

ゲート設備の健全度と寿命評価

田中義光* 藤野健一**

1. はじめに

ダムや河川に設置されるゲート設備は、厳しい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。当チームでは平成14～20年度にかけて、ステンレス鋼の暴露試験を実施するとともに、ゲート設備の腐食発生・進展の予測と設備の健全度を評価する手法の検討を行った。

具体的には、①ゲート設備の腐食発生リスクの整理、②ゲート設備における腐食進展予測、健全度評価手法を提案して、③維持管理面での提言を行うものである。

2. 腐食発生リスクの整理

汽水域や海水域で使用されるステンレス鋼と一般的に使用される普通鋼を使用したゲートの設備の腐食傾向を調査し、その発生リスクを整理した。

2.1 ステンレス鋼の腐食傾向

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水門を対象に目視調査を実施した。その結果、一部のSUS304製扉体に赤錆のような発錆が見られ、海水、汽水に浸漬された扉体、戸当たりの溶接部に孔食が発生しているケースも確認された。ただし、腐食の発生・進展については不明な点が多いことが解った。

2.2 普通鋼の腐食傾向

SS400、SM490は、水と酸素がある環境では安定せず酸化鉄(錆び)を形成して減肉(腐食)していくため、塗装で防護するのが一般的である。

塗膜が劣化した箇所は、ある速度で腐食が進行するが、その速度は汽水域・海水域では大きくなる傾向がある。ゲート設備では、主桁や補助桁の隅角部の塗膜が薄くなりやすく破壊されやすいため、そこから円弧状に腐食が広がる。

また、普通鋼はステンレス鋼よりイオン化傾向が大きいため、汽水域や海水域で直接接触すると電池を形成し、普通鉄は負極となって水中にイオ

ンを放出し減肉する。戸当たりは一般的にステンレス鋼であるため、これと接する主ローラ、端桁のような部材は腐食しやすい(写真-1参照)。

従って、汽水域・海水域に設置され、常時閉で運用されるゲートに腐食するものが多い。構造的に主桁の上部には土砂が載りやすく、その場合も塗膜の劣化が進行して腐食が起りやすくなる。



写真-1 縦端桁下部の腐食

2.3 ステンレス鋼暴露試験の実施

耐食性が良好といわれるオーステナイト系ステンレス鋼においても、表面の発錆や溶接部の孔食等が見られる。不明な点が多いステンレス製ゲート設備の腐食に関し、どの位置にどのような腐食が発生するか把握することを目的として、汽水域における暴露試験を実施した。

2.3.1 試験方法

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

引き上げ調査は次の3回に分けて実施した。

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)

3) 試験片

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400×400mm、主桁高さ200mm、主ローラ径φ145mm、ローラ軸φ25mmとした。製作数はSUS304、SUS316とも3基（各No1～3と付番）として、同一場所(荒川下流部、樋管水路内)に設置した。試験ユニットの外観を写真-2に示す。



写真-2 暴露試験ユニット外観

2.3.2 試験結果の概要

あらかじめ計測しておいた、SUS304とSUS316試験片の腐食すき間再不動態化電位と、暴露試験期間中の各試験片における自然電位を比較した結果、自然電位が腐食すき間再不動態化電位を上回っている場合が多く、両材質とも腐食環境にあることが証明された。

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間腐食深さは最大1mm前後、平均腐食深さは0.2～0.4mm程度であり、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間部で発生しており、接合金属が深くえぐられ、深さは6mmに達していた(写真-3)。

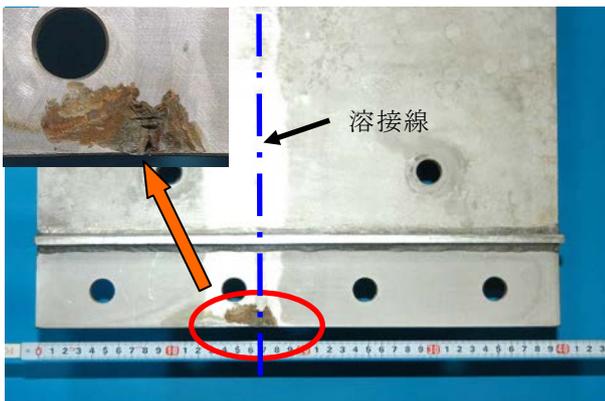


写真-3 リップ部のすき間腐食(SUS304-No2)

- 4) 発生した殆どの腐食がすき間腐食であり、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-4)。



写真-4 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。

2.3.3 SUS304及びSUS316腐食速度

図-1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。

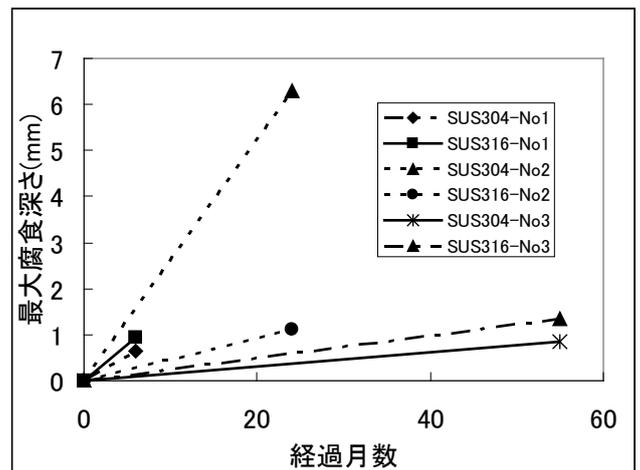


図-1 各試験ユニットの最大腐食量

各試験ユニットの腐食速度を求め、表-1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

表-1 すき間腐食速度 (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

タは用いないものとした。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られる。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。

2.4 設置環境による腐食速度

本項でいう「腐食量」とは、リスクを示す指標であり、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、普通鋼については既存文献を参考に、SUS304・SUS316については暴露試験結果より抽出し、表-2に示す。

表-2 腐食要因と腐食速度の関係

単位: mm/年

要因	区分	指標	流速	扉体材料			主ローラ材料	
				SS SM SMA	SUS304 SUS316	SUS316L	SC	SUS
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	5.8ppm程度	0.5	0.40	/	/	1.20	/
			1	0.30	/	/	1.00	/
			5	0.10	/	/	0.30	/
	汽水域	100~19000ppm	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	19000ppm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
			5	1.10	1.68	0.39	0.90	1.68
電食	淡水域	5.8ppm程度	0.5	0.90	/	/	/	/
			1	0.70	/	/	/	/
			5	0.20	/	/	/	/
	汽水域	100~19000ppm	0.5	2.70	/	/	/	/
			1	4.70	/	/	/	/
			5	7.40	/	/	/	/
	海水域	19000ppm以上	0.5	2.70	/	/	/	/
			1	4.70	/	/	/	/
			5	7.40	/	/	/	/
			5	7.40	/	/	/	/

斜線は支配要因でないことを示す。

表-2に示す汽水域と海水域で、普通鋼よりSUS304及びSUS316の方が腐食速度は大きくなっているが、腐食形態が異なっている点に注意を要する。つまり、普通鋼では塗膜が劣化した箇所の全面腐食を対象としており、SUS304及びSUS316ではすき間腐食あるいはすき間腐食から派生した孔食を対象としている。

3. 腐食による設備への影響度の試算

腐食がゲート設備の健全度に与える影響として、主桁の強度と主ローラの腐食進行に伴う開閉荷重の増加に着目した。

ゲート設備の設計条件や余裕率は設備毎に異なるが、本検討では小型・中型・大型3パターンの影響度評価を行って、類似規模のゲート設備を評価する上での指標を得ることを目的とした。

3.1 主桁強度の評価

最も大きな荷重の作用する主桁を対象として、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。部分的な欠損は、腐食実態に照らして、フランジ及びウェブに発生する(写真-4 参照)ものとし、検討条件は下記のとおりとする。

① 検討ケース A： 3例

(小形1例、中形1例、大形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箇所生じることを想定する。

● 評価

欠損部断面における応力集中の最大値を算定し、許容応力を超える欠損部の大きさを求める。許容応力は、ダム・堰施設技術基準(案)に基づき、SS400：211.5N/mm²、SMA490：319.5N/mm²とする。

● 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。

② 検討ケース B： 3例

(小形1例、中型1例、大型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カ所生じることを想定する。

- 評価、荷重条件は、検討ケースA同様とする。

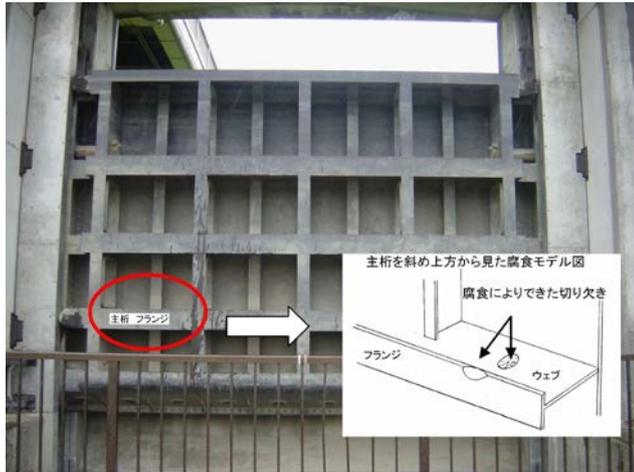


写真-5 主桁の評価モデル

3.1.1 評価対象設備

対象設備は、表-3 に示す 3 水門とした。

表-3 評価対象設備

分類	Aゲート	Bゲート	Cゲート
	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)
型式	鋼製ローラゲート	鋼製ローラゲート	鋼製ローラゲート
扉体材質	SS400	SMA490	SMA490
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)	—

3.1.2 ケースA：フランジに欠損を有する場合

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-2 に示すとおりとした。計算は、 d 、 t' 、 ρ 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幅方向の腐食厚さは、板厚方向の腐食深さに一致する条件($d=t-t'$)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。

2)評価結果

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-4 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する場合は、曲率半径 ρ は大きいほど局部応力としては安全側になるが、腐食深さが設計板厚の約 20% を超えると許容応力を超える傾向がある。

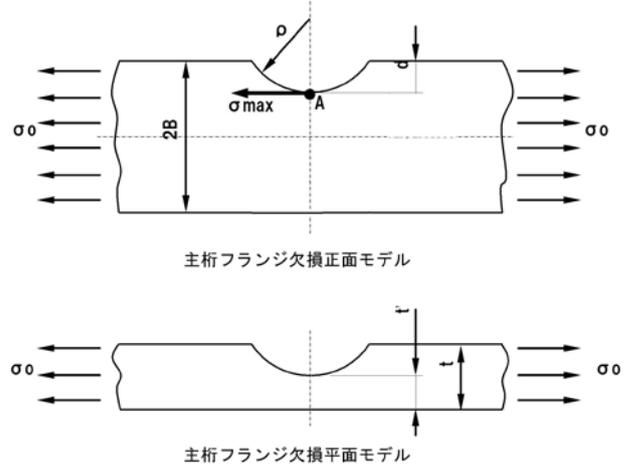


図-2 主桁フランジ欠陥モデル

表-4 計算結果 (フランジ)

ゲート種類	検討ケース	d 腐食厚さ	t' 最小板厚	ρ 曲率半径	σ_{max} 局部応力
Aゲート (小形) 設計板厚 td=13mm 許容応力 211.5 N/mm ²	A-1	可変 3.0mm (tdの23%)	可変 10.0mm	固定 13.0mm (=td)	219N/mm ²
	A-2	固定 3.0mm	固定 10.0mm	可変 14.0mm	215N/mm ²
	A-3	可変 5.0mm	可変 8.0mm	可変 21.0mm	232N/mm ²
Bゲート (中形) 設計板厚 td=15mm 許容応力 319.5 N/mm ²	A-1	可変 8.0mm (tdの53%)	可変 7.0mm	固定 15.0mm (=td)	328N/mm ²
	A-2	固定 8.0mm	固定 7.0mm	可変 16.0mm	320N/mm ²
	A-3	可変 10.0mm	可変 5.0mm	可変 20.0mm	342N/mm ²
Cゲート (大形) 設計板厚 td=31mm 許容応力 319.5 N/mm ²	A-1	可変 10.0mm (tdの33%)	可変 21.0mm	固定 31.0mm (=td)	331N/mm ²
	A-2	固定 10.0mm	固定 21.0mm	可変 34.0mm	321N/mm ²
	A-3	可変 13.0mm	可変 18.0mm	可変 49.0mm	323N/mm ²

3.1.3 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箇所を有するモデルは図-3 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' を可変させて実施した。なお、腐食最大径は板厚方向の腐食深さに一致する条件とし、設計板厚以上に腐食厚さは進行しないものとした。

2)評価結果

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-5 のとおりとなる。

ウェブ中央に腐食が発生した場合、载荷直交方向に長径があるとき局部応力は高まり、真円に近い程低下する傾向があるが、フランジ部と同様に腐食深さが設計板厚の約 20%を超えると許容応力を超過するケースが多い。

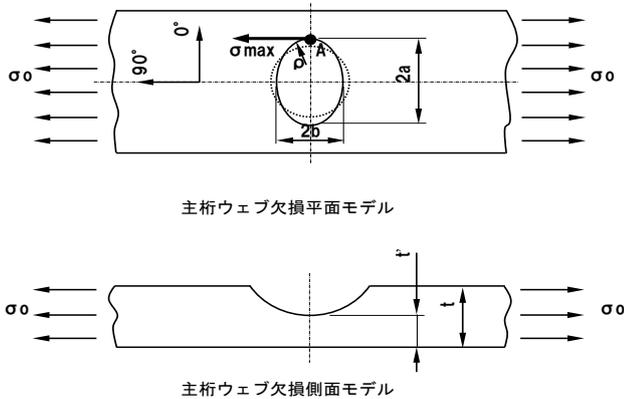


図-3 主桁ウェブ欠陥モデル

表-5 計算結果 (ウェブ)

ゲート種類	ケース	2a 長径	2b 短径	t' 最小板厚	σ max 局部応力
Aゲート 設計板厚 td=8mm	B-1	円 8.0mm	円 8.0mm	4.0mm (腐食量4.0mm)	213N/mm ²
	B-2	楕円 8.0mm	楕円 4.0mm	6.0mm (腐食量 tdの25%)	216N/mm ²
	B-3	楕円 4.0mm	楕円 8.0mm	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	B-1	円 8.0mm	円 8.0mm	貫通していても許容応力を超過しない	
	B-2	楕円 8.0mm	楕円 4.0mm	2.0mm (腐食量 tdの75%)	360N/mm ²
	B-3	楕円 4.0mm	楕円 8.0mm	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	B-1	円 17.0mm	円 17.0mm	2.0mm (腐食量15mm)	330N/mm ²
	B-2	楕円 17.0mm	楕円 8.5mm	4.0mm (腐食量13mm、 tdの76%)	350N/mm ²
	B-3	楕円 8.5mm	楕円 17.0mm	貫通していても許容応力を超過しない	

3.2 主ローラの腐食による開閉荷重解析

3.2.1 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バ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-3に示すゲートを対象として、①開閉能力を超える当たり面の腐食量、②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-4に示すモデルにおけるころがり摩擦係数 μ_1 で算出した。

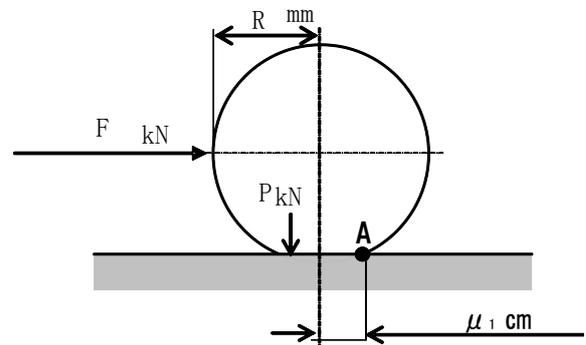


図-4 主ローラ解析モデル

3.2.2 解析結果

表-6に結果をまとめた。

表-6 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 μ_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	×	×
Bゲート	58	15	○	○
Cゲート	119	16	×	○

凡例:○可、×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。

4. 設備計画と維持管理に関する提言

4.1 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。

また、全てのローラゲートにおいて、開閉荷重を超える腐食量は把握しておき、日常点検において異常を認めたときは、迅速な処置を行う必要がある。

4.2 溶接管理

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接に関しては、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がまとめられ、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管理データは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。

4.3 ステンレス鋼ゲートの維持管理

暴露試験で散見されたすき間腐食の傾向から、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、水密方向のすき間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

取付金具のすき間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・ワッシャにすき間腐食が発生し、緩み、脱落の可能性がある。

4.4 扉体の健全度・寿命評価手法の提案

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。

- ・3.1 項に示す方法で、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欠損が生じた場合、表-2 の数値を用いて、健全度に影響が出るまでの最短年数を予測し、それまでの腐食実態と照らし合わせて補修や塗り替えの計画を立案する。なお、欠陥が認められた段階で、簡易に補修できる場合は、日常点検で対応する。
- ・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、主桁強度の低下が懸念されることから、詳細調査を実施し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³⁾を参考に行うことが有効であると考え。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、補修または更新等対策を検討することになるが、補修については施工期間や精度の確保など課題が多く、現実的に扉体は寿命を迎え、作り替える場合が多いと考えられる。従って、主桁フランジ・ウェブに同様の腐食箇所を増加させないよう日常点検時の清掃やタッチアップ等を施すことで、寿命を延伸させることが重要である。

5. まとめ

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とともに、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。

参考文献

- 1) 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、P.6、1998.1
- 2) 杉山篤・長健次・村松敏光・竹田英之・米村克己・鶴見篤：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、P.70、1992.3
- 3) 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P.19、1989.12
- 4) 田中義光・山元弘：ゲート設備におけるSUS304とSUS316の腐食特性、取水と制水No53、P.141、2009.3

田中義光*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進
本部先端技術チーム
主任研究員
Yoshimitsu TANAKA

藤野健一**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進
本部先端技術チーム
主席研究員
Kenichi FUJINO