

埋設環境に伴う水道管路の腐食に関する統計分析

荒井康裕¹・小泉明¹・馬野仁史¹

○芦田裕志²・尾崎勝²・吉田永³

¹ 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: y-arai@tmu.ac.jp

² 首都大学東京大学院・都市環境科学研究科/ 東京都水道局

³ 東京都水道局 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿 2-8-1)

本研究では、東京都水道局において収集・蓄積された管体腐食状況及び土壌環境に関する調査データを用い、水道管路の腐食に影響を及ぼす環境要因について統計的に分析した。まず、腐食に対する環境要因の相関分析を行い、全面腐食並びに局部腐食（孔食）に関する要因関連図を各々作成した結果、土壌の比抵抗及び硫化物が、孔食に対して直接的な関連性を有することがわかった。つぎに、孔食が検出された管路に焦点を当て、腐食が深く進展した場合（BAD 群）とそうでない場合（GOOD 群）を対比する分析を行った。数量化理論を適用した結果、埋設経過年と上記 2 項目による診断モデルが得られた。最後に、孔食に対するポリエチレンスリーブ（PS）被覆の防食効果について検証し、先の診断モデルを用いて PS 被覆の有無による差異を明らかにした。

Key Words : *water distribution pipe, corrosion, diagnostic model, polyethylene sleeve, quantification theory*

1. はじめに

21 世紀は「水の世紀」と呼ばれている。今日の生活において、我々の最も身近な水との接点は「水道」である。日本の水道システムは、水道普及率（＝総給水人口/総人口）が 97.3%（2006 年度末）にも達する社会基盤であり、安全・安心な飲料水をいつでも、どこでも利用することができるという意味では、世界でも最高水準のネットワークシステムを形成している。しかし、水道施設の多くは高度経済成長期に建設され、地中に埋設された水道管路も老朽化による更新時期を迎えている。管路の老朽化は、腐食損傷が原因となる漏水事故の危険性を高めるだけでなく、錆こぶ等によって管内を流れる水道水の水質に対しても悪影響を及ぼすといった問題が考えられる。老朽管の更新事業は、莫大な費用と長い年月を要するものであり、水道事業体における今後の大きな課題となっている。

管路の腐食や機能劣化に関する研究として、管体及び埋設環境の調査データに基づき、腐食深さを予測するモデル式の構築^{1), 2)}や、過去に発生した事故管路の情報を収集・整理し、曲線式を用いた事故発生率の推定^{3), 4)}と

いったものが挙げられる。既往研究に共通する課題は、管路の腐食や劣化を考える場合、埋設経過年のみならず、土壌環境による影響をどのように把握するかという点である。しかし、実際の分析では、フィールド調査に要する費用面・労力面での問題等により、必ずしも十分なデータが得られず、解析上の様々な制約を受けながら行われるのが一般的である。また、後述するように、腐食には全面腐食と局部腐食とがあり、後者の中でも特に「孔食」と呼ばれる腐食形態は管路の破損事故に結び付くリスクが高いとされる⁵⁾。土壌環境が及ぼす影響について、全面腐食と局部腐食の相違点（何が共通し、何が異なるのか）を明確化することにより、問題となる腐食の「予防保全」に有用な知見を得ることができると考える。

そこで本研究では、東京都水道局の管体及び埋設環境の調査データを対象に、水道管路の腐食損傷と土壌特性値との関連性に着目した分析を試みる。2. では、本研究で使用する調査データの概要を述べるとともに、金属の腐食特性を整理しながら、管路腐食を 2 つの側面（面的な広がりや深さ方向の進展）から捉える本研究のアプローチについて論じる。3. では、相関分析による管路腐食と土壌特性値との要因関連分析を行い、4. では、局部腐

食（孔食）に対するポリエチレンスリーブ被覆の防食効果について明らかにする。

2. 調査データの概要と本研究のアプローチ

(1) 管体腐食状況・土壤環境の調査内容

東京都水道局では、漏水事故や経年管の更新工事等に併せ、管体腐食状況と土壤環境の調査を経年的に実施してきた。調査の規模は、年間 300 件程度に及ぶ。本分析では、東京都 23 区を対象にした平成 5 年から平成 18 年の調査データ（ダクタイル鋳鉄管のサンプル数：2,714 件）を使用する。以下に述べる調査方法は、原則として、東京都水道局が、水道管路メーカー等のダクタイル鋳鉄管に精通している機関の意見を聴取し、独自に定めたものである。

管体調査では、まず外部に付着している泥、錆こぶをワイヤブラシ等を用いて落とし、管、ボルト、押し輪の腐食大きさを判定する。管の腐食の大きさは、管体外面の腐食面積が全体に占める割合から 0%：「無」、10%以下：「小」、10～50%：「中」、50%以上：「大」の 4 段階で定義する。管体に孔食が見受けられた箇所は、孔食をチョークでマーキングし、ノギスで孔食深さを計測する。管厚、ライニング厚は、切断面をノギスを用い、上下左右を測定している。また、ポリエチレンスリーブに関しては、被覆の有無、破損状況、バンドの種類等について確認する。管内面の調査では、モルタルライニングのひび割れや、シーリングの剥離状況の有無等について確認する。地下水が認められた箇所では、地下水表面から地表までの距離を水位として測定する。なお、各調査対象管の腐食状況は写真撮影を行い、他企業埋設物があつた場合や、掘削構内の土から異臭がした場合等の情報を特記事項として記録している。

一方、土壤調査には「現場測定」と、土壤サンプルを採取して所定の分析機関にて行う「室内分析」の 2 種類がある。原則として各項目の測定は、管体の上下左右の土壤を採取して行われる（室内分析は上下の土壤が対象）。現場測定及び室内分析の主な項目は、①温度、②管対地電位、③電位勾配、④土壌の比抵抗、⑤pH、⑥硫化物、⑦Redox 電位、⑧含水率、⑨塩化物イオン、⑩抽出水の比抵抗、⑪硫酸イオン、⑫ANSI 評価点である（⑧から⑫までが室内分析に相当する）。④土壌の比抵抗は、土壤杖と呼ばれる T 字型電極を埋設管の周囲の土壤に差し込み、土壤の電位に対する抵抗値を測定する。比抵抗が低ければ土壌中の電流が容易に通過するため、埋設管からの電位の流出が激しくなり腐食の原因となる。⑥硫化物は、土壌にアジ化ナトリウムヨウ素液を加え、発生した気泡の量で硫化物の存在を定性的に判断する（気泡が一つ二

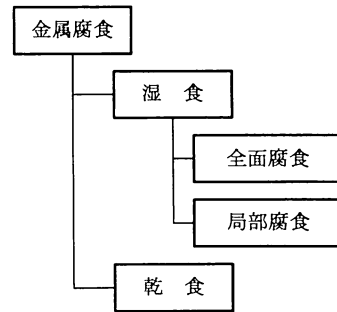


図-1 金属腐食の分類

つなら「微量」、多く発生すれば「有」）。硫化物は金属表面の保護膜を破壊するので、硫化物が存在していれば土壌の腐食性は高いと判断される。⑦Redox 電位は、Redox メーターを用い、土壌を純水で飽和させた状態で Redox 電位（酸化還元電位）を測定する。Redox 電位が低ければ、土壌中の酸素は還元状態であると判断され、硫酸塩還元バクテリアの繁殖が促進される。⑬ANSI 評価点は、アメリカ工業規格（American National Standards Institute）が土壌の腐食性を評価するために定めたものであり、土壌の比抵抗、pH、Redox 電位、水分、硫化物の 5 つの項目によって算定される⁶⁾。一般に 10 点以上の場合に腐食性の高い土壌と評価される。

(2) 腐食特性を考慮したアプローチ

金属の腐食には様々な形態・機構があるが、概略的には図-1 のように整理することができる⁷⁾。まず、腐食反応において水の存在は重要であることから、水の存在下で生ずる「湿食（wet corrosion）」と、水が存在しない環境下で生ずる「乾食（dry corrosion）」とに大別できる。なお、地中における金属管の腐食は、水の存在下で電気化学的に起こる湿食に分類される。そして、金属の湿食には、損傷の外観的な特徴から、「全面腐食（general corrosion）」と「局部腐食（localized corrosion）」の 2 つのタイプがある。全面腐食の特徴は、金属が腐食環境の下で、全面または表面の大部分がほとんど同一速度で均一に溶解するのが特徴である。この腐食メカニズムは、アノード部とカソード部の短絡による局部的電池作用であり、アノード部とカソード部が局部腐食のように固定されないため、時間と共にその位置が変わることで表面全体がほぼ一様に腐食される。一方、局部腐食とは、部分的に孔状或いは溝状の腐食を生じる場合を言い、このタイプの腐食には、孔食、異種金属接触腐食、コンクリート／土壌系腐食、通気差（酸素濃度）腐食、迷走電流による電食等が含まれる。特に、孔食（pitting corrosion）は、表面が局部的に点または孔状に深く腐食される現象を言い、金属表面或いは環境側の不均一性に起因し、あ

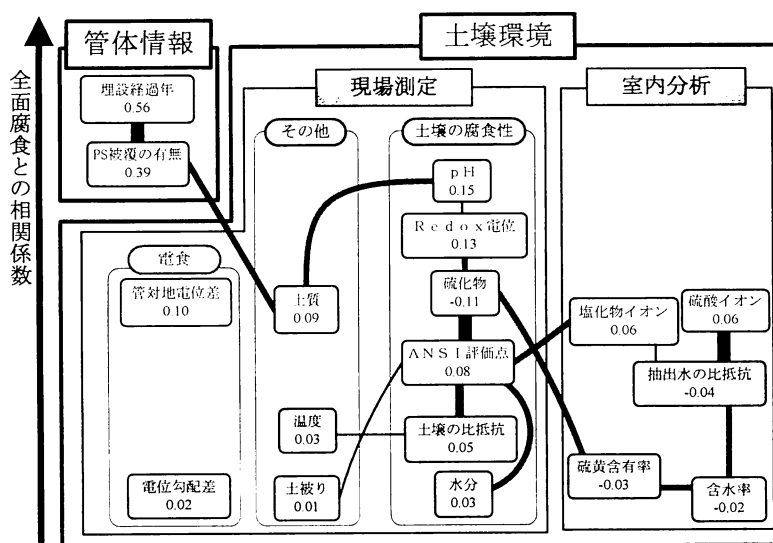


図-2 全面腐食に関する要因関連図

る局所部分が他の部分に比べて著しく腐食される特性を有する。また、深さ方向に進展する腐食損傷であり、しかも全面腐食に比べ、その検出や予測が難しいとされることから、より危険な腐食として特徴付けられる⁸⁾。

本研究では、埋設管路の腐食を2つの側面、すなわち全面腐食は「面的な広がり」、局部腐食は「深さ方向の進展」に関する特性として各々を捉え、前者は管体外面の腐食発生面積の大小に応じて分類されたカテゴリーデータ（4段階）、後者については孔食深さ（外面腐食の最大深さ[mm]）にそれぞれ着目し、これらが土壌調査で得られた各データとどのような関係性を有するのか、統計的なアプローチに基づいて包括的に把握して行く。また、今回の対象管種は、鉄系管路として我が国で最も多く埋設されているダクタイル鋳鉄管とし、この外面腐食の防止方法として採用されるポリエチレンスリーブ被覆（以下、「PS被覆」と呼ぶ）の有無に留意した分析を展開する。

3. 管路腐食と土壌特性値との相関分析

埋設管路の全面腐食及び局部腐食に関連性を有する要因を抽出するため、前述した現場測定・室内分析の各調査項目を用い、腐食発生面積の大小、並びに孔食の最大深さに対する相関分析を行った。本論文では、項目全体の関連構造が視覚的に把握できるよう、各々の腐食に関して作成した要因関連図を図-2及び図-3に示す。図中では、上部に位置する項目ほど当該の腐食に対する相関が高く、各項目を結ぶ線の太さは、両者の内部相関の大小

を相対的に表現している。また、有意水準 $\alpha=0.05$ の相関係数 r_a よりも小さい場合には、該当する項目を灰色に塗りつぶしている。

全面腐食（図-2）では、まず「埋設経過年」並びに「PS被覆」が高い相関を有していることが各々確認できる。また、土壌の特性値との関係については、「pH」が土壌の腐食性に関するグループの中で上位に位置している。なお、このpHについて、実際にはpHの値が4.0以下となるような酸性域に属するデータは数少なく、中性からアルカリ性に大部分のデータが分布している。このため、今回の分析で用いるpHは、土壌が中性からアルカリ性の領域にあった場合の管路腐食との関連性を明らかにするための項目とする。

ここで、「Redox電位」及び「硫化物」の符号に着目すると、既往の調査研究等によって知られる一般的な知見と矛盾する結果となっていることがわかる⁹⁾。すなわち、Redox電位が低い値を示す場合、硫酸塩還元細菌の活動し易い嫌気性環境であり、細菌の代謝作用は活発化する。この細菌は、硫酸塩を硫化物に還元し、鉄（管路の外面）は一部硫化鉄（FeS：黒色のさび）になって腐食する。このような関係を前提にすると、腐食に対する相関係数の符号は、Redox電位が「負」、硫化物が「正」になるべきところが、全面腐食に関する結果はいずれも逆の符号になっている。なお、管路腐食に関与する細菌については、土壌中の有機物量との関連性を把握しながら繁殖状況を検討する必要もあるが、生理化学的反応が明らかにされていない菌種が多く、微生物の腐食反応機構の解明はこの分野の課題とされている。そこで本研究では、土壌中の細菌に関して、

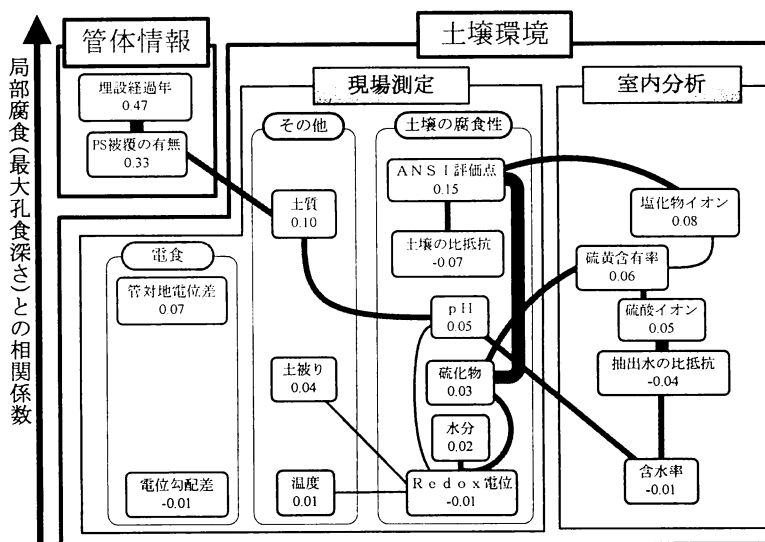


図-3 局部腐食に関する要因関連図

嫌気性ないし好気性の生育環境、並びに繁殖に適した pH がある点に着目し、Redox 電位と pH から微生物の繁殖状況を判断している¹⁰⁾。上述の相関係数の符号に見られた不整合は、「土壌の比抵抗」及び「硫黄含有率」についても読み取れる。ただし、他方の局部腐食の結果では、これら相関係数の符号が反転する（この点については改めて後述する）。

一方、局部腐食（図-3）を見ると、「埋設経過年」並びに「PS 被覆」が全面腐食と同様に図中の上部に位置している。図-2 との差異に関しては、土壌の特性値に関する上位項目が「ANSI 評価点」及び「土壌の比抵抗」に置き換わり、「pH」の相関係数が 0.15 から 0.05 と小さくなり、その影響が弱まる結果が得られた。さらに注目すべきは、先に触れたとおり、「土壌の比抵抗」の相関係数の符号が、全面腐食の結果とは反転して「負」となっている点である。符号に物理的な説明ができなかった「硫化物」、「硫黄含有率」及び「Redox 電位」に関しても、先の結果とは反対符号の相関係数が得られた。局部腐食には迷走電流による電食が分類されるが、「管対地電位」のデータを確認すると、迷走電流が生じるか否かの判定目安となる電位差 50[mV] 以上のデータは稀であり、今回の対象データの中に電食によって局部腐食が生じたケースはほとんど無いと考えられる。

以上より、本論文では管路の腐食を全面腐食と局部腐食に大別して扱うことを 1 つの特長にしなが、両者の相違点を詳しく考察した結果、以下の知見を得ることができた。全面腐食及び局部腐食に共通し、「埋設経過年」並びに「PS 被覆」は両腐食に対する相関係数の高い項目であることから、これらは管路腐食を扱う上での最も基

礎的な情報となることが確認できた。そして、全面腐食と局部腐食の差異から明らかになったのは、第一に、全面腐食に対しては「pH」が高い関連性を有している点である。土壌の pH は腐食に大きな影響を及ぼすことが一般的に知られているが⁹⁾、今回の腐食形態を区別して行った分析の結果から、局部腐食よりも全面腐食においてその影響が明確に現れていることが示された。第二に、局部腐食では、「土壌の比抵抗」、「硫化物」及び「硫黄含有率」が直接的な関連性を有する土壌の特性値であることが把握できた。全面腐食の要因関連図と比較して理解できるように、相関係数の符号、並びに図の上部に位置する項目が、周知の事実と合致する結果になっていることから、局部腐食を扱う時の方が、土壌の腐食性を定量化する際に一般的に用いられるデータとの関係がより顕著に現れることが示唆された。

4. 孔食に対する PS 被覆の防食効果

(1) PS 被覆の有無と孔食深さの関係について

前章の分析結果からも明らかとなっており、「PS 被覆」の有無による影響は、埋設管路の腐食を分析する上で最も基本的な条件である。そこで、PS 被覆の有無別にデータを区分し、孔食深さの昇順に並べて図示すると、図-4 及び図-5 のような結果が得られた。

PS 被覆の有り・無しに共通して孔食深さ 0[mm]（以下、これを「孔食無し」と称する）のデータが含まれるが、全体に占める各々の割合が大きく異なる点が特徴的である。PS 被覆有りの場合、データ総数：844 個に対して孔

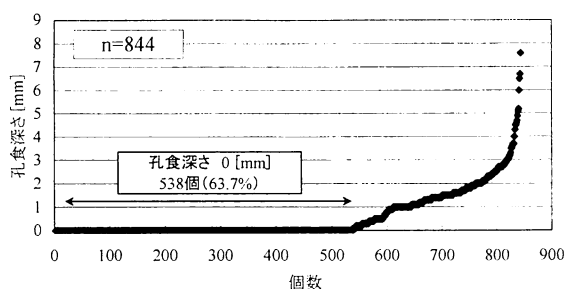


図-4 PS被覆有りの孔食深さ

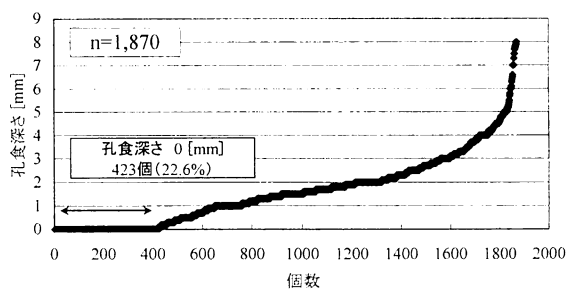


図-5 PS被覆無しの孔食深さ

食無しが 538 個 (63.7%) を占める。一方、PS 被覆無しは、データ総数：1,870 個に対して 423 個 (22.6%) となっている。また、孔食無しのデータを全面腐食と関連付けて捉えると、PS 被覆有りでは全面腐食「無」：83%、「小」：15%、PS 被覆無しでは「無」：88%、「小」：7%となっており、いずれも「中」・「大」といった全面腐食が進展したケースはほとんど無いことがわかった。さらに、孔食無しを除いたデータを用い、孔食深さの平均値を計算すると、PS 被覆有りが 1.59[mm]、無しが 2.08[mm]となった。

こうした傾向の違いを考察するためには「埋設経過年」の影響に対して十分に配慮し、図-4と図-5の差異が単に管路の新しさ・古さによって生じたものか否かを検証する必要がある。そこで、埋設経過年が「10 年以下」と「20 年より大」の比較的新しい管路と古い管路に着目し、孔食無しに該当する割合[%]を各々集計することとした。まず「10 年以下」に関しては、PS 被覆有りで 85.0%、PS 被覆無しで 88.2%となり、両者には大きな差異は認められなかった。これは、被覆の有無に関わらず、埋設経過年がさほど経過していない管路であれば、孔食無しに属する割合はほとんど変わらないことを意味している。一方、「20 年より大」となる管路について調べると、PS 被覆有りで 32.7%、PS 被覆無しでは 15.9%となった。つまり、比較的に古い管路となると、孔食無しに属する割合は被覆有りの場合でも被覆無しの場合でも大幅に減少することが確認された。しかし、PS 被覆有りの方が、孔食無しに属する古い管路の割合が高いことから、PS 被覆による防食効果がここでの差異に現れていると考察される。

以上より、防食効果の期待される PS 被覆は、腐食を完全に阻止することは難しいが、PS 被覆の無しに比べれば、管路の大半を軽微な全面腐食に止めながら、孔食が生じた場合にも、その深さ方向への腐食を抑制していると判断できる。

(2) 数量化理論第Ⅱ類の適用結果と考察

以降の分析では、孔食が発生した管路に着目し、その腐食が深く進展した場合とそうでない場合とを対比させ

ることで、孔食に影響を及ぼす土壌特性がどのように作用するのかを明らかにして行く。具体的には、データを PS 被覆の有り・無しで区分し、孔食無しを除いた上で、四分位点を基準に上位 1/4 を BAD 群、下位 1/4 を GOOD 群として定義した。各群に対応する孔食深さは、PS 被覆有りでは BAD 群：2.1[mm]以上、GOOD 群：0.9[mm]以下、PS 被覆無しでは BAD 群：2.8[mm]以上、GOOD 群：1.1[mm]以下である。一般に、水道管路は均一に進行する薄肉化を想定し、2.0[mm]の「腐食しろ」が管厚に見込まれている¹¹⁾。本研究で定義した BAD 群は、腐食しろ 2.0[mm]よりも更に腐食が進行した管路であり、他方の GOOD 群は、腐食しろの半分程度に止まっている管路に相当する。そして、この 2 群を外的基準とした数量化理論第Ⅱ類の適用^{12), 13)}を試み、説明変数(アイテム)には前章の分析結果を踏まえ、「埋設経過年」、「土質」、「ANSI 評価点」、「土壌の比抵抗」、「pH」、「硫化物」、「塩化物イオン」、「硫黄含有率」、「硫酸イオン」及び「含水率」の計 10 項目を用いることとした。表-1 に分析に用いたアイテム・カテゴリーを示す。ただし、「ANSI 評価点」は上記の内 5 項目の情報を内包したデータとなるので、以降ではケース A：ANSI 評価点を用い、かつ該当 5 項目との重複を避けた場合(5 アイテム)、ケース B：ANSI 評価点を用いず、かつ該当 5 項目を個別に扱った場合(9 アイテム)の各々を検討する。

PS 被覆無しのデータを対象に、ケース A 及びケース B についてアイテム減少法による数量化理論第Ⅱ類を適用した結果、図-6 及び図-7 のような結果が得られた。なお、カテゴリースコアの反応に関して、物理的な説明がつかう場合は○印を、つかない場合には×印を付して表示した。ここで、物理的な説明がつかない場合は、カテゴリースコアの反応が、周知の事実から導かれる内容と矛盾していたり、それらの大小関係に連続性が保たれていなかったりするケースをさす。ケース A (図-6) を見ると、5 アイテムから 3 アイテムまでの判別率の中率はほとんど変化しないものの、2 アイテムで上昇していることがわかる。また、「塩化物イオン」及び「硫酸イオン」に連続して×印が付されている。このことから、外的基準に対する「塩

表-1 分析に用いたアイテム・カテゴリー

アイテム	カテゴリー
埋設経過年 [年]	～20
	～30
	30よりも大
土質	砂, シルト
	関東ローム, 粘土, 腐植土
ANSI評価点	0～3.0
	3.5～6.0
	6.5～9.5
	10以上
	8.0より大
土壌の比抵抗 [KΩ-cm]	～8.0
	～6.0
	～4.0
	～2.0
pH	～6.5
	～7.5
	7.5より大
硫化物	無 微量 有
塩化物イオン [mg/L]	～5
	～10
	10より大
硫黄含有率 [%]	～0.1
	0.1より大
硫酸イオン [mg/L]	～100
	100より大
含水率 [%]	～20
	～40
	40より大

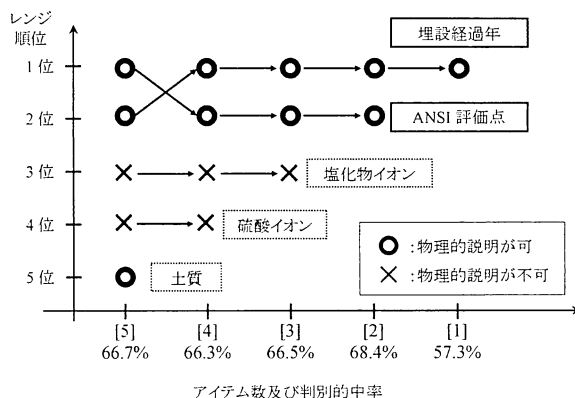


図-6 ケース A (ANSI 評価点を含めた 5 項目) のアイテム減少法の結果

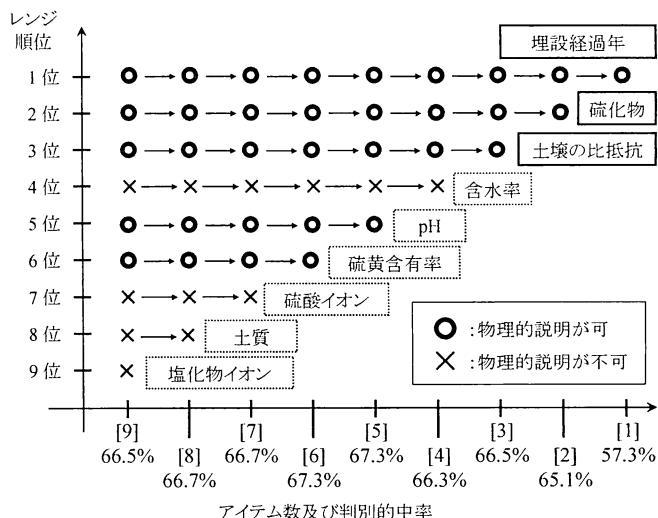


図-7 ケース B (ANSI 評価点を含めない 9 項目) のアイテム減少法の結果

化物イオン」及び「硫酸イオン」の影響度は小さく、レンジ順位 1 位及び 2 位の「埋設経過年」及び「ANSI 評価点」によって BAD 群と GOOD 群の判別が為し得ることがわかった。一方のケース B (図-7) では、レンジ順位の下位に「硫酸イオン」、「土質」及び「塩化物イオン」が下位に位置し、4 位の「含水率」では×印が連続して付されている。レンジ順位 2 位及び 3 位に「硫化物」及び「土壌の比抵抗」が位置する点から、ANSI 評価点を構成する 5 項目の中で上記 2 つが支配的な要因であることが示唆される。

つぎに、ケース A から「埋設経過年・ANSI 評価点」による 2 アイテムモデル、ケース B から「埋設経過年・硫化物・土壌の比抵抗」による 3 アイテムモデルを選択し、より詳細な管路腐食と埋設環境との関係について考えて行く。モデルの精度は、判別率で前者が 68.4%、後者が 66.5%であり、2 アイテムモデルの方が若干良好である。両モデルによるサンプルスコア (推定値) と実際

の孔食深さ[mm]との関係を調べるため、BAD 群と判定されたデータを対象に、サンプルスコアの大きい順に上位 10%相当から 50%相当までの各グループ平均値を集計することにした。図-8 に各グループの平均値を 3 アイテムと 2 アイテムのモデルで比較した様子を示す。両モデルともに、サンプルスコアと孔食深さの大小関係から、上位のサンプルスコアに属するデータほど実際の孔食深さが大きい傾向にあると判断される。ただし、2 アイテムと比較し、3 アイテムのモデルの方が、サンプルスコアの上位で腐食がより進行したデータを累計していることがわかる。より積極的にこの差異を解釈すれば、孔食深さの比較的大きいデータ、すなわち漏水や陥没事故のリスクが高い管路を厳密に判定する場面では、3 アイテムモデルを用いて評価の方が適切と考えられる。以上より、管路腐食を判別する場合、「埋設経過年」以外の説明要因として「硫化物と土壌の比抵抗」、ないしは「ANSI 評価点のみ」を利用してアプローチすることの妥当性が確認

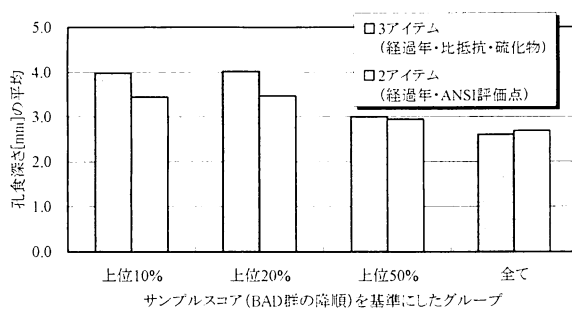


図-8 各モデルにおけるサンプルスコアと孔食深さの関係

された。しかし、ANSI 評価点に含まれる各項目の点数区分は、対象地域に依らずに定められたものであるから、今回のように必ずしも当該地域に即した評価が為されないことに留意する必要がある。

最後に、3 アイテムモデルを用い、PS 被覆の有無が防食効果にどのような影響を及ぼしているのかについて考察する。PS 被覆無しの場合では、BAD 群（孔食深さ 2.8[mm]以上：353 個）、GOOD 群（孔食深さ 1.1[mm]以下：365 個）に対して数量化理論第Ⅱ類を適用した結果、図-9 に示すカテゴリースコアグラフが得られる。この結果を解釈すると、「埋設経過年」が長い（古い）ほど、また「土壌の比抵抗」が小さく「硫化物」が多いほど、孔食深さの BAD 群に属する傾向が強いと判断できる。PS 被覆有りの場合についても同様に、BAD 群（孔食深さ 2.1[mm]以上：72 個）、GOOD 群（孔食深さ 0.9[mm]以下：72 個）に対する判別分析を行うと、「埋設経過年」は PS 被覆無しの傾向と合致する内容になった。しかし、「土壌の比抵抗」及び「硫化物」に関しては先の結果（図-9）と異なる傾向が示された。例えば、先に述べた硫化物と腐食との関係を考えれば、硫化物：「微量」より「有」の方が BAD 群に強く寄与すべきところが、GOOD 群に寄与する結果（カテゴリースコアの符号が負）になっている等、カテゴリーの反応に不整合が認められた。こうした不整合が PS 被覆有りにおいて見られ、逆に先の PS 被覆無しに見られなかった点は、埋設土壌による影響が PS 被覆によって阻害されていることを、相関分析とは異なる別の側面から裏付けたと言える。つまり、PS 被覆には管路の防食効果を有することが、被覆有無を比較することによって明確に示された。今後、予防保全の観点から管路の維持管理に取り組む際には、ANSI 評価点の 5 項目の中で基軸として位置付けられた「土壌の比抵抗」及び「硫化物」に着目し、これらの情報を管路腐食や機能劣化に関する間接診断等に活用して行くことが有用と考える。

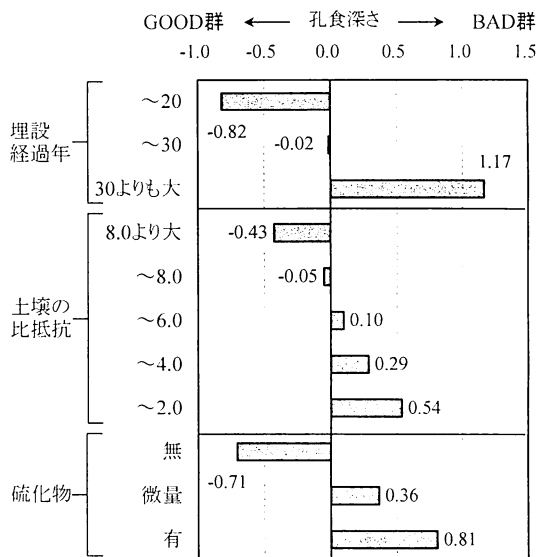


図-9 PS 被覆無しのカテゴリースコア

5. おわりに

本論文では、東京都水道局において継続的に行われてきた管体及び埋設環境調査のデータに基づき、管路腐食と埋設環境の関係性を統計的に分析した。以下に、今回の研究で得られた主要な成果について述べる。

- 1) 埋設管路の腐食を①面的な広がり（全面腐食）と②深さ方向の進展（局部腐食）の両面から捉え、測定データの中から①は管体外面の腐食発生面積の大小（4段階）、②については孔食深さ（外面腐食の最大深さ[mm]）を分析対象として各々定めた。
- 2) 全面腐食及び局部腐食に関連性を有する要因を明らかにするため、埋設環境の測定データを用いた相関分析を行った。さらに、項目全体の関連構造が把握できる要因関連図（図-2 及び図-3）を作成し、それぞれの腐食に関する結果を比較・考察した。全面腐食と局部腐食の結果の差異から、「土壌の比抵抗」及び「硫化物」等の項目が当該の腐食に対して直接的な関連性を有する土壌の特性値と判断された。
- 3) 孔食が認められた管路に焦点を当て、腐食が深く進展した場合（BAD 群）とそうでない場合（GOOD 群）とを対比する分析（数量化理論第Ⅱ類による判別）を行った。アイテム減少法に基づき、「ANSI 評価点」に対する「硫化物」と「土壌の比抵抗」の代替性を検討した（図-6 及び図-7）。「埋設経過年・ANSI 評価点」による 2 アイテムモデルと、「埋設経過年・硫化物・土壌の比抵抗」による 3 アイテムモデルの比較により、後者の方がより当該地域の特性を反映し

た診断モデルであることが示された (図-8 参照)。

- 4) 3 アイテムモデルを用い、PS 被覆の有無を比較した結果、PS 被覆無しでは「埋設経過年」が長い(古い)ほど、また「土壌の比抵抗」が小さく「硫化物」が多いほど、孔食深さの BAD 群に属する傾向が強いことを確認した (図-9 参照)。ただし、PS 被覆有りの場合において、上記の傾向と異なる結果が得られたことから、相関分析とは別面から PS 被覆による防食効果が検証された。

本論文では、「土壌比抵抗」及び「硫化物」等の項目が、腐食に対して直接的な関連性を有する土壌特性値であることを明らかにした。一般に土壌分析は、調査する項目が多くなると費用が高額となることから、必要最小限のデータを調査対象にできれば、より経済的かつ効率的に調査作業を進めることが可能になると考えている。

一方、筆者らは埋設経過年から孔食深さを推定する回帰式¹⁾を得ている。これらの式を実際の老朽度予測に適用するためには、埋設環境の影響を加味することが求められる。そこで、今回の数量化モデルを併用することにより、孔食深さの推定値を補正するような融合化が可能になると判断している。すなわち、まず回帰式を用いて平均的な孔食深さを計算しておき、埋設環境の条件によって変化する幅を取り入れるため、例えば GOOD 群に寄与するファクターがあれば値を減じ、逆に、BAD 群に寄与する場合は推定値を大きくするといった補正方法を検討することで、優先的に更新工事が必要とされる管路をより確実に選定し得ると考える。

参考文献

- 1) 山本久五, 三木典生: 埋設環境の腐食度による管路危険度の相対評価, 第 54 回全国水道研究発表会講演集, pp.356-357, 2003
- 2) 宮田健司, 清水宏明, 横尾真子, 大濱博保: 管路の老朽度予測モデル, 第 55 回全国水道研究発表会講演集, pp.400-401, 2004
- 3) 細井由彦, 村上仁士, 香西正夫, 鎌田圭朗, 奥田義郎: 徳島市水道における配水管の破損特性に関する研究, 水道協会雑誌, Vol.57, No.8, pp.2-11, 1988
- 4) 荒井康裕, 小泉明, 稲員とよの, 渡辺晴彦, 國寶蒼治, 林光夫: 送配水管路事故の実態調査アンケートデータによる故障率曲線の推定方法, 環境システム研究論文集, Vol.36, pp.125-130, 2008
- 5) 電気学会 電食防止研究委員会: 電食・土壌腐食ハンドブック, pp.37-41, コロナ社, 1977
- 6) ANSI/AWWA, C105/A21.5, National Standard for Polyethylene Encasement for Ductile-Iron Pipe System, AWWA, 1999
- 7) 石原只雄 (監修): 最新・腐食事例解析と腐食診断法, pp.27-77, テクノシステム, 2008
- 8) 日本材料学会 腐食防食部門委員会: 腐食・損傷事例と解析技術, pp.73-311, さんえい出版, 1987
- 9) 日本ダクタイル鉄管協会: 埋設管路の腐食原因とその防食について, p.8, 2001
- 10) 腐食防食協会 (編): エンジニアのための微生物腐食入門, pp.1-14, 丸善, 2004
- 11) 日本水道協会: 水道施設更新指針 更新計画作成支援のガイドラインとして, p.70, 2005
- 12) 小泉明, 荒井康裕, 稲員とよの, 新谷政秋, 中野直樹: 数量化理論を用いた水道管路システムの安全性評価に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.35, pp.163-171, 2007
- 13) 小泉明, 荒井康裕, 稲員とよの, 國寶蒼治, 馬野仁史, 有吉寛記: 水道管路の安全性を評価するメッシュ診断モデルに関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.36, pp.115-123, 2008
- 14) 芦田裕志, 尾崎勝, 吉田永, 小泉明: 水道管に対するポリエチレンスリーブの防食効果, 水道協会雑誌, Vol.78, No.5, pp.2-13, 2009

STATISTICAL ANALYSIS OF THE CORROSION OF WATER DISTRIBUTION PIPES UNDER THEIR ENVIRONMENTAL FACTORS

Yasuhiro ARAI, Akira KOIZUMI, Hitoshi UMANO,
Hiroshi ASHIDA, Masaru OZAKI and Ei YOSHIDA

This paper presents a statistical analysis in order to grasp the environmental factors which influence to the corrosion of underground water distribution pipes, based on the field survey data of Tokyo Waterworks Bureau. Firstly, we analyzed the correlation between corrosion and environmental factors, and created the factor relevance structure maps of general corrosion and localized [pitting] corrosion respectively. It was revealed that the soil resistivity [as measured by soil rod at the site of investigation] and the presence of sulfide [in soil sample] had direct relevance to pitting corrosion. Then, focusing on the pipes from which pitting corrosion was detected, this research performed a comparative study of two of the groups, one 'BAD group' and the other 'GOOD group' in terms of the pitting depth. As a result of applying the quantification theory, the diagnostic model described by three items [installation period [year], soil resistivity, sulfide] was obtained. Finally, we examined the anticorrosive effect of PS [polyethylene sleeve covering] to pitting corrosion, and clarified the difference between 'with PS' and 'no PS,' using the diagnostic model we created.