

1-5 ゲート設備の健全度と寿命評価に関する研究

研究予算：運営交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 20

担当チーム：先端技術チーム

研究担当者：山元 弘、田中義光

【要旨】

河川環境に曝されるゲート設備においては、腐食の進行が強度、寿命に大きな影響を与える。本テーマは、ゲート設備の材質や設置環境による腐食形態を整理したうえで、オーステナイト系ステンレス材による暴露試験を行い、材質及び設置環境と腐食速度の関係を明らかにして、腐食量と強度の関係を評価する方法を提案するものである。

キーワード：ゲート設備、腐食、強度、ステンレス、暴露試験

1. はじめに

ダム及び水門・樋門・堰は、洪水流量制御、内水排除・逆流防止、取水などの目的を有する河川管理施設であり、当該施設に設置される水門扉（以下本稿では「ゲート設備」という）は、開閉機能によって目的を達成する可動設備である。ゲート設備は、扉体、戸当たり、開閉装置等で構成されており、確実な止水と可動部分の円滑な動作が求められる。

ゲート設備は、河川環境にさらされることから、腐食による機能低下が大きな問題となる。ゲート設備の主要部材には、主として普通鋼（一般構造用圧延鋼材、溶接用圧延鋼材）が用いられてきたが、重要なダム施設や汽水域・海水域に設置されるゲート設備を対象として、1960年代終盤から耐食性の高いオーステナイト系ステンレス鋼（主に SUS304）を使用するケースが増えてきた。SUS304 は、一般的に無塗装で使用されるが、設置環境によっては腐食する場合があります、維持管理上の課題となっている。

ゲート設備に求められる機能の重要性を考慮すると、普通鋼、ステンレス鋼を採用したゲート設備の腐食発生・進展を予測し、設備の健全度を適切に評価する手法が求められている。

本研究は、ゲート設備の腐食発生のメカニズムを明らかにし、進展予測、健全度評価手法を提案して、設備計画と維持管理面での提言を行うものである。

研究対象とする材質は、多くのゲート設備に採用されている普通鋼（一般構造用圧延鋼材素材及び溶接用圧延鋼材）とオーステナイト系ステンレス鋼（以下本稿では、特記なき場合「ステンレス鋼」という。）とする。

2. 研究方法

本研究は、実施手順は図 - 1 に示すとおりである。

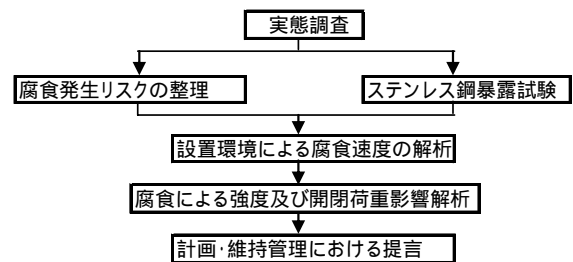


図 - 1 実施フロー

2.1 実態調査

腐食形態を把握するために、ステンレス製のゲート設備と普通鋼を採用したゲート設備に区分して調査を実施した。

2.2 腐食発生リスクの整理

ゲート設備の設置環境を、要因に分解して明確化し、設置環境と腐食の関係をまとめた。

2.3 暴露試験の実施

河川環境下でのステンレス鋼の腐食発生状況を把握するため、ゲート設備を模した試験ユニットを用いて暴露試験を実施することとした。

2.4 設置環境による腐食速度の解析

前項までの調査結果に基づき、設置環境要因をパラメータとして腐食速度を求めた。

2.5 腐食による強度及び開閉荷重影響解析

1)腐食に関する強度部材の評価

最も大きな荷重の採用する主桁を対象として、腐食

による部分的な欠損の大きさと強度の関係を解析した。解析は、実在のゲートをモデルとした。

2) 主ローラの腐食による開閉荷重影響解析

炭素鋼・鋳鋼等で製作された主ローラを対象として、回転不能時の腐食量、及びそのときの開閉荷重を算定し、当該開閉装置における能力と比較した。

2.6 防食における提案

調査結果及び解析結果を基に、維持管理上の留意点をまとめた。

3. 実態調査

国土交通省（北海道開発局、各地方整備局）の管理するゲート施設数 8,761 箇所（平成 15 年国土交通省調べ）のうち、約 3 割近い 2,367 箇所が設置後 30 年を超えている。

一方、全国に設置されているステンレス製ゲート設備は、平成 15 年度の調査で、国土交通省、地方自治体を合わせても 300 件に満たないが、腐食環境下における耐食性を期待した採用事例が多い。

本研究では、全国のステンレス製ゲートを対象とした腐食事例調査を行うとともに、普通鋼製のゲート設備については、関東地方整備局管理のゲート設備から腐食事例を確認することとした。

3.1 ステンレス製ゲートの腐食事例

ステンレス製ゲート設備の中から汽水域・海水域に設置された 12 水門を対象に調査した。以下に腐食に関する傾向を代表的な事例写真と合わせて示す。

- 1) 発錆・腐食の見られる扉体は SUS304 が多い。（殆どの SUS ゲートが SUS304 製である。）
- 2) 海水、汽水に浸漬された扉体、戸当たりが多い。
- 3) 溶接箇所が多い。



写真 - 1 スキンプレートの発錆



写真 - 2 溶接部の腐食（補修済み）



写真 - 3 下部戸当たり（水中部）の孔食

3.2 普通鋼製ゲートの腐食事例

SS400、SM490 などの素材は、塗装劣化した箇所で次のような腐食傾向を示す。

- 1) 汽水域・海水域に設置されたゲートに多い。
- 2) 常時閉で運用されるゲートに多い。
- 3) 腐食箇所は主ローラ、主桁フランジの隅角部、土砂の堆積するウェブに多い。



写真 - 4 主ローラの腐食



写真 - 5 主桁フランジの腐食



写真 - 6 縦端桁下部の腐食

常時閉で運用されるゲート設備において、戸当たりや水密部のステンレス鋼に腐食が発生しやすい傾向がある。また、主ローラは鋳鋼品が多いため、接触面の塗装が剥がれ、SUS304等の戸当たりと電食を起している。フランジ部分の腐食は、写真 - 5及び6に見られるように円弧状に欠損部が広がる傾向がある。また、写真 - 5のようにウェブ上に土砂が堆積すると塗膜が劣化しやすい。

4. 腐食発生リスクの整理

鉄鋼材料の腐食に関係する環境要因は、腐食事例の多い「常時閉」で運用されているゲート設備を対象として考えると、pH、水温、溶存酸素量(DO)、塩化物イオンである。本研究では、既存文献と過去の暴露試験結果に基づき、これらの要因と腐食発生リスクを腐食速度としてまとめた。暴露試験の結果を反映させ、6. 項に結果を示す。

4. 1 ステンレス鋼腐食メカニズムの概要

本項では、暴露試験の主旨を明確化するため、調査事例で認められた腐食のメカニズムについて述べる。

4.1.1 孔食 (pitting corrosion)

不動態皮膜の一部が局部的に破られると、その部分の電位は卑となり腐食電池が形成され小さな孔があく。このとき、電流によって塩化物イオンが孔内に引込まれ、濃度が高くなるとともに水素イオンが発生し pHも低くなる。孔内の電位は卑となり、面積が貴な面積より非常に小さいため、腐食は著しく進行する。

4.1.2 すきま腐食 (crevice corrosion)

ステンレス鋼板が重なりあっていたり、表面に貝殻などの付着物があったりすると、重なったステンレス鋼板やステンレス鋼と付着物の間にすきまが存在する。

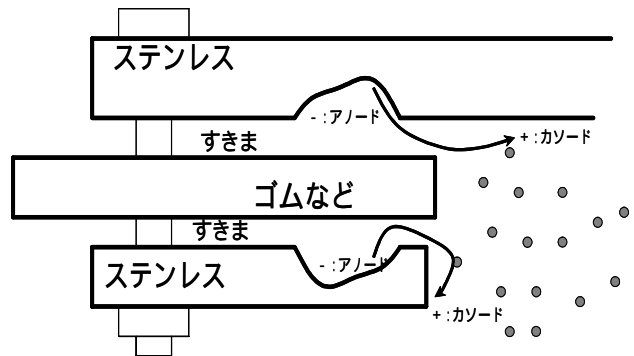


図 - 2 すきま腐食進行のメカニズム

海水など塩化物イオンが多い環境中にあり、すきま内部の不動態被膜が破壊された場合、外部からの酸素供給量が充分得られず、不動態被膜の形成が阻害され電位が卑な状態になる。このとき、外部の貴な部分と腐食電池を形成し、すきま内に局部的な浸食が起こる。

4.1.3 孔食・すきま腐食発生の評価方法

ステンレス鋼の自然電位は、水に浸漬すると長時間かけてゆっくりと上昇し、定常値に達する。このように、「与えられた環境において表面が不動態化しており、局部腐食を起していない自然電位の定常値」を定常腐食電位 (E_{SP} 、暴露試験において計測する自然電位と同意) という。また、塩化物イオンによって不動態が破壊されて腐食が発生する電位を局部腐食臨界電位 (V_C) といい、 E_{SP} が V_C よりも高い場合に腐食が起こり、逆に E_{SP} が V_C よりも低い場合その可能性はない。すなわち、ステンレス鋼の局部腐食の発生条件は、 V_C と E_{SP} との関係で決まる。

局部腐食臨界電位 (V_C) は、孔食が起きる場合とす

きま腐食が起きる場合で異なる値を示す。それぞれの臨界電位を孔食臨界電位 ($V_{C,PIT}$) およびすきま腐食臨界電位 ($V_{C,CREV}$) という。すきま腐食臨界電位 ($V_{C,CREV}$) は、進展しつつある腐食すきまの進展停止 (再不動態化) 電位として決定される腐食すきま再不動態化電位 ($E_{R,CREV}$) とほぼ一致することが知られており、これで代用されている。

孔食臨界電位 ($V_{C,pit}$) は、腐食すきま再不動態化電位 ($E_{R,CREV}$) よりも高い。したがって、すきま腐食が生じない条件下で孔食は生じない。実際のゲート設備にあっては、構造上のすきま部が多く存在し、使用中に形成される付着物 (貝類や塵芥等) とすきまが形成される場合がある。したがって、腐食の発生を評価する場合、すきま腐食に着目することが合理的である。

4.1.4 塩化物イオンの影響

塩化物イオンの存在は、局部腐食臨界電位 (V_C) を低下させる。そのため、塩化物イオン濃度が高いと局部腐食が起こりやすくなる。この関係を模式的に示すとの図 - 3 のようになる。 E_{SP} が V_C よりも高い場合は、腐食の可能性があるが、逆に E_{SP} が V_C よりも低い場合は発生しない。よって特に塩化物イオン濃度に着目し、実際の汽水域環境における暴露試験を実施した。

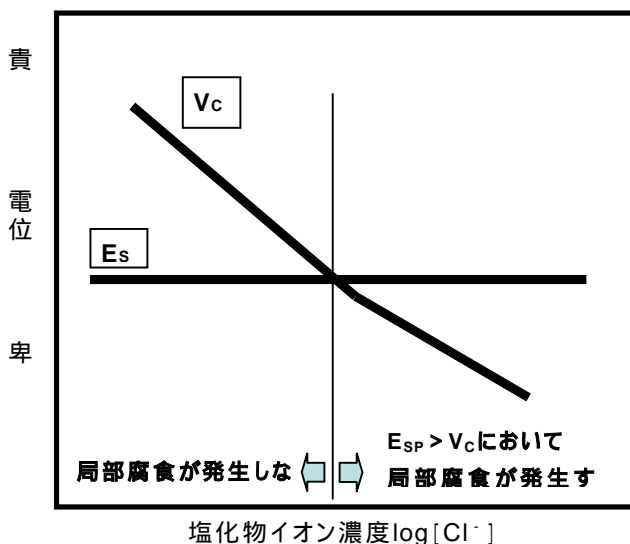


図 - 3 局部腐食発生条件(模式図)

5. 暴露試験の実施

5.1 概要

河川用ゲート設備に採用実績の多いオーステナイト系ステンレス鋼を選定し、ゲート設備構造を模した暴露試験ユニットを製作する。当該ユニットに使用する

材料は、JIS G 0592 (ステンレス鋼の腐食すきま再不動態化電位測定方法) に基づいてあらかじめ腐食すきま再不動態化電位 ($E_{R,CREV}$) を測定しておく。

試験ユニットは、汽水域にある樋管部において水没させて設置する。時系列に試験ユニット近傍の塩素イオン濃度と自然電位 (E_{SP}) 及び水温を計測するとともに、定期的に試験ユニットを引き上げ、各部の腐食量を計測する。

5.2 暴露試験場所

試験場所は、次のとおりである。

河川名 : 荒川 (河口より約 11 km 地点)

設置施設: 綾瀬排水機場吐出樋管

当該樋管と荒川河口の間には潮止め堰がないことから完全な汽水域である。

5.3 暴露試験ユニット

材質は、ゲート設備における採用実績の多い SUS304 と SUS316 を選択する。

試験ユニットは、プレートによる溶接構造とし、スキンプレート、主ローラ、下部水密ゴムを模した構造とした。各部のサイズは、スキンプレート 400 × 400 mm、主桁高さ 200 mm、主ローラ径 145 mm、ローラ軸 25 mm とした。

製作数は SUS304, SUS316 とともに 3 基 (各 No1 ~ 3 と付番) として、同一場所に設置した。

試験ユニットの外観を写真 - 7 に示す。



写真 - 7 暴露試験ユニット外観

5.4 測定方法

5.4.1 $E_{R,CREV}$ の測定⁵⁾

暴露試験に先立ち、SUS304 と SUS316 の測定試料を用意し、JIS G 0592 に基づく $E_{R,CREV}$ の測定を実施する。試料の素材は、暴露試験ユニットに採用する同一のものを使用する。

5.4.2 暴露試験ユニットの設置

6 基の暴露試験ユニットは、等辺山形鋼で組んだフレームに取付け、樋管ゲート前面から荒川本川に至る水路部に設置した。

図 - 4 に試験ユニットの設置図を示す。

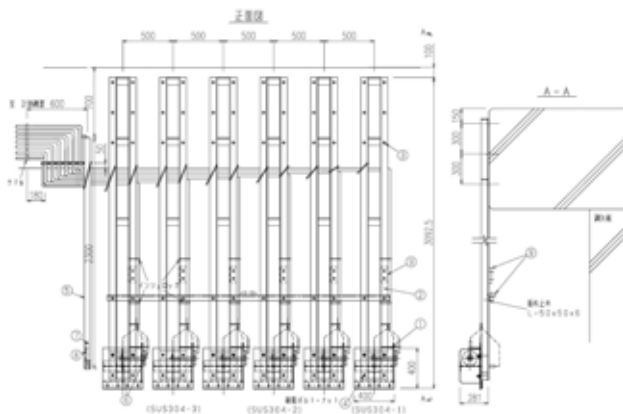


図 - 4 ユニット設置図

5.4.3 暴露試験測定内容

暴露試験の測定内容を以下に示す。

1) 総実施期間

平成 15 年 7 月 ~ 平成 20 年 2 月

2) 測定項目

- ・ 自然電位、塩化物イオン濃度及び水温
- ・ 腐食箇所及び腐食量調査（引き上げ調査）

第 1 回：平成 16 年 2 月（ユニット No 各 No1）

第 2 回：平成 17 年 7 月（ユニット No 各 No2）

第 3 回：平成 20 年 2 月（ユニット No 各 No3）

5.4.4 腐食箇所及び腐食量調査

試験ユニットを目視確認のうえ、腐食深さをデプスゲージを用いて測定した。

5. 試験結果

5.1 腐食すきま再不動態化電位 $E_{R,CREV}$

測定結果を表 - 1 に示す。特に塩素イオン濃度が高い領域で SUS316 がより良好な耐食性を示す可能性があることを示している。

表 - 1 腐食すきま再不動態化電位 $E_{R,CREV}$

鋼種	塩化物イオン濃度値[ppm]	$E_{r,crev}$ [V, SSE]
SUS304	20	0.4230
	200	0.0970
	2000	-0.1250
	20000	-0.2110
SUS316	20	0.3900
	200	0.1240
	2000	0.0060
	20000	-0.0967

電解質温度20

5.2 暴露試験結果

5.2.1 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度は、約 10 ~ 10000ppm の範囲での変動が認められたが、約 70% が 1000ppm 以上であり、暴露環境としては非常に過酷である。

5.2.2 自然電位 E_{SP}

図 - 5 及び図 - 6 は、暴露期間が最も長かった各 No3 試験ユニットの E_{SP} と塩化物イオン濃度の関係を示した散布図（サンプリング 30 分毎）である。図中の実線は、表 - 1 の実験値を基に補完した $E_{R,CREV}$ である。SUS304、SUS316 とともに塩化物イオン濃度 100ppm 以上では、多くの電位計測値が $E_{R,CREV}$ 以上になっており、すきま腐食発生の可能性があることが分かる。

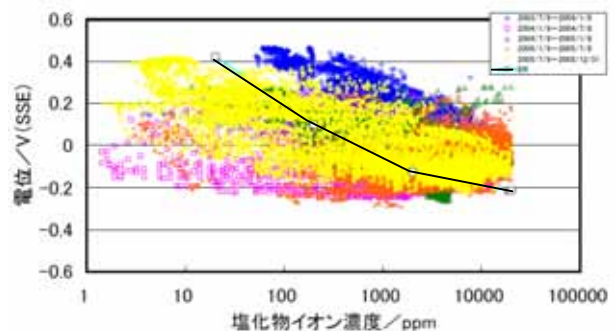


図 - 5 塩化物イオンと E_{SP} の関係 (SUS304)

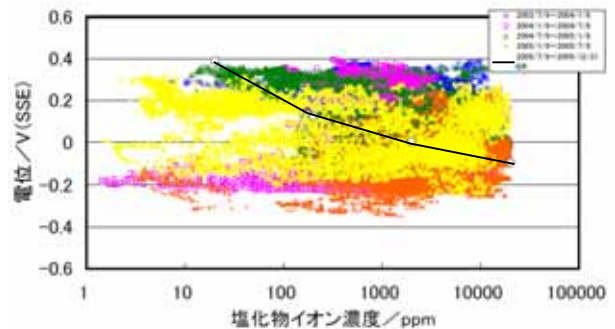


図 - 6 塩化物イオンと E_{SP} の関係 (SUS316)

5.2.3 腐食箇所及び腐食量

第 1 回目の測定から腐食が見られ、総括的な特徴をまとめると次のとおりである。

- 1) 腐食は、設置後 6 ヶ月で既に発生している。
- 2) 各試験ユニットのすきま腐食深さは最大 1 mm 前後、平均腐食深さは 0.2 ~ 0.4 mm 程度であり、調査時期、材質による明確な違いが現れていない。
- 3) 第 2 回目に調査した SUS304-No2 のリップ部の腐食は、溶接部の水密ゴムに接して形成されたすきま部で発生しており、接合金属が深くえぐられ、深さは 6mm に達していた。(写真 - 8)

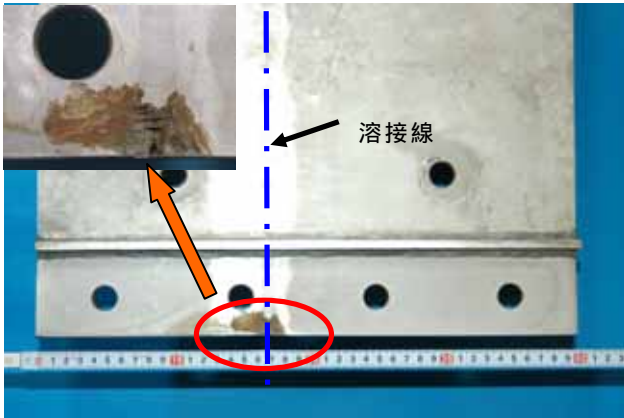


写真 - 8 リップ部のすきま腐食 (SUS304-No2)

- 4) 発生した殆どの腐食がすきま腐食であり、第 1 回、第 2 回の調査における腐食箇所数では SUS304 が SUS316 の 2 倍程度多い傾向を示している。ただし、55 ヶ月のデータでは、箇所数の差異が見られない。(SUS304 : 11 箇所、SUS316 : 14 箇所)
- 5) 発生箇所は、リップ部、水密ゴム押さえ板及び取付用のボルト・ナット、ワッシャ、ローラ軸およびローラ軸のエンドプレートである。(写真 - 9)



写真 - 9 水密ゴム押さえ板の腐食例 (SUS316-No3, 上は水密ゴム)

- 6) SUS304、SUS316 ともローラの軸受 (BC) に脱亜鉛腐食が生じ固着が見られた。
- 7) 第 1 回と第 2 回の調査後、再組立し暴露環境へ戻した SUS304 - No1 及び No2、SUS316 - No1 及び No2 を第 3 回目に引き上げ、再調査したが、前回腐食していた箇所が大きく進展したケースは殆ど見られなかった。ただし、SUS316 - No1 におけるローラ軸端面で、前回すきま腐食箇所が発生した箇所に深さ 4 mm の孔食が見られた。
- 8) 第 2 回目以降に調査したユニットには、いずれも泥状の被膜が見られ、多量のフジツボが付着していたが、フジツボの付着に起因する腐食を認めることはできない。

図 - 7 に、経過月数と各試験ユニットの最大腐食箇

所の深さの関係を示す。

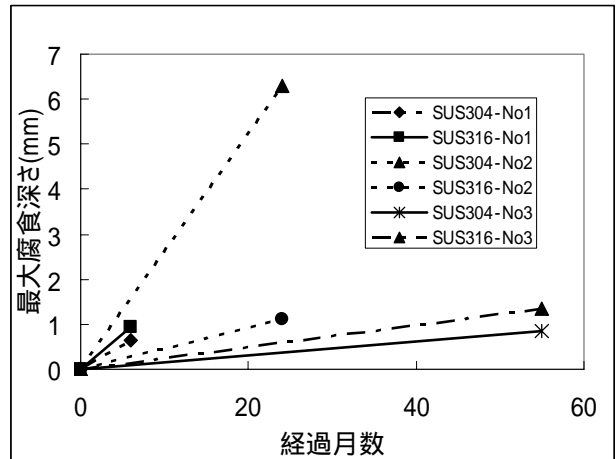


図 - 7 各試験ユニットの最大腐食量

5.4.4 析出物

写真 - 10 に示すとおり、腐食が発生した箇所には析出物を確認できた。



写真 - 10 析出物 (SUS304 - 2 リップ部)

5.5 暴露試験結果の考察

5.5.1 電位構成経時変化

試験ユニットの E_{SP} は、表面が不動態化している非常に高い値(本試験では 0.3V 以上)のときは不動態化により腐食していない状態であり、それより低く $E_{R,CREV}$ より高い場合に腐食が進展する可能性が高い。また、 $E_{R,CREV}$ より低い場合は腐食の可能性がない。従って、試験期間中の全電位に対する $E_{R,CREV}$ の領域に属する割合が求められるならば、本暴露試験における腐食リスクを定性的に表すことができる。

SUS316 は SUS304 に比べて、 $E_{R,CREV}$ の領域割合が高く、腐食リスクは SUS304 が SUS316 より大きい状態となっている。暴露 2 年後に引き上げた腐食調査結果

までは、SUS304の腐食箇所がSUS316の2倍程度あり、この解析結果と矛盾しない。

しかし E_{SP} は、時間の経過と共に $E_{R,CREV}$ 以下の電位域の割合が増大した。これは、一時的な酸化剤の低濃度化現象以外に、泥等の付着物の蓄積により酸化剤供給速度が低下しているためであると推定される。第3回目の腐食量調査では、腐食箇所数が期間に比例して増加せず、SUS304とSUS316の差異が希薄になった。その要因として、試験ユニットを覆っていた泥状の被膜が関与している可能性が高いと考えられる。

5.5.2 溶接線の影響

SUS304 - No2のみ6mmを超える腐食が2年以内に発生している。発生箇所は写真-8に示すとおり溶接線上であり、単なるすきま腐食だけでなく、粒界腐食の可能性が高い。調査事例における写真-1においても溶接線部が著しく腐食しており、溶接時の鋭敏化に起因する粒界腐食あるいは微生物による腐食である可能性が高く、ゲート設備の管理に大きな影響を与えている。

5.5.3 腐食速度

各試験ユニットの腐食速度を求め、表-2に示す。算定には各ユニットの最大腐食値を採用し、SUS304 - No2については、粒界腐食が疑われる溶接箇所のデータは用いないものとした。表-2 すきま腐食速度 a (mm/年)

ユニットNo	SUS304	SUS316
1	1.30	1.90
2	0.61	0.56
3	0.18	0.27
平均	0.70	0.91

自然電位データや泥状被膜の存在を考慮すると、ユニット No2 までのデータを腐食リスクとして評価することが妥当であると考える。つまり、いずれの鋼種も約0.6mm/年以上の腐食速度であったと推定できる。

6. 設置環境による腐食速度の解析

ここでいう「腐食量」とは、リスクとして発生する可能性がある目安であり、腐食影響因子が最大限作用する最も大きい腐食量と定義する。

腐食量算定式は、時間経過に比例して増加する線形式と、時間の経過とともに漸次腐食速度が低下する指数式が考えられる。暴露試験結果においては、時間の経過とともにSUS304とSUS316とも表面の電位が卑化し腐食速度が低下したことも想定される。しかし本項では、安全側でリスク評価することを目的としているため、以下のような直線則(比例式)を基本として腐食量を取り扱う。

$$F = a \cdot Y$$

ここで F : 腐食量 (mm)

Y : 年数

a : 腐食速度 (mm/年、定数)

関係する腐食要因毎の腐食速度 a を、既存の文献及び暴露試験結果より抽出し、表-3に示す。

表-3 腐食要因と腐食速度の関係

単位: mm/年

項目	区分	指標	流速	扉体材料			主ローラ材料	
				SS SM SMA	SUS304 SUS316	SUS316	炭素鋼	鋳鋼
pH	強酸性河川	3未満		1.00	0.3	0.01	1.00	0.3
	酸性河川	3~4		0.30			0.30	
	一般河川	4~9		0.25			0.25	
	特殊河川	9以上		0.00			0.00	
溶存酸素量	一般河川	7~12		0.40			0.40	
	汚れがひどい	1未満		0.10			0.10	
流速	緩やか	0.5程度まで		0.40			0.40	
	速い	1程度まで		0.30			0.30	
塩分濃度	淡水域	5.8程度	0.5	0.40			1.20	
			1	0.30			1.00	
			5	0.10			0.30	
	汽水域	100~19,000	0.5	0.40	0.61	0.14	0.70	0.61
			1	0.70	1.07	0.25	0.70	1.07
			5	1.10	1.68	0.39	0.90	1.68
	海水域	19,000以上	0.5	0.40	0.61	0.14	0.70	0.61
			1	0.70	1.07	0.25	0.70	1.07
			5	1.10	1.68	0.39	0.90	1.68
	硫酸濃度	一般河川	20程度					
		特殊環境						
	電食	淡水域	5.8程度	0.5	0.90			
1				0.70				
5				0.20				
汽水域		100~19,000	0.5	2.70				
			1	4.70				
			5	7.40				
海水域		19,000以上	0.5	2.70				
			1	4.70				
			5	7.40				

網掛け部分は支配要因ではない項目を示す。

7. 腐食量による設備への影響度の試算

実在するゲートの仕様を用いて、腐食がゲート設備の健全度に与える影響として次の2点を考察した。

主桁の強度

開閉荷重

ゲート設備の設計条件や余裕率は設備毎に異なるが、本検討によって強度評価のアプローチを示すとともに、類似規模のゲート設備を維持管理する上での指標を得ることを目的として実施する。

7.1 強度部材の評価

最も大きな荷重の作用する主桁のフランジ部を対象として、腐食による部分的な欠損部がどの程度の大きさになると強度的に問題が生じるか、具体的なゲート

設備を事例に試算する。検討条件は下記のとおりである。

検討ケース A： 3例

(小形ゲート1例、中形ゲート1例、大形ゲート1例)

● 腐食形状

主桁の中央部フランジ端部に断面が半楕円形の欠損が1カ所生じること想定する。形状断面は、調査実績に基づくものとする。

● 評価

腐食による強度評価は有効断面板厚によることが妥当であるが、標準的な維持管理方法でこれを把握することは困難である。よって、欠損部断面における応力集中の最大値を算定し、関連技術基準における許容応力を超える欠損部の大きさを求める。

● 荷重条件

主桁を単純支持梁と見なし、等分布荷重を作用させる。荷重条件は評価対象設備の設計条件による。

検討ケース B： 3例

(小形ゲート1例、中型ゲート1例、大型ゲート1例)

● 腐食形状

主桁の中央部ウェブに、断面が半楕円形の欠損が1カ所生じること想定する。

● 評価、荷重条件は、検討ケース A 同様とする。

7.1.1 評価対象設備

評価対象設備は、以下に示す3水門とした。

表 - 4 評価対象設備

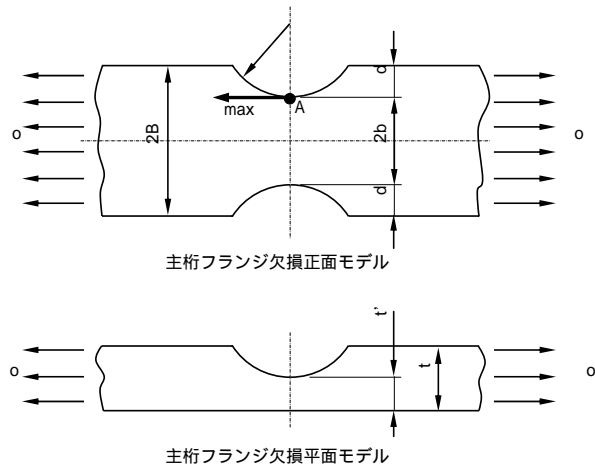
7.1.2 ケース A：フランジ端部に欠損を有する場合

	Aゲート	Bゲート	Cゲート
分類	小形水門扉	中形水門扉	大形水門扉
扉面積(A)	8.845m ² (A<10m ²)	15.400m ² (10m ² A<50m ²)	262.816m ² (A 50m ²)
ゲート形式	プレートガーダ 鋼製ローラゲート	プレートガーダ 鋼製ローラゲート	プレートガーダ 鋼製ローラゲート
設置数	2門	2門	2門
純径間	3.050m	4.400m	19.100m
有効高	2.900m	3.500m	13.760m
設計水位 (ケース1)	外水位 9.796m (YP+14.296m)	外水位 6.966m (YP+5.566m)	外水位 11.760m (YP+9.460m)
	内水位 0.000m (YP+4.500m)	内水位 0.000m (YP-1.400m)	内水位 3.300m (YP+1.000m)
操作水位 (開時)	外水位 2.150m (YP+6.650m)	外水位 2.700m (YP+1.300m)	外水位 4.716m (YP+2.416m)
	内水位 3.150m (YP+7.650m)	内水位 0.000m (YP.-1.400m)	内水位 5.716m (YP+3.416m)
操作水位 (閉時)	外水位 11.796m (YP+16.296m)	外水位 3.500m (YP+2.100m)	-
	内水位 3.150m (YP+7.650m)	内水位 2.500m (YP+1.100m)	-

1)腐食形状の設定

主桁中央部フランジ端部に断面が半楕円形の欠損1カ所を有するモデルは、図 - 8 に示すとおりとした。計算は、 d, t', r に関する可変・固定条件で3ケース実施する。なお、計算においてフランジ平板の幅方向の腐食厚さ d は、板厚方向の腐食深さ $(t-t')$ に一致する条件とし、設計板厚以上に腐食厚さ d は進行しないものとした。

図 - 8 主桁フランジ欠陥モデル



2)フランジ端部に半楕円状腐食が発生した場合の評価

許容応力を超過する欠損部の大きさは、各計算ケースについて計算すると表 - 5 のとおりとなる。

よって、フランジ端部に半楕円状の腐食が発生した場合、表 - 6 に示すリスク傾向があると考えられる。

表 - 5 計算結果 (フランジ)

表 - 6 フランジ端部腐食発生リスク傾向

ゲート種類	検討ケース	d 腐食厚さ	t' 最小板厚	曲率半径	max 局部応力
Aゲート (小形) 設計板厚 td=13mm	A - 1	可変 3.0mm (tdの23%)	可変 10.0mm	固定 13.0mm (=td)	219.109N/mm ²
	A - 2	固定 3.0mm	固定 10.0mm	可変 14.0mm	214.584N/mm ²
	A - 3	可変 5.0mm	可変 8.0mm	可変 21.0mm	231.898N/mm ²
Bゲート (中形) 設計板厚 td=15mm	A - 1	可変 8.0mm (tdの53%)	可変 7.0mm	固定 15.0mm (=td)	328.109N/mm ²
	A - 2	固定 8.0mm	固定 7.0mm	可変 16.0mm	319.704N/mm ²
	A - 3	可変 10.0mm	可変 5.0mm	可変 20.0mm	341.634N/mm ²
Cゲート (大形) 設計板厚 td=31mm	A - 1	可変 10.0mm (tdの33%)	可変 21.0mm	固定 31.0mm (=td)	330.849N/mm ²
	A - 2	固定 10.0mm	固定 21.0mm	可変 34.0mm	321.175N/mm ²
	A - 3	可変 13.0mm	可変 18.0mm	可変 49.0mm	323.256N/mm ²

	腐食厚さ(d)	曲率半径()
リスク小	d < 設計板厚の 20%程度	>設計板厚
リスク中	d = 設計板厚の 20%程度	=設計板厚
リスク大	d > 設計板厚の 20%程度	<設計板厚

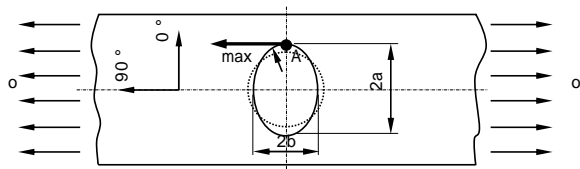
7.1.3 ケースB：ウェブに欠損を有する場合

1) 腐食形状の設定

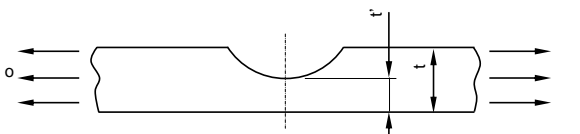
主桁中央部ウェブの断面が半楕円形の欠損1カ所を有するモデルは、図-9に示すとおりとした。

計算は、欠損部の長径・短径について3ケース設定し、 t' を変数させて実施した。なお腐食最大径は、板厚方向の腐食深さ($t-t'$)に一致する条件とし、設計板厚以上に腐食厚さ d は進行しないものとした。

図-9 主桁ウェブ欠陥モデル



主桁ウェブ欠陥平面モデル



主桁ウェブ欠陥側面モデル

2) ウェブ中央部に半楕円状腐食が発生した場合の評価
許容応力を超過する欠損部の大きさは、各ケースについて計算すると表-7のとおりとなる。

表-7 計算結果(ウェブ)

ウェブ中央に腐食が発生した場合、载荷直交方向に

ケース	2a 長径	2b 短径	t' 最小板厚	max 局部応力
Aゲート 設計板厚 td=8mm	円	円	4.0mm (腐食量4.0mm)	212.976N/mm ²
	楕円 8.0mm	楕円 8.0mm	6.0mm (腐食量2.0mm、 tdの25%)	216.439N/mm ²
	楕円 8.0mm	楕円 4.0mm	貫通していても許容応力を超過しない	
Bゲート 設計板厚 td=8mm	円	円	貫通していても許容応力を超過しない	
	楕円 8.0mm	楕円 8.0mm	2.0mm (腐食量6.0mm、 tdの75%)	360.223N/mm ²
	楕円 8.0mm	楕円 4.0mm	貫通していても許容応力を超過しない	
Cゲート 設計板厚 td=17mm	円	円	2.0mm (腐食量15mm)	330.444N/mm ²
	楕円 17.0mm	楕円 17.0mm	4.0mm (腐食量13mm、 tdの76%)	350.443N/mm ²
	楕円 17.0mm	楕円 8.5mm	貫通していても許容応力を超過しない	

長径があるときリスクが高まるが、その他のリスク傾向は表-8のとおりである。

表-8 ウェブ腐食発生リスク傾向

	腐食厚さ(d)	備考
リスク小	d < 設計板厚の 20%程度	腐食形状が真円に近似
リスク中	d = 設計板厚の 20%程度	
リスク大	d > 設計板厚の 20%程度	

7.2 主ローラの腐食による開閉荷重影響解析

7.2.1 概要

主ローラの腐食形態は次の2パターンある。

- 1) 戸当たりとの当たり面が主にガルパニ腐食によって欠損する。(円弧状でなくなる)
- 2) ローラ軸と軸受が固着する

本項では、表-4に示す実在ゲートを対象として、開閉能力を超える当たり面の腐食量、ローラ軸が固着し回転不能となった場合の開閉可否について検討を行った。開閉能力の評価においては、腐食によって弦状の平面が当たり面にできると仮定し、開閉時の抗力は、図-10に示すモデルにおけるころり摩擦係数 $\mu 1$ で算出した。

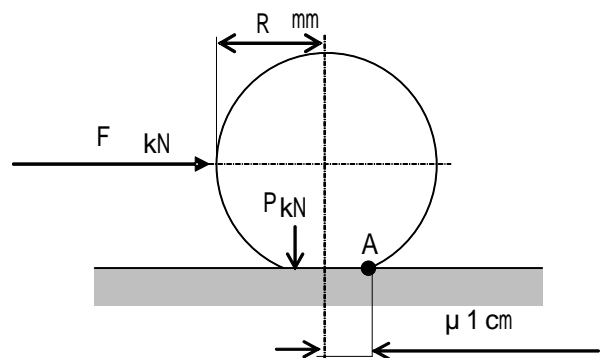


図-10 主ローラ解析モデル

7.2.2 解析結果

表-9に結果をまとめた。

表-9 主ローラ腐食と開閉能力の関係

設備名	主ローラ径 cm	開閉荷重を超過する腐食量 $\mu 1$ cm	固着した時の開閉	
			全主ローラ固着	主ローラ1個固着
Aゲート	47	2.3	x	x
Bゲート	58	15		
Cゲート	119	16	x	

凡例：可、x不可

これらの検討結果は、操作水位と主ローラ径によって決まるものであり、小さいゲート設備では腐食の影響

響を受けやすいといえる。調査実績においても、小形ゲートの主ローラには炭素鋼鋳鋼が使用されるケースで腐食が確認されており、開閉能力に影響を与えるリスクが高い。

8. 設備計画と維持管理に関する提言

8.1 ステンレス製ゲート設備の鋼種選定

SUS304 と SUS316 の暴露試験データから、汽水域における特性をまとめると大略次のとおりである。

- 1) 自然電位データと腐食箇所数から、SUS316 の方が SUS304 より腐食発生自体はしにくい。
- 2) 両鋼種とも、すきま腐食が発生すると腐食速度に大差はない。
- 3) 溶接線に発生すると腐食量が大きい傾向がある。

両鋼種が海水や汽水域で使用された場合に確認されている腐食事例について、暴露試験結果は一定の実証根拠となるものである。

従って、設備計画時の材質決定に当たっては、近隣に設置された既存設備の環境条件、腐食状況を調査する必要がある。図 - 5 及び 6 より、塩化物イオン濃度が 300ppm 程度までの領域であれば SUS304, SUS316 でもある程度の耐食性が期待できる。

一般的な海水あるいは汽水域における耐食性の評価にあたっては、扉体が没水する頻度や環境を整理し、より耐食性の高い鋼種を含めた比較検討を行うべきである。溶接構造であることを勘案すると、炭素含有量を抑えて耐粒界腐食性能を高めた SUS316L を比較検討に含める必要がある。

8.2 小形ゲートの主ローラ

小形ゲートの主ローラは主に SC450, SC480 が用いられ、戸当たりの踏み面が SUS304 であることが多い。主ローラの当たり面は塗装がすぐ剥がれるため、水中に閉鎖された状態になると、写真 - 4 に示すようなガルバニ腐食の発生リスクが高まる。小形ゲートで設計上問題が無い場合は、主ローラにも SUS304 を用いることが望ましい。

8.3 溶接管理

溶接に関しては製作時に大きな課題がある。当所の過去の調査で、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接において、鋭敏化対策としての溶接延長当たりの入熱管理値と鋭敏化率の指標をまとめており、現行の「ダム・堰施設技術基準（案）接合マニュアル」に反映されている。鋭敏化率（%）は、5%が耐食性を損なわない限界であり、安全性を考慮して鋭敏化率の許容限界を 3.5%としている。しかし、実際の製作時における明

確な管理データが残されていないのが実情である。ゲート設備に要求される精度を勘案すると、鋭敏化の修正は不可能に近いことから、製作時の入熱管理徹底と当該施工管理記録の保持など今後改善が望まれる。

8.4 維持管理

8.4.1 扉体の健全度評価手法の提案

腐食による主桁部材について影響度を評価する手法を提案する。

- ・ゲート設備のフランジとウェブにおける集中応力が許容応力を超える形状を把握しておく。
- ・塗装の部分的劣化によって当該箇所に欠損が生じた場合、表 - 3 の数値を用いて、健全度に影響が出るまでの年数を予測し、補修や塗り替えの計画を立案する。
- ・主桁中央で、かつ載荷直行方向に応力集中箇所が複数分布する場合、主桁強度の低下を招くと考えられるので、詳細調査を実施して主桁中央部載荷直行方向に関する有効板厚を求めて評価する。有効板厚の算出については、平成元年に提案された腐食鋼材の有効板厚評価法¹⁰⁾を参考に行うものとした。有効板厚による応力評価は下式による。

$$t = \frac{M}{Z_t}$$

ここに、

t : 有効板厚による曲げ応力 (N/mm²)

M : 曲げモーメント (N・mm)

Z_t : 有効板厚による断面係数 (mm³)

$$I_t = \frac{W \times B}{48 \times E \times I_t} \times \left(L^3 - \frac{L \times B^2}{2} + \frac{B^3}{8} \right)$$

ここに、

t : 有効板厚法によるたわみ量 (mm)

W : 分担荷重 (N/mm)

L : 支持間 (mm)、 B : 受圧幅 (mm)

E : 縦弾性係数

I_t : 有効板厚による桁の断面二次モーメント (mm⁴)

$$= t / L$$

ここに、

t : たわみ度

有効板厚 = 平均板厚 - \times 標準偏差

(ウェブの場合 = 1.4、スキンプレートの場合 = 0.9)

表 - 10 影響度を評価する手法

評価式	評価
t < 設計時許容応力 < 設計時許容たわみ度	部材強度は問題なく、引き続き経過観察をする
t > 設計時許容応力 > 設計時許容たわみ度	取替・補修を行う必要がある
t > 降伏点	危険な状態である

国土交通省管理のゲート設備においては、有効板厚を評価するまで腐食の進行したゲートは少ないが、マイターゲートやフラップゲートのように、水中から引き上げることのできない形式では、気づかないうちに進行していくこともあり得る。主桁の腐食は実績が多く、通常の点検でも発見しやすい。有効板厚の評価で許容応力を超えることは設計上の「赤」信号であり、近年増加しているゲリラ豪雨を考えると、緊急対応が間に合わない場合もありえる。よって、局部応力を健全度評価のきっかけとし、設置環境による腐食進行を予測しながら整備計画を適正に舵取りする方法が現実的であると思料する。

8.4.2 ステンレス製ゲートの維持管理

現行の水門関係の技術基準や設計指針では、構造から完全に「すきま」を排除することは難しい。今回の暴露試験結果では、55ヶ月という期間ではあるが板厚方向への貫通孔や構成部品の欠損（溶解）などは見られなかった。

一方、散見されたすきま腐食の傾向から、維持管理上次の事項に留意する必要がある。

1) 水密ゴムの水密性

ゴムを挟んでいるステンレス鋼に、水密方向のすきま腐食が進展すると水密性に影響が出る可能性がある。

2) 主ローラ、サイドローラ取付金具の緩み

取付金具のすきま腐食や腐食性生物により固着・緩みが生じ、がたつきや回転不良など昇降時に支障をきたす可能性がある。

3) ボルト・ナット・ワッシャ類の緩み、脱落

ナット・ワッシャにすきま腐食が発生し、緩み、脱落の可能性はある。

以上項目の発生有無について、すきま内部を目視確認することは難しいので、すきま端部における写真 - 10 に見られるような腐食生成物の有無がひとつの目安になる。また、点検上の判断基準として、写真 - 1 のような孔食が発生しているゲート設備では、上記のようにすきま構造を有している箇所では腐食が発生して

いる可能性が高いと考えるべきである。

9. まとめ

ステンレス鋼の暴露試験結果と既存文献から得られた知見を基に、河川環境における腐食発生リスクを整理することができた。また、材料選定、ステンレス鋼の溶接管理、腐食速度を用いた扉体と主ローラの健全度評価手法を提案した。

しかし、ゲート設備の腐食には、pH、溶存酸素、水温、溶接部に見られる微生物の関与等も総合的に評価する必要があり、実際に現場で発生する腐食形態を逐次把握して、今回提案した設置環境と腐食速度の関係を検証していく必要がある。

今後、本成果の普及に関して積極的にフォローアップしていく。

参考文献

- 1) ステンレス協会：ステンレスの初歩 2007, PP.84, 2007.5
- 2) 松島巖：腐食防食の実務知識, (株)オーム社, PP.23-24, 2003.3
- 3) (社)腐食防食協会：腐食センターニュース No009, 1995.12
- 4) (社)腐食防食協会：エンジニアのための微生物腐食入門, 丸善(株), PP.237, 2004.2
- 5) JIS G 0592：ステンレス鋼の腐食すきま再不動態化電位測定法, 2002
- 6) 守屋進・曾根幸宏・望月紀保：第 50 回材料と環境討論会講演集 河口堰におけるステンレス鋼の腐食性評価に関する研究(その1), PP.120, 2003.10
- 7) 明嵐政司・守屋進・池田八郎・阿部新治：ダム施設における鋼構造物の防食に関する調査報告書(その1), 土木研究所資料 3558 号, PP.6, 1998.1
- 8) 杉山篤・長健次・村松敏光・竹田英之・米村克己・霧見篤：ダム用ゲートにおけるステンレス鋼の特性調査, 土木研究所資料第 3093 号, PP.70, 1992.3
- 9) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水門鉄管・構造物編, PP.112,
- 10) 松本勝・中村幾雄・白井義朗・白石成人：腐食鋼材の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎 89-12, (株)建設図書, PP.19,

Research on the evaluation of soundness and service life of water gate equipment

Abstract : The corrosion of water gate exposed to the river environment has a big influence on strength and the life time of water gate. In the theme the exposure examination is performed using stainless steel material of the austenite. From the experiment we can see the relationship between the material and the installation environment and the corrosion speed clearly. Then we propose the method evaluating the relationship between the rust and strength.

Key words :gate equipment, corrosion, strength, stainless steel, exposure examination