

(68) 鉄系管路の内面腐食箇所を対象とした 電位勾配法の適用に関する実験的研究

田村聡志^{1*,2}・木伏明人¹・松島聡¹・増子知樹¹
芦田裕志¹・増子敦^{1,2}・稲貝とよの²・小泉明²

¹ 東京都水道局 (〒190-0014 東京都立川市緑町6-7)

² 首都大学東京大学院都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

* E-mail : tamura-satoshi@waterworks.metro.tokyo.jp

水道管路は今後大量に更新時期を迎えるが、効率的な更新計画を策定するためには、管路の腐食状況を的確に把握し、更新箇所の選定や優先順位の決定などを検討する必要がある。しかし、管路の大半は地中に埋設されているため、腐食状況を直接調査することは現状では困難となっている。このため本研究では、鉄系管路の内面に電位勾配法を適用する新たな調査手法として「管内電位勾配法」を提案し、管内面に腐食箇所を模擬した管路実験装置を用いて、管内の水中を流れる腐食電流によって生じる電位勾配の管軸方向、鉛直方向、水平方向での変化などを詳細に測定した。この結果から、管内面腐食箇所の位置の特定や、その腐食速度の推定が可能であることを明らかにし、提案した本手法が、非開削で水道管路の腐食状況を把握するために有用であることを示すことができた。

Key Words : water pipeline, inner surface, corrosion current, electric potential gradient, reference electrode

1. はじめに

我が国の水道施設の資産価値は約 40 兆円と推計されているが、このうちの約 2/3 を輸送系の施設 (導水施設、送水施設、配水施設) が占めており、その大半は管路であるとされている¹⁾。水道管路の総延長は、約 60 万 km にも及ぶが²⁾、高度経済成長期に大量に布設されたため、これから更新対象となる管路が急激に増加することとなる。この老朽管の更新には、膨大な費用と長い年月を要するため、水道事業体にとって最重要課題の一つとなっている。しかし、管路の大半は地中に埋設されているため腐食状況を直接調査することは難しく、老朽化の進行状況を把握することも困難である。このため、管路の腐食状況を非開削で的確に調査することができれば、劣化の進行した箇所から優先的に補修や更新をすることによって、漏水防止など管路のより一層の適切な維持管理とともに効率的な更新が期待できる。

ガス導管では、腐食欠陥の原因となる鋼管外面の塗覆装損傷箇所を地上から検出するため、電位勾配法を用いた調査手法が各種開発されており、多くの調査実績がある。電位勾配法は、外部から管に電圧を印加したときに損傷部から漏れる電流によって地表面で生じる電位変化

から損傷の位置を知る方法で、印加する電源の種類と電位勾配の検出法によりいくつかの方法^{3),4)}がある。その中でも、基本的でかつ従来から広く用いられている調査手法として針電極法⁵⁾が知られている。これは、直流電圧を印加した管路上の地面に 2 本の針電極を一定間隔ごとに地中に打ち込み、検流計もしくは電圧計で電位差を順次測定するものであり、損傷部の両端で電位が反転することにより損傷箇所を判定する方法である。これらの電位勾配法を用いた技術は、水道でも鋼管を対象として適用されているものの、水道で多く用いられている鋳鉄管は、継手部の絶縁性が高く、印加する電流が遮断されることから、調査可能な所は限られており調査実績も少ない。

一方、水道管では、管の外面腐食のみならず内面腐食も劣化の大きな要因とされている。また、鉄道や河川の横断部など地上からの調査が困難な場所でも管路の内側から管路の腐食状況を調査する手法の開発が求められている。これに対して、管路の内側からの調査手法としては、現在、管内調査カメラが汎用されており、最近では、管の内側から管厚を測定して管外面の傷や腐食箇所を調査するリモートフィールド渦流探傷法を水道のダクトアル铸铁管に適用しようとする研究も報告⁶⁾されている。

しかし、水道管内面の腐食箇所を精度良く検知できる機器はみられないのが現状である。

そこで、本研究では、筆者らが新たに提案した、鉄系水道管路の内側に電位勾配法を適用して管内面の腐食箇所を調査する管内電位勾配法⁷⁾について、鉄系管路内面の腐食箇所を模擬した管路装置で基礎的実験を行い、水道管の劣化診断にとって有用な手法であることを明らかにする。

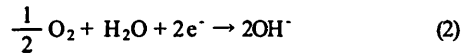
管内電位勾配法は、管の外面腐食の調査に用いられるこれまでの電位勾配法のように、外部から電気を印加させる必要はなく、水道管内面の腐食箇所から自然に流れる微弱な腐食電流によって生じた水道水中の電位勾配を直接計測できるために簡易な方法である。また、銅管だけでなく、鋳鉄管のような継手部の絶縁性が高い鉄系配管であっても、配管内に腐食が生じて腐食電流が流れていれば理論上測定可能であり、適用範囲の広い方法であるといえる。

2. 内面腐食箇所の調査方法

(1) 鉄系管路内面での腐食発生の原理

鉄系管路の内面で腐食が進行する状況の一例を図-1に示す。中央 b 部分のアノード（腐食箇所）では、(1) 式に示すように、鉄原子 Fe が電子を失い（酸化反応）、

鉄イオン Fe^{2+} となって水中へ溶解する。鉄イオン Fe^{2+} は正の電荷を持つのでアノードからは水中へ腐食電流が流れ出していることになる。一方、a と c 部分のカソードでは、(2) 式に示すように、溶存酸素 O_2 が鉄表面へ移動してきて電子を受け取り（還元反応）、水酸化物イオン OH^- へと変化する。負の電荷を持つ水酸化物イオン OH^- がカソードから水中へ移動しているの、それとは逆に腐食電流が水中からカソードへ流れ込んでいくことになる。



アノードで発生した自由電子は、金属内を通過してカソードに達し、そこで溶存酸素 O_2 を還元して水酸化物イオン OH^- に変える。電子は負に荷電しているので、腐食電流は電子とは逆方向に、金属中をカソードからアノードへ流れる。このように、電子の移動によって金属中を流れる腐食電流と、イオンの移動によって水中を流れる腐食電流は電池のような回路を形成している⁸⁾。

一般に、銅管や鋳鉄管などの鉄系水道管路の内面には、腐食を防止するためにモルタルやエポキシ樹脂等による被覆が施されているが、この内面被覆が施工不良や経年劣化などが原因となって、その一部が剥離した場合にアノードとなる。一方、鉄系水道管路において、給水管やバルブ、継手などでステンレス鋼（以降、SUS と称す

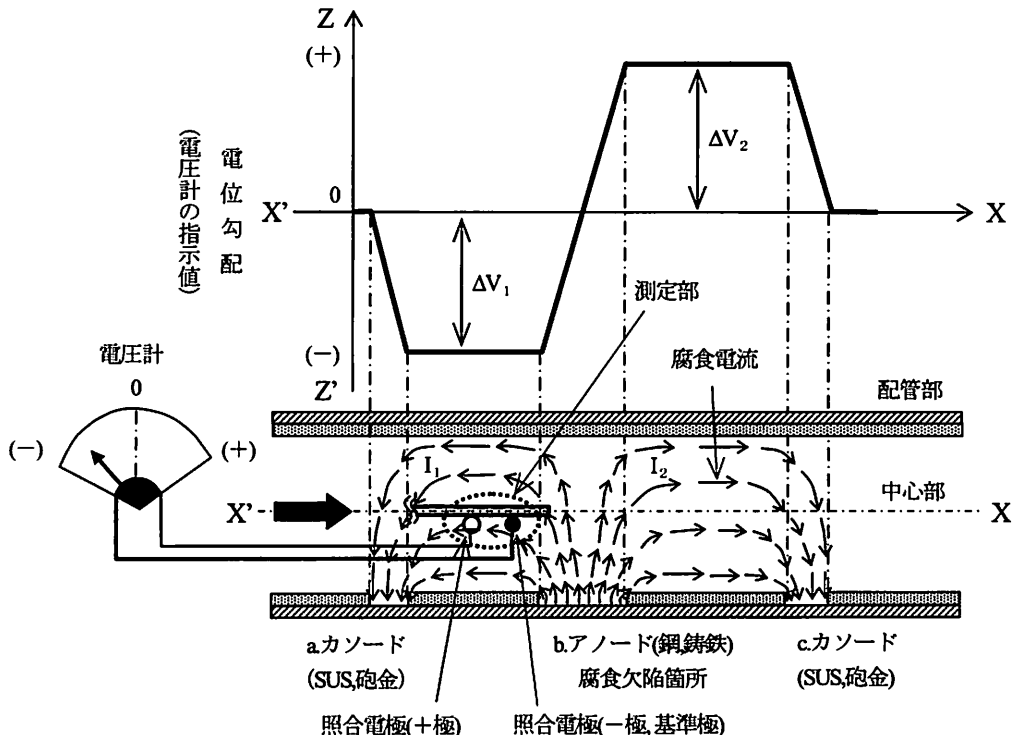


図-1 水道管内での腐食電流の流れと電位勾配の測定

る)や砲金などが併用されることが多く、炭素鋼に比較して自然電位の高い材料はカソードとなる。そして、このアノードとカソードとの間で、異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)が生じて、鋼管や鋳鉄管の内面から腐食電流が水道水中へ流出し、SUSや砲金部分へ流入する回路が形成されて腐食が進行することになる。

(2) 腐食箇所の特定方法

管内電位勾配法によって、管内に同じ照合電極2個からなる測定部を管軸X方向に置いた場合、管内の腐食箇所から流出して水道水中を流れる腐食電流と水道水の電気抵抗によって照合電極間には電位勾配が発生する。腐食箇所の両側にカソードがある場合、腐食電流が両側に流れるため、この測定部を管軸方向に一定速度で移動させると、この電位勾配は、図-1のような波形として出力される。なお、カソードが片側にしかない場合は、片側だけで電位勾配の変化が生じることになる。

腐食電流がアノードbから左向きに流れてカソードaに流入しているため、右側のマイナス極を基準とすると、この間では電位勾配は負(－)の値を示す。アノードbでは、腐食電流は左向きから右向きに変化するため電位勾配は負(－)から正(＋)へと転じている。このときアノードbの中央部分では腐食電流が左右対称となって打消し合うので電位勾配は0となる。また、アノードbとカソードcの間では、カソードa側と逆の状況となって電位勾配は正(＋)の値を示す。したがって、このような電位勾配の変化を精度よく測定すれば、電位勾配が負(－)から正(＋)へ反転する場合や0となる箇所を検出することで、腐食箇所を特定することが可能となる。

なお、この際、従来の電位勾配法のように外部電源から配管に電圧を印加させる必要はない。これは、管内面の腐食箇所から水道水中に流出している腐食電流は微弱であるが、電流の流れが管内に限定されるため、管外面から土壤中に流れ出る電流よりも検出しやすく、地中の漏れ電流やノイズの影響を受けにくいためである。

(3) 腐食電流の算出方法

つぎに、管内電位勾配法により腐食箇所から流出する腐食電流を算出するための原理について述べる。図-1に示すように、負(－)の電位勾配が一定値を ΔV_1 、正(＋)の電位勾配が一定値を ΔV_2 とすると、腐食箇所から左方向と右方向へそれぞれ流出する腐食電流 I_1 と I_2 は、オームの法則に基づいて、(3)式により求めることができる。

ここで、照合電極間の水道水の電気抵抗Rは、管内の照合電極間に挟まれた水道水を円柱状の導体とみなすことができ、導体の電気抵抗の大きさが断面積に反比例して長さに比例する⁹⁾ことから(4)式で示される。

$$I_1 = \frac{\Delta V_1}{R}, I_2 = \frac{\Delta V_2}{R} \quad (3)$$

I_1 : 腐食箇所から左方向へ流出する腐食電流(A)

I_2 : 腐食箇所から右方向へ流出する腐食電流(A)

ΔV_1 : 負の電位勾配の一定値(V)

ΔV_2 : 正の電位勾配の一定値(V)

R: 照合電極間の水道水の電気抵抗(Ω)

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4)$$

R: 照合電極間の水道水の電気抵抗(Ω)

ρ : 水道水の比抵抗($\Omega \cdot \text{mm}$)

L: 照合電極の離隔(mm)

A: 管内空の断面積(mm^2)

したがって、(3)式に(4)式を代入すると、腐食箇所から左方向と右方向へそれぞれ流出する腐食電流は(5)式となる。

$$I_1 = \frac{\Delta V_1 A}{L \rho}, I_2 = \frac{\Delta V_2 A}{L \rho} \quad (5)$$

腐食箇所から流出する腐食電流I(A)は、 I_1 と I_2 の和となるため、(6)式で求められる。

$$I = I_1 + I_2 \quad (6)$$

(4) 腐食速度の推定方法

つぎに、(6)式で求めた腐食電流から腐食速度を推定する方法⁹⁾について述べる。ファラデーの法則より、電流の流出に伴う金属の溶出(腐食)量は、電気量(電流×時間)と金属の化学当量(原子量/原子価)に比例することから、I(A)の腐食電流をt(s)間通電したときの腐食量W(g)は、(7)式で求められる。

$$W = k I t \quad (7)$$

ただし、kは電気化学当量であり(8)式から求められる。

Feの電気化学当量は、原子量Mが55.8、原子価zが2であるため、(8)式に代入して求めると、 $k = 2.89 \times 10^{-4} \text{ g/A} \cdot \text{s}$ となる。したがって、例えば $I = 1 \text{ mA}$ の腐食電流

$$k = \frac{M}{z F} \quad (8)$$

M: 原子量, z: 原子価

$F = 9.65 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{s}$ (ファラデー定数)

が $t=1$ 年間 (3.15×10^7 s) 流れたときの腐食量 W は、(7) 式から算出した結果、9.11g となる。

また、Fe の密度は 7.86 g/cm^3 であるから、この腐食量は体積に換算すると 1.16 cm^3 に相当する。これより、 1 mA/cm^2 の腐食電流密度における腐食速度は 1.16 cm/年 (11.6 mm/年) となる。したがって、腐食電流の流出面積 $A_c (\text{cm}^2)$ を管内調査カメラなどで把握すれば、(9) 式を用いて腐食電流 I から腐食速度 S を推定することができる。

$$S = \frac{11.6 \cdot I}{A_c} \quad (9)$$

S : 腐食速度(mm/年)

A_c : 腐食電流の流出面積(cm^2)

I : 腐食電流(mA)

3. 実験方法

(1) 実験装置

塗装欠陥（腐食箇所）を有する鉄系管路を模擬した実験装置の概要を図-2 に示す。

a) 実験管路

呼び径 $\phi 250 \text{ mm}$ の透明アクリル管の両端部に同口径のステンレス鋼管（以降、SUS管と略す）を接合した実験管路を用意した。この実験管路は、水道管の材料として一般的に使用されアノードとなる炭素鋼と、水道管に付属してカソードとなるSUSとの間で発生する異種金属接触腐食を模擬したものである。なお、透明アクリル管は、内面被覆によって十分な防食効果を有する管を模擬するとともに、測定部の移動状況など管内部を確認しやすくなるために用いた。

この管路の両端に水槽を配置して一定水位を保つこと

によって管内に水道水を満たした。実際の管路では管内に水が流れているが、本法による調査の際にはバルブで管路の一定区間をあらかじめ断水することになるため、実際の調査時と同じ水の流れが無い状態を設定した。

b) 模擬欠陥片とSUS管との接続

管内の塗装欠陥を模擬するため、SS400鋼製で円形の模擬欠陥片を透明アクリル管内面の底部に固定した。模擬欠陥片の大きさ d は $\phi 1 \text{ mm}$ 、 $\phi 2 \text{ mm}$ 、 $\phi 5 \text{ mm}$ 、 $\phi 10 \text{ mm}$ 、 $\phi 20 \text{ mm}$ 、 $\phi 50 \text{ mm}$ を用意し、それぞれの実験条件に合わせて使用した。

また、実際の管路では、アノードとなる内面塗装欠陥部から腐食電流が流出して、カソードとなるSUS管まで水中を流れ、管体を伝わって腐食欠陥部分に戻る異種金属接触腐食の回路を再現するため、SUS管と模擬欠陥片を絶縁被覆電線で結んだ。電線は、上下流側のSUS管外面から取り出し、水槽から管内部を通して模擬欠陥片に接続した。電線の途中には、上流側と下流側のそれぞれにゼロシヤント電流計A1およびA2を設置して、それぞれの電線を流れる電流を測定できるようにした。この電流計で計測される電流は、模擬欠陥片から上流側及び下流側のSUS管へ水道水中を流れる電流、すなわち腐食電流と同じ値を示す。

c) 電位勾配の測定部

測定部の照合電極には、銀塩化銀電極（飽和KCL）を用い、図-1のように電圧計を介した電気回路を形成し、図-2に示すように、極性は下流側を基準極のマイナス極、上流側をプラス極とした。なお、照合電極は、樹脂材に取り付けて実験管路の管軸と平行に張られたガイド用ラインにより管内部の所定位置をまっすぐに定速で移動できるようにした。

データ処理の距離表示は、上流側のSUS管と透明アクリル管との境界を起点0として、管軸X方向の下流側への距離を記載した。基準となるマイナス側の電極が、つ

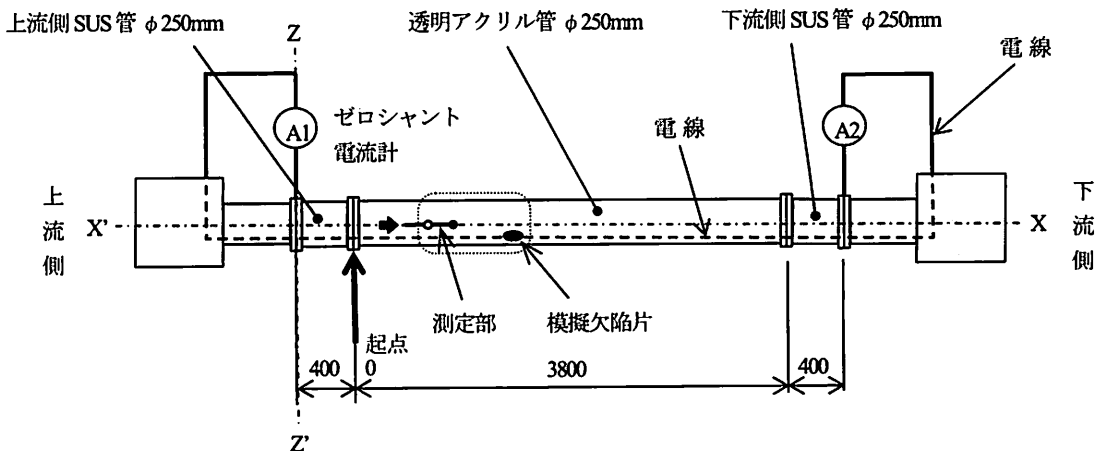


図-2 実験装置

ねに起点0となるように設置し、下流方向に1,500mm / minの一定速度で移動させて測定した。

d) 水道水の比抵抗

水道水の比抵抗は、比抵抗計を使用して1日に数回計測し、実験を行う時刻の水温変化を調べた後、測定した比抵抗値とそのときの水温から換算した値を比抵抗値とした。なお、水道水の比抵抗値は、1℃当たり2%変化するものとした。

e) 測定値の記録および測定データ

腐食電流の特性を調べるため、電位勾配を連続して電圧計で測定し、データロガー（アジレント製 34970A）に記録した。なお、水温による水道水の比抵抗の変化が電位勾配に与える影響を少なくするため、すべての電位勾配の測定値は、比抵抗 $5.0 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{mm}$ に統一した。

(2) 腐食電流によって生ずる電位勾配の変化の測定

本実験では、測定部の条件として照合電極の配列方向と照合電極間の離隔、管内部の条件として走行位置と腐食を模擬した欠陥片の大きさのそれぞれを変えて、腐食電流によって生じる電位勾配の変化を測定した。図-3には、測定部及び管内の腐食箇所を示す。

a) 管軸方向、鉛直方向及び水平方向における電位勾配の変化の測定

図-3の測定部に示すように、照合電極を管軸 X 方向、水平 Y 方向、鉛直 Z 方向に配置し、それぞれの離隔距離 x, y, z を 200 mm に固定して管の中心部を移動させ、管内の3方向における電位勾配の変化を測定した。

なお、d が $\phi 20\text{mm}$ の模擬欠陥片を起点（上流側 SUS 管と透明アクリル管の境界部）から管軸 X 方向に 1,300mm の位置に設置して測定した。

b) 管の上部、中心部及び下部における電位勾配の変化の測定

管軸 X 方向の照合電極の離隔 x を 100mm に固定して配置した測定部を用い、図-3 に示すように、管軸から 100mm 上部、中心部、中心から 100mm 下部のそれぞれの位置で移動させて、管内の電位勾配の変化を測定した。

なお、d が $\phi 20\text{mm}$ の模擬欠陥片を起点から管軸 X 方向に 1,300mm の位置に設置して測定した。

c) 腐食欠陥の大きさによる電位勾配の変化の測定

本実験では、内面被覆のピンホールなどによる孔食の初期段階（ $\phi 1\text{mm}$ ）から腐食欠陥が拡大した段階（ $\phi 50\text{mm}$ ）までを想定し、模擬欠陥片の大きさ d を $\phi 1\text{mm}$ 、 $\phi 2\text{mm}$ 、 $\phi 5\text{mm}$ 、 $\phi 10\text{mm}$ 、 $\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 50\text{mm}$ に変えて、電位勾配の測定結果にどのような影響を及ぼすのかを確認した。測定部は、照合電極の離隔 x を 50mm とし、管軸 X 方向に配置して管軸上を移動させた。

なお、模擬欠陥片は、起点から管軸 X 方向に 1,300 mm の位置に設置して測定を行った。

d) 照合電極間の離隔の違いによる電位勾配の変化の測定

照合電極を管軸 X 方向に配置し、その離隔 x を 25mm、50mm、75mm、100mm、125mm に変えた測定部によって、管軸上を移動させた場合の電位勾配の変化を測定した。

なお、d が $\phi 20\text{mm}$ の模擬欠陥片を起点から管軸 X 方向に 1,300mm の位置に設置して測定した。

e) 複数の腐食欠陥が存在する場合の電位勾配の変化の測定

実際の水道管においては、複数箇所の欠陥が存在することが考えられるため、これらを本法で判別できるかを試験した。試験では、大小2個の欠陥の判別ができるかを確認するため、d が $\phi 10\text{mm}$ と $\phi 50\text{mm}$ の模擬欠陥片を使用した。この2つの欠陥片を設置する位置は、つぎの①～③とした。① $\phi 50\text{mm}$ を起点から管軸 X 方向に 1,300mm、 $\phi 10\text{mm}$ を 1,400mm の位置に設置し、両者の離隔を 100mm とした。② $\phi 50\text{mm}$ を起点から管軸 X 方向に 1,000mm、 $\phi 10\text{mm}$ を 1,500mm の位置に設置し、両者の離隔を 500mm とした。③ $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 10\text{mm}$ を②の逆に設置して測定した。

なお、測定部は照合電極の離隔 x を 50mm とし、管軸 X 方向に配置して管の中心部を移動させた。

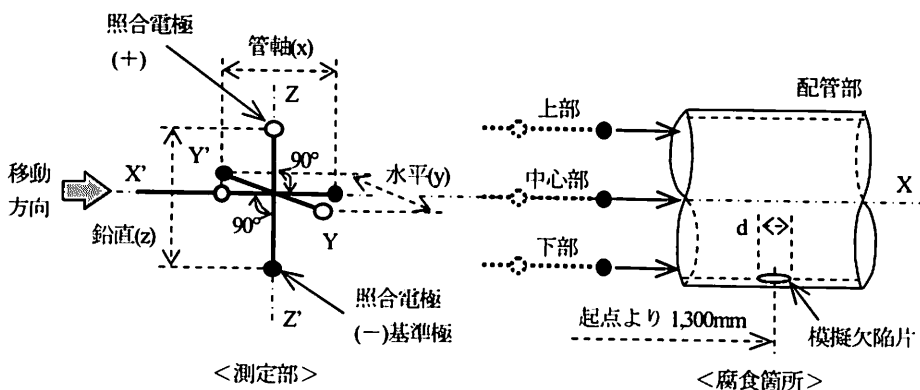


図-3 測定部及び腐食箇所

4. 実験結果及び考察

(1) 腐食電流によって生ずる電位勾配の変化

a) 管軸方向、鉛直方向及び水平方向における電位勾配の変化

標記の実験の結果を図-4に示す。管軸X方向の電位勾配は、腐食位置を中心に極性が反転しており、欠陥から離れた位置では変動が安定していた。これは、欠陥部分から上流側SUS管と下流側SUS管に向かって流れる腐食電流が測定されたことによる。

また、鉛直方向の電位勾配は、欠陥位置をピークとして大きく変動した。これは、管底部の欠陥部分から上向きに流れる腐食電流が測定されたことによる。水平方向の電位勾配は、起点付近で一定となり、欠陥位置を通過しても変化しなかった。したがって、欠陥部分から流出した電流は、管断面の水平方向には均一に流れているものと推定される。

各方向に配置された照合電極で電位勾配を測定することにより、図-1に示したように欠陥位置を中心に腐食電流が鉛直方向へと流出し、上流側のカソードと下流側

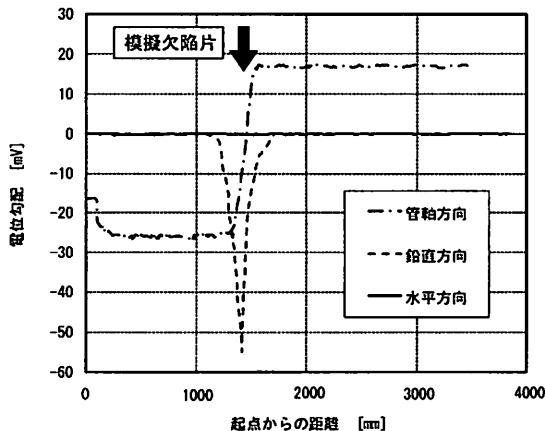


図-4 管軸、鉛直及び水平方向の電位勾配変化

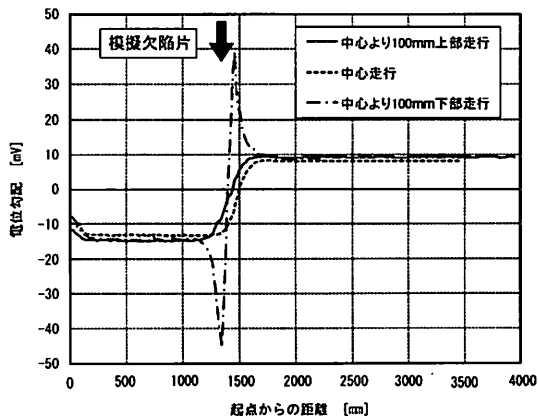


図-5 管中心部からの離隔による電位勾配変化

のカソードに向かって流れる電流が明らかとなった。また、鉛直方向、水平方向の電位勾配は、同一箇所に変化していることから判断して、どちらか一方の電位勾配の測定により、欠陥位置を特定することが可能といえる。

以上の結果より、これ以降の測定は、測定部分の構造が単純化できること、管内への挿入のしやすさに配慮して、管軸X方向を用いるものとした。

b) 管の上部、中心部及び下部における電位勾配の変化

標記の実験結果を図-5に示す。上部走行（欠陥部遠方）および中心走行の電位勾配は、欠陥位置を中心に極性が反転しており、前項での管軸方向の結果と同様の電位勾配の変化がみられており両者に差異がみられなかった。また、下部走行（欠陥部近傍）の電位勾配は、欠陥位置の前後をピークとして大きく変動し、欠陥位置を中心に極性が反転した。これらの結果から、図-1に示したように欠陥部から少し離れたと、流出した腐食電流は均一化されて管軸X方向へ流れていくと推測される。

また、下部走行（欠陥部近傍）では、欠陥部から電流が流出する地点にて電流密度が大きくなるため、模擬欠陥片付近で大きなピークを示したものと推測される。すなわち、電位勾配の波形から判断して、走行位置が欠陥部分に近いのか遠いのかの判断を推測することができる。

電位勾配は、照合電極の走行位置の違いによらず、欠陥位置を中心に極性が反転し、欠陥から離れた位置において電位勾配の変動は安定していることから、腐食電流の流入出以外の位置（欠陥部から離れた位置）において、管断面に腐食電流が均一に流れているものと推測される。

この結果、管内を流れる腐食電流は、電位勾配が安定する地点（管断面に電流が均一に流れる地点）の値を用いることで(5)及び(6)式を用いて算定可能と考えられる。

c) 腐食欠陥の大きさによる電位勾配の変化

標記の実験結果を図-6に示す。電位勾配の波形は、欠陥の直径の違いによらず、欠陥位置1,300mmを中心に極性が反転しており、欠陥から上流側に20~30mm離れ

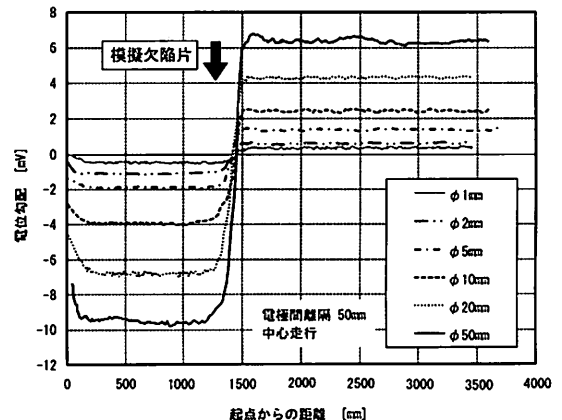


図-6 腐食欠陥の大きさによる電位勾配変化

た位置においてマイナス側で一定となっており、これとは逆に下流側ではプラス側で一定となっている。この波形より、欠陥部から上流側 SUS 管及び下流側 SUS 管に向かって腐食電流が両方向に分かれて流れ出ていることがわかる。さらに、上流側の変動幅の絶対値の方が高くなっている。例えば、欠陥の直径が $\phi 50\text{mm}$ の場合、上流側の変動幅が 9.5mV 程度であるのに対して、下流側の変動幅は 6mV 程度となっているが、これは上流側 SUS 管と欠陥との距離が、下流側 SUS 管と欠陥との距離よりも短く、それだけ電気抵抗が小さいことに起因しているものと推測できる。

また、図-7 に示すように、配管内面の欠陥直径が大きくなるほど、欠陥片両側での電位勾配の変動幅が大きくなっている。この理由は、欠陥直径に反比例して水道水中の欠陥表面近傍の電気抵抗値は小さくなり、欠陥から流出する腐食電流が大きくなるためと考えられる。

したがって、実験結果より、口径 $\phi 250\text{mm}$ の水道管の場合、内面被覆のピンホールなどによる孔食の初期段階と考えられる $\phi 1\text{mm}$ 程度の小さな腐食欠陥であっても、本法により検出可能であるといえる。

さらに、電位勾配より、(6)式を用いて腐食電流を求めて、これをもとに、(9)式を用いて腐食欠陥の大きさに腐食速度を求めた結果が図-8 である。

これより、カソードとなる SUS 管の面積は一定で、アノードとなる腐食欠陥が小さくなるにつれて、腐食速度は増加する。この理由は、異種金属接触腐食において、腐食速度は、アノード / カソード面積比の影響を受け、この値が小さいものほど腐食欠陥から流出する単位面積あたりの腐食電流が大きくなり、腐食の進行が速くなる¹⁰⁾ためと考えられる。

特に、 $\phi 2\text{mm}$ 以下の腐食欠陥の場合には、表面に錆などが発生しない限り、理論上 $20\text{mm}/\text{年}$ を超える腐食

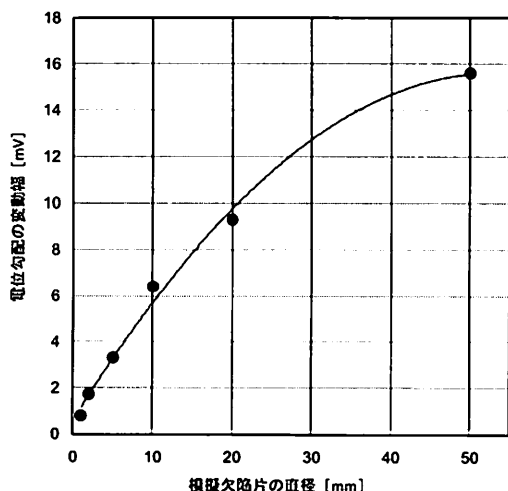


図-7 腐食欠陥の大きさと電位勾配の変動

速度になり得ることが示された。

d) 照合電極間の離隔の違いによる電位勾配の変化

標記の実験結果を図-9に示す。電位勾配は、欠陥位置において変動し、腐食欠陥から離れた位置において安定する傾向にあった。また、電極間の離隔が大きくなるに

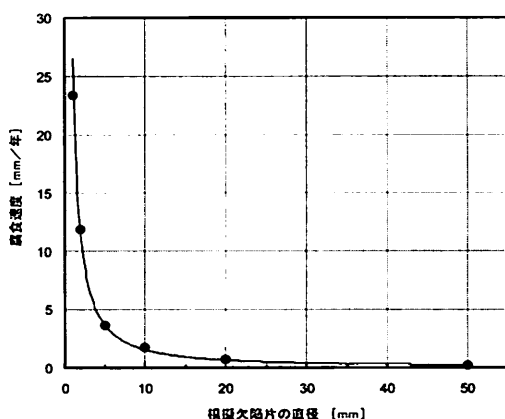


図-8 腐食欠陥の大きさと腐食速度

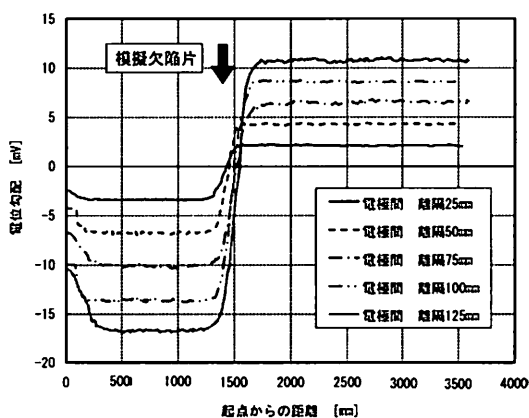


図-9 電極間の離隔距離による電位勾配

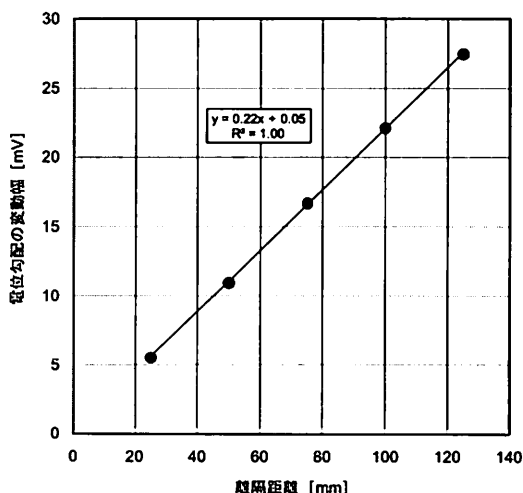


図-10 電極間の離隔距離と電位勾配の変動

つれて、欠陥位置付近で電位変動する区間の距離が長くなることが分かった。

さらに、図-10に示すように、電極間の離隔 x が大きくなるほど、電位勾配の変動幅が大きくなった。この理由は、(4)式より、電極間の離隔は水道水の電気抵抗値と比例関係にあるためであり、電極間の離隔が大きいものほど欠陥箇所を検知しやすくなるといえる。

$\phi 250\text{mm}$ の配管を使用した本実験では、欠陥の直径が、最小の $\phi 1\text{mm}$ においても電位勾配が検知可能な離隔 50mm と、変動幅がその約2倍になる離隔 100mm の2条件とした。配管の口径が大きくなるにつれて、(4)式に示したように水道水の電気抵抗は小さくなり、これに比例して電位勾配が小さくなるため、欠陥箇所を検知し難くなる。したがって、配管の口径に応じた適切な電極間の離隔を設定する必要がある。

e) 複数の腐食欠陥が存在する場合の電位勾配の変化

標記の実験結果を図-11に示す。これより、欠陥の間隔が電極間の離隔 50mm に対して2倍程度離れている場合にはグラフの波形は単独欠陥と同様な傾向を示し、欠陥が2個あることを見分けられなかった。

さらに、欠陥間隔を電極間の離隔 x に対して10倍に離すと、各欠陥位置で電位勾配が変動しており、2個の欠陥が見分けられた。また、上流側に $\phi 50\text{mm}$ の欠陥がある場合、電位勾配の変動が大きくなり、大小の区別が可能であることも確認できた。

以上の結果より、隣接する2個の欠陥を判別するためには、電極間の離隔をなるべく短い方が判別しやすくなることがわかった。しかし、前項の「d) 照合電極間の離隔の違いによる電位勾配の変化」で示したように、電極間の離隔が短くなると、欠陥部での電位勾配が小さくなり、欠陥を検知しにくくなる懸念がある。

また、電極間の離隔を大きくした場合には、電位勾配の変動する区間の距離が大きくなってしまうため、電位勾配曲線が描けなくなり検知できない場合がある。

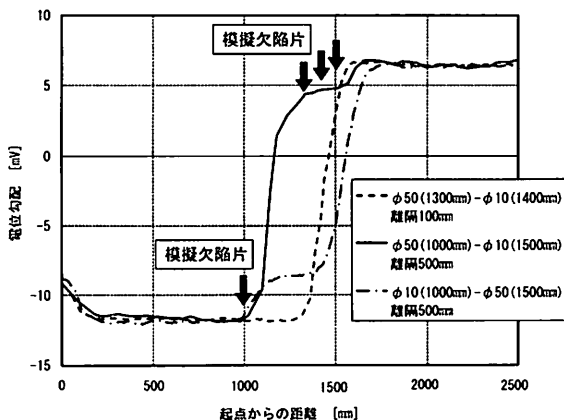


図-11 複数の腐食欠陥の存在による電位勾配変化

したがって、 $\phi 250\text{mm}$ 程度の配管へ適用する場合には、電極間の離隔が 50mm と 100mm の2条件に設定することにした。

(2) 電位勾配の実測値と理論値の比較

照合電極で測定した電位勾配より(5)式を用いて腐食電流を求めることが適切な方法であるかを確認するため、前述の試験においてゼロシヤント電流計を用いて測定した腐食電流値から電位勾配を算出して比較した。

データは、「3.(2) c) 腐食欠陥の大きさによる電位勾配の変化の測定」及び「3.(2) d) 照合電極間の離隔の違いによる電位勾配の変化の測定」の実験において、ゼロシヤント電流計を用いて測定した模擬欠陥片とSUS管の間に流れる腐食電流の測定値より、(10)式を用いて電位勾配の理論値 $\Delta V(\text{mV})$ を求め、電位勾配の実測値と比較した結果を図-12に示す。ここで水道水の比抵抗は、「3.(1) d) 水道水の比抵抗」の値を使用した。また、実験配管内空の断面積は、透明アクリル管とSUS管で違いがあるため、内径 $\phi 242\text{mm}$ のアクリル管の断面積を代表値として使用した。

これより、両者の相関係数は0.998となっており高い相関性を示した。したがって、管内電位勾配法は、腐食速度

$$\Delta V = \frac{L I \rho}{S} \quad (10)$$

ΔV : 電位勾配の理論値(mV)
 L : 照合電極の離隔(mm)
 I : 腐食電流(mA)
 ρ : 水道水の比抵抗($\Omega \cdot \text{mm}$)
 S : 管内空の断面積(mm^2)

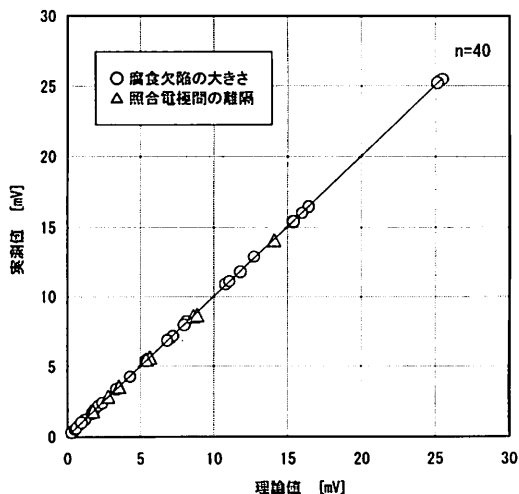


図-12 電位勾配の実測値と理論値

を求める前提となる腐食電流を直接実測するには有効な手法であることが明らかになった。

5. おわりに

本研究では、鉄系水道管路の内側に電位勾配法を適用して管内面の腐食箇所を調査する手法として「管内電位勾配法」を新たに提案し、鉄系管路内面の腐食箇所を模擬した実験配管を用いて各種の計測を行った。以下に、本研究で得られた主な成果について述べる。

- 1) 管内の水道水中を流れる腐食電流は微弱であるが、管内において2個の照合電極を管軸方向に移動させることによって、腐食電流と水道水の電気抵抗で発生する電位勾配の変化を直接測定できることを確認した。
- 2) 管内の電位勾配は、管軸方向に測定を行うと腐食箇所において極性が反転する場合や0になることから、この点を検出することによって、腐食箇所の位置を特定可能であることが明らかとなった。
- 3) 口径φ250mmの管では、φ1mm程度の小さな腐食箇所の位置でも特定できることを確認した。
- 4) 隣接する2個の腐食箇所の間隔が、照合電極間の間隔の10倍以上離れている場合は、管内電位勾配法により腐食箇所を個別に検出可能であった。
- 5) 電位勾配から腐食電流を算定することが可能であり、さらに、管内調査カメラによって腐食箇所の面積を把握すれば、腐食速度も推定可能であることが示された。

今後は、実管路での調査を重ねて、様々な大きさや腐食の程度をもつ腐食箇所を精度よく検出できるように、配管の口径の違いによる適切な電極間の離隔や照合電極の安定性など、測定部の構造にも改善を加えていく。

また、腐食速度の推定にあたっては、アノードとなる配管の内面から鉄イオンが直接水道水中へ溶出する腐食の極初期の状況を前提としたが、実際には腐食が進行するにつれて腐食生成物が堆積し、鉄イオンの溶出や溶存酸素の還元過程も複雑な機構となっていく¹¹⁾。このため、腐食生成物の堆積によって電気抵抗が増加して腐食

電流が減少するなど、時間経過に伴って腐食速度が変化する過程なども検討して、管内電位勾配法による腐食速度の推定精度をさらに向上させていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 厚生労働省健康局水道課：水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き～中長期的な視点に立った水道施設の更新と資金確保～，2009。
- 2) 社団法人日本水道協会：水道統計 平成20年度 施設・業務編，pp.40, 2010。
- 3) 畠中省三，手塚浩一，千葉修二：高感度塗膜装損傷検知システム—MS マイケル，防錆管理，第44巻第2号，pp.52-56，2000。
- 4) 川上誠，鈴木正二：塗膜装損傷検査システム“スーパーコーディンス”，材料と環境，第42巻第9号，pp.601-603，1993。
- 5) Peter Nicholson：Is Your Pipeline Corroding?, *NACE corrosion 2008 conference & expo*, pp.145-159, 2008。
- 6) 栗田亨，小島賢一郎，河部俊英，平原孝保，鎌田敏郎，内田慎哉：リモートフィールド渦流探傷法によるダクタイル鋳鉄管の老朽度診断手法に関する基礎的研究，水道協会雑誌，第78巻第5号，pp.14-20, 2009。
- 7) 増子知樹，田村聡志，松島聡，岡田佳久，齊藤昇：管内劣化調査システムの研究開発，第62回全国水道研究発表会講演集，pp.494-495，2011。
- 8) 松村昌信，磯本良則，矢吹彰広：エロージョン・コロージョン入門，日本工業出版(株)，pp.20-23, 2005。
- 9) 世利修美：金属材料の腐食と防食の基礎，(株)成山堂書店，pp.78-81, 2006。
- 10) 社団法人腐食防食協会：腐食・防食ハンドブック，丸善(株)，pp.69-74, 2000。
- 11) P.Sarin, V.L.Snoeyink, D.A.Lytle and W.M.Kriven: Iron Corrosion Scales: Model for Scale Growth, Iron Release, and Colored Water Formation, *Journal of Environmental Engineering*, pp.364-373, 2004。

(2011.5.30 受付)

Experimental Study on Applying of Electric Potential Gradient Survey for Inner Surface Corrosion of Iron Pipelines

Satoshi TAMURA^{1,2}, Akihito KIBUSHI¹, Sou MATSUSHIMA¹, Tomoki MASUKO¹,
Hiroshi ASHIDA¹, Atsushi MASUKO^{1,2}, Toyono INAKAZU², Akira KOIZUMI²

¹Tokyo Metropolitan Government, Waterworks Bureau

²Graduate school of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University

A large amount of water pipelines will have to be replaced in the near future. In order to make efficient replacement plans, the investigation of corrosion level on water pipelines with accuracy, selection of pipelines to be replaced and deciding priority of replacement are all needed. However, it is difficult to survey the level of corrosion directly at present, due to pipelines being laid underground.

This paper proposes a new survey method for applying inner surface of iron water pipelines and surveyed electric potential gradients on the three directions made by corrosion current flow in pipelines and others, making a new device which mimics corrosion spots in pipelines experimentally. The result of this experiment shows that the new survey method can find corrosion spots and estimate the corrosion rate. Moreover, this survey shows that this method is very useful for understanding the level of corrosion without cutting open water pipelines.