

土木建築における腐食に関する研究 (その 1)

—土中埋設配管の腐食原因の調査例—

喜 田 大 三
守 屋 正 裕

Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 1) —Investigation of Underground Corrosion—

Daizo Kita
Masahiro Moriya

Abstract

The objects of the study are corrosion protection of materials and estimation of durability in civil engineering and building construction. This paper deals with corrosion of steel pipe in soil. Examples are given as follows: (1) Rapid corrosion occurred in oil pipes of a certain factory with the rate being 0.75 mm/yr or higher. The cause was found to be electrolysis brought about by stray electric currents in the ground. (2) Water leakage due to local corrosion occurred from underground piping at a hospital and the cause of the corrosion was found to be galvanic effects. (3) Corrosion occurred in the underground water pipes of a certain building at a rate of 0.4 mm/yr or higher. On inquiry, the cause of the corrosion was found to be soil contaminated by corrosive waste chemicals added to which there was local corrosion due to oxygen concentration cells.

概 要

本研究は、土木建築分野において各種環境下で使用される金属材料の腐食速度の予測法と防食法の確立が主目的である。本報文では、腐食に関する多数の依頼調査の中から、土中埋設配管に発生した予期しない急激な腐食の原因を調査した事例を2, 3紹介している。

例1. 某工場において、重油配管が0.75mm/yr以上の速度で腐食し、短期間で穴があいて重油が漏出した。この腐食原因は隣接工場の電気施設からの漏洩電流によると思われる電食であった。例2. 某病院において、給水管が1.07mm/yr以上の急激な速度で局部的に腐食した。この原因は、給水管（亜鉛メッキ鋼管）と給湯管（銅管）によるカルバニック腐食であった。例3. 某建物において、給水管が0.4mm/yr以上の速度で腐食し漏水した。この原因は、腐食性の化学物質によって汚染された土による全面腐食と、通気差電池による局部腐食であった。

1. まえがき

金属材料は、多くのすぐれた特性をもつ主要な材料である。ところが、金属材料の多くは、熱力学的に不安定であり、環境物質と化学的に反応して安定な化合物に自然に変化する性質をもっている。この化学変化が腐食であり、金属材料の宿命的な欠点である。

さて、土木建築における金属材料の使用環境は、主として大気中、水（淡水、海水）中、土中に大別され、それぞれの環境において、さまざまな形態の腐食が発生し、直接的あるいは間接的に多大な経済的損失をも

たらしている。たとえば、大気中の亜硫酸ガスの影響による空調用冷却水配管の異常腐食、腐食性の高い海岸埋立地や化学薬品で汚染された工場地帯の土中における基礎鋼管杭の腐食、土中埋設配管の急激な腐食による漏水事故などがある。それらに関し著者等も2, 3の報告を先にしている^{1), 2), 3), 4)}。したがって、土木建築分野における腐食に関する研究は、各種環境下における金属材料の腐食の形態、原因、機構について調査検討し、環境の腐食性を予測するとともに適切な防食法について検討することが腐食事故の予防、構築物の耐久性の予測、さらに過剰設計による材料費や人件

費の節減など、構築物の設計施工上非常に重要である。

この報告では、腐食に関する多くの依頼調査の中から、土中埋設配管に発生した特異な腐食の原因を調査究明した事例を2、3紹介する。この調査例は、土中埋設配管の設計施工のうえで参考になると思われる。

2. 調査例

2.1. 例1. 某工場における重油配管の腐食

2.1.1. 腐食状況 布設後約4年経過した土中埋設重油配管から重油が漏出する事故が発生した。この配管は20Aの亜鉛メッキ鋼管である。調査の結果、外面から直径3~15mmの孔食が多数発生し、数ヶ所貫通していることが確認された。布設後の経過年数と配管の肉厚とから腐食速度を概算すると最大0.75mm/yr以上である。

一般に、土中における鋼管の平均的な腐食速度は0.03~0.10mm/yrで、耐用年数は裸埋設でも30~50年といわれている。したがって、この事故は全く予期しない異常な腐食によるものである。

2.1.2. 調査内容および調査検討結果 土の腐食性を決定する因子には、pH、酸度、溶解塩、復極作用や分極作用、電気伝導度、通気性、水分などがあり、腐食の形態には、マイクロセルによる全面腐食、土質の差などに基因するマクロセルによる局部腐食、バクテリア腐食および迷走電流による腐食などがある。したがって、腐食事故の原因を究明するためには多面的に調査検討する必要がある。また、既設建物の埋設管の場合には、調査上の制約も多く十分な調査ができない場合が多い。この例においても、調査時にはすでに配管は掘り出されており、配管の対地電位および管電流の測定はできなかった。

以下に調査検討結果を調査項目ごとに説明する。

(1) 土の化学分析 配管埋設地点の土を5点採取し、化学分析を行った。その結果を表-1に示す。また、表-2に土のpHと腐食性との関係を示す。さらに、表-3に文献⁵⁾から引用した土中埋設鋼材の腐食試験の結果を示した。

試料	pH	含水比 %	水溶性イオン meq/100 g			
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Cl ⁻ +SO ₄ ²⁻
1	7.80	51.5	0.06	0.60	0.04	0.66
2	7.75	16.2	0.24	0.58	0.05	0.82
3	8.00	84.6	0.15	0.41	0.11	0.56
4	7.50	90.7	0.17	0.40	0.02	0.57
5	7.10	105.9	0.08	0.27	0.01	0.35

表-1 土の分析結果

さて、表-1においてpHは中性ないし微アルカリ

性であり、pHからは非腐食性であると判定される。また、水溶性イオン濃度は、一般的な土の分析値と比較して異常は認められず、表-3と対比しても腐食性因子であるSO₄²⁻(硫酸イオン)やCl⁻(塩素イオン)は少ない方である。したがって、SO₄²⁻やCl⁻などを含む腐食性の化学薬品などによって汚染された形跡はなく、土自体の腐食性は高くはないと判断される。

pH	腐食傾向
4.5以下 酸性	非常に腐食性
4.5~6.5 弱酸性	腐食性
6.5~8.5 中性または弱アルカリ性	非腐食性
8.5以上 アルカリ性	不明

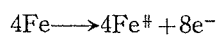
表-2 pHと鉄の腐食傾向

土質	腐食速度 mm/yr	pH	酸度 meq/100 g	水溶性イオン meq/100 g		
				Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ +SO ₄ ²⁻
シルトローム	0.061	7.6	3.0	0.06	0.48	0.54
砂質ローム	0.066	4.5	12.6	-	-	-
シルトローム	0.083	7.3	2.6	0.03	0.12	0.15
砂質ローム	0.085	5.9	12.8	-	-	-
細砂	0.095	4.7	1.8	-	-	-
シルトローム	0.366	9.4	アルカリ	1.12	5.57	6.69
粘土	0.324	6.8	-	0.99	0.87	1.88
堆肥土	0.309	4.2	28.1	1.68	2.30	1.99
アルカリ土	0.290	7.4	アルカリ	0.18	11.98	12.16
粘土ローム	0.252	7.6	アルカリ	0.01	4.43	4.44

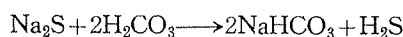
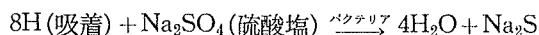
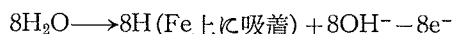
表-3 鉄の腐食と土質

(2) バクテリア腐食 土中におけるバクテリア腐食は、主として硫酸塩還元バクテリアによる場合が多く、しばしば激しい腐食の原因となる。このバクテリア腐食の反応機構は次のように表わすことができる。

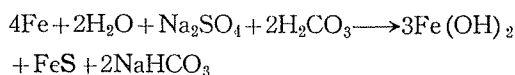
(アノード反応)



(カソード反応)



(全反応)



硫酸塩還元バクテリアは、嫌気性菌であり、還元状態の土中で活動する。また、上記反応式から明らかのように、腐食生成物は、Fe(OH)₂(水酸化鉄)とFeS(硫化鉄)とが3:1のモル比となる⁶⁾。したがって、硫酸塩還元バクテリアによる腐食は、土の酸化還元状態や腐食生成物中のFeSの有無で判定できる。

表-4に土のEh(酸化還元電位)と嫌気性バクテ

リアによる腐食程度との関係を示した⁷⁾。

さて、当現場において、配管が埋設されていた地点で、土の Eh を測定した。その結果、Eh は、250~350mV で

Eh(mV)	嫌気性腐食の程度
< 100	激 烈
100~200	中 程 度
200~400	軽 微
> 400	無 腐 食

表-4 土のEhと嫌気性腐食

酸化状態であった。また、配管に付着していた腐食生成物について、蛍光×線分析による S (イオウ) の定性分析を行い、FeS の有無を判定した。その結果、FeS は検出されなかった。これらの結果から、硫酸塩還元細菌による腐食は発生していないと判断した。

(3) 土の比抵抗 金属の腐食反応は本質的には金属と環境との電気化学的な反応である。したがって、環境側の電気伝導度（あるいは比抵抗）は腐食性を判定するうえで重要な指標の1つであり、土の比抵抗と腐食性とは表-5 に示す関係がある⁸⁾。

比 抵 抗 Ω cm	腐 食 傾 向
900以下	非常にはげしい
900~2300	はげしい
2300~5000	中 位
5000~10000	軽 微
10000以上	非常に軽微

表-5 土の比抵抗と腐食性

そこで、現場において、配管埋設地点の土の比抵抗を測定し、表-5 から土の腐食性を判定した。

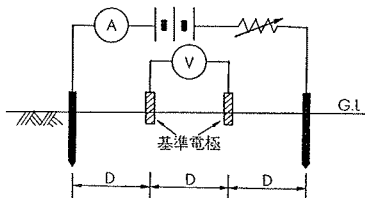


図-1 比抵抗の測定

測定は、図-1 に示す4電極法によって行い、次式から比抵抗 (ρ) を求めた。

$$\rho(\Omega \text{ cm}) = 2\pi D(\text{cm}) \cdot E(\text{V})/I(\text{A})$$

その結果、 $\rho = 4114 \sim 8910 \Omega \text{ cm}$ で、平均すると約6000 $\Omega \text{ cm}$ であった。したがって、腐食性は、軽微と判定され、この結果においても特に異常は認められない。なお、土の比抵抗と水溶性イオン濃度とは密接な関係にあり、この判定結果は前述(1)のをうらづけている。

(4) 地電位分布 一般に、地電位分布の測定は、土中を流れる迷走（漏洩）電流の有無を調査するために行う。方法は、照合電極2個を任意の間隔で地表面に設置し、両電極間に電位差計を接続して電位差を測定する。

調査の結果、距離約3m で最大265mVの電位差が

測定され、迷走（漏洩）電流の存在が確認された。また、その電流は、建家の外から建家方向へ流れており、地電位の最も低い地点と、配管の腐食が最も著しかった部分との位置関係が一致していた。

2.1.3. 腐食原因の考察 調査検討の結果明らかとなったように、当現場の土は、腐食性の化学薬品などによって汚染された形跡はなく、土自体の腐食性は高くないと判定された。また、嫌気性細菌による腐食の可能性もないと判定された。したがって、最大腐食速度 0.75mm/yr 以上という急激な異常腐食の直接的な原因は土の腐食性によるものではないと判断した。さらに、地電位分布を測定した結果、工場建家の外部から建家方向へ迷走電流が流れていることが明らかとなり、大地電位の最も低い地点すなわち土中から埋設管に流入した迷走電流が再び土中に流出する地点と埋設管に激しい腐食が発生した位置とが一致することが確認された。したがって、腐食の主原因はこの迷走電流によると判断した。なお、この調査では、迷走電流の発生源は究明できなかったが、当工場の周辺には、各種工場が隣立しており、他工場の電気施設からの漏洩電流の可能性が大きいと推定した。

対策は、現場の諸条件を考慮し、露出配管で施工することにした。

2.2. 例2. 某病院における給水管の腐食

2.2.1. 腐食状況

某病院において、土中埋設給水管が布設後約3年で局部的に腐食貫通し漏水した。この配管は、20Aおよび25Aの亜鉛メッキ鋼管で、ビニールテープ被覆を施して埋設されていた。漏水は3箇所（A, B, C）で発見され、いずれも腐食はビニールテープの継目部分に集中していた。

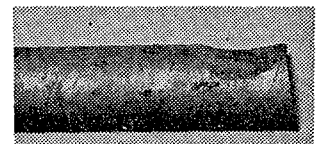


図-2 腐食配管(A)

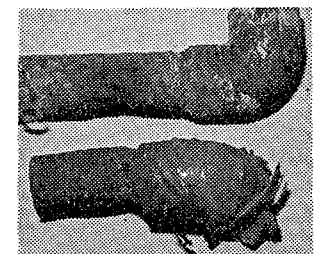


図-3 腐食配管(B)

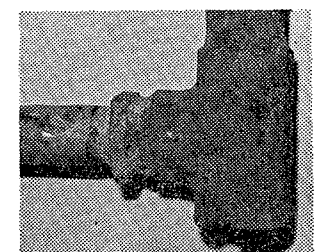


図-4 腐食配管(C)

配管の腐食状況を図-2~4 に示す。厚さ3.2mmの配管が、布設後約3年ですでに貫通していることから、腐食速度は最大1.07mm/yr 以上と推定され、土中腐食としてはきわめて急激で異常な腐食である。

2.2.2 調査検討結果 調査項目ごとに以下に要約する。

(1) 土の化学分析 3地点の土を採取し、化学分析を行った。その結果を表一6に示す。同表において、pHは3試料ともほぼ中性であり、表一2から非腐食性と判定される。また、水溶性イオン濃度は、採取地点によって差はあるが、一般的な土の分析値と比較して異常は認められず、腐食に影響する SO_4^{--} 、 Cl^- 濃度は、表一3のデータから急激な腐食の原因になりえないと判断される。

試料	pH	含水比 %	水溶性イオン meq/100 g			
			Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻ +SO ₄ ⁻⁻
A	7.15	25.40	0.25	0.07	0.27	0.27
B	6.95	24.32	0.04	0.05	0.01	0.06
C	7.45	26.50	0.07	0.05	0.10	0.15

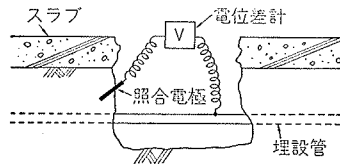
表一6 土の分析結果

(2) バクテリア腐食 現場において土のEh(酸化還元電位)を測定した結果、380~480mVと酸化状態であり、また、配管に付着していた腐食生成物を分析した結果FeSは検出されなかった。したがって、例1で前述の硫酸塩還元バクテリアによる腐食の可能性はないと判定した。

(3) 土の比抵抗 4電極法で測定した結果、比抵抗は5024~6700Ωcmであった。したがって、表一5から明らかなように、土の腐食性は軽微であり、上記(1)の結果と一致する。

(4) 管対地電位 一般に埋設金属体の対地電位の測定は、腐食の原因となる迷走電流、または電池作用の有無、埋設体の腐食の状況などを判定する手段となる。

そこで、図一5に示す方法によって、埋設給水管の対地電位を測定した。



図一5 管対地電位の測定

その結果、給水管の対地電位は、A、B、Cいずれの地点においても約-200mV (v.s S. C. E)を示した。また、土中に挿入した鉄に対しては900mV、亜鉛メッキ鋼材に対しては1300mVの電位を示した。

ところで、通常、土中における鉄の電位は-600mV前後、亜鉛メッキ鋼は-1000mV前後、銅は-150mV前後(いずれもS. C. E.基準)である。

ところが、上記の給水管は、亜鉛メッキ鋼管であるにもかかわらず、その電位は、銅に近い非常に貴重な値を示した。この原因としては、直流電源からの漏電や、ガルバニックスセルの形成などによるアノード分極

が考えられる。そこで、さらに調査を行ったところ次のことが明らかとなった。

i) 当病院で使用している直流電源から鉄筋や埋設管への漏電はおこっていない。ii) 給水管の近くに給湯用の銅管が埋設されており、両配管は、コンクリートスラブの鉄筋を介して電氣的に短絡している。iii) 給湯管は、その周囲をウレタンスポンジで保温し、さらに半割土管で保護して埋設されているが、土との電氣的絶縁は不完全である。iv) 土中に挿入した鉄電極と給水管との間に電流計を接続したところ、給水管がプラスで約1mAの電流が流れた。仮りにこの1mAの電流が給水管表面の10cm²から土中に流出した場合、腐食速度に換算すると1.16mm/yrとなる。

以上の調査結果を総合的に検討すると、給水管である亜鉛メッキ鋼管と給湯管である銅管とがスラブの鉄筋を介して電氣的に短絡し、ガルバニックスセルを形成していると判断される。また、その結果、次節で述べるように、給水管に急激な局部腐食が発生したのである。

2.2.3 腐食原因の考察 以上の調査検討結果から、給水管に発生した急激な局部腐食の原因は次のように考えられる。

給水管(亜鉛メッキ鋼管)と給湯管(銅管)とがスラブの鉄筋を介して電氣的に短絡しており、ガルバニックスセル(異種金属電池)が形成され、給水管がアノードとなって、被覆してあるビニールテープの継目部分に腐食電流が集中し、その結果急激な局部腐食が発生したのである。その際、次のような種々の予期せぬ悪条件が関与し、腐食が促進された。i) アノードとカソードとの開路電位差が500~600mVと大きい。ii) 銅は、酸素還元反応やその他の還元反応に対する過電圧が低くきわめて効果的なカソードとして働く性質を持っている。iii) 土が酸化状態であるので酸素の関与するカソード反応が進み易い状態にある。iv) ビニールテープによる被覆は、一般的な防食処置としては適切であったが、その継目部分に腐食電流が集中し、かえって局部腐食を促進する結果となった。

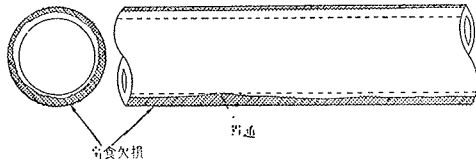
なお、防食対策としては、給水管と給湯管との電氣的な短絡箇所を究明することが困難なため、流電陽極方式による電気防食を提案した。

2.3 某建物における給水管の腐食

2.3.1 腐食状況 しゅん工後約7年経過した某建物において、土中埋設給水管が著しく腐食し、1箇所腐食貫通して漏水した。この給水管は20Aの亜鉛メッキ鋼管であり、裸埋設である。

腐食の状況は、全面腐食が著しく、漏水箇所には、

孔食による直径約5mmの穴があいていた。腐食速度を概算すると、孔食部分で、最大0.4mm/yr以上であった。



図一6 腐食状況

2.3.2. 調査検討結果 調査項目ごとに以下に要約する。

(1) 土の化学分析 配管埋設地点で採取した土2点（I，II）の分析結果を表一7に示す。同表において明らかのように、pH はほぼ中性である。しかし、 SO_4^{--} 濃度が非常に高く、土中水に対する濃度に換算すると、Iは2564ppm、IIは6366ppmであり、これは海水中 SO_4^{--} 濃度の0.95および2.3倍に相当する。そして、表一3のデータからも腐食性の高い土であることが明らかである。また、蛍光X線分析による重元素の分析の結果、多量のFe(鉄)が含有しており、さらにMn(マンガン)、Ti(チタン)、Cu(銅)、Zn(亜鉛)およびCr(クロム)も検出された。

試料	pH	含水比 %	水溶性イオン meq/100g			
			Ca ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻ +SO ₄ ⁻⁻
I	6.7~7.4	28.69	2.81	0.09	4.15	4.24
II	6.7~7.2	37.21	5.00	0.31	9.62	9.93

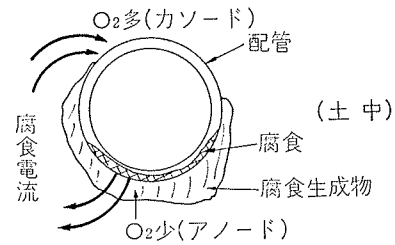
表一7 土の分析結果

(2) 土の比抵抗 4電極法によって測定した結果、2000Ωcm以下の値を示した。したがって、表一5からも腐食性の高い土であることが明らかであり、(1)の結果をうらづけている。

2.3.3. 腐食原因の考察 土の分析結果から明らかのように、当現場の土は、多量の硫酸塩や各種の金属化合物を含む特異な組成である。これは、当建物の敷地が工場の跡地であることから、過去に、工場廃棄物などで汚染されたためであると推定される。

土中に多量含有している硫酸塩は、当然土の腐食性を高め、Fe、Mn、Ti、Cu、Crなども存在形態によっては腐食を促進する因子となる。

また、配管の腐食状況および腐食生成物の付着状況などから、最も腐食の激しかった部分では、図一7に示すような通気差電池による腐食が併発したと判定される。



図一7 通気差電池腐食

3. まとめ

腐食に関する多数の依頼調査の中から、土中埋設配管に発生した特異な腐食の原因を調査究明した事例をいくつか紹介した。腐食原因はそれぞれ次のようであった。

(1) 某工場の重油配管に発生した最大0.75mm/yr以上の腐食は、隣接工場の電気施設からの迷走電流によると思われる電食であった。(2) 某病院の給水管に発生した最大1.07mm/yr以上の局部腐食は、給水管(亜鉛メッキ鋼管)と給湯管(銅管)とのガルバニック腐食であった。その際、ビニールテープによる防食被覆が、かえって腐食電流を局部に集中させる結果となり、孔食が促進された。(3) 某建物の給水管に発生した著しい全面腐食と、最大0.4mm/yr以上の孔食は、腐食性の化学物質によって汚染された土の腐食作用と通気差電池による腐食であった。

以上、ここに紹介したわずかの事例でも明らかのように、土中における腐食は非常に多くの要因によって発生し、しばしば予期しない事故の原因となる。

今後、これらの調査例を参考にして、土中で発生する腐食の形態と速度の予測および適切な防食法の選定についてさらに検討していくつもりである。

参考文献

- 1) 喜田・守屋ほか：大林組技研所報，No. 5，p. 145 (1971)
- 2) 喜田・守屋：建築技術，No. 242. (1971) p. 129
- 3) 喜田・守屋：大林組技研所報，No. 6，(1972) p. 197
- 4) 喜田・守屋：大林組技研所報，No. 7，(1973) p. 122
- 5) H. H. Uhlig：Corrosion Handbook
- 6) H. H. Uhlig，岡本剛監修：腐食反応とその制御，産業図書 (1968)
- 7) 電食防止研究委員会編：電食・土壤腐食ハンドブック，電気学会 (1966)
- 8) F. O. Waters：Corrosion，8，(1952) p. 407