大口径海水管の内部陰極防食*

J. H. Morgan**

1. ま え が き

産業施設や火力発電所の冷却水の使用は急増してきた。これらは大量の水を要するのと英国では海水または河口水を使用する場合が多いので本文では大口径海水管の防食について考える。

2. 防 食 方 法

一般にこれらの装置には4種の防食方法が適用される。(1) 塗装, (2) 陰極防食, (3) 循環使用の冷却水の場合抑制剤の使用, (4) 耐食性金属材料またはコンクリート, 合成樹脂等の非金属材料の使用。

塗装と陰極防食は相互に補足的に用いることができる。塗装を行なった上陰極防食を適用するのが最も経済的な方法であろうが塗装と陰極防食の割合をどの程度にするのが最も経済的であるかについては研究を要する。完璧な塗装を行なえば陰極防食を併用する必要はないがそれは陰極防食併用よりも完全に塗装費が安い場合に限る。

3. 裸管の陰極防食

A 中心円筒陽極 B 管壁円筒陽極 C 管壁陽極

第1図 陰極防食用陽極

管路の防食を行なう最も簡単な方法は第1図Aに示すように管と同心に取付けた円筒形の陽極を用いることである。裸管表面上の電流密度は均一になるし単位長さについての電解液の抵抗は容易に計算できる。1ft 当りの抵抗は

$$R = (\rho/2\pi \times 30.5) \cdot \log_e(D/d) \\ = 0.012 \rho \log_{10}(D/d) \dots \dots \dots (1)$$

ただし ρ = 比抵抗 (Ω -cm)

D = 管直径 (in)

d = 陽極直径 (in)

ゆえに D=30 in, d=3 in, $\rho=100 \Omega$ -cm のとき液の1ft 当りの抵抗は 1.15Ω となる。管面積に対し 4 mA/ft^2 の防食電流が必要な場合には1ft 当り 31 mA の電流を必要とし駆動電圧は 36 mV となる。防食電流は管寸法に比例する。60 in 管の防食電流は 30 in 管の2倍である。1ft 当りの抵抗は $\log_{10} D/d$ に比例する。ゆえに 30 in 管に 0.3 in の陽極を付けた場合は 3 in の陽極を付けた場合の抵抗の2倍となる。同心円筒陽極を使用すれば抵抗および駆動電圧が著しく低くなるので高

比抵抗の水にも適用可能である。連続的に同心陽極を取付けるのはかさばって不利な点がある。大口径の管では第1図Bに示すように管壁に近い位置にあるいは第1図C¹⁾に示すように管壁に陽極を取付けるのが簡単である。陽極を管中心から離れた位置に取付ける場合は陽極と管壁との間の抵抗は若干減少する。管のある部分は過剰防食となるので全面を防食に必要な電流は管中心に陽極を置いた場合より大となる。これはまたいくぶん高い駆動電圧を必要とすることを意味する。同心陽極の場合、とくに低比抵抗の電解液中において所要の駆動電圧が低いことは陽極が連続していなくても防食可能なことを示唆している。たとえば陽極は長さ 5 ft のものを間隔を 5 ft 離して取付けても良いかも知れない。陽極材料が経済的な駆動電圧と十分な耐久寿命を持つならば陽極間隔を変えないで陽極長さを短くしても良い。最近の鉛合金²⁾の発達はほとんど点状の小さな陽極で海水中で経済的な駆動電圧と十分な寿命との二つの要求を満し得ることを示している。電力はどこでも安く入手できるから管内面陰極防食の研究にはこれらの陽極を使用することとした。この型式による研究は簡単に数学的取扱³⁾が可能であるし、各種の状態での防食分布状況、所要電流密度、分極度等を研究し得るので有利であると考えた。これらの成績の多くは工業技術の伸長、他の方式による陰極防食法等に應用できる。

4. 塗装管内における中央点状陽極

管中で電流は水中を流れ塗膜を通過して管へ流入する。管の小部分を考えると水を通して長さ方向に流れる電流は水電位の小さな変化を生ずる。同様に塗膜を通じての電位は金属中に流れる電流を生じその値だけ水中を流れる電流を減ずる。第2図に2個の中央点状陽極の取付状況を示

第2図 中央点状陽極装置

す。これは対称的であるから a a' から b b' に至る部分を考えればよく、この部分の水の比抵抗 $\rho \Omega$ -cm, 塗膜伝導度 $g \text{ } \Omega/\text{cm}^2$ であるとする。管の直径を D cm とすると小さな断面の長さ δx 内の水柱の抵抗は $(4\rho/\pi D^2) \cdot \delta x \Omega$ で、塗膜は $g\pi D\delta x \text{ } \Omega$ の伝導度をもつ。距離 x の点では陰極防食のため電位変化 E_x を生じこれは塗膜電流 δI_x を生ずる。

$$\delta I_x = E_x g \pi D \delta x \dots \dots \dots (2)$$

同様に水中を流れる電流 I_x はこの小さな断面の水柱内に δE_x の電位変化を生ずる。

* 訳者: 福谷英二 中川防蝕工業(株)

** Sturtevant Engineering Co.

(原文) The Internal Cathodic Protection of Large Steel Pipes Carrying Sea Water. Corrosion, Vol. 15, No. 8, 417 t~422 t (1959) Aug.

$$\partial E_x = I_x (4 \rho / \pi D^2) \cdot \partial x \dots \dots \dots (3)$$

これらの式から次の微分方式が導びかれる。

$$(\partial^2 E_x / \partial x^2) = (4 \rho g / D) \cdot E_x \dots \dots \dots (4)$$

これを解けば次式が得られる。

$$E_x = A \cosh ax + B \sinh ax$$

$$\text{ただし } a = \sqrt{4 \rho g / D}$$

境界条件は $x=0$ のとき $E_x = E_m$ と $\partial E_x / \partial x = 0$ である。 E_m は防食に必要な最小電位変化である。ゆえに

$$E_x = E_m \cosh ax \dots \dots \dots (5)$$

陽極の反対側にも同様の過電圧が許されるものとすれば同じ水比抵抗、塗膜伝導度の管中で最大許容陽極距離は管直径の平方根に比例する。すなわち

$$E_x / E_m = \cosh ax$$

$$\therefore ax = \cosh^{-1}(E_x / E_m) = \text{一定}$$

ゆえに x は $1/a$ すなわち $\sqrt{D}$ に比例する。つまり

$$x = k D^{1/2} \dots \dots \dots (6)$$

しかし陽極付近では管は導線の役目をしないから陽極間の最大距離は前に記述した距離と陽極の影響による距離との和になる。防食の及ぶ範囲は

$$S = C(D) + k D^{1/2} \dots \dots \dots (7)$$

ただし S = 陽極間距離

D = 管直径

$C(D)$ = D のある関数

k = 常数

陽極の影響は小さいから $C(D)$ は正確に決定する必要はない。 $C(D)$ は直径と一定の関係にあるから D と見なしても差支えないであろう。すると (7) 式は次のようになる。

$$S = D + k D^{1/2} \dots \dots \dots (8)$$

k の値は比抵抗の平方根に反比例し塗膜の単位面積当りの伝導度の平方根に反比例する。ゆえに塗膜抵抗 $50 \Omega / \text{ft}^2$ の直径 60 in の管で最大許容陽極間距離が 20 ft の場合塗膜抵抗を 100 倍に増したときの陽極間距離は次のように計算できる。

$$S_1 = D + k_1 D^{1/2}$$

$$S_2 = D + 10 k_1 D^{1/2} \quad (k_2 = 10 k_1)$$

$$= 155 \text{ ft}$$

すなわち陽極間距離は 155 ft となる。もし陽極間距離が塗膜抵抗に正比例するものならばこの距離は $2,000 \text{ ft}$ となるはずである。水比抵抗の変化に対しても同様の関係がある。水比抵抗は容易に決定できる。塗膜抵抗は実験によって決めなければならない。この式を試すため小口径管についての実験室試験と大口径管に対する現場試験を裸鋼管で行なった。

5. 裸鋼管に対する実験的試験

裸鋼管の表面に対しては電位変化と電流密度⁴⁾は直線の関係をもっていないので一つの特定の伝導度を定めるわ

第3図 流動海水中の分極曲線

けには行かない。動いている海水に対する二つの典型的な分極曲線を第3図に示した。防食電流密度が 5 mA/ft^2 と 6.5 mA/ft^2 の場合のもので

ある。この曲線は各種の陽極間隔に対する過剰防食と陽極電流を算術的に求めるのに用いることができる。

48 in 管を防食する場合について 5 mA/ft^2 の結果を第4A図に、 6.5 mA/ft^2 の結果を第4B図に示す。

他の口径の管に対しても同様の曲線が得られる。実験室試験は2本の短い鋼管を用いて行なった。1本は内径約 1 in 、他は内径約 $1\frac{1}{2} \text{ in}$ であ

(A) 5 mA/ft^2 のとき

(B) $6\frac{1}{2} \text{ mA/ft}^2$ のとき

第4図 48 in 管内各種陽極間隔における陽極電流と過防食の関係

装され第5図に示すように水中に垂直に吊下げられた。

管の下端付近の陽極によって陰極防食は管内に適用され海水は管中を緩い速度で循環させた。管内電位は毛细管

第5図 工場試験施設

塩橋を用いて管に沿って計測された。この研究は最大陽極距離を求め得るものでその成績を第6A図と第6B図に示した。第6A図は内径 0.91 in 管の通電後3日と8日の電位を示したもので曲線の形状は数学で予期したものと同様である。2個の中央点状陽極間距離は $22D$ である。第6B図は2種の電流密度における内径 1.56 in 管の分極状況を示したものである。電位は継続的に防食されていると 20 hr 以後一定に保たれた。 1.56 in 管の防食達成範囲は $18D$ である。大口径管に対する現地試験は第7A図、第7B図に示すように3個の陽極と一連の半電池を用いて行なった。中央の陽極には一定の電流を供給し両端の陽極には管の最小電位の位

第6図 管長に沿った電位変化

Ib に対するもの

A 電 位

B 半電池配置

第7図 試験装置および成績

だものを管壁付近に取付けた。基準電極は陽極と正確な関連をもたせて取付けてないが距離の標識として用いた。最も重要な計測は最小電圧部間の距離であるからこれは陽極位置とは無関係に決定できる。管中の流速はごく微速から 5 ft/sec までの間に変更できるようにした。5 ft/sec は 16 in 管では達成できたが他の大径管ではもっと小さい値となった。流速の防食範囲に及ぼす影響は小さいのでこれらのことは実験成果を無効にするようなことはない。代表的な成績を第8A, B, C図に示す。

第8図 管内電位分布

置で防食電位を維持するに必要な電流を供給した。最小電位の位置は中央陽極の両側でほぼ等距離にあるようにした。最小電位間の距離を測定したが、これが特定電流における最大陽極間距離である。現場には直径 16, 24, 36 in の3種の管があった。これらの短い管を異径管でつないで一列とし各径の部分に3個ずつの陽極を設置した。陽極間隔は 16 in 管 8 ft, 24 in 管は 10 ft, 36 in

管は 12 ft とした。飽和塩化銀電極を 1 ft 間隔でつない

6. 防食基準

管はその電位が飽和塩化銀電極に対して -0.75 V のとき適切に防食されるものと仮定した。この基準は試験結果から見て適切でこの電位では鋼の表面に薄い灰色の皮膜ができた。実験結果は分極および速度によっていくぶんの変化を示したがその変化は小さく第9図に示した小円の中に包括される程度である。これらの結果は他の二つの実験結果および $S=D+kD^{1/2}$ の直線と比較したが結果は全く良く一致している。

第9図 最大陽極間隔

7. 工業化前の試験計画

前述の試験結果は塗装および電解液が同じである場合には陽極間隔と管直径の間には簡単な関係があることを示している。試験を完結させるためには各種の塗装、各種の液を用いた一連の試験を行なわなければならない。

第10図 塗膜抵抗と陽極間隔

これらの試験は比較的困難である。実験を行ない得る実際の設備が少なく、しかも塗装の適用および塗装劣化程度が十分にわかっていないためである。試験には二つの方法が用いられる。短い管長の中心に陽極を置き陽極最大間隔を決定すれば塗膜伝導度は管径と水の比抵抗の関係から算出できる。他の方法としては点状陽極を装備した部分で裸管の場合に述べたのと同様の方法で通電調査を行なえば良い。どちらの方法でも同様の結果が得られるはずであるが陽極間隔を求める場合には前者の方が適当であろう。現在の議論では k は塗膜伝導度の平方根に反比例すると仮定している。その場合最初に述べた 60 in 管に対して塗膜抵抗に対する陽極間隔の関係を図示することができる。これを第 10 図に示す。

8. 裸管に対する実用施設

実験から一步前進して鉛合金製点状陽極を装備する外部電源式陰極防食実用装置を裸管内面防食用に設計した。陽極は管から引出し得る構造とした。陽極は第 11 図に示すように絶縁した鉄製の支持金具に取付けた。支持金具は PVC で被覆し陽極は被膜の端を密閉するように取付けた。PVC と鉛は双方を加工して機械加工した面で組合せるようにし組合面には接着剤を用いた。絶縁された支持金具は填坐を通して管外に出し電氣的接続は外部で行なった。陽極の形は吊下提灯のガラス球のような形をしている。陽極は 1957 年後期から使用されているが全く満足すべき成績を示している。管は裸であるし海水を輸送するので陽極間隔は第 9 図に示したものより小とした。屈曲点や分岐点では更に陽極間隔を小さくした。屈曲点では距離を計るのに彎曲の外側の寸法を用いた。接続部では陽極が分岐点にある場合は陽極は各岐管にも通常に防食効果を及ぼすものと見なし、陽極が任意の位置にある場合は分岐部は屈曲部と同様に見なした。弁は余分の電流を消費するから弁があるときは陽極間隔は一直径分の長さだけ短縮した。

第 11 図 陽極および支持具

9. 電位計測装置

陰極防食装置が適切であることを証明するためにはなんらかの電位測定装置を用いなければならない。永久に使用できる基準電極を装備することは困難なので新しい測定装置を考案した。第 12 図に示すように絶縁合成樹脂製の容器の中に多孔性陶器の栓を装備してある。多孔

第 12 図 多孔栓電位計測装置

の栓は電解液で飽和されているから基準電極を陶器栓の外面に接触させれば管中の金属の電位を計測することができる。この装置は鉄製の箱で保護され水密の蓋が取付けられているのでたとえ高圧でも素焼の栓を破壊して大きな漏水を生ずるおそれはない。この装置は広く用いられているが事故を生じた例はない。他の方法としては素焼栓の代りに高純度亜鉛電極を用いても良い。

10. 管内面の塗装

陽極間隔は抵抗の高い皮膜で管内面を被覆することによって増大できる。この被覆は陰極防食の併用に適した特別の性能をもっていなければならない。これらの性質の中最も重要なのは陰極防食の影響のため展色剤や顔料が劣化して塗膜の軟化を生じないことである。静止海水中で塩化銀電極に対して -0.9 V のアルカリ軟化作用に耐える塗装に対しては管路では流速のためアルカリ作用が減退するので危害を及ぼす心配はない。海水中における有害な影響は塗膜の吸水で特に陰極電位の影響による塗膜の電気浸透作用である。吸水は塗膜の電気抵抗を低下させる。

11. 経 済 性

前に述べた方法は裸管や塗装不良の管には理想的であるが良好な塗装を行なった管に対しては管壁近くに装備した陽極の場合と比較しなければならない。これらの方法による比較を詳細に行なうには前述の場合と同様の試験を行なう必要がある。塗装と陰極防食の各種の組合せについては今後もっと詳細な研究を行なわなければならない。現在のところ最も経済的な方法は合理的な抵抗をもった安く、かつ容易に施行できる塗装を行ない管中心付近に装備した点状陽極によって陰極防食を併用することであろう。

文 献

- 1) The Magnesium Anode. A Publication of Dow Chemical Co. Michigan U.S.A. 8, No. 2 (1958) July.
- 2) J. H. Morgan: Lead Alloy Anodes Tested at 20 A/ft². *Corrosion*, 13, No. 7, 128~130 (1957) July; J. H. Morgan: Lead Alloy Anode for Cathodic Protection. *Corr. Technol.*, 5, No. 11, 347~352 (1958) Nov.
- 3) J. H. Morgan: Spread of Protection. *Corr. Technol.*, 3, No. 6, 194~196 (1956) Jun.
- 4) L. T. Carter & J. T. Crennel: The Cathodic Protection of Ships Against Sea Water Corrosion. *Trans. Inst. Naval Arch*, 97, 413 (1955); J. H. Morgan: Cathodic Protection. Leonard Hill (Books) Ltd. (1959)