

埋設管路の腐食原因と その防食について

JDPA T 11



一般社団法人

日本ダクタイル鉄管協会

目 次

1. はじめに	1
2. 腐食反応	2
3. 管の外面腐食に影響を及ぼす諸因子	6
3.1 土壌腐食	6
3.1.1 通気性(不均一性)	7
3.1.2 比抵抗	7
3.1.3 pH値	7
3.1.4 溶融塩類	8
3.1.5 バクテリアの影響	8
3.1.6 特殊な腐食性土壌	8
3.2 異種金属による影響	9
3.3 コンクリート／土壌マクロセル腐食	10
3.4 電食	10
4. 土壌の腐食性判定基準方法	12
5. ポリエチレンスリーブ法による鉄管の防食	14
6. 管の内面腐食に影響を及ぼす諸因子	15
6.1 通水による内面腐食	15
6.2 水の侵食性評価方法	17
6.3 その他の内面腐食	19
7. 塗装・ライニングによる内面防食	19
7.1 モルタルライニング	19
7.2 エポキシ樹脂粉体塗装	19
7.3 その他の塗装	20
本文中の出典	22
参考資料	23
Q & A	30
写真集	

1. はじめに

鋳鉄管は、一般に水道・下水道・工業用水道・農業用水・ガス・通信など、各種の用途に用いられている。鋳鉄管が使用されるようになったのは、公式な記録によると 1455 年ドイツの Dillenberg 城の給水設備に用いられたものが最初であるといわれている。

また、フランスにおいては、1644 年ルイ 14 世が Marly-on-Seine のポンプ場からベルサイユ宮殿まで、15 マイルにわたる鋳鉄管路を布設し、宮殿の噴水や町の水道に用いた。そしてこの管路は今日でもその役目を果たし続けている。

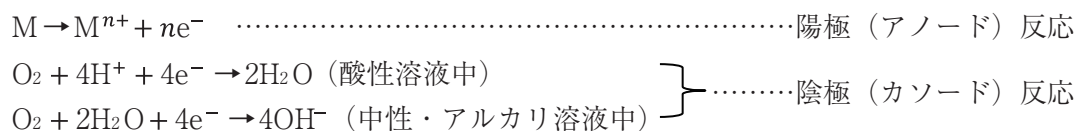
わが国においても、1885 年横浜市で水道に鋳鉄管が使用されて以来、一世紀以上にわたる歴史があり、耐久性の優れた管として現在広く用いられている。

このように、鋳鉄管は耐久性・耐食性に優れた特長を持つが、いかなる土壌条件においても万全であるわけではなく、腐食性の激しい条件下では、長期間その性能を発揮しないまま寿命を終える事例も認められている。

本稿では、鋳鉄管を含め一般の埋設管の腐食原因とその対策について説明し、ご参考に供したい。

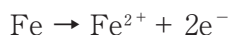
2. 腐食反応

金属の土壤中における腐食と水中における腐食は、本質的には同じで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、金属の腐食は電子 (e^-) を放出する陽極（アノード）反応であるが、これと同時に電子を受け取る陰極（カソード）反応も起こる。このように腐食反応は陽極と陰極とが対になった一種の電池を形成することで成立する。



鉄の反応は次式で示される。

(1) 陽極反応



(2) 陰極反応（環境によって異なる）

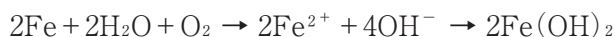
(i) 酸素還元（酸性溶液中）



(ii) 酸素還元（中性またはアルカリ性溶液中）



中性溶液中の鉄の腐食全反応式は、

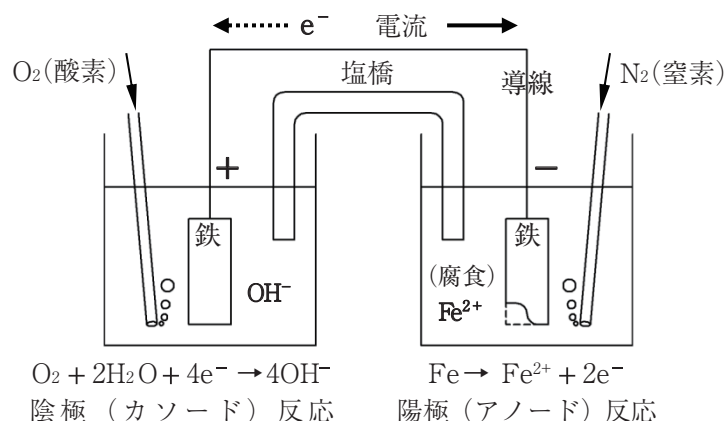


で示され、この水酸化第一鉄は速やかに酸化されて、



となり、さらに $FeOOH$ 、 Fe_2O_3 （赤錆）、 Fe_3O_4 （黒錆）などの酸化物をつくる。

鉄の腐食反応の一例（食塩水の場合）として酸素濃淡電池を図1に示す。



〔参考〕

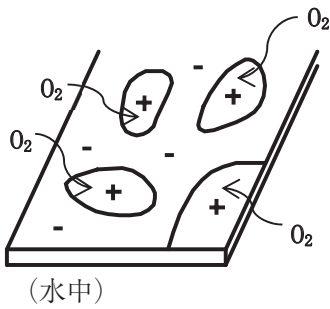
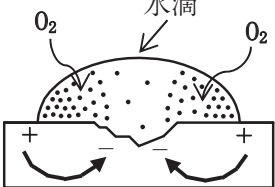
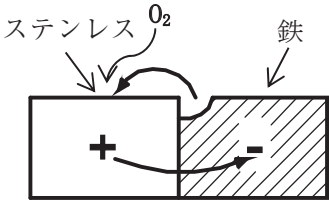
電極の呼称は学会ごとに異なる。化学系と電気系で分類したものを下表に示す。

電極（図中）	（左）	（右）
化学系	陰極 （カソード）	陽極 （アノード）
電気系	正極 （+）	負極 （-）

図1 酸素濃淡電池（食塩水）

この陽極反応と陰極反応は、金属表面に電位差が生じて起こるが、電位差が生じる原因は①金属の組成や組織の状態によって起こるミクロ的なものと、②金属のおかれている環境条件の差異や③異種金属の接触などで起こるマクロ的なものがある。これらの状態を電位差の生じる例として表1に示す。

表1 電位差の生じる例

①金属の組成や組織の差異	②酸素濃度の差	③異種金属の接触
 (水中)		 (水中)
ミクロ的	マクロ的	

さらに、腐食生成物の金属表面への堆積、酸化剤の供給不足や不均一、共存イオンの濃度差などの第2次的な要因により腐食の進行は不均一になっていく。

金属が腐食する現象は、上述のごとく金属のイオン化に基づくものであるが、金属がイオンとなって溶解しようとする傾向は、金属と液の界面に発生する電位差によって決まる。

この電位差は直接測定することはできないが、標準の電極と組み合わせた起電力によって測定することができ、これに対する相対値として表される。そして、標準電極として水素電極（Normal Hydrogen Electrode、NHE）を基準にして求めた各金属の電位を標準電極電位という。

実際の環境における電位は、環境条件によって変化し次式で示される。

$$E = E^{\circ} + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln a \quad (\text{Nernstの式})$$

ここに、

E : 自然電位

E° : 標準電極電位

n : イオン価

F : ファラデー定数 (96,500 coul / mol)

R : ガス定数 (8.314 J)

T : 絶対温度 (°C + 273)

a : イオン活量 (重量モル濃度 × 活量係数) ÷ モル濃度

温度以外の環境情報はイオン活量 a に関連付けられる。例えば、表1の②の場合、水滴に覆われた金属面に達する酸素量が、気体が透過できる薄い水滴に覆われた金属面上の酸素量と比べて少なくなる。すなわち、水滴の中心部は酸素濃度が薄く、中心から離れるほど酸素濃度が濃くなる。この酸素濃度の差により、自然電位 E に差が生じ、電池が形成されることで腐食が進行する。

自然電位は、使用される環境によって異なるため、実際の条件で測定する必要がある。標準電極電位および海水中の自然電位を表2、3に示す。

この表で電位が低いほど腐食しやすく、逆に高いほど腐食しにくい。注)

注) 腐食しやすい金属でも、不動態化現象などによって逆に腐食性が低くなるときもある。

表2 標準電極電位（水素電極基準）⁽²⁾

金 属	電 極 反 応	電 位 (V) 25℃
金	$\text{Au}^3 + 3\text{e}^- = \text{Au}$	+ 1.498
(酸 素)	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+ 1.229
白 金	$\text{Pt}^2 + 2\text{e}^- = \text{Pt}$	+ 1.2
銀	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+ 0.799
水 銀	$\text{Hg}_2^+ + 2\text{e}^- = 2\text{Hg}$	+ 0.788
鉄	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$	+ 0.771
(酸 素)	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$	+ 0.401
銅	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+ 0.337
(水 素)	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	0.000
鉛	$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$	- 0.126
す ず	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Sn}$	- 0.136
ニ ッ ケ ル	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	- 0.250
コ バ ル ト	$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Co}$	- 0.277
カ ド ミ ウ ム	$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cd}$	- 0.403
鉄	$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	- 0.440
ク ロ ム	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$	- 0.744
亜 鉛	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	- 0.763
ア ル ミ ニ ウ ム	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	- 1.662
マ グ ネ シ ウ ム	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	- 2.363
ナ ト リ ウ ム	$\text{Na}^+ + \text{e}^- = \text{Na}$	- 2.714
カ リ ウ ム	$\text{K}^+ + \text{e}^- = \text{K}$	- 2.925

表3 海水中の自然電位系列（飽和カロメル電極基準¹⁾）⁽²⁾

金 属		電 位 (V)
白金		+ 0.33
金		+ 0.18
ステンレス鋼	(18Cr－8Ni－3Mo)	－ 0.04
銀	(18Cr－8Ni) (不導体)	－ 0.06
ステンレス鋼		－ 0.08
モネル	(67Ni－30Cu)	－ 0.10
キュープロニッケル	(70Cu－30Ni)	－ 0.13
青銅	(Sn 6～10%)	－ 0.14
黄銅	(85cu－15Zn)	－ 0.15
銅		－ 0.17
黄銅		－ 0.20
(標準水素電極)	H ₂ /H ⁺	－ 0.24
ニッケル	(活性)	－ 0.24
黄銅	(60Cu－40Zn)	－ 0.27
ステンレス鋼	(18Cr－8Ni) (活性)	－ 0.28
すず		－ 0.46
鉛		－ 0.50
銅・鋳鉄		－ 0.45～－ 0.65
ジュラルミン		－ 0.61
カドニウム		－ 0.78
アルミニウム		－ 0.78
亜鉛		－ 1.07
マグネシウム		－ 1.60

- 1) 一般に水素電極は、実環境中で使用できないため、照合電極には水素電極に対する電位差が既知で、環境による変動が少なく、かつ取り扱いの容易な電極（飽和硫酸銅電極、飽和カロメル電極、飽和塩化銀電極など）が使用される。

3. 管の外面腐食に影響を及ぼす諸因子

管の外面腐食は、水道施設設計指針 2012 年版 478 頁では図 2 に示すように分類され、解説されている。

金属管の外面腐食は、電食と自然腐食とに大別される。電食とは、直流電鉄鉄道の漏れ電流及び電気防食設備の防食電流によって生じる腐食をいう。

自然腐食は、腐食電池の形成状況により、マイクロセル腐食とマクロセル腐食に区分される。マイクロセル腐食は、金属管の表面上の微視（ミクロ）的な局部電池作用によって生じる。マクロセル腐食は、構造物において部分的な環境の差や材質の差から金属管表面の一部分が陽極部となり、他の部分が陰極部となって、両者が巨大（マクロ）な腐食電池を構成することによって生じる。

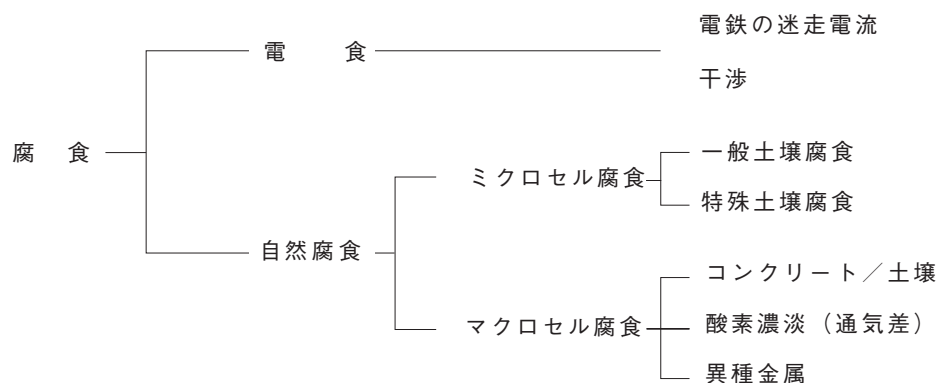


図2 金属管の腐食の分類⁽³⁾

3.1 土壌腐食

地中に埋設されている金属管は土壌または地下水に接するため、腐食を受ける。このような土壌と接する金属管の腐食は土壌腐食と言われ、その腐食の程度は土壌の種類や性質に左右される。土壌腐食に影響を及ぼす因子としては、土壌の不均一、組成・比抵抗・通気性・含水量・pH 値・溶解塩分およびその濃度、バクテリアの活動、陽極・陰極の面積比など種々の要因がある。これらは、配管の防食対策を行う場合や腐食原因の解明などには重要な項目である。土壌が一般的に腐食性であるといわれているのは、次のような所である。

- (i) 酸性の工場廃液や汚濁河川水などが地下に浸透した所
- (ii) 海浜地帯、埋立地域など地下水に多量の塩分を含む所
- (iii) 硫黄分を含む石炭ガラなどで盛土や埋立された所
- (iv) 泥炭地帯
- (v) 腐植土、粘土質の土壌
- (vi) 廃棄物による埋立地域や湖沼の埋立地
- (vii) 海成粘土など酸性土壌

3.1.1 通気性(不均一性)

金属を、溶存酸素量や塩類濃度が異なる環境で用いると、金属表面にそれらの濃度の濃淡に起因する濃淡電池が形成され、濃度の低い部分に接する所が陽極となって腐食が促進される。特に通気の差異に起因してできる酸素濃淡電池は、通気差電池と呼ばれ、通気の悪い所の金属体が腐食する。

例えば、通気のよい砂と通気の悪い粘土質の土壌とに接して管が埋設された場合や、土壌の湿潤程度に差異がある所に埋設された場合にはマクロセルが形成され、粘土質の土壌と接する部分で激しい腐食を生ずることがある。その例を図3に示す。

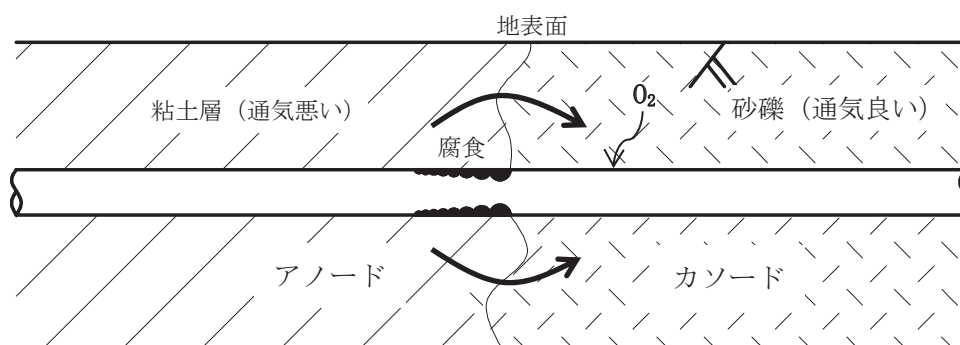


図3 通気差による腐食

3.1.2 比抵抗

金属の腐食は、電気化学的な反応であるから、腐食速さは環境の電気抵抗（比抵抗）によって大きな影響を受ける。

土壌の比抵抗と腐食性の関係については、過去多くの研究者によって発表されている。その一例を表4に示す。

表4 土壌の腐食性と比抵抗の関係⁽²⁾

腐食性の程度	比 抵 抗 $\Omega \cdot \text{cm}$				
	F.O.Waters ¹⁾	L.M.Applegate ²⁾	V.A.Pritula ³⁾	E.R.Shepard ⁴⁾	Romanoff ⁵⁾
激 し い	0 ～ 900	0 ～ 1,000	0 ～ 500	0 ～ 500	< 700
やや激しい	900 ～ 2,300	1,000 ～ 5,000	500 ～ 1,000	500 ～ 1,000	700 ～ 2,000
中	2,300 ～ 5,000	5,000 ～ 10,000	1,000 ～ 2,000	} 定め難い	2,000 ～ 5,000
小	5,000 ～ 10,000	10,000 ～ 100,000	2,000 ～ 10,000		> 5,000
きわめて小	> 10,000	> 100,000	> 10,000		

1) F.O.Waters:Corrosion, 8, No.407 (1952)

2) L.M.Applegate:Cathodic Protection (1960)

3) V.A.Pritula:Cathodic Protection of Pipeline and Storage Tanks (1953)

4) E.R.Shepard:Journal of Res. of NBS, 6, 683 (1931)

5) M.Romanoff:NBS Circular 450 and 579

3.1.3 pH値

土壌のpH値は、腐食に大きな影響を及ぼす。鉄はpH4前後から弱アルカリ性までの範囲では腐食速度にはほとんど差がない。しかし、pH4以下の酸性域では酸性が強くなるにしたがって腐食は激しくなる。なお、pH8.5以上のアルカリ域であっても、硫酸ナトリウムを多く含むような、いわゆる天然のアルカリ土壌では、土壌の比抵抗が低い値を示す場合、腐食を受けやすくなることがあるので注意する必要がある。一般的なpH値と鉄の腐食程度を表5に示す。

表5 土壌のpH値と鉄の腐食程度の関係⁽⁴⁾

pH 値		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	中性または弱アルカリ性	非腐食性
8.5 以上	アルカリ性	不明 ¹⁾

1) 不明とは、場合によって非腐食性のときと腐食性のときがあり、一概に決められないことをいう。

3.1.4 溶解塩類

可溶性の塩類の存在は、土壌の電気伝導性を良好にし（比抵抗を下げる）、電流の通過を容易にするので腐食速度が大きくなる場合が多い。

また、塩素イオンや硫酸イオンは、金属表面の保護被膜を破壊し腐食を進行させる作用がある。

一方、中性条件下でカルシウムイオンやマグネシウムイオンは、不溶性の生成物となって析出し、これが保護被膜となって働くため腐食を抑制する作用がある。

3.1.5 バクテリアの影響

埋設管の腐食は、土壌中に生息するバクテリアの代謝作用によって促進されることがある。

腐食に関係する代表的なバクテリアには、好気性の鉄バクテリアと嫌気性の硫酸塩還元バクテリアとがあるが、土壌中では一般に硫酸塩還元バクテリアの影響が大きいといわれている。

硫酸塩還元バクテリアは、pH6～8の中性環境中で水素と硫酸塩を必要とし、硫酸塩を硫化物に還元する。通常、鉄表面には水素が吸着しているが、バクテリアは硫酸塩を還元するときに、この鉄表面の水素を利用し復極させ、鉄は一部硫化鉄（FeS：黒色の錆）になって腐食する。

Redox 電位（酸化還元電位）は、硫酸塩還元バクテリアの活動しやすい酸素の少ない嫌気性環境のとき、低い値を示す。

3.1.6 特殊な腐食性土壌

粘土は、淡水成粘土と海成粘土に大別できる。この中で海成粘土は、内海の静かな海底に堆積して生成した粘土であり、硫化物や塩分として硫酸塩を多量に含

有するため、強い腐食性を示す。これは、嫌気性環境で活動する硫酸塩還元バクテリアによって、海水中の硫酸塩が多量に還元されたためであり、この結果、海成粘土の比抵抗や Redox 電位は低い値を示す。

また、この粘土は還元状態（海水中や地中深く）では中性を示すが、風化する
と酸性を示す特徴を持つ。

海成粘土は、今から 5 万年～ 200 万年前（地質学的には第四紀）に生成された
もので、その後の海岸線の移動や地殻変動によって、海岸近くだけでなく内陸の
丘陵地にも分布している場合がある。

海成粘土と淡水成粘土の分析結果を表 6 に示す。

表 6 海成粘土と淡水成粘土

粘土の種類	比抵抗 $\Omega \cdot \text{cm}$	硫化物	硫黄分 %	土壌抽出水 ¹⁾ (1 : 2.5)					腐食性 評 価
				比抵抗 $\Omega \cdot \text{cm}$	pH	SO ₄ ²⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	蒸留残留物 mg/L	
海 成 粘 土	430	検出	0.63	331	4.7	779	4	1268	強腐食性
淡水成粘土	1670	検出	0.03	2520	6.9	28	6	180	腐食性

1) 土壌を乾燥後、質量比で 2.5 倍の純水を入れ、抽出した水のことである。

3.2 異種金属による影響

種類の異なる金属を土壌中で電氣的に接触させると、各々の自然電位の差により、マクロセルを形成し、自然電位の低い金属がアノード（陽極）となり腐食する。これを異種金属接触腐食という。

例えば、図 4 に示すように、鉄管とステンレス管を接合した場合、電位の低い鉄管が腐食する。腐食の程度は、電位の高いステンレス管の表面積に依存し、表面積が大きいほど腐食が激しくなる。

このような異種金属による影響を防止するには、絶縁継手（ボルトに絶縁ワッシャー、絶縁スリーブおよびガスケット（GF 2 号など）を使用した継手）などにより、電氣的に絶縁状態にするとともに、防食用ポリエチレンスリーブにより、金属と土壌が直接接触するのを防止することが有効である。

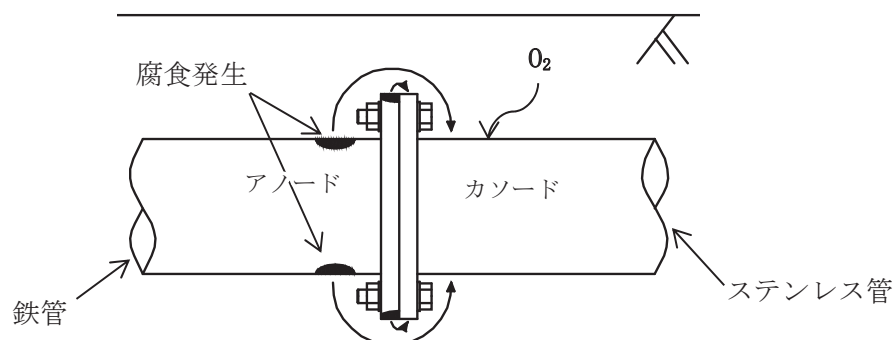


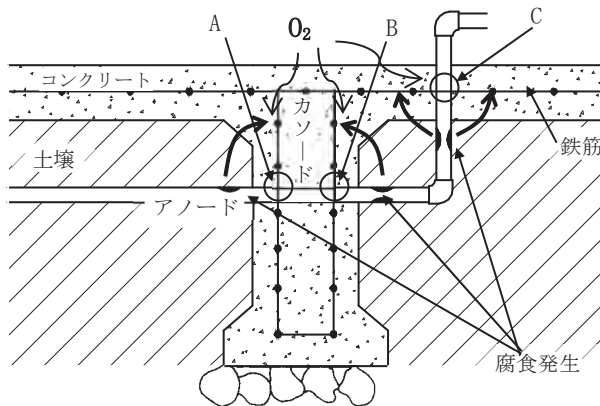
図 4 異種金属接触腐食

備考) 実際に腐食が進行するには、カソード反応（電位の高い金属側）に酸素が必要となる。また、腐食の程度は電位の高い金属の表面積と酸素の供給量に支配されることになる。

3.3 コンクリート／土壌マクロセル腐食

コンクリート内の鉄筋表面の電位はアルカリ成分による不動態化に伴い電位が高くなる。このため、異種金属が接触したのと同じ状態になる。さらに、カソードとして働くためには鉄筋表面への酸素の供給が必要である。

例えば、管が鉄筋コンクリート構造物を貫通して土壌中に埋設されており、しかも鉄筋と管が接している場合には大きなマクロセルが形成され、コンクリートと隣接した土中埋設部の金属にかなり激しい腐食が起こることもある。



備考)
A、B、C のうち 1ヶ所でも管と鉄筋とが接触するとコンクリート中の鉄筋がカソードとなり、アノードの管が腐食する。

図5 コンクリート／土壌マクロセル腐食

3.4 電食

電食とは、電鉄の迷走電流や電気防食施設の漏れ電流などが地中の埋設管に流入し、電流が再び土中に流出する箇所で激しい電解腐食を起こすことをいう。

電気防食施設からの漏れ電流による電食は干渉と呼ばれる。

電鉄の漏れ電流による電食の発生メカニズムを図6に示す。

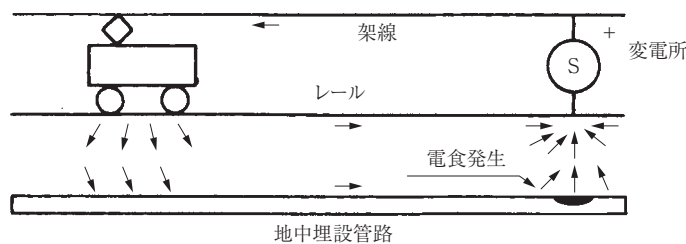


図6 電食の発生メカニズム

現在の電鉄は、大部分が直流で、レールを電車電流の帰路として使用している。レールと地面との絶縁が不十分で、埋設管路の電気抵抗が低い場合、レールに近接して配管されている埋設管路に電流が流入し、この流入部分では腐食は起こらないが、流出する所で電解腐食が発生する。

ダクトイル鉄管はゴム輪を用いた継手構造であり、継手部の電気抵抗が大きいいため、一般に電食を受けにくい。

溶接継手の場合、管路が電氣的に一体となっているため、電食への配慮が必要である。

電鉄電流が交流の場合、腐食は直流の場合に比べてはるかに小さく、通常 50～60Hz の交流によって生ずる鉄の腐食は、同程度の直流によって起こる腐食の 1 %

程度にすぎないといわれている。

交流腐食の実験例として、昭和 56 年 12 月第 23 回中部・関西電食合同研究発表会における名古屋工業大学・飯田、伊藤氏の発表データを図 7 に示す。

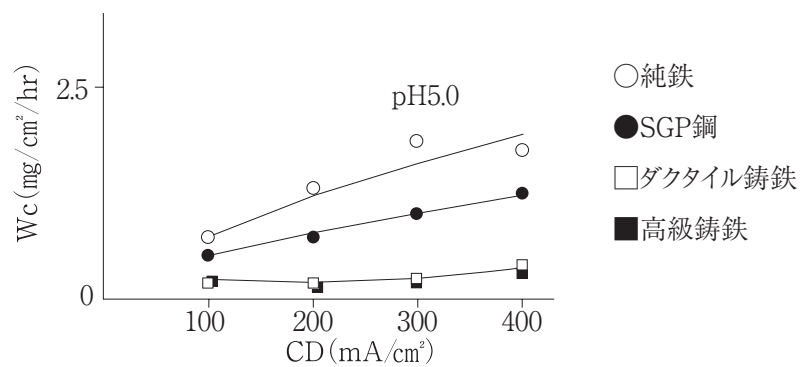


図7 電食量 (Wc) と電流密度 (CD) の関係

4. 土壌の腐食性判定評価方法

1970 年代に鋳鉄管の防食方法としてポリエチレンスリーブ法が英米で開発され、1972 年に米国で ANSI A 21.5 として規格化された。同時に参考としてこの防食法を適用するか否かの判断基準として土壌の腐食性評価法が示された。

日本ダクタイル鉄管協会においても、ANSI/AWWA C 105/A21.5-1999 による土壌の腐食性評価基準を参考とし、JDPA Z 2005 に簡易判定法と土壌分析による判定法を基準化している。

スリーブの規格で基準化された腐食性調査では、埋設管の埋設深さ付近の土を分析し、腐食性土壌かどうかの評価を行う。ANSI による評価基準(表 7)は、土壌の比抵抗、pH、酸化還元電位、水分、硫化物の測定結果を点数化して、合計点数で評価を行う。合計が 10 点以上の場合、腐食性土壌と判断し、埋設時にはポリエチレンスリーブによる防食を推奨する。

表 7 ANSI/AWWA C105/A21.5-1999 による土壌評価法

測定項目	測定値	点数
比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	<1500	10
	1500 ~ 1800	8
	1800 ~ 2100	5
	2100 ~ 2500	2
	2500 ~ 3000	1
	>3000	0
pH 値	0 ~ 2	5
	2 ~ 4	3
	4 ~ 6.5	0
	6.5 ~ 7.5	0*
	7.5 ~ 8.5	0
	>8.5	3
Redox 電位 (mV)	>100	0
	50 ~ 100	3.5
	0 ~ 50	4
	<0	5
水 分	排水悪く常に湿潤	2
	排水良く一般に湿っている	1
	排水良く一般的に乾燥している	0
硫化物	検 出	3.5
	痕 跡	2
	な し	0

* 硫化物が存在し、Redox 電位が低いとき (100mv 以下) は 3 点を加算する。

合計点が 10 点以上のときは、鋳鉄管に対して腐食性であるので防食方法を考慮すること。

国内の主な土壌を ANSI により評価した結果を図 8 に示す。

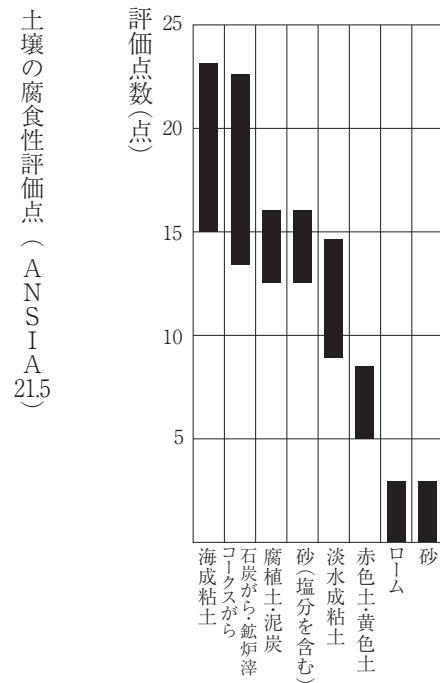


図 8 国内の主な土壌の腐食性評価⁽⁵⁾

また、国内における長年の調査結果から、鉄管の外面腐食深さと埋設期間には以下の関係（図 9）があることがわかっている。

- ①ダクタイル鉄管（ポリエチレンスリーブなし）の外面腐食（孔食）が成長する速度は時間とともに減少する。
- ②腐食深さの進行速度は土壌の腐食性によって大きく異なる。

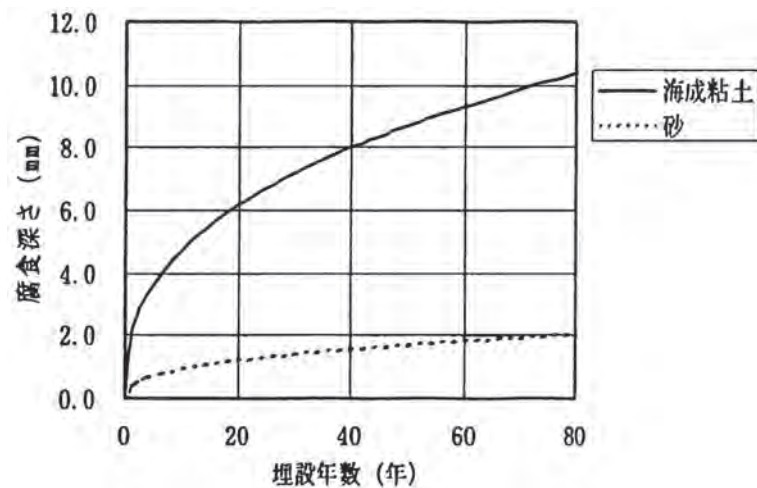


図 9 腐食深さと埋設年数⁽⁶⁾⁽⁷⁾

5. ポリエチレンスリーブ法による鉄管の防食

ダクタイル鉄管の布設予定地の土壌が、腐食性土壌と判定された場合、ポリエチレンスリーブ法で防食するのは一般的である。

ポリエチレンスリーブ法は、1970年代に米国および英国で開発された地下埋設鉄管の防食方法であり、管の布設現場で0.2mm厚さに軟質ポリエチレン製チューブを、铸铁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地下水が浸入した場合でも水の移動を抑制し、溶存酸素が消費されることで腐食の進行を抑制する。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、スリーブの施工に関しては、JCPA W08「ポリエチレンスリーブ施工要領書」にもとづいた正しい施工管理を行う必要がある。

ポリエチレンスリーブは、米国・英国で国家規格になっており、欧州諸国でも広く用いられ、ISOでも規格化されている。また、土壌の腐食性が強いといわれている中近東諸国でも採用されている。

日本では、日本水道協会規格JWWA K 158として規格化されている。

なお、現在使用されている日本のポリエチレンスリーブの品質は、2001年により破れにくい材料に改良されている。さらに2017年にはポリエチレンスリーブの酸化を防止し耐久性を向上させるために、新たな性能規定項目（酸化誘導時間）を導入し、さらなる品質改良が実施されている。

現在使用されているポリエチレンスリーブの物性を表8に示す。

表8 ポリエチレンスリーブの物性

試験項目	品 質
引張降伏応力	30 MPa 以上 ¹⁾
引張破壊ひずみ	600 % 以上 ¹⁾
引張弾性率	160 MPa 以下
衝撃強さ ²⁾	衝撃に耐えること ³⁾
酸化誘導時間 ⁴⁾	60 分 以上

1) 熱融着によって製造したスリーブの熱融着部の引張降伏応力は、10MPa 以上、引張破壊ひずみは250%とする。

2) 衝撃試験条件：デュポン衝撃試験器を改造した装置
(撃ち型径9.52mm×おもり質量1000g×落下高さ570mm以上)

3) 判定基準：10枚中8枚以上の試験片に破れが認められなければ、衝撃に耐えると判断する。

4) 酸化防止剤の効果が持続する時間を測定することで、防止剤の効果を評価する。

6. 管の内面腐食に影響を及ぼす諸因子

6.1 通水による内面腐食

内面腐食に影響を及ぼす因子としては、溶存酸素・温度・流速・pH 値・溶存塩類および電気伝導度（比抵抗の逆数）が挙げられる。

中性の水中では、鉄系金属は腐食の進行に溶存酸素が必要である。しかし、逆に酸素濃度が高すぎると、鉄は不動態化して腐食速度は低下する（図 10 参照）。

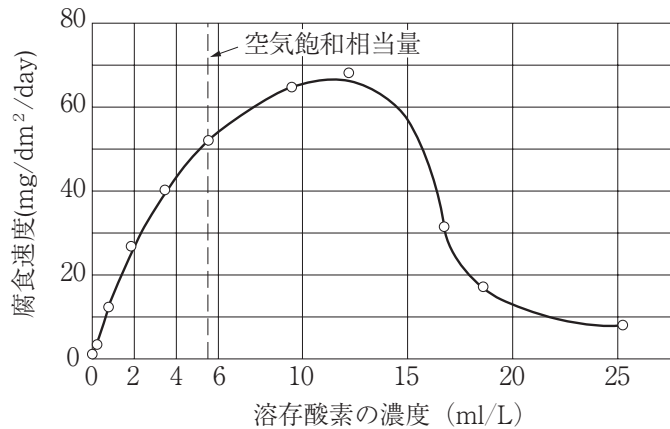


図 10 溶存酸素濃度と腐食速度の関係⁽¹⁾

温度の影響については、図 11 に示すように、一定酸素濃度下（密封系）では温度上昇とともに腐食は直線的に増加する。しかし、開放系では腐食速度は 80℃ で最大となり、それ以上の温度では酸素の溶解度が急激に減少するため、腐食速度は低下する。

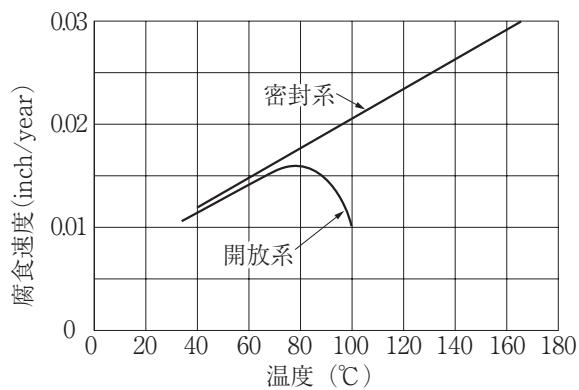


図 11 溶存酸素を含む水中での鉄の腐食に対する温度の影響⁽¹⁾

流速については、流速が増せば鉄表面に達する酸素濃度が増大するため腐食速度も増すが、さらに流速が上がり、酸素供給量が多くなりすぎると、鉄表面が不動態化して腐食速度は低下する。しかし、流速が極端に早くなると、不動態被膜や腐食生成物が機械的に破壊され、キャビテーションエロージョンの被害を受ける。

(図 12 参照)

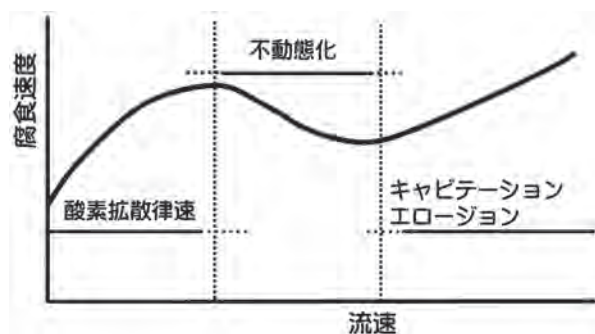


図 12 腐食に与える流速の影響⁽⁸⁾

このキャビテーションエロージョンは、配管の直管部ではなくバルブ部のように、局部的に流れが変化する箇所できりやすい。防止対策としては、エポキシ樹脂粉体塗装のように硬度の高い材料で被覆するか、ゴムライニングのような弾性材料で被覆する方法がある。

pH 値の影響については、図 13 のように pH 4 ～ 10 の範囲ではほとんど差がなく、一定の腐食量を示すが、pH 4 以下では水素発生腐食が起こり、鉄の腐食速度は急速に増大する。

pH10 以上では鉄は不動態化の傾向を示し、腐食速度は低下する。

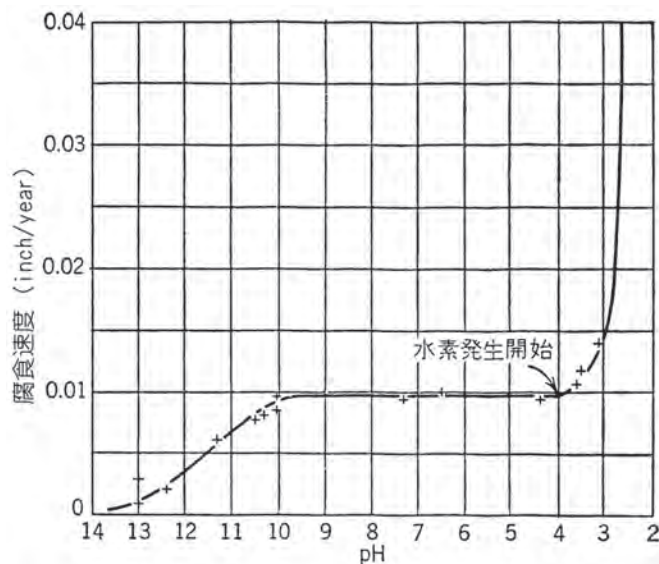


図 13 鉄の腐食に及ぼす pH 値の影響 (ばっ気した室温の水中)⁽¹⁾

溶存塩類の影響については、食塩（NaCl）の濃度を上げていくと電気伝導度が大きくなり、塩素イオンが水酸化鉄の保護被膜を破壊するため、腐食速度は増加する。しかし、食塩（NaCl）濃度がさらに高くなると、酸素の溶解度が小さくなるため、図 14 に示すように腐食速度は減少する。

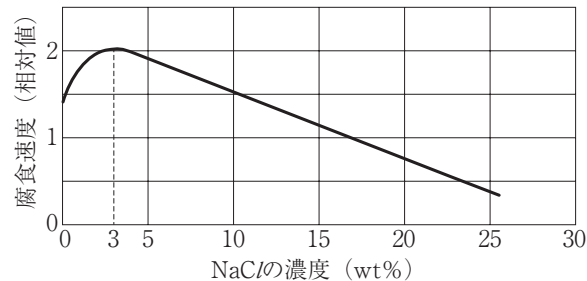


図 14 ばっ気した室温の鉄の腐食に関する食塩水濃度の影響⁽¹⁾

6.2 水の侵食性評価方法

水の侵食性は、水中に溶解しているカルシウム塩やマグネシウム塩の濃度により変化し、特に硬水の場合は鉄管の内面に炭酸カルシウムの沈殿層を形成して、いわゆるスケール形成性の水として腐食（赤水）が生じない場合が多い。

水が侵食性か、あるいはスケール形成による非侵食性かの判別方法として、ランゲリア指数（Langelier Index）がある。

ランゲリア指数については、水道施設設計指針 2012 年版に次のように示されている。

$$\begin{aligned} \text{ランゲリア指数} &= \text{水の pH 値} - \text{pHs} \\ \text{pHs} &= 8.313 - \log [\text{Ca}^{2+}] - \log [\text{A}] + \text{S} \end{aligned}$$

ここに、

8.313：定数

$[\text{Ca}^{2+}]$ ：me/L で示されたカルシウムイオン量であって

$\text{Ca}^{2+} \text{ mg/L} \div (40.1 \div 2)$ で求められる。

$[\text{A}]$ ：me/L で示された総アルカリ度であって、

総アルカリ度 $\text{mg/L} \div (100 \div 2)$ で求められる。

S：補正值であって、次式によって求められる。

$$S = \frac{2\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \quad \mu = 2.5 \times 10^{-5} \text{ Sd}$$

Sd：溶解性物質濃度（mg/L）

ランゲリア指数がプラスの値で数値が大きいほど、炭酸カルシウムの析出が起こり易く非腐食性であり、ゼロであれば炭酸カルシウムは析出も溶解もしない平衡状態にあり、マイナスの値では炭酸カルシウム被覆は形成されにくく、その絶対値が大きくなるほど水の腐食傾向は強くなる。従って赤水問題をコントロールするために、ランゲリア指数が大きくなるようにソーダ灰、消石灰、苛性ソーダなどを添加して水質を調整することがある。

井戸水を水源にした所では、pH 値が弱酸性（pH6 前後）を示す所が多く、この原因としては遊離炭酸がある。遊離炭酸については、水道施設設計指針に「侵食性遊離炭酸を多く含む水は水道施設に対して障害を与える場合がある。遊離炭酸が約20mg/L を超える場合は、侵食性遊離炭酸も多いおそれがあるので、水質障害の程度を勘案勘定して、エアレーションあるいはアルカリ処理を行って、除去又は中和する必要がある。」と記されている。

また、AWWA では水の侵食性を示す指標として、侵食性指数（Aggressiveness Index）も提案されている。この指数は以下に示す式より算出でき、10 以下のときは強侵食性、12 以上のときは非侵食性、10～12の間を中程度の侵食性と区別している。

$$\text{侵食性指数} = \text{pH 値} + \log (A \cdot H)$$

ここに、

- A：総アルカリ度（CaCO₃ mg/L） 水中に含まれている重炭酸塩・炭酸塩・水酸化物などのすべてのアルカリ分を CaCO₃として表したもの。
- H：カルシウム硬度（CaCO₃ mg/L） 水中のカルシウムイオンの量によって示される硬度を CaCO₃で表したもの。

ランゲリア指数と侵食性指数により示される水の侵食性を表9に対比して示す。

表9 水の侵食性とランゲリア指数及び侵食性指数の関係

水の侵食性	ランゲリア指数	侵食性指数
強侵食性	< - 2.0	< 10.0
中程度の侵食性	- 2.0 ~ 0.0	10.0 ~ 12.0
非侵食性	> 0.0	> 12.0

赤水の問題が発生している都市で、原水の井戸水にエアレーションを行った結果、表10に示すようにランゲリア指数・遊離炭酸・侵食性指数とも改善された。

このように、水質をコントロールすることによって赤水問題を解決し、施設の耐久性を向上させることも可能である。

表 10 井戸水の水質改善

	pH 値	遊離炭酸	ランゲリア指数	侵食性指数
原 水	6.02	57.2mg/L	-2.12	9.41
エアレーション後の水	8.20	1.76mg/L	0.0	11.57

水道施設設計指針では、水が水道施設に与える障害を低減するために、腐食に関する水質項目の管理目標として表 11 に示す目標値をあげている。

表 11 維持管理上望ましい水質

	pH 値	遊離炭酸	ランゲリア指数
管理目標値	7.5 程度	20mg/L 以下	-1.0 程度以上とし、極力 0 に近づける

6.3 その他の内面腐食

下水処理に用いるばっ気用送気管は、断熱圧縮した空気を送るため 70～100℃にも温度が上がり、かつ水分が飽和に近いいため管内面には塗装又はライニングが必要である。この場合、管内面には、モルタルライニングが一般的に用いられている。

7. 塗装・ライニングによる内面防食

管の内面防食材料には、次のような条件が要求される。

- ① 水質に悪影響を与えないこと
- ② 管に対する防錆力が優れていること
- ③ 管の内面への密着性が優れており、長期間の通水によっても密着力の低下がないこと
- ④ 塗膜が損傷され難いこと
- ⑤ たとえ局部的な損傷を受けた場合でも、これが起点となって塗膜の密着性が劣化しないことなどがあげられる。

7.1 モルタルライニング

海水・淡水を問わず、水に対する防食方法としてモルタルライニングを施すことは、セメントによる鉄面の不動態化およびセメントの水和の進行といった面から、合理的な方法といえる。

モルタルライニングは、水中では時間の経過とともに水和が進行し、かつ石灰によるアルカリ環境を作り出すため、鉄の防食には効果的である。

防食効果を確認するため、管路の流速係数（C 値）を測定した結果を表 12 に示す。

このデータによると、通水後 30～40 年にわたっても C 値の実質的な変化は少なく、ライニングとして機能していることがわかる。

海水管の場合、海棲生物（フジツボ、イガイなど）が内面に付着し、瀝青質塗装に食い込み、損傷を生ずることがあるが、モルタルライニングではこのような危険は少ない。（巻末写真集参照）

7.2 エポキシ樹脂粉体塗装

内面塗装としては、いろいろなものが考えられるが、長期の信頼性を考え、各種の水質および流速で長期間の通水試験を行った結果、耐久性、水質衛生性、塗膜の品質などの面でもっとも信頼性が高いものはエポキシ樹脂粉体塗装であった。

エポキシ樹脂塗料は、合成樹脂塗料の中では代表的なものである。なかでも、粉体塗料に使用される樹脂は、溶剤型の塗料に比べて高分子量のものが使われるため、

性能がよい。

また、一般に溶剤型の塗料は硬化乾燥が不十分な場合、臭気などで水質に悪影響を与えることがある。一方、粉体塗装は溶剤を含まない焼き付け塗装であるため、飲料水に対して溶剤臭を与えるおそれがなく、水に溶解する低分子化合物がないため衛生性に優れている。

すなわち、管内流速が小さい場合でも、管内水の pH 値や残留塩素の変化が少ないなど、水質への影響が小さいという特長を有している。

なお、エポキシ樹脂粉体塗装の規格は、1977 年に異形管内面用の塗装規格として日本鑄鉄管協会（現日本ダクトイル鉄管協会）規格、JCPA Z 2006「水道用ダクトイル鑄鉄異形管粉体塗装」が適用呼び径 75～250 の範囲で制定された。その後、直管の内面にもエポキシ樹脂粉体塗装を採用する都市が増えたことや、事業体から赤水対策として少しでも適用口径の拡大を要望する声が強くなったので、その適用呼び径を 75～350 までとし、直管・異形管ともに適用できる規格として、1980 年に日本水道協会規格 JWWA G112「水道用ダクトイル鑄鉄管内面エポキシ樹脂粉体塗装」が制定された。

さらに、1982 年に日本水道協会規格 JWWA G 113「水道用ダクトイル鑄鉄管」が制定され、モルタルライニングと同様に、粉体塗装が標準化された内面防食法として規定された。

また、エポキシ樹脂粉体塗装は上水道以外の分野、例えば硫化水素ガスの発生しやすい下水道管路や工業用水管路でも採用されるようになり、上水道以外にも適用できる規格として 1984 年に日本工業規格 JIS G 5528「ダクトイル鑄鉄管内面エポキシ樹脂粉体塗装」が制定され、適用呼び径も 75～600 となった。

その後、技術の進歩や関連規格の改正などを背景に、2002 年に日本水道協会規格 JWWA G 112「水道用ダクトイル鑄鉄管内面エポキシ樹脂粉体塗装」が改正され、塗料組成の限定や、その原料に適した試験項目、方法が改められた。

7.3 その他の塗装

ダクトイル鑄鉄異形管の内面防食対策としては、エポキシ樹脂粉体塗装が一般的であるが、大口径になると設備などの問題で適用することが困難であることから、これらの管には無溶剤形エポキシ樹脂塗料（JWWA K 157）や液状エポキシ樹脂塗料（JWWA K 135）が用いられている。日本ダクトイル鉄管協会では、JCPA Z 2011（ダクトイル鑄鉄 異形管内面液状エポキシ樹脂塗装）を制定し、主として呼び径 1350 以上のエポキシ樹脂粉体塗装が難しい大口径管に適用するものとしている。

また、一部の異形管およびその接合部品には、合成樹脂塗料（JWWA K 139）が使用されている。

表 12 アメリカにおけるモルタルライニング管流速係数（C値）の経年変化実測例⁽⁹⁾

場 所	呼び径 (インチ)	シール コート 有 無	公称最小 ライニング 厚さ(インチ)	長さ (フィート)	布設年	経過年数	C 値
Birmingham, Ala.	6	有	1/16	473	1940	1	148
						6	141
						12	138
						17	133
Catskill, N.Y.	16	無	1/8	30,825	1932	25	136
Champaign, III	16	無	3/16	3,920	1928	13	137
						22	139
						28	145
						36	130
Charleston, S.C.	5.78			300	1941	新管	145
						12	146
						16	143
	12		1/8	500	1932	15	145
						25	136
Chicago, III	36	有	1/8	7,200	1945	1	147
						12	151
Concord, N.H.	12	無	1/16	500	1928	13	143
						29	140
						36	140
Danvers, Mass.	20	無	1/16	500	1926	31	135
						38	133
Greenville, S.C.	30		1/8	87,400	1944	13	148
						20	146
	30	有	1/8	50,700	1939	19	148
						25	146
Greenville, Tenn.	12	無	1/16	500	1928	13	134
						29	137
						36	146
Knoxville, Tenn.	10		1/16	500	1925	16	134
						32	135
						39	138
Manchester, N.H.	12	有		500	1936	5	151
						19	132
						26	140
Safford, Ariz.	10	無	1/8		1941	16	144
Watertown, N.Y.	10	無	1/16	500	1927	14	151
						28	132
						37	125 ¹⁾

1) 重塩素処理によりライニング上のスライムを除去したもの。

〔本文中の出典〕

- (1) H. H. ユーリック, 腐食反応とその制御 (第2版), (1974)
- (2) 電気学会, 新版 電気・土壌腐食ハンドブック, (1977)
- (3) 日本水道協会, 水道施設設計指針 2012 年版
- (4) 電気学会, 新版 電気・土壌腐食ハンドブック, (1966)
- (5) ㈱クボタ, アーバンクボタ 23 号, (1984)
- (6) Y.Katano et al., 「Predictive Model for Pit Growth on Underground Pipes」, Jour. CORROSION vol.59,2003
- (7) ㈱クボタ宮田ほか, 「管路の老朽度予測モデル」, 第 55 回水道研究発表会講演集, (2004)
- (8) 岡本剛, 腐食と防食
- (9) Wallace & T.Miller, Jour.AWWA,Jun.1965

参考資料

(1) 水道水、蒸留水による腐食試験結果

参考表1 各種管の水道水スプレーによる腐食試験結果

試料	腐食量 mg / dm ² / day	
	45日	90日
ダクタイル鉄管	13.3	10.0
高級铸铁管	13.3	11.4
引抜銅管	37.8	30.3
溶接銅管	65.3	44.0

〔出典：日本ダクタイル鉄管協会によるデータ〕

備考 スプレーガンにて水道水を霧化、10時間吹き付け－14時間休止の乾湿を繰り返す。

参考表2 蒸留水中浸せき試験結果

試料	腐食量 mg / dm ² / day	
	静置水中 380日間浸せき	圧さく空気を吹き込む 380日間浸せき
ダクタイル铸铁	6.1	19.1
高級铸铁	6.2	19.3
銅	7.5	24.5

〔出典：M.Paris & B.Brunier “Corrosion” May 1957〕

(2) 海水による腐食試験結果

参考表3 海水中浸せき試験結果（1）

試料	腐食量			腐食速度		
	mg / dm ² / day			mm / year		
	90日	180日	360日	90日	180日	360日
ダクタイル鉄管	24.0	16.1	13.2	0.122	0.081	0.066
高級铸铁管	24.9	16.4	14.5	0.127	0.083	0.073
銅管	30.2	20.7	27.3	0.140	0.097	0.130

〔出典：M.Paris&B.Bruniere“Corrosion”May 1957〕

備考 1. 海水中に浸せきし、機械的に攪拌した。
2. ダクタイル鉄管および高級铸铁管の場合、腐食生成物の影響で、長期にわたるにしたがい、腐食量が減少している。銅管では、この傾向は見られない。

参考表4 海水中浸せき試験結果(2)

試 料	腐食量			腐食速度		
	mg / dm ² / day			mm / year		
	90 日	180 日	360 日	90 日	180 日	360 日
ダクタイル鉄管 (約15% Ni含有)	43.5	44.5	42.0	0.221	0.221	0.214
ダクタイル鉄管	44.5	43.9	43.0	0.226	0.234	0.218
普通鉄鑄管	45.5	43.7	43.0	0.231	0.211	0.218
銅 管	62.5	64.0	64.0	0.292	0.300	0.300
低炭素鋼板	82.5	69.2	67.0	0.384	0.300	0.300

[出典：M.Paris & B.Bruniere“Corrosion” May 1957]

- 備考 1. 海水中に20分ごとに浸せきおよび引き上げの乾湿を繰り返した。
 2. 腐食量が全般に参考表3の結果よりも大きいことから、より厳しい条件であるといえる。
 3. ダクタイル鉄管と普通鉄鑄管の腐食量に大きな差は見られない。
 また、銅管の腐食量はこれらより大きい。

(3) 土壌埋設腐食試験結果

参考表5 欧米諸国におけるダクタイル鉄管および鉄鑄管の土壌埋設腐食試験結果(裸管)

出 典	土壤条件			埋 設 期間年	平均腐食量 mg/dm ² /day		最高孔食速度 in/yr		供試管寸法
	種 類	比抵抗 Ω・cm	pH値		DCI	FC	DCI	FC	
CIPRA	Slag Chinker	400	—	3.7	12.2	10.6	0.035	0.035	φ 150×1.5m
				13.5	9.3	11.3	0.011	0.020	〃
	Alkaline Soil	200~500	—	3.7	7.2	5.4	0.022	0.016	〃
				14.0	2.4	1.9	0.009	0.013	〃
European	Brown Clay ¹⁾	500~900	7.5~8.5	2.0	10.5	10.3	0.011 ²⁾	0.017 ²⁾	φ 100×1.75m
	Tidal Beach	110	8.0~9.0	2.0			0.005	0.013	〃
	Pea Clay Soil	900	7.0	2.1	9.6	7.7	0.015	0.015	〃
Stanton	Brown Clay ¹⁾	700~1300	7.0~8.0	6.5			0.010 ²⁾	0.016 ²⁾	φ 4″×6ft

- 1) Brown Clay：Essex にあり英国における代表的な強腐食性土壌。
 2) 孔食深さを測定し、大きいものから25個を取って、その値を平均した。

参考表6 ダクタイル鉄管および高級鋳鉄管土壌埋設腐食試験結果（裸管）

項目	埋設 条件	ダクタイル管					高級鋳鉄管				
		3ヵ月	6ヶ月	1ヵ年	2ヵ年	5ヵ年	3ヵ月	6ヶ月	1ヵ年	2ヵ年	5ヵ年
平均腐食量 mg/dm ² /day	砂土中	6.05	7.72	8.25	6.01	4.84	7.91	7.61	7.35	5.38	4.76
	粘土中	19.9	13.9	10.1	12.4	9.54	17.2	13.1	12.0	11.2	10.0
	山土中	20.2	12.9	10.2	7.39	5.47	19.2	10.7	9.39	9.88	6.58
最高孔食 速度 ¹⁾ mm/yr	砂土中	0	0	0.39	0.27	0.21	0	0.34	0.31	0.31	0.23
	粘土中	1.84	1.32	0.67	0.62	0.34	1.56	1.14	0.52	0.52	0.39
	山土中	1.68	1.18	0.77	0.61	0.28	1.32	1.18	0.71	0.54	0.30

〔出典：日本ダクタイル鉄管協会によるデータ〕

1) 孔食深さを測定し、大きいものから3個を取って、その値を平均した。

(4) ダクタイル鋳鉄の比抵抗

参考表7 ダクタイル鋳鉄と鋼の比抵抗

試料	比抵抗 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
ダクタイル鋳鉄	50 ～ 70
鋼	10 ～ 20

〔出典：日本ダクタイル鉄管協会によるデータ〕

(5) 実管路の事故統計

参考表8 各管種の平常時事故率(1983～1985年度、全国20事業体の集計)

管 種	継 手 ¹⁾		管路数	延長 (Km)	事故数 (件) (3年間)	事故率 (件/Km) (3年間)	事故の種類別事故数					事故率 (件/Km) (3年間)	管種別 事故率 (件 /km/ 年)
							継手のゆるみ ²⁾			亀裂	腐食		
							(1)	(2)	(3)				
石 綿 セメント管	直管	異形管	283	39.62	37	0.934	1	1	－	35	0	1.21	0.40
	C A	G											
	C S	C S	14	1.49	3	2.013	0	0	－	3	0		
	C S	G	1	0.07	0	0	0	0	－	0	0		
	G	G	515	80.33	107	1.332	24	2	－	81	0		
鋳鉄管	S O		2,701	439.22	416	0.947	－	－	62	338	16	0.74	0.25
	M		1,280	200.09	54	0.270	－	－	3	47	4		
ダクタイル	S O		6	1.07	0	0	－	－	0	0	0	0.05	0.02
鉄 管	M		5,026	740.06	37	0.050	－	－	4	32	1		
銅 管	S O		57	10.32	15	1.453	－	－	1	1	13	0.83	0.28
	W		79	11.67	0	0	－	－	0	0	0		
	S C		164	12.29	14	1.067	－	－	2	6	6		
硬質塩化	T S		184	30.75	45	1.463	－	－	40	5	0	1.48	0.49
ビニル管	R R		3	0.36	1	2.777	－	－	0	1	0		

〔出典：水道管路更新システム開発調査報告書（厚生省）〕

1) 継手の記号

管 種	継 手	
石 綿 セ メ ン ト 管	C A	石綿セメント継手
	C S	銅板製継手
	G	鋳鉄製継手（ギボルト）
鋳 鉄 管	S O	ソケット継手（印ろう）
	M	メカニカル継手
ダ ク タ イ ル 鉄 管	S O	ソケット継手（印ろう）
	M	メカニカル継手
銅 管	S O	ソケット継手（印ろう）
	W	溶接継手
	S C	ねじ込み式継手
硬質塩化ビニル管	T S	接着継手
	R R	ゴム輪型継手

2) 継手のゆるみ

- (1) 石綿セメント管直管部
- (2) 石綿セメント管異形管部
- (3) 石綿セメント管以外

参考表 9 各管種の平常時事故率（東京都水道局の例）

（単位：件／Km／年）

事故内容	年 度	S 56		S 57		S 58		3 ヶ年平均	
		件数	事故率	件数	事故率	件数	事故率	件数	事故率
自然漏水管体事故 （破損・腐食・継手）	铸铁管 F C C	1,101	0.0874	933	0.0730	1,207	0.0934	1,080.4	0.0846
	F C M	1,058	0.2067	896	0.1842	1,165	0.2544	1,039.4	0.2142
	F C D	43	0.0057	37	0.0047	42	0.0050	40.7	0.0051
	鋼 管	63	0.2704	53	0.2284	50	0.2174	55.3	0.2387
	石綿管	188	0.3118	146	0.2561	165	0.3107	166.3	0.2928
小 計		1,352	0.1006	1,132	0.0834	1,422	0.1039	1,302.0	0.0959
その他	弁類・消火栓等	2,636	0.1961	2,199	0.1620	1,861	0.1360	2,232.0	0.1645
	他企業関連事故等	712	(0.0530)	639	(0.0471)	548	(0.0400)	633.0	(0.0467)
合 計		4,700	(0.3497)	3,970	(0.2924)	3,831	(0.2799)	4,167.0	(0.3071)

〔出典：配水管破損事故における季節変動の実態とその分析（川北和徳、水道協会雑誌、1986 年 5 月）〕

- 備考**
1. 事故率については、それぞれの年度末管路延長で計算した。他企業関連事故はそのときの他企業の工事量、東京という都市の特殊性によるところが多いため、関連するものを（ ）内に参考値として示した。
 2. F C C：ソケット継手铸铁管
F C M：メカニカル継手铸铁管
F C D：ダクタイル铸铁管（メカニカル継手およびT形継手）

参考表 10 铸铁管および鋼管の東京ガス、大阪ガス両者における腐食事故総件数総括表

管 種	東京ガス(株) S.30.4～38.4(32年は除く) 7 年間			大阪ガス(株) S.30.4～42.3(31,36年は除く) 10 年間		
	配管延長	事故総件数	配管 1 km 当たり 事故件数	配管延長	事故総件数 ¹⁾	配管 1 km 当たり 事故件数
铸铁管	7,162km	84 件	0.012 件 /km/7 年	5,968km	61 (3) 件	0.010件/km/10年 (0.0005)
鋼 管	492km	119 件	0.242 件 /km/7 年	1,364km	360 (67) 件	0.264件/km/10年 (0.049)

〔出典：日本ダクタイル鉄管協会によるデータ〕

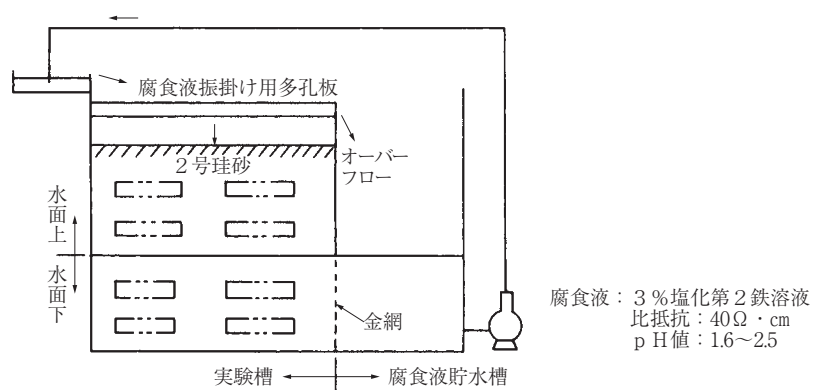
- 1) () 内の数字は電食事故件数を示す。

(6) ポリエチレンスリーブの防食効果

参考表 11 促進腐食試験結果

試 験 片				重量減による 平均腐食速度		孔食 速度 mm/yr	孔食数	ポリエチレンスリーブ 内浸入液の pH 値	ポリエチレンスリーブ 内浸入液の 量 (ml)
防食方法	実験槽での 位 置	人口傷 の有無	No.	mg/dm ² /day	mm/yr				
ポリエチレン スリーブ	水面上	無	1	9.3	0.043	0.80	19	4.7	25
			2	3.3	0.015	0.44	29	—	痕跡
		有	3	9.3	0.043	0.20	5	5.1	9.5
			4	3.2	0.015	0.04	3	—	痕跡
	水面下	無	5	3.5	0.016	0.04	58	—	痕跡
			6	8.5	0.040	0.24	6	5.1	23
		有	7	11.8	0.061	0.08	1	4.9	102.5
			8	16.7	0.078	0.48	6	4.6	61.5
タールエポキシ 塗 装	水面上	—	9	4.7	0.021	3.48	166	—	—
			10	9.6	0.044	4.48	102	—	—
	水面下	—	11	3.4	0.016	3.16	198	—	—
			12	20.7	0.095	4.24	45	—	—
裸	水面上	—	13	678.9	3.175	9.40	13	—	—
			14	782.1	3.610	9.24	3	—	—
	水面下	—	15	842.7	3.890	7.84	2	—	—
			16	733.4	3.436	7.20	2	—	—

〔出典：日本ダクタイル鉄管協会によるデータ〕



参考図 1 腐食促進試験装置

(7) 淡水成粘土と海成粘土の比較

参考表 12 大阪層群・沖積層・大阪湾底泥に含まれる
 燐 (P)・硫黄 (S) の含有量 (%) ならびに pH 値

測定項目	大阪層群							沖積層	大阪湾		
	淡水成粘土			海成粘土				海成粘土	底 泥		
	屏風ヶ浦粘土層	千里山T.直上	Ma3直上	Ma3	Ma3	Ma4	Ma5	梅田粘土層	No.7	No.7~8	No.8
P	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	—	0.08	—	0.07
S	不検出	不検出	0.09	0.99	0.38	0.74	1.72	0.34	0.31	0.30	0.28
pH 値	6.7	7.2	6.5	3.8	4.3	3.7	2.4	8.1	—	8.0	—

〔出典：1971 年竹原平一教授記念論文集、市原 実、市原優子「大阪層群の海成粘土と淡水成粘土について」〕

(8) 大阪層群相当層の分布図



参考図2 大阪層群相当層の分布図

備考 大阪層群とは、大阪平野・奈良盆地・京都盆地・播磨平野と淡路島の地下に分布する鮮新・更新統（約 300 万年前～30 万年前）の地層。
 大阪層群相当層とは、大阪層群に相当する地層をいう。

Q&A

問－１ 鋳鉄管はいつ頃から使用されているか。

答 鋳鉄管がいつ、どこで最初につくられたかははっきりしていません。

ドイツのある古いパイプメーカーのカatalogによれば、1455 年 Dillenberg の給水設備に鋳鉄管が使用されたと述べられています。

給水設備としては、地下に埋設された鋳鉄管に関するもっとも信頼できる記録は、フランスにおいてルイ 14 世の時代にパリ近郊に各種口径のものを数条布設したというものです。

これはベルサイユの街と泉に水を送るために Marly – on – Seine のポンプ場から約 15 マイルにわたって布設されたものです。

これに使用した鋳鉄管は 1664 年から 1668 年の間に製造されたものであり、1 本の長さは 31/2 フィートでフランジとボルトで接続されています。パッキンには鉛が使用され、長期間中には継手の一部が修理されましたが、これらは今日なおその機能を完全に果たし、市民の憩いの場で美しい噴水を噴き続けています。

日本においては、1885 年横浜で布設された鋳鉄管が最初のもので、これは輸入品でしたが、1893 年（明治 26 年）には大出鋳造所（現在の（株）クボタ）において鋳鉄管が製造されました。

鋳鉄管の古い使用例は表 1 の通りです。

表 1 鋳鉄管の古い使用例

国 名	地 名	埋設年
フランス	ベルサイユ	1664
〃	ウィルバーク	1703
〃	エレーン・ベレット	1727
〃	クリアモンド	1748
イギリス	ロンドン	1810
アメリカ	フィラデルフィア	1822
〃	ボストン	1830
〃	セントルイス	1831
〃	リッチモンド	1832
〃	ニューヨーク	1833
〃	ランカスタ	1844
〃	メインランド	1848
日 本	横 浜	1885
〃	長 崎	1887
〃	東 京	1888
〃	大 阪	1889
〃	神 戸	1894

問－２ モルタルライニング管の許容流速はいくらか。

答 2012年度版日本水道協会の水道施設設計指針によると、自然流下式の場合、モルタルライニング・シールコート管の平均流速の許容最大限度は、3 m/sec と規定しています。

一方、ポンプ圧送方式の場合、採用すべき管内の流速は、路線の条件、使用管種、管径、管路形式などによって一概に決められませんが、管路の経済性を考慮して決定します。一例として農林水産省の基準（2009年度版土地改良事業計画設計基準・設計「パイプライン」基準書・技術書）では、表2のような設計流速の目安を決めています。これに対して管路の経済性などの面から、これ以上の高流速を使用する場合は、上記の最大限度の範囲内で選定すればよいわけです。

表2 ポンプ圧送方式の平均流速

呼び径	平均流速 m/sec
75 ～ 150	0.7 ～ 1.0
200 ～ 400	0.9 ～ 1.6
450 ～ 800	1.2 ～ 1.8
900 ～ 1500	1.3 ～ 2.0
1600 ～ 3000	1.4 ～ 2.5

問－３ ボルト・ナットの防食法は。

答 土壌中に埋設された金属の腐食は電気化学反応にもとづいて進行します。電気化学反応の大きさは、発生原因としての電位差と環境の電気抵抗の二者に影響されます。たとえば、電位差が存在しても埋設土壌の比抵抗の高い条件下では腐食は生じにくく、塩分などを多く含むような低い比抵抗の土壌中では腐食が進む可能性が高くなります。また、土壌中の鉄系金属の腐食では、陰極面積と陽極面積の比率によりその腐食速度が定まり、この比率が大であるときには陽極部に激しい腐食が生じ、逆の場合はあまり極端な腐食は生じません。

メカニカルジョイントのボルト・ナットの土壌腐食は、ちょうどこの面積比が大なる場合に相当し、ボルト・ナットが鉄管や押輪に対して陽極となり、面積比率が極端に小さいため局部電池が形成されると、腐食電流がボルト・ナットに集中し、管体の犠牲になって選択的に腐食するわけです。ボルト・ナットが鉄管、押輪に対して陽極（電位が低くなる）になる理由としては、

- ① ボルト・ナットがネジ加工されるため、ネジ部分の電位が低下する。
- ② ボルト・ナットの加工時に端部が傷付きやすく、それらの部分の電位が低下する。
- ③ 鉄管、押輪が比較的確実に塗装されているのに対して、ボルト・ナットの塗装は薄く耐久性が劣ること、および接合作業時に塗装が傷付きやすく、そのため電位が低くなる。

などです。そこでボルト・ナットの防食方法としては、ボルト・ナット自体の電位を均一化し、かつ鉄管よりも貴（noble）になるようにすればよいことになります。

図1に一般的な旋盤加工ボルトの電位分布を、図2に加熱酸化処理したボルトの電位分布を示します。酸化皮膜付きボルトは表面の電位が均一化されるため、局部腐食の危険性は低減されるとともに、ボルト・ナットの電位が鉄管と比較して100mV以上貴な電位を示すため、陰極的にボルト・ナットが防食される効果も得られます。

しかし酸化皮膜付きボルトであっても、たとえば海成粘土のように非常に腐食性が強い土壌においては、ときに腐食が進行する場合があります。したがって、このようなボルトの腐食が懸念されるような埋設環境では、ボルトの防食だけにとらわれるのではなく、管を含めた全体の防食を検討することが必要です。

このため、ダクトイル管路では全体を防食する方法として、ポリエチレンスリーブ法が標準化されています。一方、より高い耐食性が要求される場合に耐震管ではステンレス製のボルト・ナットを採用し耐食性を高めています。

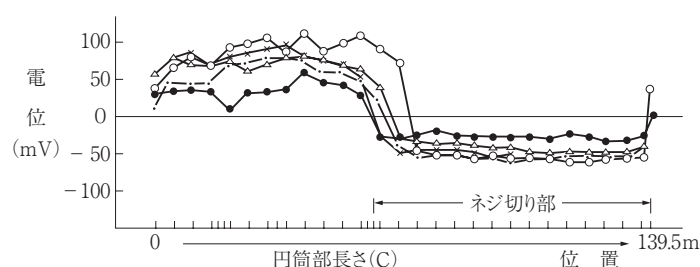


図1 旋盤加工ボルトの電位分布測定結果

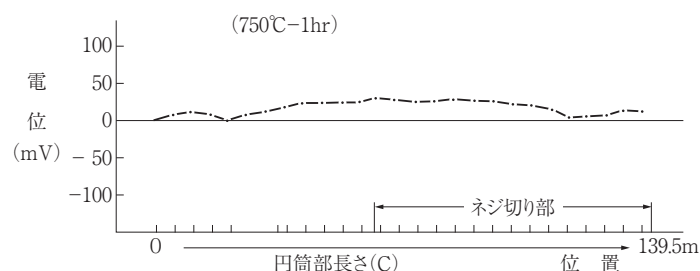


図2 加熱酸化処理ボルトの電位分布測定結果

問-4 ダクトイル管路にも電食が起こるか。

答 電食とは、地中での迷走電流が低抵抗の回路である地下埋設金属管路に拾い集められて管路の中を流れ、この電流が帰流点で再び地中に流出する箇所では金属体が陽極として激しく電解腐食する現象を指すものです。

迷走電流の発生源としては電鉄のレール、接地された直流電源、電気溶接機または外部電源法による電食防止施設などがあげられますが、一般的には電鉄電流がもっとも代表的です。〔「電食・土壌腐食ハンドブック」電気学会発行〕

迷走電流が比較的集中しやすい場所として、電鉄の変電所や操車場があげられます。

また、管路が電食被害を受けやすい条件として、管路自体があたかも地中にアンテナを広げたような良好な電導状態にある場合があげられます。このような場合は、微小な迷走電流であっても、広範囲な地域から特定の場所に集中し、無視できない

量となることがあります。

一方、ダクタイト鉄管は継手にゴム輪を用いており、管路は電氣的につながっていません。また部分的に離脱防止継手や離脱防止金具が使用された場合でも、管路全体としては良好な導電状態ではなく、ダクタイト管路は全体として迷走電流が流れにくくなっています。したがって、ダクタイト管路は基本的に電食被害を受けにくい構造であるといわれています。

なお、ダクタイト管路では自然腐食対策も兼ねてポリエチレンスリーブ法を採用することにより、より安全性を高めることができます。

以下に具体的に電食の危険性の有無を調査した事例を示します。

(事例－1) A水道企業団

(1) 配管状況

- 1) 呼び径：500、600
- 2) 管 種：メカニカル継手ダクタイト鉄管
：溶接継手鋼管
- 3) 布設場所：図3

電鉄との距離	並行区間
10 ～ 25 m	約 2Km
7 ～ 10 m	約 6Km
100 ～ 300 m	

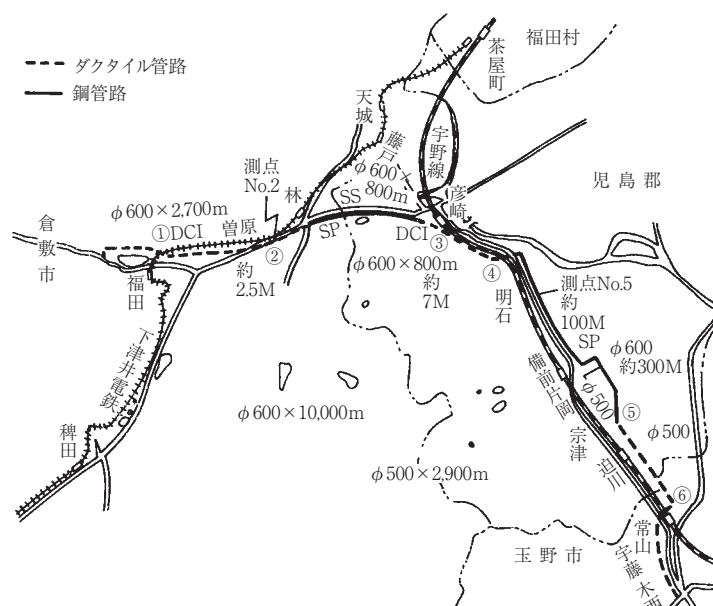


図3

(2) 調査結果

- 1) ダクタイト管路：管対地電位 (P / S) 測定の結果、迷走電流の影響は認められなかった。(図4、図5)
- 2) 鋼 管 路：管対地電位 (P / S) 測定の結果、迷走電流の影響が認められた。(図6)

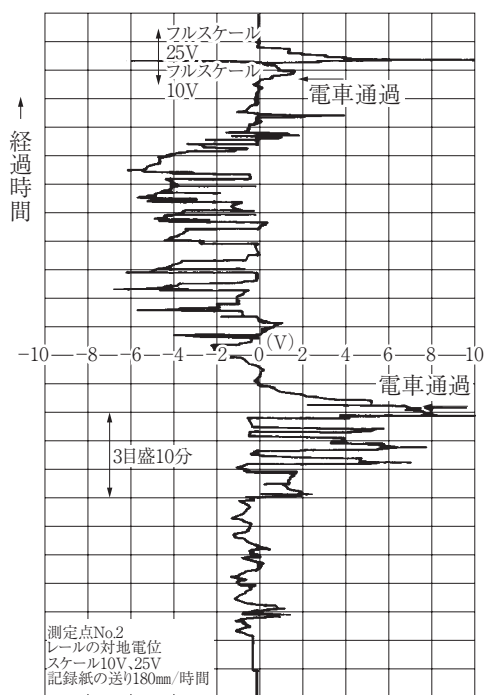


図4 A水道企業団レール対地電位測定結果

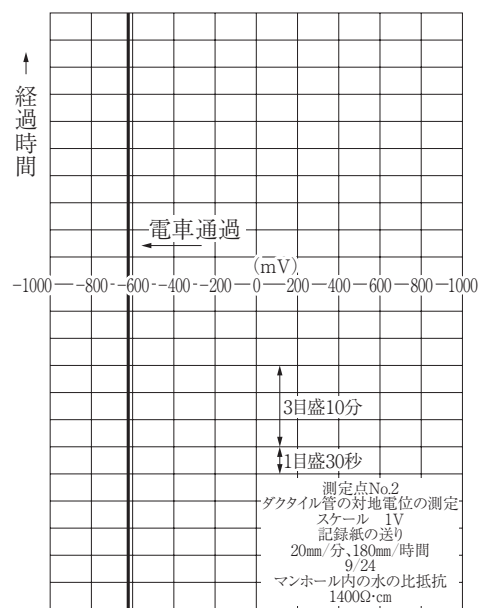


図5 A水道企業団呼び径 600
ダクタイル鉄管対地電位測定結果

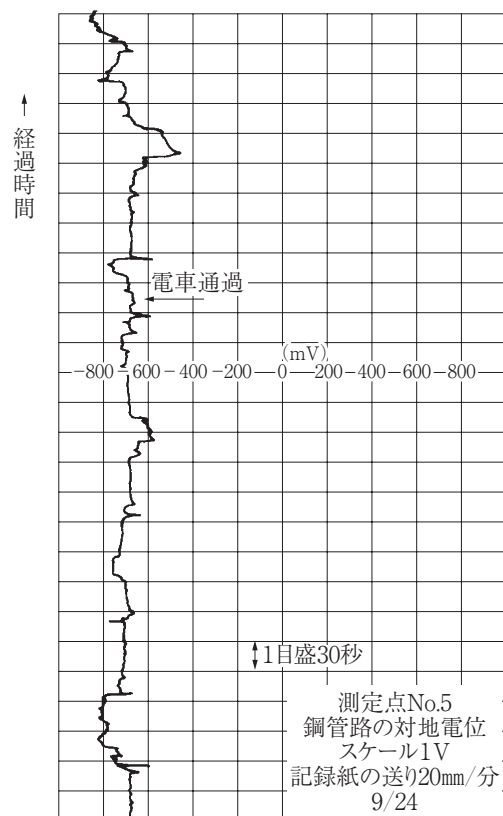


図6 A水道企業団体呼び径 600 鋼管対地電位測定結果

(事例－2) B水道企業団

(1) 配管状況

- 1) 呼び径：2000
- 2) 管種：U形ダクトイル鉄管
- 3) 布設場所：図7

：シールド内配管

：電鉄横断

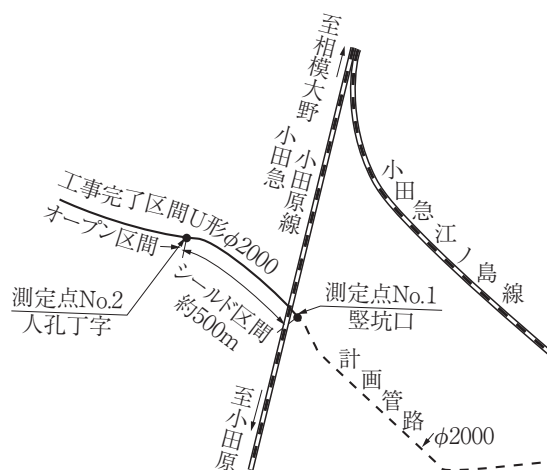


図7 現場付近の状況

(2) 調査結果

管対地電位測定の結果、迷走電流の影響は認められなかった。(図8、図9)

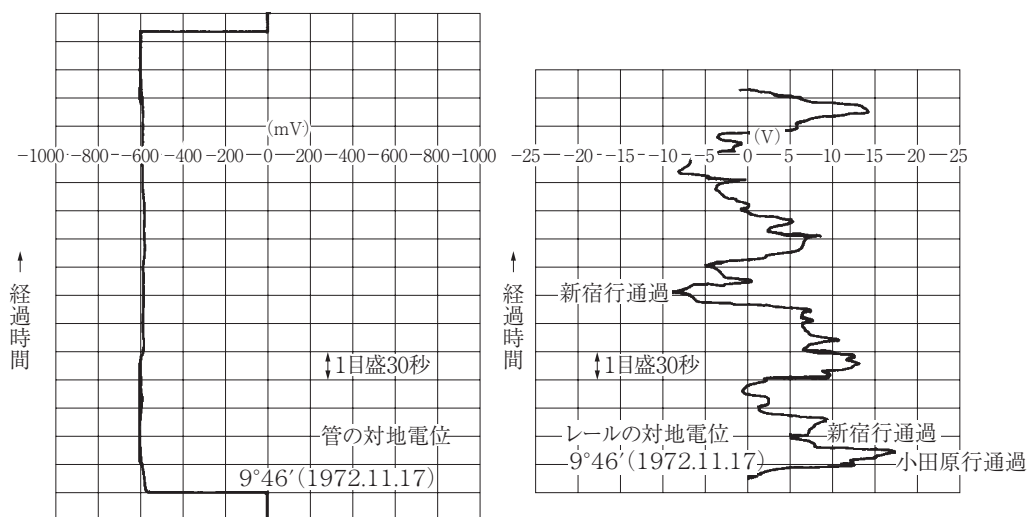


図8 B水道企業団呼び径 2000 ダクトイル鉄管対地電位
およびレール対地電位の同時測定結果

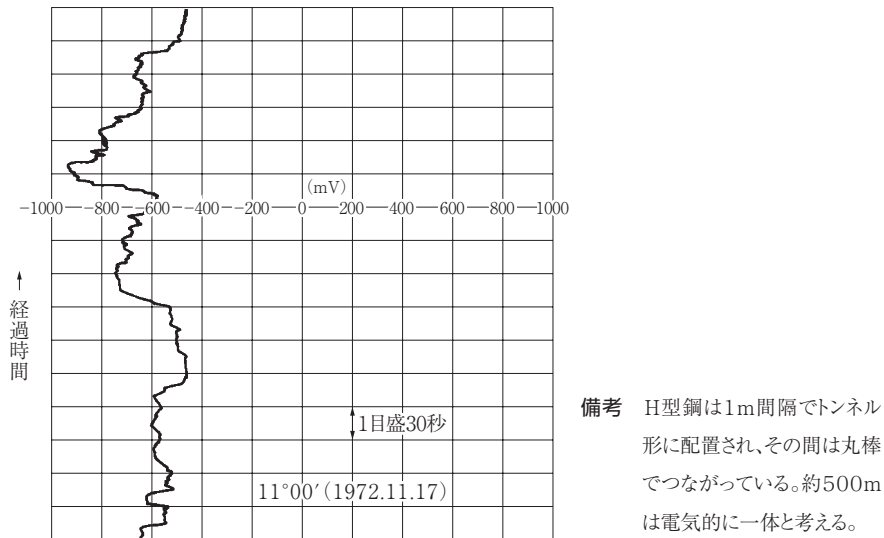


図9 B水道企業団トンネル内H型鋼の対地電位測定結果

(事例－3) C水道企業団

(1) 配管状況

- 1) 呼び径：250
- 2) 管種：A形ダクタイル鉄管
- 3) 布設場所：ヒューム管内配管
：洗車場近辺、軌道9条横断

(2) 調査結果

布設後21年目の調査で管対地電位測定の結果、迷走電流の影響は認められなかった。

(事例－4) D流域下水道

(1) 配管状況

- 1) 呼び径：900
- 2) 管種：U形ダクタイル推進管
- 3) 布設場所：JR 操作場、軌道7条横断

(2) 調査結果

管対地電位測定の結果、迷走電流の影響は認められなかった。

以上の諸例で示されるとおり、ダクタイル管路は直流電流により運行される電車の近傍に埋設された場合でも、その迷走電流による電食の影響を受けにくくなっています。

なお、このような迷走電流の影響が考えられる場所では、自然腐食に対する防食も兼ねて、ポリエチレンスリーブの採用を推奨します。

問－５ 耐震管のボルト・ナットだけが何故ステンレス製なのですか。

答 ダクタイル鉄管の継手部に用いるボルト・ナットは、極めて特殊な用途の場合を除くと、強度的にはダクタイル製のものでもステンレス製のものでも使用可能です。耐震管は、K形などのメカニカル継手よりも後年に開発され、継手に伸縮および離脱防止という高機能を有しており、ボルト・ナットについてもより高い耐食性を有するステンレス製のものが標準になっています。近年では、耐震管以外の管にも、合金製やステンレス製のボルト・ナットが使用される場合もあり、今後、各事業体の要望に合わせて使い分けられていくものと考えます。

問－６ ステンレス製のボルト・ナットを使用した場合、異種金属の接触によるダクタイル鉄管の腐食の心配はないですか。

答 ステンレス製ボルトナットの表面積に比べてダクタイル鉄管の表面積は大きいため、異種金属接触腐食は問題のないレベルです。

(1) 異種金属接触腐食について

二つの異なる金属が土壌中や水中などの電解質中で電気的に接すると両者の電位の違いにより、電位の低い方の金属の腐食が促進されます。この現象を異種金属接触腐食といいます。

この腐食に影響する因子は、両金属の表面積比や電位差、電解質の電気伝導度、温度、pH などがありますが、金属側の因子で影響の大きいものは、両金属の表面積比です。

(2) 金属の表面積の影響

一般に、電位の異なる二つの金属を電気的に接触させた場合、電位が低い方の金属の腐食量 P は、電位の低い金属の表面積 A_a 、電位の高い金属の表面積 A_c 、電位の低い金属単独時（より電位の高い金属を接触させない場合）の腐食量 P_o を用いて式(1)で表されます。

$$P = P_o \left(1 + \frac{A_c}{A_a} \right) \dots\dots\dots (1) \text{ (注)}$$

ここで、 P : 腐食深さ、

P_o : 金属片単独時（より電位の高い金属を接触させない時）の腐食深さ

A_a : 電位の低い金属の表面積

A_c : 電位の高い金属の表面積

(注) H.H. ユーリック：腐食反応とその制御（第3版）,P105（産業図書,1989）

ここで、鉄片（ A_a ）とステンレス片（ A_c ）の表面積を以下のように変えて式(1)に代入し、表面積の違いによる異種金属接触腐食量を計算すると、図10のようになります。

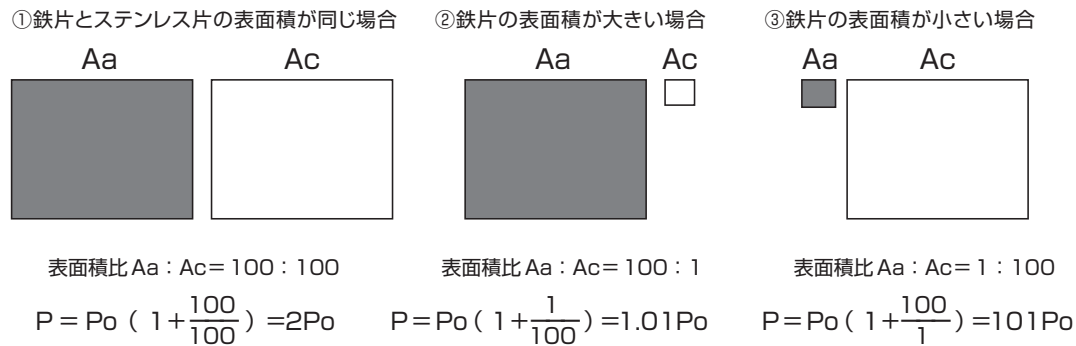


図 10 表面積の違いによる異種金属接触腐食の例

(3) ダクタイル鉄管本体への影響について

ステンレス製ボルト・ナットを使用した場合、ステンレス製ボルト・ナットの表面積に比べてダクタイル鉄管の表面積は大きい場合、それらの表面積比は図の②に近いと考えられます。図の②に示すように 100 分の 1 の表面積をもつステンレス片を電氣的に接触させた場合、鉄片の腐食量は、ステンレス片を接触させない鉄片単独時とほぼ同じ (1.01 倍) です。したがって、ダクタイル鉄管に表面積の小さいステンレス製ボルト・ナットが接触した場合、ダクタイル鉄管の腐食はそれを接触させない場合とほぼ同等であることから、ダクタイル鉄管の腐食に及ぼすステンレス製ボルト・ナットの影響は少ないものと考えられます。

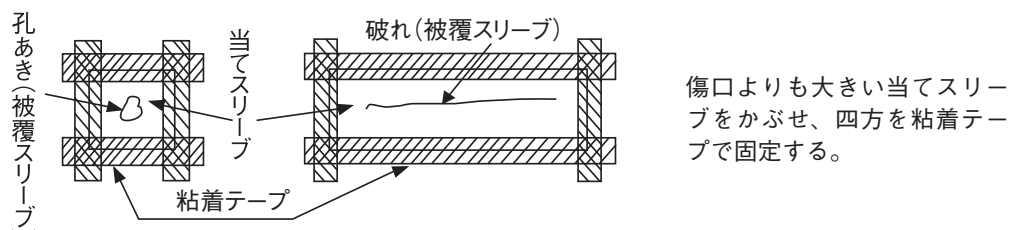
問－7 ポリエチレンスリーブに穴が開いても大丈夫ですか。

答 ポリエチレンスリーブによる防食は、以下の面で有効であることが判っています。

- ・管が周囲の埋設土壌と直接接触することを防ぐ。
- ・管の周囲の環境を均一化する。
- ・ポリエチレンスリーブ内へ水が侵入しても停滞し、腐食に必要な溶存酸素の供給を防ぐ。

従って、現地施工時や他工事などの際に軽微な損傷が生じて、これらの有効性が大きく損なわれることはありません。ただし、損傷の程度が激しい場合や、地下水が多く、入れ替わりが激しい場合などでは、損傷部分を適切な方法で補修する必要があります。

なお、2002 年 10 月に規格が改訂され、損傷を受けにくいタイプのポリエチレンスリーブに改良されています。



傷口よりも大きい当てスリーブをかぶせ、四方を粘着テープで固定する。

図 11 スリーブの補修方法

問－８ ポリエチレンスリーブの耐久性はどうか。

答 ポリエチレンスリーブの材料であるポリエチレンは、エチレンを重合して製造されます。ポリエチレンは、軽くて、透明性があり、絶縁性もよく、プラスチックの中でも安価です。また、耐水性、耐酸性、耐アルカリ性にも優れています。ただし、熱や光の作用で劣化を起しやすいため、ポリエチレンスリーブを保管する時には直射日光などを避けるよう注意が必要です。

地中における耐久性については、これまでに多くの実績があります。

ポリエチレンスリーブの調査例を図 12、図 13 に示します。埋設当時の規格値は、引張強さ 10MPa 以上、伸び 250% 以上であり、物性値は少しずつ低下しているものの、埋設から 41 年後においても、当時の規格値を満足しており、実績の一例を下表に示しますが、地中に 20 年間埋設されていたポリエチレンスリーブは掘り上げ後も当時の規格値を満足しており、優れた耐久性を示していました。

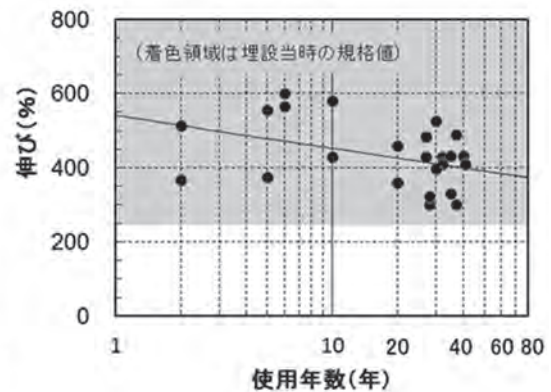
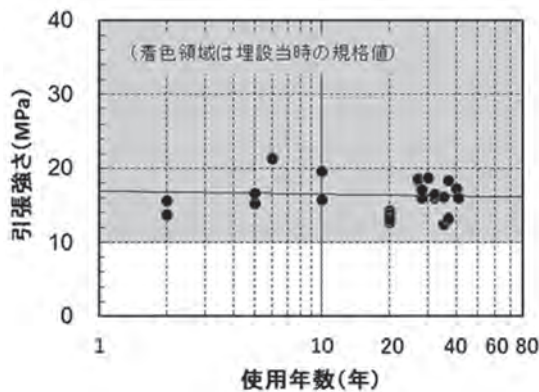
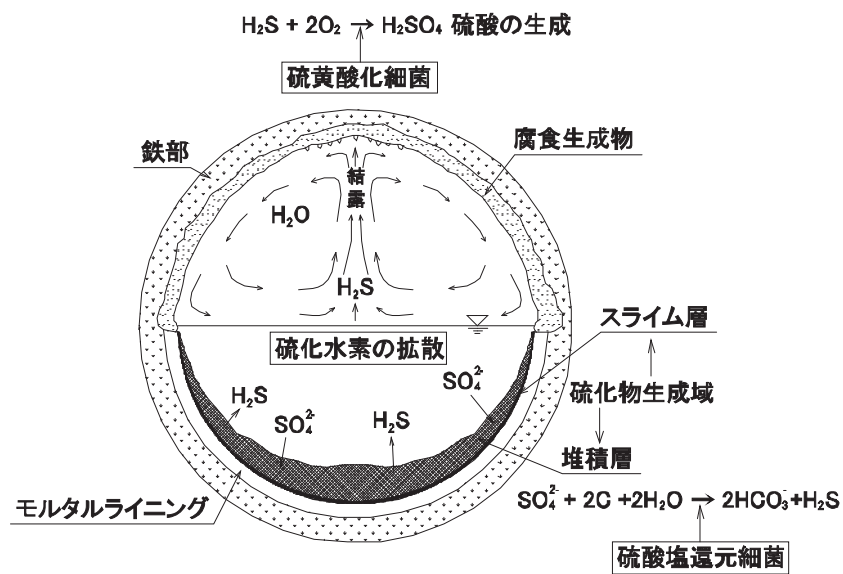


図 12 ポリエチレンスリーブの使用年数と引張強さ 図 13 ポリエチレンスリーブの使用年数と伸び

問－９ 下水道中の硫酸腐食はどのようなメカニズムで起こっていますか。

答 コンクリート（モルタルライニング）の硫酸腐食は、以下のように起きています。

- ① 嫌気性状態の下水中および汚泥中での硫酸塩還元細菌による硫酸塩 (SO_4^{2-}) からの硫化水素生成
- ② 液相から気相への硫化水素 (H_2S) ガスの放散
- ③ 密閉されたコンクリート（モルタルライニング）構造物の気相部表面の結露水中での好気性の硫黄酸化細菌群による硫化水素からの硫酸生成
- ④ 硫酸とコンクリート（モルタルライニング）中の成分の反応によるコンクリート（モルタルライニング）の劣化



[出典：下水道圧送管路における硫酸腐食箇所の効率的な調査技術導入ガイドライン（案）
（国土交通省 国土技術政策総合研究所）]

図 14 コンクリート（モルタルライニング）の硫酸腐食のメカニズム

写真集



海水浸せぎしたモルタルライニング
(浸せき期間：1.5 年) 異常なし



海水浸せぎしたコールタールエナメルライニング
(浸せき期間：6 ヶ月) フジツボにより侵食



ポリエチレンスリーブ被覆
海底を浚渫した埋立地に埋設されていた
呼び径 600 ダクタイル鉄管 (埋設期間：7 年間)



左記の管のスリーブをはがした状態 (管およびボルト・ナットに腐食はなかった)



海成粘土層 (大阪府堺市)



海水を通水した呼び径 1800 モルタルライニング
ダクタイル鉄管 (通水期間：4.5 年)



サウジアラビアの上水道管
(T形呼び径 1100 ダクタイル鉄管)



39年間使用された粉体塗膜
(異常認められず良好、呼び径200直管)



30年間使用された粉体塗膜
(異常認められず良好、呼び径100継ぎ輪)



35年間使用された粉体塗膜
(異常認められず良好、呼び径150異形管)

技術資料の内容は、製品の仕様変更などで予告なく変更される場合があります。当協会のホームページから最新の技術資料がダウンロードできますので、お手持ちの技術資料をご確認ください。

一般社団法人

日本ダクタイル鉄管協会

[http://www. jdpa. gr. jp](http://www.jdpa.gr.jp)

本部・関東支部	東京都千代田区九段南4丁目8番9号（日本水道会館） 電話 03（3264）6655（代） FAX 03（3264）5075
関西支部	大阪府中央区南船場4丁目12番12号（ニッセイ心斎橋ウエスト） 電話 06（6245）0401 FAX 06（6245）0300
北海道支部	札幌市中央区北2条西2丁目41番地（札幌2・2ビル） 電話 011（251）8710 FAX 011（522）5310
東北支部	仙台市青葉区本町2丁目5番1号（オーク仙台ビル） 電話 022（261）0462 FAX 022（399）6590
中部支部	名古屋市中村区名駅3丁目22番8号（大東海ビル） 電話 052（561）3075 FAX 052（433）8338
中国四国支部	広島市中区立町2番23号（野村不動産広島ビル） 電話 082（545）3596 FAX 082（545）3586
九州支部	福岡市中央区天神2丁目14番2号（福岡証券ビル） 電話 092（771）8928 FAX 092（406）2256