拡散到達する時間は、膜厚の二乗に比例し拡散係数に反比例するので、有機被覆の膜厚を大きくするか、または、腐食因子の拡散係数が小さく、欠陥が無い材料を選定する。

③有機被覆と金属との接着の破壊の防止

接着力が小さいときには被覆の膨れや剥離が進行しやすいが、大きい接着力が保持されている場合は被膜の剥離を生じさせる水等の腐食因子の皮膜下への浸入が抑制される。したがって、被覆前に行う鋼面の素地調整は適正な清浄度と粗さに仕上げ、プライマーなどで有機被覆と鋼面との接着力を大きくすることが重要である。

④塗膜下腐食の進展の防止

塗膜下の腐食電池の作用やアルカリ生成による剥離の防止対策には防錆顔料の添加が有効であり、顔料としては犠牲防食作用をもつ亜鉛や金属表面を不動態化するクロム酸塩顔料、水に溶けて塗膜下の pH をコントロールするものなどがある。

以上のことから、重防食鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板などの重防食製品では、この被覆下の腐食を防止するために、被覆材は耐候性、耐熱性や耐水性に優れたポリエチレンやウレタンエラストマーを２㎜ 以上の厚膜とし、鋼材表面は入念な素地調整により、接着性、耐水性、防食性を持たせた被覆構造になっている。

２．６．３　鋼製施設の防食工法の最近の動向

鋼管杭の各種防食法による海洋環境下での長期暴露試験（付録－付・２、付・４）が実施されている。

これらの試験の結果をもとに、この防食性能（寿命）の相対的評価として優れたものを挙げると

（ａ）ポリエチレン、ウレタンエラストマーの有機被覆

（ｂ）コンクリート被覆、セメント硬化体＋保護カバーによる複合防食

（ｃ）耐海水性ステンレス鋼

（ｄ）キュプロニッケル、モネル、チタンなどの耐食性金属被覆 がある。

一方、イニシャルコストの面で優れたものとしては、有機被覆ではポリエチレン、ウレタンエラストマーがある。ポリエチレン、ウレタンエラストマーを被覆した重防食製品は、性能が良く、品質が安定しており、また比較的安価な防食法として1980年代後半から港湾等の鋼構造物に採用されている。

従来は単独の防食法の適用が多かったが、最近では複合型の防食法が増えている。例えば大気中及び飛沫・干満帯に重防食を適用し、海中部については電気防食を適用する複合型防食システムが増加している。また、長期防食法としてセメントモルタル＋有機被覆＋鋼板巻き付けなどの複合防食や、耐海水ステンレス鋼被覆、チタンクラッド鋼による被覆などの長期防食法の適用が見られるようになってきている。

＜参考文献＞

1) (社)腐食防食協会技術委員会：JSCE-TC-01. 耐候性鋼技術小委員会報告書「耐候性鋼とさび層の現状と課題」p.12 (1994)
2) (社)石油学会:腐食形態写真集、p.185-191 (1977)
3) (財)腐食防食協会:腐食・防食ハンドブック、p.279 (2000)
4) E. Heyn, O. Bauer：Mitt. Mat. Prug, Vol.28, p.102 (1910)
5) (財)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)」(2009)
6) F. M. Reinhart, J. F. Jenkins：The Relationship between the Concentration of Oxygen in Seawater and the Corrosion of Metals, Proceeding of 3rd International Congress on Marine Corrosion and Fouling, p.562 (1972)
7) H. Uhlig, D. Triadis, M. Stern：J. Electrochem. Soc., 102, 59 (1955)
8) (社)腐食防食協会：「防食技術便覧」、日刊工業新聞社 (1986)
9) 小若正倫, 長野博夫：流動海水中における鋼の腐食に及ぼす合金元素の影響, 防食技術, Vo20, No.5, p.213 (1972)
10) 梶山文夫：土壌に埋設された鉄管の微生物誘起腐食、配管技術、p.94～98. (1996)
11) R. E. McVay：Proceedings of the 4th Annual Underground Corrosion Short Course, p.78 (1959)
12) H. A. Humble：Corrosion, 5, 292 (1949)
13) (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)(1997)
14) 鋼管杭協会：「防食ハンドブック」p.2-14 (1998)
15) 善一章：海洋環境における鋼構造物の腐食の実態と集中腐食対策に関する研究、港湾技術研究所報告、Vol.15, No.3. (1976)
16) 阿部正美：港湾鋼構造物の集中腐食に関する研究、第38回腐食防食討論会講演予稿集、PP351～354. (1991)
17) 小林　純：用水と廃水、Vol.2, No.1, p.9 (1960)
18) 半谷高久：水質調査法、P170. (1960)
19) 守屋進：河川護岸用鋼矢板の全国腐食調査、第22回鉄構塗装技術検討会発表予稿集、(社) 日本鋼構造協会、p.89～94. (1999)
20) A. Hache：Revue de Metallurgie, Vol.53, No.1, p.76 (1956)
21) 大崎順彦：「鋼ぐいの腐食」、(社) 鋼材倶楽部 (1980)
22) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：「鋼管杭　その設計と施工」(2009)
23) I. A. Denison, M. Romanoff：Corrosion, 9, 141 (1953)
24) W. J. Schwerdtfeger：Corrosion, 10, 30 (1954)
25) 鋼管杭協会：「防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書 千葉沖・阿字ヶ浦沖」(1992)
26) 伊藤陽一、坂本浩行：飛沫帯及び干満帯における鋼構造物の防食技術（第３報）-海洋 技術総合研究施設を用いた暴露試験-腐食防食96講演集、96D-102
27) 増田一広、吉田耕太郎、山本正弘、川上　誠、佐々木信宏、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回年次学術講演会資料、Ⅴ192.（1992）
28） W.Funke:Prog.Org.Coating,9.29.（1981）
29） 審良善和ほか；重防食被覆を適用したハット形鋼矢板の耐久性に関する基礎的研究、港湾技術研究所資料（公表予定）

第３章　防食設計

３．１　適用防食法 ―――――――――――――――――――――――――― ３－　１
　３．１．１　重防食被覆 ―――――――――――――――――――――――― ３－　１
　３．１．２　電気防食 ―――――――――――――――――――――――― ３－　２
　３．１．３　腐食しろ ―――――――――――――――――――――――― ３－　４
３．２　海洋環境 ―――――――――――――――――――――――――― ３－　６
　３．２．１　防食設計の考え方 ―――――――――――――――――――― ３－　６
　３．２．２　港湾鋼構造物の設計 ―――――――――――――――――――― ３－　８
　３．２．３　漁港鋼構造物の設計 ―――――――――――――――――――― ３－１１
　３．２．４　海洋鋼構造物の設計 ―――――――――――――――――――― ３－１２
　３．２．５　防食設計手順と設計例 ―――――――――――――――――― ３－１３
３．３　河川環境 ―――――――――――――――――――――――――― ３－２６
　３．３．１　防食設計の考え方 ―――――――――――――――――――― ３－２６
　３．３．２　河川鋼構造物の設計 ―――――――――――――――――――― ３－２７
　３．３．３　防食設計例 ―――――――――――――――――――――――― ３－２８
３．４　土壌（陸上）環境 ―――――――――――――――――――――― ３－３１
　３．４．１　防食設計の考え方 ―――――――――――――――――――― ３－３１
　３．４．２　鋼管杭基礎の設計 ―――――――――――――――――――― ３－３２
　３．４．３　防食設計例 ―――――――――――――――――――――――― ３－３３
　参考文献 ―――――――――――――――――――――――――――― ３－３５
　参考１　腐食代に関する規定 ―――――――――――――――――― ３－３６
　参考２　漁港施設の防食法適用区分と適用防食―――――――――― ３－３８
　参考３　基準・指針・参考文献等―――――――――――――――― ３－３９

第３章　防食設計

３．１　適用防食法

本章では、鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の腐食対策として「重防食被覆」、「電気防食」、「腐食しろ」の３種類を用いる場合について述べる。

３．１．１　重防食被覆

重防食製品には、重防食鋼管杭、重防食鋼管矢板、重防食鋼矢板がある。これらは、鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の外面にポリエチレンあるいはウレタンエラストマーを工場被覆した製品で、その被覆構成を図3.1-1 に示す。

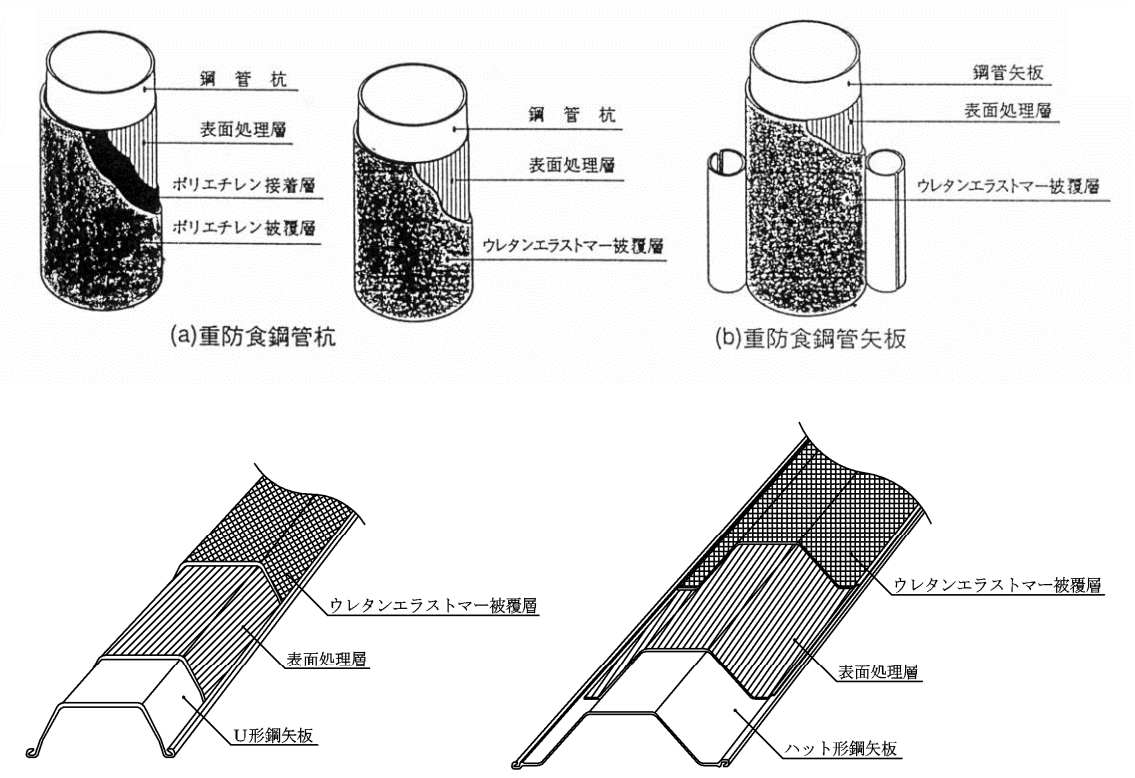


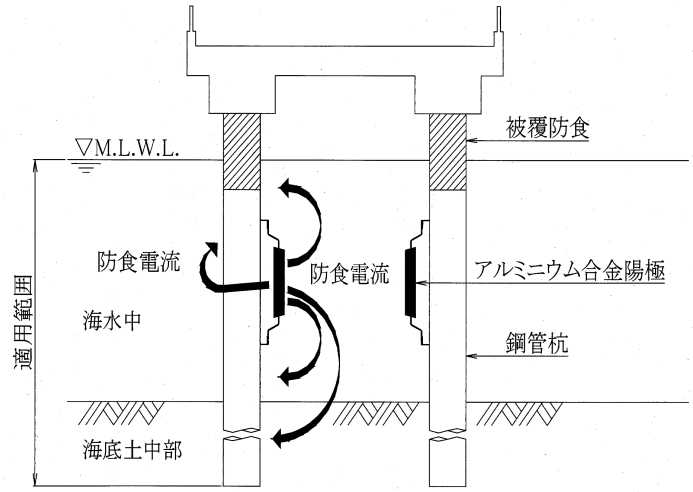
図3.1-1　重防食製品の被覆構成[注]

注：文献１）で鋼矢板を刷新。

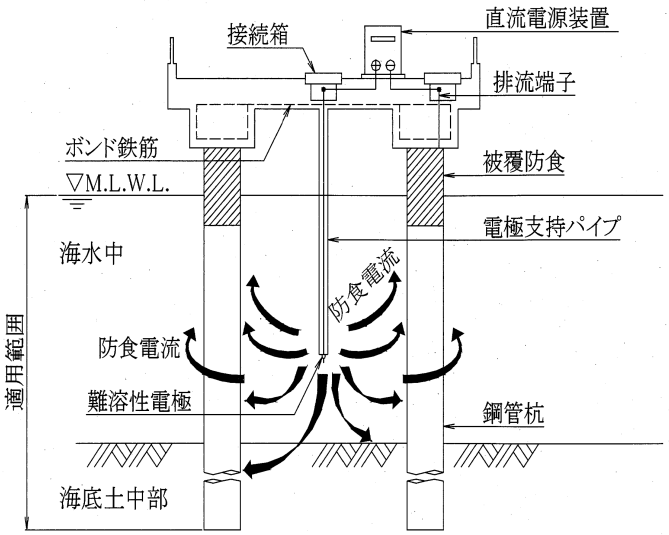
３．１．２　電気防食

電気防食は、鋼材表面から流れ出す電流（腐食電流）を阻止するために図3.1-2 に示すように、外部から電流を流して腐食を防止する工法である。電気防食には、流電陽極方式と外部電源方式があり、現在は流電陽極方式の採用が主流となっている。

わが国における諸団体の海洋鋼構造物に対する電気防食設計基準の規格を表3.1-1 に示す。各規格ともに海洋鋼構造物が建設される海域の環境（清浄海域・汚染海域・潮流等）、腐食部位（海水中・土中等）及び鋼材の被覆の有無（裸・塗覆装・コンクリート被覆等）により防食電位・防食電流密度を細かく規定している。



（ａ）流電陽極方式



（ｂ）外部電源方式

図3.1-2　電気防食概念図[2)]

表3.1-1　海洋鋼構造物に対する電気防食設計基準の公的規格[2)～4)]

<table>
<tr><td>名　称</td><td>港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)</td><td>海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説</td></tr>
<tr><td>出版機関</td><td>(財)沿岸技術研究センター</td><td>(財)土木研究センター</td></tr>
<tr><td>防食電位</td><td>
<table>
<tr><th>防食電位</th><th>照合電極</th><th>適用環境</th></tr>
<tr><td>-780mV</td><td>海水塩化銀電極：Ag/AgCl[SW]</td><td>海水中</td></tr>
<tr><td>-850mV</td><td>飽和硫酸銅電極：Cu/CuSo4</td><td>海底土中部
陸土中部</td></tr>
<tr><td>+250mV*1</td><td>亜鉛電極：Zn</td><td>海水中
海底土中部</td></tr>
</table>
*1.亜鉛電極の固有電位が-1030mV(vs Ag/AgCl[SW])の場合
換算値:-780mV(防食電位)＝(-1030mV)+(+250mV)</td><td>
防食電位　単位：mV(S.C.E.)
清浄海域　-770
汚染海域　-900
高潮流海域　-770
塗装併用　-770ただし下限-1050
（管理電位）　単位：mV(S.C.E.)
一般海域　-800より卑
汚染海域　-900より卑
潮流海域　-800より卑
塗装併用　-800～-1050までの間</td></tr>
<tr><td>電流密度
(mA/m²)</td><td>
<table>
<tr><th>環　境</th><th>清浄海域(mA/m²)</th><th>汚染海域(mA/m²)</th></tr>
<tr><td>海水中</td><td>100</td><td>130～150</td></tr>
<tr><td>石積中</td><td>50</td><td>65～ 75</td></tr>
<tr><td>海底土中部</td><td>20</td><td>26～ 30</td></tr>
<tr><td>陸土中</td><td>10</td><td>10</td></tr>
</table>
本表は、いずれも裸鋼材面に対する値である。
汚染海域と清浄海域の区分は、国内各地で実施した電気防食調査結果から，塩化物イオン濃度（17800ppm以下），溶存酸素濃度（6ppm以下），アンモニウムイオン濃度（0.1ppm以上）の３項目のうち２項目以上が該当する場合に汚染海域と判別している。
電気防食の適用範囲内に被覆防食された部分がある場合には，被覆防食材の導電性(耐食性金属被覆など)および劣化・損傷を想定し，DNV規格およびISO規格を参考にして防食電流密度の係数を設定。
<table>
<tr><th colspan="2">被覆防食法</th><th>防食電流の密度係数*1</th><th>備考</th></tr>
<tr><td colspan="2">塗装</td><td>0.25</td><td>初期に損傷率を設定</td></tr>
<tr><td rowspan="2">有機</td><td>重防食(鋼管杭)</td><td>－</td><td>劣化・損傷率小</td></tr>
<tr><td>同(鋼矢板・鋼管矢板)</td><td>0.10</td><td>継手勘合部考慮</td></tr>
<tr><td colspan="2">無機被覆(ﾓﾙﾀﾙ被覆)</td><td>0.10</td><td>導電性有り</td></tr>
<tr><td colspan="2">金属被覆</td><td>1･00</td><td>導電性</td></tr>
</table>
*1.本係数の適用は，[裸鋼材面積/被覆面積]＞1 とする.
*2.重防食鋼矢板や鋼管矢板は，継手勘合部に一部未被覆部がある：[未被覆面積]/[被覆面積]＝8～13%で幅あるも，10%を設計に織り込むこととする。</td><td>
<table>
<tr><th colspan="3">環　境</th><th>初期防食電流密度</th><th>定常防食電流密度</th></tr>
<tr><td rowspan="2">一般海域</td><td rowspan="2">内湾性</td><td>海水中</td><td>100</td><td>50</td></tr>
<tr><td>土　中</td><td>20</td><td>10</td></tr>
<tr><td rowspan="2">一般海域</td><td rowspan="2">外洋性</td><td>海水中</td><td>100F</td><td>50F</td></tr>
<tr><td>土　中</td><td>20F</td><td>10F</td></tr>
<tr><td rowspan="3">特殊海域</td><td rowspan="3">汚染</td><td>海水中</td><td>100K</td><td>50K</td></tr>
<tr><td>ヘドロ</td><td>150</td><td>100</td></tr>
<tr><td>土　中</td><td>20K</td><td>10K</td></tr>
<tr><td rowspan="3">特殊海域</td><td rowspan="3">潮流</td><td>1m/s</td><td>160</td><td>80</td></tr>
<tr><td>2m/s</td><td>230</td><td>115</td></tr>
<tr><td>5m/s</td><td>270</td><td>135</td></tr>
</table>
複合電気防食：上の値にＰを乗じた値
（備考）
Ｆ：海域の波浪、潮流の程度に応じて1.0～1.5までの範囲。
Ｋ：汚染の程度に応じて1.2～1.5までの範囲。
Ｐ：塗膜の劣化･損傷等によって生じる鋼の露出率で塗装系により0.1～0.25までの範囲。</td></tr>
</table>

注１．「港湾の施設の技術上の基準･同解説」2007を詳述する「港湾鋼構造物防食･補修マニュアル(2009年版)」を記載。

３．１．３　腐食しろ

腐食しろによる方法は、構造物の耐用年数期間中の鋼材の腐食量に見合った肉厚をあらかじめ腐食しろとして見込む方法である。この方法は、腐食が平均的な場合や腐食速度が比較的小さい場合には適するが、腐食速度が大きい場合や予測しがたい場合、および集中腐食が発生しやすい環境では適さない。

公的規格類をみると、港湾では(社)日本港湾協会の「港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版」（1989）で、腐食しろによる方法は原則として用いないとされ、2007年の改定でも趣旨が踏襲されている。一方、(社)全国漁港協会の「漁港・漁場の設計の手引き」（2003）では腐食しろによる設計を認めている。しかし、漁港鋼構造物も港湾施設同様腐食速度は大きく集中腐食の発生も考えられるため、腐食しろを用いる場合は十分な検討が必要である。

また、建築・土木関係の基準によると防食措置をとらない場合、腐食しろは一般的に１㎜～２㎜と規定されていたが最近では１㎜に移行している。

腐食しろによる設計等の記載が施設の予防保全や性能設計等との関係で見直されつつあることや各基準等の改定時期の関係から、旧表3.1-2(1),(2)を本章末尾の参考に残すこととし、ここでは表3.1-2として最近の基準等に基づく腐食しろに関する規定を示す。

表3.1-2　主な腐食しろに関する規定[2)、3)、10)～17)]

区別	基準名称	腐食しろ	備考
土木関係	道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編 （平成14年3月） （(社)日本道路協会）	海水や有害な工場排水などの影響を受けない場合で、環境の腐食性調査を行わず、また、防食処理も施さないときは、常時、水中及び土中にある部分（地下水中部を含む）に対して１㎜の腐食しろを考慮する。	海水または鋼の腐食を促進させる工場排水の影響を受ける部分及び常時乾湿を繰り返す部分は、十分な防食処理を行わなければならない。　参考：（）に防食法を記す （(1)塗装・有機被覆 (2)無機被覆 (3)犠牲鉄板巻 (4)電気防食）：第2章 図2.6-1参照
	鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物（平成９年３月） （(財)鉄道総合技術研究所）	腐食代は一般に１㎜を考慮する。外周面について考える。	
	土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書　技術書（2001） （農林水産省農村振興局）	杭の周辺土に接する表面は２㎜。 鋼材で囲まれた内側の表面は０．５㎜。 ６㎝以上の厚さのコンクリートに接する表面は０㎜。	
建築関係	国交省告示1113号 （平成13年）	腐食しろ（有効な防食措置を行う場合を除き、1以上とする。）（単位㎜）	・課長通達123号：国交省では通達を廃止し、告示に記載。
	建築基礎構造設計指針(2001) (社)日本建築学会）	年間腐食しろ(0.02㎜/yr×耐用年数)。 通常１㎜をとれば十分である。	
	建築構造設計指針（2001） （東京都）	例として、「開端杭の腐食しろとして外側１㎜内側0.5㎜の場合」を載せている。ただし「閉鎖杭の場合は内側の腐食しろは見込まないことができる」。	
港湾・漁港関係	港湾の施設の技術上の基準･同解説(2007)((社)日本港湾協会)	電気防食や被覆防食等の防食法の適用が前提である。腐食しろの記載無し。	・
	港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)	腐食しろによる設計は認められていないことを明記[注2].	・腐食しろ記載箇所：注２参照
	漁港・漁場の施設の設計の手引き（2003） (社)全国漁港漁場協会）	腐食代は、一般に｛平均腐食速度(㎜／年)×防食期間(年)｝で算出される。 （注:鋼材の平均腐食速度(㎜/年）参照：30年を標準とする。）	
河川関係	建設省事務連絡 (昭和54年４月10日) 護岸用鋼矢板の選定について	表裏合わせて２㎜。ただし、特に腐食が著しいと判断された場合は現地に適合した腐食しろを見込む。	河川関係では昭和54年以降、この趣旨が踏襲されている。
	災害復旧工事の設計要領(2010)((社)全国防災協会)	１級河川　表裏合わせて２㎜。	同上

注１．土木関係の腐食しろの基準に関しては、平成8年12月の道路橋示方書・同解説の改定時に従来の２㎜から１㎜に変更された。
なお、首都高速道路，阪神高速道路等は道路橋示方書に準ずるとされているので記述は除くこととした。

２．港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)では、防食工法の名称が変更された（ex.○○ライニング ⇒ ○○被覆）。
また、腐食しろとしては、「供用期間の短い構造物（仮設構造物など）の副部材には防食法は適用せず、腐食しろによって腐食対策を図ることもある。」と記されている。これを本書３．２．２（１）Ａ方法に記載。また、「第Ⅳ部 無防食の鋼構造物に対する性能評価と補修・補強対策 第一編 第一章 総説」にも腐食しろ設計についての記述有り。

３．港湾・漁港関係では　腐食速度が設置環境により異なる。漁港関係では後述の 表３．２－２ 鋼材の平均腐食速度 を参照されたい。また、各種防食法については、既述の2章 2.6-1　被覆防食法の分類 を参照されたい。

４．「建築用鋼管杭施工指針・同解説」（昭和61年9月）(鋼管杭協会)は絶版のため記述から除くこととした。

５．基準名称記載資料は、主に本「防食ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ」初版を参考とした（名称変更、趣旨変更等が主）。

３．２　海洋環境

３．２．１　防食設計の考え方

海洋環境における鋼製構造物としては、海洋施設、港湾施設、漁港施設等がある。

海洋環境の腐食の特徴は、図3.2-1 および表3.2-1 に示すように、飛沫帯と平均干潮面直下の海水中部の腐食が激しいことである。

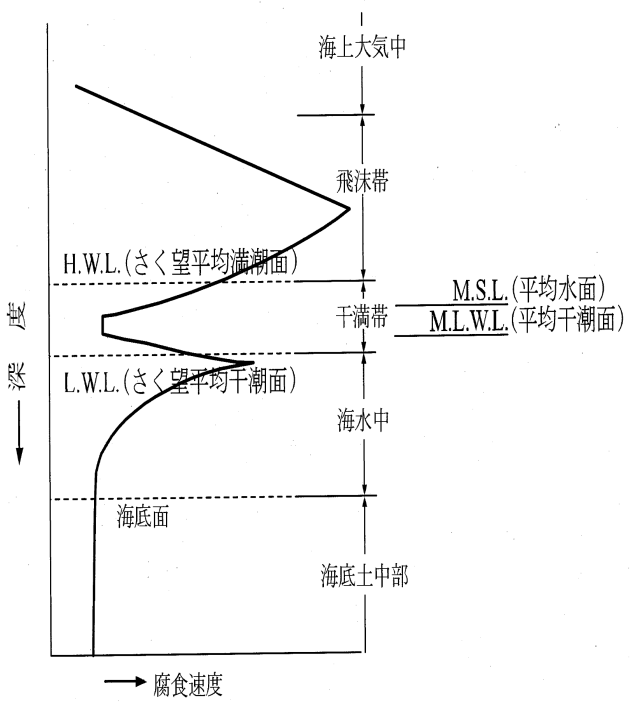


図3.2-1　鋼管杭の板厚減少プロフィール[2)]

表3.2-1　鋼材の腐食速度の標準値[2)]

腐　食　環　境	腐食速度（mm/年）
1）H.W.L. 以上	０．３
2）H.W.L.～L.W.L.-1.0m	０．１～０．３
3）海水中	０．１～０．２
4）海底土中部	０．０３
5）背面土中部	
a.残留水位より上	０．０３
b.残留水位より下	０．０２

防食を適用する範囲は、海洋環境の腐食性、防食法の特性などを配慮して、図3.2-1、表3.2-1に記すように、①海上大気中、②飛沫帯、③干満帯、④海水中、⑤海底土中部、⑥背面土中部（残留水位より上、下）に区分する。

特に、飛沫帯と平均干潮面直下の海中部の腐食が激しく、メンテナンスが困難であることから、この部位には長期耐久性に優れた重防食製品を適用する。適用範囲は、図3.2-2のように、通常、海上大気部からL.W.L. －1.0m までとするのが一般的である。

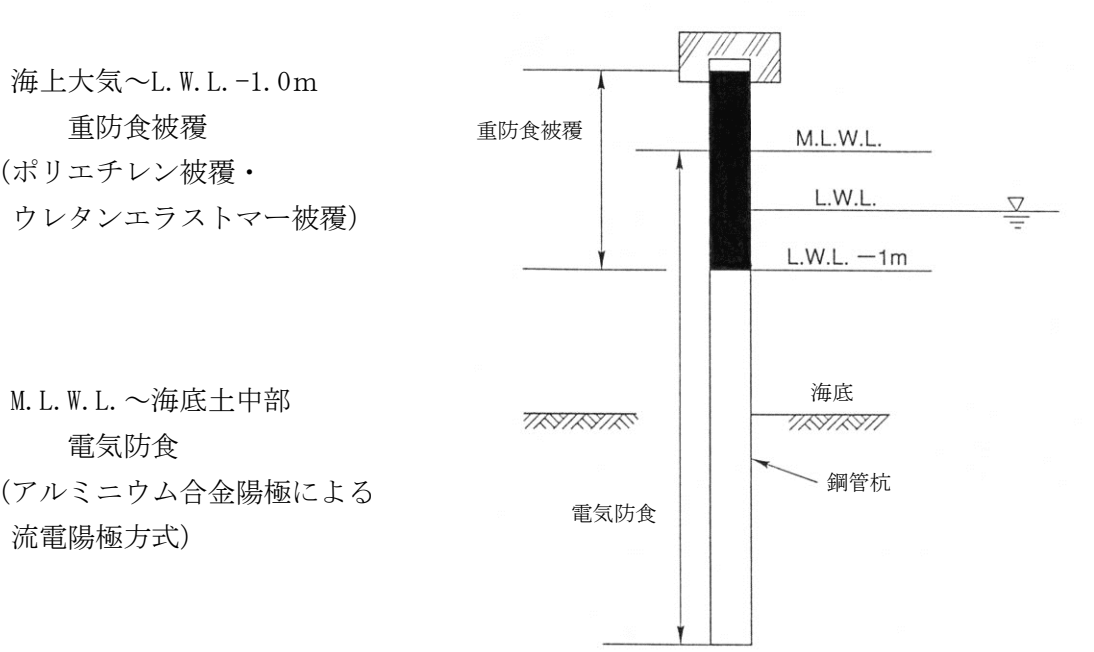


図3.2-2　防食方法の例[1)]

３．２．２　港湾鋼構造物の設計

港湾鋼構造物の防食設計に関する基準、指針等として、次のものがある。

①「港湾の施設の技術上の基準・同解説」、（（社）日本港湾協会、2007）

②「東京港腐食対策手引書（改定版）」、（東京都港湾局、1998）

③「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)」、

（（財）沿岸技術研究センター、2009）

港湾構造物に適用する防食法は、図3.2-3 に示すＡ～Ｃの３つの方法がある。「港湾の施設の技術上の基準・同解説（2009年版）」ではＡおよびＢの方法を原則としており、Ｃ方法をやむを得ず採用する場合には耐久性などに関する検討が必要としている。

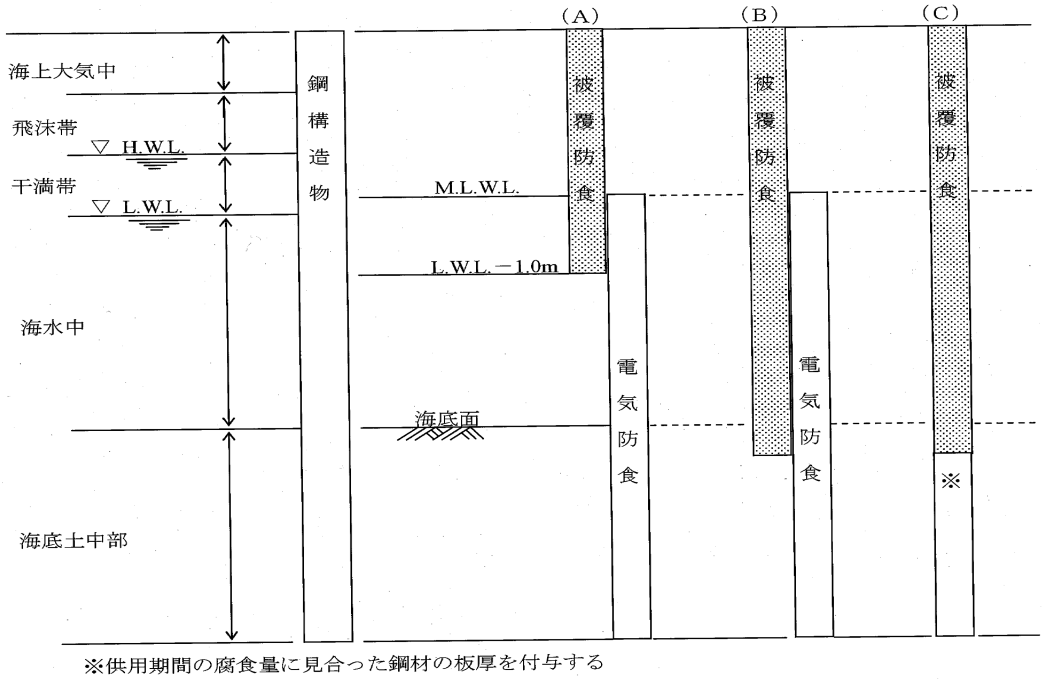


図3.2-3　港湾構造物の防食適用区分と適用防食法（例）[2)]

以下、Ａ～Ｃの方法につき、本「防食ハンドブック」初版（平成10年3月発行）と上記③「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(2009年版)」を参考に次頁に記す。

（1）Ａ方法

方法Ａは、（L.W.L. －1m） 以上に被覆防食を、M.L.W.L.以下に電気防食を適用する方法で最も実績が多く、信頼性が確認されている方法である。

M.L.W.L.～（L.W.L. －1m） 区間は、集中腐食が最も発生しやすい部位であるため被覆防食と電気防食を併用し、集中腐食が防止できるよう配慮している。

電気防食の適用範囲はM.L.W.L.以下であるが、高波浪環境で干満部に鋼材が露出している場合には大きな防食電流を要することや、河川水や多量の雨水が混入する環境では、淡水は海水に比較して電気抵抗率が大きく比重が小さいため上層部に滞留し、電気防食の効果が低下することがある。したがって、被覆防食の適用範囲は（L.W.L. －1.0m）より上部が標準的であるが、海域によって河川水の流入程度、汚染状況などが異なるため、水質調査を行い適切な深度を決定することが望ましい。

（2）Ｂ方法

方法Ｂは、Ａ方法の被覆防食を海底面まで行った方法である。外洋や高潮流海域などで電気防食の防食電流密度が大きな値を必要とする場合や、季節により海水の電気抵抗率が大きく変動する環境（河口付近、およびその水門や護岸など）では、経済的・効果的な場合が多い、なお、この方法は電気防食の陽極の取り付けが被覆防食に損傷を与えないように、あらかじめ陽極の取り付け台座を設けておくか、被覆前に陽極を取り付けるなどの配慮が必要である。

（3）Ｃ方法

方法Ｃは、腐食の激しい飛沫帯、海水中および海底土中部の一部に被覆防食を適用する方法である。この方法は一般に水深の浅い鋼矢板護岸等に用いられる。この場合の被覆防食は特に防食性、耐久性に優れたものでなければならない。被覆防食には、新設構造物の場合はポリエチレン被覆やウレタンエラストマー被覆、既設構造物の場合は、ペトロラタム被覆やモルタル被覆などが用いられることが多い。また、被覆防食の下端深度は、（海底面－1.0m）程度とすることが多い。これは、海底土としては腐食性の強い泥土（ヘドロ）が堆積している場合が多いことや、海底面の若干の変動などに配慮したものである（図3.2-4 参照）。

なお、港湾構造物の腐食量の計算では、一般的に耐用年数30～50年を考慮している場合が多い。

この方法の設計例としては、以下のようなものがある。

・現地盤を掘削し計画水深まで掘り下げる場合 （図3.2-5 参照）
・現地盤上に捨石等による根固めが行われる場合
・地盤改良により現地盤を良質な砂質土に置き換えられる場合等

すべての場合において、防食層を計画水深（または現地盤面）から1.0m程度根入れすることが望ましい。

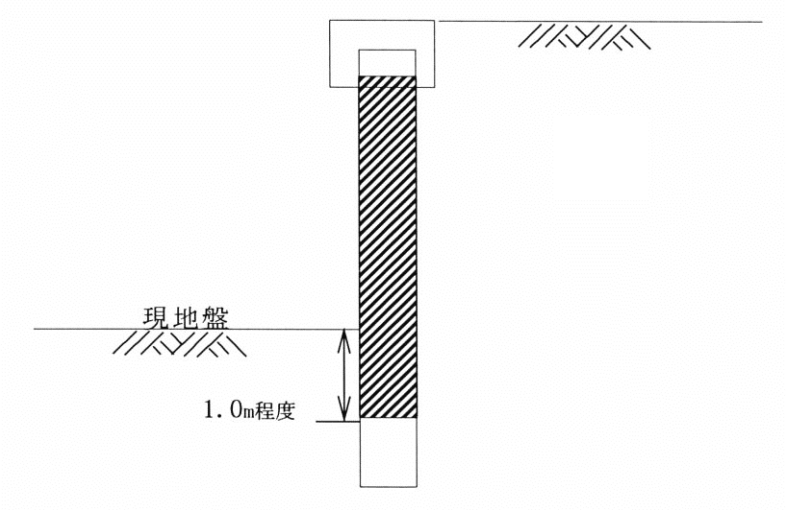


図3.2-4　計画水深がほぼ現地盤と等しい場合

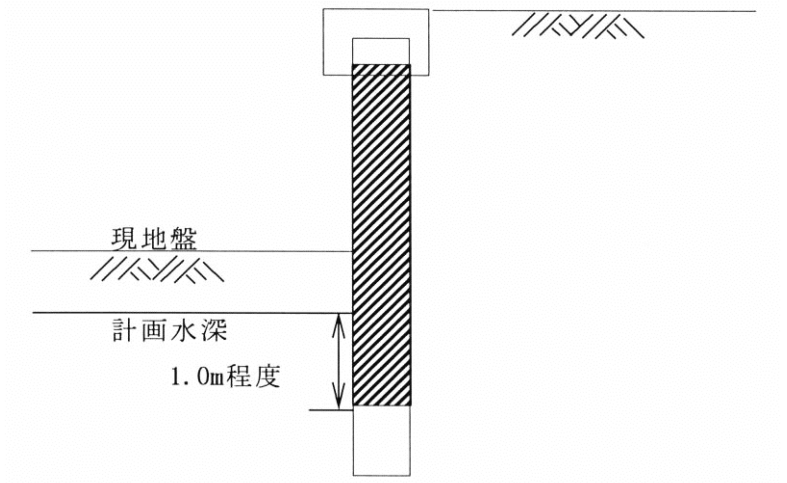


図3.2-5　現地盤を掘削し計画水深まで掘り下げる場合

鋼管杭、鋼矢板や鋼管矢板を使用した岸壁および桟橋構造の適用防食法はＡ方法が一般的である。大規模構造物や河口付近の構造物の場合はＢ方法が効果的な場合があるので、比較検討して経済的な防食法を決定する必要がある。また、護岸など水深の浅い構造物で重要度が低く設計供用期間が短い場合にはＣ方法を採用する場合もある。

供用期間の短い構造物（仮設構造物など）の副部材には防食法は適用せず、腐食しろ（鋼材の板厚の増加）によって腐食対策を図ることもある。[2)]

３．２．３　漁港鋼構造物の設計

漁港も前項の港湾と同様な海洋環境下にあり、その腐食性の激しさを考慮し、漁港構造物の鋼材の腐食対策は、腐食しろと重防食製品による防食法との組み合わせを標準とする。しかし、漁港構造物も港湾と同様に厳しい腐食環境にあり、著しい局部腐食が予想される場合は、重防食製品と電気防食法の併用により十分な対策を講じることが望ましい。

漁港鋼構造物の防食設計に関する基準、指針等として次のものがある。

①「漁港･漁場の施設の設計の手引き」（（社）全国漁港漁場協会、2003）

上記①「漁港･漁場の施設の設計の手引き」では、腐食しろは腐食代と記載され、2.4 防食 (4)腐食代付与による方法 に記されている。ここにその主要部を抜粋する。

「・・・、一般に干満帯近傍では集中腐食が発生することを十分に考慮し、腐食代による防食方法の適性を構造物の重要度に応じて検討することが望ましい。鋼材の平均腐食速度は表3.2-2の値を標準とする。・・・。腐食代は一般に{平均腐食速度(mm／年)×防食期間(年)}で算出される。」[6)]

表3.2-2　鋼材の平均腐食速度（片面）[6)]

	腐　食　環　境	腐食速度（mm/年）
海側	H.W.L 以上	0.3
	H.W.L～L.W.L－1.0m	0.1～0.3
	L.W.L－1.0m～水深20m	0.1～0.2
	水深20m～50m	0.06
	水深50m 以深	0.045
	海底泥層中	0.03
陸側	陸上大気中	0.1
	土中（残留水位上）	0.03
	土中（残留水位下）	0.02

（注）防食期間は30年を標準とする。

また、文献６）には防食方法の実施例が図示されているが、ここでは既存の防食法に関し後述する 図3.2-7 腐食環境区分と防食法 を参照戴き、その記載に従うこととする。

漁港に見られる防食は、（A）被覆防食＋電気防食、（C）土中まで被覆防食＋腐食しろ、（D）被覆防食＋腐食しろ、（E）腐食しろ、の４種類がある[注]。

我が国の漁港では水深が浅く電気防食装置が取り付けにくい場合が多い。このような場合は（C）を適用するとよい。

注：本章末尾の参考２を参照戴きたい。そこでの対応記号はａ）＝（A），ｂ）＝（D），ｃ）＝（E），ｄ）＝（C）である。

３．２．４　海洋鋼構造物の設計

海洋鋼構造物としては、人工島護岸や海上橋下部工などを想定している。

海洋の防食設計には建設省土木研究所と鋼管杭協会が作成した「海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）（飛沫帯・干満帯）」[7]が参考となる。

関西国際空港連絡橋や東京湾横断道路橋脚では耐用年数が100年に設定され、それに見合った防食法が採用された。例えば、関西国際空港の飛沫・干満帯における防食法は長期無補修防食の考え方の一例である。これを図3.2-6 に示す。

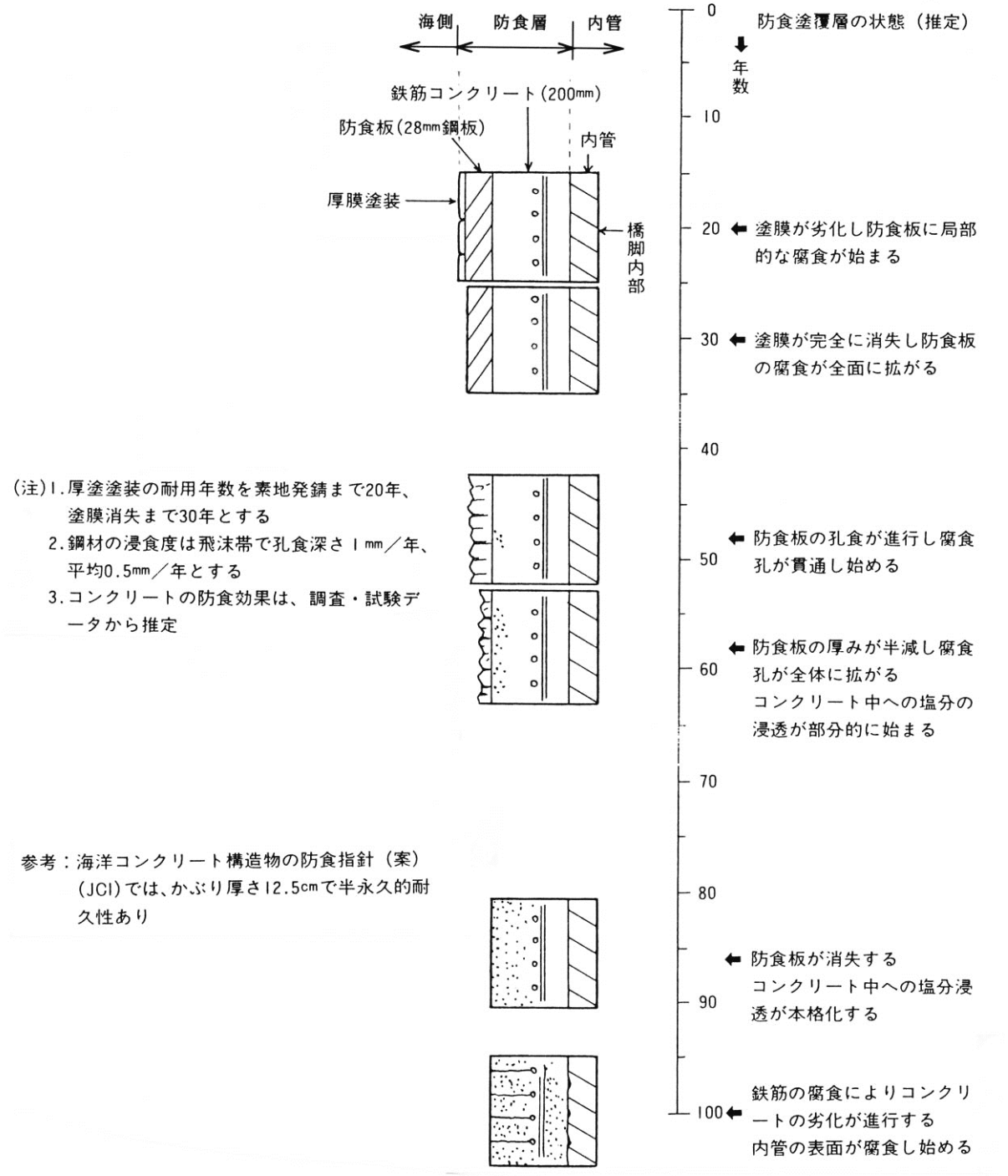


図3.2-6　長期無補修防食の考え方[8]

３．２．５　防食設計手順と設計例

（１）防食設計のポイントと選定

港湾や漁港・河川等の鋼構造物に現在までに使用されている防食システムの概要と選定理由を表3.2-3，図3.2-7 に示す。（A）は一般的な防食工法、（B）は大規模施設や外洋・高潮流海域に対し防食性、経済性に優れた工法であり、（C）は水深が浅い施設、（D）および（E）は河川施設や仮設構造物への適用に有利な工法である。

表3.2-3　既存防食システムの概要と選定理由[注]

	防食法と適用範囲	特　　長	防食工法の選定理由
A	重防食被覆：L.W.L.-1m以上 電気防食：M.L.W.L.以下	腐食環境の最も厳しい部位に重防食、M.L.W.L.以下の海中・海底土中に電気防食を適用した最も一般的な防食工法。	集中腐食の防止に有効な工法。河川水等の淡水の流入する場所では電気防食の効果を補填する機能がある。経済的な工法で実績も多い。
B	重防食被覆：海底面-1m以上 電気防食：海底面-1m以下	飛沫・干満帯及び海中・海底土中の一部に重防食被覆を施し、海底土中の裸鋼材に電気防食を適用した工法。	外洋や高潮流海域及び大規模防食対象施設の防食電流を低減することができる工法。
C	重防食被覆：海底面-1m以上 腐食しろ：海底面-1m以下で根入れ先端まで	腐食環境の厳しい飛沫・干満帯及び海中と海底土中の一部に重防食を施し、腐食が比較的軽微な海底土中の裸鋼材に腐食しろを付加した工法。	水深が比較的に浅く、電気防食用の陽極が取付けられないような場所に適用されている。この工法は漁港に比較的多く適用されている。
D	重防食被覆：L.W.L.以上 腐食しろ：L.W.L.以下、根入れ先端まで	腐食の激しい飛沫・干満帯（L.W.L.-1m）以上に対し重防食被覆を施し、L.W.L.-1m以下の裸鋼材には腐食しろを付加した工法。	干満の差がなく、集中腐食の発生する恐れがない場所では適用されている例がある。
E	腐食しろ：上部コンクリート下端より根入れ先端まで	構造物に使用する鋼材に対し、あらかじめ腐食しろを付加した工法。	集中腐食の発生する恐れがない場所では現在も採用されている例もある。一般的には河川鋼構造物に適用されている。

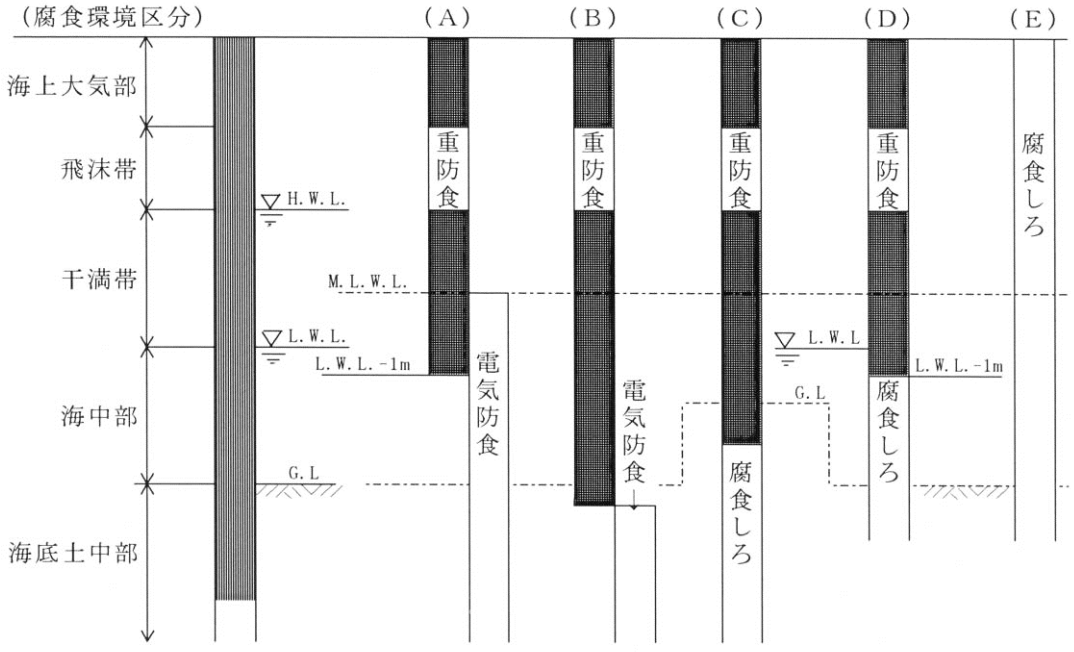


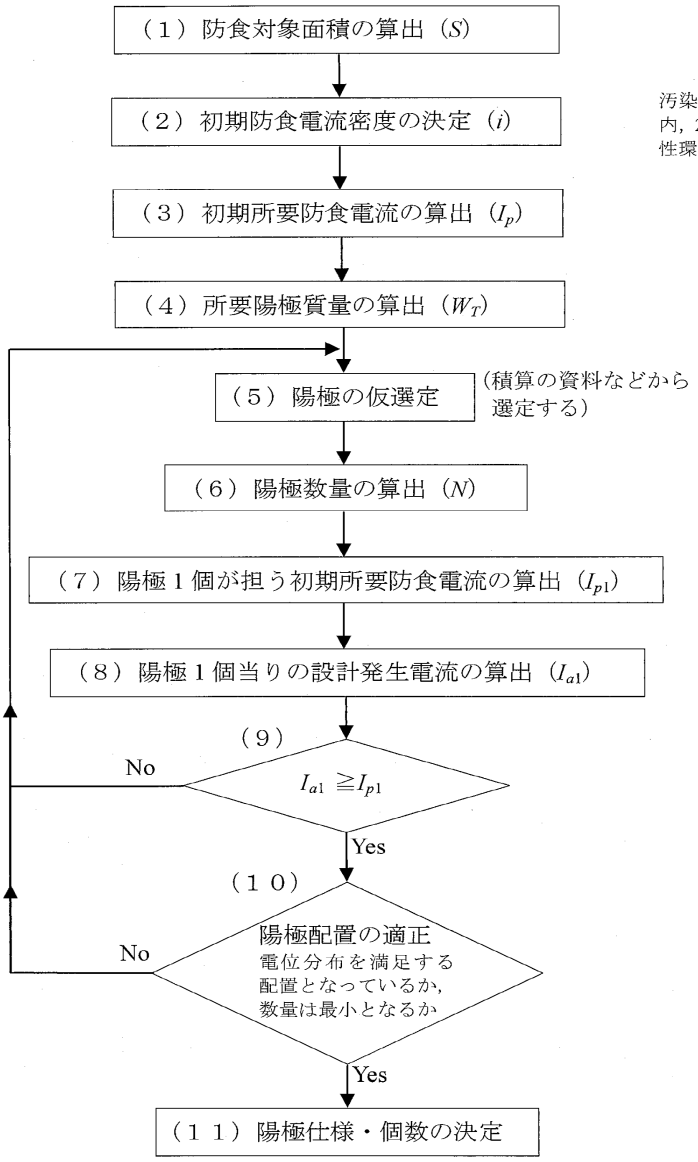
図3.2-7 腐食環境区分と防食法[注]

注：本ページは「防食ﾊﾝﾄﾞﾌﾞｯｸ」初版による。

（２）電気防食の設計手順

電気防食の設計手順を「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（(社)日本港湾協会）、「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」（（財）沿岸技術研究センター）、に準拠して設計する。ここでは近年主流となっている流電陽極方式の設計フローを示す。

また、道路橋等については「海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説」（建設省、（財）土木研究センター）等の基準も参照されたい。



汚染判定基準項目の塩化物ｲｵﾝ，溶存酸素，ｱﾝﾓﾆｳﾑｲｵﾝの内，２項目以上が該当すれば，汚染海水と判定する．嫌気性環境の場合は別途考慮する．

$I_p = S \times i$

$W_T = I_p \times T \times r_1 \times 8760/Q$

T ：陽極の設計年数（y）
Q ：有効電気量（A･h/kg）
r_1：電流低減率
8760（h/y）＝24（h/d）×365（d/y）

$N = W_T/W$

W：陽極１個の正味質量

$I_{p1} = I_p/N$

$I_{a1} = \triangle E/R$

$\triangle E = 0.25$（V）

R： 陽極の接水抵抗（Ω）

図3.2-8　流電陽極方式の設計フロー[2)]

（３）防食設計例および事例

設計例１：－7.5m鋼矢板岸壁

防食方式：重防食被覆(L.W.L.－1.0m)＋電気防食　環境：汚染海域

①防食対象
鋼矢板　：SP-Ⅲ型、l＝15.5m
岸壁延長　：150m
平均干潮面　：M.L.W.L.＋0.6m
水深　：－7.5m

②設計条件
被覆の種類　：ポリエチレンまたはポリウレタン被覆
被覆の範囲　：上部コンクリート下端(＋1.0m)から－1.0mまで
注：鋼矢板継手嵌合部は未防食であるため被覆の面積の10%を防食対象面積とする。
海域の環境　：汚染海域（塩化物イオン濃度(17800ppm以下)、溶存酸素濃度(6ppm以下)、アンモニウムイオン濃度（0.1ppm以上）の3項目の内、2項目以上が該当）
電気防食適用範囲　：＋0.6m以下
防食電流密度　：海水中0.13A/㎡、海底土中0.026A/㎡
電気防食方式　：流電陽極方式（設計耐用寿命20年）
海水抵抗率　：$35\times10^{-2}\Omega$－ m

③防食面積
海水中(被覆部)　：(0.6m＋1.0m)×150m×1.65×0.1 ＝　39.6㎡
海水中(裸部)　：(7.5m－1.0m)×150m×1.65　＝1,608.8㎡
海底土中　：(13.5m－7.5m)×150m×1.65　＝1,485.0㎡

④所要防食電流
海水中(裸部)　：(39.6㎡＋1,608.8㎡)×0.13A/㎡ ≒214.3A
海底土中　：1,485.0㎡×0.026A/㎡　≒ 38.6A
合 計　252.9A

⑤所要陽極質量
所要陽極質量＝(252.9A×20年×0.5×8760h/y)÷2600A･h/kg＝8520.8kg

⑥使用陽極仮選定
種　類　：アルミニウム合金陽極
正味質量　：101.1kg/個(理論計算質量)
初期発生電流　：3.0A /個(140＋180)×160×1510mm
耐用年数　：20年

⑦陽極使用数量
陽極使用数量＝8520.8kg÷101.1kg/個≒84.3個→85個

⑧陽極1個が担う初期所要防食電流
陽極1個が担う初期所要防食電流＝252.9A÷85個＝2.98A

⑨陽極1個当りの設計発生電流
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個

⑩陽極1個当りの設計発生電流が担う初期所要防食電流より大きな値であることの確認
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個≧陽極1個が担う初期所要防食電流＝2.98A

⑪適正配置の確認
重防食被覆下端（－1.0m）から海底面(－7.5m)までの6.5mに水深方向2段に配置
鋼矢板の周辺計数1.65：陽極取付け間隔4m以内に配置
鋼矢板のピッチが0.8m（鋼矢板2枚）であるため陽極の取付け間隔は最大で4mであり適性

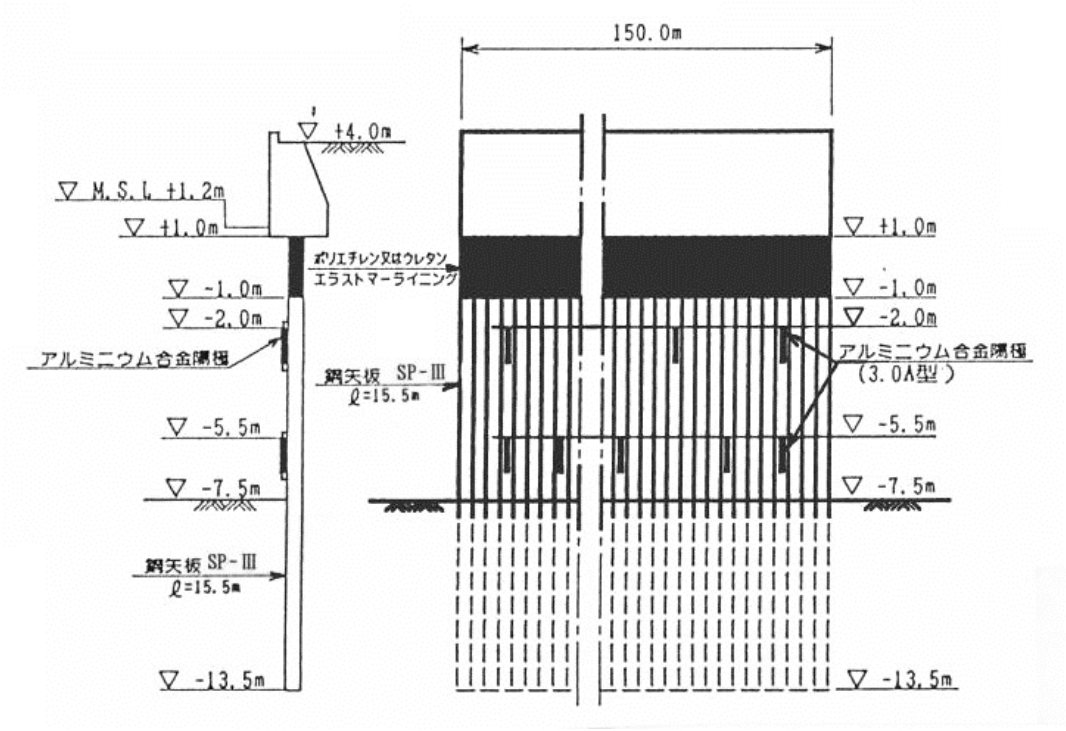


図3.2-9　－7.5m鋼矢板岸壁

設計例２：－10m鋼矢板岸壁

防食方式：重防食被覆(L.W.L.－2.0m)＋電気防食　環境：清浄海域

①防食対象

鋼矢板	：	SP-Ⅵ L型、l＝22.0m
岸壁延長	：	180m
平均干潮面	：	M.L.W.L.＋0.7m
水深	：	－10.0m

②設計条件

被覆の種類	：	ポリエチレンまたはポリウレタン被覆
被覆の範囲	：	上部コンクリート下端(＋0.5m)から－2.0mまで 注：鋼矢板継手嵌合部は未防食であるため被覆の面積の10%を防食対象面積とする。
海域の環境	：	清浄海域
電気防食適用範囲	：	＋0.5m以下
防食電流密度	：	海水中0.1A/㎡、海底土中0.02A/㎡
電気防食方式	：	流電陽極方式（設計耐用寿命20年）
海水抵抗率	：	$30\times10^{-2}\Omega$-m

③防食面積

海水中(被覆部)	：	(0.5m＋2.0m)×180m×1.75×0.1＝　78.8㎡
海水中(裸部)	：	(10m－2.0m)×180m×1.75　＝2,520.0㎡
海底土中	：	(20.5m－10m)×180m×1.75　＝3,307.5㎡

④所要防食電流
海水中(裸部)　：（78.8㎡＋2,520.0㎡）×0.1A/㎡ ≒259.9A
海底土中　：3,307.5㎡×0.02A/㎡ ≒ 66.2A
合 計　326.1A

⑤所要陽極質量
所要陽極質量＝326.1A×20年×0.5×8760h/y)÷2600A･h/kg＝10987.1kg

⑥使用陽極仮選定
種　類　：アルミニウム合金陽極
正味質量　：101.1kg/個(理論計算質量)
初期発生電流　：3.0A /個
耐用年数　：20年

⑦陽極使用数量
陽極使用数量＝10987.1kg÷101.1kg/個≒108.7個→109個

⑧陽極1個が担う初期所要防食電流
陽極1個が担う初期所要防食電流＝326.1A÷109個＝2.992A

⑨陽極1個当りの設計発生電流
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個

⑩陽極1個当りの設計発生電流が担う初期所要防食電流より大きな値であることの確認
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個≧陽極1個が担う初期所要防食電流＝2.992A

⑪適正配置の確認
重防食被覆下端（－2.0m）から海底面(－10m)までの8mに水深方向3段に配置
鋼矢板の周辺計数1.75：陽極取付け間隔4m以内に配置
鋼矢板のピッチが1.0m（鋼矢板2枚）であるため陽極の取付け間隔は最大で4mであり適性

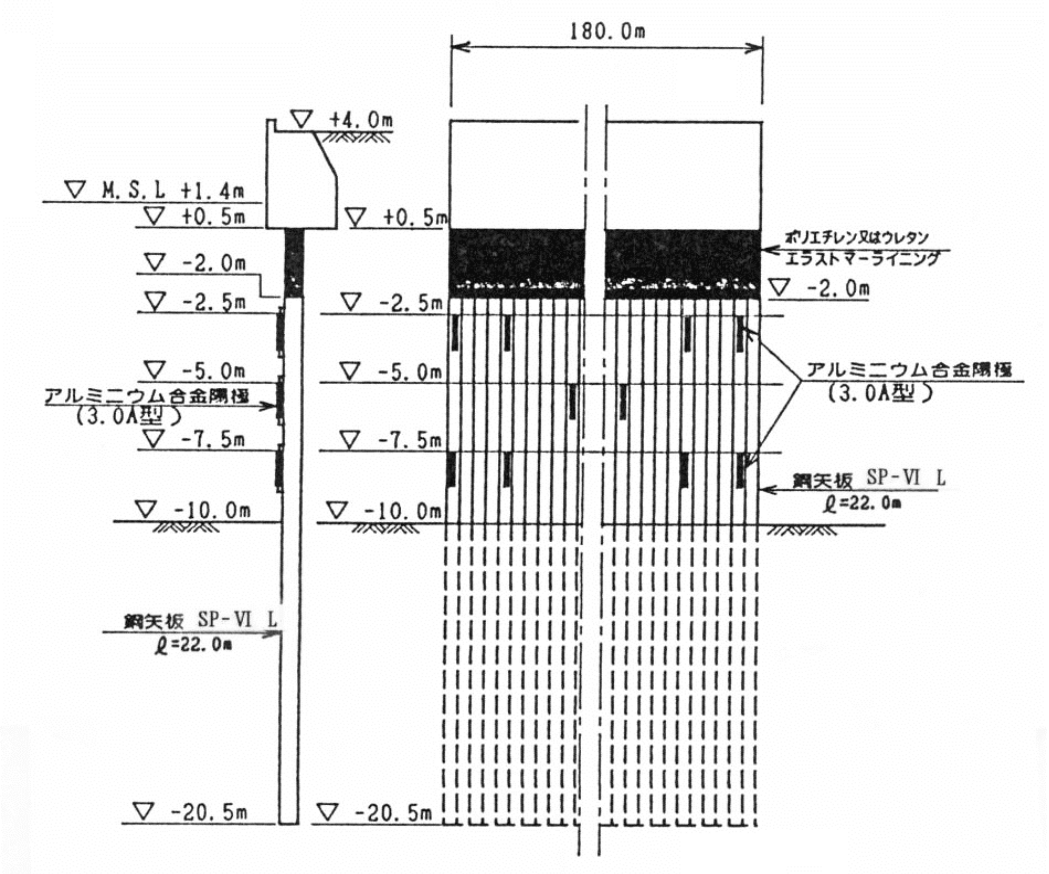


図3.2-10　－10m鋼矢板岸壁

設計例３：－12m鋼管矢板岸壁

防食方式：重防食被覆(L.W.L.－2.0m)＋電気防食　環境：汚染海域

①防食対象
鋼管矢板　：800φ×12t、l＝30m
岸壁延長　：180m
平均干潮面　：M.L.W.L.＋0.6m
水深　：－12.0m

②設計条件
被覆の種類　：ウレタンエラストマー被覆
被覆の範囲　：上部ｺﾝｸﾘｰﾄ下端(＋0.5m)から－2.0mまで
注：鋼管矢板継手嵌合部は未防食であるため塗覆装の面積の10%を防食対象面積とする。
海域の環境　：汚染海域（塩化物イオン濃度(17800ppm以下)、溶存酸素濃度(6ppm以下)、アンモニウムイオン濃度（0.1ppm以上）の3項目の内、2項目以上が該当）
電気防食適用範囲：＋0.5m以下
防食電流密度　：海水中0.13A/㎡、海底土中0.026A/㎡
電気防食方式　：流電陽極方式（設計耐用寿命20年）
海水抵抗率　：$35\times10^{-2}\Omega$－m

③防食面積
海水中(塗覆装部)：(0.5m＋2.0m)×180m×1.57×0.1＝70.7㎡
海水中(裸部)　：(12.0m－2.0m)×180m×1.57　＝2,826.0㎡
海底土中　：(31.3m－12.0m)×180m×1.57　＝5,454.2㎡

④防食電流
海水中(裸部)　：(73.5㎡＋2,826.0㎡)×0.13A/㎡≒　376.6A
海底土中　：5,454.2㎡×0.026A/㎡　≒ 141.8A
合 計　518.4A

⑤所要陽極質量
所要陽極質量＝(518.4A×20年×0.5×8760h/y)÷2600A･h/kg≒17466.1kg

⑥使用陽極仮選定
種　類　：アルミニウム合金陽極
正味質量　：101.1kg
初期発生電流　：3.0A
耐用年数　：20年

⑦陽極使用数量
陽極使用数量＝17466.1kg ÷101.1kg/個≒172.8個→173個

⑧陽極1個が担う初期所要防食電流
陽極1個が担う初期所要防食電流＝518.4A÷173個＝2.997A

⑨陽極1個当りの設計発生電流
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個

⑩陽極1個当りの設計発生電流が担う初期所要防食電流より大きな値であることの確認
陽極1個当りの設計発生電流＝3.0A／個≧陽極1個が担う初期所要防食電流＝2.997A

⑪適正配置の確認
重防食被覆下端（－2.0m）から海底面(－12m)までの8mに水深方向3段に配置
鋼管矢板の周辺計数1.57：陽極取付け間隔4m以内に配置
鋼管矢板のピッチが1.05m（鋼管矢板0.8m+0.25m）であるため陽極の取付け間隔は最大で3.15m以下になる。
適正配置に必要な数量は180m÷3.15m×3段＝171.4個であり適正な配置は可能である

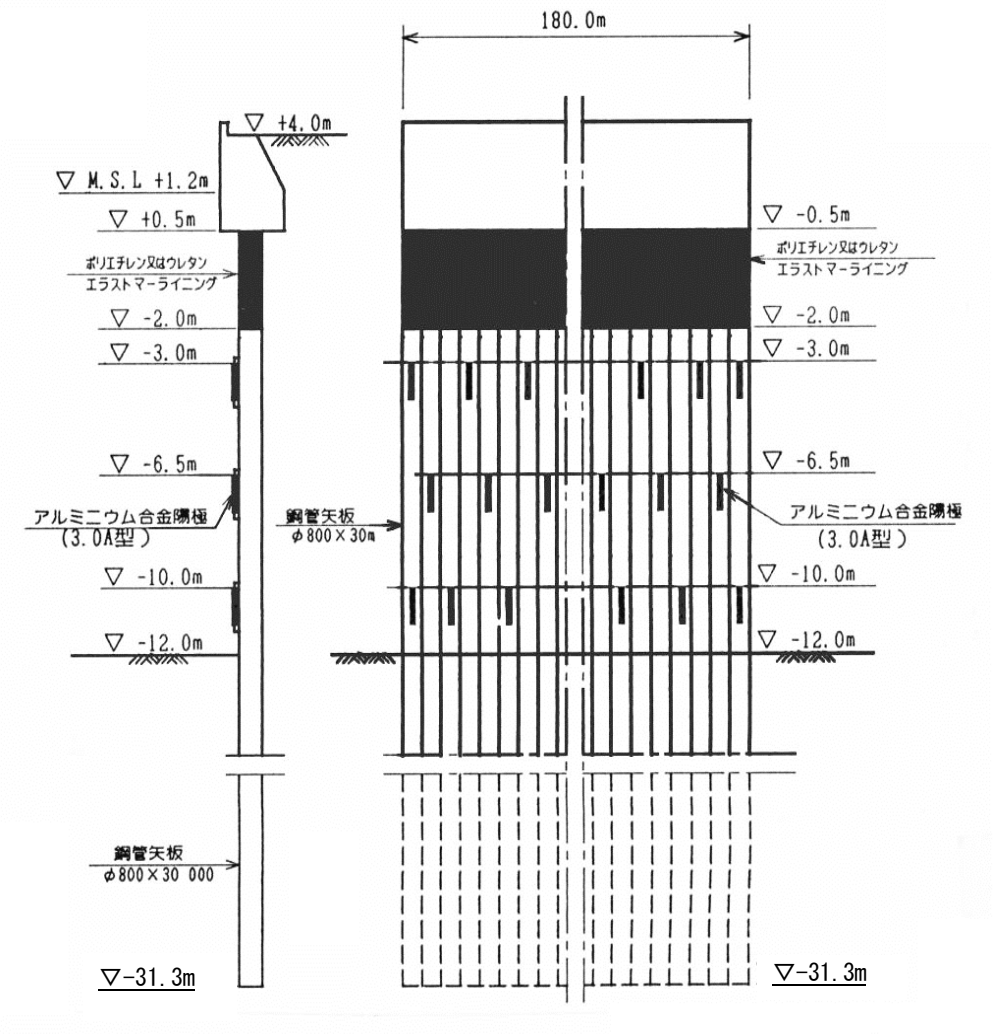


図 3.2-11　－12m鋼矢板岸壁

設計例４：－12m鋼管杭桟橋

防食方式：重防食被覆(L.W.L.－1.0m)＋電気防食　環境：清浄海域

①防食対象
　鋼矢板　　：900φ×16t、l＝30m
　岸壁延長　　：200m
　平均干潮面　　：M.L.W.L.＋0.5m
　水深　　：－12.0m

②設計条件
　被覆の種類　　：ウレタンエラストマー被覆
　被覆の範囲　　：上部コンクリート下端(＋2.0m)から－1.0mまで
　海域の環境　　：清浄海域
　電気防食適用範囲：+0.5m以下
　電流防食密度　　：海水中0.1A/㎡、石積中：0.05A/㎡、海底土中0.02A/㎡
　電気防食方式　　：流電陽極方式（設計耐用年数20年）
　海水抵抗率　　：$30\times10^{-2}\Omega$-m

③防食面積（ブロック当り）
　海水中（裸部）　：565.6㎡／ブロック×10ブロック＝ 5,656.0㎡
　石積中　　：353.4㎡／ブロック×10ブロック＝ 3,534.0㎡
　海底土中　　：919.0㎡／ブロック×10ブロック＝ 9,190.0㎡
　　合 計（10ブロック）18,380.0㎡

④所要防食電流（ブロック当り）
　１ブロック当たりの所要防食電流
　海水中（裸部）　：565.6㎡×0.10A/㎡　≒ 56.6A
　石積中　　：353.4㎡×0.05A/㎡　≒ 17.7A
　海底土中　　：919.0㎡×0.02A/㎡　≒ 18.4A
　　計　92.7A
　合計（10ブロック）＝927.0A

⑤所要陽極質量
　所要陽極質量＝92.7A×20年×0.5×8760h/y÷2600A･h/kg≒3123.3kg

⑥使用陽極仮選定
　種　　類　　：アルミニウム合金陽極
　正味質量　　：117.9kg/個（理論計算質量）
　初期発生電流　　：3.5A/個
　耐用年数　　：20年

⑦陽極使用数量
　陽極使用数量＝3123.3kg/ブロック÷117.9kg/個≒26.5個→27個/ブロック

⑧陽極1個が担う初期所要防食電流
　陽極1個が担う初期所要防食電流＝92.7A÷27個＝3.43A

⑨陽極1個当りの設計発生電流
　陽極1個当りの設計発生電流＝3.5A/個

⑩陽極1個当りの設計発生電流が担う初期所要防食電流より大きな値であることの確認
　陽極1個当りの設計発生電流＝3.5A/個≧陽極1個が担う初期所要防食電流3.43A/個

⑪適正配置の確認（ブロック当り）
　ブロック内の鋼管杭は電気的に接続されているので、必要個数を分散配置とする。

⑫陽極の仕様および配置個数
　＊陽極の仕様
　　種　　類　　：アルミニウム合金陽極
　　正味質量　　：117.9kg/個（理論計算質量）
　　初期発生電流　：3.5A/個
　　耐用年数　　：20年
　＊陽極配置個数
　　１ブロック当たりの陽極配置個数：27個/ブロック
　　陽極の配置
　　第１列　　５個（－2.5m：3個、－6m：2個）
　　第２列　　６個（－2.5m：3個、－5m：1個、－8m：1個、－9.5m：1個）
　　第３列　　５個（－2.5m：3個、－6m：2個）
　　第４列　　６個（－2.5m：3個、－6m：1個、－8m：1個、－9.5m：1個）
　　第５列　　５個（－2.5m：3個、－6m：2個）
　　合計　　27個/ブロック
　　陽極総取付け個数：27個／ブロック　10ブロック＝270個

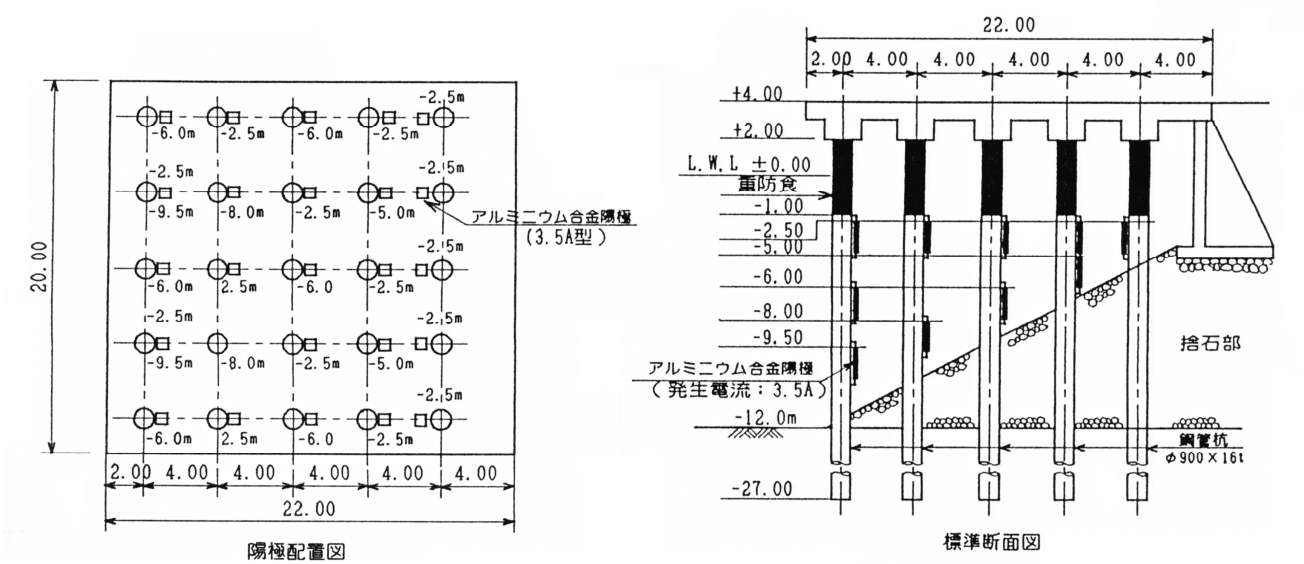


図3.2-12　－12m鋼管杭桟橋

設計例５：－15m鋼管杭桟橋

防食方式：重防食被覆(海底面より-1.0m)＋電気防食　環境：清浄海域

①防食対象
　鋼管矢板　　：　700φ×16t、ℓ＝36.5m
　片壁延長　　：　200m
　平均干潮面　：　M.L.W.L.＋0.4m
　水深　　：　－15.0m

②設計条件
　被覆の種類　　：　ポリエチレン被覆
　被覆の範囲　　：　上部コンクリート下端(＋2.0m)から海底面下－1.0mまで
　海域の環境　　：　清浄海域
　電気防食適用範囲　：　重防食（ポリエチレン被覆）下端から根入り先端まで(34.0m)
　防食電流密度　　：　海底土中；0.02A/㎡
　電気防食方式　　：　流電陽極方式（設計耐用寿命20年）
　海水抵抗率　　：　$30\times10^{-2}\Omega$-m

③防食面積（ブロック当り）
　海底土中　　：　2,421.5㎡／ブロック×8ブロック＝ 19,372.0㎡

④所要防食電流（ブロック当り）
　海底土中　　：　2,421.5㎡×0.02A/㎡≒ 48.4A
　　合計　48.4A／ブロック×8ブロック＝387.2A

⑤所要陽極質量
　　所要陽極質量＝48.4A×20年×0.5×8760h／y÷2600A・h／kg≒1630.7kg

⑥使用陽極仮選定
　　種　　類　　：　アルミニウム合金陽極
　　正味質量　　：　117.9kg／個（理論計算質量）
　　初期発生電流　：　3.5A／個
　　耐用年数　　：　20年

⑦陽極使用数量
陽極使用数量＝1630.7kg／ブロック÷117.9kg／個≒13.8個→14個／ブロック

⑧陽極1個が担う初期所要電流
陽極1個が担う初期所要電流＝48.4A÷14個＝3.46A

⑨陽極1個当り設計発生電流
陽極1個当り設計発生電流＝3.5A／個

⑩陽極1個当り設計発生電流が担う初期所要電流より大きな値であることの確認
陽極1個当り設計発生電流＝3.5A／個≧陽極1個が担う初期所要電流3.46A／個

⑪適正配置の確認（ブロック当り）
ブロック内の鋼管杭は電気的に接続されているので、必要個数を分散配置とする。

⑫陽極の仕様および配置個数
＊陽極の仕様
種　　類　　：アルミニウム合金陽極
正味質量　　：117.9kg／個（理論計算質量）(140＋200)×180×1440㎜
初期発生電流：3.5A／個
耐用年数　　：20年
＊陽極配置個数
1ブロック当りの陽極配置個数：14個／ブロック
陽極の配置
－8.0m：10個
－10m　：4個
合計14個／ブロック
陽極総取付個数：14個／ブロック　8ブロック＝112個

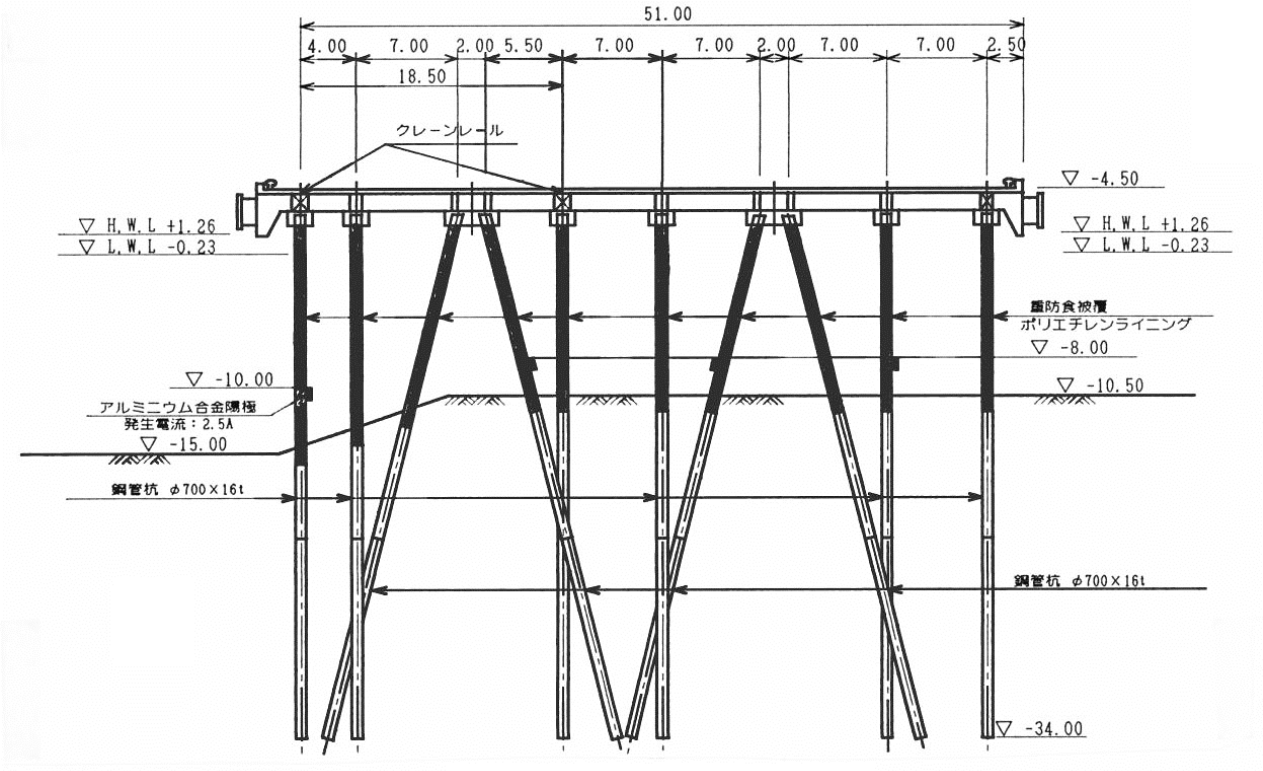


図3.2-13　－15m鋼管杭桟橋

事例１：-6m鋼矢板護岸

防食方式：重防食被覆(海底面より-0.5mまで)　環境：清浄海域

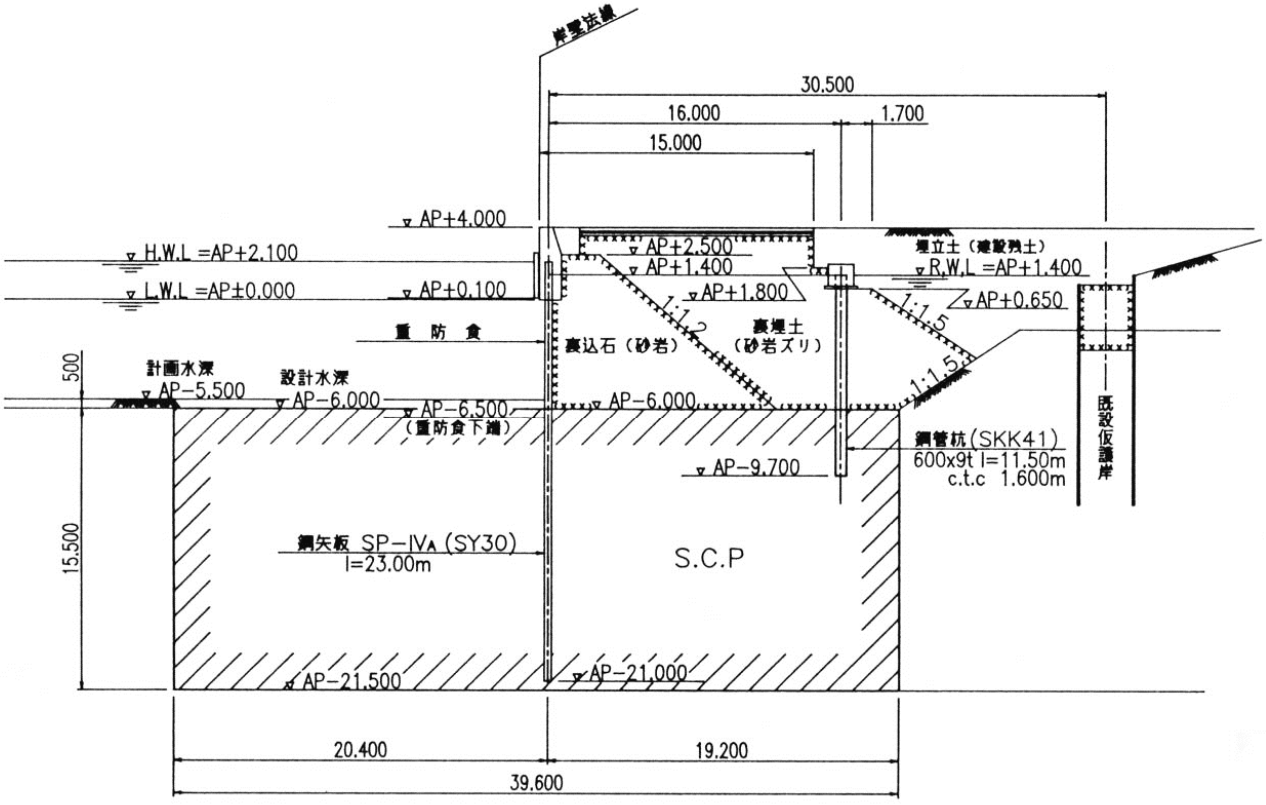


図3.2-14　-6m鋼矢板護岸

事例２ ：-3.5m鋼矢板物揚場（災害復旧工事）

防食方式：重防食被覆(L.W.L.-1.0m)+電気防食　　環境：清浄海域

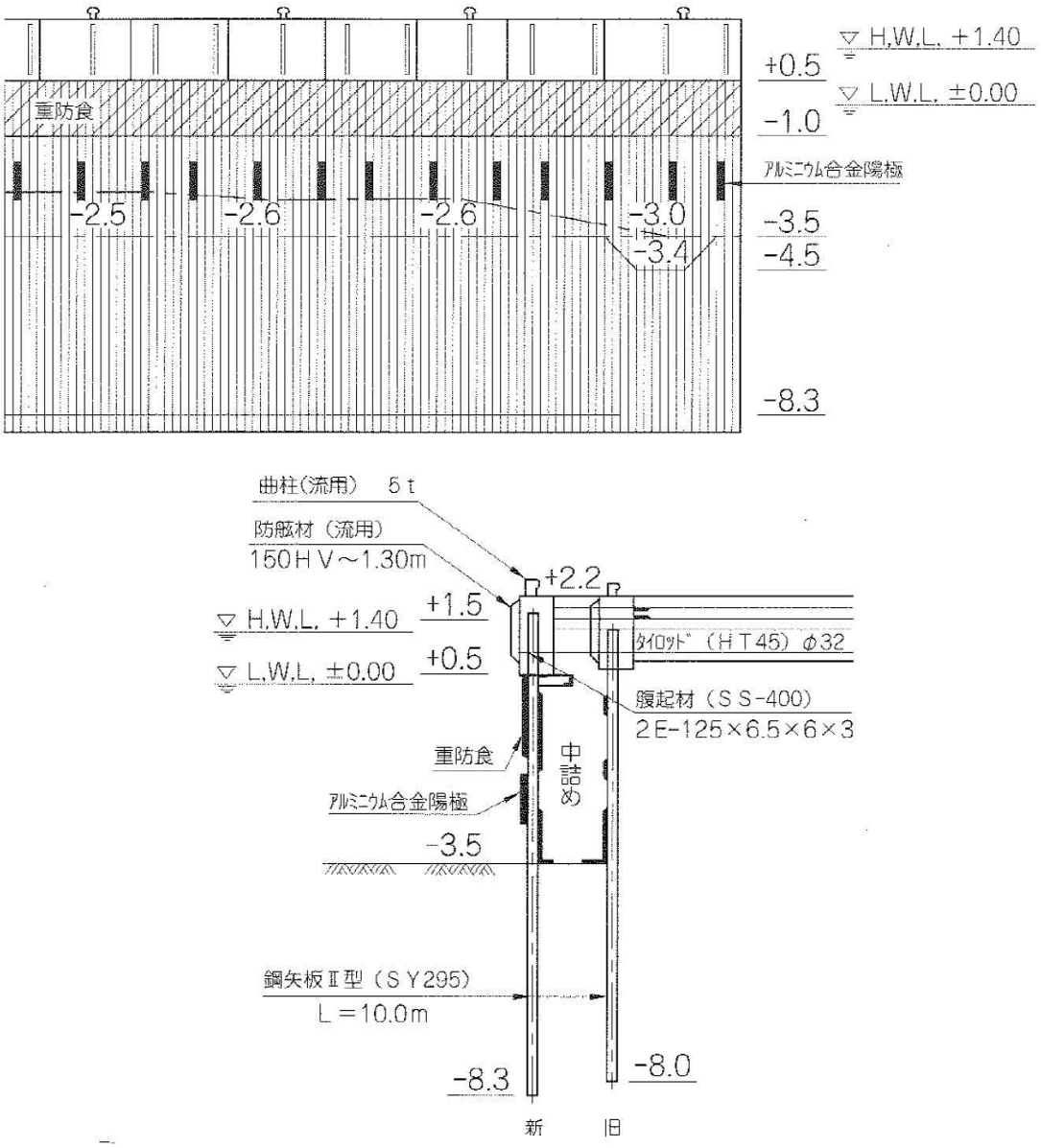


図3.2-15　-3.5m鋼矢板物揚場（災害復旧工事）

事例３：海中橋脚基礎の鋼管杭（フーチング下端（海底面）以下）

防食方式：電気防食

このタイプの土木構造物は、腐食性の激しい海域に設置されるため、その腐食防止策として、鋼構造物の海水中、海底土中部に対して極めて有効で、かつ信頼性の高い電気防食法が近年の橋梁の基礎等に多く採用されるようになってきた。

本例の橋脚基礎は、一般の橋脚と異なり、フーチング下端が海底付近に位置するため電気防食を適用し、海底面付近の鋼管杭の防食性を高めたものである。

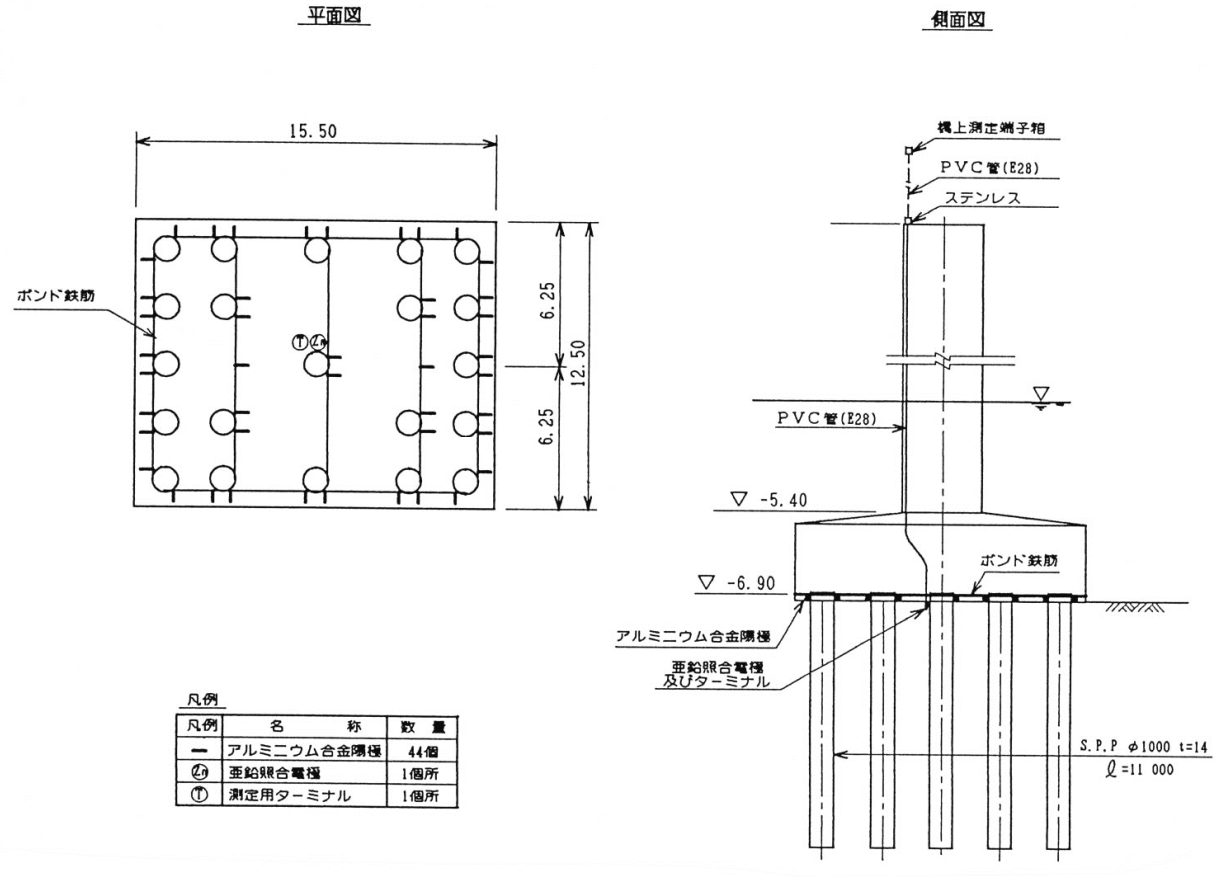


図3.2-16　海中橋脚基礎の鋼管杭

３．３　河川環境

３．３．１　防食設計の考え方

河川における鋼構造物としては護岸や水門などがある。

河川鋼構造物の設置環境は、①河川一般部 ②河川感潮部 ③酸性河川等 の特殊な腐食環境部等、多種多様であり、構造物の接する環境も、大気部、水中部、土中部と分かれ、それぞれ腐食特性は異なる。

鋼構造物の防食設計としては、腐食しろによる方法が一般的に採用されている。

一般の河川での護岸鋼矢板は、腐食速度は小さく、また局部腐食による問題も少ないため、護岸用鋼矢板の防食設計では平均腐食量で考えればよい。

河川感潮部などの腐食の激しい設置環境については、水中部、大気部に長期耐久性に優れた重防食製品を適用するとよい。水中部、土中部については、電気防食を適用するのが有効である。

電気防食を適用する場合、その基本的な設計手順は海洋環境の構造物と同様であるが、河川水等の環境要因が大きく影響するため、事前に調査を実施して河川水の抵抗率やpHなどを把握した上で、電流密度等を決定するとともに、陽極の接水抵抗や電流の到達距離などを十分に検討する必要がある。河川水は海水に比べて電気伝導率が非常に小さいため、流電陽極方式に用いる陽極材料は、亜鉛、アルミ合金陽極よりも閉路電位が低いマグネシウム合金陽極を用いるのが一般的である。

また、近年，生物環境の保持や改善などで石積みなどによる水質対応、景観性などへの配慮が求められており、これに対応する上述の防食に配慮した護岸・岸壁構造が試みられている。

３．３．２　河川鋼構造物の設計

河川や湖沼の防食設計に関連する基準としては、次のものがあり、腐食しろによる設計が一般的である。腐食環境が厳しい場合は、重防食・電気防食などの防食法の適用が望ましい。河川の防食設計法の考え方を図3.3-1 に示す。

①「災害復旧工事の設計要領」、（(社)全国防災協会、2010）

②「土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書　技術書」、

（農林水産省農村振興局、2001）

（１）河川一般部

河川一般部の護岸に用いられる鋼矢板、鋼管矢板等の防食設計では、２㎜（表裏合せて）の腐食しろを考慮する事を基本としている。（図3.3-1(a)）

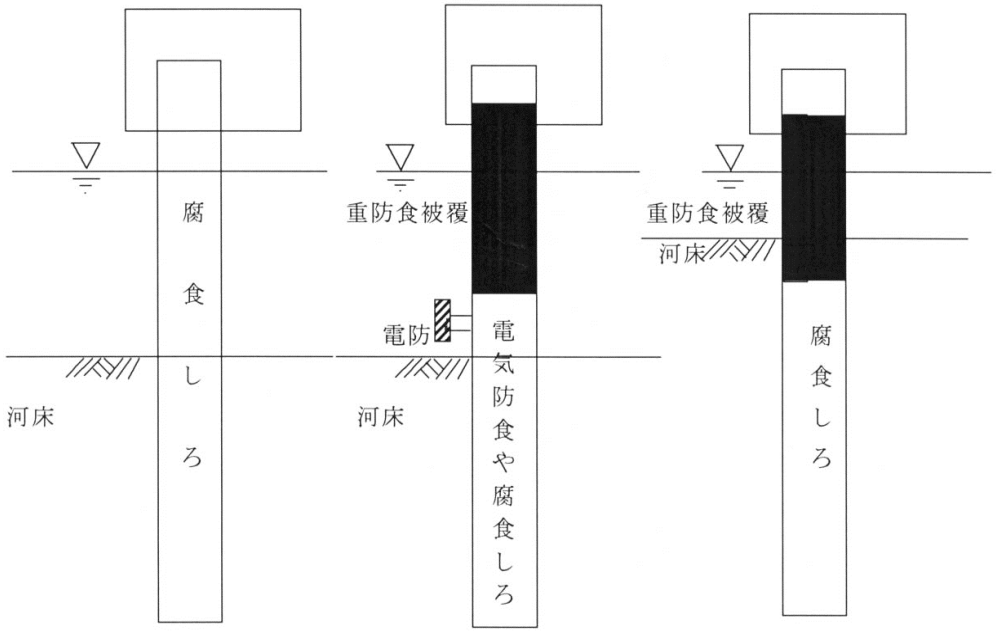
（２）河川感潮部

河川感潮部のみに関する設計基準は設定されていないが、その腐食環境特性から、感潮部の鋼構造物の防食設計は河川一般部とは異なる設計思想が必要である。その考え方を図3.3-1 の(b)、(c)に示す。

この環境では港湾や漁港構造物等の海洋環境下と同様な防食設計が推奨される。また、淡水と海水が混じり合った混合水は、一般の海水より希釈された塩分濃度となるが、塩分濃度の変化によって鋼の腐食速度が海水よりも大きくなる領域になることがあり、注意が必要である。

（３）特殊な腐食環境部

特殊な腐食環境部については、別途詳細な環境調査をした後、その結果に適した防食設計を行わなければならない。基本的には重防食製品と電気防食を用いての設計となる。



(a) 河川一般部　　(b) 水深が深い河川感潮部　　(c) 水深が浅い河川感潮部

図3.3-1　河川の設置環境別防食設計の考え方

３．３．３　防食事例

（１）腐食しろのみでの事例

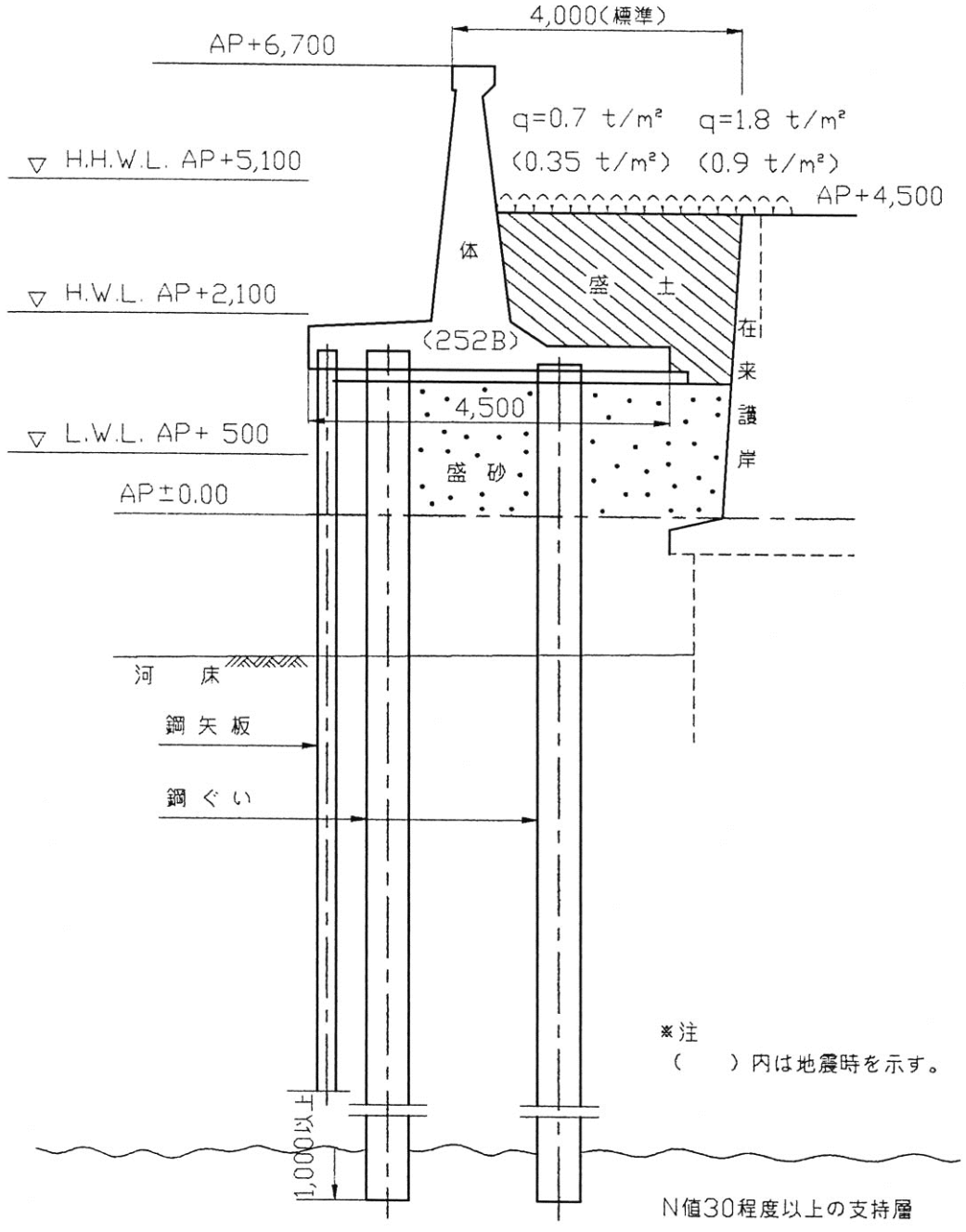
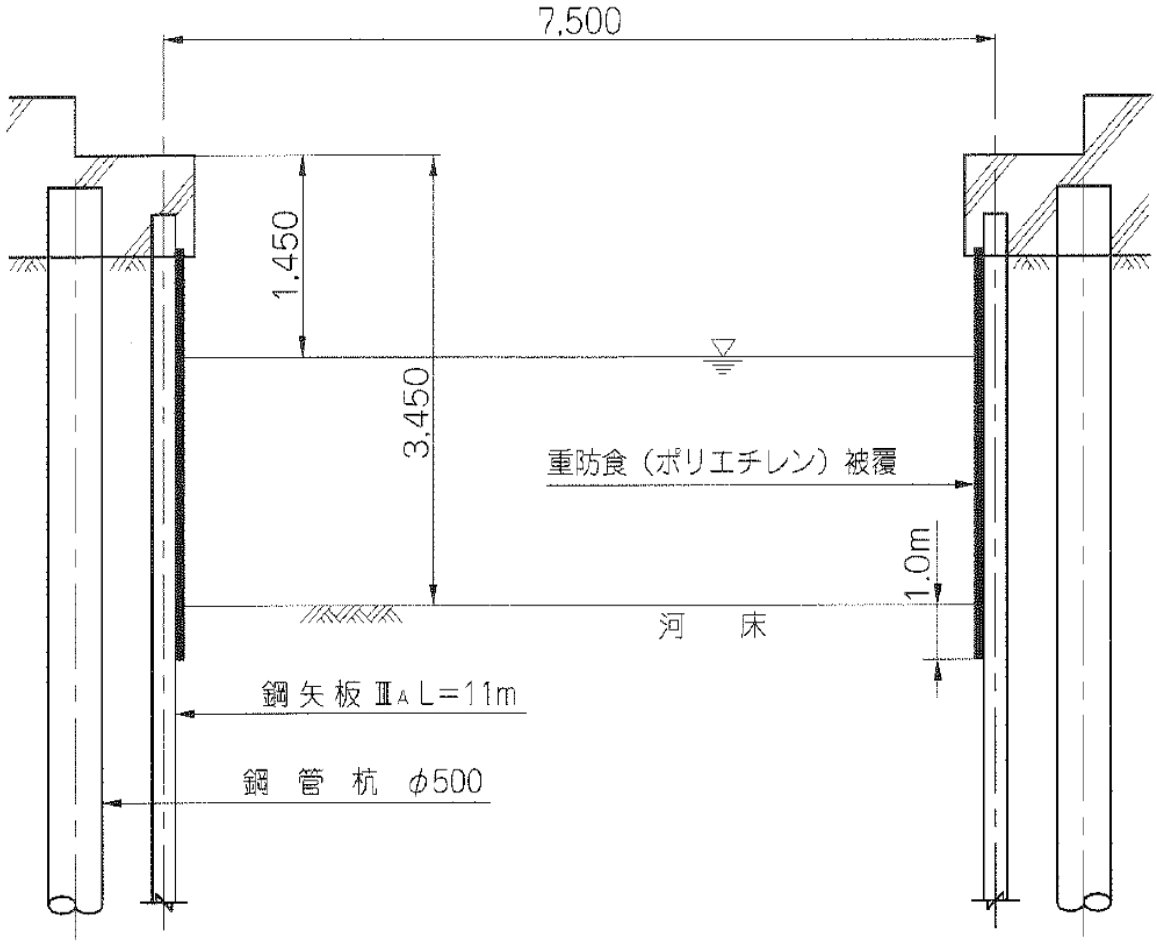


図3.3-2　腐食しろのみでの事例

（２）重防食製品を適用した事例

都市の小河川に適用された例で、汚染排水が流入する場合に重防食（黒塗り部）が適用された例である。

図



3.3-3　重防食製品を適用した事例

（3）腐食しろ＋重防食を適用した事例

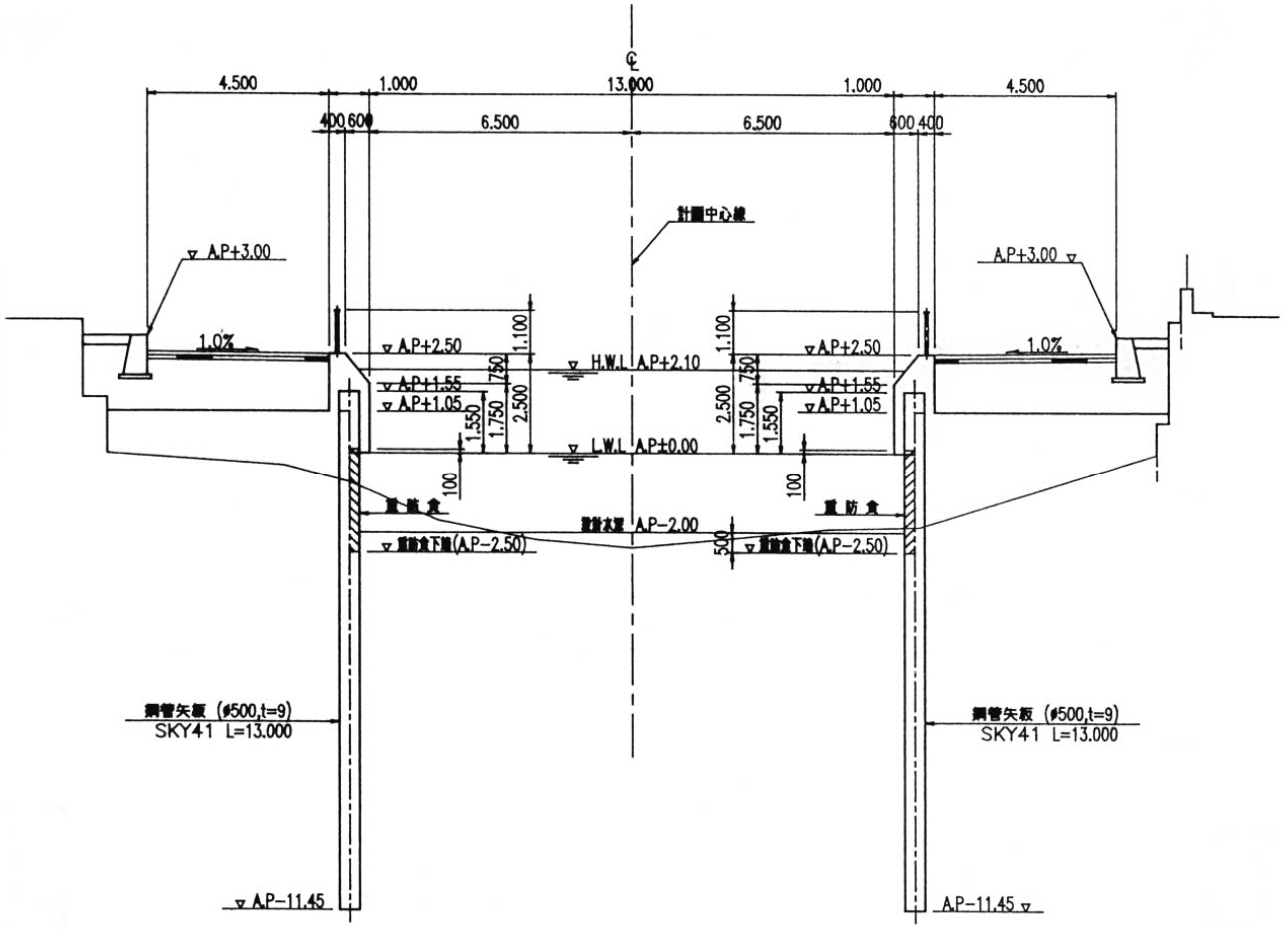


図3.3-4　腐食しろ＋重防食を適用した事例

３．４　土壌（陸上）環境

３．４．１　防食設計の考え方

土壌中では海水中、大気中に比べ鋼材の腐食速度はかなり小さい。このため一般的には１～２㎜の腐食しろの対応で十分である。図-3.4.1に我が国での結果を示す。

図-3.4.1は、我が国の各地で実施された土壌への埋設環境での個々に異なる既存の７文献の結果をもとに、統計的検討を行い、鋼材の平均的な腐食性状を把握したものである。

例えば、計測結果において鋼矢板や山形断面形状の鋼材は両面腐食が考えられるので、報告されている平均腐食量の１／２を平均腐食減量とし、片面が河川水に接する鋼矢板は除くなど、土壌腐食に絞っている。

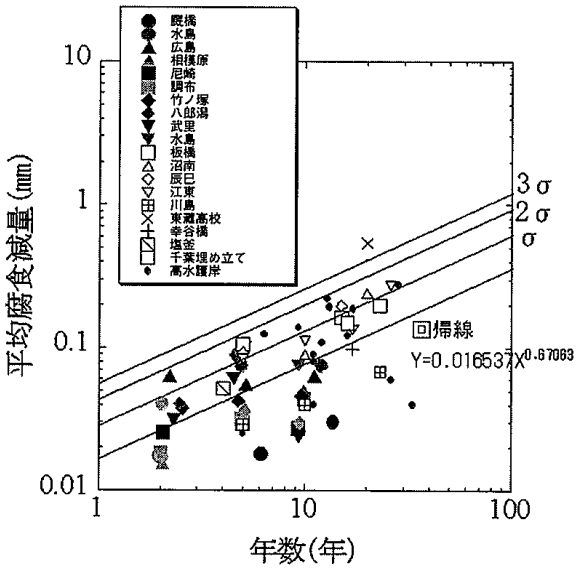


図3.4-1　平均腐食減量の経年変化[9)]

しかし、以下のような土壌中では重防食や電気防食などの防食対策が必要である。

①海水が浸透する海岸埋立地の場合

②産業廃棄物埋立地

③その他腐食性土壌

ａ．pHが低い酸性土壌（pH４以下）。

ｂ．硫酸塩還元バクテリア等の微生物の存在が明らかな土壌。

ｃ．火山・温泉地帯で亜硫酸ガスや硫化水素、さらには炭酸ガスを多く含む土壌。

３．４．２　鋼管杭基礎の設計

鋼管杭基礎の防食設計に関する基準、指針等として、次のものがある。

①「道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編」、（（社）日本道路協会、2002）
②「設計要領第二集」、（高速道路総合技術研究所、2006）
③「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物」、
（（財）鉄道総合技術研究所、2000）
④「土木工事一般仕様書・土木工事必携」、（日本下水道事業団、2008）
⑤「港湾の施設の技術上の基準・同解説」、（（社）日本港湾協会、2007）
⑥「漁港・漁場の施設の設計の手引き」、（（社）全国漁港漁場協会、2003）
⑦「港湾工事共通仕様書」、（（財）港湾建設技術サービスセンター、2009）
⑧「土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書　技術書」、
（農林水産省農村振興局、2001）
⑨「国交省告示1113号(平成13年)」
⑩「建築基礎構造設計指針」、（（社）日本建築学会、2001）
⑪「東京都建築構造設計指針」、（東京都、2001）

鋼管杭を土壌中に設置する場合、供用期間の腐食量に見合った鋼材の板厚を付加する腐食しろによる防食法が一般的である。

各種設計基準の腐食しろの規定を表3.1-2 に示した。腐食しろとしては、１～２㎜を採用している基準が多い。

腐食の激しい土壌に設置する鋼管杭の腐食対策としては、重防食製品や電気防食を適用するとよい。重防食製品は流電陽極の消耗を低減する目的で使用される場合もある。

硫酸塩還元バクテリア等による生物腐食の恐れがある地下水中の土壌に対しては、電気防食を適用するのが有効である。

３．４．３　防食事例

通常の土壌環境下では腐食しろによる設計例は一般的であるので、ここでは特殊な環境での事例を示す。

（１）酸性土壌中の基礎杭に重防食製品を適用した事例

道路橋脚基礎杭　(pH３～４、抵抗率10Ω-m)

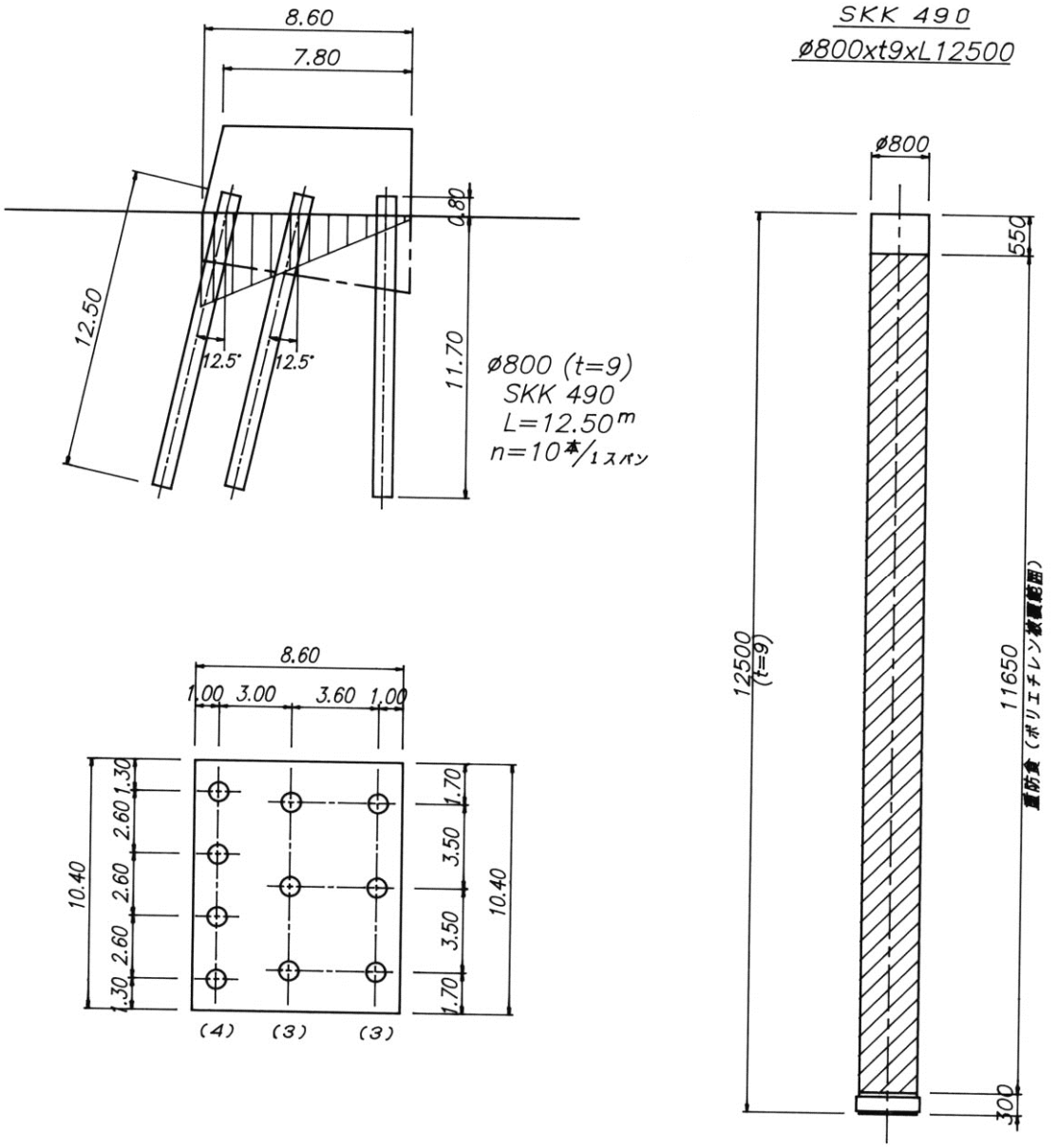


図3.4-2　酸性土壌中の基礎杭へ重防食製品の適用例

（２）人工地盤に重防食製品を適用した事例

雨水調整池上に設置された人工地盤の基礎杭で、降水時には水位が上昇するため防食対策が必要なので、重防食製品が使用された。

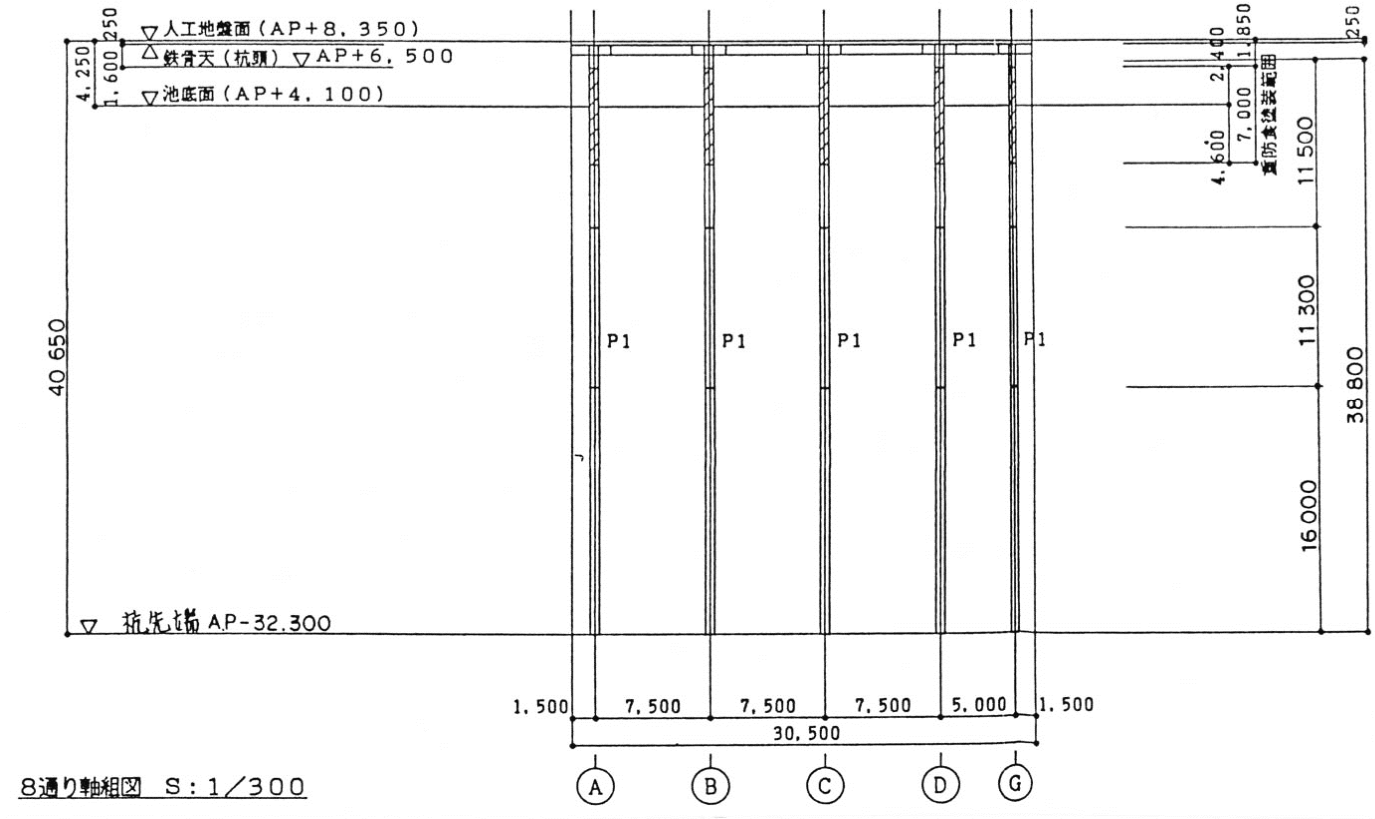


図3.4-3　人工地盤施工例

＜参考文献＞

１）鋼管杭協会：「[海洋環境下における]鋼製護岸・岸壁の防食システム」（1995）
２）(財)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)」(2009)
３）(社)日本港湾協会：「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（2007）
４）建設省土木研究所、(財)土木研究センター:「海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書－海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説－」（1991）
５）東京都港湾局:「東京港腐食対策手引書(改定版)」(1998)
６）(社)全国漁港協会：「漁港・漁場の設計の手引き」（2003）
７）建設省土木研究所、鋼管杭協会：「海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）（飛沫帯・干満帯編）」（1990）
８）関西国際空港㈱、(財)土木研究センター：「空港連絡橋の鋼構造物の防錆防食指針(案)」（1987)
９）守屋、村瀬、中野「鋼杭・鋼矢板の土中腐食性状の統計的検討」、土木技術資料47-3（2005）
１０）(社)日本道路協会：「道路橋示方書・同解説　Ⅳ下部構造編」（平成14年3月）
１１）(財)鉄道総合技術研究所：「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物（平成９年３月）
１２）農林水産省農村振興局：「土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書技術書」（2001）
１３）国交省：「告示1113号」(平成13年)
１４）(社)日本建築学会：「建築基礎構造設計指針」(2001)
１５）東京都：「建築構造設計指針」（2001）
１６）建設省：「事務連絡；護岸用鋼矢板の選定について」(昭和54年４月10日)
１７）(社)全国防災協会：「災害復旧工事の設計要領」(2010)

参考１　腐食代に関する規定

構造物の性能設計化、施設の保全－維持管理の充実等の時代的要請に対し、「防食ハンドブック H10年3月」記載の表（pp3-5,6）をそのまま抜粋。

表3.1-2(1)　腐食しろに関する規定

区別	基　準　名　称	腐　食　し　ろ	備考（防食法）
土木関係	道路橋示方書・同解説 Ⅳ下部構造編 （平成８年12月） ((社)日本道路協会)	海水や有害な工場排水などの影響を受けない場合で、環境の腐食性調査を行わず、防食処理も施さない時は、常時、水中及び土中にある部分（地下水中部を含む）に対して１㎜の腐食しろを考慮する。	海水または鋼の腐食を促進させる工場排水の影響を受ける部分及び常時乾湿を繰り返す部分は、十分な防食処理を行わなければならない。 ((1)塗装 (2)有機ライニング (3)無機ライニング (4)犠牲鉄板巻き (5)電気防食)
	首都高速道路下部構造物設計基準 （平成４年４月） ((財)首都高速道路厚生会)	道路橋示方書の規定に準ずる。防食処理を行わない場合は２㎜とすることが多い。	
	設計基準（平成2年6月） （阪神高速道路公団）	常時水中または土中にある場合２㎜を標準とする。	
	鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物 （平成９年３月） ((財)鉄道総合技術研究所)	腐食代は一般に１㎜を考慮する。外周面について考える。	
	設計基準(案)土木設計 （平成４年） （日本下水道事業団）	道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編の規定に準じる。一般に２㎜を考慮する。	海水または鋼の腐食を促進させる工場排水の影響を受ける部分及び常時乾湿を繰り返す部分は、十分な防食処理を行わなければならない。 (1)塗装 (2)コンクリート被覆 (3)電気防食 (4)有機ライニング (5)犠牲鉄板巻き
	土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」 基準書　技術書 （平成７年７月） (農林水産省構造改善局)	杭の周辺土に接する表面は２㎜。 鋼材で囲まれた内側の表面は0.5㎜。 ６㎝以上の厚さのコンクリートに接する表面は０㎜。	
建築関係	建設省住宅局建築指導課長通達123号（平成４年４月） （建設省住宅局）	防食処理を行わない鋼杭の断面積の算定にあたっては、腐食しろとして１㎜以上をとるものとする。	
	建築基礎構造設計指針 （昭和63年１月） ((社)日本建築学会)	年間腐食しろ(0.02㎜/yr×耐用年数)。 通常１㎜をとれば十分である。	表面塗装（コールタールと樹脂系の強靭な焼付塗料などによる保護皮膜）その他詳細は「建築用鋼管杭施工指針・同解説」を参照すること。
	建築構造設計指針 （平成３年12月） （東京都）	例として、「開端杭の腐食しろとして外側１㎜内側0.5㎜の場合」を載せている。ただし「閉鎖杭の場合は内側の腐食しろは見込まないことができる」。	
	建築用鋼管杭施工指針・同解説 （昭和61年９月） （鋼管杭協会）	年間腐食しろ0.02㎜/yr。 通常の場合は鋼管杭の外側のみ１㎜の腐食しろを考慮すればよい。	(1)塗装 (2)有機ライニング (3)無機ライニング (4)金属ライニング

表3.1-2(2)　腐食しろに関する規定

<table>
<tr><th>区別</th><th>基　準　名　称</th><th>腐　食　し　ろ</th><th>備考（防食法）</th></tr>
<tr><td rowspan="2">港湾・漁港関係</td><td>港湾の施設の技術上の基準・同解説 改訂版
（平成元年２月）
((社)日本港湾協会)</td><td>当該地区における既設構造物の腐食速度、環境条件、構造などから集中腐食等の著しい腐食のおそれがないと推定できる場合には、腐食しろによる方法を用いてもよい。その場合設計に用いる腐食速度(片面)は次の値に基づき設定する。
<table>
<tr><th colspan="2">腐食環境区分</th><th>腐食速度
(mm/yr)</th></tr>
<tr><td rowspan="4">海側</td><td>H.W.L.以上</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>H.W.L.～
L.W.L.-1.0m</td><td>0.1～0.3</td></tr>
<tr><td>L.W.L.-1.0m
～海底部まで</td><td>0.1～0.2</td></tr>
<tr><td>海底泥層中</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td rowspan="3">陸側</td><td>陸上大気中</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>土中(残留水位上)</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td>土中(残留水位下)</td><td>0.02</td></tr>
</table></td><td>(1)　電気防食工法　　適用範囲M.L.W.L以下
(2)　塗覆装工法
(a)　モルタルライニング
(b)　金属ライニング
①犠牲鉄板巻き②耐食性鋼巻き③金属溶射
④耐食性金属巻き⑤クラッド鋼
(c)　塗装
(d)　有機ライニング
①ポリエチレンライニング ②レジンモルタルライニング ③FRPライニング ④厚膜無溶剤型樹脂ライニング(ウレタン樹脂を含む)
⑤水中硬化型樹脂ライニング
⑥ペトロラタムライニング ⑦その他</td></tr>
<tr><td>漁港構造物標準設計法
（1990年版）
((社)全国漁港協会)</td><td>腐食しろは、30年分を考慮することを標準とする。
鋼材の平均腐食速度(mm/年)
<table>
<tr><th colspan="2">腐食環境</th><th>腐食速度</th></tr>
<tr><td rowspan="4">海側</td><td>H.W.L以上</td><td>0.3</td></tr>
<tr><td>H.W.L～M.L.W.L-1m</td><td>0.1～0.3</td></tr>
<tr><td>M.L.W.L-1m～海底部</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>海底泥層中</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td rowspan="3">陸側</td><td>陸上大気部</td><td>0.1</td></tr>
<tr><td>土中（残留水位上）</td><td>0.03</td></tr>
<tr><td>土中（残留水位下）</td><td>0.02</td></tr>
</table></td><td>(1)　被覆材による防食:無機質ライニング、金属ライニング、塗装、有機ライニング
(2)　電気防食:外部電源法、流電陽極法</td></tr>
<tr><td rowspan="2">河川関係</td><td>建設省事務連絡
(昭和54年４月10日)
護岸用鋼矢板の選定について</td><td>表裏合わせて２㎜。ただし、特に腐食が著しいと判断された場合は現地に適合した腐食しろを見込む。</td><td></td></tr>
<tr><td>災害復旧工事の設計要領
（平成７年）
((社)全国防災協会)</td><td>１級河川　表裏合わせて２㎜。</td><td></td></tr>
</table>

注：土木関係の腐食しろの基準に関しては、平成8年12月の道路橋示方書・同解説の改定時に従来の２㎜から１㎜に変更された。

参考２　　漁港施設の防食法適用区分と適用防食

当時の漁港での腐食代の適用理解の例として[編集：鋼管杭協会 防食委員会 H10年3月]「防食ハンドブック 」pp3-12から図3.2-6と6行目～13行目を抜粋（文献番号も同様）。

漁港鋼構造物の防食設計に関する基準、指針等として、次のものがある。

（１）「漁港構造物標準設計法」、（水産庁監修（社）全国漁港協会、1990）[6)]

（２）「漁港構造物の設計ガイド」、（（社）全国漁港協会、1994）[7)]

防食の方法として、図3.2-6 に示すように、ａ）被覆防食＋電気防食、ｂ）被覆防食＋腐食しろ、ｃ）腐食しろ、ｄ）土中まで被覆防食の４種類がある。

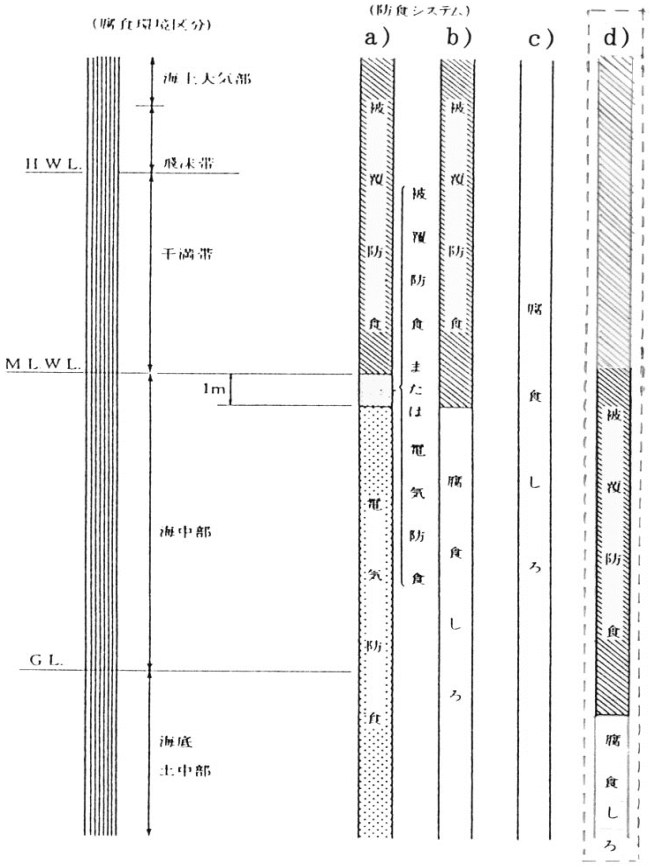


図 3.2-6　防食法適用区分と適用防食

「漁港構造物の設計ガイド」[7)]ではａ），ｂ），ｃ）のいずれかの防食方法を選択することとしている。しかし、漁港では水深が浅く電気防食装置が取り付けにくい場合が多く、このような場合はｄ）を適用するとよい。なお、腐食しろは表3.2-2 を参考にし、標準的には30年分を考慮する。』

注．本文第３章の表 3.2-2 は、鋼材の平均腐食速度（片面）である。腐食環境に対応して腐食速度（mm/年）が記されている。

参考３　基準・指針・参考文献等

ここでは、［編集：鋼管杭協会 防食委員会 H10年3月］「防食ハンドブック 」（本章中で「防食ハンドブック」（初版）と記す）に参考とされた基準・指針・参考文献等を第1章、第3章からそのまま抜粋した。

＜＜基準、指針、記述等＞＞

＜第１章 1.3＞

本ハンドブックにおいて参考にした防食基準・指針はつぎのとおりである。

（１）土木関係

①「海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）（飛沫帯・干満帯編）」、
（建設省土木研究所、1990）

②「景観に配慮した重防食被覆鋼矢板・鋼管矢板の利用技術指針（案）」、
（建設省土木研究所、（社）鋼材倶楽部、1995）

③「道路橋示方書・同解説 Ⅳ 下部構造編」、（（社）日本道路協会、1996）

④「道路橋示方書・同解説 Ⅴ 耐震設計編」、（（社）日本道路協会、1996）

⑤「設計要領第二集」、（日本道路公団、1993）

⑥「首都高速道路 下部構造物設計基準」、（（財）首都高速道路厚生会、1992）

⑦「設計基準」、（阪神高速道路公団、1990）

⑧「鉄道構造物等設計標準・同解説　基礎構造物・杭土圧構造物」、
（（財）鉄道総合技術研究所、1997）

⑨「設計基準（案）土木設計編」、（日本下水道事業団、1992）

（２）港湾、漁港関係

①「港湾の施設の技術上の基準・同解説」､(運輸省港湾局監修(社)日本港湾協会､1989)

②「東京港腐食対策手引書」、（東京都港湾局、改訂中）

③「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）

④「漁港構造物標準設計法」、（（社）全国漁港協会、1990）

⑤「漁港構造物の設計ガイド」、（（社）全国漁港協会、1994）

（３）建築関係

①「建設省住宅局建築指導課長通達123号」、（建設省住宅局、1992）

②「建築基礎構造設計指針」、（（社）日本建築学会、1988）

③「東京都建築構造設計指針」、（東京都、1991）

④「建築用鋼管杭施工指針・同解説」、（鋼管杭協会、1986）

（４）治山・治水関係

①「土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」基準書　技術書」、
（農林水産省構造改善局、1995）

＜3 章全般＞：今後参考と思われる部分を抜粋。

３．１．３　腐食しろ：記述引用

「港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版」では腐食しろによる方法は、原則として用いないとしている。一方、水産庁監修(社)全国漁港協会の「漁港構造物標準設計法」では腐食しろによる設計を認めている。

３．２．２　港湾鋼構造物の設計：上記＜第 1 章 1.3＞記載と重複も、後述の＜＜参考文献＞＞の文献番号が付与されているので、そのまま記載。

港湾鋼構造物の防食設計に関する基準、指針等として、次のものがある。

（１）「港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版」、(運輸省港湾局監修(社)日本港湾協会、1989) [3)]

（２）「東京港腐食対策手引書」、（東京都港湾局、改訂中） [5)]

（３）「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) [2)]

３．２．３　漁港鋼構造物の設計：後述＜＜参考文献＞＞の番号５)、７）

３．２．４　海洋鋼構造物の設計：・・・８）が参考となる。・・・

３．２．５　防食設計手順と設計例：ここは省略

３．３．２　河川鋼構造物の設計：ここでは、＜＜参考文献＞＞にないものを記載。

河川や湖沼の防食設計に関連する基準としては、次のものがあり、腐食しろによる設計が一般的である。・・・。

（１）「災害復旧工事の設計要領」、((社)全国防災協会、1995)

３．４．２　鋼管杭基礎の設計：３．３．２と同じ。

鋼管杭基礎の防食設計に関する基準、指針等として、次のものがある。

（４）「設計基準（案）土木設計」、（日本下水道事業団、1992）

（７）「港湾工事共通仕様書」、（（財）港湾建設技術サービスセンター、1996）

(12)「建築用鋼管杭施工指針・同解説」、(鋼管杭協会、1986)」

＜＜参考文献＞＞

１）鋼管杭協会:「[海洋環境下における]鋼製護岸・岸壁の防食システム」(1995)

２）(財)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(改訂版)」(1997)

３）運輸省港湾局監修(社)日本港湾協会:「港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版(上巻)」(1989)

４）建設省土木研究所、(財)土木研究センター:「海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書－海域における土木鋼構造物の電気防食指針(案)・同解説－」(1991)

５）東京都港湾局:「東京港腐食対策手引書」(改訂中)

６）水産庁監修(社)全国漁港協会：「漁港構造物標準設計法」（1990）

７）(社)全国漁港協会：「漁港構造物の設計ガイド」（1994）

８）建設省土木研究所、鋼管杭協会:「海洋鋼構造物の防食指針・同解説(案)(飛沫帯・干満帯編)」(1990)

９）関西国際空港㈱、(財)土木研究センター:「空港連絡橋の鋼構造物の防錆防食指針(案)」(1987)

10）建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部:「土木鋼材用重防食被覆材料の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅰ)・(Ⅱ)」(1995)

第4章　防食材料（重防食製品）

４．１　重防食製品の概要 ---------- ４－　１
４．１．１　鋼材規格 ---------- ４－　１
４．１．２　重防食製品 ---------- ４－　１
４．２　各性状の試験方法 ---------- ４－　４
４．３　被覆材料の性能 ---------- ４－　５
４．４　重防食製品の製造方法 ---------- ４－１０
４．５　製品設計上の留意点 ---------- ４－１３
４．６　重防食製品の外観および寸法 ---------- ４－１９
４．６．１　鋼管杭・鋼管矢板 ---------- ４－１９
４．６．２　鋼矢板 ---------- ４－２０
４．７　重防食製品の検査 ---------- ４－２３
４．７．１　鋼管杭・鋼管矢板 ---------- ４－２３
４．７．２　鋼矢板 ---------- ４－２５
参考文献 ---------- ４－２７

第４章　防食材料（重防食製品）

４．１　重防食製品の概要

４．１．１　鋼材規格

本章で扱う鋼材の規格は以下の表4.1-1 による。

表4.1-1　鋼材の規格

No.	製品名	規格名	規格	記　号
1	鋼 管 杭	鋼管ぐい	JIS A 5525	SKK400および SKK490
2	鋼管矢板	鋼管矢板	JIS A 5530	SKY400および SKY490
3	鋼 矢 板	溶接用熱間圧延鋼矢板	JIS A 5523	SYW295 および SYW390

４．１．２　重防食製品

重防食鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板に使用されるポリエチレンおよびウレタンエラストマーは、環境遮断性、電気絶縁性に優れた被覆材料であり、また、長期にわたって耐久性を保持するように成分の設計がなされている。

これらの被覆層は海洋や河川などの過酷な環境下でも高い耐衝撃強度と接着強度を有し、長期間優れた防食性能を発揮する。

鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板のプレコート製品（工場被覆製品）は、過去より各種の被覆が採用されているが、

1965年～1985年　；塗装（タールエポキシ樹脂等）

1986年～現在まで；重防食被覆（ポリエチレン・ウレタンエラストマー）

と、施設の信頼性や、長寿命化のニーズから製品の主流が変化してきている。各種の防食製品があるが、本章では鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の外面にポリエチレンあるいはウレタンエラストマーを工場被覆した重防食製品（重防食鋼管杭、重防食鋼管矢板、重防食鋼矢板）に限定して記述する。重防食製品の仕様については、鋼管杭・鋼矢板技術協会「重防食鋼管杭・重防食鋼管矢板製品仕様書」[1)]、「重防食鋼矢板製品仕様書」[2)]を参考とされたい。

（１）重防食製品の被覆構成

重防食製品の被覆構成を図4.1-1 に示す。

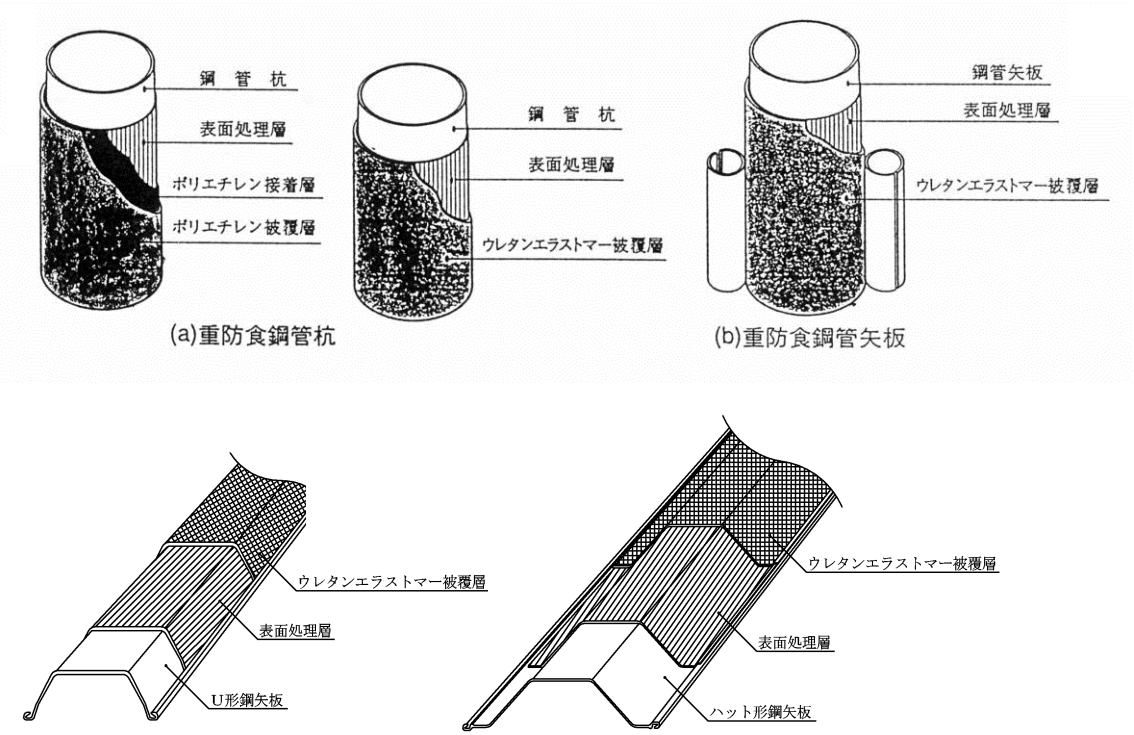


図4.1-1　重防食製品の被覆構成

（２）被覆材料と膜厚の関係

重防食製品の種類により、被覆材料と膜厚は表4.1-2 より選定される。

表4.1-2　重防食製品の材料と膜厚の関係

製　　品	被覆材料		標準膜厚 (mm)
	ポリエチレン	ウレタンエラストマー	
鋼 管 杭	○	○	2.5
鋼管矢板	—	○	2.5
鋼 矢 板	—	○	2.0

標準膜厚については、JIS G 3469 (2002) （ポリエチレン被覆鋼管）を参考に決定した。JIS G 3469では素材鋼管の呼び径によって被覆の膜厚の規定が異なり、呼び径200mm～1000mm では2.0mm 以上、1100mm～2000mm では2.5mm 以上としており、鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の膜厚は製品質量の差（鋼矢板１枚当たりの質量は呼び径200mm～1000mm に相当）より鋼管杭および鋼管矢板は膜厚2.5mm 以上、鋼矢板は膜厚2.0mm 以上とし、施工時等の軽微な疵がついても防食機能（残存防食層膜厚1.0mm 以上）を保持できるように設定した。

（3）被覆材料の性状

①ポリエチレン

ポリエチレン被覆材料は、次に示す性状に適合するものとする。

a）表面処理剤（プライマー）

プライマーは、下地（鋼材）および上層に塗布される接着剤との接着性に優れたものとする。

b）接着剤

接着剤は、変性ポリエチレンとし、上層に被覆されるポリエチレンとの接着性に優れたものとする。

c）ポリエチレン

ポリエチレンは、表4.1-3 に示す数値を満足するものとする。

表4.1-3　ポリエチレンの性状

項　　目	数　　値
密度	0.915g/㎤ 以上
引張強さ	12.0MPa 以上
伸び	300％ 以上
硬さ	ＨＤＤ40 以上
軟化点	85℃ 以上
吸水率	0.1％ 以下
体積抵抗率	1.0×10^{12}Ω･cm 以上
カーボンコンテント(黒色の場合)	1.5～3.0％
鋼材との接着力	35Ｎ/10㎜ 以上

②ウレタンエラストマー

ウレタンエラストマー被覆材料は、次に示す性状に適合するものとする。

a）表面処理剤（プライマー）

プライマーは、下地（鋼材）および上層に被覆するウレタンエラストマーとの接着性に優れたものとする。

b）ウレタンエラストマー

ウレタンエラストマーは表4.1-4 に示す数値を満足するものとする。

表4.1-4　ウレタンエラストマーの性状

項　　目	数　　値
比重	1.0 以上
引張強さ	8.0MPa 以上
伸び	30％ 以上
硬さ	ＨＤＤ50 以上
吸水率	0.35％ 以下
体積抵抗率	1.0×10^{12}Ω･cm 以上
鋼材との接着力	3.0 MPa 以上

４．２　各性状の試験方法

被覆材料の各性状の試験方法については、表4.2-1 のとおりとする。

表4.2-1　各性状の試験方法

	項　　目	（ＰＥ） ポリエチレン	（ＰＵ） ウレタンエラストマー
性状・試験項目	1.密度	JIS K 7112/ プラスチック－非発泡プラスチックの密度と比重の測定方法	―――
	2.比重	―――	JIS K 6911/ 熱硬化性プラスチック一般試験方法
	3.引張強さおよび伸び	JIS K 7161/ プラスチック－引張特性の試験方法	
	4.硬さ （デュロメータＤ硬さ）	JIS K 7215/ プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法	
	5.軟化点 （ビカット軟化点）	JIS K 7206/ プラスチック－熱可塑性プラスチック－ビカット軟化温度(VST)試験方法	
	6.吸水率	JIS K 7209/ プラスチック－吸水率の求め方	
	7.体積抵抗率	JIS K 6911/ 熱硬化性プラスチック一般試験方法	
	8.鋼材との接着力	JIS G 3469/ ポリエチレン被覆鋼管（ピール強度試験）	JIS G 3443-3/　水輸送用塗覆装鋼管(第3部:外面プラスチック被覆)のJIS H 8300の引張密着強さ試験方法（Ａ法）

各性状の試験方法についての詳細は、巻末（付．6）に示す。

４．３　被覆材料の性能

（１）長期耐久性

ポリエチレンまたはウレタンエラストマーを被覆した重防食製品は、実環境における暴露試験により被覆の長期耐久性が確認されている。その例として各種防食方法について表4.3-1 に示すような海洋環境における暴露試験がある[3),4),5),6),7),8)]。（詳細は付．２参照）

表4.3-1　公的機関による重防食被覆鋼材の暴露試験　　2010年現在の暴露年数
（ ）内は計画年数

実　施　機　関	場　所	暴露期間(年)
運輸省港湾技術研究所 （財）沿岸開発技術研究センター、鋼管杭協会	波崎沖	継続中(30)
建設省土木研究所、鋼管杭協会、 （財）国土開発技術研究センター	千葉沖 阿字ケ浦沖	完了 11.5 完了　22
建設省土木研究所、（社）鋼材倶楽部	駿河湾沖	継続中(30)
建設省土木研究所、（社）鋼材倶楽部	沖の鳥島	完了20 一部継続(20)
鋼管杭協会	シンガポール	完了 10
	フィリピン	完了 15

なお、実施機関名は試験開始時期

写真4.3-1

写真4.3-2

写真4.3-3

表4.3-1 の暴露試験の一例として、千葉沖で約１１年と茨城県阿字ケ浦沖で約２２年における暴露 試験の結果[3)、4)] をまとめたものを表4.3-2 に示す。各種防食法の防食性能については主として外観を中心に、Ａ（優）～Ｅ（劣）の５段階で定性的に評価した。評価がＣ以下のものは、長期の防食性能は期待できない。この結果、ポリエチレン被覆とポリウレタンゴム被覆の防食性能はＡ～Ｂに評価され、他の防食法と比較して優れた防食性能を有することが実証された。

また、表4.3-3 には茨城県波崎沖におけるポリエチレン被覆の約20年間の暴露試験結果[5)]の要約を示すが、千葉沖、阿字ケ浦沖と同様に良好な防食性能を有することが実証された。

表4.3-2　重防食鋼管杭の防食性能（千葉沖11年・阿字ケ浦沖22年間の暴露試験）

防食被覆の種類	千葉沖		阿字ケ浦沖	
	飛沫帯	干満帯	飛沫帯	干満帯
ポリエチレン被覆	ＡＢ	Ａ	Ａ	Ａ
ポリウレタンゴム被覆	＊	＊	Ｂ	Ａ
無機ジンクリッチペイント塗装 ＋タールエポキシ塗装	Ｂ	Ｃ	ＢＣ	ＢＣ
エポキシ系レジンモルタル	ＣＤ	Ｃ	Ｃ	Ｃ
セメントモルタル ＋ポリエステルＦＲＰカバー	＊	＊	ＤＥ	ＣＤ

注１）表中の＊は試験を実施しなかったことを示す。

注２）イ：異常なし　ロ：若干のふくれ、点錆あり　ハ：ふくれ、剥離、塗膜下錆点在
ニ：剥離と赤錆が進行　ホ：剥離、錆発生大の分類で外観観察を行い、それに基づく防食性能をＡ～Ｅの５段階に順序づけた。

表4.3-3　波崎沖20年間の暴露試験における重防食鋼管杭の総合評価

防食工法	被覆構成	耐　久　性				
		外　　観	絶縁抵抗	塗膜下錆	接着強度	総合
ポリエチレン被覆	図4.1-1 表4.1-1 表4.1-2 参照	ふくれ、亀裂、剥離等の塗膜劣化および発錆は無く、外観良好	10^8 Ω㎠以上の値を有しており鋼材表面には腐食は認められないと推測される。	発錆無し	初期 274N/10㎜ ↓ 10年後 225N/10㎜ ↓ 20年後 199～ 265N/10㎜ 異常無し	20年間で異常無し

重防食製品の被覆層の諸特性（耐候性、耐海水性、接着性、耐せん断性、耐衝撃性など）は各々の試験によって確認されている。試験結果の例をあげると次のとおりである。

（２）耐候性

一般に、耐候性とは材料を光や熱、風、雨などの屋外条件で暴露した場合の耐久性のことであり、重防食被覆材料の場合、特に大気中の酸素による被覆材料自体の酸化劣化や、太陽光中に含まれる紫外線に曝されることによる紫外線劣化などに対する耐久性が重要となる。

耐候性の確認方法としては、屋外暴露試験や促進暴露試験があり、重防食被覆材料（ポリエチレン、ウレタンエラストマー）の耐候性は、次のように確認されている。

① ポリエチレン

ポリエチレンは表面からクラックが生じる等の劣化形態を示すことから、ポリエチレンの伸びの変化により劣化の状態を把握することができる。規定どおり品質管理されたポリエチレンは、11.5年間海洋暴露された千葉沖での結果[3)]、表4.3-4 で示すようにほとんど初期の性能を維持している。なお、参考として22年阿字ヶ浦沖[4)]での値を示す。

また、促進試験として、サンシャインウェザーメータによる試験結果を図4.3-1 に示すが、ほぼ初期と変わらない結果となっている。

以上のことから、この品質規定を満足するポリエチレン被覆材料は十分耐候性を保持していることがわかる。

表4.3-4　ポリエチレン被覆材料屋外暴露の性状結果

	千葉沖			阿字ヶ浦沖	
		11.5年海洋暴露後		22年海洋暴露後	
	初　期	飛沫帯	海中部	飛沫帯	海中部
疵	なし	なし	なし	なし	なし
被覆下腐食	なし	なし	なし	なし	なし
密度(g/cm³)	0.937	0.937	0.937	0.948	0.934
硬さ(H_DD)	44	47	45	51	45
引張強度(N/m²)	12.3*1	15.8*1	13.4*1	10.8*2	13.3*2
伸び (%)	550	590	520	440	470

*1：1kgf=9.8N で変換　*2：破断強度（×10^6N/m²）

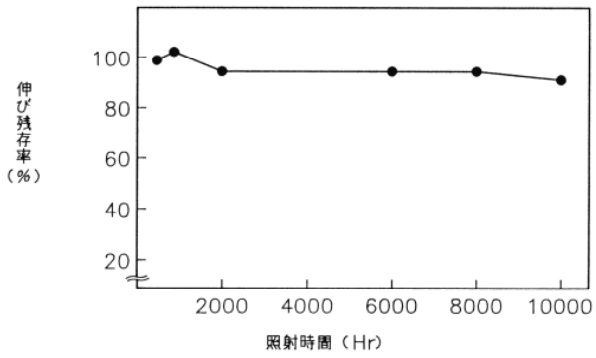


図4.3-1　促進耐候性試験結果の例（サンシャインウェザーメータ）

②ウレタンエラストマー

ウレタンエラストマーでは、劣化形態がポリエチレンと異なり、被覆表面がチョーキングを起こし劣化するので、チョーキング量や引張強度の変化により劣化の状態を把握することができる。

促進試験におけるウレタンエラストマー消失量の結果を図4.3-2 に示す。この結果から、消失量は小さく重防食被覆厚は2.0㎜ 以上あり問題にならない。また、図4.3-3に示す引張強さ残存率についても、促進試験結果では初期とほとんど変化が無く十分な耐候性を有していることがわかる。

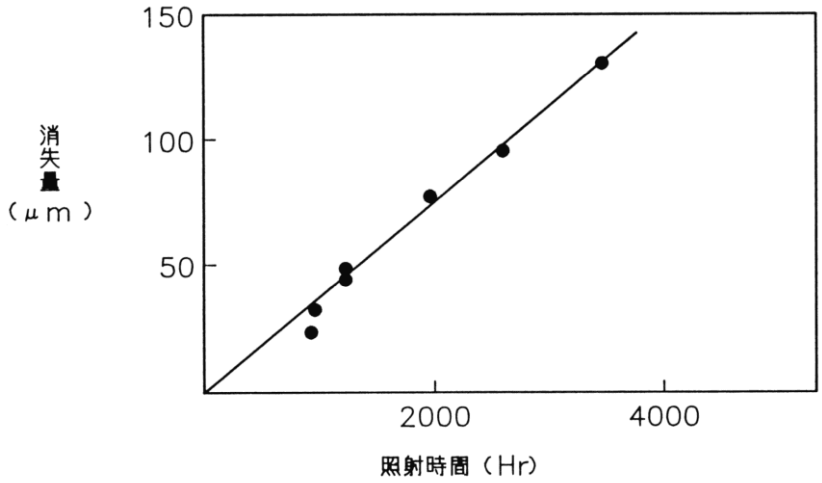


図4.3-2　促進試験によるウレタンエラストマー消失量の例
（サンシャインウェザーメータ）

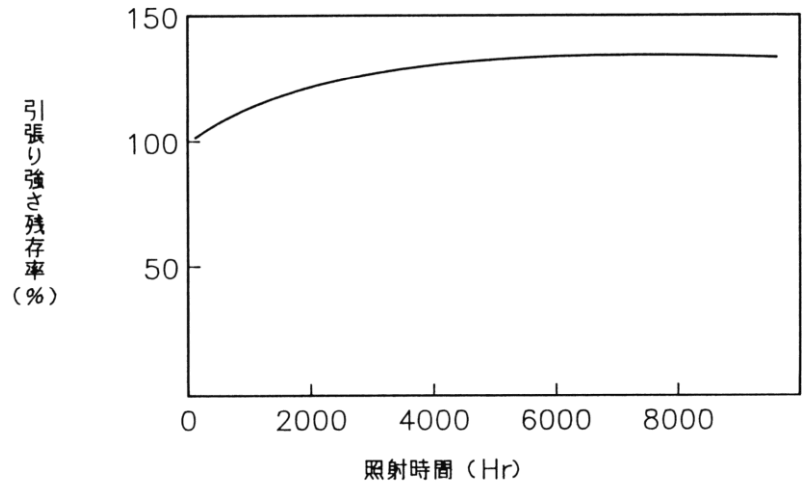


図4.3-3　促進試験による引張強度の例（サンシャインウェザーメータ）

（３）耐海水性

最も厳しいと考えられる80℃、3%NaCl 水溶液浸漬試験におけるポリエチレン被覆鋼材の結果を図4.3-4 に示す。図より、2ヶ月後も接着力の低下がないことが確認された。

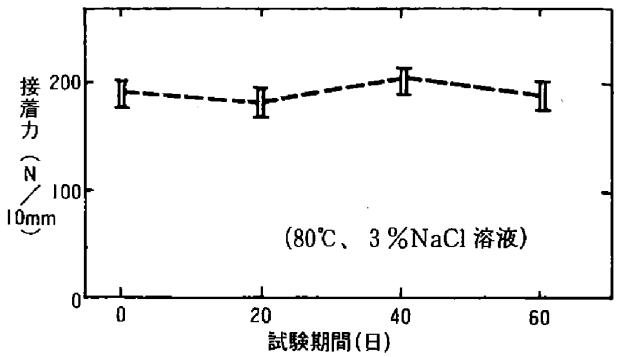


図4.3-4　ポリエチレン被覆鋼材の耐海水性促進試験結果

４．４　重防食製品の製造方法

重防食製品は厳正な品質管理のもとに工場にて製造される。

（１）ポリエチレン被覆

①鋼管杭の製造工程（概要）

鋼管杭のポリエチレン被覆は図4.4-1 に示す工程により実施される。

また、その製造方法の例を図4.4-2 に示す。

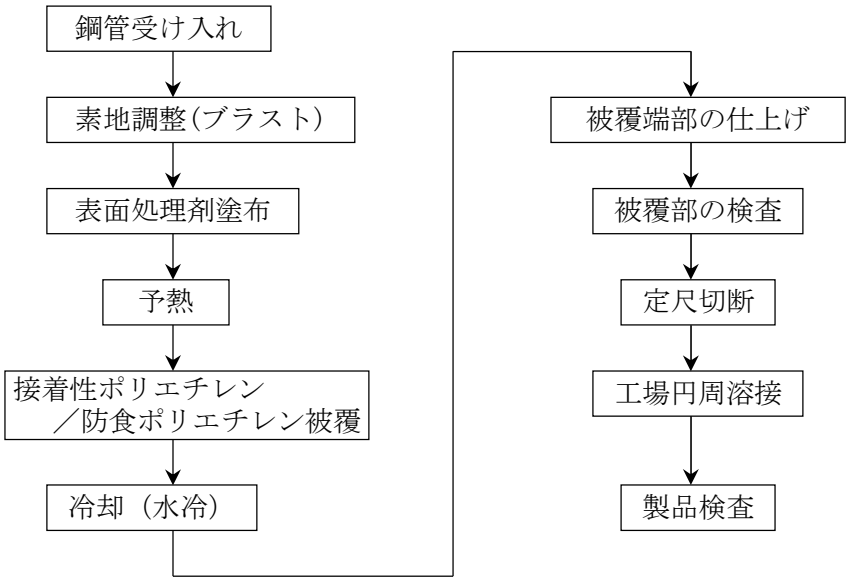


図4.4-1　鋼管杭（ポリエチレン被覆）の製造工程

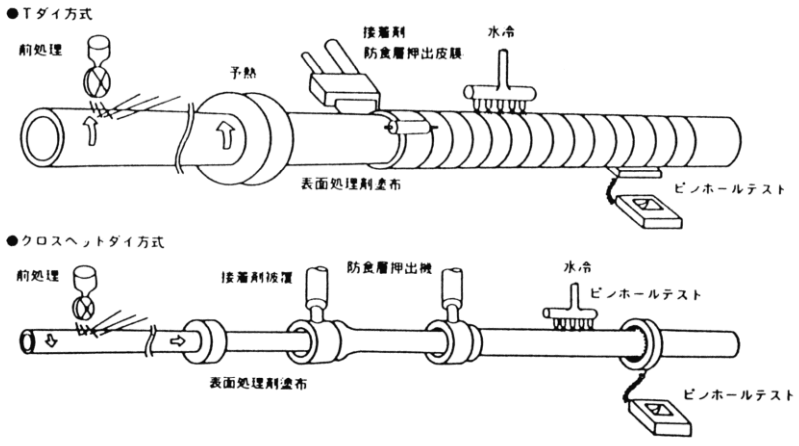


図4.4-2　ポリエチレン被覆鋼管杭の製造方法の例

（2）ウレタンエラストマー被覆

①鋼管杭・鋼管矢板の製造工程（概要）

鋼管杭・鋼管矢板のウレタンエラストマー被覆は図4.4-3 に示す工程により実施される。また、その製造方法の例を図4.4-4 に示す。

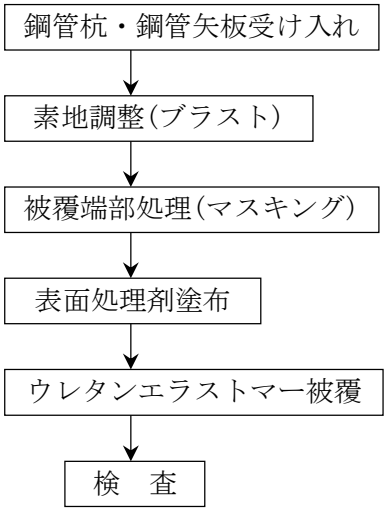


図4.4-3　鋼管杭・鋼管矢板（ウレタンエラストマー被覆）の製造工程

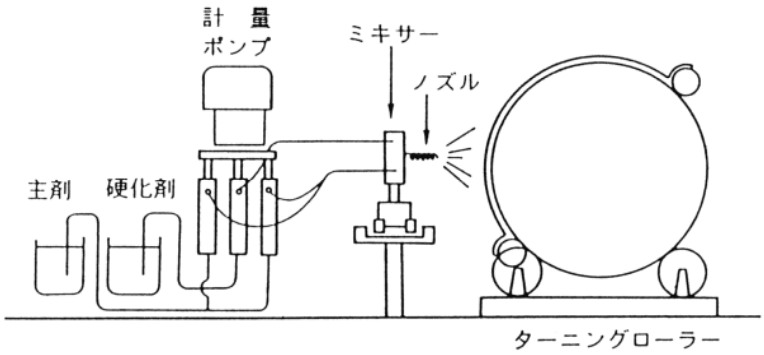


図4.4-4　ウレタンエラストマー被覆鋼管杭（鋼管矢板）の製造方法の例

②鋼矢板の製造工程（概要）

鋼矢板のウレタンエラストマー被覆は図4.4-5 に示す工程により実施される。

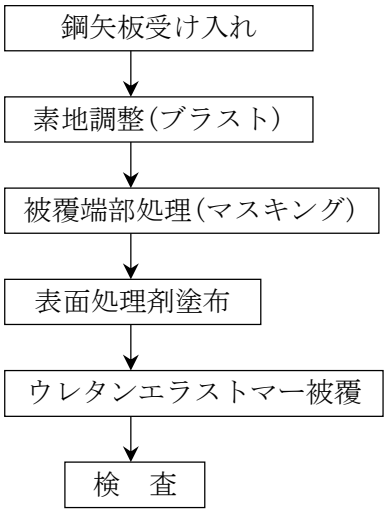


図4.4-5　鋼矢板（ウレタンエラストマー被覆）の製造工程

４．５　製品設計上の留意点

（１）被覆範囲（被覆断面）の検討

重防食製品の使用条件（海・川側、陸側）により被覆断面を決定する。

またコーピングへの重防食部の埋め込みしろは一般的に50～100㎜ 程度とする。これはコンクリートの付着面積と防食とを考慮したものである。

①鋼管杭（ポリエチレン・ウレタンエラストマー）

鋼管杭は、図4.5-1 のように海・河川に全周が海水・河川水に接するような使用条件が多く、被覆断面を図4.5-2 のように全周とする。

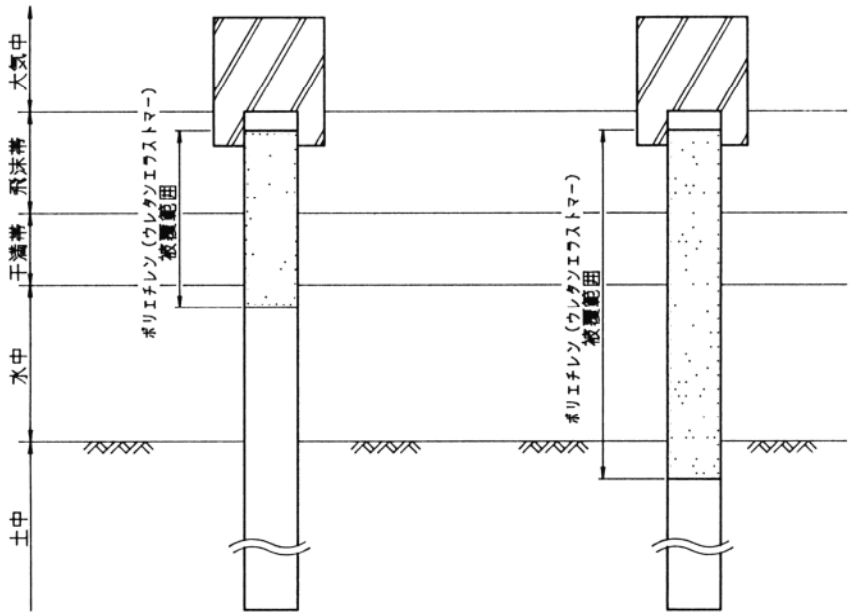


図4.5-1　被覆範囲（全周）

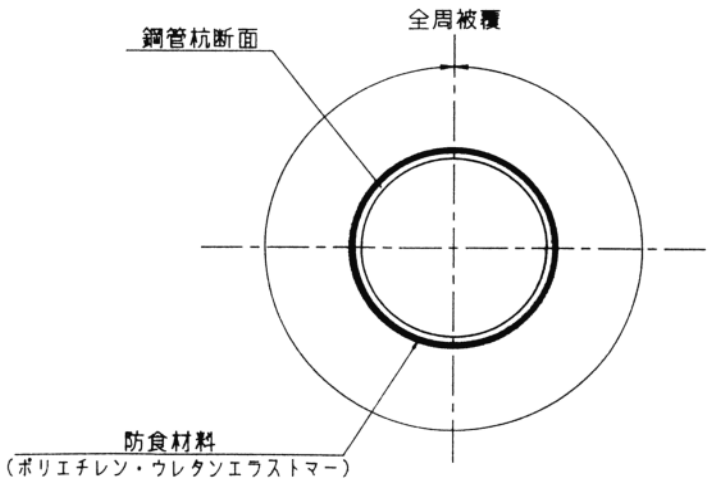


図4.5-2　全周被覆の例

②鋼管矢板（ウレタンエラストマー）

鋼管矢板は護岸・岸壁に使用され、前面側は海または河川であり、背面側は陸であり、一般的には図4.5-3、図4.5-4 に示す前面側のみ重防食被覆をする。

しかし、防波堤や陸側の土壌と水位等から図4.5-5、図4.5-6 に示す前面側および背面側を全周被覆するケースもある。

ａ）前面側のみ被覆するケース

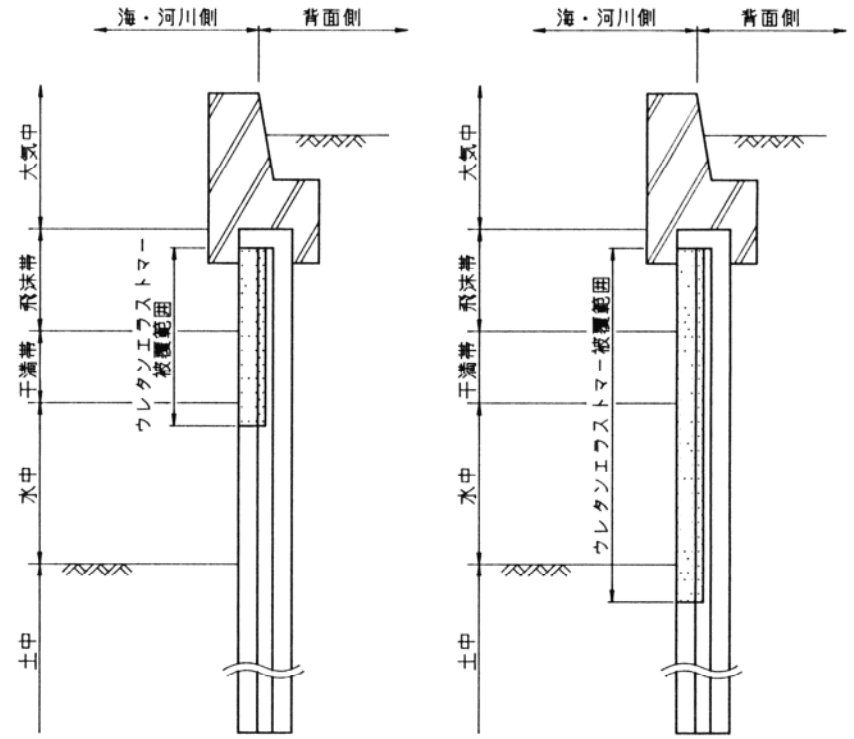


図4.5-3　被覆範囲（前面のみ）

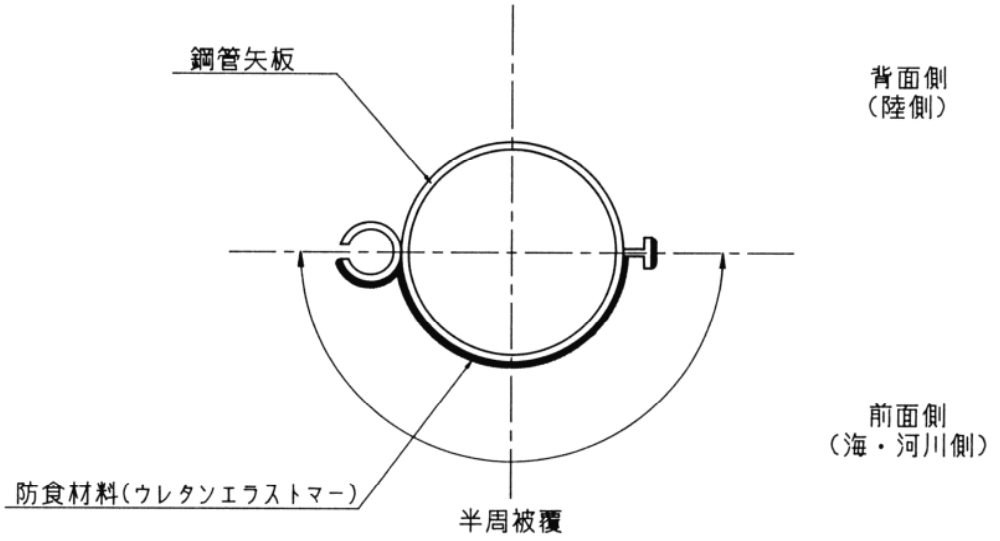


図4.5-4　半周被覆の例

b）全周（前面側・背面側）を被覆するケース

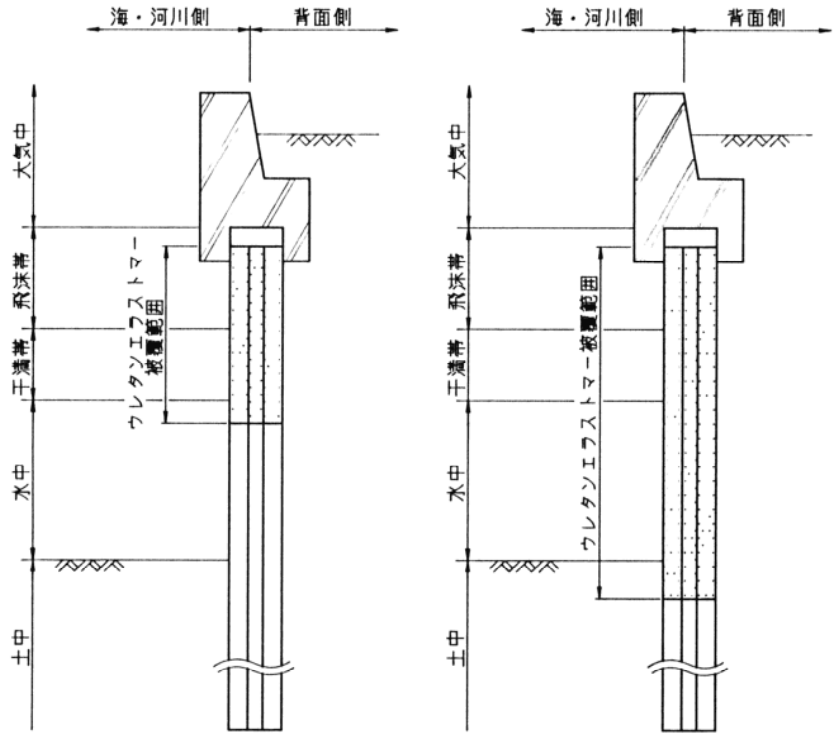


図4.5-5　被覆範囲（全周）

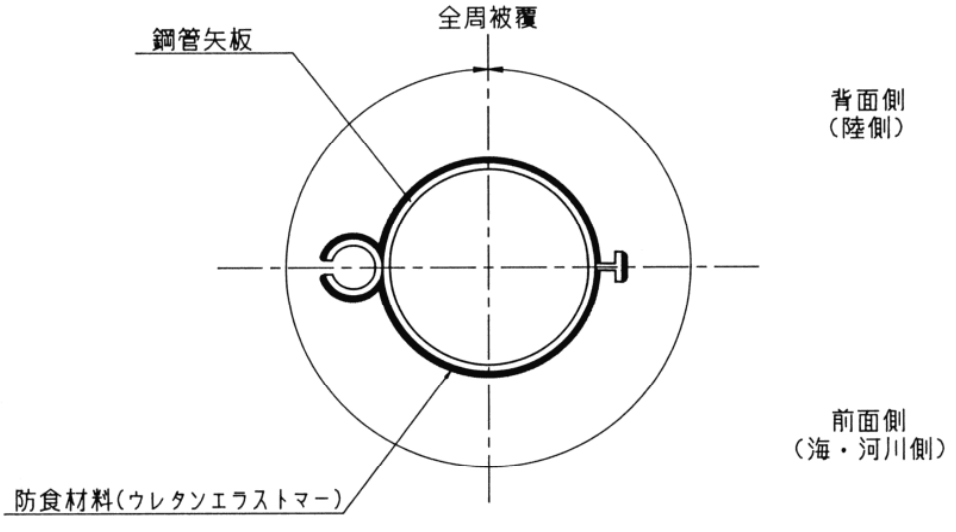


図4.5-6　全周被覆の例

③鋼矢板（ウレタンエラストマー）

前面側（海・河川側）を図4.5-7、図4.5-8 のように被覆する。

また、導流堤などに使用されるときに両面被覆をする場合がある。

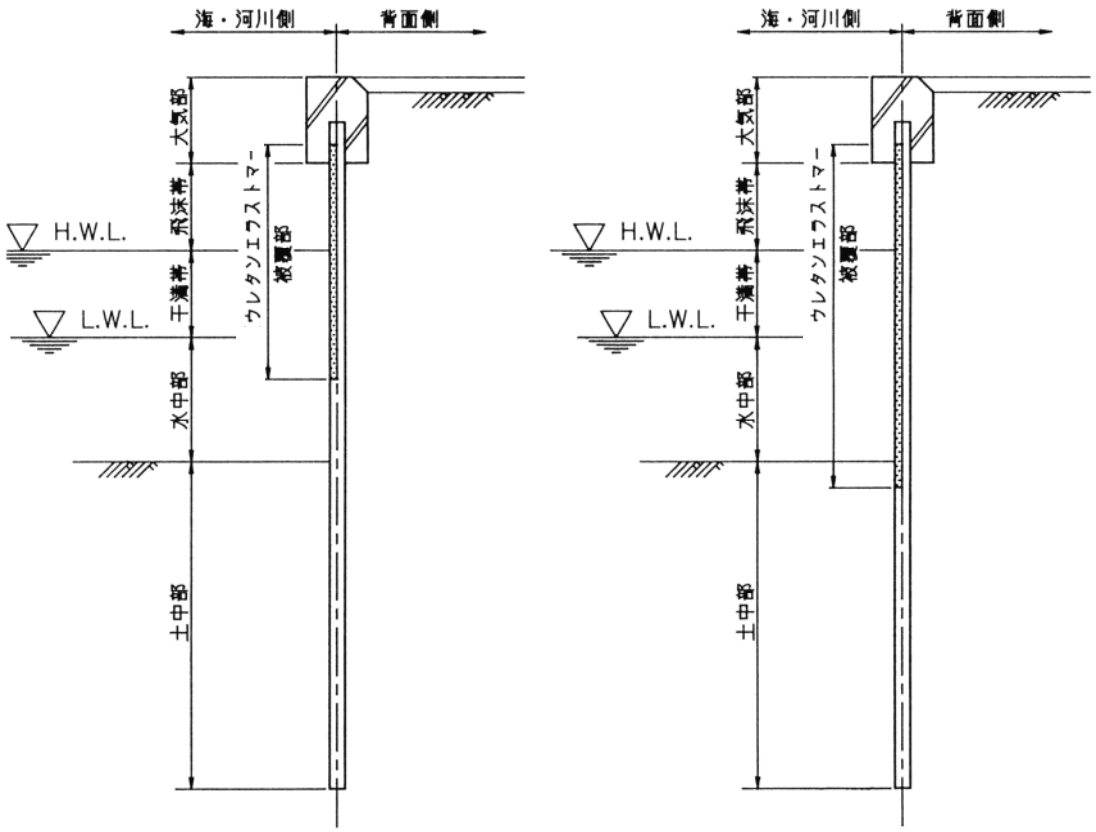


図4.5-7　鋼矢板の被覆範囲

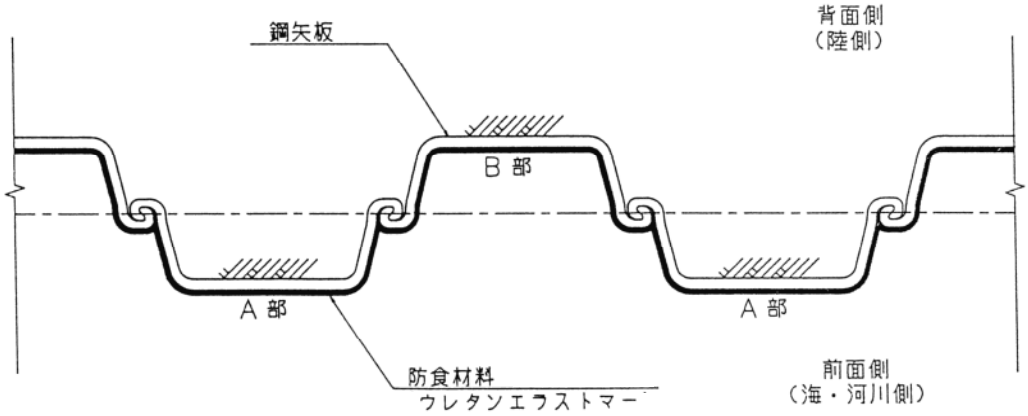
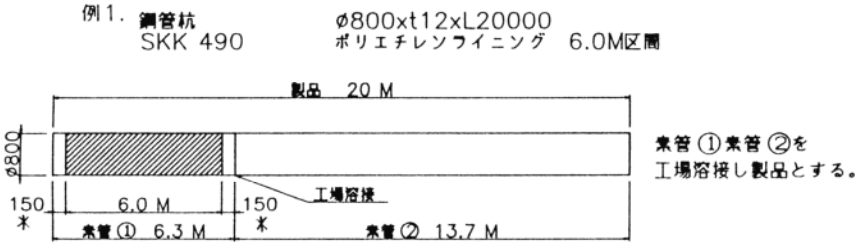


図4.5-8　前面側被覆の例

（２）製品設計例

図4.5-9、図4.5-10、図4.5-11 に鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板の製品設計例をそれぞれ示す。



＊ 被覆（ポリエチレン）端部150㎜は杭頭部および工場溶接のために剥離処理

図4.5-9　鋼管杭の例

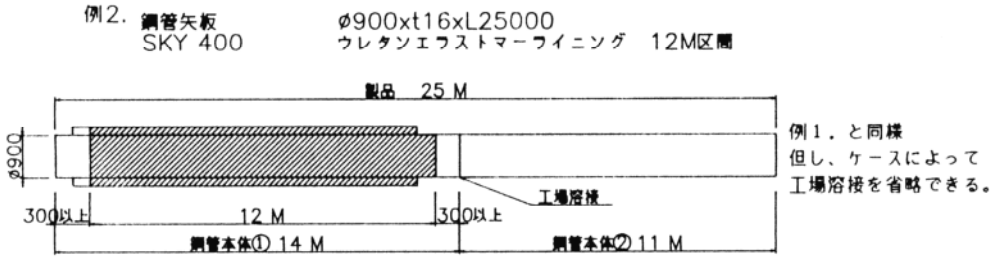


図4.5-10　鋼管矢板の例

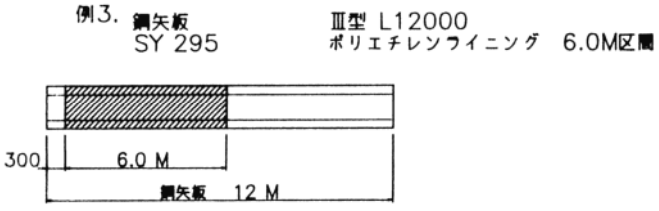


図4.5-11　鋼矢板の例

４．６　重防食製品の外観および寸法

４．６．１　鋼管杭、鋼管矢板

（１）外観

被覆層は表面が平滑であるとともに、実用上有害な傷、異物の混入、極端な厚さのむらなどがないものとする。有害な傷とは、工事中や構造物の完成後に被覆層の剥離の原因となったり、防食耐久性の低下を起こすようなもの（われの原因となるするどい切り傷、被覆の浮き上がりや重なりおよび微少な孔：ピンホール）をいう。

（２）被覆層の厚さの許容差

被覆層の厚さは2.5㎜とし、その寸法許容差を　０,＋規定せずとする。

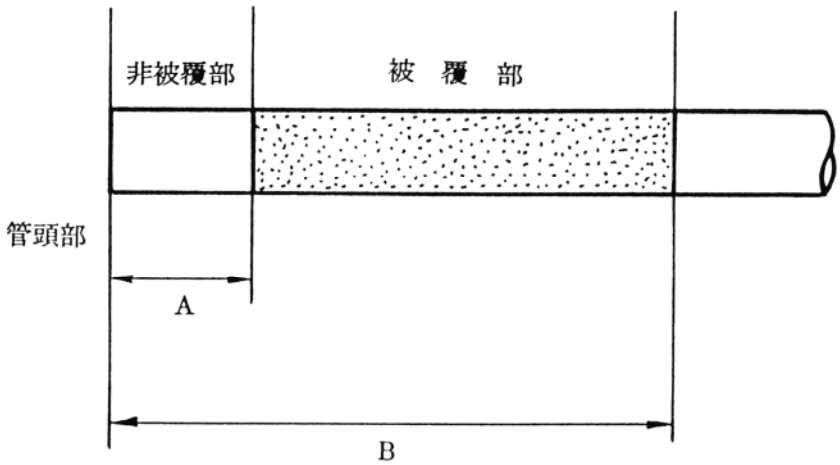
（３）被覆範囲および寸法許容差

重防食被覆の範囲は前述4.5項（製品設計上の留意点）を考慮して設計者が決定する。この時の被覆範囲の寸法許容差は図4.6-1 のとおりとする。

①管頭部には、被覆をしない部分（非被覆部）を設ける。これは、上部構造物のコンクリートとの付着力を低下させないことと、製造時の機械設備の都合上、非被覆部が必要となる。

②Ａ（非被覆部）の寸法許容差のプラス側を０としたのは、防食範囲を確保するためであり、マイナス側を50㎜ としたのは、コンクリートとの付着面積を考慮したためである。

③Ｂ（管頭部～被覆部下端）の寸法許容差でプラス側を「規定しない」としたが、これは被覆範囲が大となっても防食上問題がない（安全側）ためである。



Ａ：図面寸法　$^{0}_{-50㎜}$

Ｂ：図面寸法　$^{+規定しない}_{0}$

図4.6-1　被覆範囲および寸法許容差

（4）鋼管矢板の継手周辺の被覆範囲および被覆厚さ

鋼管矢板の継手周辺の被覆範囲は、継手周辺の腐食の傾向と継手の形状を勘案して図4.6-2 のとおりとする。

①鋼管矢板岸壁は、前面は海水に接し、背面は土砂に接しているので防食被覆は海に面する半周を行えばよい。ただし、防波堤のように全面が海水に接する場合は全周を防食被覆する。

②鋼矢板壁の腐食状況を調査した結果[9)]、腐食は海に面した凸部が大きく凹部は少ない。この傾向は腐食の理論上からも納得できることから、鋼管矢板においても継手周辺の腐食は海に面した本体よりも少ないとみなされるので膜厚は規定していない。

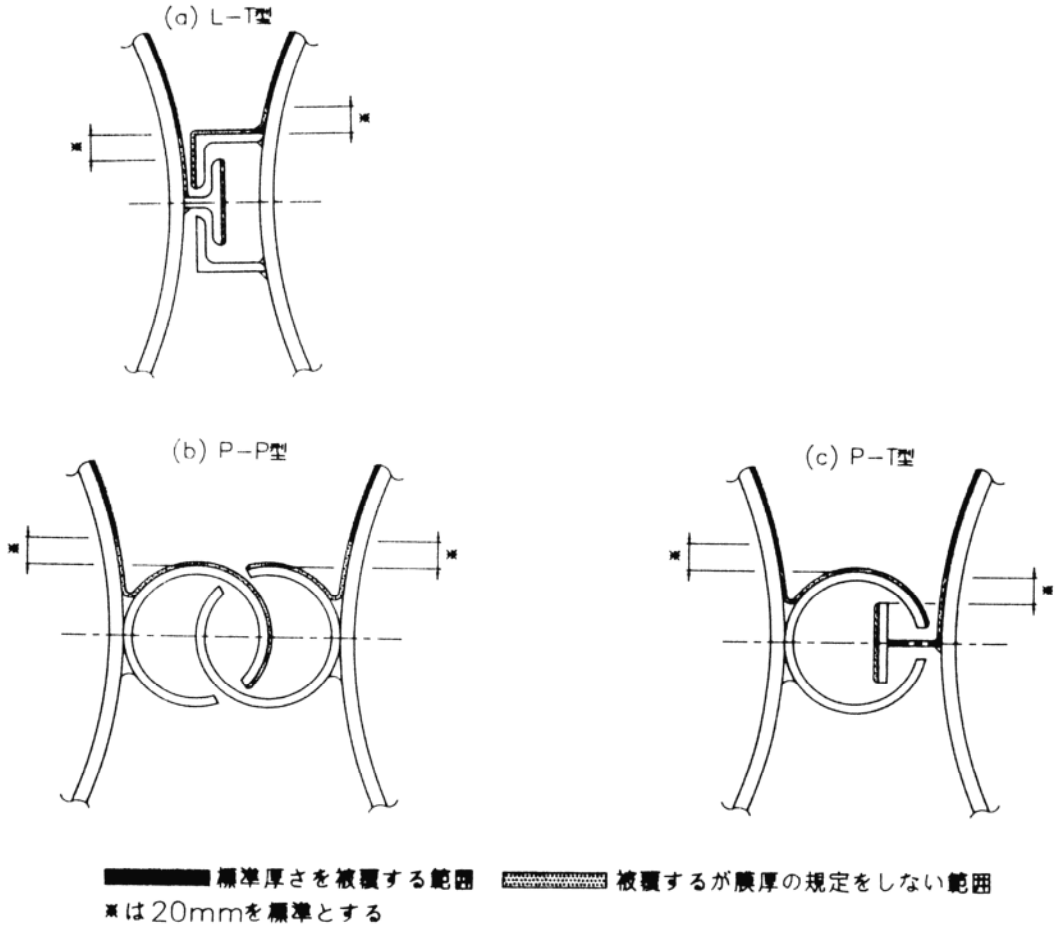


図4.6-2　鋼管矢板継手周辺の被覆範囲および膜厚

４．６．２　鋼矢板

（１）外観

被覆層は表面が平滑であるとともに、実用上有害な傷、異物の混入、極端な厚さのむらなどがないものとする。

有害な傷とは、工事中や構造物の完成後に被覆層の剥離の原因となったり、防食耐久性の低下を起こすようなもの（①われの原因となるするどい切り傷、②被覆の浮き上がりや重なり③微少な孔：ピンホール）をいう。

（２）被覆層の厚さの許容差

被覆層の厚さは2.0㎜とし、その寸法許容差を０,＋規定せずとする。

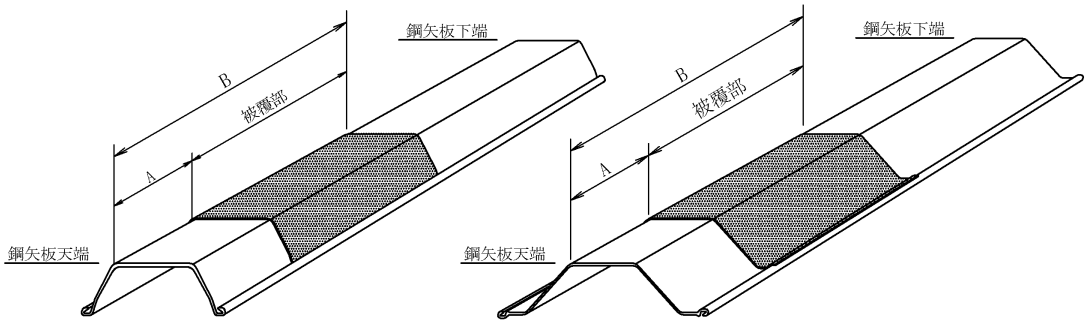
（３）被覆範囲および寸法許容差

重防食被覆の範囲は前述の4.5項の記述を考慮して設計者が決定する。この時の被覆範囲の寸法許容差は図4.6-3 のとおりとする。

①天端部には、被覆をしない部分（非被覆部）を設ける。

②Ａ（非被覆部）の寸法許容差のプラス側を０としたのは、防食範囲を確保するためであり、マイナス側を50㎜ としたのは、コーピング用の鉄筋の溶接、バイブロハンマーのチャキングしろ等を考慮したためである。

③Ｂ（鋼矢板天端～被覆部下端）の寸法許容差でプラス側を「規定しない」としたが、これは被覆範囲が大となっても防食上問題がない（安全側）ためである。



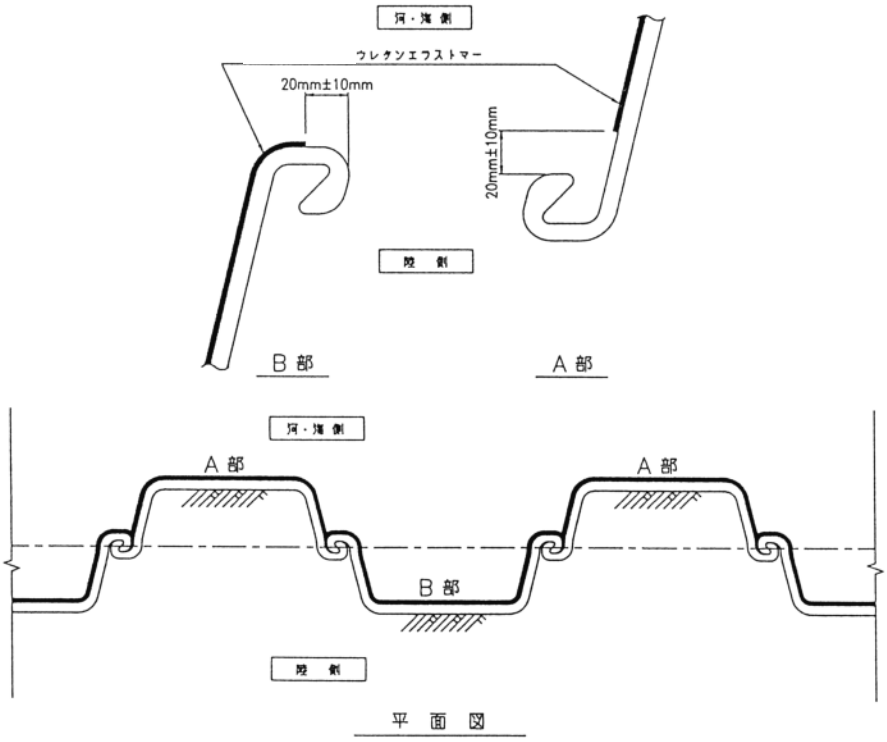
設計寸法	寸法許容差
A　部	＋ 0 ㎜ － 50 ㎜
B　部	＋規定しない － 0 ㎜

図4.6-3　被覆範囲および寸法許容差

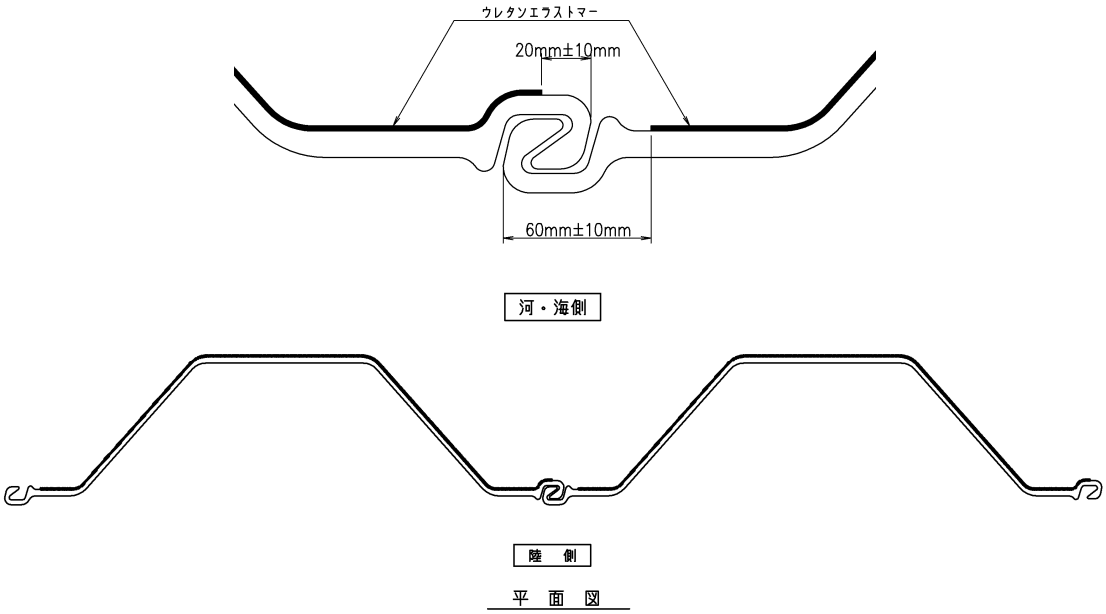
（４）鋼矢板の継手周辺の被覆範囲および被覆厚さ

鋼矢板の継手周辺の被覆範囲および寸法許容差は図4.6-4 のとおりとする。

（図は標準的な鋼矢板継手周辺の被覆する範囲を示したものである。）



(a) U形鋼矢板



(b) ハット形鋼矢板

図4.6-4　鋼矢板継手周辺の被覆範囲

過去の腐食調査によれば、U形鋼矢板の各部位ではウェブの腐食量が最も大きく、次いでフランジであり、継手部は最も小さい。継手部の腐食量が小さいのは、打込み時の土砂の充填および初期の腐食によるさびの充満により、酸素や水の侵入が妨げられるためと考えられる[9)]。そのため、ハット形鋼矢板も膜厚保証対象外となる継手部は陸側に位置するため、腐食も比較的緩やかになると考えられる。

U形鋼矢板の継手嵌合部は応力の中立点であり、仮に継手嵌合部が腐食し、断面欠損が生じても構造物の強度が損なわれる影響は少ない。しかし、ハット形鋼矢板は、継手が矢板壁の外縁に位置するため、重防食が劣化し腐食が進展した場合には断面性能が低下する。よって、良好な防食性能を確保するためには、計画的な点検・補修に基づく維持管理が必要とされる。

重防食製品の維持管理方法は、第6章で解説する。

４．７　重防食製品の検査

以下は、鋼管杭・鋼矢板技術協会の標準検査仕様である。

４．７．１　鋼管杭・鋼管矢板

（１）検査一般

①検査は原則として製造所で行い、その検査内容は、材料検査および製品検査とする。

（２）材料検査

①鋼管の検査は JIS A 5525 または JIS A 5530の規定に基づき行う。

（３）被覆材料

①被覆材料は製造ロットごとに品質検査を行い、前述の4.1.2(3)項（被覆材料の性状）の規定に合格するものとする。

②被覆材料の検査は材料メーカーが行う。

（４）製品検査

①被覆部の外観検査

被覆部の外観検査は１本ごとに目視にて行い、前述の4.6項（重防食製品の外観寸法および寸法許容差）の規定に合格するものとする。

（５）被覆厚さの検査

①被覆厚さは前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②被覆厚さは単管10本またはその端数ごとに１本の割合で行う。

③厚さの測定は電磁膜厚計を用い図4.7-1 に示すように被覆材料の両端部および中央部の３断面について測定する。

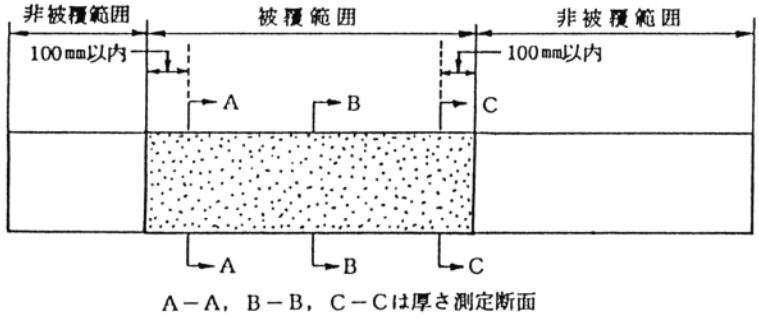


図4.7-1　被覆厚さの測定位置（管軸方向）

④図4.7-2 に示すように全周被覆の場合は、１断面につき４ヶ所、それ以外は１断面につき３ヶ所とする。

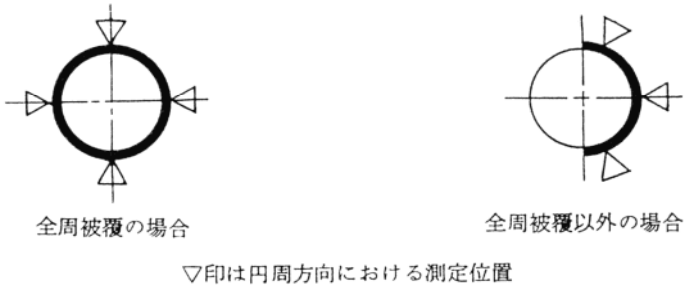


図4.7-2　被覆厚さの測定位置（円周方向）

（６）被覆範囲の検査

①被覆範囲は前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②被覆範囲の検査は単管10本またはその端数ごとに１本の割合で行う。

③検査方法はスチールテープを用いて行い、測定箇所は１管端につき１箇所とする。

（７）鋼材との接着力の検査

①鋼材との接着力は前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②接着力の検査は、単管20本またはその端数ごとに１本の割合で余長部にもうけた試験片で行うか、または供試材により検査する。

③検査方法については以下の通りとする。

・ポリエチレン　　：ピール強度試験

・ウレタンエラストマー：引張密着強さ試験

（８）ピンホール検査

①ピンホール検査は単管１本ごとに被覆部の厚さ規定部全面について行う。

②ピンホール検査は放電式ホリデーディテクターを用い、試験電圧は JIS G 3469(ポリエチレン被覆鋼管)の試験電圧10KV～12KV に準拠して10KV 以上とする。

③被覆部は規定の電圧をかけた時、異常のないものとする。

４．７．２　鋼矢板

（１）検査一般

①検査は原則として製造所で行い、その検査内容は、材料検査および製品検査とする。

（２）材料検査

①鋼矢板の検査は JIS A 5523の規定に基づき行う。

（３）被覆材料

①被覆材料は製造ロットごとに品質検査を行い、前述の4.1.2(3)項（被覆材料の性状）の規定に合格するものとする。

②被覆材料の検査は材料メーカーが行う。

（４）製品検査

①被覆部の外観検査

被覆部の外観検査は１枚ごとに目視にて行い、前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②ピンホール検査は20枚またはその端数ごとに１枚の割合で被覆部の膜厚規定部全面について行う。

③ピンホール検査は放電式ホリデーディテクターを用い、試験電圧は JIS G 3469(ポリエチレン被覆鋼管)の試験電圧10KV～12KV に準拠して10KV 以上とする。

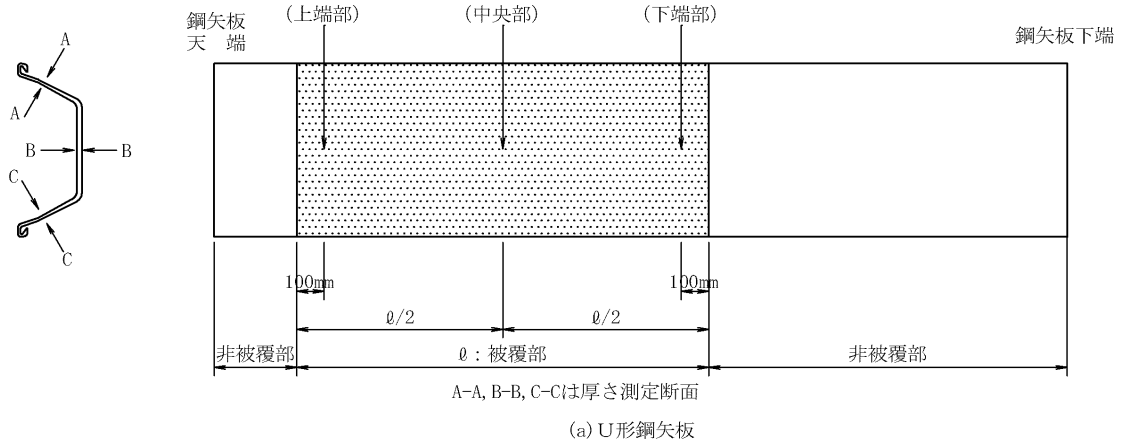
④被覆部は規定の電圧をかけた時、異常のないものとする。

（５）被覆厚さの検査

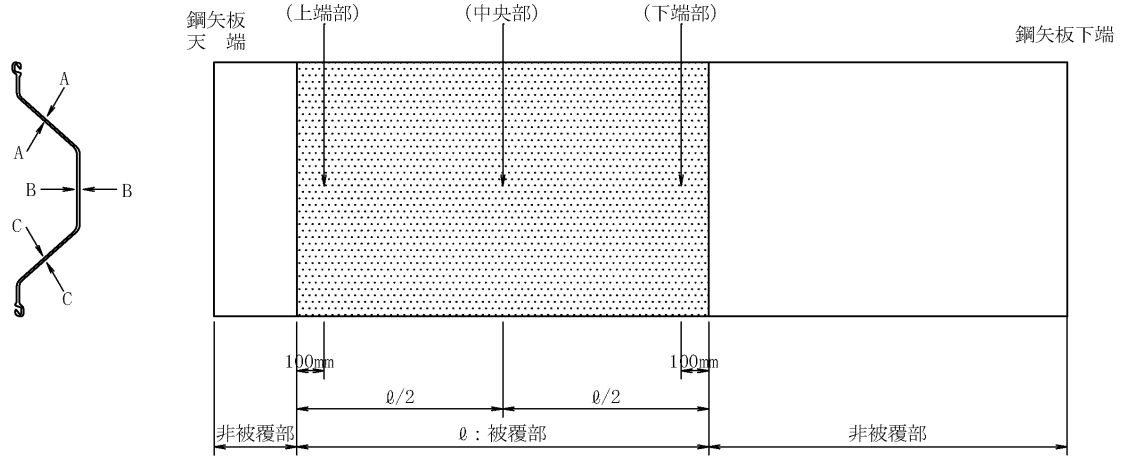
①被覆厚さは前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②被覆厚さは鋼矢板20枚またはその端数ごとに１枚の割合で行う。

③厚さの測定は電磁膜厚計を用い図4.7-3 に示すように被覆材料の両端部および中央部の３断面について測定する。



(a) U形鋼矢板



(b) ハット形鋼矢板

図4.7-3　被覆厚さの測定位置（軸方向）

（６）被覆範囲の検査

①被覆範囲は前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②被覆範囲の検査は鋼矢板20枚またはその端数ごとに１枚の割合で行う。

③検査方法はスチールテープ、ノギス等を用いて行い、測定箇所は長手方向につき１箇所（ウェブ中央）、幅方向につき２箇所（左右の爪部）とする。

（７）鋼材との接着力の検査

①鋼材との接着力は前述の4.6項の規定に合格するものとする。

②接着力の検査は、製品20枚またはその端数ごとに１枚の割合で余長部にもうけた試験片で行うか、または供試材により検査する。

③検査方法については以下の通りとする。

・ウレタンエラストマー：引張密着強さ試験

＜参考文献＞

1)(社)鋼管杭・鋼矢板技術協会：「重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書」(2011)
2)鋼管杭協会：「重防食鋼矢板製品仕様書」(1995)
3)鋼管杭協会：「防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書」(1992)
4)建設省土木研究所：明嵐政司、守屋進、鳥居謙一、山本幸次「外洋に２０年間曝露した防食鋼管杭の耐久性試験報告書」土木研究所資料(平成12年1月)
5)(独)港湾空港技術研究所：宮田義一、阿部正美、濵田秀則、清水一夫、中野啓眞、芥川博昭「鋼管杭の防食工法に関する現地試験（２０年目中間報告）」港湾空港技術研究所資料（2006,6）
6)建設省土木研究所：「海洋鋼構造物の防食指針・同解説(案)(飛沫帯・干満帯編)」(1990)
7)建設省土木研究所，(社)鋼材倶楽部,(社)プレストレス・コンクリート建設業協会,(財)土木研究センター：西崎到、守屋進氏ら「海洋鋼構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書」(平成18年5月)
8)鋼管杭協会:「熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験10年の結果報告」(1997)
9)(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)」(1997)

第５章　施　　工

５．１　重防食製品の施工 ―――――――――――――――――――― ５－　１
５．１．１　運搬・保管 ―――――――――――――――――――― ５－　２
５．１．２　打込み工 ―――――――――――――――――――― ５－　６
５．１．３　高止り・打ち過ぎ時の対応 ―――――――――――――― ５－１３
５．１．４　上部工打設時 ―――――――――――――――――――― ５－１６
５．１．５　溶接 ―――――――――――――――――――― ５－１８
５．１．６　前面地盤の掘削、捨石 ―――――――――――――― ５－１９
５．１．７　補修 ―――――――――――――――――――― ５－２０
５．２　電気防食の施工 ―――――――――――――――――――― ５－２１
５．２．１　現場作業者 ―――――――――――――――――――― ５－２１
５．２．２　作業準備 ―――――――――――――――――――― ５－２１
５．２．３　施工方法の選定 ―――――――――――――――――― ５－２１
５．２．４　施工手順 ―――――――――――――――――――― ５－２１
５．２．５　安全対策 ―――――――――――――――――――― ５－２４
５．２．６　竣工検査 ―――――――――――――――――――― ５－２４

第５章　施工

５．１　重防食製品の施工

重防食鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板の運搬・施工に当たっては、重防食被覆部に高温や衝撃等による損傷を与えないように十分な注意が必要である。

以下に施工フローと主な留意点について図5.1-1 にまとめる。

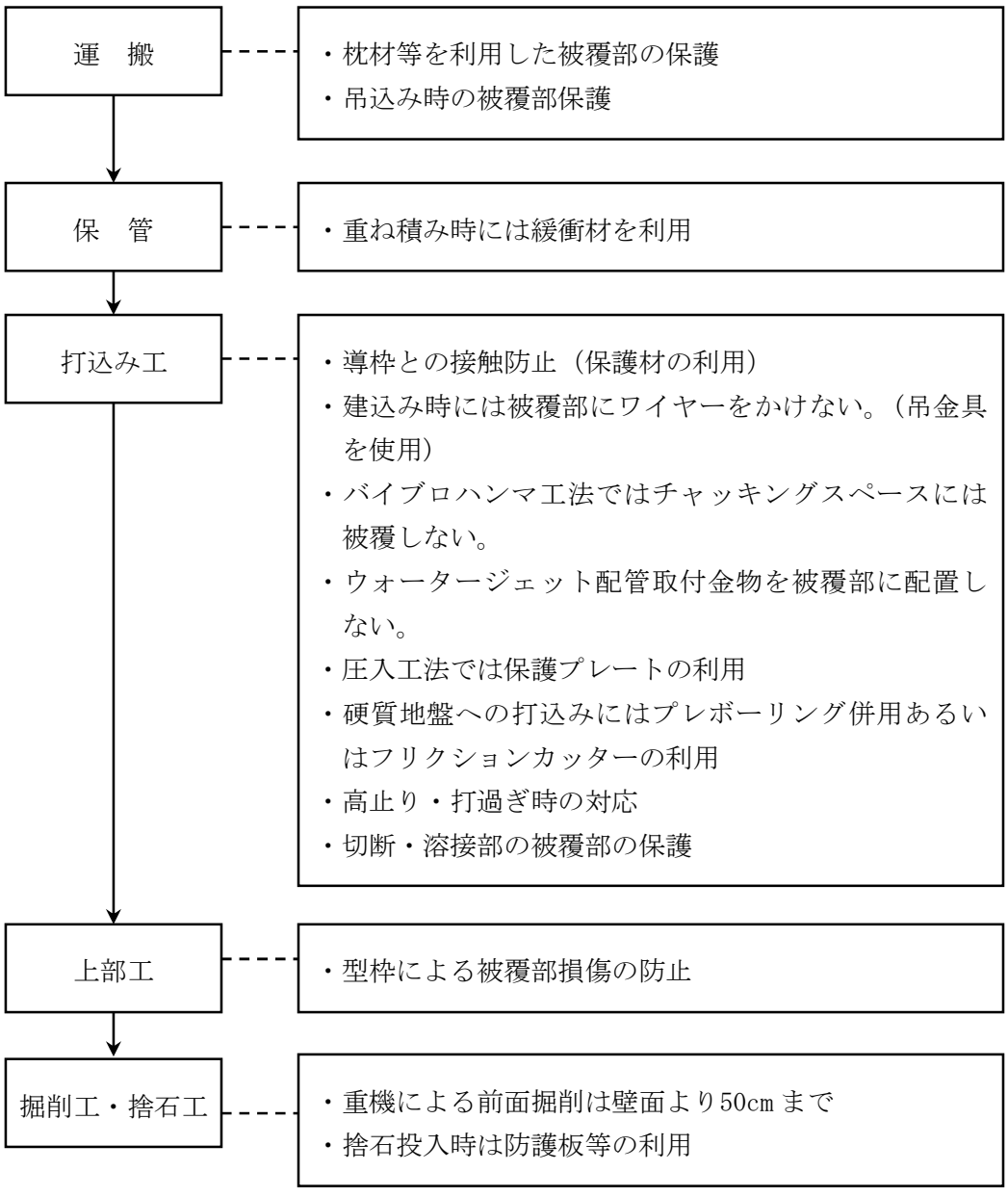


図5.1-1　施工フローと主な留意点

５．１．１　運搬・保管

（１）運搬

重防食製品をトラックや台船等に積込む際には、重防食被覆部が他の鋼材面と接触しないように枕材または緩衝材を使用し、ワイヤーが掛かる部位は緩衝材で保護する。（図5.1-2、図5.1-3）。

裸（無防食）製品等と混載する場合には通常の鋼材を先に下積みし、その上に枕材を置いて重防食製品を上積みする（図5.1-4）。

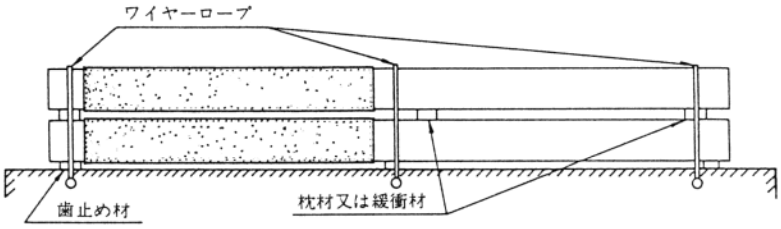


図5.1-2　非被覆部にワイヤーがけする場合

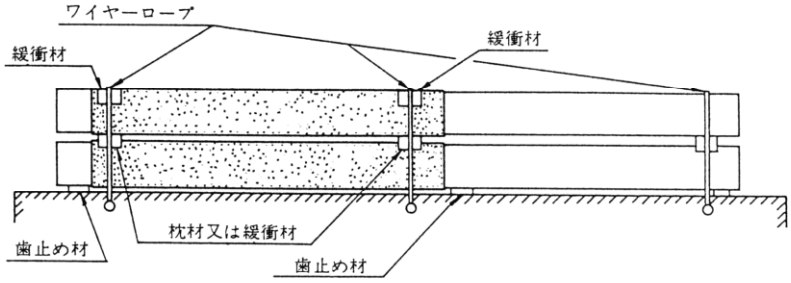


図5.1-3　被覆部にワイヤーがけする場合

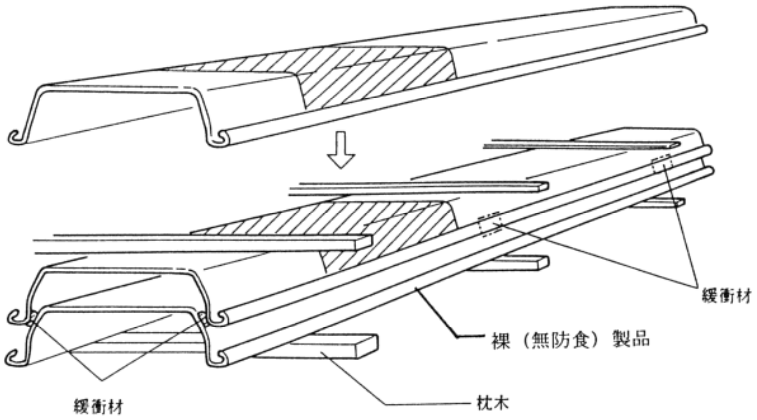


図5.1-4　工場出荷姿の一例

（2）吊り方

荷役作業の安全および被覆部保護等より図5.1-5 のような吊り方を推奨する。

① フックがけの例

管端保護のため、ゴムライニング等で保護したフックを利用する。

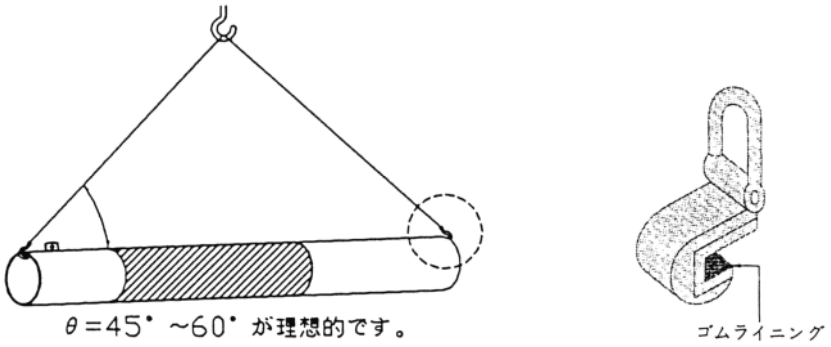


図5.1-5　フックがけの例

② 胴吊りの例

被覆部に直接ワイヤーロープを接触させないために、ゴムベルト（図5.1-6）やナイロンスリング（図5.1-7）を利用する。

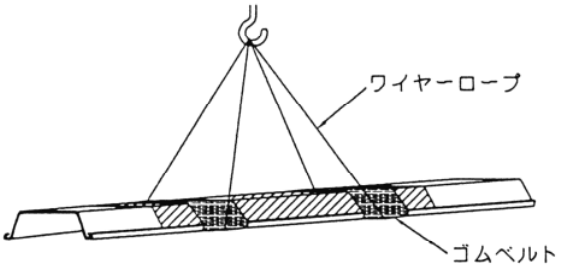


図5.1-6　ワイヤーロープ使用の場合

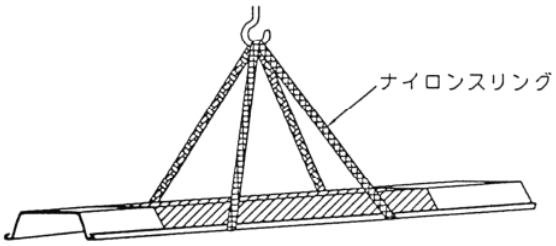


図5.1-7　ナイロンスリング使用の場合

③　吊金具使用の例

図5.1-9 に示す適切な吊金具及び取付位置を選定することにより、図5.1-8 に示す通常通りの吊り方ができる。

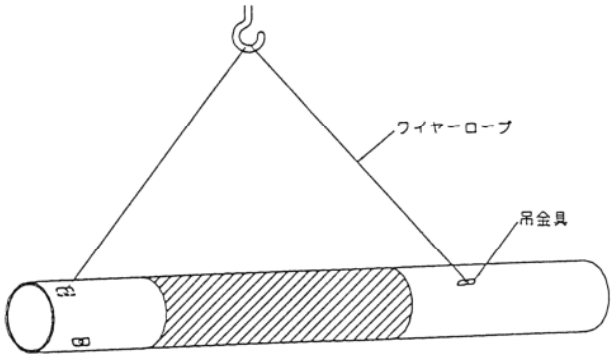
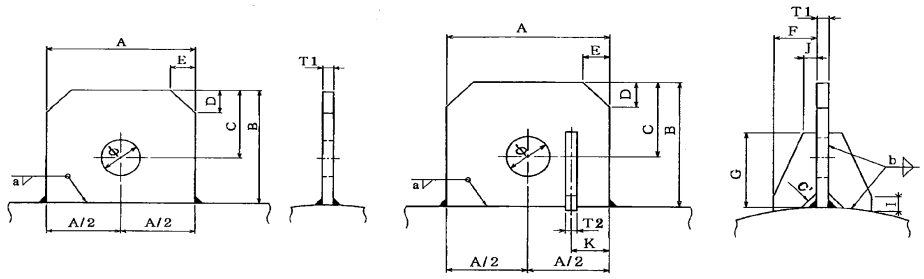
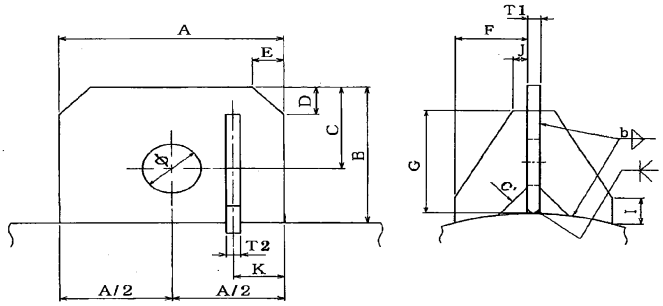


図5.1-8　吊金具使用の場合



（図－イ）　（図－ロ）10～20ton 以下の場合



（図－ハ）20ton 超えの場合

吊金具の形状

吊金具の寸法　（単位：mm）

対象図	最大吊荷重 (ton)	A	B	C	D	E	T_1	φ	a	F	G	I	J	K	T2	C'	b	吊金具質量 kg／箇
図－イ	3　以下	120	100	55	25	25	12	40	6	－	－	－	－	－	－	－	－	1
〃	3～ 5 以下	120	100	55	25	25	16	40	9	－	－	－	－	－	－	－	－	2
〃	5～10 以下	200	150	90	30	30	22	65	15	－	－	－	－	－	－	－	－	5
〃	10～20 以下	300	250	150	50	50	22	80	15	－	－	－	－	－	－	－	－	13
図－ロ	10～20 以下で補強リブ有り	300	250	150	50	50	22	80	15	80	150	30	25	70	22	C30	15	17
図－ハ	20～30 以下	350	250	150	50	50	22	90	－	125	200	50	25	80	22	C50	15	23
〃	30～40 以下	400	300	150	50	50	25	100	－	125	260	50	25	90	22	C50	15	35

図5.1-9　吊金具の寸法形状 [1)]

（3）保管

平坦で荷捌きに支障のない広さの場所に保管する。

重ね積みする場合は図5.1-10、図5.1-11、図5.1-12 に示すように、被覆部に他の鋼材面が接触しないようにゴムベルト等の緩衝材を挟む。

鋼管杭の場合、回転防止のためコッターあるいはストッパーを使用する。

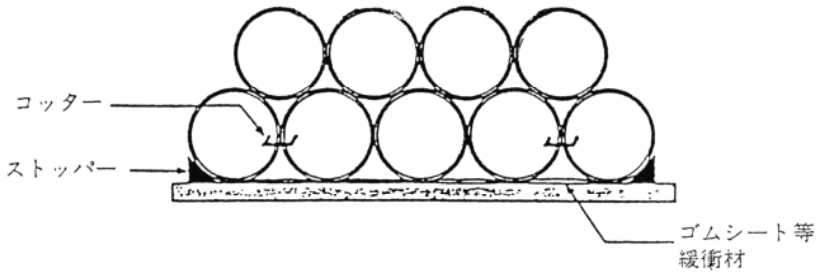


図5.1-10　現場保管の例（鋼管杭）

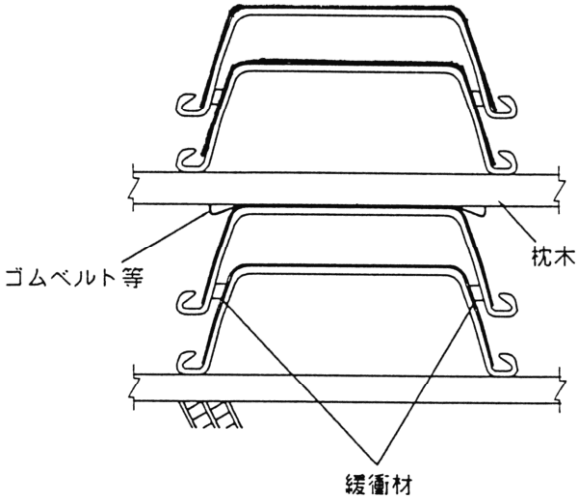


図5.1-11　現場保管の例（鋼矢板凸部被覆）

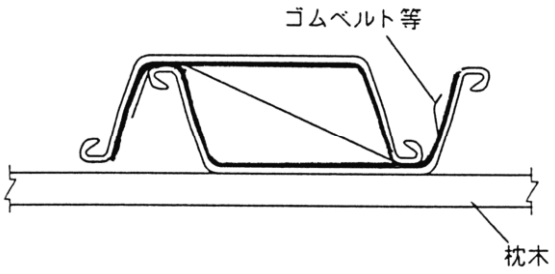


図5.1-12　現場保管の例（鋼矢板凹部被覆）

５．１．２　打込み工

打込み時には、以下のようなことに注意する必要がある。

（１）打込み準備

施工精度の確保を目的として導枠を利用した施工がよく行われる。この際、被覆部が導枠に接触しないように注意する必要がある。接触防止策としては以下のような方法がある。

①位置ぎめ具、間隔保持材の使用（図5.1-13、図5.1-14、写真5.1-2）

②緩衝材の使用（ローラー等、写真5.1-1）

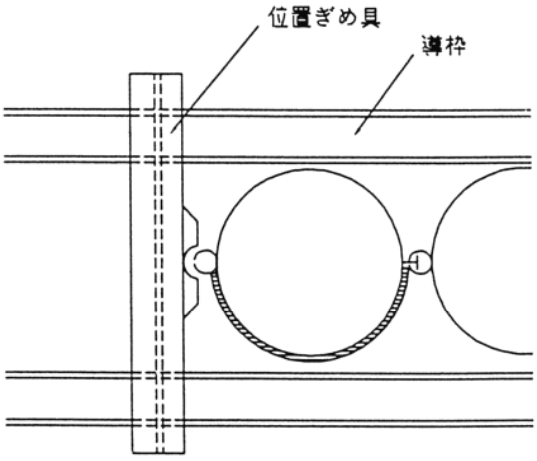


図5.1-13　位置ぎめ具の例（鋼管矢板）

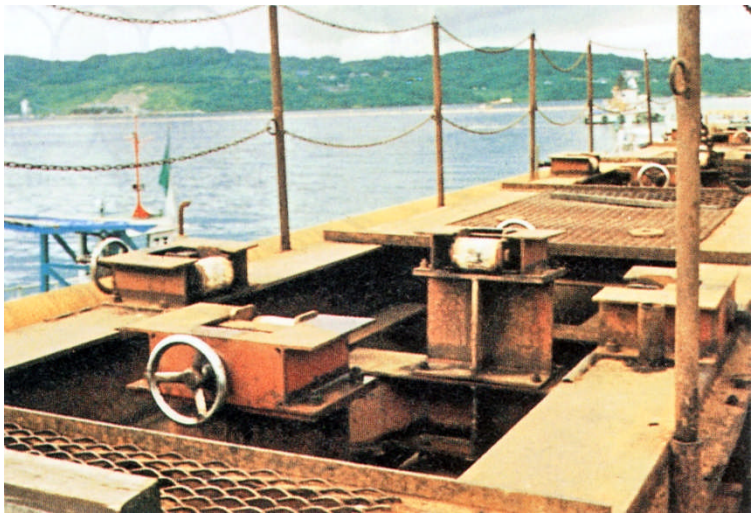


写真5.1-1　ローラー取付状況

写真5.1-2　位置決め具の例

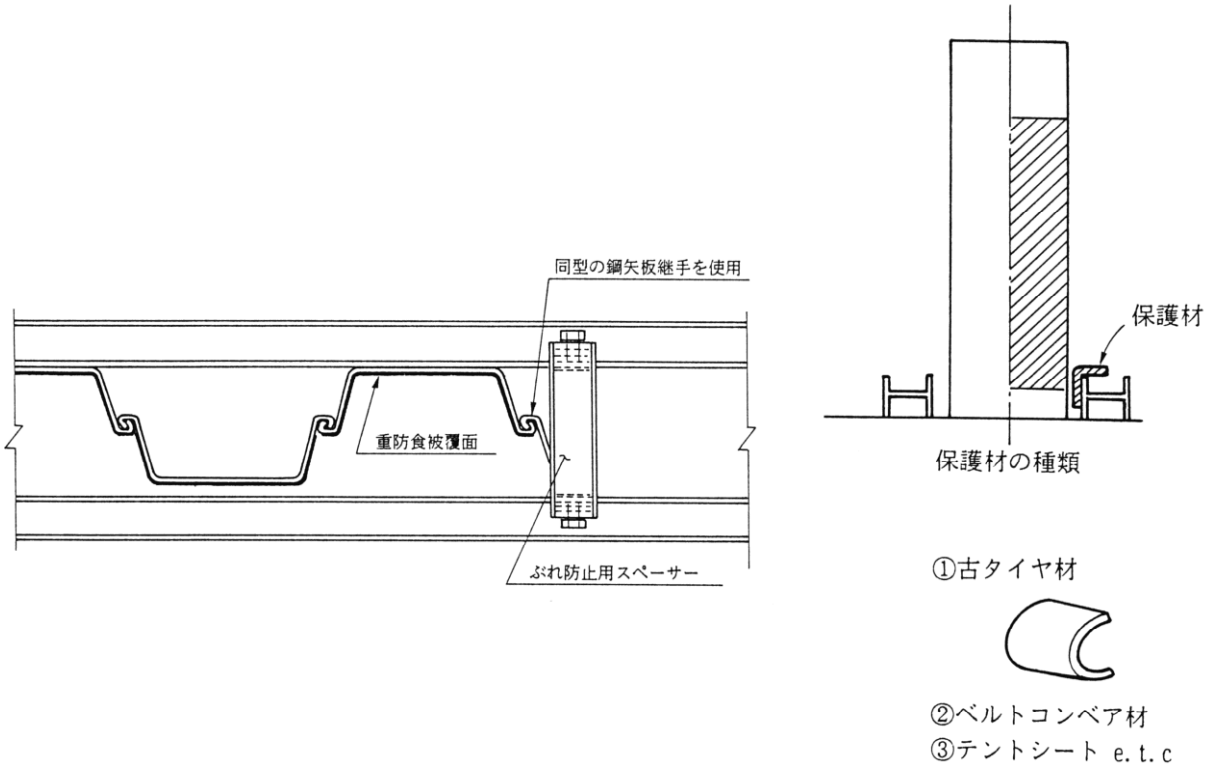


図5.1-14　位置ぎめ具の例（鋼矢板）

また、鋼矢板におけるびょうぶ打ちの場合には、通常の挟み導枠を設置し、重防食鋼矢板を自立できる深さでかつ重防食被覆に導枠が接触しようとした時点まで導枠に沿って連続して20～30枚打込む（図5.1-15）。 その後、導枠を取り外し、打ち下げを再開して所定の位置まで打ち下げる。 よって、導枠位置の設定は重防食被覆部が導枠に触れない高さとする必要がある。

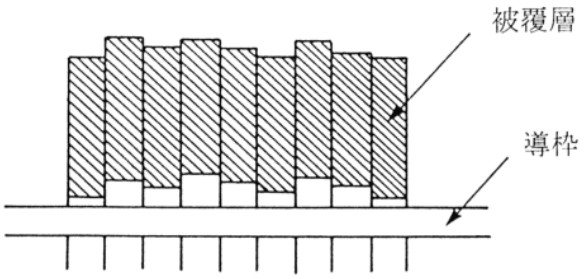


図5.1-15　鋼矢板のびょうぶ打ち

（２）建込み

鋼管については吊金具を溶接で取り付ける方法、鋼矢板については吊穴をあけてシャックル等をセットし吊り上げる方法が望ましい（図5.1-16、図5.1-17）。吊金具の取付位置及び吊穴の位置は、被覆端部から150㎜程度以上離す必要がある（図5.1-18）。

直接ワイヤーロープをかける場合は、被覆部に緩衝材を巻き付け、損傷防止を施したワイヤーロープをかける。

横たえたままの状態で地面を引きずる等、被覆に損傷を与えるようなことは避ける。

打撃工法の場合、ハンマが熱を帯びているため、建込み時に被覆部とハンマとの接触を避ける。

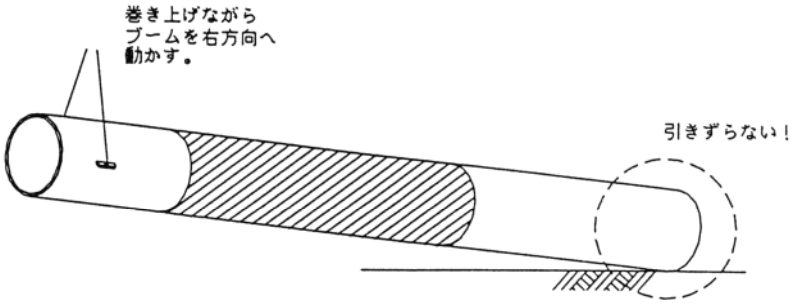


図5.1-16　建込み方（鋼管杭）

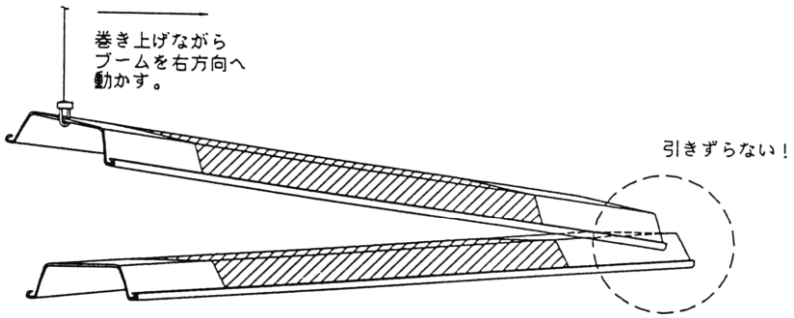


図5.1-17　建込み方（鋼矢板）

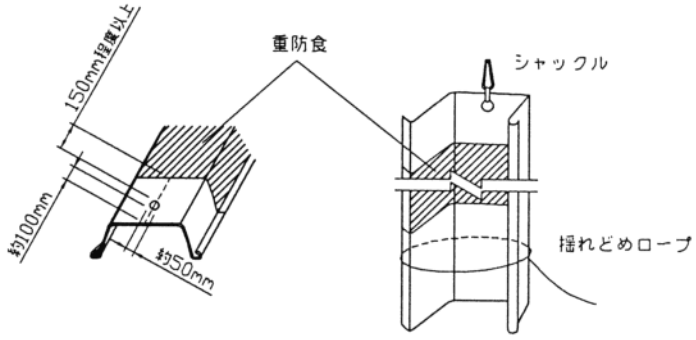


図5.1-18　吊穴の例（鋼矢板）

（３）バイブロハンマ工法

バイブロハンマ工法により杭の打込みを行う場合には、バイブロハンマのチャックによって被覆部に傷を付けないような配慮が必要である。そのためには、製品設計の時点で予めチャッキングスペースには被覆部を設けないようにすることが、補修等の必要もなく、最も合理的である。一般的に利用されているバイブロハンマであれば、チャッキングスペースは400mm 程度あれば十分である（図5.1-19、図5.1-20）。参考までに、主要なバイブロハンマのチャッキングスペースを表5.1-1 に示す。

最近では、鋼管杭・鋼管矢板にも適用可能な鋼管専用チャックが広く普及しており、鋼管径φ600～φ2500mm 程度に対応が可能である（写真5.1-3）。鋼管専用チャックが適用できない場合、あるいはバイブロハンマのチャックが被覆部にかかる時は、チャッキングプレートを取り付け、被覆部に傷が付かないようにする。チャッキングプレートを現場にて取付ける場合は、溶接の熱影響を考慮して、溶接位置を被覆部から150mm 程度以上離す（図5.1-21、図5.1-22）。

表5.1-1　代表的なバイブロハンマのチャッキングスペース

出力（kW）		45	60	90	120	180	200	240
チャッキングスペース（mm）	鋼管チャック	－	－	291	291	310	340	440
	標準チャック	335	385	375	376	－	－	－

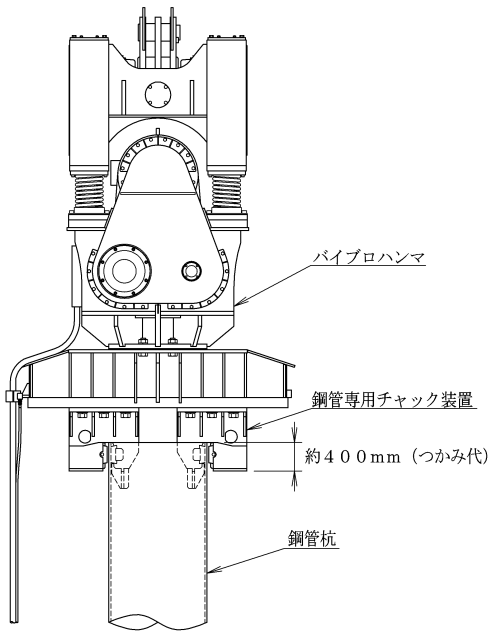


図5.1-19　鋼管専用チャック

写真5.1-3　バイブロハンマ工法施工状況

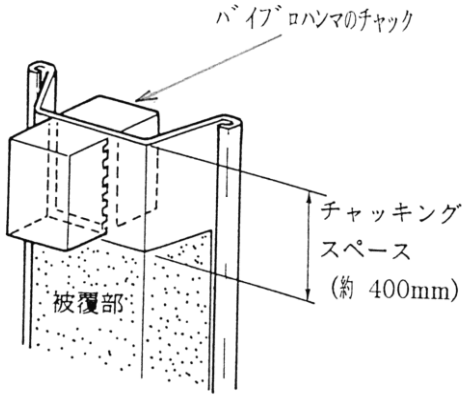


図5.1-20　チャッキングスペース

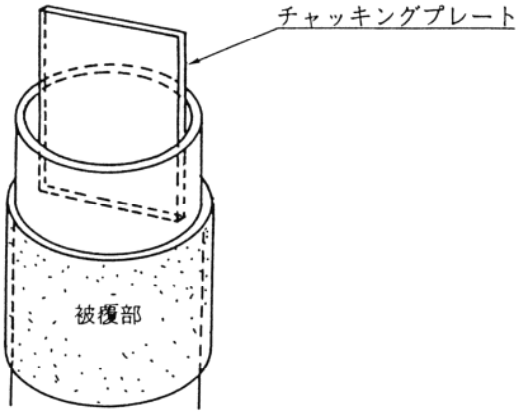


図5.1-21　チャッキングプレート
（鋼管杭工場取付の例）

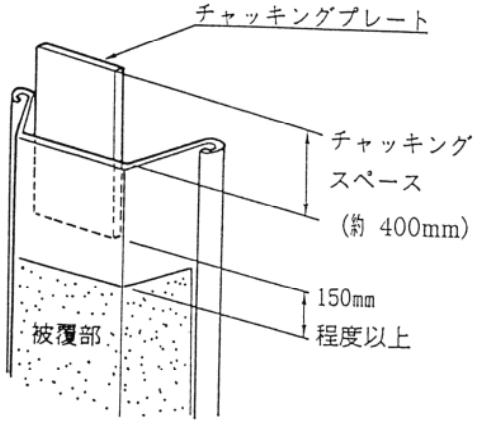


図5.1-22　チャッキングプレート
（鋼矢板現場取付の例）

その他特殊な場合でチャッキングスペースが確保できない場合は、チャックと被覆部との間に、鋼板や硬化プラスチック等（ゴム等の軟らかい材質は不可）の保護プレートを挿入する。（写真5.1-4）

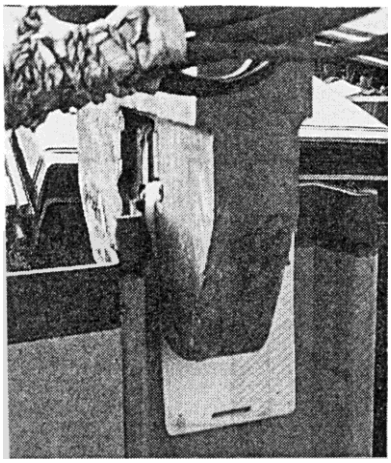


写真5.1-4　保護プレートの挿入

ウォータージェット併用時には、ジェットパイプ取付金具を重防食被覆部へ配置しないようにする必要がある（写真5.1-5）。また、ウォータージェットパイプの縦継ぎ溶接部も同様に被覆部を避けるように配置する。やむを得ず縦継ぎ溶接部が被覆部にくる場合は、縦継ぎ部の溶接ビードを削り、突起を取り除く（図5.1-23）。

写真5.1-5　ジェットパイプの取付

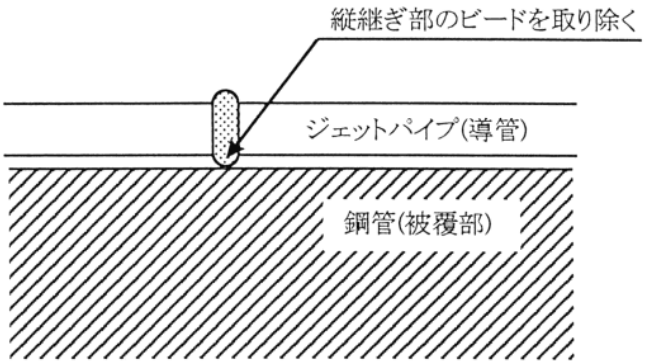


図5.1-23　ウォータージェットパイプの縦継ぎ部ビードの除去

（４）圧入機使用の場合（鋼矢板の例）

重防食鋼矢板を圧入機で打設する場合、直接チャック爪でつかむと被覆部に傷が発生する。その対策として、被覆面とチャック爪との間にプラスチックや鋼板等の当て板を施してから施工する（写真5.1-6）。

反力用チャッキング部については、バイブロハンマ使用の場合と同様の注意を払う必要がある。また硬質地盤等で圧入力が大きくなるような場合は、ウォータージェット等の補助工法を併用した方が圧入力も小さくなり効果的である。この際、ウォータージェット用のパイプを取り付ける時、重防食被覆部に傷をつけないよう注意する必要がある。

写真5.1-6　圧入機の施工例

（５）硬い地盤への打込み

通常の地盤では、打撃、振動によって被覆が剥がれることはない。しかし、硬い地盤に打込む場合には、損傷、剥離の危険性が考えられる。したがって、地表面付近に比較的大きな砂利層、転石、敷きバラス等がある場合は、これを取り除いてから施工する。

地中に比較的大きな砂利層、転石、硬い砂層（Ｎ値30以上）がある場合は、プレボーリング等の事前処置をするか、フリクションカッターを取り付ける（図5.1-24）。

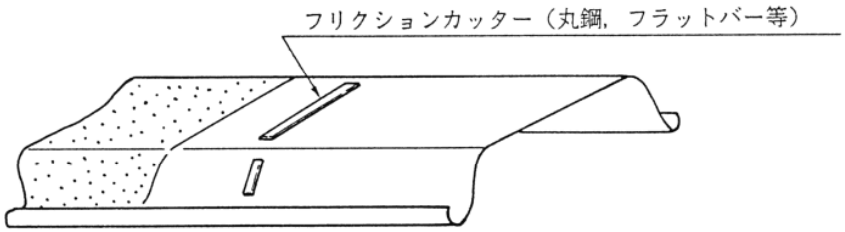


図5.1-24　フリクションカッターの例

５．１．３　高止り・打ち過ぎ時の対応

高止り・打ち過ぎが発生した場合、設計上の防食レベルとずれが生じるため、重防食被覆の過不足が生じる（図5.1-25）。

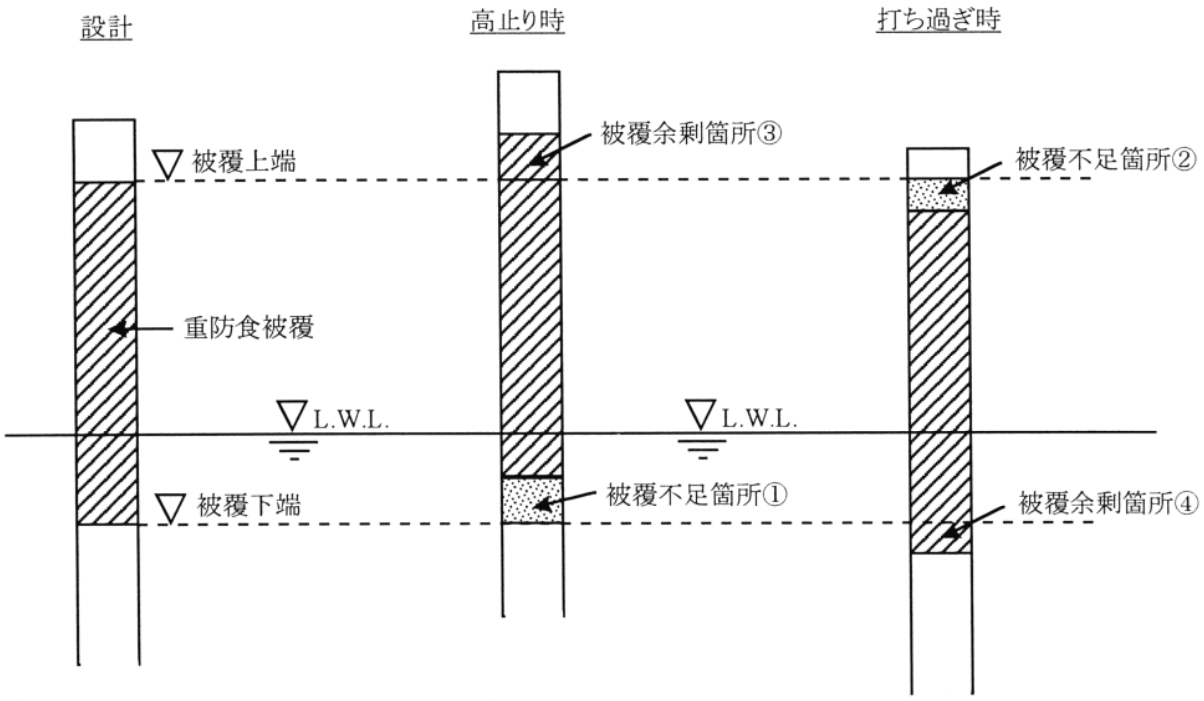


図5.1-25　高止り・打ち過ぎによるレベルのずれ [2)]

この場合、表5.1-2 に示すような対応を行う必要がある。

表5.1-2　高止り・打ち過ぎ時の対応

箇　　所	対　　応
被覆不足箇所①	6.2.2 重防食被覆の補修の項目に従い補修する。 但し、電気防食が併用され、不足箇所にその防食効果が確実に期待できると判断される場合、補修の必要はない。
被覆不足箇所②	6.2.2 重防食被覆の補修の項目に従い補修する。
被覆余剰箇所③	必要に応じて次項の方法により重防食被覆を剥離する。
被覆余剰箇所④	防食設計上は安全側のため、対策不要。

以下に重防食被覆部の剥離および切断方法の要領を示す（ポリエチレンの例　図5.1-26～28、写真5.1-7～10）。

①切断位置から15cm 程度以上離れた位置にカッターまたはタガネ等により被覆に切欠きを入れる。

②タガネ、ヘラ等を用い、切欠きに沿って被覆をはがす。この際、被覆部の裏面からバーナーにより加熱して接着材を硬化させると容易にはがすことができる。

裏面からの加熱が困難な場合は、表面から恒温器などにより加熱する。

③切断時の火花やノロから被覆を保護するために切断位置近傍の被覆に濡れた布を巻く。

④通常の方法（ガス切断機）により切断する。

⑤切断箇所を冷却する。

なお、被覆部をはがさず切断することは可能であるが、被覆部が燃焼したり、熱影響を受けるため、避けた方が望ましい。

また、ウレタンエラストマーの場合は、②の加熱工程を省き、タガネ等により剥離する。

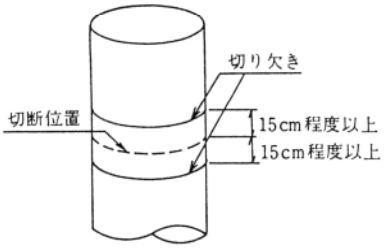


図5.1-26　切り欠き

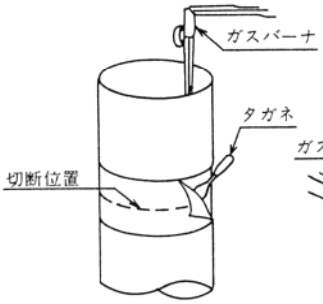


図5.1-27　被覆の剥離

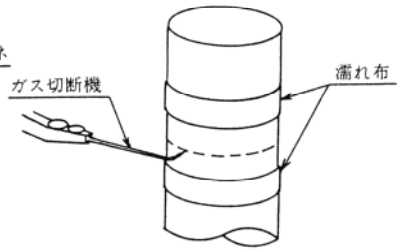


図5.1-28　被覆の保護

写真5.1-7　カッターによる切り欠き

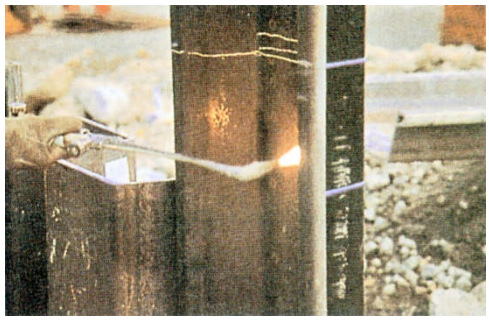


写真5.1-8　バーナーによる加熱

写真5.1-9　被覆部のはがし

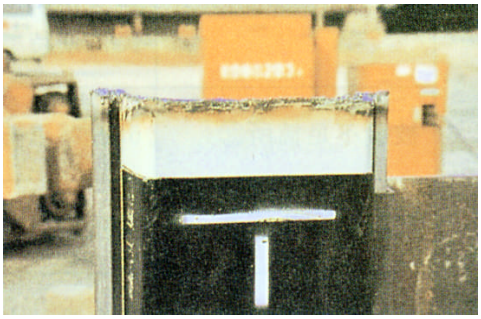


写真5.1-10　鋼矢板頭部切断

なお、設計上必要な重防食被覆範囲に施工上のバラツキを考慮して、現地補修を必要最小限に抑えるため余裕を見込んだ製品設計をすることが望ましい（図5.1-29）。

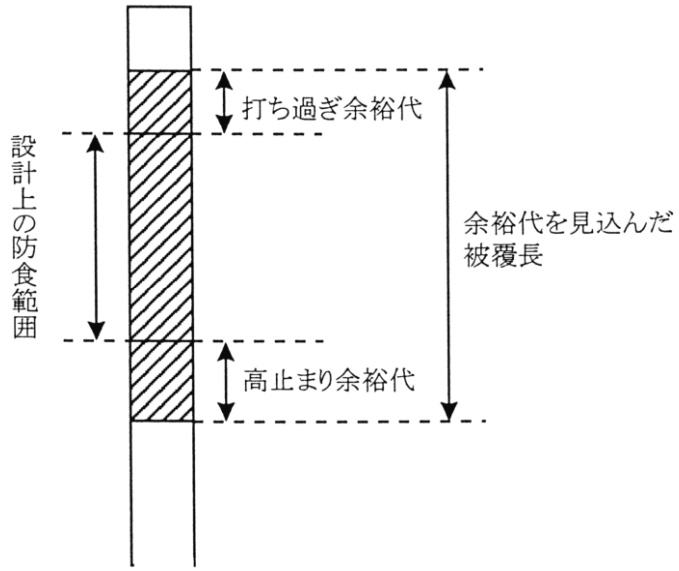


図5.1-29　施工上のバラツキを考慮した被覆範囲 [2)]

５．１．４　上部工打設時

上部コンクリートの打設に当たり、陸側では一般に土砂を埋め立てた後、捨てコンクリートを打つため底面型枠は不要であるが、海側には複雑な形状をした型枠工が必要である（図5.1-30、図5.1－31）。重防食被覆がある場合、底面型枠を支持するブラケットが溶接で取り付けられないため、吊り型枠等の方式で施工する必要がある（図5.1-32）。

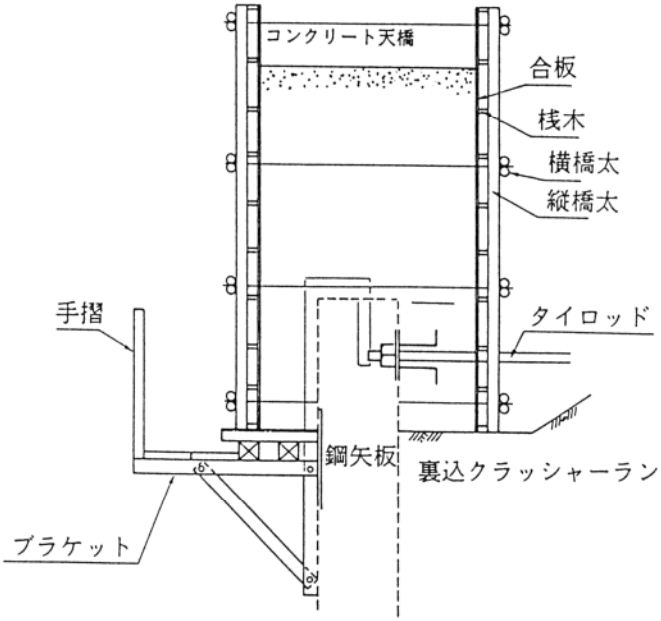


図5.1-30　吊形鋼方式例

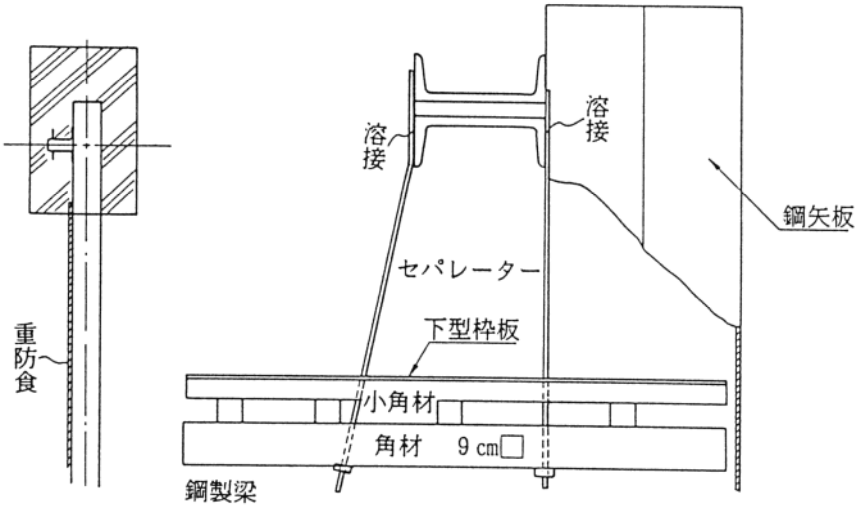


図5.1-31　腹起しからの吊り方式例

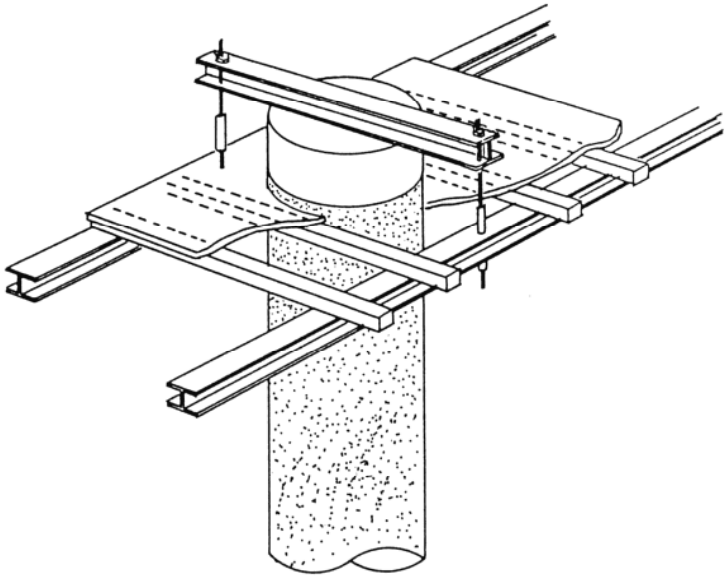


図5.1-32　吊り型枠による方法

５．１．５　溶接

被覆部は高温に弱いため、直接溶接することはできない。やむを得ず、ブラケット、コーピング用鉄筋等を現場溶接する場合は、被覆部への熱影響あるいは、スパッタ等の対策を講じた後に溶接する必要がある。

被覆部への現地溶接は、切断同様に被覆部を剥ぎ、溶接部近傍の被覆を濡れた布等で覆い、スパッタ等から保護する。被覆部を剥ぐ際には、なるべく裏面から加熱するようにし、困難な場合は恒温器等により表面から加熱する。

５．１．６　前面地盤の掘削、捨石

前面掘削に当たっては、重機による掘削は壁面より約50cm までとして残りの土砂はジェット水や手作業により取り除く（図5.1-33）。また、ウォータージェットによる排土は、被覆面に直接当てないよう、また被覆端部が剥離しない方向に向けるように注意する必要がある。

捨石の際には、捨石が被覆面に直接当たらないように適当な防護板等で保護する必要がある（図5.1-34、図5.1-35、写真5.1-11）。

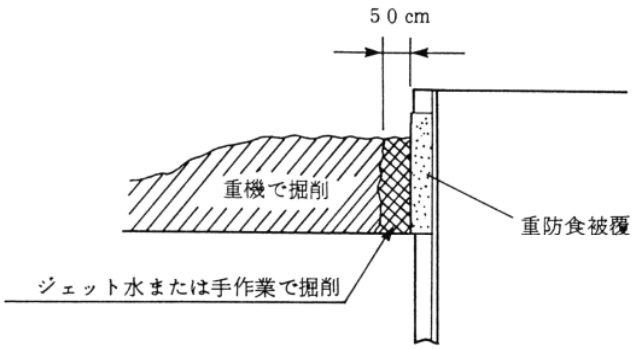
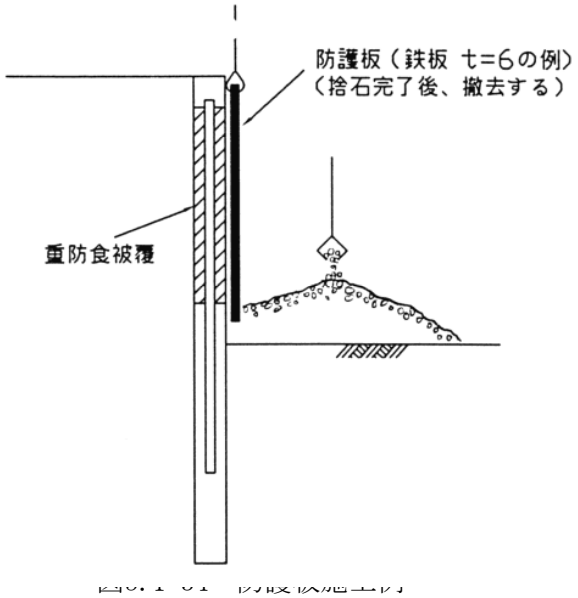


図5.1-33　前面側掘削の例



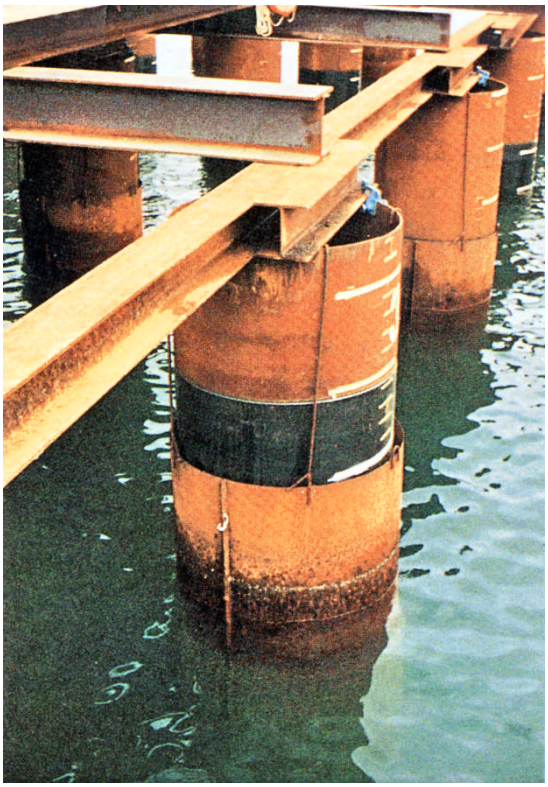


写真5.1-11　防護方法の例

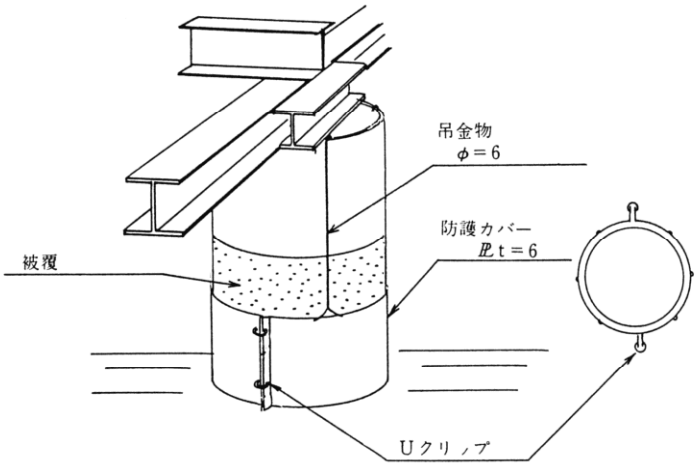


図5.1-35　防護方法の例

５．１．７　補修

（１）傷の判定方法

重防食被覆材料のポリエチレン及びウレタンエラストマーは、かなり高い硬度と優れた耐衝撃性を有しているが、鋼材ほどの硬さはないため、できる限り傷を付けないように注意することが必要である。万一、傷が付いた場合には傷の種類に応じて補修が必要かどうかを判定する。

また、施工上計画的に重防食被覆部を剥がした箇所にも補修の必要がある。

（２）補修方法の判定

補修の必要があると判断された場合には、①被覆材料（ポリエチレンかウレタンエラストマーか）、②傷の位置（水面上か水中か）、③傷の形状・大きさにより、適切な補修方法を選択する。

詳細は、第６章の６．２．２項（重防食被覆の補修）を参考のこと。

５．２　電気防食の施工

５．２．１　現場作業者

現場作業者は、各工種に適合した有資格者で、現場作業に対する知識、および経験を有する者でなければならない。

陽極の取り付けを水中溶接により行う場合、作業は潜水作業となるため溶接の技能検定(JIS Z 3801)に合格した潜水士であること。また、玉掛け作業、クレーン作業等の作業がともなう場合は、それぞれの有資格者が必要である。

５．２．２　作業準備

工事着工前に関係官庁への届け出を行うとともに、必要に応じ作業用の台船、資材置き場および作業員詰所等の準備を行う。

工事着工前に港湾法および港則法に基づく手続きが必要である。手続きは、港湾管理者および所轄の海上保安部に対し、港湾法および港則法に準拠した作業許可申請書を提出し、許可を受けた後に工事に着手する。また、資材置場および作業員詰所を設置する場合は、現場の管理部署へ届け出を行う必要がある。

５．２．３　施工方法の選定

現場の状況に適した施工方法を選定し、作業の安全確保に努めなければならない。

陽極を取り付ける際、陸上から陽極を吊り下げた方がよい場合と、台船を使用した方がよい場合とがある。現場の状況に応じた適切な施工法を選定する。

５．２．４　施工手順

（１）流電陽極方式

陽極の取付は一般的には水中溶接による現場施工であるが、陸上で製作されるジャケット構造物等については、工場等で陽極を取り付けることもある。

一般的な施工手順のフローを図5.2-1 に示す。

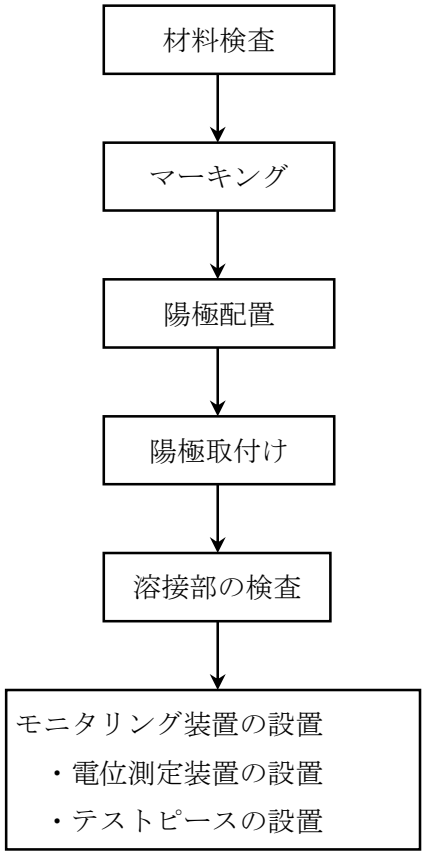


図5.2-1　電流陽極方式の施工手順

①マーキング

設計図書に基づき、陽極の取付け位置および取付け水深のマーキングを行う。

②陽極配置

陽極の吊り下げは、クレーン等によって海面下付近まで吊り下げ、海面上に待機した潜水士がアクアリフター等に吊り替え、陽極取付け位置まで移動し、吊り下げる。

③陽極取付け

水中溶接によって陽極を取り付ける場合は、陽極の取付箇所に付着している海生物や、荒サビ等を除去した後に取付金具を溶接する。

④溶接部の検査

溶接完了後は、フラックスを潜水士に除去させるとともに、その溶接状況を目視または写真撮影によって確認する必要がある。

⑤モニタリング装置の設置

1)電位測定装置の設置

新設構造物での電位測定装置の設置は、上部コンクリート打設前に、防食対象である鋼矢板等に丸鋼を溶接して立ち上げる。丸鋼は他の鉄筋と識別できるように白ペイント等で塗装するとよい。立ち上げた丸鋼は、上部コンクリート天端に設ける電位測定装置に溶接して設置する。

また、既設構造物に対する電位測定装置の設置は、防食対象である鋼矢板等に丸鋼を溶接して躯体に沿わせて立ち上げるか、または、上部コンクリート中の配筋（鉄筋）と鋼材が通電試験等から電気的に導通されていることが確認された場合は、鉄筋に溶接して電位測定装置を設置してもよい。

2)テストピースの設置

防食対象施設の防食効果を確認するには、電位測定以外に定量的に防食効果が確認できるテストピースや陽極の発生電流を経時的に測定するなどのモニタリング装置を設置することがある。モニタリング装置を設置する場合は、維持管理計画にしたがって設置するものとする。設置位置は、電位測定装置と隣接した位置に設置することで電位測定結果と併せた防食効果の確認ができる。

（２）外部電源方式

外部電源方式による電気防食装置は、電気設備の技術基準、第78条、同解釈236条に準拠し施工しなければならない。

外部電源方式による電気防食装置は、適用される事例が少なくなってきているため、ここでは施工手順などについては省略した。（詳細は付・9を参照）

５．２．５　安全対策

水中や海上での作業がほとんどであることから、安全対策には十分な配慮が必要である。

①潜水士の健康管理には、十分な配慮が必要である。また、水深-10ｍ以下での作業では、作業時間に応じた減圧時間が必要である。

②作業海域での気象、海象、水路状況、船舶の航行状況等を十分に把握して、無理のない施工計画を立案する。例えば、潜水作業中は、標識を掲げるとともに警戒船および見張り員を立て、また、気象状況に留意して、風速、波高、視界等から適宜判断して必要に応じて作業を中止する等、労働災害の未然防止に万全を期するほか、労働安全衛生規則、港則法、海洋汚染および海上災害防止に関する諸規則を遵守して作業を行う。

５．２．６　竣工検査

施工にともなう関係書類の検査と、防食対象施設の電位測定によって合否の判定を行う。

①書類検査は、設計図書に基づいて施工されていることの工事記録写真等にて、使用材料が設計上の性能を満足していることを試験成績書等にて確認する。

②電位測定は、防食対象施設全域が規定の防食電位（人工海水塩化銀電極基準で-780mv）より卑（マイナス側）な値であるかを確認する。

＜参考文献＞

1)(社)鋼管杭・鋼矢板技術協会：「鋼管杭・鋼管矢板の付属品の標準化」(2009)
2)(財)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)」

第６章　維持管理

６．１　維持管理の手順 ---------- ６－　１
６．２　重防食被覆の維持管理 ---------- ６－　５
６．２．１　点検・調査の方法 ---------- ６－　５
６．２．２　重防食被覆の補修 ---------- ６－　８
６．３　電気防食の維持管理 ---------- ６－１１
６．３．１　点検・調査の方法 ---------- ６－１１
６．３．２　電気防食装置の補修 ---------- ６－１５
６．４　無防食鋼構造物（腐食しろで対応した鋼構造物）の維持管理 --------- ６－１５
６．４．１　対象と目的 ---------- ６－１５
６．４．２　点検・調査の方法---------- ６－１６
６．４．３　補修・補強 ---------- ６－２２

参考文献 ---------- ６－２５

第６章　維持管理

港湾鋼構造物は、海水に接する厳しい腐食環境下にあることから、適切な維持管理により鋼材の腐食を抑制し、要求性能を確保する必要がある。

本章では重防食被覆と電気防食より構成される鋼構造物の維持管理について、６．１～６．３項で解説する。腐食しろで対応した無防食鋼構造物（防食を施していないという意味から、以下無防食鋼構造物と称する。）の維持管理は６．４項で解説する。

６．１　維持管理の手順

重防食被覆と電気防食より構成される鋼構造物の維持管理フローを図6.1-1 に示す。

（１）維持管理計画の策定

重防食被覆および電気防食より構成される鋼構造物の維持管理は、維持管理計画に基づき防食の状態を計画的に点検診断を行うことで、その状態を把握し、劣化や損傷が確認された場合には適切に補修を行って防食を健全な状態に維持しなければならない。維持管理計画を策定するに当たって参考となる指針としては以下のものが挙げられる。

①「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」、
（財）沿岸技術研究センター、2009）
②「海洋鋼構造物の防食指針・同解説（案）（飛沫帯・干満帯編）」、
（建設省土木研究所、鋼管杭協会、1990）
③「海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書　－海域における土木鋼構造物の電気防食指針（案）・同解説－」、
（建設省土木研究所、（財）土木研究センター、1991）
④「東京港腐食対策手引書」、（東京都港湾局、1998）

（２）防食の点検診断

点検診断とは、防食の変状の有無を点検・調査により把握し、劣化度を評価して、性能を評価することである。港湾鋼構造物の防食に関する点検診断の位置付けを図6.1-2に示す。なお、点検診断は表6.1-1に示す6種類に分類される。点検診断では、防食工の変状、劣化を対象として、点検・調査を実施し、防食工の現状の把握および劣化判定を行うとともに、その性能を評価して劣化進行予測を実施する。

初回点検は竣工直後において防食および施設全体に異常が無いことを確認することを目的に行う。また既設構造物で維持管理計画を策定する際は、防食効果の状況を把握し、併せて施設全体の異常の有無を確認する。

日常点検は日常の巡回において広範囲にわたって、目視により防食の変状を発見することを目的に行う。

一般定期点検診断は、目視・簡易計測により防食の有無を確認し、防食の劣化度判定を行うことを目的に行う。

一般臨時点検は、地震時や荒天時の直後にできるだけ早い時期に、可能な限り広範囲にわたって、目視により防食の変状の有無や程度を把握することを目的に行う。

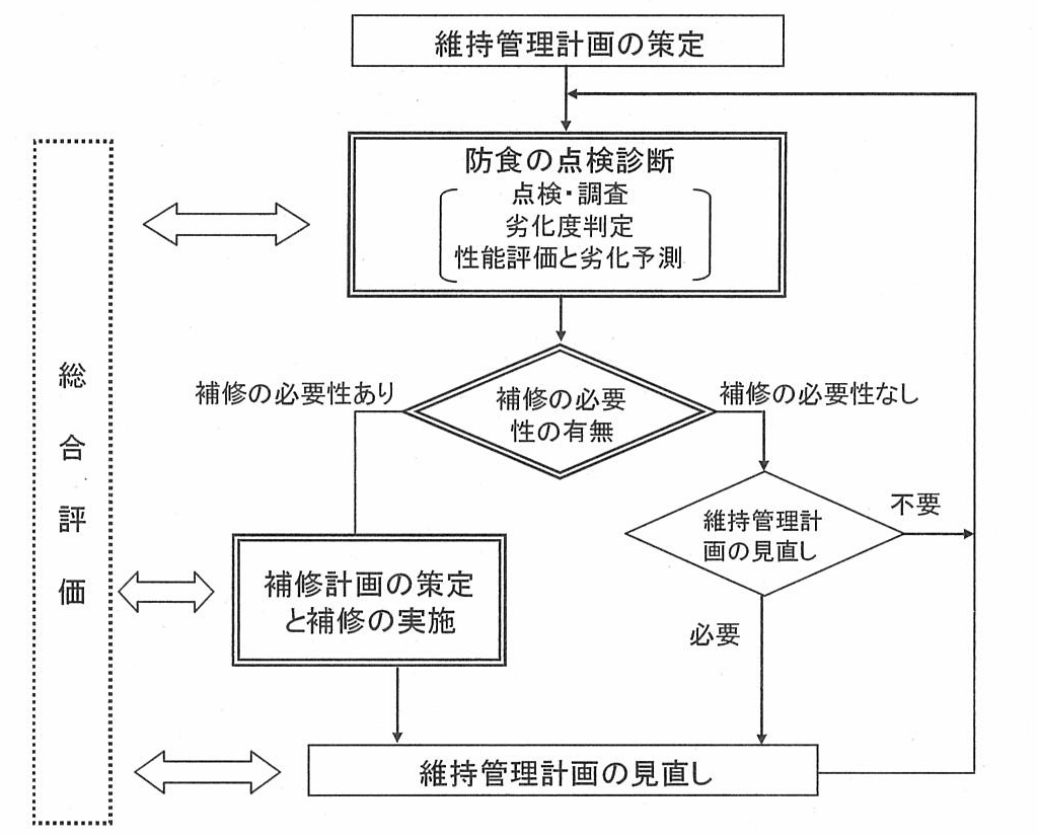


図6.1-1　港湾鋼構造物の防食の維持管理フロー[1)]

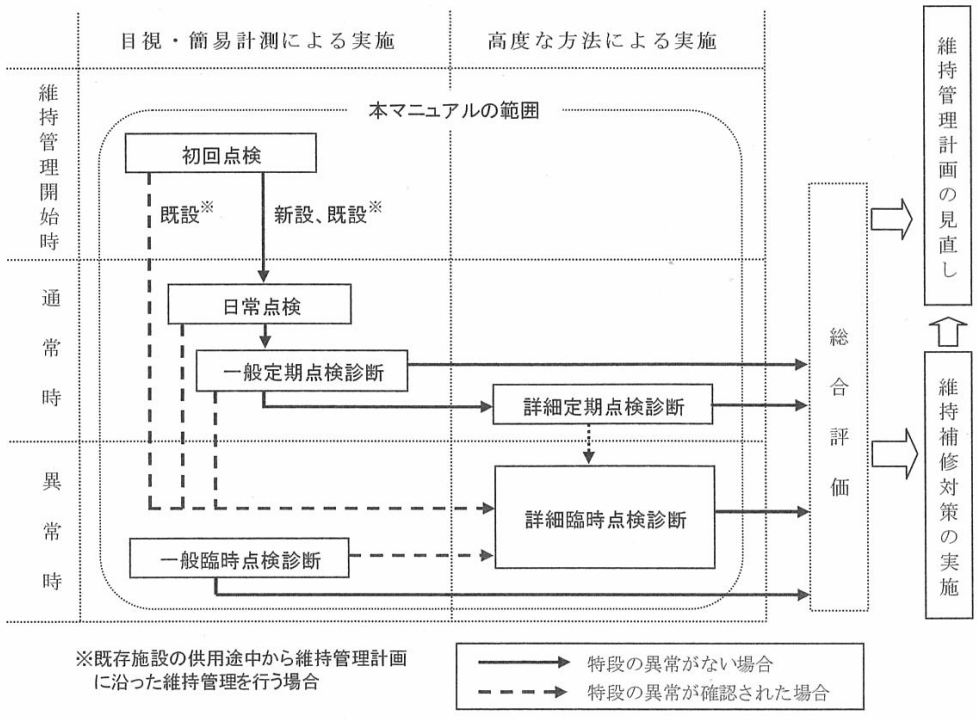


図6.1-2　港湾鋼構造物の防食工に対する点検診断の位置付け[1)]

詳細定期点検診断は、日常点検や一般定期点検診断では実施困難な部分を含めて、各種計測機器や専門家による高度な方法により実施する。

詳細臨時点検診断は、一般および詳細定期点検診断、既設構造物の初回点検、一般臨時点検診断の結果、特段の異常が確認された場合、および想定外の異常が確認された場合に実施する。

なお、現時点では防食の劣化進行予測などの性能評価を精度良く行うには十分なデータが揃っていない状況にあるが、今後の維持管理段階で得られるデータの蓄積を図ることで、より精度の高い性能評価を行うことが可能になるものと期待される。

（3）補修計画の策定と補修の実施

維持補修においては、事前に補修のための調査を行い、その結果に基づき策定した補修の計画に従って実施する必要がある。

（4）総合評価

補修などの実施の有無や実施の時期などについては、施設の維持管理計画などにおける施設全体を対象とする総合評価において総合的な判断に基づき決定される。したがって、防食の維持管理における点検診断の結果は、総合評価において総合的に評価され、その結果は、防食の維持管理計画に適切に反映されなければならない。

表6.1-1　点検診断の分類[1)]

点検診断の種類	内　　容	点検診断の方法
初回点検	建設直後の竣工段階，あるいは既設構造物に対する維持管理計画の策定段階において，防食を含む構造物全体について維持管理の初期状態の把握を行う．既設構造物に対しては履歴調査も併せて行う．	目視・簡易計測による
日常点検	日常の巡回で点検が可能な箇所について防食の変状の有無や程度の把握を行う．	
一般定期点検診断	日常点検では把握し難い細部を含めて防食の変状の有無や程度の把握を行い，劣化度の判定を行う．	
一般臨時点検診断	地震時や荒天時の直後のできるだけ早い時期に，防食の変状の有無や程度の把握を行う．	
詳細定期点検診断	日常点検や一般定期点検診断では実施困難な箇所も含めて，防食の変状の有無や程度の把握，変状の原因推定や劣化進行予測のデータを収集することを目的に，比較的長い間隔で実施する．	高度な方法による
詳細臨時点検診断	一般および詳細定期点検診断，既設構造物の初回点検，一般臨時点検診断の結果，特段の異常が確認された場合，および想定外の異常が確認された場合に実施する．	

６．２　重防食被覆の維持管理

６．２．１　点検・調査の方法

重防食被覆は、ポリエチレン被覆、ウレタンエラストマー被覆ともに被覆の厚さが2.0～2.5㎜ と厚く、また工場被覆のため品質のばらつきが小さく、安定している。また、重防食被覆は耐候性に優れており、劣化が起こりにくい。

重防食被覆に関して問題となるのは、船舶や流木等の衝突による割れ、疵、剥離等の物理的損傷と、被覆損傷部や被覆密着不良部を起点として物理的および化学的作用による被覆の剥離、膨れ、割れなどの欠陥、被覆欠陥部の鋼材の腐食などの現象があげられる。重防食被覆における点検診断の種類と点検・調査項目を表6.2-1のように目視・簡易計測による実施および高度な方法による実施に分けて示す。重防食被覆の点検・調査は被覆の欠陥、被覆欠陥部の鋼材の腐食などの現象に着目した目視調査を主体に行う。

表6.2-1　重防食被覆の点検診断の種類と点検・調査項目[1)]

実施区分	項目＼種類		初回点検	日常点検	一般定期点検診断	詳細定期点検診断	一般臨時点検診断	詳細臨時点検診断
目視・簡易計測による	目視調査（海面上）	被覆の表面損傷	◎	○	◎	◎	◎	◎
		被覆の剥離	◎	○	◎	◎	◎	◎
		被覆の膨れ	◎	○	◎	◎	◎	◎
		被覆の割れ	◎	○	◎	◎	◎	◎
		鋼材の腐食	◎	○	◎	◎	◎	◎
	打音検査		○	—	○	◎	○	◎
	その他変状チェック		○	○	○	○	○	○
高度な方法による	目視調査（海面下）	被覆の表面損傷	—	—	—	◎	—	◎
		被覆の剥離	—	—	—	◎	—	◎
		被覆の膨れ	—	—	—	◎	—	◎
		被覆の割れ	—	—	—	◎	—	◎
		鋼材の腐食	—	—	—	◎	—	◎
	打音検査		—	—	—	◎	—	◎
	その他変状チェック		—	—	—	○	—	○
	機器調査	膜厚測定	—	—	—	◎	—	◎
		付着性試験*1	—	—	—	○	—	○
		引張強さおよび伸び測定*1	—	—	—	○	—	○
		吸水率測定*1	—	—	—	○	—	○
		体積抵抗率測定*1	—	—	—	○	—	○

◎：実施
○：可能な範囲で実施
*1 の調査項目は，モニタリング用テストピースがある場合に実施する．

（1）目視・簡易計測による点検

定期的に実施する一般点検、および台風、地震、船舶の衝突等の異常時に実施する臨時点検では、目視観察が基本となる。表6.2-2に目視調査と打音検査の方法を示す。点検時期は干潮時などの水位が低いときが望ましい。目視観察においては、重防食被覆の割れ、変形、剥離や錆等の項目について注意して観察する。可能な場合は構造物の近傍で木製あるいはプラスチック製のハンマによる打音検査を行うと良い。更にこれらの部位の代表的な箇所および変状箇所については写真撮影を行う。有害な異常が発見された場合には、早急に詳細調査を実施し適切な対策を講じる必要がある。

（2）高度な方法による点検

詳細定期点検診断、詳細臨時点検診断では、海面下での目視調査、打音検査および機器による点検調査を行う。機器による点検・調査の内容を表6.2-3に示す。機器による点検・調査が可能な部位では、目視調査と打音検査に加えて被覆膜厚測定を併用することが望ましい。さらにモニタリング用のテストピースを設置している場合は、付着性試験、引張強さおよび伸び、吸水率、体積抵抗率の定量的な測定を行うことで、被覆の劣化状況を総合的に判断することができる。

詳細点検診断は、5～10年に１回程度、全ての鋼構造物について行うことが望ましいが、不可能な場合には、できるだけ構造物の状況を代表できる箇所を選定して行う必要がある。

（3）点検診断における性能評価

重防食被覆の劣化の程度は、大きさや発生密度を数段階に分類する方法を用いる。重防食被覆の劣化度判定例について表6.2-4に示す。劣化度は点検・調査の場所および部位ごとに異なるので[2)]、調査場所全体としての劣化度について総合的な判定を行うことも重要である。

表6.2-2　重防食被覆の目視調査と打音検査の内容[1)]

項目	内容	参考規格・基準
目視調査	全体を確認し，目視で確認できる劣化（被覆の損傷・剥離・膨れ・割れ，鋼材の腐食）を記録する． 可能な場合は，構造物の近傍で打音検査を行いながら，個々の劣化の範囲を特定する．	JIS K5600-8-1～8-6:1999
打音検査	木製あるいはプラスチック製のハンマによる検査：打音により周囲とは明らかに異なる音がする部位は被覆の浮きや剥離などの欠陥が推定される．	

表6.2-3　重防食被覆の機器による調査の内容[1)]

項目		内容	参考規格・基準
膜厚測定		電磁式膜厚計による測定：被覆膜厚の定点測定を行うことで経時での損耗量が把握できる． 各部位（干満帯・飛沫帯）の測定が必要である．	
モニタリング試験	付着性試験	ピール強度試験：ポリエチレン被覆の付着強度を評価する．接着劣化の傾向を把握する指標として有効である． プルオフ試験：ウレタンエラストマー被覆の付着強度を評価する．接着劣化の傾向を把握する指標として有効である．	
	引張強さおよび伸び	プラスチックの引張試験方法：JIS K 7113 によって測定する．被覆の劣化傾向を把握する指標として有効である．	JIS K 7113
	吸水率	プラスチック－吸水率の求め方：JIS K7209 によって測定する．被覆の劣化の傾向を把握する指標として有効である．	JIS K7209
	体積抵抗率	熱硬化性プラスチック一般試験方法：JIS K6911 の 5.13 抵抗率 の方法によって測定する．被覆の劣化の傾向を把握する指標として有効である．	JIS K6911

・付着性試験，引張強さおよび伸び，吸水率，体積抵抗率については，モニタリング用テストピースにて実施する．

表6.2-4　重防食被覆の劣化度判定例[1)]

劣化度	重防食被覆の点検・調査結果	防食の性能評価
a	被覆の劣化が著しく，鋼材が腐食している状態．	防食性能が著しく低下している状態
b	一部に鋼材まで達する被覆の劣化が生じ，鋼材の腐食が認められる．	防食性能が低下している状態
c	鋼材まで達しない被覆の損傷が多く見られる．	防食性能の低下はないが，変状が発生している状態
d	初期状態とほとんど変化なく，健全な状態である．	ほとんど変状が認められない状態

６．２．２　重防食被覆の補修

重防食被覆の点検診断を実施した結果、その劣化度の評価に基づいて表6.2-5に示す対策を行う必要がある。劣化度がａもしくはｂの補修が必要とされる場合は、劣化度に応じて全面補修あるいは部分補修を実施する。

重防食被覆の補修区分・方法の例を表6.2-6に示す。重防食被覆の種類と補修必要部位の位置の違いにより適用可能な工法が異なる。

表6.2-5　重防食被覆における劣化度ごとの対策例[1)]

劣化度	対策
a	重防食被覆の全面的な補修を実施する必要がある.
b	劣化した箇所を補修し，以降の定期点検診断時期を早めるなどの配慮が必要である.
c	特に補修の必要はないが，多少劣化が始まった時期のため，以降の定期点検診断時期を早めるなどの配慮が望まれる.
d	従来通りの定期点検診断を継続する.

表6.2-6　重防食被覆の補修区分と補修方法の例（抜粋）[1)]

被覆防食法＼腐食環境区分	補修範囲	海上大気中	飛沫帯	干満帯	海水中
ポリエチレン被覆	部分補修	スティック法 パッチ法 ペトロラタム被覆 水中硬化型被覆	ペトロラタム被覆 モルタル被覆 水中硬化型被覆		
	全面補修	ペトロラタム被覆	ペトロラタム被覆		
ウレタンエラストマー被覆	部分補修	補修用ポリウレタンを用いる方法 水中硬化型被覆	水中硬化型被覆 ペトロラタム被覆		
	全面補修	補修用ポリウレタンを用いる方法 水中硬化型被覆 ペトロラタム被覆 モルタル被覆	水中硬化型被覆 ペトロラタム被覆 モルタル被覆		

補修の実施に先立って、補修範囲、仕様などを決定するための補修調査を行う必要がある。海上大気中における重防食の部分補修は、重防食被覆用の補修材料と補修方法で実施するのが一般的である。ポリエチレン被覆の場合はスティック法およびパッチ法、ウレタンエラストマー被覆の場合は補修用ポリウレタンによる補修がこれに相当するが、劣化状況、素地調整の程度や環境などにより、補修方法の種類によっては適用が困難な場合がある。したがって、補修部位、劣化状況、素地調整の条件、被覆重ね適合性などを考慮して補修材料、補修方法を決定する必要がある。

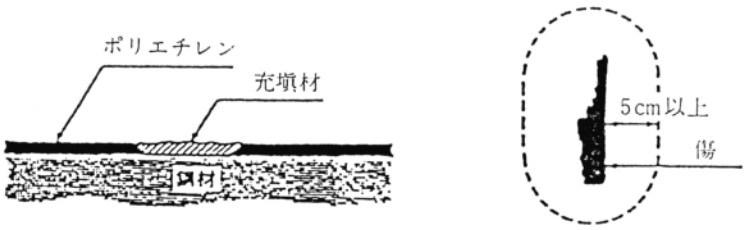
ポリエチレン被覆の補修に水中硬化型被覆を用いる場合、両者の付着力が強くないので、用いた場合は点検の頻度を増やす必要がある。このため、ポリエチレン被覆の部分補修法

をして、超音波による振動でポリエチレン被覆どうしを加熱・溶着する方法が波崎観測桟橋で試験的に適用されている[2)]。

また、電気防食を併用している場合は、水中部分の被覆が損傷しても電気防食による防食効果が及ぶので、損傷部面積が小さい場合は基本的には水中部分の補修は行わなくてもよい。しかし、損傷面積が広い場合は、電気防食の防食面積の増大により陽極設計寿命が満足できなくなる可能性がある。また、重防食被覆を施した L.W.L.－１ｍ までの範囲は、電気抵抗率の大きい河川水や雨水等の淡水が滞留しやすい環境（河川感潮部）であり、電気防食の効果が低下する場合があるので、補修を行うのが望ましい。

具体的な重防食被覆（ポリエチレン、ウレタンエラストマー）の補修方法を、表6.2-7に示す。劣化度 a の場合は、実質的に防食工が機能していないことも考えられるので、無防食鋼構造物の維持管理に準じた対策が必要となる場合もある。その場合には６．４項に記載されている、無防食鋼構造物の補修方法、防食工法を実施する。

表6.2-7　重防食被覆の補修方法

補　修　方　法	補　　修　　内　　容
①スティック法	ポリエチレン製スティックを溶融し、ポリエチレン被覆層に融着させる。
②パッチ法	充填剤で傷部を埋め、その上にポリエチレン製のパッチシートを張り付け、ガスバーナー等のヒーターで加熱融着させる。 
③ペトロラタム被覆	ペースト状、テープ状、シート状のペトロラタム系防食材を傷部に塗布あるいは巻き付ける。ペトロラタムは硬化しないため、塗布あるいは巻き付けたままでは波や浮遊物によって剥離するので、通常 FRP 製の保護カバーが用いられる。
④水中硬化型被覆	主剤と硬化剤を混合し、パテ状にしたものを、傷部に手作業で圧着して所定の厚さに被覆する。
⑤モルタル被覆	モルタルを打設する際の型枠を保護カバーとして用いる方法が一般的である。保護カバーには樹脂製と耐食性金属のカバーがある。
⑥補修用ポリウレタンを用いる方法	①傷が鋼面に達した場合 鋼面の錆や汚れを除去し、調合したプライマーをはけで薄く塗り、２～４時間放置する。次ぎに補修用ウレタン塗料を調合して、刷毛やヘラを用いて傷部に塗布して完了である。 塗り終わらないうちに塗料が硬化することがあるので、少量ずつ混合して塗装する必要がある。 ②傷が鋼面に達していない場合 プライマーは不要なので、傷の周りの汚れを除去して補修用ウレタンを塗布して完了である。

６．３　電気防食の維持管理

本項では主に、流電陽極方式による電気防食の維持管理について示す。

６．３．１　点検・調査の方法

流電陽極方式による電気防食の点検診断の種類と点検・調査項目を表6.3-1に示す。防食電位の判定は、防食管理電位である-800mV より卑（マイナス側）な電位であることを確認する。なお、防食管理電位である-800mV に達していない場合は、１年後を目途に電位測定を実施し、防食管理電位の-800mV より卑（マイナス側）な電位であることを確認する。防食管理電位が得られていない場合は、詳細臨時点検診断を行い、その原因を究明して補修を行わなければならない。

表6.3-1　流電陽極方式による電気防食の点検診断の種類と点検・調査項目[1)]

実施区分	点検診断の種類 ＼ 点検・調査項目		初回点検	日常点検	一般定期点検診断	詳細定期点検診断	一般臨時点検診断	詳細臨時点検診断
目視・簡易計測による	目視調査	海水面付近のさびの有無	○	○	○	○	○	○
		電位測定装置の損傷の有無	◎	○	◎	◎	◎	◎
	電位調査	電位の測定	◎	——	◎	◎	◎	◎
高度な方法による	陽極調査	陽極の取付状況	——	——	——	◎	——	◎
		陽極の消耗量	——	——	——	◎	——	◎
	環境調査	水質調査	——	——	——	○	——	◎
		底質調査	——	——	——	○	——	○
	モニタリング陽極*1		——	——	——	○	——	○
	テストピース*1		——	——	——	○	——	○

◎　：実施
○　：可能な範囲で実施
*1　：設置してある場合に実施

（１）　目視・簡易計測による点検

目視調査は、日常点検時などでは、なるべく潮位の低い時に海水面付近の赤橙色のさびや鋼材の損傷や電位測定装置の損傷の有無などについて、可能な範囲で実施する。

電位調査における電位の測定を実施する地点は測定装置の設置地点とその中間地点で行うのが一般的である。鋼構造物の深度方向での測定は、M.L.W.L.および測定レベルの起点となるL.W.L.から海底面までを１m間隔で行うのが望ましい。

（２）高度な方法による点検

陽極調査は陽極の取付状況、陽極の発生電流、陽極の消耗量などに関して行う。

目視調査により陽極の取付状況、陽極の異常消耗の有無を確認する。また、必要に応じて水中テレビによる撮影や、水中カメラによる写真撮影を行う。

陽極の消耗量調査は、電位の測定結果に基づいて行う。調査陽極の選定は、電位測定装

置の設置箇所または、電位測定装置の設置箇所の中間点付近より選定することが望ましく、深さ方向で2～3段で陽極が配置されている場合は深度別に調査を行うのが望ましい。電位測定装置の設置箇所が１箇所しかない施設は、複数の地点で調査することが望ましい。

詳細定期点検診断で実施する一般的な陽極の消耗量の調査の数量を表6.3-2に示す。防食対象施設が複雑な場合や場所によって水質環境が異なる場合は対象施設別あるいは環境別に調査する陽極数量を増やし、各条件下で陽極の消耗量の調査を行うことが望ましい。また、防食管理電位を満足していない箇所がある場合は、その付近で調査を行うことが望ましい。

表6.3-2　陽極の消耗量の調査の数量[1)]

陽極の取付数量	陽極の調査の数量	
	詳細臨時点検診断	詳細定期点検診断
100 個未満	5 個	3 個
100 個以上 300 個未満	5%	3%
300 個以上	15 個	9 個

陽極の残存寿命を見極めるためには、陽極の調査が必要である。陽極の消耗量調査は、陽極取付け総個数の５～10%を任意の位置から選び出し、潜水士によって陽極の寸法を計測するか、陽極を陸上に引き上げて秤量し、陽極の消耗量や陽極の寿命を算出する。陽極の形状寸法を実測して残存質量を算出する方法は、水中作業で陽極表面の付着物を除去し、陽極の寸法を図6.3-1 に示す要領で実測する。また、必要と思われる場合は写真撮影を行う。

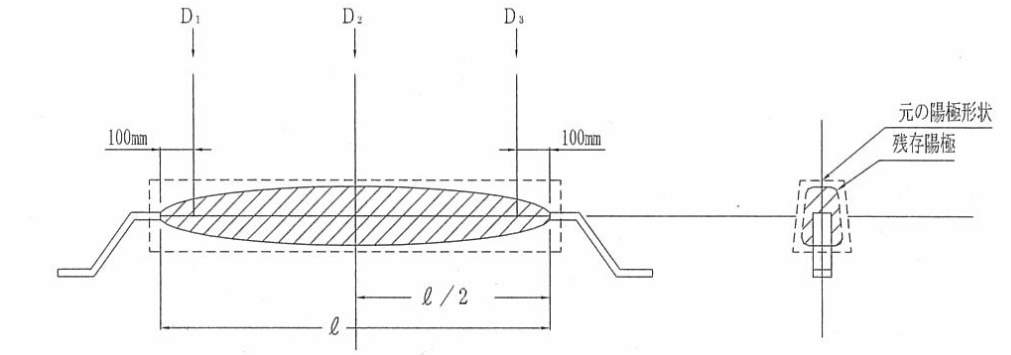


図6.3-1　陽極の寸法測定要領[1)]（単位；mm）

陽極の平均周長：D、長さ：Ｌとすれば
陽極残質量（kg）＝［D/４］^{2} x Ｌ－芯金の体積×陽極の密度×10^{-3}
平均周長Ｄ（cm）＝（D_1＋D_2＋D_3）/３
ただしD_1，D_3：残存陽極の端から約10cm の位置の外周長（cm）

D_2　　：残存陽極中央部外周長（cm）
L　　：残存陽極の長さ（cm）

陽極を陸上に引き上げて秤量する場合は、陽極の芯金部を水中で切断して陸上に引き上げて秤量し、芯金部分を差し引き陽極の残質量を求める。

陽極の残寿命の算定は、残存質量、経過年数から求める。また、陽極の平均発生電流から残寿命を求めることもできる。

$$\text{陽極の年間平均消耗量(kg/y)} = \frac{\text{陽極の初期質量(kg)} - \text{陽極の残存質量(kg)}}{\text{経過年数(y)}}$$

$$\text{残存寿命（y）} = \frac{\text{陽極の残存質量(kg)}}{\text{陽極の年間平均消耗量(kg/y)}}$$

また、陽極の平均発生電流から求めることもできる。

$$\text{残存寿命（y）} = \frac{\text{陽極の残存質量(kg)} \times \text{陽極の有効電気量(A・y/kg)}}{\text{陽極の平均発生電流(A)}}$$

環境調査は、適切な維持管理を実施するにあたり、設計当初の環境条件が変化していないかを確認するために行う。また、陽極の耐用年数以内に防食状態が保たれなくなった場合にも、原因を究明するための調査が必要である。

モニタリング陽極が設置してある場合は、その陽極の発生電流を測定することによって、電気防食装置の作動状況の確認と、陽極のおよその残存寿命を知ることができる。

テストピースによる防食効果の確認は、防食効果を定量的に把握できるだけでなく、テストピースの表面状況を目視で観察して、その状況から効果を確認することができる。テストピースの取り付けは電気的に接続した試験片と絶縁して取り付けた試験片を組み合わせて、電気防食を適用した構造物の各深度に水中溶接や電線などで取り付ける。設置場所は、電気防食適用施設の両端部および中間部とし、深度方向の取り付け位置は±0m、中間部（陽極と陽極の中間点）、海底面付近とすることを標準とする。

テストピースによる腐食速度の算出方法は次式による。

$$\text{腐食速度(mm/y)} = \frac{\text{腐食減量(g)}}{\text{試験片表面積(mm}^2\text{)} \times \text{試験期間(y)} \times \text{試験片単位体積当たりの質量(g/mm}^3\text{)}}$$

（3）点検診断における防食効果の評価

流電陽極方式の点検診断は電位と陽極の現状調査および陽極の消耗状況で判定する。電位による点検診断は表6.3-3に基づき判定する。また、この表は評価記録として用いることができる。

表6.3-3　電位の測定結果による判定基準と記号[1)]

点検方法	判定基準	
電位測定：海水塩化銀電極	a	□防食管理電位（－800mV）が維持されていない。
	b	―――
	c	―――
	d	□防食管理電位（－800mV）が維持されている。

判定基準が a の場合は、陽極の消耗や脱落などで防食状態が部分的に保持されていない可能性があるので、詳細臨時点検診断が必要である。その際、前回の測定結果などを参考にして、その原因を究明するとともに、防食状態を回復させるための対策を立案し、補修する必要がある。d の場合は策定された維持管理計画のスケジュールに基づき定期点検診断を実施して経過観察を行う。平均電位が-900mV 程度を維持すれば陽極の耐用年数は満足する。なお陽極が設計寿命に近づくと電位は貴（プラス側）な値となり、防食管理電位（-800mV）に近づいていく。

陽極の現状調査による点検診断は表6.3-4に基づき判定する。またこの表を評価記録として用いることができる。

表6.3-4　陽極の現状調査結果による判定基準と記号[1)]

点検方法	判定基準	
潜水調査 現状陽極の確認（全数）	a	□陽極が脱落または全消耗している．*1
	b	□陽極取付に不具合がある．（ぶら下がり）
	c	―――
	d	□変状なし．

*1　：ブロックの中で陽極１本でも脱落または全消耗した場合

判定基準が a の場合は、防食状態を回復するための部分補修または全面補修が必要であり、いままでの測定結果などを参考にして、その原因を究明するとともに、防食状態を回復させるための対策を立案し補修する必要がある。

判定基準が b の場合は、陽極に脱落の懸念があり、防食管理電位（-800mV）を維持していても、不具合が発見された陽極取付部の補修が必要であるので対策を立案する。

d の場合は、策定された維持管理計画のスケジュールに基づき、定期点検診断を実施して経過観察を行う。

維持管理の不備により陽極が完全に消耗している場合や鋼材が無防食の状態で長期間経過している場合は、鋼材の肉厚測定を行わなければならない。肉厚測定は港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）を参照するとよい。

鋼材全体の状況調査は、潜水士によって目視調査を行う。

６．３．２　電気防食装置の補修

点検診断の結果、その判定基準に基づいて表6.3-5に示す対策を行う必要がある。a の場合は、電位の減衰傾向、陽極の消耗、環境の変化などを考慮して、速やかに耐用年数を満足させるように陽極を追加、取り付けする必要がある。

また、陽極の設計耐用年数以内に防食状態が保たれなくなると推測される場合には、その原因を究明した上で陽極の更新対策を検討する。

表6.3-5　流電陽極方式における判定基準に基づく対策例[1)]

判定基準	対　策
a	防食状態を回復するための補修を実施する必要がある.
b	不具合な箇所の補修を実施する必要がある.
c	―――
d	従来通りの定期点検診断を継続する.

６．４　無防食鋼構造物（腐食しろで対応した鋼構造物）の維持管理

６．４．１　対象と目的

本項では、腐食しろで設計した鋼構造物の維持管理、及び、既設の無防食鋼構造物の維持管理について解説する。

港湾鋼構造物において、過去に腐食しろで設計された構造物や、維持管理段階において予測不可能な原因により防食が十分に機能していない鋼材に対しては、腐食診断および性能評価を行う必要がある。

図6.4-1に、維持管理フローにおける「無防食の鋼構造物に対する性能評価」の位置付けを示す。防食工が施されていない場合や、防食が十分に機能していないことが予測された場合には、鋼材の腐食診断の必要性を検討し、必要に応じて腐食診断とそれに基づく性能評価を実施しなければならない。既設構造物においては、初回点検前の履歴調査で防食の維持管理状況と鋼材の腐食診断記録を確認する。

防食の点検診断において、防食が十分に機能していない期間が存在したか、現状で防食が十分に機能していないと評価された場合には鋼材の腐食診断の必要性を検討する。鋼材の腐食診断の必要性は防食が十分に機能していなかった期間の長さや、当該鋼構造物に対する既存の鋼材腐食診断記録の信頼性（有効性）などから判断する。

防食が継続的かつ十分に機能していたことが確認された場合は、肉厚測定調査を実施しなくてもよい。特に電気防食が稼動していたことが確認されている場合は、M.L.W.L.以下の腐食診断は一般に省略することができる。

鋼材の腐食調査とその診断結果に基づき、鋼構造物の性能評価を行い、必要に応じて補修などの対策を実施することとなる。

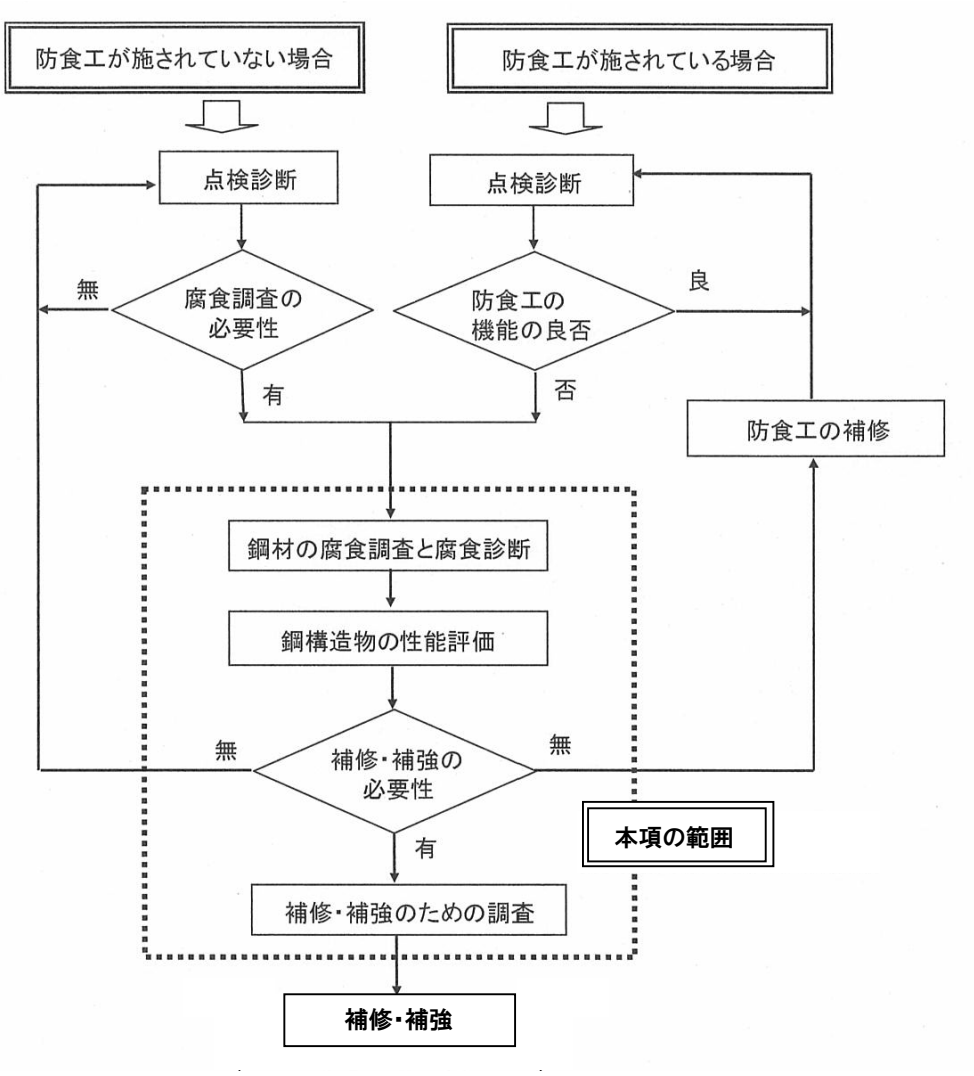


図6.4-1　維持管理フローにおける「無防食の鋼構造物に対する性能評価」の位置付け[1)]

（注）（財）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）」pp.262，図-1.1.1を基に加筆・修正して作成

６．４．２　点検・調査の方法

（１）　鋼材の腐食診断

鋼材の腐食診断は、目視調査および肉厚測定により実施することを基本とする。

目視観察は、適切な頻度で、鋼材の腐食状態について概略の調査を行う。目視観察は、水面上の観察と水中の観察がある。水面上の観察は、低水位時、観察可能範囲全域にわたって実施し、写真撮影も併せて行う。水中の観察は、施設の構造上、水面の調査が不可能な場合、及び水面上の観察の結果、水面下にも著しい腐食が予測される場合に実施するものとし、潜水士によって目視観察を行う。

肉厚測定は、防食が機能していない場合、あるいは防食が施されていない場合に、鋼材自体が健全であるかどうかを確認するために実施する。肉厚測定には、超音波厚さ計を用いることを標準とする。肉厚測定を行う調査地点は、維持管理計画に従った点検診

断に基づき、肉厚の減少が著しいと推定される箇所を重点的に選定する。目視観察の結果より、腐食状態が法線方向にかなりの区間にわたってほぼ一様であると判断される場合は、その区間に対して以下の腐食状態①～③での目安を基に調査地点を選定してよい。

腐食状態①：孔の発生あるいは M.L.W.L 付近～L.W.L.付近にかけて広範囲に連続して赤橙色さびが見られる状態で、建設後5年以上経過している場合は、法線方向に約20m毎に１調査地点を選定する。これは、桟橋１ブロック相当の単位として検討するのが実際的と考えられるからである。

腐食状態②：M.L.W.L 付近～L.W.L.付近において赤橙色のさびが部分的に見られる状態で、建設後10年以上経過している場合は、法線方向に約50m毎に１調査地点を選定する。

腐食状態③：腐食状態が①、②以外の場合、すなわち M.L.W.L 付近～L.W.L.付近において赤橙色のさびがごく部分的か、または見られない場合は、法線方向に約100m毎に１調査地点を選定する。また、①あるいは②の腐食状態であっても、建設後の経過年数が短い場合は、腐食量は小さく法線方向のばらつきの小さいため、法線方向に約100m毎に１調査地点を選定できる。

測定箇所は、防食の劣化・損傷状態や鋼材の腐食状態とともに、部材の発生応力の分布状況などを考慮して選定する。測定箇所は、部材の鉛直方向での肉厚を測定する位置を表した点のことで、部材の鉛直方向の腐食の分布状態を把握するための点である。図6.4-2に、鋼杭および鋼矢板の場合における測定箇所の標準を示す。

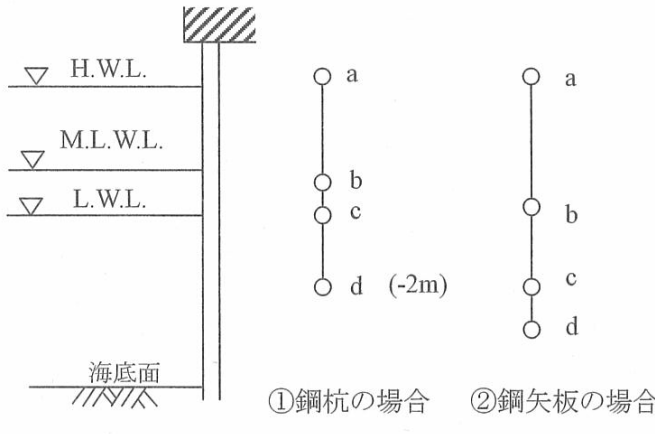


図6.4-2　測定箇所の標準[1)]

測定箇所は、防食の劣化・損傷状態を十分に考慮し、目視観察の結果に基づき鋼材の腐食状態を確認した上で最適な位置を選定する。腐食が進行している構造物については、危険な状態を見落とすことのないように入念な調査が必要である。

肉厚測定点は、鋼材の形状を考慮して選定する。肉厚測定点は、鋼材の同一断面内で肉厚を測定する点のことで、肉厚測定点の測定値から測定箇所の断面形状が把握できる。肉厚測定は、鋼材の形状に応じて図6.4-3の位置を標準とする。図6.4-3に示す各肉厚測定点においては、図6.4-4に示すように公称肉厚が一様な約10×10cm の範囲内で数点に

超音波厚さ計の探蝕子を当てて肉厚を測定する。測定点数は5点を標準とし、H形鋼の場合は3点とする。なお被覆防食の劣化部などで肉厚測定を行う際に、被覆防食の損傷をできるだけ防ぐことなどから約10×10cm の範囲を選定することが無理な場合には、必ずしもこれによる必要はない。しかし、測定点数を増やすなどして測定精度の向上を図ることが必要である。

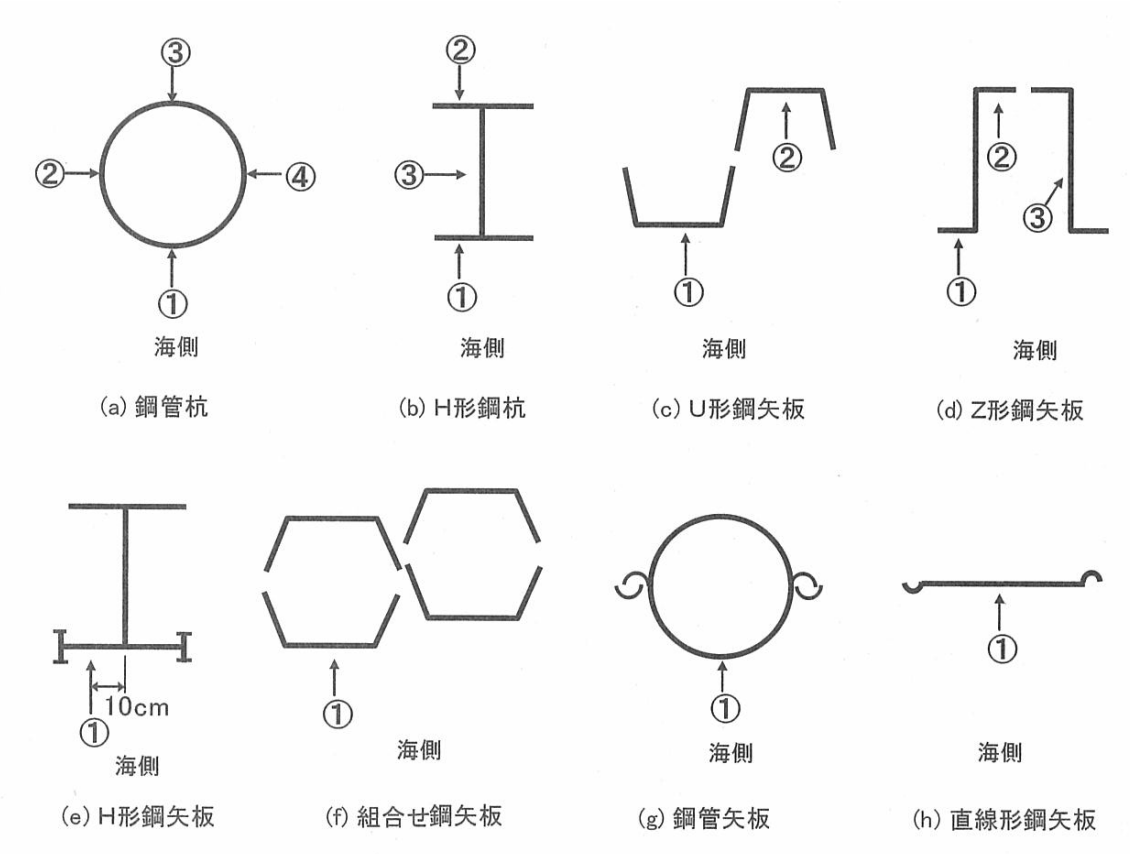


図6.4-3　肉厚測定点の標準[1)]

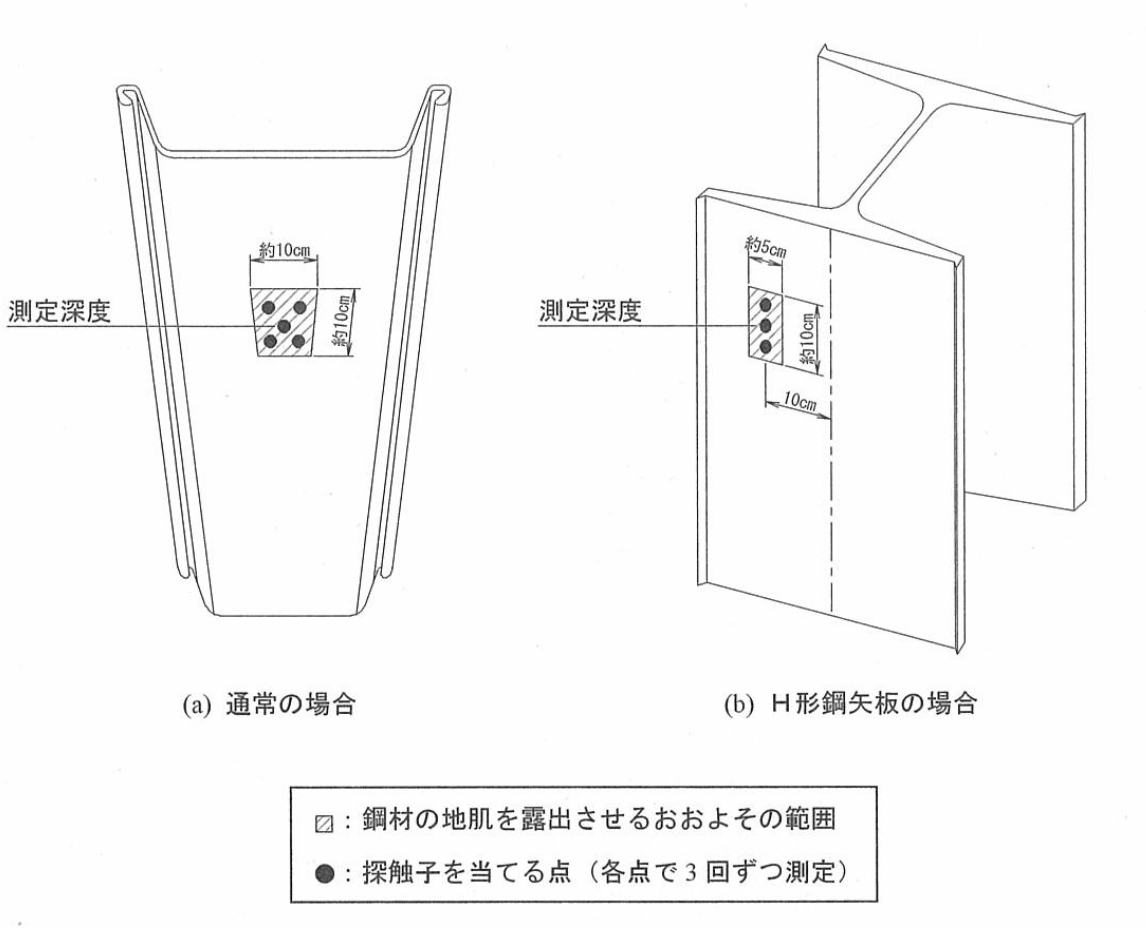


図6.4-4　超音波厚さ計の探蝕子を当てる点[1)]

肉厚測定において局部腐食が発見された場合、局部の腐食測定を実施する。肉厚測定において局部腐食（おおむね深さ3㎜ 以上のもの）が発見された場合、超音波厚さ計による現有最小肉厚の測定は困難なことが多いため、型を取ったり、デプスゲージなどで深さを測定し現有最小肉厚を把握するとともに、腐食の形状などを記録に残す必要がある。局部腐食が多数ある場合には、図6.4-5に示すように目視上で局部腐食が大きいと判断される５箇所を選定し、局部腐食の深さを測定することが望ましい。

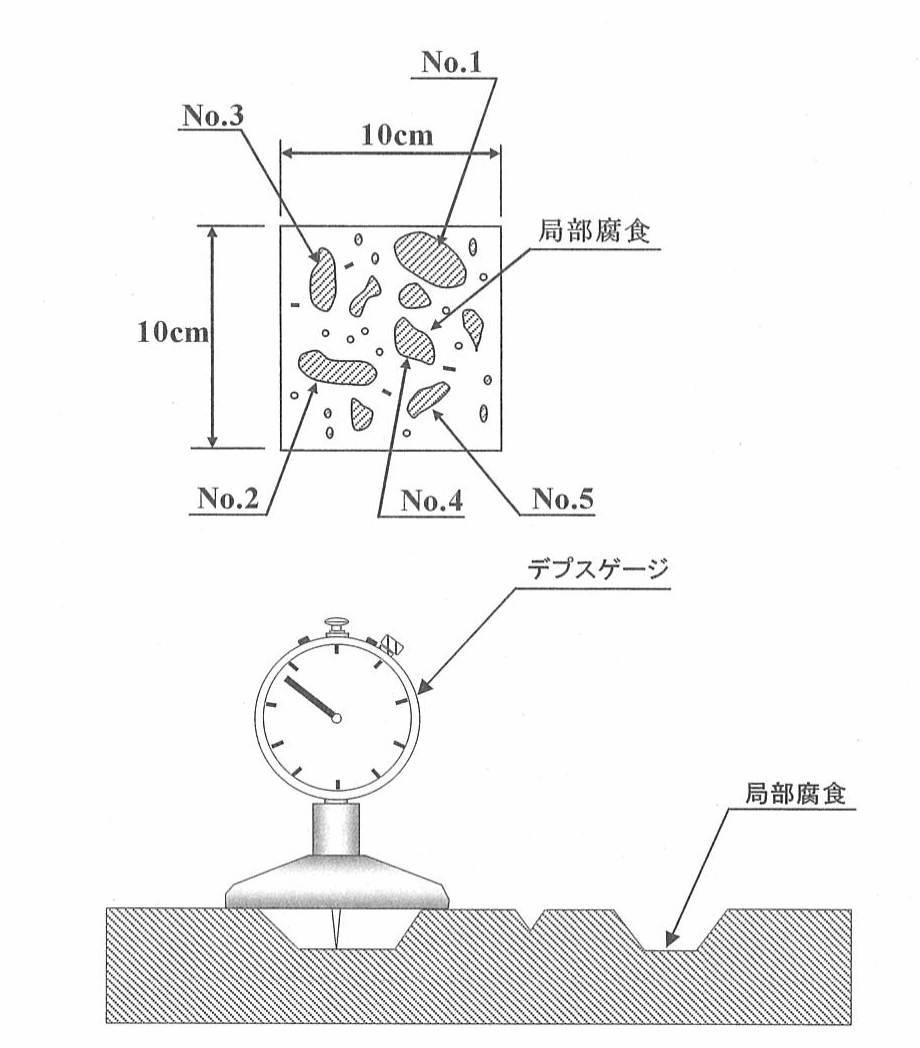


図6.4-5　局部腐食測定方法例[1)]

腐食評価は、肉厚測定の結果から得られた現有肉厚および腐食速度に基づき行う。腐食速度は、肉厚測定結果と初期肉厚との相違に基づき算定する。

①腐食速度は次式より算出する。

$$\text{腐食速度(mm／y)} = \frac{\text{腐食量(mm)}}{\text{腐食期間(y)}} = \frac{\text{初期肉厚(mm)} - \text{現在肉厚(mm)}}{\text{腐食期間(y)}}$$

②無防食期間と電気防食期間の両方がある場合の腐食速度は次式による。

$$\upsilon_c = \frac{c}{y_c + (1-p)\ y_p}$$

$$\upsilon_p = \frac{c - \upsilon_c \cdot y_c}{y_p}$$

ここで、υ_c：無防食状態における腐食速度（mm/y）

υ_p：電気防食状態における腐食速度（mm/y）
y_c：無防食期間（y）
y_p：電気防食期間（y）
c　：腐食量（mm）
p　：防食率(0.9)

③孔食深さ（最大孔食深さ）の算出

実(最大)孔食深さ(mm)＝｛元厚(mm)－肉厚平均値(mm)｝＋計測(最大)孔食深さ(mm)

$$\text{実(最大)孔食深さの腐食速度(mm/y)} = \frac{\text{実（最大）孔食深さ}}{\text{腐食期間（y）}}$$

（2）鋼構造物の性能評価

鋼構造物の性能評価は前述の腐食評価結果に基づいて行う。まず、腐食評価結果から調査時点及び設計耐用年数経過後に予想される平均腐食量を深度毎に設定する。設計耐用年数経過後における各深度の平均腐食量が当初設計時に想定した腐食しろ以内に収まっている場合、設計耐用年数内は健全に保たれるものとして、補修・補強は行う必要がない。

設計耐用年数経過後の腐食量は設計腐食しろを上回るが、調査時点の腐食量はこれ以内に収まっている場合、現状よりも腐食を進行させないための防食補修を行う。

調査時点の腐食量が部分的または全面的に設計腐食量を上回る場合、各深度の平均腐食量を考慮した構造計算を行って判断する。このとき、鋼材は深度毎に異なる断面をもつ変断面部材としてモデル化する必要がある。構造計算の結果、鋼材の応力度や変位量が許容値を下回る場合は防食補修を、上回る場合は補強を行う。防食補修しても設計耐用年数内に多少の腐食が見込まれる場合は、調査時点の腐食量でなく、腐食後の腐食量でもって構造計算を行わなければならない。

また、孔食により既に穴があいている場合、または設計耐用年数内に貫通すると予想される場合、貫通後著しい腐食や応力集中などが発生することがあるため、孔を塞ぐための補修を行う必要がある。

具体的な鋼構造物の性能評価方法の例を図6.4-6 に示す。腐食速度と孔食速度は、腐食しろと設計断面として耐用年数や構造耐力の計算に使用され、最大孔食深さは、極値統計手法を用いて、全面積で貫通孔や最大孔食深さの有無を推定するのに用いられる。

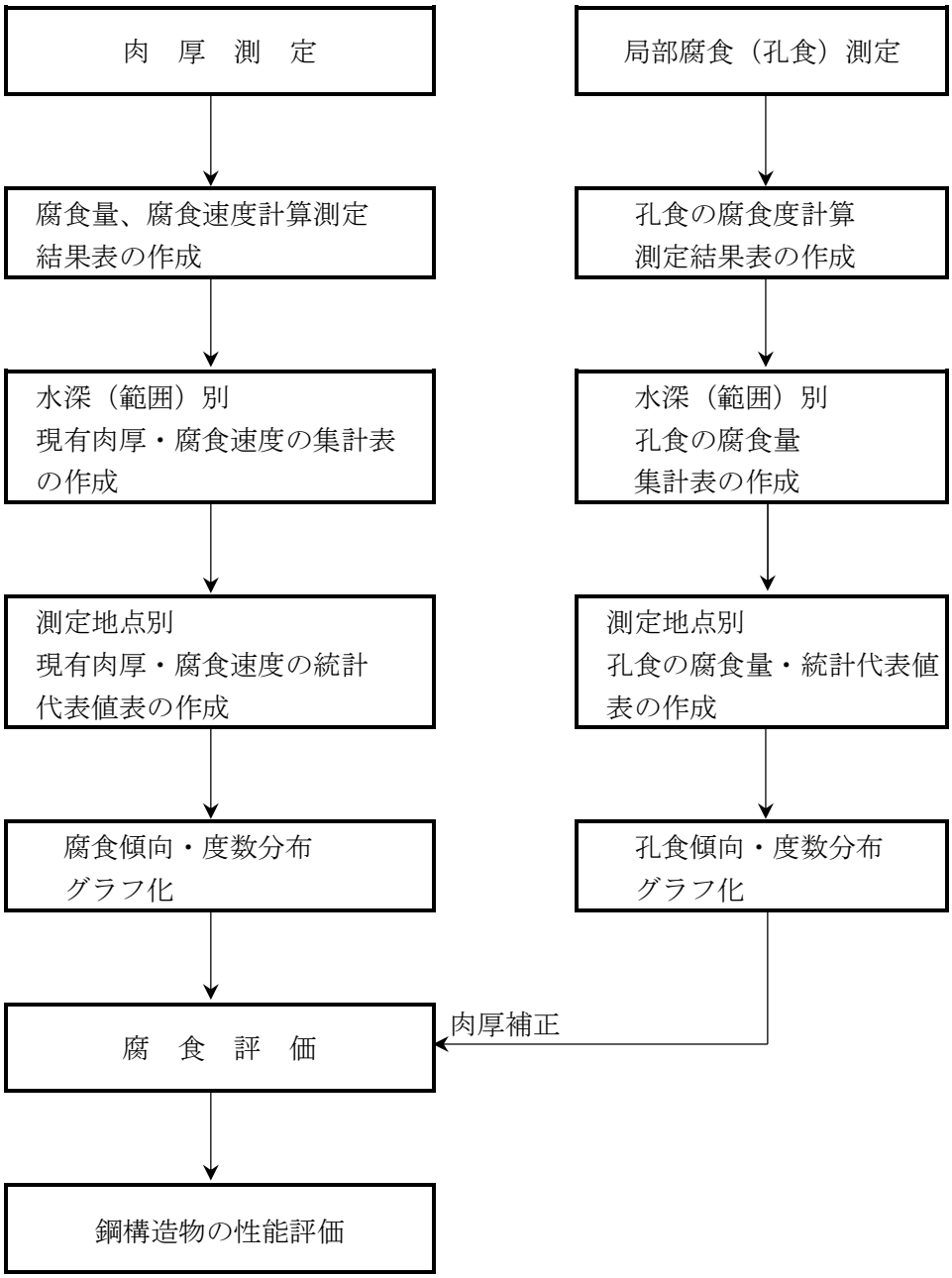


図6.4-6　肉厚測定、局部腐食測定のまとめ方

６．４．３　補修・補強

無防食鋼構造物の点検診断の結果、補修・補強が必要と判断されたら、適切な補修・補強対策をとる必要がある。

鋼材の劣化進行における補修・補強の位置付けは、概念的には図6.4-7 に示すことができる、過去に腐食しろで設計されたり、防食が十分に機能していないなど無防食の状態にある鋼材は、腐食の進行に伴い部材の性能が低下してくる。このような場合には6.4.2項に基づいた点検診断によって劣化状態を確認し、診断結果に基づいて補修・補強対策を実施し、その後は必要に応じて維持管理計画を見直して、適切に維持管理を行う必要がある。

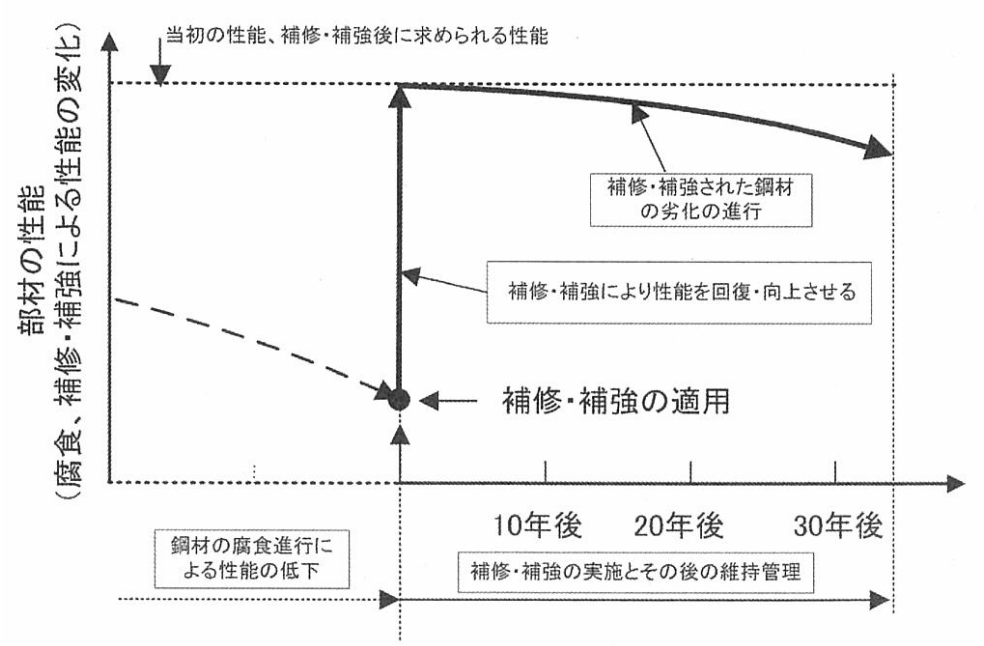


図6.4-7　鋼材の腐食進行に対する補修・補強の位置付け[1)]

（1）　補修・補強範囲の考え方

鋼管杭あるいは鋼矢板が腐食によって設計断面耐力が低下し、それによって構造物の要求性能が満足されない場合には、腐食した鋼材の設計断面耐力が回復できるように、適切に補修・補強範囲を設定しなければならない。また、補修・補強のための鉄筋コンクリートあるいは鋼板が受け持つ断面力は、既設の鋼材の健全な部分に円滑に伝達するように、適切に定着しなければならない。

（2）補修・補強工法

主に実用されている工法は①鉄筋コンクリートを用いた工法①と②鋼板を用いた工法の２種類である。

①鉄筋コンクリートを用いた工法

この工法は、スタットジベルや鉄筋を鋼材部に溶接し、コンクリートで被覆する工法である。具体例を図6.4-8 に示す。鋼材の素地調整は十分に行い、品質の良いコンクリートを打設することが必要である。

②鋼板を用いた工法

この工法は、腐食損傷部の断面修復に見合った厚さの鋼板を溶接する工法である。具体例を図6.4-9 に示す。溶接の方法として、水中で直接溶接する湿式溶接法とドライチャンバー等を使用して行う乾式溶接法がある。この工法では力の伝達は溶接部を介して行われるため、溶接部の品質が重要である。なお、溶接部は一般部に比べて腐食速度が大きい傾向にあるので、補修部全体を被覆防食する事が望ましい。

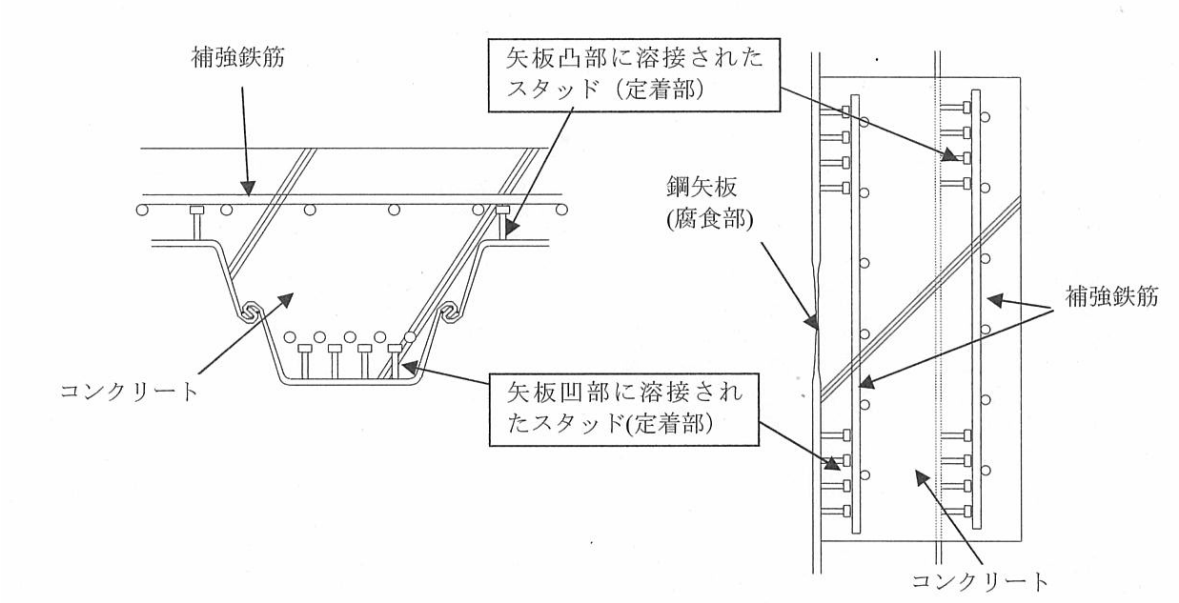


図6.4-8　鉄筋コンクリートを用いた補修・補強の定着部の概要[1)]

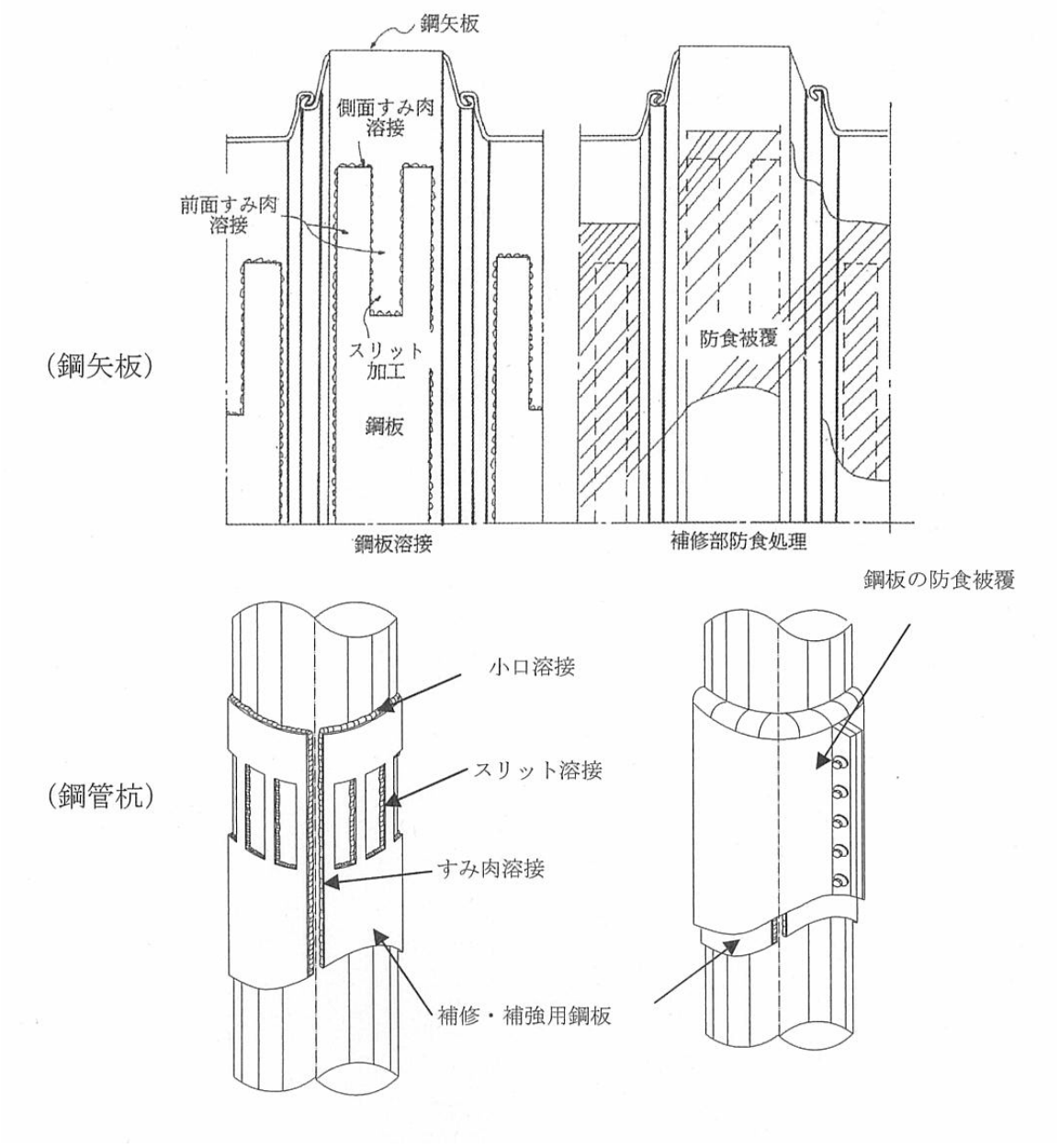


図6.4-9　鋼板を用いた補修・補強の定着部の概念図[1)]

<参考文献>

1)（財）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）」(2009)

2）鋼管杭の防食工法に関する現地試験（20年目の中間報告），港湾空港技術研究所資料, No.1123, pp.66-67（2006）

付録　＜目次＞

付．１　製品概要 ―――――――――――――――――――――――――――――― 1
１．１　鋼管杭 ―――――――――――――――――――――――――――――― 1
１．２　鋼管矢板 ―――――――――――――――――――――――――――― 3
１．３　鋼矢板 ―――――――――――――――――――――――――――――― 5
付．２　海洋環境下の長期暴露試験 ―――――――――――――――――― 7
２．１　防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験（千葉沖・阿字ケ浦沖）――――― 8
２．２　横浜市本牧埠頭におけるウレタンエラストマー被覆
重防食鋼管の海洋暴露試験 ―――――――――――――――――― １１
２．３　鋼管杭の防食法に関する研究（波崎沖）―――――――――――― １２
２．４　熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験
（フィリピン・シンガポール10年間）―――――――――――― １５
２．５　海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究（駿河湾沖）―――――― １８

付．３　海上橋上部工の重防食塗装 ―――――――――――――――― ２１
３．１　海上橋上部工の重防食塗装 ―――――――――――――――――― ２１

付．４　下部工の超長期防食法 ―――――――――――――――――― ２７
４．１　本州四国連絡橋 ―――――――――――――――――――――― ２８
４．２　関西空港連絡橋 ―――――――――――――――――――――― ２８
４．３　東京湾横断橋 ―――――――――――――――――――――― ３０
４．４　沈埋トンネル ―――――――――――――――――――――― ３０

付．５　素地調整 ―――――――――――――――――――――――― ３９

付．６　防食被覆材料の試験法 ―――――――――――――――――― ４３

付．７　水中切断・溶接 ―――――――――――――――――――― ４９
７．１　水中切断 ―――――――――――――――――――――――― ４９
７．２　水中溶接 ―――――――――――――――――――――――― ５０

付．８　外部電源方式による電気防食 ―――――――――――――― ５３
８．１　外部電源方式の特徴 ―――――――――――――――――― ５３
８．２　設計方法 ―――――――――――――――――――――――― ５３
８．３　施工方法 ―――――――――――――――――――――――― ５６
８．４　維持管理 ―――――――――――――――――――――――― ５７

付．９　防食工の積算 ―――――――――――――――――――― ５９
９．１　重防食鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板 ―――――――――――― ５９
９．２　鋼管杭・鋼管矢板の工場塗装 ―――――――――――――― ６１
９．３　現場防食工事の積算 ―――――――――――――――――― ６２

付．10　腐食・防食の用語集 ―――――――――――――――――― ６３

索引 ―――――――――――――――――――――――――――――― ７３

付・１　製品概要

１．１　鋼管杭

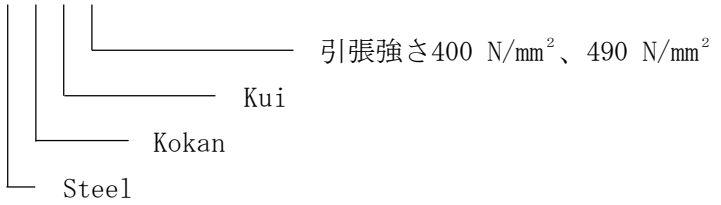
（１）鋼管杭の規格・適用範囲は表1.1 による。

表1.1 鋼管杭の規格・適用範囲

規格名	鋼管ぐい　JIS A 5525
規格記号	SKK400,　SKK490
適用範囲	土木・建築などの構造物に使用する溶接鋼管ぐい

（２）規格記号は以下の２種類

S K K 400, SKK490 の２種類



（３）くいの構成および各部の呼び名は図1.1 による。

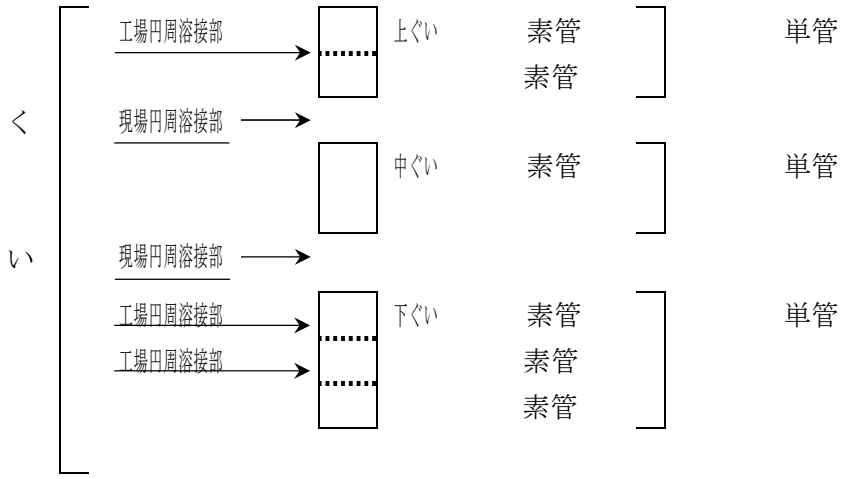


図1.1　くいの構成及び各部の呼び名

（４）化学成分は表1.2 による。

表1.2　化学成分　　単位 %

種類の記号	C	Si	Mn	P	S
SKK 400	0.25以下	-	-	0.040以下	0.040以下
SKK 490	0.18以下	0.55以下	1.65以下	0.035以下	0.035以下

（５）機械的性質は表1.3 による。

表1.3　機械的性質

機械的性質	引張強さ N/mm²	降伏点又は耐力 N/mm²	伸び % 5号試験片 横方向	溶接部引張強さ N/mm²	へん平性 平板間の距離(H) (D は管の外径)
製法区分	アーク溶接、電気抵抗溶接			アーク溶接	電気抵抗溶接
SKK 400	400以上	235以上	18以上	400以上	2/3 D
SKK 490	490以上	315以上	18以上	490以上	7/8 D

（６）製造方法・製造寸法および特長

鋼管杭の製造方法別需要をみると、スパイラル鋼管が主流であるが小径（φ609.6以下、板厚16mm 以下）には、電縫鋼管が一部使用されている。また、スパイラル鋼管では造管できない大径管や厚肉管には UOE 鋼管や板巻鋼管が使用されている。製造方法・製造寸法および特徴を表1.4 に示す。

表1.4　製造方法・製造寸法および特徴

製造法	スパイラル鋼管	電縫鋼管	UOE 鋼管	板巻鋼管
外　径	400 ～2,500	318.5～609.6	508.0～1422.4	350～5,000
板　厚	4.5～25.0	4.8～16.1	6.4～38.1	6.0～60.0
素管長	30,000	18,000	18,000	6,000
特徴	1．同一幅の鋼帯でも螺旋巻きの角度を調整することにより任意の外径の管が得られる。 2．管長は走行切断機により自由な長さが得られる。 3．連続的に成形、溶接が行なわれるので、溶接品質が良く、高い寸法精度(真円度、真直度)が得られる。	1．外径はインチサイズである。 2．外径は鋼帯巾で決定されるので、比較的小径サイズとなる。 3．溶接は、高周波電気抵抗により行なわれ、ストレートシームとなる。内外面の溶接ビードが切削されるので外観が良い。	1．鋼板をU型～O型に成形するので、鋼管に高強度や靭性など高品質が要求されるものに適する。 2．溶接線が片側になるので真直度が得られにくい。 3．ロール組替えに時間がかかる。同一寸法の鋼管を大量生産するのに適している。	1．鋼板をガス切断して所定の寸法とし、曲げ加工により鋼管とする。 2．大型になると鋼板の巾方向が鋼管の長さ方向になる。 3．大径･厚肉管、小径･厚肉管など多種少量生産に適している。 4．R.B.(Roll Bender)のほか厚肉になるとベンディングプレス方式で製管する。

（７）設計に使用する寸法は JIS A 5525の単管の寸法を参考に決定する。

１．２　鋼管矢板

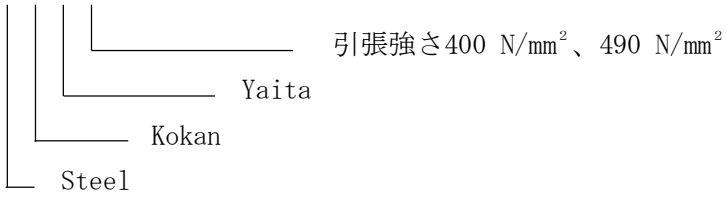
（１）鋼管矢板の規格・適用範囲は表1.5 による。

表1.5　鋼管矢板の規格・適用範囲

規格名	鋼管矢板　JIS A 5530
規格記号	SKY400,　SKY490
適用範囲	土留め、締切り、構造物の基礎

（２）規格記号は以下の２種類

S K Y 400, SKY490の２種類



（３）鋼管矢板の構成および各部の呼び名は図1.2、図1.3 による。

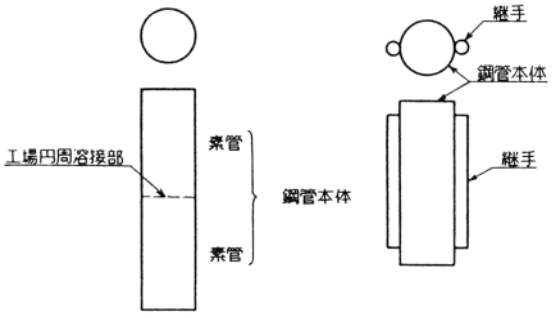


図1.2　鋼管矢板の構成図
及び各部の呼び名

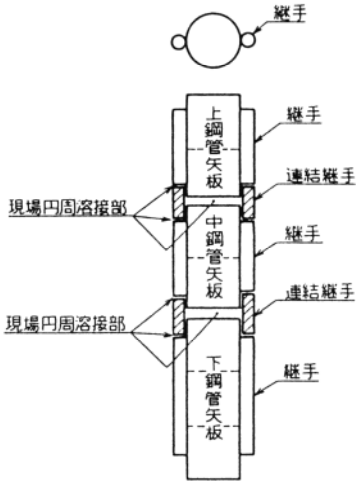


図1.3　現場で連結する鋼管矢板の
構成及び各部の呼び名

（４）化学成分は表1.6 による。

表1.6　化学成分　　単位　％

種類の記号	C	Si	Mn	P	S
SKY 400	0.25以下	-	-	0.040 以下	0.040以下
SKY 490	0.18以下	0.55以下	1.65以下	0.035 以下	0.035以下

（５）機械的性質は表1.7 による。

表1.7　機械的性質

機械的性質	引張強さ N/mm²	降伏点又は耐力 N/mm²	伸び ％ 5号試験片 横方向	溶接部引張強さ N/mm²	へん平性 平板間の距離(H) (D は管の外径)
製法区分	アーク溶接、電気抵抗溶接			アーク溶接	電気抵抗溶接
SKY 400	400以上	235以上	18以上	400以上	2/3 D
SKY 490	490以上	315以上	18以上	490以上	7/8 D

（６）鋼管矢板の継手及び連結継手の形状は図1.4 による。

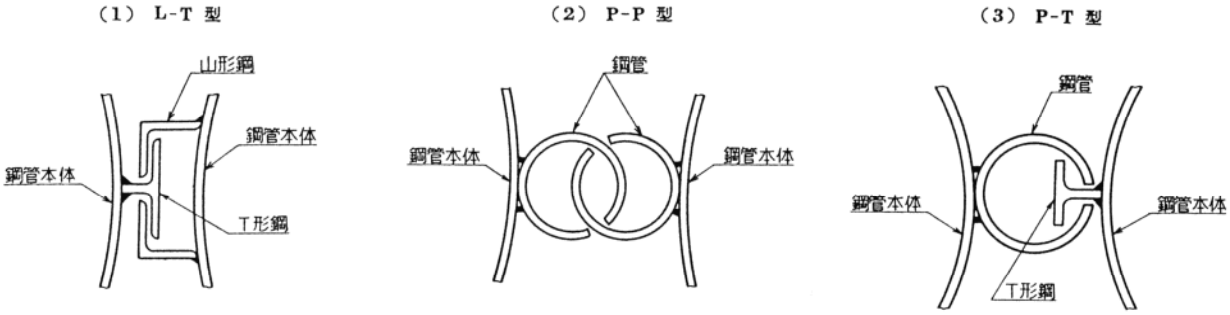


図1.4　鋼管矢板の継手及び連結継手の形状

（７）鋼管矢板の設計に使用する寸法は JIS A 5530の鋼管本体の寸法を参考に決定するが、ｔ／D 比（鋼管本体の板厚と外径の比）が1.1％以上（中掘り工法）または1.4％（打撃工法）を目安とすることが望ましい。

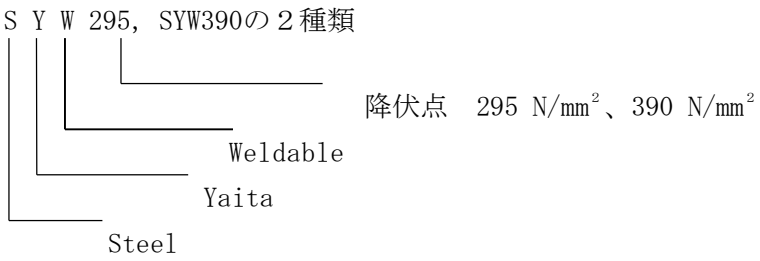
１．３　鋼矢板

（１）鋼矢板の規格・適用範囲は表1.8 による。

表1.8　鋼矢板の規格・適用範囲

規格名	溶接用熱間圧延鋼矢板　JIS A 5523
規格記号	SYW295,　SYW390
適用範囲	土留め、締切り、構造物の基礎

（２）規格記号は以下の２種類



（３）化学成分は表1.9 による。

表1.9　化学成分　　単位　％

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	ﾌﾘｰ窒素*1,*2
SYW 295	0.18以下	0.55以下	1.50以下	0.040以下	0.040以下	0.0060以下
SYW 390	0.18以下	0.55以下	1.50以下	0.040以下	0.040以下	0.0060以下

＊１：0.0060％を超え、0.0100％以下の鋼材について、3％ひずみを与えた後、250℃で１時間保持した試験片でひずみ時効シャルピー衝撃試験を行い、その結果が表1.12を満足すれば、これに置換えてもよい。

＊２：フリー窒素含有率の値は、全窒素含有率に置換えてもよい。

（４）機械的性質は表1.10 による。

表1.10　機械的性質

種類の記号	引張強さ N/mm²	降伏点 N/mm²	伸び ％ 1A 号又は4号試験片
SYW 295	490以上	295以上	17以上
SYW 390	540以上	390以上	15以上

（５）炭素当量は表1.11による。

表1.11　機械的性質

種類の記号	炭素当量 ％
SYW 295	0.44以下
SYW 390	0.46以下

なお、炭素当量(%)＝C＋Mn／6＋Si／24＋Ni／40＋Cr／5＋Mo／4＋V/14

（６）シャルピー吸収エネルギーは表1.12による。

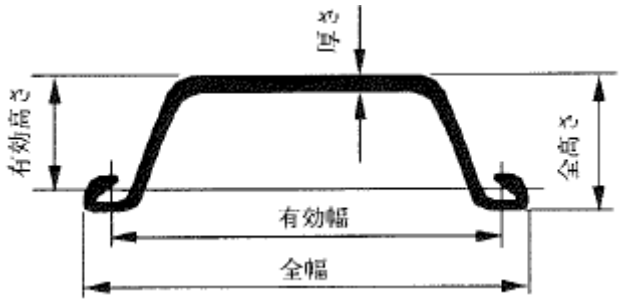
表1.12　　シャルピー吸収エネルギー

種類の記号	試験温度℃	シャルピー吸収エネルギー J			試験片及び試験方向
		試験片の高さ×幅(m)			
		標準寸法試験片	ｻﾌﾞｻｲｽﾞ試験片		
		10×10	10×7.5	10×5	
SYW 295	0	43以上	32以上	22以上	Ｖノッチ 圧延方向
SYW 390	0	43以上	32以上	22以上	

なお、シャルピー吸収エネルギーは３個の平均値とし、JIS G 0404の9.6(組試験の結果の評価)によって判定する。

（７）鋼矢板の断面形状はU形、ハット形断面形状及び各部の呼び名は図1.5 による。

U形



ハット形

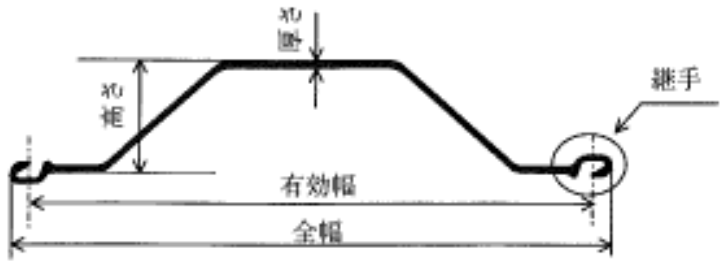


図1.5　鋼矢板の断面形状及び各部の呼び名

付・２ 海洋環境下の長期暴露試験

長期暴露試験の一覧を表2.1 に示す。また、それぞれの報告書の試験材およびまとめ等を紹介する。

表2.1　長期暴露試験一覧表

Ｎｏ	暴露試験の名称	機　　関	場　　所	期　　間
2.1	防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験	・(財)国土開発技術研究センター ・建設省土木研究所 ・鋼管杭協会	・千葉沖	1975 ～ 1986
			・阿字ケ浦沖	1976 ～ 1997
2.2	横浜市本牧ふ頭におけるｳﾚﾀﾝｴﾗｽﾄﾏｰ被覆重防食鋼管の海洋暴露試験	・横浜市港湾局 ・ＮＫＫ ・(株)クボタ	・横浜市／本牧ふ頭Ｃ突堤	1987 ～ 1997
2.3	鋼管杭の防食法に関する研究	・運輸省港湾技術研究所 ・(財)沿岸開発技術研究センター ・鋼管杭協会	・波崎沖	1984 ～
2.4	熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験	・鋼管杭協会	・シンガポール ・フィリピン	1983 ～ 1993 (フィリピンは1998)
2.5	海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究 第一分科会	・建設省土木研究所 ・(社)鋼材倶楽部	・駿河湾沖	1984 ～ 2004

２．１　防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験（千葉沖・阿字ケ浦沖）[1)2)]

（１）供試材

①　千葉沖

（ａ）鋼管杭

防食鋼管杭の形状・寸法、防食範囲および暴露位置を図2.1 に示す。

φ508xt9.5xL44000　防食範囲は６ｍ（干満帯中心）

（ｂ）試験片

防食試験用、防汚試験用被覆鋼管（φ114.3xt4.5xL4000）

および金属系板状試験片（W100xt5～10xL2000））

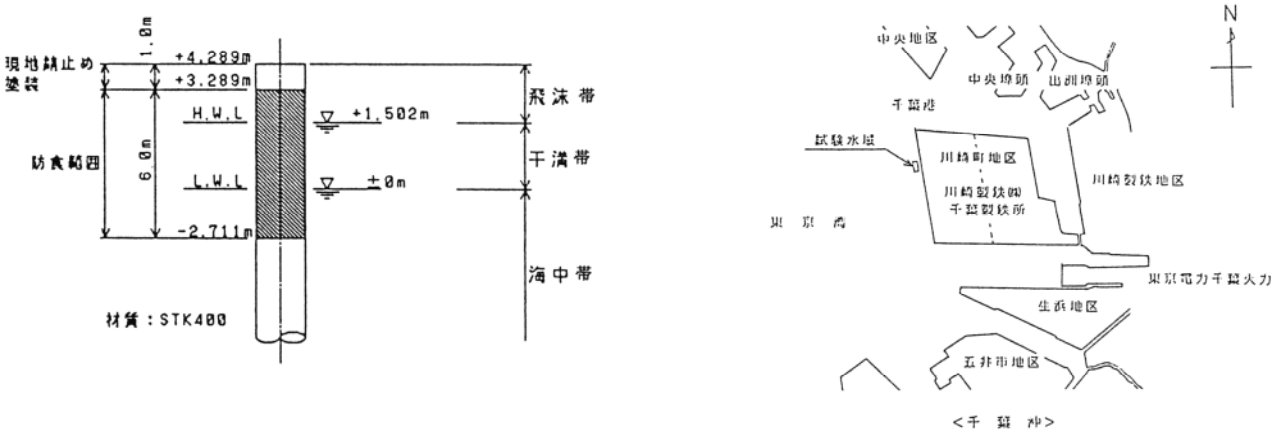


図2.1　供試材の形状・寸法および暴露試験位置

②阿字ケ浦沖

（ａ）鋼管杭

防食鋼管杭の形状・寸法、防食範囲および暴露位置を図2.2 に示す。

φ609.6xt14xL16000　防食範囲は6m（干満帯中心）

（ｂ）試験片

防食試験用、防汚試験用被覆鋼管（φ114.3xt4.5xL2000）

有機ライニング、無機ライニングが一部含まれる。

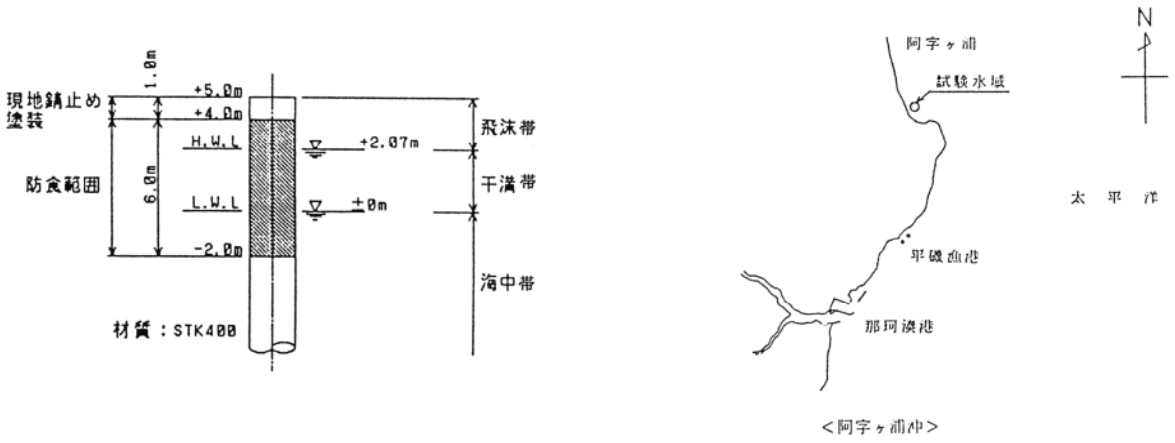


図2.2　供試材の形状・寸法および暴露試験位置

（２）試験材の種類と試験結果

防食鋼管杭の被覆の外観観察を(イ）異常なし、(ロ）若干のふくれ、点錆あり、(ハ）ふくれ、剥離、塗膜下錆点在、(ニ）剥離と赤錆が進行、(ホ）剥離、錆発生大、に区分して実施し、それに基づいて防食性能の評価グレードをＡ（優）～Ｅ（劣）の５段階に順位づけた。評価Ｃ以下は長期耐久性の期待できないとされている。

①防食鋼管杭の試験結果を表2.2 に示す。

この結果から、長期の防食耐久性が期待できる被覆材は、ポリエチレン(Ａ，ＡＢ)、ポリウレタンゴム(Ａ，Ｂ)、及び異種金属接触腐食に注意すればステンレス鋼(Ａ)である。

表2.2　防食鋼管杭の防食性能の評価

	被　覆　の　種　類	千葉沖(11年)		阿字ケ浦沖(22年)	
		飛沫帯	干満帯	飛沫帯	干満帯
塗　装	アルミ溶射(100μm)＋ タールエポキシ塗装（300μm)	D	E	－	－
	アルミ溶射(100μm)＋ビニロンクロス補強 タールエポキシ塗装(300μm×3)	C	DE	E	E
	亜鉛溶射(100μm)＋ タールエポキシ塗装(300μm×3)	B	E	－	－
	無機ジンクリッチペイント(75μm)＋ タールエポキシ塗装(300μm×3)	B	C	BC	BC
	無機ジンクリッチペイント(75μm)＋ガラスクロス補強エポキシ塗装(300μm×3)	B	B	B	AB
有　機 被　覆	ポリエチレン(4mm)	AB	A	A	A
	エポキシレジンモルタル(4mm)	CD	C	C	C
	ウレタンマスチック(3mm)	－	－	E	E
	ポリウレタンゴム(4mm)	－	－	B	A
無　機 被　覆	ファイバーコンクリート(吹付け法) (50mm) ファイバーコンクリート(型枠法) (100mm)	B	B	－	－
複　合 防食法	セメントモルタル(47mm)＋ ポリエステルFRP カバー(3mm)	－	－	DE	CD
金　属 被　覆	ステンレス鋼 (25Cr-13Ni) (3mm)	A	A	－	－
	アルミ溶射(200μm)	A	E	－	－

②有機被覆試験片の防食性の順序づけ（グレード順）を表2.3 に示す。

試験片では、ポリエチレン押出し被覆が優れており、ついでポリウレタンゴム被覆が良好であった。エポキシレジンモルタル被覆は鋼面に腐食が発生していた。

表2.3　有機被覆試験片の防食性

グレード	防　　食　　仕　　様	
AB	ポリエチレン押出し	(4mm)
	エポキシ＋ポリエチレン押出し	(4mm)
	ポリウレタンゴム	(3mm)
	発砲ポリウレタン	(10mm)
B	ポリエチレン粉体塗装	(3mm)
	ポリエチレンシュリンクチューブ	(3mm)
	タールエポキシマスチック	(14mm)
	水中硬化エポキシ	(5mm)
BC	アスファルトマスチック	(10mm)
	エポキシ含浸不織布テープ	(3mm)
	常温加硫クロロプレンシート	(5mm)
C ～ D	ブチルゴム	(4mm)
	レジンモルタル	(5mm)
	ウレタンマスチック	(3mm)

２．２　横浜市本牧ふ頭におけるウレタンエラストマー被覆重防食鋼管杭の海洋暴露試験[3)]

（１）供試材

防食鋼管の形状・寸法、防食範囲および暴露位置を図2.3 に示す。

φ165.2xt9xL15000　防食範囲は14.4m（ほぼ全長）

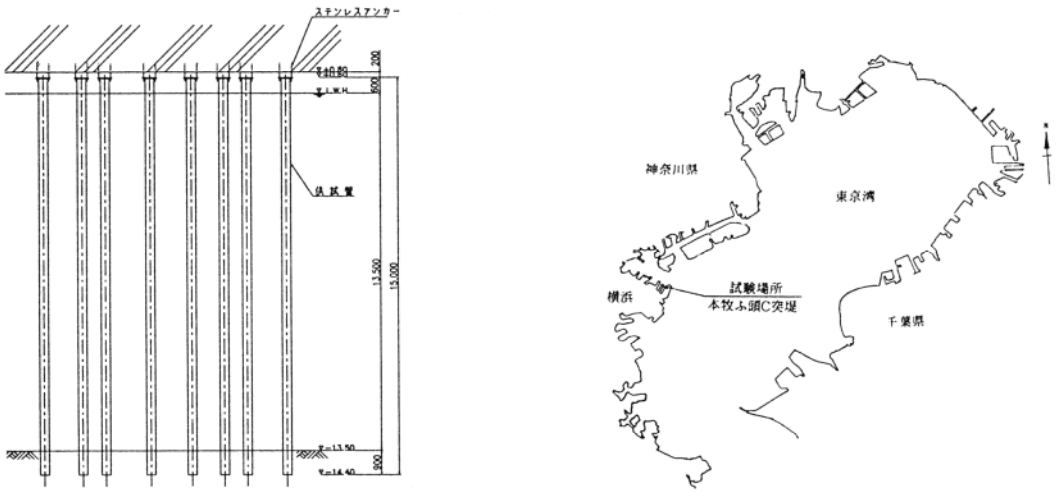


図2.3　供試材の形状・寸法および暴露試験位置

（２）試験結果

①外観（暴露５年目）

付着生物はほぼ全面に認められたが、付着生物を除去した被覆は、付着生物による食い込みは観察されず、被覆の健全性が確認された。

②各物性の測定値（経時変化）を図2.4 ～ 図2.6に示すが初期値と実質的な変化はなかった。

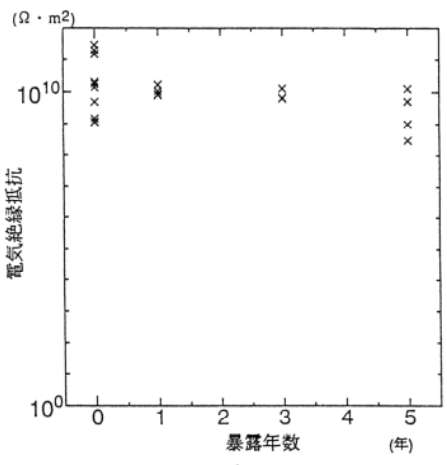


図2.4　電気絶縁抵抗

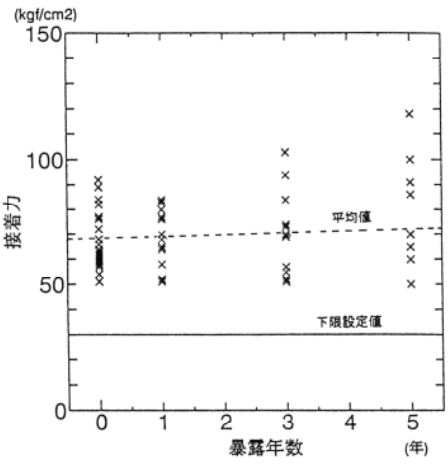


図2.5　接着力

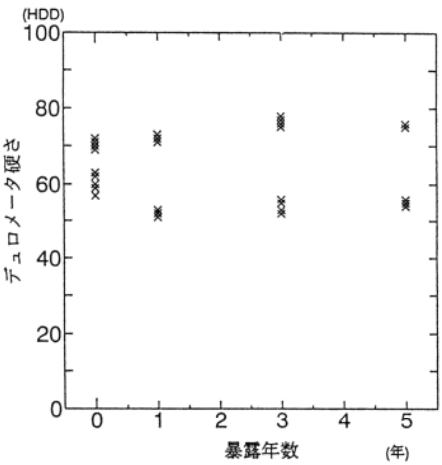


図2.6　被覆硬さ

２．３　鋼管杭の防食法に関する研究（波崎沖）[4)]

（１）試験概要

①供試体の防食工法、塗装系名の種類と杭 No を表2.4 に示す。

②観測桟橋全体図を図2.7 に示す。

③研究施設の設置場所を図2.8 に示す。

④防食区分と試験体の寸法を図2.9 に示す。

表2.4　供試体の防食工法、塗装系名の種類と杭 No

防食系	工法名	杭 No.
有機被覆	水中硬化型被覆工法	5，7*，9** 10**，11** 15，18
	極厚マスチック工法	27，28
	ポリエチレン被覆工法	31，32，33 34，35
無機被覆	セメントモルタル／ＦＲＰカバー工法	4，8，20
	ＣＲＵＳ工法	29
	ＧＲＣ補強カバー工法	17
	電着工法	9**，10** 11**
ペトロラタム被覆	ペトロラタム防食工法	12，13，14 29，22***
	一体成型防食工法	6*，24，25
	防食テープ／ＦＲＰカバー工法	21
電気防食	流電陽極法	22***，23 26，30
塗　装	防食シート接着被覆工法	1，2
	水中硬化型エポキシ樹脂塗料	6*，7*

	塗　装　系　名
Ｋ１	ガラスフレークポリエステル樹脂塗料
Ｋ２	超厚膜型エポキシ樹脂塗料
Ｋ３	超厚膜型エポキシ樹脂塗料
Ｋ４	ガラスフレークエポキシ樹脂塗料
Ｋ５	厚膜型無機ジンク/エポキシ/ポリウレタン樹脂塗料
Ｋ６	タールエポキシ樹脂塗料
Ｋ７	タールエポキシ樹脂塗料
Ｋ８	ガラスフレークエポキシ樹脂塗料
Ｋ９	水系厚膜防食塗料/フッ素樹脂塗料
Ｋ１０	ガラスフレークポリエステル樹脂/フッ素樹脂塗料
Ｋ１１	湿潤面用エポキシ樹脂塗料
Ｋ１２	ガラスフレークエポキシ樹脂塗料

＊　杭No.6，7は水中硬化型エポキシ樹脂塗料と水中硬化型被覆工法または一体型成型防食工法との併用

＊＊　杭No.9～10は電着工法と水中硬化型被覆工法の併用

＊＊＊　杭No.22はペトロラタム防食工法と電気防食との併用

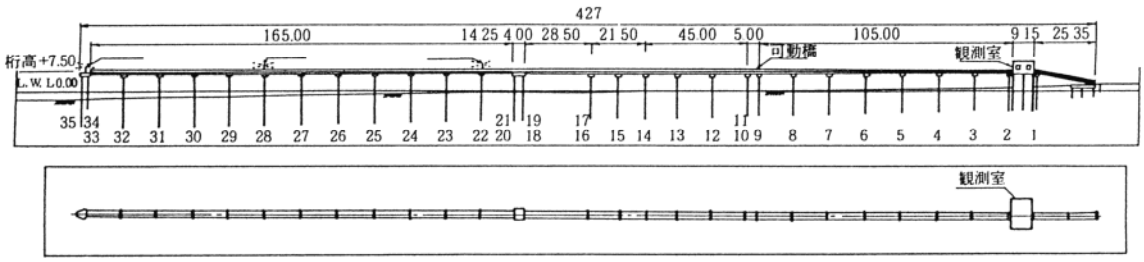


図2.7　観測桟橋全体図

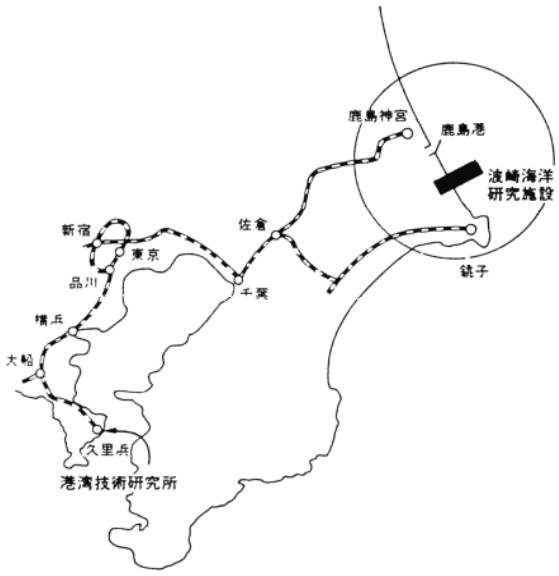


図2.8　研究施設の設置場所

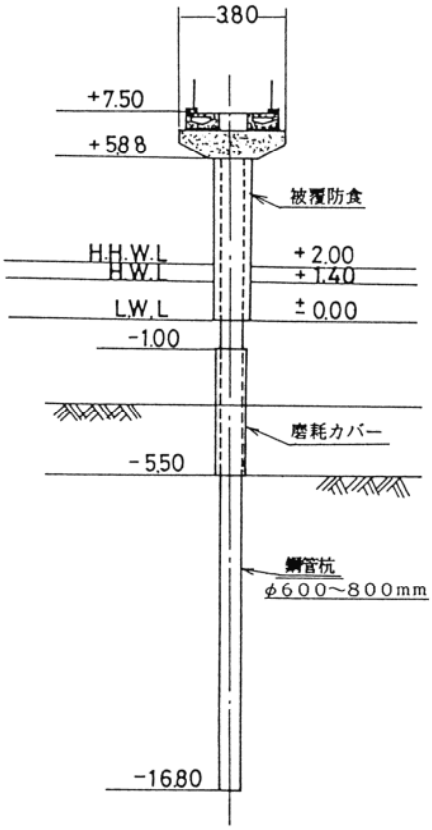


図2.9　防食区分と試験体の寸法

（２）試験結果（２０年間の暴露試験）

試験結果のうち、ポリエチレン被覆鋼管杭の総合評価を表2.5 に、またその補修法と耐久性評価を表2.6 にそれぞれ示す。

表2.5　ポリエチレン被覆鋼管杭の総合評価

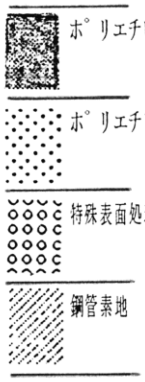
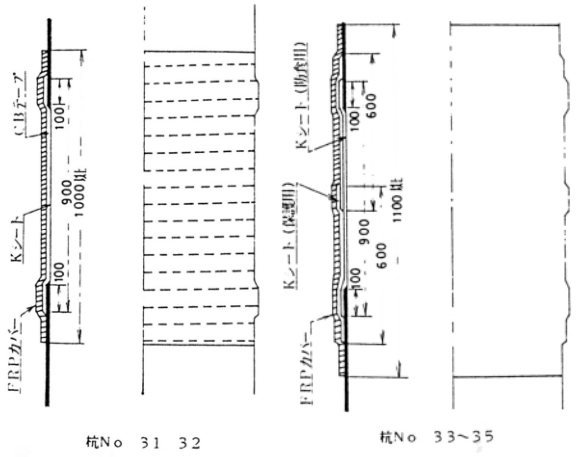
杭 No.	被覆構成	膜厚	外観	耐　久　性			
				モニタリング	塗膜下錆	接着劣化	総　合
３１ ～ ３５		2.5 mm 以上	異常 なし	電気抵抗 10^8 Ω㎝以上 ただし、塗膜の絶縁抵抗が高いので測定条件の影響を受けやすく、バラツク。	発錆 なし	ﾗﾝｸ:A 初期 274 N/10mm 20年後 199　～ 265 N/10mm	20年間で 異常なし

表2.6　ポリエチレン被覆鋼管杭の補修法と耐久性評価

補修箇所は施工当初に人為的に傷を付け、補修部分の耐久性と防食効果確認目的に実施。

	補　修　工　法	対象杭	耐　久　性
1	FRP カバー工法 	No. 31 ～ No. 35	３年目までは密着不良や波浪による影響で思うような成果が無かったが、左図のFRP 保護カバーを装着した結果その後は５年間異常なし。
2	サーモスタック法 （ポリエチレン被覆上にプライマー塗布加熱後水中硬化エポキシ樹脂塗布）	No. 34	３年間異常なし
3	一体成型部分カバー法（飛沫帯） （水中硬化エポキシ樹脂＋FRP カバー、ボルト締め）	No. 35	３年間異常なし

２．４　熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験（フィリピン15年・シンガポール10年間）[5)6)]

（１）設置場所

①フィリピン・ミンダナオ島、Philippine Sinter Corp.構内（東経103°北緯1°）

②シンガポール本島、Jurong Shipyard Ltd.構内（東経125°北緯8°）

（２）供試材および暴露試験結果

フィリピン・シンガポールの熱帯海域において、表2.7 に示す鋼管、Ｌ形鋼、H形鋼、鋼矢板等の土木用鋼材および電気防食、有機被覆等の防食法について10、15年間の暴露試験を行った結果、次のことがわかった。

①図2.10 および図2.11 に示す炭素鋼鋼材のプロフィールは、侵食度が飛沫帯で最大、干満帯で最小を、また L.W.L.および海底面直下では極小値を示しており、これらの部位にマクロセルを形成する典型的なものであった。

②図2.10および図2.11に示すように熱帯海域での腐食速度は、各部位でフィリピンがシンガポールより若干大きかったが、腐食速度は経時とともに減少する傾向は日本国内と同様であるが、平均すると日本（東京湾）の約1.5～２倍であった。

③電気防食は平均干潮面（M.L.W.L.）以下、海中部で有効。とくに局部腐食を低減できた。防食電流密度は温帯よりやや高い傾向があった。

④表2.8 に示すように有機被覆は温帯域と同様に有効であり、厚膜の被覆材のポリエチレン、ペトロラタム＋FRP カバー、ガラスフレーク入りポリエステルおよびエポキシは、10年経過しても疵、腐食はほとんどなく十分な耐久性が保持された。なお、フィリピンの暴露15年ではポリエチレンおよびガラスフレーク入りエポキシのみが良好な結果を示した。

表2.7　試験材の内容

試　験　材			暴　露　場　所		備　　考
分　類	母材形状	表面	フィリピン	シンガポール	
裸　鋼　材	鋼管	裸	４	４	*普通鋼３本 耐海水鋼１２本
	Ｌ形鋼	裸	１５*	－	
	H形鋼	裸	３	－	
	鋼矢板	裸	６	－	
電気防食鋼材	鋼管	裸	２	２	
有機被覆鋼材	鋼管	塗装	９	７	
	鋼管	被覆	４	１	
金属被覆鋼材	鋼管	モネル	１	－	
計			４４	１４	

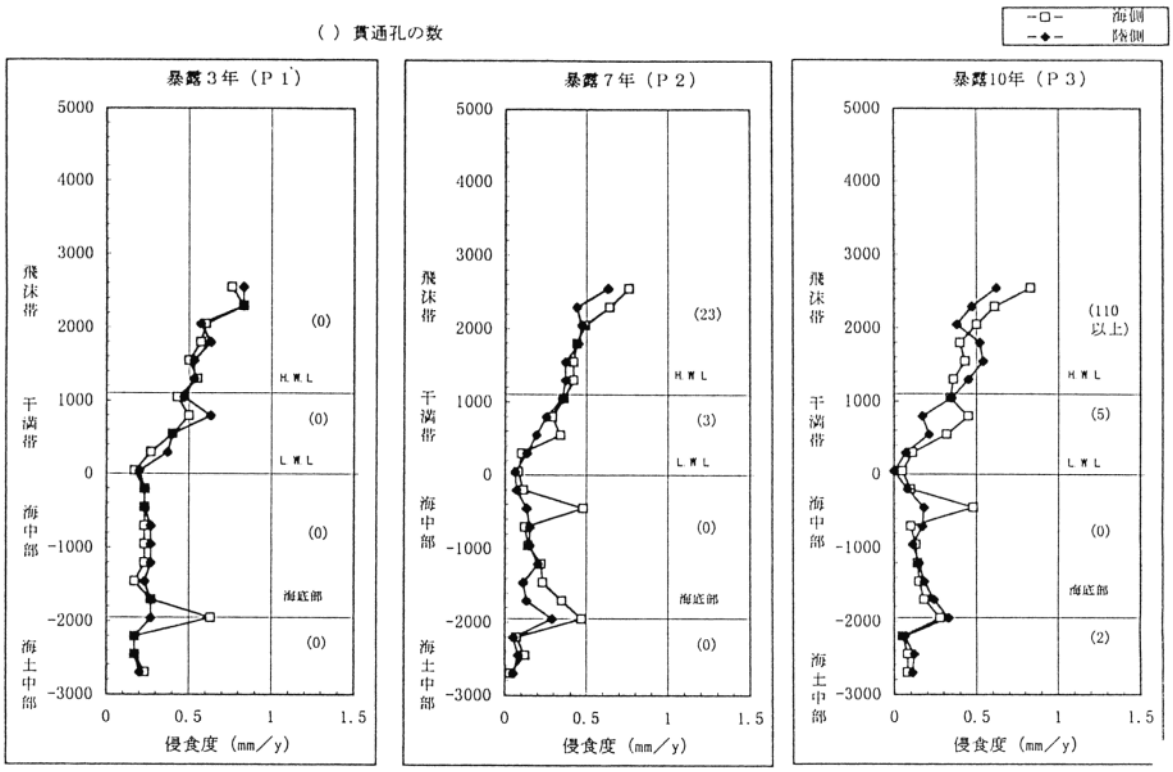


図2.10　フィリピン鋼管試験材の侵食度

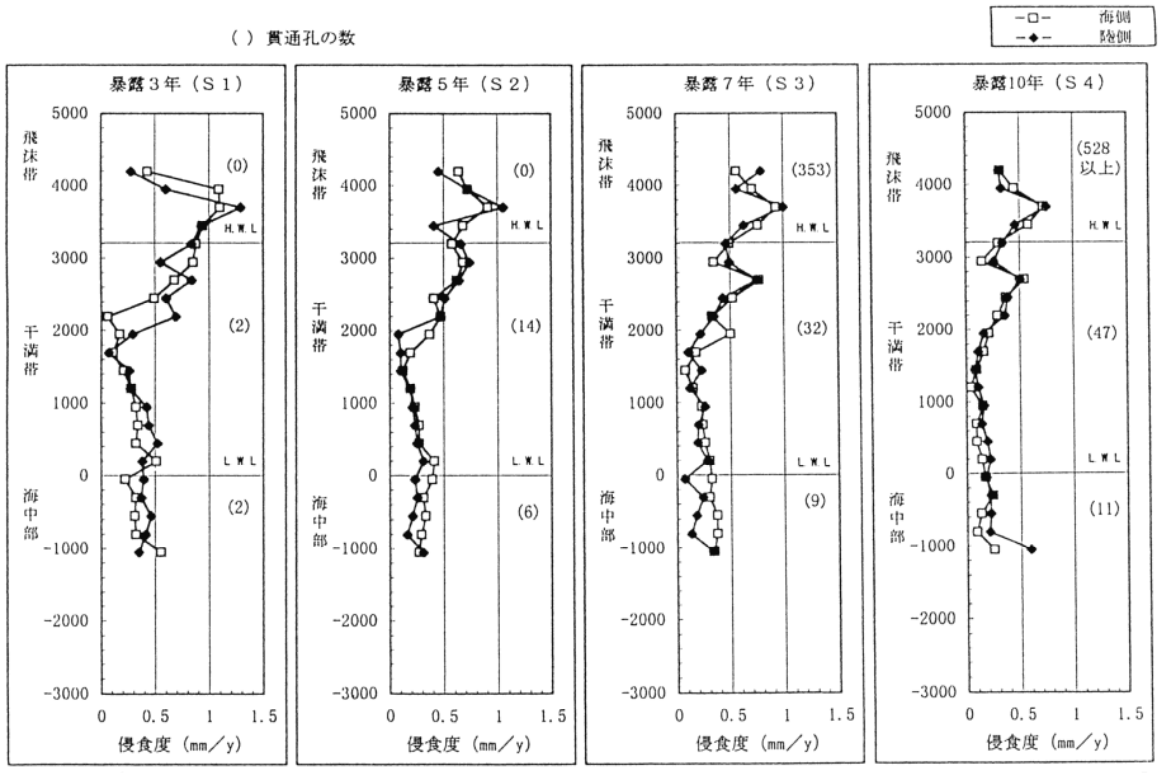


図2.11　シンガポール鋼管試験材の侵食度

表2.8　被覆材の目視による外観観察結果[6)]

（フィリピン暴露15年）

仕　　様	試験材No.	暴露期間	外　観　状　況
無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（75μm）＋ ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ塗装（300μm×3）	P7	7年	全体的に塗膜状態は良好。３箇所にごく小さな疵からのさび発生がある。
	P8	15年	全長にわたって部分的な塗膜ふくれと錆発生がみられる。 飛沫帯陸側上部に比較的大きな錆こぶが集中して発生している。干満帯に錆を含む小さな塗膜ふくれの点在と、部分的な塗膜剥離・素地腐食がみられる。海中部に部分的な塗膜剥離・素地腐食がみられる。
無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（75μm）＋ ｴﾎﾟｷｼ塗装（200μm×3）	P9	7年	全体的に塗膜状態は良好。全体的に数cm程度の疵が８箇所みられる。
	P10	15年	試験材の上方と下方に塗膜ふくれと錆発生がみられる。 飛沫帯の陸側上方に錆こぶが数点みられる。干満帯の塗膜状態は良好。海中部に塗膜剥離と錆発生がみられる。殆どが陸側にある。
ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ塗装（300μm×2）	P11	7年	全体的に塗膜状態は良好。さびなどの塗膜欠陥は全くみられない。
有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（20μm）＋ ｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸ入りﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ塗装 （750μm×2）	P12	7年	全体的に塗膜状態は良好。さびなどの塗膜欠陥は全くみられない。
	P13	15年	試験材上端は腐食が進んでおり、地鉄は殆ど残っていない。 この部分以外は塗膜の損傷がみられず良好である。
有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（25μm）＋ ｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸ入りｴﾎﾟｷｼ塗装 （650μm×3）	P14	7年	全体的に塗膜状態は良好。さびなどの塗膜欠陥は全くみられない。
	P15	15年	試験材上端で塗膜割れと錆の発生がみられる以外は、塗膜損傷や腐食はみられない。
ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ被覆（3.0mm）	P16	7年	全体的に異状が認められない。疵も全く見られない。
	P17	15年	試験材下方に少し錆発生がみられるが、被覆は概ね良好である。 飛沫帯、干満帯は被覆の損傷はみられず良好。海中部に数箇所、被覆損傷と錆発生がみられる。下端（シール塗装部分）に錆が発生している。
防食ﾃｰﾌﾟ（ﾍﾟﾄﾛﾗﾀﾑ系）（2mm） ＋ＦＲＰカバー（3mm）	P18	7年	ｶﾊﾞｰ自体には異状は認められない。ｶﾊﾞｰ解体後の鋼管表面にもさびは見られない
	P19	15年	FRPｶﾊﾞｰに目立った損傷はみられない。上方の横に走る割れは試験材支持枠の接触とみられる。陸側に３箇所、等間隔にあいた穴があるが、現地調査では記録されていないので梱包時に受けた傷とみられる。
ﾓﾈﾙ板溶接巻き	P20	15年	モネル板が部分的に腐食し、その腐食生成物が表面で観察される。腐食程度と色調は部位によって異なる。 飛沫帯は上方試験材支持具からの流れ錆に覆われ、中に微小な緑色錆が混じっている。干満帯は薄い緑色を呈している。海中部は緑色の点錆が全域にみられる。

（シンガポール暴露10年）

仕　　様	試験材No.	暴露期間	外　観　状　況
無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（75μm）＋ ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ塗装（300μm×3）	S7	7年	全体的に塗膜状態は良好。しかし、全体的にあて疵やこすり疵が多く（２０箇所程度）、疵部のさびの面積は数cm角程度ある。
	S8	10年	全体的に塗膜状態は良好。しかし、全体的にあて疵やこすり疵が多く（３０箇所程度）、疵部のさびの面積は数cm角程度ある。２箇所で鋼管に孔がみられる。
無機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（75μm）＋ ｴﾎﾟｷｼ塗装（200μm×3）	S9	7年	全体的に塗膜状態は良好。しかし、全体的にあて疵やこすり疵がわずか見られ、（８箇所）、１箇所は10cm角の大きな疵部でさびもみられる。
	S10	10年	全体的に塗膜状態は良好。しかし、全体的にあて疵やこすり疵が多く（３０箇所程度）、疵部のさの面積は数cm角程度ある。海中部のさび発生面に深い孔食あり
ﾀｰﾙｴﾎﾟｷｼ塗装（300μm×2）	S11	6年	全体的に塗膜状態は良好。しかし、全体的にあて疵やこすり疵が多く（２０箇所程度）、疵部のさびの面積は数cm角程度ある。
有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（20μm）＋ ｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸ入りﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ塗装 （750μm×2）	S12	9年	全体的に塗膜状態は良好。飛沫帯にﾁｮｰｷﾝｸﾞが認められ、一部にｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸが露出している。さびなどの塗膜欠陥は全く見られない
有機ｼﾞﾝｸﾘｯﾁﾍﾟｲﾝﾄ（25μm）＋ ｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸ入りｴﾎﾟｷｼ塗装 （650μm×3）	S13	9年	全体的に塗膜状態は良好。飛沫帯にﾁｮｰｷﾝｸﾞが認められ、一部にｶﾞﾗｽﾌﾚｰｸが露出している。干満部に１箇所、大きな疵部(12*12cm)にさびがみられる。
ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ被覆（3.0mm）	S14	9年	全体的に異状が認められない。 W.L.近くの干満部に３×３５cmのこすり疵があるが、表面のみである。

２．５　海洋構造物の耐久性向上技術に関する共同研究（駿河湾沖）[7)]

（１）暴露試験の位置および種類

①暴露試験の位置を図2.12 に示す。

②暴露試験材の種類を表2.9 に、その形状を図2.13 に示す。

暴露試験期間は1984年～2003年までの20年間

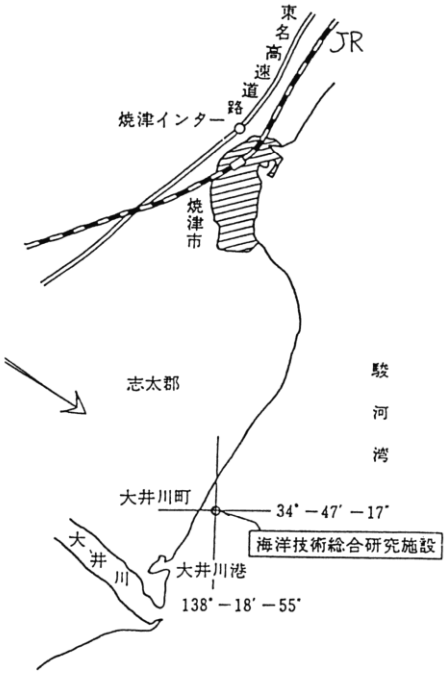


図2.12　設置場所

表2.9　海洋技術総合試験施設を利用した腐食防食試験材料[8)]

大　項　目	小　　項　　目 (代表的な試験材構成)	当初 設置	回収済	追加 設置	現在 本数
Cr-Ni 系ｽﾃﾝﾚｽ (一部隙間材付与)	ステンレス鋼(304､316他)	14	9	3	8
	ステンレス鋼＋電防	7	7	2	2
	二相ステンレス鋼	6	3	0	3
ｸﾗｯﾄﾞ鋼	ステン、チタン、キュプロ、モネル	7	4	0	3
比較材	普通鋼、チタン	9	4	0	5
	溶射＋塗装、亜鉛メッキ＋塗装	2	0	0	2
	普通鋼＋無機ジンク＋タールエポ等	4	2	0	2
耐海水性鋼		14	8	2	8
塗覆装鋼材	塗覆装鋼材	6	0	10	16
	塗覆補修材	0	0	4	4
合　　計		69	37	21	53

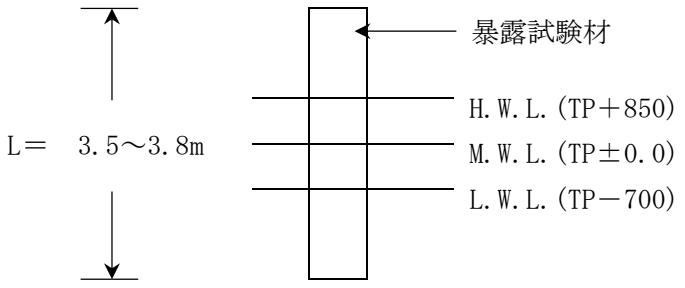


図2.13　暴露試験材の形状

（２）研究結果

①塗膜物性

普通鋼、耐海水鋼の塗膜は、膜厚、交流抵抗とも劣化を示すような変化はなかった。ピンホールが板材の端部で若干検出された。施設本体の塗覆装は台風時の浮遊物衝突によるキズ以外は健全で、膜厚、交流抵抗ともに著しい変化はない。

②各種ステンレス鋼

（ａ）生物付着下、人工隙間付与部以外のステンレス鋼表面には飛沫、干満帯および海中部ともにほとんど腐食はない。

（ｂ）隙間腐食は生物付着下、人工隙間付与部に発生しており、発生面積は人工隙間付与部の方が生物付着下より大きく、その深さも深い傾向になっている。

（ｃ）隙間腐食は干満帯より海中部の方が深い傾向を示している。

（ｄ）二相ステンレスは隙間腐食の発生が他のステンレス鋼より少ない。

③ステンレス鋼の電気防食

（ａ）電気防食によって生物付着下、人工隙間付与部に発生していた隙間腐食は全て完全に防止された。

（ｂ）このときの防食電位は施設本体と同様、-930～-970mV（S.C.E.）に設定したが、さらに適正電位の検討を継続している。

④チタン材

生物はステンレス鋼と同様に付着しているが、飛沫帯から海中部までの隙間部、および一般部に腐食は発生していない。

⑤耐海水鋼

飛沫帯から海中部までの腐食量を比較すると、耐海水鋼は普通鋼の約70％の値になっている。

＜参考資料＞

１）鋼管杭協会：「防食鋼管杭の開発とその海洋暴露試験報告書」(1992)

２）建設省土木研究所：明嵐政司、守屋進、鳥居謙一、山本幸次「外洋に２０年間曝露した防食鋼管杭の耐久性試験報告書」土木研究所資料(平成12年1月)

３）伊坂健二，鈴木　操，土谷正幸，鈴木規彦：土木学会第48回年次学術講演会 V-120，(1993)

４）(独)港湾空港技術研究所：宮田義一、阿部正美、濵田秀則、清水一夫、中野啓眞、芥川博昭「鋼管杭の防食工法に関する現地試験（２０年目中間報告）」港湾空港技術研究所資料（2006,6）

５）鋼管杭協会：「熱帯海域における鋼材と防食材の暴露試験－暴露10年間の結果報告－」(1997)

６）鋼管杭協会：「熱帯海域における被覆鋼管の暴露試験－暴露15年間の結果報告－」(1999)

７）建設省土木研究所，(社)鋼材倶楽部,(社)プレストレス・コンクリート建設業協会,(財)土木研究センター：西崎到、守屋進氏ら「海洋鋼構造物の耐久性向上技術に関する共同研究報告書」(平成18年5月)

８）(社)鋼材倶楽部土木専門委員会：鋼材の新しい利用技術，P.14～17，(1996)

付・３　海上橋上部工の重防食塗装

３．１　海上橋上部工の重防食塗装

（１）重防食塗装の変遷

海上橋上部工における腐食環境は海上大気部にあたり、飛来海塩粒子の影響を受け田園地帯や都市部の大気部よりも腐食が激しく腐食速度は0.01～0.1mm/y 程度である。

この部位の防食法は比較的長寿命で塗替え可能かつ安価な塗装系が注目され、近年大型海上橋の建設とともに海洋環境下の鋼橋塗装の防食性能が飛躍的に向上した。

海上橋の塗装の変遷を表3.1 に示す。

①１９６０年以前

本邦の鋼橋塗装系は油性系鉛丹下塗り塗料＋フタル酸樹脂上塗り塗料系が圧倒的に多く、今日の温和な環境用の塗装仕様に相当する比較的薄膜（130～180μm）の一般塗装系であった。

②１９６２年以降（若戸大橋、東海道新幹線橋梁）

ショットブラスト、ショッププライマーなどの下地処理技術が向上し、耐水・防食性の優れた合成樹脂塗料の適用と相まって鋼橋塗装技術は著しく進歩した。

③１９７２年以降

大型橋梁に厚膜（200～300μm）の重防食塗装が使用開始された。重防食塗装系は米国の流れを汲む無機ジンクリッチペイント＋塩化ゴム塗料系（境水道大橋）と英国の流れを汲む亜鉛溶射＋フェノール MIO＋ 塩化ゴム塗料系（関門大橋）からである。その後大ブロック一括架設工法に対応する工場塗装や現地補修塗装の技術が港大橋や箱崎宮前大橋で確立した。重防食塗装の本格的な使用は本州四国連絡橋からであり、厚膜型無機ジンクリッチペイント＋ジンククロメート＋フェノール MIO＋塩化ゴム塗料系（大三島橋・1978年）や厚膜型無機ジンクリッチペイント＋エポキシ＋ウレタン塗料系（因島大橋・1982年、大鳴門橋・1985年、関西新空港連絡橋・1994年）が使用され、さらに上塗り塗料に耐候性を重視したふっ素塗料（東京湾横断道路橋・1997年、明石海峡大橋・1998）が採用され20年以上の塗替え周期が期待されている。

参考として腐食環境分類を表3.2[1)]に、環境別塗装仕様の代表例を表3.3 に、また、塗料・塗装規格を有している代表的な公的機関を表3.4 に示す。

１９８０年代後半には海上橋に長期耐久性の重防食塗装を採用し、新設と塗替え塗装の基準・仕様が決定された。これらの代表例を表3.5、表3.6 に示す。

最近では、「鋼道路橋塗装・防食便覧」（日本道路協会）[2)]が大幅改定された。

（２）維持管理システム

わが国の橋長15m 以上の鋼道路橋のストックは約６万橋、また鋼鉄道橋は約５万橋を越え、これらの維持管理のうち塗替え費の占める割合は年々大きくなり、合理的・経済的な塗替え周期、補修法を決定することは重要な課題である。日本鋼構造協会、

ＪＲなどの諸機関は実績の多い油性鉛丹塗料＋フタル酸樹脂塗料系を中心として鋼橋塗料の実態調査を行い塗膜劣化因子（環境、構造部位、塗装系）、塗膜劣化・診断評価法（劣化度、生錆率、ケレン度等）、各種塗料や使用環境に応じた塗替え周期・補修方法を検討した。その後「ライフサイクルコスト」の概念[3)]を導入した合理的な塗膜設計手法及び塗替え・補修法が提案された。鋼橋塗装の防食防錆技術の要点は塗膜の耐久性を上げ塗替え回数をできるだけ少なくし維持管理を含むトータルコストを最小限にすることである。現在は重防食塗装の塗替え期間、点検・診断・補修などの維持管理に関する実務的なデータの蓄積段階であり、景観と防食塗装の使い分けや部分塗替えなどの採用、塗装の自動化・工期短縮化などの塗替え塗装コストの低減も含め、ソフト・ハードの両面からの最適化が課題である。

標準的な重防食塗替え仕様を表3.6 に示した。

表3.1　海上橋上部工の重防食塗装システムの変遷

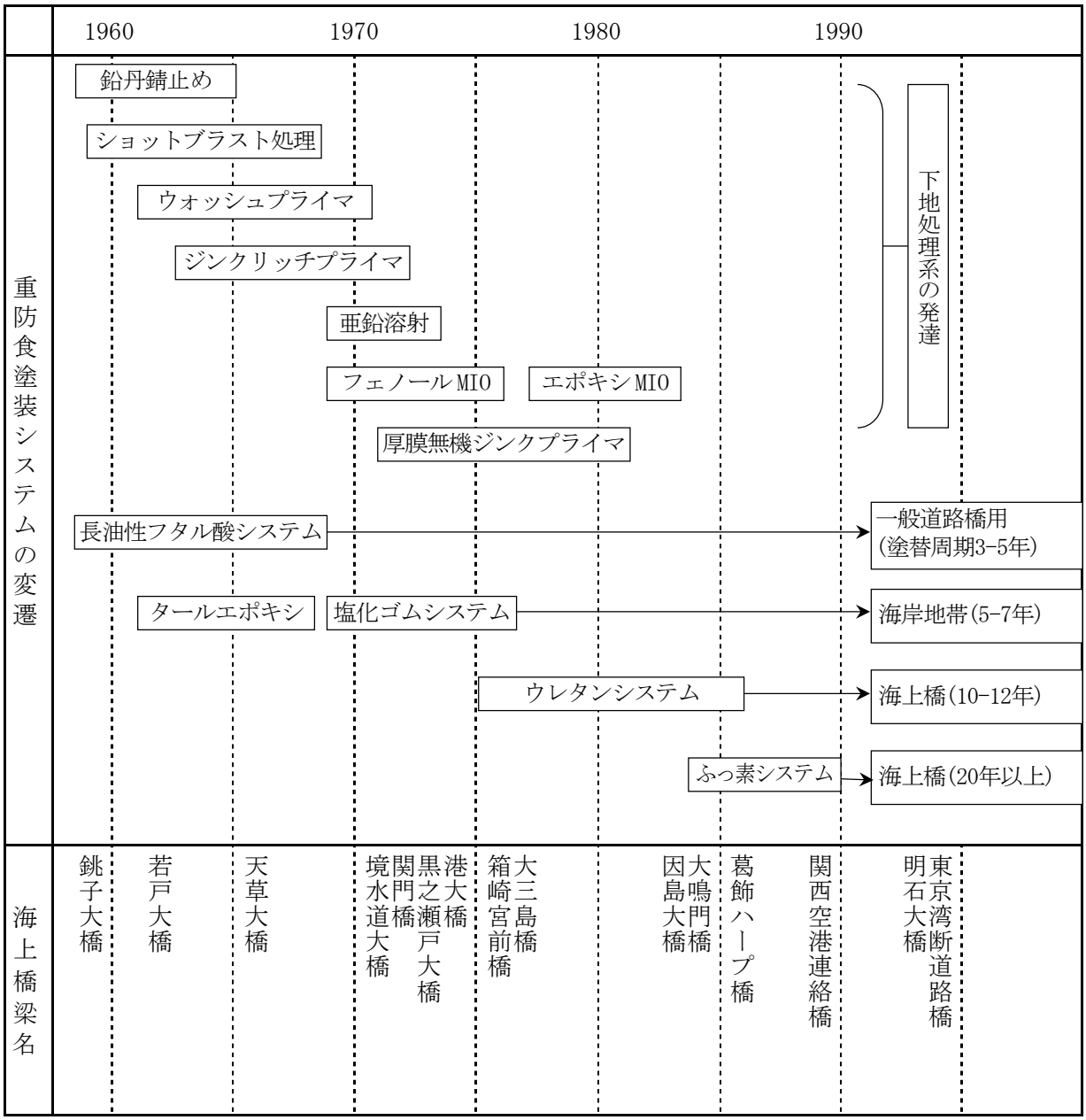


表3.2　腐食環境分類[1)]

一般環境	やや厳しい環境	厳しい環境
飛来塩分の影響を受けず、かつ、自動車排気ガスや工場ばい煙の影響を強く受けない環境。	飛来塩分の影響を受ける環境。または自動車排気ガスや工場ばい煙の影響を強く受ける環境。	潮風が強く、飛来塩分の影響を強く受ける環境。

表3.3　環境別塗装仕様の代表例

環境／工程	一般環境	やや厳しい環境		厳しい環境	
素地調整	原板ブラスト	原板ブラスト	原板ブラスト	原板ブラスト	同　左
ショッププライマー	エッチングプライマー	エッチングプライマー	ジンクリッチプライマー	無機ジンクリッチプライマー	〃
２次素地調整	－	－	－	製品ブラスト	〃
下塗り第１層	鉛系さび止めペイント	鉛系さび止めペイント	塩化ゴム系塗料下塗り	厚膜型ジンクリッチペイント	〃
下塗り第２層	鉛系さび止めペイント	鉛系さび止めペイント	塩化ゴム系塗料下塗り	エポキシ樹脂塗料下塗り	〃
下塗り第３層				**エポキシ樹脂塗料下塗り	〃
中　塗　り		フェノールMIO塗料			
中　塗　り	*長油性フタル酸樹脂塗料中塗り	塩化ゴム系塗料中塗り	塩化ゴム系塗料中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗り	ふっ素樹脂塗料用中塗り
上　塗　り	*長油性フタル酸樹脂塗料上塗り	塩化ゴム系塗料上塗り	塩化ゴム系塗料上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り	ふっ素樹脂塗料上塗り

＊　：シリコンアルキド樹脂塗料に置き換えることがある。
＊＊　：エポキシ樹脂系 MIO 塗料に置き換えることがある。

表3.4　塗料・塗装規格を有している代表的な公的機関

日本道路協会（鋼道路橋塗装・防食便覧）
ＮＥＸＣＯ(構造物施工管理要領)
旧本州四国連絡橋公団(鋼橋等塗装基準・同解説)
首都高速道路㈱(橋梁塗装設計施工要領)
名古屋高速道路公社（塗装設計施工基準)
阪神高速道路㈱(土木工事共通仕様書)
福岡北九州高速道路公社(設計基準 第３部 構造物設計基準)
広島高速道路公社(塗装設計施工基準)
(財)鉄道総合技術研究所「鋼構造物塗装設計施工指針」
日本道路協会（道路橋の塩害対策指針（案）・同解説）

表3.5　海上長大橋や港湾大型橋梁に採用されている標準的塗装仕様
（上塗りにポリウレタン樹脂塗料またはふっ素樹脂塗料が適用されている場合）

工　　程	塗　料　名 又は作業名	塗回数	塗　装 方　法	標　　準 塗　布　量 (kg/㎡/回)	標　　準 膜　　厚 (μm/回)	塗装間隔	
						min	max
素地調整 （原板）	ブラスト処理により錆、その他の付着物を全面的に除去する。 （SSPC　SP-10　または　ISO　Sa2$\frac{1}{2}$）						
一　次 プライマー	無機ジンクリッチプライマー	1	エアレス スプレー	0.20	20	２日	６ヵ月
素地調整 （製品）	ブラスト処理により錆、その他付着物を全面的に除去する。 （SSPC　SP-10　または　ISO　Sa2$\frac{1}{2}$）						
下塗り	厚膜型無機ジンクリッチペイント	1	エアレス スプレー	0.70	75	２日	６ヵ月
ミストコート	厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗り	1	エアレス スプレー	0.16	－	１日	10日
下塗り	厚膜型エポキシ樹脂塗料下塗り	2	エアレス スプレー	0.30	60	１日	３ヵ月
中塗り	ポリウレタン樹脂塗料用中塗り又はふっ素樹脂塗料用中塗り	1	エアレス スプレー	0.17	30	１日	10日
上塗り	ポリウレタン樹脂塗料上塗り又はふっ素樹脂塗料上塗り	1	エアレス スプレー	0.14	25	－	－

（参考）

中塗りはポリウレタン樹脂塗料用中塗りまたはふっ素樹脂塗料用中塗りとしたが、この塗料は実質的にはエポキシ樹脂を基本樹脂とした塗料であるため、本州四国連絡橋公団のようにエポキシ樹脂塗料中塗りと表記されていることもある。

表3.6　標準的塗替え塗装仕様例

工　　程	塗　料　名 又は作業名	塗 回 数	塗　装 方　法	標　　準 塗　布　量 (kg/㎡/回)	標　　準 膜　　厚 (μm/回)	塗装間隔	
						min	max
素地調整	動力工具処理により錆、劣化した塗膜その他の付着物を除去する。 (SSPC SP-3 または　ISO　St3)						
下塗り (鋼面部)	変性エポキシ樹脂 塗料	1	はけ塗り	0.24	60	1日	10日
下塗り	変性エポキシ樹脂 塗料	1	はけ塗り	0.24	60	1日	10日
下塗り	変性エポキシ樹脂 塗料	1	はけ塗り	0.24	60	1日	10日
中塗り	ポリウレタン樹脂 塗料用中塗り 又は ふっ素樹脂塗料用 中塗り	1	はけ塗り	0.14	30	1日	10日
上塗り	ポリウレタン樹脂 塗料上塗り 又はふっ素樹脂塗 料上塗り	1	はけ塗り	0.12	25	－	－

＜参考文献＞

1）(社)日本道路協会：「鋼道路橋塗装便覧」(1990)

2）(社)日本道路協会：「鋼道路橋塗装・防食便覧」(2005)

3）(社)日本鋼構造協会：鋼橋塗装のライフサイクルに関する調査研究、JSSC レポート、No12、(1989)

付・4　下部工の超長期防食法

超大橋梁や大規模な浮体鋼構造物等に於いては、過酷な海洋環境下で超長期間のメンテナンスフリーを目指した防食システムの採用が必要である。

現在までに、暴露試験結果等を基に実用化されている腐食環境毎の防食システムを整理した結果を表4.1 に示し、以下、これらの主な採用例の概要について解説する。

表4.1　鋼構造部の長期防食法とその耐用年数[1)]

腐食環境	防食法	防食仕様	補修予想周期	実　績
飛沫帯 干満帯	有機ライニング	ポリエチレン，エポキシ， ポリウレタン，2.5㎜	40　年	多数
	無機ライニング	セメントモルタル （かぶり）100㎜	50　年	多数
	耐食性金属 ライニング	チタンクラッド鋼板 チタン厚　1㎜	100　年	東京湾横断 道橋脚
	複合防食	セメントモルタル＋犠牲鋼板＋ エポキシ（500+28+2.5）㎜	100　年	関西 空港連絡橋
海中部	電気防食	アルミ流電陽極 耐用年数に応じて設計	陽極の設計 寿命	多数
	有機ライニング	ポリエチレン，エポキシ， ポリウレタン，2.5㎜	40　年	多数
	有機＋電気防食	ポリエチレン，2.5㎜ アルミ流電陽極	70　年	多数
海　底 土中部	腐食しろ	2㎜	100　年	多数
	電気防食	アルミ流電陽極 耐用年数に応じて設計	陽極の設計 寿命	多数

４．１　本州四国連絡橋

海中基礎工法の設置ケーソン工法（ケーソンを工場で製作、現地に曳航し、沈設する工法）が主流であり、鋼ケーソンはコンクリート工事用の型枠として位置づけられており、防食対策は従来とられてこなかった。しかし、ケーソン外壁の腐食消滅の後に進行するであろうリブ、ストラットなど鋼材腐食に起因するコンクリートへの影響を防止するには、鋼ケーソンを防食することが最も効果的である。そこで表4.2 に示すように超厚膜型エポキシ樹脂塗料と電気防食が来島大橋ＳＰケーソンにはじめて採用された。電気防食電流密度は高潮流を考慮して大きく、またアルミニウムアノードは50年耐用設計である。

表4.2　塗装仕様（来島大橋）[2)]　　単位（μm）

区　　分	第１層	第２層	第３層	第４層	合　計
海中部 (TP-29m ～TP-5m)	厚膜型無機ジンクリッチペイント 75	ミストコート	タールエポキシ樹脂塗料 200	タールエポキシ樹脂塗料 200	475
干満帯・飛沫帯 (TP- 5m ～TP+5m)	エポキシジンクリッチプライマー 20	超厚膜型エポキシ樹脂塗料 3,000	ふっ素樹脂塗料 （上塗り） 20	―――	3,040

表4.3　設計防食電流密度（来島大橋）[2)]

区　　分	設　　計　　値	
防食電流密度	230mA／㎡	平均潮流速を2m/ｓと仮定
	50mA／㎡	捨石の中
はくり率	25%	塗膜のはくり率

４．２　関西空港連絡橋

図4.1 に示す空港連絡橋の下部工の水線部には、図4.2 に示す複合防食仕様が採用された。すなわち、干満帯は防食被覆の損傷、劣化が著しく、維持管理と補修が極めて困難であるほか、船舶などの衝突に対して強度を確保する必要があることから、図4.3 で見られるように、コンクリートで15～40年、犠牲鋼板で55～40年、有機ライニングで30～20年、計100 年の耐久性がはじめて明示された。

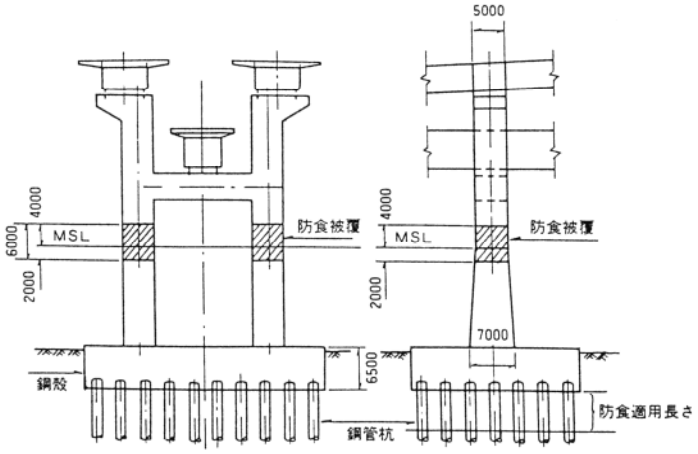


図4.1　下部工一般図[3)]

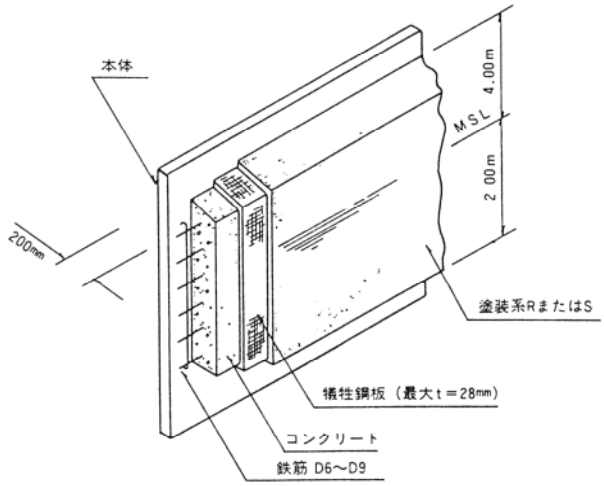


図4.2　干満帯の防食工[3)]

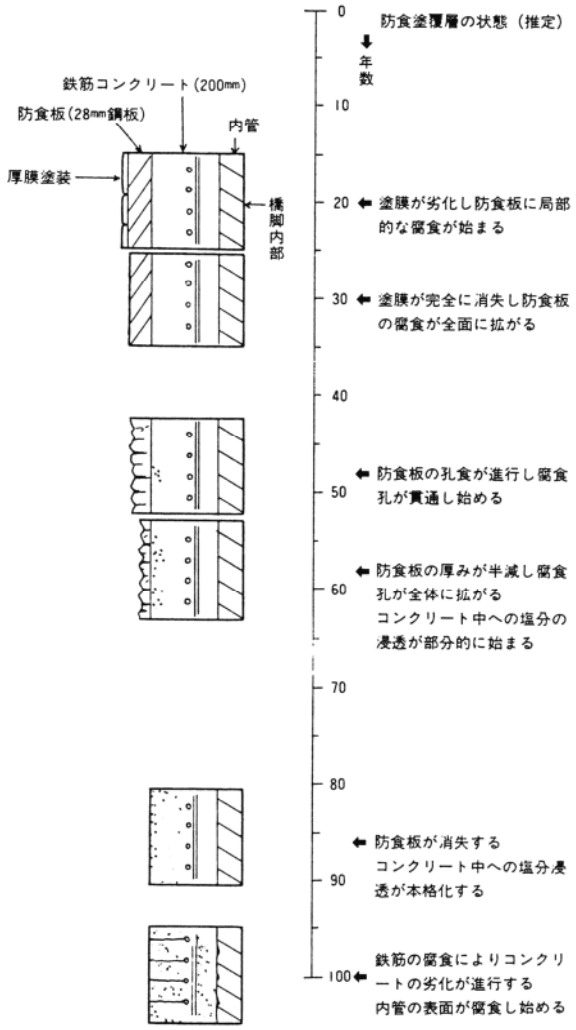


図4.3　干満帯の劣化状態の推定[3)]

４．３　東京湾横断橋

横断橋は50～100 年の耐用年数を目標にしており、図4.4 に示すTP+3m からTP-2mまでの飛沫・干満帯の下部工の防食としては、チタンクラッド鋼板（チタン１㎜、鋼４㎜）が採用された。これはチタンの高耐食性と景観に注目したものであり、クラッド鋼にすることにより母材との溶接を可能にしている。またチタンと鋼は直接溶接できないことから、クラッド鋼の施工に関してはチタン/チタン溶接の工夫をし、終端部のみTIG による銀ロウ付としている。

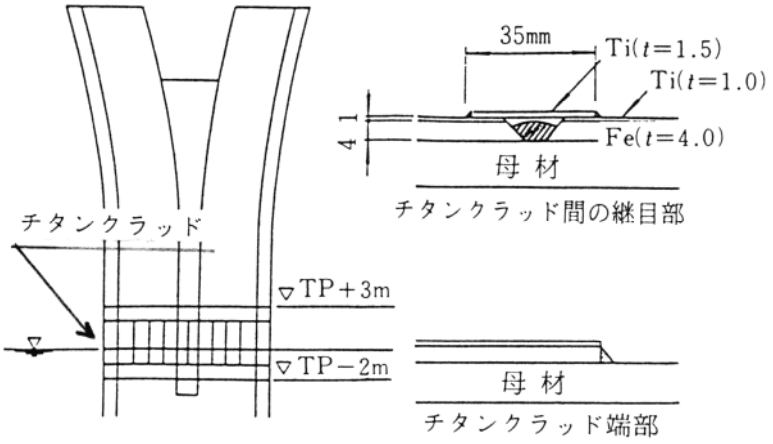


図4.4　チタンクラッド鋼板の溶接（東京湾）[4)]

４．４　沈埋トンネル

沈埋トンネルの施工方式には「鋼殻方式」と「コンクリート方式」があり、「鋼殻方式」では鋼板の寿命を確保するために腐食対策は不可欠である。また「コンクリート方式」でも止水のために鋼板を使用する場合には同様に腐食対策が必要である。表4.4 に沈埋トンネルの電気防食の適用例を示す。

表4.4　電気防食施工例[5)]

	工　事　名	施　工	施　主	耐用年数（流電陽極）
①	京葉線多摩川	S.43. 8	鉄建公団	60年耐用Al陽極
②	地下鉄６号線	S.43.11	大阪市交通	80年耐用Mg陽極
③	京葉線京浜運河	S.45. 1	鉄建公団	60年耐用Al陽極
④	衣浦港	S.46. 3	運輸省	60年耐用Al陽極

注）①、③、④は、ともに鋼殻形式でｔ＝９㎜の鋼板である。構造力学的には鋼殻に期待をせずに止水を目的としている。鋼板の土壌中における年間腐食量をいずれも0.2㎜／ｙ としている。尚、最近では、耐用年数が100年の採用例もある。

＜参考文献＞

１）（財）沿岸開発技術研究センター・マリンフロート推進機構：大規模浮体構造物の研究報告書、P.347、(1995)

２）高城信彦、金保　勉、清見博英：本四技報、Vol.18, P.42～45、(1994)

３）関西国際空港（株）、（財）土木研究センター：「空港連絡橋の鋼構造物の防錆防食指針（案）」(1986)

４）米田利博：基礎工、Vol.21, P.17、(1993)

５）中条武彦:防錆管理,Vol.9, P.30, (1981)

付・５　素地調整

（１）素地調整の目的

素地調整の目的は、鋼材の被覆面上のさび、油脂、汚れ等の、被覆防食材の接着性、防食性に有害な物質を除去するとともに、塗膜の初期接着強度の確保に有効な表面粗さを与えることである。鋼材面の汚染は、塗膜を構成する樹脂や乾性油と鋼材面との接近を妨げ、鋼材面とこれらの相互作用による接着を阻害するほか、塗膜と鋼材の界面上に存在する水層が塗膜下腐食や塗膜ふくれの原因となる。鋼材表面に存在する有害物質を取り除くための素地調整は、防食被覆の施工上必要なばかりでなく、耐久年数に及ぼす影響が大きいので、入念な施工管理が必要な工程である。

（２）素地調整の規格

防食被覆の防食効果や耐久性を十分に保持するため、表6.1 に示す塗覆装の種類に応じた素地調整グレードに仕上げなければならない。素地調整の規格としては、これまで国内外でSIS 055900（スウェーデン規格）やSSPC（Steel Structures Painting Council USA） などが使用されていたが、ISO 8501-1が制定されて以降、素地調整に関する国際規格が整備されつつあり、ISO 規格に統一化される方向にある。表6.2 にISO 8501-1による素地調整グレードを参考として示す。ISO 8501-1は、SIS 055900の基本的要素を採用したもので、素地調整グレードは、清浄化前の原板のさび度（４段階）と仕上げ等級（７段階）によって表示され、さび度と仕上げ等級の組み合わせの代表的な写真（24枚）がある。

表5.1　防食被覆の標準的な素地調整のグレード

	防　食　工　法		標準的な素地調整のグレード		
			ISO	SIS	SSPC
重防食被覆 (有機被覆)	工場加工 (プレコート)	ポリエチレン ウレタンエラストマー	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	SP-10以上
塗　　装		ジンクリッチペイント	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	SP-10以上
		エポキシ樹脂塗料	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	Sa2 $\frac{1}{2}$ 以上	SP-10以上
		タールエポキシ樹脂塗料	Sa2　以上	Sa2　以上	SP-6 以上
ペトロラタム被覆	現地施工	ペトロラタム系防食材	St2　以上	St2　以上	SP-2～3
無機被覆		モルタル被覆	St2　以上	St2　以上	SP-2～3
		金属被覆	St2　以上	St2　以上	SP-2 以上

表5.2　ISO 8501-1 による素地調整グレード

原板のさび度	A	鋼材の表面は大部分が固いミルスケールでおおわれており、さびは、もしあってもごく僅かである。
	B	鋼材の表面はさびが発生しており、ミルスケールは剥離し始めている。
	C	鋼材の表面のミルスケールは、すでにさびとなっているか、あるいはかき落とすことができる。しかし孔食は肉眼で僅かに認められる程度である。
	D	表面のミルスケールは、すでにさびとなっており、かなりの孔食が肉眼で認められる。
ﾌﾞﾗｽﾄ処理(Sa)		ブラスト処理による素地調整は文字Saで表示される。ブラスト処理に先だって、厚いさび層をチッピングにより除去する。眼で見える油、グリースや泥も除去する。ブラスト処理後表面の遊離した塵や研削材の屑を清掃する。
	Sa1	軽いブラスト処理。拡大鏡なしで見える表面には、油、グリース、泥土および弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。
	Sa2	十分なブラスト処理。拡大鏡なしで見える表面には油や異物等がないこと。
	$Sa2\frac{1}{2}$	さらに充分なブラスト処理。拡大鏡なしで見える表面には油や異物等がないこと。汚れのすべての残存する痕跡は、斑点あるいはすじ状の僅かな染みとしてのみ認められること。
	Sa3	目視上清浄な鋼材を得るためのブラスト処理。拡大鏡なしで見える表面には油や異物等がないこと。表面は、均一な金属色をしていること。
手工具および動力工具仕上げ(St)		スクレーパーやワイヤーブラシ、機械ブラシ、グラインダーのような手工具および動力工具による素地調整は、文字Stで表示される。 手工具および動力工具仕上げに先だって、厚いさび層をチッピングにより除去する。 手工具および動力工具仕上げ後、表面の遊離した塵や屑を清掃する。
	St2	充分な手工具および動力工具仕上げ。拡大鏡なしで見える表面には油、グリース、泥土また弱く付着したミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。
	St3	さらに充分な手工具および動力工具仕上げ。St2と同様であるが、素地の金属光沢を呈するまで、より充分な処理を行うこと。
火炎処理(F1)		火炎処理による素地調整は文字F1で表される。火炎処理に先だって、厚いさび層をチッピングにより除去する。火炎処理後、表面は動力ワイヤブラシにより仕上げられる。
	F1	拡大鏡なしで見て、表面にはミルスケール、さび、塗膜、異物がないこと。 すべての残存物は表面の変色（微妙な色の違い）としてだけ認められること。

注 ①さび度は文章とともに代表写真例でも定義されている。
注 ②処理等級は文章とともに代表的写真例でも定義されている。

（3）素地調整の方法

素地調整の方法の主なものは以下であり、工場では①のブラスト法を採用している。②～④は現場作業で主に使用される。

①ブ ラ ス ト 法　　：ショットブラスト、サンドブラスト
②動力工具による方法　：グラインダー、ディスクサンダー、スケーリングマシーン、エアハンマー、ジェットタガネ、ワイヤーホイール等
③手　作　業　　：スクレーパー、ハンマー、細ノミ、鋲カキ、ワイヤーブラシ
④そ　の　他　　：火炎による方法、酸洗法など

（4）素地調整の程度と工程に関する国内規格で、よく使われるものをあげると、
構造物施工管理要領（㈱高速道路総合技術研究所）
鋼道路橋塗装・防食便覧（（社）日本道路協会）　　などがある。
これらの規格による素地調整の程度の表示を対応させると表6.3のようになる。

表6.3　素地調整規格間の対応

	ISO	SIS	SSPC	高速道路総合技術研究所	日本道路協会
ブラスト法	Sa3	Sa3	SP-5 WHITE METAL BLAST CLEANING		清浄度１種 （１種ケレン）
	Sa2$\frac{1}{2}$	Sa2$\frac{1}{2}$	SP-10（95%以上） NEAR WHITE BLAST CLEANING	G-a	
	Sa2	Sa2	SP-6 COMMERCIAL BLAST CLEANING	G-b	
	Sa1	Sa1	SP-7 BRUSH-OFF BLAST CLEANING		
動力工具・手工具	St3		SP-3 POWER TOOL CLEANING	G-c	清浄度１種 （２種ケレン）
	St2		SP-2 HAND TOOL CLEANING		清浄度３種 （３種ケレン）
					清浄度４種 （４種ケレン）

付・6　防食被覆材料の試験法

防食被覆材料試験の規格および各種試験方法

防食被覆材料試験の規格および各種試験方法を表7.1 に示す。また、代表的な試験方法の概要を付与番号に応じ試2、3，試5、試9、試14～試16[注]に抜粋して示す。

表6.1　防食被覆材料試験の規格および各種試験方法

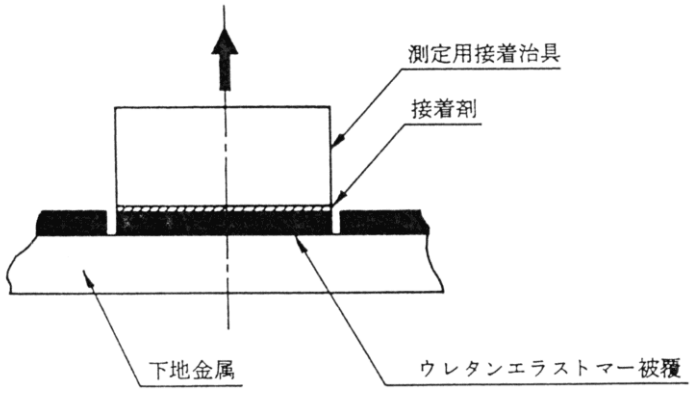
No	規　格　番　号	名　　称	項　　目
1	ASTM G 14-04(2010)	パイプラインコーティング	衝撃試験
2	JIS H 8300 (2010)	鋼材との接着力（ウレタンエラストマー)	プルオフ法試験
3	JIS G 3469(2010)	ポリエチレン被覆鋼管	ピール強度試験
4	JIS G 3469(2010)	ポリエチレン被覆鋼管	ピンホール試験
5	JIS K 5600-7-6(2002)	塗料一般試験法－屋外暴露耐候性	耐候性
6	JIS K 5600-7-7(2008)	促進耐候性	耐候性
7	JIS K 6922-2(2005)	ポリエチレン成形用及び押し出し用材料－試験片の作成方法及び特性の求め方	一般試験法
8	JIS K 6911(2006)	熱硬化性プラスチック一般試験方法	見掛け密度、比重
9	JIS K 6911(2006)	熱硬化性プラスチック一般試験方法	抵抗率
10	JIS K 6911(2006)	熱硬化性プラスチック一般試験方法	耐薬品性
11	JIS K 7112(1999)	プラスチックの密度と比重の測定方法	密度、比重
12	JIS K 7162(2011)	プラスチック－引張試験方法	引張強さ、伸び
13	JIS K 7206(1999)	熱可塑性プラスチックのビカット軟化温度試験方法	ビカット軟化点
14	JIS K 7209(2000)	プラスチックの－吸水率の求め方	吸水率
15	JIS K 7215(1986)	プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法	デュロメータ硬さ
16	JIS Z 8729(2004)	色の表示方法－$L^*a^*b^*$表色系及び $L^*u^*v^*$表色系	$L^*a^*b^*$
17	JIS Z 8730(2009)	色の表示方法－物体色の色差	△E
18	JIS Z 8741(1997)	鏡面光沢度測定方法	光沢度
19	JIS Z 0208(1976)	防湿包装材料の透湿度試験方法（カップ法)	透湿度

注．文献１）記載の規格番号・名称については最新版を記した。

試２：JIS H 8300	鋼材との接着力（ウレタンエラストマー）／引張密着強さ試験（A法）：初版ではプルオフ法試験と記載

JIS G 3443-3（第3部：外面プラスチック被覆）の試験方法

試験方法：平滑に仕上げた被覆面に測定用接着治具を接着し、接着剤が硬化してから治具の外周に沿って下地金属に達するまで切り込みを入れ、測定用接着治具を垂直に引きはがして、被覆あるいは接着部破断時の最高荷重を測定する。接着力はこの荷重を接着面積で除して求める。通常、測定冶具径は20mm、11.28mm（面積1cm^2）が用いられる。

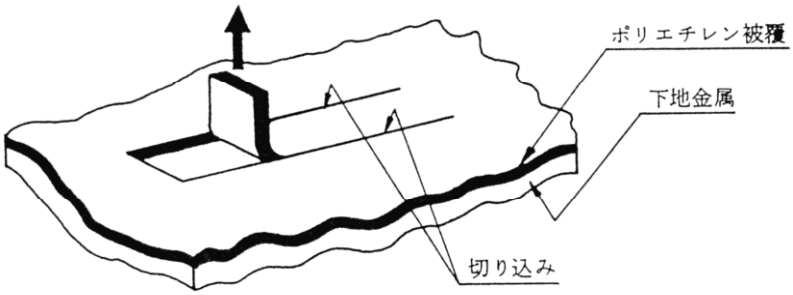


試３：JIS G 3469(2010)	ポリエチレン被覆鋼管／ピール強度試験

試験方法：被覆に間隔10mm、長さ60mm 以上の２本の切れ目を原管に達するまで入れ、その一端を剥ぎ起こし、荷重を測定する。

剥ぎ起こし角度　；約90°または約180°方向

速度　　；約50mm/min



試５:JIS K 5600-7-6(2002)	塗料一般試験方法／屋外暴露耐候性

１．試験片：鋼板（300㎜ × 150㎜×１㎜）に所定の方法で塗装

２．条　件：*特に規定の無い場合

試験開始時期　４月及び１０月（曇天・晴天）

観察時期　　３ヶ月毎（１年経過後は６ヶ月毎）

対象範囲　　試験片の周囲及び塗膜端10㎜

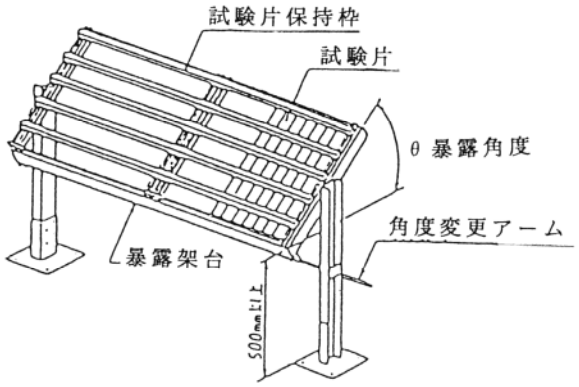
３．評価方法：①目視評価

②数値評価　　評価スケール　　→ グレースケール、評価写真、

白亜化度　　レイティングナンバー等

光沢保持率

４．気象観測：天候、気温、湿度、降水量、日照時間、日射量



試９：JIS K 6911(2006)	熱硬化性プラスチック一般試験方法／抵抗率

１．試験片：Φ約100㎜ 厚さ2㎜ の成型品

状態調整　温度20℃、湿度65％の空気中に88～94時間放置

２．条　件：試験温度　20℃　湿度　65％

電　　極　透湿性の導電性ゴムまたはペイント

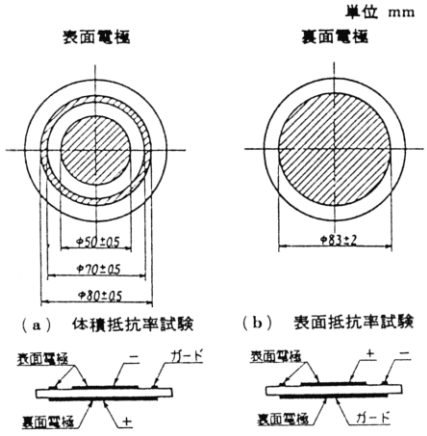
充電時間　１分間

体積抵抗率 $\rho_v = \frac{\pi d^2}{4t} R_v$

ρ_v：体積抵抗率（ＭΩcm）
d　：表面電極の円内の外形（cm）
t　：試験片厚さ（cm）
R_v：体積抵抗（ＭΩ）

抵抗率試験の電極配置

単位 mm



体積抵抗：

２つの電極間に印加した直流電圧を、電極間に挟んだ試験片の単位体積を通る電流で除した値

体積抵抗率：

各辺１cmの正方形の相対する辺を電極とする２つの電極間の体積抵抗と同じ値

試１４：JIS K 7209(2000)	プラスチック－吸水率の求め方

１．試験片：型成形又は押出成形で可、試験片作成方法を記録すること
60㎜×60㎜　厚さ1㎜
状態調整　温度50℃　24時間乾燥後、デシケータ中で放冷

２．条　件：試験温度　23℃　湿度　50％
試験数量　１つの試料について３個以上
方　　法　試験片を水（23℃　24時間）または沸騰水（30分＋室温水15分）に浸漬する前後で重量を秤り、重量変化量を試験片の総面積で除して吸水率を求める。

試１５：JIS K 7215(1986)	プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法／デュロメータ硬さ

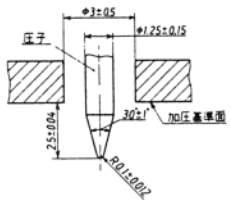
１．試験片：試料の試験面及び裏面は原則として平面かつ平行
厚さ6㎜ 以上　幅約25㎜ 以上（但し、H_DD40 以上であれば厚さ2㎜ 以上も可）
状態調整　温度23℃　湿度50％　88時間以上放置

２．条　件：押 圧 力　約50N（約5kgf）が望ましい（Dタイプ）
方　　法　デュロメータの圧子を試料の試験面に垂直に衝撃を与えないように押圧し、１秒以内に指示装置の指針の最大指示値を読みとる。
試験回数　同一試料について５回ないし10回（中心距離6㎜ 以上で実施）

３．表　示：デュロメータ硬さの記号と測定値（ex. H_DD56）

重防食ポリエチレンやウレタンエラストマーではタイプDデュロメータを用いる。

タイプDデュロメータの圧子
単位 mm



試１６：JIS Z 8729(2004)	$L^*a^*b^*$色素系及び$L^*u^*v^*$色素系による物体色の表示方法／$L^*a^*b^*$

１．明度指数：L^*

L^*：$116(Y/Y_n)^{1/3}-16$　　$Y/Y_n > 0.008856$

L^*：$903.29(Y/Y_n)$　　$Y/Y_n \leqq 0.008856$

国際照明委員会(CIE)が1976年に推奨した色空間

Ｙ：ＸＹＺ系における三刺激値の値

Y_n：完全拡散反射面の標準の光によるＹの値 ←JIS Z 8701
JIS Z 8728

２．クロマティクネス指数

①$L^*a^*b^*$ 表色素系のクロマティクネス指数：a^*、b^*

$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$

$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$

X/X_n，Y/Y_n，Z/Z_n ＞0.00856

［X/X_n，Y/Y_n，Z/Z_n のいずれかが0.008856以下の場合は、α/α_n を $7.787 \times (\alpha/\alpha_n) + (16/116)$ と置き換える］

Ｘ，Ｙ，Ｚ　：ＸＹＺ系における三刺激値

X_n，Y_n，Z_n：完全拡散反射面のＸＹＺ系における三刺激値

②$L^*u^*v^*$ 表色素のクロマティクネス指数：u^*，v^*

$u^* = 13L^*(u' - u_n')$

$v^* = 13L^*(v' - v_n')$

u',v'：CIE 1976年 UCS 色度座標

u_n',v_n'：完全拡散反射面の標準の光による CIE 1976年 UCS 色度座標

注．ここに記載の試２～試１６は旧ハンドブック記載の参考文献：

１）建設省土木研究所、（社）鋼材倶楽部：「土木鋼材用重防食被覆材料の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅰ）」(1995) をもとに、「重防食鋼管杭・鋼管矢板製品仕様書」（平成23年１月）一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会　に準じた規格番号、記述に変更。

付・７　水中切断・溶接

７．１　水中切断

土木工事の現場で鋼材を水中で切断する方法には、以下の２種類がある。

①水中ガス切断法

陸上で一般に使用されるガス切断法と同様に、燃焼ガスによる予熱炎で鋼材を予熱し酸素ガスで溶融切断する方式である。気中切断では、燃焼ガスとして一般にアセチレンが用いられるが水中では水素が用いられる。気中切断と大きく異なる点は、水中で予熱ガスを安定的に着火、燃焼させるために、切断用トーチは周囲から圧縮空気を噴射して水を遮断する構造になっていることである。

水中切断用トーチの構造例を図7.1 示す。

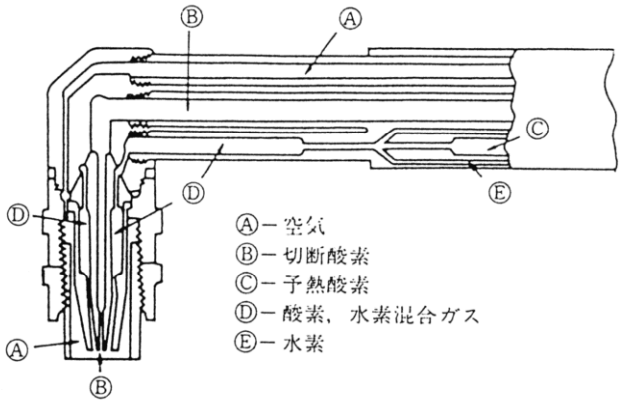


図7.1　水中ガス切断用トーチの例

②水中酸素アーク切断法

この方法は、ガス炎の代わりにアークを発生させて鋼材を予熱し酸素で溶融切断する方式である。直流アーク溶接器と酸素ボンベに繋がれた切断用ホルダに切断棒としての中空鋼管をチャックし、切断棒と鋼材の間にアークを発生させるとともに、切断棒の先端から酸素を噴射して切断するものである。切断棒は、絶縁材で被覆された細い中空鋼管であり、アーク発生とともに損耗するため通常の溶接棒と同じく取り替える必要がある。

水中酸素アーク切断法は、前述のガス切断法に比べて切断面は汚いが切断速度が数倍速いという特徴があり、多くの水中切断工事に採用されている。

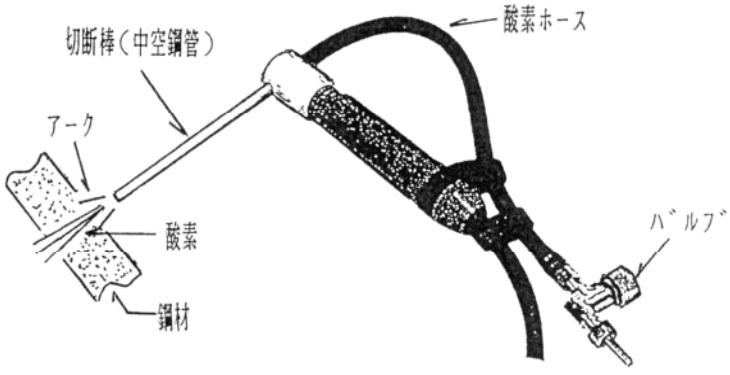


図7.2　酸素アーク切断用ホルダの例

７．２　水中溶接

７．２．１　水中溶接の方法

水中で鋼材を溶接する方法として、多様な方法が考案されているが、以下の３種類に大別できる。

①湿式法（図8.3 参照）

この方法は、気中で用いられているアーク溶接法を水中に適用するものであり、簡便な設備で水中溶接が可能なことから土木工事に多用されている。ただし、水中であるために被覆アーク溶接棒には絶縁コーテングが、溶接ホルダには感電防止対策が実施されている。

②局部乾式法（図7.4 参照）

この方法は、溶融金属を水から遮断するために溶接部に局部的な空洞を形成するものであり、その１例としてガスや水を溶接部の周囲に噴射して空洞を形成するガスシールドアーク溶接法がある。

③乾式法（図7.5 参照）

この方法は、溶接部だけでなく溶接作業者全体を囲む空洞の箱（ドライチャンバー）の中で溶接する方法である。乾式法は陸上とほぼ同じ条件で溶接が行えるため、良好な溶接品質を得ることができる。ただし、設備費用が高くなるため、その用途はジャケットや海中パイプライン等に限定されている。

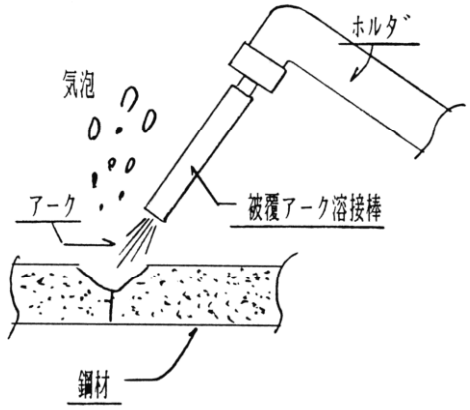
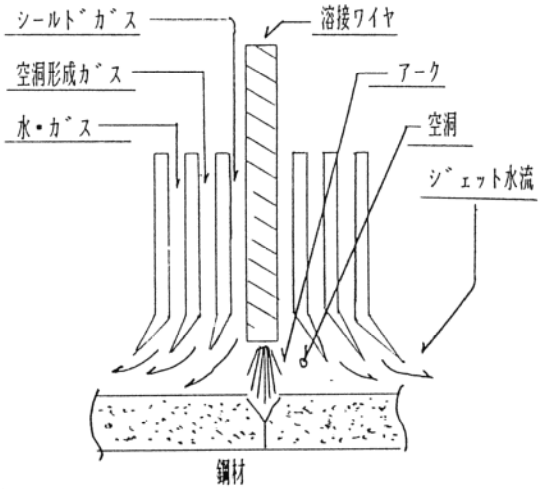
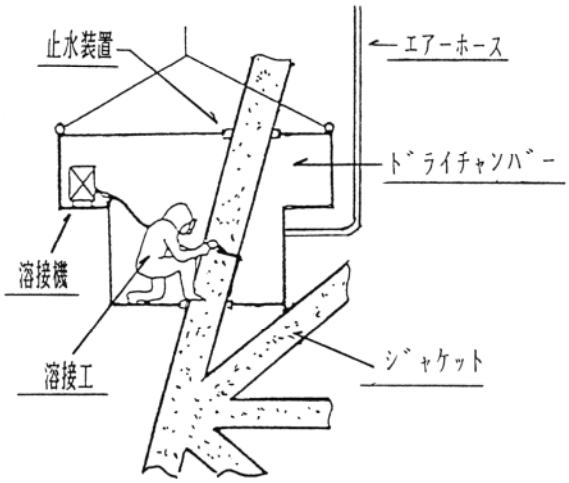


図7.3　湿式法



（ガスシールドアーク溶接法）

図7.4　局部乾式法



（ドライチャンバー使用）

図7.5　乾式法

７．２．２溶接品質

水中溶接は、陸上の気中溶接に比べ溶接作業条件が悪いため、良好な溶接品質が得られない場合が多い。特に広く採用されている湿式法は、溶接部が直接水と接するため溶接欠陥が発生しやすい。水蒸気発生によるブローホール、溶融金属の急冷による割れや残留応力、水素発生による脆化、不安定な溶接姿勢による溶け込み不足などが発生しやすいためである。

このため、主要な構造部材の接合に水中溶接を用いることはできるだけ避けるのが望ましい。やむをえず構造部材に水中溶接を計画する場合、溶接品質の悪化を考慮して溶接部の強度計算上許容応力度を工場溶接の半分程度に抑えることが望ましい。

付・ ８　外部電源方式による電気防食

８．１　外部電源方式の特徴

外部電源方式は、電源装置から被防食体に直流電流を強制的に流し込む方式である。日本国内では護岸・岸壁に対し流電陽極方式による電気防食が数多く採用されている。しかし、世界各国においては外部電源方式を採用している例が多い。

外部電源方式の設備は、直流電源装置・電極・照合電極・配線・接続箱などで構成され、それらの技術的な基準は旧通産省令「電気設備技術基準」第２４８条で詳しく定められていたが、現在、経済産業省令「電気設備の技術基準」７８条、同解釈第２３６条（平成20年10月1日改正）に受け継がれている。

これらのうち、直流電源装置には付属設備として各種モニター計器、開閉器、過電流遮断機、アラームなどが装備されている。

防食するために必要な電流は、海洋環境の変化に対応した調整が必要である。現在行われている直流電源装置の調整は手動タップ切替による段階的な電圧調整とオートマチックコントロール（自動電位制御）の２方式がある。後者は、環境の変化に対応して常に正常な防食状態を維持することができる方式である。外部電源方式では、装置の故障や断線によって無防食状態が発生しないように、正常に作動していることを常に監視する必要がある。

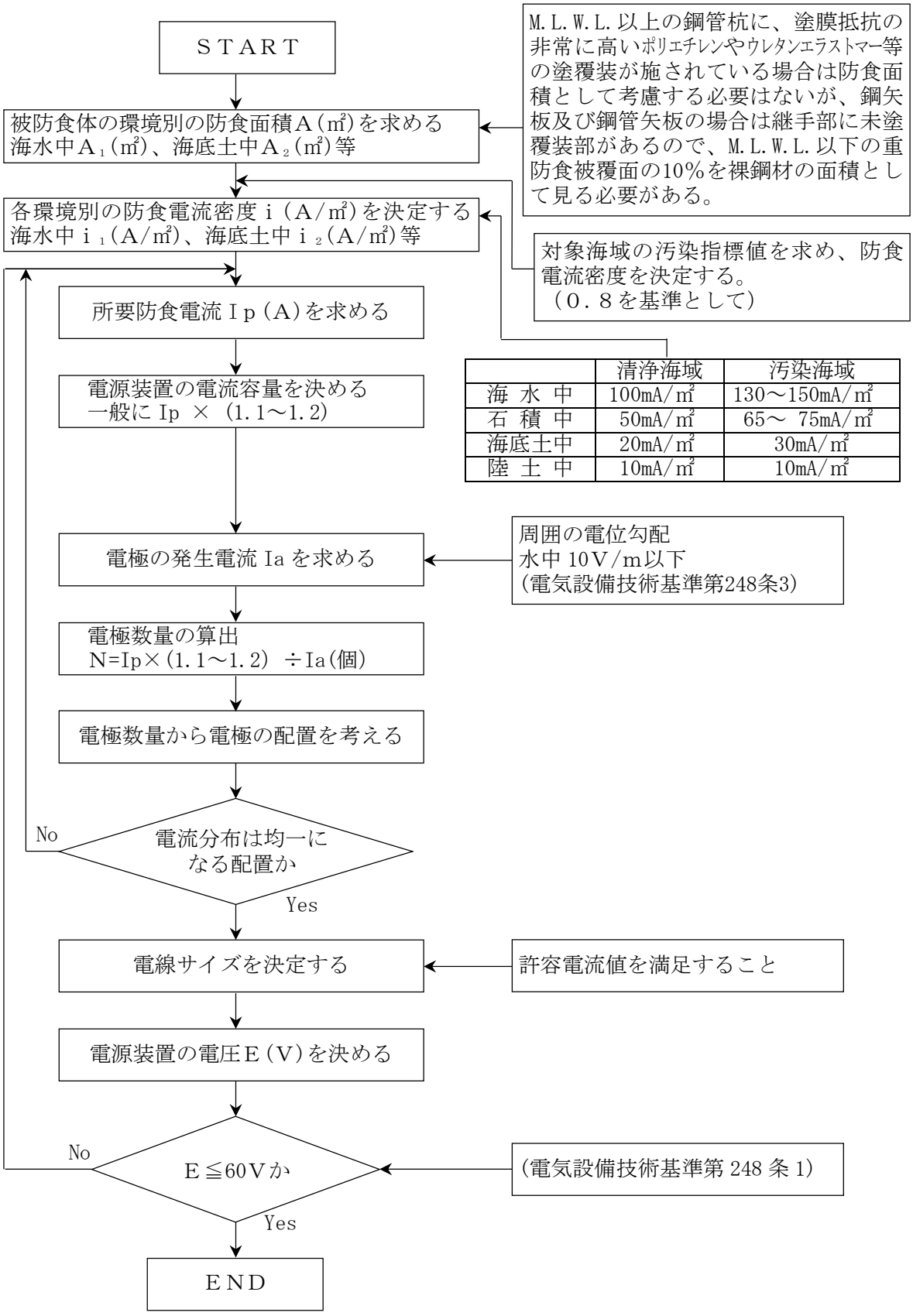
８．２　設計方法

（１）設計手順

従来の設計は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（運輸省港湾局監修（社）日本港湾協会、1989）、「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）、「海域における土木構造物の電気防食指針（案）・同解説」（建設省、（財）土木研究センター、1991）等の基準に準拠して行われていた。

一方、近年改定された「港湾の施設の技術上の基準・同解説」（（社）日本港湾協会、2007）を反映した「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」（（財）沿岸技術研究センター、2009）では、防食面積を S とし、対象海域の汚染状況が汚染指標から塩化物イオン濃度＜17,800ppm、溶存酸素濃度＜6ppm、アンモニウムイオン濃度＞0.1ppm の３項目のうち、2項目以上が該当する場合を汚染海域とした点等が変更されている。

ここに、より理解しやすいように、外部電源方式の1997年版記載の設計手順と改訂マニュアル記載の同フローを図8.1と図8.2に示す。なお、図8.2の詳細については、「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」（（財）沿岸技術研究センター、2009）の第Ⅱ部 第２編 第３章 3.2 を参照戴きたい。



	清浄海域	汚染海域
海 水 中	100mA/㎡	130～150mA/㎡
石 積 中	50mA/㎡	65～ 75mA/㎡
海底土中	20mA/㎡	30mA/㎡
陸 土 中	10mA/㎡	10mA/㎡

図8.1　外部電源方式の設計手順（1997年版）

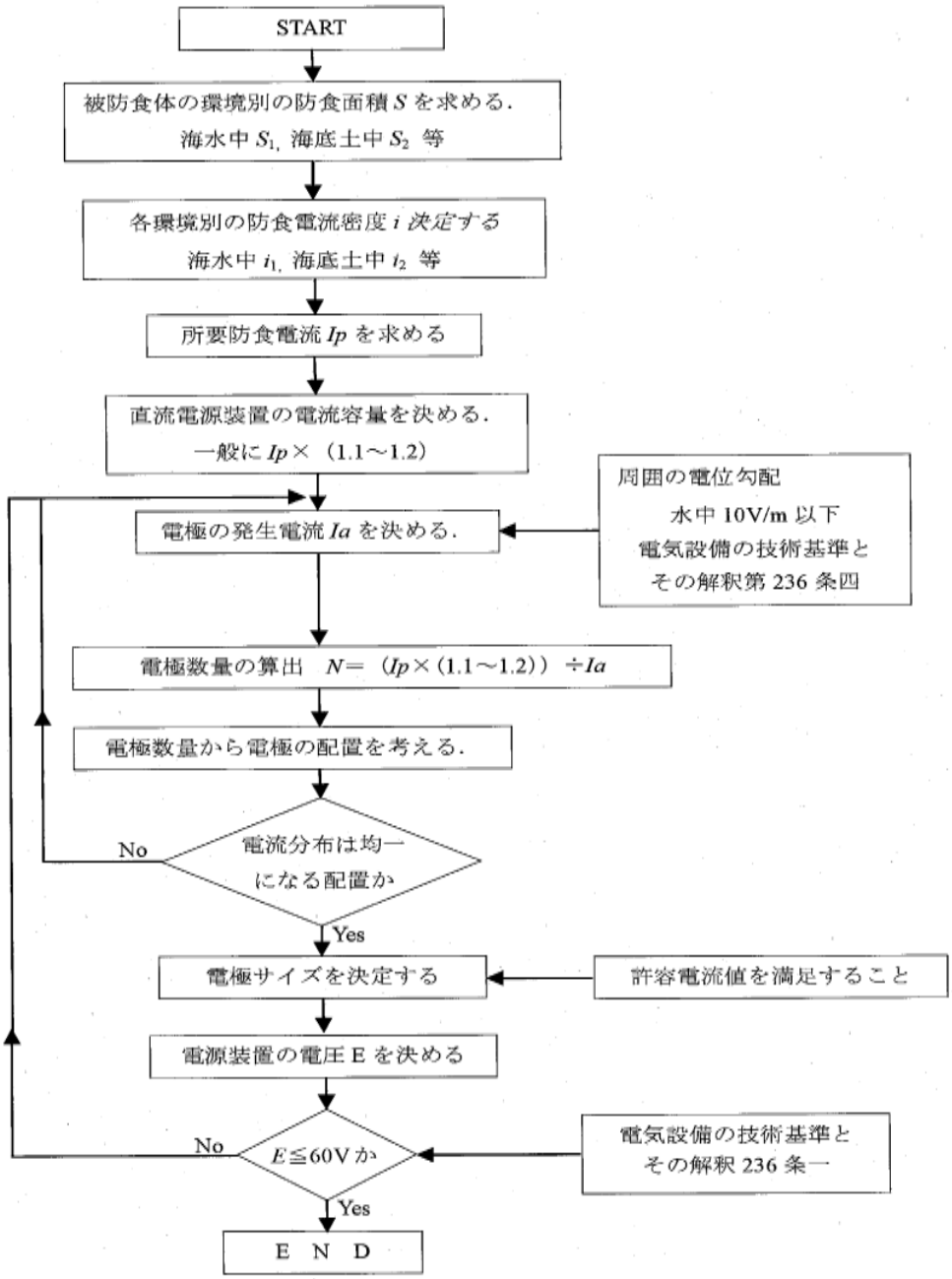


図8.2　外部電源方式の設計フロー（2009年版）

（２）設計例　：－２３ｍ鋼管杭桟橋

防食方式：重防食（ポリエチレンライニング：-0.5m以上）＋ 外部電源方式

①防食対象

鋼管杭	：φ812.8 x t12.0,　φ914.4 x t12.7
岸壁延長	：470m
平均干潮面	：M.L.W.L.　＋0.6m
水深	：-23.0m

②設計条件

海域の環境	：清浄海域
電気防食方式	：リアルタイム管理型モニタリングシステム
電気防食の適用範囲	：-0.5m以下

③防食面積

海水中	：28,400㎡
石積中	：　886㎡
海底土中	：　2,640㎡

④防食電流密度

海水中	：　0.1 A/㎡
石積中	：　0.05A/㎡
海底土中	：　0.02A/㎡

⑤所要防食電流

海水中	：　2840A
石積中	：　45A
海底土中	：　53A
計	2938A

⑥使用電極

種類	：チタン＋セラミックコーティング
数量	：64個

⑦照合電極数量　：48個

⑧直流電源供給装置

数量	：16基
供給電圧	：380V.50/60Hz
最大出力電圧	：40VDC
最大出力電流	：200mA/基（×16＝3200A＞2938A･･･OK）

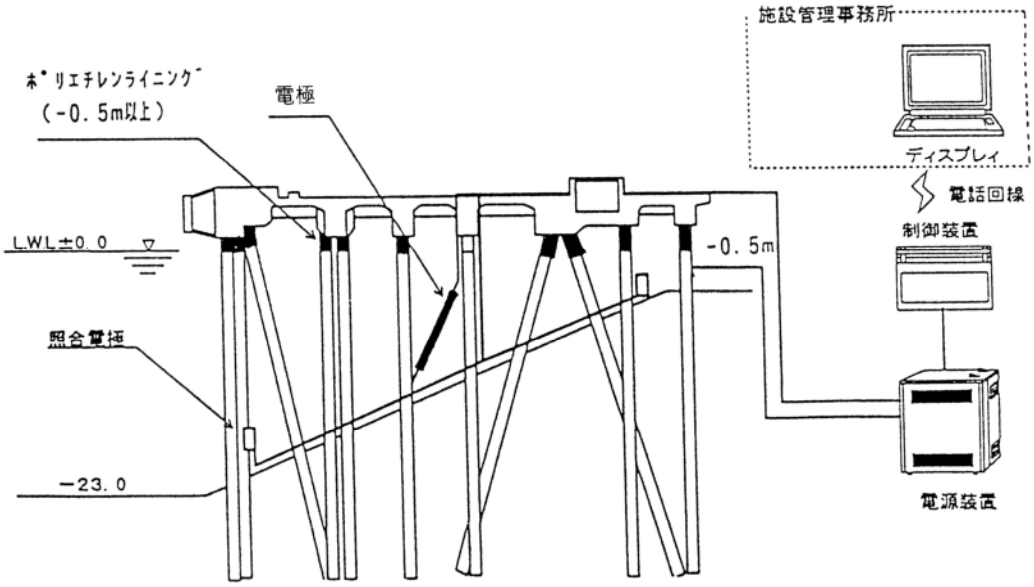


図8.3　－２３ｍ鋼管杭桟橋

８．３　施工方法

外部電源方式による電気防食装置は、電気設備の技術基準78条、同解釈第236条に準拠し施工しなければならない。一般的な施工手順は図8.4 に示す通りである。

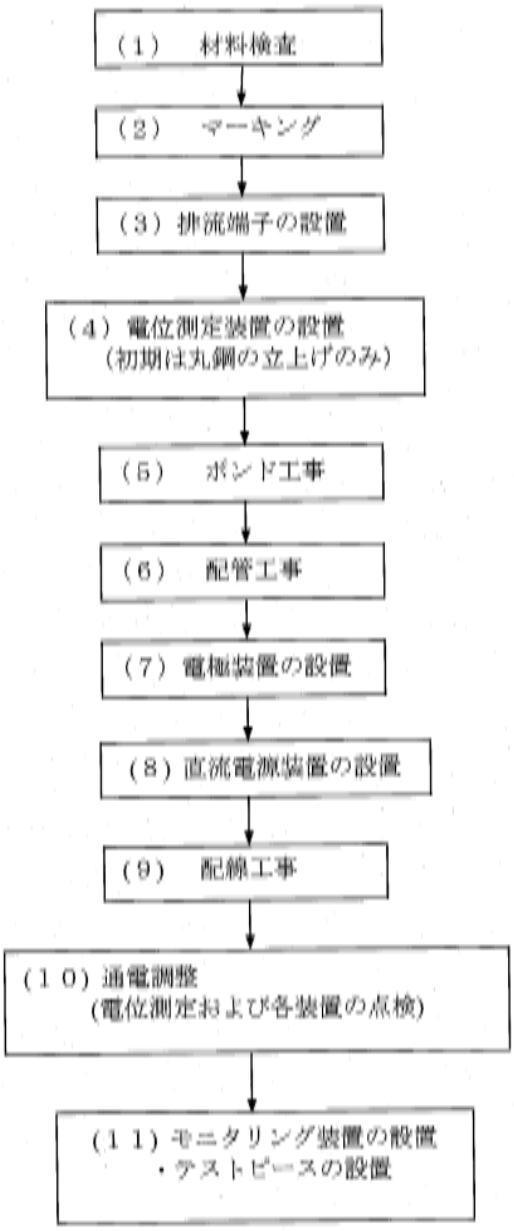


図8.4　外部電源方式の施工手順（2009年版）

①材料検査

現地に搬入された電極などの材料は、数量の確認や電極表面に付着している油汚れなどの有無を目視確認する。発生電流の測定装置などのモニタリング装置は、その機能を確認しなければならない。

②マーキング

設計図書に基づき、ボンド鉄筋の取付け位置や電極装置の設置箇所などのマーキングを行う。

③排流端子の設置

上部コンクリート打設前に、設計図書に基づいた位置に丸鋼を防食対象鋼材に溶接して立ち上げる。丸鋼の頂部には接続箱が設置されるので、上部コンクリートの天端と接続箱の寸法を考慮した長さの丸鋼を取り付ける。なお、丸鋼には排流点用の丸鋼と他の鉄筋が識別できるように、白ペイントなどで塗装するとよい。立ち上げた丸鋼は、接続箱内に導き、丸鋼の先端には耐食合金製の端子を溶接して取り付ける。

④電位測定装置の設置

新設構造物での電位測定装置の設置は、上部コンクリート打設前に防食対象である鋼矢板などに丸鋼を溶接して立ち上げる。丸鋼は他の鉄筋と識別できるように白ペイントなどで塗装するとよい。立ち上げた丸鋼は、上部コンクリートの天端に設ける電位測定装置に溶接して設置する。

また、既設構造物に対する電位測定装置の設置は、防食対象である鋼矢板などに丸鋼を溶接して躯体に沿わせて立ち上げるか、または上部コンクリート中の配筋（鉄筋）と鋼材とが通電試験などから電気的に導通されていることが確認された場合は、鉄筋に溶接して電位測定装置を設置しても良い。

⑤ボンド工事

鋼材相互の電気抵抗を少なくするため、丸鋼などを用いて鋼材相互間を溶接し、電気的な接続を行う。ボンド用鉄筋は他の鉄筋と識別できるよう白ペイントなどで塗装するとよい。ただし、防食対象用鋼材が電気的に接続されていることが確認された場合には改めてボンドをする必要はない。

⑥配管工事

配管工事に使用する電線管は、硬質塩化ビニル電線管、波付き硬質ポリエチレン管、または厚鋼電線管を使用しなければならない。なお、厚鋼電線管を使用する場合は、内外面に被覆を施したものを使用すると耐久性が大幅に改善される。

接続箱は、電極設置箇所および排流端子の立上げ箇所に設ける。ただし、接続箱相互間の距離が非常に長い場合や、電線を挿入する際の作業性が悪いと思われる場合は、中継用として接続箱を任意の位置に設置することがある。

接続箱から電極までのケーブルは、通常防護管（厚鋼電線管または硬質塩ビ電線管）で保護する。また、露出した防護管にはステンレス製バンドやコンクリート用のブラケット等で固定させる。

⑦電極装置の設置

上部コンクリート打設前に、電極支持パイプまたは電極リード線立ち上げ用のパイプは、設計図に基づいた位置に取り付ける。なお、パイプの上端には接続箱が設置されるので、予め上部コンクリートの天端と接続箱の寸法を考慮した長さのパイプを取り付けると良い。

⑧直流電源装置の設置

直流電源装置は、設計図書に基づき所定の位置に設置し、アンカーボルトなどを用

いて固定する。電源装置には、電気設備の技術基準の解釈に準拠し、D種接地工事を施さなければならない。

⑨配線工事

使用する電線は JIS に適合した600V ビニル絶縁電線、クロロプレン外装ケーブル、ビニル外装ケーブル、またはポリエチレン外装ケーブルを使用する。

電線の接続は接続箱内で行うため、接続部は絶縁材などを使用して、完全な水密処理を施す必要がある。

⑩通電調整:

直流電源装置を運転する場合は、通電開始時においては定格の1/2程度の負荷で行い、徐々に電流値を上昇させながら定格値までの負荷運転を行う。定格運転後、鋼材の電位を測定し、過剰な電流を流さないように通電電流を調整する必要がある。

⑪モニタリング装置

外部電源方式の場合のモニタリング装置としては、自動制御装置を備えた直流電源装置がある。この装置を設置する際は、鋼材の電位を検出するための照合電極の取り付け箇所は、電極電流値の影響を大きく受けないように十分な配慮が必要である。また、テストピースなどの取り付けは次に準ずる。

防食対象施設の防食効果を確認するには、電位測定以外に定量的防食効果が確認できるテストピースや陽極の発生電流を経時的に測定するなどモニタリング装置を設置することがある。モニタリング装置を設置する場合は、維持管理計画にしたがって設置するものとする。設置位置は、電位測定装置と隣接した位地に設置することで電位測定結果と併せた防食効果の確認ができる。

テストピースは図8.5に示すように防食片と腐食片を一つの供試体として鋼材に直接取り付ける。また、上部コンクリートに設けた電位測定用ボックスから吊り下げて取り付ける方法もある。テストピースは設置後1～5年以内に引き上げ、秤量し、防食効果の確認を行う。

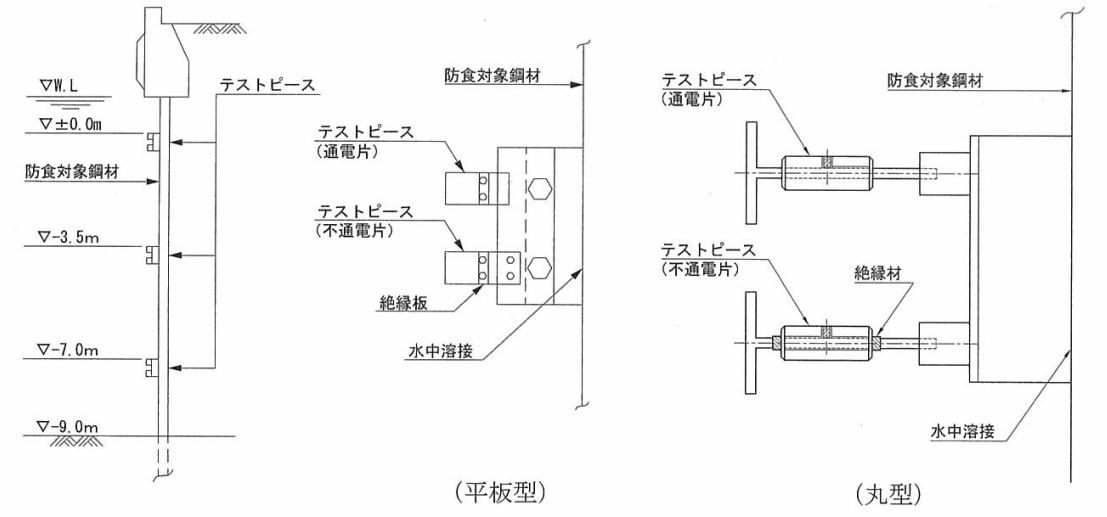


図8.5　テストピースの取付けの一例

８．４　維持管理

外部電源方式の点検診断項目と点検診断方法については、２００９年版では「外部電源方式の点検診断の実施にあたっては、結果の客観性、信頼性および一貫性を確保するために、あらかじめ点検診断項目、点検診断方法および判定基準を定めておかなければならない。外部電源方式の点検診断は、電位測定に加えて直流電源装置についても行う。」と記載されている。

点検診断の種類は初回点検、日常点検、一般定期点検診断、詳細定期点検診断、一般臨時点検診断および詳細臨時点検診断とされ，また、実施区分に点検・調査項目が対応し、目視・簡易計測による区分としては、目視調査、電位調査、直流電源装置の運転状況があり、高度な方法による区分として、電極装置、回路、環境調査、テストピースがある。

８．４．１　各点検および点検診断

初回点検は電位の測定と電気防食装置の運転状況（直流電源装置・電極装置・回路）の点検を実施する。初回点検は施設の竣工後または維持管理段階の開始時点で維持管理の初期状況を把握し、その後の維持管理データの初期値を取得するために実施する。

日常点検は、直流電源装置の稼働状況（運転表示灯、出力電流の指示値）を確認する。警報装置がある場合は、その状況を確認し、異常を知らせる情報がある場合は一般臨時点検診断を実施する。

一般定期点検診断は、電位測定と電気防食装置の運転状況（直流電源装置や電極）の点検を実施する。一般定期点検診断は１年に１回程度実施するのが望ましい。

詳細定期点検診断は、電位の測定と電気防食装置の運転状況（直流電源装置や電極・回路）の点検を実施し、必要がある場合は環境調査も実施する。詳細定期点検診断は、５年に１回程度実施するのが望ましい。テストピースが設置してある場合は、テストピースを取り外し、秤量・評価する。モニタリング装置、警報装置を設置すれば、詳細定期点検診断の点検間隔を延ばすことができる。

一般臨時点検診断は、地震時や荒天時の直後、あるいは日常点検で特段の異常が発見されたときにできるだけ早い時期に実施する。

詳細臨時点検診断は、一般定期点検診断や一般臨時点検診断を実施した結果、特段の異常が確認された場合に実施する

８．４．２　点検・調査の方法

外部電源方式で実施される点検・調査の方法は，目視調査，電位調査，直流電源装置の運転状況調査，電極装置の通電電流調査，配線路の絶縁抵抗調査，環境調査，テストピースによる防食効果の確認である。ここでは，これらの調査事項のうち本ハンドブックの第６章 維持管理 ６．３記載の目視調査，電位調査，環境調査，テストピースは除き外部電源方式の事項を以下に記す。

（１）直流電源装置の運転状況調査

運転状況の確認にあたっては，前回の点検診断記録と比較して出力電圧や電流値に大幅な変動があるかどうかについて，もっとも注意する必要がある．前回の通電記録と大幅に異なる場合には，電気防食回路に異常が発生していることが考えられるので，その回路の

点検を行う必要がある．また，点検時の電位測定の結果を参照の上，直流電源装置の通電電流を調整することが望ましい．

直流電源装置の電圧，電流が定格値通りに作動するかを電圧調整機で電圧を切り替えて点検するとともに，直流電源装置の変圧器，整流体，開閉器，端子などに異常があるかについての点検を行う．さらに，直流電源装置の接地および回路の絶縁が電気設備技術基準で定められた値以内であるかの確認を行う

（2）電極装置の通電電流調査

外部電源方式に用いる電極は，難溶性電極であるので，電極の消耗状態を目視観測で判断するのは難しい．したがって，点検診断時以外でも異常が認められた際には，各電極からの通電電位を測定し，設計上の電流値または許容電流以下で通電されているかの確認を行う．また，許容電流以上の電流が流れている場合には，同一回路内の電極の故障が考えられるので，水中での目視による検査と通電電流の測定を行い，故障箇所の原因を究明した上で補修を行わなければならない．

（3）配線路の絶縁抵抗調査

腐食環境の激しい場所に配線路が敷設されているので，点検診断時には配線路の絶縁抵抗などを測定し、絶縁不良と思われる箇所は速やかに補修する必要がある．絶縁抵抗の劣化の一因として接続箱内に堆積した土砂や塵の影響が考えられるので，接続箱内の清掃を行う必要がある．

８．４．３　点検診断における判定基準と防食効果の評価

外部電源方式による電気防食装置の防食効果の評価は，防食対象施設の電位の測定と直流電源装置の作動状況の点検診断結果に基づき行う．

表8.1　電位の測定結果による判定基準と記号

点検方法	判定基準	
電位測定：海水塩化銀電極	a	防食管理電位（－800ｍＶ）が維持されていない．
	b	―――
	c	―――
	d	防食管理電位（－800ｍＶ）が維持されている．

判定基準の記号ａ

ａ．電位が－800mV よりも貴（プラス側）な場合，直流電源装置の出力電圧を調整して平均電位を－900mV より卑程度に維持．

ｄ．策定された維持管理計画のスケジュールに基づき定期点検診断を実施する．

直流電源装置の出力電圧調整ができない等、防食状態が維持できない場合には，詳細臨時点検診断を行う。そこで直流電源装置の劣化判定の目安を表8.2に示す。

表8.2　直流電源装置の劣化判定の目安

直流電源装置 の運転状況	原因の推定と調査方法	対策
電源盤から全回路の出力電流が流れていない場合や故障が頻繁に発生する	①トランスの絶縁不良 ②整流素子の破損が推定されるので、トランスや整流素子の点検を実施する	部品の交換や部分補修では修理できないケースが多く電源盤の取替えなどの全面補修が必要となる
計器の指示値が表示されない場合や電極からの出力値に大きなバラツキがあって指示値が変動する	①計器の不良 ②出力回路の配線の絶縁不良 ③通電電極の破損などが推定され潜水士による電極調査や配線の絶縁抵抗測定を実施する	計器の取替えや電極の取替えなど部品の交換で部分的な補修を行う
運転ランプ切れや ヒューズの遮断	①ランプ球の寿命 ②過電流によるヒューズの遮断と推定されるが，ヒューズが再三にわたり遮断する場合は，回路の絶縁抵抗測定を実施する。	ランプやヒューズの部品交換や簡易な補修を行う

８．４．４　補修

外部電源方式の点検診断を実施した結果，防食状態が維持されていない場合には，補修を行わなければならない．補修は，その判定基準に基づいて次の表に示す対策を行う必要がある．

ここに，ａの場合は，その原因を究明した上で補修などの対策を検討する．直流電源装置の受電ランプやヒューズなどの部品は，通常製造会社の在庫年数が製造後10年程度であることから予備部品として確保する。

表8.3　判定基準に基づく対策例

判定基準	対　策
a	防食状態を回復するための補修を実施する必要がある．
b	―――
c	―――
d	従来通りの定期点検診断を継続する．

参考文献

「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル（2009年版）」（（財）沿岸技術研究センター、2009）

付・９　防食工の積算

防食工の積算については、初版そのままを再録することとした。このため、当時の単価等が記載されているものの、本質的には同様故、ご参考戴きたい。

９．１　重防食鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板

工場において鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板にポリエチレンまたはウレタンエラストマーによる重防食被覆を施す場合の被覆単価は以下のとおりである。

９．１．１被覆単価

（１）鋼管杭へのポリエチレン被覆

表9.1　ポリエチレン被覆鋼管杭のエキストラ　　（単位：円／㎡）

塗覆長 ＼ 外径	3m未満	3～6m未満	6～18m	18m超え
318.5～1524mm	13,000	12,000	9,000	別途見積

注記　①上記の価格は、社団法人建設物価調査会編「建設物価」1997年４月号に掲載された価格であり、変更されることがあるので注意すること。

②被覆部の両端には各々150mm 以上の非被覆部が必要となる。

③被覆部が150mm を越える場合は、被覆管と非被覆管との工場円周溶接または現場円周溶接を行うことを原則とする。なお、工場円周溶接を行う場合は、「不等厚および異規格等厚工場円周溶接エキストラ」が別途付加される。

④150mm を越える非被覆部を剥離する場合は、剥離部長さも被覆長さに含めて上表の価格が適用される。なお、150mm の非被覆部はメーカー負担で剥離し、上記エキストラの対象外とする。

（２）鋼管杭・鋼管矢板へのウレタン被覆

表9.2　ウレタン被覆鋼管杭・鋼管矢板のエキストラ　（単位：円／㎡）

塗覆長 ＼ 種別	3m未満	3～5m未満	5～7m未満	7m以上
半　　周	23,500	17,000	15,500	14,500
全　　周	21,000	15,500	14,500	13,000

注記　①上記の価格は、社団法人建設物価調査会編「建設物価」1997年４月号に掲載された価格であり、変更されることがあるので注意すること。

②上記の価格は、鋼管矢板継手の外側の被覆を含むが、内側の被覆は含まない。

③鋼管矢板のエキストラ金額の算定方法は以下のとおり。

素管の被覆面積×上記価格＝素管部および継手外側部の被覆価格

（３）鋼矢板へのポリエチレン被覆またはウレタン被覆

表9.3　重防食鋼矢板のエキストラ　　（単位：円／㎡）

塗　覆　長	3m未満	3～5m未満	5～7m未満	7m以上
エキストラ	15,000	11,000	10,000	9,000

注記　①上記の価格は、社団法人建設物価調査会編「建設物価」1997年４月号に掲載された価格であり、変更されることがあるので注意すること。

②異形鋼矢板は別途見積り。

９．１．２　重防食鋼管杭・鋼管矢板の積算例

（１）ポリエチレン被覆鋼管杭の例

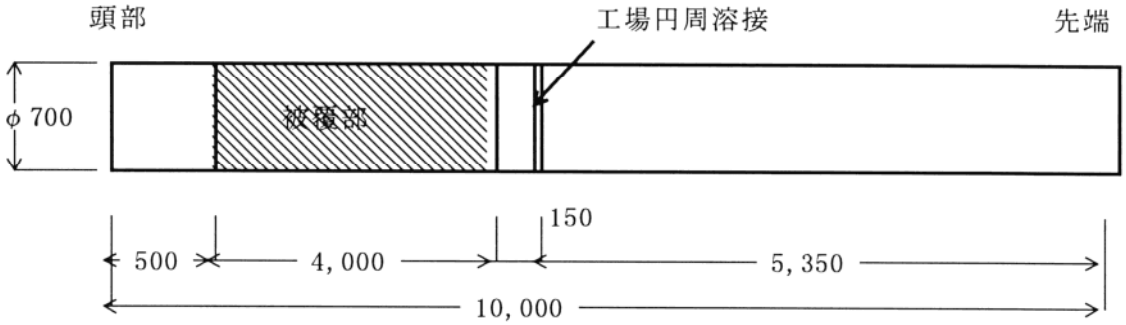


図9.1　ポリエチレン被覆鋼管杭の例

エキストラ金額

①　被覆費　　被覆長さ×外周長×㎡単価

＝［4.0＋（0.5-0.15）］×0.70×3.14×12,000＝114,736円／本

②　工場円周溶接費　　11,500円／本

合　　計　　126,236円／本

（2）ウレタン被覆鋼管矢板の例

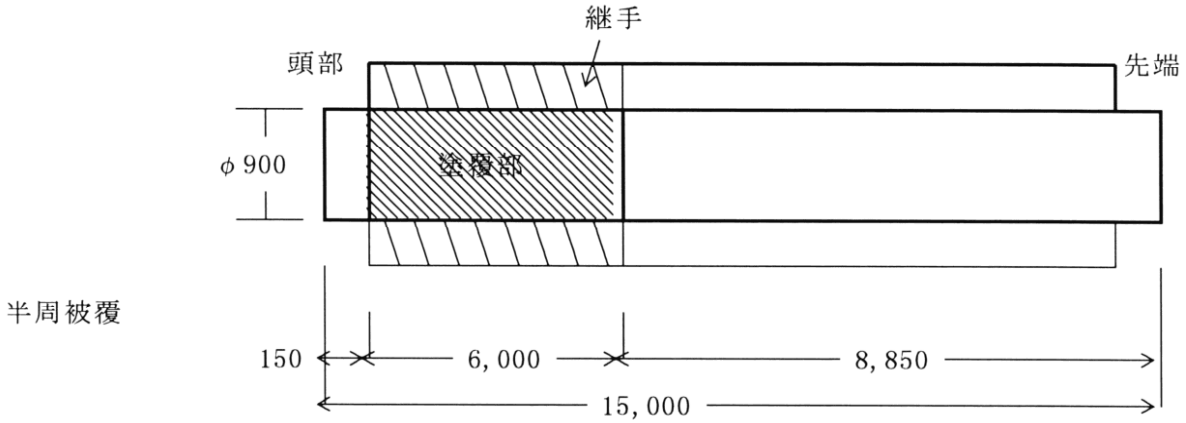


図9.2　ウレタン被覆鋼管矢板の例

エキストラ金額

被覆費　　被覆長さ×半周長×㎡単価

＝6.0×0.90×3.14／2×15,500＝131,409円／本

9．2　鋼管杭・鋼管矢板の工場塗装

9．2．1　塗装価格

工場において鋼管杭・鋼管矢板に塗装する場合は以下の価格を適用する。

表9.4　塗装関係エキストラ　　（単位：円／㎡）

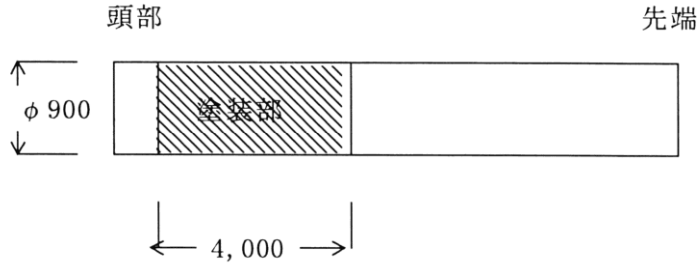
区　　分	1回塗り	2回塗り	3回塗り
(1) 下地処理	1,800	—	—
(2) 一般さび止め	350		
(3) ウオッシュプライマー	850	1,400	
(4)高濃度亜鉛系 （ジンクリッチペイント）	1,400	2,500	3,600
(5) タールエポキシ樹脂塗料* （ JIS K 5664 1 種 ）	(0.1mm) 1,300	(0.2mm) 2,400	(0.3mm) 3,400
(6)梱包費	700		

注記　①上記の価格は、社団法人建設物価調査会編「建設物価」1997年４月号に掲載された価格であり、変更されることがあるので注意すること。

②*印：塗装仕様の塗膜厚でエキストラが決まる。

９．２．２　工場塗装の積算例

（１）塗装条件（例）



・鋼管杭　　φ900

・塗装長さ　　4m

図9.3　工場塗装鋼管杭の例

・塗装仕様　①　下地処理　ブラスト SIS $Sa2\frac{1}{2}$

②　下塗り　　ジンクリッチペイント　　15μm

③　上塗り　　タールエポキシ樹脂塗料　　300μm

④　梱包　　ピロボード巻き　１重巻き

（２）積算

１㎡当り費用

①　下地処理	1,800	円／㎡
②　下塗り	1,400	〃
③　上塗り	3,400	〃
④　梱包	700	〃
合　　計	7,300	円／㎡

塗装費用

１㎡当り費用×塗装面積

＝　7,300　円／㎡　×　0.9m×3.14×4m

＝ 82,519　円／本

９．３　現場防食工事の積算

下記の資料を参考に積算するとよい。

工　　種	参　考　資　料
電気防食工 （流電陽極方式）	「運輸省港湾土木請負工事積算基準」第３章14節 平成８年４月　（財）港湾空港建設技術サービス
ＦＲＰモルタルライニング工	同　　上
ペトロラタムライニング工	「港湾鋼構造物　防食補修工事の積算資料」 防食補修工法研究会

付・１０　腐食・防食の用語集

腐食・防食に関わる本文記載用語ならびに同関連用語を主に記す。ただし、溶接用語等の記載もあるが、これは本文または図表等に記載の用語である。また、通常、用語の下の（）内に英語表示が組まれるが、英語の読みやすさや行の関係で用語の解説中に記載したものもある。

――――　「あ～お」　――――

ISO 素地調整規格　：素地調整方法および素地調整面の清浄度や表面粗さの評価方法に関する国際規格。ISO 規格。(ISO-surface preparation standards)

アーク溶接(arc welding)　：金属板と電極の間に発生させたアーク放電による熱エネルギーを利用する金属の溶接。

アノード(anode)　：電流が電極から電解質に向かって流れ、酸化反応が行われる電極（陽極）。

異種金属接触腐食(bimetallic corrosion)　：異種金属が直接接続されて、両者間に電池が構成されたときに生じる腐食（ガルバニック腐食；galvanic corrosion）。

維持管理(maintenance and controll)　：防食工の点検・調査、健全度評価および防食工の防食機能が十分でない場合に実施する鋼材の点検・調査、健全度調査、さらには防食工あるいは構造物の補修の一連の管理業務。

エポキシ樹脂(epoxy resin)　：エポキシ基を持つ樹脂で、アミン、酸などによって硬化する。エポキシ化合物とビスフェノール類または多価アルコールとの反応により得られる樹脂と、不飽和基を過酸によりエポキシ化して得られる樹脂がある。

エレクトロコーティング(electro coating)　：海水中で、電気防食された鋼表面に高pHのために析出する炭酸カルシウム、水酸化マグネシウム等の混合した皮膜（石灰質被膜）。電着被覆とも言う。

SIS 塗装前鋼材表面処理規格　：素地調整のスウェーデン規格。ISO 素地調整規格に採用されている。(SIS 05 59 00-1967 pictorial surface preparation standard for painting for painting steel surface)

SSPC素地調整規格　：アメリカの Steel Structures Painting Councilが定めた素地調整規格。(SSPC-surface preparation specifications)

汚染海域
(polluted marine areas)　：塩化物イオン濃度＜17800ppm、溶存酸素濃度＜6ppm、アンモニウムイオン濃度＞0.1ppmの３項目のうち、２項目以上が該当する場合を汚染海域といい、電気防食の電流密度を設定する場合に用いる。

―――― 「か～こ」 ――――

海水塩化銀電極　：銀塩化銀電極の一種。銀の表面に塩化銀の層をつけ、海水または人工海水に浸漬した電極（Ag/AgCl)で、一般に海洋での電気防食に広く利用されている基準電極。(silver-silver chloride electrode used in sea water)

感潮河川
(tidal river)　：海の潮汐の影響を受け、満潮時には水位が上がり、干潮時には水位が下がる河川。このような影響を受ける区域のことを感潮区域という。また、河川が海にそそぐ場合、下流の一定区間は感潮区域である。河川の干潮部ともいう。

カソード
(cathode)　：電流が電解質から電極に向かって流れ、還元反応が行われる電極（陰極）。

干満帯　：干潮位と満潮位との間の領域。(tidal zone)

局部電池
(local cell)　：金属側または環境側の不均一性が原因となって、金属表面に局部的に形成された腐食電池。

局部腐食
(local corrosion)　：金属表面の腐食が均一でなく、局部的に集中して生じる腐食。

クラッド鋼
(cladding steel)　：鋼材表面にステンレスやチタンなどの金属を被覆、一体化した複合材料。

嫌気性バクテリア
(anaerobic bacteria)　：空気または酸素を必要としない状態で活動するバクテリア。代表的なバクテリアとして硫酸塩還元バクテリアがある。

現地被覆　：現地（ヤードを除く）で施工される被覆防食法の総称。新設鋼

(site coating)　構造物が主に対象となる。該当する方法は以下のとおり。
・水中硬化型被覆 ・ペトロラタム被覆 ・無機被覆

工場被覆(shop coating)：工場や現地ヤードで施工される塗装及び被覆防食法の総称。新設鋼構造物が主に対象となる．該当する方法は以下のとおり。
・塗装 ・重防食被覆 ・超厚膜型被覆 ・金属被覆

孔食：金属内部に向かって孔状に進行する局部腐食。
(pitting corrosion)

――――― 「さ～そ」 ―――――

サンドエロージョン(sand erosion)：砂などの固体粒子を含む流体の流れにより、該固体粒子が材料と接触し、材料が機械的に損傷する現象を言う。
例えばISOなどによる規定では、エロージョン・コロージョンと総称し、条件により機械的摩耗が主体の損傷から高流速下での腐食が主体の損傷までを範囲とすると広く表現されており、また、局部腐食を特徴としている。
ただし、港湾では従来から砂を含む高流速海水により、鋼材表面に生成した腐食さびが除去される結果、活性面が露出し腐食が促進される現象を含め、総称として「サンドエロージョン」と呼ばれている。

酸化還元電位(差)(oxidation-reduction potential)：溶液中のイオン間の電子交換を含む酸化還元反応の自由エネルギー変化を電位換算したもの。また、細菌腐食の指標に用いられる場合には、不活性金属電極と照合電極とを溶液中に浸漬したときの両電極間の電位差を示す。

酸素濃淡電池(通気差電池)：局部的に酸素の濃度が異なるために生じる腐食電池。
(oxygen concentration cell)

自然電位列(natural potential series)：金属および合金のある環境における自然電極電位を実測して、その順序に配列したもの（自然電極電位列）。

集中腐食(concentrated corrosion)：平均干潮面直下付近に発生する鋼材の激しい局部腐食。平均干潮面（M.L.W.L.）直下付近が陽極、平均水面（M.S.L.）付近が陰極となる局部電池を形成し、陰極が腐食する現象。

周辺係数（peripheral coefficient）：電気防食や現地施工を行なう被覆防食（ペトロラタム被覆，水中硬化型被覆等）において鋼矢板や鋼管矢板などの継手構造を有する鋼材の防食面積を計算するのに用いる係数である。

照合電極（reference electrode）：電極電位の一定した電極。金属の電位はこの電極との電位差で表す（基準電極）。水素電極、カロメル電極、海水塩化銀電極、硫酸銅電極などがある。

詳細点検（detailed inspection）：施設の腐食・防食状態をより詳細に把握し、健全度評価や補修等に役立てるための調査。(detailed inspection)

ショッププライマー（shop primer）：鋼材をブラスト処理し、本塗装に先立って、ブラスト直後に塗装する一時防錆塗料。

重防食鋼管杭：腐食防止対策としてポリエチレンあるいはポリウレタンを工場でライニングした鋼管杭をいう(heavy duty coating steel pipe piles)。重防食鋼管矢板、重防食鋼矢板等もある。

重防食被覆（heavy duty plastic coating）：港湾鋼構造物に適用される主な重防食被覆の被覆材料には，ポリエチレン樹脂およびウレタンエラストマー樹脂の2種類があり，これらの材料種別に2方法に分類される。被覆施工は主として工場にて行なわれる.

水中硬化型被覆（underwater coating）：被覆による防食を干満帯や海中部においても施工可能としたもので，水中硬化型エポキシ樹脂塗料あるいは被覆材が主たる材料である．材料は3種類あり，5㎜の膜厚に施工するパテタイプと1㎜の膜厚に施工するペイントタイプ，飛沫帯・干満帯専用の湿潤面タイプがある。

水中硬化型樹脂（underwater cured epoxy resin）：エポキシ～変性アミン系、特殊変性ポリエステル～有機過酸物系、変性アクリル～有機過酸系の樹脂。（これらの樹脂を被塗装面へ押しつけることにより、水分は機械的に排除されるが一部は被塗装面に薄膜状に残存する。残存する水分子に対し、水分子よりも被塗装鋼材面への親和力に優れる樹脂成分が水分子を被塗装面から引きはがし、樹脂内部に取り込む。取り込んだ水分子を樹脂の硬化プロセス中に樹脂中から絞り出し、樹脂は水分を外に放出するとともに硬化する）。

水中溶接（underwater welding）：港湾構造物では波の遡上高以下で行う溶接。溶接作業状態によって、乾式溶接と湿式溶接の二つの方法に大別される。

すきま腐食（crevice corrosion）：金属間または金属と他の材料とのすき間の内外においてイオン、酸素などの濃淡電池が構成されて生じる腐食。

すみ肉溶接（fillet welding）：溶接しようとする材料を重ねるかあるいは突き合わせておいて両者の間にできる隅角部に溶着金属を置く三角形の断面をもつ溶接方法。

スリット溶接（slit welding, slot welding）：鋼板溶接工法において、力の伝達を確実に行うように、鋼板の上下端近くに母材軸方向に細長い切欠き（スリット）を設け、その部分を鋼管とすみ肉溶接すること。JISでは側面すみ肉溶接という。

素地調整（surface preparation）：防食被覆の付着性および防食効果を高めるために防食被覆前に行う被塗装面の処理。同義で用いられる用語に下地処理、表面処理、前処理、生地こしらえ、ケレンなどがある。代表的な素地調整方法に、ブラスト法、動力工具による方法がある。

素地調整グレード：素地調整した鋼面の清浄度の程度（surface preparation grades）。ISO 規格では素地調整の方法と仕上げ等級の組合せで表される。

――― 「た～と」 ―――

潮位（tidal level）：H.W.L.；（さく望平均満潮面）
さく望の日から前２日後４日以内に現れる各月の最高満潮位を平均した水位をいう。

M.S.L.；（平均海面・中間水位）
ある期間の海面の平均高さに位する面をその期間の平均水面または中間水位という。

M.L.W.L.；（平均干潮面）
すべての干潮時の潮位を平均した水位をいう。

L.W.L.；（さく望平均干満面）
さく望の日から前２日後４日以内に現れる各月の最低干潮位を平均した水位をいう。

超厚膜型被覆（super high build coating）：港湾鋼構造物に適用される主な超厚膜型被覆の被覆材料には，エポキシ樹脂系およびポリウレタン樹脂系の2種類があり，これらの材料種別に2方法に分類される。複雑な形状のものや大型構造物にも適用可能であり、その施工は一般的には工場にて行なわれる。

超音波式厚み計（ultra-sonic thickness gauge）：測定物（あらゆる金属およびガラス）の表面から速度既知の超音波を放出し、表面と裏面の間で繰り返し反射する波の多重エコーをとらえ、測定物の厚みを時間と音速の積として求める計測器。超音波探傷式厚み計ともいう。

チョーキング（chalking）：塗料の劣化により、塗膜表面が粉が吹いた様になる現象。

抵抗率（resistivity）：電気伝導度の逆数で、電流が断面積１cm^2、長さ１cmの体積を通過するときの抵抗の大きさ（Ω-cm）。

定期点検（periodical inspection）：既設構造物の防食状態を定期的に点検するもので、一般点検と詳細点検に分けられる。

点検診断（assessment）：維持管理計画に従い防食工法を維持管理するための行為．防食法の異常や変状の有無を点検・調査で確認し，防食法の性能を評価する劣化度判定を行う．初回点検、日常点検、一般および詳細定期点検診断、一般および臨時点検診断に分類される。

電解質（electrolyte）：溶液がイオン伝導性を持つような物質。海水も電解質である。

電気防食（electric(anodic) protection）：流電陽極または外部電源を用いて金属体をカソードとして通電し、腐食を防止すること。カソード防食ともいう。特殊な場合として、防食する金属体をアノードとするアノード防食（anodic protection）もある。

電位：電極が溶液に接する界面に発生する電位。（electric potential）

電食（electrolytic corrosion）：(electrolytic corrosion, stray current corrosion。正規の回路以外のところを流れる電流によって生じる腐食（迷走電流腐食）。

電流効率（current efficiency）：流電陽極において発生電気量を理論電気量で除した値。理論電気量に対し流電陽極として有効な電気量の割合を表す。

電流低減率：電気防食適用初期の防食電流は時間の経過とともに低減し、安定した防食電流に達した時の電流は一般的には初期値の１／２程度になる。

塗膜下腐食（under-film corrosion）：塗膜下の素地金属面の腐食現象。塗膜の劣化や透過により金属表面に到着した水分や酸素により腐食が発生し、さびなどの蓄積で塗膜ふくれや剥離が起こる。

――――　「な～の」　――――

肉厚（thickness）：本ハンドブックでは鋼材の厚さをいうことが多い。素材が板状のものの場合は板厚ともいう。錆の厚さは含まない。

――――　「は～ほ」　――――

標準膜厚（nominal dry film thickness）：塗装において所定の防食性能を得るのに必要な各層および各層の合計の膜厚。施工における膜厚の管理範囲は標準膜厚を基準に定める。

被覆防食（protective coating）：被覆防食は，塗装，有機被覆（超厚膜型被覆・水中硬化型被覆・重防食被覆），ペトロラタム被覆，無機被覆（モルタル被覆・鉄筋コンクリート被覆），金属被覆に分類される。

飛沫帯（splash zone）：H.W.L.以上で海水の飛沫を受ける領域。

腐食電流（corrosion current）：電気化学的腐食において、構成された腐食電池のアノードからカソードの間に流れる電流。

腐食疲労（corrosion fatigue）：腐食と繰返し応力との相乗作用によって、金属材料が疲労して劣化する現象。

不働態：電気化学列で卑（活性）な金属、あるいは、そのような金属か

(passive state)　らできている合金であるにもかかわらず、電気化学的に貴な金属であるような挙動を示す状態をいう。クロム、ニッケル、チタン、ステンレス鋼などは多くの環境中で不働態となり、きわめて腐食しにくい。不働態は不働態皮膜と呼ばれる極めて薄い皮膜の生成によってもたらされる。不動態、受働態ともいう。

分極(polarization)：電極に出入りする電流によって、電位に変化が生じる現象。アノードに生じる分極をアノード分極、カソードに生じる分極をカソード分極という。

ペトロラタム(petrolatum)：減圧蒸留残さ油から分離精製した常温で半固形状の石油ワックスの一種。JIS K2335に規定されている。ペトロラクタム系の防食テープや防食ペーストなどの主原料として用いられる。

ペトロラタム被覆(petrolatum and protective cover system)：ペトロラタム系防食材とその防食材を保護する保護カバー材とを組み合わせることにより，防食材が波浪や海生生物などの外力によって損傷することを防ぎ，長期間良好な防食効果が期待できる。

防食管理電位(protective potential for intenance)：電気防食の維持管理を行う際に基準とする電位。海水塩化銀電極（Ag/AgCl）基準で－800mVとしている．また、アルミ合金陽極の劣化度を推定する電位値として防食設計推奨電位が用いられるが，その電位は，海水塩化銀電極（Ag/AgCl）基準で－900mVより卑な値である。

防食電位(protective potential)：電気防食において、腐食を停止させるために必要な最低限の電位。海水塩化銀電極(Ag/AgCl)での値が-780mVとしている。

防食電流(protective current)：電気防食において被防食体を防食電位に保つため、被防食体に流す電流。

防食電流密度(protective current density)：金属の電位を防食電位に維持するために要する単位面積当たりの電流。防食初期の電流密度を初期電流密度、防食状態の維持に必要な電流密度を定常電流密度という。

補修対策調査(inspection For repairing)：点検・調査に基づく健全度評価の結果、補修対策を講ずる必要があると判明した場合に、補修工法の選定および補修設計・施工のために行う調査。

飽和甘こう電極
(saturated calomel electrode)
：ガラス容器の底に水銀を入れ、その上に糊状の甘こう(Hg_2Cl_2)を置きさらにその上に塩化カリウム水溶液を満たした照合電極。代表的な照合電極の１つである。実験室では電極に水銀を用いることが多い。

―――― 「ま～も」 ――――

マクロセル
(macro-galvanic cell)
：アノードとカソードがはっきり区別できる程度の大きさをもち、その位置が固定されている腐食電池。異種金属接触電池、通気差電池などがこれに属する。

ミルスケール
(mil scale)
：鋼材の製造過程において高温に加熱されるとき、空気中の酸素と反応して生成し付着している酸化皮膜。黒皮ともいう。

無機被覆
(inorganic coating)
：主材料として無機系の材料を用いた被覆．このハンドブックでは，モルタル被覆，鉄筋コンクリート被覆，電着被覆を取り扱う。

無効電流
(invalid effective current)
：防食対象である鋼材の干満帯部等に耐食性金属被覆材が電気的に接続されている場合，防食電流が耐食性金属に流入する．この電流は防食を目的とした電流でないことから本ハンドブックでは無効電流と表現する。

無防食
(non protection)
：建設時に腐食しろによる腐食対策によって設計され，電気防食や被覆防食などの防食対策が適用されていない場合や，防食工法の劣化や損傷等により防食機能が不十分な状態となった場合のように，鋼材が腐食環境下に置かれている状態。

モネルメタル
(monel metal)
：ニッケルと銅を主成分とする合金の商品名。生物付着が少ない特徴がある。我が国の港湾鋼構造物ではほとんど用いられていない。

―――― 「や～よ」 ――――

有機被覆
(organic coating)
：主材料として有機系の材料を用いた被覆。このハンドブックでは，超厚膜型被覆・水中硬化型被覆・重防食被覆を取り扱う。

有効電位差（effective driving voltage）：電気防食において鋼材の防食管理電位（－0.8V）と陽極の閉路電位（－1.05V）との電位差（0.25V）を言う。

有効電気量（effective current capacity）：流電陽極において陽極のもつ理論電気量から自己腐食による電気量を除いた、流電陽極に有効に発生する電気量。有効発生電気量ともいう。

――― 「ら～ろ」 ―――

ライニング（lining）：厚膜型の塗覆装工法の総称。本ハンドブックでは、ライニングをすべて被覆とし、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、金属被覆の４種に分類した。また、塗装系では比較的厚膜のもの海洋塗装系とし、その他塗装と別分類とした。元来、ライニング(lining)は構造物などの内面の塗覆装工法をいうので、鋼の防食には、外側に被覆することから変更することとした。

硫酸塩還元バクテリア（sulfate reducing bacteria）：バクテリア腐食を生じる代表的なバクテリア。嫌気性で多くの水や土壌中に存在する。pHが中性に近くて溶存酸素が少なく、有機質栄養物の豊富な河口付近などでは、この菌が繁殖していて、物質代謝の過程で硫化水素や酢酸などを生成し、鋼材に異常腐食を生じさせる原因となることがある。

硫酸銅電極（copper-copper sulfate electrode）：硫酸銅の飽和溶液と粘土のペーストを多孔性の円筒中に入れ、金属銅を挿入した照合電極。土壌環境で使用する一般的な照合電極。

流電陽極（sacrifical anode, galvanic anode）：鋼よりもイオン化傾向の大きいアルミニウム、亜鉛、マグネシウムをそれぞれ主体とする合金からなるもの。電気防食の陽極（犠牲陽極）。

臨時点検（temporary inspection）：荒天や地震あるいは船舶の衝突等の直後に実施するもので、構造物に異常が発生していないかどうかを確認するための調査。

履歴調査（research of history）：点検・調査に際し、事前に対象となる構造物の設計・施工条件を参考にして、構造物の特徴や点検・調査における重点箇所、注意点を把握するための調査。

劣　　化　　度（degree of deterioration）：防食工法の性能の低下の程度．本ハンドブックでは，防食工法の部材ごとに（a，b，c，d）の記号で表現する。

ロ　ス　電　流（missing current）：防食対象の鋼構造物に防食対象外の鋼構造物が電気的に接続されている（鋼矢板等の継手で接続）際、防食対象外の鋼構造物に防食電流が流入する．この電流をロス電流と表現する。一般的には防食対象の境界線から20m程度まで流入するといわれている。

索　　引

あ

・圧入機　：5-12.
・アノード反応　：2- 1, 2- 3
・アノード溶解　：2-29.

い

・イオウ酸化細菌　：2- 7.
・維持管理　：6- 1, 6- 2, 6- 3, 6- 5, 6- 9, 6-11, 6-13, 6-14, 6-15, 6-16, 6-22.
・異種金属接触腐食　：2- 9, 2-32, 2-33.
・位置決め具　：5- 6, 5-7.
・一般点検　：6- 6.

う

・ウェブ　：4-22.
・ウォータージェット　：5- 1, 5-11, 5-12, 5-19.
・打込み工　：5- 1, 5- 6.
・打ち過ぎ　：5- 1, 5-13.
・ウレタンエラストマー（被覆）　：1-2, 1- 4, 2-31, 2-37, 2-38, 3- 1 4-15, 5-14, 5-20.

え

・エポキシ樹脂(塗料)　：1- 2, 2-31.
・塩化ゴム系(塗料)　：2-31.
・塩分濃度　：2- 4, 2-18.
・塩類　：2- 4.
・ＦＲＰカバー　：2-32, 4-11.

お

・汚染海水(海域)　：2- 4, 2- 5, 3- 2.

か

・海上大気部　：2-10.
・海中部　：2-10, 2-27, 2-28, 2-32, 2-38.
・海底土中部　：2-10, 2-12.
・外観(検査)　：4-23.
・外港(域)　：2-13.
・外部電源方式　：3- 2, 5-24.
・河口域　：2-13.
・海洋鋼構造物　：3- 3, 3-13.
・カソード反応　：2- 1, 2- 3, 2-36.
・河川水　：2- 4, 2- 5, 2- 6, 2-13, 2-18, 2-19.
・河川感潮部　：3-26.
・河川鋼構造物　：3-26.
・干満帯　：1- 2, 2-10, 2-12, 2-31.
・岸壁　：1- 2, 4-14.

き

・犠牲防食　：2-34, 2-37.
・局部電池(腐食電気)　：2- 1, 2- 8.
・局部腐食　：2- 2, 2-12, 2-19 2-20.
・漁港鋼構造物　：3-11.
・吸水率　：4- 3, 4- 4.
・金属ライニング（金属被覆）　：2-29, 2-32, 2-38.

く

・掘削　：5-1, 5-19.

け

・嫌気性バクテリア（菌）　：2 -5.

こ

・鋼管杭 : 4- 1.
・鋼管矢板 : 4- 1.
・鋼矢板 : 4- 1.
・鋼矢板の形状 : 2-15.
・孔食 : 2- 8, 2-26, 2-32, 2-33, 6-21, 6-22.
・鋼板を用いた工法 : 6-23, 6-25.
・港湾鋼構造物 : 3- 8.
・コーピング : 4-20.

さ

・酸化還元電位 : 2- 7.
・酸素濃淡(電池) : 2-10, 2-14.
・酸性河川 : 2- 3.
・酸性土壌 : 3-31.
・サンシャインウェザー試験(メーター) : 4- 7.
・残存寿命 : 6-12, 6-13.
・桟橋(構造) : 1- 2.

し

・自然電位 : 2- 9.
・集中腐食 : 2-12, 2-14, 2-15, 2-16, 2-17, 2-29 2-32, 3-10.
・上部工 : 5- 1, 5-16.
・重防食製品 : 1- 2, 1- 4, 4-1, 5- 1, 5- 2.
・重防食被覆 : 3- 1, 5- 1, 5- 2, 5- 7, 5-11, 5-12, 5-13, 5-14, 5-15 5-16, 5-20, 6- 5.
・詳細点検 : 6- 6.
・人工地盤 : 3-34.
・ジンクリッチペイント : 2-31, 4- 6.

す

・水中硬化型樹脂(ライニング) : 2-29, 2-31, 6- 7.
・水中溶接 : 5-21, 5-22, 6-15.
・隙間腐食 : 2-32, 2-33.
・スティック法 : 6-10.
・捨石 : 5-1, 5-19.
・スパッタ : 5-18.

せ

・清浄海域 : 3- 2
・設計耐用年数 : 6-15, 6-21.
・接着強さ(接着力) : 4- 4.
・切断 : 5- 1, 5-14.
・セル(式)構造物 : 2-17.

た

・タールエポキシ樹脂塗料 : 1- 2, 2-31, 4- 1.
・耐海水性ステンレス(鋼) : 1- 2, 2-32, 2-38.
・耐候性 : 2-31, 2-37, 4- 7.
・耐食性金属被覆 : 2-29, 2-32, 2-38.
・体積抵抗率 : 4- 2.
・高止り : 5- 1, 5-13.

ち

・地下水(位) : 2-7, 2-20, 2-21, 2-22.
・チタンクラッド鋼 : 2-32, 2-38.
・チャッキングプレート : 5- 9, 5-10.
・チャッキングしろ(スペース) : 4-20, 5- 1, 5- 9, 5-10.
・潮位差 : 2-15.
・超厚膜型無溶剤ライニング : 2-29.
・超音波厚み計 : 6-16, 6-18, 6-19.
・チョーキング量 : 4- 8.

つ

・通気差(電池) : 2- 1, 2-21.
・通気性 : 2-21, 2-26.
・継手(部) : 4-22.
・吊り型枠 : 5-16.
・吊金具 : 5-1, 5- 4, 5- 8.

て

・鉄筋コンクリートを用いた工法 : 6-23, 6-24.
・鉄細菌 : 2- 7.
・鉄酸化細菌 : 2- 7.
・電位測定 : 5-22, 5-23, 5-24, 6-11, 6-12.
・電解質 : 2- 9.
・電気伝導度 : 2- 9.
・電気防食(工法) : 1- 2, 1- 4, 2-10, 2-12, 2-29, 2-30, 2-31, 2-32, 2-33, 2-34, 2-36, 2-38, 3-2, 3-14, 5-21, 5-24, 6-10, 6-15, 6-20, 6-21.
・電気防食設計基準 : 3-3.

と

・導枠 : 5- 1, 5- 6, 5- 7.
・導流堤 : 4-16.
・土質 : 2-26.
・土壌 : 1- 4, 2-1, 2- 4, 2- 7, 2- 9, 2-10, 2-18, 2-20, 2-25 2-26, 2-29, 3-31.
・土中(水分) : 2-25.
・土中(腐食速度) : 2-20.
・塗装 : 1- 2, 2-31, 2-33, 2-36, 6-10.
・塗膜下腐食 : 2-36.
・塗覆装工法 : 1- 2.

な

・内港(域) : 2-13.
・ナイロンスリング : 5- 3.
・軟化点 : 4- 3, 4- 4.

に

・肉厚測定 : 6-15, 6-16, 6-17, 6-18, 6-19, 6-20, 6-22.

は

・背面土中部 : 2-10, 2-12.
・バイブロハンマー(工法) : 4-20, 5- 1, 5- 9.
・はがし : 5-14.
・暴露試験 : 4- 5.
・パッチ法 : 6-10.

ひ

・ピール強度試験 : 4- 4.
・ピーリング法(90°ピーリング法) : 4-28.
・被覆構成 : 4- 2.
・被覆材料 : 4- 3.
・被覆範囲 : 4-13.
・被覆防食法 : 2-30.
・飛沫帯 : 2-10, 2-12, 2-31, 2-32.
・ピンホール : 4-18.
・ＰＥ : →ポリエチレン
・ＰＵ : →ウレタンエラストマー

ふ

・フーチング　：2-20, 2-23, 2-24.
・腐食環境　：1- 1, 1- 2, 1-4, 2-10, 2-12.
・腐食の形態　：2- 2.
・腐食速度(溶解速度)：2- 3, 2-4, 2- 5, 2- 6, 2-8, 2-10, 2-12, 2-13, 2-18 2-19, 2-20, 2-21, 2-22, 2-24, 2-32, 2-33, 3- 6, 3-11. 6-22, 6-23
・腐食しろ　：1- 2, 2-29, 2-32, 3- 4, 6- 1, 6-15, 6-21, 6-22.
・腐食電位(列)　：2- 9.
・腐食反応　：2- 7.
・不動態化　：2-36, 2-37.
・プライマー　：4- 3.
・フランジ　：4-22.
・ブラケット　：5-16, 5-18.
・フリクションカッター　：5- 1, 5-12.
・プレコート製品　：4- 1.

へ

・平均干潮面(M.L.W.L.)　：2-10
・ペトロラタム(ライニング)　：1- 2, 2-29, 2-31, 6- 9, 6-15.
・ヘドロ　：2- 7, 2-14.

ほ

・防食システム　：3-13.
・防食機構　：2-36.
・防食電位　：2-33, 2-34, 3- 3, 5-24.
・防食電流(密度)　：3- 3.
・補強　：6-21, 6-22, 6-23, 6-24, 6-25.
・保護プレート　：5- 1, 5-10.
・補修　：5-20, 6- 1, 6- 3, 6- 8, 6- 9, 6-10, 6-11, 6-14, 6-15, 6-21, 6-22, 6-23, 6-24, 6-25.
・ホリデーディテクター　：4-24.
・ポリエチレン(被覆)：1- 2, 1- 4, 2-31, 2-37, 2-38, 3- 1, 4- 1, 5-14, 5-20.
・ポリウレタン樹脂塗料(ライニング)　：2-31.

ま

・マクロセル　：2-10, 2-17, 2-20, 2-23.

み

・ミルスケール　：2- 8.

む

・無機被覆　：2-29, 2-32.
・無防食鋼構造物　：6- 1, 6- 9, 6-15, 6-22.

め

・メタン生成菌　：2- 7

も

・目視観察　：6- 6,6-16,6-17.
・モルタルライニング　：2-29,2-31,2-32,
6-15.

ゆ

・有機被覆　：2-10,2-29,2-31,
2-36,2-37,2-38.

よ

・陽極　：5-21,5-22,5-23,
6- 9,6-11,6-12,
6-13,6-14,6-15.
・溶解成分　：2-18,3- 4.
・溶接　：2- 8,2- 9,5- 1,
5- 9,5-11,5-16,
5-18.
・溶射　：2-29,2-30,2-32
2-33.
・溶存酸素　：2-3,2- 4,2- 5,
2- 6,2- 7.

ら

・ランジェリア指数　：2- 4.

り

・硫酸塩還元(バクテリア)　：2- 7,2-10,3-31.
・流速の影響　：2- 6.
・流電陽極方式　：2-29,2-33,2-34,
3- 2,5-21.
・履歴調査　：6-15.
・臨時点検　：6- 1,6- 3,6- 6,
6-11,6-14.

れ

・レジンモルタル被覆：2-31,4-11.

わ

・ワイヤーロープ　：5- 3,5-8.

防食ハンドブック

発　　行　　初　版　平成10年３月
　　改　訂　平成23年３月
編　集　者　　一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会
　　「港湾技術委員会　防食ＷＧ」
発　行　者　　岡　原　美　知　夫
発　行　所　　一般社団法人　鋼管杭・鋼矢板技術協会
　　東京都中央区日本橋茅場町3－2－10
　　鉄鋼会館６階
　　〒103-0025 TEL 03－3669－2437㈹
　　FAX 03－3669－1685
印刷・製本

一般社団法人 鋼管杭 鋼矢板技術協会