

1. まえがき

海洋環境下における鋼構造物にとっては、飛沫帯部分の腐食と平均干潮面直下付近の腐食が最も問題である。後者は平均水面付近がカソードとなり、平均干潮面直下から L.W.L. 付近がアノードとなるマクロ腐食によりアノード部分が集中的に腐食する現象で、港湾鋼構造物の場合特にこれが問題であり集中腐食と称している。集中腐食は常に発生するわけではなく、発生した場合も腐食の程度は事例により相当の幅がある。また集中腐食の発生および腐食の程度を予測することは現在ではまだ困難である。

一方、海水部分の鋼材の防食方法としては、電気防食と腐食しろを見込む方法が一般的である。腐食しろを見込む方法は条件によっては経済的であり簡易な方法であるが集中腐食に対応することは実際には困難である。電気防食はすでに相当長期間の実績があり、その効果も認められている。しかし、電気防食が十分にその効果を発揮するためには適切な設計と管理が必要である。

電気防食の効果、特に集中腐食に対する効果を把握する目的で水槽実験を行った。また電気防食を適用している構造物に対して、電気防食の効果の実態を把握し、所要防食電流密度の適性値および防食電流密度に影響する環境要因を知り、その結果を電気防食の設計法に反映させる目的で現地調査を行った。

2. 水槽実験

(1) 実験方法

実験に用いた水槽は、横2m、縦4m、深さ2mのコンクリート製で、海岸護岸より内側約5mのところであり、ポンプにより自然海水を定期的に給・排水して水槽内で潮位変動を起こすことができるものである。実験においては水槽内の潮位を図-1に示すようなサイクルで変動させた。

供試体は図-1に示すように22枚の鋼板の試験片（1片の寸法は横10cm、縦8cm、厚さ1mm、材質SS41）を塩ビ製パネルに固定し、各試験片には電流測定用のリード線を取付けた。供試体はマイクロ腐食試験用、マクロ腐食試験用および電気防食試験用の3種類作製した。マイクロ腐食試験用は22枚の試験片を開路の状態にし、他の2種は22枚の試験片を短絡し長尺の鋼材と同じ状態にした。マイクロおよびマクロ腐食試験用の供試体は無防食のまま水槽に設置し、電気防食試験用の供試体には外部電源方式で防食電位を-780mV（海水塩化銀電極基準）になるように電気防食を行った。

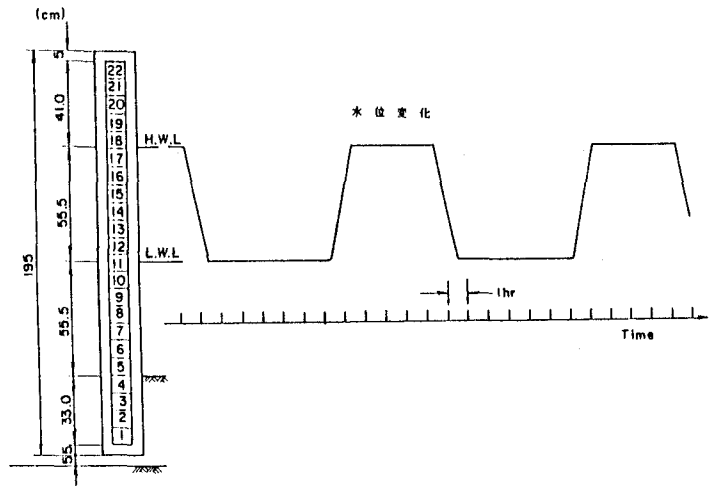


図-1 供試体の配置と潮位の変動周期

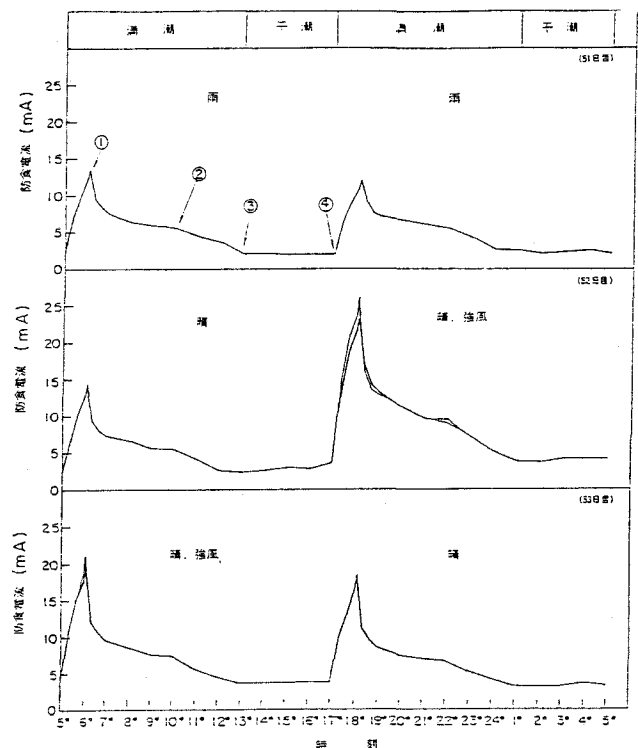


図-2 防食全電流の経時変化

(2) 実験結果

1) 防食電流

潮位変動に伴う防食全電流の変化の例を図-2に示す。図に示すように防食全電流は満潮初期に最大となり、時間とともに減少してほぼ一定値となり、潮位が下がり始めるとさらに減少して干潮時に一定値になった。なお防食全電流の値は、測定日の天候によって異なっており、この傾向は満潮初期の値で著しい。図-2では防食全電流は、雨天、晴天、晴天強風の順で大きくなった。

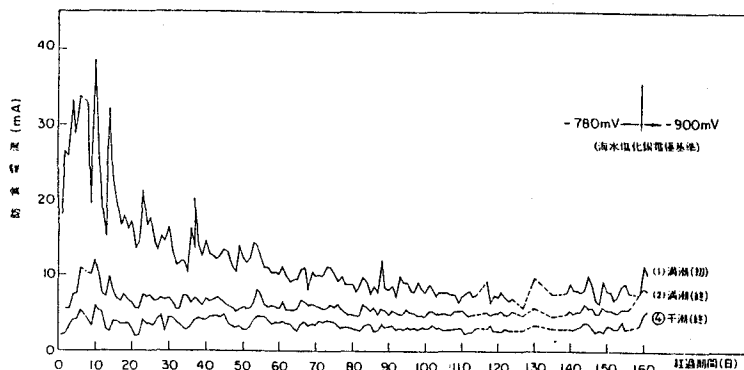


図-3 防食全電流の経日変化

防食全電流の経日変化を示すと図-3のようになり、時間経過とともに減少して一定値に近づいた。

次に試験片別に防食電流値をみると、図-4に一例を示すように潮位間に流入した防食電流は、満潮初期に急増して最大値に達した後、急減して一定値に近づき、干潮時には0となった。海水中上部の試験片に流入した防食電流は満潮初期には若干増加したが、海水中の中下部および海底下では潮位変動の影響は受けなかった。

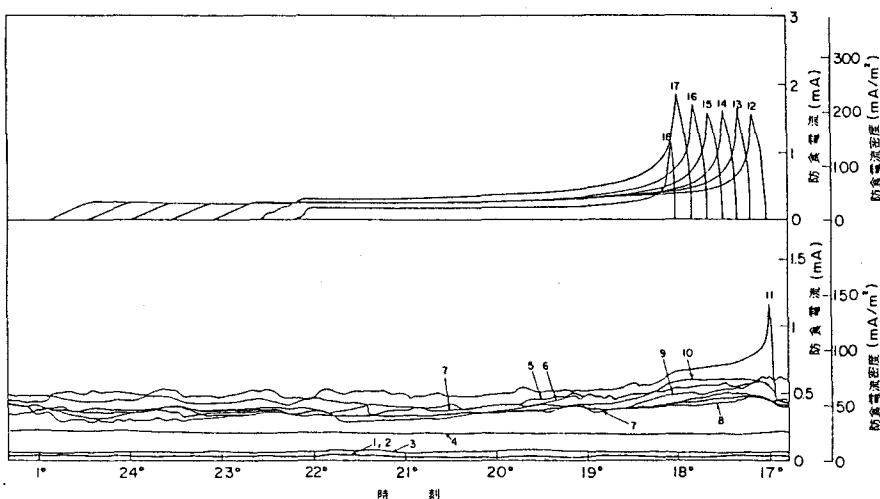


図-4 防食電流の潮位による変動 (100日目)

2) 腐食速度

マイクロ腐食試験、マクロ腐食試験および電気防食試験用供試体の各試験片の腐食速度を図-5に示す。マイクロ腐食試験用供試体では潮位間の腐食速度が大きく、マクロ腐食試験用供試体では L.W.L. 以下の腐食速度が大きくなっているのに対し、電気防食試験用供試体では H.W.L. 以下の腐食速度は小さい。

(3) 実験結果の考察

1) 所要防食電流

実験において潮位間および海水中の各試験片に流入した防食電流を防食電流密度で表すと表-1のようになる。潮位間の防食電流密度は大きく、特に満潮初期の値は清浄海域における海水中の防食電流密度(初期値)の標準とされている100mA/㎡より10倍以上大きい。防食電流密度は時間の経過とともに減少したが、約5ヶ月後でも満潮初期の値は約300~500mA/㎡であった。このように潮位間の防食電流密度が大きいのは、干潮時に大気中で酸化したさび層の還元反応に起因するためと考えられる。次に海水中の防食電流密度については、海水中上部では電気防食開始初期では100mA/㎡以上で、下部でも満潮初期では100mA/㎡を超えていた。約5ヶ月後の値はいずれも初期値よりかなり小さく初期値の30~70%程度になった。海底下の防食電流密度は時間の経過によってあまり変化せず10~20 mA/㎡であった。

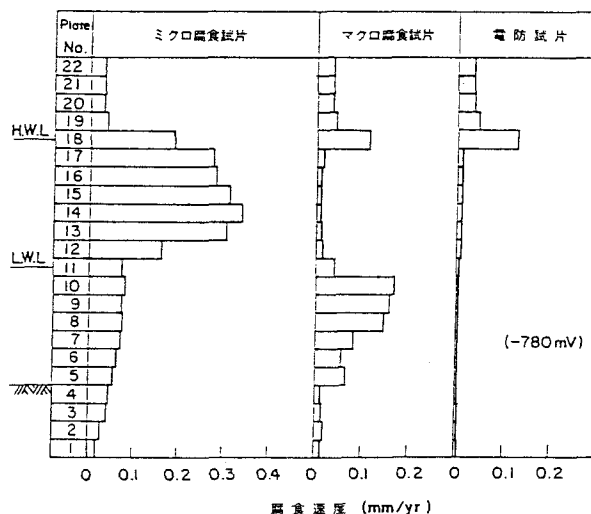


図-5 防食速度の比較

以上のように、防食電流密度は潮位間、海水中、海底下において異なった。現行の電気防食の設計では、通常平均海水面以下に電気防食を適用し、潮位間は海水中に含ませて扱っている。しかし、潮位間の防食電流密度は大きいので、潮位差の大きいところでは潮位間と海水中とを分けて所要防食電流を算出したほうが望ましい。また潮位間の防食電流密度が大きいことはその部分の鋼材を被覆すれば防食電流の節減に有効であることを示している。

2) 集中腐食に対する電気防食の効果
実験においてはマクロ腐食試験用供

試体の L.W.L. 以下に集中腐食が発生したが、電気防食を適用すると腐食量は極めて小さかった。電気防食試験用供試体のミクロおよびマクロ腐食試験用供試体に対する防食率を次式より求めると表-2 のようになる。

$$\text{防食率 (\%)} = (W_o - W_p) / W_o \times 100$$

W_o : 無防食時の腐食量
 W_p : 電気防食時の腐食量

表-2 にみられるように L.W.L. 直下付近の防食率は 98% 程度であった。したがって電気防食は集中腐食の防止に有効である。

3. 現地調査

電気防食を適用している実構造物に関するデータを得るため現地調査を行って来た。現在港湾構造物の電気防食の方式はほとんどすべてが Al 合金陽極を用いた流電陽極方式であるので、調査の対象を流電陽極方式の電気防食を約 10 年以上行っている大型の港湾構造物とし全国各地から選定した。約 10 年以上経過しているとしたのは、防食電流が定常状態になっているとして解析できることと陽極の残寿命の推定の精度を高めるためである。これまでに約 30 例の調査を行った。

(1) 調査方法

調査の内容は、陽極調査（陽極の閉路電位測定、発生電流測定、重量測定および観察）、構造物調査（構造物の電位測定、肉厚測定および観察）、環境調査（水質試験および底質試験）である。

陽極調査は一構造物について 4～6 個の陽極を調査した。電位測定および発生電流測定は図-6 および図-7 に示す要領で行った。肉厚測定には超音波探傷式厚み計を用いた。水質試験は海水の表層、中層、底層より満潮時および干潮時に採水して行った。

位 置	実 験 初 期			実験終期 (5ヶ月後)		
	干潮終	満潮初	満潮終	干潮終	満潮初	満潮終
潮位間		1250 } 1400	250 } 300		275 } 475	38
海水中 上 部	123 } 175	200 } 250	100 } 150	63 } 81	63 } 88	81 } 94
海水中 下 部	56 } 100	125 } 190	56 } 88	31 } 56	38 } 63	63 } 75

単位 mA/m²

表-1 防食電流密度

試片 No.	環 境	防食率 (%)	
		対ミクロ腐食	対マクロ腐食
11	L.W.L.	89.0	80.0
10	海水中	97.0	98.6
9	"	96.1	98.1
8	"	96.0	98.0
7	"	95.2	95.5
6	"	94.4	92.8
5	"	93.4	94.2
4	海底下	93.4	78.6
3	"	85.3	59.5
2	"	75.7	60.7
1	"	61.6	55.3

表-2 防食率

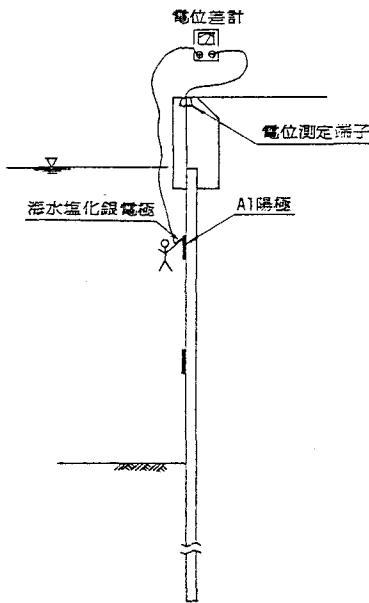


図-6 陽極の電位測定法

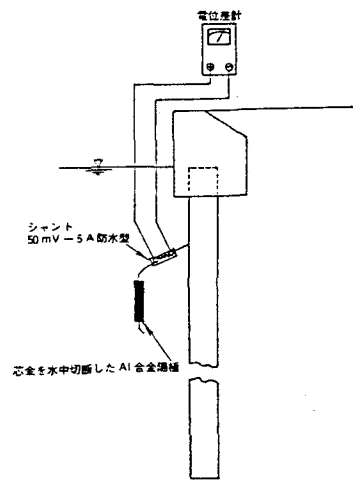


図-7 陽極の発生電流測定法

(2) 調査結果

1) 防食電流密度

防食電流密度は陽極の発生電流測定から求めるとともに陽極の消耗量から算出した平均発生電流からも求めた。陽極の消耗量から求める方法は次式によった。

陽極消耗量＝初期重量－残存重量

平均発生電流＝（陽極消耗量×陽極有効電氣量）／電氣防食期間

Al合金陽極の有効電氣量＝1／3.8（A・yr/kg）

防食電流は電氣防食開始初期は大きく次第に減少して一定値に落ち着くから、陽極の消耗量から求めた防食電流密度の値には初期の影響が含まれている。一方、陽極の発生電流は季節、天候、潮位、水質などの影響を受けることがあるので、発生電流測定値が現在の平均値を示しているとは限らないという問題がある。一般に陽極の消耗量から求めた値の方が大きくなる。

同一陽極又は同一構造物の陽極を約5年間隔で前後2回測定した構造物が4例ある。約5年間の消耗量から算出した防食電流密度は陽極の発生電流測定から算出した値と近いものであった。また当初の陽極が消耗後、二度目に取り付けた陽極について調査した2例では、両方の方法で求めた防食電流密度はほぼ同じであった。これらはいずれも防食電流が既にほぼ一定値に達している期間について測定しているとみてよいため、定常状態の防食電流密度は陽極の発生電流測定値から求めた値とみてよいと考えられる。

図-8に陽極の発生電流測定値から求めた防食電流密度の頻度図をしめす。12mA/m²から72mA/m²までの幅があり、30mA/m²前後の事例が多い。なお陽極の消耗量から求めた値は事例より相当差があるが平均的には10～15 mA/m²程度大きかった。

防食電流密度と水質との関係については後述する。

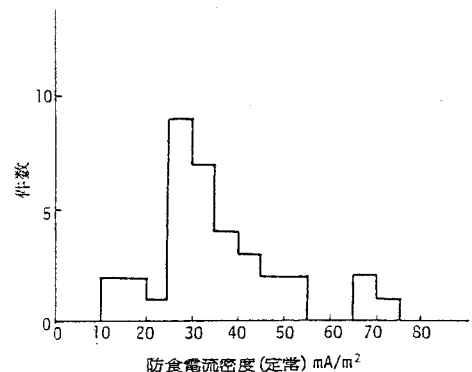


図-8 防食電流密度の頻度

2) 陽極の推定寿命

陽極の寿命の推定を次式により行った。

残寿命＝（残存重量×陽極有効電氣量）／陽極の発生電流

寿命＝残寿命＋現在までの電氣防食期間

この結果、推定寿命が設計値に足りないものは32例中6例で、最も不足するものは設計寿命20年に対し約4年短かった。これらの事例は大体において水質に問題があると思われるものであった。

逆に推定寿命が設計寿命を上回る事例では、設計寿命10年あるいは20年に対し10年以上上回るものもあるが、5年までのものが多かった。

3) 構造物の電位

構造物の電位は防食電位（-780mV、海水塩化銀電極基準）より卑に保たなければならない。調査結果では図-9に示すように防食電位に達していない構造物が一例あった。この構造物は河川水の流入するところでありその影響が考えられる。

4) 腐食速度

構造物の肉厚測定の結果では平均干潮面からL.W.L.付近にかけて集中腐食の傾向は全

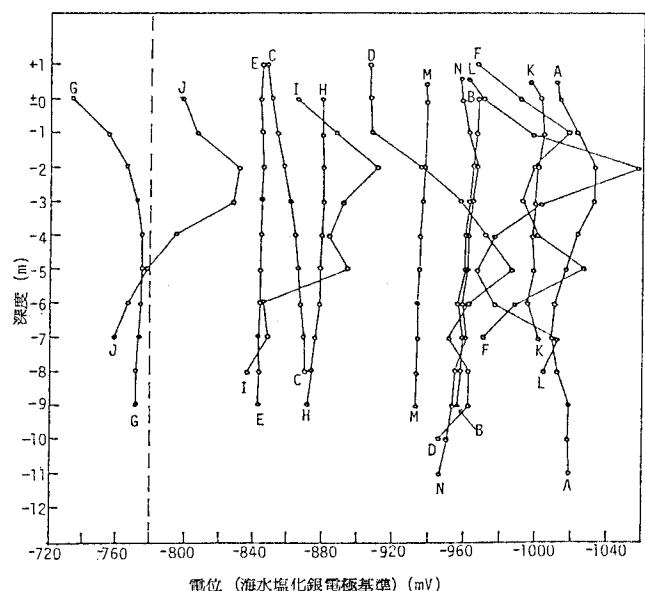


図-9 構造物の電位

く認められなかった。次に腐食速度を算出すると、平均腐食速度は大きいものは 0.05mm/yr 程度であるが、0.02～0.03 mm/yr 程度のものが多かった。ここで鋼材の初期肉厚はカタログ厚として算出している。したがって初期肉厚の寸法誤差および電気防食開始までの建設途中の腐食量が含まれており、特に後者の影響が大きいと思われるので電気防食期間中の腐食速度は上記の数値よりかなり小さいと考えられる。

(3) 調査結果の考察

防食電流密度と水質との関係を検討する。

防食電流密度は水質の影響を受け、汚染海域では大きい防食電流密度を必要とするとされているが、汚染海域という区分は抽象的で実際の設計に適用するためにはなんらかの水質の指標で表示されることが望まれる。

前述の防食電流密度が大きい事例にはアンモニウムイオンが大きいものあるいは塩素イオンが小さいものが多いことに着目して、 NH_4^+ (ppm) + $1/\text{Cl}^-$ (%) に対して防食電流密度をプロットすると図-10 のようになる。ここでアンモニウムイオンと塩素イオンの値は、満潮および干潮に測定した海水の表層、中層、底層の値を平均したものである。 $\text{NH}_4^+ + 1/\text{Cl}^-$ の値が 0.8 以下では定常状態の防食電流密度は $40\text{mA}/\text{m}^2$ 以下であり、0.8 より大きくなると $40\text{mA}/\text{m}^2$ 以上が現われる。 $\text{NH}_4^+ + 1/\text{Cl}^-$ が 0.8 以上でも防食電流密度が $30\text{mA}/\text{m}^2$ 程度のものもあるが、これらは鋼材が潮位間にほとんど露出していない場合である。水槽実験で認められた潮位間の防食電流が大きいことが現地調査でも裏付けされたといえる。

一時点の水質の限られた試験項目の値と防食電流密度を関係付けることは乱暴ではあるが、一応のめやすになるのではないかと考えられる。

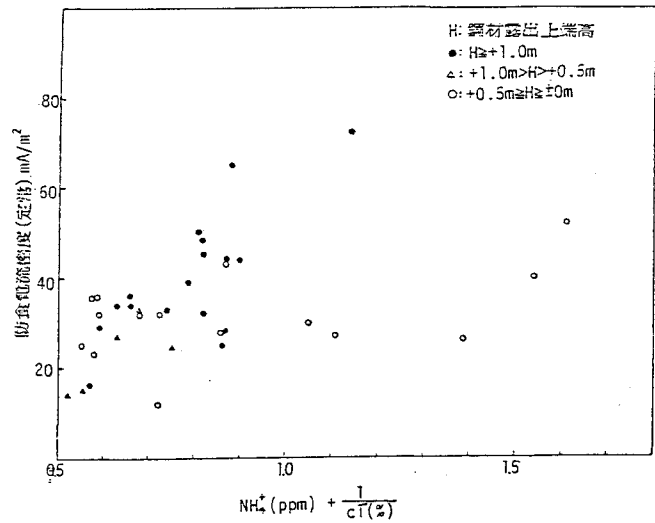


図-10 防食電流密度と水質との関係

4. 結論

水槽実験および現地調査から、海洋構造物への電気防食の適用に関していえることを要約すると次のとおりである。

- ① 平均干潮面直下から L.W.L. 付近の集中腐食の防止に対して電気防食は有効である。
- ② 潮位間の電気防食密度は大きく、この部分を被覆すると防食電流の節減に効果がある。特に水質が汚いところで有効である。
- ③ 防食電流密度と水質との関係は、アンモニウムイオン濃度と塩素イオン濃度を指標に表すことができる。

5. あとがき

今後の検討課題は、防食電流密度の初期値の適性値、波浪、潮流などが防食電流密度に及ぼす影響、電気防食中の腐食速度などである。

本報告は善一章博士の港湾技術研究所在職中の業績に負うところが大きい。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 善、阿部：集中腐食に対する電気防食の適用性、港湾技術研究所報告、22巻2号、1983
 善、横井、阿部：港湾構造物の電気防食調査（その1）、港湾技研資料、No.475、1984
 横井、阿部：港湾構造物の電気防食調査（その2）、港湾技研資料、No.502、1984