



特集記事・2

寿命100年に挑む水道管

鉄鋼材料としての水道管の耐久性

Durability of Cast-iron and Steel-pipes

網野信重

(株)日本水道設計社 部長

Nobushige Amino

1 はじめに

IWA (国際水協会) は、1999年9月、IWSA (国際水道協会) とIAWQ (国際水環境協会) が合併して発足したが、第6回目のIWSA国連会議の場では既にテーマとして水問題が取り上げられ、いずれも水資源の開発はもとより、水資源の不足が強調されはじめた。

日本においてもその具体策な一歩として、昭和51年9月に厚生省環水第70号で有効率向上を目標とした「水道の漏水防止対策の強化について」の通達はまさに国際的な動きに添ったものとして、漏水に対する経済的負担から水資源の重要性をわきまえ、具体的な漏水防止対策の研究開発に創意を傾注することを意味した。水道管の漏水原因は多義に及ぶが、なかでも腐食が主因とされる漏水事故が多く存在するとみられる。

腐食は熱力学的に自然な反応であり、かつ電荷の移動を伴う電気化学反応である。土壌抵抗を支配する因子として土壌の成分・組成、含有水分、温度、通気性などがあるが、これらは電荷の移動すなわち腐食反応を支配している。土壌抵抗の低下による極部電池作用 (Local cell)、ガルバニック作用 (Galvanic Action)、そしてマクロセル (Macro Cell) などによる各種腐食が加速される例をこれまでの調査資料をもとに、モデル実験等に若干の考察を加えて水道管に固有の腐食形態の一面を解説する。

2 水道事業と配管ネットワーク

水道界の最近の主な課題は、施設の耐震化、施設更新、技術者養成であり、これに続いて、施設の高機能化、ダウンサイジング、環境・省エネルギー等が挙げられている。これら課題は全て社会インフラの「持続性」に関連している。水道事業は施設産業とも言われ、水道全施設資産価値に対する配管ネットワークの占める割合は表1 (水道統計平成20年度版) のとおり凡そ75%である (表1)。配管は耐震強度など強度面の要求から資材として鑄鉄管、鋼管、ステンレス管等の鉄鋼材料が用いられる。そのため、必然的に水道管の腐食は避けられないものとなっている。

因みに、水道管の主要鋼材は、鑄鉄管、鋼管であり、その使用割合は表2 (水道統計20年度版) のとおり凡そ95%、5%で

表1 水道施設別費用割合

水道施設名	施設費		
	金額 (千円)	%	
貯水施設費	19,030,707	2.3	
取水施設費	18,908,990	2.3	
導水施設費	14,300,952	1.8	
浄水施設費	115,044,855	14.2	
送水施設費	43,364,193	5.3	
配水施設費	550,149,850	67.9	小計 75%
その他	50,402,437	6.2	
計	811,201,984	100	

水道統計 (平成20年度版)

表2 鑄鉄管と鋼管の布設延長割合

管種	導水(m)	送水管(m)	配水管(m)		計(m)	比率 (%)
			本管	支管		
普通鑄鉄管	845,137	1,244,312	3,226,432	15,899,073	21,214,954	
ダクタイル鑄鉄管	5,288,495	13,696,706	39,893,799	278,375,726	337,254,726	95%
普通鋼管	986,797	2,028,576	2,905,369	10,519,999	16,440,741	
ステンレス鋼管	11,508	30,130	93,197	397,100	531,935	5%
水道鋼材延長	7,131,937	16,999,724	46,118,797	305,191,898	375,442,356	
水道管総延長	9,705,507	20,373,763	68,420,458	606,902,640	705,402,368	

水道統計 (平成20年度版)

ある(表2)¹⁾。

経年化した鋼管・ダクトイル管の実態の報告例は皆無に近いほどである。これは、法定耐用年数が40年とされていても水道管の埋設環境によっては、その法定耐用年数の遙か以前に腐食漏水に至ったり、あるいは逆に100年に至る老朽管であっても水道管としての機能を十分果たし得る管材も存在している。それほどに鉄鋼材料からなる配管ネットワーク環境は一元的ではない。

「寿命100年に挑む水道管」を考えるには、素地の鉄鋼と主に高分子材料からなる被覆材からなる複合材料としての配管の耐久性を単体で評価するだけでは十分ではない。単体で評価される水道管の寿命はすでに100年を超えたものとなっているであろう。

配管とそれを取り囲む環境、システムおよびそれが設置されるまでの施工過程までを含めたもっとグローバルな環境を取り入れて考えるべきかと思う。ここで、「グローバル環境」とは、送配水管ネットワーク全体の埋設環境を指している。送配水管ネットワークの埋設環境、言いかえると、土質・土壌成分、地下水、対地電位、微生物等である。さらには施工手順施工管理などが含まれる。

3 水道管の腐食と原因調査

3.1 水道管の腐食事故の現状

埋設水道管の腐食原因は迷走電流による場合のようにその原因が明確な場合を除いては、単一の要因に結論づけることは難しい。多くの場合、腐食事故発生原因については必ずと言ってよいほど複数因子が介在し、相乗的あるいは段階的に母材に作用する。これらは、マクロな埋設環境因子が関与している。

3.2 腐食事故発生原因調査事例

このような背景から筆者らは神奈川県内の地域を限定して腐食事例1201ヶ箇所について表3に示す調査用紙によって腐食事例を収集することにより、現場経験者の主観的判断を交えて集約し腐食の実態を整理した²⁾。

調査時点では水道管の鉄鋼材料として、普通鋳鉄管、ダクトイル鋳鉄管、鋼管、白ガス管(亜鉛メッキ鋼管)、鉛管等が記載されているが、現時点では白ガス管、鉛管は採用されていない。調査結果から注目されるのは、これらの全ての配管材料において腐食漏水事故に至る経過年数が20年以内で多発している点である(図1)。この原因を解明すべく①水道管理埋設土壌の湿潤性、②管体腐食部の位置、③鋼材別腐食の形態、④土質別腐食事故発生率、⑤土壌成分分析等を行なった。

3.3 埋設土壌

埋設土壌の湿潤性(透水性)を定性的に、①極めて乾燥性、②降水時のみ滞水、③常時湿潤状態、④地下水面下の4段階に分類し、腐食事故の発生割合を土壌の状態別に調査した。その結果、鋳鉄管類(普通鋳鉄管、ダクトイル鋳鉄管)の凡そ60%は「降水時のみ滞水」が占めているが、鋼管、白ガス管、鉛管等では「乾燥性の土壌」でも腐食事故が発生している。

表3 調査用紙

Table 2

所属課主任	課長	主任	整理番号	—
-------	----	----	------	---

埋設管腐食環境調査 事例収集 用紙

次の項目の1~12についてお答え下さい。

No	項目	調査内容
1	事故現場の住所	市 町 区
2	事故発生年月日	年 月 日
3	漏水管布設年月日	年 月 日
3	管種(該当項目を○で囲む)	F C I P D I P S P G P L P C P ()
3	口径(該当項目を○で囲む)	13 20 25 40 50 75 ()
4	地形係数 起伏含水等について (該当項目の記号に○印)	a 平地で地下水等の影響を受けず、きわめて乾燥性である。 b 地下水位が低く、常時乾燥しているが降水時には滞水する。 c 地下水位が高く、常時湿潤状態である。 d 地下水面下でしかも流水がある。
5	土質係数 粒経分布による (該当項目の記号に○印)	a 砂質(主として砂質ローム系) b ローム質(主として粘土質ローム系) c 粘土質(主として粘土質) d 岩石・軽石・土塊等の混入がある。
6	周辺の地域環境 (該当項目を○で囲む)	鉄道 変電所 高場 学校 幼稚園 高圧線空中ケーブル 下水道 電々 東伝 ガス 排水施設 () 舗装の状態(コンクリート・アスファルト) ()
7	腐食部分の位置 (該当項目を○で囲む)	a 直管部分の上面 c 曲管部分の上面 b 直管部分の下面 d 曲管部分の下面
8	腐食部分の色	a 茶褐色 b 暗褐色 c 白濁食 d ()
9	腐食部分の様子 その他の意見	a 総体腐食 b 孔食 c (溝食われ) d ()
10	腐食ヶ所の位置	()
11	あなたの考える腐食原因	()
12	腐食状態表示図	()

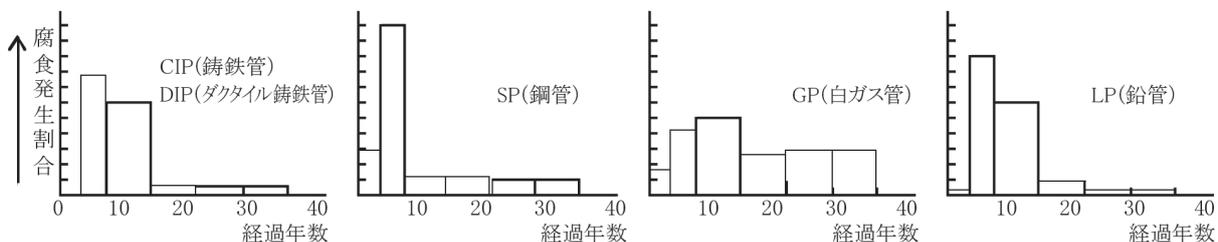


図1 経過年数による腐食漏水事故の発生割合

また、全管種とも腐食事故の80%は「通常乾燥状態」とする埋設環境条件下で発生している。

表層地質図(前国土庁)を用いた地質別腐食事例調査では、地区の土質別腐食性評価を示したもので、土質(堆積形態別)・管種別に単位管路延長当たりの腐食発生率を比較したもので、これより、未固結土壌(m(泥)、s(砂))は、固結土壌(sm(砂岩・泥岩互層)、smt(砂岩・泥岩・凝灰岩互層)、cg(礫岩))に比較して凡そ7倍の腐食性を有する結果となっている³⁾(図2)。

調査区域は、昭和42年頃から送・配・給水管の漏水修理状況を継手、折損、破損、電食、腐食と原因別に集計している。これより事故全体の腐食の占める割合は20～30%程度であるが、この他にも腐食減肉による強度低下を副次的原因とする折損・破損事故も広義には腐食事故とすることができる。これを含めると事例の過半数が腐食による損傷とみなせる。

また、調査事例として過去5年間の平均値を月別にプロットし、他の集計単位と合わせて3ヵ月毎の平均をパーチャートで図化したもので、これより7月と9月(夏季)2点で腐食事故件数が最大値を示す傾向がある。月別温度についても、降水量と同じ方法で作成したもので同傾向を示している。

7月と9月の降水量についてはほぼ同程度であるが、7月の降水日数は9月より多いので、1回の降水量は9月が大きい。7月のように10mm程度の間欠的降水のほうが浸透水が土壌を飽和状態に長期間保つため腐食性が大きい。これは降水間隔を変えて腐食減量を測定したモデル実験によっても実証される⁴⁾。

温度と事故件数については、腐食事故のピークが気温の上昇に対して1ヵ月程度遅れるのは、大気温が地表を暖め、地表の温度が給水管のレベルに達するまでの期間として考えられる。

4 水道管材質と被覆材・塗覆材の変遷

4.1 鋳鉄管材質と内外面塗覆装の変遷

鋳鉄管の母材は、大正3年に普通鋳鉄として誕生した。以来、昭和8年に片状黒鉛鋳鉄が、続いて昭和37年頃より耐食性に優れるとされる球状黒鉛鋳鉄(ダクタイル鋳鉄管)が誕生し、現在に至っている。防食外面塗装は、昭和30年頃よりコールタール系塗装が、昭和40年頃よりタールエポキシ樹脂塗装が、そして昭和50年頃より合成樹脂塗料が使用されている。また、昭和63年からはタールを含まない合成樹脂塗料が採用され、呼び系250以下の直管は亜鉛系プライマが施され耐食性が高められている(1992年、JWWAG113、114およびJWWAK139で規定)。

現行の外面塗装は母材に対して亜鉛系合金(Zn-Sn-Mg)を溶射し、皮膜を形成してその上に合成樹脂塗料層を設けている。これにより、ポリエチレンスリーブを被覆せずに長寿命化の使用が期待できるとしている。また、防食内面塗装は、昭和30年頃よりコールタール系塗装やモルタルライニングが用いられているが、コールタール系塗装については昭和40年に廃止されている。

現行の内面塗装としては、昭和50年以降エポキシ樹脂粉体塗装(JWWAG112-2004)規格となっている⁵⁾。

4.2 鋼管材質と内外面塗覆装の変遷

鋼管の母材は、昭和32年に水道用塗装鋼管としてJIS化され、昭和43年には水道用塗覆装鋼管としてJIS改正され、続いて平成19年水輸送用塗覆装鋼管としてJIS改正され現在に至っている。防食外面塗装は、古くは昭和8年頃よりアスファルトジュート巻き、昭和43年よりコールタールエナメル(JIS G 3492)が採用され、昭和53年頃よりコールタールエナメルに代わってポリウレタンJWWA K161(H11)、ポリエチ

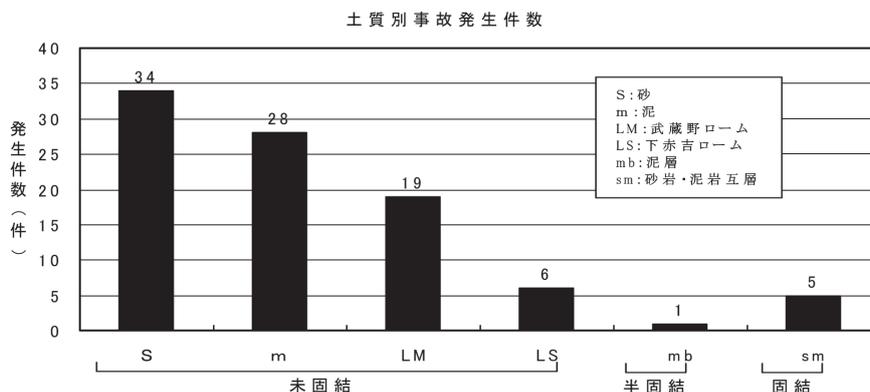


図2 土壌(堆積形態別)の腐食性評価結果

レンJWWA K162 (H11) が誕生し現在に至っている。

防食内面塗装は、昭和28年頃よりアスファルト系コーラターエナメル、昭和35年頃よりタールエポキシ系樹脂塗料が使用され、平成16年には無溶剤エポキシWSP・H7 JWWAに規格化、平成20年に再度JWWAK157として改正され現在に至っている。

これらの母材、内外面塗覆装材料の変遷からもわかるように水道用鋼材は素地鋼材の防食を目標に改良が進められてきた。鋼管の外表面被覆にはプラスチック（ポリウレタン）が用いられ、内面にはエポキシ樹脂が用いられている⁶⁾。

溶接部の耐食性を保証するような長寿命被覆鋼管の開発が終局的には期待されるが、短期的には施工基準あるいは被覆の養生法の推奨と施工者末端への指導普及が必要である。

5 鉄鋼材料に与える水道水質項目（内面腐食への影響）

水道管の内面の腐食環境は水道水である。水道水質は厚生労働省令である水質基準を満たさなければならないから比較的一定した水環境であるといえる。水質基準は健康安全を主眼として定められるものであり、一部の項目を除いては配管の耐食性に関心が低い。

水質基準項目（50項目）のうち強いて耐食性に関連する項目として①pH値5.8以上8.6以下、②塩化物イオン200mg/L以下、③硬度300mg/L以下などがある。更に基準には含めないが管理目標設定項目として27の項目がいわば推奨値として示されている。27項目のうち耐食性に関連するものとして④残留塩素1mg/l以下、⑤遊離炭酸20mg/L以下および⑥腐食性項目としてランゲリア指数-1以上などが示されている。

残留塩素については管理目標設定項目では臭気上からくる水質管理目標設定項目（推奨値）として1mg/L以下と記されるがされるが、水道法施行規則では、給水栓水の遊離残留塩素として0.1mg/L以上、給水栓水の結合性残留塩素として0.4mg/L以上含まれていなければならない。オゾン処理など新しい殺菌法が提唱されているが、日本の水道水では塩素殺菌は法規上避けては通ることはできない。これは微量ではあるが一部の配管材料に対して侵食的な要因となる。

水質基準でpHの許容範囲が $5.8 < \text{pH} < 8.6$ とされるのは暗黙のうちに水道水は炭酸塩の酸塩基平衡によりpHが決定されている水でなければならないことを意味している。ここで塩基は重炭酸イオン HCO_3^- であり、酸は H_2CO_3 である。後者の酸 H_2CO_3 は水質の分野では遊離炭酸と呼ばれ、これが20mg/L以下に抑えることが腐食抑制の観点から推奨されている。炭酸塩平衡は炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）の析出と関連して配管防食の視点からも重要である。ここで飽和指数ある

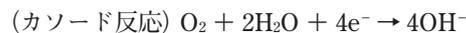
いはランゲリア指数が導かれる。水質管理目標設定項目では腐食性と定義されている。

淡水腐食の古典的手法による制御は CaCO_3 保護皮膜形成の制御を含めた炭酸塩平衡の管理を意味していた。プラスチックライニング鋼管が主流となった現在、鋼管の腐食対策は端面あるいは接合面で裸の金属面が露出されないよう樹脂等で被覆することが肝要である⁷⁾。

6 金属腐食のメカニズム

6.1 均質な腐食反応：電気化学反応

金属の腐食は電気化学反応により進行するとされる。鉄の腐食を考えてみよう。通常の中性環境での鉄の腐食は鉄の溶解反応に対応するアノード反応と溶存酸素の還元反応に対応するカソード反応に分解され、両者はバランスしているものと解釈される。アノード／カソードはそれぞれ陽極／陰極と訳されることもあるが、電気的極性と混同されやすいので酸化／還元といった化学反応をもとにした概念であるアノード／カソードを用語として用いるのが適切である。



アノード部とカソード部が同じ場所で起きているとする考えもある。すなわち表面の同じ場所が2役を担うとするのである。他方 α -Fe鉄相がアノードに、またグラファイト（炭素）相あるいは Fe_3C 相がカソードとミクロ的ではあるが異なる場所がアノードおよびカソードに分離しているとする考えもある。マクロ的現象で捉えると両者は同じ結果を与える。

均質腐食における腐食減量はmm/年あるいはmdd (mg/dm²/day) のような単位で表されてきた。ちなみに大気からの酸素で飽和された水環境に置かれた鉄あるいは低合金鋼の腐食速度は、水質等の影響は小さく、0.1mm/年程度であるとされる。このようなモデルは実験的に求められる腐食評価では現在でも有効なモデルである。一方で配管のプラスチック被覆が常識化しているマクロな腐食を記述するには有効であるとはいいがたい。一般に構造物の腐食評価については異なるモデルの構築が必要である。いずれのモデルにおいても、マクロ的にアノードとカソードが分離しマクロな電流が管内を流れて腐食を加速するとするメカニズムである。塗膜のキズ部はマクロなアノードとなるに絶好な場所を与える。

6.2 不均質な腐食反応系

6.2.1 異種金属接触腐食（ガルバニ腐食）

金属はそれぞれに固有な電位を有する。異種の金属が接触すると電池が形成され、電位が低い（卑な）金属はアノード

となり腐食される。この現象を異種金属接触腐食という。俗に電食とも言われるが誤用である。水道でよくみられる異種金属接触系としては低合金鋼（鋳鉄）／ステンレス、低合金鋼（鋳鉄）／銅合金などをあげることができる。

6.2.2 マクロセルの形成

実験室スケールの試片の腐食評価に関してはマイクロな電気化学反応に基く解釈で十分であるが、土中埋設管やその他の鋼構造物の腐食解析には異なる視点が必要である。すなわち配管や構造物がアノード部とカソード部に場所的に分離してしまう状況が実現することがよくある。このような状態をマクロセルの形成という。異種金属が接触している状況でアノードとカソードの分離は理解が容易であるが、一連の同材質の配管でも部分的に置かれる環境が異なる場合にはマクロなアノード部とカソード部の分離が起こりマクロセルを形成する。

局部アノード部とカソード部が1m以下あるいは数メートルの距離をおいて分離している状態をマクロセル（大電池）と呼ぶ。電池の電極間を接続する電線の役割を配管そのものが担っている。絶縁が完全なプラスチックライニング管はかえってマクロセル形成に好都合な条件を与える場合もあることに留意すべきである。

6.2.3 通気差腐食

土質の異なる土壌を貫通して配管が敷設されているとする。ここで土壌Aは砂地のような通気の良いものであり、Bは粘土質でかつ地下水位が浅く常に濡れた状態にあるとする。AおよびB域はそれぞれ好気域および嫌気域と呼ばれる。好気域では電位およびpHともには高くなる傾向があり、鉄は不動態化しやすくなる。これに対して嫌気部は酸素濃度が低く、電位が低くかつpHは低下する傾向にあり、活性な腐食が保持される。このような環境でしばしば硫酸塩還元菌（SRB）が見出される。硫酸塩還元菌（SRB）は鉄の電位を更に低下させる。好気性部Aおよび嫌気性部Bにライニングのキズがあったとすると配管金属内ではAからBに向かって管内電流が流れBは電流の流れ出し口になる。すなわちこの部分が局部アノードとなり、最悪の場合穿孔に至る。

SRBの存在そのものが腐食を異常に加速するとする考えもあるが、SRBにより生成する硫化鉄 F_2S 皮膜もある程度の保護性がある。SRBが見つかったからと言って、それが孤立して存在するときにはそれほど驚くには当たらない。要はこの部分が好気性部とカップルされているかどうかが問題である。

6.2.4 CS（コンクリート・鉄筋）マクロセル

鉄筋コンクリートを鋼配管が貫通したときにしばしば見られ

る異常腐食現象である。コンクリートを鋼管が貫通するとき鋼管はコンクリート内鉄筋と電氣的接触を持つ。コンクリートは強アルカリ性であるため、鉄筋は通常不動態状態にある。これがコンクリート中で鉄筋が耐食性を示す理由でもある。コンクリート内鉄筋は不動態化のため高い電位を示す。このためこれと接する埋設管の間でマクロセルを形成し、埋設部で異常侵食がしばしば発生した。この現象は配管施工業界でも広く認識されることとなり、埋設配管がコンクリート構造部物を貫通する場合、配管に絶縁スリーブを置くなど鉄筋との絶縁施工が常識化しつつある。

6.2.5 迷走電流腐食、干渉（電食）

地下鉄など都会を走る電気鉄道は直流電源駆動であり、架線側が（+）にレールが（-）に接続されている。鉄道モーターを駆動した電流はレールを伝って変電所へ戻るわけである。都市内に張りめぐらされた配管が電鉄軌道と交差する箇所あるいはその近傍で配管は電鉄の電流の一部を拾いやすい。そして電流の出口となる部分で配管は異常腐食を起こす。類似する現象として干渉がある。これは全く別の独立した配管系に施されていた電気防食の影響を受け（干渉を受け）、自分の配管が思いもよらぬ場所で被害を受ける例である。これは被害を受けた配管が他人の電気防食電流の短絡路を与えてしまい、その電流の出口で異常腐食を示すものである。

迷走電流腐食の診断とその防止については電気防食会社等の専門家に任せるのが望ましい。

7 鉄鋼材料に与える土壌環境因子（外面腐食への影響）

塩化物イオンや硫酸イオンは鉄に対して侵食性物質であるとともに土壌抵抗を低下させ、マクロセル電流や迷走電流を通し易くすると考えられ、できるだけ排除するのが望まれる。これらは海水起因のことが多い。また、水道事業体では配管周りに敷設する埋め戻し砂はこれらのイオン含有の少ない山砂や再生ダストなどを用いることを条件としている。

土壌pHと言っても土壌と接する水分のpHであるから、水道水に於けると同様、基本的には炭酸塩平衡がこの値を支配している。水道水が塩素殺菌された酸化性な水でなければならぬのに対して土壌の酸化性の目安は酸化還元電位（ORP）で表されることが多い。ORPは高い（貴であるとも言う）ほど電気分解との類推から、金属に対し侵食的であると考えられがちであるが、配管系では逆であり、低い（卑であるとも言う）箇所ほど危険である。これはORPが卑な場所は通気差電池あるいはマクロセルにおいてはマクロアノードとなっていることが多いからである。特に局部的に嫌氣的に

なっている箇所では硫酸塩還元菌が存在し硫化物腐食をひき起こすこともある。

7.1 土壌成分

埋設管は常に土壌と接し、土の拘束力によって支持され、その機能を果たしている。その反面、土壌は水分により浸出作用を受け腐食性物質の供給源ともなりうる。

土壌はCa、Mg、などのアルカリの供給源であり、本来金属の耐食性に寄与する成分を放出している。塩化物イオン(Cl⁻)や硫酸イオン(SO₄²⁻)など侵食性成分は海水など一般土壌以外の因子に由来する。

神奈川県内調査32点につき、水道管理設置位置(0.5～2.0m)付近の土壌を採取し、X線回折による化合物同定および蛍光X線による元素分析を行なった。神奈川県南部については、石英(Quartz SiO₂)、灰層長石(Oligoclase)、正長石(Orthoclase KAlSi₃O₈)等が主成分であり、神奈川県中央部では上記に加え、緑泥石[chlorite (MgFe^{II}, AlFe^{III})₆(AlFe^{III}Si)₄O₁₀(OH)₈]、カリソーダ沸石(Potassium Natrobitite KNaAl₂Si₃O₁₀2H₂O)等の化合物が同定され、蛍光X線からは総体的に、Al、Si、Fe、が主成分(数パーセント以上)と、Ca、Mg、Ti、Sr、が微量成分(10～0.01%)として検出された。しかしながら塩化物イオン、硫酸イオン、pHと配管侵食性に相関は認められない。ハロゲン元素が存在する場合は、鉄表面は一時的に不動態化し電位は高くなっても、電位は反転しながら腐食は進行する。これは、土壌粘土鉱物の分析値からの評価であるが、ごく一般的なものであり耐食性との関連が認められない。

土壌中にはこの他に植物起因の有機酸などにより低いpHを示すこともあるが、腐食性との関係は認められない。このように、土壌分析値そのものより次に述べる土壌の環境因子を中心として話を進めた方がより実際的である。

7.2 土壌抵抗率

土壌中には、降水や土中水により溶解される物質があり、電気伝導性をもつ電解物質を一定量以上含み、適宜水分を含めば土壌抵抗率は低下する。この土壌抵抗率を支配する水分の基本量としては透水係数、貯留係数、水分保持特性、地中温度等があげられ、不飽和状態の砂利、砂、ロームの代表的な土質につき、降水による土壌抵抗の変化を銅板(5×5cm、40cm間隔)を用いてモデル的に実験すると土中水が重力水として下層に浸透してゆき、ある水平断面を通過する時間を表わし、腐食性を評価する意味で、便宜的に水分保持特性を評価することができる。この時間帯で、電池作用が最も大きく表われ、再び土壌抵抗を上昇させながら腐食反応量も漸減してゆく。自然界ではこの様に、土壌抵抗を季節的に上下させ、

温度条件と合わせて反応量を制御して腐食を進行させてゆくのである。

降雨など降水の約35%は地中に浸透すると言われ、降水と言う重力水の浸透により、土壌は初期含水率より飽和状態に近づき、ある一定時間これを保持してまたもとの不飽和状態に戻る。含水率の低い土中での管片腐食減量試験は長期を要するので鉄の初期状態における腐食をみるため輪切管を用いて砂中に埋設し、人工土壌水(NaCl、Na₂SO₄水溶液)により間欠的に降水させたモデル実験では、土壌の飽和、不飽和を頻繁に繰返す方が酸素の供給量も多く、常に飽和状態にあるので腐食減量は大となる⁸⁾。

7.3 マクロセル腐食形成しやすさの目安

異種帰属接触腐食あるいはマクロセル形成のしやすさの目安として最も重要な因子が環境(水あるいは土壌)の抵抗率ρである。海水の抵抗率は0.2Ωmであるのに対して典型的な水道水のそれは100Ωm(10kΩcm)程度である。土壌は土質や湿りの影響を受けるが、平均的には水道水程度と見て良い。

海水と水道水を抵抗率により単純に比較すると、海水は500倍も電流を流しやすいのであるから、異種金属間の電位差あるいはマクロセルの起電力が一定ならば腐食電流は500倍にもなる。またマクロセル電流の到達距離は500倍になる。単純な比較は誤解を招くこともあり注意が必要であるが、環境の電気抵抗率を上昇させることがマクロセル腐食防止対策として第一に留意する事項である。

腐食性土壌の評価手法としてANSI A21.5があげられる。ここでは土壌の抵抗率、pH、酸化還元電位、水分、硫化物の測定値に対して一定の係数をかけて評価点を得るとともに、その加算値から土壌の侵食性を判定するものである。

評価点が高いほど土壌の侵食性は大きである。測定項目のうち最も影響の大きい項目は抵抗率である。また酸化還元電位と硫化物は土壌のSRB生息環境と関係している。その評価点の加算値は土壌の侵食性に対する一つの目安を与えるものの、腐食速度を推計するには十分ではない。図3は、横浜市水

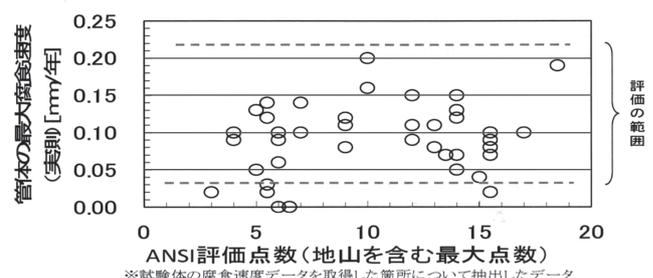


図3 ANSI評価点と管体腐食速度との関係⁹⁾

道局富岡線口径800mm管の漏水事故調査結果であり、ANSI評価点以外に周辺に分布する海成粘土層の存在も影響していることが判明している⁹⁾。

8 施工時における腐食対策と留意事項

8.1 配管工事時の損傷と修復

ダクタイル鋳鉄管(内面エポキシ樹脂粉体塗装)においては、切管端面(内外面)を面取り処理し、塗膜に損傷があればその部分を除去する。また、損傷部周辺をグラインダー等で研磨し、内面はダクタイル鉄管切管鉄部用塗料にて、外面は塗装補修用塗料にて補修する¹⁰⁾。また、接続部(ボルトナット)は必要に応じてステンレス製ボルトを使用している。

施工時は、それぞれの施工基準の留意事項によって管材入れ、布設(吊り下ろし、布設、接合)、塗膜等検査、損傷部手直し検査等が行なわれ、鋼管等溶接完了後の検査としての非破壊検査は、放射線透過検査又は超音波探傷試験により行なわれる。また、塗膜等の品質検査は塗膜厚保により異なるが、高電圧を印加するピンホール探知器等を用いる¹¹⁾。

8.2 環境抵抗率の改善

布設された管は、仕様書や設計図書どおりに位置、深さ等が施工されている必要があり、埋め戻し土砂の性状を確認し、搗き固めも重要な要素である。埋め戻し土砂は一般に塩分を含まない山砂を条件としていることが多い。その他、水位(地下水レベル)の管理も見逃せないが都市構造として輻輳した地下埋設環境等を考慮して、少なからず環境抵抗率の改善を図るべきである。

9 鉄鋼材料としての水道管腐食防食研究の方向性

9.1 水道事業者による調査研究

実際の配管ネットワークを管理運営する水道事業者は、日常、施設の老朽化、漏水そして更新を繰り返し、施設を維持管理している。昭和50年代の数年間、神奈川県企業庁では、実際の給水区域の実態をモニタリング方式を用いて調査し、土壌土質別、降水量別等についてその腐食性を評価している。

また、近年、横浜市水道局においては、市内に分布する海成粘土層由来の腐食漏水事故を決起として土壌の腐食性をより簡易に捕えることが可能な腐食センサー開発を目的に腐食進行度調査を開始している。これは、腐食センサーの種類として、①監視用試験体(重量減少法)、②モニタリング用試験体(電気抵抗法)を用いて行なうものである。小さな金属の

試験片による腐食減量測定や局所的な埋設環境のデータしか得られないという問題点はあるが、腐食マップとして整備することにより巨大施設の防食に資するデータベースへと発展するものと期待される。また、ANSI(米国規格協会による土壌評価手法)評価手法を用いることの適正という点について、調査結果から図3「ANSI評価点と管体の最大腐食速度の関係(実測mm/年)」を記しているが、当該調査地域内においてはANSI評価点によって腐食進行度を評価することは困難であるとしている。

9.2 防食技術の今後

先に述べたように、水道送配水施設ネットワークは、さまざまな土壌環境中に埋設されるため、腐食の危険性にさらされている。

電気防食法の適用方式には、流電陽極方式と外部電源方式とがあり、外部電源方式には更に電極の設置深度に応じて、不溶性陽極を比較的浅い地中(十数メートル迄)に埋設する浅埋電極方式と、比較的深い地中(百数十メートル迄)に埋設する深埋電極方式とがある¹²⁾。図4に深埋電極方式に於ける陽極設置の概念図を示す。

深埋電極方式は既に石油や天然ガスパイプライン等の防食、或いは都市ガスの高圧管の防食に用いられており実績もあるが、水道分野では限られた事業者で比較的大口径管に限って適宜使用されているに過ぎない。深埋電極方式は、①配管近くに電極を設置できない、②適当な箇所に複数個の電極を設置できない、③防食配管と電源あるいは電極との結線が必要とするため、溶接可能な鋼管に限られる等、水道管へ

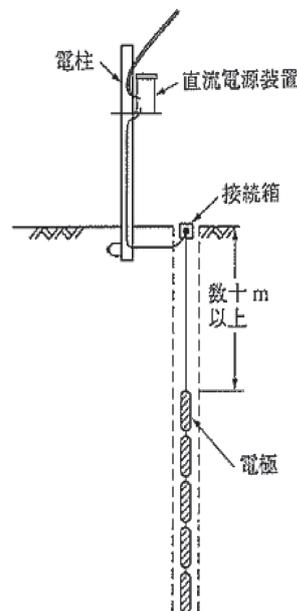


図4 深埋電極設置の概要図

の適用には問題点が指摘される。一方で近年の埋設配管は、①市街地特有の設置上の制約があるとき、②埋設管種が輻輳しているとき、③他の埋設管への干渉防止を考慮する必要があるときに、手法として優位性が認められる。

深埋電極による電気防食の設置費用は一般的な浅埋電極に較べて、電極設置部分のボーリング費用のみ凡そ30%～50%程度の増額であると評価され、その効果を考えると割安で効果的であるといえる。ガス管、特に高圧ガス管では深埋電極法が普及しており、その安全性も確認されていることから、今後は水道管においてもこの技術の普及が期待される。

10 おわりに

最新の塗覆装管を使用することにより、水道管システム全体の耐久性は確実に向上が図られてきたが、工場出荷時に内在していた欠陥あるいは施工時に受けた損傷を起点として穿孔に至る損傷事例も多く確認されている。塗覆装の絶縁が完全になるほど欠陥部へのマクロセル電流は集中し、穿孔に至る期間を短縮しかねない。素材単体としては寿命100年を達成しているにもかかわらず、システム全体としての寿命は欠陥の寿命に支配される。これを克服するには、適切な材料選定、欠陥の検出と補修技術の開発、施工仕様の確立が必要である。

本報は、鉄鋼材料としての水道管の耐久性評価から、水道事業者が配管ネットワークの管理・更新計画を検討するための基礎資料としてまとめたものである。前述したように素材とそれが使用される環境を包括したマクロな視点に立つことが重要であり、それに沿った調査研究をすすめることによ

り、「水道配管ネットワーク100年計画」が実現される。また、本解説が鉄鋼材料としての水道管を維持管理している水道事業者にとって更新計画の参考となれば幸いである。

おわりに本解説を纏めるにあたってご討議いただいたナカボーテックの小玉俊明博士に感謝いたします。

参考文献

- 1) 水道統計施設・業務編, (社) 日本水道協会, (2008), 512.
- 2) 網野信重, 佐々木力, 飯岡隆, 永谷岩男: 第31回全国水道研究発表会講演集, (1980), 70.
- 3) 網野信重, 下大蘭和仁: 第32回全国水道研究発表会講演集, (1981), 94.
- 4) 網野信重: 第28回全国水道研究発表会講演集, (1977), 144.
- 5) 塗装とライニング JDPAT 12, 日本ダクタイトル 鋳鉄管協会, (2007), 18.
- 6) 水道用鋼管, 日本水道鋼管協会, (2010), 49.
- 7) 小玉俊明, 藤井哲雄: 防食技術, 26 (1977), 641.
- 8) 網野信重: ローボ-資料, 64 (1977), 33.
- 9) 中山武彦, 遠藤尚志, 鈴木雅彦, 中井一雄, 藤村壮: 第62回全国水道研究発表会講演集, 492.
- 10) ダクタイトル 鋳鉄管配管手帳 [2] 施工編, 日本ダクタイトル 鋳鉄管協会, (2008), 67.
- 11) 水道用塗覆装鋼管現場施工基準, 日本水道鋼管協会, WSP002 (2010), 35.
- 12) 腐食・防食ハンドブック, 腐食防食協会編, (2000), 520.

(2011年9月26日受付)