

汽水域におけるステンレス鋼の腐食挙動に関する研究

Corrosion behavior of stainless steel in brackish water region

守屋進*, 南孝男**, 松岡和巳***, 幸英昭****, 望月 紀保*****, 曾根 幸宏*****, 平井陽一*****
 MORIYA Susumu, MINAMI Takao, MATUOKA Kazumi, MIYUKI Hideaki, MOCHIZUKI Noriyasu, SONE Yukihiro, HIRAI Yoichi

*主任研究員 独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

**次長 住友金属テクノロジー株式会社受託研究事業部 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)

***工博 主幹研究員 新日本製鐵株式会社鉄鋼研究所 (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

****工博 部長研究員 住友金属工業株式会社総合技術研究所 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-8)

*****工博 主席研究員 株式会社ナカポーテック技術研究所 (〒362-0052 埼玉県上尾市中新井 417-16)

*****株式会社ナカポーテック技術研究所 (同上)

*****専門部長 石川島播磨重工業株式会社生産技術開発部 (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1)

In order to apply stainless steels to river administration facilities in the brackish water region, environmental condition such as chloride concentration and corrosion behavior of stainless steels were investigated. Exposure tests were conducted in the brackish water region of a river for six years. Various types of welded specimens and simulated water gates were settled at tidal zone, in the river water and in soil under the river bottom. It was found that chloride concentration in river water changed with water level at the range between several 10 and several 1000 ppms. On the other hand, the concentration was stagnant several 1000ppm in soil, which decreased the corrosion potential of SUS 304 stainless steel to lead to the occurrence of localized corrosion and its propagation. These results show that corrosivity in soil is higher than in water for stainless steels. Exposure test results by simulated water gate suggest that corrosion proceeds by the formation of cell which is composed of anodic part in soil (high Cl^- - S^{2-}) and cathodic part in water (Cl^- - O_2).

Key Words: river administration facilities, stainless steel corrosion, brackish water region.

キーワード: 河川管理施設, ステンレス鋼の腐食, 汽水域

1. はじめに

水門、樋門・樋管、堰、閘門やダム放流設備ゲート、取水設備などの河川管理施設は、洪水調整、灌漑用水や飲料水の確保、発電等、河川水を多目的に利用・制御するための重要な構造物である。これら河川管理施設は、人命や財産を護るため常に稼働状態であることが求められるが、そのほとんどは常時水中にあるなど厳しい腐食環境にあるものが多い。その機能を維持するためには、常日頃の点検とメンテナンスによる維持管理が重要である。

一方、今後本格的な少子・高齢化社会を迎えるわが国は、社会の活力の低下が懸念されている。また、財政事情の悪化により公共事業は削減の傾向となっている。このため、河川管理施設においてもその維持管理の合理化・効率化による維持管理費用の削減が求められている。建設分野の腐食コスト調査結果によると河川構造物の腐食コストは、産業連関表より 1995 年時点で 559 億円と算出されている¹⁾。

従来、水門扉、堰のゲート、ダムの放流管、扉体、取水設備本体、スクリーンなどの鋼構造物の防食は、塗装で行われることがほとんどであった。しかしながら、わが国では、梅雨から台風襲来の時期は洪水調整のためこれらの施設のメンテナンスを行うことはできず、10 月後半以降から冬季で維持管理を行っている。このため補修塗装は、低温である冬季に行うため十分な塗膜性能を得ることが難しく、再塗装までの周期が橋梁塗装などに比べて短いことが多い。特に山間部や東北、北海道などの寒冷地のダムでは、10 月後半から 1 ヶ月程度しかメンテナンスの期間がとれないため、十分な補修塗装ができないことが多かった。

このため河川管理施設の維持管理費用に占める腐食コストを削減する方法として、河川管理施設の防食性能を向上させ、維持管理費用を削減することが試みられている。特に東北地方のダム施設では、昭和 30 年代から耐食性に優れ、塗装を必要としないステンレス鋼が土木分野では最も早くから適用された。しかしながら、ステンレス鋼が

高価であったため、その使用は部分的で他の金属材料（主に普通鋼材）との混用や、ステンレスクラッド鋼が使用されていた²⁾。このため水中没水部では、普通鋼との異種金属の接触による腐食やステンレス鋼の溶接熱影響部の鋭敏化や溶接金属の希釈による局部腐食が問題となってきた。ダム施設におけるステンレス鋼の適用方法に関する研究が平成元年から行われ、その適用法が検討されてきた³⁾。これらの研究成果は、ダム・堰施設技術基準⁴⁾に取り入れられ淡水環境でのステンレス鋼の防食法はほぼ確立した。

しかし、潮の満ち引きにより塩化物イオン濃度が数 ppm～数千 ppm まで変化する汽水域にある河口堰などの河川構造物は、従来から塗装による防食だけでは十分でないため、塩化物イオン濃度が高くなる下流側は、塗装と陽極をゲート本体に取り付ける電気防食（流電陽極方式）が併用されていた。一方、淡水の上流側は、塗装で防食されていた。このような防食方法では、10 数年毎に陽極の取替えに併せて仮ゲートを降ろしてゲート本体を気中に取り出す大規模な補修工事が行われている。

このため、維持管理を軽減する目的で近年、河口堰のゲートをステンレス鋼製とする試みが行われ始めた。全面腐食にくいステンレス鋼を汽水域で使用する場合は、普通鋼との異種金属接触腐食と、ステンレス鋼溶接部の局部腐食のほか、孔食、すき間腐食や微生物腐食など各種局部腐食を考慮する必要がある。すなわち、ゲートの局部腐食による漏水、ボルトの破断、開閉装置の固着が懸念される。そこで、河口堰などの汽水域にある河川管理施設の維持管理の軽減を目的にステンレス鋼を適用する際の汽水域におけるステンレス鋼の腐食挙動を明らかにするため以下の3種の暴露試験を河口堰周辺で実施した。①汽水域の腐食性を明らかにするための塩化物イオン濃度の変動とステンレス鋼の自然電位変化の長期モニタリング。②各種ステンレス鋼の汽水域における耐食性に及ぼす鋼種の影響を明らかにするための小型試験片の暴露試験。③河口堰ゲートの構造部位におけるステンレス鋼の腐食に及ぼす構造要因を明らかにするための魚腹型ゲートを模擬した箱型試験体の河床への設置暴露試験を行った。

2. 汽水域におけるステンレス鋼の腐食性

2. 1 実験方法

(1) 試験体

試験体は、常時水中部にある水中試験体と、上流からの砂れきの流下により最終的には砂れき層に埋没する土中試験体の2種類である。それぞれの試験体の組立概観図を図-1に示す。試験片は、中央部にX開先の溶接部を持つ長辺1000mm、短辺500mm、厚さ10mmのステンレス(SUS304)鋼板で、シュリンクチューブを挿入したボルトおよび絶縁ワッシャを介して試験片支持治具に取り付けることにより、他の部材とは電氣的に絶縁状態とした。土中試験体は、2枚の試験片を箱状の上面および下面に相当する位置に取り付け、両者を導通材(SUS304)にて短絡した。電位測定用

の照合電極と塩化物イオン濃度センサーは、試験片の裏側約25mmの位置に750mm×500mmのセンサー取付板を固定し、その表面に取り付けた。照合電極には、KCl飽和水溶液を内部溶液とする銀/塩化銀電極を用いた。

(2) 設置方法

試験体は河口から約3km上流の河口堰のピアを利用して設置暴露した。設置状況を図-2に示す。水中試験体は、試験片を水面に対して垂直方向にして干潮時でも常時冠水状態を維持するために、最下部が川底のコンクリート底板より約100mm上部に位置するようにピア側壁に取り付けた。土中試験体は、側面を全てSUS304鋼板で覆っているが、長辺方向の側面の片側には1020mm×50mmの開口部、

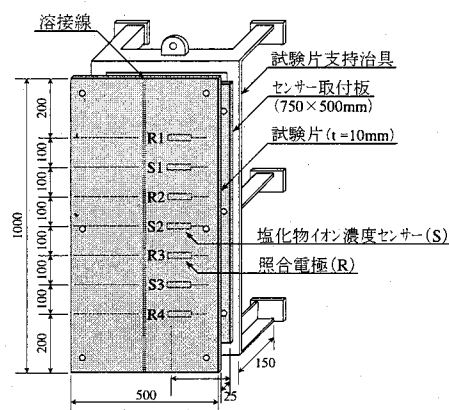


図-1(a) 水中部試験体の概観

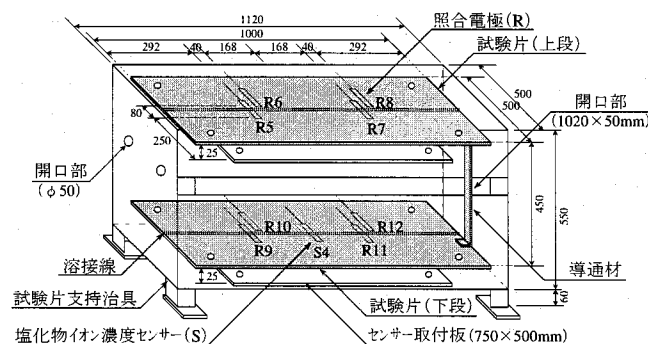


図-1(b) 土中部試験体の概観

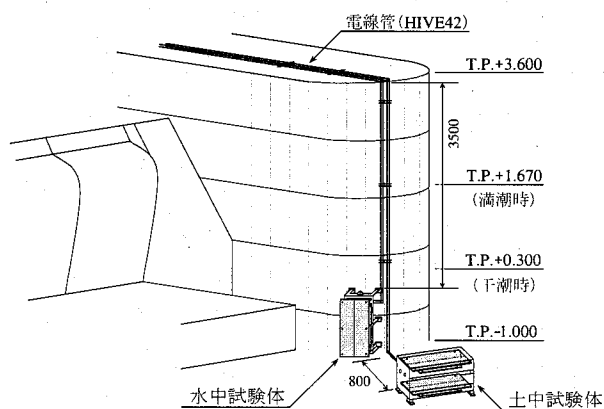


図-2 試験体の設置位置

短辺方向の側面にはφ50mmの開口部を2個設けてあり、砂れき層に埋もれた状態となるようにピア側壁より約800mm下流のコンクリート底板上に長辺方向の開口部を下流側に向けて設置した。試験体に取り付けた照合電極と塩化物イオン濃度センサーからのリード線は、電線管を通し河口堰管理棟内のデータロガーに結線した。

(3) 測定方法

測定は、データロガーを用いて水中部のステンレス鋼の電位を4箇所、土中部のステンレス鋼の電位を8箇所、水中部の塩化物イオン濃度を3箇所、土中部の塩化物イオン濃度を1箇所の合計16箇所の測定をサンプリング間隔30分で約140日間行った。

2. 2 実験結果

(1) 塩化物イオン濃度の経時変化

汽水域における塩化物イオン濃度の経時変化を図-3に示す。図中の縦線は大潮の時期を示したものである。また、潮位と塩化物イオン濃度変化が分かり易いように時間軸を拡大したものを図-4に示す。なお、潮位は現地の潮位表に基づいて表示した。水中の塩化物イオン濃度は、干満の水位の差が大きい大潮の時、数ppm～数千ppmの広範囲にわたる濃度変化を示し、小潮の時は10ppm程度の低濃度で推移する傾向が見られる。しかし、拡大③に示すように小潮の時期でも塩化物イオン濃度に大きな変動が現れる場合もあり、その挙動は複雑である。これは、塩化物イオン濃度の変化が単に潮の干満により変化するだけでなく、上流からの河川水の流れ込み状況により大きな影響を受けているためと考えられる。一方、土中の塩化物イオン濃度は、水中部で数ppm～数千ppmという大幅な濃度変化が継続する場合、1000ppm以上の高濃度で停滞する傾向が認められた。これは、SUS304鋼にとって土中は水中以上に過酷な腐食環境になることを示している。

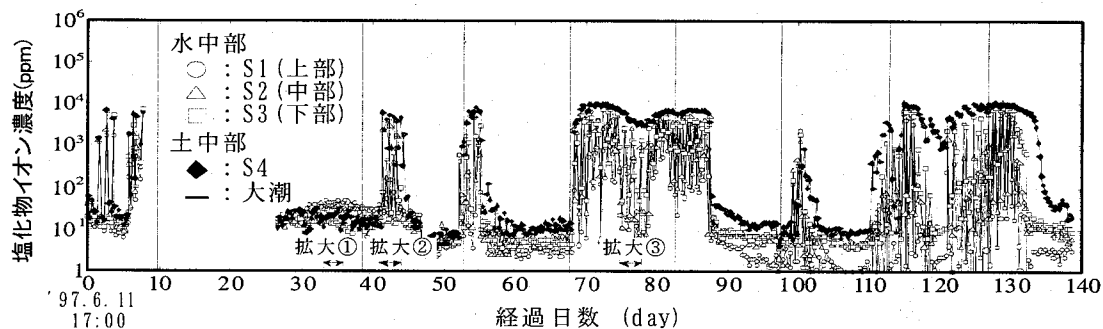


図-3 塩化物イオン濃度の経時変化

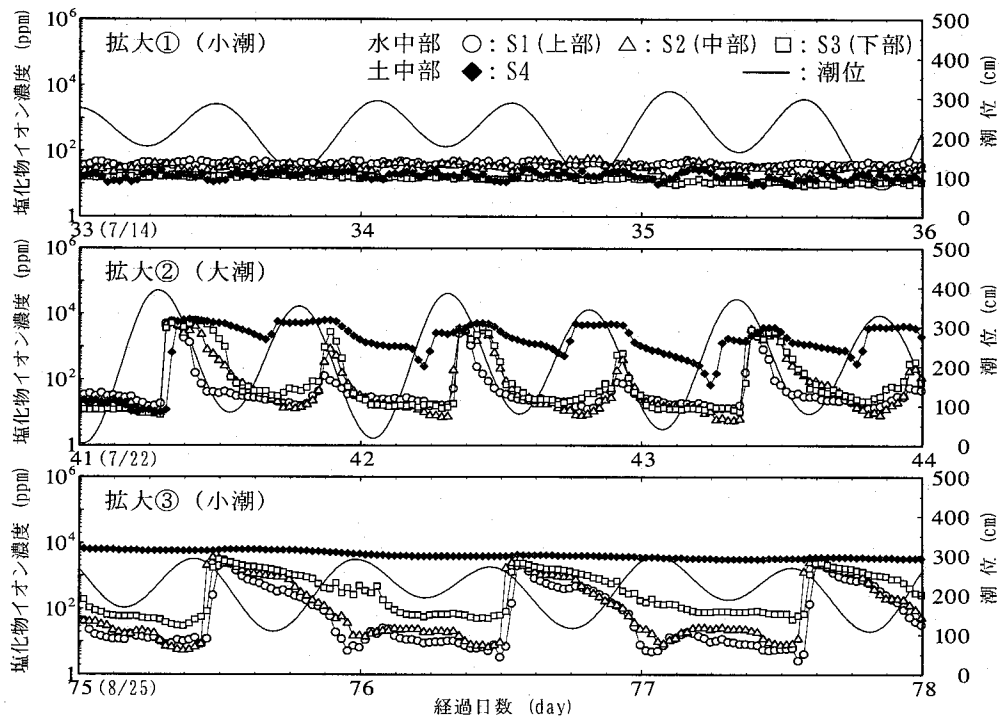


図-4 潮位と塩化物イオン濃度変化(拡大)

(2) ステンレス鋼の電位変化

水中試験片と土中試験片の電位変化を図-5に示す。なお、電位は全て SHE (標準水素電極) 基準に換算して表示した。ステンレス鋼の電位は試験体設置後上昇し、その後塩化物イオン濃度の影響により大きく変動した。図-3に示す塩化物イオン濃度の経時変化と対比すると、塩化物イオ

ン濃度の上昇によりステンレス鋼の電位は低下する傾向が認められたが、特に塩化物イオン濃度が1000ppm以上に上昇した場合の低下は顕著で、本条件下ですき間腐食生起の可能性を示唆している。水中、土中とも電位の低下と上昇が繰り返されているが、水中の周期に比べ土中の周期は大きく、一度低下した電位は再度上昇するまでに時間を要している。

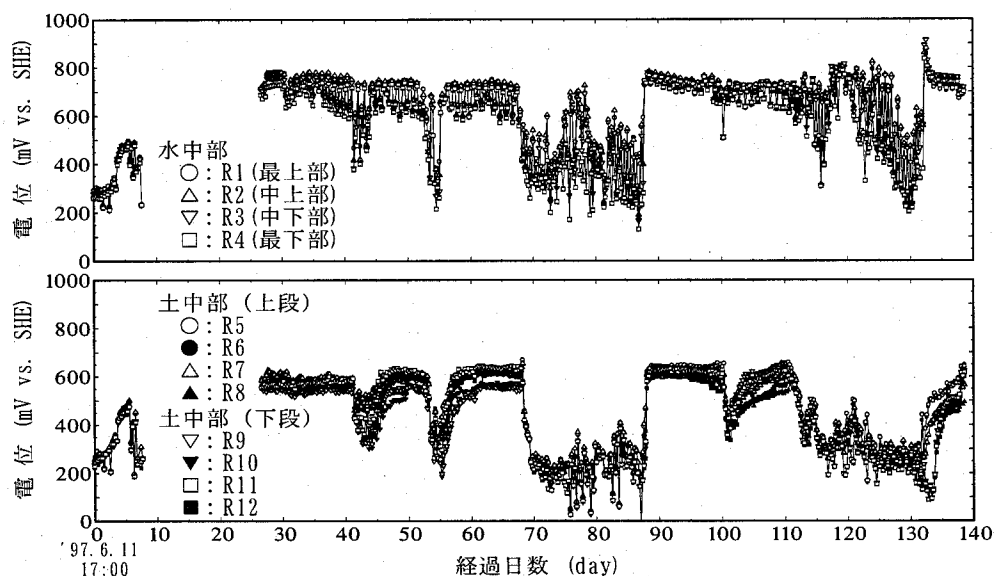


図-5 試験片の電位経時変化

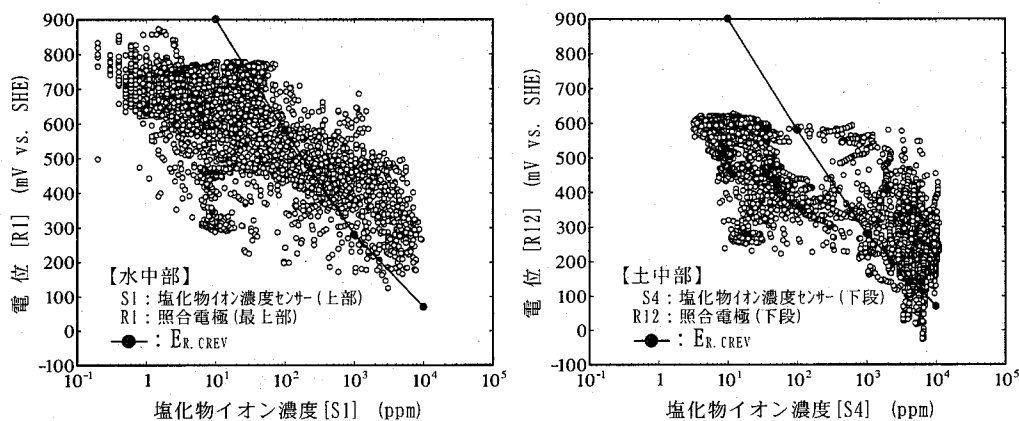


図-6 塩化物イオン濃度と試験片電位の関係

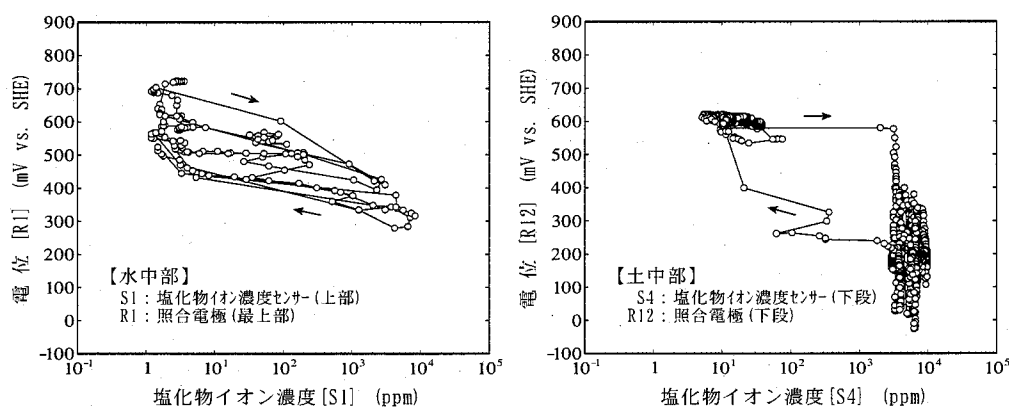


図-7 塩化物イオン濃度の変化に伴う試験片電位の推移

塩化物イオン濃度と電位との相関を水中と土中それぞれに対して検討した結果を図-6に示す。また、図-7にプロットの推移の一部を示す。実線は明石ら⁵⁾によって報告されているすき間腐食の再動態化電位 $E_{R, CREV}$ の概略値を示したものであるが、本環境下のステンレス鋼の電位は数 100ppm 以上の塩化物イオン濃度ですき間腐食の生起を考えてよいことを示している。したがって、先に示した塩化物イオン濃度が 1000ppm 以上に上昇した場合の電位低下は、すき間腐食の発生・進展であり、電位低下時間の積分値に相当する腐食が試験片に生じたと考えられる。一方、塩化物イオン濃度の変化にともなうステンレス鋼の電位変化は、水中と土中では大きく異なる。両者の関係を図-7に示すプロットの経時的な推移でみると、水中は塩化物イオン濃度の増減に対する電位変化のヒステリシスが比較的小さいのに対し、土中は非常に大きい。この現象は、水中のすき間部は、水中の塩化物イオン濃度などの変化の影響を受けやすいのに対して、土中のすき間部は外部の環境変化の影響を緩和する砂れき層の下にあるため、電位変化に関与する塩化物イオンや溶存酸素の物質拡散が遅い環境であることが影響したと思われる。

3. 小型試験片および箱型試験体の暴露実験

3. 1 実験方法

(1) 実験場所

小型試験片の暴露地点としては、図-8に示す5ヶ所を下記の理由から選定した。また、各地点での試験体設置環境は、ステンレス製ゲートが工事中や完成後に置かれる環境を想定し、干満部、水中部、土中部を選定した。

A 地点：河口堰上流側で淡水環境である。この地点では水中部、土中部に暴露した。

B 地点：河口堰下流側でE地点から約60m下流地点で、河床には土砂堆積がある流水環境である。この地点では土中部に暴露した。

C 地点：河口堰下流側で支流との合流地点で、支流上流に製紙工場等があり支流水の腐食環境への影響を考慮して選定した。この地点では土中部に暴露した。

D 地点：支流の合流地点の対岸で、支流水の影響を受けないと考えられる。この地点では土中部に暴露した。

E 地点：河口堰下流側であるが、越流部の直近で淡水の影響を受けると考えられる。この地点では干満部、水中部に暴露した。

なお、箱型試験体は、B地点およびE地点の2ヶ所の川底に設置した。

(2) 試験体

ステンレス鋼製ゲートで、溶接部近傍に大きな局部腐食が生じた事例があるので、それを再現するために図-9(a)に示す溶接部を含む試験片を用いて溶接部の耐食性を評価した。さらに、ステンレス鋼はすき間が存在すると、より局部腐食感受性が大きくなるため、図-9(b)に示すすき

間付き試験片を用いてすき間部の耐食性を評価した。

小型試験片の形状は、図-9に示す通り2種類、(a)溶接腐食試験片：中央に溶接線を設けたもの、(b)すき間腐食試験片：中央に溶接線を設けた後これを切削しポリスルホン樹脂を用いたすき間形成材(φ35mm×厚さ5mm)をチタン製ボルトで締付け固定したもの、何れも溶接スケールを除去するための清掃ケレンをサンドブラストで行った。

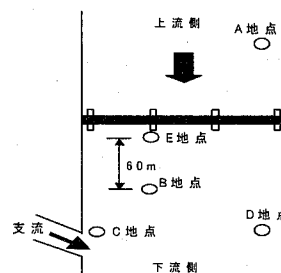


図-8 試験片の暴露場所

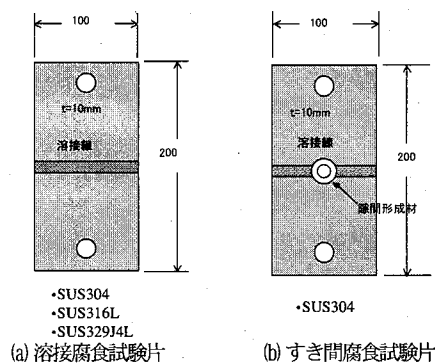


図-9 小型試験片の形状

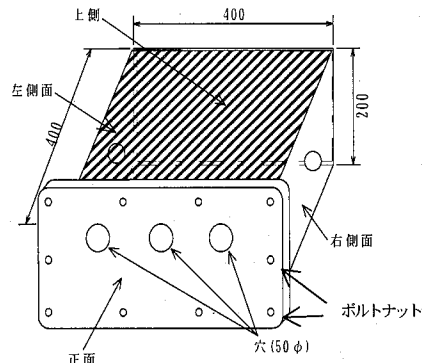


図-10(a) 箱型試験体の外観
(フランジ付き状態)

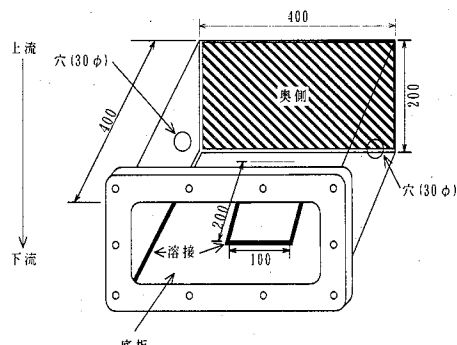


図-10(b) 箱型試験体の外観
(フランジ取り外し状態)

鋼種としては、淡水環境で通常用いられる SUS304 を基本とし、比較材としてより耐食性の高い SUS316L、SUS329J4L を選定した。(a)、(b) の溶接材料は、SUS304 に対しては D308、D309 の 2 種類とし、各々について適正入熱 (約 15,000J/cm) と過大入熱 (約 22,000J/cm) の 2 種類、計 4 種類を用いた。なお、一部の試験片は暴露架台から脱落して流出した。

箱型試験体は、10mm 厚の SUS304 ステンレス鋼板を用い、図-10 (a) に示す 400mm×400mm×200mm の寸法で、魚腹型ゲートを模擬し、川底の砂が内部に流れ込むような孔を開けた箱型試験体を製作し、暴露試験に供した。溶接材料には D308 を用いた。なお、図 10-(b) はステンレス製ボルトをはずしてフランジを取り外した内部の状態を示す。

(3) 調査項目

暴露試験は 7 月に開始し、約 6 年間暴露した。1 ヶ月～3 ヶ月間隔で経時的に電位測定および塩化物イオン濃度を測定した。また、試験片は暴露開始後 4 ヶ月、15.5 ヶ月、6 年後の計 3 回の回収を行い、外観観察、局部腐食の発生位置・腐食深さを測定した。

箱型試験体は、砂れきに埋もれた試験体の回収時に水中で試験体の自然電位を測定すると共に、表面の付着微生物をサンプリングして分析した。回収後、外観状況の観察、局部腐食の発生位置・個数および腐食深さを測定した。また、局部腐食箇所の断面ミクロ観察と電子線マイクロアナライザー (EPMA) による元素分析を実施した。

3. 2 実験結果

(1) 小型試験片の電位

堰上流の A 地点および堰下流の E 地点における電位測定結果を図-11、12 に示す。また、E 地点の電位変化と塩化物イオン濃度の関係を図-13 に示す。A 地点は全て SUS304 のデータであるが、いずれの試験片でも第二回目測定以降、電位が+500mV 前後まで上昇しており、以後概ね高い電位を示している。ただし、すき間腐食試験片はやや低い電位を示している。溶接材料や入熱量の違いには有意味な差は認められない。

E 地点ではいずれの試験片においても第二回目測定で +600mV 前後まで上昇している。SUS329J4L はその後も常に高い電位を推移しているが、SUS304 系および SUS316L は第三回測定時には電位が低下し +200mV 程度を示している。その後、これらは測定の度毎に上下に変動しているが、概ね冬場には電位が低下し夏場には再度上昇しており、同時に塩分濃度の変化ともよく対応していることがわかる。ここでも溶接材料や入熱量の違いには有意な差は認められない。両地点における電位上昇の原因は、後述するようにいずれもステンレス鋼表面に付着した微生物の影響によるものであると考えられる。

(2) 小型試験片の腐食量

6 年間暴露後回収した SUS304、SUS316L 試験片の入熱条

件 (適正/過大) 毎に最大孔食深さの値を表-1 に示す。SUS304 は、A 地点では水中部、土中部のいずれの位置でもすき間腐食および孔食の発生は認められなかった。C 地点では、汽水域にもかかわらず A 地点と同様に腐食の発生は認められなかった。D 地点 (土中部) では、いずれの試験片においても固定用ボルトワッシャとの間にすき間腐食が発生していた。E 地点の干満部では、いずれの試験片にも腐食の発生は認められなかったが、水中部においてすき間腐食および固定用ボルトとワッシャとの間にすき間腐食が発生していた。SUS316L は E 地点水中部で腐食が認められた。

しかしながら、SUS329J4L は、E 地点で腐食は全く発生していなかった。

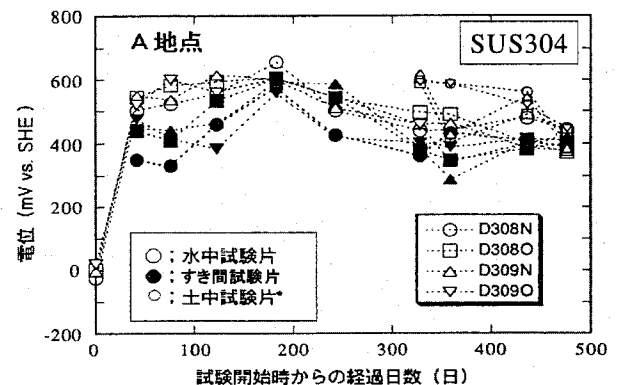


図-11 A 地点における電位変動

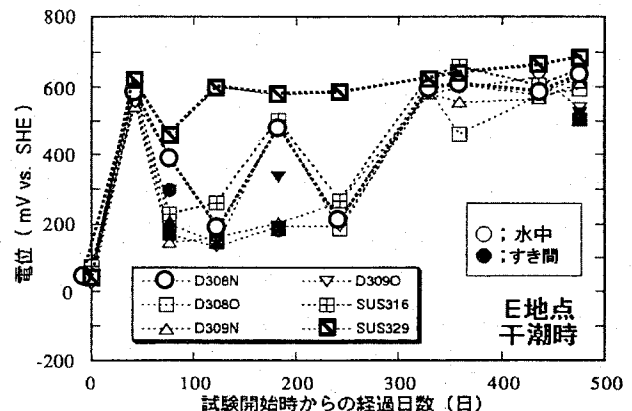


図-12 E 地点における電位変動

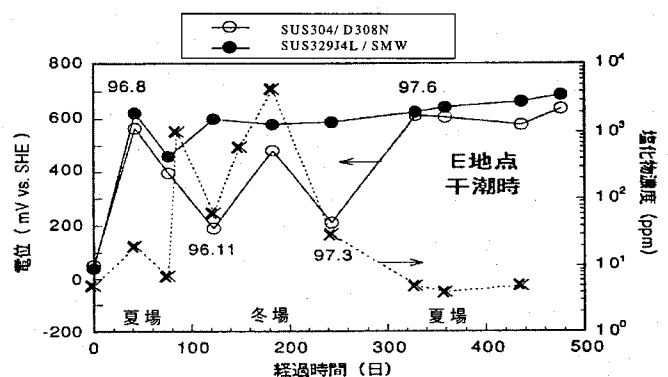


図-13 E 地点の電位変化と塩化物イオン濃度変化

(3) 箱型試験体の腐食状況

実環境でのステンレス鋼の劣化程度は、局部腐食の発生数、もしくはその腐食深さで評価した。

6年暴露後の局部腐食の個数と腐食深さを表-2に示す。腐食深さの測定は、ポイントマイクロメーターで行った。試験体正面のフランジ部のメタル/メタル間に一部わずかなすき間腐食が認められたが、それ以外の箇所では最大深さ 8.7mm ものピット状の局部腐食が多数発生していた。その状況の一例を写真-1 に示す。堆積した砂れき下のすき間腐食も形態的にはピット状であり、以下メタル/メタル間のすき間腐食以外の腐食をまとめて局部腐食と呼ぶこ

とにする。

1) 局部腐食の発生個数

図-14 に示すように、E 地点よりも B 地点の方が、局部腐食の発生数が多い傾向にある。B 地点では天井、底板面に多く発生したが、E 地点ではそれほど他の面に比べて多くない。図-15 で水平部では構造的に砂れきが堆積し易い上面に集中して局部腐食が発生していることが判る。また、図-16 で垂直部では発生個数は水平部に比して少なく、内面外面の差も認められない。

表-1 小型試験片の腐食程度

目的	材質	腐食環境	溶接条件	暴露地点				
				A	B	C	D	E
腐食評価	SUS304	干満	D308×2					0.0/0.0
			D309×2					0.0/0.0
		水中	D308×2	0.0/0.0				0.04/0.21
			D309×2	0.0/0.0				0.46/0.19
		水中 (隙間付)	D308×2	0.0/0.0				(1)/1.32
			D309×2	0.0/0.0				1.1/3.26
		土中	D308×2	0.0/0.0	(4)	0.0/0.0	1.45/0.78	
			D309×2	0.0/0.0		0.0/0.0	0.52/0.14	
	SUS316L	水中	D316					0.15
	SUS329J4L	水中	SMAW					0.0
計				13体	4体	4体	4体	15体

*: ステンレス鋼は、最大孔食深さ (mm) (適性入熱材/過大入熱材)

** : SM400B は、平均減肉量 (mm)

***: (1) 及び (4) は、流出した試験片数

表-2 局部腐食の数と腐食深さ

地点			天井		底板		正面		奥	
			外面(上面)	内面(下面)	外面(下面)	内面(上面)	外面	内面	外面	内面
B	個数	母材部	35	0	0	32	0	3	3	0
		溶接部				21				
	最大深さ (mm)	母材部	3.4	0	0	8.5	0	1.3	0.6	0
		溶接部				5.8				
	平均深さ(mm)		1.6	0	0	2.2		0.5	0.3	
E	個数	母材部	20	0	0	22	11	21	0	0
		溶接部				6				
	最大深さ (mm)	母材部	1.9	0	0	2.3	1.2	0.9	0	0
		溶接部				8.7				
	平均深さ(mm)		0.6	0	0	1.8	0.6	0.4	0	0
			水平部				垂直部			

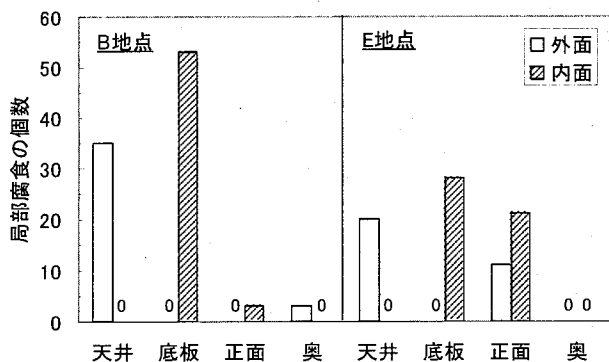


図-14 部位別局部腐食発生数

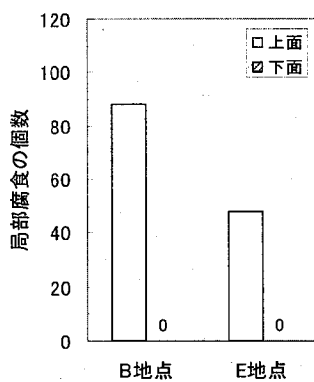


図-15 水平部の局部腐食発生数

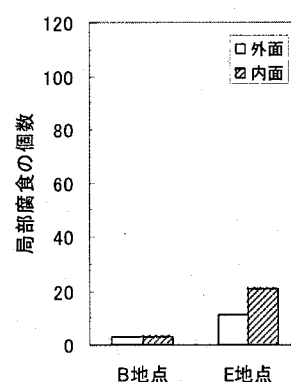


図-16 垂直部の局部腐食発生

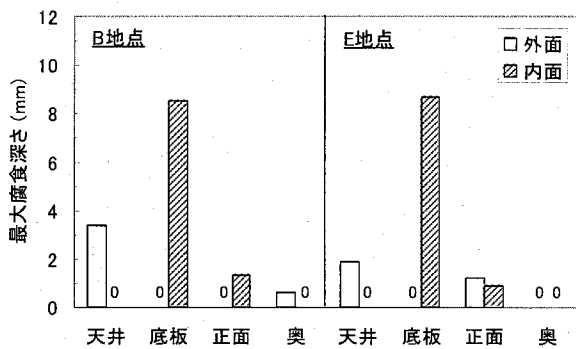


図-17 部位別局部腐食の最大深さ

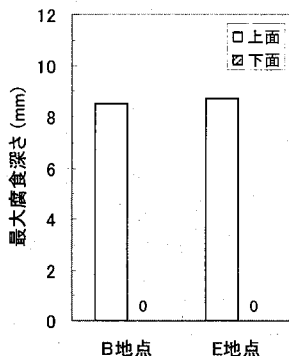


図-18 水平部の局部腐食の最大深さ

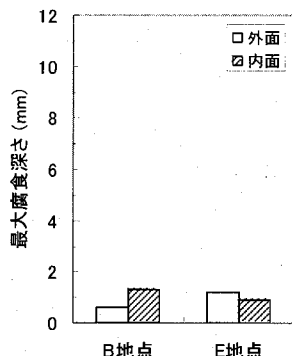


図-19 垂直部の局部腐食の最大深さ

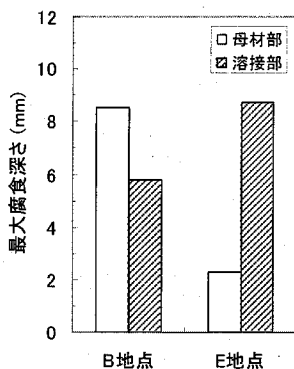


図-20 底板上面の局部腐食最大深さ

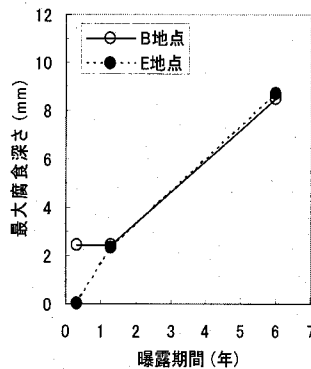


図-21 最大局部腐食深さの経時変化

表-3 微生物の分析結果 (単位: CFU/ml)

	4ヶ月後	1年後	6年後
一般生菌	1.1×10^5	8.6×10^4	1.5×10^5
真菌	1.7×10^2	7.5×10	5.1×10
放射細菌	10以下	1.1×10	1.0×10
SRB	1.6×10^4	2.2×10^3	4.0×10
鉄細菌	不検出	不検出	不検出

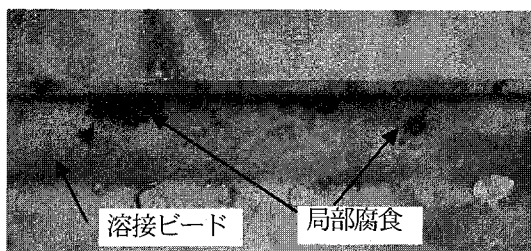


写真-1(a) 局部腐食(B地点,土中底板,6年暴露)

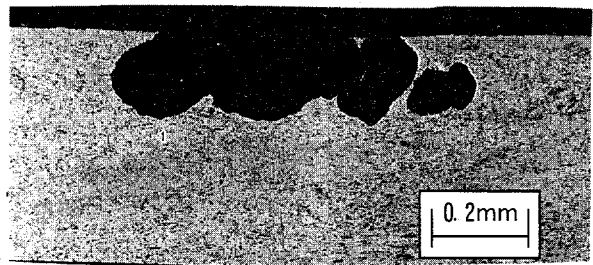


写真-1(b) 局部腐食の断面(B地点,土中底板,6年暴露)
大気
水面

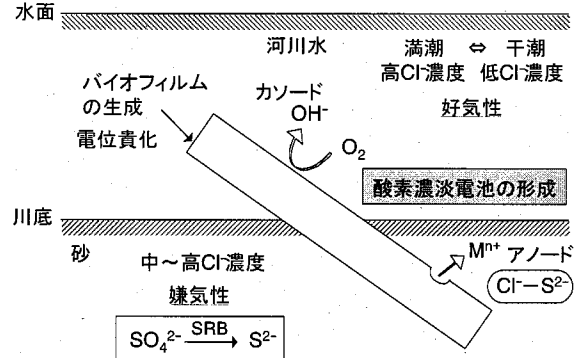


図-22 局部腐食発生機構の模式図

2) 最大腐食深さ

表2には局部腐食の深さの平均値を示しているが、実構造物の機能を考慮すると最大局部腐食深さの方が重要と考えられ、以降最大腐食深さで論じることとする。

図-17に部位別の最大腐食深さを示すように、深い腐食は天井、底板部に多い。図-14との比較から、腐食発生個数の多い部位ほど最大深さも大となる傾向にある。図-18で、水平部においては、最大深さは全体としてB地点とE地点とで差が認められない。一方、図-19で垂直部でもB地点とE地点とでほとんど差がない。このことは、構造要因としての、水平部と垂直部との比較では、前者において局部腐食発生個数は多く、かつ最大腐食深さも大であり、砂れきが堆積したことで、すき間が形成されたため局部腐食が加速されたものと考えられる。

図-20に底板上面における腐食深さに及ぼす溶接の影響を示す。全体としては顕著な差はないといえる。しかし、断面ミクロ観察の結果、溶接金属部においてはδ-フェライトの選択腐食が認められた。

図-21に底板上面における腐食深さの経年変化を示す。BおよびE地点とも、ほぼ時間の経過と共に最大腐食深さも増大することを示しており地点間の差は小さい。

3) 付着微生物と腐食生成物の元素分析

試験体は水中と砂れき中にまたがって存在した状態にあった。表-3に付着微生物の分析結果を示す。好気性の一般細菌と嫌気性の硫酸塩還元菌(SRB)が検出された。

腐食部のEPMAによる元素分析ではC, P, S, O, 金属元素としてステンレス鋼の成分であるFe, Cr, Ni, Mn, 砂成分としてAl, Siおよび海水成分としてNa, Mg, Clがそれぞれ検出された。特にC, P, S, Mn等が存在することは微

生物の存在を示唆しており、微生物が局部腐食に大きく影響していることが考えられる^{6, 7)}。

4) 自然電位

自然電位の測定結果から、B地点では外面(上板)で331~471mV、内面(底板)で46~-4mV、E地点では外面(上板)で46~226 mV、内面(底板)で約-4mV以下であった。このように、自然電位も水中では約400mV程度にまで貴化(高くなって)しており、表面に付着した好気性微生物の影響と考えられる。

(4) 腐食機構

川底が砂れき質の土中部には満潮時の海水起源の塩分が高濃度で干潮時にも残留する。また、水中では好気性微生物により自然電位は400mV程度にまで貴化していた。しかも、土中部では、SRBの作用により生成する硫化物および高濃度塩化物イオンの共存下で局部腐食感受性が高まると考えられる。このような環境下でSUS304に発生した局部腐食の一例を写真1に示した。こうした環境下では図-22に示すように、水中部と土中部で酸素濃淡電池を構成して水中部カソード、土中部アノードとなるマクロセルを形成して、アノードでの局部腐食が進行したものと考えられる。さらに、水中部のカソード面積が大きいため、大カソード/小アノードの組み合わせとなり局部腐食の進行速度が増大したものと考えられる。もちろんカソード反応として酸素還元反応が進行すると考えられる。

4. 結論

河口から約3kmの汽水域の水中および河底の土中の腐食環境の評価および各種試験体を用いた最大6年間の暴露試験を行い次の結果を得た。

- (1) 汽水域においては、潮の満ち引きによる塩化物イオン濃度の変化に応じてステンレス鋼の電位は変化する。すなわち、電位が低下(卑化)するとステンレス鋼は腐食し、電位が高く(貴化)になるとステンレス鋼の表面は再不動態化して腐食しない。塩化物イオン濃度の変化に対応してこの繰り返しをしていることが明らかとなった。
- (2) ステンレス鋼の鋼種(SUS304, SUS316L, SUS329J4L)により腐食挙動が異なることが明らかとなった。汽水域では、SUS304は水中部や土中部で腐食が発生した。また、水中部ですき間部にすき間腐食が発生し、土中部では溶接熱影響部にも腐食が発生した。SUS316Lは水中部で腐食が発生した。SUS329J4Lは水中部で腐食は生じなかった。すなわち、ステンレス鋼の汽水域における耐食性は、SUS329J4L, SUS316L, SUS304の順であった。
- (3) 満潮時に遡上した塩化物イオンは、砂れき質の土中部に滞留して高濃度を維持することが明らかとなった。
- (4) 河床にあるステンレス鋼が、その一部が土中にありその塩化物イオンが高濃度である場合、水中部がカソードに、土中部がアノードとなるマクロセルを形成して局部腐食が生じると考えられる。

- (5) 汽水域では、ステンレス鋼表面に付着した微生物の影響と思われる電位の貴化が見られた。

以上の結果から、河口堰など汽水域の河川管理施設にステンレス鋼を適用する際には、塩化物イオンが滞留する環境では開口部の広いピット状の腐食が生じる可能性が示された。

河口堰建設時に堰柱など土木工事より先にゲートが製作され、土木工事が完了するまでの間、河床にゲートを沈めて置く場合がある。

このような場合、ゲート内部の塩化物イオン濃度は、潮の満ち引きに関係なく高い状態に保持される場合があることが明らかとなった。

このような状況では、ステンレス鋼の不動態皮膜が破壊され溶接部近傍などに孔食が発生し易くなる。また、ゲートが土砂などの堆積物に覆われたままであると塩化物イオン濃度が高くなったときステンレス鋼はすき間腐食や微生物腐食を生じる可能性がある。よって、このような環境で河川管理施設にステンレス鋼を適用する場合には、建設時も含めた十分な環境評価が必要である。一般に、汽水域の河口堰などにステンレス鋼を適用した場合、満潮時にステンレス鋼の不動態皮膜は破壊されるが、潮が引いて淡水が上流から流下して塩化物イオンが洗い流されるような環境では、従来の普通鋼に塗装を施すよりも確実に防食される。また、ステンレス鋼の電位変化をモニタリングして電位が検知された場合には、バイオフィルムの除去や塩化物イオンを洗浄すればよく、維持管理も塗装に比べて大幅に軽減させることが可能となる。

謝辞

本研究の実施に際して、河口堰周囲への暴露試験片の設置並びに回収および電位などの経時計測に便宜をはかっていただきました国土交通省中国地方整備局の関係各位並びに、本暴露試験にご協力いただきました関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) わが国における腐食コスト, (社)腐食防食協会, (社)日本防錆技術協会:平成13年5月.
- 2) 土木研究所資料第2909号, ダムにおけるステンレス鋼材の利用実態調査報告書, 建設省土木研究所, 平成2年9月.
- 3) 土木研究所資料第3954号, 河川・ダム施設防食ガイドライン(案)-ステンレス材料編-, 平成17年1月.
- 4) ダム・堰施設技術基準(案), (社)ダム・堰施設技術協会, 平成11年3月.
- 5) 明石正恒, 鎌田久美子, 中山元, 福田敬則:腐食防食'96, 453(1996).
- 6) B. A. Shaw, P. J. Moran and P. O. Gartland: Corrosion Science, 32, 707(1991).
- 7) S. W. Borenstein: Mater. Perform., 27(8), 62(1988)

(年 月 日受付)