電気防食下における港湾構造物の電位分布解析

正員 岩 田 光 正* 正員 永 井 欣 一*
正員 宇 都 久 幸**

Numerical Analysis of Potential Distributions in Harbor Structures under
Cathodic Protection Using Sacrificial Anode

by Mitsumasa Iwata, *Member* Kinichi Nagai, *Member*
Hisayuki Uto, *Member*

Summary

As the numerical method to analyse the potential distribution in a protection cell with a sacrificial anode, the finite element method adding the conservation law of protection current has already been proposed by the authors. In order to investigate the applicability of the numerical method to anticorrosion design of marine structures protected with a sacrificial anode, potential distributions of real structures built in harbors were analysed by the numerical method and compared with measured values.

The results are summarized as follows :

(1) The numerical method is applicable to estimate potential distributions in real marine structures.

(2) The time elapsed since the cathodic protection is started should be specified in the estimation of the potential, because the polarization characteristics of steel in sea water changes with time. If the polarization characteristics correspond to the elapsed time is given to the estimation, the potential distribution estimated by the numerical method is in good agreement with the measured results.

(3) The cathodic polarization curve, of which the surface resistance of steel in sea water is $6\Omega\cdot\text{m}^2$, is suitable for the anticorrosion design of marine steel structures.

1 緒 言

海水中に設置される鋼構造物の防食には、アルミニウム合金を犠牲陽極とする流電陽極法が、外部電源法に比べて経済的であることから多用されているが、いずれの電気防食法においても陽極から遠ざかるにつれて、海水の抵抗による IR 降下が増大し分極が小さくなるので、構造物全体が均等な電流密度で防食されているとは考え難い。したがって、流電陽極法の防食設計に際しては、犠牲陽極周辺の電位分布と陽極が供給する電流を把握して、犠牲陽極の合理的な配置およびその寸法を決定することが望ましい。

防食下で形成される電池内の電位分布はラプラスの方程式で表わされるが、実構造物では境界条件が単純でないのでその解析解を得ることは困難であり、従来有限要素法^{1)~3)}、境界要素法⁴⁾などによって数値解を得ている。

しかしながら、これらの数値計算では、電池内の少なくとも 1 点の既知電位を基本境界条件として与えなければ、構成方程式の解は不定となる。したがって従来の数値計算法は、定電圧で電流を供給する外部電源法の防食設計には直接適用できるが、犠牲陽極と鋼材がともに分極を起こして、電位が定まらない流電陽極法の防食設計に適用する場合には工夫を要する。

これに対して著者らは、有限要素法の構成方程式と電流の保存則を連立させて解くことにより、流電陽極法の防食電池内における電位分布を求める方法を提案するとともに、3% 食塩水を電解液とした流電陽極法の防食電池内における電位分布を求め、実測値と比較することによってその妥当性を示した^{5), 6)}。しかしながら、海水中に設置された実際の鋼構造物では、電気防食に伴って石灰質皮膜がその表面に付着するなど、組成の単純な食塩水の防食電池にはみられない現象が起こっており⁷⁾、また計算に際して用いる鋼材のカソード分極特性が時間の経過に伴って変化する。そこで本報では、アルミニウム

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院工学研究科

合金の犠牲陽極によって防食された実際の港湾構造物における電位分布を本計算によって求め、実測値と比較することによって、本計算法が実構造物の防食設計に適用可能であることを示すとともに、計算に用いる電極の電気化学的特性について考察を加えた。

2 防食電池における電位分布の計算手法

流電陽極法の電池内における電位分布を、2 次元⁵⁾ および 3 次元⁶⁾ 有限要素法によって解析する方法については既報に詳述してあるので、ここではその考え方とマトリックス計算の技法について概説する。

防食電池内における電位 ϕ の分布は、ラプラスの方程式で記述され、次式の境界条件下で混合型境界値問題として取扱うことができる。

$$\text{基本境界条件: } \phi(x_0, y_0, z_0) = \phi_0 \quad (1)$$

$$\text{自然境界条件: } \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial n} + q_n = 0 \quad (2)$$

ここに、 ϕ_0 は電場内の点 (x_0, y_0, z_0) における電位、 ρ は電解液の比抵抗、 $\partial \phi / \partial n$ および q_n は電極境界面法線方向の電位勾配および電流密度をそれぞれ表す。

電流密度 q_n は Fig. 1 に実線で示す分極曲線すなわち ϕ の指数関数で与えられるが、この指数関数を有限要素法の線形方程式に代入すると、方程式が非線形となり計算上得策でないので、分極特性を同図の破線で示すごく少数本の直線で近似し、各直線を次式のように与える。

$$q_n = (\phi - \phi_c') / R_p' \quad (3)$$

Fig. 1 において、 ϕ_c は自然腐食電位、 R_p は分極抵抗であり、各破線の切片および勾配が上式の ϕ_c' および R_p' である。(3) 式を (2) 式に代入すると Neumann 型境界条件が得られ、自然対流の境界を有する熱伝導問題と同様にして有限要素法による定式化を行うと、次の構

Fig. 1 Schematic polarization curve and its linearization

成方程式が得られる。

$$[K]\{\phi\} = \{I\} \quad (4)$$

上式の $\{I\}$ は電流の単位をもつ列ベクトルで、その各要素は電極に沿う要素面の面積を S とすると、 $S\phi_c' / R_p'$ で与えられる定数である。

本報では、防食電池内の電位を海水塩化銀電極を照合電極とした値で表わすこととし、(1) および (3) 式の ϕ はこの照合電極基準の電位で表わされるものとする。流電陽極法では (1) 式の ϕ_0 が未知であるので、(4) 式の解が得られない。そこで、 ϕ_0 の代わりに任意の値 Φ_0 を与えるために、海水塩化銀電極との間に未知の電位差 Φ_{ref} をもつ仮想の照合電極を導入する必要がある、仮想の照合電極を基準とする電位を Φ とすると次式が成立する。

$$\Phi = \phi - \Phi_{ref} \quad (5)$$

上式を用いると、(1) 式の基本境界条件および (3) 式に分極特性は次のように表わされる。

$$\Phi_0 = \phi_0 - \Phi_{ref} \quad (1')$$

$$q_n = \{\Phi - (\phi_c' - \Phi_{ref})\} / R_p' \quad (3')$$

(1)' 式の右辺は未知量の差であるので、 Φ_0 には任意の値を与えてよいことが了解できる。なお (2) および (4) 式は照合電極のいかんによらず成立するので、各式の ϕ を Φ に置換えるだけでよい。

(3)' 式に分極特性を用いると、(4) 式の右辺 $\{I\}$ に未知数 Φ_{ref} の項が含まれることになり、この項を同式左辺に移行すると次式が得られる。

$$[K[P]\left\{\frac{\Phi}{\Phi_{ref}}\right\} = \{I\} \quad (4')$$

ここに、左辺の行列に含まれる $\{P\}$ は Φ_{ref} の係数を与える列ベクトルで、その各要素は $-S/R_p'$ によって定まる。上式では未知数の数よりも方程式の数が一つだけ少ないので、防食電池のアノードから電場へ流入する電流 I_A と、カソードへ流出する電流 I_C の総和が零となること、すなわち次式に示す電流の保存則を加える必要がある。

$$I_A + I_C = \sum_{i=1}^E (q_n S)_i = 0 \quad (6)$$

ここに E は電極に接する要素の数である。したがって、(4)' 式と (6) 式を連立させて解くことにより、未知数 Φ および Φ_{ref} を求めることができる。なお、ここで得られた Φ は仮想照合電極基準の電位であるので、 Φ および Φ_{ref} を (5) 式に代入すると海水塩化銀電極基準の電位 ϕ に換算することができる。

(6) 式を (4)' 式に組込んだ連立方程式の行列は、Fig. 2(a) のようになり、バンドマトリックス法を適用してもメモリーの節約にはならず、3 次元電場の解析では多大のメモリーと計算時間を必要とする。そこで同図 (b) に示すように、 K の部分についてのみバンドマトリックス

Fig. 2 Band matrix used in this calculation

法を適用し、 $\{P\}$ は $\{I\}$ とともに消去法の処理を行うようにした。後述する計算例では、節点数約 5,000 の 3 次元電場の計算を行っているが、上述の手法を採用することによって所要のメモリーを約 6% に減じ、計算時間と費用を大幅に節約することができた。

3 港湾構造物の防食電池

3.1 防食電池の形状

海水中に設置された鋼構造物について、取付けられている犠牲陽極の配置の妥当性やその耐用年数を確認するために、電位分布、陽極発生電流などの調査が行われた実績がある^{7),8)}。これらの調査結果のうち公表されているものから、比較的データの整った 3 カ所の港湾構造物を選び、それらの防食電池を著者らの提案した有限要素

法によって解析し、その結果を実測値と比較することとした。各港湾構造物の実形と防食電池の要素分割を Fig. 3, 4 および 5 に示す。いずれもアルミニウム合金を犠牲陽極とした流電陽極法による防食が施工されている。

Fig. 3 は島根県の G 港栈橋の鋼管杭⁷⁾, Fig. 4 および 5 はそれぞれ静岡県 O 港および愛知県 K 港の鋼矢板岸

Fig. 4 Cathodic protection cell along steel sheet pile in O-Harbor⁸⁾ Fig. 5 Cathodic protection cell along steel sheet pile in K-Harbor⁸⁾

Table 1 Size and weight of aluminum alloy anodes used in harbor structures

Harbor	Size mm				Weight (Gross) kg
	L	B ₁	B ₂	D	
G	700	140	160	150	45.0
O	700	100	120	110	25.4
K	700	140	160	150	45.0

壁⁹⁾を示す。構造物の対称性および犠牲陽極配列の周期性を考慮し、各実形図中の破線で囲まれた海水領域を防食電池として3次元要素分割を行った。なお、海水はほぼ無限の広がりをもつが、前報⁹⁾で示したように電場を鋼材表面の法線方向に2m以上広げても、鋼材表面の電位分布はほとんど変化しないことから、安全側をみて鋼矢板岸壁の法線方向に5mまでの海水を解析の対象とした。また深さ方向については、構造物が海底の岩盤あるいは比抵抗が十分高い層まで達しているとみなして、防食電池の深さを構造物の高さと等しくした。電池内の電場を四面体1次元要素に分割する際には、各要素分割図の上面を手作業によって三角形に分割し、そのうち深さ方向に自動分割を行った。各港の構造物に用いられた犠牲陽極の寸法および重量をTable 1に示す。

3.2 分極特性

前節に述べた有限要素法計算を行うには、海水中的のカソード（鋼材）およびアノード（犠牲陽極）の各分極曲線の近似直線を分極特性として与える必要がある。海水中における鋼材の分極曲線は、善ら⁷⁾により表面抵抗 R_s をパラメータとしてFig. 6のように推定されている。また、この表面抵抗は、鋼構造物が海水中に設置された最初の数日ないし数週間で急増するが、その後は漸増し半年ないしそれ以上の期間で飽和するとされている¹¹⁾。従来の防食設計では、表面抵抗 R_s を $3.0\Omega\cdot m^2$ として防食範囲の簡易推定を行っている⁹⁾が、この値は R_s が急増した時点のもので、防食状態が安定した時期には R_s はさらに増加した値をとると考えられる。善ら⁷⁾が調査した鋼管矢板の例では、建造6年後に R_s は $10\Omega\cdot m^2$ に達していることが電位分布の測定結果から推定されている。

本報で取上げたG港、O港およびK港の各構造物は、

* Fig. 1の一点鎖線は実線で示した分極曲線を一本の直線で近似したもので、その勾配 R_s が表面抵抗である。

Fig. 6 Polarization curves of steel and aluminum alloy in sea water^{7),10)}

建造後それぞれ12.8年、1.8年および1カ月を経過した時点で電位分布あるいは電流の調査が行われていることから、本計算では海水中における鋼材の表面抵抗 R_s として 3.0 および $6.0\Omega\cdot m^2$ を採用することとした。なお、G港栈橋については、12.8年を経過しているので、 R_s を $12\Omega\cdot m^2$ とした場合の計算も行っている。Fig. 6の実線②、③、④はこれらの R_s に対する分極曲線を示しており、各曲線に沿った破線が計算に用いた分極特性である。

構造物の上部すなわち平均水面下2m、同水面上1mの範囲では、波浪、潮の干満などの影響を受けて表面抵抗 R_s は $1\sim 2\Omega\cdot m^2$ となり、経時変化もほとんど生じないことが知られている⁹⁾。そこで本計算では、平均水面下1.5mまでの部分に対しては表面抵抗を $1.5\Omega\cdot m^2$ とした。その分極曲線がFig. 6の実線①に相当する。

海土中の鋼材に対するカソード分極曲線は不明なので次のようにして推定した。鋼構造物に対する従来の電気防食設計では、カソード側の平均防食電流密度として構造物における海水中的の部分には $100\text{mA}/m^2$ 、海土中の部分には $20\text{mA}/m^2$ を採用しており⁹⁾、防食に必要な電流密度は海水中に比べて海土中では1/5でよいことになっている。そこで、Fig. 6に示した分極曲線②に沿う破線の勾配を5倍にした直線⑤を海土中の鋼材に対する分極特性として与えた。なお使用期間の長いG港栈橋に対しては、海土中の鋼に対する表面抵抗 R_s についても経時変化を考慮し、直線⑤の R_s を2倍にとった直線⑥の分極特性による計算も行っている。

アルミニウム合金製犠牲陽極のアノード分極特性は、

Table 2 Polarization characteristics used in FEM calculation : Case I, Case II, Case III

Electrode	Electrolyte	Polarization curve	Surface resistance $R_s \Omega \cdot m^2$	Polarization characteristics		Case I	Case II	Case III
				$R_p \Omega \cdot m^2$	$\phi_c V$			
Steel (Cathode)	Sea (Surface)	①	1.5	2.7	-0.59	○	○	○
		②	3.0	4.0	-0.63	○	—	—
	Sea (Bulk)	③	6.0	6.8	-0.63	—	○	—
		④	12.0	12.0	-0.63	—	—	○
	Mud	⑤	20.0	20.0	-0.63	○	○	—
		⑥	40.0	40.0	-0.63	—	—	○
Al-Alloy (anode)	Sea	⑦	0.001	0.001	-1.10	○	○	○

坂野ら¹⁰⁾によって示された分極曲線を採用することとし、これを直線近似して Fig. 6 の直線⑦に示してある。以上の各種分極特性を組合せた3種類のケースについて電位分布解析を行った。各ケースに用いた分極特性の ϕ_c' および R_p' を Table 2 に一括して示す。

3.3 比抵抗

海水および海土の比抵抗 ρ は、海水の成分、温度などの影響を受けるので、港ごとに異なった値をとることになる。G港については実測されており、その平均として $\rho=30 \Omega \cdot cm$ が示されている⁷⁾。O港およびK港における海水の実測値は示されていないが、伊勢湾における実測例⁷⁾を参照して $\rho=25 \Omega \cdot cm$ とした。海土の比抵抗は、50~100 $\Omega \cdot cm$ といわれているので¹¹⁾、本計算ではすべての港湾に対して 75 $\Omega \cdot cm$ を採用することとした。

4 計算結果および考察

Table 2 に示したケース I の各分極特性を与えて、G港、O港およびK港の各構造物表面における電位を計算し、その分布を実測値と比較して Fig. 7 の (a), (b) および (c) にそれぞれ示す。なお同図は Fig. 3, 4 および 5 に○印で示す位置の深さ方向における電位分布を示したものである。同図によると、いずれの構造物における電位分布も計算結果は実測値よりも貴な値を示し、その差が 0.1 V を越える箇所も多々見受けられる。また、G港およびK港の構造物では、海土中に埋れた部分における電位の計算値が鋼の防食電位 $-0.78 V$ より貴になっている。このように海水中における鋼材の表面抵抗 R_s を 3.0 $\Omega \cdot m^2$ とした分極特性による計算結果は、鋼構造物表面における分極を小さく見積り、また $-0.78 V$ よ

Fig. 7 Comparison of potential distributions measured and calculated under the condition of Case I

Fig. 8 Comparison of potential distributions measured and calculated under the condition of Case II

り卑となる防食範囲を狭く推算することになる。

これに対して、ケースⅡの分極特性による電位の計算結果は、Fig. 8 (a), (b) および (c) に示すようにいずれの構造物においても、海水中では実測値にかなり近い値を示すようになる。計算値が分極特性の推定値を基に求めたものであること、実測値が現場の厳しい作業環境で得られたものであることなどを考慮すれば、両者は良好な対応を示しているとみることができる。また、陽極から遠く離れた海土中の鋼構造物表面は -0.78 V より卑側へほぼ分極しており、いずれの港湾構造物もその全体が防食状態にあることが了解できる。海土中の構造物表面における電位は、測定が困難であるために、ここに取上げたいずれの構造物においても実測されていないが、使用実績からみて犠牲陽極による防食の効果は構造物全体に及んでいたものと推察できるであろう。したがって、Fig. 8 に示した海土中の鋼材表面における電位の計算結果は、ほぼ妥当な値と見なすことができる。

ここに取上げた港湾構造物では、調査までの使用期間が1カ月から12.8年までの広い範囲に及んでいるにもかかわらず、ケースⅡの条件下で妥当な推定結果が得られたことから考えて、港湾構造物の防食設計に際しては海水中における鋼の表面抵抗を $6.0\Omega\cdot\text{m}^2$ とした時の分極特性を用いればよいことが結論づけられる。

調査時点までの使用期間が特に長いG港栈橋については、海水中における鋼材の表面抵抗 R_s をケースⅡよりも大きく採ったケースⅢの分極特性による電場解析を行

ったが、この計算で得られた電位分布はFig. 9に示すように実測値とほぼ一致している。調査時期に応じた分極特性を本計算に与えることができれば、構造物表面における電位の計算値は実測値とほぼ一致することと同図は示している。以上のことから、著者らの提案した計算法は流電陽極法によって防食された海水中の実構造物における電位分布の推定に適用可能であることが実証できた。

本計算によって求めた節点電位 ϕ 、(3) 式に分極特性および(6)式よりアノード電流 I_A を計算することができる。この I_A は犠牲陽極1個当りの発生電流すなわち陽極発生電流に相当する。陽極発生電流の計算値を一括してTable 3に示す。善ら⁷⁾はG港栈橋を含めて建造後6~12.8年間使用した10カ所の港湾構造物について防食状況の調査を行っている。その調査結果によると、G港栈橋の陽極発生電流は 0.28 A/個 、その他の構造物は $0.44\sim1.96\text{ A/個}$ の範囲にあった。G港栈橋は、陽極発生電流の実測値が極端に低い値となっており、特異な環境にあったものと推察される。陽極発生電流のケースⅡに対する計算値は善らの実測値の範囲内にあり、ほぼ妥当な犠牲陽極の消耗速度が推定されていることがうかがえる。この陽極発生電流から鋼の防食のために消費される犠牲陽極の重量が算出できる。しかしながら、犠牲陽極は鋼材の防食に対して衰耗するばかりでなく、自然腐食も同時に進行する。この腐食量を別途求めることができれば、犠牲陽極の所要重量あるいは残余寿命も推算可

Fig. 9 Comparison of potential distribution measured and calculated under the condition of Case III in G-Harbor

Table 3 Calculated value of current generated by one piece of anode

Harbor	Case I	Case II	Case III
G	1.68	1.30	1.19
O	1.70	1.60	—
K	1.83	1.67	—

Unit in A/Piece

能である。

5 結 言

流電陽極法の防食電池における電位分布の数値解析法として、著者らはすでに電流の保存則を加味した有限要素計算法を提案した。この計算法が流電陽極法の防食設計に適用できるか否かを検討する目的で、実際の港湾構造物における電位を種々の分極特性を与えて計算し、実測値と比較して次の点を明らかにした。

(1) 本計算法は、実際の海水中で使用される鋼構造物の表面における電位分布の解析に利用できる。

(2) 海水中における鋼材の分極特性は時間の経過に伴って変化するので、電位分布の推定に当っては構造物の使用開始後における時期を指定する必要がある。その

時期に応じた鋼材の分極特性を採用することができれば、本計算法によって求めた電位分布は測定結果とはほぼ一致する。

(3) 海水中の鋼材に対する防食設計を本計算によって行う場合、計算に用いる分極特性としては一般に表面抵抗が $6.0 \Omega \cdot m^2$ の分極曲線が適当である。

本研究を遂行するに当たり、日本防蝕工業株式会社常務取締役小林豊治氏並びに同社取締役玉利昭一氏には貴重なご意見と資料の提供をいただいた。茲に記して深甚の謝意を表する。また本研究の一部は昭和 61 年度文部省科学研究費補助金〔一般研究(B)〕、課題番号 61460152、代表者 永井欣一〕によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) H. P. E. Helle, G. H. M. Beek, J. T. H. Ligte-lijn: Numerical Determination of Potential Distributions in Multi-Electrode Systems, Corrosion-NACE, Vol. 37, No. 9 (1981), p. 522.
- 2) R. G. Kasper, M. G. April: Electrogalvanic Finite Element Analysis of Partially Protected Marine Structures, Corrosion-NACE, Vol. 39, No. 5 (1983), p. 181.
- 3) R. Stromen, A. Podland: Computerized Numerical Techniques Applied in Design of Offshore Cathodic Protection, Corrosion/80 (Preprint of the International Corrosion Forum in Chicago), (March 1980), p. 241/1.
- 4) 青木 繁, 岸本喜久雄, 吉部耕史, 宮坂松甫: 鉄-ステンレス鋼のガルバニック腐食(境界要素法による予測), 材料, 第 35 巻, 394 号 (1986), p. 791.
- 5) 永井欣一, 岩田光正: 電気防食下における電位分布の数値解析(その 1 2 次元有限要素法の適用), 日本造船学会論文集, 第 158 号 (1985), p. 587.
- 6) 永井欣一, 岩田光正, 小川量也: 電気防食下における電位分布の数値解析(その 2 3 次元有限要素法の適用), 西部造船会々報, 第 73 号 (1981), p. 114.
- 7) 善 一章, 阿部正美: 港湾構造物の所要防食電流に関する調査, 運輸省港湾技術研究所資料, No. 365 (1980).
- 8) 日本防蝕工業株式会社技術部: アルミニウム陽極“アラノード”による港湾施設の電気防蝕, さび, Vol. 9, No. 3 (1967), p. 1.
- 9) 玉利昭一: 電気防食の実施例, 設計技術者・保安技術者のための防食設計及び防食管理, 日本材料学会腐食防食部門委員会, (1984), p. 95.
- 10) 坂野 武, 戸田一夫: 電気防食用 Al-Zn-In 合金陽極の研究, 防食技術, Vol. 11, No. 11 (1962), p. 1.
- 11) 玉利昭一: 日本防蝕工業株式会社技術資料(私信).