海水管内面の陰極防食*

福谷 英二** 金子 隆**

Internal Cathodic Protection of Steel Pipes Carrying Sea Water

Eiji Fukutani and Takashi Kaneko

Impressed current cathodic protection has been applied for protection of internal corrosion of steel pipes carrying sea water at N Co. and M Co. Diameters of pipes are in the range of 10~36 in. Higher current densities and larger anode distances than standard values, which were published by J. H. Morgan in Corrosion, Vol. 15, No. 8, are selected to reduce initial investment.

Pipe to water potential at the midpoint of anodes was measured against zinc reference electrode. All sea water steel pipes at N Co. are successfully protected, but the results at M Co. were not satisfactory except 14 in diameter pipe line. The experiment will be continued to improve the performance of unsatisfactory pipes at M Co.

1. ま え が き

海水管の内面防食に関しては J. H. Morgan¹⁾の研究と E. D. Dolan²⁾の Grain Refinery における実施例が報告されている。わが国では N 社のポリウレタン塗装を行なった径 10~48 in 管に亜鉛防食を行なった例があるが、電位計測装置を取り付けなかったため防食効果を知ることができなかった。今回 N 社の径 12~36 in 管と M 社の径 10~24 in 管に外部電源法による内部陰極防食法を適用した。電流密度と電極間隔の選定には Morgan の研究を準用したが、初度施設費を低減するためでき得る限り電極間隔を大とする工夫を行なった。管内面の電位は電極と電極の中間点に高純度亜鉛の基準電極を取り付けてこれに対して計測を行なった。N 社の管はすべて完全防食状態となったが、M 社の管は 14 in 管のみ防食電位を示し、他は防食不十分な中間点

電位を示している。その原因に関しては試験を継続して探究し改善を図る予定である。

各種の水比抵抗、管内面の抵抗等と電極間隔との関係、電流密度と電極間隔との関係を求める図表を作製して将来設計上の参考資料とした。

2. 設 計 要 領

電極には小型磁性酸化鉄電極 (30φ×200

mm) を使用し、取付要領は N 社のものは図 1、M 社のものは図 2 に示す。いずれも管壁に近い部分はビニル管で遮蔽し管中央部に近い部分から電流が流

出するようにしてあるが、M 社の方がより管の中心に位置している。N 社の方は外部電源による陰極防食に先立ち約 6 ヶ月間ガルボライン (Mg リボン状陽極 3/8×3/4 in) を取り付けて防食を行なったが、ガルボライ

ンは陽極寿命が短くて経済的でないため外部電源法に切り替えたものである。よって管内面は純然たる裸管ではなく、若干石灰苦土質の電解皮膜が付着していたものと推定される。N 社では 4 個の鉛合金電極 (銀 4% 入り、30φ×

図 1 N 社電極取付要領図

図 2 M 社電極取付要領図

図 3 電位測定装置

* 昭和 36 年 11 月 21 日 学振第 97 委員会腐食防食研究討論会において発表

** 中川防蝕工業 (株) (東京都千代田区神田鍛冶町 2 の 1)

50 mm 露出) を試験的に取り付けてある。電位測定用基準電極は高純度亜鉛棒を使用し、これを管と絶縁して図3の要領で取り付けた。N社では電極と電極の間点のみに、M社では電極付近と電極中間点とに装備してある。電流密度と電極間隔に関しては Morgan の研究報告を参照して検討を加え、表1の通り決定した。Sを

表1 海水管内面陰極防食要目

会社名	内径 (in)	管長 (m)	電流密度 (mA/m ²)	i_2/i_1	S/D	S_2/S_1
Morgan 基準	36		70	1	4.5	1
	24		70	1	5.4	1
	20		70	1	5.8	1
	18		70	1	6.0	1
	16		70	1	6.3	1
	14		70	1	6.6	1
	12		70	1	7.0	1
N 社	36	8	150	2.1	3	0.67
	20	97	150	2.1	10.8	1.86
	18	33	150	2.1	12.0	2.0
	16	27	150	2.1	13.2	2.1
	12	16	150	2.1	13.5	1.93
M 社	24	15	200	2.9	8.2	1.52
	20	85	200	2.9	12.0	2.03
	14	55	200	2.9	13.0	1.97
	12	90	200	2.9	15.0	2.15
	10	30	200	2.9	14.7	1.94

注: S=電極間隔 (in)
 S_1 =Morgan 基準電極間隔 (in)
 S_2 =電流密度 i_2 に対する電極間隔 (in)
 D =管内径 (in)
 i_1 =標準となる電流密度 ($S=S_1$)
 i_2 =増大した電流密度 ($S=S_2$)

電極間隔, D を管径とすると Morgan は電流密度を約 70 mA/m² として S/D を決定しているが, 今回の設計では電流密度を N 社は 150 mA/m², M 社は 200 mA/m² として S/D を Morgan 標準の約 2 倍とした。電流密度を増せば電極間隔を増大し得ると考えたからである。表1で i_2/i_1 に対し S_2/S_1 を求めた根拠については後に述べる。

表2 N 社海水管通電状況

D 管内径 (in)	36	20	18	16	12
電流密度 (mA/m ²)	3.0	12.8	5.7	4.0	—
不通電電位 (-mV)	130	82	119	114	—
不通電電位 (-mV)	—	580	600	580	—

注: 電位は飽和甘汞基準に換算
 12 in 管は不通水のため記録なし

図4 N 社海水管通電々位

表3 M 社海水管通電状況

試験年月	D 管内径 (in)	24	20	14	12	10
36 7	電流密度 (mA/m ²)	0.2	24.0	16.0	13.7	7.0
	電流密度 (mA/m ²)	0.01	179	250	196	269
36 8	電流密度 (mA/m ²)	0.5	27.5	17.8	16.5	8.5
	電流密度 (mA/m ²)	0.025	205	278	236	327

図5 M 社海水管通電々位

3. 通電成績

N 社の通電状況を表2に測定電位を図4に示す。M 社の通電状況を表3に測定電位を図5に示す。M 社の24 in 管の電極位置は水の乱流のきわめて多い位置にあって電極が十分に液に浸漬されなかったもののようで、電流がほとんど流出していない。しかしこの管のみはこのような状態となるおそれがあることを予想し内部塗装が施されていたため、電流が余り流れていないのかかわらずおおむね防食状態に近い成績を示していた。N 社の管に対する電流密度は M 社のものよりも小さいが S_2/S_1 は M 社のものとほとんど同じになっている。しかるに管の通電電位は防食電位より卑で十分な防食状態を維持していることを示している。外部電源による防食施工前約6ヵ月間ガルボラインによる防食を行っていたため、電解皮膜の付着によって管の皮膜抵抗が裸管よりも大となっていたためであろう。M 社の他の管は電極付近の電位はきわめて卑になっているが、電極と電極との中間点では14 in 管以外は防食電位より貴な電位を示している。設計条件は14 in 管も他の管も同様であるから、他の管が防食電位に達していないのは基準電極取付位置の不適によるものではないかと考えている。基準電極は管の頂部に取り付けてあるため、管内が水で充滿していないときはその部に防食電流が到達しないため、貴な電位を示すのではないかと想像している。この件に関しては試験を継続し原因を探究して改善を図る予定である。

海水管内部を外部電源法によって防食する場合には、電極や基準電極の取付位置には十分留意を要する。乱流部や空気滞留のおそれのある位置を避ける必要がある。屈曲部や枝管に近い部分、垂直管等は乱流が多く、管頂部には空積を生じ易い。鉛合金電極は1年間の試験ではほとんど消耗が認められなかった。

4. 考 察

J. H. Morgan¹⁾ は海水管内部の防食について理論的および実験的に研究を進め、これを発表しているが、発表された図表のみでは実際設計資料としてやや不便を感じる。電流密度の増減がどの程度に電極間隔に影響を与えるか、水の比抵抗 ρ 、管の皮膜抵抗 R と電極間隔との関係についての図表等について不十分なものがあるからである。これらの点につき Morgan の研究を参考とし本実験の成績を加味して将来設計上の資料を作製した。

Morgan は次式を示している。

$$\partial I_x / \pi D \cdot \partial x = E_x / R \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_x = E_m \cosh(\sqrt{4\rho/RD} \cdot x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし

x = 電極間中間点からの距離 (cm)

D = 管の内径 (cm)

R = 管の皮膜抵抗 (Ω/cm^2)

ρ = 水の比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

E_x = x 点における電位変化 (V)

E_m = 電極間中間点における電位変化 (V)

$\partial I_x / \pi D \cdot \partial x = x$ 点における電流密度 (A/cm^2)

E_m は 0.2 V となれば防食状態を維持できる。

Morgan の試験結果では裸の海水管に対し $E_m = 0.2 \text{ V}$, $E_{S/2} = 0.4 \text{ V}$ ($E_{S/2}$ は電極付近の電位変化) のとき電流密度は $68 \text{ mA}/\text{m}^2$ となっている。電流密度 $68 \text{ mA}/\text{m}^2$ のとき $E_x = (E_m + E_{S/2})/2 = 0.3 \text{ V}$ として (1) 式を解け

図 6 R と標準電流密度

ば $R = 4.4 \Omega/\text{m}^2$ となる。すなわち裸海水管の皮膜抵抗は $4.4 \Omega/\text{m}^2$ 程度であることを示している。平均電位変化が 0.3 V のときを標準状態として皮膜抵抗 R が異なるときの電流密度を (1) 式から求めこれを 図 6 に示した。これが Morgan の提示した電極間隔における標準的な電流密度である。 E_m を常に 0.2 V とし電極間隔を増せば $E_{S/2}$ は 0.4 V より大となり平均電位変化が 0.3 V より大となるため所要電流密度も大となることが予想できる。 $E_{S/2}/E_m$ と電流密度との関係は (1) 式から求めこれを 図 7 に示した。これを少し変形して $E_{S/2}/E_m$ と i_2/i_1 (i_1 は平均電位変化 0.3 V のときの電流密度, i_2 はその他の平均電位変化に対する電流密度) との関係求めて 図 7 中に示してある。(2) 式を変形すれば $\sqrt{4\rho/RD} \cdot x = \cosh^{-1}(E_x/E_m)$ となるが、これから $E_{S/2}/E_m$ と S の関係を求めることができる。これらの関係および 図 7 から i_2/i_1 と S_2/S_1 との関係を求めて

図 7 $E_{S/2}/E_m$ と電流密度

図 8 i_2/i_1 と S_2/S_1

図8に示した。ただし $\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$ として求めたものである。図8から、連続した線状陽極を使用すれば電流密度は標準値の $2/3$ となし得ること、電流密度を3倍とすれば電極間隔を標準状態の約2倍となし得ることがわかる。M社設計における電極間隔と電流密度は図8から求めたものである。N社の場合はガルボラインによる電解皮膜の付着を考慮し、 R は $6 \Omega/\text{m}^2$ に増大したものと仮定して図6から電流密度を $50 \text{ mA}/\text{m}^2 \times 3 = 150 \text{ mA}/\text{m}^2$ に選定し、図8の関係から電極間隔を決定したものである。

Morgan は実験の結果 S と D との間に次の関係が

図9 R と S/D の関係 ($\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$)
(電流密度と電位変化は基準状態)

図10 ρ と S/D の関係 ($R = 4.4 \Omega/\text{m}^2$)
(電流密度と電位変化は基準状態)

あることを見出した。

$$S/D = 1 + kD^{-1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ただし S = 最大電極間隔 (in)

D = 管直径 (in)

$k = \sqrt{R/4\rho} = 21$ (海水水中の裸管)

$\rho = 25 \Omega \cdot \text{cm}$ (海水水中)

$R = 44,000 \Omega/\text{cm}^2 = 4.4 \Omega/\text{m}^2$ (裸管)

図11 R と S/D の関係 ($\rho = 5,000 \Omega \cdot \text{cm}$)
(電流密度と電位変化は基準状態)

R と ρ が変化すれば k は変化し、従って S も変化する。 R と S の関係を図9に、 ρ と S の関係を図10に示した。淡水のように ρ が $5,000 \sim 10,000 \Omega \cdot \text{cm}$ もあるときは電極間隔をきわめて密にしなければ防食不可能であるから防食施設費は拒否的に高価となるが、塗装を行ない皮膜抵抗を適当に増大すれば陰極防食の適用も可能となる。図11に比抵抗 $5,000 \Omega \cdot \text{cm}$ の水中における S と R の関係を示した。

5. 結 論

M社の海水管の陰極防食効果についてはなお検討を要するものがあるため、本解析の結果が全面的に将来の設計基準となり得るかについては若干の疑問を残している。特に図8の正確度については将来十分な検討を加える必要がある。しかしながら一応管内陰極防食設計の参考資料を得たものと考えている。将来なお研究を継続する予定である。

(昭和36年12月11日受理)

文 献

- 1) J. H. Morgan: *Corrosion*, 15, No. 8, 417 t~422 t (1959) Aug.
- 2) E. D. Dolan: 5th World Petroleum Congress (1959) May