

土木建築における腐食に関する研究（その2）

——揚水管に発生した衝撃腐食の調査例——

喜 田 大 三
守 屋 正 裕

Study on Corrosion in Civil Engineering and Building Construction (Part 2)

—Investigation of Cavitation-Corrosion Occurring in Water Pipe—

Daizo Kita
Masahiro Moriya

Abstract

Corrosion of a peculiar type occurred inside water pipes of a certain hotel with the rate estimated to have been a maximum of approximately 1.7 mm/yr. The results obtained from investigation of the corrosion were as follows:

- (1) The cause of the corrosion was found to be cavitation-erosion due to water hammer phenomena. These phenomena had occurred with particular violence simultaneously with stopping of the water pump.
- (2) Cavitation was completely prevented by utilizing a water tank on the roof as a surge tank.

概 要

しゅん工後約3年経過した某ホテルの揚水管（延長約500m，揚程約100m）の一部に，特異な形態の腐食が発生し漏水事故の原因となった。

この配管は，150Aのライニング鋼管であり，腐食は，管の真上の部分に20～30mmの幅で管軸方向に直線的に発生しており，年間腐食率は最大約1.7mmと推定されるきわめて急激な腐食であった。

そこで，この腐食原因ならびに対策について調査検討した結果，腐食の主原因は，揚水ポンプの停止時に発生する急激な圧力変化（ウォーターハンマー）によるキャビテーションコロージョンであると堆定され，現場実験で圧力波を測定した結果，腐食した箇所ではキャビテーションの発生が確認された。対策としては，高架水槽をサージタンクとして利用する方法が効果的であった。

1. はじめに

腐食は，金属がそれをとり囲む環境によって化学的あるいは電気化学的に侵食される現象であり，この形態，発生機構および関連因子はきわめて多く，実にさまざまな原因によって発生する。土木建築分野においても，各種金属部材にしばしば予期せぬ原因による予想以上の急激な腐食が発生し，直接的あるいは間接的に多大な経済的損失をもたらしている。このような腐食事故を防止するためには，腐食事故の原因を十分に調査し，設計施工に生かすことがぜひとも必要である。

前報¹⁾では，建物の土中埋設配管において，迷走電流や電池作用および土の化学汚染などの原因によって発生した特異な腐食事故の調査例を報告した。

ここでは，機械的衝撃作用による，特異な腐食の1例として，某ホテルの揚水管に発生した衝撃腐食による漏水事故の調査と対策について報告する。

漏水事故の発生した揚水管は，図-1にそのプロフィールを示すように，山麓に設けられた受水槽から山上にある高架水槽に送水するための延長約500m，揚程約100mの配管である。この配管は，150Aの炭素鋼管で内面にはタールエポキシ樹脂の防食ライニングが施されている。腐食による漏水事故は，当ホテルがしゅん工してから約3年経過後に図-1のA地点においてその約3ヶ月後にB地点において相次いで発生した。

腐食状況の詳細は3.1節で説明するが，腐食は配管の内側から発生し，その腐食形態は，A，B両地点ともに配管の真上の部分（12時の位置）のみが管軸方向

に直線的に腐食されるという特徴があった。また、その年間腐食率は防食ライニングが施されているにもかかわらず、最大1.7mm/yrと推定されるきわめて急激な腐食であった。

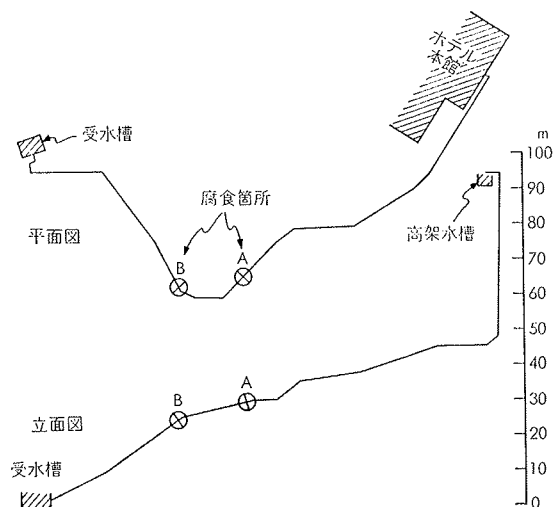


図-1 配管プロフィール

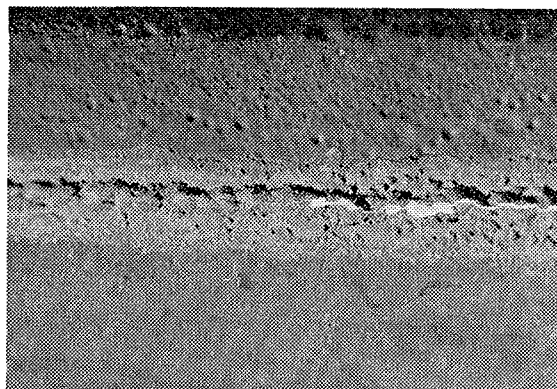


図-3 腐食配管(a)

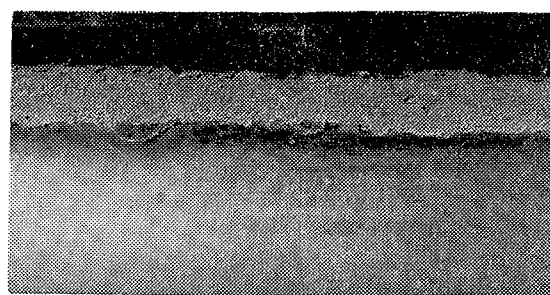


図-4 腐食配管(b)

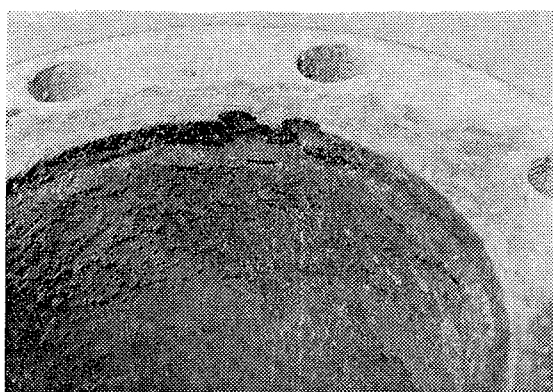


図-5 腐食配管(c)

2. 調査項目

この異常な腐食事故の原因を究明するため、次の調査を行なった。

- (1) 腐食状況の調査
- (2) 配管の材質調査
- (3) 配管断面の金属組織
- (4) 水質の調査
- (5) 水流その他の機械的作用

3. 調査検討結果

A, B両地点ともに腐食の形態は同じであり、同一の原因による腐食であると判断され、配管に関する調査はA地点について行なった。調査検討結果を各項目ごとに以下に述べる。

3.1. 腐食の状況

図-2に腐食配管の略図を示すとともに、図-3～5にa～cの各部位の写真を示し以下に説明する。

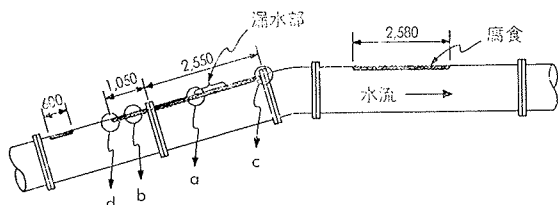


図-2 腐食配管の略図

図-3は腐食の最も著しい部分で、配管の真上に相当する部分のライニングが20～30mmの幅で管軸方向に剝離しており、その中心部で配管は10mm前後の幅で溝状に腐食し、一部細長く腐食貫通していた。さらにその溝の周辺には大小の孔食が無数に発生していた。なお、5mmの肉厚が約3年で腐食貫通していることからその腐食率は最大約1.7mm/yrと推定される。

図-4は、図-3の貫通箇所より約2m下流側の配管の一部である。やはり配管の真上の部分でライニングが剝離し、腐食が発生していた。しかし、この部分の腐食は比較的軽度で、腐食による肉厚欠損はわずかで、深さ1mm以下の微細な孔食が無数に発生している程度であった。

図-5は、図-3の貫通箇所より上流側約1.3mの

フランジ部である。図から明らかなように、フランジも真上の部分が著しく侵食されていた。

以上のように、腐食は配管の真上の部分だけに特徴的に発生していることが判明した。このことは、腐食原因となった因子が配管の真上の部分のみに作用したことを示している。さらにもう一つの特徴として、腐食面に腐食生成物(鉄サビ)の付着が少なかったことがあげられる。一般に、水道水のような電気伝導度の低い淡水中において鉄が電気化学的作用のみによって腐食する場合には、腐食溶出した鉄イオンは鉄の表面でただちに水酸化鉄(鉄サビ)となり²⁾、腐食面に強固に付着し、小径の給水管などでは鉄サビで配管が閉塞することさえもある。ところが、当配管の場合には、腐食が非常に著しい部分でもサビはほとんど付着していなかった。このことは、鉄サビの付着を妨げるような機械的外力の作用があったことを示唆している。

次に腐食箇所の近くでライニングが剝離していない部分の表面を顕微鏡観察すると、図-6の略図に示すように、配管の真上に相当するライニングの表面に、20~30mmの幅で管軸方向に物理的損傷によると判定される微細なピンホールおよびクラックが多数認められた。このことも機械的な外力が配管内面に作用したことを示唆しておりしかもそれは配管の真上のみに作用していたことをものがたっている。

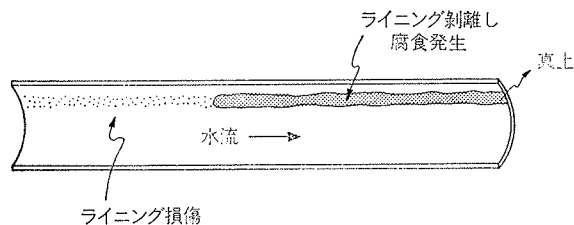


図-6 ライニングの損傷状態

3.2. 配管の材質

腐食箇所が限定されていたため、腐食原因の一つとして配管の部分的な材質不良が懸念された。そこで、腐食した配管の材質を確認するために、その一部分について、とりべ法で組成分析を行なった。その結果、当配管の化学的組成は、JIS 3452の規格によるSGP(配管用炭素鋼管)の化学成分許容値に適合しており材質は正常であると判断された。

3.3. 金属組織

当配管は電縫管であり、一般に電縫部は他の部分よりも化学的に活性化しやすく、腐食が発生し易い。したがって、電縫部に沿って管軸方向に腐食が発生した可能性もある。そこで、配管の断面組織を金属顕微鏡で観察し、電縫部を確認するとともに結晶組織の検査

を行なった。その結果を図-7および図-8に示す。

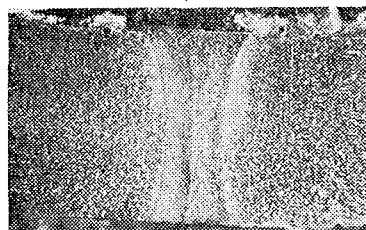
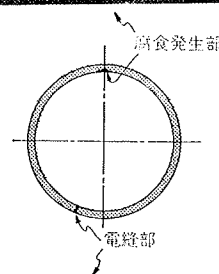
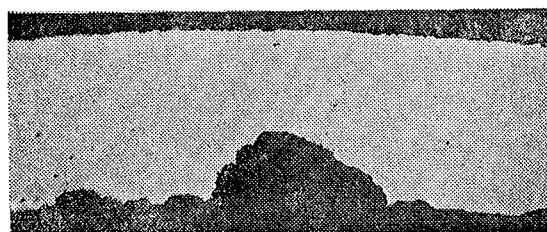


図-7 配管の断面組織

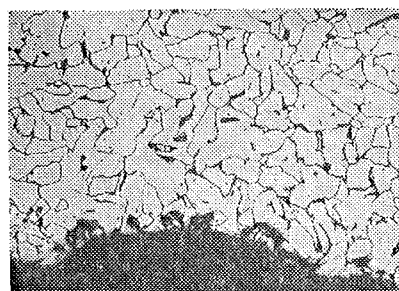


図-8 配管の断面組織

図-7から明らかなように、腐食の発生した配管の真上の部分は電縫部ではないと判定された。また図-8にその一部を示した腐食部分の断面組織において、粒界腐食や腐食割れは認められず結晶組織は正常であった。

3.4. 水質

前述のように、腐食は配管の内側から発生しており当然水質の影響が懸念された。そこで、受水槽で水を採取し、水質分析を行なった。その結果、pHは6.6とほぼ中性であり、腐食性因子となる塩素イオン、硫酸イオンの濃度も一般的な給水と比較して異常は認められなかった。このことから、当給水の腐食性は裸の鋼管であっても年間腐食率として最大0.04~0.1mm程度と推定され、この水質の影響だけでは前述した年間腐食率1.7mm/yrという急激な腐食は発生しないと判断された。

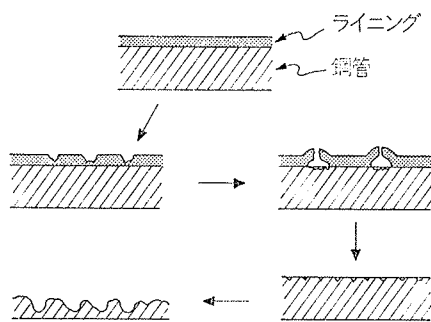
3.5. 水流その他の機械的作用

3.1. 節に前述のように、腐食の状況およびライニングの損傷形態から、機械的な外力が配管の真上に作用した形跡があり、それによって腐食が異常に促進された可能性が考えられた。そこで、この点について検討を行なった。配管の内面に作用する機械的な外力としてまず考えられるのは、水の流動によって配管壁におよぼされる力である。一般に、流速が10m/sec以上になると、インピンジメントアタック、あるいはエロージョンというような機械的作用を伴って配管の腐食が急激に促進される。そこで、ポンプの吐出量と配管の径とから、水の流速を求めたところ、管内流速は最大1.2m/sec程度であり、水流に基因した機械的作用によって腐食が促進された可能性はないと判断した。

その他の機械的作用として、当配管においては、ポンプ停止時に激しいウォーターハンマー現象が認められたことから、その水撃作用が考えられた。この水撃作用によって、キャビテーションが発生し、そのくり返しによってキャビテーションコロージョンによる急激な腐食の発生した可能性が濃厚となった。

4. 腐食原因の考察

調査結果を総合的に検討し、当配管に発生した特異な腐食の主原因は、機械的な衝撃力を伴ったキャビテーションコロージョン（衝撃腐食）であると推定し、その腐食過程を図一9のように推定した。以下に推定理由を述べる。



図一9 配管の腐食過程

(1) 腐食は、配管の真上に直線的に発生しており、鋼管の電綫部との位置的關係はなく、年間腐食率も最大1.7mm/yrと急激であることなどから、配管の材質および、水質も直接腐食状況とは結びつかない。したがって、化学的あるいは電気化学的機構による自然腐食ではないと判断される。

(2) 腐食発生部の上流および下流部分において、配管真上の部分のライニングが機械的外力によって孔食

を受けたように損傷しており、衝撃力が配管の真上の部分に働いたことを示している。また、通常の給水による自然腐食の場合には、腐食生成物である鉄サビが腐食面に強固に付着するが、当配管の場合には、腐食が非常に著しい部分でもサビはほとんど付着していなかった。このことも機械的な作用を伴った腐食であることを示している。一般に、機械的作用を伴った腐食の形態としては、エロージョンコロージョン、インピンジメントアタック、キャビテーションコロージョンなどがある。エロージョンコロージョンおよびインピンジメントアタックは、鋼管の場合には、流速が少なくとも10m/sec以上の条件でないと発生せず、当配管の流速は最大1.2m/sec程度と比較的遅い。この流速ではエロージョンコロージョンおよびインピンジメントアタックは起こりえないと判断される。キャビテーションコロージョンは、プラスチックやガラス等にも金属と同じように発生しその初期においては孔食状の損傷形態を呈することが知られている。この損傷形態は上述の当配管のそれと類似のものである。

(3) キャビテーションコロージョンは、5章で詳述するように、低圧時に発生した蒸気泡が高圧時に崩壊する場所に発生する。したがって、横引き配管においては、蒸気泡の集る配管真上の部分にその機械的衝撃力が集中する可能性が十分予想される。この予想と前述した当配管の特異な腐食状況とは完全に一致している。

5. キャビテーションコロージョンの発生原因

キャビテーションは、系の局所的な圧力変化に基因し、その最低圧がその温度における飽和蒸気圧以下になるような条件で発生する。すなわち、このような条件では低圧時に一種の減圧沸騰現象によって低圧の蒸気泡が発生し、この蒸気泡の崩壊に際して壁面に大きな機械的衝撃を与える。キャビテーションコロージョンは、この衝撃のくり返しによって金属の腐食が急速に促進される現象で、一般には、水力タービン翼やプロペラ等に発生することが知られている³⁾。文献⁴⁾によるとキャビテーションの衝撃圧力は数十気圧に達することが示されている。

当配管の場合には、ポンプ停止時に、ポンプ吐出口の逆止弁が瞬時に作動する結果、ウォーターハンマー現象として観察される圧力波が発生し、配管の一部においては瞬間的に真空状態に近い低圧となって蒸気泡が発生する。この泡は続く高圧によって配管上面で崩壊して配管の上部に大きな衝撃力を与える。このくり

返しによって、キャビテーションコロージョンが発生したものと推定した。

そこで、上記の推定原因によってキャビテーションが発生していたことを確認するために現地において配管内の圧力変化の測定実験を行なった。この実験は、本社設備部計画第二課（渥美職員）が担当し、次のような結果が得られた。

腐食の発生した箇所におけるポンプ停止時の圧力変化は、最低圧が -1.0 kg/cm^2 とほぼ真空状態であり、最高圧が 11.5 kg/cm^2 と測定された。この結果はキャビテーションの発生を裏づけている。

なお、現状の配管系には、ポンプ起動停止時の圧力波を吸収し、ウォーターハンマーを軽減するためのウォーターハンマーズーバーがポンプ吐出口と配管の途中に設けられているが、メンテナンスの悪さ等の条件でこの装置が十分に作動しなかったために今回のような全く予期しない特異な腐食事故が発生したと考えられる。

6. 防食対策

前記のように、キャビテーションの発生原因は、ポンプ停止時の急激な圧力変化（ウォーターハンマー）によることが明らかとなった。そこで、キャビテーションの防止対策としては、ウォーターハンマーの防止法として一般的に知られている次のような方法が有効であろうと推定された。

- (1) ポンプにフライホイールを設ける。
- (2) サージタンクを設置する。
- (3) ポンプ吐出側に電動弁を設け、ポンプの停止指令によって電動弁を徐々に閉じたのちポンプを停止する。

そこで、上記対策案のうち、主としてサージタンク方式について本社設備部計画第二課（渥美職員）で現場実験を行なった結果、ホテルの高架水槽をサージタンクとして利用することによって容易にキャビテーシ

ョンの発生を防止できることが判明した。

7. まとめ

しゅん工後約3年経過した某ホテルにおいて、延長約500m、揚程約100m、直径155mmの揚水管の一部が年間最大腐食率 1.7 mm/yr 以上という急激な速さで内側から腐食貫通し、漏水事故が発生した件につき、その腐食原因を調査究明し、対策について検討を行なった。その結果以下のことが判明した。

腐食の主原因は、キャビテーションコロージョンであり、キャビテーションは、ポンプの停止時に発生する急激な圧力変化の際に、最低圧がほぼ真空状態に近くまで低下することによって発生したと判断された。その際、低圧時に発生した蒸気泡が配管の上部に集まり、続く高圧によって蒸気泡が崩壊する時に機械的な衝撃力が配管の真上に作用し、このくりかえしによって、まずライニングが損傷剝離し、次いで鋼管の腐食が急激に促進されたと判断した。

対策としては、高架水槽をサージタンクとして利用する方法が最も簡易でしかも効果的であることが判明した。

おわりに、この調査例は、建物の配管に発生した特殊な衝撃腐食の1例として紹介したが、今後、長大な配管系でしかも揚程の大きな配管の設計施工上および類似の腐食トラブルの処理上の参考資料となるものと思われる。

参考文献

- 1) 喜田・守屋：土木建築における腐食に関する研究（その1），大林組技研所報，No. 13,(1976)，p. 111
- 2) H. H. ユーリック：腐食反応とその制御，産業図書，(1968)
- 3) 日本機械学会：機械工学便覧
- 4) 日本材料学会編：材料の腐食と防食の工学，(1969)