

耐腐食化による長寿命化への取り組み ～次世代の河川用機械設備～

渡邊 大記¹

¹豊橋河川事務所 管理課 (〒441-8149愛知県豊橋市中野町字平西1-6)

豊橋河川事務所では水閘門設備30箇所、排水機場2箇所の河川用機械設備を直轄管理している。しかし、河口付近の汽水域は機械設備において劣悪な環境であり、浸水しているゲートや水中ポンプの腐食を促進し、修繕および更新の頻度やコストの増加が懸念される。本稿では、河口付近の機械設備のライフサイクルコスト削減による長寿命化の第一歩として、近々更新を計画している江川樋門に着目し、オーステナイトステンレス鋼や二相ステンレス鋼等、耐腐食性に優れた鋼材を用いて、機械設備のライフサイクルコストについて比較および検討を行った。

キーワード：豊川放水路、河川用機械設備（機械設備）、腐食、江川樋門、二相ステンレス鋼、ライフサイクルコスト（LCC）

1. はじめに

(1) 河川用機械設備の長寿命化

図-1より、現在、全国の直轄管理区間に約1万施設存在する河川用機械設備（以下「機械設備」）のうち、樋門・樋管等が9割以上（約9,300施設）を占め、残る1割弱を揚排水機場（約450施設）、堰等（約330施設）が占める。これらのうち、今後10年間の間に設置後40年を経過する施設は、全体の約6割に達する。このことから、今後は河川構造物の維持修繕・更新の比重が増加すると考えられる。機械設備は、堤内側への逆流防止、本川への強制排水を目的とした機能を有するため、腐食等による劣化や損傷により機能損失した場合、生命・財産の損失に直結するなどの事態が想定される。

この事態を防止する施策として「河川用ゲート設備点検・整備・更新マニュアル（案）」（以下「更新マニュアル」）及び「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）」が定められており、これらに基づき維持管理および機能保全を図っている。しかし、水質や気候、運転頻度等によっては、更新マニュアルに定められた平均の取替・更新の標準年数未満であっても、早急に更新を要する場合がある。

(2) 豊川放水路の概要

豊橋河川事務所では水閘門設備30箇所、排水機場2箇所の機械設備を直轄管理している。その中でも豊川放水路においては河口から6.4kpと短い管理区間でありながら、直轄管理区間全体のうち、約5割を占めている。

図-2に機械設備の概観（左側：豊川放水路分流堰、右

側：古川排水機場水中ポンプ）を示す。

豊川放水路河口付近に位置する江川樋門は、経年劣化により発錆・腐食が扉体全体に渡り進行しているため、扉体の更新を検討している。表-1より、最初の扉体更新は完成後27年目（1987年）に実施し、2021年時点で34年経過している。いずれも更新マニュアルの目安として定められている、平均更新年数58年の約半分しか経過していない。河口付近の汽水域による劣悪な環境が、鋼材の発錆・腐食の進行に影響を及ぼしている。本稿では江川樋門の更新検討に先立ち、近年、施工実績が増加し、耐食性に優れた二相ステンレス鋼のライフサイクルコスト（以下「LCC」）の比較及び適用の検討を目的とする。

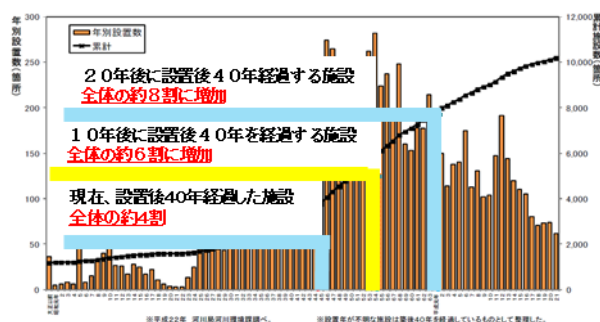
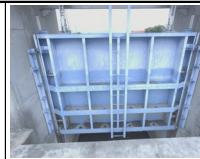


図-2 豊川放水路に設置されている機械設備の概観

表-1 江川樋門におけるゲートの概観と主要諸元

ゲート形式	ローラーゲート	
門数	3門	
径間×扉高	4.80m × 3.70m	
開閉方式	電動ラック式	
写真		
	全景	ゲート部
修繕・更新履歴	ゲートの概算費用(千円)／修繕・更新内容	
1960(完成年)	10000／江川樋門竣工	
1987(完成後27年)	20,000／更新(扉体、戸当り各3門)	
2007(完成後47年)	4,000／塗装、水密ゴム交換各3門	
50年間LCC(千円)	34,000	
標準更新年数	58年	

2. 現状と課題

(1) 豊川水系の水質

海水は塩化物を中心とする無機塩類を多量に含んでおり、電気伝導度が高いことから腐食性が高く、これに接するゲートやポンプは淡水に比べて腐食の進行が顕著である。海水は地域によって多少の違いはあるものの、含有している塩化物イオン濃度は約19,000mg/Lと、水道水の上限200 mg/Lの約200倍である。1章1節で述べた通り、機械設備の標準更新年数はマニュアルに定められている。しかし、実際には河口からの距離や周囲の環境等によって設備の寿命に数十年の差が生じる場合がある。

既設の江川樋門は鋼製ゲートであること、また河口から約2.4kmの汽水域であることから、塩化物イオン濃度が高く腐食しやすいと考えられる。そこで、国土交通省水管理・国土保全局が所管する観測所の観測データから、豊川に設置されている3箇所の観測所で取得した、直近30年間の塩化物イオン濃度の平均値を図-3に整理した。

江川樋門の最寄観測所（小坂井大橋）において、平均塩化物イオン濃度が約6,500mg/Lと他2地点に比べ約1,200～2,000倍であり、海水に近い性質であることが言える。

(2) 機械設備における腐食のメカニズム

江川樋門のゲート点検の際に発見した腐食事例に基づいて、鉄の腐食が発生するメカニズムを図-4に示す。金属の腐食はアノード（陽極）反応とカソード（陰極）反応を対とする電気化学的反応によって進行する。アノード反応は式(1a)の通り鉄がイオン(Fe^{2+})となって溶液中に溶け出す反応である。一方、カソード反応は式(1b)の通り鉄のイオン化で余った電子と、溶存酸素および水とが、 OH^- を作る反応である。式(1a)、式(1b)から発生した Fe^{2+} と OH^- は、式(1c)の通り水酸化第一鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ になる。これは溶存酸素によってすぐに酸化されて $\text{Fe}(\text{OH})_3$ になり、最終的には FeOOH 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ のような形の赤錆となって鉄表面に堆積する。

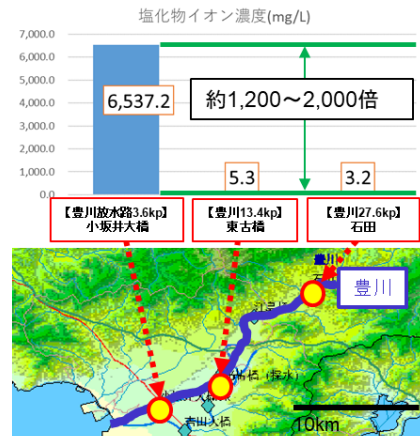
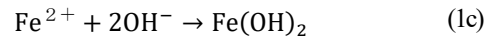
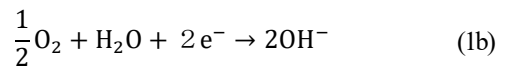
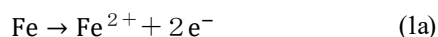


図-3 各観測地点における塩化物イオン濃度の平均値

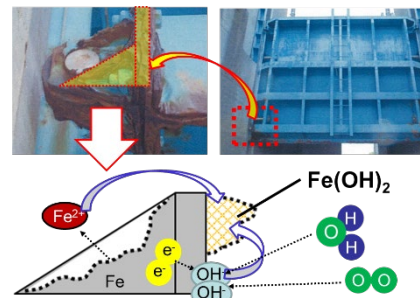


図-4 鉄の腐食事例及びメカニズム

3. 一般鋼とステンレス鋼の比較・検討

江川樋門の既設ゲートの主要部材は一般鋼材（SS400）であり、表面に塗装が施されている。しかし、汽水域に位置するため塗装の経年劣化やゲート部材の腐食が進行しやすく、10～20年に1度は塗替塗装が必要となる。その対策として、耐腐食性に優れた、オーステナイトステンレス鋼（SUS304およびSUS316L）への更新を検討した。しかし、更新後の耐用年数やレアメタル（NiやCr等）含有によるコスト上昇の観点から、近年河川用ゲートに使用されている二相（オーステナイト＋フェライト）ステンレス鋼（SUS329J1）を新たに適用対象として提案する。

ステンレス鋼は、鉄（Fe）を主成分（50%以上）とし、クロム（Cr）を10.5%以上含む合金鋼であり、Crが空気や水中の酸素と結合して表面に不動態皮膜（約3nm）を形成し、錆を防止するため、塗装が不要となる。一方、鉄鋼に比べて全面腐食が発生しにくい反面、すきま腐食（局部腐食）が発生しやすい。各ステンレス鋼の適用検討にあたって、表-2に示す通り、江川樋門付近の水質に近い江戸川水閘門付近（東京都江戸川区）で2年間実施

表-3における、2年間の暴露試験実データを基に、同じペースで腐食が進行すると仮定した場合の100年間の最大すきま腐食量を図-5に示す。なお、近畿地方整備局の津波水門設計における耐震性能の考え方²⁾を参考に、耐食性能を健全な順から①水密性など水門としての機能を完全に維持した状態（最大すきま腐食量1mm以下）、②構造物としての安全性を維持した状態（最大すきま腐食量4mm以下）、③水門の開閉操作が可能である状態（閉動作のみ可能）の3段階で区分したとき、耐食性能①（最大すきま腐食量1mm以下）に準じて検討する。

環境：汽水、感潮河川	江戸川水門付近	江川樋門付近	単位	
塩化物イオン濃度	平均	6,000	mg/L	
	最大	12,000	mg/L	
	最小	≧ 0	≧ 0	mg/L
水温	平均	22	18	℃
	最大	32	34	℃
	最小	12	3	℃

年	オーステナイト ステンレス鋼		汎用二相 ステンレス鋼	備考
	SUS304(mm)	SUS316L(mm)	SUS329J1(mm)	
0	0	0	0	実績
2	0.368	0.069	0.037	
10	1.84	0.345	0.185	
20	3.68	0.69	0.37	
30	5.52	1.035	0.555	推定
40	7.36	1.38	0.74	
50	9.2	1.725	0.925	
60	11.04	2.07	1.11	
100	18.4	3.45	1.85	

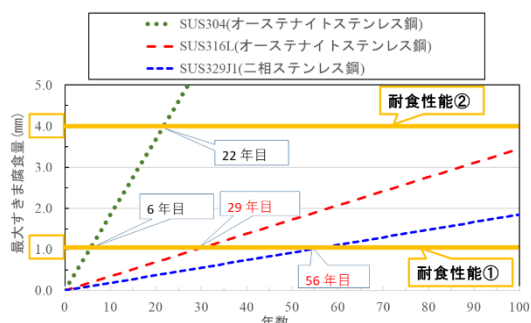


図-5 江戸川水閘門付近におけるステンレス鋼のすきま腐食量

4. 検討結果

表-3 および図-5 から、100 年間で前述の耐食性能①に定める最大すきま腐食量 1mm を超過する材質は、SUS304 が約 6 年に対し、SUS316L は約 29 年、SUS329J1 は約 56 年であることが言える。さらに耐食性能②に定める最大すきま腐食量 4mm を超過する材質は、SUS304 のみで約 22 年である。しかし、実際には表-1 に示した通り江川樋門は鋼製でありながら、竣工から 27 年で更新し、34 年経過した現時点においても運用している。これは、平常時は常にゲートを開放（干満時ともに浸水していない状態）していることが要因と考えられる。言い換えれば、ステンレス鋼の最大すきま腐食量は表-3 および図-5 よりも減少し、更なる長寿命化が期待できる。

この暴露試験結果の他、市場性や、経済性等の観点から、各比較項目を◎～△の3段階で評価し、総合的に点数で評価したものを表4に整理する。表4から、SS400、SUS316L、SUS304のトータルコストはイニシャルコストの約2~4倍に対し、SUS329J1は等倍であるため、LCCが最小になると考えられる。したがって、①寿命化によるメンテナンス費用の抑制、②軽量設計による開閉装置のコンパクト化・コスト削減、③省合金化（Ni削減・Cr増加）による価格変動リスクの減少³⁾、と言った3つのメリットから、SUS329J1が適切と考えられる。

比較項目	一般鋼	三相ステンレス鋼	オーステナイトステンレス鋼	
	SS400	SUS329J1	SUS316L	SUS304
主要成分 (mass%)	-	23Cr-5Ni- 1Mo-0.16N	18Cr-12Ni -2.5Mo	18Cr-8Ni
市場性	◎	◎	◎	◎
景観	◎	◎	◎	◎
加工性	◎	◎	◎	◎
耐食性	△	◎	△	◎
維持管理	△	◎	△	◎
イニシャルコスト	10 百万円	15 百万円	17 百万円	14 百万円
50年間に亘るコスト	34 百万円	15 百万円	34 百万円	42 百万円
経済性	△	◎	△	△
材料総重量	5400 kg	4300 kg	5400 kg	5400 kg
既設構造物への影響	◎	◎	◎	◎
総合評価	◎:3点 ×2= 6点 ◎:2点 ×2= 4点 △:1点 ×3= 3点 金計: 13点	◎:3点 ×5=15点 ◎:2点 ×2= 4点 △:1点 ×0= 0点 金計: 19点	◎:3点 ×4=12点 ◎:2点 ×2= 4点 △:1点 ×1= 1点 金計: 17点	◎:3点 ×2= 6点 ◎:2点 ×4= 8点 △:1点 ×1= 1点 金計: 15点

5. 今後の課題

本検討から、表-1や表-2、図-3より、機械設備の更新履歴や水質調査結果を関連付けて比較することで、江川樋門に限らず、多様な河川域の耐腐食化の検討手法としての活用が期待できる。また、表-1の過去の塗替塗装の実績から、汽水域の腐食しやすい環境下のゲートは、耐食性の高い二相ステンレス鋼に更新することでLCCが減少すると考えられる。

しかし、同じ汽水域でも塩化物イオン濃度や水温が大きく異なる場合の腐食条件についても検証が必要である。

また、今回の検討にあたって、二相ステンレス鋼を用いて実際に施工した企業に確認したところ、オーステナイトステンレス鋼に比べ、①酸洗いに約4倍の時間を要し納期が長期化する、②高度な溶接技術を要する、③製作できる企業が少ない、と言った問題が挙げられた。今後は工期の短縮を考慮した施工計画の検討も必要と考えられる。

謝辞：本検討にあたり二相ステンレス鋼によるLCCの検討に際しては中部地方整備局職員の皆様および、関係企業の皆様のご協力があったことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1)国土交通省：河川構造物長寿命化及び更新マスタープラン、
(2011)
- 2) 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所：東日本大震災の知見を踏まえた水門の基本設計について、 (2012)
- 3) 新日鐵住金ステンレス株式会社：水門への二相ステンレスの適用について、 (2014)