

農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル
(鋼管等腐食対策編) (案)

令和2年3月

農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室

まえがき

新たな土地改良長期計画（平成 28 年 8 月 24 日閣議決定）では、農業水利施設について「インフラ長寿命化基本計画に基づき、機能診断・保全計画の策定の加速化、機能診断結果や補修履歴等の施設情報の共有化、新技術の開発と現場への円滑な導入等を推進」が改めて位置づけられたところです。今後、国営土地改良事業等で機能保全対策が本格化するに伴い、既存の水利ストックを活かす補修・補強工事に関する技術指針の迅速な整備や技術支援等に対する各方面からの要請に応じていく必要があることから、農業用鋼管等（ダクタイル鋳鉄管、ステンレス管を含む）の管路の腐食に対する対策の実施に当たり、腐食環境や腐食状態の把握、対策の要否判定、防食工法の選定及びモニタリング方法に関する技術図書として、本書を策定しました。

本書は、施設に生じている腐食機構の特定及び腐食環境や腐食状態を把握する各種調査、また、対策の要否判定及び防食工法選定の考え方、各種防食工法の設計・施工・モニタリングについて取りまとめたものです。策定に当たっては、九州農政局土地改良技術事務所において、平成 29 年度から鋼管等の腐食に対する防食工法の施工に資するマニュアル策定に向け、学識経験者による技術検討委員会を設置して技術的な審議を重ねて参りました。

本書の策定に当たっては、技術検討委員会の指導・助言の下、農業用鋼管等の腐食や補修材料・工法等に関する研究論文、他分野の鋼管や鋼構造物における規定及び既存の技術図書等を参考に取りまとめておりますが、農業用鋼管等の腐食深さと腐食範囲（腐食分布）を指標として構造性能を評価する手法は一般化されていないことから、腐食範囲の指標を目視等で定性的に判断し決定するものとしています。このことから、本書の記載事項は、現時点で得られている知見を基に取りまとめたものであり、今後、本書による補修等の実態に基づいた知見を積み重ねつつ、新技術・新材料の開発なども踏まえた持続的な研究・開発の成果を得ながら、段階的に整備、充実を図っていくべきものと考えており、将来的な基準化に繋げていきたいと考えております。

この場を借りまして、本書の策定にご協力頂いた検討委員及び幹事各位、並びに関係者の全ての方々に対して深く感謝の意を表します。

技術検討委員会に参画された委員は次のとおりです。

【技術検討委員会】

委員長 貝沼 重信

委員 有吉 充、大槻 富有彦

（五十音順、委員のみを記載）

また今後、本書に示す腐食調査手法、対策区分の判断指標、防食工法の選定が現場で実践され、運用上の課題や新たな知見が得られれば、その内容を検討し、本書を改定していくこととしているため、関係者からご意見・ご提案をいただければ幸いです。

令和 2 年 3 月

農村振興局整備部設計課施工企画調整室長

目 次

まえがき

第1章 総則	1- 1
1.1 背景及び目的	1- 1
1.1.1 基幹的水利施設の耐用年数の超過状況と管水路の延長.....	1- 1
1.1.2 農業水利施設の突発事故.....	1- 2
1.1.3 鋼管及びダクタイル鋳鉄管における事故原因.....	1- 3
1.1.4 背景.....	1- 5
1.1.5 目的.....	1- 5
1.2 内容と適用	1- 6
1.2.1 本書の内容.....	1- 6
1.2.2 本書の適用範囲.....	1- 8
(1) 本書を適用する施設状態.....	1- 8
(2) 本書を適用する実施段階.....	1- 8
1.3 関連する基準等.....	1-10
1.3.1 農水分野.....	1-10
1.3.2 その他の分野.....	1-12
1.4 用語の定義.....	1-13
第2章 腐食の種類とその特徴	2- 1
2.1 基本的事項.....	2- 1
2.1.1 腐食の概要.....	2- 1
(1) 腐食の定義.....	2- 1
(2) 鉄の腐食.....	2- 1
2.1.2 電気化学的腐食.....	2- 4
2.2 腐食環境.....	2- 5
2.2.1 腐食環境の概要.....	2- 5
(1) 淡水環境による腐食.....	2- 5
(2) 海水環境による腐食.....	2- 6
(3) 大気環境による腐食.....	2- 6
(4) 土壌環境による腐食.....	2- 6
2.3 腐食の分類.....	2- 7
2.3.1 ミクロセル腐食とマクロセル腐食.....	2- 7
2.3.2 腐食機構の特徴.....	2- 7
(1) ミクロセル腐食.....	2- 7
(2) マクロセル腐食.....	2- 7
(3) 微生物腐食.....	2-12
(4) 電食.....	2-12
(5) 黒鉛化腐食.....	2-13
2.4 腐食速度.....	2-14
(1) 一般土壌腐食における腐食速度.....	2-14
(2) 特殊土壌腐食における腐食速度.....	2-14
(3) マクロセル腐食における腐食速度.....	2-14

第3章 詳細調査	3- 1
3.1 基本的事項.....	3- 1
3.1.1 機能診断調査・評価.....	3- 1
3.1.2 詳細調査.....	3- 4
(1) 腐食環境調査.....	3- 4
(2) 腐食状態調査.....	3- 6
(3) 防食工法検討のための調査.....	3- 6
(4) 詳細調査データの整理.....	3- 6
3.2 詳細調査の実施手順.....	3- 8
3.3 腐食環境調査.....	3-10
3.3.1 管対地電位(分布)測定.....	3-10
(1) 適用条件.....	3-10
(2) 調査要領.....	3-11
(3) 調査手順.....	3-12
(4) 判定基準.....	3-14
3.3.2 導通試験.....	3-17
(1) 適用条件.....	3-17
(2) 調査要領.....	3-17
(3) 調査手順.....	3-18
(4) 判定基準.....	3-19
3.3.3 仮通電試験.....	3-21
(1) 適用条件.....	3-21
(2) 調査要領.....	3-22
(3) 調査手順.....	3-23
(4) 判定基準.....	3-24
3.3.4 土壤腐食性調査.....	3-26
(1) 土質.....	3-26
(2) ANSI A 21.5-2010による評価.....	3-28
3.3.5 塗覆装損傷調査.....	3-35
(1) 鋼管に直流電流を通電する方法(地表面電位勾配測定).....	3-35
(2) 鋼管に交流電流を通電する方法.....	3-38
3.4 腐食状態調査.....	3-40
3.4.1 超音波法(管厚測定).....	3-40
(1) 適用条件.....	3-40
(2) 調査要領.....	3-40
(3) 調査手順.....	3-43
(4) 判定基準.....	3-43
第4章 対策工法	4- 1
4.1 基本的事項.....	4- 1
4.1.1 防食工法の目的と分類.....	4- 1
(1) 電気防食.....	4- 1
(2) 塗覆装.....	4- 1
(3) メタルタッチ切断.....	4- 1
4.2 対策工法の検討.....	4- 4

4.2.1	対策区分の判断指標	4-4
(1)	腐食深さ	4-4
(2)	腐食範囲	4-6
(3)	施設の重要度区分	4-9
4.2.2	対策区分の判断基準	4-10
4.2.3	防食工法の選定	4-12
4.2.4	腐食環境の改善	4-14
4.3	防食工法	4-15
4.3.1	電気防食（流電陽極方式）	4-15
(1)	工法概要と適用条件	4-16
(2)	使用材料	4-18
(3)	設計	4-20
(4)	施工	4-30
4.3.2	塗覆装	4-36
(1)	工法概要と適用条件	4-36
(2)	使用材料	4-38
(3)	設計	4-40
(4)	施工	4-42
(5)	ダクタイル鋳鉄管の防食工法	4-43
(6)	内面防食	4-43
4.3.3	メタルタッチ切断	4-44
(1)	工法概要と適用条件	4-44
(2)	使用材料	4-45
(3)	設計	4-45
(4)	施工	4-47

第5章	防食工法のモニタリング	5-1
5.1	基本的事項	5-1
5.1.1	モニタリングの目的	5-1
5.1.2	モニタリングの実施段階と手順	5-1
(1)	モニタリングのための事前調査	5-3
(2)	モニタリング計画の立案	5-4
(3)	モニタリングの実施	5-4
(4)	モニタリング結果の記録	5-4
5.2	防食工法に応じたモニタリング	5-7
5.2.1	電気防食（流電陽極方式）	5-7
(1)	モニタリングの項目と留意点	5-7
(2)	モニタリング方法	5-8
(3)	評価及び判定	5-8
(4)	モニタリングの頻度	5-9
5.2.2	塗覆装	5-9
(1)	モニタリングの項目と留意点	5-9
(2)	モニタリング方法	5-11
(3)	評価及び判定	5-12
(4)	モニタリングの実施時期	5-12

5.3 対策（次期）	5-13
------------	------

参考資料

① 土木工事共通仕様書（第3章施工共通事項 第14節防食対策工）	参- 1
② シートライニング材を用いた塗覆装の施工	参- 3
③ 更生工法（「管路更生局所補修工法」）	参- 9
(1) 工法概要と適用条件	参- 9
(2) 使用材料	参-10
(3) 設計	参-10
(4) 施工	参-13

巻末資料

1. 施工管理項目参考例	巻末- 1
(1) 電気防食工法（流電陽極方式）	巻末- 1
① 直接測定による出来形管理	巻末- 1
② 撮影記録による出来形管理	巻末- 1
③ 品質管理	巻末- 2
(2) 塗覆装	巻末- 2
1) ジョイントコート	巻末- 2
① 直接測定による出来形管理	巻末- 2
② 撮影記録による出来形管理	巻末- 3
③ 検査による出来形管理	巻末- 3
④ 品質管理	巻末- 4
2) 合成ゴムシート	巻末- 4
① 直接測定による出来形管理	巻末- 4
② 撮影記録による出来形管理	巻末- 5
③ 検査による出来形管理	巻末- 5
④ 品質管理	巻末- 6
(3) メタルタッチ切断	巻末- 7
① 直接測定による出来形管理	巻末- 7
② 撮影記録による出来形管理	巻末- 7
③ 品質管理	巻末- 7
2. 参考図書一覧表	巻末- 8
3. 電気防食工法の設計計算例	巻末- 9

第1章 総則

1.1 背景及び目的

全国に展開する農業用鋼管等（ダクタイル鋳鉄管、ステンレス管を含む）の管路（以降、「鋼管等」という。）は、経年的な性能の低下とともに更新時期を迎えるものが増加傾向にあり、施設の長寿命化を図りライフサイクルコストを低減させるため、腐食機構に応じた適切な長寿命化のための機能保全対策（以降「対策」という。）の実施が求められている。「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（鋼管等腐食対策編）」（以降「本マニュアル」という。）は、鋼管等の腐食に対する対策の実施に当たり、腐食環境や腐食状態の把握、対策の要否判定、防食工法の選定に関する考え方や留意すべき事項をとりまとめたものであり、鋼管等のライフサイクルコスト（以降「LCC」という。）低減や保全管理の推進を目的としている。

【解説】

1.1.1 基幹的水利施設の耐用年数の超過状況と管水路の延長

平成28年度時点での全国の基幹的な農業水利施設は約7.6千箇所、支線水路を含めた農業用排水路は約40万kmに及び基幹的農業水利施設の総資産価値（再建設費ベース）で18.5兆円 of the stock is accumulated (図1.1-1)。

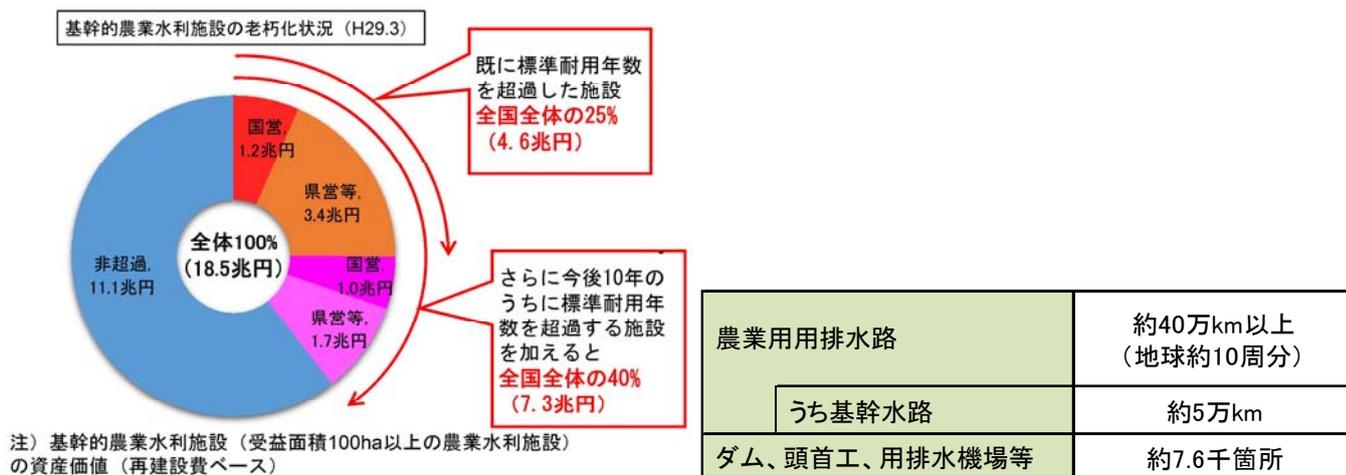


図 1.1-1 農業水利ストックの現状 (出典：H31.2 農林水産省ホームページ)

農業水利ストック情報データベースに登録（平成25年6月時点）されているパイプラインの材質は「鉄鋼系」、「樹脂系」、「コンクリート系」に大別できるが、材質ごとの施設延長割合で見ると、鉄鋼系が占める割合が高く全体の53%（鋼管が6%、ダクタイル鋳鉄管が47%）を占め、次いで樹脂系が37%（硬質ポリ塩化ビニル管20%、強化プラスチック複合管16%、ポリエチレン管1%）となっている（図1.1-2）。

小～中口径管（800mm未満）ではダクタイル鋳鉄管及び硬質ポリ塩化ビニル管の割合が高く、大口径管（800mm以上）では強化プラスチック複合管や鋼管、コア式プレストレストコンクリート管、鉄筋コンクリート管の割合が高い。

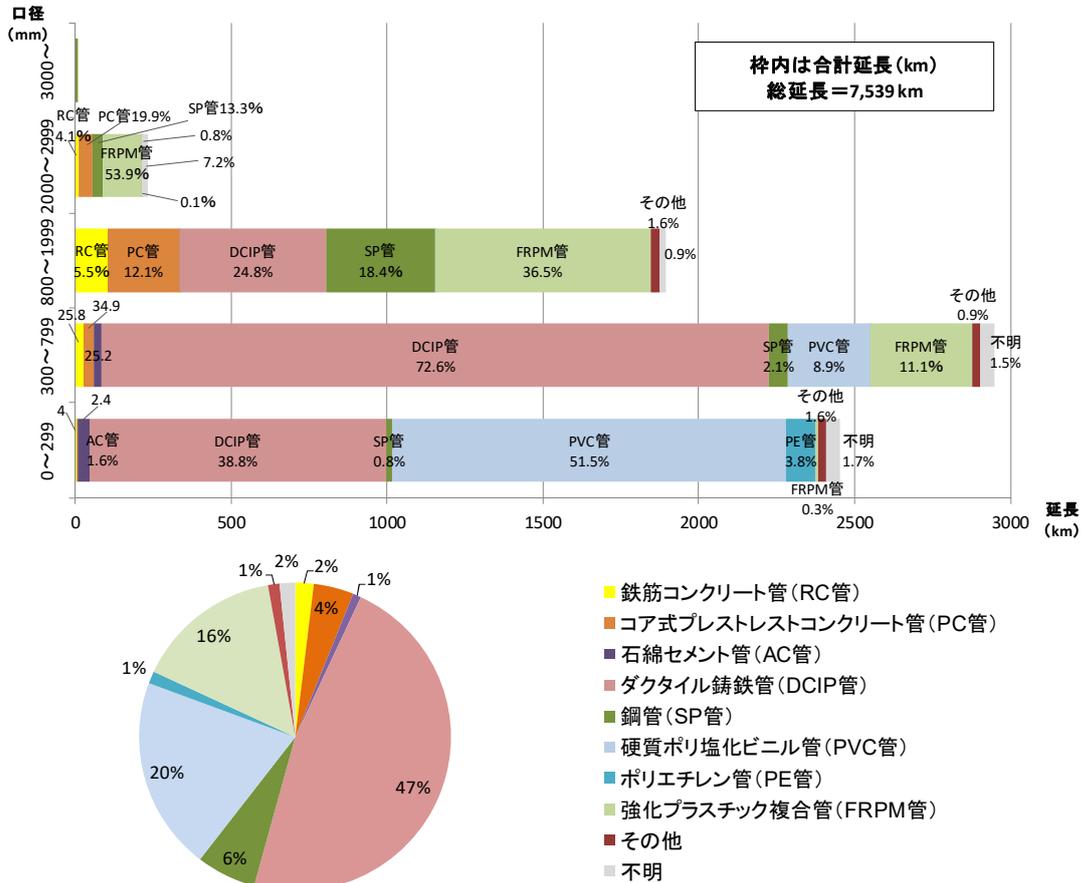


図 1.1-2 パイプラインの管種別の賦存量 (出典: H25.6 農業水利ストック情報データベース)

1.1.2 農業水利施設の突発事故

基幹的な農業水利施設は、多くが戦後から高度成長期にかけて整備されてきたことから、標準的な耐用年数を超過した施設が平成に入り急増 (図 1.1-3) するとともに、突発事故の件数も増加している。突発事故のうち、管水路の占める割合は 65% と高い。(図 1.1-4)

特に、平成 23~26 年にかけて 595 件 (内管水路 426 件で県営・団体営 332 件) から 1,378 件 (内管水路 972 件で県営・団体営 872 件) と県営事業等で造成された事故件数が急増している。この背景には県営施設で主に使用されるφ300 程度以下の小口径で管種が硬質ポリ塩化ビニル管による破損が急増しているものと考えられる。

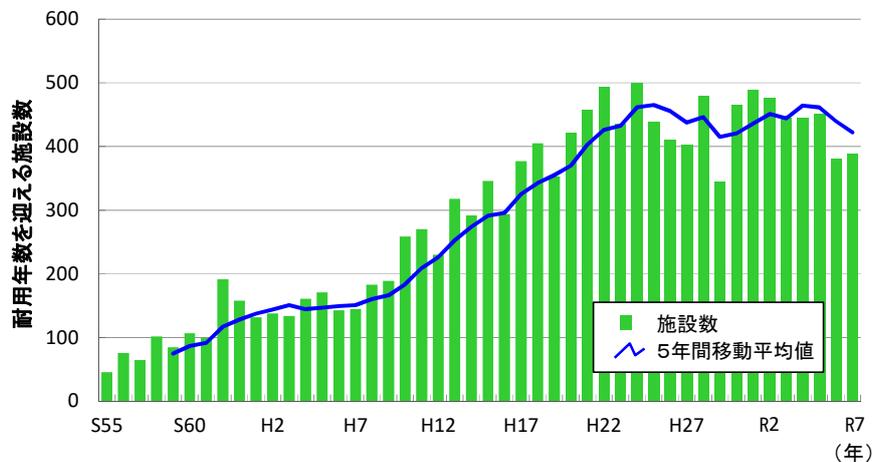


図 1.1-3 耐用年数を迎える基幹的水利施設数 (出典: 農林水産省農村振興局調べ)

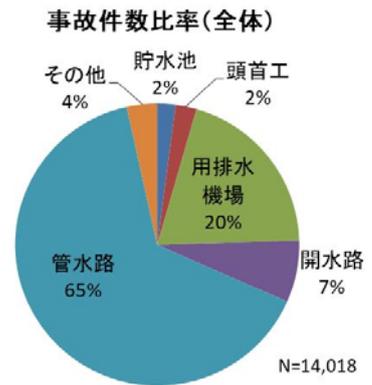
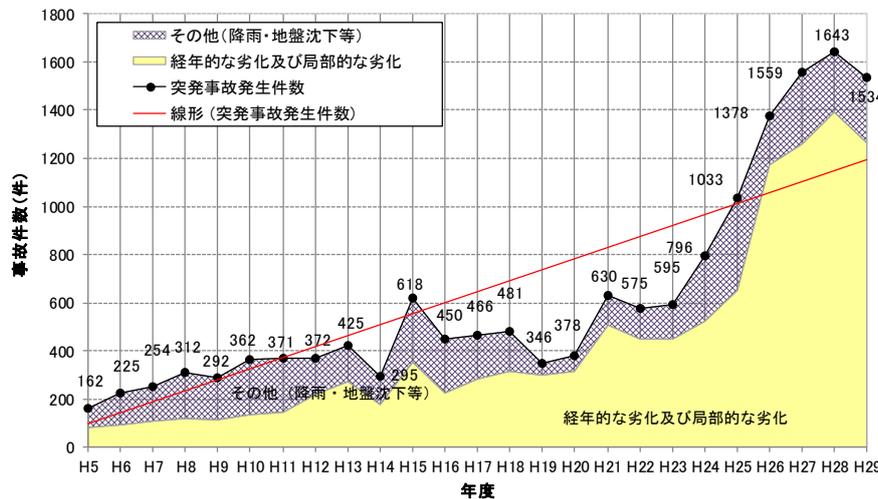


図 1.1-4 突発事故発生状況 (H5~29年度) (出典：農林水産省農村振興局調べ)

国営造成施設の管水路の管種別事故件数 (平成 21~28 年度) では、全体で 447 件 (φ100mm 以下の事故は除く) あり、比率で見ると、鋼管 (SP 管) 25%、硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC 管) 21%、コア式プレストレストコンクリート管 (PC 管) 15%、強化プラスチック複合管 (FRPM 管) 14%、ダクタイル鋳鉄管 (DCIP 管) 8%である。(図 1.1-5)

区分	管種	事故件数
鉄鋼系	DCIP 管	34
	SP 管	111
コンクリート系	RC 管	41
	PC 管	68
	AC 管	35
樹脂系	PVC 管	96
	PE 管	1
	FRPM 管	61
計		447

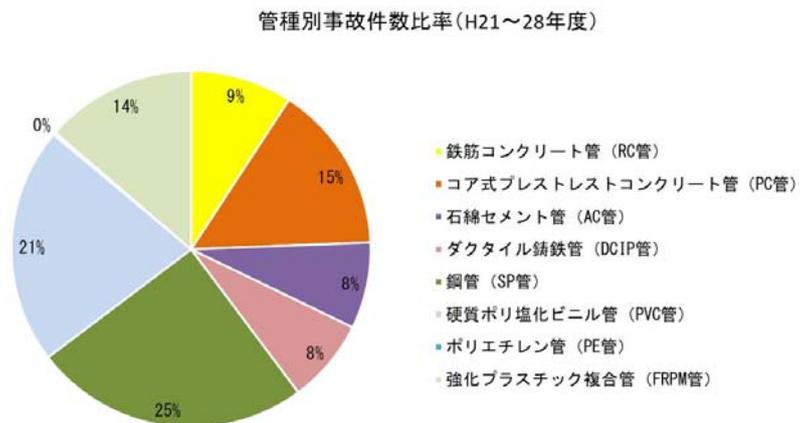


図 1.1-5 国営造成施設の管水路の管種別事故件数 (平成 21~28 年度) 比率

(出典：農林水産省九州農政局土地改良技術事務所調べ)

1.1.3 鋼管及びダクタイル鋳鉄管における事故原因

国営造成施設を対象とした突発事故調査結果 (平成 21~28 年度) (図 1.1-6) によると、鋼管の事故原因は、コンクリート/土壌マクロセル腐食 (以降、「C/S マクロセル腐食」という。) 42 件、通気差マクロセル腐食 5 件、異種金属腐食 2 件、マイクロセル腐食 1 件、その他の損傷 61 件 (内面腐食 20 件：腐食原因は、確認できていないが、小口径管路の現場溶接部に対する内面塗装が施工できないために腐食が生じた等が考えられる (内面腐食に対する対策例は「参考資料③更生工法 (管路更生局所補修工法)」に示しているため参考にされたい。なお、対策の要否は鋼管の腐食状態に応じて判断する)。経年劣化 11 件、原因不明 26 件、その他 4 件)

であり、C/S マクロセル腐食が多くを占めている。

ダクトイル鋳鉄管の事故原因は、継手損傷 7 件、通気差マクロセル腐食 6 件、マイクロセル腐食 5 件、C/S マクロセル腐食 3 件、その他の損傷 13 件（他工事による損傷 3 件、原因不明 6 件、その他 4 件）である。どちらの管も電食による事故は発生していない。（腐食の分類は P. 2-7 参照）

なお、平成 14 年度以降の鋼管等の管水路工事では、土木工事共通仕様書の規定（参考資料①参照）により、腐食性土壌に埋設する場合のポリエチレンスリーブ被覆やターミナルを設置して鉄筋と鋼管等との絶縁を確認する等の腐食対策が講じられているので、平成 15 年度以降の工事においては C/S マクロセル腐食の件数はほとんど発生していない（H21～H28 の鋼管等漏水事故 111 件中 H14 年度以降の施工事故は 1 件）。

鋼管は溶接継手構造のため電氣的に導通状態となる。一方、ダクトイル鋳鉄管は、材質の電気抵抗（ $50\sim 70\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）が鋼管（ $10\sim 20\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）に比べ、2.5倍～7.0倍程度と大きく、またゴム輪を使用しているため継手自体が抵抗体となっており、継手抵抗値は管内満水状態で $100\sim 3000\Omega$ 程度を有している。そのため管路全体としては導通状態でなく、迷走電流の影響による電食を受けにくい。また、ダクトイル鋳鉄管は鋳物でありコンクリートピット内の鉄筋との溶接は基本的にできないため、メタルタッチの発生は極めて少ない。

地下埋設のダクトイル管路に生じる外面腐食の原因は、腐食性土壌やバクテリアによる腐食が主体である。

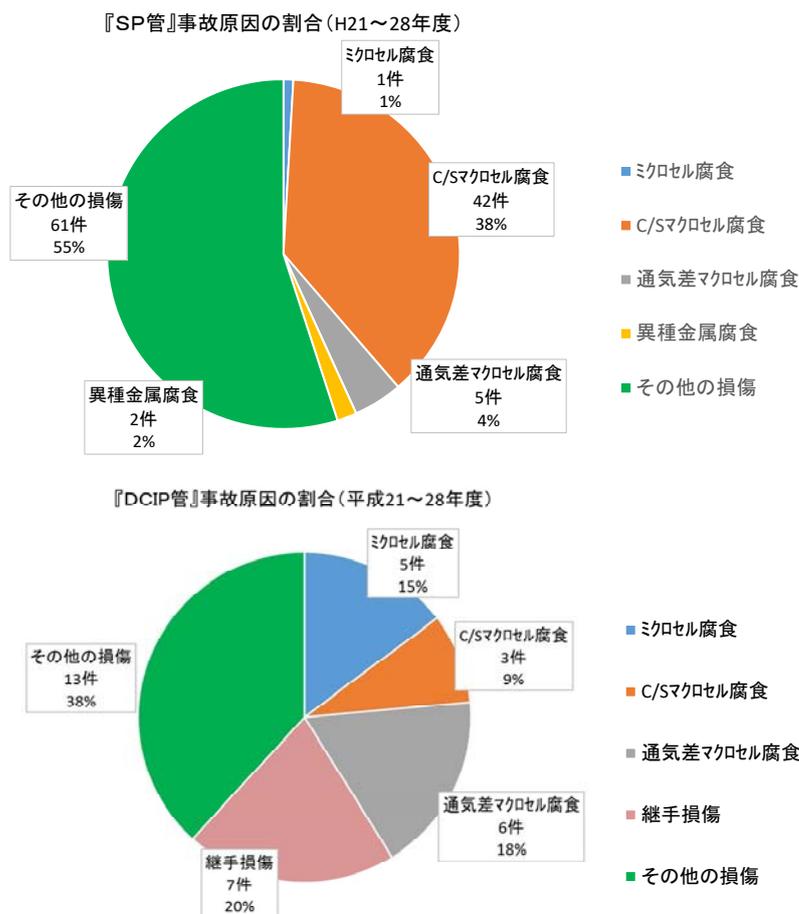


図 1.1-6 突発事故要因の割合 (平成 21～28 年度)

(出典：農林水産省九州農政局土地改良技術事務所調べ)

腐食環境下に存在しても塗覆装が健全であれば外面からの腐食は進行しにくいですが、以下に列記する施工に起因する欠陥により激しいマクロセル腐食が生じる場合があることに留意する必要がある。

【施工に起因する欠陥】

- ・配管吊降ろし時のワイヤーロープによる塗覆装の擦傷
- ・現場塗装の不具合（工場塗装と現場塗装の継ぎ目部の不良）
- ・石礫等を含んだ埋戻し土の転圧による塗覆装の損傷
- ・バックホウ等の重機やスコップ等による塗覆装の損傷
- ・造成当初からのメタルタッチ（既設鋼管等とコンクリートピット内の鉄筋の接触）
（S40～60年代には、あえて接触させている施設も多く見られた）
- ・材料にタールエポキシやアスファルトを使用した場合の養生不足による不完全な塗覆装の形成



図 1.1-7 石礫等を含んだ埋戻し土の転圧による塗覆装の損傷例

1.1.4 背景

今後、標準的な更新基準年数（参考耐用年数：鋼管等 40 年）をむかえる農業水利施設が急速に増加する一方、財政的な制約がきびしくなる等の状況を踏まえると、既設の農業水利施設には適切な対策を講じることにより、長寿命化のための適切な保全管理を実施することが求められている。特に、突発事故の 65%を占める管水路に対する取り組みは急務である。

本マニュアルでは、農業用管路の材質が「鉄鋼系（鋼管・ダクタイル鋳鉄管）」の占める割合が多いこと、突発事故要因の主要因が C/S マクロセル腐食等の外面腐食であり、適切な腐食対策を講ずることにより長寿命化が可能となることから、鋼管等を対象としている。

1.1.5 目的

本マニュアルの目的は、鋼管等の腐食に対する対策を実施するに当たり、自然条件、設計・施工条件により腐食環境が異なる施設の腐食状況を把握し、対策の要否判定や最適な防食工法を選定するための視点や考え方、留意事項をとりまとめたものであり、施設の LCC の低減や保全管理の推進に寄与することを目的としている。

1.2 内容と適用

本マニュアルは、腐食により低下した鋼管等の性能を回復又は向上させる、若しくは腐食の抑制により施設の長寿命化を図るために、施設に生じている腐食機構の特定及び腐食環境や腐食状態を把握する各種調査、また、対策の要否判定を行ったうえで検討する各種防食工法の設計・施工についてとりまとめたものである。

【解説】

1.2.1 本書の内容

本マニュアルは、腐食機構の特定や施設の対策の要否判定のための詳細調査、防食工法の設計・施工方法、防食工法実施後のモニタリング調査方法等について、関連の基礎知識と実務の進め方をまとめたものである。

本マニュアルの記載内容をより理解しやすいものとするため、『コラム』として関連する技術情報を示している。また、本マニュアルの記載内容に関連する他図書の内容の一部を参考資料として巻末に掲載する。

なお、対策区分は「農業水利施設の機能保全の手引き」によると、表 1.2-1 のように分類される。

表 1.2-1 対策区分

対策区分	内 容
要観察（継続監視）	目視により施設の劣化の進行を見極めること。
補 修	主に施設の耐久性*を回復又は向上させること。
補 強	主に施設の構造的耐力を回復又は向上させること。
改 修	失われた機能を補い、又は新たな機能を追加すること。
更 新	施設又は設備を撤去し新しく置き換えること。

*構造物の劣化に対する抵抗性

ここで、本マニュアルと「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（パイプライン編）（案）」で対象としている鋼管等の対策工法は補修・改修のいずれにも該当する「管路更生工法」、補修に該当する「止水工法」、「防食工法」がある（図 1.2-1）。

本マニュアルで扱う「電気防食」、「塗覆装」、「メタルタッチ切断」は防食工法に該当し、腐食を抑制あるいは腐食に対する耐久性を回復又は向上させるものであるため、対策区分は「補修」となる。

ただし、腐食程度が著しく、補強又は改修・更新を選定した場合は、『土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」』（以降「設計基準パイプライン」という。）や「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（パイプライン編）（案）」等を参照し、設計、施工を行う。

なお、本マニュアルは、詳細調査や防食工法の運用、対策後の施設のモニタリング調査などを通じた技術情報の蓄積、技術開発・研究の進展状況を踏まえて適宜、内容の見直しや充実を図っていくものである。

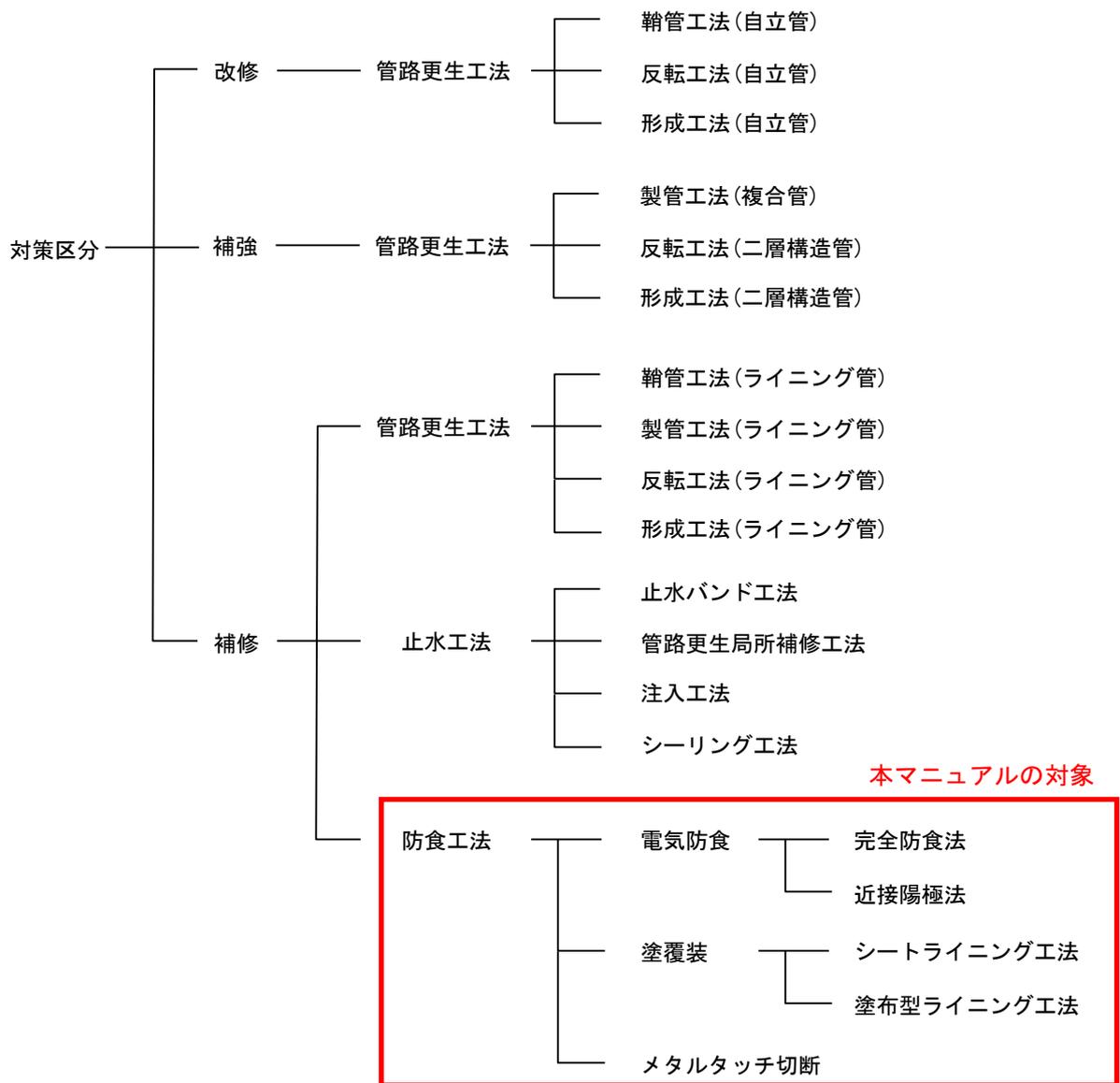


図 1.2-1 鋼管等の対策工法体系図

管路更生工法と止水工法の扱いは「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（パイプライン編）（案）」を参照。

1.2.2 本書の適用範囲

(1) 本書を適用する施設状態

本マニュアルは、変状種別が腐食と判断され、孔食による貫通孔や断面欠損（図 1.2-2）がなく構造性能を保持するための管厚が残存する鋼管等（「4.2 対策工法の検討」参照）に対して補修を行う場合、又は腐食に対する予防保全のために補修を行う場合に適用する。



図 1.2-2 断面欠損が生じたダクタイル鋳鉄管の例

(2) 本書を適用する実施段階

本マニュアルは、農業水利施設のストックマネジメントにおける基本サイクル（図 1.2-3）に示す各プロセスのうち、パイプラインにおける③機能保全計画の策定及び⑤対策工事の実施設計、補修（施工）、対策後の施設のモニタリング時において参考とする。

なお、実施設計段階とは、対策工事の設計・施工のために必要となる施設状態や施設使用環境等の施設情報の把握と、それに応じた対策の要否判定や対策方針・範囲の検討、防食工法の選定、設計等をいう。

ストックマネジメントによる機能保全の各プロセスにおける本マニュアルと「農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」（平成 28 年 8 月）」との関連を図 1.2-4 に示す。

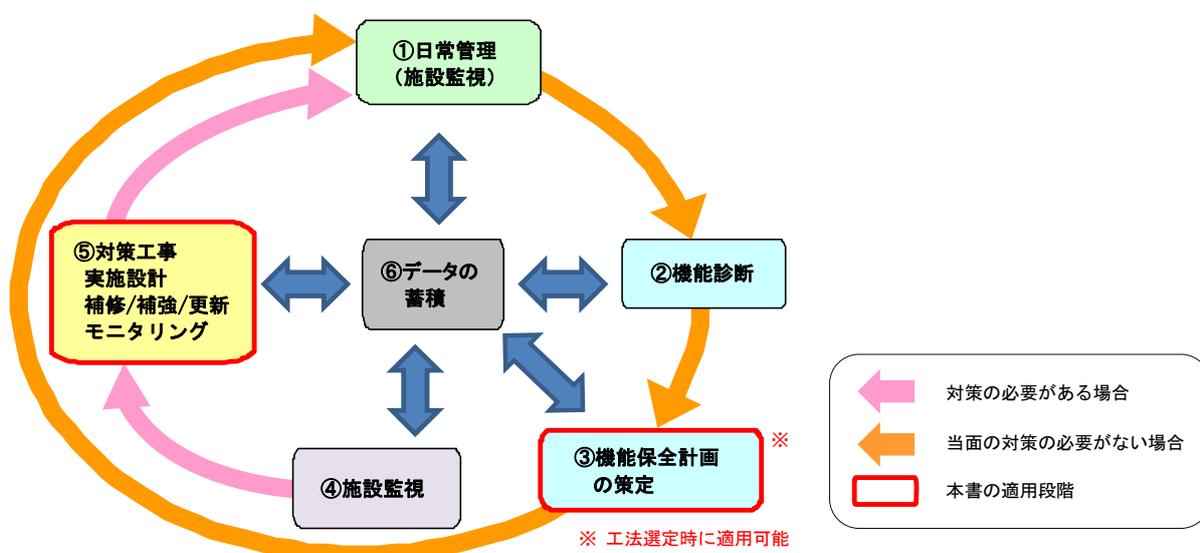


図 1.2-3 農業水利施設のストックマネジメントの基本サイクル

		機能保全の手引き (パイプライン編)	補修補強工事に関するマニュアル (鋼管等腐食対策編)
主な適用段階		保全計画 策定段階	保全計画 策定段階 対策工事 実施段階
日常管理・施設監視		△	—
ストックマネジメントの概要 (性能管理、性能指標、性能低下の概要等)		△	—
変状の特徴		△	—
機能診断(調査・評価) (劣化要因推定、現地調査、健全度評価等)		○	—
機能 保全 計画 策定	劣化予測	○	—
	管理水準の設定	△	—
	対策工法検討	△	○
	コスト算定・比較 機能保全計画策定	△	—
実施 設計	腐食機構特定、腐食状態把握のための詳細調査		○
	工法概要、工法選定		○
	設計		△
対策 工事	品質管理、施工管理 出来形管理		○
	モニタリング		○

○：具体的な手法等について記載 △：基本的概念や留意事項等について記載

図 1.2-4 「農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」(平成 28 年 8 月)」との関連

1.3 関連する基準等

本マニュアルに関連する基準としては、設計基準パイプラインがあり、これには腐食の概念や分類、発生要因、調査・評価方法の概要が示されている。

本マニュアルは、基準に準拠したうえで関連図書とこれまでのストックマネジメント技術高度化事業の取り組み事例を参考にとりまとめている。

【解説】

腐食、防食に関連する基準等は、鋼管等の他に、現場条件（埋設管、圧力管）が類似している水道分野と電食・電気防食に関連する電気分野において策定されているものがある。

1.3.1 農水分野

農水分野の関連する基準「土地改良事業計画設計基準」における腐食・防食に係る記述の変遷を表 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 土地改良事業計画設計基準における腐食・防食の記述

図書名	腐食・防食に係る記述
土地改良事業計画設計基準 設計水路工 (その2) パイプライン (昭和52年10月)	<ul style="list-style-type: none"> ・金属管では迷走電流による腐食の問題があることが示され、電気防食法として主に以下の工法について記載された。 (1) アスファルト系、コールタール系等の塗料を用いた管の被覆 (2) 絶縁継手により鋼管の電気抵抗を大きくして絶縁する方法 (3) 強制排流法 (現在の外部電源法) (4) 低電位金属体の接続埋設法 (現在の流電陽極法)
土地改良事業計画設計基準 設計水路工 (その2) パイプライン (昭和63年3月)	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食の概念と金属管の内面防食、外面防食に関する考え方が記載された。 ・内面防食では、使用材料 (タールエポキシ樹脂塗料、コールタールエナメル、モルタルライニング) と該当する規格が示された。 ・外面防食では、下記の要求性能と使用材料 (ダクタイル鑄鉄管では瀝青質系塗料、鋼管ではアスファルトやコールタールエナメル等の塗料とビニロンクロス、ガラスクロス等の塗覆材と合せたもの)、該当する規格が示された。 <p>【外面防食の要求性能】</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 吸水性、透水性が小さく電気絶縁性が大きいこと (2) 機械的強度があり、運搬中、埋設中の損傷に対して抵抗があること (3) 金属管に対して十分な密着性があり、剥がれにくいこと (4) 耐薬品性があること (5) 上記(1)～(4)の性能が長期にわたり安定していること
土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」(平成10年3月)	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食の分類 (ミクロセル腐食、マクロセル腐食、電食) と解説が示され、腐食速度が速いマクロセル腐食を重視する必要性が記載された。 ・解説の中では、鋼管等で想定される腐食の発生要因 (コンクリートピット貫通部におけるメタルタッチ等) が具体的に示されている。 ・腐食、防食調査として、調査項目と標準調査間隔、評価方法が示された。記載された調査項目は以下のとおり。 土質・地下水位調査、土壌採取・分析、土壌抵抗率、土壌 pH、管対地電位、地表面電位勾配、レール対地電位、レール対管電位差、仮通電試験、仮排流試験、他構造物の電位、干渉調査 ・腐食対策について、基本となる「塗覆装」、「絶縁」、「電気防食」の分類と概要が記載された。また、腐食防止対策の選定手順が示された。 ・外面塗覆装として、一般路線は、アスファルト塗覆装を主体、それ以外の路線は、現場条件や施設重要度に応じて塗覆装と電気防食の併用を検討と記載されており、その場合の塗覆装はアスファルト、コールタールエナメル、ポリエチレン、ポリウレタンから選定することが示されている。
土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」(平成21年3月)	<ul style="list-style-type: none"> ・基本的には上記 (平成10年3月版) と同様の記載である。 ・腐食、防食を含めたパイプラインの補修・補強に係る概念が記載された (ただし、工法選定や設計手法に係る記載はない)。 ・外面塗覆装として、プラスチック被覆 (ポリエチレン、ポリウレタン) のみ記載。

1.3.2 その他の分野

他分野における腐食・防食に係る記述の概要を表 1.3-2 に示す。

表 1.3-2 関連する基準等

分野	資料名	記載概要等	発行元	制定年月
水道	マクロセル腐食防食指針 (WSP045-2008)	・設計・施工上の技術的事項 (メタルタッチ、塗覆装等) を記載。	日本水道鋼管協会 (WSP)	H20. 3
	水道用塗覆装鋼管の電気防食指針 (WSP050-2017)	・地中埋設に使用する水道用塗覆装鋼管及び水道用塗覆装鋼管の異形管等の電気防食法について記載。	日本水道鋼管協会 (WSP)	H29. 9
	長寿命形水道用ジョイントコート (WSP012-2014)	・水道用塗覆装鋼管ジョイントコートに関する規格を記載。	日本水道鋼管協会 (WSP)	H26. 10
	農業用プラスチック被覆鋼管 (WSP A 101-2009)	・農業用鋼管を対象にプラスチック被覆に関する規格を記載。	日本水道鋼管協会 (WSP)	H21. 3
	農業用水用 ダクタイル鉄管管路 設計と施工	・ダクタイル鉄管管路の設計と施工上の基本的事項について記載。	日本ダクタイル鉄管協会	H30. 2
電気	電食防止・電気防食ハンドブック	・電食の機構、調査、計測手法、防食工法、健全性の評価手法等について記載。	電気学会・電食防止研究委員会	H23. 1
	電食防止・電気防食用語辞典	・電食防止、電気防食に係る用語の定義や解説を記載。	電気学会・電食防止研究委員会	H25. 8

1.4 用語の定義

本マニュアルで使用している各用語の定義を以降に示す。

表 1.4-1 用語の定義 (1/5)

区分	用語	定義
あ	アノード(陽極)	酸化が起こる電極又は金属の場所を指す。3)
	硫黄酸化細菌	通気性に富んだ pH 2~4 の酸性土壌・油田・硫黄・鉱床・汚水等の中で繁殖しやすい。 この細菌は、元素硫黄 (S) 又は硫化鉄を硫酸にするため、硫黄酸化細菌の活性が高い土壌中に埋設された配管は、鉄酸化細菌と同様に、極めて激しく腐食する。また、硫黄酸化細菌は鉄酸化細菌と同様の環境中で繁殖しやすいため、共生することが多い。
	イオン化傾向	溶液中で金属がイオンへのなりやすさ(腐食のしやすさ)の相対尺度を表す。
	維持管理	構造物の供用期間において、構造物の性能を所要の水準以上に保持するための全ての行為。2)
か	外面腐食	埋設鋼管等の場合、埋設土中部で生じる腐食が外面腐食であり、管の内面で生じる腐食は内面腐食。4)
	外部電源方式	交流や太陽電池等、外部から受電した電源を直流に変換し、地中や水中に設けた不溶性電極から防食電流として防食対象施設に供給し、腐食を抑制するシステム。
	カソード(陰極)	還元が起こる電極又は金属の場所を指す。3)
	管対地電位	埋設配管の外面が土壌に接している状態での照合電極に対する電位。4)
	管路更生工法	既設管にひび割れや破損、腐食等が発生し、耐荷性、水密性、通水性、耐久性が低下している場合、又は継手部の水密性が全面的に低下している、若しくは低下するおそれがある場合に、既設管内面から新たな管を構築し、管路の耐荷性、水密性、通水性等を回復又は向上させる工法の総称。施工方法によって「反転工法」、「形成工法」、「製管工法」、「鞘管工法」に大別される。5)
	含浸	多孔質に液状物質をしみこませること。更生材の場合は、硬化性樹脂を含浸用基材(ガラス繊維、有機繊維等)にしみこませる工程。5)
	機能保全	全施設又は施設系の機能が失われたり、性能が低下することを抑制又は回復すること。1)
	機能保全コスト	施設を供用し、機能を要求する性能水準以上に保全するために必要となる建設工事費、補修・補強費等の経費の総額。1)
	機能保全計画	性能指標や健全度指標について管理水準を定め、それを維持するための中長期的な手法をとりまとめたもの。1)
機能保全対策	機能保全計画に基づく工事等のこと。1)	

表 1.4-1 用語の定義 (2/5)

区分	用語	定義
か	供用年数	施設を供用する年数。1)
	局部電池	金属が土壌等の電解質に接する環境に置かれた際に、金属表面の組成の不均一などによって微視的なアノードとカソードが無数に生じている状態。4)
	局部腐食	金属が土壌等の電解質に接する環境に置かれた際に、金属表面の腐食が全面均一に進行せず、局所的に集中して生じた腐食。4)
	近接陽極法	防食対象配管が構造物やコンクリート中の鉄筋等、防食電流が分流する要素と電氣的に絶縁できない場合に行われる電気防食法。4)
	形成工法	熱又は光等で硬化する樹脂を含浸させた材料を既設管内に引き込み、空気圧又は水圧等で拡張・圧着させ、加圧拡張したまま温水、蒸気、光等で圧着硬化する工法、又は、熱可塑性樹脂のパイプを既設管内に引き込み、空気圧、蒸気圧等で拡張・圧着させ、加圧拡張したまま冷却固化する工法等。5)
	嫌気性バクテリア	空気又は酸素を必要としない状態で活動するバクテリアの総称。
	孔食	局部腐食が孔状に深く進行する腐食。
さ	再対策	長寿命化対策後の施設に対して行う補修・補強・改修・更新の各行為。5)
	錆 (さび)	金属表面に生成する腐食生成物。4)
	酸化還元電位	物質の酸化力又は還元力の強さを示す尺度。
	施設の機能	施設の設置目的又は要求に応じて施設が果たすべき役割、働きのこと。1)
	施設監視	施設監視計画等に基づき行う施設の監視(施設管理者及び施設管理委託者(以降、「施設管理者」という)は通常、日常管理の一環として行う)。5)
	自然電位	金属が与えられた環境中で実際に示す電位。
	シャント抵抗器(分流器)	正確な抵抗を持った標準抵抗器で電流測定に用いる。
	照合電極	金属の絶対的な電位は測定できないので基準となる電極を用いて電位を測定する。 このときに用いる電極が照合電極又は基準電極。4)
	初期欠陥	施設の計画・設計・施工に起因する欠陥。1)
	性能低下	経時的に施設の性能が低下すること。1)
	全面腐食	金属表面全面にほぼ一様に生じる腐食。4)
	損傷	偶発的な外力に起因する欠陥。1)

表 1.4-1 用語の定義 (3/5)

区分	用語	定義
た	耐用年数 (耐用期間)	施設の水利用性能、水理性能、構造性能が低下することなどにより、必要とされる機能が果たせなくなり、当該施設が供用できなくなるまでの期間として期待できる年数。1)
	地表面電位勾配	地中を流れる地電流により、地表面に生じた電位差。
	長寿命化	施設の機能診断に基づく機能保全対策により残存の耐用年数を延伸する行為。1)
	長寿命化対策	施設の長寿命化のための機能保全対策。5)
	抵抗	電流の流れにくさを表す。単位は Ω で表す。
	抵抗率	単位面積、単位長さ当たりの電気抵抗をいい、 $\Omega \cdot \text{cm}$ 又は $\Omega \cdot \text{m}$ で表す。4)
	鉄細菌	主としてFe・Mn等を含んだ井戸水・泉水・湧水等の地下水に多く繁殖し、pH 6~8の中性環境で最も活性が高い。鉄細菌は $\text{Fe}(\text{OH})_2$ を溶存酸素によって酸化し、 $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{FeOOH}$ 等からなる錆こぶを形成し、酸素濃度差電池の作用により錆こぶの下の腐食を促進する。
	鉄酸化菌	通気性に富んだpH 2~4の硫酸酸性土壌中で繁殖しやすい。この細菌は、 Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化する。この時生成する $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ は加水分解され、硫酸を生成する。このため、鉄酸化細菌の活性が高い土壌中に埋設されている配管は、生成した硫酸により極めて激しく腐食する。
	電圧	回路に電流を流すために必要な電氣的圧力。単位はVで表す。4)
	電位	金属が有する電氣的なエネルギー。単位はV(ボルト)で示す。
	電極	電解質に接触するように設置された伝導体を指す。3)
	電解質	電場で泳動するイオンを含む化学物質。 物質を水に溶かしたとき、陽イオンと陰イオンに電離する物質で、電気を通しやすい性質がある。
	電流	電気の流れる量を電流。単位はA(アンペア)で表す。
	電流密度	単位面積当たりの電流値。単位は A/m^2 で表す。4)
	塗覆装	鋼管の外表面が直接土壌と接しないよう施される絶縁性の被覆。
	土壌杖	長さ1m程度の土壌抵抗率を測定する杖状の治具で、土中に押し込んで測定する。
土壌腐食	土壌中で起きる金属の腐食の総称。	
な	熱硬化性樹脂	加熱すると重合を起こし、高分子の網状構造を形成して硬化する合成樹脂。更生材に使用される樹脂には、不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂等がある。5)

表 1.4-1 用語の定義 (4/5)

区分	用語	定義
は	反転工法	熱又は光等で硬化する樹脂を含浸させた材料を、既設管内に反転加圧させながら挿入し、既設管内で加圧状態のまま樹脂を硬化させることで管を構築する工法。反転挿入には、水圧又は空気圧等によるものがあり、硬化方法も温水、蒸気、温水と蒸気の併用、光等がある。5)
	微生物腐食	土中又は水中に生息する微生物の代謝作用によって生成された腐食物質によって発生する腐食。
	ピンホール	塗装や被覆などの防食層の欠陥の一つで、金属素地まで貫通した微細な孔を指す。
	腐食	環境との相互作用の結果生じる材料の劣化を指し、通常、材料は金属を指す。3)
	腐食速度	腐食が進行する速度、通常、mm/y(年間腐食速度)で表す。3)
	腐食電流	腐食電池回路内を流れる電流。
	腐食度	一定期間における腐食の平均進行速度。4)
	プローブ	埋設された塗覆装鋼管の腐食の程度、又は電気防食の効果を定量化するために用いられる表面積が既知の金属サンプルで、クーポン(coupon)とも呼ばれる。 プローブは塗覆装鋼管の損傷(欠損)部で、鋼面が直接土壌等の電解質と接している部位を模擬している。
	分極	金属が土壌等の電解質との間の電流の流れに起因して起こる電位の変化。3)
	変状	初期欠陥、損傷、劣化を合わせたもの。1)
	pH	水素イオン濃度を表す数値。4)
	防食	金属が腐食するのを防止すること。4)
	防食電位	金属が腐食するのを防止するために必要な構造物対電解質電位。 3) 4)
防食電流	電気防食において防食電位を保つために防食対象となる金属体に対し流すべき電流。4)	
ま	迷走電流	金属本体上で生じる腐食電池回路以外から流れる電流。3)
や	要求性能	施設や工法が果たすべき機能や目的を達成するために必要とされる性能。1)
ら	ライフサイクルコスト (LCC)	施設の建設に要する経費に、供用期間中の運転、補修等の維持管理に要する経費及び廃棄に要する経費を合計した金額。1)
	硫酸塩還元菌	嫌気性かつ中性環境の土壌中で菌の代謝作用により硫酸イオンを硫化物イオンに還元し金属の腐食を促進させる細菌。3)

表 1.4-1 用語の定義 (5/5)

区分	用語	定義
ら	流電陽極方式	土壌中など電解質中の防食対象金属より自然電位が卑(マイナス)な金属(流電陽極)と接続し、防食電流として防食対象金属に流し、腐食を抑制させるシステム。4)
	劣化	立地や気象条件、使用状況(流水による浸食等)等に起因し、時間の経過とともに施設の性能低下をもたらす部材・構造等の変化。1)

用語の定義 参考文献

- 1) 農業農村整備部会技術小委員会：農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」、平成 28 年 8 月
- 2) 土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】、平成 25 年 10 月
- 3) 電気学会・電気防食研究委員会：電食防止・電気防食ハンドブック、平成 23 年 1 月
- 4) 日本水道鋼管協会：WSP 水道用塗覆装鋼管の電気防食指針 WSP 050-2017、平成 29 年 9 月
- 5) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル(パイプライン編)(案)、平成 29 年 4 月

第2章 腐食の種類とその特徴

2.1 基本的事項

腐食は、金属材料が環境条件により化学的あるいは電気化学的反応により表面から消耗する現象であり、鋼管等の場合、土壌中に含まれる水分を介した電気化学的腐食が生じる。

埋設鋼管等の場合、施設の置かれた環境により異なる腐食機構が存在し、発生要因から自然腐食と電食に大別され、自然腐食は全面腐食（マイクロセル腐食）と局部腐食（マクロセル腐食）に大別される。

【解説】

2.1.1 腐食の概要

(1) 腐食の定義

腐食とは、金属がそれを取り囲む環境の物質と化学的あるいは電気化学的に反応して、表面から消耗したり金属以外の物質に変わることによって金属が失われていく現象である。

化学的腐食は水分を伴わない腐食（乾食）で、高温の空気あるいは反応性ガスによる酸化の腐食をいい、電気化学的腐食は主に土や水のような電解質を介在する腐食（湿食）をいう。

(2) 鉄の腐食

自然界の鉄は、酸化した“錆”（酸化鉄）の状態では鉄鉱石として存在し、この鉄鉱石を精錬（酸素を失う：還元）して“鉄”として使用している。鉄を放置すると水（水が溶けた酸素を含む）に接することで腐食（水と酸素と結合：酸化）して、最も安定した状態（酸化鉄）に戻ろうとする。この現象が腐食である。図 2.1-1 にその機構を示す。

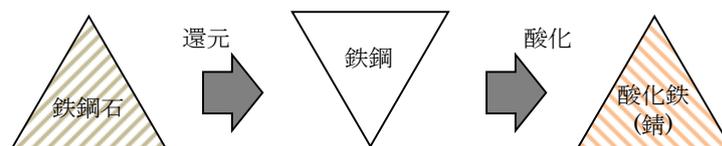


図 2.1-1 鉄の還元(精錬)と酸化(腐食)の関係

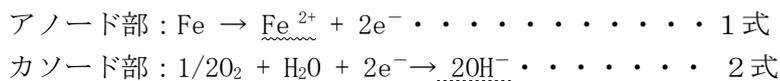
酸素と水が存在する環境で鉄が腐食するという現象は、電気化学的な機構によって起こる金属のイオン化反応である。この場合、電子を放出し腐食する側をアノード、電子を受け取り防食される側をカソードという。

なお、自然界で不安定な鉄が、pH（水素イオン濃度）の変化によって腐食しない領域がある。鉄の腐食は、pH10 以上になると腐食速度は急激に減少し、pH12 以上のアルカリ領域では強固な不動態被膜の形成により腐食は進行しない。pH4～10 程度の領域では、腐食速度にほとんど変化はないが、pH4 以下の酸性領域では、水素イオン濃度が溶存酸素濃度より高くなるため水素発生型腐食が生じ、腐食速度が著しく増大する。

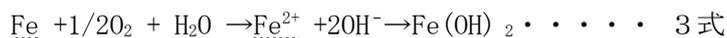
【コラム】 鋼管等の腐食反応

鋼管等は様々な環境の中に埋設されるため、環境の違いによる電位差から逃れることは出来ない。鋼管等の鋼材表面は、材料特性や土壌環境の差異により不均一であり、この結果、同一金属表面に電位差が異なるアノードとカソードが生じる。このアノードとカソードの電位差（電池作用）により鉄の中を電子が流れ、鉄(Fe)がイオン化(Fe²⁺)して溶け出し腐食が進行する。この際、電流は鋼管等の内部をカソードからアノードに向かい流れる（①）。また、アノードに流れた電流は電解質を通りカソードに戻る（②）。

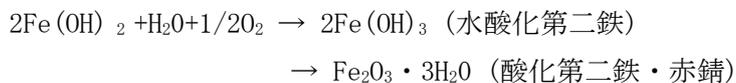
腐食反応は下式により表すことができる。



鉄鋼の腐食反応は、アノード反応とカソード反応の和となるので、水酸化第一鉄(Fe(OH)₂)が生成される。



この水酸化第一鉄は不安定であり、さらに酸化され水酸化第二鉄、酸化第二鉄（赤錆）になって沈積し、鉄鋼は減肉するとともにこれらの腐食生成物に覆われて錆層を形成する。



なお、上記3式から、酸素(O₂)又は水(H₂O)のいずれか一方でも供給されない環境では、鉄鋼の腐食は進行しないことがわかる。

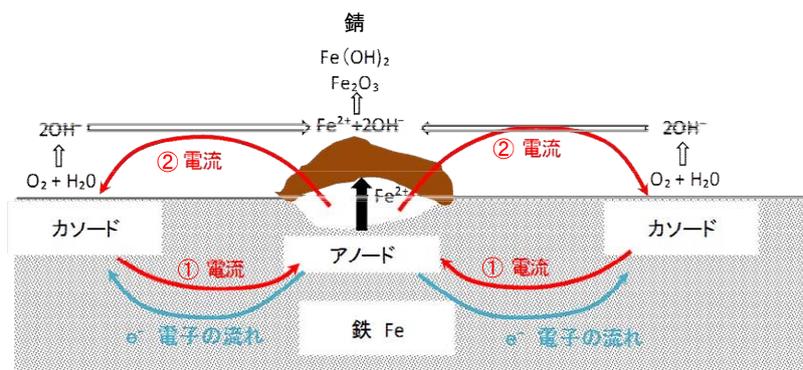


図1 腐食の電気化学的機構

【コラム】 電気の話

電圧とは電気を流そうとする「圧力のようなもの」で、単位はボルト (V) で表される。乾電池を例にとると、図 1 に示すように乾電池のプラス極は黒鉛、マイナス極は亜鉛 (Zn) と異なる二種類の金属を使用している。これらを電線で接続するとプラス側の黒鉛からマイナス側の亜鉛に向かって電流が流れる。この時の乾電池の電圧が 1.5V (ボルト) であり、流れる電流は A (アンペア) で表わされる。

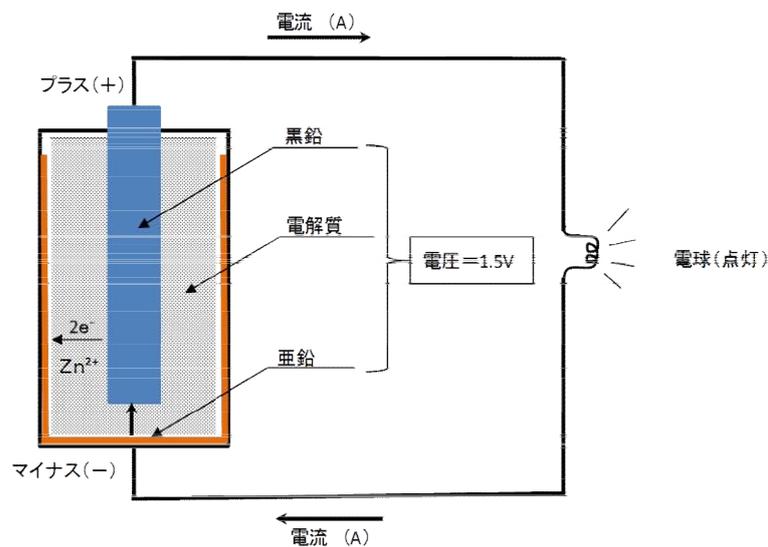


図 1 乾電池の構造図

また、電線を通れる電流は電線の電気抵抗 Ω (オーム) で決まり、抵抗が大きいほど電流は小さくなり、電圧が高いほど電流は大きくなる。この法則をオームの法則といい、電圧 : V (V) ・ 電流 : I (A) ・ 抵抗 : R (Ω) の関係は次式となる。

$$V = I \times R \dots \dots \text{【オームの法則】}$$

電気抵抗の大きさは物質の種類によって異なる。電気を通しやすい物質を導体といい、銅は特に電気を通しやすいので導線の材料として用いられる。反対に電気をほとんど通さない物質を不導体又は絶縁体といい、ゴムや FRP が挙げられる。

2.1.2 電気化学的腐食

金属には腐食しやすいものと腐食しにくいものがあり、腐食しやすい金属ほど低い電位を示す。腐食しやすい金属は水溶液中等の環境で陽イオンになる（金属イオンと電子に分かれる反応）傾向が強く、この傾向をイオン化傾向という。表 2.1-1 は、金属をイオン化しやすい順に並べたものである。

表 2.1-1 イオン化傾向と標準電極電位

大 ← イオン化傾向								
金属	Li リチウム	K カリウム	Na ナトリウム	Mg マグネシウム	Al アルミニウム	Zn 亜鉛	Fe 鉄	
電位 (V)	-3.0400	-2.9360	-2.7141	-2.3700	-1.6800	-0.7627	-0.4400	
イオン化傾向 → 小								
金属	Ni ニッケル	Sn スズ	Pb 鉛	Cu 銅	Hg 水銀	Ag 銀	Pt 白金	Au 金
電位 (V)	-0.2360	-0.1410	-0.1263	+0.3370	+0.7960	+0.7991	+1.3200	+1.5000

イオン化傾向が異なる金属を接続すると、イオン化しやすい金属から電子が放出され、マイナスの電荷を有する電子はプラス側へ移動する。図 2.1-2 の例ではイオン化しやすい亜鉛から放出された電子が銅に移動する。一方、電流はプラスからマイナスに流れるため、電子の移動とは逆に銅から亜鉛に向かって流れ、亜鉛から電解質を介して銅に流れる。

この反応を腐食・防食の観点でみると、亜鉛板に腐食電流が流れ、亜鉛板が腐食（酸化）し、銅板は防食されたことになる。このため、銅板には防食電流が流れたと考えることができる。

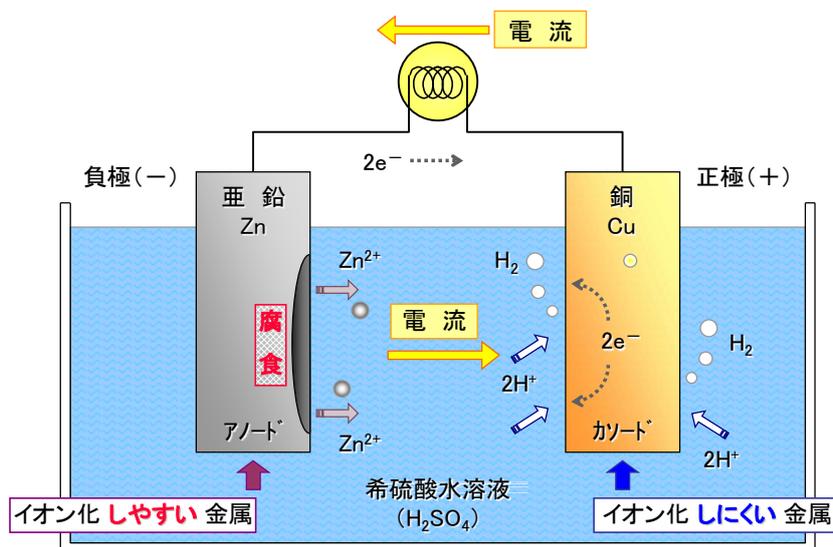


図 2.1-2 ボルタ電池

2.2 腐食環境

鋼管等鋼材の腐食は、自然界に置かれた環境によって、淡水、海水、大気、土壌の四つの腐食環境に大別される。

2.2.1 腐食環境の概要

腐食は淡水、海水、大気、土壌の四つの腐食環境において、腐食因子である水と酸素が関与し電気化学的反応により進行するものである。一方、腐食に影響を及ぼす腐食促進因子は、表 2.2-1 に示すようなものがある。

表 2.2-1 腐食促進因子

腐食促進因子	概 要
pH	・ pH が 4～10 の範囲では腐食速度は pH に依存せず、鋼材表面に到達する酸素量によって決定される。一方、pH4 以下を示す領域では、腐食速度が急激に増大する。特殊な環境を除き pH4 以下を示す領域になることはなく、腐食速度に影響を及ぼすことは少ないが、酸性土壌などでは留意する必要がある。
溶存酸素	・ 淡水、海水中の鋼材の腐食は、その環境から鋼材表面に供給される溶存酸素の供給速度により決定する。したがって、淡水、海水中の溶存酸素量が増大すると、環境に関らず腐食速度は増加する。
溶解成分	・ 塩化物などの塩類を多量に溶解している場合、その環境は良好な電解質となり鋼材の電気化学的腐食反応が生じやすくなる。また、溶解している塩類の主成分である Cl^- （塩化物イオン、以降 Cl^- と示す）は、腐食により生成される錆を多孔化するため、錆層による保護性能が低下し腐食しやすい環境となる。
流 速	・ 一般に淡水、海水中の腐食速度は、周囲の環境から鋼材表面に供給される溶存酸素の供給速度により決定される。したがって、流速の増加により酸素供給速度が増加し、鋼材表面への酸素供給量が増大するため、腐食速度は増加する。
温 度	・ 鋼材周辺の温度上昇に伴い鋼材表面への酸素の供給速度が増大し、鋼材表面におけるアノード反応とカソード反応の速度も増大するので、腐食速度は増加する。

(1) 淡水環境による腐食

淡水の代表は湖、沼を含む河川水、地下水及び水道水である。

淡水による腐食は、水中に溶けている酸素（溶存酸素）により生じる。腐食の速度は、金属表面にどれだけ酸素が供給されるか（溶存酸素濃度、流速及び表面付着物で決まる）による。また、錆こぶを伴った腐食形態が一般的であって、錆こぶの下には孔食が存在する場合が多い。なお、水質や流速、温度等、酸素拡散量に影響を与える全ての因子の作用によっても腐食の程度は異なる。

(2) 海水環境による腐食

鋼材の腐食機構は、基本的に酸素と水によって腐食が進行するので、海水環境と淡水環境で同じである。

腐食速度の違いは、鋼の表面に拡散してくる溶存酸素濃度の大小、海水の場合は塩化物イオン濃度の増加による海水抵抗の減少等により、形成されるマクロセル腐食回路を流れる腐食電流が大きくなり、腐食速度が大きくなる。

護岸等で用いられている鋼管杭や鋼矢板は、海上大気部から海底土中まで連続体である。このような構造物では、飛沫帯の腐食速度が最も大きく、干潮位直下、干満帯、海中部、海上大気部、海底土中の順で腐食速度は減少する。飛沫帯は、海水の飛沫により形成される薄い水膜が最も酸素を供給しやすい環境となるため、常時水没している海中部と比較しても非常に大きな腐食速度を示す傾向にある。ついで、干潮位直下は、酸素が供給されやすい干満帯がカソードとなり、その直下がアノードとなるマクロセル腐食の形成により大きな腐食速度となりえる。

(3) 大気環境による腐食

大気腐食においても、基本的には水と酸素の存在下で腐食が生じる。水の供給源としては、降雨によるものや大気中の水分の結露などにより鋼材表面に薄い水膜が形成された場合に進行する。その水膜の厚さが 1μ となる場合が最も腐食速度が大きいといわれている（Tomashovモデル）。

また、大気中のさまざまな汚染物質が水膜に溶解し電解質溶液を形成する。この電解質溶液の状態は、気象条件及び環境条件（汚染物質の種類、濃度等）によって変化するため、大気腐食はその地域の気象条件及び大気環境の汚染の度合いによって大きく異なる。

(4) 土壌環境による腐食

土壌腐食についても、基本的には水中と同様な腐食原理であるが、水中のような比較的均一な腐食環境と異なり非常に不均一な環境である。土質の差異による通気差や、微生物の関与、直流電気鉄道からの迷走電流等の腐食促進因子が多く、さらにはそれらが複合することで複雑な腐食形態を呈する。また、埋設配管の場合には、施された塗覆装の経年劣化や損傷程度でも漏洩にいたるまでの期間が大きく異なる。

土壌腐食に影響を及ぼす因子には、①土壌抵抗率、②pH、③酸化還元電位、④土質、⑤含水率、⑥土壌溶解成分等があるが、これらの物理的・化学的性質以外に降雨、気温、日照などの気象条件や管路の埋設条件によっても異なる。

これらのうち、土壌の腐食性に最も影響を与える因子は土壌抵抗率である。マクロセル腐食回路が形成された時に、土壌抵抗率が小さいと腐食回路の抵抗が小さくなるので腐食電流が流れやすくなり、腐食速度も大きくなる。

鋼管等に生じる主な腐食は土壌環境による腐食である。

2.3 腐食の分類

腐食は、その機構から一般的に図 2.3-1 に示すように分類される。

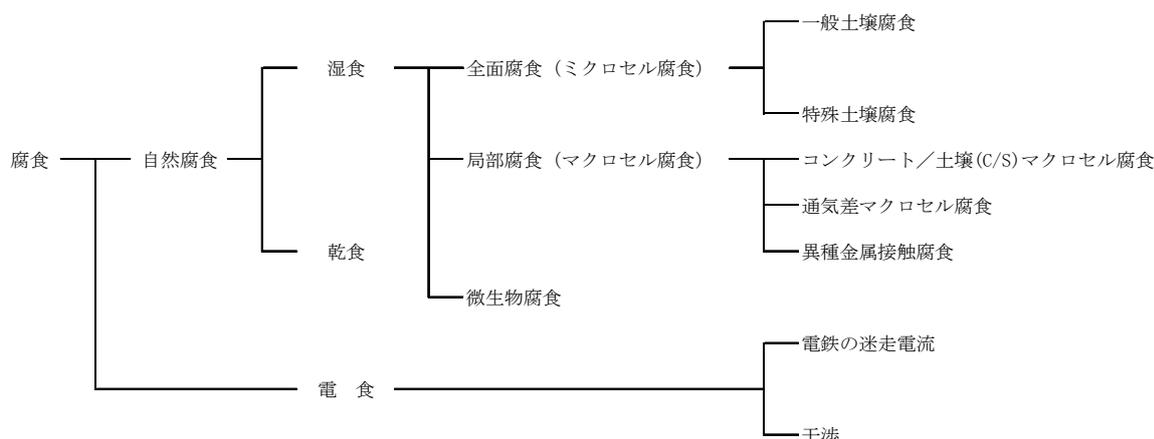


図 2.3-1 腐食の分類

2.3.1 ミクロセル腐食とマクロセル腐食

マイクロセル腐食とはマイクロ腐食電池による腐食であり、アノード (+) とカソード (-) の位置は終始移動しているため、腐食位置の特定は困難である。一方、マクロセル腐食はマクロ腐食電池による腐食であり、アノード (+) とカソード (-) の位置は固定される。

マイクロセル腐食は、環境に接触している全表面がほぼ均一に腐食していく。そのため、マイクロセル腐食の腐食速度は遅く進行を予測しやすい。一方、マクロセル腐食は、特定の部分のみがアノード (+) となって局所的に腐食する。そのため、マクロセル腐食は、マイクロセル腐食より進行が速く、様々な要因によって狭い範囲に腐食電流が集中して激しい腐食になることがある。

2.3.2 腐食機構の特徴

(1) ミクロセル腐食

1) 一般土壌腐食

一般土壌（腐植土、泥炭、淡水成粘土、海成粘土等の腐食性土壌以外の土壌）中で鋼材全面に一樣に生じる腐食を示す。腐食速度は小さく鋼管等に与える影響は小さい。

2) 特殊土壌腐食（詳細は「3.3.4 土壌腐食性調査」参照）

腐植土、泥炭、淡水成粘土、海成粘土等の腐食性土壌（以降、特殊土壌と記載）が分布する箇所では鋼材全面に一樣に生じる腐食を示す。

(2) マクロセル腐食

1) コンクリート/土壌(C/S)マクロセル腐食

コンクリートのようなアルカリ環境にある鉄の電位は-200mV 程度の電位を示すが、土壌中（中性）の鉄の電位は-400～-800mV 程度の電位^{*}を示す。

^{*}本マニュアルに示す電位は飽和硫酸銅電極基準値を示す（以降に示す電位値も同様）。

このため、両者の電位差により土壌中の鋼管等がアノード、コンクリート中の鋼管等がカソードとなるマクロセルが形成され腐食が生じる。これが、コンクリート／土壌(C/S)マクロセル腐食である (図 2.3-2)。

さらに、コンクリート中に鉄筋があり、鉄筋と鋼管等が導通している場合、カソード部の面積が大きくなり土壌中の鋼管等の腐食がさらに促進される。

腐食事例を見ると、コンクリートピットの規模にもよるが、コンクリート壁から 10m の範囲で塗覆装が不良と思われる箇所に腐食事故が発生している。一般に鉄筋の表面積は、鋼管等の塗覆装損傷部の面積に比べて非常に大きいので、鋼管等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漏水事故を起こすこととなる。なお、農業用水管路の突発事故実績によると、鋼管の漏水事故の多くは、このコンクリート／土壌(C/S)マクロセル腐食が原因になっているといわれている。

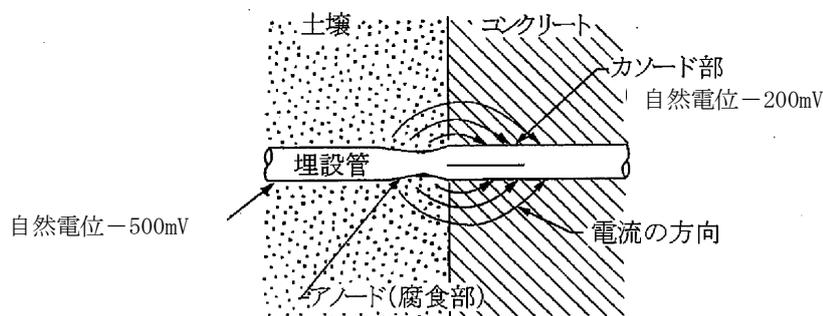


図 2.3-2 コンクリート／土壌(C/S)マクロセル腐食の機構

コンクリート／土壌(C/S)マクロセル腐食が起こりやすい環境には、ポンプ場、水管橋の橋脚、橋台、露出したスラストブロック(鉄筋入り)、コンクリート舗装部、コンクリートピット等がある。図 2.3-3 は、事例の一部である。

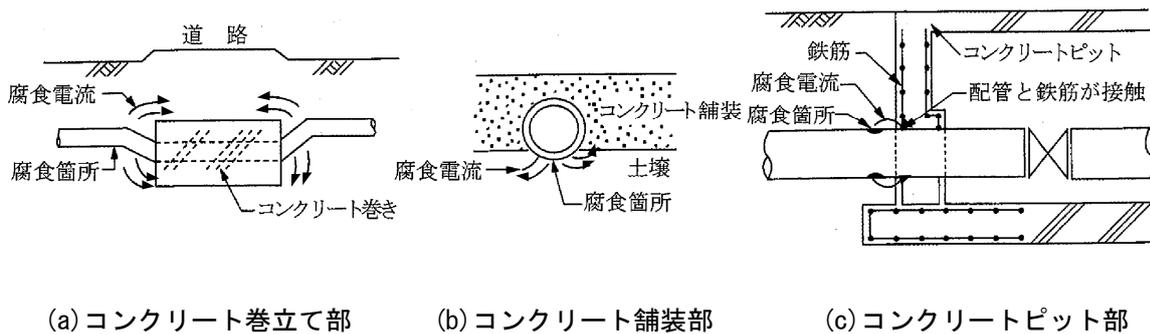


図 2.3-3 コンクリート／土壌(C/S)マクロセル腐食の例

【コラム】 C/S マクロセル腐食とメタルタッチ

鋼管が一般土壌中とコンクリート中に敷設されると、pH7 前後の中性環境にある一般土壌中の鉄の電位は-600mV 程度を示し、pH12 以上の強アルカリ環境にあるコンクリート中の鉄の電位は-200mV 程度を示し、土壌中の鋼管がアノード部、コンクリート中の鋼管がカソード部となりマクロセル腐食が起きる。このときコンクリート中の鉄筋と鋼管が図1に示すように接触(メタルタッチ)していると、アノード部となる土壌中の鋼管の腐食を助長させる。

このようなC/S マクロセル腐食の腐食速度に関係する因子として、アノード部とカソード部の面積比があり、これらの関係は図2に示される。

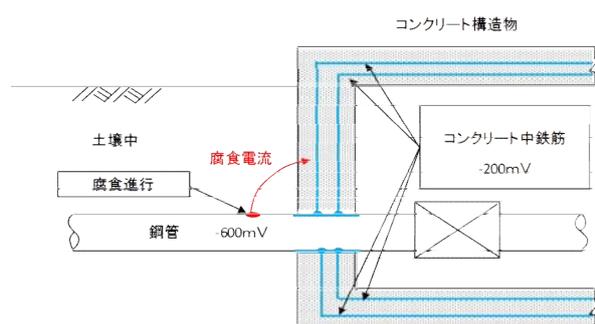


図1 鋼管とコンクリート中の鉄筋が接続している場合

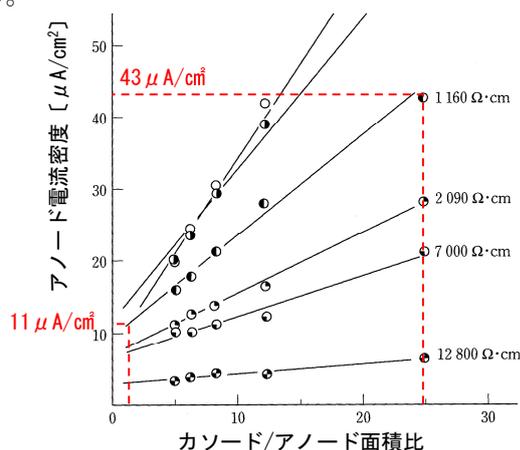


図2 カソード部とアノード部の面積比と電流密度の関係

ここで、土壌抵抗率が $1160 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合、アノード/カソード面積比が1に対して25倍になるとアノード電流密度は $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ から $43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ と約4倍に増加している。

腐食速度に置き換えると、ファラデーの法則より $1\text{mA} \cdot 1$ 年間の電気量により腐食される量は 9.1g 、鉄の密度が $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ である。塗覆装劣化面積を 10cm^2 とすると腐食速度は表1のように算定され、面積比1に対して面積比が25の場合、腐食速度も約4倍速くなる(比率①)。また、一般的な土中での鉄の腐食速度 ($0.02\text{mm}/\text{年}$) と比較すると、面積比1 ($0.13\text{mm}/\text{年}$) の場合で約7倍、面積比25 ($0.50\text{mm}/\text{年}$) の場合で約25倍腐食速度が速くなる(比率②)。

表1 腐食速度の試算結果

電流密度		1mA・1年間の電気量により腐食される量(g)	塗覆装劣化面積(cm^2)	腐食電流($\text{mA}/10\text{cm}^2$)	電流により腐食される量(g)	鉄の密度(g/cm^3)	腐食速度(mm/y)	比率①	比率②
($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	(mA/cm^2)								
11	0.011	9.1	10	0.11	1.001	7.86	0.13	1.0	6.5
43	0.043	9.1	10	0.43	3.913	7.86	0.50	3.8	25.0

実構造物レベルでは、例えば $\phi 800$ に対するコンクリートピット中の鉄筋面積(カソード面積)は $500,000\text{cm}^2$ 程度であり、塗覆装損傷部との面積比は50,000倍にもなる。図2に示すアノード電流密度とアノード/カソード面積比の関係は面積比で25倍までしか示されていないため、比率による単純な評価はできないが、メタルタッチに伴うC/S マクロセル腐食の腐食速度は極めて速くなることが想定され、特に留意すべき腐食機構であると言える。

2) 通気差マクロセル腐食

多くの金属の腐食は、カソードで酸素を消費、アノードで酸化することで腐食が進行する。この酸素は多くの場合、大気中より供給される。この通気の程度は金属の形状や位置、表面付着物等によって異なる。

埋設された鋼管等の場合、水分の多い用水路の下部や砂・粘土などの異なる環境を通ると、通気の悪い部位(酸素供給の少ない部位)がアノード、通気の良い部位(酸素供給の良い部位)がカソードとなってアノード部で腐食が進行する。通気差マクロセルとは、このように酸素濃度の違いによって引き起こされる腐食を指す。

通気差マクロセル腐食の起こりやすい環境には、次のようなケースがある。

①土質の差による通気差マクロセル腐食

鋼管等が粘質土と砂質にまたがって埋設されている場合、通気差により粘質土の部分の管が腐食する。

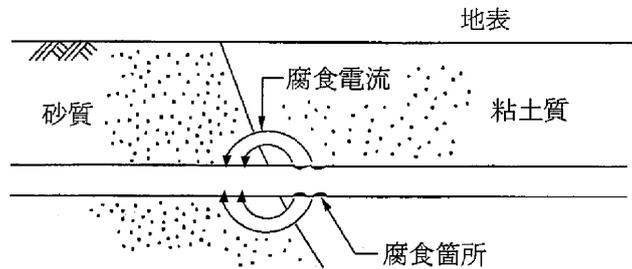


図 2.3-4 土質の差による通気差マクロセル腐食の例

②地下水の影響による通気差マクロセル腐食

鋼管等が地下水又は水分の多い土壌と通気性の良い土壌にまたがる場合は、水分の多い土壌の部分に腐食が生じる。

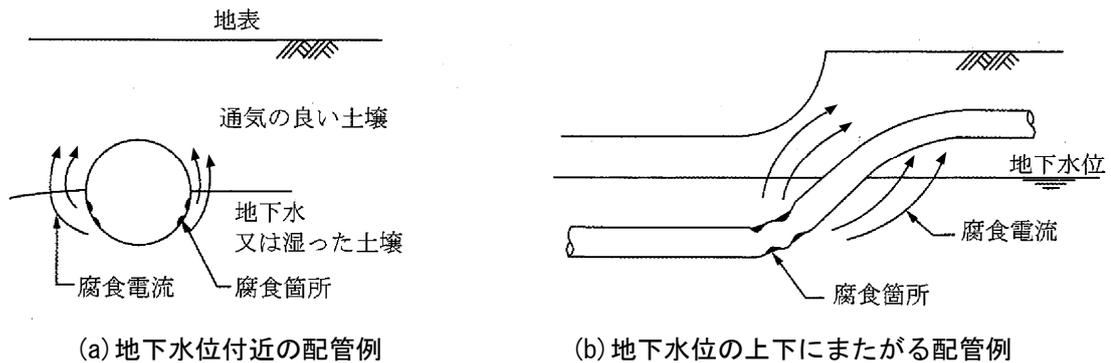


図 2.3-5 地下水の影響による通気差マクロセル腐食の例

③地表面付近での通気差マクロセル腐食

鋼管等が地上に立ち上がる場合、地表部分と地表のすぐ下の部分で通気差が生じ、地表のすぐ下の部分が腐食する。

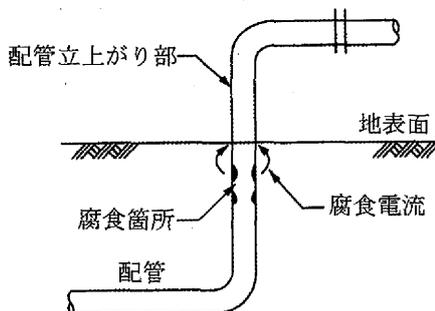
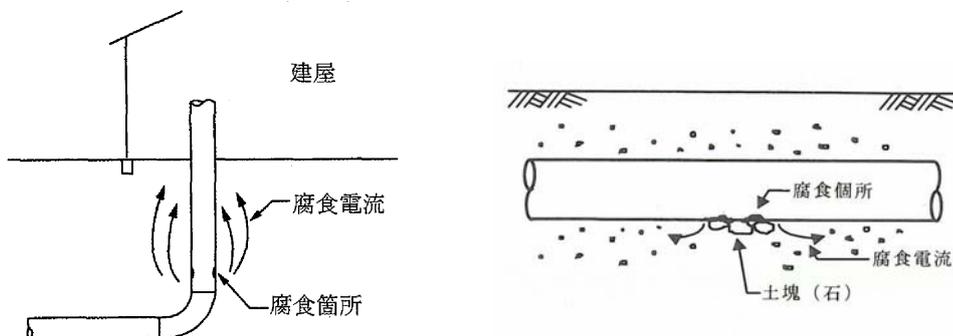


図 2.3-6 地表付近での通気差マクロセル腐食の例

④その他の通気差マクロセル腐食

その他、地表面からの埋設深さの差により、深い部分では地表付近に比べて通気性が悪くなり腐食する場合がある。道路のアスファルト舗装等が地表の遮蔽物となって、通気差を生じ、マクロセル腐食の原因になることもある。

また、配管に土塊（石）などが接触した場合、土塊（石）の下の部分の配管表面には酸素が届きにくい。石のまわりでは、酸素は普通に供給される。こうして、石のまわりをプラス、石の下をマイナスとする通気性電池ができて、石の下で腐食が起こる。



(a) 埋設深さの差による通気差マクロセル腐食 (b) 土塊（石）との接触による通気差マクロセル腐食

図 2.3-7 その他の通気差マクロセル腐食の例

3) 異種金属接触腐食

二つの異なった金属が電解質中で接続しているとき、それぞれの金属の自然電位の違いから腐食電池回路が構成され、アノード部の金属が腐食する現象を示す。

異種金属接触腐食の起こりやすい環境の例としては、鋼管とステンレス製伸縮管との接続がある。この場合、絶縁されていないステンレス製伸縮管と鋼管の塗覆装損傷部の間で腐食電流が流れるため、鋼管が腐食する。

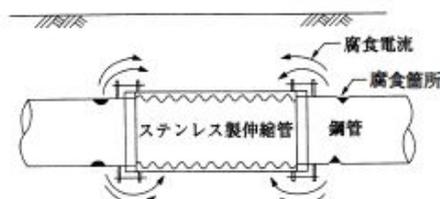


図 2.3-8 異種金属接触腐食の例

(3) 微生物腐食

微生物腐食は、微生物の代謝作用によって腐食アノード反応あるいはカソード反応が促進されることが原因となる。腐食に関する代表的な微生物には、好気性の鉄細菌や硫黄酸化細菌、嫌気性の硫酸塩還元菌や鉄酸化細菌が挙げられる。腐食の激しさとしては鉄細菌が最も高く、次いで鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌、硫酸塩還元菌の順となる。また、微生物が存在する可能性としては、硫酸塩還元菌が最も高く、次いで鉄細菌、鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌の順となる。

嫌気性である硫酸塩還元菌による腐食が進行すると、その過程で溶存酸素の還元反応を促進すると考えられており、強い還元状態では酸化還元電位が低い値となることが分かっている。また、硫酸塩還元菌は低級脂肪酸や水素をエネルギー源として摂取し、硫酸イオンを用いて酸化し、硫化水素を放出する。このため、硫酸塩還元菌が存在する土中には硫化物が存在することが特徴である。

(4) 電食

1) 電気設備等からの迷走電流

直流電気鉄道や電気防食施設のような電気設備から直流電流が土壤中に漏洩し、その一部が鋼管等に流入し、流入した電流が鋼管等より再び土壤中に流出する。このとき、鋼管等の塗覆装損傷部からの流出で激しい腐食が起きる。この腐食現象を電食という。電食は、概して鋼管等の一部に集中して発生する特徴があり、短期間で配管に孔があき事故が発生する。特に塗覆装に損傷がある場合には、迷走電流は高電流密度で損傷部から流出し、鋼管等の局部的腐食を著しく促進する。

なお、ダクタイル铸铁管（ゴム輪を介して接続される継手の場合）は、継手部が絶縁材となり、影響範囲が配管 1 本毎（約 5.5m 程度）の延長と極めて短いので、迷走電流による影響も小さく、電食の影響を受けにくい。

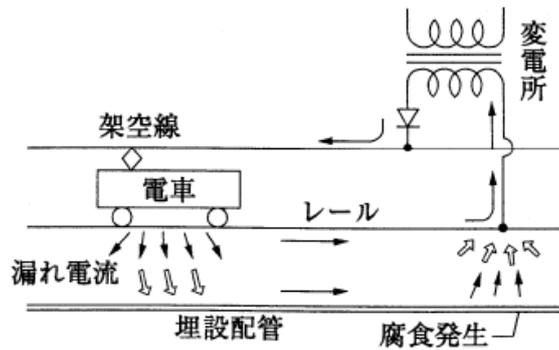


図 2.3-9 電食の概念図

2) 干渉

埋設鋼管に外部電源方式の電気防食を行ったとき、これに近接する他の埋設鋼管に電氣的影響を及ぼすことを干渉という。外部電源方式は、整流器の(－)側に鋼管を接続し、土中に設置した電極を整流器の(＋)側に接続して、鋼管に防食電流を強制的に流し続ける方法である。

外部電源用電極の周囲の大地は、遠隔の大地に対してプラスの電位となっている。このプラスの範囲に他の埋設鋼管があると、防食電流の一部がその配管に流入する。流入した電流は近接交差部等の電流の出やすい場所から元の配管に戻ろうと電流が流出する。この電流の流出部で腐食が発生する場合がある。このことを干渉による腐食と呼ぶ。なお、流電陽極方式の場合は、陽極周囲の電圧・電流が極めて小さいので、干渉作用はほとんど生じない。

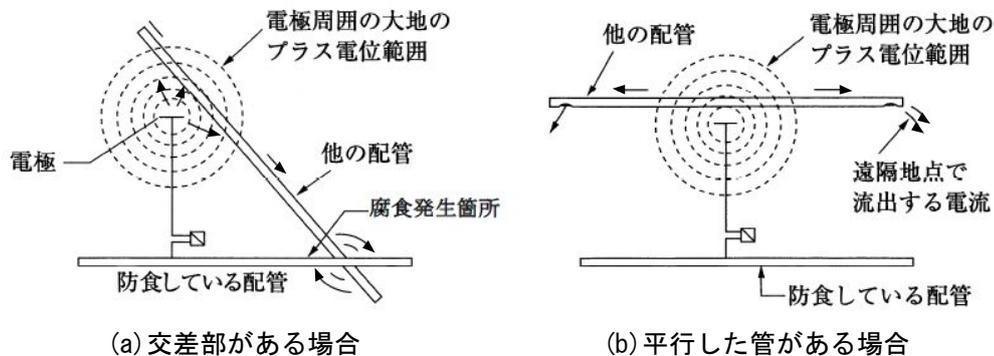


図 2.3-10 電気防食装置による干渉の例

(5) 黒鉛化腐食

ダクタイル鋳鉄管において、鋳鉄など炭素を多く含む材料に見られる選択腐食の一つで、素地の鉄が腐食し、黒鉛が表面に残留して外観が黒く変色する腐食をいう。一般の炭素鋼管と異なり、素地の鉄に分散した黒鉛は、素地の鉄より溶解しにくく、鉄が選択的に溶解(腐食)し、表面が黒色に変化する。腐食部の強度は著しく低下する。黒鉛化腐食が発生しても、見掛けは健全状態と変わらない場合が多く点検時に注意が必要である。

2.4 腐食速度

(1) 一般土壌腐食における腐食速度

土壌中における鋼管のマイクロセル腐食による腐食の場合、日本鉄道電気技術協会が長期間の埋設試験を行った結果によれば、鋼管の腐食進行速度は、約 0.02mm/年程度である。

(2) 特殊土壌腐食における腐食速度

特殊土壌中におけるダクタイル鋳鉄管のマイクロセル腐食による腐食の場合、九州管内の海成粘土が分布する地区の事例によれば、腐食進行速度は、約 0.29mm/年（DCIP4 種管 ϕ 600：規定管厚 $t=8$ mm、孔食による漏水発生までの供用年数 28 年）であり、一般土壌腐食に対し約 15 倍の腐食速度となっている。

(3) マクロセル腐食における腐食速度

マクロセル腐食が生じる環境では腐食速度は著しく増加し、設計基準パイプラインには 0.1mm/年～2.0mm/年と示され、一般土壌腐食に対し最大 100 倍の腐食速度となっている。

[参考]

平成 21～28 年の国営造成管水路の突発事故調査結果の場合、孔食による漏水発生までの腐食進行速度は、鋼管で約 0.17mm/年～0.43mm/年、ダクタイル鋳鉄管で約 0.22mm/年～0.38mm/年（農林水産省九州農政局土地改良技術事務所調べ）となっている。



図 2.4-1 メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食例

以上より、腐食機構の特定では、他の腐食機構よりも腐食速度が速く対策の必要性が高くなる（対策実施時期が早くなる）ことが想定され、マクロセル腐食の有無に留意する。

第3章 詳細調査

3.1 基本的事項

詳細調査は、既往の機能診断結果等を活用し、腐食機構の特定、腐食対策の要否判定、対策実施範囲の概定を目的に実施するもので、その内容から腐食環境調査と腐食状態調査に大別される。

腐食環境調査は、施設構造条件や設置環境に着目して腐食機構を推定し、これを確認することを目的とする。また、腐食状態調査は腐食対策の要否判定、対策の実施範囲の概定を目的に実施する。

【解説】

3.1.1 機能診断調査・評価

機能診断調査の目的は、対象施設の機能の状態、劣化状況等を把握し、対象となる農業水利施設の機能全般について把握するとともに、性能低下予測や劣化要因の特定及び防食工法の検討に必要な事項について調査を行うものである。

鋼管等の機能診断調査は、これらの調査を効率的に進める観点から

- ①資料収集や施設管理者からの聴き取りによる事前調査
- ②埋設位置の地上状況や附帯施設の巡回目視による概況の把握を行う現地踏査
- ③近接目視、計測・試験等により定量的な調査を行う現地調査

の3段階で実施することを基本とし、主として表 3.1-1 の内容について実施している（*表 3.1-1 では鋼管等の腐食に関わる調査を抽出している）。

表 3.1-1 「農業水利施設の機能保全の手引き」による機能診断調査の目的と内容

項 目	目的及び内容
事前調査	<p>【調査目的】 対象施設の施設概要と想定される腐食機構の把握</p> <p>【調査内容】 下記資料を収集整理し、施設概要等を把握する。</p> <p>①設計、施工に係る資料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・パイプラインの設計図書（設計図、業務報告書）、完成図書（竣工図、施工記録等）、地形・地質データや当時の設計基準、施工方法・技術、使用材料、施工年月及び事業誌、工事誌、用地関係の資料等から、施設の概要やコンクリートピット貫通部の有無等を把握する。 <p>②事故履歴・補修履歴に係る資料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・破損の状態、補修・補強の方法、場所等を平面図、縦断図に記入するなどして整理し、範囲ごとの変状の特徴等の分析を行う。 <p>③埋設環境に係る資料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・土質、地下水の水質、電気化学的特性（鉄道・変電所等の有無）等から、対象施設に生じている可能性がある腐食機構を推定する。 <p>④施設管理者に対する問診調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・施設に生じている変状の概要、腐食による漏水事故の発生の有無と腐食要因
現地踏査	<p>【調査目的】 腐食が疑われる区間及び腐食発生原因の概定、現地調査計画の立案（調査地点、調査内容、必要な仮設計画等の選定）</p> <p>【調査内容】 配管ルート、コンクリートピット貫通部（附帯施設内部）の状況、調査個所の土地利用状況、調査個所の作業スペース 等を確認する。</p>
現地調査	<p>【調査目的】 事前調査や現地踏査で得られた情報を踏まえ、対象施設の腐食状態等を把握し、想定される腐食機構を推定する。</p> <p>【調査内容】 管内調査による管内面の発錆状況（大口径管路のみ）、試掘による管外面の腐食深さ（詳細調査であり必ず実施する内容ではない）を把握する。また、これまでの事前調査、現地踏査結果を考慮し腐食機構を推定する。</p>

また、機能診断調査結果に基づき、表 3.1-2 に示す評価表により施設状態評価（健全度評価）を実施している。

表 3.1-2 「農業水利施設の機能保全の手引き」によるパイプラインの施設状態評価表

地区名		評価年月日				評価者			
施設名		調査地点				調査点等			
施設状態		S-5:変状なし S-4:変状兆候 S-3:変状あり S-2:顕著な変状あり S-1:重大な変状あり							
評価項目		評価区分				評価の流れ			
健全度ランク		S-5	S-4	S-3	S-2	変状別	要因別	総合評価	
管内面調査	漏水	漏水の進行(全管種)※1	無	-	有	-	-	-	
	管路の変状	ひび割れ(RC,PC,ACP)	無	-	有	-	-	-	-
		ひび割れ(FRPM)	無	-	-	有			
		沈下(全管種)	無	0~10cm未満	10cm以上~20cm未満	20cm以上			
		進行性(全管種)	有りの場合1ランクダウン						
		継手曲げ角度(SP以外)	許容曲げ角度の1/2以内	許容曲げ角度以内	許容角度超や芯ずれ等で浸入水・不明水あり	-			
		進行性	有りの場合1ランクダウン						
		継手間隔等(溶接又は接着継手は除く)	施工管理基準規格値内	規格値外だが侵入水・不明水なし	大幅・全面的に規格値外等で浸入水・不明水あり	-			
		進行性	有りの場合1ランクダウン						
		発錆状況(SP,DCIP)	無	軽微な錆が点在	一定範囲で全体的に錆が確認される	-			
		進行性	有りの場合1ランクダウン						
たわみ量(SP,DCIP,FRPM)	4%以内	4%超5%以内	5%超	-					
進行性	有りの場合1ランクダウン								
テストバンド(φ900mm以上ソケットタイプ)(静水圧で5分間放置後の水圧)	80%超	-	80%以下	-	-	-	-		
※1漏水については施工時(初期値)と比較して漏水量が増えている場合“有”とする。ただし、施工時(初期値)がない場合は、許容減水量(土地改良事業計画設計基準・設計「パイプライン」を参照)を越える場合を“有”と判断する。									
詳細調査※2	試験調査	鉄鋼系管路外観調査(SP)	変状なし	腐食代2mm以内	腐食代2mm超	貫通孔あり	-	-	
	PC管外観調査(中性化残り)	中性化残り10mm以上	-	中性化残り又はカバークート厚10mm未満	PC鋼線腐食・破断	-	-		
※2管内面調査や事前調査結果から、詳細調査を行うか判断する。									
(評価の流れにおける、主要要因評価及び施設状態評価の判定の考え方)									

調査項目				備考	
漏水事故の状況 (同一路線で過去に起きた事故件数)					
現地踏査	周辺地盤の沈下等(全管種)	無	有		
	上部及び周辺の土地利用(全管種)	変化なし	荷重増		
事前調査	腐食※3環境調査	土質調査(PC,SP,DCIP)	腐食土壌でない		腐食性土壌
	周辺調査(SP,DCIP)	迷走電流の可能性なし	迷走電流の可能性あり		
	問診調査	供用年数			
	バルブの使用頻度と位置(FRPM,PVC)	近くにあるバルブはほとんど使用しない	近くに頻繁に使用するバルブがある		
※3腐食性土壌の懸念がある場合には、必要に応じて土壌調査を行い、試験調査を行うか判断する。					

注1) 変状別評価から主要要因評価を行う場合は、最も健全度が低い評価を代表値とする。総合評価については、今後の性能低下により影響されると思われる支配的要因を検討し、その評価区分を採用する。また、参考情報についても加味し考えることができる。

注2) S-1の評価は、この評価表に依らず評価者が技術的観点から個別に判定する。

【凡例】 : 鋼管等の腐食に関わる評価項目

3.1.2 詳細調査

詳細調査は、「農業水利施設の機能保全の手引き」に基づく機能診断調査（事前調査、現地踏査結果、現地調査）及び施設状態評価より推定した腐食機構の特定と対策の要否判定のための調査であり、その目的から【腐食環境調査】、【腐食状態調査】、【防食工法検討のための調査】に大別される。

なお、詳細調査の実施に当たっては、施設の基本条件や機能診断結果が蓄積されている農業水利ストック情報データベース等を活用し、鋼管等に生じている腐食機構を推定したうえで実施する。

(1) 腐食環境調査

腐食環境調査は、鋼管等又は土壌の電気的性状に関する腐食機構の特定（図 3.1-1 の①～⑤）と腐食環境の程度（図 3.1-1 の⑥～⑧）の把握を目的として実施する。各調査方法の詳細は「3.3 腐食環境調査」で詳述する。

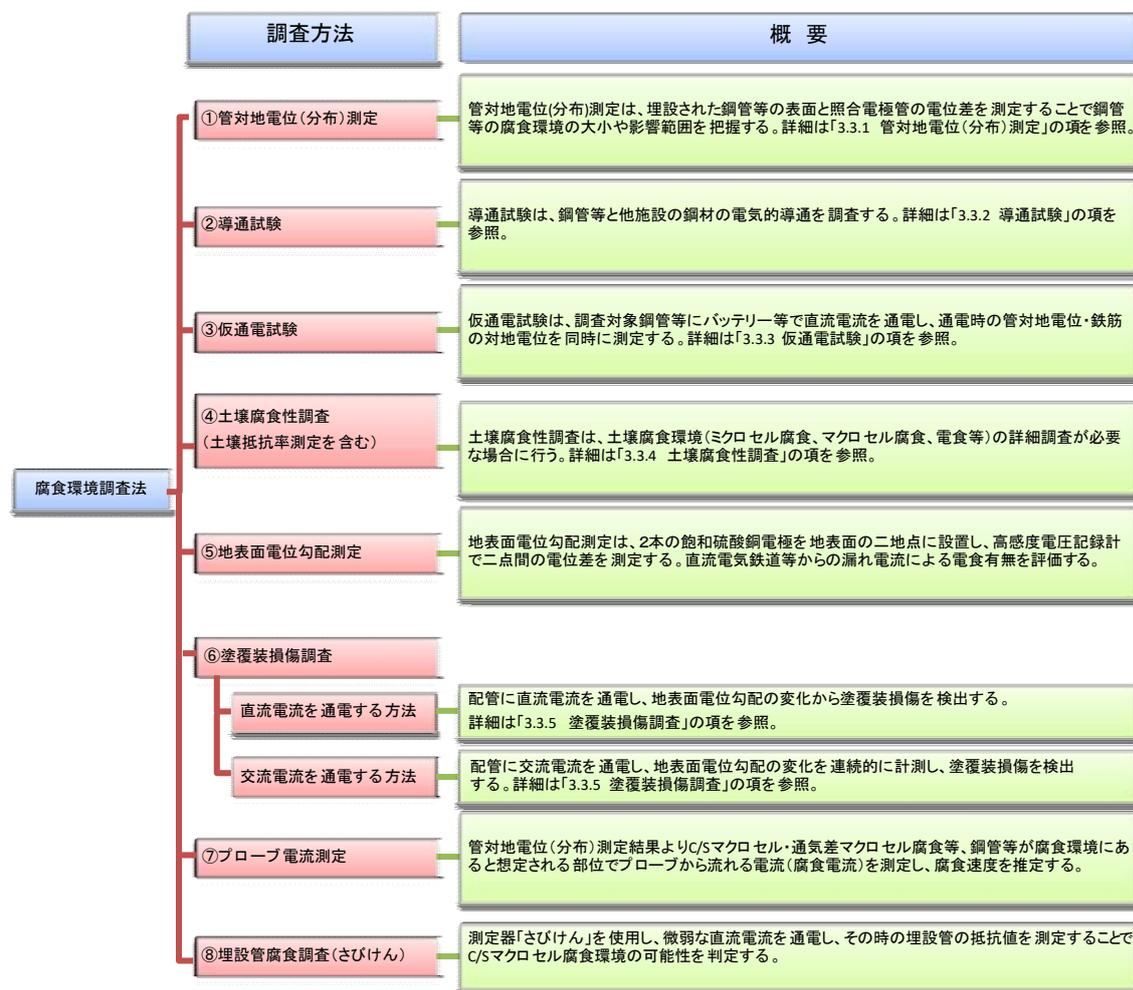


図 3.1-1 腐食環境調査の調査方法

①管対地電位(分布)測定(管対地電位測定と管対地電位分布測定の総称として記載)、②導通試験、③仮通電試験、④土壌腐食性調査(土壌抵抗率測定を含む)、⑤地表面電位勾配測定は腐食機構を特定するための調査であり、想定される腐食機構に応じて適用が異なることに

留意する。

なお、管対地電位（分布）測定は、本マニュアルにおいて表 3.1-3 のように用語を使い分けられている。

表 3.1-3 管対地電位（分布）測定について

用語	考え方
管対地電位（分布）測定	・管対地電位測定と管対地電位分布測定双方に共通する記載を行う場合に使用。
管対地電位測定	・1地点で管対地電位測定を行い、1地点の測定結果から腐食機構を判断する。 ・本マニュアルにおいて、1地点での測定に係る内容を示す場合に使用。
管対地電位分布測定	・複数地点で管対地電位測定を行い、複数地点の管対地電位の分布状況や電位差から腐食機構を判断する。 ・マニュアルの解説において、複数地点での測定に係る内容を示す場合に使用。

直流電気鉄道等からの迷走電流による電食の有無を評価する調査には、①管対地電位測定（電位変動が 50mV 以上であるか）又は⑤地表面電位勾配測定があるが、本マニュアルでは、①管対地電位測定を適用する（図 3.2-1）。

また、⑥塗覆装損傷調査と⑦プローブ電流測定は腐食環境の程度を把握するための調査であり、腐食環境の程度に応じて対策の要否判定を行うための試掘調査（近接目視）を実施する箇所を概定したい場合に実施するが、⑥塗覆装損傷調査の方が開削箇所を的確に設定できる。

⑧埋設管腐食調査（さびけん）は、小口径（100mm 以下）の SGP 白管（溶融亜鉛メッキ鋼管）にのみ適用する調査方法であり、①管対地電位分布測定で代替できる。

このため、⑤地表面電位勾配測定、⑦プローブ電流測定、⑧埋設管腐食調査（さびけん）は本マニュアルの対象外とする。

腐食機構と調査方法適用の組合せは表 3.1-4。

表 3.1-4 腐食機構と調査方法適用の組合せ

腐食機構 調査方法	マクロセル腐食		マイクロセル腐食	微生物腐食	電食
	C/S マクロセル腐食	異種金属接触腐食 通気差マクロセル腐食	特殊土壌腐食 一般土壌腐食		
管対地電位分布測定	●	○	—	—	—
管対地電位測定	—	—	—	—	○
導通試験	○	—	—	—	—
仮通電試験	○	△	△	△	△
土壌腐食性調査 （土壌抵抗率測定）	△	△	●	●	△
土壌腐食性調査 （土壌抵抗率測定以外）	—	—	○	○	—

凡例： ○腐食環境の把握に必要、—：実施しなくても良い、

△対策（電気防食工法）検討時に必要、

●腐食環境の把握及び対策（電気防食工法）検討時に必要

(2) 腐食状態調査

腐食状態調査とは、鋼管等の管厚や腐食範囲から腐食状態を把握し、評価するものである。腐食状態調査は、図 3.1-2 に示すように外観目視調査、部材厚（管厚）測定及び探傷調査に大別される。なお、各調査方法の詳細は「3.4 腐食状態調査」で詳述する。

外観目視調査は、配管理設深度まで掘削し、管外面の塗装・腐食状況、発錆状況の目視及び簡易計測を行うことを目的に実施する。デプスゲージやスケール等を用いて腐食深さや腐食の発生範囲を把握する。

管厚測定は、超音波により鋼管等の管厚（腐食深さ）を把握することを目的に実施する。

探傷調査は、鋼管等に生じた傷や腐食部を検出することを目的に実施する。

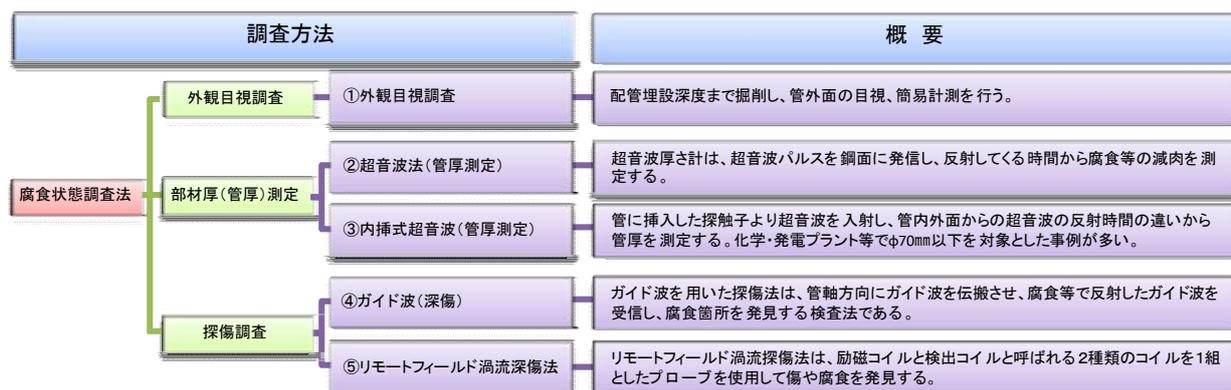


図 3.1-2 腐食状態調査の調査方法

なお、部材厚（管厚）測定の中の③内挿式超音波、及び探傷調査（④ガイド波、⑤リモートフィールド渦流探傷法）は、未だ手法として確立されておらず研究開発段階であること、また、適用条件が極めて限定的な技術であるため、本マニュアルでは腐食状態調査として②超音波法（管厚測定）について解説する。

(3) 防食工法検討のための調査

防食工法として電気防食を採用する場合、必要な防食電流を決定することを目的に仮通電試験、管対地電位分布測定と土壤抵抗率測定を実施する。

なお、各調査とも腐食環境調査（土壤抵抗率測定は、腐食環境調査である土壤腐食性調査の中に含まれる）にも位置づけられることから、本マニュアルでは腐食環境調査の項目で詳述している。

(4) 詳細調査データの整理

詳細調査で得られるデータは、表 3.1-5 を参考に採用値を整理する。

表 3.1-5 詳細調査データの整理例

詳細調査方法	調査データの整理
腐食環境調査	
管対地電位（分布）測定	実施する測定は1回、測定値＝採用値とする ※詳細は各調査方法の標準調査ピッチを参照。
導通試験	
仮通電試験	
土壌腐食性調査 （土壌抵抗率測定（4電極法）を含む）	
塗覆装損傷調査 （直流電流を通電する方法）	
塗覆装損傷調査 （交流電流を通電する方法）	1 地点当たり2回（2側線）の測定を標準とする 2 回の測定を総合的に評価し、塗覆装損傷部を概定する
土壌腐食性調査 （土壌抵抗率測定（土壌杖法））	1 地点当たり3回の測定を標準とする 3 回の平均をもって採用値とする
腐食状態調査	
超音波法（管厚測定）	1 地点当り3回の測定を標準とする 3 回の平均値をもって採用値とする

3.2 詳細調査の実施手順

鋼管等に腐食発生が予測される場合は、想定される腐食機構（C/Sマクロセル腐食、ミクロセル腐食、微生物腐食、電食、異種金属接触腐食、通気差マクロセル腐食）を特定する腐食環境調査を実施したうえで、腐食状態調査を行い腐食対策の要否を判定する。

【解説】

鋼管等に腐食の発生が予測される場合は、機能診断結果等から鋼管等に生じている腐食機構（ミクロセル腐食、C/Sマクロセル腐食、異種金属接触腐食、通気差マクロセル腐食、微生物腐食、電食）を推定し、図3.2-1のA（腐食発生の予測調査）に基づき、腐食機構を特定する詳細調査（管対地電位（分布）測定、導通試験、仮通電試験、土壤腐食性調査、土質調査等）を実施した上で、図3.2-1のB（腐食防止対策の必要性調査）に基づく腐食状態に応じて腐食防止対策の要否を判定する。

C/Sマクロセル腐食が予測される場合は、コンクリートピット付近を開削し、近接目視により塗覆装の損傷状況やデプスゲージにより腐食深さの確認を行い、腐食状態に応じて腐食防止対策の要否を判定する。

メタルタッチに伴うC/Sマクロセル腐食以外が予想される場合は、塗覆装損傷調査を実施し、腐食環境の程度を把握する。その結果から塗覆装の損傷箇所を絞り込んだ上で管路周辺を開削し、近接目視、簡易測定又は超音波法により塗覆装の損傷状況確認や管厚測定を行い、腐食状態に応じて腐食防止対策の要否を判定する。塗覆装損傷調査の結果、塗覆装損傷箇所が判断し難い場合、また、調査対象がダクタイル鋳鉄管の場合は、延長1km当たり5箇所程度開削箇所を設定する（詳細はWSP081-2019 鋼管路の更新・診断マニュアル 第2部 鋼管路の補修参照）。

防食工法として電気防食を選定した場合は、電気防食設計のために以下の詳細調査を実施する（腐食機構の特定のために調査を実施している場合は、調査結果を活用する）。

表 3.2-1 電気防食に必要な詳細調査

電気防食	必要な詳細調査
近接陽極法	管対地電位分布測定、土壤抵抗率測定
完全防食法	仮通電試験、土壤抵抗率測定

なお、腐食発生が予測されるが現場状況から開削が困難な場合は、腐食環境調査の結果、同一路線や同一地区内での腐食による漏水事故の有無や頻度、施設の重要度等を考慮し、腐食防止対策の要否を判断し、適切な対応を行う必要がある。

注) 防食工法選定の詳細は「4.2 対策工法の検討」を参照。

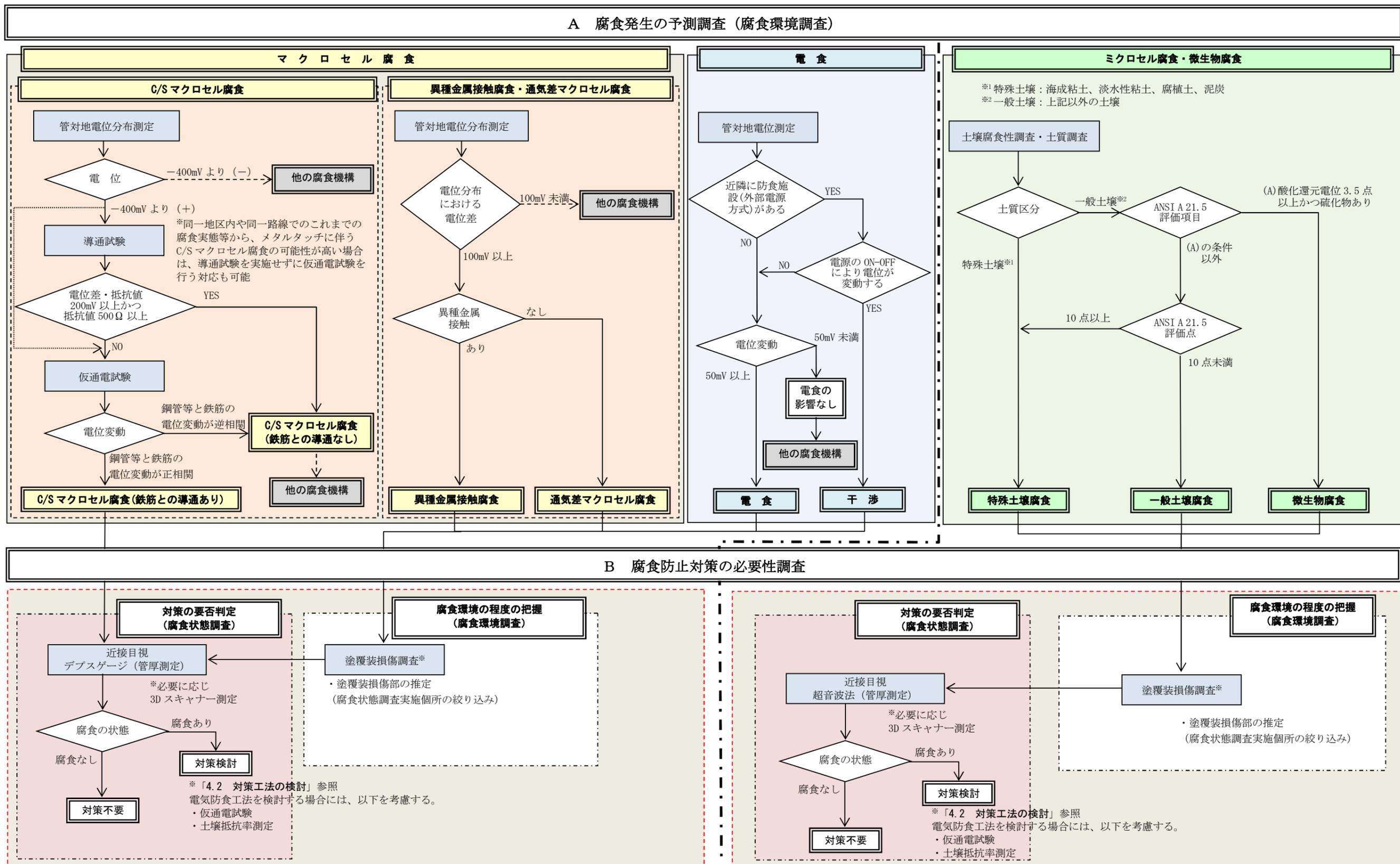


図 3.2-1 詳細調査の実施手順

3.3 腐食環境調査

腐食環境調査は、腐食機構の特定又は腐食環境の程度の把握を目的として実施する。

腐食機構の特定のための調査は、管対地電位（分布）測定、導通試験、仮通電試験、土壤腐食性調査（土壤抵抗率測定を含む）がある。

腐食環境程度の把握調査は、塗覆装損傷調査がある。

【解説】

3.3.1 管対地電位（分布）測定

(1) 適用条件

管対地電位（分布）測定は、管対地電位分布測定と管対地電位測定との総称として記載している。両者の適用区分は以下のとおり。

管対地電位分布測定：C/S マクロセル腐食、異種金属接触腐食、通気差マクロセル腐食

管対地電位測定：電食

なお、管対地電位（分布）測定に当たっては、以下の点に留意する。

1) 調査結果

本調査結果はマクロセル腐食環境の有無と腐食環境の範囲を示すものであるが、メタルタッチに伴うマクロセル腐食であるかは導通試験、仮通電試験を実施し判断する必要がある。

2) 照合電極の設置位置

管対地電位（分布）測定は、鋼管等表面と電解質（土壤）を介した飽和硫酸銅照合電極（以降、照合電極と記載）の電位差を測定するもので、照合電極と鋼管等との距離が重要となる。図 3.3-1 に示すように、鋼管等直上と離れた位置に照合電極を設置した場合、照合電極と鋼管等表面との距離が離れ、土壤の抵抗が大きくなり電圧降下による測定誤差が生じる。このため、照合電極はできるだけ鋼管等に近い位置（地表面で測定する場合は管の直上・掘削孔内で測定する場合は鋼管等近傍）に設置する。

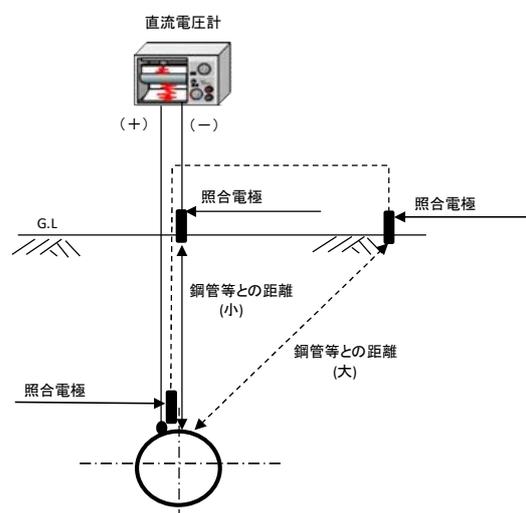


図 3.3-1 管対地電位（分布）測定概略図

(2) 調査要領

1) 調査概要

管対地電位とは、埋設された鋼管等の表面と地盤に設置した照合電極間の電位差であり、無防食鋼管等の場合、この値を自然電位（表 3.3-1）と呼ぶ。管対地電位（分布）測定とは、この自然電位を測定することで鋼管等の腐食環境を把握するものである（図 3.3-2）。

表 3.3-1 異なる環境における鋼管（鉄）の自然電位（照合電極基準）

外部環境	鉄の自然電位 (mV)
粘土・ローム	-700~-800
山砂	-400~-600
コンクリート	-200 程度

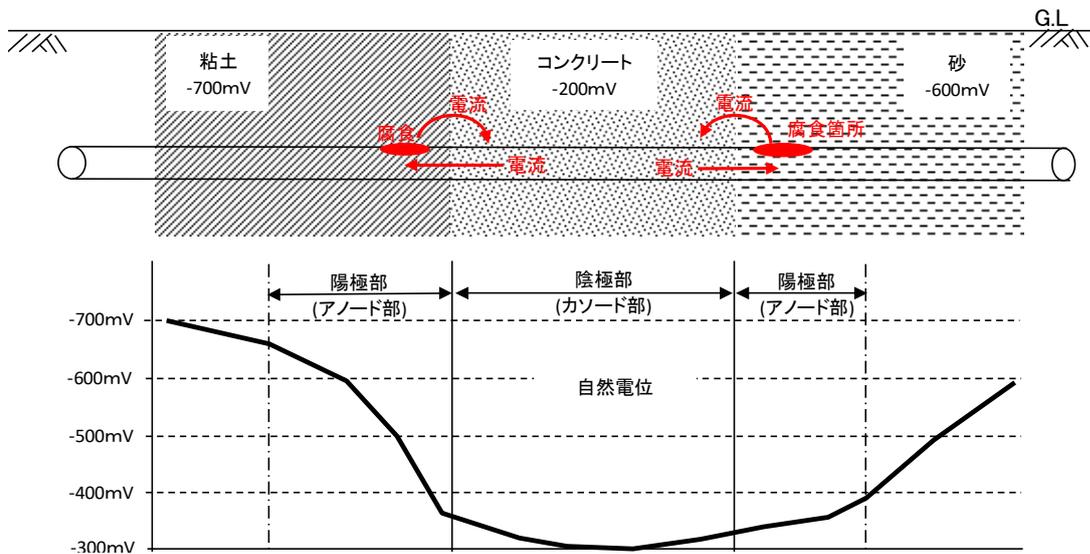


図 3.3-2 異なる環境中における鋼管（鉄）の自然電位（照合電極基準）例

具体的には、管対地電位（分布）測定では、管対地電位と管対地電位分布の測定を行い、鋼管等の管対地電位が埋設延長に対し変化しているかを調べ、マクロセル腐食等の腐食環境に置かれている範囲を把握するものである（図 3.3-3）。

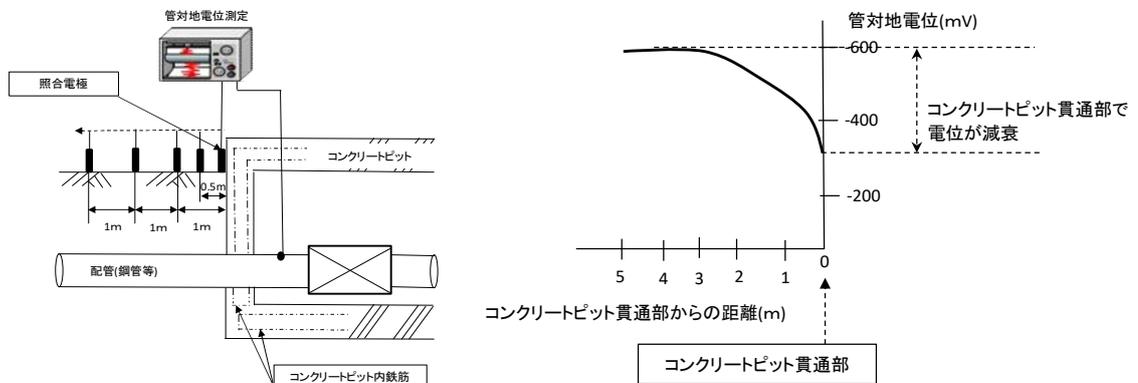


図 3.3-3 管対地電位分布測定例

鋼管では、C/S マクロセル腐食環境を把握するために実施される事例が多い。C/S マクロセル腐食の原因は、鋼管がコンクリートピット中の鉄筋と接触していることがほとんどであるため、管対地電位を測定した場合、コンクリートピット貫通部近傍ほど、コンクリートピット中の鉄筋電位の影響を受け、電位がプラス側になる。「マクロセル腐食防食指針 (WSP045-2008)」によると、その影響範囲はコンクリートピットの規模にもよるが、貫通部より 10m までの間で見られることが示されている。このため、本調査はコンクリートピット貫通部から 10m の範囲で実施される事例が多い。

2) 標準調査ピッチ

調査ピッチは、埋設配管の状況により以下のように設定する。

①コンクリートピット周辺の場合

コンクリートピット貫通部や鉄筋コンクリートスラストブロック設置部の土中際を起点 (0m) として 0m、0.5m、0.5m その後は 1m ピッチで測定を行う (図 3.3-3) が、電位勾配が平衡状態 (測定値がほぼ同一) となる地点まで測定を行う。測定の目安は、上記のとおり 10m 区間となる。

②一般埋設部の場合

埋設鋼管等延長が 1m 未満の場合は 1 地点の測定 (管対地電位測定) となるが、埋設延長が 1m 以上ある場合は 1m ピッチで測定を行う。

(3) 調査手順

管対地電位 (分布) 測定は図 3.3-4 の手順で実施する。

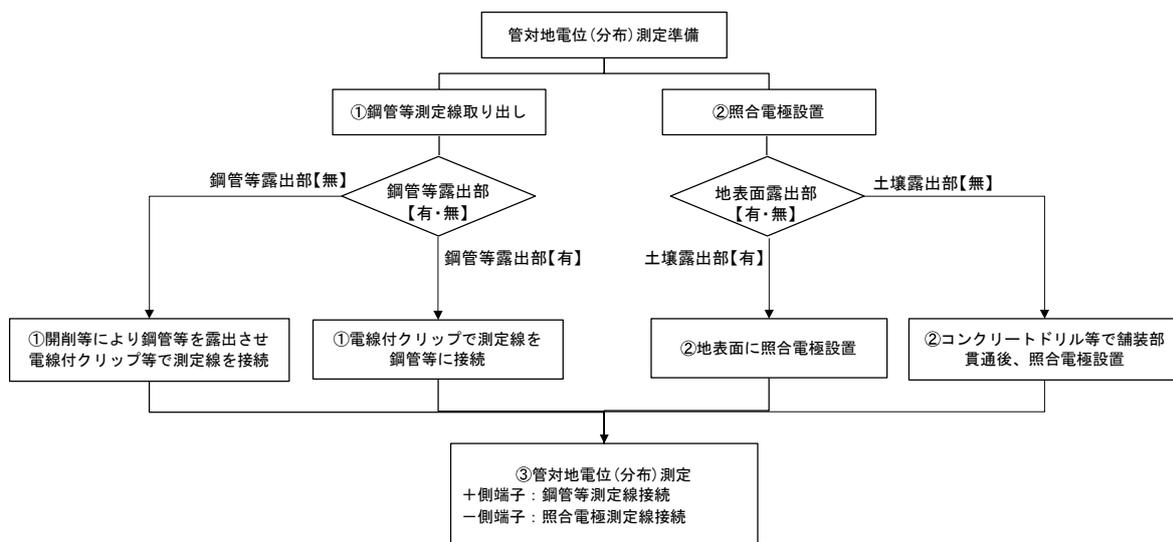


図 3.3-4 管対地電位 (分布) 測定の実施手順 (例)

※①～③の数字は以降に示す項目番号を示している。

①鋼管等測定線取り出し

コンクリートピット内の鋼管等（鋼管等露出部）から測定線を取り出す場合、図 3.3-5 に示すようにクリップ付測定線を用い測定対象となる鋼管等と電氣的に導通している鋼管等露出部の計装配管やフランジボルトから測定線を取り出す。



計装配管への測定線接続例

バルブフランジボルトへの測定線接続例

図 3.3-5 露出鋼管からの測定線取り出し例

鋼管等露出部が無い場合は開削等により鋼管等を露出させ測定線を取り出す必要がある。

開削等により鋼管等を露出させ図 3.3-6 に示すように測定線を取出す。また、継続して測定する必要がある場合はターミナルボックスを設け測定線を収納する。

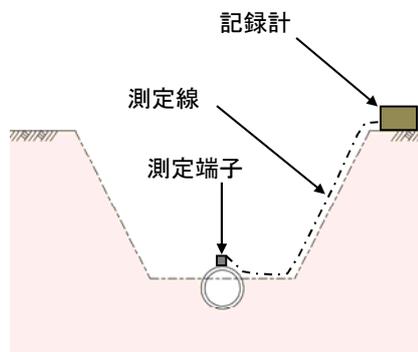


図 3.3-6 埋設鋼管等からの測定線取り出し例

②照合電極の地表面への設置

照合電極は、測定対象配管直上の地表（土）に電極面を接触させ測定する。コンクリート舗装又は土壌面が乾燥している場合、測定値に誤差が生じる可能性があるため散水し湿潤状態を保ったうえで照合電極を配置する。

地表面がアスファルト舗装等で露出していない場合、舗装等が高抵抗となり正確な電位測定ができなくなる。図 3.3-7 に示すように、舗装面をドリル（φ10mm 程度）で穿孔し、地表面を貫通させ、貫通口に照合電極を挿入し測定する。その際、貫通孔に十分注水し湿潤状態として測定する。



図 3.3-7 舗装道路上の照合電極配置例

③管対地電位（分布）測定

管対地電位（分布）測定は、鋼管等表面と電解質（土壌や水）を介した照合電極間の電位差を測定するもので、図 3.3-8 に示すように鋼管等からの測定線を高感度電圧記録計プラス側端子、照合電極からの測定線をマイナス側端子に接続し測定する。

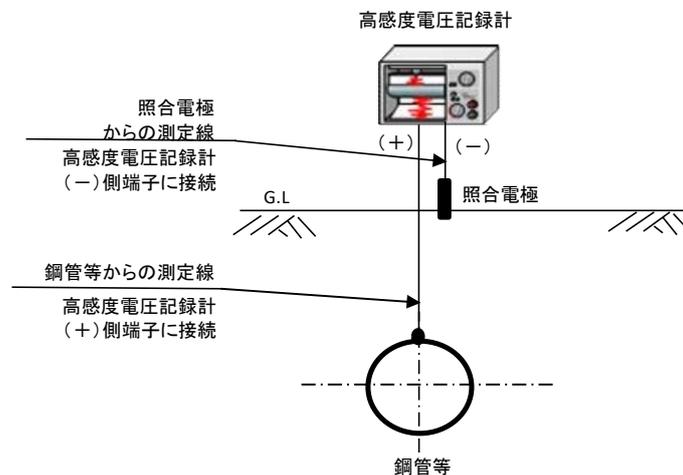


図 3.3-8 管対地電位（分布）測定状況

(4) 判定基準

1) 電位による判定

金属が与えられた環境中で実際に示す電位を自然電位といい、中性土壌中の鋼材の場合、 -400mV ～ -800mV 程度を示すとされている。

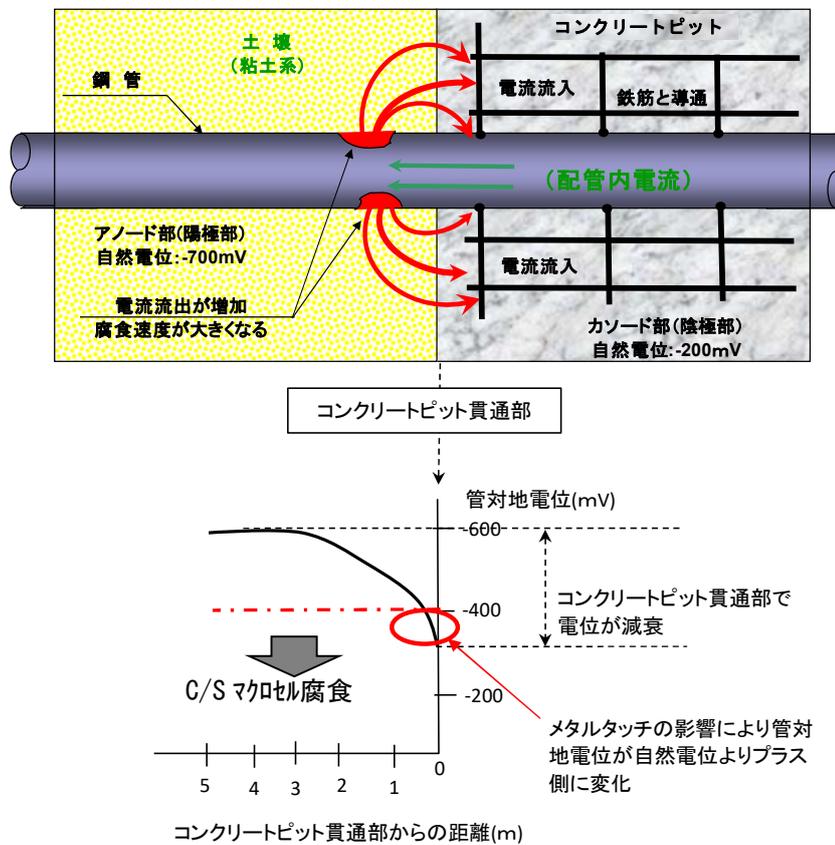
一方、コンクリート等の高アルカリ性 (pH12 以上) の環境では不動態化（鋼材表面に腐食作用に抵抗する酸化被膜が生じた状態のこと）し、 -200mV 程度の自然電位を示す。

鋼管等が、図 3.3-9 のようにコンクリートピットを貫通して配管される場合、土中部とコンクリート中の自然電位に差異が生じ、マイナス側がアノード、プラス側がカソードとなって腐食電池が形成され、アノード部が腐食する。

埋設鋼管等の管対地電位が -400mV よりプラス側である場合、土壌中の自然電位よりプラス側に位置していることになり、腐食電池により腐食が生じている可能性がある状態を意味している。

このため、「C/S マクロセル腐食の可能性あり」に対する管対地電位の判定指標は-400mV以上を標準とする。

この考え方は「マクロセル腐食防食指針 (WSP045-2008)」等、多数の図書で適用されているものである。



【凡例】

.....: 「C/S マクロセル腐食の可能性あり」と判定される管対地電位

図 3.3-9 メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食が進行している場合の管対地電位分布測定結果例

2) 電位変動による判定

土壌中の鋼管等が直流電気鉄道の迷走電流や他防食施設からの干渉等による影響を受ける場合、管対地電位には変動が生じる。この関係に着目し、「消防用設備等の配管を土中に埋設する場合の工事施工に係る指導基準」では、「1 測定地点の管対地電位の最大変位が 50mV 以上の場合⇨電食に対する防食措置を指導」と規定されている。

このため、「電食の危険性あり」の判定基準として電位変動 50mV 以上を標準とする。

なお、干渉の場合は、近隣の防食施設（外部電源方式）の電源の ON-OFF により電位変動が生じる。

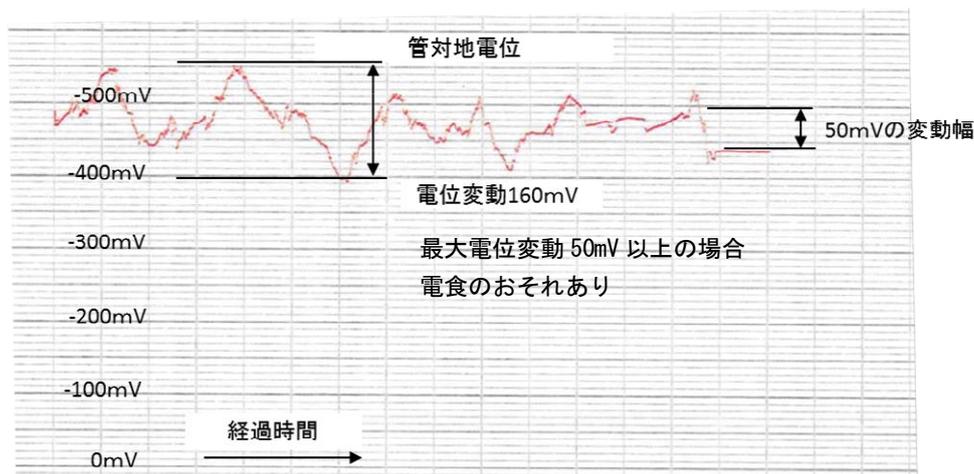


図 3.3-10 管対地電位の測定例（電位変動 50mV 以上）

3) 電位分布における電位差による判定

電位差とは延長のある鋼管等に対し複数の地点で行った管対地電位の差異を示す。電位差が 100mV 以上を示す場合は、腐食環境の程度が大きいと判断され通気差マクロセル腐食又は異種金属接触腐食のおそれありと判定される（図 3.3-11 は 6 地点での管対地電位の測定結果を示した事例であり、管対地電位の電位差が 120mV）。

このため、「通気差マクロセル腐食又は異種金属接触腐食のおそれあり」の判定基準として電位差 100mV 以上を標準とする。なお、基準値の 100mV は、これまでの調査実績から決定している。

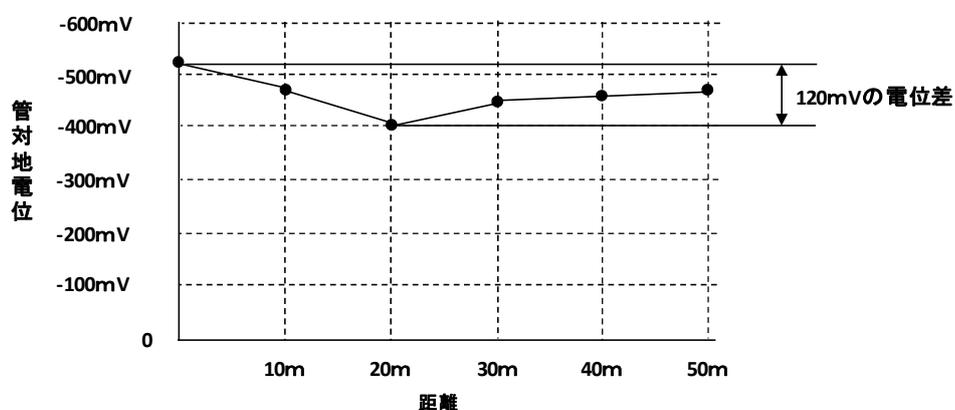


図 3.3-11 複数地点の管対地電位の電位差例

3.3.2 導通試験

(1) 適用条件

導通試験は、鋼管等と他施設の鋼材（主にコンクリートピット中の鉄筋）の電氣的導通を調査するものであるため、マクロセル腐食のうちC/Sマクロセル腐食に対して適用する。

また、コンクリートピット周辺（貫通部）に埋設された鋼管等に対して適用する。

導通試験の適用に当たっては、コンクリートピット貫通部の鉄筋をはつり出す必要があるため、事前に対象となる構造物の詳細（かぶり厚、配筋ピッチ等）を把握し、施設管理者にはつり作業の同意を得る必要がある。

なお、本調査は「メタルタッチしていない」ことは特定できるが、「メタルタッチしている」ことは特定できない。このため、本調査により「メタルタッチの可能性あり」と判定された場合は「メタルタッチの有無を特定するための仮通電試験」が必要となることに留意する。なお、同一路線内や同一地区内で過去にメタルタッチに伴うC/Sマクロセル腐食の発生が確認されメタルタッチの可能性が高いと想定される場合は、本調査を実施せず仮通電試験を実施する対応をとることも可能である。

(2) 調査要領

1) 調査概要

コンクリートピットを鋼管等が貫通し塗覆装に損傷部があると、**図 3.3-9** に示すように、自然電位の差により腐食電流が生じ土中部の鋼管等で腐食が発生する。さらに鋼管等がコンクリート内の鉄筋と接触していると、鉄筋もコンクリート中の鋼管等（カソード）の表面積に含まれ、カソード部が増大し、電位差により生じる流出電流（腐食電流）も増大する。このため、腐食速度は著しく大きくなる。よって鉄筋と鋼管等の電氣的な導通（陰極部の増加）を測定すればC/Sマクロセル腐食環境の有無（あるいは大小）が判定できる。

具体的には、測定器のマイナス側端子に鋼管等からの測定線を接続し、プラス側端子に鉄筋からの測定線を接続し、コンクリートピット中の鉄筋と鋼管等の電氣的な導通を把握する。測定状況を**図 3.3-12** に示す。

2) 標準調査ピッチ

導通試験の場合、鋼管等と保護工等のコンクリート中の鉄筋について各1箇所（場所の指定は特になし）測定線を取り出すことができれば調査可能であるため、標準調査ピッチの規定はない。ただし、コンクリートピット内のバルブ等に絶縁フランジが使用されている場合には、鋼管等からの測定線は絶縁フランジを挟んだ上下流を対象に設置する必要がある。

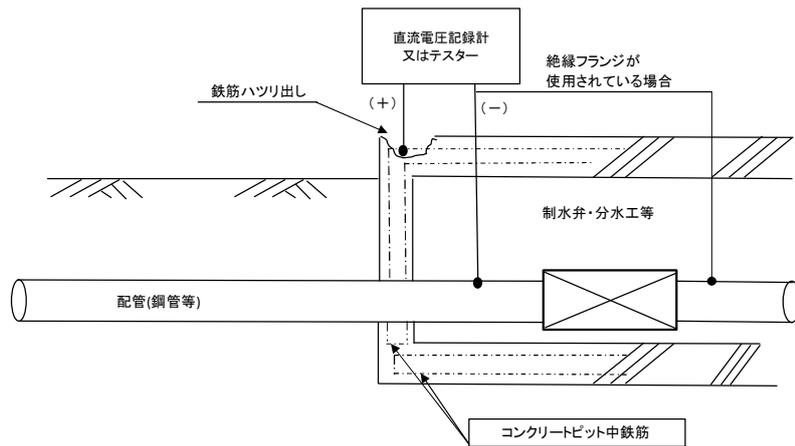


図 3.3-12 導通試験測定状況例

(3) 調査手順

導通試験は、図 3.3-13 に示す手順で実施する。

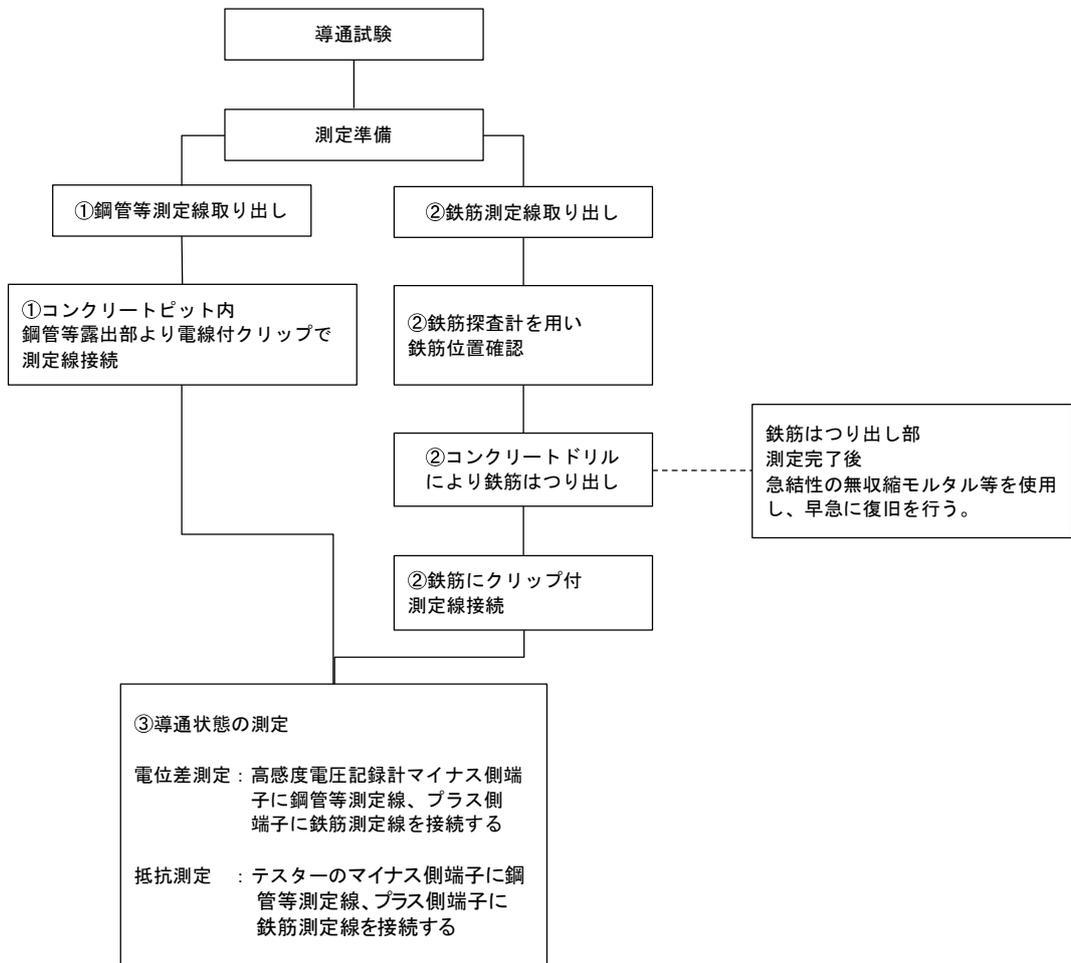


図 3.3-13 導通試験の実施手順

注) ①～③は以降の項目番号を示している。

①鋼管等測定線取り出し

コンクリートピット内等の鋼管等（露出部）から測定線を取り出す場合は、「3.3.1 管対地電位（分布）測定 ①鋼管等測定線取り出し」を参照。

なお、鋼管等からの測定線はマイナス側端子に接続する。

②鉄筋測定線取り出し

コンクリートピット中の鉄筋からの測定線取り出しは、図 3.3-14 に示すように鉄筋探査機で鉄筋位置を探索・確認後、コンクリート中の鉄筋をはつり出し測定線を取り付ける。

なお、鉄筋からの測定線はプラス側端子に接続する。



図 3.3-14 鉄筋からの測定端子取り出し例

③導通状態の測定

導通状態の測定に当たっては、高感度電圧記録計又はテスターによる電位差測定と、テスターによる鉄筋と鋼管等間の抵抗値測定を行う。図 3.3-15 に測定状況を示す。

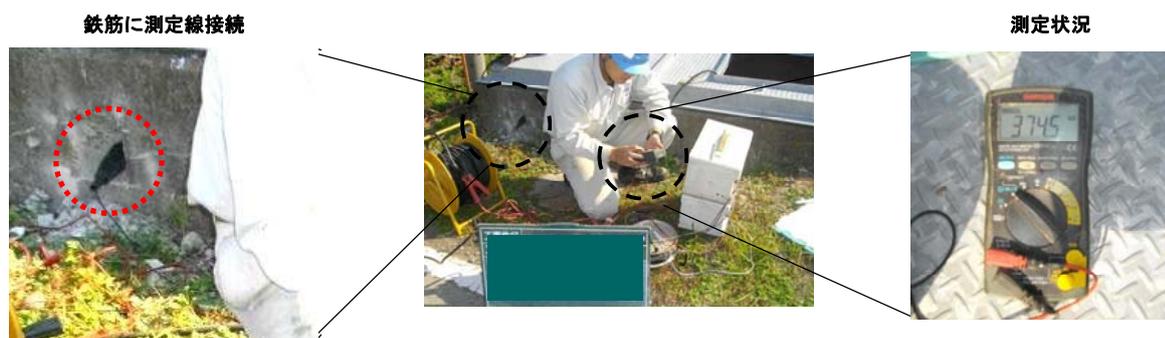


図 3.3-15 鉄筋との導通測定例

(4) 判定基準

マクロセル腐食防食指針（WSP045-2008）では、以下の要領で判定が実施されている。

鋼管と鉄筋間の電位差が 200mV 以上ある場合又は、電位差は 200mV 未満であるが両者間の抵抗が 500 Ω 以上ある場合は「非導通状態にある」、両者の電位差が 200mV 未満かつ抵抗が 500 Ω 未満の場合は、既設鋼管と鉄筋の導通の有無を確実に判定できる「仮通電試験が必要」と評価される。

ただし、判定結果が「非導通状態※」に該当する場合、判定上は非導通状態と評価されるが、これまでの実績より必ずしも非導通状態ではない場合が散見されている。

このため、本マニュアルでは、電位差 200mV 以上かつ抵抗値 500Ω 以上を「鋼管と鉄筋の導通の可能性なし」の判断指標とし、これに該当しない場合は仮通電試験の実施を検討する。

		電位差	
		200mV 未満	200mV 以上
抵抗	500Ω 未満	仮通電が必要	非導通状態※
	500Ω 以上	非導通状態※	非導通状態

図 3.3-16 導通試験結果の判定

3.3.3 仮通電試験

(1) 適用条件

仮通電試験は、鋼管等と主としてコンクリートピット内の鉄筋の電氣的導通を調査するものであるため、マクロセル腐食のうちC/Sマクロセル腐食に対して適用可能である。

また、コンクリートピット周辺（貫通部）に埋設された鋼管等に対して適用可能である。

なお、仮通電試験の適用に当たっては仮設電極の設置が必要となる。仮設電極は、正確な測定結果を得るため調査対象となる構造物や鋼管等から20m以上離すことが望ましいとされている。このため、事前に仮設電極の設置の可否を把握する必要があることに留意する。

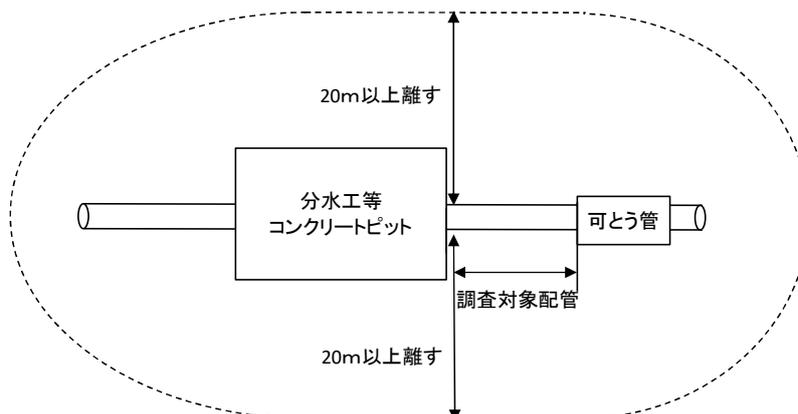


図 3.3-17 仮設電極設置範囲

また、仮設電極とバッテリーの接続に当たっては、接続方法を間違えると鋼管等が腐食するので十分留意する。図 3.3-18 に仮設電極とバッテリーの接続方法を示す。

プラス(+)極を電極に接続

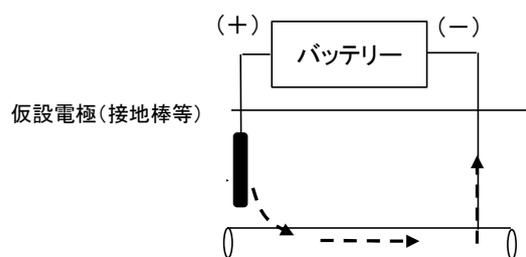


図 3.3-18 バッテリーによる通電方法

留意点を踏まえた仮通電試験実施状況を図 3.3-19 に示す。

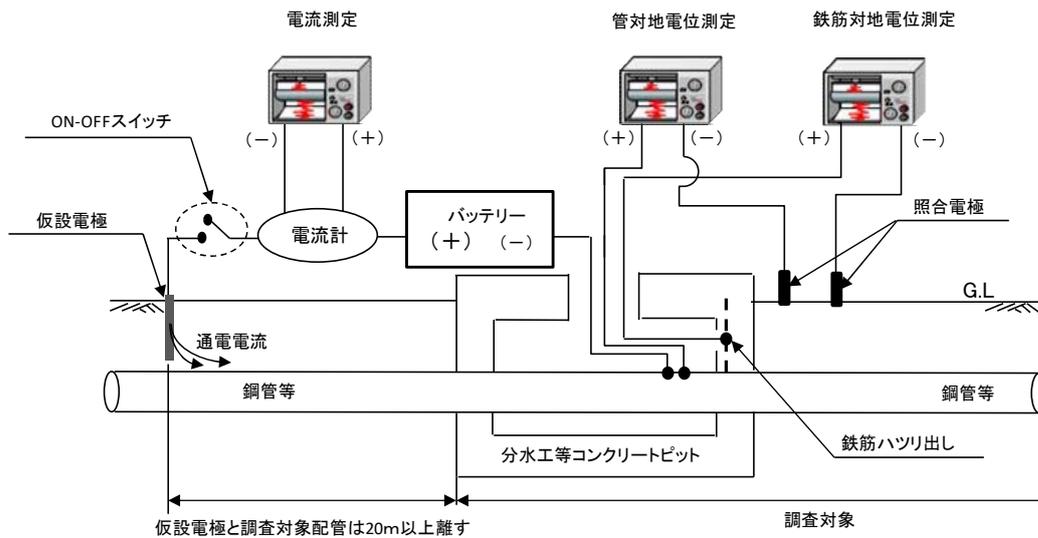


図 3.3-19 留意点を踏まえた仮通電試験実施状況

(2) 調査要領

1) 調査概要

調査対象鋼管等にバッテリー等で直流電流を通電し、通電時の管対地電位・鉄筋の対地電位を同時に測定するものである。その際、通電している直流電流を ON-OFF し、その時の管対地電位と鉄筋の対地電位の変化量並びに直流電流値を測定し、電位変化量の傾向からコンクリートピット中の鉄筋と鋼管等の導通有無を調査する。

この事象から鋼管等と鉄筋の導通有無を判定する（詳細は「(4) 判定基準」参照）。

2) 標準調査ピッチ

仮通電試験の場合、導通試験の結果、仮通電試験の実施が必要と判定された箇所を対象に、鋼管等とコンクリートピット中の鉄筋について各 1 箇所（場所の指定は特になし）測定線を取り出すことができれば調査可能であるため、標準調査ピッチの規定はない。

(3) 調査手順

仮通電試験は、図 3.3-20 に示す手順で実施する。

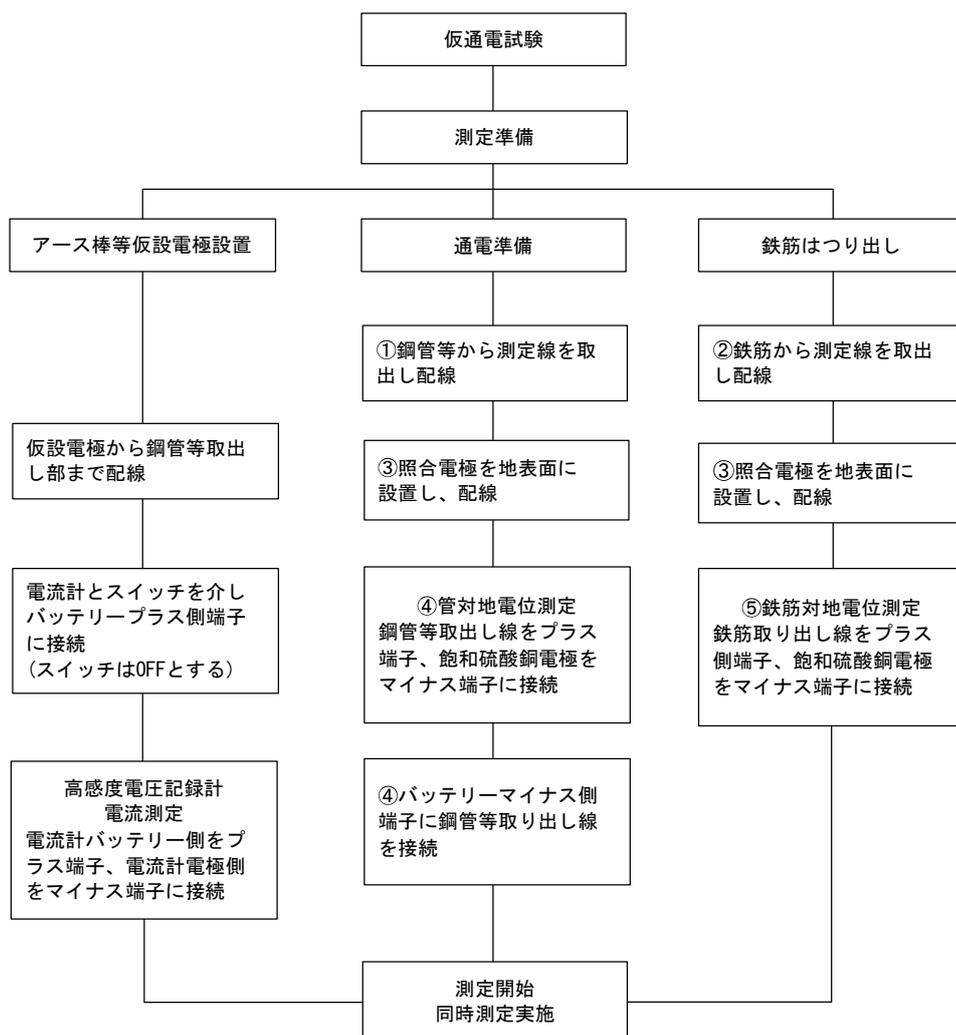


図 3.3-20 仮通電試験の実施手順

注) ①～⑤は以降の項目番号を示す。

①鋼管等測定線取り出し

コンクリートピット内の鋼管等（鋼管等露出部）から測定線を取り出す場合は、「3.3.1 管対地電位（分布）測定」を参照のこと。なお、鋼管等からの測定線はプラス側端子に接続する。

②鉄筋測定線取り出し

コンクリートピット中の鉄筋から測定線を取り出す場合は、「3.3.2 導通試験」を参照のこと。なお、鉄筋からの測定線はプラス側端子に接続する。

③照合電極の地表面への設置

照合電極の地表面への設置は、「3.3.1 管体地電位（分布）測定」を参照のこと。

④管対地電位測定

管対地電位測定は、「3.3.1 管対地電位（分布）測定」を参照のこと。

⑤鉄筋対地電位測定

鉄筋対地電位測定は、鉄筋と電解質（土壌や水）を介した照合電極間の電位差を測定するもので、測定に際し、鉄筋からの測定線を高感度電圧記録計プラス側端子、照合電極（飽和硫酸銅電極）からの測定線をマイナス側端子に接続し測定する。測定状況を図 3.3-21 に示す。

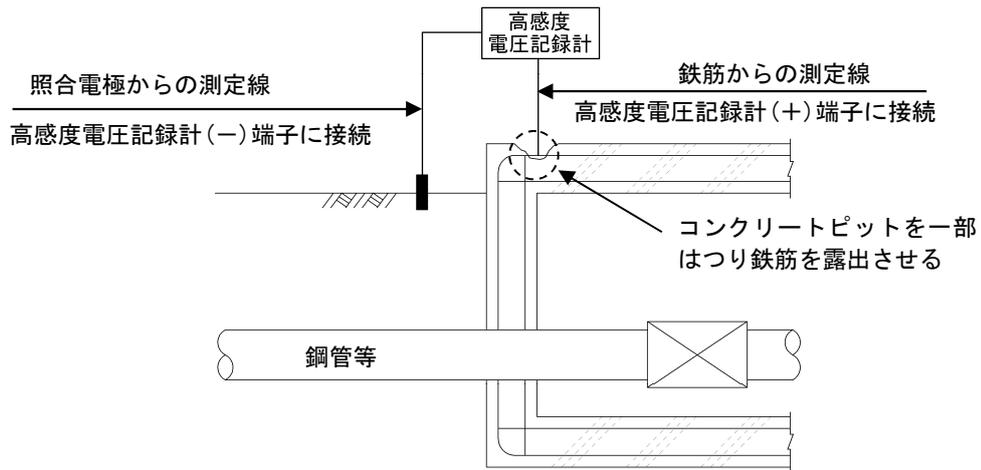


図 3.3-21 鉄筋対地電位測定状況

(4) 判定基準

仮通電試験により鋼管等に向かって直流電流を流すと、鋼管等の管対地電位はマイナス方向に変化する。この時、鋼管等に通電した直流電流は、鉄筋と鋼管等が導通していると、一部の電流が直接鉄筋にも流入し、鋼管等を介して赤矢印のように戻る回路ができる。

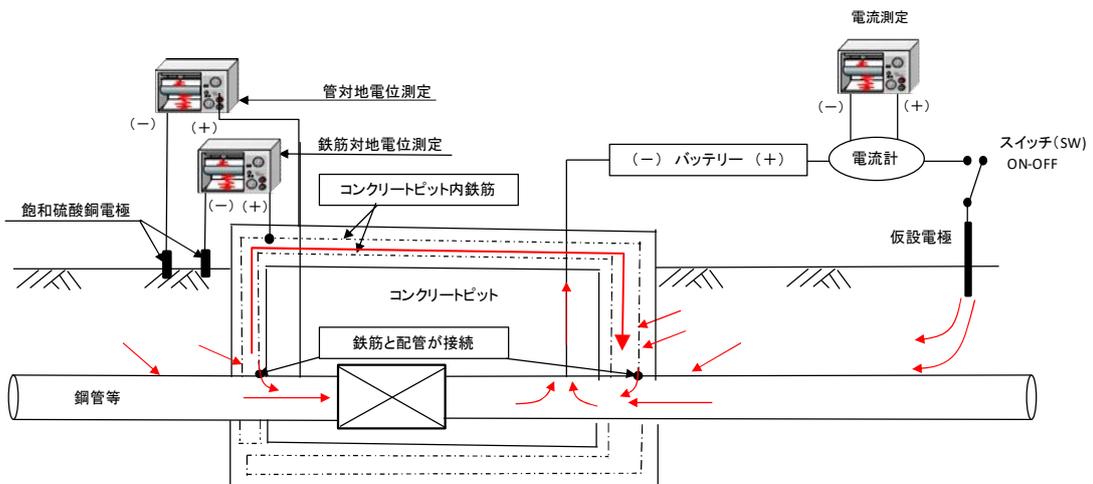


図 3.3-22 鋼管等と鉄筋が導通している場合の電流の流れ

このため、鉄筋が鋼管等と導通していると鉄筋の対地電位もマイナス方向に変化し、鋼管等の対地電位と正相関を示す。鋼管等と鉄筋が導通していない（絶縁）と、鉄筋対地電位は変化しないかプラス方向（逆相関）に変化する。

上記の特性を活用し、鋼管等と鉄筋の導通状態を把握する調査が仮通電試験である。このため、「鋼管等と鉄筋の導通あり」に対する判定指標は鋼管等と鉄筋電位変動が正相関を標準とする。

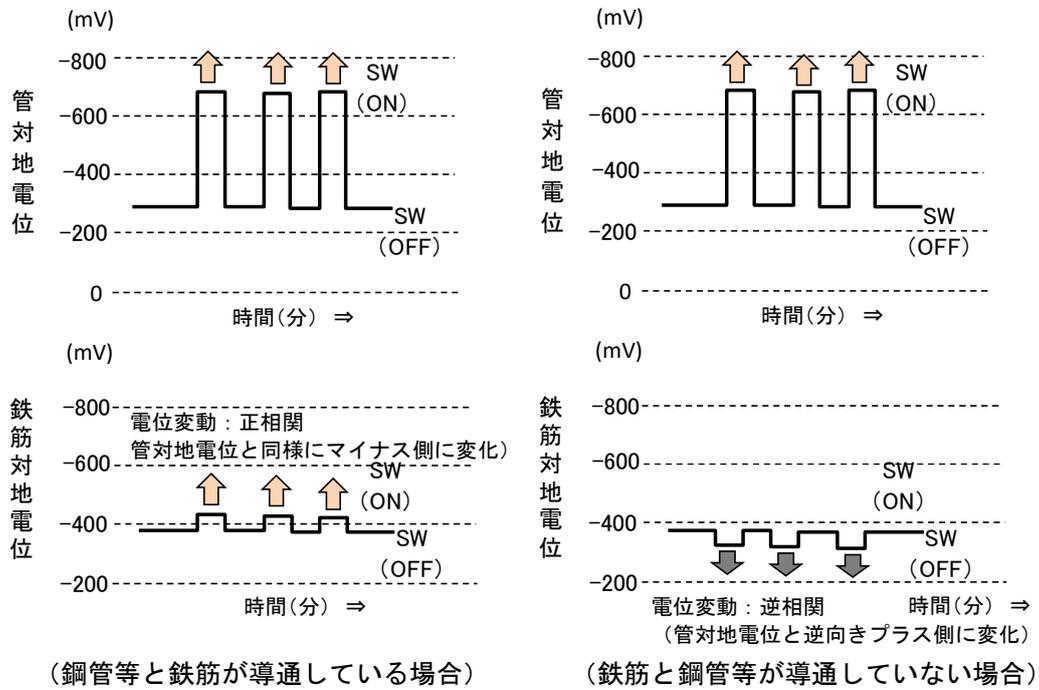


図 3.3-23 仮通電試験結果例

3.3.4 土壌腐食性調査

土壌腐食性調査とは、土壌の化学的性状を把握し、その結果から土壌の腐食環境を評価するものである。

土壌腐食性調査は、土壌抵抗率やその他の土壌特性値及び埋設環境を基に、土壌の腐食性を定性的に数値化評価する代表的な方法として「DIN (ディン) 50929」と「ANSI (アンシ) A 21.5-2010」の評価方法がある。「DIN50929」に比べ「ANSI A 21.5-2010」は調査項目が少ないが、これまでの業務等による腐食性土壌判定の実績から土壌の腐食性を判断できるため、本マニュアルでは「ANSI A 21.5-2010」を採用する。

一般に土壌腐食の進行は比較的穏やかで、質量減少量から求められる平均腐食速度は鋼管の場合、一般的な土壌環境中で約0.02mm/年程度である。

しかし、土壌の各種環境(抵抗率、pH、酸化還元電位(Redox 電位)、含水率(地下水)、土質、可溶性塩基 ($\text{Cl}^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 等)、通気性等)が一般的な土壌環境とは異なる場合、鋼管等が非常に激しく腐食する場合がある。このため、これらの土質性状に着目し土壌腐食性調査を行うことが重要である。土壌環境による腐食因子の主な測定項目を表3.3-2に示す。

表 3.3-2 土壌腐食環境調査の主な測定項目

測定項目	目 的
土 質 (観察目視)	土質の違いによる腐食環境を評価する。粘土質又は細粒分の多い土質では、マクロセル形成時にアノード(腐食部)となりやすく腐食速度が大きくなる。
土壌抵抗率	土壌又は地下水の電気伝導性を評価する。土壌抵抗率が小さいとマクロセル形成時の腐食速度が大きくなる。
pH (水素イオン濃度)	酸性環境の有無、程度を評価する。 pH4以下の酸性では水素発生型の激しい腐食が進行し腐食速度が増大する。
酸化還元電位 (Redox 電位)	嫌気性硫酸塩還元菌による腐食環境を評価する。酸化還元電位が100mV以下では激しい腐食が懸念されるが、この因子だけでは判定しにくい。このため、その他の土質性状を考慮した「ANSI A 21.5-2010」による総合評価を行うことが望ましい。
含水率	土壌の含水率から腐食性を評価する。地下水の影響等、含水率が高いと腐食生成物が溶解しやすく腐食が進行しやすい。また通気性不良によりマクロセル形成時にアノード(腐食部)となり腐食速度が大きくなりやすい。 なお、含水率は、見た目や触診により判断する。
硫化物	硫化物を多く含む土壌は鋼の表面に保護性酸化被膜が生成されにくいいため腐食速度が速くなる。また、硫酸塩還元菌の判定にも利用できる。

(1) 土質

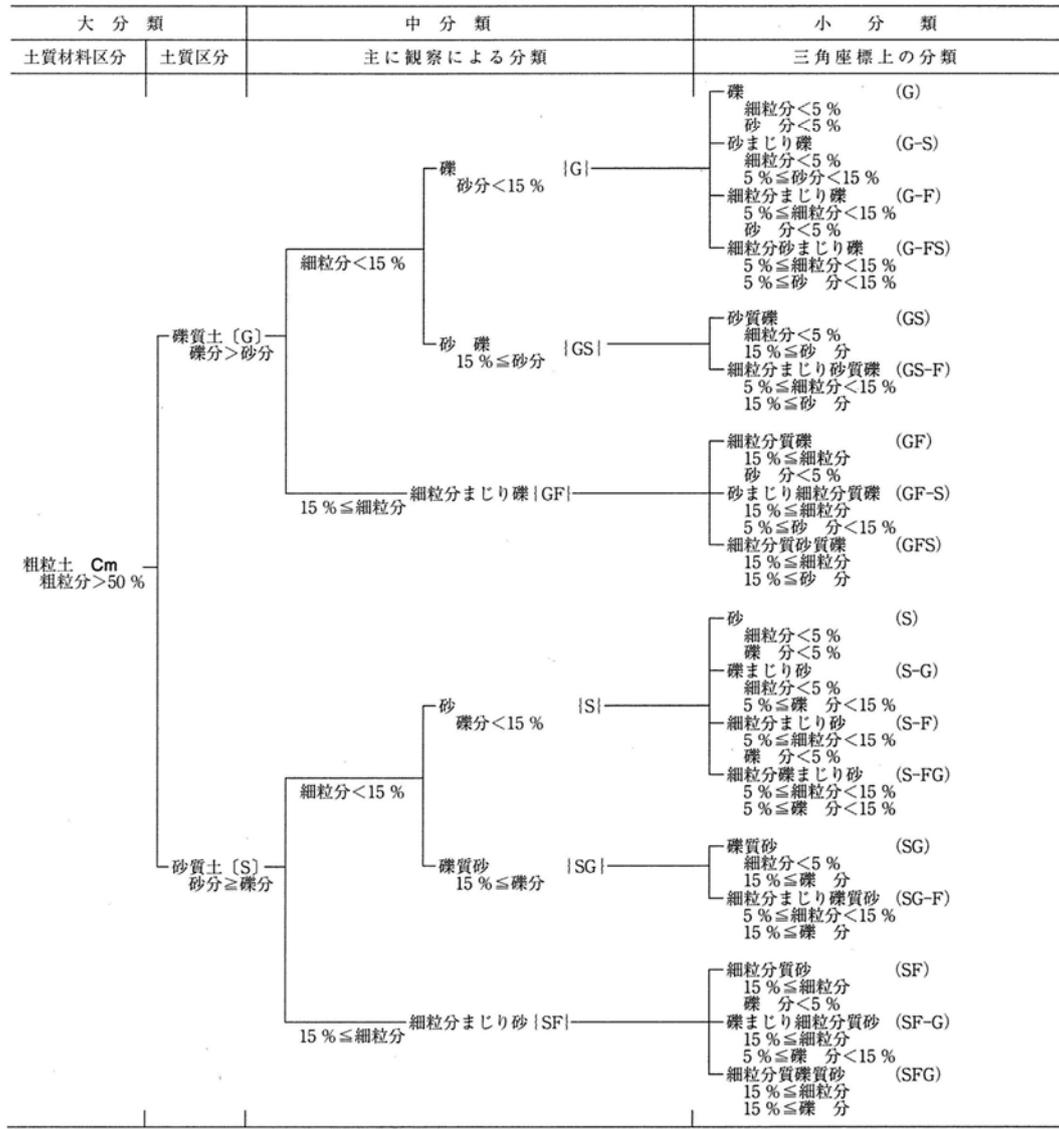
1) 調査要領

土壌中の鋼管等は、土壌との界面で生じる化学反応の結果、腐食が進行する。土壌の腐食環境は、非常に不均一な環境であり、さまざまな腐食要因の影響を受ける。土壌は粒子の直径の大小により礫(れき)・砂・シルト及び粘土に大別されるが、土質による自然電位の違いなど、土質を検証することで腐食環境を把握するものである。

土質は、掘削箇所等を主に目視により観察分類し、必要に応じて粒度分布試験、土の細粒分含有量試験により分類する。

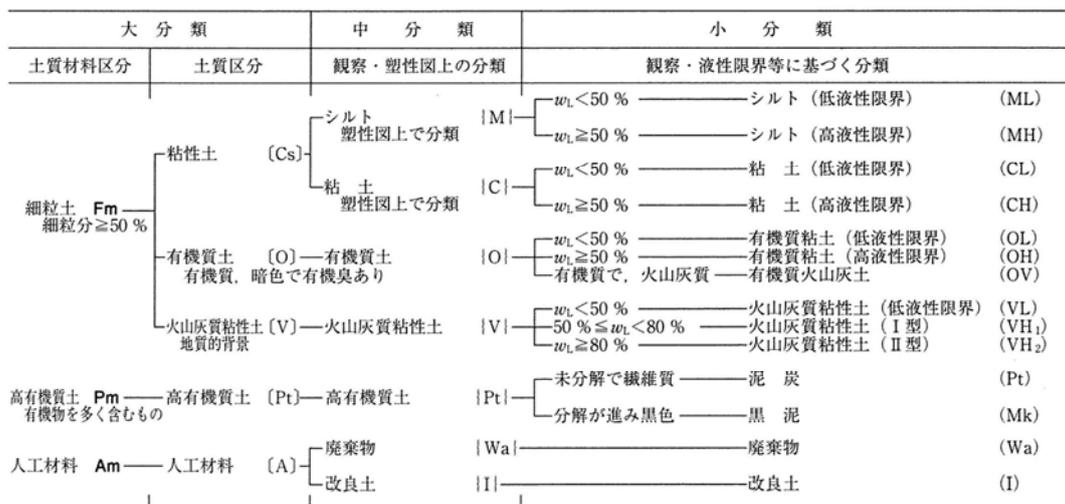
土質の分類を図 3.3-24 土質材料の工学的分類体系（平成 21 年改訂）に示す。

第 2 編 地盤材料の工学的分類



注:含有率 % は土質材料に対する質量百分率

(a) 粗粒土の工学的分類体系



(b) 主に細粒土の工学的分類体系

図 4 - 土質材料の工学的分類体系

図 3.3-24 土質材料の工学的分類体系（平成 21 年改訂）

2) 判定基準

一般的に腐食性が高いとされる土壌は次のような土壌である。

- ・海成粘土*等に代表される酸性土壌
- ・淡水成粘土
- ・泥炭
- ・腐植土

※沖積世などの内湾や潟などの地域（現在の主な平野部）に堆積した粘土である。

このような環境は非常に還元的であるため、硫酸塩還元菌の作用により海水の硫化イオンが還元され、海成粘土は多量の硫化物を含み、強い腐食性を示す特徴を有する。

このような土壌は特殊な腐食性土壌と位置付けられることから、「特殊土壌腐食のおそれあり」の判定指標として対象土壌が海成粘土など酸性土壌、淡水成粘土、泥炭、腐植土であることを標準とする。

なお、対象地の地質が上記に示す腐食性土壌であるかどうかは、掘削箇所等の観察目視及び既存の地質図等から対象地の地質の把握、当該地質の地質構造発達史を文献等から調査することで判定が可能である。

(2) ANSI A 21.5-2010 による評価

ダクタイル鋳鉄管に適用することが多い ANSI A 21.5-2010 では、表 3.3-3 に示す評価点の合計点が 10 点以上となった場合に腐食性土壌であると判定している。

表 3.3-3 ANSI A 21.5-2010 の土壌の腐食性評価

測定項目	測定結果	点数	測定項目	測定結果	点数
土壌の抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	< 1500	10	酸化還元電位 (Redox 電位) (mV)	> 100	0
	1500~1800	8		50~100	3.5
	1800~2100	5		0~50	4
	2100~2500	2		< 0	5
	2500~3000	1	水分	排水悪い、常に湿潤	2
	> 3000	0		排水かなり良好 一般に湿っている	1
pH 値*	0~2	5	水分	排水良好 一般に乾燥している	0
	2~4	3		硫化物	あり
	4~6.5	0	微量		2
	6.5~7.5	0*	なし		0
	7.5~8.5	0			
	> 8.5	3			

※pH 値が 6.5~7.5 の場合で硫化物が存在し、かつ、酸化還元電位が低い場合は 3 点加算する。

1) 土壤抵抗率測定

①適用条件

土壤抵抗率測定は、土壤の抵抗を測定することで腐食電流が流れ易いか、流れにくいかを判定するものであり、マイクロセル腐食、マクロセル腐食、微生物腐食、電食に対して適用可能である。

なお、土壤抵抗率測定の適用に当たっては、以下の点に留意する。

4電極法による土壤抵抗率測定を行う場合、その調査方法（詳細は②調査要領参照）から電極間隔Dとほぼ等しい深さまでの、土壤抵抗率の平均値を示す。電極間隔Dを広げればそれに応じた深い場所の土壤抵抗率が推定できる。但し、既設の鋼製埋設物と平行に間隔を広げた場合は鋼構造物に電流が流出入し電位差が小さく表れ、実際の抵抗率より低い値が測定されるので、**図 3.3-25** に示すように鋼管等と直角方向に測定する必要があることに留意する。

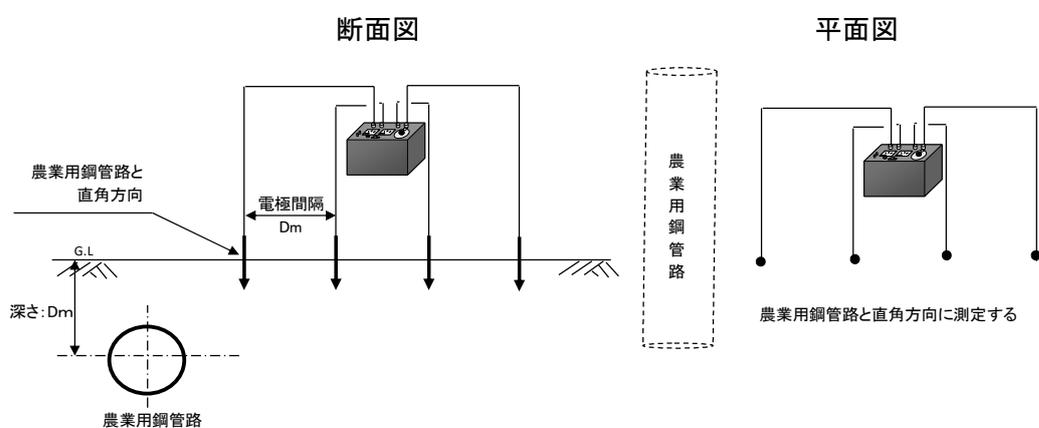


図 3.3-25 配管と直角方向の測定例

また、土壤抵抗率は、腐食電流の流れやすさ（腐食速度）を把握するもので、土壤の腐食環境を知る上で重要な測定となる。なお、土壤の腐食性は、酸素、含水率、含有塩分の種類とその濃度など種々の因子が関係する。このため、本調査結果を考慮し土壤の腐食性調査方法（ANSI A 21.5-2010）により判定する。

②調査要領

a) 調査概要

測定方法は一般的に、土壤杖による方法、1m以上の深度の平均的な土壤の抵抗率を測定する4電極法による方法、土壤箱による方法がある。

掘削が可能な場合は土壤杖による方法を適用し、非掘削によってある深さの土壤抵抗率を測定する場合は4電極法を用いる。

以降に土壤杖による方法と4電極法の概要を示す。

I) 土壤杖による方法

土壤杖の構造は、接地棒の先端に絶縁リングを介した所定の寸法の金属先端からなる。この土壤杖を土中又は水中に挿入し、オームメータから交流電圧を与えた際の抵抗値を測定し、土壤抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$) に換算した値をオームメータの針がゼロになるよう調整しその値を読み取る方法である。

土壤杖による方法の場合、鋼管等の管下部、管横部、管上部を対象に各地点で3回測定を行い、測定値の平均値を採用する。

土壤杖で土壤抵抗率測定するには、先端を少なくとも 30cm 土壌中に突き刺して測定する。図 3.3-26 に土壤杖による測定概念図を示す。

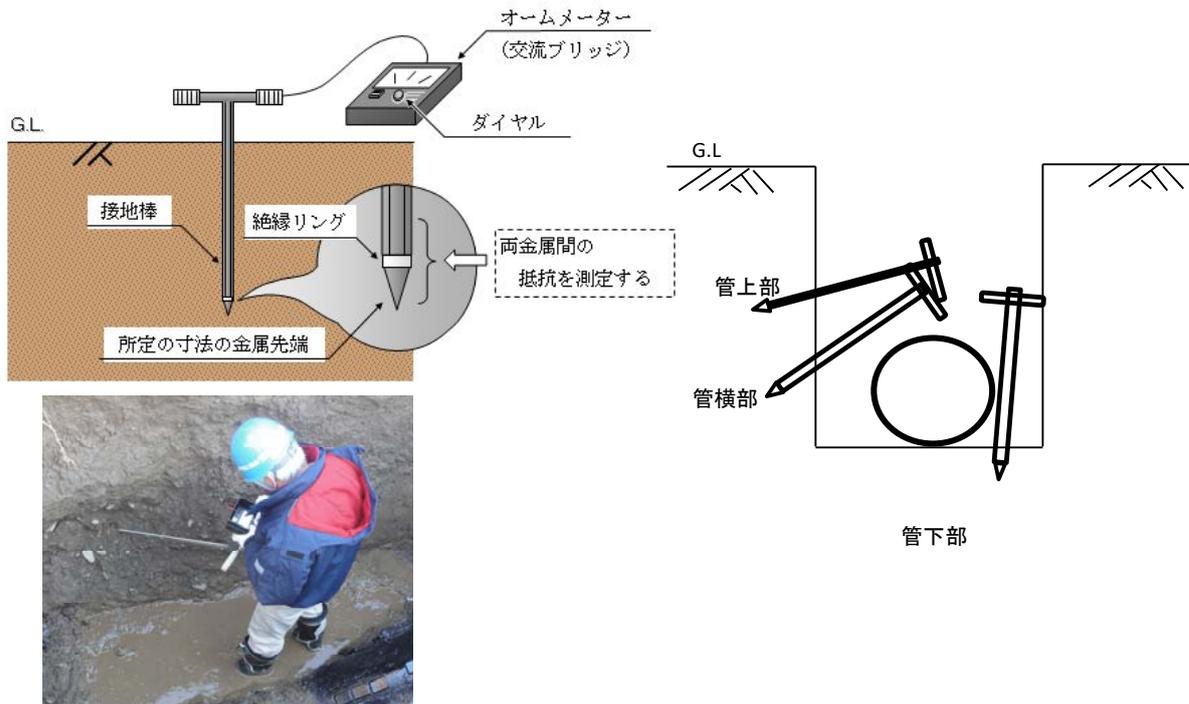


図 3.3-26 土壤杖による測定概念図

II) 4 電極法による測定

地表面に一直線上に 4 本の電極 ($C_1 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot C_2$) を測定深さ 1.0m の間隔で管底以下まで電極 (接地棒) を設置し、 C_1 から C_2 に交流電流を流し、 $P_1 \cdot P_2$ で電位差を測定する。なお、接地棒は鋼管等への電流の流入を防止するため、鋼管等の中心線から $D3/2$ の離隔を確保することが望ましいが、現場の状況に応じて適宜対応する。

鋼管等が埋設されている地盤構造は、抵抗率の異なる複数の地層により形成されている。4 電極法により土壤抵抗率を測定した場合、測定電流が浸透した深さまでの平均的な抵抗値が得られる。この性質を利用して、図 3.3-27 に示したように電極の間隔を順次拡大することで、深さ方向における土壤抵抗率の変化を見ることが可能となる。

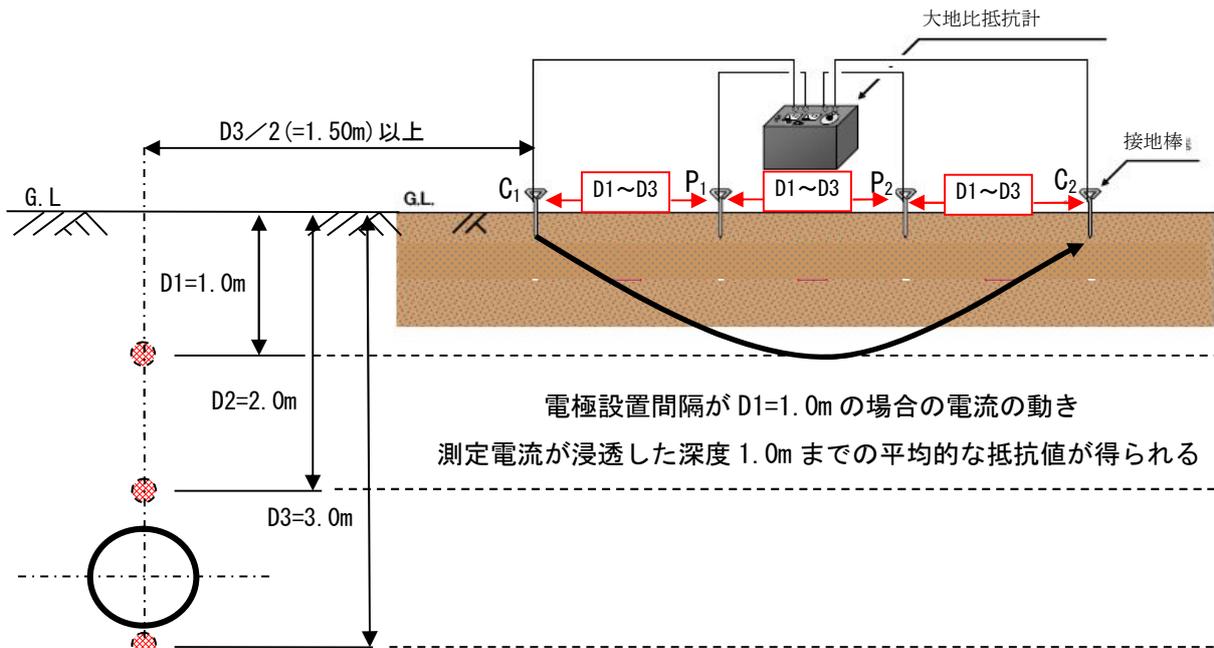


図 3.3-27 4 電極法による測定例

本事例の場合、接地棒間隔が 1.0m、2.0m、3.0m の 3 ケースについて実施することになり、各ケースについて平均的な抵抗率 (R) を測定する。

測定した大地比抵抗 (R) は、P₁ と P₂ 間の電位差を C₁ と C₂ 間に流した電流で割った抵抗 R(Ω) として求められ、次式に代入することにより土壤抵抗率 (ρ) を求めることができる。

$$\rho (\Omega \cdot \text{cm}) = 628 \cdot D \cdot R$$

ここで、D : 測定深さ (m)

R : 大地比抵抗測定値 (Ω)

ρ : 土壤抵抗率 (Ω · cm)

なお、接地棒は土中に接地することを前提とし、差し込み深さに特に規定はないが、10～20cm 程度を目安とする。測定点に舗装がある場合は、φ10mm 程度で穿孔し、土中に差し込む。

b) 標準調査ピッチ

I) 土壤杖による方法

土壤杖による方法の場合、管下部、管横部、管上部を対象に開削断面に 1 箇所以上、調査時の掘削延長が長い場合は 5.0m 程度を標準ピッチとして測定を行うが、掘削断面内の地層構成等が複雑な場合は、調査ピッチを密にする等の対応をとる。

II) 4 電極法による測定

4 電極法の調査ピッチは鋼管等と直角方向について、図 3.3-27 に示すとおり鋼管等の埋設深さに応じて適宜設定する。

③調査手順

本調査方法の場合、特筆すべき調査手順はなく、所定の場所に土壌杖又は接地棒を設置し適宜調査を行う。

④判定基準

土壌は大気、水、その他の環境に比較して複雑な腐食性環境を有するため、地中での鋼管等の腐食度は急速なものから無視できる程度のものまで広範囲にわたっている。

ANSI A 21.5-2010 による評価では、土壌抵抗率の測定結果に応じて表 3.3-3 のように配点が決まっている。

2) 水素イオン濃度 (pH) 測定

①調査概要

水素イオン濃度 (pH) の測定は、pH 試験紙を用いて標準色と比較する比色法と、ガラス電極を用いた携帯型 pH 計による測定法が一般的である。

携帯型 pH 計はガラス電極を複合電極に交換するだけで酸化還元電位計として併用できる機器が数多く販売されている。

計測器を使用する場合は、地下水や十分に水を含んでいる資料は直接ガラス電極を設置して測定可能であるが、通常の土壌を測定する場合は JGS0211-2009 (地盤工学会の土懸濁液の pH 試験法) に基づいた試料の調整・測定を行う。

②判定基準

金属の腐食は、土壌や地下水の水素イオン濃度 (pH) に影響される。pH は水素イオン $[H^+]$ の濃度を示す指標であって、中性が pH7 となり、水素イオン濃度が大きいほど pH1 方向に近づき (酸性)、水素イオン濃度が小さいほど pH14 に近づく (アルカリ性) こととなる。



図 3.3-28 pH 値の表示

腐食因子としての pH と鉄の腐食の関係を示す資料として、土壌の pH と鉄の腐食程度 of 関係を表 3.3-4 に示す。

表 3.3-4 土壌の pH 値と鉄の腐食程度の関係

pH 値	区分	腐食の程度
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	中性又は弱アルカリ性	非腐食性
8.5 以上	アルカリ性	不明*

*不明とは、場合によって非腐食性と腐食性があり、一概に決められないことをいう。

なお、ANSI A 21.5-2010 による評価では、測定した pH に応じて表 3.3-3 のとおりの評価点が規定されている。

3) 酸化還元電位

①調査概要

酸化還元電位の測定は、不活性電極と照合電極からなる複合電極を土中に設置して、両電極間の電位差を計測する。計測器は前頁の携帯型 pH 計のガラス電極を複合電極に交換することで計測できる。なお、電極を土中に接地する際、酸素が一緒に入り土壤中の還元物質が乱れる場合があることに留意する。

②判定基準

微生物腐食のうち、嫌気性の硫酸塩還元菌は水系・土壌系の環境を問わず幅広く生息し、活動の結果生成する硫化水素や硫化物が鋼の腐食に大きな影響を及ぼす。

硫酸塩還元菌の活動する環境は強い還元性の状態にあるので、酸化還元電位は低い値となる。酸化還元電位 (Eh) は次式で算出され、酸化還元電位と嫌気性腐食程度との関係を表 3.3-5 に示す。

$$Eh = Ep + Er + EpH$$

ここで、Ep：計測器による計測値 (mV)

Er^{*}：247mV (カロメル電極に対する水素電極換算値)

*使用した電極(カロメル電極・塩化銀電極等)によって換算値が異なる場合がある

EpH：pH7.0 への修正値 [(pH 計測値-7) × 60mV]

表 3.3-5 酸化還元電位と嫌気性腐食の程度

Eh 範囲 (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

計算例：pH6.5 の土壌中で計測した電位が-100mV の場合、

$$Eh = (-100) + 247 + [(6.5 - 7.0) \times 60] = 147 - 30 = +117\text{mV}$$

ANSI A 21.5-2010 による評価では、酸化還元電位に応じて表 3.3-3 のとおりの評価点が規定されている。

4) 硫化物

①調査概要

土壌には粘土に代表される低抵抗率土壌と砂に代表される高抵抗率土壌がある。低抵抗率土壌は Cl⁻ や SO₄²⁻ などの塩類濃度が高く、空気と水の透過度が低い。Cl⁻ や SO₄²⁻ の濃度が高いと、鋼表面に酸化被膜が生成されにくいため腐食速度はより速くなる。

硫化物の測定は、現地で土壌や地下水を採取し分析する。硫化物は非常に不安定で現地で試料採取する際に揮発し酸化分解するので、以下のように保存する。

- ・あらかじめポリエチレン瓶に亜鉛アンミン溶液を満たしておく。
- ・採取した試料（50g）を瓶に入れて溶液をあふれさせる。
- ・容器中に空気が残らないよう密栓してよく混和した後に5°C以下に保つ。

②判定基準

SO_4^{2-} は硫酸塩還元菌の存在下で高くなるので、微生物腐食の判定にも利用できる。分析方法は、ヨウ素滴定法、メチレンブルー吸光光度法、地盤工学会基準 JGS 0241 土の水溶性成分試験方法 7. 塩化物、硫酸塩含有量試験等により行う。

ANSI A 21.5-2010 による評価では、硫化物の有無に応じて表 3.3-3 のとおりの評価点が規定されている。

3.3.5 塗覆装損傷調査

鋼管の腐食は、塗覆装が損傷し鋼表面が直接土壌と接する部位で激しく腐食することが多い。マイクロセル腐食、マクロセル腐食、電食の腐食環境下にある鋼管で塗覆装損傷調査により損傷箇所が検証できれば、腐食危険箇所としての対応が容易にできる。

塗覆装の損傷調査は以下の2工法に大別される。

- ・ 鋼管に直流電流を通电し、地表面電位勾配の変化から検出する方法（地表面電位勾配測定）
- ・ 鋼管に交流電流を通电し、誘起電圧の大小から検出する方法

塗覆装（アスファルトライニングやプラスチック被覆等）で被覆している鋼管に直流又は交流電流を通电すると、塗覆装が健全な部位は抵抗が高いので鋼表面への流入電流が小さく、塗覆装に損傷部（鋼面が土壌と接触）があると健全な部位と比べ抵抗が小さくなり流入電流は大きくなる。流入電流の大きい部位は、図 3.3-29 に示すように地表面電位勾配にも極性の反転という変化が生じる。上記の二つの工法は、いずれもこの変化を測定することで塗覆装の損傷部を判定するものである。

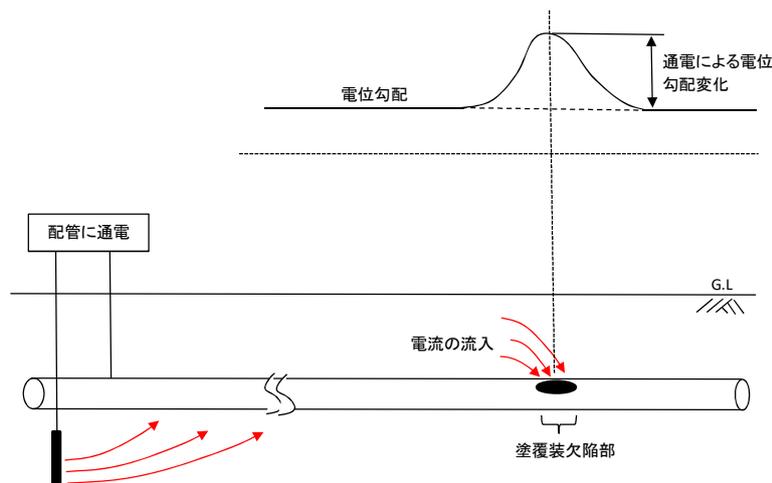


図 3.3-29 通电による電位勾配の変化

直流電流を通电する方法は、交流電流を通电する方法に比べ安価に実施できるが、測定精度はやや劣る。一方、交流電流を通电する方法は、測定精度が高く、道路上等、使用する受信器の走行性が確保されれば効率的に調査が可能であるが、調査費用は高くなる。

(1) 鋼管に直流電流を通电する方法（地表面電位勾配測定）

1) 適用条件

本調査適用に当たっての留意点を次頁以降に示す。

①調査精度

本調査方法では、管周方向の塗覆装損傷位置（管上・管下等）までは判定できない。また、他分野の事例では、塗覆装損傷部の規模にもよるが概ね土かぶり 2~3m 程度での適用実績（損傷特定実績）が多く、土かぶりが大きくなる場合には適用に当たり留意する必要がある。

また、本調査は、塗覆装損傷部だけではなく、鋼管に水道管や存置された鋼矢板などが接触している場合にも同様の結果を示すため、必ずしも塗覆装損傷部を特定できるものではないことに留意する。

②メタルタッチが生じている場合

コンクリートピット中の鉄筋と鋼管がメタルタッチしている部位（C/S マクロセル腐食環境にある配管）では、塗覆装損傷部と比べ、鋼管と接続している鉄筋の表面積の方がはるかに大きいので、通電電流のほとんどが鉄筋に流入してしまい、塗覆装損傷部の地表面電位勾配の変化が微小となる。このため、このような部位での塗覆装損傷調査は適用できないことに留意する。

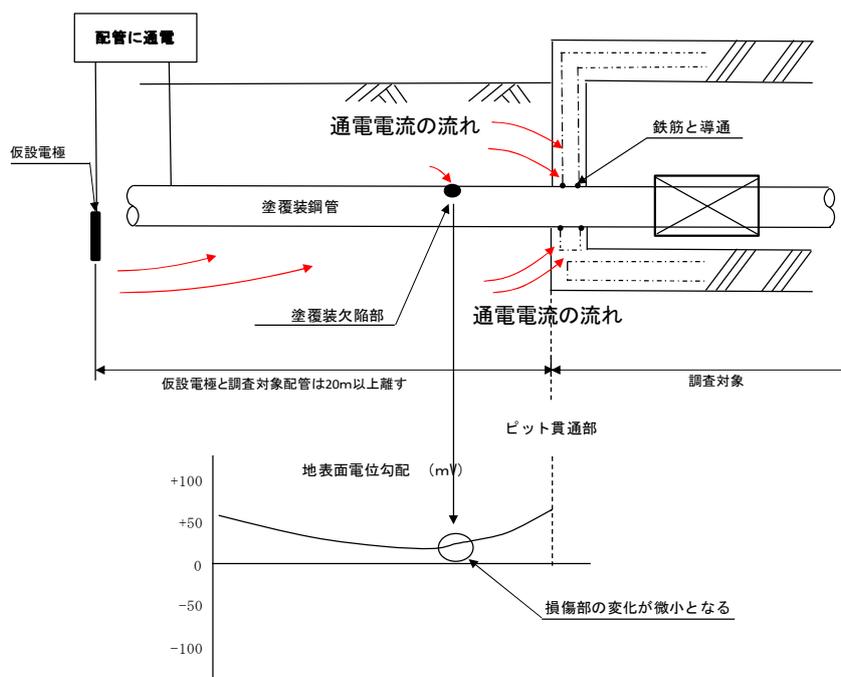


図 3.3-30 鉄筋とメタルタッチした際の地表面電位勾配例

③仮設電極の設置

電流測定に際し設ける仮設電極は、「3.3.3 仮通電試験」と同様、調査対象となる構造物や鋼管から 20m 以上離すことに留意する。

2) 調査要領

①調査概要

本調査方法は、仮設電極により鋼管に強制的に直流電流を流し、2本の照合電極を地表

面の2地点に設置し、高感度電圧記録計で2点間の電位差を測定するものである。

鋼管に通電した直流電流をON-OFFしながら地表面電位勾配を測定すると、図3.3-31に示すように塗覆装損傷部付近で、極性が反転する。

②標準調査ピッチ

地表面電位勾配測定は、最初は10m間隔程度で測定し、極性の反転（塗覆装損傷部）を検知後、その部位を1m間隔で測定すると、前後1m程度の範囲で損傷箇所を判定できる。

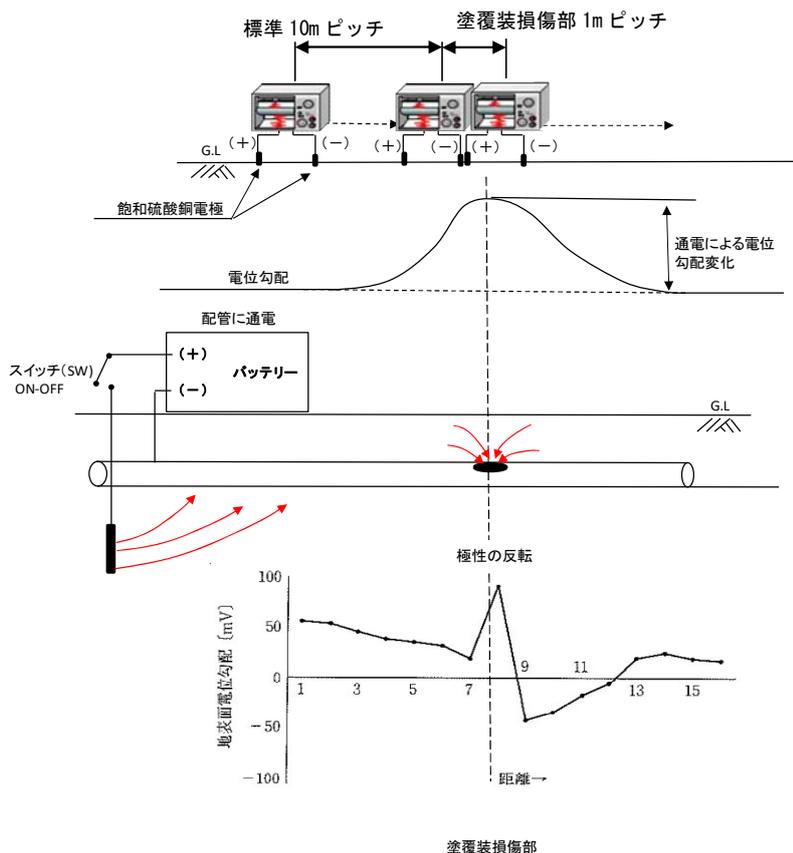


図 3.3-31 直流通電による地表面電位勾配測定 (例)

3) 調査手順

①照合電極の地表面への設置

照合電極の地表面への設置は、「3.3.1 管体地電位 (分布) 測定」を参照のこと。

②地表面電位勾配の測定

地表面電位勾配の測定に当たっては、鋼管と平行方向に実施する。なお、起点側の測定端子を高感度電圧記録計のプラス側端子、起点から離れた測定端子をマイナス側端子に接続し測定を行う。

4) 判定基準

鋼管に通電した直流電流を ON-OFF しながら地表面電位勾配を測定し、塗覆装損傷の可能性ありの判定指標として、図 3.3-31 に示すように電位勾配の変化（極性の反転）が認められた場合を標準とする。

(2) 鋼管に交流電流を通電する方法

1) 適用条件

本調査方法の適用条件は「(1) 鋼管に直流電流を通電する方法（地表面電位勾配測定）」と同様である。

2) 調査要領

①調査概要

鋼管に交流電流を通電し、基本的に鋼管直上で電位勾配を測定する。基本的な原理は直流電流を通電する方法と同様であるが、直流電流を通電する方法に対し測定精度が高く、測定効率も良いことが利点である。ただし、調査に当たっては測定器を走行させる必要があるため、平坦かつ走行性が良い調査地点で適用する。

測定は図 3.3-32 に示すように、測定対象の鋼管に交流発信機をセットして通電し、通電によって発生する地表面電位勾配と塗覆装損傷部に生じる位相変化を手押し式又は自走式受信器の車輪を電極として検出・評価する。

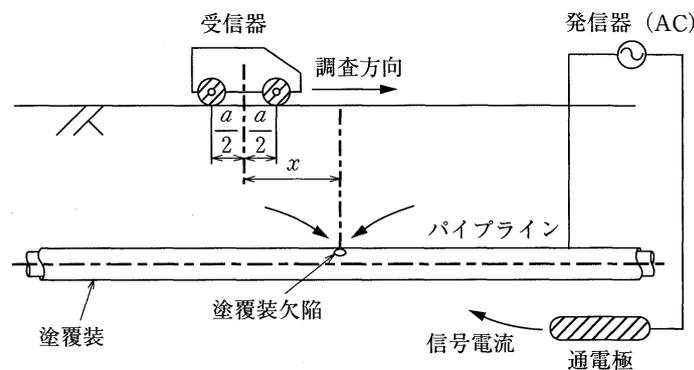


図 3.3-32 交流通電による測定概要

②標準調査ピッチ

本調査方法は線的に実施するものであり、標準調査ピッチはない。なお、調査精度を向上させるため、調査は同一測線上で2回（2測線）実施することが望ましい。

3) 調査手順

本調査は次の手順で実施する。

1. 調査対象始点終点部に発信装置の設置
2. 機器のキャリブレーション（模擬損傷部での位相調整実施）
3. 路面への散水
4. 調査実施（2回実施）
5. 調査結果の記録

4) 判定基準

図 3.3-33 に示すように、通电した交流の位相変化 ($+90^\circ$ ($\pi/2$) から 180° ($-\pi/2$) への変化) 地点と振幅の極小点が重なる地点が塗覆装損傷部を示す。

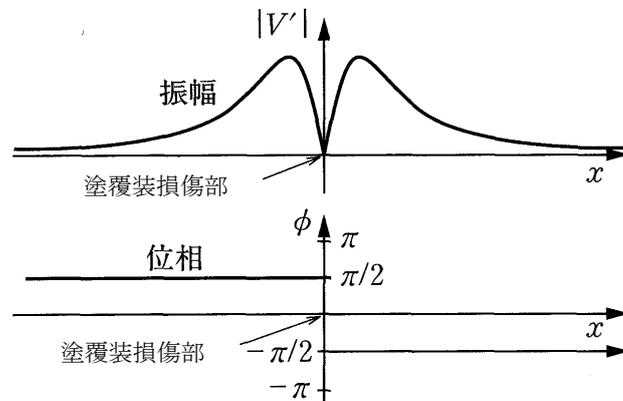


図 3.3-33 塗覆装損傷判定例

3.4 腐食状態調査

腐食状態調査は、鋼管等の腐食状態の把握と対策の要否判定を目的とし、外観目視又は超音波法（管厚測定）により実施する。

腐食機構がマクロセル腐食又は電食の場合は外観目視を行い、マイクロセル腐食の場合は超音波法又は外観目視を行う。

【解説】

3.4.1 超音波法（管厚測定）

(1) 適用条件

超音波法はマイクロセル腐食に対して適用可能である。

なお、超音波法適用に当たっての留意点を以下に示す。

- ・管内で診断を実施する場合は「 ϕ 800mm 以上（作業性を考慮すると ϕ 1000mm 以上が望ましい）、管内に進入できる程度の水深（30cm 程度まで）又は内水なし」の条件が求められる。
- ・管外面からの計測は、最大腐食深さまで管表面を均等に研磨し探触子を探傷面に垂直に置かないと誤差が生じる。
- ・内面腐食がある場合には、管厚を正確に測定できない。
- ・管外面からの調査に際しては、鋼管等の塗覆装や腐食生成物を除去し、腐食部の最深部に端子が垂直に密着できるように表面をサンダー等で研磨した後、**図 3.4-1** に示すように鋼管等に垂直に探触子を密着させ測定する必要がある。

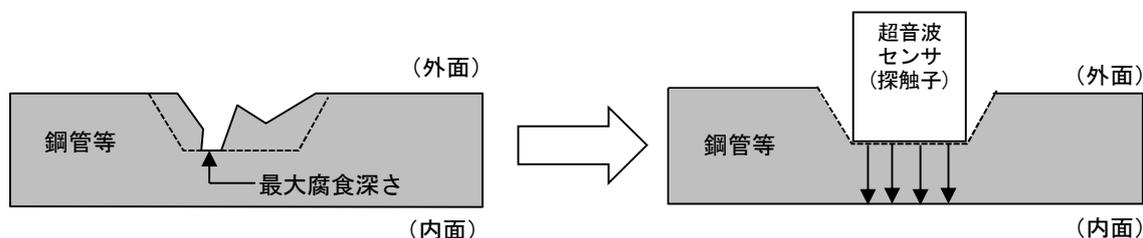


図 3.4-1 測定要領

(2) 調査要領

1) 調査概要

超音波による管厚測定は、基本的に測定対象金属（鋼管等）の外面又は内面に探触子と呼ばれるセンサーを押し当て、センサーから発信した超音波が金属の健全部と腐食部の境界面で反射することを利用し、受信までにかかった時間（反射して戻ってくる時間（伝搬時間））を基に厚さを算出する。

なお、本調査方法はその測定原理から孔食や局所腐食、管継手部など平面状でない箇所では測定が困難であり、一般的にはマイクロセル腐食を対象に実施する。

$$D=1/2 \times C \times t$$

D: 厚さ・C: 音速・t: 伝搬時間

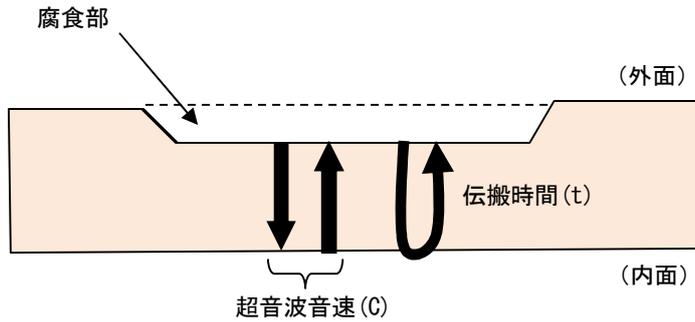
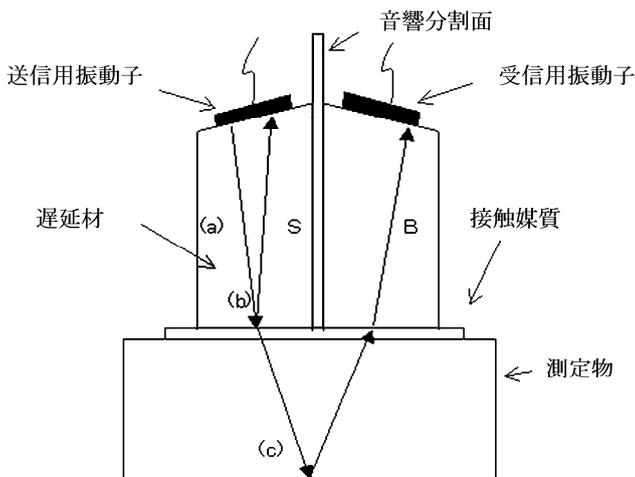


図 3.4-2 超音波法による管厚測定原理

具体的には次のとおり実施する。

- ①送信用振動子から超音波を入射し、測定物表面からの反射波（図のS波）と測定物底面からの反射波（図のB波）を受信する。各々の反射波を受信した時間差からの測定物の厚さを判定する。



【凡例】

- (a) 探触子から送信された超音波
- (b) 測定物表面での反射
- (c) 測定物底面での反射
- S 測定物表面からの反射波
- B 測定物底面からの反射波

図 3.4-3 超音波厚さ計の探触子の原理

- ②探触子を探傷面におくと、垂直探傷子の中に組み込まれた振動子によって発生した超音波パルスは、探傷面と垂直な方向に試験体の中を伝搬していく。超音波パルスは試験体内伝搬していく途中で、傷や底面など、超音波パルスを反射させる原因となる反射源に当たると戻ってくる。戻ってきた超音波パルス信号、すなわち反射波をエコーといい、これらは探傷器の表示器に描かれている目盛板上に探傷図形として表示され、目盛板上の管厚(W)（図 3.4-4）を読み取り、鋼管等の厚さを測定する。

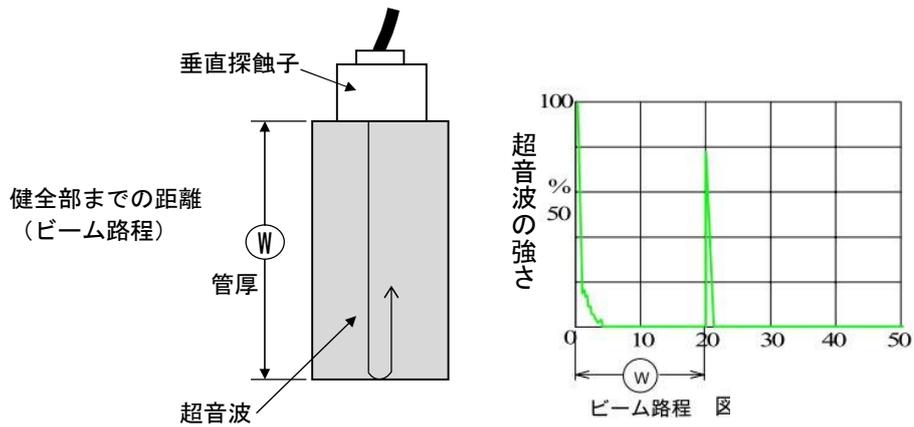


図 3.4-4 探触子による厚さ計測の原理

2) 標準調査ピッチ

調査箇所は、外面調査の場合 1 調査地点当り管頂、両管側（左右）の 3 箇所、内面調査の場合、管頂、両管側（左右）、管底の 4 箇所を基本とするが、内外面の腐食によって測定値にばらつきが生じる可能性があることを考慮し、最大 12 箇所（内面調査）まで測定箇所を設ける。なお、調査対象区間の前後 1m 地点についても同様に計測を行う。

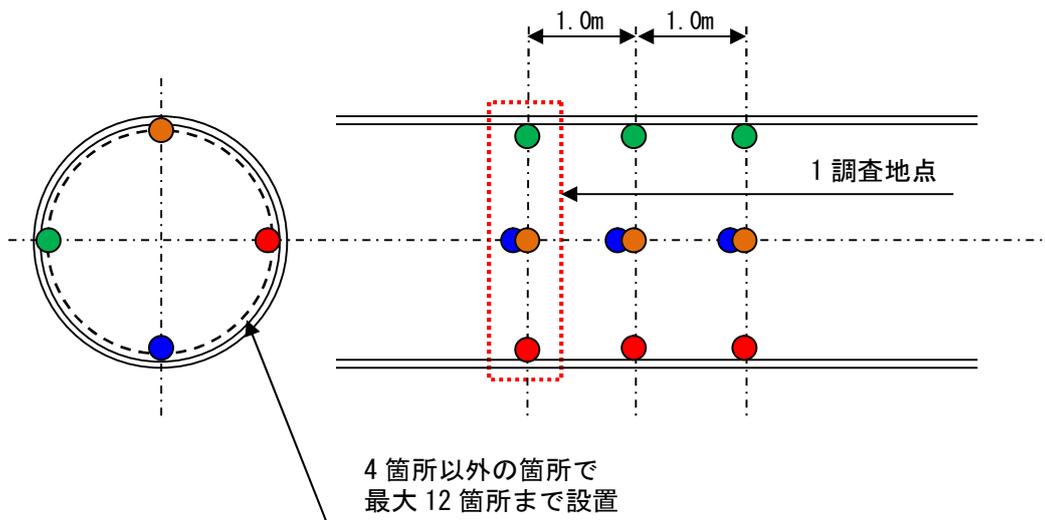


図 3.4-5 超音波法測定実施箇所（管内での調査の場合）の例

(3) 調査手順

超音波法による管厚測定の手順を以下に示す。

- ①試験片を用いたキャリブレーション
- ②調査対象管路の清掃
- ③測定箇所のマーキング
- ④管厚の測定
- ⑤腐食深さ算定（規定管厚から測定管厚を差し引く）

(4) 判定基準

超音波法（管厚測定）による腐食状態により適用する対策区分を表 3.4-1 に示す（詳細は「4.2 対策工法の検討」参照）。

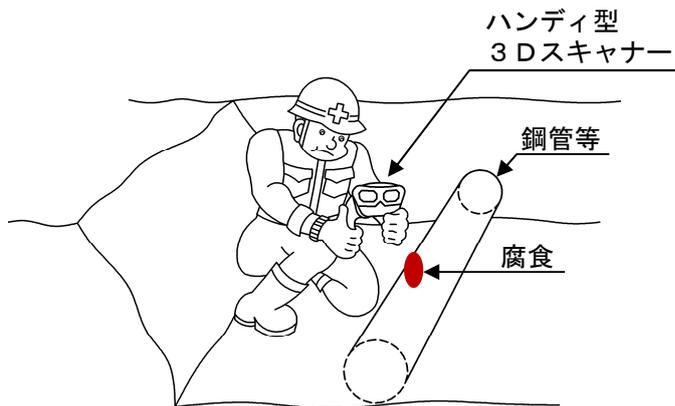
表 3.4-1 腐食状態評価の判定基準

腐食の状態	性能の評価	適用される対策区分
設計管厚×0.3 以上かつ 円周方向に全体的	力学的安全性に重大な影響あり	補強又は改修・更新
設計管厚×0.3 以上であるが局所的	力学的安全性に対する影響が小さい	補修 補強又は改修・更新
設計管厚×0.3 未満	力学的安全性を保持している	補修

コラム ～ハンディ型3Dスキャナー機器の紹介～

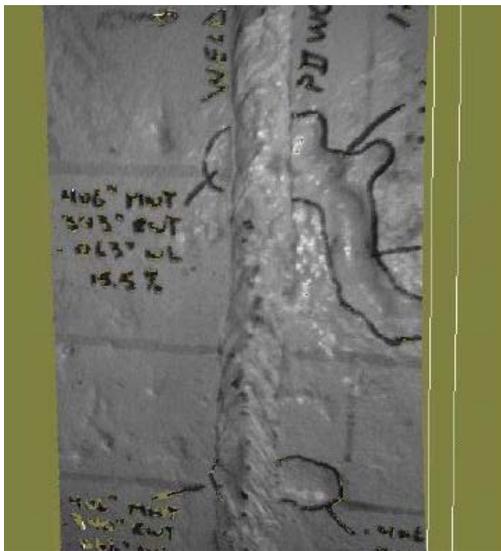
ハンディ型3Dスキャナーは、構造化光法等を用いた計測機器であり、腐食の程度を計測する他の機器と比べて、現場での作業効率化、データ取得再現性の向上、より精細なデータの取得による記録性の向上、経年変化のより正確な記録・評価できる。

【計測状況イメージ】



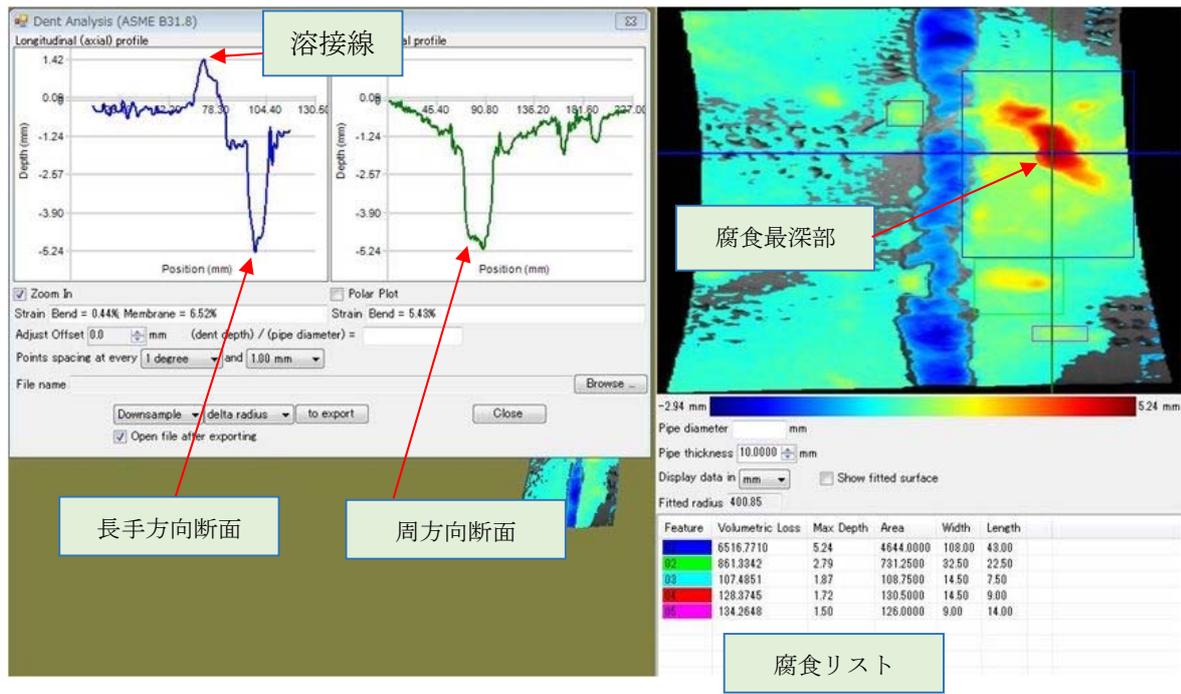
本機器は軽量かつコンパクトであり、現地での作業に当たっても計測技術者が一人で容易に対応できる（現場での計測状況イメージは左図参照）。

【鋼管等溶接線周辺の腐食の3D画像例】



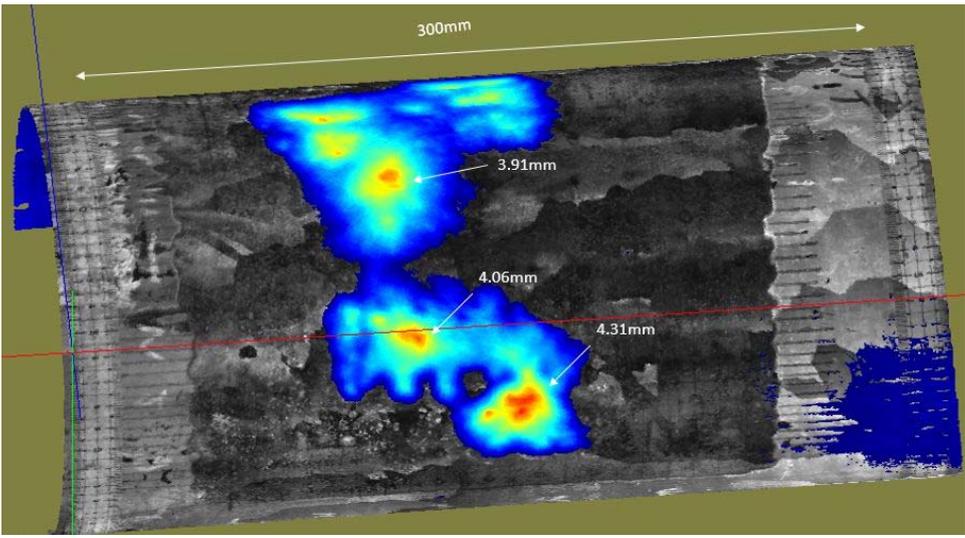
左図は、周方向に溶接線の走っている鋼管等の腐食計測事例である。従来、腐食深さはデプスゲージを使って手動で計測しているが、デプスゲージの台に当たる部分が溶接線に当たってしまう、このような事例では正確な計測が困難であった。本コラムで紹介している、可視光による非接触式3次元計測手法では、面単位で一括して形状を取得できるため、鋼管等の健全面からの高さや深さを、容易に把握が可能となる。

次頁の図面は、この腐食面の3次元形状を一括して取得した座標群に、装置標準添付のソフトウェアでデータ処理を施し、腐食深さをカラーマップ化した図である。この図では、赤が腐食、青が盛り上がり（溶接線など）を表している。



本ソフトウェアでは、腐食のカラーマップの表示とともに、腐食リストの生成や、任意の点での、長手方向・周方向の高さプロファイル（断面）グラフを生成し、さらに、高さ・深さのデータを2次元に展開したCSVファイルとして保管できる。

下図は、比較的広い範囲のなだらかな減肉形状を3次元計測し、データ処理後カラーマップを生成したものである。このような一回の計測範囲を超える腐食に対しても、重複領域を設けつつ複数回取得した3次元データを、半自動で合成し、データ処理ができる。3次元座標データにはモノクロ階調データが乗っており、鋼管等表面に書き込んだメモなどを一緒にデータ化でき、記録性も従来手法（手書きスケッチ）よりかなり進化しているといえる。また、定点観測データを比較し、腐食や損傷の進展具合を定量的に把握も可能である。



第4章 対策工法

4.1 基本的事項

腐食に対する補修（防食工法）は、鋼管等の耐久性を回復又は向上、若しくは腐食の抑制により施設の長寿命化を図ることを目的に実施し、「電気防食」、「塗覆装」、「メタルタッチ切断」に分類される。

【解説】

4.1.1 防食工法の目的と分類

管路の腐食を防止したり抑制することを防食という。防食工法は図 4.1-1 に示すとおり電気防食、塗覆装、メタルタッチ切断に分類される。

(1) 電気防食

鋼管等から電解質（周辺土壌等）へ腐食電流が流れ出ることによって腐食が生じる。電気防食は、この腐食電流に対抗して鋼管等へ防食電流を流入させることで、腐食電流を減少あるいは停止させて防食を行う。

電気防食は、防食電流の供給方式により「流電陽極方式」と「外部電源方式」に分類されるが、本マニュアルでは、鋼管への適用実績を踏まえ「流電陽極方式」について記述する。

外部電源方式は、防食対象の管路が大口径かつ延長が長い場合及び流電陽極方式で対応できない電流を必要とする施設に対して実施する。維持電力費を要し、過防食や隣接鋼構造物への影響に留意する必要がある。詳細は、WSP050-2017（水道用塗覆装鋼管の電気防食指針）等を参照する。

(2) 塗覆装

鋼管の表面に塗覆装を施すことにより、腐食環境の悪い土壌や水等から遮断し腐食を防止する防食方法である。既存の鋼管塗覆装と同程度の対策を行った場合は耐久性の回復となり、既設塗覆装より絶縁性の高い材料や複数の被覆を重ねる塗覆装を行った場合は耐久性の向上となる。

塗覆装の使用材料は、既製のシートライニング材である（詳細は「4.3.2 塗覆装」参照）。

また、本マニュアルでは熱収縮シート及び熱収縮チューブのプラスチック系防食材の材料を総称してジョイントコートと記載している。

(3) メタルタッチ切断

鉄筋コンクリートピットと配管の絶縁により、C/S マクロセル腐食の防止を目的として実施する。

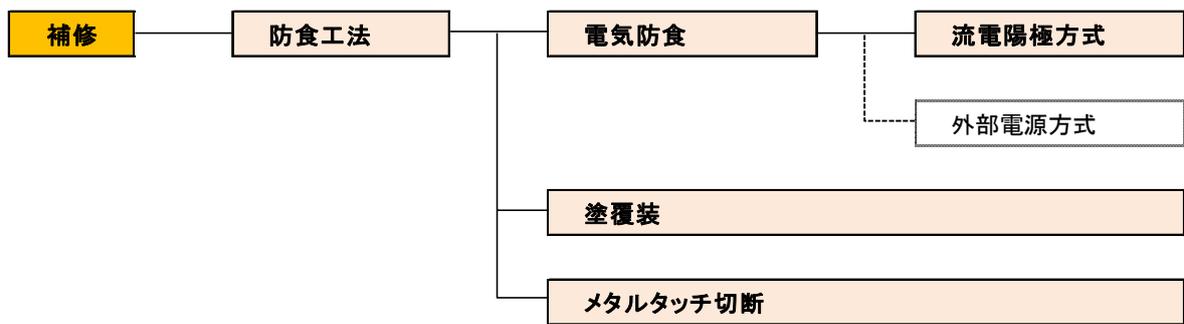


図 4.1-1 防食工法の分類

本マニュアルにおける腐食に対する補修（防食工法）は、「電気防食」、「塗覆装」、「メタルタッチ切断」を対象としている。

補修（耐久性回復または止水対策）における漏水補修クランプ・漏水補修ジョイント（メカニカル補修）、当て板工法については「WSP081-2019 鋼管路の更新・診断マニュアル」に詳述されているため参照されたい。

なお、本マニュアルでは、管路の付帯施設として排泥管路の腐食により漏水が生じた施設で実績のある「**管路更生局所補修工法**」を巻末の参考資料に掲載している。

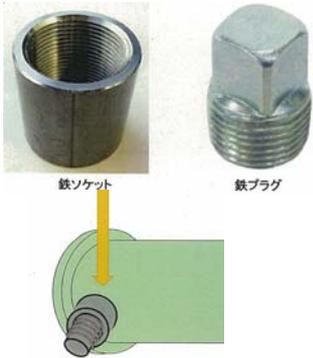
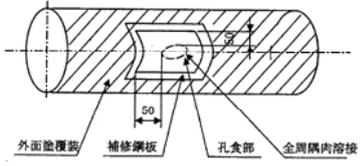
コラム ～漏水に対する対策事例～

防食工法は、腐食により漏水等が発生していない鋼管等に対して実施する場合（予防保全）と、漏水が発生した鋼管等に対して実施する場合（事後保全）が想定される。

事後保全として防食工法を実施する場合、漏水対策を併用する必要がある。一般的な漏水対策は表1に示すようなものがあり、施設条件や経済性等を考慮し適宜選択する。

なお、漏水補修クランプ・漏水補修ジョイント（メカニカル補修）、鉄ソケット・鉄プラグによる止水対策は小口径管路に、当て板工法は大口径管路に対する適用実績が多い。

表1 一般的な漏水対策

漏水補修クランプ 漏水補修ジョイント (メカニカル補修)	鉄ソケット・鉄プラグ	当て板工法
<p style="text-align: center;">漏水補修クランプ</p>  <p style="text-align: center;">漏水補修ジョイント</p>	 <p style="text-align: center;">鉄ソケット</p> <p style="text-align: center;">鉄プラグ</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 局部腐食箇所バンドを巻きつける要領でクランプ又はジョイントを設置し止水する。 ・ φ2000mm までの実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄ソケットを溶接し、溶接したソケットに鉄プラグをねじ込むことで止水する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管外面から局部腐食箇所に鋼板を溶接し止水する。

なお、鋼管等で漏水が確認された場合の対応手順と留意事項は以下のとおりである。

- 1) 事故報告（事故原因を「電食」とする報告が多いことから、漏水箇所周辺に直流電気鉄道や変電所等があるか確認すること）（腐食の分類は P. 2-7 参照）
- 2) 対策の検討及び原因究明調査の実施（管理者から事故歴の聞き取り及び資料確認）
- 3) 対策工法及び詳細調査の検討・判断
- 4) 対策の施工時（土質資料の収集、動画・写真、デプスゲージ、超音波・3D スキャナー等で管路の腐食状況を確認するとともに、塗覆装を準備し、補修必要箇所の既設塗覆装を復旧する。）

また、必要に応じて対応すべき事項として 5)～7) を示す。

- 5) 詳細調査実施（腐食環境調査＋腐食状態調査）
- 6) 防食工法検討
- 7) 防食工法の実施

漏水が確認されない場合でも、腐食による減肉や腐食発生面積が著しい場合は、既設塗覆装の除去及び塗覆装の新設や当て板工法等、適切な対策を検討する。

4.2 対策工法の検討

腐食が確認され対策工法が必要となった場合は、腐食程度（腐食深さと腐食範囲）と重要度区分に応じて対策区分（補修・補強・改修・更新）を判断する。補修を選定した場合、鋼管等に生じている腐食機構、施工条件、施設の重要度区分、経済性等を踏まえて、適切な防食工法を選定し、必要に応じて防食工法の組合せ（併用）を検討する。

【解説】

4.2.1 対策区分の判断指標

(1) 腐食深さ

設計基準パイプラインによると、鋼管等の設計管厚は下式により算定される。

$$t \geq \frac{0.5D \cdot H + \sqrt{(0.5D \cdot H)^2 + 24\alpha \cdot \sigma_a \cdot M}}{2\sigma_a} \dots\dots\dots (9.4.5)$$

ここに、

- t : 応力計算から求められる必要管厚 (mm)
- D : 管の内径 (mm)
- H : 設計水圧 (MPa)、 $H=H_1+H_2$
 H_1 : 静水圧 (MPa) H_2 : 水撃圧 (MPa)
- M : 外圧によって延長 1mm 当たりの管体に発生する最大曲げモーメント
 (N・mm/mm) (単位変換 1kN・m/m=1,000N・mm/mm)
- α : 引張応力/曲げ応力
 ダクタイル鋳鉄管 0.7 鋼管 0.7 硬質ポリ塩化ビニル管 0.55
 ポリエチレン管 0.75
- σ_a : 許容引張応力度 (N/mm²)
 ダクタイル鋳鉄管 : 許容応力度を引張強さの 90%、安全率を 2 とする。
 $\sigma_a = 420 \times 0.9 \div 2 = 189\text{N/mm}^2$
 鋼管 : 溶接効率を考慮し、許容応力度を引張り強さの 85%、安全率を 2 とし、表 4.2-1 に示す。
 硬質ポリ塩化ビニル管 : 安全率を 3 とし、 $\sigma_a = 45 \div 3 = 15\text{N/mm}^2$
 ポリエチレン管 : 安全率を 3 とし、 $\sigma_a = 6.2\text{N/mm}^2$ (MPa)

表 4.2-1 鋼管の許容引張応力度

材質 \ 項目	引張強さ (N/mm ²)	許容応力度 σ_a (N/mm ²)
STW490 (SM490)	490	208
STW400、STPY400	400	170
STW370、STPG370	370	157
STW290、SGP	290	123
STPG410	410	174
SUS304、316	520	221

上記式中の許容応力度 (σ_a) は、鋼材の引張強さ (表 4.2-1) に対し溶接効率の 85%と安全

率 (=2) を考慮し決定している。鋼管等の余裕厚は、式 9.4.5 で算出した設計厚 (t) と「安全率を 1 として算出した管厚 (t')」の差分として考える。

ここで、t' と t の比率は計算上約 0.65~0.68 と算定され、安全側に丸めて 0.70 を採用する。この結果を踏まえ、鋼管等の余裕厚 (腐食深さ) の目安は設計管厚×0.3 と設定する。

なお、局所的な腐食の場合 (次頁の「(2) 腐食範囲」参照)、本指標値以上の腐食深さが生じても鋼管等の力学的安全性に対する影響は小さいと考えられるが、現状では局所的な腐食範囲及び腐食深さと管体の力学的安全性の関係が明らかにされていないため、局所的な腐食に対しても本値 (設計管厚×0.3) を腐食深さの指標値として準用する。

既存資料から設計管厚が把握できない場合は、安全側に考慮し最小管厚×0.3 と設定する。口径に応じた最小管厚は表 4.2-2。

表 4.2-2 鋼管の最小管厚

口径 (mm)	最小管厚 (mm)	備考
80~90	4.2	JIS G3452 SGP 管規格
100~125	4.5	
150	5.0	
175	5.3	
200	5.8	
225	6.2	
250	6.6	
300	6.9	
350~600	6.0	JIS G3457 STPY400 規格
700~1,600	6.0	水門鉄管技術基準
1,650	6.2	
1,800	6.5	
1,900	6.8	
2,000	7.0	

(2) 腐食範囲

国営造成施設を対象とした突発事故調査結果によると、鋼管の主な腐食形態はマクロセル腐食であり、マクロセル腐食による孔食が局所的に生じている状態が現場で確認される主な腐食形態であると想定される。

対策区分の判断に当たっては、腐食範囲、腐食深さと鋼管等の力学的安全性の関係を定量的に評価し、補修の適用が可能な局所的な腐食の定義を示すことが望ましいが、現在の技術では困難である。このため、腐食範囲については、**図 4.2-1** に示す事例を参考に目視等で定性的に判断し、「局所的」と「全体的（円周方向）」を決定するものとする。



（局所的に腐食が生じている事例）

（円周方向に全体的に腐食が生じている事例）

図 4.2-1 腐食範囲の参考例

なお、対策区分の判断に係る具体事例の蓄積・活用により、判断の考え方の精度向上を図り、適切な対策実施に資するため、①施設諸元、②実施済みの機能診断結果、③重要度区分、④詳細調査（腐食環境調査、腐食状態調査）結果、⑤残供用期間、⑥施設造成者と施設管理者の協議結果（選定した対策区分）について記録を残す必要がある。記録様式は**表 4.2-3**。

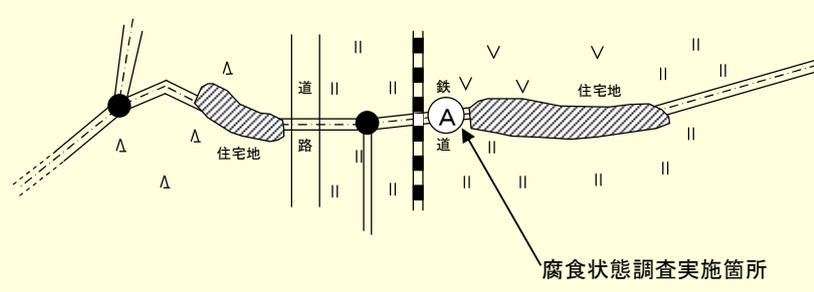
また、作成した記録票については、保管するとともに写しを各農政局土地改良調査管理事務所にその都度提出するものとする。

表 4.2-3 対策区分選定結果記録票（記載例）（1/2）

対策区分記録票						
作成日		2019年2月13日				
基本情報						
施設造作者		〇〇農業水利事業所				
施設管理者		〇〇土地改良区				
地区名		〇〇地区				
施設名		A 幹線用水路				
所在地		〇〇県△△市××地先				
施設諸元	管種	鋼管				
	口径、設計管厚	口径	1,500	(mm)	設計管厚	7.0
施設運用上の不具合		特になし				
施設の重要度区分		A（鉄道や道路横断部を有し、突発事故が発生した場合第三者被害が想定される）				
機能診断結果	機能診断実施年	2015年				
	健全度評価 [※]	S-4				
	※「農業水利施設の機能保全の手引き」参照					
主な変状		管内面に軽微な錆が点在				
腐食環境調査結果						
実施した腐食環境調査項目調査結果	調査項目	実施の有無	調査結果			
	管対地電位分布測定	実施	電位	-400mVより (+)	電位差	対象外
	管対地電位測定	未実施				
	導通試験	未実施	電位差		抵抗値	
	仮通電試験	実施	鋼管等と鉄筋の電位変動が正相関			
	土壌腐食性調査、土質調査	未実施				
	塗覆装損傷調査	未実施	コンクリートピット貫通部であるため必要なし			
	調査結果の所見	腐食機構	C/Sマクロセル腐食			
腐食状態調査結果						
実施した腐食状態調査項目調査結果	調査項目	実施の有無	調査結果			
	近接目視	実施	腐食の有無	腐食あり		
	超音波法	未実施	腐食の有無			
	基準深さ	2.1mm	設計管厚(mm)×0.3			
	腐食程度	腐食深さ	腐食深さ≥設計管厚×0.3			
		腐食範囲 [※]	実測値	2.2mm		
※設計管厚×0.3以上の深さを有する腐食の発生形態を記載						
腐食状況写真						
※腐食範囲の規模がわかるようにスタッフやロッドテープ等と併せて撮影すること。						
残供用期間	20年以上を想定					
施設造作者と施設管理委託者の協議結果	対策区分(リストより補修、改修、更新を選定する)		改修			
	対策工法		管路更生工法			
	協議結果	腐食範囲が局所的であること、また、腐食深さが対策区分判定指標の基準値である2.1mmを0.1mmだけ超過していることから、力学的安全性を有していると判断され補修の適用が可能であるが、本施設は重要度区分がAであり、突発事故が生じた場合の社会的影響が甚大であるため、安全側に考慮し改修又は更新から経済的である改修を選定した。				

【凡例】 : 記載欄 : リストから選択

表 4.2-3 対策区分選定結果記録票（記載例）(2/2)

自由記載欄（可能な限り記載する）	
対象施設の周辺環境	<p>A幹線用水路は〇〇頭首工を取水源とし、受益面積〇〇haの用水を送水する施設である。地上部の土地利用条件は様々であるが、住宅地や道路横断部、鉄道横断部を有する。腐食状態調査を実施した箇所は鉄道横断部付近に位置する空気弁保護工の直下流であり、突発事故が生じた場合の第三者被害は甚大であると想定される。 接近する鉄道は交流電化区間であり迷走電流の影響はない。</p> 
対象施設の埋設条件	<p>開削した結果、埋戻し土に石の混入が認められた。このため、転圧時に石の影響により塗覆装の損傷が生じた可能性が高い。</p> 
検討上特に苦慮した事項	<p>補修工法を併用（塗覆装+電気防食）することも考えられたが、本施設の場合、重要度区分を考慮して改修を選定した。この判断については、定量的な根拠を設定できないため、判断に苦慮した。</p>
その他特記事項	<p>A幹線用水路には本調査地点以外にもメタルタッチに伴うC/Sマクロセル腐食が懸念される箇所（空気弁及び流量計保護工等）が複数あるため、早急に詳細調査を実施することが望ましい。</p>

(3) 施設の重要度区分

重要度区分は、農業面では農業への影響度や復旧の難易度（費用、期間）を、農業以外の面では住宅地、公共機関等の周辺施設の立地条件から、事故が発生した場合の被害等を踏まえて評価ができる。

パイプラインにおける施設の重要度区分は、設計基準パイプラインによると、表 4.2-4 のように示されている。本表に示されている区分を基本としつつ、当該施設が置かれた状況等を総合的に勘案した上で決定する。

表 4.2-4 パイプラインにおける重要度区分

区 分	項 目 ①～③のいずれかに該当する施設	判断する上での参考指標
重要度区分 A種 (レベル2地震動を 考慮する)	①利水施設としての規模。 供給される用水の中断あるいは減量が地域の生活機能及び経済活動・生産活動に与える影響の度合い。	・水路システムの中で上流に位置し、施設規模が極めて大きく、かつ被災した場合にライフラインとしての水供給、ひいては地域の生活機能や経済活動・生産活動に著しい支障を来たす場合。 例) 基幹水利施設(水田用水)として、流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上、管径で $\phi 2,000$ ($V=1.5\sim 2.0\text{m/s}$ 程度を想定) 以上 ¹⁾ など。 また、バイパス水路の有無や、関連施設からの供給の可能性など地区の状況に応じて勘案する。
	②被災による二次災害危険度。 パイプライン施設が被災することによる第三者への被害で、特に人命・財産やライフラインなどへの影響。	・パイプライン施設に近接して家屋、避難場所、若しくは公道、鉄道、ライフライン等重要公共施設があり、水路の損壊による流出水が大量にこれらの場所に流入、又は湛水し、人命若しくは社会経済的に重大な影響を及ぼすおそれがある場合。
	③応急復旧の難易度。 パイプライン施設が被災した場合に直ちに実施すべき応急復旧のための現場作業の難易度。	・応急復旧のための作業が極めて困難、若しくは長期間を要する場合。 例) 宅地などの隣接部や構造物の埋設が深い場合などに難易度が高くなると考えられる。
重要度区分 B種 (レベル1地震動を 考慮する)	①利水施設としての規模。 同上	・施設規模が極めて大きく、かつ被災した場合にライフラインとしての水供給、ひいては地域の生活機能や経済活動・生産活動に相当の支障をきたす場合で、A種以外のもの。
	②被災による二次災害危険度。 同上	・パイプライン施設に近接して家屋、避難場所、若しくは重要公共施設があり、水路の損壊による流出水がこれらの場所に流入又は湛水し、人命に重大な影響はないものの、社会経済的に多大な影響を及ぼすおそれがある場合。
	③応急復旧の難易度。 同上	・応急復旧のための作業に比較的長期間を要する場合。
重要度区分 C種 (耐震設計は行わな い)	①利水施設としての規模。 同上	A種、B種に該当しない場合。
	②被災による二次災害危険度。 同上	②の例) 水路施設が甚大な被害を受けた場合でも付近の原野、水田等が浸水する程度で、社会経済的な影響が軽微な場合。
	③応急復旧の難易度。 同上	③の例) 応急復旧のための作業が容易で、短期間で実施できる場合。

1) 水田用水における流量 $5\text{m}^3/\text{s}$ 以上、管径で $\phi 2,000$ ($V=1.5\sim 2.0\text{m/s}$ 程度を想定) 以上は、一つの例として示しているものであることから、地区の状況に応じて勘案する。

4.2.2 対策区分の判断基準

対策区分は、図 4.2-2 を参考に鋼管等の腐食程度や対象施設の重要度区分を踏まえ、施設管理者と施設造成者が協議のうえ判断する。

なお、対策区分が補修と選定された場合でも、施設の重要度区分や今後の残供用期間を踏まえた経済性等に応じて、補強又は改修・更新を選定することを妨げるものではない。

また、本マニュアルで対象としている対策区分は「防食を目的とした補修（腐食の抑制も含む）（防食工法）」であり、上記の選定で補強又は改修・更新を選定した場合は、設計基準パイプラインや「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル パイプライン編）（案）」等を参照し、設計、施工を行う。

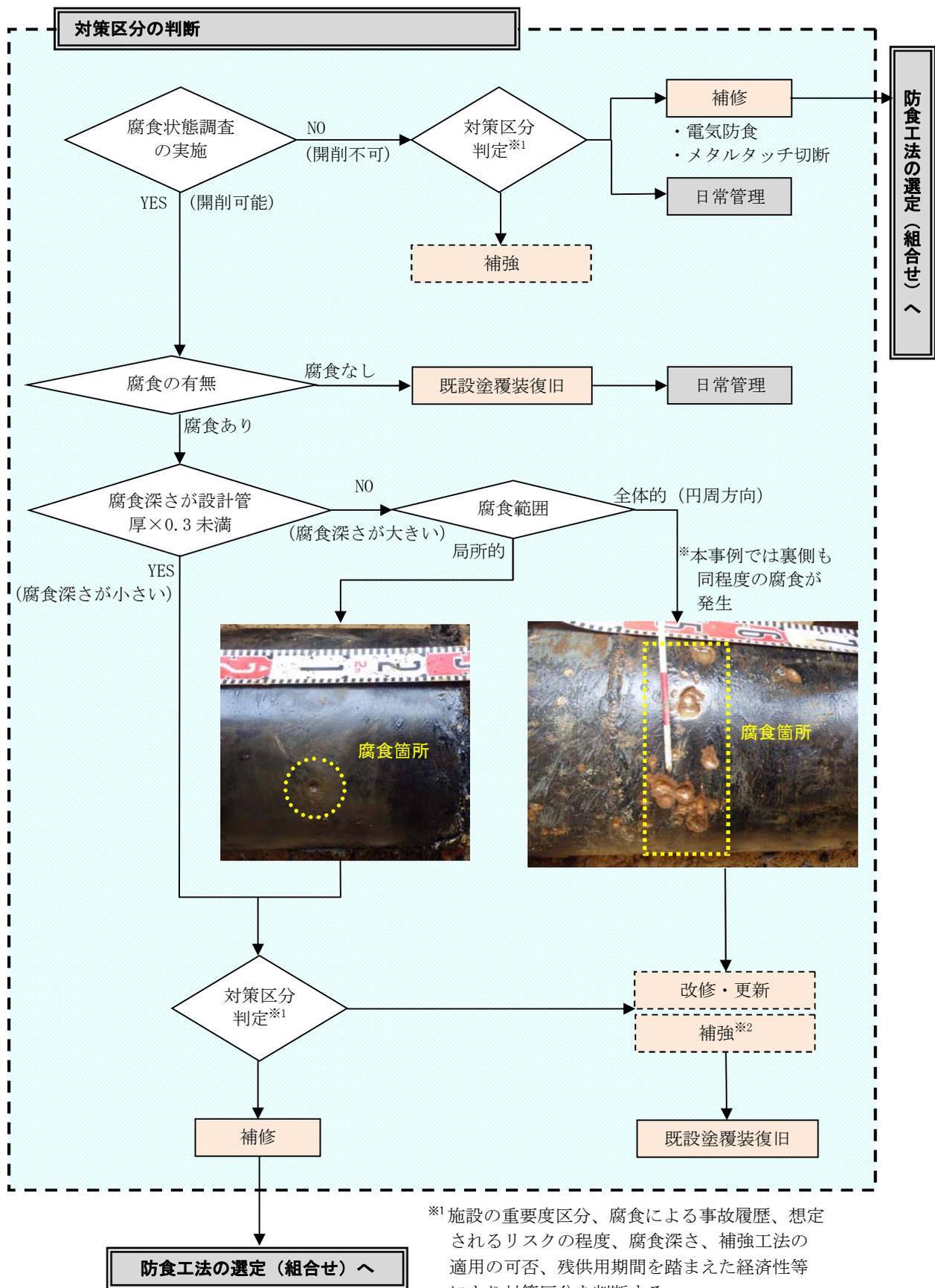


図 4.2-2 対策区分の判断

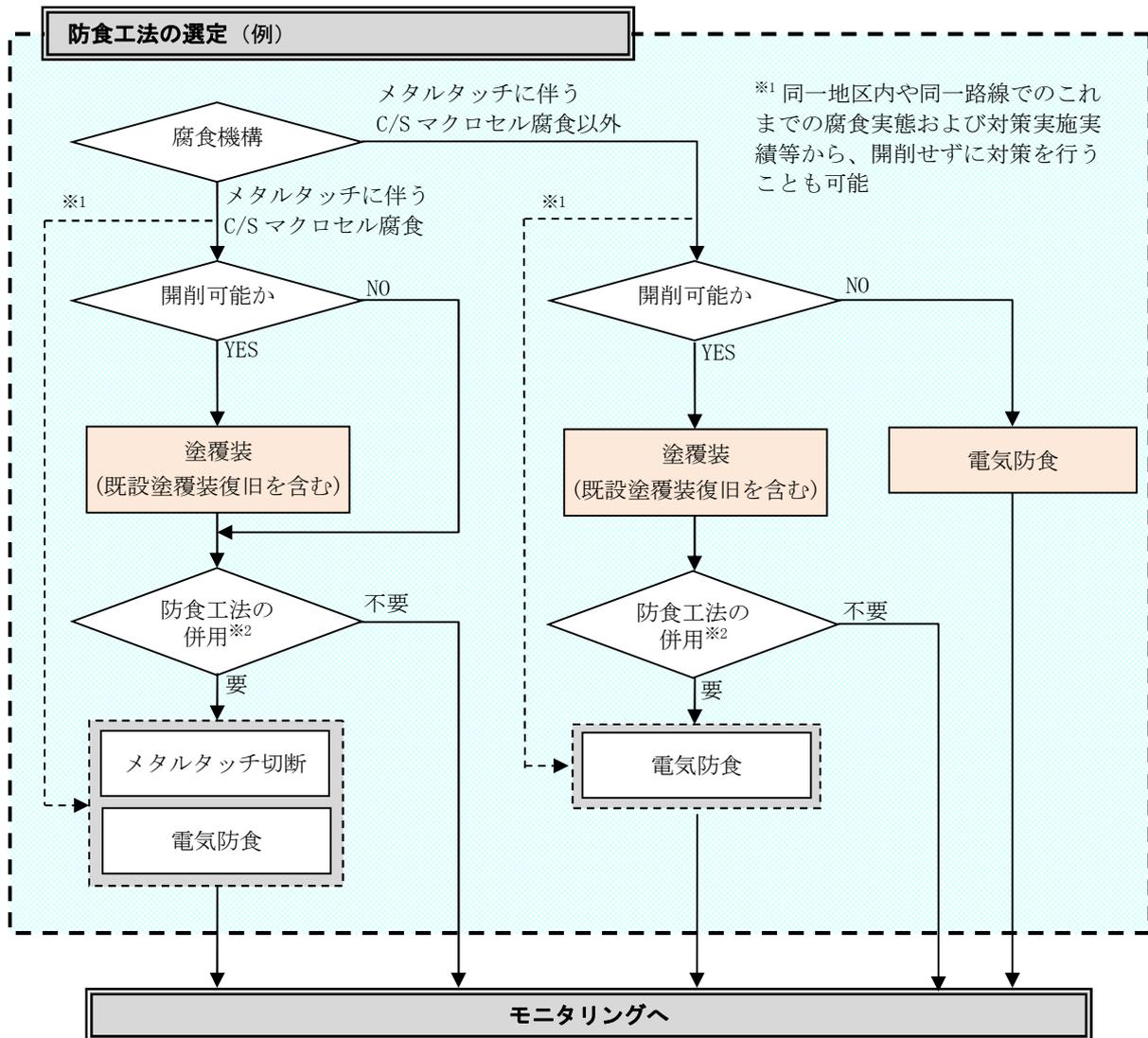
4.2.3 防食工法の選定

防食工法はそれぞれの工法により防食機構が異なり、適用可能な腐食機構も異なる。また、開削を必要とする防食工法もあり、現場条件によっては採用できない場合もある。各防食工法の防食機構と適用可能な腐食機構、現場条件を整理すると表 4.2-5 のとおりである。

表 4.2-5 各防食工法の防食機構と適用可能な腐食機構、現場条件

	電気防食	塗覆装	メタルタッチ切断
工法の防食機構	<ul style="list-style-type: none"> 自然電位が鋼管等よりマイナスの流電陽極材を接続し、その電位差で電流を流すことにより鋼管等の管対地電位を目標値以下に保ち防食する。 	<ul style="list-style-type: none"> 管外面を絶縁性の高い防食シート等で被覆し防食する。 	<ul style="list-style-type: none"> C/S マクロセル環境の原因である管路とコンクリート中の鉄筋等の接続を切り離し、C/S マクロセル環境を自然腐食環境まで改善する。
適用可能な腐食機構	全ての腐食機構	全ての腐食機構	メタルタッチによる C/S マクロセル腐食
現場条件	非開削・開削で施工可能	開削が必要	非開削・開削で施工可能

上記を踏まえ、防食工法の選定の考え方を図 4.2-3 に示す。



※2 施設の重要度区分がAで、対象施設と同一路線や同一地区で腐食による事故履歴を有する場合等は、想定されるリスクの程度や残供用期間を踏まえた経済性により、リスク対応として塗覆装と他工法の併用を検討する。

図 4.2-3 防食工法選定の考え方

図 4.2-3 において、開削が可能な場合、劣化した塗覆装を除去し腐食状態調査を実施するため、既設塗覆装除去部の復旧（塗覆装）を行う必要がある。また、対象の腐食機構がメタルタッチによるC/Sマクロセル腐食以外で開削ができない場合、適用可能な工法は電気防食のみである。以上より、図 4.2-3 の着色した防食工法は、必ず実施する。

一方、未着色の防食工法は他工法との併用が考えられる。防食工法の組合せに当たっては、施設の重要度区分、腐食による事故履歴等を踏まえ想定されるリスクの程度、残供用期間を踏まえた経済性等を考慮し、リスク対応としての防食工法の併用を検討する。

具体的には重要度区分がA（表 4.2-4）となる施設では、被災による二次災害危険度や応急復旧の難易度が高い場合が想定され、リスク対応としての防食工法の併用が有効であると考えられるが、各現場において、施設が置かれた状況を総合的に勘案し、施設造成者と施設管理者が協議の上適切に設定する。

なお、メタルタッチ切断工法は、鉄筋切断後の既設構造物の構造性能照査を実施し、既設構造物が応力的に不安定な状態にならないことを確認する必要があることに留意する（詳細は「4.3.3 メタルタッチ切断（3）設計」を参照）。

4.2.4 腐食環境の改善

埋め戻し材料に石が含まれる場合、埋戻し土の転圧時に石が塗覆装を損傷し、石と管の接触部をアノード、その他の部分をカソードとした通気差マクロセル腐食が生じ漏水するという状況がある。このため、地区内で過年度生じた漏水事故原因を究明し、必要に応じて埋め戻し土を良質な材料へ置き換える等の対策を検討する。（水分が多い粘性土の抵抗は3千 Ω 、一方、シラス（火山性土）は10万 Ω を示し、シラス（火山性土）の方が約33倍電気を通しにくい）

4.3 防食工法

防食工法の基本はアノード反応かカソード反応が生じないようにすることであり、その方法によって外部から電流を流入させアノード反応の進行を阻止する電気防食、鋼材表面と電解質（土壌、水分）を遮断する塗覆装、アノードとカソードを切り離すメタルタッチ切断に分類される。

【解説】

4.3.1 電気防食（流電陽極方式）

電気防食は、防食対象である鋼管等の自然電位をよりマイナス側の電位に変化させて腐食を抑制あるいは緩和させる手法である。

その工法には、完全防食法と近接陽極法があり、原則完全防食法を適用する。

メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食対策の場合、電氣的に接触しているコンクリート構造物を含めて防食されることとなる。このため、構造物の規模が大きければその対策に係るコストが膨大になることと併せて周囲の他埋設金属構造物に対する影響（干渉）も大きくなることが懸念されることから、近接陽極法を適用する。ただし、近接陽極法はメタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食環境の解消のみを目的としているため、それ以外の自然腐食は解消できない。

完全防食法と近接陽極法をまとめると以下のとおりとなる。なお、本マニュアルに示す電位は飽和硫酸銅電極基準値を示す。

表 4.3-1 電気防食法（流電陽極方式）の分類

項目	完全防食法	近接陽極法
適用される腐食機構	メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食以外	メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食のみ
防食達成の評価基準	-850mV*以下を目標とする。 *防食電位	一般的な埋設鋼管等の自然電位である-600mV 以下又は、自然電位から300mV マイナス側に変化させることを改善目標電位とする。

防食電位の考え方は以下のとおりである。

中性環境における土壌中の鋼管等の電位は-400~-800mV の自然電位にあり、腐食しない領域(A)又は腐食が停止する領域(C)の電位に変化させることで腐食が抑制されるが(図 4.3-1)、一般的な電気防食は(C)の領域に防食対象物の電位を変化させる工法である。

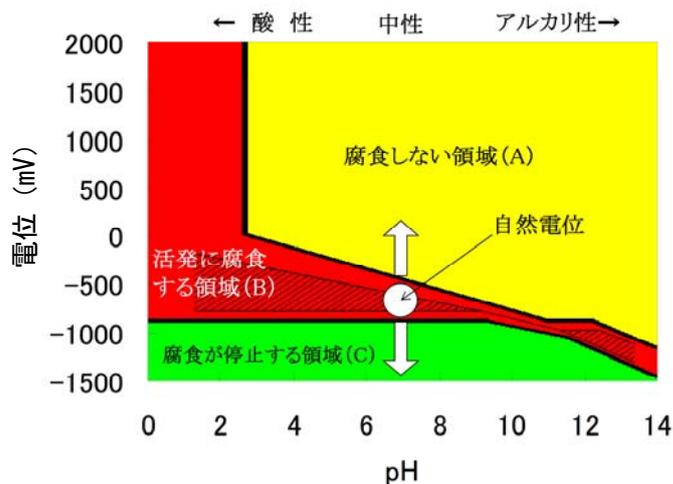


図 4.3-1 鋼の電位・pH 図

中性環境において腐食が停止する領域の境界は -850mV であり、この電位を防食電位と呼び、この状態が完全防食状態となる。

(1) 工法概要と適用条件

1) 工法概要

電気防食（流電陽極方式）は、図 4.3-2 に示すように鋼管等より電位がマイナス側である陽極材を鋼管等に接続し、その電位差により防食電流を鋼管等に流すことで電位をマイナス側に変化させて腐食が停止する領域（マイナス側）にする（又は近づける）ことである。なお、この場合、鋼管等に接続した陽極材がアノード部、鋼管等がカソード部となるため、陽極材が腐食する。一般的にはマグネシウム合金陽極を陽極材として使用する。

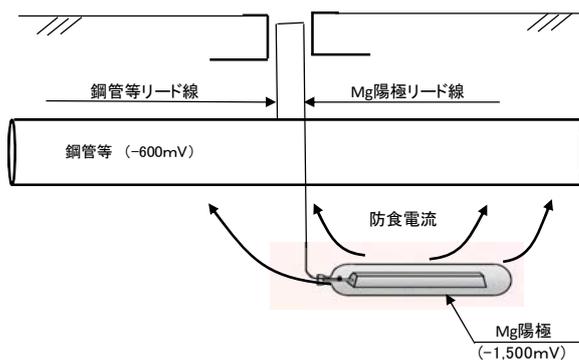


図 4.3-2 流電陽極方式による電気防食

【コラム】 電気防食の原理

電気防食は、異なる金属が電解質を介して接続すると電位のマイナス側の金属がアノード部、電位のプラス側の金属がカソード部となって電流が流れ、カソード側の金属の腐食を防止するもので、土壌中の鋼管等の防食にはマグネシウム陽極(Mg 陽極)が用いられる。

図1に鉄とMg陽極を電解質中で接続した状況を示す。コンクリート中の鉄の電位を -200mV 、土壌中の鉄を -600mV 、マグネシウム陽極の電位を -1500mV とすると、鉄からMg陽極に向かって I_b の電流が流れる。この場合、Mg陽極がアノード部となってカソード部である鉄に向かって電解質中を I_b の電流を流し、Mg陽極は電流を流すことで消耗するが鉄の腐食は抑制(防食)される。

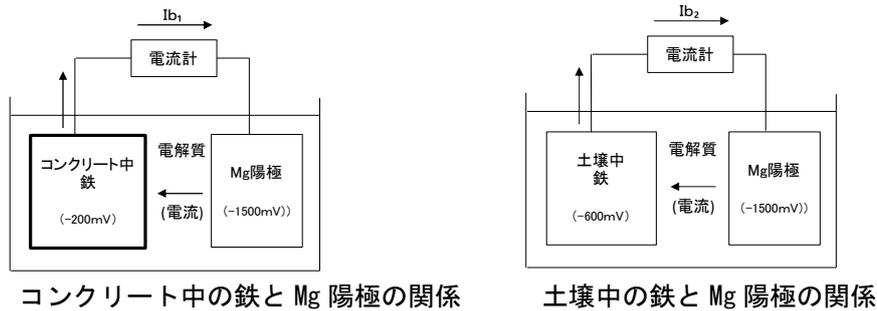


図1 電解質中の鉄と Mg 陽極の関係

これを土壌中の鋼管等と Mg 陽極に置き換えると、図2に示すように近接陽極法と完全防食法による電気防食イメージ図で表すことができる。

C/S マクロセル腐食環境にある鋼管等の電位 -200mV を近接陽極法で電位改善する場合、 I_{b1} の防食電流をMg陽極から流すことで鋼管等の電位を 300mV 以上マイナス側又は、 -600mV よりマイナス側の自然電位まで変化させる。(C/S マクロセル腐食以外の自然腐食は解消できない。) C/S マクロセル腐食以外の腐食環境にある鋼管等の電位 -600mV を完全防食法で電位改善する場合、 I_{b2} の防食電流をMg陽極から流すことで鋼管等の腐食が抑制される -850mV よりマイナス側の防食電位まで変化させる方法で電気防食を施す。

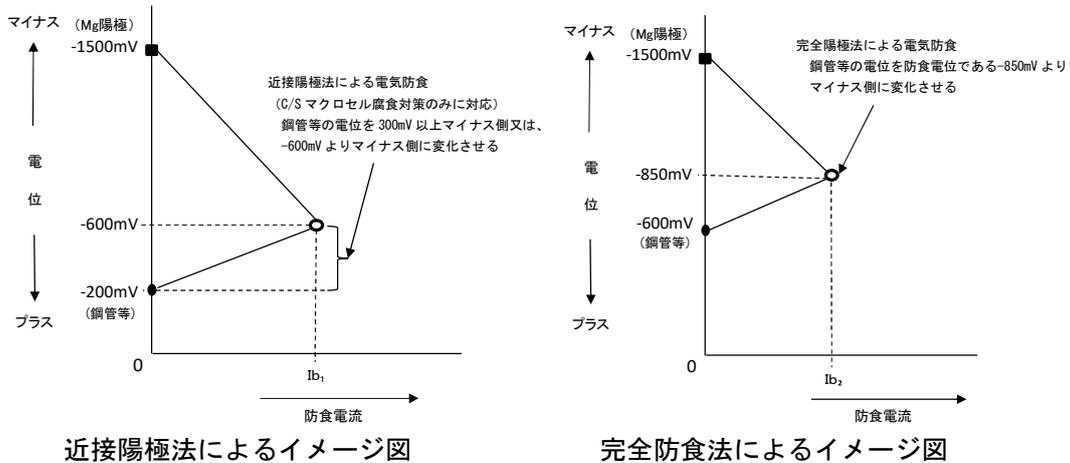


図2 流電陽極法による鋼管等の電気防食イメージ図

2) 適用条件

本工法は、腐食電流の発生に伴う腐食の抑止を目的とし、開削又はボーリング等により鋼管等直近に陽極材を設置できる場合に適用する。

流電陽極法による腐食対策は、「4.3.1 電気防食（流電陽極方式）」に記載した完全防食法と近接陽極法の二つの方法のいずれかを適用する。

(2) 使用材料

流電陽極材の代表的なものは、マグネシウム合金陽極（Mg 陽極）・亜鉛合金陽極（Zn 陽極）・アルミニウム合金陽極（Al 陽極）である。各種流電陽極材の性能を表 4.3-2 に示す。

表 4.3-2 各種流電陽極材の性能

特性		マグネシウム合金陽極	亜鉛合金陽極	アルミニウム合金陽極
密度 [g/cm ³]		1.77	7.14	2.83
回路陽極電位 [V] (SCE)		-1.48	-1.03	-1.08
鉄に対する有効電位差 [V]		0.65	0.20	0.25
発生電気理論値 [A・h/g]		2.21	0.82	2.87
海中 3mA/cm ² (注1)	電気効率 [%]	55	95	80
	発生電流量 [Ah/g]	1.22	0.78	2.30
	消耗度 [kg/(A・y)]	7.20	11.80	3.80
地中 0.03mA/cm ² (注1)	電気効率 [%]	50	65	65 (注2)
	発生電流量 [Ah/g]	1.11	0.53	1.86 (注2)
	消耗度 [kg/(A・y)]	7.90	16.50	4.70

(注1)：電流密度により電気効率・発生電流量・消耗度が変わるので海水中を 3mA/cm²、地中を 0.03mA/cm² の電流密度としたときの結果を記載した。

(注2)：組成により変動がある。

なお、土壌のように一般的に抵抗率の高い環境では、実用金属中で陽極電位が最も低く有効電位差の大きいマグネシウム合金陽極を用いることが多い（以降、Mg 陽極と記載）。

Mg 陽極の形状図を図 4.3-3 に示す。ただし、海水が入ったり抵抗率が低いような環境では亜鉛を使用する場合もある。

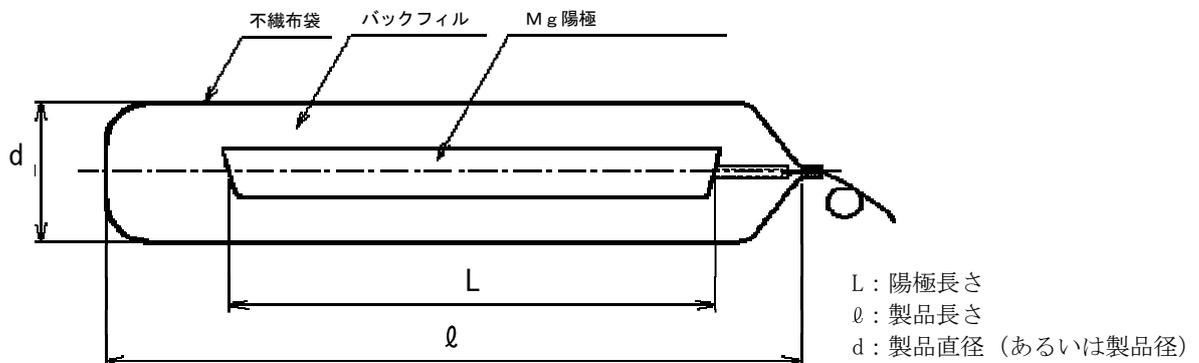


図 4.3-3 Mg 陽極形状図

Mg 陽極は陽極の接地抵抗を低減し、陽極電位を安定させるためベントナイトを主剤としたバックフィルで組み使用している。

Mg 陽極は、鋼管等に防食電流を流すことで消耗していくので、設計耐用年数に応じた質量を表 4.3-3 より選定する。(詳細は「(3) 設計」を参照)

表 4.3-3 Mg 陽極の型式と形状

型式	L (mm)	φ (mm)	d (mm)	陽極質量 (kg) NET (GROSS)	製品質量 (kg)	形状係数	
						1 本吊	2 本吊
I	1,000	1,200	φ 150	1.84 (2.08)	約 25	0.42	0.26
II	1,000	1,200	φ 150	2.47 (3.01)	約 25		
III	1,000	1,200	φ 150	4.18 (4.72)	約 26		
IV	1,000	1,200	φ 200	7.73 (8.85)	約 44	0.38	0.24
V	1,000	1,200	φ 200	11.2 (12.9)	約 45		
VI	1,000	1,200	φ 200	15.8 (17.5)	約 47		
VII	1,000	1,200	φ 200	23.4 (25.1)	約 48		
VIII (A)	1,050	1,020	φ 90	5.83 (6.87)	約 11	0.53	—
VIII (A+B)	2,105	2,040	φ 90	11.66 (13.71)	約 22	0.32	—
X I	700	1,000	φ 200	2.0 (2.3)	約 34	0.43	0.27
X II	700	1,000	φ 200	4.0 (4.3)	約 33		
X III	700	1,000	φ 200	6.0 (6.3)	約 34		
X IV	700	1,000	φ 200	8.0 (8.3)	約 35		
X V	700	1,000	φ 200	11.0 (11.7)	約 36		
X VI	700	1,000	φ 200	14.0 (14.6)	約 38		
X VII	700	1,000	φ 200~220	22.0 (23.1)	約 48		

※ 陽極標準組成：JIS H6215 MGA-2 に準じる。

※ 製品質量とは、バックフィルを含んだ質量で参考値である。

※ Mg 陽極材を管に平行に敷設する場合は、1 本吊りの形状係数を適用する。(VIII (A)、VIII (A+B) は、コンクリートピット内からの押込みのため、1 本吊り欄に記載。)

流電陽極方式では、流電陽極材の他に主な材料として、鋼管等からリード線を取り出すターミナル、リード線として使用するケーブル、それらケーブルを保護するための電線管、地表部に立ち上げたリード線を収納するターミナルボックス等から構成され、必要に応じて電位測定用の照合電極を設置する。

なお、ターミナルは用途別に、電位測定を目的とする I 型、Mg 陽極と接続する II 型、外部電源装置等、大きな電流を流す III 型に分けられ、鋼管等に溶接し取付ける。

流電陽極材の設置方法は図 4.3-4 に示すように横置き、縦置き及び押込みがあるが、構成する主な材料は同一である。

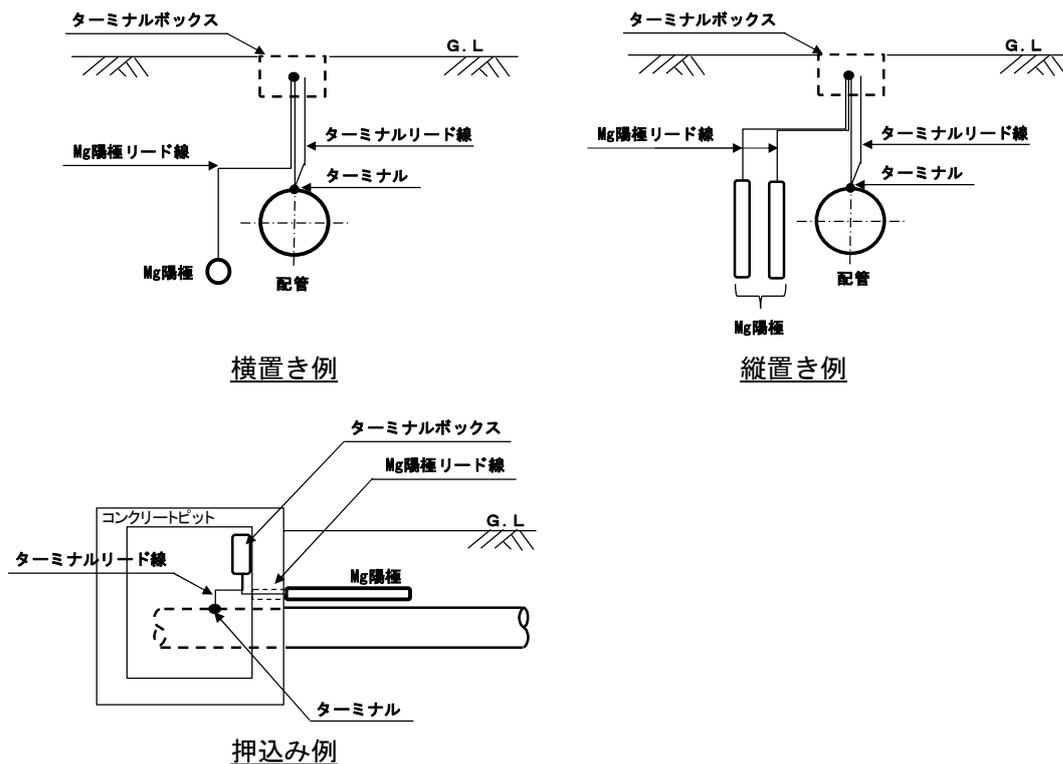


図 4.3-4 流電陽極材設置例

防食設計を基に各種使用材料は図 4.3-5 に示すように配置する。この際、各種リード線は電線管内に収納し配線する。

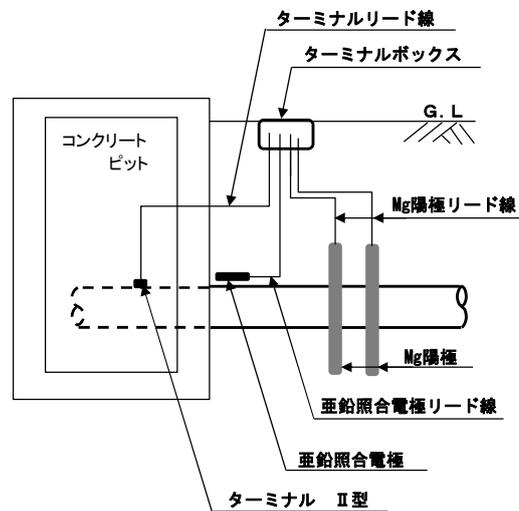


図 4.3-5 主な材料の配置例

(3) 設計

1) 基本的事項

①設計の考え方

電気防食（流電陽極方式）の設計法は、完全防食法を基本として、メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食対策についてのみ経済性等も考慮した近接陽極法とに大別される。これらの設計手法においては表 4.3-4 のように設計条件や検討内容が異なる。

表 4.3-4 各防食設計法における設計条件の考え方

項目	完全防食法	近接陽極法
適用される腐食機構	・メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食以外	・メタルタッチに伴う C/S マクロセル腐食のみ
鋼管等の自然電位	・原則として実測値（仮通電試験実施時）とする。鋼管等延長上で複数箇所の測定を行った場合は、最もプラス側の値を採用する。	・原則として実測値（管対地電位分布測定実施時）とするが、調査が実施できない場合は-200mV（飽和硫酸銅電極基準）としても良い。
鋼管等の改善目標電位	・防食電位は-850mV 以下であるが、防食設計電位は-1,000mV とする。	・一般的な埋設鋼管等の自然電位である-600mV 以下又は、自然電位から 300mV マイナス側に変化させることを改善目標電位とする。
防食対象範囲	・腐食環境調査、腐食状態調査結果に基づく範囲とする。	・電位分布測定を行った場合は、電位が定常値になるまでの範囲とする。 ・電位分布測定を行わない場合は、コンクリートピット貫通部より 10m まで、あるいは 10m 以内に可とう管（絶縁）がある場合は可とう管までとする。
配管周囲の土壌抵抗率	・陽極からの防食電流は土壌抵抗率の値で左右されるので、事前に測定した値又は、付近の柱状図等より想定する。	
設計耐用年数	・個々の施設の残供用期間等を考慮し適宜設定する。	
施工方法の検討	・鋼管等の埋設環境を考慮し、陽極の設置方法（縦置き、横置き又は押込み等）・資機材搬入方法・掘削方法等を検討する。	

②設計に当たっての留意事項

電気防食（流電陽極方式）の設計に際しての留意事項を以下に記載する。

・配管位置の確認

図面と照合し、対象配管の位置、延長、埋設深さ、口径及び他埋設物の位置、埋設深さ、地上部の土地利用条件を確認する。

・他工法との比較検討

流電陽極は陽極本体の電位（-1,500mV）と鋼管等との有効電位差が小さく、陽極 1 本当たりの発生電流も小さい。このため、完全防食を適用する施設において、大規模施設や土壌抵抗率が高い施設では陽極本数が増加するため、コストも増大する。小規模施設であっても、防食対象施設の埋設環境によっては掘削可能範囲が制限される場合等もあり、多数の陽極を設置できないことも考えられる。また、近接陽極法を適用する施設において、防食対象範囲が長い場合には施工範囲が広がり、借地や地上物の干渉も増え施工が困難になることも考えられる。

・特殊環境での改善目標電位の設定

硫酸塩還元菌の存在する水田等の不通気環境、温泉地で地熱のある環境等、特に腐食作用が激しいと認められる土壌中では、目標電位として-950mV とする場合があります。

2) 設計に必要な各種設計数値の考え方

①改善目標電位

C/S マクロセル腐食下における自然電位より 300mV マイナス側に変化させる場合、変化後の電位は-500mV~-600mV となるので、一般土壌中でのマイクロセル腐食環境は変わらない。一方、完全防食法によって-850mV 以下とした場合、腐食は抑制される。

②陽極数量算出

近接陽極法の場合、改善目標電位と土壌抵抗率から陽極 1 本当りの防食電流と効果範囲を求め、防食対象面積から陽極数量と設置間隔を求めるが、コンクリート構造物際の電位勾配の大きい部位では陽極を 1 本余分に追加するなど陽極を密に配置することを検討する。

③陽極消耗率

陽極消耗率は、1A の電流を 1 年間流し続けた場合に消耗する量で「kg/A・y」で表される。流電陽極材の消耗率は、電気防食の設計計算上 WSP と同様に 8.0kg/A・y として計算する。

3) 設計のフローチャート

電気防食による電気防食設計のフローを図 4.3-6 に示す。

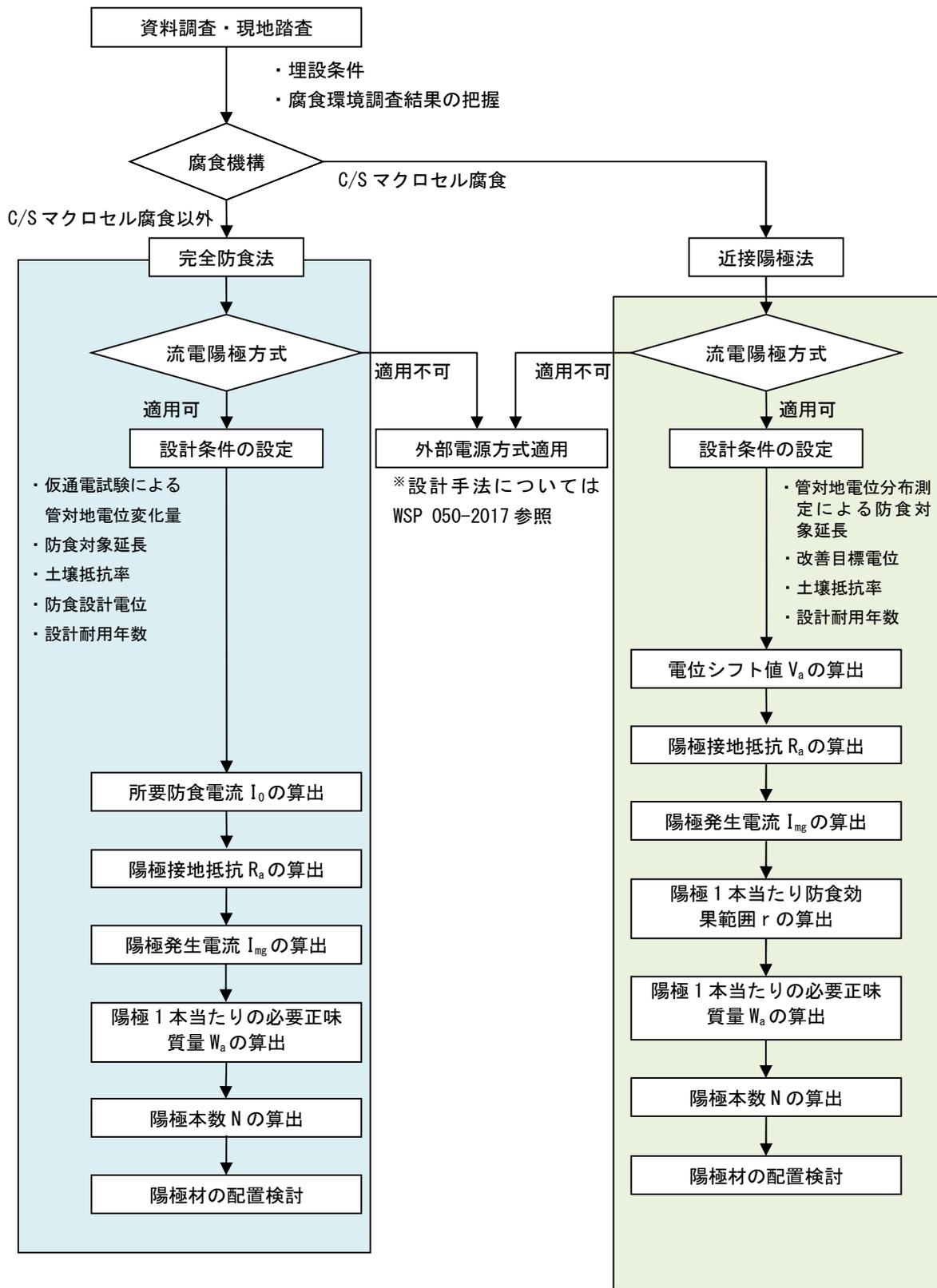


図 4.3-6 電気防食の設計フロー

4) 設計計算例

①完全防食法による設計計算

a) 所要防食電流 I_0 (A) の算出

仮通電試験結果を基に防食設計電位 (-1,000mV) ・ (飽和硫酸銅電極基準) に必要な防食電流を次式より算出する。

$$I_0 = (\Delta E / (\Delta E_1 / I_1))$$

I_0 : 所要防食電流 (A)

ΔE_1 : 仮通電による管対地電位変化量 (V)

I_1 : 仮通電時に通電した電流値 (A)

ΔE : 自然電位 ($V_{p/s}$) - 防食設計電位 (-1.0V)

ただし、現場条件による制約等で仮通電試験が実施できない場合は、鋼管等に施されている外面塗覆装と防食電流密度 (WSP050-2017 参照) より所要防食電流 I_0 を算出しても良い。

b) 陽極接地抵抗 R_a (Ω) の算出

$$R_a = k \cdot \rho$$

R_a : 陽極 1 本の接地抵抗 (Ω)

ρ : 土壌抵抗率 ($\Omega \cdot m$)

k : 陽極の形状係数

c) 陽極発生電流 I_{mg} (A/本) の算出

$$I_{mg} = \Delta e / R_a$$

I_{mg} : 陽極発生電流 (A/本)

Δe : 管の有効電位差 (V)

$\Delta e =$ 防食設計電位 (-1.0V) - M_g 陽極閉路電位 (-1.5V)

d) 陽極 1 本当たりの必要正味質量 W_a (kg) の算出

$$W_a = I_{mg} \cdot Y \cdot C$$

W_a : 陽極 1 本当たりの必要正味質量 (kg)

Y : 設計耐用年数 (y)

C : 陽極消耗率 8.0 (kg/A・y)

表 4.3-3 (M_g 陽極の型式と形状) より、陽極質量 (NET) が W_a より大きい陽極形式を使用陽極として選定する。

e) 陽極本数 N (本) の算出

$$N = I_0 / I_{mg}$$

N : 陽極本数 (本)

陽極本数は、整数に切り上げる。

(例 : $N = 1.6 \rightarrow 2$ 本 ・ $N = 2.1 \rightarrow 3$ 本)

②近接陽極法による設計計算

- a) 防食対象延長 L(m)の算出

事前調査の管対地電位分布測定結果から防食対象延長(L)を求める。

- b) 電位シフト値 V_a (V)の算出

$$V_a = V_{p/s} - V_o$$

V_a : 電位シフト値(V)

$V_{p/s}$: 管の自然電位(V)

原則実測値を用いるが、調査を行わない場合は-0.2V とする。

V_o : 改善目標電位(V)

-0.6V とする。

- c) 陽極接地抵抗 R_a (Ω)の算出

$$R_a = k \cdot \rho$$

R_a : 陽極 1 本の接地抵抗(Ω)

ρ : 土壌抵抗率($\Omega \cdot m$)

k : 陽極の形状係数

- d) 陽極発生電流 I_{mg} (A/本)の算出

$$I_{mg} = \Delta e / R_a$$

I_{mg} : 陽極 1 本当たりの発生電流(A/本)

Δe : 管の有効電位差(V)

改善目標電位(-0.6V) - Mg 陽極閉路電位(-1.5V)

- e) 陽極 1 本当たりの防食効果範囲 r (m)の算出

$$r = (I_{mg} \cdot \rho) / (2\pi \cdot V_a)$$

- f) 陽極 1 本当たりの必要正味質量 W_a (kg)

$$W_a = I_{mg} \cdot Y \cdot C$$

W_a : 陽極 1 本当たりの必要正味質量(kg)

Y : 設計耐用年数(y)

C : 陽極消耗率 8.0(kg/A・y)

表 4.3-3(Mg 陽極の型式と形状)より、陽極質量 (NET) が W_a より大きい陽極形式を使用陽極として選定する。

g) 陽極本数N(本)の算出

$$N = [(L \cdot D \cdot \pi) / (r^2)] + 1$$

N : 陽極本数(本)

L : 防食対象の鋼管等延長(m)

D : 鋼管等の外径(m)

r : 陽極1本の効果範囲(m)

1 : C/S マクロセル環境に陽極を設置する場合は、コンクリートピット貫通部の防食を考慮し、陽極本数を設計数量に1本追加する。

陽極本数は、整数に切り上げる。

(例 : N=1.6→2本・N=2.1→3本)

5) 陽極材の配置検討

完全防食法の場合、陽極設置間隔は200~500m程度を標準とし、防食対象長さに対して均等に配置する。

近接陽極法の場合、防食効果範囲 r (m) を半径とする球の内部に防食対象の鋼管等が位置するように管径、配管状況を考慮して陽極の配置を決定する必要がある。ただし、**図 4.3-7** に示すとおり、コンクリートピット際等の電位勾配の大きい部位では陽極材を密に配置することを検討する。

なお、鋼管等との離隔について特別に規定された値はないが、施工上、開削の場合は20cm程度、オーガーやボーリングを使用する場合は30~50cm程度の離隔を確保する場合が多い。

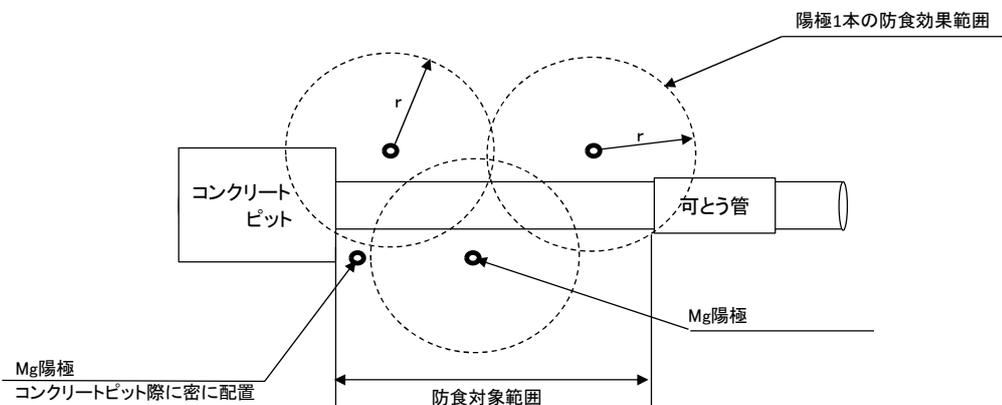


図 4.3-7 陽極配置例 (平面配置)

また、陽極材の設置に当たり、開削する場合、地表からボーリングで行う場合、コンクリートピット内から押込む場合等、防食効果範囲・配管深さや施工範囲の制約等、現場条件によって工事費の経済比較を行い、陽極の設置方法 (縦置き、横置き又は押し込み) ・陽極間隔・縦置きの場合1本吊・2本吊・3本吊等を考慮した設計が必要となる。

参考として、陽極配置例を**図 4.3-8**~**図 4.3-10**に示す。

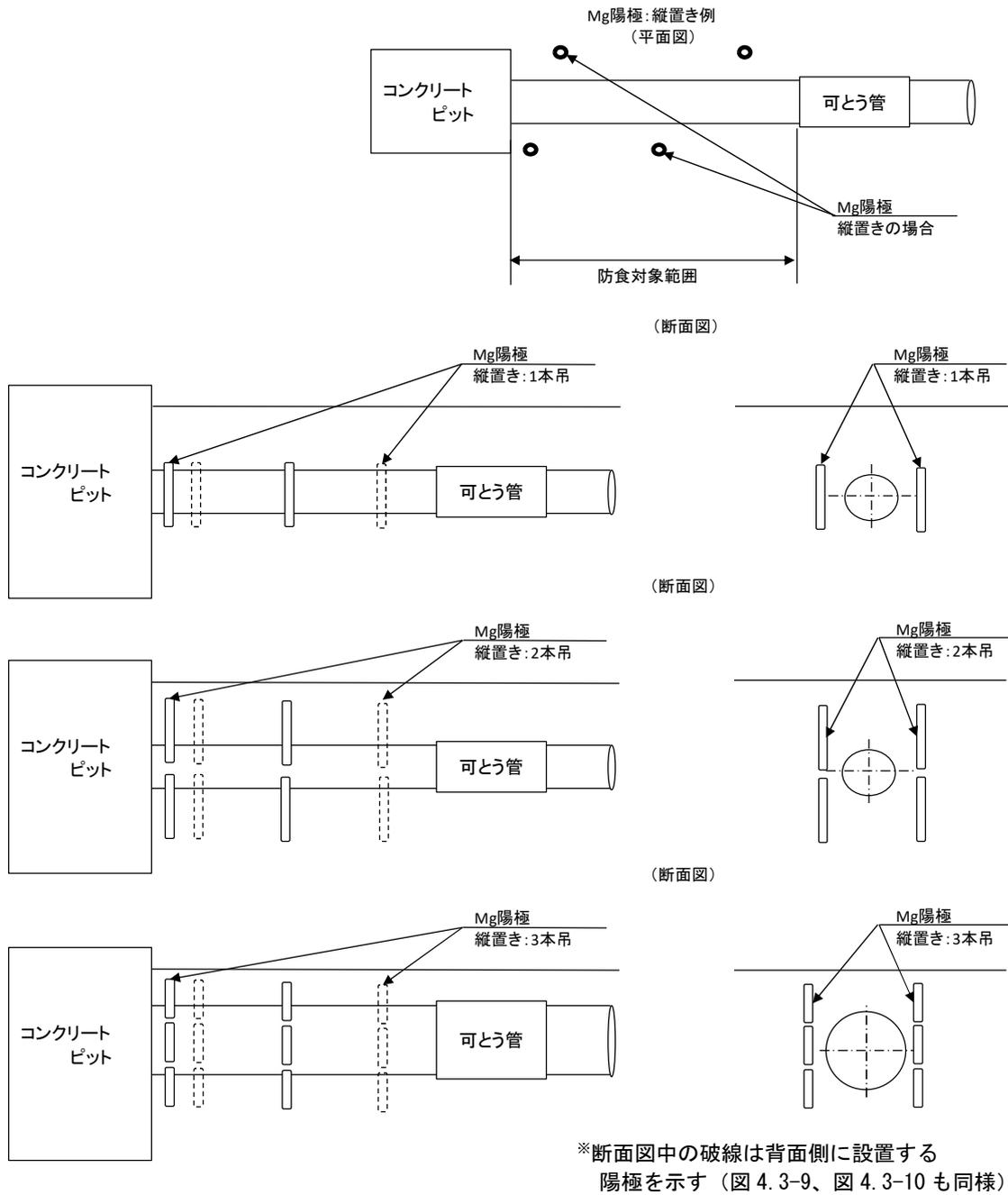


図 4.3-8 流電陽極材縦置き例

陽極縦置き工法は、地表からオーガー車やハンドオーガー又は、ボーリングマシンにより所定の深さまで穿孔掘削し、掘削孔内に陽極を設置する方法であり、配管まで開削する必要がなく、限られた用地内で施工ができる利点がある。ただし礫や玉砂利・湧水等、ボーリングの障害となる土質の場合は施工が困難になる場合があるので、現場状況の把握が重要である。

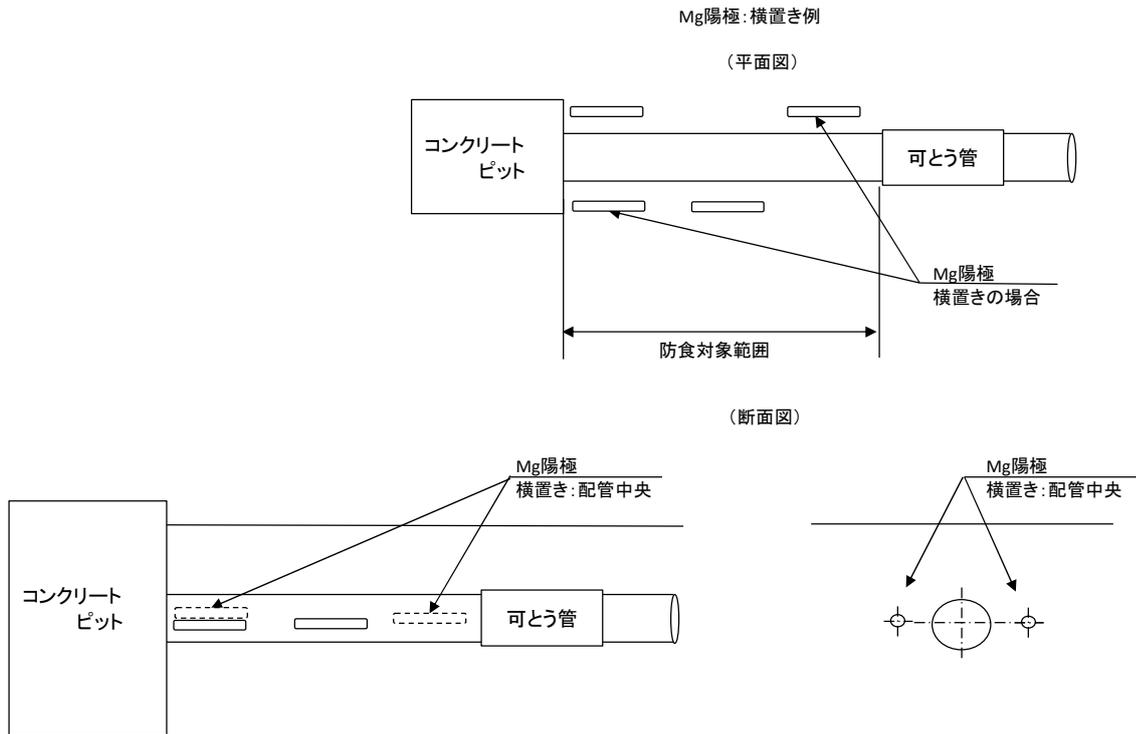


図 4.3-9 流電陽極材横置き例

陽極横置き工法は、バックホウにより所定の深さまで開削し、陽極を設置する方法である。陽極縦置き工法や陽極押し込み工法に比べ土木工事量が多くなるが、礫や玉砂利・湧水等がある場合でも施工が可能である。

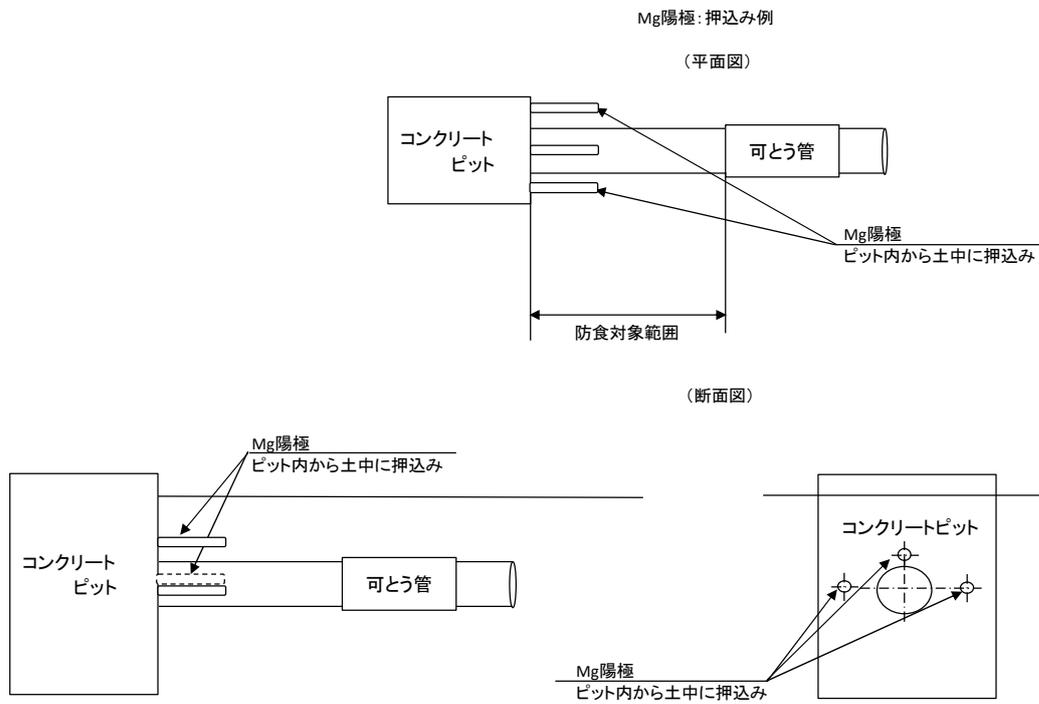


図 4.3-10 流電陽極材押込み例

陽極設置箇所のコンクリートピット壁をコア抜きし、油圧ジャッキを用いて陽極を推進圧入して陽極を設置する方法であり、ピット内のように限定された狭い空間でも施工が可能であることから、地上部からの施工ができない場合にも適用できる。また、小型軽量の機材を使用するため、人力運搬が可能であり、機材搬入が容易にできる利点がある。

①施工順序

a) 縦置き方法

設置状況を図 4.3-12 に示す。

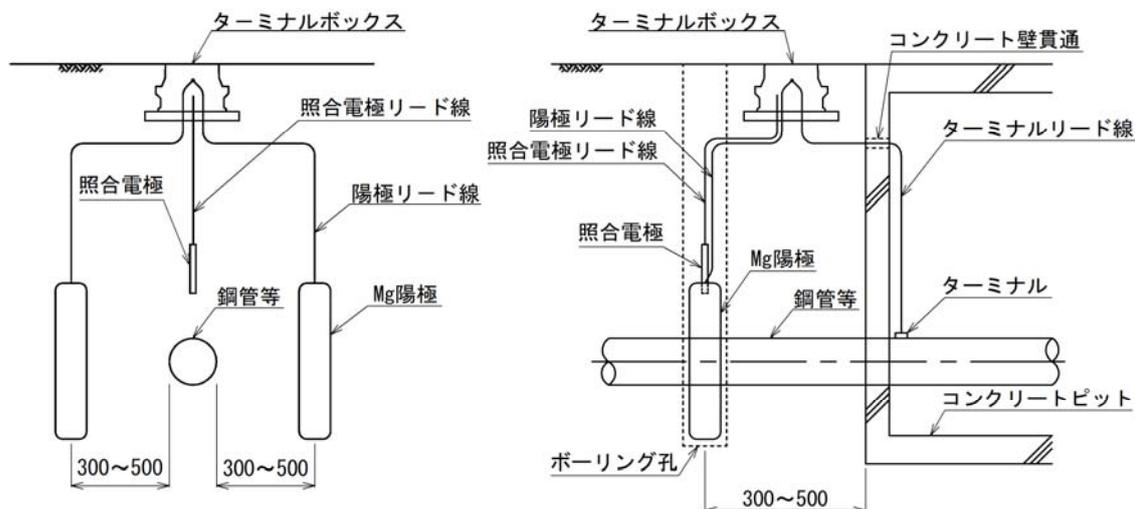


図 4.3-12 設置状況

縦置き方法の施工順序を以降に示す。

I) ボーリング工

陽極設置予定箇所及び照合電極設置箇所を G.L-1.0m 程度手掘り試掘し、GL-1.5～2.0m 付近まで他埋設物等の障害物が無いことを探査棒等で確認後、 $\phi 200\sim 300\text{mm}$ (口径は適用陽極の径を考慮) で所定の深さまで掘削穿孔する。

また、地表付近の土壤に礫や玉砂利等の障害がある場合、一部開削し障害物を撤去した後ボーリングする方法もある。

II) 陽極設置工

掘削穿孔完了後、陽極及び照合電極を所定のボーリング孔内に設置し、陽極及び照合電極周囲は良質土を充填する。

Ⅲ) ターミナル取付工

陽極接続用ケーブルおよび測定用ケーブルはⅡ型ターミナルを使用し、コンクリートピット内の鋼管等に溶接により取付ける。

取付例を図 4.3-13 に示す。



ターミナル取付



取付け部プライマー処理

図 4.3-13 ターミナル取付例

Ⅳ) コンクリート壁貫通工

鉄筋探査計で鉄筋位置を確認し、コアドリルを用いてφ40～60mm程度の穿孔を行い、ターミナルリード線あるいは陽極リード線および照合電極リード線を配線する。

Ⅴ-1) 配線配管工

陽極、ターミナルおよび照合電極のリード線は電線管で保護し配管する。

一般的に使用する電線管は次の通りである。

埋設部：波付硬質ポリエチレン管等

露出部：厚鋼電線管等

埋設配管の場合、埋め戻し途中で所定の深さに電線布設を示す埋設表示シートを布設する。

各配線は、ターミナルボックスまで布設する。

Ⅴ-2) コンクリート壁止水工

コンクリート壁貫通部を復旧し、止水処理する。



陽極リード線

ピット内引込

図 4.3-14 止水状況

VI) ターミナルボックス設置工

ターミナルボックスは、ピット内に設置する場合は鋼製プルボックス、管路上に設置する場合はターミナルボックスを設置し、Mg 陽極とターミナルリード線を収納結線する。

VII) 完工測定工

工事完了後、防食効果確認の完工測定を行う。

測定は、管対地電位と流電陽極発生電流を同時に測定し、防食設計電位又は改善目標電位を満足していること及び陽極発生電流値から設計耐用年数を満足するか確認を行う。



図 4.3-15 測定状況例

$$\text{設計耐用年数} = W_0 / (C \times I_{mg})$$

ここで、 W_0 : 設置した陽極質量 (kg)

C : 陽極消耗率 (8.0kg/ (A×y))

I_{mg} : 測定した陽極発生電流値 (A)

b) 横置き方法

横置き方法の施工順序を以降に示す。

I) 開削工

開削工は、重機、人力等によって配管周囲（陽極設置位置）まで掘削する。

II) 陽極設置工

陽極設置位置まで掘削してあるので、所定の位置に陽極を配置し、管頂には照合電極を配置する。埋め戻しは、山砂を使用することが望ましい。



図 4.3-16 Mg 陽極設置例

陽極の設置方法は、図 4.3-17 に示すように、防食対象に対して陽極数量が多い場合や防食対象範囲が狭い場合等では、開削しても陽極を縦に設置する場合もある。



防食対象範囲に対して陽極数が多い例



防食対象範囲が狭い例

図 4.3-17 Mg 陽極設置例

以降、Ⅲ)ターミナル取付工、Ⅴ-1)配線配管工、Ⅵ)ターミナルボックス設置工～Ⅶ)完工測定工は、縦置き方法と同様に行う。

c) 押込み方法

押込み方法の施工順序を以降に示す。

I) コンクリート壁貫通工

鉄筋探査計等を使用してコンクリートピット中の鉄筋位置を確認し、マーキングを行った後、陽極設置箇所のコンクリート壁をコア抜きする。

II) 推進架台設置工

コア抜きした孔に陽極を押し込める位置に推進架台を設置する。

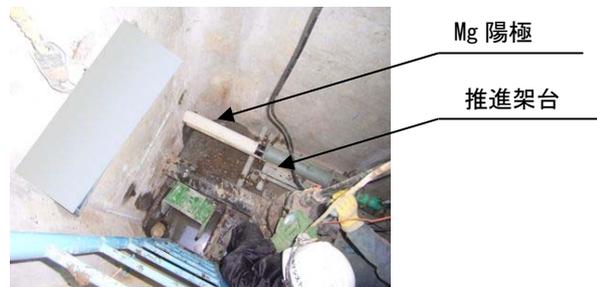


図 4.3-18 Mg 陽極押込み(圧入)状況

III) 陽極設置工、コンクリート壁止水工

油圧ジャッキにより陽極を所定の位置まで押し込む。

陽極設置後、陽極リード線をピット内に引込み、コンクリート壁を止水処理する。止水工の状況は図 4.3-14。

IV) ターミナル取付工

ターミナルは、陽極縦置き・横置きと同様にターミナルⅡ型を使用し、鋼管等に溶接により取付ける。

V) 配線配管工

陽極リード線とターミナルリード線をピット内壁に固定配線する。



図 4.3-19 配線状況

以降、VI) ターミナルボックス設置工～VII) 完工測定工は、縦置き・横置き方法と同様に行う。

2) 施工段階での留意事項

道路幅や区画整理等で建設時の図面と現状が異なる場合は、必要に応じて管路を試掘し、配管ルートを確認する。

4.3.2 塗覆装

(1) 工法概要と適用条件

1) 工法概要

塗覆装は、埋設環境中の土壌、水が鋼管表面に触れるのを防ぎ、腐食電流や迷走電流の流入が発生しないようにすることを目的とし、鋼管に防食シート材を熱融着、接着、又は塗布する工法である。

なお、下地処理の程度が塗膜の耐久性に与える影響は大きく、その寄与率は(社)日本鋼構造協会によると50%と示されている。このため、本工法を適用する場合には、工法・材料の性能を確実に発揮させるために、より確実な下地処理を行うことが重要である。

①下地処理の目的

鋼管の表面に浮き錆、油、汚れ、水分等が残存していると、塗覆装の付着が不十分となり、膨れ、割れ、はがれ等が生じ、さらには鋼材の腐食の発生に至る。

下地処理の目的は、鋼管の表面の錆、油脂、汚れなど、塗覆装の付着性及び防食性を妨げる物質を取り除くことである。

②下地処理程度

下地処理が不十分であり、鋼管に錆が残存すると、塗覆装の付着性が低下し腐食因子が浸入しやすくなるため、早期に腐食が進行しやすくなると考えられている。

このため、下地処理の程度（除錆度）は、塗覆装の材料種別に関らず表 4.3-5 のように設定する。

表 4.3-5 塗覆装材料と適用する下地処理の程度

材料	鋼管表面の状態
シートライニング材 塗布型ライニング材	付着物を全て除去する 錆は孔食部底部を除き全て除去する（孔食部底部は可能な限り錆を除去する（下記参照））

特に鋼管に局部腐食が生じている場合、孔食部底部に錆が残存しやすく、錆が残存した場合再劣化の原因となることに留意し、当該部分の錆について動力工具（表 4.3-7）等を組合せて使用するなどして、可能な限り除去する必要がある。

③下地処理の工法と主な工具

下地処理の工法は、「大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策」によると、表 4.3-6 のように分類されるが、鋼管に対する塗覆装ではこれまでの実績から主に物理的工法（動力工具）を適用している。本マニュアルでは、動力工具について、代表的な工具を紹介する（表 4.3-7）。

表 4.3-6 主な下地処理の工法と種類

原理	工法	概要
物理的	ブラスト	研削材を高速で処理面に投射し、その衝撃力で錆や塗膜等を除去するとともに、鋼表面に表面粗さを形成させる工法。
	動力工具	電気又は圧縮空気により駆動する工具を用いて、鋼材面を研磨することで錆や塗膜を除去する工法。
	手工具	力棒、ハンマー、ワイヤーブラシ等を用いる手作業法、単独では多大な労力が必要になるため、完全な錆除去は困難である。
化学的	酸洗い	酸性薬品で鋼材表面の錆や酸化被膜等を除去する工法。
	化学処理	リン酸等を用いて処理面表面にリン酸塩被膜を形成させる工法。

表 4.3-7 動力工具の分類と特徴

分類	特徴
ディスクサンダー 	【概要】 ・動力により回転する円盤にサンドペーパーを取付け、その回転研磨力により下地処理を行う工具。サンドペーパーの粗さは、サンド粒子の大きさにより異なり、錆落としには粒子の粗いものを用いる。 【適する使用条件】 ・比較的広い範囲、比較的軽微な腐食 【不適な使用条件】 ・孔食底部、リベットやボルト部（異形管）
カップワイヤーホイール 	【概要】 ・カップ型のワイヤーブラシを回転させる工具であり、その回転力により下地処理を行う工具。アタッチメントには種々のものがあり、六角ボルト専用のももある。 【適する使用条件】 ・リベットやボルト部（異形管） 【不適な使用条件】 ・特になし
エアハンマー (ニードルガン) 	【概要】 ・動力によりハンマーを作動させる工具で深い錆のあら落としのために用いる。 【適する使用条件】 ・リベットやボルト部（異形管）、腐食により著しく起伏が生じた部位 【不適な使用条件】 ・比較的広い範囲
縦回転式動力工具 	【概要】 ・特殊硬質金属ブラシの先端をブラシの回転と弾性変形により、鋼表面に叩きつけることで、腐食損傷が軽微な場合については、ブラスト処理に近い清浄面や表面粗さが形成できる。 【適する使用条件】 ・腐食損傷が軽微な場合の孔食底部 【不適な使用条件】 ・大面積、著しい孔食底部

2) 適用条件

本工法は、腐食電流の流出入を発生させないことを目的とし、開削による施工が可能な場合に適用する。なお、使用材料に応じて適用性が高い部位が異なる（「(2) 使用材料」参照）。

(2) 使用材料

塗覆装に使用する材料は、既設鋼管に熱融着又は接着するシートライニング材と、巻きつけて塗布する塗布型ライニング材に分類される。シートライニング材にはプラスチック系熱収縮シートやチューブ、合成ゴムシート、防食テープがあり、塗布型ライニング材には補修用ポリウレタン、水中硬化型エポキシ樹脂、ペトロラタム等があるが、防食テープとペトロラタムは以下の理由により本マニュアルの対象外とする。

- ①防食テープは他工法の端部処理等に使用する事例が多く、防食テープ単独で使用する事例は極めて少ない。また、製品厚が薄いため、単独使用での性能は他工法に比べ劣ると考えられる。
- ②ペトロラタムは原油から減圧蒸留により分離された石油ワックスの一種であり、柔軟性に富む材料である。このため、埋戻し、転圧時に変形する可能性があり、本来の性能が発揮されない可能性がある。

なお、材料選定に当たっては、以下に示す材料から既設塗覆装同等以上の性能を有するものを採用する。

1) シートライニング材

シートライニング材は表 4.3-8 に示す特徴、表 4.3-9 に示す性能を有している。

なお、プラスチック系は、現状では高品質化に併せてポリエチレン（PE）系が多く用いられているため、表 4.3-9 では当該材料のみ性能を評価している。

表 4.3-8 シートライニング材の特徴

種 類		特 徴
プラスチック系	ポリエチレン(PE)系	PE 基材に固形粘着剤の貼り合せたシートで、PCV より耐久性に優れている。 手巻き・機械巻きともに可能である。
	ポリ塩化ビニル(PCV)系	PCV 基材に固形粘着剤の貼り合せたシートで、柔軟性・耐久性に優れている。 手巻きが主体の施工となる。
合成ゴム系		加硫ゴム又は未加硫ゴムを使用したシートで、防食シートとしての利用が多い。

表 4.3-9 シートライニング材の性能

		熱収縮性ポリエチレン		防食ゴムシート
		粘着型	高密度型	
材 料	基 材	架橋 ポリエチレン	架橋 ポリエチレン	ブチルゴム
	内層材	マスチック系	ホットメルト系	ブチルゴム系粘着剤
性 能	耐薬品性	◎	◎	◎
	耐水性	◎	◎	◎
	耐油性	○	○	○
	耐衝撃性	◎	◎	◎
	可とう性	◎	◎	◎
	密着性	○	◎	○
	絶縁抵抗	◎	◎	◎
耐候性	◎	◎	◎	

各材料の特徴を以降に示す。

①ジョイントコート

ジョイントコートは、ポリエチレンを成形、架橋、延伸し熱収縮機能を付与したもので、加熱すると鋼管の断面方向に収縮して被覆を形成するものである。

ジョイントコートの構成は、ポリエチレン外層材とある温度以上では溶融・流動して鋼管との密着性を付与する内層材から成り立っている。

ジョイントコートの形状は、チューブ系・シート系及びテープ系があるが、鋼管の補修などにはシート系が有効である。ジョイントコートの構成を図 4.3-20 に示す。

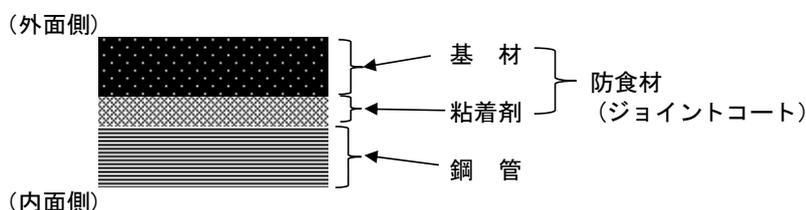


図 4.3-20 ジョイントコートの構成

なお、本材料は過熱すると鋼管の断面方向に収縮し塗覆装を形成するため、直管部に対して適用されることが多い。

②合成ゴムシート

合成ゴムシートは、基材として加硫ゴムシートあるいは未加硫ゴムを使用し、ブチルゴム系粘着剤を積層したもので、材料の構成を表 4.3-10、図 4.3-21 に示す。

表 4.3-10 合成ゴムシート外面防食材料の構成

使用材料		構成
防食ゴムシート	加硫ゴムシート	ブチル・EPDM系
	粘着層	ブチルゴム系
保護テープ		塩化ビニル系
保護シート		ポリエチレンシートR
シールテープ		ブチルゴム系

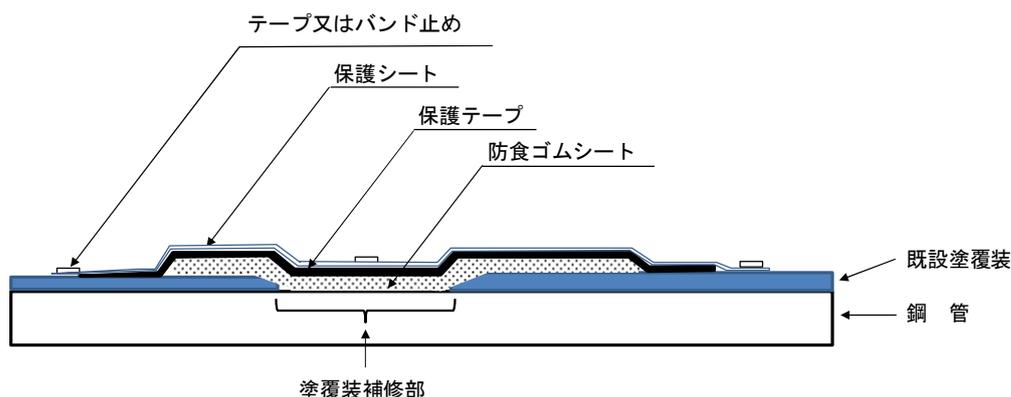


図 4.3-21 ゴム系外面防食材の構成

2) 塗布型ライニング材

塗布型ライニング材には補修用ポリウレタンや水中硬化型エポキシ樹脂があるが、これらは施工規模が極めて小さい場合や腐食深さが深い場合に適用される。詳細は「鋼管路の更新・診断マニュアル（第2部） WSP081-2019」に示されているため参照されたい。

(3) 設計

1) 基本的事項

①材料選定の考え方

塗覆装の材料選定に当たっては、塗覆装の機能が十分に発揮できるように、「②材料選定に当たっての留意点」に示す施工条件を考慮し選定する。なお、一般的にはジョイントコートが安価となる傾向にあるが、対策規模によってはその他の材料が経済的となる場合もあるため、材料選定に当たり経済比較を実施する。

②材料選定に当たっての留意点

塗覆装は、補修を行う鋼管の充水の有無、対象部位等の条件に応じて適する材料が異なる（図 4.3-22）ことに留意する。

2) 設計に必要な各種数値の考え方

塗覆装の設計に当り、使用する材料は JIS によりその要求性能が規定されている。また、特に構造検討などを要する工法ではないため必要となる設計数値はない。

3) 材料選定のフローチャート

塗覆装の使用材料は、図 4.3-22 に示すように選定する。

なお、材料選定の目安として示した対策規模（こぶし大）は、現地での施工性を考慮して示した参考値であるため、個々の施設に応じて経済比較により選定根拠を整理する必要がある。

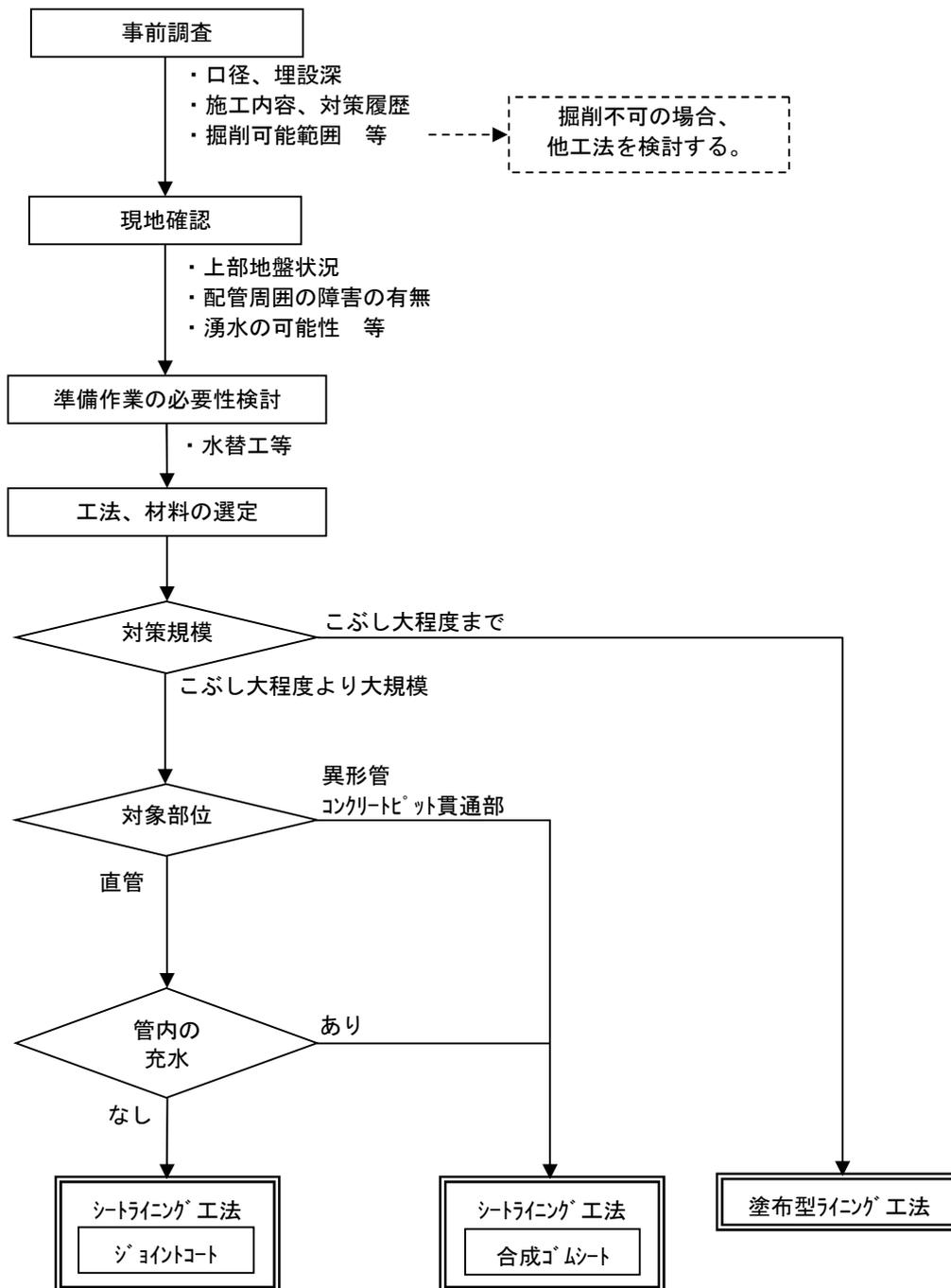


図 4.3-22 塗覆装補修材料の選定フロー例

(4) 施工

塗覆装の施工方法は、使用する材料によりその手順が異なる。以降では、シートライニング材を用いた塗覆装と塗布型ライニング材を用いた塗覆装について、その施工順序、施工段階での留意事項、施工管理を解説する。

1) シートライニング材を用いた塗覆装

①施工順序

シートライニング材のうち、ジョイントコートと合成ゴムシートの施工方法の詳細は「長寿命形水道用ジョイントコート WSP 012-2014」、「鋼管路の更新・診断マニュアル(第2部) WSP081-2019」に規定されている。これらの詳細については当該図書を参照されたい。本マニュアルでは、当該図書から概要を引用し、巻末の参考資料②に掲載している。

②施工段階での留意事項

a) ジョイントコート

- ・熱収縮シートの保管は、40℃以下の屋内を原則とし、変形や水分・異物の付着のないようにする。
- ・被覆が完了した後、速やかに埋戻しを行う。やむを得ず放置するときは、シート等で養生を行う。

b) 合成ゴムシート

- ・ゴムシートの保管は、シート状の梱包の場合は平坦な場所に平置きする。また、ロール状の梱包材については、ロールを立てた状態で保管する。
- ・ゴムシートの施工は、管表面温度が60℃以下の場合とする。
- ・ゴムシート・保護シートは、いずれもシート末端が管底を向く方向に巻き付ける。
- ・湿度の高い時、雨天の時は、原則的にゴムシートの施工を行ってはならない。ただし、やむを得ない場合は、防水・防湿対策を施して行うこととする。
- ・被覆が完了した後、速やかに埋戻しを行う。

なお、対策実施後もマクロセル腐食環境は変わらないため、礫質土を用いた埋戻し時の転圧や他工事の掘削等で塗覆装に欠損を生じさせると、塗覆装欠損部から腐食が進行することに留意する。

(5) ダクタイトル鑄鉄管の防食工法

腐食性土壌と判定された場合、ポリエチレンスリーブで防食するのが一般的である。

ポリエチレンスリーブ法は、1950年代に米国の地下埋設鑄鉄管に実採用された防食方法であり、管の布設現場で0.2mm厚さの軟質ポリエチレン製チューブを鑄鉄管の全長にわたって被覆する方法である。

このポリエチレンスリーブ法には、①腐食性土壌との直接接触を防ぎ防食する。②管の周辺を均一な状態に保ち、マクロセル腐食を防ぐ。③地下水が進入した場合でも水の移動を制御し、溶存酸素が消費されることで腐食の進行を制御する。④迷走電流による電食に対しても遮蔽物の効果を果たす。などの防食効果が挙げられる。

なお、スリーブの施工に際しては、JCPA W 08「ポリエチレンスリーブ施工要領書」に基づいた正しい施工管理を行う必要がある。

また、ダクタイトル鑄鉄管に対してはエポキシ樹脂塗料やアクリル樹脂塗料を塗布する工法があるが、これらの詳細は「ダクタイトル鉄管ガイドブック」や「日本ダクタイトル鉄管協会規格 ダクタイトル鑄鉄管合成樹脂塗装（抜粋）Z2010」等に示されているため参照されたい。

(6) 内面腐食

内面腐食には、一般にダクタイトル鑄鉄管はモルタルライニングが最もよく使用されるが、そのほかにエポキシ樹脂塗料等が使用される。鋼管の場合は一般に水道用液状エポキシ樹脂塗料が使用される。特に上水道や上水供給事業との供用管路については、厚生労働省令に基づく浸出性能が要求されるため、水道用液状エポキシ樹脂塗料若しくは無溶剤形エポキシ樹脂塗料を使用する必要がある。

詳細は「鋼管路の更新・診断マニュアル（第2部）WSP081-2019」に示されているため参照されたい。

4.3.3 メタルタッチ切断

(1) 工法概要と適用条件

1) 工法概要

コンクリートピット貫通部で生じるC/Sマクロセル腐食環境は、コンクリートピット中の鉄筋と鋼管等が導通していることで発生するが多い。

メタルタッチ切断は、コアドリル等によりメタルタッチのアノード部とカソード部を切り離すこと、すなわち鋼管等と鉄筋等の異金属の接触を切り離すことで、腐食電流を阻止する方法である。

図 4.3-23 に示すように、鉄筋と鋼管等が導通していた時の管対地電位分布は、コンクリートピット貫通部に近づくとき大きく減衰し-400mVよりプラス側の電位を示すが、鉄筋と鋼管等を絶縁することで管対地電位がマイナス方向に改善する。

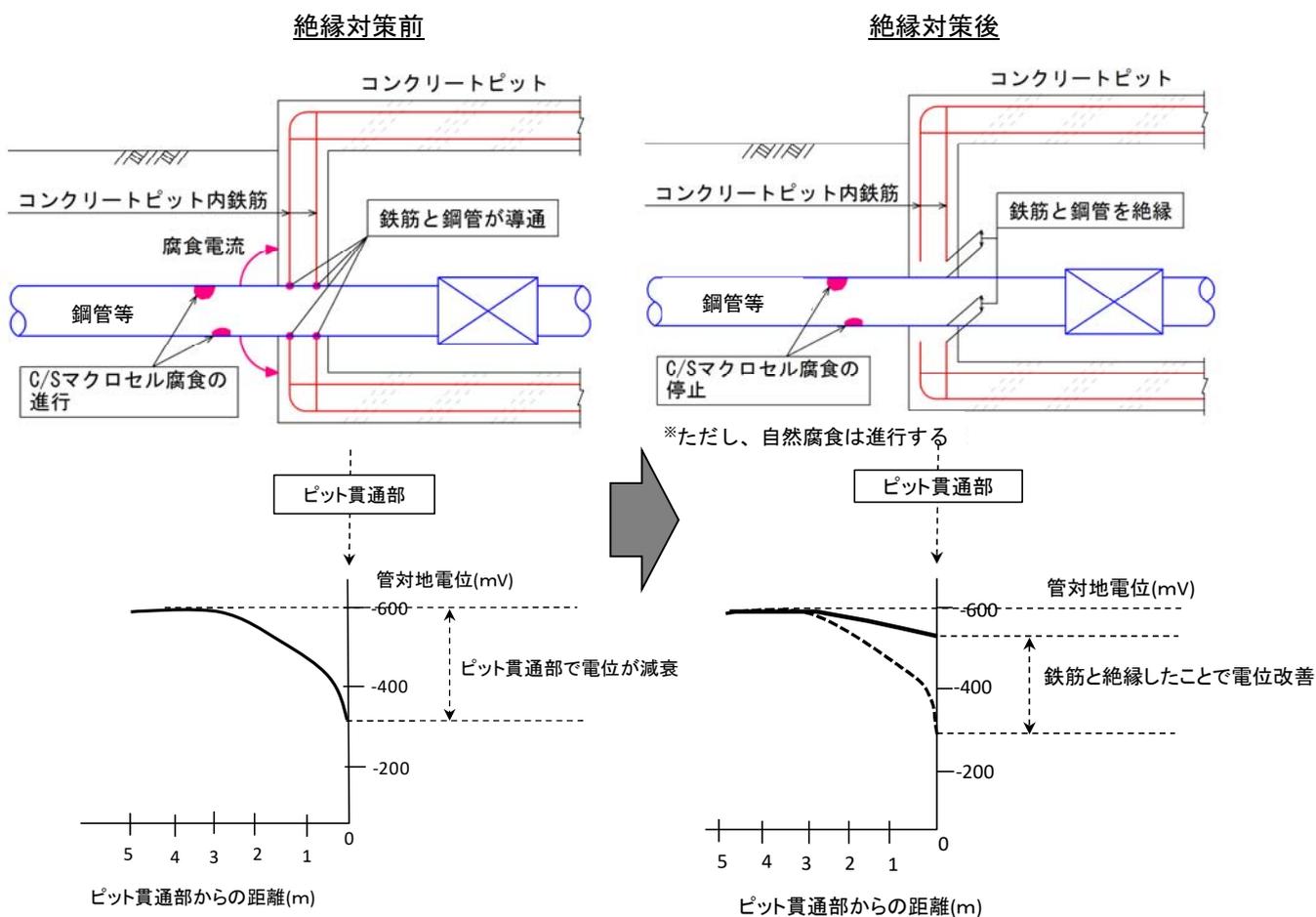


図 4.3-23 メタルタッチ切断概要図

鋼管等の場合、本工法はコンクリートピットなどの適用が想定される。本工法は、コアドリルを用いることでコンクリートピット周囲の掘削や、コンクリートピット中の鉄筋をはつり出し鉄筋を切断するような大掛かりな工事を必要とせず、コンクリートピット内から鋼管等と導通している鉄筋の切断が可能である。

2) 適用条件

本工法は、鋼管等の管対地電位が-400mV よりプラス側を示し、コンクリートピット中の鉄筋と鋼管等が導通している場合、かつ、コアドリルを安全に使用するための施工スペースが確保可能な場合に適用する。

なお、鉄筋と鋼管等の導通の有無は仮通電試験の結果、表 4.3-11 に示す変化が確認された場合に該当する。

表 4.3-11 仮通電試験による鉄筋との導通有無の判定

通電による鉄筋対地電位の変化	鉄筋と鋼管等の導通有無
鉄筋対地電位がマイナス方向（同相）に変化	導通有
鉄筋対地電位がプラス方向（逆相）に変化 又は、変化なし	導通なし

(2) 使用材料

本工法はコアドリルにより鋼管等と導通しているコンクリートピット内の鉄筋を切断するものであり、工法そのものに使用する材料は特になし。施工上必要となる材料は、鉄筋切断部（コア抜き部）の復旧に使用する無収縮モルタル程度である。

(3) 設計

1) 基本的事項

①設計の考え方

本工法の設計に当たっては、メタルタッチ切断によるコンクリートピットの構造性能に与える影響を検討し、応力的に不安定な状態とならないことを確認する。

②設計に当たっての留意事項

鉄筋を切断することで、鉄筋切断範囲の荷重を切断していない部分の構造体に負荷させた時の応力照査が必要となる（施設の構造上、鉄筋を切断すると応力的に対応できない構造の場合もある）。照査項目は次のとおり。

- ・鉄筋を切断した部分に土圧が作用した場合のせん断破壊に対する照査
- ・鋼管等にスラスト力が作用した場合のせん断破壊に対する照査
- ・鉄筋切断箇所の断面照査

メタルタッチ切断により応力的に不安定となった場合は、補強筋の配置、又は他工法（電気防食）の検討を行う必要がある。

また、本工法は、C/S マクロセル腐食環境を改善できるが、自然腐食環境（鋼管等が埋設されている地盤における腐食環境）は変わらないため、鋼管等の自然腐食の進行に留意する。

2) 設計に必要な各種設計数値の考え方

鋼構造物の応力照査に用いる各種数値（許容応力度等）は、「土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計『水路工』」等を参照する。

3) 設計のフローチャート

メタルタッチ切断のフローチャート例を図 4.3-24 に示す。

【メタルタッチ切断設計のための調査】

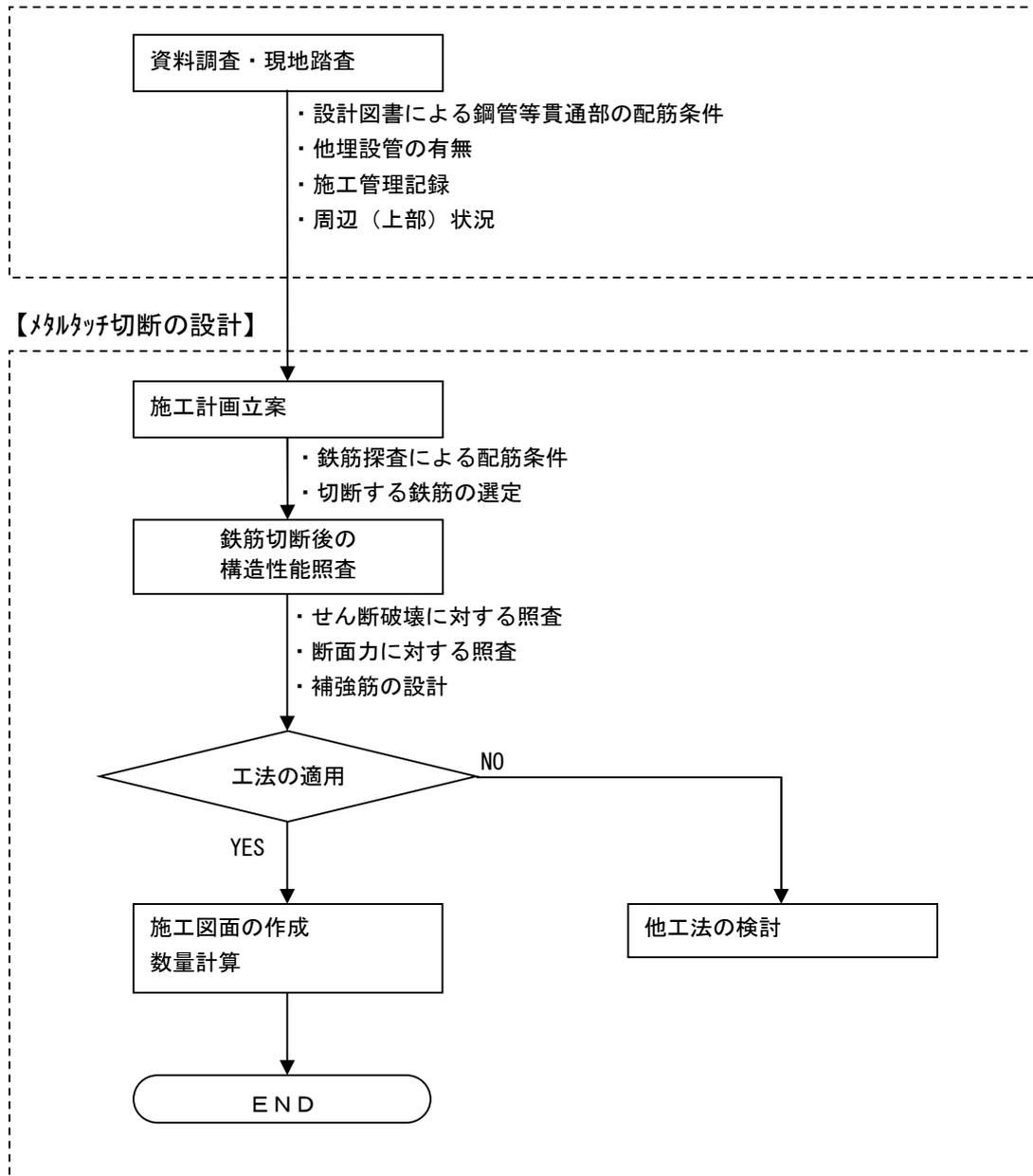


図 4.3-24 メタルタッチ切断設計フロー例

(4) 施工

本項は、メタルタッチ切断に係る施工について定め、円滑かつ的確な対策工事の施工を図ることを目的としている。

施工に当たっては、工事着手前に、工事目的物を完成させるために必要な手順や工法について施工計画書により、確認しなければならない。

1) 施工方法

コンクリートピット中の鉄筋を切断するので、鉄筋探査が重要となる。探査した配筋状況と施工図面等の配筋図を確認し切断位置を決定する。

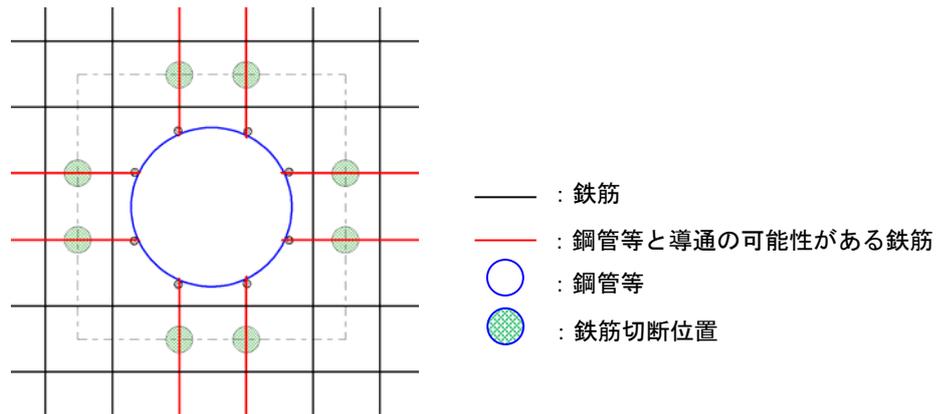


図 4.3-25 鉄筋切断位置例

施工フローを図 4.3-26 に示す。

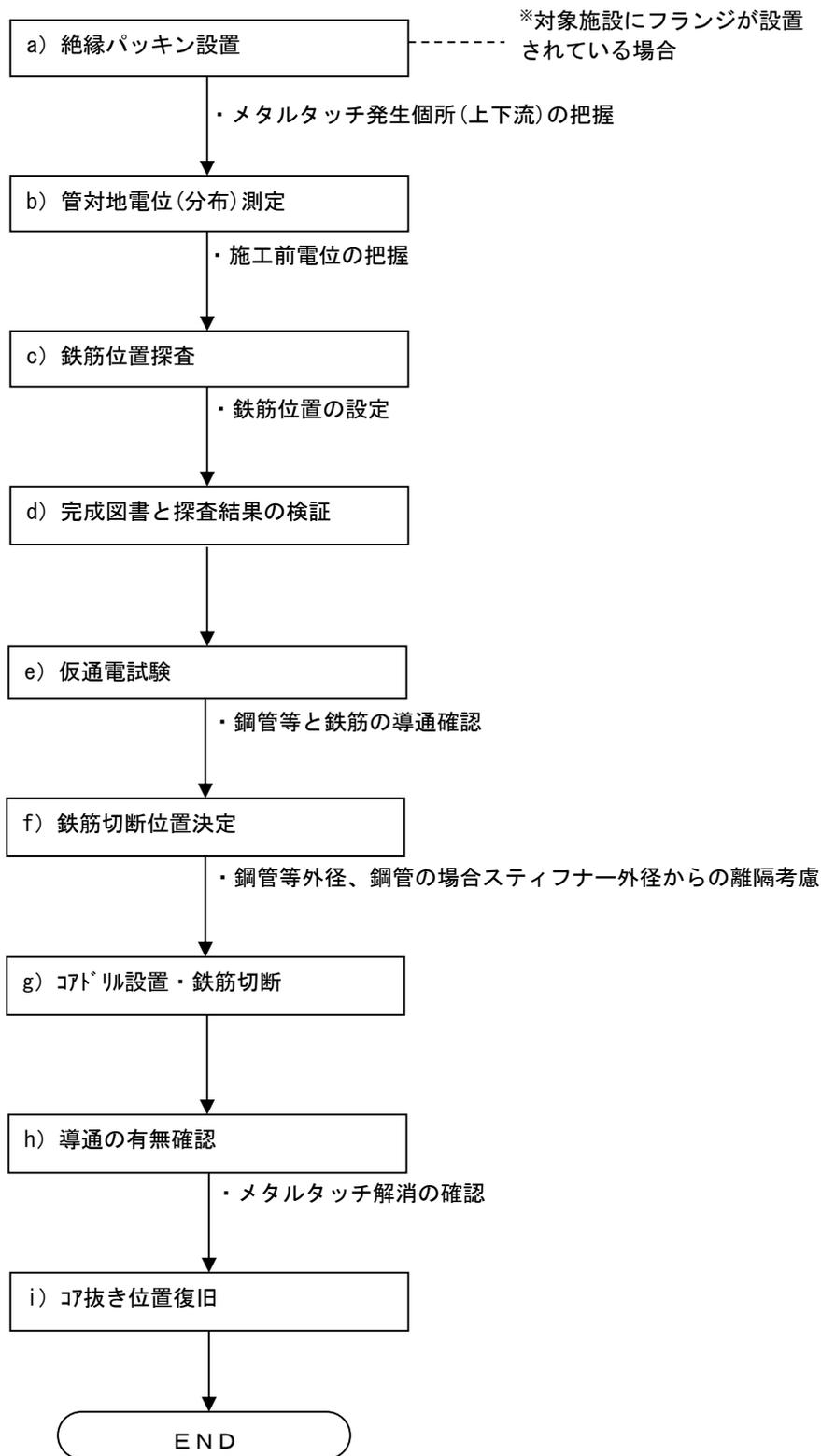


図 4.3-26 施工フロー

①施工順序

a) 絶縁パッキン設置

コンクリートピット中の鉄筋と鋼管等が導通しているとピット貫通部に向かって電位がプラス側に減衰しC/Sマクロセル腐食環境となるが、**図 4.3-27**の例に示すように、ピット貫通部の片側で鉄筋と鋼管等が導通していても影響は両側に発生する。これは、鋼管等が電氣的に一体化しているために、鉄筋が片側で導通していても影響は両側に発生するもので、この状況ではどちら側で導通しているかの判断ができない。

そのため、対象施設にフランジが設置されている場合、フランジに絶縁パッキンを設置しボルトも絶縁ボルトに入れ替え、鋼管等を電氣的に絶縁することでメタルタッチの発生箇所（上下流）を特定する。絶縁ボルトに入れ替えると、鉄筋と導通している側の電位のみ電位差が 200mV 未満を示し鉄筋と鋼管等が導通している方向が判定できる。

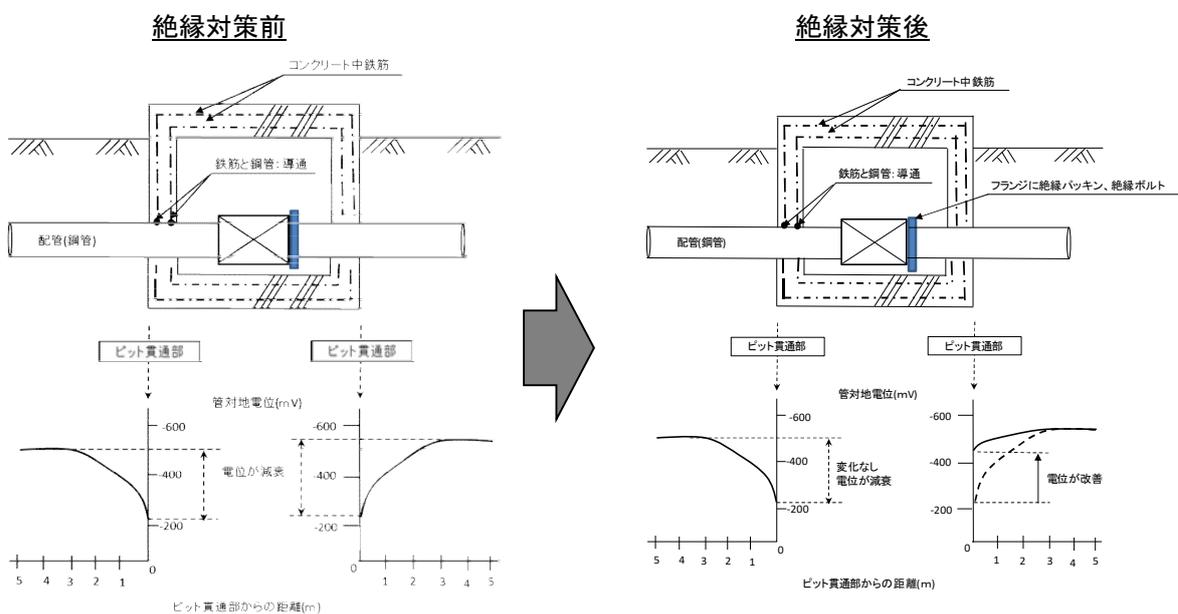


図 4.3-27 絶縁パッキン・ボルト設置前後の管対地電位(勾配)測定結果例

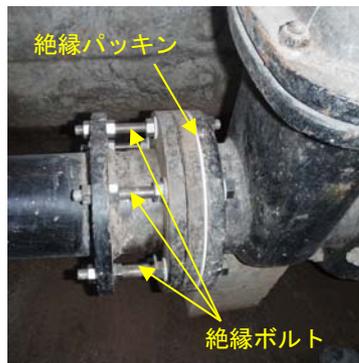
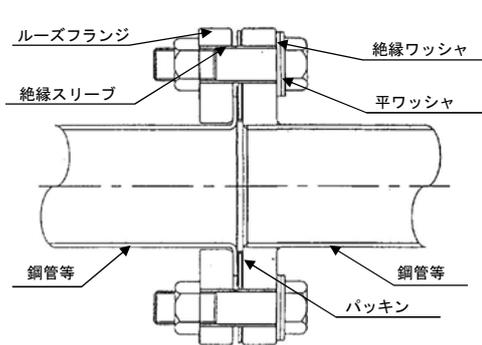


図 4.3-28 絶縁パッキン施工例

b) 管対地電位分布測定

コンクリートピット貫通部の電位を事前に測定し、鉄筋切断後の電位と比較検証する。

図 4.3-29 に示すように、コンクリート貫通部の管対地電位を測定する。

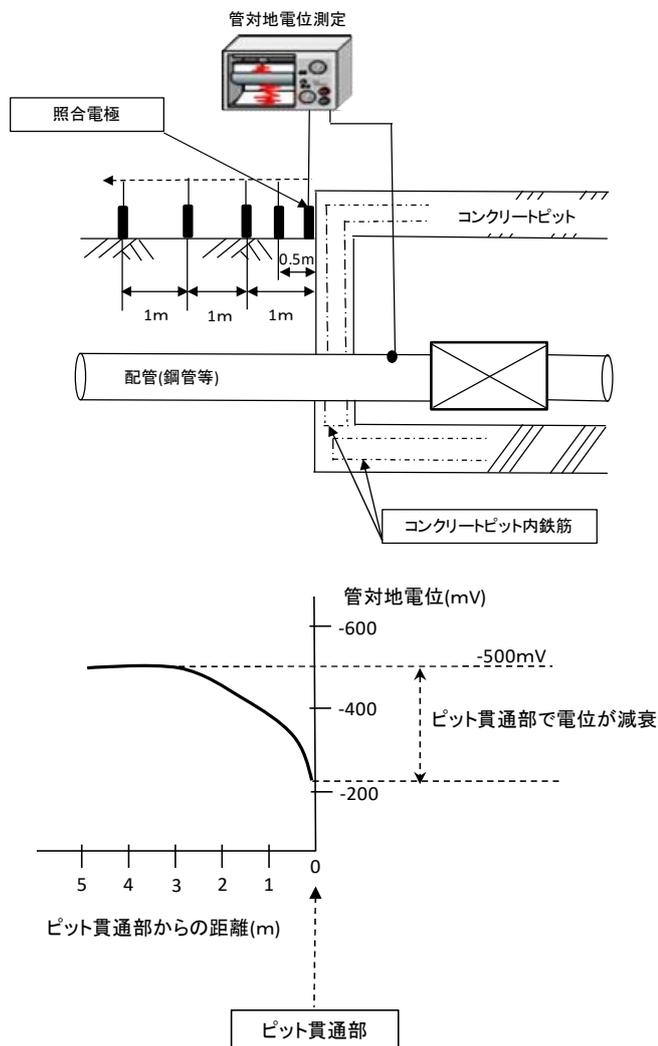


図 4.3-29 管対地電位分布測定例

c) 鉄筋位置探査

鉄筋探査機により、コンクリートピット内部から、鋼管等周囲の配筋状況を探査、マーキングし、鋼管等と導通している可能性のある鉄筋位置を把握する。

d) 完成図書と探査結果の検証

設計・完成図書の配筋図等と探査結果に基づき、鋼管等と配筋状況を踏まえ切断対象となる鉄筋を選定する。

鉄筋探査結果と設計・完成図書を基に鋼管等周囲の配筋を把握する。

コラム ～電磁波レーダーによる鉄筋位置探査について～

【電磁波レーダー法の実施手順】

- ①探査機器は、タイヤの回転を検出して水平距離を測定する距離計が設けられているため、タイヤの空転等が生じないように、壁面の清掃や平滑処理を行う。
- ②探査は対象の鉄筋に対し直角に行う必要がある。このため、測定対象とする配筋と直角方向に探査ライン（図1の例では①～③と④～⑥）を設ける。
- ③スタートラインを決定し、探査ラインに沿って探査計を走行させる。配筋状態とかぶり厚は、探査機の表示部に示される双曲線の中心までの距離により算定する。

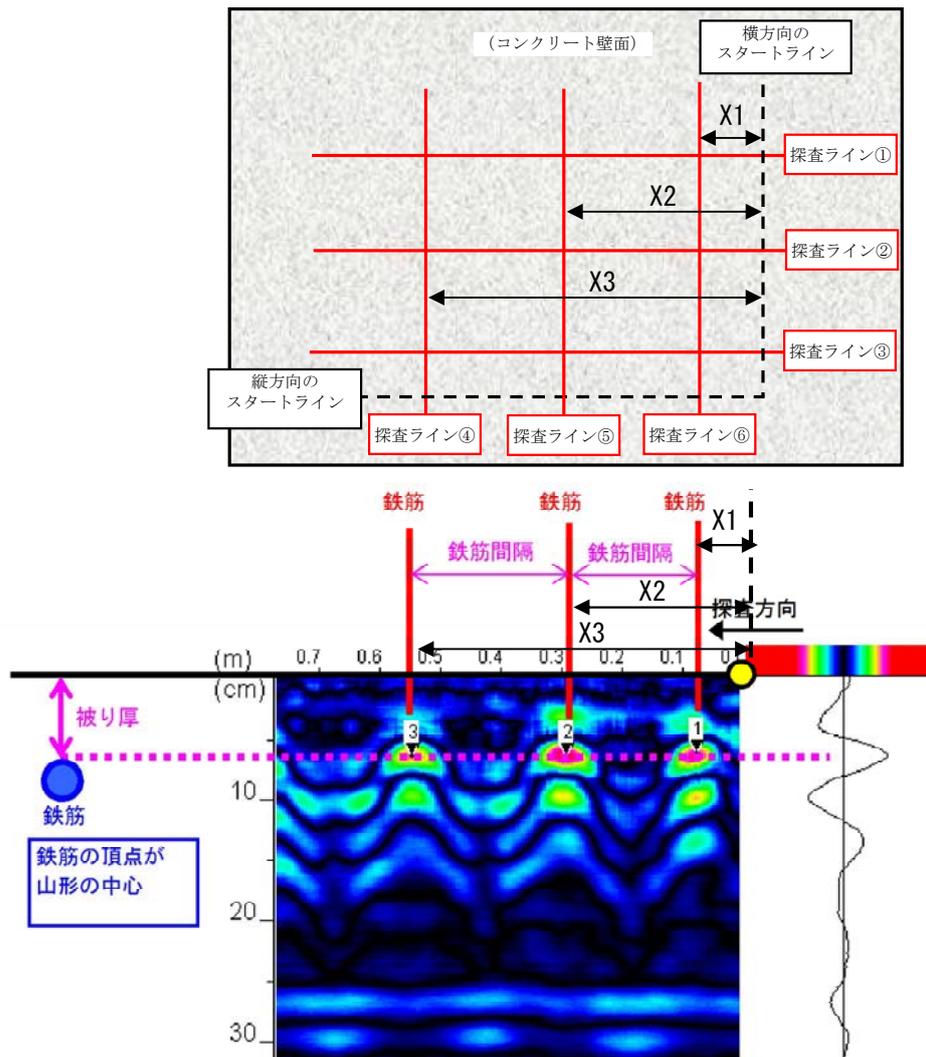


図1 電磁波レーダー探査による探査例

e) 仮通電試験

鉄筋探査後、鉄筋を一箇所ハツリ出し仮通電試験により鋼管等と鉄筋の導通の有無を確認する。



図 4.3-30 鉄筋ハツリ出し・導通確認例

f) 鉄筋切断位置決定

既設鋼管等の口径、スティフナーがある場合はスティフナーの外径を考慮し、鉄筋の切断位置を決定する。なお、鋼管等と導通している鉄筋までは特定できないことから、鋼管等と導通している可能性がある全ての鉄筋を対象とする。

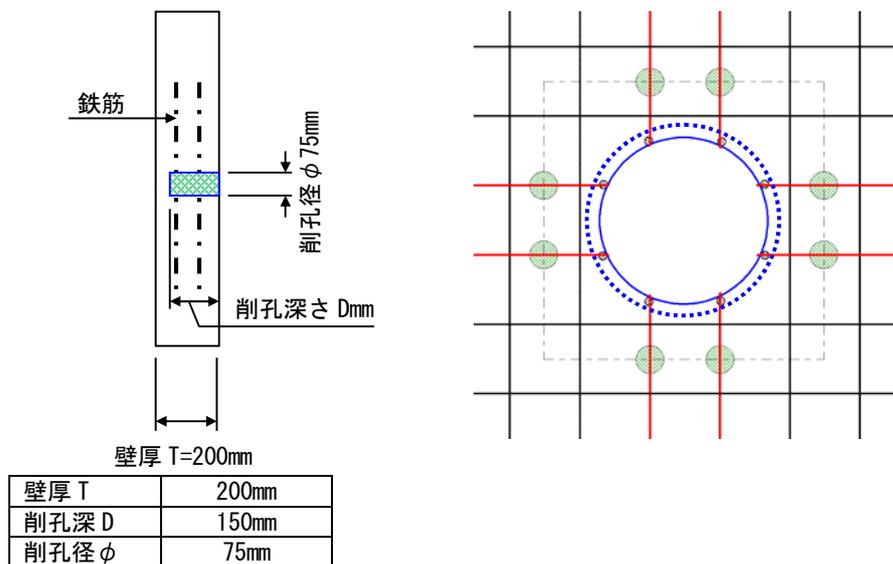


図 4.3-31 鉄筋切断位置例

g) コアドリル設置・鉄筋切断

鉄筋切断位置にコアドリルを設置し、鉄筋を切断する。その際、鉄筋の切断状況を確認する。



図 4.3-32 鉄筋切断状況例

h) 導通の有無確認

鉄筋切断工施工後、再度鋼管等と鉄筋との導通を確認し、メタルタッチ切断により電位差が改善されていることが確認できるまで g) ~h) を繰り返す。

i) コア抜き位置復旧

コア抜き位置と鉄筋はつり出し位置を断面修復材により復旧する。

2) 施工段階での留意事項

施工段階における留意事項を以下に示す。

- ・ 計画・完成図書と鉄筋探査結果を十分に吟味し、配筋状況の確認が重要となる。
- ・ コア抜き後、抜いたコンクリート塊中に切断された鉄筋が残っていることを確認する。
- ・ 配管中にフランジがない流量計用のコンクリートピットの場合、上流側・下流側のどちらで導通しているか、あるいは両方で導通しているかを特定できない。

第5章 防食工法のモニタリング

5.1 基本的事項

防食工法のモニタリング（以降、「モニタリング」という。）は、防食工法の効果が期待される期間中、当該工法が備えるべき性能の確認を目的とし、施工時及び供用時を対象に防食工法に応じたモニタリング計画に基づき実施する。

【解説】

モニタリング計画は、防食工法を適切に評価するため、対象となる防食工法の防食機構を把握し、防食効果を発現するために必要となる性能、又は外観上の変状の程度等を対象に策定する。

モニタリング結果は、対象鋼管等の基本情報（施設基本情報・防食工法情報）や周辺状況写真・管外面（開削可能な場合）と併せて、記録様式に蓄積し、施設管理者等の関係者間で情報を共有することでリスク管理を行う。

なお、モニタリングは防食工法毎に設定された頻度で実施する。モニタリング実施後は結果の傾向分析を行い、傾向に応じた実施頻度を適宜設定する。

5.1.1 モニタリングの目的

モニタリングは、補修工法の効果が期待される期間中、供用開始後の状況変化、当初品質の維持状況を継続的に把握し、当該工法が備えるべき性能（要求性能）の照査を目的として実施する。

5.1.2 モニタリングの実施段階と手順

モニタリングの実施段階は、「防食工法施工時」と「供用時」の2段階に区分する。

「防食工法施工時」のモニタリングは、今後継続して実施するモニタリングデータの初期値を把握するために実施する。なお、初期値は防食工法施工時の性能発揮状況を把握するとともに、今後の性能低下傾向を把握するための基準値となる。

「供用時」のモニタリングは、防食工法の性能や変状の程度を把握し、防食工法の効果を適切に評価することを目的とし実施する。

モニタリングの実施手順を図 5.1-1 に示す。

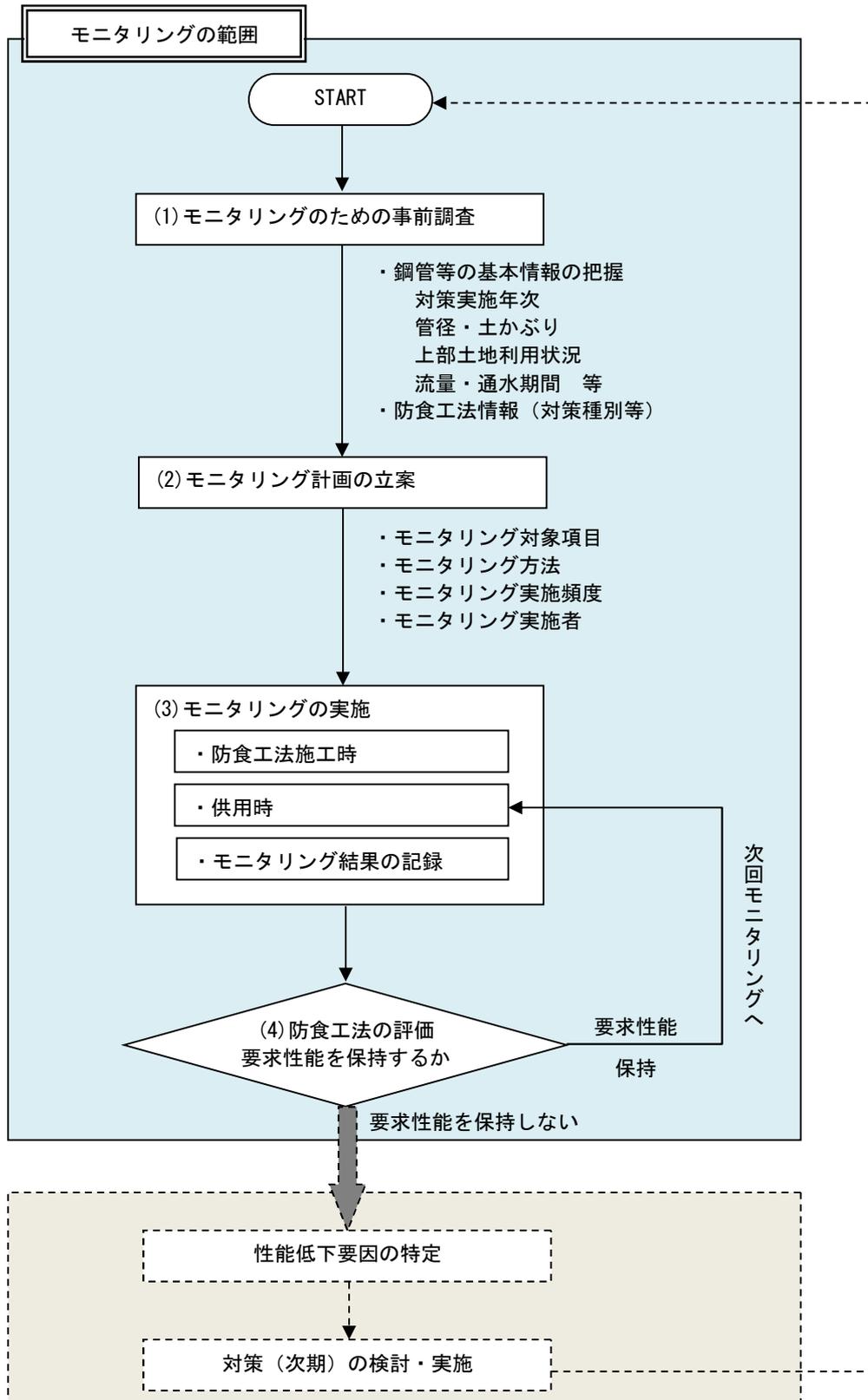


図 5.1-1 モニタリングの手順

(1) モニタリングのための事前調査

モニタリングのための事前調査では、既存資料（表 5.1-1）の収集整理により、対策を実施した鋼管等について施設基本情報、施設状態情報、防食工法情報、維持管理情報を把握する。

既存資料が十分に収集できない場合は施設管理者などへの聴き取り調査を実施し内容を把握する。

把握した内容をもとに、モニタリング計画を立案する。

表 5.1-1 事前調査の収集資料及び把握内容の資料例

情報区分	収集資料	把握内容	
施設基本 情報	工事誌、土地改良区パンフレット	基本情報	造成年次（経過年数）、施設構造 等
	設計書、出来高図面、施設管理台帳	埋設条件	上部土地利用状況、管径、土かぶり 等
	事業計画書、事業誌、河川協議書、設計書	通水条件	計画流量、通水期間 等
施設状態 情報	既往調査資料、対策工事施工記録、聴き取り	変状情報	対策実施前の変状種別・変状要因・変状の程度 施設の補修履歴、対策実施後の施設状態（不具合の有無等）
防食工法 情報	工法パンフレット、対策工事施工記録	基本情報	防食工法種別（電気防食、シートライニング工法、塗布型ライニング工法、管路更生局所補修工法） 防食工法名称、工法選定理由、防食工法の要求性能 防食工法の防食機構
	製造証明書等	材料情報	品質試験結果
維持管理 情報	聴き取り、日常管理記録	対策実施後の日常管理等で確認された不具合等	

(2) モニタリング計画の立案

モニタリング計画では、表 5.1-2 の内容について実施方針を整理する。

表 5.1-2 モニタリング計画記載項目

検討項目	検討内容
モニタリング対象施設の概要	・ 事前調査で把握した基本情報（施設基本情報・防食工法情報）、施設状況写真（対策施工完了時の写真）を示す。
モニタリング対象範囲（位置）	・ 原則として防食工法が実際された全範囲を調査対象とし、位置図と測点等の位置情報を添付する。 ・ 施工延長が長い場合は、定点を設けて調査を行う。 ・ 定点は重要施設等近接箇所や管内調査し易い箇所等を考慮し設定する。
モニタリング項目	・ モニタリング対象の防食工法に応じて適宜設定する。
モニタリング方法	・ モニタリング項目に応じたモニタリング方法を設定する。
モニタリング実施時期	・ 地上部で実施するモニタリングは特に実施時期を限定しない。 ・ 管内で実施するモニタリングは非かんがい期（通水停止期間）を原則とする。
モニタリング頻度	・ モニタリング対象の防食工法に応じて適宜設定する。
モニタリング実施者	・ 施設管理者、専門技術者等、実施者を明記する。
留意事項	・ 施設の通水条件や施設変状の有無、維持管理の状況等について施設管理者に確認する。

(3) モニタリングの実施

防食工法に応じたモニタリングを実施する（詳細は後述の「5.2 防食工法に応じたモニタリング」を参照）。

(4) モニタリング結果の記録

実施したモニタリング結果は所定の記録様式に蓄積し、防食工法の効果検証にフィードバックしていく。

記録様式を表 5.1-3～表 5.1-4 に示す。

また、作成した記録表については、保管するとともに写しを各農政局土地改良調査管理事務所にその都度提出するものとする。

表 5.1-3 電気防食 モニタリング結果記録様式

基本情報								
地区名								
施設名								
管種・口径								
土かぶり厚								
対策実施前の管対地電位								
電気防食	種別	<input type="checkbox"/> 完全防食法			<input type="checkbox"/> 近接陽極法			
	要求性能	管対地電位-850mV以下			管対地電位-600mV以下 対策前後の管対地電位差300mV超			
	W : 設計時の陽極正味質量 (kg)							
	施工年月				設計耐用年数			
モニタリング結果								
回数	実施年月日	測定者		管対地電位	要求性能に対する判定			
施工時					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
1年目					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
2年目					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
3年目					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
4年目					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
5年目					<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない			
余寿命算定								
<p>①施工時 $Y_a = W_0 / (I_{mg} \times C)$ Y_a : 余寿命 [y] W_0 : 初期陽極質量 [kg] I_{mg} : 測定時陽極発生電流 [A] C : 陽極消耗率 8.0kg/A・y</p> <p>②モニタリング時(1年目以降) $Y_a = W_n / (I_{mg} \times C) - n$ W_n : 前回実施したモニタリング時の陽極残質量 [kg] n : 前回実施したモニタリングからの経過年数 [y] $W = W_n - W'_n$ W : 陽極残質量 [kg] W'_n : 前回実施したモニタリングからの陽極消耗量 [kg] $W'_n = I_{mg} \times C \times n$</p>								
回数	経過年	W0(kg)	I _{mg} (A)	n(年)	W(kg)	Y _a (年)	設計余寿命(年) 設計耐用年数-経過年	要求性能に対する判定
施工時								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
1年目								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
2年目								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
3年目								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
4年目								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
5年目								<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
所見								
施工時								
1年目								
2年目								
3年目								
4年目								
5年目								

【凡例】 : 記載欄

表 5.1-4 塗覆装 モニタリング結果記録様式

基本情報			
地区名			
施設名			
管種・口径			
土かぶり厚			
対策実施前の写真			
塗覆装	種別	<input type="checkbox"/> シートライニング工法	<input type="checkbox"/> 塗布型ライニング工法
	細目		
	施工年月		メーカー名
	要求性能	劣化度 c 以上・ピンホールがないこと	
モニタリング手法			
地表面電位勾配	種別	<input type="checkbox"/> 直流電流による	<input type="checkbox"/> 交流電流による
塗覆装の外観	区分	<input type="checkbox"/> 開削による目視実施	<input type="checkbox"/> ピンホール探知試験 <input type="checkbox"/> 未実施
モニタリング結果（地表面電位勾配）			
回数	実施年月日	測定者	要求性能に対する判定
施工時			<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
次回			<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
計測結果図・所見を記載			
施工時	<input type="checkbox"/> 極性の変化なし（導通なし） <input type="checkbox"/> 極性の変化あり（導通あり）		
次回	<input type="checkbox"/> 極性の変化なし（導通なし） <input type="checkbox"/> 極性の変化あり（導通あり）		
モニタリング結果（塗覆装の外観）			
回数	写真	劣化度	要求性能に対する判定
施工時		<input type="checkbox"/> a	<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
		<input type="checkbox"/> b	所見
		<input type="checkbox"/> c	
		<input type="checkbox"/> d	
回数	写真	<input type="checkbox"/> a	<input type="checkbox"/> 保持 <input type="checkbox"/> 保持しない
		<input type="checkbox"/> b	所見
		<input type="checkbox"/> c	
		<input type="checkbox"/> d	

【凡例】 : 記載欄

5.2 防食工法に応じたモニタリング

モニタリングは、防食工法施工後の状況変化、当初品質の維持状況を継続的に把握し、性能などを検証するものである。

モニタリングは、各防食工法の性能の発揮状況を確認できる調査又は外観目視により行うことで、防食工法の要求性能を保持しているか否かの判定を行う。

【解説】

本節では、「第4章 対策工法」で示した①電気防食、②塗覆装の2工法を対象にモニタリング計画について記載する。

5.2.1 電気防食（流電陽極方式）

(1) モニタリングの項目と留意点

本工法に対するモニタリング項目は、防食効果の発現状況の判定指標となる管対地電位と陽極材の余寿命（下式参照）の判定指標となる陽極発生電流とする。

①施工時

$$Y_a = W_0 / (I_{mg} \times C)$$

Y_a : 余寿命 [y]

W_0 : 初期陽極質量 [kg]

I_{mg} : 測定時陽極発生電流 [A]

C : 陽極消耗率 8.0kg/A・y

②モニタリング時（1年目以降）

$$Y_a = W_n / (I_{mg} \times C) - n$$

W_n : 前回実施したモニタリング時の陽極残質量 [kg]

n : 前回実施したモニタリングからの経過年数 [y]

$$W = W_n - W'_n$$

W : 陽極残質量 [kg]

W'_n : 前回実施したモニタリングからの陽極消耗量 [kg]

$$W'_n = I_{mg} \times C \times n$$

計測結果に急激な低下傾向が認められる場合は、原因究明のための詳細調査の要否を検討する。

管対地電位の測定位置は原則として埋設型照合電極を活用するが、ない場合は常に同位置で実施可能となるように、図面に測定位置を明記する。

(2) モニタリング方法

モニタリング方法を表 5.2-1 に示す。なお、モニタリング方法の詳細は表中に記載の本マニュアルの該当頁を参照されたい。

表 5.2-1 電気防食（流電陽極方式）のモニタリング

モニタリング項目	モニタリング方法	参照頁
管対地電位	管対地電位測定	第3章 3.3.1 管対地電位（分布）測定
陽極発生電流	陽極発生電流測定	下記1) 陽極発生電流測定

1) 陽極発生電流測定

陽極発生電流測定は、ターミナルボックス内又はコンクリートピット内でボルト締め結線している陽極と鋼管等のリード線をシャント抵抗器（又は零抵抗電流計）を介して接続し、高感度電圧記録計で陽極発生電流を記録する。

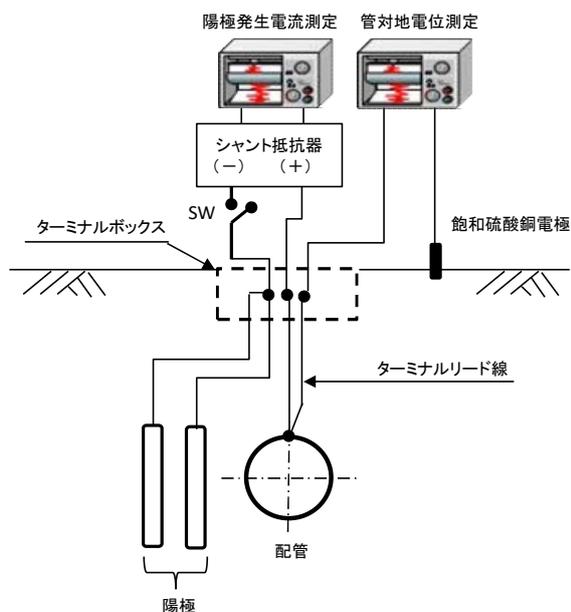


図 5.2-1 陽極発生電流測定（例）

(3) 評価及び判定

1) 管対地電位

モニタリング結果の評価及び判定は、適用された電気防食種別に応じて表 5.2-2 のとおり実施する。

表 5.2-2 管対地電位測定結果の評価と判定

種別	区分	評価	判定
完全防食法	—	-850mV 以下	要求性能を保持
		-850mV 超過	要求性能を保持しない
近接陽極法	①	-600mV 以下	要求性能を保持
		-600mV 超過	要求性能を保持しない
	②	対策前後の管対地電位差 300mV 以上	要求性能を保持
		対策前後の管対地電位差 300mV 未満	要求性能を保持しない

※近接陽極法の区分は、採用されている防食達成基準（①自然電位である-600mV 以下、②自然電位より-300mV マイナス側に変化）により選定する。

2) 陽極発生電流

モニタリング結果の評価及び判定は表 5.2-3 のとおり実施する。

表 5.2-3 陽極発生電流測定結果の評価と判定

評 価	判 定
余寿命 (2~3*年以上)	要求性能を保持
余寿命 (2~3*年未満)	要求性能を保持しているが、モニタリングを半年に1回実施 *改修・更新を含めた再対策実施時期を検討する。
余寿命なし	要求性能を保持しない

※今後の保全計画等の計画を踏まえ、適宜設定する。

(4) モニタリングの頻度

モニタリングの頻度は防食工法の防食機構を踏まえ、防食工法の効果、変状の有無や進行性等を継続的に評価・判定するため表 5.2-4 のように設定する。

なお、余寿命が2~3*年になった場合、モニタリングの実施頻度を上げ防食工法の効果が期待される期間に対する監視体制を強化する。

表 5.2-4 モニタリングの頻度

区 分	実施頻度
施工時	施工完了後（初期値の把握）
初期値把握後	1年~複数年に1回
余寿命が2~3*年未満となったとき	半年に1回 改修・更新を含めた再対策の実施時期を検討する

5.2.2 塗覆装

(1) モニタリングの項目と留意点

塗覆装で被覆している鋼管に直流又は交流電流を通電すると、塗覆装が健全な部位は抵抗が高いので鋼面への流入電流が小さく、塗覆装に損傷部があると健全な部位と比べ抵抗が小さくなり流入電流が大きくなる。流入電流の大きい部位は、図 5.2-2 に示すように地表面電位勾配にも変化（極性の変化）が生じる。

このため、塗覆装に対するモニタリング項目は、塗覆装の損傷の有無の判定指標となる地表面電位勾配とする。

また、塗覆装施工箇所周辺の開削が可能で塗覆装の状態を直接的に目視できる場合は、塗覆装の外観（膨れ、剥れ、亀裂等の有無や程度）、膜厚についてもモニタリング項目とする。

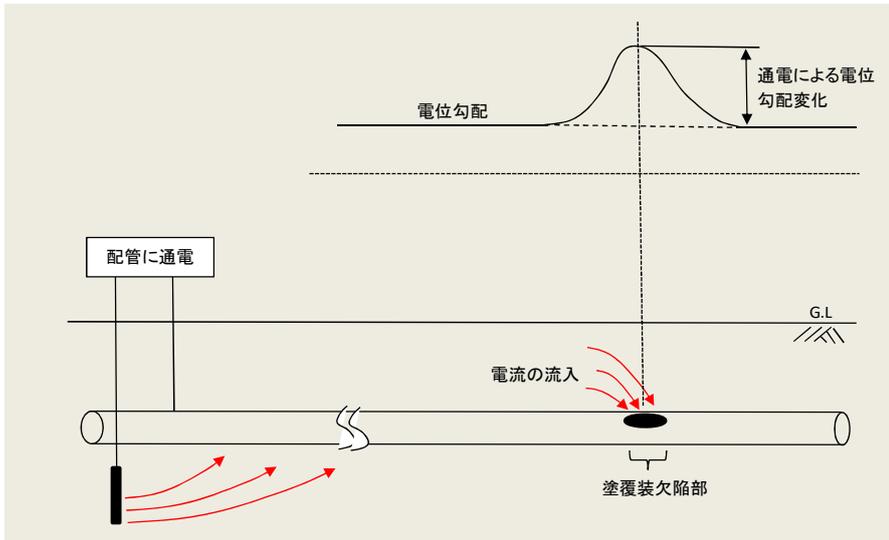


図 5.2-2 通電による地表面電位勾配の変化

塗覆装のモニタリングを実施する際の留意点を以下に示す。

- 1) モニタリング地点近隣に鋼管とコンクリート中の鉄筋等がメタルタッチしている箇所がある場合、通電電流の大部分が鉄筋に流入してしまい塗覆装の損傷に起因する地表面電位勾配の極性の変化が現れないため、このような地点でのモニタリングは実施できない。
- 2) 塗覆装を施した鋼管近傍に他の埋設鋼管が敷設されている場合、地表面電位勾配の極性の変化が生じるため、事前に周辺の配管状況を把握しておく必要がある。

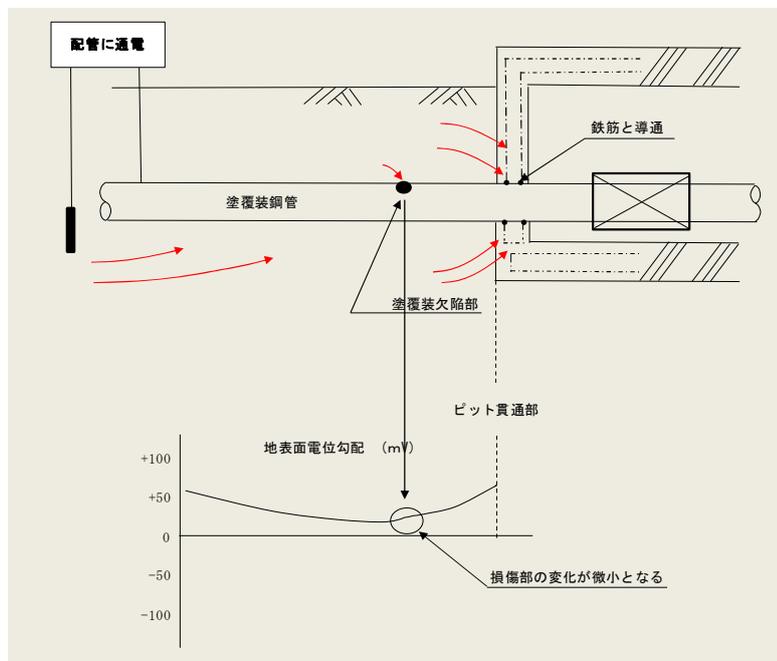


図 5.2-3 鋼管と鉄筋がメタルタッチしている場合の地表面電位勾配例

(2) モニタリング方法

1) 地表面電位勾配

モニタリング方法は通電する電流種別に応じて表 5.2-5 に示す方法がある。

モニタリング方法の詳細は表中に記載の本マニュアル（案）の該当頁を参照されたい。

表 5.2-5 地表面電位勾配のモニタリング方法

モニタリング項目	通電する電流種別	モニタリング方法	参照頁
地表面電位勾配	直流電流	塗覆装損傷調査	第3章 3.3.5 (1) 鋼管に直流電流を通電する方法 (地表面電位勾配測定)
	交流電流	塗覆装損傷調査	第3章 3.3.5 (2) 鋼管に交流電流を通電する方法

2) 塗覆装の外観

塗覆装の外観に対するモニタリング方法は表 5.2-6 のとおり目視と簡易計測とする。

表 5.2-6 塗覆装の外観を対象としたモニタリング方法

モニタリング項目	想定される変状	モニタリング方法	使用機器
塗覆装の外観	歪み、へこみ、剥離、亀裂 焼損、めくれ、剥がれ	目視	—
	ピンホール	ピンホール探知検査	ピンホール探知機

(3) 評価及び判定

モニタリング結果の評価及び判定は表 5.2-7～表 5.2-8 のとおり実施する。

1) 地表面電位勾配

表 5.2-7 地表面電位勾配測定結果の評価と判定

評 価	判 定
極性の変化なし	要求性能を保持
極性の変化あり	要求性能を保持しない

2) 塗覆装の外観

表 5.2-8 外観目視結果の評価と判定

評 価	判 定
劣化度 c、d	要求性能を保持
劣化度 a、b	要求性能を保持しない（防食性能の低下・著しい低下あり）

*劣化度の区分は表 5.2-9。

表 5.2-9 劣化度判定基準

劣化度	判定基準	参考：対策工例
a	剥がれや欠陥が著しく、鋼材が露出し錆が生じている。	全面的な対策（補修）を実施
b	一部に鋼材まで達する亀裂や剥落等が生じ、わずかに錆が認められる。	劣化した箇所の対策（補修）を実施
c	一部に鋼材まで達していない亀裂や剥落等が点状している。	補修は不要だが、モニタリング頻度を高める等の配慮が望まれる。
d	初期状態とほとんど変化なく、健全な状態。	モニタリングを継続する。

(4) モニタリングの実施時期

モニタリングの実施時期は防食工法の防食機構を踏まえ、防食工法の効果等の評価・判定するため表 5.2-10 のように設定する。

表 5.2-10 モニタリングの実施時期

区 分	実施時期
施工時	施工完了後（初期値の把握）
初期値把握後	塗覆装を実施した鋼管を露出させる（開削する）土工事等があった場合に適宜*

* 周辺で土工事等がある場合は、原則として事前に施工実施機関と施工計画を検討し、塗覆装対策区間に影響が生じないようにするが、塗覆装を損傷してしまう可能性が否定できないため、影響が生じていないことを確認する目的で施工者側とモニタリング実施の調整を図る。

5.3 対策（次期）

次期の対策は、モニタリングの結果「要求性能を保持しない」と評価された場合に実施する再対策である。

次期対策は、改修・更新の可能性、実施済みの防食工法の適否も含めて検討を行う。

【解説】

モニタリング結果を踏まえ性能低下の要因（施工不良によるもの、材料不良によるもの、想定外の腐食環境等）を特定した上で、今後の残供用期間や経済性、維持管理性、発生している変状の程度等を総合的に考慮し、次期の対策の区分（「部分的な補修」、「全面的な再対策」、「鋼管等の改修・更新」等）や種別（同一工法、他工法）を検討する。

特に、モニタリングの結果、早期に劣化や変状が確認された場合は、実施済みの防食工法の適否を慎重に検討する必要がある。

土木工事共通仕様書（平成 31 年 3 月 28 日 30 農振第 3904 号）

第 3 章 施工共通事項 第14節 防食対策工

3-14-1 一般事項

1. 受注者は、ダクタイル鋳鉄管路線において設計図書に示す土質が腐食性土壌（ANSI A 21. 5に相当する土壌）の場合は、JWWA K 158に規定されたポリエチレンスリーブを全線にわたって被覆するものとする。
2. 受注者は、鋼管、ダクタイル鋳鉄管（バルブ類を含む）等これに類するパイプライン等施設で、土中に直接埋設するバルブ、鋼製継輪類、可とう管等については、塗膜の欠損に注意するとともに、土質が腐食性土壌（ANSI A 21. 5に相当する土壌）の場合は、埋設部全体をJWWA K 158に規定されたポリエチレンスリーブで被覆しなければならない。
3. 受注者は、鋼管、ダクタイル鋳鉄管（バルブ類を含む）等これに類するパイプライン等施設で、これと接し鉄筋コンクリート構造物を造成する場合、本節3-14-2 防食対策工の規定による対策を講じなければならない。

3-14-2 防食対策工

1. コンクリート中の鉄筋と金属管（鋼管、ダクタイル鋳鉄管及びバルブ類を含む）とは接触させてはならない。また管体支持金具及び管体固定アンカー等は金属管との絶縁処置がされている場合を除き鉄筋と接触させてはならない。
なお、鉄筋に絶縁測定用のターミナルを設置し、コンクリート打設前及び打設後にテスターにより金属管等との絶縁状態を確認するものとする。
2. コンクリート構造物より10m以内における埋設鋼管の現場溶接部の外面塗覆装は、水道用塗覆装鋼管ジョイントコート（WSP 012）又は、水輸送用塗覆装鋼管—第3部：長寿命形外面プラスチック被覆（JIS G 3443-3）によるものとする。
3. コンクリート構造物貫通部より10mの区間は、特に鋼管腐食の発生しやすい場所となるので、埋戻し前に外観及びピンホール検査を行い塗装に損傷のないことを確認するものとする。
4. 鋼管（プラスチック被覆鋼管を除く）は、コンクリート構造物から絶縁性を有する伸縮可とう管・可とう継手まで又は、配管延長10m 以内の短い方、ダクタイル鋳鉄管は1本目までをポリエチレンスリーブで被覆しなければならない。
なお、コンクリート構造物内への巻き込みはスティフナーの手前までとし、施工方法及び品質については、JWWA K 158、（一社）日本ダクタイル鋳鉄管協会より発行されている技術資料に準じるものとする。
5. 埋設鋼管（ダクタイル鋳鉄管及びバルブ等を含む）の埋戻材は、管体及び塗覆装に有害な礫等を含まない良質土を使用するものとする。

なお、埋戻し締固めに当たり、管体及び塗装に損傷を与えないように慎重に行わなければならない。

6. ゴム可とう管については、ゴム被覆部とプラスチック被覆等との境界部は、塗装重ね幅を十分とるものとする。

シートライニング材を用いた塗覆装の施工

シートライニング材のうち、「ジョイントコート」と「合成ゴムシート」の施工方法を以降に示す。なお、これらの材料を使用したシートライニング材の施工方法は「水道用塗覆装鋼管ジョイントコート WSP012-2014」により規定されている。詳細は当該資料を参照されたい。

既設埋設鋼管の塗覆装の補修は、基本的に鋼管を全周露出させ(掘り出し)補修するため、ここでは開削等によって鋼管が全面露出していることを前提とした各施工(補修)方法のフローを図1に示す。

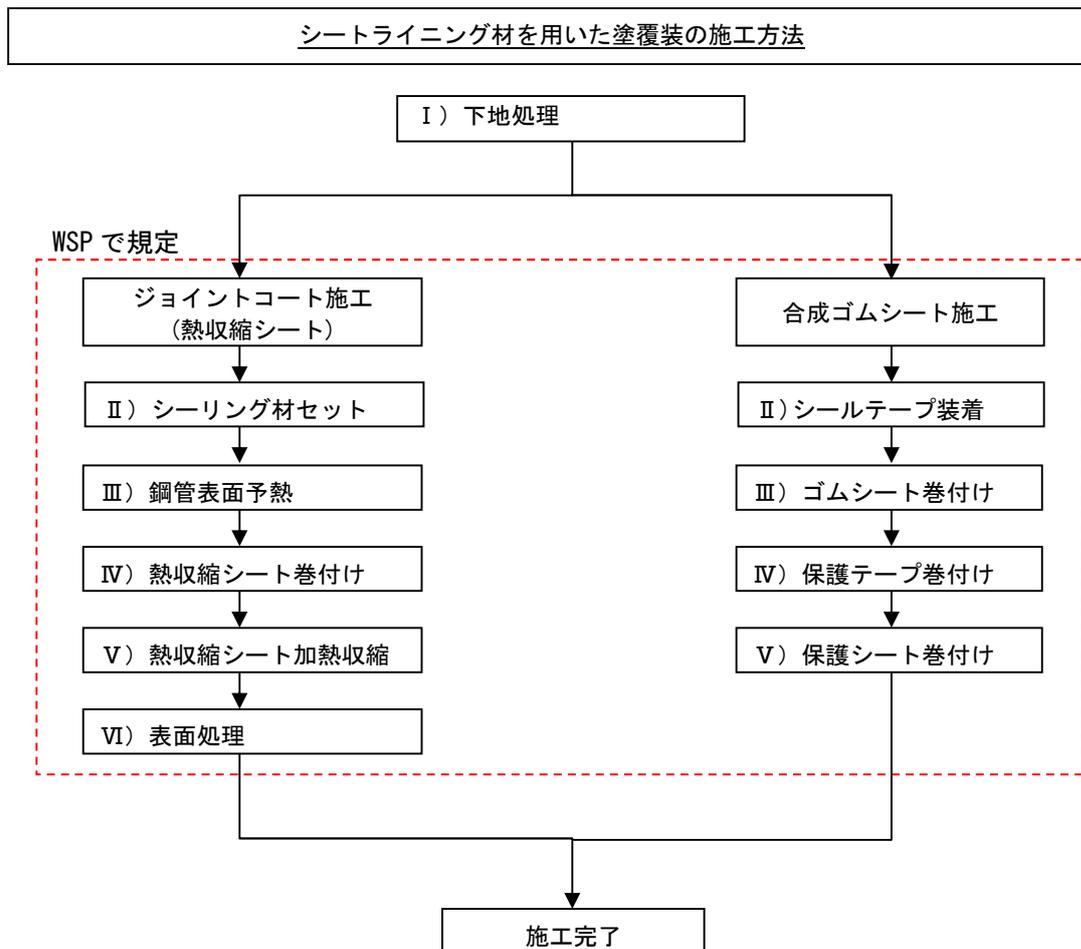


図1 シートライニング工法の施工フロー

1) 施工順序

①ジョイントコート(水道用塗覆装鋼管ジョイントコート WSP012-2014 より)

I) 下地処理

- ・溶接によって生じたスラグ、スパッタ、仮付けピース跡、ビード部凹凸等の有害な突起はディスクグラインダー等によって除去又は滑らかに仕上げる。
- ・スケールや錆、補修部にあたる既設の塗覆装は除去する。
- ・ほこり、泥が付着しているときは、布等で拭き取る。
- ・水分が付着しているときは、乾いた布等で拭き取った後、鋼面を十分に乾燥させる。
- ・油分が付着しているときは、溶剤を含ませた布等で拭き取る。

II) シーリング材セット

既設塗覆装の端面の角度が 45° を超える場合は、 45° 以下に整形するか、シーリング材を装着し、角度を滑らかにする。シーリング材の装着状況を図 2 に示す。

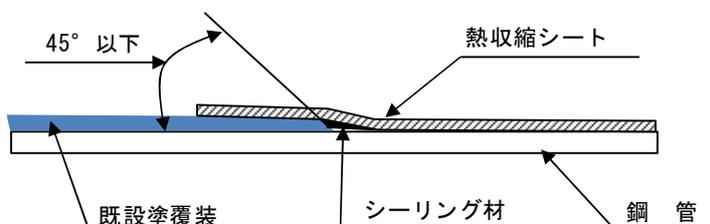


図 2 シーリング材の装着

III) 鋼管表面予熱

専用バーナーを用いて鋼管表面に炎をあて、管体を約 60°C に予熱する。

IV) 熱収縮シートの巻付け

- ・熱収縮シートの貼り始め部を図 3 に示すように切り除く。

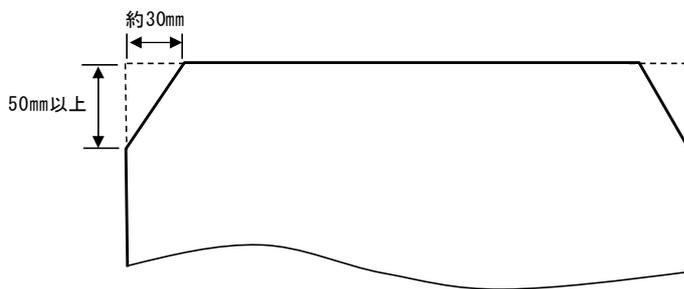


図 3 熱収縮シート貼り始め切り除き

- ・熱収縮シートと既設塗覆装との重ね長さは、両側とも 50 mm 以上とする。なお、円周方向の重ね長さは 50 mm 以上とする。
- ・熱収縮シートの貼り始めは、はく離紙をはがしながらローラーを用いて管の表面に圧着するように張り付ける。
- ・熱収縮シートの貼り始めの位置は、管の頂点から 45° とし、貼り始め部端部にシ

ーリング材を圧着する。

図4に既設塗覆装との重ね長さ、シーリング材の取付状況を示す。

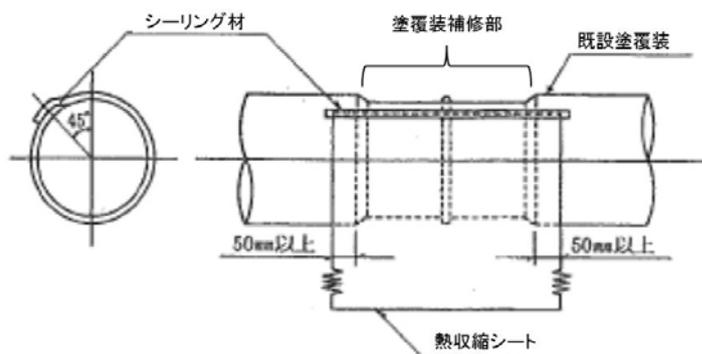


図4 既設塗覆装との重ね長さ、シーリング材の取付状況

- ・熱収縮シートの末端を張る時は、シワが生じないように熱収縮シートを軽く引っ張り、貼り始め部にラップして貼り付ける。
- ・熱収縮シートの貼り付け後、接合用シートの幅方向中央と熱収縮シート端部が一致するように接合用シートを貼り付ける。

図5に熱収縮シート巻終わり状況を示す。

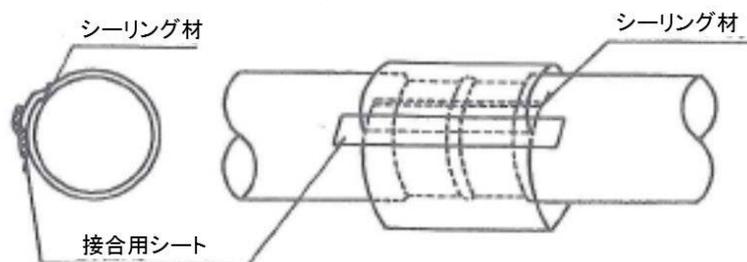


図5 熱収縮シート巻終わり状況

- ・接合用シートは、貼り付ける前にあらかじめ専用バーナーを用いて接合シートの接着面が軟化するまで加熱する。
- ・接合用シートは、均一に圧着していないと接合用シートの一部に力が加わり破断する可能性があるため、圧着むらが生じないように、加熱しながらローラーで十分に均一に圧着する。

V) 熱収縮シートの加熱収縮

- ・加熱収縮は、専用バーナーを用いて、炎を直角に当てゆっくり移動しながら行う。バーナーを移動せず同じ場所を加熱すると焼損の原因となるので、バーナーは常にゆっくりと移動させなければならない。
- ・加熱収縮は下方から上方に向かって行う。
- ・熱収縮シートに焼け焦げを生じさせないように、専用バーナーは適度の離隔を保持

する。

- ・大口径の場合は、エア抜きのために必要に応じて熱収縮シートと鋼管等との間に浮かし治具を挿入しても良い。
- ・手順1：熱収縮シートの中央部を円周方向に360°均一に収縮させる。なお、大口径で一度に全周を収縮させることが困難な場合、下面から順に分割して行っても良い。
- ・手順2：熱収縮シート軸方向半幅に対し、熱収縮シートの中央部から側端部へ空気を追い出す要領で加熱収縮を行う。
- ・手順3：軸方向半幅の加熱収縮がほぼ完了した後、他半幅の加熱収縮を行う。
- ・手順4：熱収縮シートの収縮がほぼ完了した後、熱収縮シート端部から粘着剤がはみ出るまで全体を均一に収縮させる。
- ・手順5：加熱収縮作業中及び完了後必要に応じて、溶接ビード部、工場被覆端部の段差をローラーで整形する。

VI) 表面処理

- ・熱収縮シート加熱収縮完了後、保護シートを巻付ける。
 - ・保護シートとしてポリエチレンシートの例を記載する。
 - ・ポリエチレンシートは熱収縮シートのラップ部と逆方向の、管の頂点から45°の位置から巻始め、幅合わせをしながら巻付ける。
 - ・ポリエチレンシートを巻き終わった後、テープ又は固定バンドで固定する。
- ポリエチレンシート巻終わり状況を図6に示す。

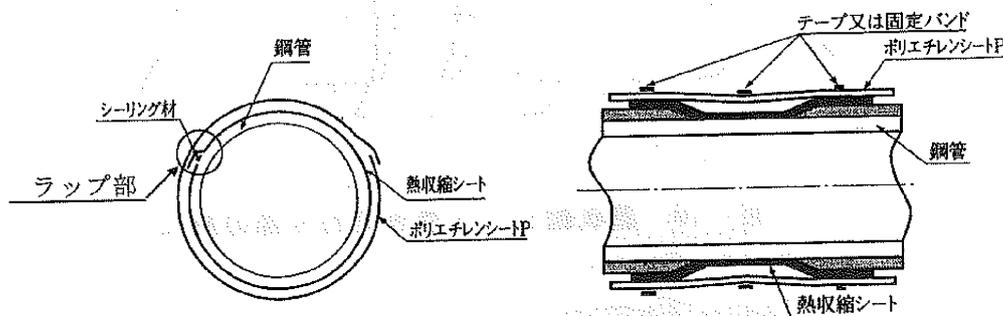


図6 ポリエチレンシート巻終わり状況

2) 合成ゴムシート(水道用塗覆装鋼管ジョイントコート WSP012-2014 より)

I) 下地処理

- ・溶接によって生じたスラグ、スパッタ、仮付けピース跡、ビード部凹凸等の有害な突起はディスクグラインダー等によって除去又は滑らかに仕上げる。
- ・スケールや錆、補修部にあたる既設の塗覆装は除去する。
- ・ほこり、泥が付着しているときは、布等で拭き取る。水分が付着しているときは、乾いた布等で拭き取った後、鋼面を十分に乾燥させる。
- ・油分が付着しているときは、溶剤を含ませた布等で拭き取る。

II) シールテープ装着

既設塗覆装の端面の角度が 30° を超える場合は、あらかじめ管周に沿ってシールテープを装着する。シールテープ施工状況を図7に示す。

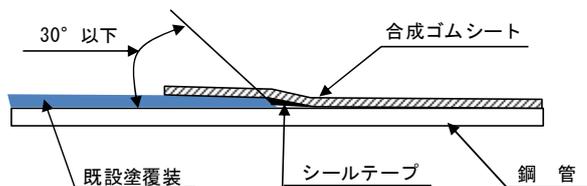


図7 シールテープ施工状況

III) ゴムシート巻付け

- ・はく離紙を付けた状態で仮巻きし、位置決めを行う。
 - ・ゴムシートと既設被覆部との重ね長さは、両側とも 50 mm以上とする。なお、ゴムシートの円周方向の重ね長さは 50 mm以上とする。
 - ・ゴムシートの巻き始めの位置は管の頂点から 45° とし、少しずつはく離紙を剥がし、しわやたるみができないように圧着しながら巻き付ける。
 - ・ゴムシートの巻き始め部にシールテープを圧着する。
 - ・ゴムシートの圧着は、ローラーを用い気泡がシート内に残らないように中央から端部に空気を押し出す要領で行い、さらにローラーを左右にローリングし圧着する。特に既設被覆とラップする部分及びゴムシートの重ね分は念入りに圧着する。
- 注1：呼び径 800A 以上では、ゴムシートを円周方向に複数使用して巻付けを行う。

図8にゴムシート巻付け例(800A 以上の場合)を示す。

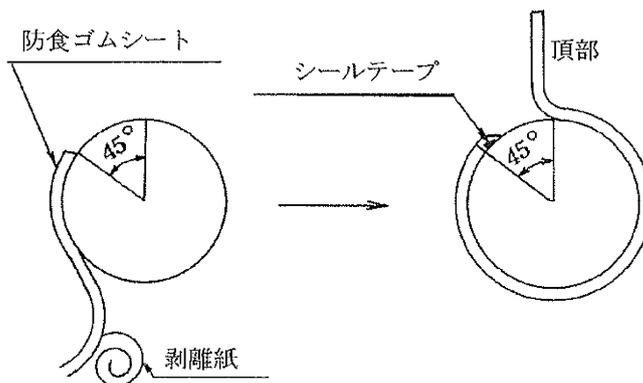


図8 ゴムシート巻付け例(呼び径 800A 以上の場合)

注2：呼び径 1,600A 以上では、ゴムシートを円周方向に加え、管軸方向にも複数使用して巻付けを行う。ゴムシートとの重ね長さは円周方向及び管軸方向ともに 50 mm以上とする。なお、ゴムシートを複数使用する際、鋼面にブチルゴム系のプライマー(接着剤)を塗布しても良い。

図9に管軸方向巻付け例(1,600A 以上)を示す。

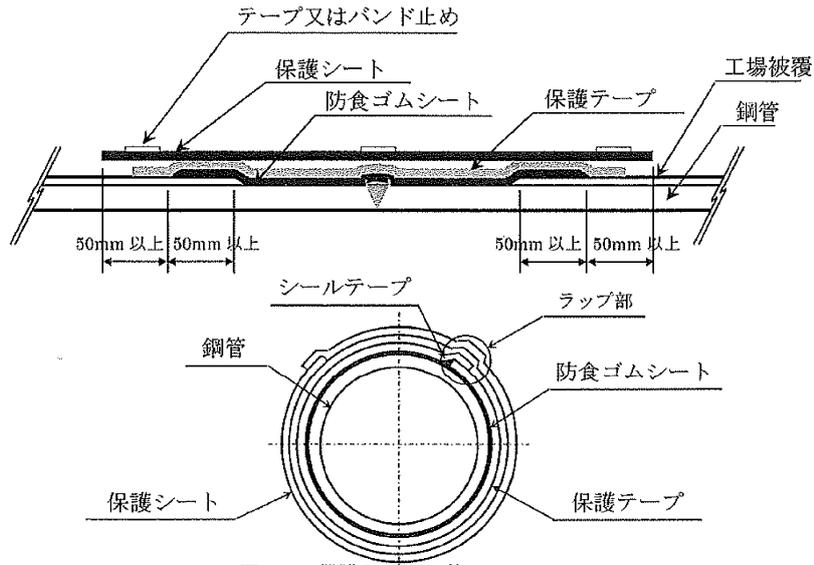


図9 ゴムシート管軸方向巻付け例(呼び径 1,600A 以上の場合)

IV) 保護テープ巻付け

- ・保護テープはハーフラップ 1 回巻きとし、保護テープを引っ張りながらゴムシートを巻き締める。
- ・保護テープの巻き始めと巻終わりは 2 回巻きとする。

V) 保護シート巻付け

- ・保護シートはゴムシートのラップ部と逆方向の管の頂点から 45° の位置から巻き付けを行う。
- ・保護シート端部は、ゴムシート端部から 50 mm 以上とする。
- ・保護シートを巻き終えた後、テープ又はバンドで保護シートを固定する。

更生工法（「管路更生局所補修工法」）

更生工法は、既設管の内面から非腐食性の材質の新たな管を構築して、腐食により低下した水密性の回復又は向上を図る工法である。

本マニュアルでは、鋼管等での適用実績がある「管路更生局所補修工法」について記述する。

【解説】

管路更生局所補修工法

(1) 工法概要と適用条件

1) 工法概要

管路更生局所補修工法は、鋼管等の腐食箇所を対象とした補修を行うものであり、原理的には更生工法の形成工法（熱・光硬化型）と同様である。腐食対策としての適用事例は多くないが、斜面上や狭小スペースに設置された排泥施設の取付管等、現場条件的に開削ができない、又は仮設工を含めた開削に係る工事費が嵩む場合、及び本工法を施工するための施工スペース（既設コンクリートピット等）がある場合に適用されることが想定される。

本工法は、鋼管等の腐食箇所に硬化性樹脂などを搬入し、鋼管等の内側をTVカメラ等で確認しながらエアにより拡張して圧着させ、加圧圧着後に熱、光などで硬化させることで補修する工法である。

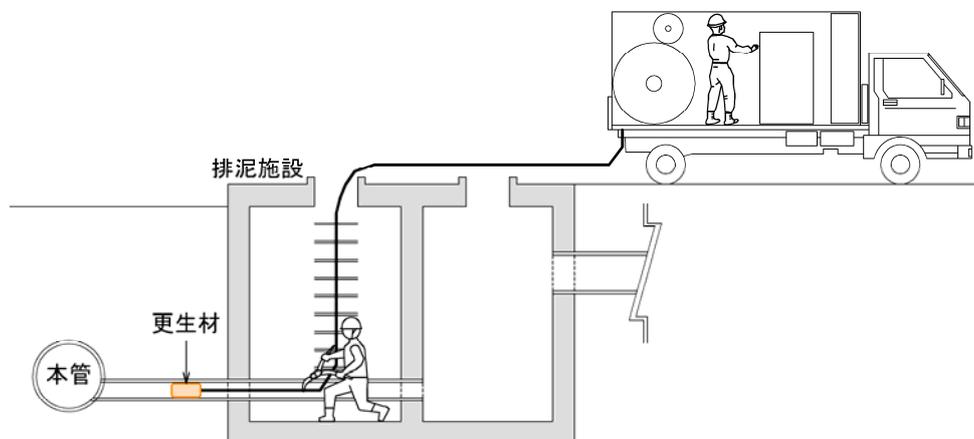


図1 管路更生局所補修工法概要図（形成工法（熱形成タイプ）の例）

本工法は鋼管等内での施工が可能であり、重要構造物に近接している場合や斜面上の狭小スペース等、開削による防食工法が適用できない現場条件に対し有効であるが、施工ヤード（開口部）がコンクリートピットしか確保できないことが多く、人力片押し施工での対応が予想される。この場合、対応可能な施工延長に限られるため、採用に当たっては対象工法メーカー等に事前に確認を行う必要がある。

2) 適用条件

本工法は低下した水密性の回復又は向上を目的とし、管内で防食工法を実施できる鋼管等に対し適用する。

(2) 使用材料

管路更生局所補修工法の材料（更生材）は、熱硬化性樹脂（熱硬化剤又は光開始剤含む）と含浸用基材（補強材）に区分される。

熱硬化性樹脂は耐久性、耐薬品性に優れたビニルエステル樹脂やエポキシ樹脂が用いられる。また、含浸用基材（補強材）には耐酸性ガラス繊維を使用している。含浸用基材には3種類の基材（ロービングクロス・ガラスマット・不織布）があり、各基材を縫製加工し適用している。

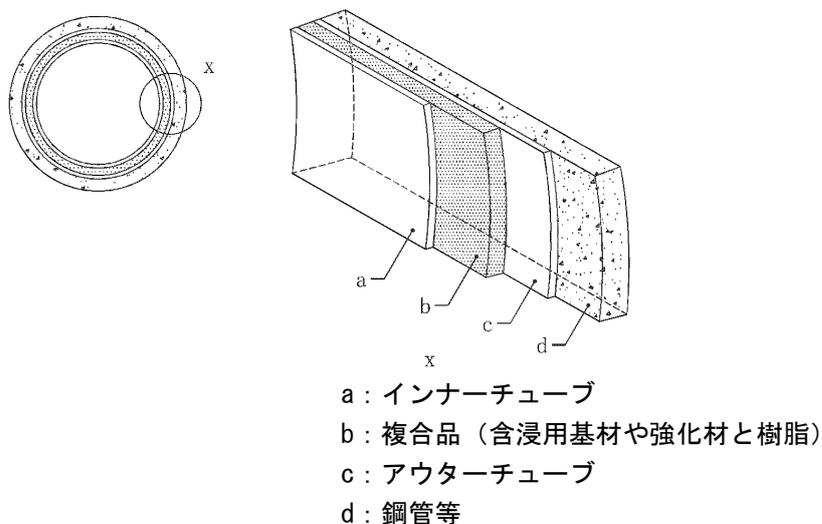


図2 管路更生局所補修工法（反転工法・形成工法の例）の構成材概念図

(3) 設計

1) 基本的事項

①設計の考え方

現在、鋼管等に対する更生管の構造設計は、既設管がないものと仮定して、新設管と同様に設計基準パイプラインに準拠して行っている。

設計基準の構造設計では、「管体の横断方向及び縦断方向の耐圧強さ、移動、変形、水密性等について十分検討の上、適切に設計することが示されている。

②設計に当たっての留意事項

本工法の適用に当たっては、要求性能における品質規格値を満足した材料・工法を選定する必要がある。

また、本工法は下水道事業での実績を有する工法であり、建設技術審査証明等によりその性能や特徴を客観的に評価された工法であるが、鋼管等への適用は少ない。

2) 設計に必要な各種設計数値の考え方

耐荷性の照査に用いる各種数値（許容値等）は、設計基準パイプラインを参照する。

なお、耐久性、施工性の照査に用いる各種数値（許容値等）は工法に応じて異なるため採用工法のメーカー等に確認する必要がある。

3) 設計のフローチャート

設計のフローチャートを図 3 に示す。

【管路更生局所補修工法設計のための調査】

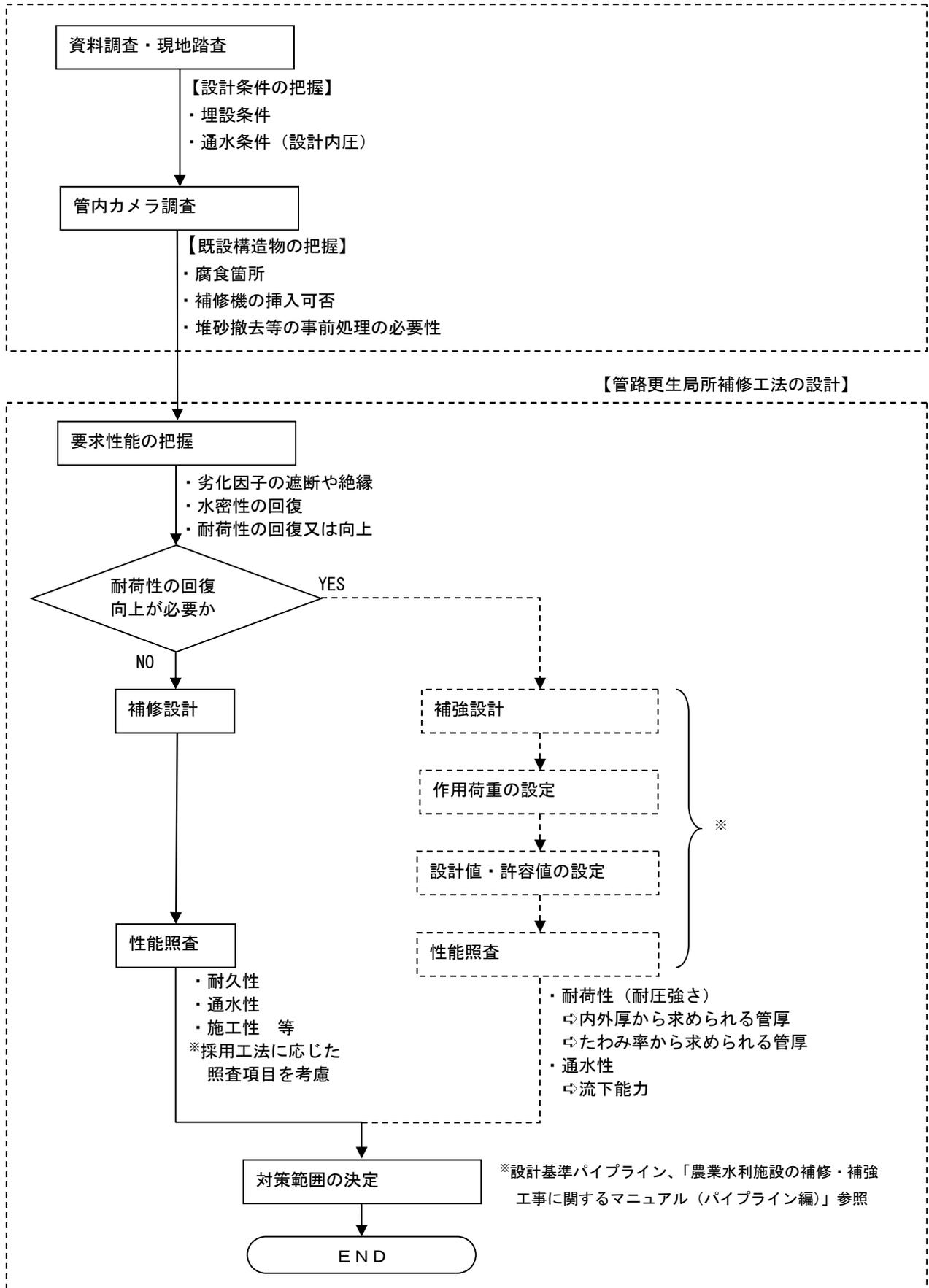


図3 管路更生局所補修工法設計フロー例

(4) 施工

1) 施工方法

本工法の施工フローを図4に示す。

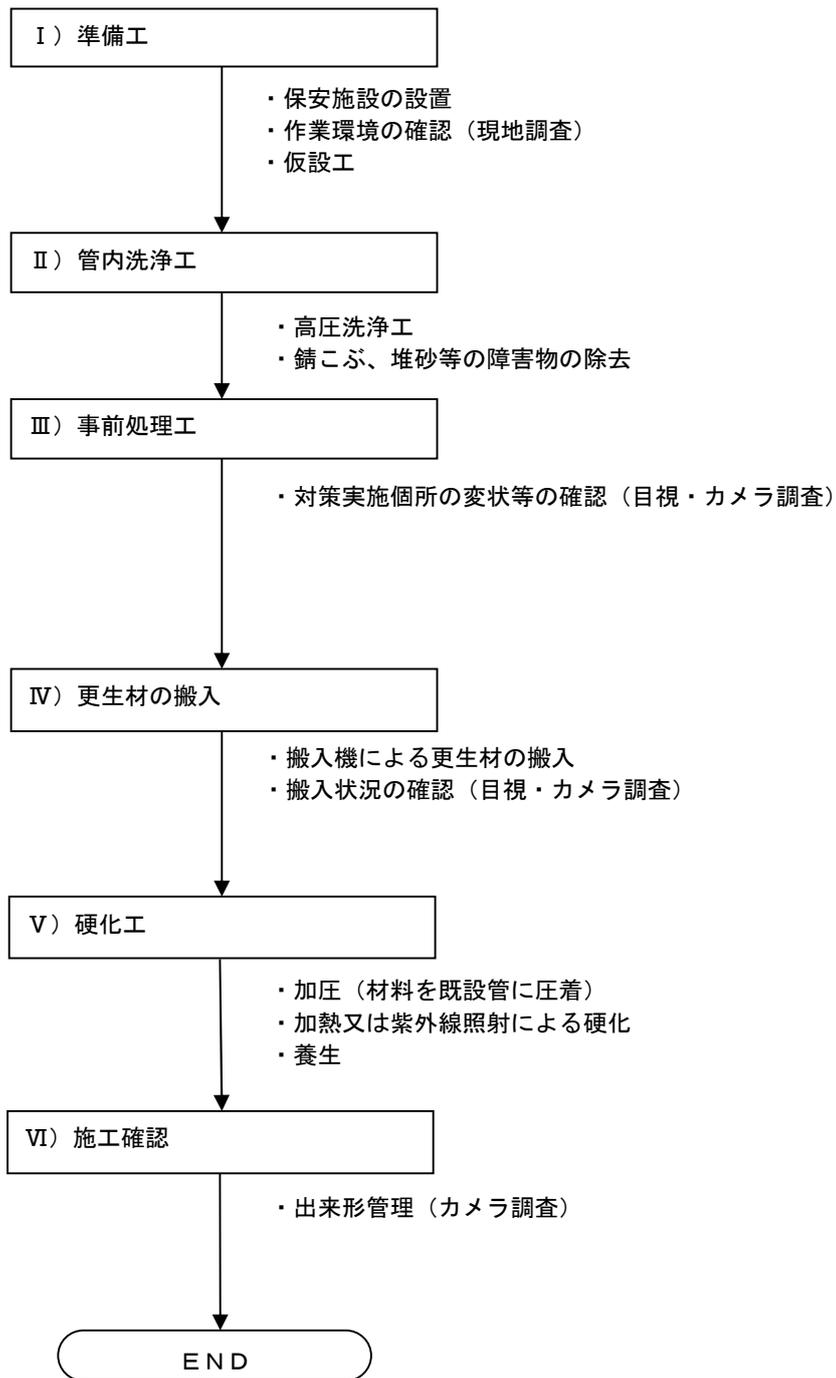


図4 施工フロー例

施工方法の詳細は「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（パイプライン編）」に詳述されているため参照されたい。

なお、施工に当たっては、次頁の安全管理を徹底する。

① 専任技術者による施工管理

各工法の専門技術を取得した作業主任者が施工管理を行う。樹脂等の取扱いは有機溶剤作業主任者が行う。

② 作業環境基準の遵守

下記作業環境基準を順守する（作業前）。

酸素濃度（18%以上）、硫化水素濃度（10ppm以下）、一酸化炭素濃度（50ppm以下）

スチレンガスの作業環境基準を順守する（施工中）。

スチレンガス（20ppm以下）

③ 施工中の安全管理

温度管理（熱硬化型の場合）、スチレンガス濃度管理、騒音・振動対策等を行う。

上記①、②の出典：「労働安全衛生規則」、「一酸化炭素による労働災害の防止について（厚生労働省）」

卷末資料

1. 施工管理項目参考例

(1) 電気防食工法（流電陽極方式）

- ①直接測定による出来形管理
- ②撮影記録による出来形管理
- ③品質管理

(2) 塗覆装

1) ジョイントコート

- ①直接測定による出来形管理
- ②撮影記録による出来形管理
- ③検査による出来形管理
- ④品質管理

2) 合成ゴムシート

- ①直接測定による出来形管理
- ②撮影記録による出来形管理
- ③検査による出来形管理
- ④品質管理

(3) メタルタッチ切断

- ①直接測定による出来形管理
- ②撮影記録による出来形管理
- ③品質管理

2. 参考図書一覧表

3. 電気防食工法の設計計算例

1. 施工管理項目参考例

(1) 電気防食工法（流電陽極方式）

①直接測定による出来形管理

出来形管理は表1に示す管理項目について実施する。なお、管理図表はその都度、記録・整理し監督職員に報告する。

表1 施工管理の管理項目

工種	種別	測定項目	規格値	測定基準
削孔工	ボーリング工	掘削長 掘削径	-100mm - 30mm	全箇所
土工	掘削工	幅 基準高	-150mm ±100mm	代表1箇所/1施設
電気防食工	陽極設置工	深度 偏心量	±100mm ±100mm	全箇所
	照合電極設置工	深度 偏心量	±100mm ±100mm	全箇所
舗装工*	アスファルト舗装工	幅員 厚さ	- 30mm - 15mm	代表1箇所/1施設
	コンクリート舗装工	幅員 厚さ	- 30mm - 10mm	代表1箇所/1施設

*対象箇所が舗装されている場合

②撮影記録による出来形管理

撮影記録は、表2に示す写真管理基準に従い実施する。

特に、完成後に不可視となる部分については、出来形が判定できるように撮影する。

表2 写真管理基準

分類	工種	撮影項目	撮影時期	撮影頻度
着手前・完成	着手前	全景又は代表部分	着手前	着手前1回
	完成	全景又は代表部分	完成後	施工完成後1回
施工状況	工事施工中	全景又は代表部分の工事進捗状況	施工中	適宜
	図面との不一致	図面と現場の不一致の写真	発生時	必要に応じて
安全管理	安全管理	保安設備の設置状況	設置後	各種類において1回
		安全訓練等の実施状況	実施中	実施毎に1回
使用材料	使用材料	形状・寸法・数量	使用前	各品目において1回
出来形管理	ボーリング工	掘削長・掘削幅	実施後	全数
	掘削工	幅・基準高	実施後	1箇所/施設
	陽極設置工	陽極設置深度・位置	実施後	全数
	照合電極設置工	陽極設置深度・位置	実施後	全数
	舗装工*	幅員・厚さ	実施前	1箇所/施設
品質管理	完成測定	完成測定状況	実施中	各測定において1回

*対象箇所が舗装されている場合

③品質管理

品質管理は、電気防食の効果を確認するため表3の項目について実施する。

表3 品質管理

区分	管理項目	管理方法	管理内容	品質規格	測定頻度	整理方法
材料	形状寸法	陽極本体の寸法検査	承諾された形状・寸法に適合していること	製品規格値	納入前	試験成績書 又は 品質証明書
防食効果	防食効果	管対地電位	防食効果を満足すること	<ul style="list-style-type: none"> 完全防食法の場合 防食電位-850mV以下 近接陽極法の場合 改善目標電位-600mV以下 又は 自然電位からの電位変化量がマイナス側に300mV以上 	施工後	完工測定報告書
		陽極発生電流	設計耐用年数を満足すること	設計耐用年数 \leq 陽極発生電流より算出される期待耐用年数	施工後	

(2) 塗覆装

1) ジョイントコート

①直接測定による出来形管理

出来形管理は原則として塗覆装補修箇所毎に行う。なお、管理図表はその都度、記録・整理し監督職員に報告する。

表4 ジョイントコート施工出来形管理

分類	工程	撮影項目	撮影時期	撮影頻度
出来形管理	下地処理	補修長さ	施工後	全数
	シーリング材セット	セット位置	施工後	全数
	鋼管表面予熱	予熱状況	施工中	全数
	熱収縮シート巻付け	巻付け状況	施工後	全数
	熱収縮シート加熱収縮	補修長さ	施工後	全数

②撮影記録による出来形管理

写真撮影は、表 5 に示す写真管理基準に従い実施する。

特に、完成後に不可視となる部位については、出来形が判定できるように撮影する。

表 5 写真管理基準

区分	工程	撮影箇所及び内容	撮影頻度
一般共通事項	現場概要	・ 施工個所の概況	・ 工事施工の起点、主要中間点毎及び終点
	材料、品質等	・ 施工前の使用材料の保管状況 ・ 施工前の使用材料の確認状況（形状、寸法、数量）	・ 適宜
準備工	安全管理	・ 保安設備の設置状況	・ 適宜
		・ 安全訓練の実施状況	・ 適宜
防食工法	施工状況	・ 下地処理状況 ・ 工事進捗状況	・ 施工箇所毎
		・ 図面との不一致（発生した場合）	・ 必要に応じて適宜
	出来形管理	・ 別途工法毎に記載（表 4）	

③検査による出来形管理

ジョイントコートの検査は表 6 に基づき表 7 の管理項目について行う。

保護シートを巻く場合は、保護シート巻付け前に実施する。

表 6 ジョイントコートの検査

項目		判定基準
外観検査	焼損	焼損があってはならない
	両端のめくれ	有害な欠陥となる大きなめくれがあってはならない
	ふくれ	ジョイントコート両端から 50mm 以内にふくれがあってはならない
	既設塗覆装との重ね長さ	片側 50mm 以上とする
	円周方向の重ね長さ	50mm 以上とする
ピンホール検査		ピンホール検知器を用いて検査を行い、火花の発生するような欠陥があってはならない この場合の検査電圧は、8～10kV とする
膜厚検査		加熱収縮後のジョイントコートの厚さは、1.5mm 以上とする

表 7 ジョイントコートの管理項目

工程	管理項目	管理方法	管理値	測定基準
下地処理	鋼面除錆度	目視 (除錆度判定写真帳との対比)	設計図書以上の除錆度	2 箇所/1 施設
シーリング材セット	セット位置	目視	管上 45° 付近	1 箇所/1 施設
鋼管表面予熱	予熱状況	表面温度計又は温度チョーク	60℃程度	1 箇所/1 施設
熱収縮シート巻付け	既設塗覆装との重ね長さ	計測	既設塗覆装との重ね長さ 50mm 以上	全箇所
熱収縮シート加熱収縮後	外観検査	目視	鋼管と密着していること	全箇所
ピンホール検査	塗覆装補修欠陥部	ピンホール検知器	欠陥なし	全箇所
膜厚検査	膜厚	膜厚計	1.5mm 以上	2 箇所/1 施設

④品質管理

ジョイントコートの品質管理は表 8 の項目について実施する。

表 8 ジョイントコートの品質管理

区分	管理項目	管理方法	管理内容	品質規格	測定頻度	整理方法	
基材	形状寸法	試験成績書により確認	形状・寸法値	承諾された形状、寸法に適合していること	搬入前	試験成績書(検査証明書)を提出	
	種類	試験成績書により確認	材質	特記仕様によるか、監督職員に承諾されたプラスチック系熱収縮シートであること	搬入前		
	外観	目視	使用上の有害な欠陥の有無	シワ・傷がないこと	搬入前		
	性能	JIS K 7112 又は ASTM D 792 の試験法	密度	0.92~1.05 (kg/cm ³)			搬入前
		JIS K 7113 の 2 号形試験片又は ASTM D 638 の TypeIV の試験法	引張強度	管周方向	19.6MPa 以上		搬入前
			管軸方向	伸び			
		JIS K 7215 又は ASTM D 2240 の試験法	硬さ	45HDD 以上			搬入前
	ASTM D 2732 の試験法	収縮率	管周方向	20%以上	搬入前		
管軸方向	8%以上						
粘着剤	性能	JIS K 6268 又は ASTM D 792 の試験法	密度	1.0Mg/m ³ 以上		搬入前	
		JISK 2220 の試験法	ちょう度*	JIS	80 以下	搬入前	
		ASTM G 17 の試験法		ASTM	ピンホールがない		
		JIS K 2207 又は ASTM E 28 の試験法	軟化点	60℃以上		搬入前	

*ちょう度はジョイントコートの堅さを表す物性値であり、JIS 又は ASTM のいずれかによる

2) 合成ゴムシート

①直接測定による出来形管理

出来形管理は原則として塗覆装補修箇所毎に行う。なお、管理図表はその都度、記録・整理し監督職員に報告する。

表 9 合成ゴムシート施工出来形管理

分類	工程	撮影項目	撮影時期	撮影頻度
出来形管理	下地処理	補修長さ	施工後	全数
	シールテープ装着	装置位置	施工後	全数
	ゴムシート巻付け	巻付け状況	施工後	全数
	保護テープ巻付け	巻付け状況	施工後	全数
	保護シート巻付け	巻付け状況	施工後	全数

②撮影記録による出来形管理

写真撮影は、表 10 に示す写真管理基準に従い実施する。

特に、完成後に不可視となる部位については、出来形が判定できるように撮影する。

表 10 写真管理基準

区分	工程	撮影箇所及び内容	撮影頻度
一般共通事項	現場概要	・ 施工個所の概況	・ 工事施工の起点、主要中間点毎及び終点
	材料、品質等	・ 施工前の使用材料の保管状況 ・ 施工前の使用材料の確認状況 (形状、寸法、数量)	・ 適宜
準備工	安全管理	・ 保安設備の設置状況	・ 適宜
		・ 安全訓練の実施状況	・ 適宜
防食工法	施工状況	・ 下地処理状況 ・ 工事進捗状況	・ 施工箇所毎
		・ 図面との不一致 (発生した場合)	・ 必要に応じて適宜
	出来形管理	・ 別途工法毎に記載 (表 9)	

③検査による出来形管理

合成ゴムシートの検査は表 11 に基づき表 12 の管理項目について行う。

表 11 合成ゴムシートの検査

項目		判定基準
外観検査	両端のめくれ	有害な欠陥となる大きなめくれがあってはならない
	ふくれ	ゴムシートの両端から 50mm 以内にふくれがあってはならない
	既設塗覆装との重ね長さ	片側 50mm 以上とする
	円周方向の重ね長さ	50mm 以上とする
ピンホール検査		ピンホール検知器を用いて検査を行い、火花の発生するような欠陥があってはならない この場合の検査電圧は、8～10kV とする
膜厚検査		ゴムシートの膜厚は、1.5mm 以上とする

表 12 合成ゴムシートの管理項目

工程	管理項目	管理方法	管理値	測定基準
下地処理	鋼面除錆度	目視 (除錆度判定写真帳との対比)	設計図書以上の除錆度	2 箇所/1 施設
シールテープセット	セット位置	目視	管上 30° 付近	1 箇所/1 施設
ゴムシートの巻付け	既設塗覆装との重ね長さ	目視又は計測等	既設塗覆装との重ね長さ 50mm 以上	全箇所
	管周方向のゴムシートの重ね長さ	目視又は計測等	50mm 以上ラップ	全箇所
保護テープ巻付け	1/2 ラップ巻付け	1/2 ラップ	1/2 ラップ	全箇所
ピンホール検査	塗覆装補修欠陥部	ピンホール検知器	欠陥なし	全箇所
保護シート巻付け	既設塗覆装との重ね長さ	目視又は計測等	既設塗覆装との重ね長さ 50mm 以上	全箇所

④品質管理

合成ゴムシートの品質管理は表 13 の項目について実施する。

表 13 合成ゴムシートの品質管理

区分	管理項目	管理方法	管理内容	品質規格	測定頻度	整理方法
加硫 ゴムシート	種類	試験成績書により 確認	材質	特記仕様によるか、監督 職員に承諾された加硫 ゴムシートであること	搬入前	試験成績書 (検査証明書) を提出
	外観	目視	使用上の有害な 欠陥の有無	シワ・傷がないこと	搬入前	
	性能	JIS K 6268 の試験法	密度	1.39Mg/m ³ 以下	搬入前	
		JIS K 6253 の 5. (デュロメータ硬さ試験)	硬さ	55±5HDA	搬入前	
		JIS K 6251 の試験法	引張 強度	2.0MPa 以上	搬入前	
			伸び	300%以上	搬入前	
		JIS K 6911 の 5.13 (抵抗率)	体積 抵抗率	1×10 ¹² Ω・cm以上	搬入前	
JIS K 6258 の 5. (浸せき試験)	吸水率	0.5%以下	搬入前			
粘着層	性能	JIS K 6268 の試験法	密度	1.35±0.1Mg/m ³	搬入前	
		JIS K 2207 の試験法	針入度 (20℃)	115±15	搬入前	
積層品	性能	下記注 1) 参照	ピール強度 (鋼面接着力)	14.7N/25 mm以上	搬入前	

注 1) : ピール強度 (鋼面接着力) 試験は、製品から 25mm×150mm の試験片に切断し取り出す。試験用鋼板は溶剤で洗浄する。試験片と試験用鋼板を 20℃の恒温槽に入れ、1 時間以上静置した後、試験片を試験用鋼板に手で軽く圧着し、100g/cm² の力を加え、20℃の温度に 30 分以上放置した後、引張速度 300mm/min の速さで 180 度剥離試験を行う。

(3) メタルタッチ切断

①直接測定による出来形管理

出来形管理は以降の項目について実施する。なお、管理図表はその都度、記録・整理し監督職員に報告する。

表 14 メタルタッチ切断の管理項目

工 程	管理項目	管理方法	管理値	測定基準
鉄筋位置探査	配筋状況把握 設計・完成図書と現状 比較	鉄筋探査計	計測値	全箇所
鋼管等との導通確認	メタルタッチ有無検証	電位差	計測値	1 施設一箇所
鉄筋切断	鉄筋との導通解除有無 検証	電位差	計測値	全箇所
コア抜き位置復旧	外観検査	目視	補修ムラの 無いこと	全箇所

②撮影記録による出来形管理

写真撮影は、表 15 に示す写真管理基準に従い実施する。

特に、完成後に不可視となる部位については、出来形が判定できるように撮影する。

表 15 写真管理基準

分 類	工 程	撮影項目	撮影時期	撮影頻度
着手前・完成	着手前	全景又は代表部位	着手後	着手前 1 回
	完成		完成後	施工完成後 1 回
施工状況	工事施工中	全景又は代表部位の 工事進捗状況	施工中	適時
	図面との不一致	図面と現場の不一致 の写真	発生時	必要に応じて
安全管理	安全管理	保安設備の設置状況	設置後	各種類において 1 回
		安全訓練等の 実施状況	実施中	実施毎に 1 回
使用材料	使用材料	形状・寸法・数量	使用前	各品目において 1 回
出来形管理	工事施工中	コア採取状況	施工中	適時
品質管理	完成後	補修箇所	施工後	全数

③品質管理

品質管理は、コンクリート圧縮強度について実施する。照査方法は JSCE-K561（原則 28 日間養生）を採用し、品質規格値は 21.0N/mm² 以上とする。

2. 参考図書一覧表

表 16 に参考図書一覧表を示す。

表 16 参考図書一覧表

図書名	出版年	出版元
消防用設備等の配管を土中に埋設する場合の工事施工に係る指導基準	—	東京消防庁
マクロセル腐食防食指針 (WSP045-2008)	H20. 3	日本水道鋼管協会 (WSP)
土地改良事業計画設計基準及び運用・解説設計「パイプライン」	H21. 3	農林水産省農村振興局整備部設計課
腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル	H21. 3	(社) 土木学会
地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 1-	H21. 11	(社) 地盤工学会
電食防止・電気防食ハンドブック	H23. 1	電気学会・電気防食研究委員会
一般塗装系塗膜の重防食系への塗替え塗装マニュアル	H26. 5	(社) 日本鋼構造協会
港湾鋼構造物防食・補修マニュアル	H26. 8	(財) 沿岸技術研究センター
農業水利施設の機能保全の手引き	H27. 5	食料・農業・農村政策審議会 農業農村整備部会 技術小委員会
農業水利施設の機能保全の手引き「パイプライン」	H28. 5	農林水産省農村振興局整備部水資源課施設保全管理室
農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【パイプライン編】(案)	H29. 4	農林水産省農村振興局整備部設計課 施工企画調整室
水道用塗覆装鋼管の電気防食指針 (WSP050-2017)	H29. 9	日本水道鋼管協会 (WSP)
大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策	R1. 7	(社) 土木学会
鋼管路の更新診断マニュアル (更新診断から劣化調査・補修まで) (WSP081-2019)	R2. 3	日本水道鋼管協会 (WSP)

※現在の組織名で示している。

3. 電気防食工法の設計計算例

(1) 完全防食法による設計計算

1) 所要防食電流 I_0 (A) の算出

【例-1 仮通電試験実施の場合】

－試験結果－

通電電流 [I_1] : 0.2A

自然電位 [V_p/s] : -0.5V

通電時の管対地電位 : -2.0V

仮通電による電位変化量 [ΔE_1] : $-0.5 - (-2.1) = 1.6V$

$$\begin{aligned} I_0 &= \Delta E / (\Delta E_1 / I_1) \\ &= (-0.5 - (-1.0)) / (1.6 / 0.2) \\ &= 0.0625A \end{aligned}$$

【例-2 仮通電試験未実施の場合】

－配管仕様例－

プラスチック被覆

防食対象面積 : $625m^2$

WSP050-2017 よりプラスチック被覆配管の防食電流密度は $1 \times 10^{-4}A/m^2$

$$\begin{aligned} I_0 &= \text{防食対象面積} \times \text{防食電流密度} \\ &= 625 \times 1 \times 10^{-4} \\ &= 0.0625A \end{aligned}$$

2) 陽極接地抵抗 R_a (Ω) の算出

【条件】

土壌抵抗率 [ρ] : $100 \Omega \cdot m$

陽極形状係数 : 0.42 (P4-19・表 4.3-3 参照)

※この後の計算が成立しなければ陽極の型式を変更する。

$$\begin{aligned} R_a &= k \times \rho \\ &= 0.42 \times 100 \\ &= 42 \Omega \end{aligned}$$

3) 陽極発生電流 I_{mg} (A/本) の算出

$$\begin{aligned} I_{mg} &= \Delta e / R_a \\ &= 0.5 / 42 \\ &= 0.012A \end{aligned}$$

4) 陽極 1 本当たりの必要正味質量 W_a (kg) の算出

【条件】

設計耐用年数 [Y] : 40 年

$$\begin{aligned} W_a &= I_{mg} \cdot Y \cdot C \\ &= 0.012 \times 40 \times 8.0 \\ &= 3.84 \text{kg} \end{aligned}$$

使用陽極型式を表 4.3-3 より、陽極質量 (NET) が W_a より大きい陽極を選定すると III型が選定される。

この時、適用した形状係数に一致する陽極が選定できなければ 2) に戻って再計算を行う。

5) 陽極本数 N (本) の算出

$$\begin{aligned} N &= I_0 / I_{mg} \\ &= 0.0625 / 0.012 \\ &= 5.3 \rightarrow 6 \text{本} \end{aligned}$$

(2) 近接陽極法による設計計算

1) 防食対象延長 L(m) の算出

【条件】

防食対象延長 [L] : 1.5m

2) 電位シフト値 V_a (V) の算出

【条件】

管の自然電位 [$V_{p/s}$] : -0.2V

$$\begin{aligned} V_a &= V_{p/s} - V_0 \\ &= -0.2 - (-0.6) \\ &= 0.4V \end{aligned}$$

3) 陽極接地抵抗 R_a (Ω) の算出

【条件】

土壌抵抗率 [ρ] : 100 $\Omega \cdot m$

陽極形状係数 : 0.38 (P4-19・表 4.3-3 参照)

$$\begin{aligned} R_a &= k \cdot \rho \\ &= 0.38 \times 100 \\ &= 38 \Omega \end{aligned}$$

4) 陽極発生電流 I_{mg} (A/本) の算出

$$\begin{aligned} I_{mg} &= \Delta e / R_a \\ &= 0.9 / 38 \\ &= 0.024A \end{aligned}$$

I_{mg} : 陽極 1 本当たりの発生電流(A/本)

Δe : 管の有効電位差(V)

改善目標電位(-0.6V) - M_g 陽極閉路電位(-1.5V)

5) 陽極 1 本当たりの防食効果範囲 r (m) の算出

$$\begin{aligned} r &= (I_{mg} \cdot \rho) / (2\pi \cdot V_a) \\ &= (0.024 \times 100) / (2 \times 3.14 \times 0.4) \\ &= 0.95m \end{aligned}$$

6) 陽極 1 本当たりの必要正味質量 W_a (kg)

【条件】

設計耐用年数 [Y] : 40 年

$$W_a = I_{mg} \cdot Y \cdot C$$

$$= 0.024 \times 40 \times 8.0$$

$$= 7.68 \text{kg}$$

使用陽極型式を表 4.3-3 より、陽極質量 (NET) が W_a より大きい陽極を選定すると IV型が選定される。

7) 陽極本数 N (本) の算出

【条件】

鋼管等の外径 [D] : $\phi 0.1652\text{m}$

$$N = [(L \cdot D \cdot \pi) / (r^2)] + 1$$

$$= [(1.5 \times 0.1652 \times 3.14) / (0.95^2)] + 1$$

$$= 1.9 \rightarrow 2 \text{個}$$

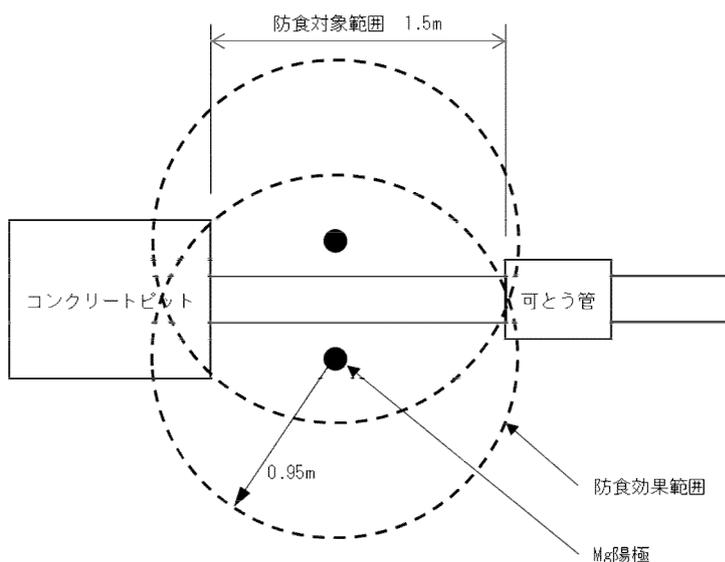


図 1 陽極配置例