交流インピーダンス法を用いたダクタイル鋳鉄管の腐食予測方法[†]

藤 井 宏 明* 久 保 俊 裕* 清 水 宏 明*
片 野 幸 雄* 柴 田 俊 夫**

Prediction Method of Corrosion of Ductile Iron Pipes by A. C. Impedance Measurment Method

by

Hiroaki FUJII*, Toshihiro KUBO*, Hiroaki SHIMIZU*, Yukio KATANO* and Toshio SHIBATA**

It is important to evaluate the corrosion extent of buried pipes for maintaining them. But it requires much time and much cost to get corrosion data for evaluating the corrosion extent of buried pipes. So we have tried to evaluate the corrosion extent simply by using corrosion resistance based on A.C.impedance measurment method in solution containing many soluble compo-nents extracted from soil.

We have investigated the relationship between every corrosion resistance and analysis value of water extracted from soil, weight loss by the corrosion and corrosion rate of buried ductile iron pipes and have established the simple prediction method of the depth of external corrosion by the corrosion resistance and soil quality judged visually on the spot.

Key words : A. C. impedance measurment method, Corrosion resistance, Simple prediction of external corrosion, Solution extracted from soil, Ductile iron pipe

1 緒 言

ライフラインと呼ばれる水道、ガスなどのパイプラインは都市機能を支える基盤設備である。これらの施設の故障は都市生活に多大な影響を及ぼすため、維持管理では予防保全的な対応が不可欠である。

地中に埋設された管路は、普段は目に見えないが、確実に老朽化している。近年、上水道は維持管理の時代に入っており、水道管路の予防保全策として老朽度評価を行うために、外面腐食診断を実施する事業者が増えつつある。普通これらの事業者では、管路の腐食程度を調査するために、膨大かつ網の目状に張り巡らされた管路の代表的な箇所（少なくとも 50 カ所程度）を掘削し、管路の一部を露出させて腐食量を測定するとともに、現地で採取して持ち帰った周辺土壌を分析し、得られたデータから、周辺土壌の性質と腐食量の統計的な相関関係を求め、別に調査した土壌土質分布と合わせて、全管路の今後の腐食量を予測するという作業が行われている。ここで、周辺土壌の分析については、ANSI¹⁾（アメリカ国家規格、Table I に示す）や DVGW²⁾（ドイツガス水道技術者協会規格、Table II に示す）の評価法で示されている土壌の比抵抗、pH、酸化還元電位等を分析している。このように、現状では管路の外面腐食診断に多大な労力、期間、費用を要している。

交流インピーダンス法³⁾は、正弦波電圧を所定の環境中に置かれた試料に加え、応答電流を解析することによって金属の腐食抵抗を簡易に評価できる有効な方法であ

Table I. Soil-test evaluation by ANSI A21.5.

Item	Analysis value	points*
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	<700	10
	700-1000	8
	1000-1200	5
	1200-1500	2
	1500-2000	1
	>2000	0
pH	0-2	5
	2-4	3
	4-6.5	0
	6.5-7.5	0**
	7.5-8.5	0
	>8.5	3
Redox potential (mV)	>+100	0
	+50 to +100	3.5
	0 to +50	4
	Negative	5
Moisture	Poor drainage,continuously wet	2
	Fair drainage,generally moist	1
	Good drainage,generally dry	0
Sulfides	Positive	3.5
	Trace	2
	Negative	0

* Ten points indicates that soil is corrosive to ductile-iron pipe; protection is needed.

** If sulfides are present and low or negative redox-potential results are obtained, add three points for this range.

り、一般に、ある環境中における金属材料の耐食性を評価するのに用いられている。また、埋設土壌の腐食性を評価するため、土壌中での計測も行われている。⁴⁾

† 原稿受理 平成 14 年 2 月 8 日 Received Feb. 8, 2002

* (株)クボタ 〒660-0095 尼崎市大浜町, Kubota Ltd., Ohama-cho, Amagasaki, 660-0095

** 正 会 員 福井工業大学機械工学科 〒910-8505 福井市学園, Dept. of Mech. Eng., Fukui Univ. of Tech., Gakuen, Fukui, 910-8505

Table II. Soil-test evaluation by DVGW GW9.

Item	Analysis value	points*
Soil	Lime, Marl lime, Marl sand, Sand	+2
	Loam, Sandy loam, Marl loam, Sandy clay	0
	Clay, Marl clay, Humic soil	-2
	Peat, Slime, Swamp	-4
Soil condition	Conventional soil	0
	Reclamation soil	-2
	The soil equal to excavated soil	0
	The different soil with excavated soil	-3
Groundwater	Not exist	0
	Exist	-1
	Fluctuation	-2
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	>10000	0
	5000~10000	-1
	2300~5000	-2
	1000~2300	-3
	<1000	-4
Moisture (%)	<20	0
	>20	-1
pH	>6	0
	<6	-2
Redox potential (mV)	>+400	+2
	+200~+400	0
	0~+200	-2
	Negative	-4
Carbonate content rate (%)	>5	+2
	1~5	+1
	<1	0
Hydrogen sulfide, Sulfides	Negative	0
	Trace	-2
	Positive	-4
Cinder, Coke	Not exist	0
	Exist	-4
Chlorine ion (mg/kg)	<1000	0
	>1000	-1
Sulfate ion (mg/kg)	<200	0
	200~500	-1
	500~1000	-2
	>1000	-3

* The corrosiveness is intense under negative ten points.

本報文では、水道管路の主流をなしているダクトイル
鋳鉄管について、湧水等の影響を考慮するため各種土壌
抽出水中でダクトイル鋳鉄の交流インピーダンス法³⁾に
よる腐食抵抗を測定し、これらの腐食抵抗が実際の試験
片の腐食量と統計的に相関があることを示し、更に、実
際に各土壌中に長期間埋設されてきたダクトイル鋳鉄管
の腐食調査データとも統計的に相関があることを示した。
このことから、土壌抽出水とダクトイル鋳鉄試験片があ
れば、交流インピーダンス法³⁾によって腐食抵抗が求め
られ、その土壌と同じ土質が分布している地域の埋設管
の腐食量予測が可能になると考えられる。また、土壌抽
出水を用いた交流インピーダンス法³⁾による腐食抵抗の
計測は、土壌を採取する現地でも簡易に行うことができ、
従来の作業が大幅に簡略化できるようになる。

2 土壌抽出水中での腐食抵抗

2・1 試験の概要

(1) 土壌抽出水の作成

土壌抽出水は、採取した土壌を 110℃で乾燥させ、重
量で 2.5 倍の純水を加えて 24 時間放置した後の上澄液を
採取したものとした。本試験では、70 地点で採取した土
壌から作成した 70 検体の土壌抽出水を 500ml ずつ用い
た。試験に用いた土壌抽出水の分析値の基本統計量を
Table III に、分析値のヒストグラムを Fig. 1 ~ Fig. 4 に
示す。

Fig. 1. Histogram of resistivity of extracted water.

Fig. 2. Histogram of pH of extracted water.

Fig. 3. Histogram of SO_4^{2-} in extracted water.

Fig. 4. Histogram of Cl^- in extracted water.

Table III. Statistics of the analysis values of water extracted from soil (n = 70).

Item	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation*
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1070	22790	8814.0	4641.8	0.53
pH	4.8	8.8	6.58	0.60	0.091
SO_4^{2-} (mg/l)	4	130	27.3	24.9	0.91
Cl^- (mg/l)	4	71	13.9	13.9	1.00

* The degree of the variation of data is expressed, and if it is one or more, it can be said that the variation of the data is large (= standard deviation / mean).

(2) 腐食抵抗の測定

腐食抵抗測定用試験片にはダクタイル鋳鉄片 ($12^{\text{W}} \times 25^{\text{L}} \times 1^{\text{t}}$ mm) を用いた。試験に用いたダクタイル鋳鉄の化学組成を Table IV に示す。試験片の形状を Fig. 5 に示す。試験片表面は、鏡面に研磨した後、アルコールで脱脂を行った。また、 $\phi 9$ mm の試験面を残して他の部分は粘着テープで被覆した。作成した試験片を土壌抽出水中に向かい合わせに浸漬し、腐食モニター (CT-5: 株理研電子) を用いて 2 電極法により、室温 (約 25°C) で 3 ヶ月間、腐食抵抗を測定した。この腐食モニターでは、 $\pm 10 \text{ mV}$ の電圧を高周波 (10 kHz) と低周波 (0.1 Hz) で印加し、高周波で溶液抵抗、低周波で (溶液抵抗 + (試験片 2 枚分の腐食抵抗)) に対応する交流電流を測定するものである。試験方法を Fig. 6 に示す。なお、土壌抽出水の蒸発分は補充を行った。また、腐食抵抗は、(腐食抵抗測定値 $\times$ 試験面積) / 2 として求めた。

(3) 腐食重量減の測定

土壌抽出水中にダクタイル鋳鉄片を浸漬して 3 ヶ月後に腐食生成物を除去し、腐食重量減を測定した。腐食生成物の除去は、超音波洗浄器を用い、塩酸 500 ml にヘキサメチレンテトラミン 3.5 g を入れた後、蒸留水を加えて 1000 ml とした溶液に試験片を 10 分間浸漬して行った。

2・2 試験結果

(1) 腐食抵抗

浸漬後 3 ヶ月にわたって、土壌抽出水中におけるダクタイル鋳鉄の腐食抵抗を測定した。一例として、3 種類

Fig. 6. Experimental equipment for measurement of corrosion resistance.

の土壌抽出水中における測定結果を Fig. 7 に示す。一般に水道水や食塩水中で測定した腐食抵抗は、ほぼ安定した経時挙動を示すが、土壌抽出水中で測定した腐食抵抗は変動することがわかった。これは、鉄の腐食を促進させる硫酸イオン等の各種イオンの影響により試験片表面の腐食生成物が不安定になるためと考えられる。なお、試験後に、ダクタイル鋳鉄片とリード線として用いた冷間圧延鋼板の接触が保持されていることを確認した。

ここで、Fig. 7 に示すサンプルについて、土壌抽出水中にダクタイル鋳鉄片を浸漬してすぐに測定した腐食抵抗 (浸漬直後の腐食抵抗と呼ぶ) と平均腐食抵抗 (浸漬後 2 週間, 1, 2, 3 ヶ月間) を比較した。その結果を

Fig. 5. Specimen for corrosion resistance.

Fig. 7. The relationship between corrosion resistance and immersion time.

Table IV. Chemical composition of ductile iron (mass%).

T.C	Si	Mn	P	S	Mg
3.25	2.28	0.22	0.018	0.010	0.038

Table Vに示す。腐食抵抗は変動するものの、浸漬直後の腐食抵抗が大きいほど平均腐食抵抗も大きい傾向が認められ、浸漬直後の腐食抵抗はその後の腐食抵抗に大きな影響を与えていることがわかった。

(2) 腐食重量減

浸漬して3ヶ月後に腐食重量減を測定し、浸漬直後の腐食抵抗および平均腐食抵抗（浸漬後2週間、1、2、3ヶ月間）との関係を調査した。

それらの結果を Fig. 8～Fig. 12 に示す。

この結果、土壌抽出水中において測定したどの期間の

Table V. The average corrosion resistance in each immersion time ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).

Sample No.	Immersion time (day)				
	immediately	14	30	60	90
No. 1	3753 (100)	3427 (91)	4044 (108)	4697 (125)	4736 (126)
No. 2	2058 (100)	1736 (84)	1731 (84)	2215 (107)	2301 (119)
No. 3	980 (100)	941 (96)	877 (89)	1207 (123)	1271 (130)

* () means the index number when setting corrosion resistance measured immediately after being immersed to 100.

Fig. 8. The relationship between weight loss and corrosion resistance measured immediately after being immersed ($r = -0.310$).

Fig. 9. The relationship between weight loss and the average corrosion resistance in 14 days ($r = -0.316$).

Fig. 10. The relationship between weight loss and the average corrosion resistance in 30 days ($r = -0.408$).

Fig. 11. The relationship between weight loss and the average corrosion resistance in 60 days ($r = -0.418$).

Fig. 12. The relationship between weight loss and the average corrosion resistance in 90 days ($r = -0.430$).

平均腐食抵抗も腐食重量減と有意な相関関係⁵⁾にあり、腐食抵抗が小さいほど腐食重量減は大きいことが統計的に言えた。また、より長期間の平均腐食抵抗の方が高い相関係数が得られたものの、浸漬直後の腐食抵抗との間にも有意な相関関係⁵⁾が認められたことより、腐食抵抗として浸漬直後の腐食抵抗を用いることが可能であることがわかった。なお、各試験片間で腐食重量減に大きな

差が認められなかったのは、浸漬期間が3ヶ月と短かったためと考えられる。

また、相関係数 (r) の有意水準は、危険率 1% 時が $|r| \geq 2.576/(n+1)^{1/2}$ 、危険率 5% 時が $|r| \geq 1.960/(n-1)^{1/2}$ で示されるものであり、 n 数に依存する。⁵⁾

(3) 土壌抽出水の分析値との関係

腐食抵抗 (浸漬直後) と土壌抽出水の分析値の関係を Fig. 13 ~ Fig. 16 に示す。腐食抵抗と有意な相関関係⁵⁾ が認められた項目は、比抵抗、硫酸イオン濃度であり、比抵抗が小さいほど腐食抵抗は小さく、硫酸イオン濃度

Fig. 13. The relationship between corrosion resistance and resistivity of extracted water ($r = 0.398$).

Fig. 14. The relationship between corrosion resistance and pH of extracted water ($r = 0.023$).

Fig. 15. The relationship between corrosion resistance and SO_4^{2-} in extracted water ($r = -0.306$).

Fig. 16. The relationship between corrosion resistance and Cl^- in extracted water ($r = -0.128$).

が大きいほど腐食抵抗は小さいことがわかった。また、pH および塩化物イオン濃度と腐食抵抗は有意な相関関係⁵⁾ が認められなかったことから、これらの因子が腐食抵抗に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(参考)

土壌の腐食性評価方法として用いられている ANSI 評価点と腐食抵抗の関係を調査した。その結果、これらの間には有意な相関関係⁵⁾ が認められ、ANSI 評価点が大いほど、腐食抵抗は小さいことがわかった。

その散布図を Fig. 17 に示す。

3 ダクトイル鋳鉄管の腐食予測方法

次に、土壌抽出水中にダクトイル鋳鉄片を浸漬して測定した腐食抵抗と、土壌抽出水作成に用いた土壌中に埋設されていたダクトイル鋳鉄管の腐食速度との関係を調査した。さらに、その関係を用いて、現地でも簡単にダクトイル鋳鉄管の腐食深さを予測する方法を考案した。

なお、埋設されているダクトイル鋳鉄管の腐食深さは、以下の方法で測定したものである。

① 一定範囲を掘削し管の一部を露出させた後、管外表面の付着物をワイヤーブラシ等で除去する。

② 目視で腐食調査を行い、腐食が認められた部分は、デプスゲージ (孔食計) で腐食深さを測定する。

Fig. 17. The relationship between corrosion resistance and values by ANSI ($r = -0.246$).

3・1 腐食抵抗と腐食速度の関係

実験室での試験に用いた 70 検体の土壌抽出水のうち、埋設管の腐食量と対応できる土壌抽出水は 31 検体であり、それらのデータについて腐食速度と腐食抵抗の関係を調査した。なお、腐食速度は、(最大腐食深さ/埋設期間)として求めた。

その結果、腐食抵抗と埋設管の腐食速度には有意な相関関係⁵⁾が認められ、腐食抵抗が小さいほど、埋設管の腐食速度は大きいことが統計的に言えた。その散布図を Fig. 18 に示す。

これは、腐食抵抗に大きな影響を及ぼしている土壌中の各成分値と、埋設管の腐食量が統計的に有意な相関関係にある⁶⁾ことから妥当な結果と言える。

3・2 腐食度予測式の作成

(1) モデルの設定

腐食深さの経年変化を知ることは重要である。一般に、埋設条件下において、腐食深さ (y) と時間 (T) の関係は、式 (1) で示される。⁶⁾

$$y = kT^\alpha \quad (1)$$

ただし、

y: 腐食深さ (mm)

T: 埋設期間 (年)

k: 埋設環境の腐食性を表す定数

α : 定数

ここで、式 (1) を変形して、

$$\ln(y) = \ln(k) + \alpha \ln T \quad (2)$$

埋設管の腐食深さは、対数正規分布にしたがう⁷⁾ので、目的変数 $\ln(y)$ を環境因子の 1 次式で表して、重回帰分析を行うこととした。

$$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \alpha \ln T \quad (3)$$

ここで、

β : 回帰係数, X: 環境因子, p: 因子の数

多数のデータを用いて行った従来の解析結果を参照して、式 (3) で $\alpha = 0.4$ ⁶⁾ とおき、式 (4) のように変形して重回帰分析を行った。

$$\ln(y/T^{0.4}) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p \quad (4)$$

なお、予測モデルは、式 (4) を変形して式 (5) のようになる。

$$y = \exp(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p) \times T^{0.4} \quad (5)$$

(2) 腐食度予測式の作成

腐食抵抗と埋設管の腐食速度との間に高い相関関係が認められたことから、これを説明変数に取り入れた腐食度予測式を作成した。さらに、現地にて目視で判別できる土質を説明変数に取り入れることにより重相関係数が大きくなった。なお、土質は砂とそれ以外の土質に分類した。その時の土質と埋設管の腐食速度との相関係数は、 $r = -0.512$ であった。散布図を Fig. 19 に示す。

作成した腐食度予測式を式 (6) に示す。

なお、 $X_{11} \sim X_{13}$ における腐食抵抗の区分けの方法は、まず $500 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ 毎に区分けして予測式を作成した後、算出された回帰係数の値に大きな差がないものについて一括りにすることにより行った。

$$y = \exp(-0.069 \dots \text{定数項} \\ -0.193X_{11} - 1.671X_{12} - 3.079X_{13} \dots \text{腐食抵抗} \\ -1.405X_2 \dots \text{土質} \\ \times T^{0.4} \dots \text{埋設期間}) \quad (6)$$

ただし、

y: 腐食深さ予測値 (mm)

T: 埋設期間 (年)

X_{11} : $1000 (\Omega \cdot \text{cm}^2) \leq \text{腐食抵抗} < 1500 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ の場合 1, その他 0

X_{12} : $1500 (\Omega \cdot \text{cm}^2) \leq \text{腐食抵抗} < 2000 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ の場合 1, その他 0

X_{13} : $2000 (\Omega \cdot \text{cm}^2) \leq \text{腐食抵抗}$ の場合 1, その他 0

X_2 : 土質が砂の場合 1, その他 0
(腐食抵抗 $< 1000 (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ の場合, $X_{11} = X_{12} = X_{13} = 0$ を代入する。)

(3) 腐食深さの実測値と予測値

作成した予測式を用いて算出した腐食深さの予測値と実測値の関係を調査した。その散布図を Fig. 20 に示す。相関係数は、 $r = 0.817$ と高い値を示したことから、土壌抽出水中のダクタイル鋳鉄の腐食抵抗および目視で判別できる土質から、埋設管の腐食深さを予測することが可

Fig. 18. The relationship between rate of corrosion and corrosion resistance ($r = -0.636$).

Fig. 19. The relationship between rate of corrosion and soil quality ($r = -0.512$).

Fig. 20. The relationship between calculated value and surveyed value.

能となった。また、腐食度予測式を用いて腐食深さの経年変化を求めた。その一例を Fig. 21 に示す。

3・3 現地での腐食抵抗の測定

現地で土壌抽出水を作成し、試験片を用いて腐食抵抗を測定するためには、土壌を乾燥する器具、純水、目盛のついた容器、ダクトイル鋳鉄試験片、交流インピーダンス測定器が必要である。これらの機器は、現場に携帯し持ち運びすることが可能である。

また、実験室では、乾燥後の土壌に純水を加えて 24 時間放置した後の上澄み液を土壌抽出水として用いたが、Table VI に示すように、20 分間放置した土壌抽出水中で測定した腐食抵抗でも近い値を示したことから、現場では乾燥土壌に純水を加えて 20 分間放置したものを土壌抽出水として用いることが可能であると思われる。

Fig. 21. The relationship between depth of corrosion calculated by equation (6) and time.

Table VI. Corrosion resistance in water which passed for 20 minutes and 24 hours after adding pure water to dried soil ($\Omega \cdot \text{cm}^2$).

Sample No.	passed time	
	20 minutes	24 hours
No.1	2868	3009
No.2	1838	1772
No.3	1123	1148
No.4	925	970
No.5	758	725

4 ま と め

土壌抽出水中におけるダクトイル鋳鉄の腐食抵抗と腐食重量減の関係および土壌抽出水作成に用いた土壌中に実際に埋設されていたダクトイル鋳鉄管の腐食速度の関係を調査した。さらに、現地でも測定が可能である腐食抵抗と目視で判別できる土質を説明変数とした腐食度予測式を作成した。

その結果、以下のことがわかった。

(1) 土壌抽出水中で測定したダクトイル鋳鉄の腐食抵抗と腐食量にはある程度の相関があり、腐食抵抗によって腐食量を評価することができた。

(2) 土壌抽出水中におけるダクトイル鋳鉄の腐食抵抗と土壌抽出水作成に用いた土壌中に実際に埋設されていたダクトイル鋳鉄管の腐食速度の間にも相関があり、腐食抵抗は埋設されているダクトイル鋳鉄管の腐食量の予測に用いることができた。

(3) 現地でも測定が可能である腐食抵抗と目視で判別できる土質から腐食量が予測できることがわかった。今後、この方法によって管路の外腐食診断作業を簡略化することが可能であり、老朽管の更新事業を行っていく上で少しでも役立てば幸甚の至りである。

参 考 文 献

- 1) ANSI/AWWA C105/A21.5 (1993).
- 2) DVGW GW9 (1971).
- 3) 水流 徹, 春山志郎, 防食技術, **27**, 573 (1978).
- 4) 笠原晃明, 梶山文男, Corrosion, **39**, 475 (1983).
- 5) 日本科学技術連盟, 新編日科技連数値表, 20 (1990).
- 6) 片野幸雄, 西崎耕造, 岩松潤吉, 防食技術, **37**, 205 (1988).
- 7) 片野幸雄, 磯貝恭史, 材料と環境講演集, **2000**, 317 (2000).