

# はじめに

鋼材は社会基盤施設の整備にとって、きわめて重要な建設材料であり、港湾構造物、海洋構造物に広く適用されている。しかし、鋼材は腐食するという欠点を持っているため、その機能を十分に発揮させるためには、適切な防食対策を施すことが不可欠である。

昭和 50 年代の後半に、海洋鋼構造物の防食対策のために各種被覆防食工法の開発が、主に民間企業において実施された。開発された各種の被覆防食工法の防食効果や耐久性については不明な点が多く、可能であれば公的な研究機関で長期的な実証試験を行い検証することが強く要望されていた。防食工法の防食効果や耐久性を正しく検証するには、実際の海洋環境において長期間の暴露を行い確認することが最も信頼性の高い評価方法と考えられた。

時を同じくして運輸省港湾技術研究所（現・独立行政法人 港湾空港技術研究所）が海象観測を実施する目的で茨城県の波崎に観測桟橋を建設した。そこで、この桟橋に用いられている鋼管杭を用いた防食法の長期的な暴露試験を行うことが計画された。1984（昭和 59）年度に運輸省港湾技術研究所（以下、港空研）、財団法人 沿岸開発技術研究センター（現・（財）沿岸技術研究センター、以下、沿岸センター）、鋼管杭協会（現・一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会、以下同様）の三者による共同研究として、波崎観測桟橋（正式名称：波崎海洋研究施設碎波帶観測用桟橋、以下、観測桟橋）の 47 本の鋼管杭を利用して、各種防食工法の防食効果および材料の耐久性に関する現地試験を開始した。対象とした防食工法は、有機被覆、ペトロラタム被覆、無機被覆、塗装および電気防食の 5 種類である。これらの防食工法を 1983（昭和 58）～1986（昭和 61）年にかけて鋼管杭に施工した。

観測桟橋は、防波堤に囲まれている一般的な港湾施設と異なり、年間を通じて太平洋の荒波を受け、しかも砂浜海岸に立地しているため海底面近傍における漂砂による磨耗作用を無視することができないなど、きわめて過酷な腐食環境に位置する。観測桟橋における長期暴露試験は、海洋環境の実構造物を利用しての長期的な暴露試験としては世界的にもほかに類を見ない貴重なものである。

本書はこの暴露試験が 20 年を経過したことを契機に、ここで得られた防食技術に関する多くの知見を整理し、取りまとめたものである。本書が海洋鋼構造物の防食技術を担う実務技術者、海洋鋼構造物の腐食、防食に興味を持っておられる研究者および技術者の方々に広く読まれ、これから海洋鋼構造物の防食技術の発展に少しでも寄与できれば幸いである。

『海洋鋼構造物の防食技術』編集委員会

副委員長 阿部 正美

# 第1章 港湾鋼構造物の建設の推移と防食技術の変遷

鋼材は海洋環境においても、古い時代から現在まで社会基盤を形成する建設材料として広く利用されている。本章では、港湾鋼構造物の建設の推移についてふれ、次に、鋼材で建設された港湾施設が何故多いのかを説明する。さらに、鋼材は腐食するという宿命的な欠点があることから、古くから防食対策が施されており、その防食対策の変遷について述べる。

## 1.1 港湾鋼構造物の建設の推移

鋼材を最初に用いた港湾構造物としては、1876（明治9）年に工部省鉄道寮が神戸港内に、輸入されたスクリューパイルを脚とする鉄製桟橋を建設したという記録が残されている<sup>1)</sup>。その後、スクリューパイルを用いた桟橋が横浜港、名古屋港、大阪港、敦賀港で造られ、このうち横浜港山下大桟橋は、1890（明治23）年から建設が始められ4年後に完成している（図1.1、写真1.1）<sup>2)</sup>。この桟橋に使用された材料は、鋳鉄が2518トン、鍛鉄が1100トン、鋼鉄が12トンである。この桟橋は、その後、1906（明治39）年から1917（大正6）年にかけて水深-10.5mに増築されている。その後、関東大震災により旧桟橋は座屈陥落し、杭（丸鋼）は沈下した。復旧された桟橋には直径17.5cmの丸鋼が用いられた。この形式の桟橋は大正時代になっても敦賀港、釜山港などで造られた。しかし、許容荷重が小さいこととプレーシングの腐食などのために、その後は鉄筋コンクリート柱の桟橋に取って代わられるようになった<sup>3)</sup>。

大正末期には関東大震災の復旧のために鋼矢板が輸入された。港湾においては、当初は鋼材の腐食が懸念され仮設工に用いられていたが、施工が容易であることとともに、工期の短縮が図れる



図1.1 「土佐丸」画：五姓田義松 1896（明治29）年頃  
横浜港大桟橋に接舷した、歐州航路開航披露当日の土佐丸（右）と威海丸の油彩画  
(所蔵：日本郵船（株），写真提供：横浜みなど博物館)



写真1.1 大桟橋の基礎に使用されたスクリューバイブル  
3m物揚場と言わわれている<sup>5)</sup>。昭和初期に鋼矢板式けい船岸が造られた主な港湾は大阪港、名古屋港、伏木港、函館港、留萌港などである。しかし、腐食の問題があるので、当時は主要な施設よりもむしろ地方港湾の小型けい船岸で多く使われた。大阪港、名古屋港は-9mの大型岸壁であるが、これは地盤が軟弱なためである。

戦後になると、鋼管杭が港湾構造物に用いられるようになり、1954（昭和29）年の塩釜港の米軍LST桟橋の建設を契機に、鋼管杭は桟橋基礎杭などに多く用いられるようになった。また、直線鋼矢板を用いたセル式けい船岸が塩釜港貞山1号岸壁で最初に造られた（1954（昭和29）年着工、1959（昭和34）年完成）。セル式けい船岸はその後戸畠港（鉱石岸壁）、名古屋港（六号地岸壁）、直江津港（西埠頭）、青森港（浜町埠頭）、横浜港（出田町石炭埠頭）など各地で建設された。また、直線鋼矢板の代わりに鋼板で円筒形を造り、それを現場に据え付ける鋼板セル工法が考案され、1957（昭和32）年に神戸港の波除堤に用いられた。

昭和30年代半ばになると、急増する港湾貨物に対応するために、港湾施設の整備が急務となつたこともあり、鋼杭桟橋工法が開発され、大型のけい船岸が各地で造られるようになった。その代表が横浜港山下埠頭と神戸港摩耶埠頭である。山下、摩耶両埠頭における鋼構造物の成功により、その後全国各地に鋼構造物が大量に建設されるようになった。その後も鋼管矢板の使用など、鋼材の種類の多様化、鋼矢板セルのプレハブ化や根入鋼板セルなどの施工法の改良が続けられた。根入鋼板セル工法は関西国際空港の護岸、名古屋港ポートアイランド護岸などに用いられている。最近では、施工の早さや軟弱地盤への対応としてジャケット式の鋼構造物が建設されるようになってきた。その代表的なものとして東京港大井埠頭コンテナバースや羽田空港のD滑走路がある。以上のように、港湾鋼構造物は発展し続け、現在ではけい船岸のほぼ半数は鋼構造物で占めるに至っている。

## 1.2 我が国における港湾構造物の特徴

前述したように、我が国のがい船岸のほぼ半数は鋼構造物である。これは世界的に見ても珍しく、我が国の特徴である。特に、桟橋に用いられている杭は、海外ではコンクリート杭が多いのに対して我が国では鋼管杭がほとんどである。

ことから本設構造物としても用いられるようになった。最初の鋼矢板式けい船岸は、1926（大正15）年に建設された大阪府尻無川の一2.4m物揚場といわれている<sup>4)</sup>。昭和に入ると鋼矢板の輸入量も増え、昭和初期には毎年2.5万～3.5万トンの鋼矢板が輸入されるようになった<sup>5)</sup>。また、1929（昭和4）年に鋼矢板の試作が官営八幡製鉄所で行われ、1930（昭和5）年には本生産が始まった。国産鋼矢板が最初に使われたのは、1931（昭和6）年の宮古港の一

## 第2章 波崎観測桟橋の概要

### 2.1 波崎観測桟橋の位置と構造

波崎海洋研究施設碎波帯観測用桟橋（以下、観測桟橋と呼ぶ）は、各種の海象観測、例えば海底における物質移動、海底面の変形、海浜流などの観測を行うための施設として1982（昭和57）～1985（昭和60）年にかけて、運輸省港湾技術研究所（現・独立行政法人 港湾空港技術研究所）が建設したものである。

観測桟橋は茨城県の鹿島と銚子の中間付近の鹿島灘に位置し（図2.1）、太平洋に面した海浜に、汀線直角方向に突き出すように建設されている（写真2.1、写真2.2）。観測桟橋の全長は427m、先端の水深は約-5mである。

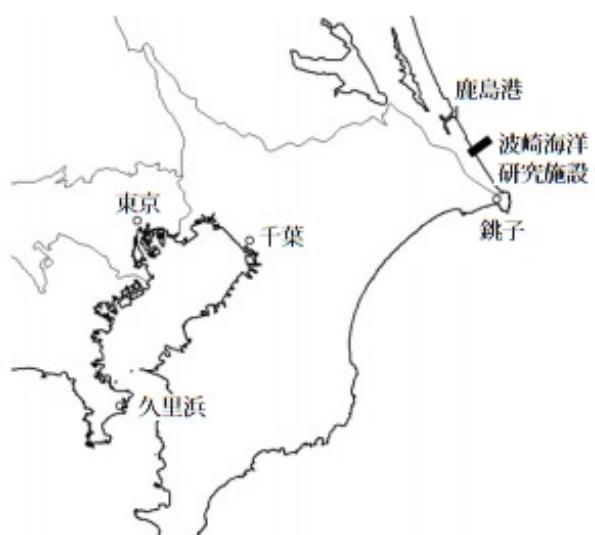


図2.1 波崎海洋研究施設の位置

観測桟橋は、桟橋部钢管杭が35本（杭No.1～35）と観測室部钢管杭12本（杭No.K1～K12）の47本の钢管杭（ $\phi$  600～800mm）が用いられており（図2.2）、杭頭部のコンクリート上部工にPC桁を設置した構造となっている（図2.3）。また、海水中の海底面近傍には、砂による鋼材の磨耗を防ぐために、 $\phi$  900～1 000mmの磨耗カバーが取り付けられている。



写真2.1 波崎観測桟橋（航空写真）



写真2.2 波崎観測桟橋

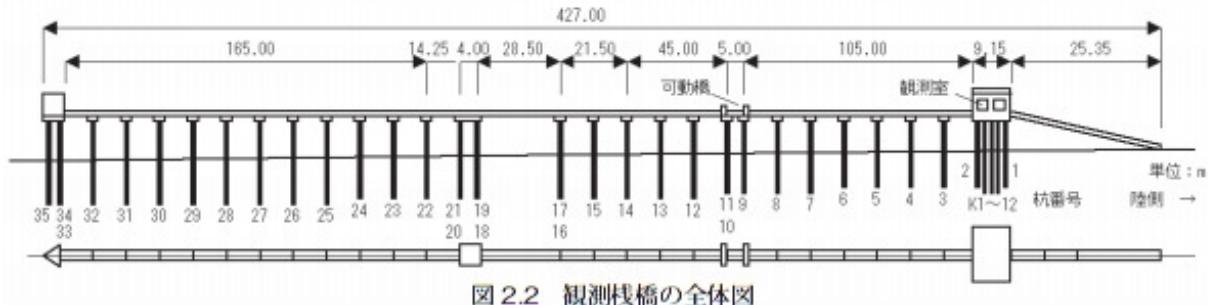


図 2.2 観測桟橋の全体図

## 2.2 波崎観測桟橋の環境



図 2.3 観測桟橋の概要図

観測桟橋が位置する環境は、外海に面し、海底の砂が大きく移動する碎波帯を含む海域であるため、鋼管杭は頻繁に激しい波浪や速い潮流の作用を受ける、きわめて厳しい腐食環境である。海域の潮位差 (H.W.L. ~ L.W.L.) は 1.4m であるが、有義波高で 0 ~ 3m 程度の波が繰り返し作用する。碎波位置は作用する波によって異なるが、荒天時（波高の高い時期）は桟橋全体が碎波帯となるため、鋼管杭に施された防食工法は、波浪による強い衝撃力を絶えず受けことになる。湾内環境である第二海堡（東京湾）の平均有義波高は 0.35m（1991 ~ 1999 年統計）<sup>1)</sup> であるのに対し、観測桟橋の平均有義波高は 1.05m（2007 年）と非常に高い。また、飛来塩化物イオン量（桟橋上部、+ 7m 付近）は、荒天期となる秋から冬にかけて非常に多くなる傾向を示し、桟橋先端付近において多くなる（図 2.4）。年平均では、桟橋先端付近において  $106 \text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、桟橋中央付近が  $81 \text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 、汀線付近が  $77 \text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$  となる。神奈川県久里浜湾内の護岸（港湾空港技術研究所内暴露場）の飛来塩化物イオン量である  $17 \text{mg}/\text{day}/\text{m}^2$  と比較しても、観測桟橋は非常に厳しい腐食環境であることが分かる。

## 2.3 波崎観測桟橋に適用された防食工法

観測桟橋の鋼管杭を利用して、種々の防食工法を適用した場合の鋼材の防食効果および各防食工法の耐久性を確認するための暴露試験を実施している。なお、この研究は「鋼管杭の防食法に関する研究」として、（独）港湾空港技術研究所、（財）沿岸技術研究センター、一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会の三者ならびに研究に賛同した各社により 1984（昭和 59）年に開始されたもので、2009（平成 21）年で 25 年目を迎えた。

## 第5章 各種防食工法の防食効果と耐久性

観測桟橋での暴露試験は、各種の防食工法を適用し、現在も継続して実施している。この暴露試験の目的は、実際の海洋環境・実構造物に適用した各種防食工法の防食効果や耐久性を検証することであり、定期的な調査や経時モニタリングなどを行い、防食工法の性能を実証してきた。また、暴露期間中に工法の改良や開発、調査・点検手法の構築なども試みた。ここでは、長期にわたる暴露試験において得られた知見についてとりまとめたものを示す。

### 5.1 無防食钢管杭の腐食傾向

干満帯以上が無防食状態で暴露されている6本の钢管杭（杭No.3, 16, 23, 26, 29, 30）の肉厚測定を行った（図5.1）。なお、杭No.23, 26, 30の海水中は流電陽極による電気防食を施しており、杭No.29は被覆防食を干満帯から海水中の一部（+1.27～-1.23m）に施している（表5.1）。

肉厚の測定は、一つの測定点で5点に超音波厚み計の探触子を当てて、それぞれ3回の繰返し測定を行った値の平均値である。なお、測定点は深度方向に20cm間隔とし、海側および陸側で

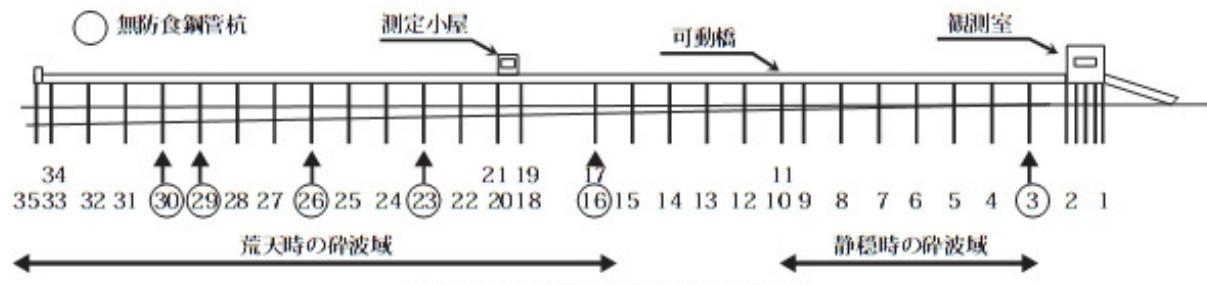


図5.1 無防食杭（調査杭）の位置図

表5.1 調査時期と調査杭の概要

杭No.	調査時期	海水中	大気中
3	4年, 10年	無防食	無防食
16	4年, 10年	無防食	無防食
23	20年	電気防食	無防食
26	20年	電気防食	無防食
29	10年	一部被覆防食	無防食
30	20年	電気防食	無防食



写真5.1 杭No.23の腐食状況

測定した(写真5.1)。なお、杭No.23, 26および30は電気防食を施しているため、-0.6m以深は測定していない。

鋼管杭の腐食速度は、飛沫帯および海上大気中に位置する+2.0m以上の箇所で大きくなつた(図5.2)。これは钢管杭に作用する海水飛沫が多いためである。また、荒天時には波高2~3mの大きな波浪が钢管杭海側表面に作用するため、杭No.26および30においては、陸側に比べ海側の腐食速度が0.1mm/y程度大きくなつたと思われる。一方、干満帶以深の腐食速度は、海水に没水しているため波浪の影響が小さく、測定方向による差は生じていない。

钢管杭の腐食速度は、最大で0.4mm/yを示した。これは鋼材のH.W.L.以上の腐食速度の標準値0.3mm/y<sup>1)</sup>よりも大きな値である。基礎に使用する钢管杭などの耐力の限界状態は、残存肉厚で5mmとされており<sup>2)</sup>、例えば、初期肉厚10mm程度の鋼材を観測栈橋のような環境に無防食

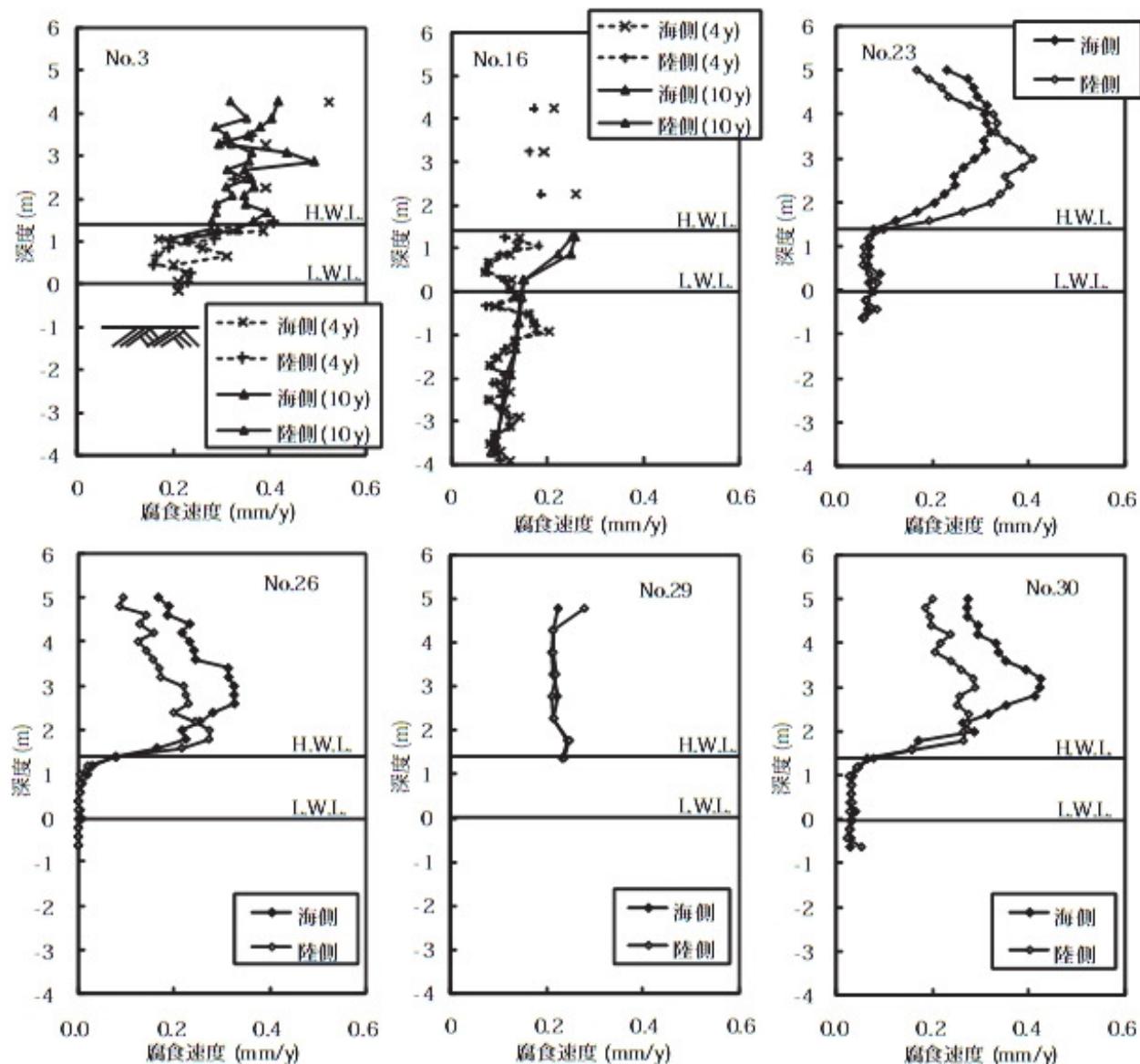


図5.2 鋼管杭の腐食傾向

## 第6章 20年間のノートから

### 6.1 技術者からのメッセージ

1920（大正9）年に我が国の港湾施設はじめて鋼材が使用されて以来、さまざまな課題に直面し新たな試みが行われてきている。我々が現在の技術を活用できるのは、先人の知恵と工夫を積み重ねてきた結果である。本節は、港湾施設の腐食防食に係わった技術者からのメッセージとして述べる。

#### 6.1.1 実験室と現場の役割分担

本研究の主対象である鋼材の腐食防食の問題に限らず、工学あるいは医学のような現実問題に対する現場がある場合には、実験室と現場の連携がきわめて重要である。なお、ここでは、波崎観測桟橋における現地試験のような研究は「現場」に分類して考えることとする。この観測桟橋における研究は、医学でいうと臨床試験に相当するものと考えたい。

実験室と現場の持つ役割を、以下のように定義して考えてみる。実験室での研究は「材料開発あるいは工法開発の第一歩であり、新しいことの創造の試み、新しいことへの挑戦を行う原点」である。一方、現場における試験は「実験室で開発された新しい材料あるいは新しい技術を実際に現場環境に適用し、想定できない不具合などを洗い出すこと」をその主目的とする。すなわち、現場の環境から評価を受ける、あるいは自然環境に教えを請うことである、ともいえる。現場で生じた不具合を再度実験室にフィードバックし改良を加える。そして、再度、現場で自然の試験を受ける。この過程を繰り返すことにより、より優れた技術に成長していくのである。概念的に表現すると、実験室において行う作業は「沈思黙考」と「新しい試み」を主とし、現場で行う作業は「自然との会話をすること」、あるいは「自然のテストを受けること」を主とする。

観測桟橋に適用したある種の防食カバーが破損した事例を考えてみたい（写真5.10参照）。この破損は決して失敗ではない。自然が、「これではダメだよ！」と教えてくれているのだから、この経験を踏まえてさらによい技術開発を行えばよい。この20年間、観測桟橋における試験では、その繰返しを実施してきた。厳しくいえば、実験室で開発された新技術も、現場で自然のテストを受けない限りは「独りよがり」でしかないともいえる。また、今となってはあまりにも有名な「钢管杭および鋼矢板の鉛直方向の腐食傾向」も、数多くの実構造物を調査することによって得られた貴重な知見である（図3.1参照）。言い換えれば、長い年月をかけて自然に教えてもらったのである。

波崎での20年間は、自然と会話をし、自然から多くのことを教えてもらった期間であったのではないだろうか。技術者の頭の中で芽生えた知恵と自然が教えてくれた知識が相互に協力するとき、