

農業用パイプラインの鋼製異形管における腐食原因解明調査と調査手法の有効性に関する考察

株式会社アルファ技研 ○植屋 賢祐, 大津 正則

はじめに

オープンタイプパイプライン等においては、スタンド等の RC 構造物に管体が接続する際に、鋼製異形管が用いられることが多い。

本報告は、竣工後 20 年余りを経過した農業用パイプラインのスタンドに接続する鋼製異形管の内面腐食変状について、C/S(コンクリート/土壌)マクロセルとの関連性の有無、ならびに腐食要因解明にあたり、間接調査として「管対地電位調査」、「土壌電気抵抗調査」等を、直接調査として「管内面調査」、「管外面調査」などの各種詳細調査を行った結果の報告とともに、調査手法の有効性を考察した。

1. 調査施設の概要と詳細調査の必要性

管水路は、取水口から函渠を経て接続する、口径 1,500mm, 延長 L=1.9km, 最大水圧 0.07MPa(動水圧)のオープンタイプパイプラインである。構造は、主として RC 管で構成され、管水路の途中 7 箇所を設置されたスタンドの上下流は「鋼製異形管」(以下 SP という)で接続されている。このうち、6 箇所のスタンドは構造を一にする施設である。(図-1)

パイプラインは、ほぼ全路線が段丘の斜面の裾を縦走り、埋設条件は同一であり、土壌条件は一様に火山灰質土が表層を覆っている。なお、施工年度は昭和 56~58 年である。

SP 管の内面は、構造を一にするスタンドに共通した「こぶ状」の錆が、コンクリート壁からほぼ 2m 前後の範囲で発生していた。(写真-1)

この錆こぶに貫通しているものがあるか否かは内面調査からは不明であったが、施工履歴やスタンドコンクリートと配管の接続状況から、経年による腐食以外に、C/S マクロセル腐食と関連する可能性も考えられた。

C/S マクロセル腐食は、配管が土壌中からコンクリートに入る場合に管外面に発生し、配管が鉄筋と接触すると腐食が促進され、かつ塗覆装損傷部に集中するため、短期間でも漏水事故を起こす場合があるといわれている¹⁾。

他方、内面だけの腐食としてみると、塗装面のキズや塗覆装の経年劣化による剥離に、水中の酸素供給などが関連した発錆、微生物による錆の促進、用水水質など、複数の腐食要因が考えられた。

これらのことから、腐食要因の解明には、C/S マクロセル腐食およびその他要因の可能性の両面から詳細調査が必要と判断した。

なお、事前調査、管内目視調査および簡易計測より把握されたパイプラインの状況は以下のとおりであり、SP を除いて顕著な変状は確認されなかった。

- (1) 竣工後、パイプラインにおける漏水履歴はない。
- (2) RC 管に、ひび割れは見られなかった。
- (3) 全体として、たるみ、蛇行、沈下は見られなかった。
- (4) 継目間隔は、施工管理基準値の範囲内であり、止水ゴム等のはみ出し等の変状は見られなかった。

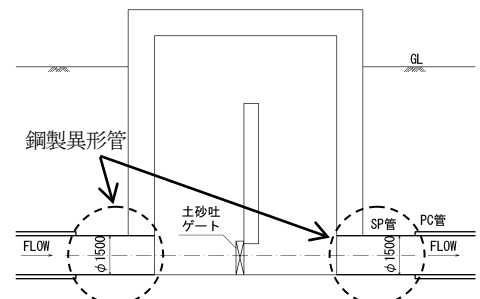


図-1 調圧水槽の概略図

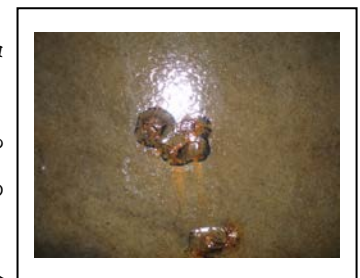


写真-1 SP 内面に見られたこぶ状の錆

2. 腐食原因解明調査

2.1 調査項目

対象施設の場合、立地条件から電食の可能性は低い。腐食原因としては、図-2 に示される「自然腐食」と「微生物腐食」の可能性に着目し、表-1 に示す調査項目を選定した。

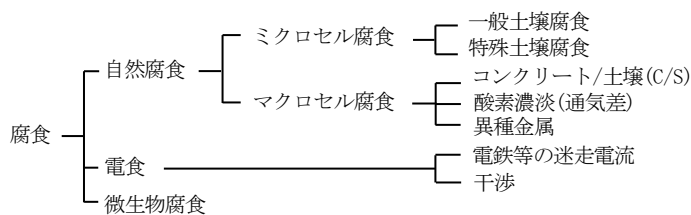


図-2 鉄鋼系管材の腐食要因の分類²⁾

表-1 調査項目

マクロセル腐食調査	間接	土壌腐食性 管対地電位 土壌電気抵抗率
	管外面	直接 目視調査(掘削) 残存肉厚量
管内面	直接	目視調査 さび分析 さび部pH 微生物
	間接	水の腐食性

「マクロセル腐食調査」は、間接調査として土壌腐食性、電位、土壌電気抵抗調査を行うこととした。加えて、直接調査による確認が必要と考え、「管外面調査」として、掘削による目視調査および超音波管厚測定器による管厚測定を行うこととした。

「管内面調査」は、目視調査のほか、錆に含まれる元素の同定のため蛍光X線分析、さび部 pH 調査、微生物(鉄バクテリア)による腐食の可能性検討のための培養プレートによる微生物調査および水の腐食性調査を行うこととした。

2.2 C/S マクロセル腐食調査

(1) 土壌腐食性調査

土壌の腐食性は、DIN³⁾の基準を適用し、土壌分析等の結果にもとづき評価した。採土は、土被り 2.5m に対し、管体の側部でハンドオーガにより掘削が可能であった深度 1.1~1.5m で行った。

調査結果を DIN 基準に照らすと、C/S マクロセル腐食に対する腐食性は、調査を行った同一構造で変状が共通する 6 箇所中、「高」が 1 箇所、「中」が 2 箇所、「低」が 3 箇所と評価された。

(2) 管対地電位調査

管体地電位調査からメタルタッチが疑われ⁴⁾、C/S マクロセル腐食の可能性があると判定される地点が 3 箇所確認された。このうち 1 箇所は、上記の DIN 基準から C/S マクロセル腐食の可能性が「高」と判定された地点であった。

(3) 土壌電気抵抗率調査

土壌電気抵抗率は、いずれの地点も腐食電池の回路抵抗値としては、「大きい(腐食しにくい)」と判断できる値であった。(≧10,000 Ω・cm)⁵⁾

2.3 管外面調査

(1) 目視調査

調査地点は、土壌腐食性および管対地電位調査(電位分布)により、マクロセル腐食の可能性が最も高いと判断されたスタンドを代表として選定し、掘削により管体を露出して行った。このとき、管体基礎(支持角 120 度)に支障がないよう、管上半部(180 度)まで掘り起こした。

写真-2 のとおり、コンクリート躯体との接続部に僅かな発錆が認められたが、その他の範囲では塗装の劣化や発錆はなく、マクロセル腐食と思われる変状は認められなかった。接続部の発錆は、その位置や状況から施工時の塗装の剥がれやキズに起因したものと判断された。



写真-2 管外面の状況

(2) 残存肉厚調査

本調査は、超音波板厚計により、掘削による外面腐食調査と併せて実施した。発錆が見られた箇所(錆を除去後に計測)を含めた上面、側面から8箇所を選定し計測したが、いずれも、管板厚は許容差のプラス側の範囲にあり($t_0=11.5\sim 11.9\text{mm}$)、発錆による明かな減肉は生じておらず、管体の構造機能は確保されていることを確認した。(規格厚 $t=11.0\text{mm}$ ⁶⁾)

2. 4 管内面調査

(1) 目視調査

調査方法は「錆の発生程度の調査」⁵⁾に準じた。調査は、同一構造で変状が共通する6箇所を対象とした。内面目視調査より、錆には、いずれの地点もほぼ同様に以下の特徴が見られた。

- 錆は、管体の下半分に集中し、上半分にはほとんど見られない。
- 管体の左右では、発錆状況に差異は見られない。
- 錆の形状は、主としてこぶ状(フジツボ状)である。
- 平面状の錆も見られる。(フジツボ状の錆が発達し、塗膜とさび生成物が水流により流失した結果と推察される)

(2) さび分析

錆を現地より採取し(内面4試料, 外面1試料), 「蛍光 X 線分析」により元素の同定と定量を行った。

分析結果を水輸送用塗覆装鋼管(以下「塗覆装鋼管」という)の化学成分(JIS G 3443)と比較したものが図-3である。JIS規格によれば、塗覆装鋼管の化学成分は、鉄(Fe)のほか、リン(P)、硫黄(S)および炭素(C)であり、圧力配管用炭素鋼管と異なり、ケイ素(Si)およびマンガン(Mn)を含まない。

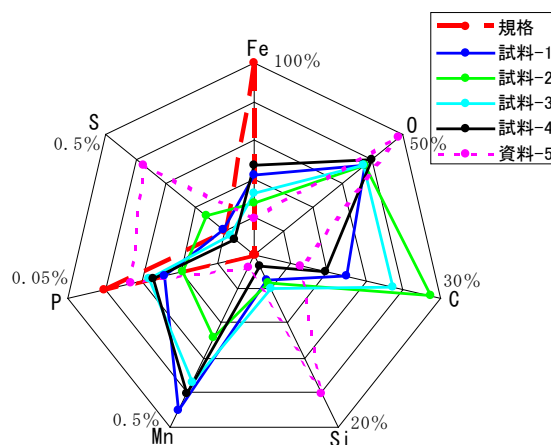


図-3 塗覆装鋼管(規格値)とさびの成分比較図

一般に、さびの成分は水和酸化物が主体であり、これには大気由来の二酸化炭素や二酸化硫黄なども含まれるため、さびの進行によって、Feの減少とC、Sの増加が予想され、同図にもその傾向が現れている。一方、塗覆装鋼管の成分に元々含まれていないMnやSiも同定された。Mnの同定は、鉄バクテリアによる水中のマンガンイオンの酸化・集積の働き⁷⁾による可能性を示唆する。なお、内面のMn量は、外面(試料-5)の10倍程度の濃度であった。

(3) さび部 pH 調査

さび部における腐食電池(マイクロセル)の形成有無の判断のため、リトマス試験紙をさび部位に貼り付け、その呈色状況より、カソード部とアノード部の形成を調べた。

健全部は、呈色からpH7.0~7.4の中性と判断された。一方、さび部は、pH5.0~8.0程度の弱酸性から弱アルカリ性のモザイク状の呈色から、さび中のカソード部とアノード部の存在、すなわち、腐食電池の形成を示唆した。(弱酸性:pH3.0~pH6.0, 弱アルカリ性:pH8.0~pH11.0)

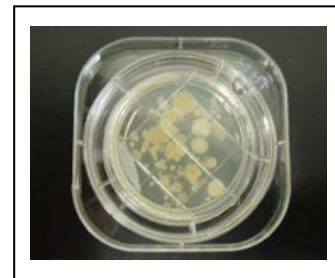
(4) 微生物調査

管内面の発錆は、①フリーフローで流下するときの水際付近(管下半分)に集中し、②こぶ状(フジツボ状)に成長する特徴が見られた。また、③上流の函渠区間からは湧水の浸入もある。これらの条件から、錆の成長に関与する好気性細菌として「鉄バクテリア」の関与を考え、その可能性を判断するための調査を行った。

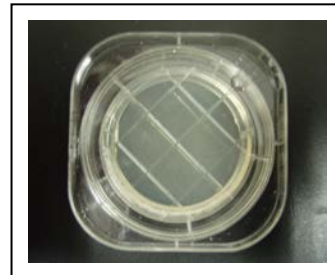
調査方法は、微生物腐食の実験・解析法の簡便法として紹介⁷⁾されている「寒天培地平板法」を用いた。具体的には、市販品の寒天培地(ぺたんチェック; 栄研器材社)を用いて、現地でさび部(被検体)に寒天培地を付着させた後、36°C、48時間の恒温培養を行い、コロニーの発生状況を確認した。なお、比較として、健全部を被検体とした培養も行った。

写真-3 のとおり、さび部では明らかなコロニー形成が確認できた。一方、健全部はコロニー形成はほとんど確認できなかった。これは、内面腐食における微生物(鉄バクテリア等)の関与の可能性を示唆する。

ただし、本調査は、微生物の存在の有無を確認するための簡便手法であり、細菌の種類を特定するものではない。



a. さび部



b. 健全部

写真-3 恒温培養後の培地

(5) 水の腐食性

水質は、表-2 に示す項目について成分分析を行った。採水地点は、取水地点、管水路流入部、管水路中間部の3地点である。

水の腐食性は、図-4 の「キーダイアグラム分類表」を用いて評価した。各地点の水質成分は類似し、いずれも「中間型」に分類された。中間型は、鋼材の腐食因子である硫化物や塩素系化合物が少なく、腐食性が小さい水質である。

溶存酸素量は、1気圧、採水時の水温で気体換算した値が7.2~7.5mL/Lであった。この場合、図-5⁸⁾によれば、やや腐食速度が速くなる可能性があるかと判断される。

pH値は、pH7.1~7.2であり、ほぼ中性を示した。水が中性の場合は、ほとんど鋼材腐食の要因とならないことから、酸またはアルカリに起因した腐食の可能性は低いと評価した。

表-2 水質調査の項目

調査項目	
水の腐食性	塩化物イオン量
	硫酸イオン量
	カルシウムイオン量
	マグネシウムイオン量
	炭酸水素ナトリウムイオン量
	ナトリウムイオン量
溶存酸素量	
pH値	

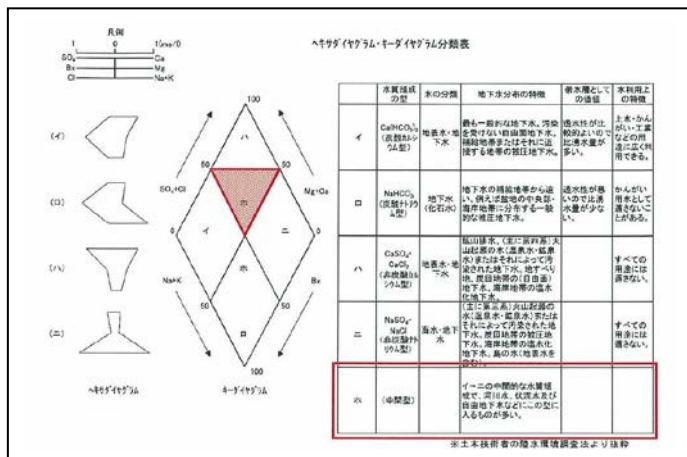


図-4 キーダイアグラム分類表

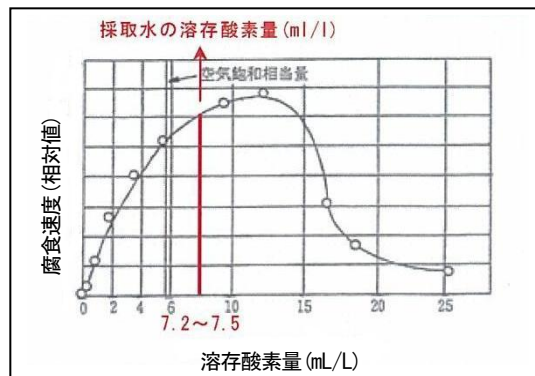


図-5 溶存酸素量と腐食速度の関係

3. 鋼製異形管の腐食原因と対策

- 腐食原因として当初懸念されていた「C/S マクロセル腐食の可能性」については、間接調査から可能性「有」とする診断結果であったが、最もその疑いの強いスタンドでの外面調査より、C/S マクロセル腐食は発生していないことが確認された。このことは、土壌電気抵抗率が高く、土壌中に腐食電流が流れにくかったことが理由と推察される。
- 管内面の腐食原因は、さびの pH、蛍光 X 線分析、寒天培地平板法によるバクテリア培養試験および水質分析の結果から、通水時の浮遊物の衝突等による「ライニング材(タールエポキシ樹脂塗装)の損傷(キズ・剥離)をきっかけとした発錆」と、水と酸素の供給(溶存酸素)による「マイクロセル」および「微生物(鉄バクテリア)付着」による複合要因である可能性が高いと判断した。また、各スタンドに接続する鋼管の腐食は、腐食状況が同じであることや、施設の立地条件や管理設条件・土壌条件が同様であり、施工時期もほぼ同時期であることなどから、同一の原因によるものと判断した。
- 管外面の軽微な腐食は、敷設初期の「塗装の損傷をきっかけとした発錆」と、土中の水と酸素の供給による「マイクロセル」が主要因と判断した。
- 以上から、管内面の腐食の進行を抑え、施設の長寿命化を図るためには、既存のさびを除去するとともに、塗覆装の改善・強化により発傷を防止し、鉄バクテリアの増殖の要因を遮断することが有効と判断した。

4. 調査・診断手法の有効性に関する考察

今回の調査・診断手法を、他の類似する施設の調査で活用するうえで有効と考えられる事項は、以下のとおりである。

- (1) コンクリート構造物に接続する鋼管の腐食原因は、内外面様々であり、内面目視調査のみで腐食原因を特定することが困難な場合は、本調査で示したような複数の要因(マクロセル、マイクロセル、微生物)を想定した調査を行うこと。
- (2) C/S マクロセル腐食の早期発見、効率的な判定にあたり、掘削による外面調査を頻繁かつ容易に行うことは難しいことから、経過年数、漏水履歴、土壌条件等を把握するとともに、土壌電気抵抗率を把握すること。C/S マクロセル腐食が発生すると、短期に腐食が進み、漏水につながる可能性があることから、とくに建設初期または供用年数の短い施設では、C/S マクロセル腐食の可能性の有無を把握することが重要である。
- (3) マイクロセル腐食は、さび部位の pH 試験により、腐食電池形成の可能性を把握すること。
- (4) 微生物腐食については、簡便な寒天培地平板法を用いて健全部と腐食部のコロニー形成状況の観察により、その可能性判定を行うこと。

5. まとめ

農業水利施設のストックマネジメントは、目視調査と、補足的に簡易な計測手段により施設機能の診断評価を行うことが基本である。しかし、これらの調査のみで変状の原因を特定することが困難な場合は、さらに詳細な調査を必要とする。

本調査は、オープンタイプパイプラインのスタンドに接続する SP の内面目視調査により、こぶ状の錆を確認したものの、変状の発生原因を目視調査のみで特定することが困難であったことから、腐食原因解明のため、C/S マクロセル腐食の可能性を含む、管の内外面の詳細調査を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) C/S マクロセル腐食には、土壌電気抵抗率の影響が大きいと推察される。
- (2) 管内面の腐食については、マイクロセルの判定としてさび部位の pH 試験を行い、腐食電池の形成が示唆された。また、健全部と腐食部の寒天培地平板法による培養試験から、さびの成長に微生物の関与が示唆され、さびの成分分析によりマンガン集積が高くなっていることと併せて、鉄バクテリアの関与の可能性を指摘した。
- (3) また、詳細調査では、施設管理者からの聞き取りや既往の設計・施工資料など、事前調査から得られる情報が、腐食原因特定の際に有用となる。具体的には、①漏水履歴、②構造を一にした施設の共通した変状の有無、③立地条件・施設周辺の土壌条件の類似性、④施工年度などである。今回の調査では、これらの情報が、SP の腐食原因解明や、その腐食がほぼ同一原因であるとの診断を可能とした。

おわりに

近年、農業用パイプラインにおいては、C/S マクロセルと見られる外面腐食による漏水の事例が報告されている。また、今後、腐食による影響として、管口径によっては、漏水に至らずとも内面腐食(錆こぶ等)による断面阻害が通水機能を低下させる可能性も考えられる。

金属(鋼)は、自然界で酸化物等の形で存在し、エネルギー投入により製錬した結果得られるものであり、化学的には不安定な状態といえる。このため、元の安定な形(錆)へ戻ろうとすることは自明である。対象物の性能維持・長寿命化とは、これを遅延あるいは防止する技術である。

鋼材の腐食は、農業分野のほか、古くより建築、橋梁、水道、機器・装置など多くの分野で対象物の機能低下の重大な要因とされ、数多くの調査・研究が行われてきている。「さび」の発生と進行は、材質が同じであっても、使用される条件や置かれる環境条件によってさまざまな形態を示す。

今回実施した調査結果ならびに調査手法が、今後、類似する農業用パイプラインの鋼管の腐食原因推定に有益な材料となり、各現場で検証が積上げられ、農業水利施設の機能診断や長寿命化における技術の高度化の一端に貢献できれば幸いである。

なお、本報は、北海道開発局が所管する国営造成土地改良施設でのストックマネジメント技術高度化対策事業の一環として実施された内容の一部を紹介させていただいたものであります。この調査の実施ならびに発表の機会を与えて下さいました、北海道開発局担当各位ならびに調査のご協力をいただきました施設管理者の各位に対し深く謝意を表します。

参考文献等

- 1) 土地改良事業計画設計基準・技術書 P338
- 2) (社)農業土木事業協会；農業水利施設の機能保全の手引き パイプライン、平成 21 年 8 月、P24
- 3) ドイツ規格協会(ドイツ工業規格)
- 4) 関東農政局土地改良技術評価委員会；鋼管腐食防止対策指針-C/S マクロセル腐食対策について、平成 8 年 1 月
- 5) 農林水産省関東農政局利根川水系土地改良調査管理事務所；農業水利施設ストックマネジメントマニュアル参考資料編、平成 19 年 3 月
- 6) JIS G 3451 水輸送用塗覆装鋼管の異形管 STW41(B) (現 STW400(B))
- 7) 防食腐食協会；エンジニアのための微生物腐食入門、平成 16 年 2 月 25 日
- 8) 日本ダクタイル鋳鉄管協会；埋設管路の腐食原因とその防食について JDP A T 11