

IV-10 ダム・河川管理施設の新しい防食材料に関する研究

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、守屋 進、富山 禎仁

【要旨】耐食性金属材料や河川用塗料の暴露試験による耐食性評価、複合材料の河川管理施設への適用性評価などに取り組み、以下の結果を得た。アルミニウム合金に施した塗装は淡水環境で若干の膜厚減少を生じるが、塗膜自体に劣化は無く、アルミニウム素地への防食効果が期待できる。ステンレス鋼を河川環境で使用する場合、微生物の付着により自然電位が貴化し、局部腐食感受性が高まる恐れがある。また、水中部で炭素鋼と接触するとステンレス鋼自体の耐食性は高まるが、炭素鋼の腐食は単独使用の場合よりも加速される。河川環境における鋼材の塗替塗装は、十分なブラスト処理を行い、有機ジンクリッチペイントを用いる仕様が望ましい。FRP は河川環境に十分適用可能な耐久性を有しており、常時没水状態にあるような水門扉に特に適している。

キーワード：河川管理施設、防食材料、耐食性金属材料、防食塗料、微生物腐食、複合材料、暴露試験

1. はじめに

河川・ダム施設は洪水調節や灌漑用水・飲料水の確保並びに発電など、国民の生命や財産の保全に欠かせない施設である。これらの多くには鋼材が使用されており、複雑な構造をした多くの部材で構成されているものが多い。またこれらの設備は水に接していることが多く、厳しい腐食環境にあるものが多い上に、その維持管理は、雪解けや洪水期には行えないなど、実施可能な期間が限られていることも多い。これらのことから、河川・ダム施設の機能を長期にわたって維持するためには、適切な防食対策が必要である。

従来、河川・ダム施設の防食方法は塗装により行われてきたが、近年では腐食しにくい材料や電気防食などの新しい防食法が開発されている。また、防食性能に優れた新しい塗料なども開発されつつある。

そこで本研究では、ダム・河川管理施設の維持管理労力軽減のために、耐食性に優れた新材料の導入（主に新設構造物）や塗装の高度化（主に既設構造物）などを目的とし、耐食性金属材料や河川用塗料などの暴露試験による耐久性評価、複合材料などの新材料の河川管理施設への適用性評価などを行った。

2. 研究の概略

本研究では、以下の4つの項目について検討した。

- (1) 耐食性金属材料の河川環境における耐食性
- (2) 耐食性金属材料の微生物腐食特性
- (3) 防食塗料のダム・河川環境における耐食性
- (4) 高分子系新材料の河川管理施設への適用性

3. 耐食性金属材料のダム・河川環境における耐食性評価

鋼材に比べて淡水や汽水環境で耐食性に優れているステンレス材料や、軽量で扱いやすい材料であるアルミニウム合金材料をダム・河川施設へ適用することは、施設の維持管理の合理化に寄与できるものと考えられる。これらの施設には、1950年代に既にステンレス材料が適用され始めたが、ステンレス材料は適切に使用されないと、かえって周囲の炭素鋼の腐食を促進したり、条件によってはステンレス材料自体ももらい錆びやすきま部が腐食したりすることがある。このように、これら耐食金属材料を河川・ダム施設で適用するためには、その腐食特性を十分に理解した上で行うことが重要である。

そこで、これら耐食性金属材料の腐食特性の解明を目的とし、七ヶ宿ダム（淡水環境）、江戸川河口（汽水環境）において暴露試験を実施した。

3. 1 アルミニウム合金材料への塗装の効果に関する検討

3. 1. 1 試験材料

試験に供するアルミニウム合金としては、JIS H 4000「アルミニウム及びアルミニウム合金の板及び条」で規定される A5083P-O を使用した。その成分分析結果を表 3-1 に示す。図 3-1 の形状および寸法に加工したアルミニウム合金に、表 3-2 に示す塗装を施し暴露試験片を作製した。

表 3-1 試験に供したアルミニウム合金の成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.08	0.19	0.02	0.60	4.21	0.06	0.02	0.02	残部

(カウントメーター法による参考値：mass%)

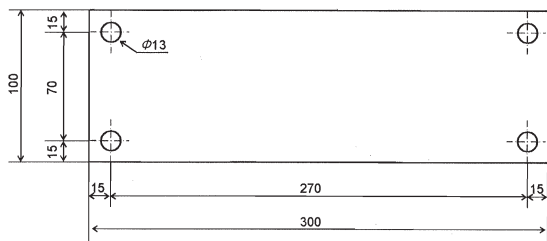


図 3 - 1 暴露試験片の形状と寸法

表 3 - 2 暴露試験片の塗装仕様

仕様 No.	素地調整	プライマー 膜厚 [μm]	下塗 膜厚 [μm]	上塗 膜厚 [μm]
C	シンナー	Cr フリーウオッシュプライマー 10	エポキシ 80	ウレタン 30
D	シンナー	Cr フリーウオッシュプライマー 10	エポキシ 80	ふっ素 30
E	プラスト	Cr フリーウオッシュプライマー 10	エポキシ 80	ウレタン 30
F	シンナー	従来タイプウオッシュプライマー 10	エポキシ 80	ウレタン 30

表 3 - 3 セツケ宿ダム湖水の分析結果

項目	採取日	暴露 開始日	暴露 1年後	暴露 3年後
	pH		7.6	7.0
電気伝導度 [mS/cm]		67	66	64
全硬度 [CaCO ₃ :mg/l]		20	22	19
Cl ⁻ [mg/l]		2.8	2.9	3.1
SO ₄ ²⁻ [mg/l]		6.8	8.2	7.7
Na [mg/l]		3.5	3.7	3.7
K [mg/l]				
Ca [mg/l]		6.0	6.6	5.9
Mg [mg/l]		1.1	1.3	1.1
Fe [mg/l]		0.03	< 0.1	0.1
Cu [mg/l]		0.02	< 0.01	< 0.01
SiO ₂ [mg/l]		13	11	10
蒸発残留物 [mg/l]		14	49	48

3. 1. 2 試験方法

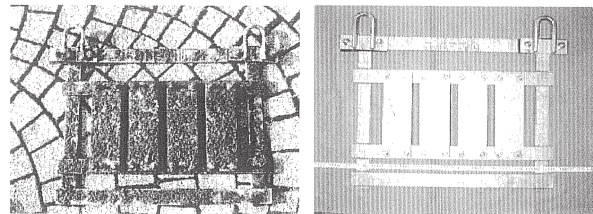
塗装を施したアルミニウム合金試験片は、阿武隈川水系白石川（宮城県刈田郡七ヶ宿町）にある、七ヶ宿ダム湖の水中に暴露した。3年間の暴露後に試験片を引き上げ、試験片表面に付着した水生生物や泥、腐食生成物等を水道水流水中でスポンジを用いて洗い流し、試験片外観を観察した。また、塗膜の膜厚測定、クロスカット法（JIS K 5600-5-6）による塗膜の付着性評価、塗膜や腐食生成物除去後の外観観察および腐食深さ測定などを行った。

なお、参考として、七ヶ宿ダム湖の水質分析結果を表 3 - 3 に示した。表中の電気伝導度は名古屋市の水道水とほぼ同等であり、pH も中性で塩素イオン濃度も水道水より低い分析結果となった。

3. 1. 3 試験結果

回収直後の試験片と、水洗後の各試験片の外観写真を図 3 - 2 に示す。試験片取り付け枠全体および各

試験片は全面緑色がかった藻に覆われていたが、腐食生成物等の異物は観察されなかった。いずれの試験片でも表面には多少のキズが観察されたが、裏面にはほとんど察されなかった。また、塗膜のふくれ、はがれ等は観察されなかった。



(a) 回収直後

(b) 水洗後

図 3 - 2 暴露 3 年後の試験片外観（試験片取り付け枠にボルトで固定された状態）

暴露試験前における各試験片の塗装膜厚の差（表 3 - 4）を求めたところ、塗装膜厚は3年間の暴露によって約 3~6μm 程度減少していたが、塗装仕様による有意差は認められなかった。

表 3 - 4 アルミニウム合金試験片の暴露試験による塗膜膜厚変化量

仕様 No.	膜厚変化量 [μm]					
	試験片表			試験片裏		
	上部	中央	下部	上部	中央	下部
C	-0.3	-5.3	-5.3	-7.0	-3.7	-2.7
D	-5.7	-2.7	-4.3	-5.3	1.0	-3.3
E	-5.7	-4.0	-1.7	-13.0	-4.0	6.7
F	-3.3	-9.3	-4.3	2.7	-1.0	-3.0

クロスカット法（カット間隔 2mm）による塗膜はく離試験を行ったところ、いずれの試験片においても塗膜が完全に残存した格子数は 25/25 であり、塗膜密着性は良好であった。ふっ素上塗装材（仕様 D）の裏面において、表層メタリック層がテープによってはく離したが（図 3 - 3 (a)）、ウレタン上塗装材（仕様 C、E、F）と仕様 D の表面では、この現象は観察されなかった。これらは暴露期間中に、表層が洗い流されてしまったものと思われる。

各試験片の塗膜を塗膜除去剤により完全に除去したところ、いずれの試験片においてもアルミニウム素地の腐食は観察されなかった。

以上の暴露試験の結果、アルミニウム合金に施した塗装は淡水環境で若干の膜厚の減少を生じたが、塗膜自体の劣化や付着性の低下は認められず、アルミニウム素地への防食効果が確認された。

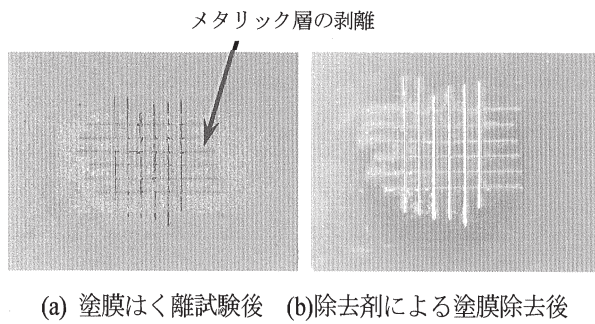


図3-3 クロスカット部の外観写真（仕様D）

3. 2 ステンレス鋼材の耐食性に関する検討

3. 2. 1 試験材料

暴露試験では、SUS304、SUS316L、SUS329J4L、YUS270、AC-4、耐海水鋼 A、B について評価した。普通鋼 SM400B は、暴露環境を総合的に評価する目的で暴露した。試験材料の成分を表3-5に示す。

試験片の形状および寸法を図3-4に示す。試験には (a) 母材腐食試験片、(b) 母材すき間腐食試験片、(c) 溶接すき間腐食試験片、(d) 異種金属接触腐食試験片の4種類を用いた。すき間腐食試験片は、母材部にすき間形成材（図3-5）取り付けした試験片(b)と、溶接部にすき間形成材を取り付けた試験片(c)の2種類とした。また、(d) 異種金属接触腐食試験片では、SM400B と各ステンレス鋼（SUS304、SUS316L、SUS329J4L）との表面積が等しくなるように試験片の寸法を合わせ、図3-4(d)に示すようにステンレス鋼をSM400Bで挟みボルトにより締め付けた。

3. 2. 2 試験方法

暴露試験は、江戸川河口堰下流（汽水域）で行った。護岸から水中部までにわたる暴露架台を設置し、試験片を大気部、干満帯、水中部に暴露した。所定の期間暴露した後、試験片の外観観察、飽和カロメル電極を使用した自然電位の測定、すき間腐食およ

び孔食の発生状況の目視や腐食深さの計測等を行った。江戸川河口堰下流（汽水域）と上流（淡水域）における水質分析結果を表3-6に示した。

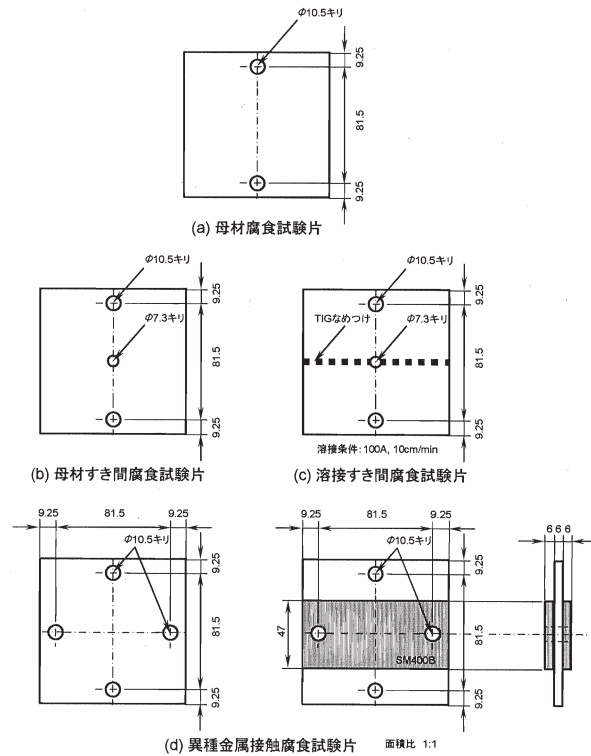


図3-4 暴露試験片の形状と寸法

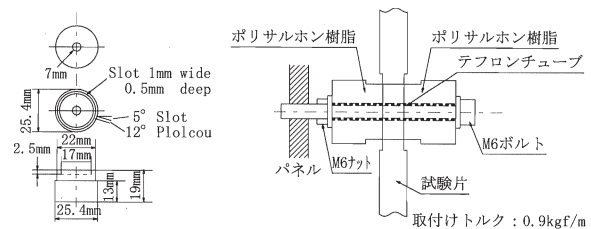


図3-5 すき間形成材の形状とすき間形成方法

表3-5 試験に供したステンレス鋼試験片の化学成分（wt%）

鋼種	元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	その他の元素
SM400B	A ※1	0.12	0.23	0.62	0.014	0.002	-	-	
	B ※2	0.179	0.15	0.78	0.025	0.0115	0.018	0.022	0.014Cu
SUS304		0.04	0.53	1.10	0.034	0.006	8.49	18.35	
SUS316L		0.019	0.46	0.90	0.026	0.0009	12.24	17.54	2.1Mo-0.26Cu
SUS329J4L		0.019	0.56	0.91	0.023	0.001	7.26	24.86	2.98Mo-0.42Cu-0.29W-0.15N
YUS270		0.014	0.51	0.55	0.021	0.001	18.11	20.14	6.18Mo-0.66Cu-0.202N
AC-4		0.014	0.51	0.79	0.022	0.003	20.98	23.06	0.09Cu-6.10Mo-0.25N
耐海水鋼 A		0.07	0.39	0.98	0.008	0.001	0.12	1.05	0.26Cu-0.23Mo
耐海水鋼 B		0.103	0.79	0.79	0.018	0.0029	0.22	0.83	0.19Cu-0.17Mo

※1：全面腐食試験に使用

※2：異種金属接触腐食試験に使用

表 3 - 6 江戸川河口堰付近の水質分析結果

採取箇所 潮位	下流	上流	下流	下流	上流
	干潮	干潮	中間	満潮	満潮
Cl ⁻ [mg/l]	20	16	18	18	16
電気伝導度 [mS/m]	18.1	17.1	17.9	17.1	16.9
溶存酸素 [mg/l]	9.4	9.3	9.3	9.2	9.4
SO ₄ ²⁻ [mg/l]	20	23	22	21	21
NO ₃ ⁻ [mg/l]	4.9	4.4	4.4	4.4	4.4
Na ⁺ [mg/l]	16	14	14	14	13
Ca ⁺ [mg/l]	13	12	13	13	12
Mg ⁺ [mg/l]	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1
化学的酸素消費量 COD	4	4	4	4	4
生物化学的酸素消費量 BOD	3	3	3	3	3

※水の採取は水面下-0.5~-1.0mで行った。

3. 2. 3 試験結果

1) 暴露試験片の外観

3年および5年間暴露した各種ステンレス鋼 (SUS304, SUS316L, SUS329J4L, YUS270, AC-4) の試験片には貝(フジツボ)や藻が付着していたが、10年間暴露した試験片には藻のみが付着していた。SM400B および耐海水鋼にはいずれも貝や藻などが付着しておらず、赤錆が発生していた。

2) 腐食速度の評価

10年間暴露し回収した試験片の腐食生成物を除去して、試験片の重量減より腐食速度を求めた。母材腐食試験における各鋼種の腐食速度、孔食深さおよびすき間腐食深さを表3-7に示す。

a) 普通鋼 (SM400B) の腐食速度

普通鋼 SM400B の腐食速度は、干満部 (0.067mm/yr) = 水中部 (0.06mm/yr) ≫ 大気部 (0.009mm/yr) であった。これらは、海水環境下で既に得られている知見である、干満部 0.1~0.3mm/yr、水中部 0.1~0.2mm/yr より小さい値である。これまでに七ヶ宿ダム湖などで実施してきた SM400B の重量減から求めた平均腐食深さと、今回の江戸川での腐食深さを図3-6に示した。各環境下での SM400B の腐食速度は $y=AX^B$ の形で整理することができる。それによると、七ヶ宿ダム湖では $y=0.21X^{0.66}$ 、江戸川汽水域では $y=0.18X^{0.62}$ 、江戸川淡水域では $y=0.15X^{0.50}$ となり、江戸川下流部 (汽水域) は、七ヶ宿ダム湖より若干少ない腐食量であることがわかった。

b) 耐海水鋼の腐食速度

耐海水鋼の腐食速度は、干満部 (0.028mm/yr) ≧ 水中部 (0.029mm/yr) ≫ 大気部(0.006mm/yr)であった。この値は普通鋼 SM400B と比べると干満部 42%、水中部 43%、大気部 67%と小さい値となっており、耐海水鋼は汽水域でもある程度の防食効果があると思われる。

c) ステンレス鋼の腐食速度

各種ステンレス鋼 (SUS304、SUS316L、SUS329J4L) は、干満部、水中部において腐食が無視できる程度 (1.1×10^{-4} mm/yr 以下) であった。しかしながら、水中部において SUS304 および SUS316L は、試験片固定用の FRP ワッシャー下においてすき間腐食を生じていた。

表 3 - 7 各鋼材の母材腐食試験結果 (10年間暴露)

環境	鋼種	重量減 [g]	腐食速度 [mm/yr]	孔食深さ [mm]		FRP ワッシャー下のすき間腐食深さ [mm]	
				表面	裏面	表面	裏面
水中部	SUS304	0.182	1.1×10^{-4}	0.028 0.020 0.018	0.010 0.008 0.005	<0.186	<0.140
	SUS316L	0.182	1.1×10^{-4}	0	0	0	0
	SUS329J4L	0	0	0	0	0	0
	耐海水鋼 A	44.718	0.026	0	0	0	0
	耐海水鋼 B	55.992	0.031	0	0	0	0
	SM400B	119.505	0.0674	0	0	0	0
干満部	SUS304	0.004	0	0	0	<0.015	<0.019
	SUS316L	0.17	1.0×10^{-4}	0	0	0	<0.019
	SUS329J4L	0.013	1.1×10^{-4}	0	0	0	0
	耐海水鋼 A	50.843	0.0295	0	0	0	0
	耐海水鋼 B	45.979	0.0259	0	0	0	0
	SM400B	118.316	0.0669	0	0	0	0
大気部	SUS304	0.011	0.11×10^{-4}	0	0	<0.025	<0.010
	SUS316L	0.171	0.1×10^{-4}	0	0	<0.013	<0.006
	SUS329J4L	0.005	0	0	0	0	0
	耐海水鋼 A	10.107	0.0059	0	0	0	0
	耐海水鋼 B	10.766	0.0061	0	0	0	0
	SM400B	15.867	0.0089	0	0	0	0

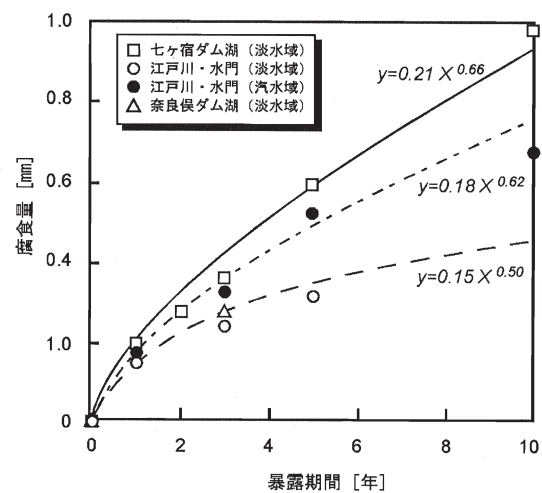


図 3 - 6 各暴露環境 (水中) における SM400B の腐食速度

3) ステンレス鋼のすき間腐食

ステンレス鋼 (SUS304、SUS316L、SUS329J4L) のすき間腐食特性を表3-8に示す。いずれの鋼種も、溶接の有無に関係なくすき間腐食が発生していることがわかる。10年間の暴露試験におけるすき間腐食

深さの最大値は、SUS304 は 0.289mm、SUS316L は 0.330mm、SUS329J4L は 0.041mm であり、SUS329J4L が最も耐すき間腐食性に優れるという結果になった。SUS304 および SUS316L では溶接した場合の方がすき間腐食の程度が大きかったのに対し、SUS329J4L では逆の結果となった。

表 3 - 8 ステンレス鋼のすき間腐食試験結果 (水中部に 10 年間暴露)

試験片種別	鋼種	すき間腐食深さ [mm]				すき間腐食の発生率 [%]
		ポリサルホン樹脂		FRP とのすき間		
		表	裏	表	裏	
母材	SUS304	0.155 (1点)	0	<0.154	<0.160	2.5 ※(100)
	SUS316L		0	0	<0.020	5 (33)
	SUS329J4L	0	0.027 (1点)	<0.041	<0.008	2.5 (50)
溶接材	SUS304	0.257 0.123 0.104 (3点)	0.126 0.104 0.095 0.15 0.014 0.0104 (6点)	<0.150	<0.289	22.5 (100)
	SUS316L	0	0.147 0.330 (2点)	<0.044	<0.055	0 (100)
	SUS329J4L	0	0	<0.039	<0.021	0 (50)

※FRP とのすき間腐食 [$x/4 \times 100$ (%)]

4) 暴露試験片の自然電位

暴露試験片の自然電位(飽和カロメル電極を使用)は、試験片回収時に河川水中で測定した。また、試験片表面に付着している藻などを丁寧に除去した後、再び試験片を河川水に漬けて測定した。母材腐食試験片および異種金属接触腐食試験片の自然電位測定結果を図 3 - 7 に示す。

a) 水中部での自然電位

耐海水鋼 B および SUS329J4L を除き、いずれの試験片も水洗いによって自然電位が低下した。その程度は普通鋼 SM400B が最も大きく、回収直後に -340.5mV だったのが、水洗いして付着物を除去すると -529.5mV まで下がった。ステンレス鋼単独での自然電位は 200~450mV (水洗後)であったが、SM400B と接触させるといずれも SM400B とほぼ同じレベルまで低下することが明らかとなった。

b) 干満帯での自然電位

SM400B および耐海水鋼 A、B の自然電位は、水中部よりも 20~350mV 高い結果となった。この理由としては、腐食生成物の組成が異なること、試験片の厚さが非常に厚いこと、などが影響しているも

のと思われる。ステンレス鋼については逆に、水中部よりも 90~380mV 程度電位が低下した。一方、SM400B との接触による自然電位の低下の度合いは、各鋼種ともに水中部よりも小さくなった。

一般に、材料と環境との組合せで決まる孔食電位あるいはすき間腐食電位よりも自然電位の方が上回ると、材料の局部腐食感受性が高まることが知られている。今回の暴露試験では、ステンレス鋼単独で暴露した場合には孔食やすき間腐食が発生した(表 3 - 7)が、異種金属接触腐食試験片ではそれが全く認められなかった。このことから、ステンレス鋼は SM400B と接触することにより自然電位が低下し、これが孔食電位やすき間腐食電位よりも下回ったものと思われる。

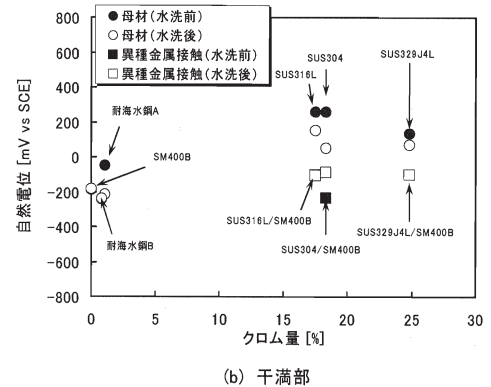
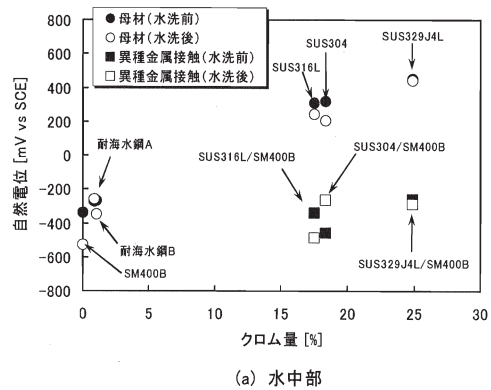


図 3 - 7 母材腐食試験片および異種金属接触腐食試験片の自然電位測定結果

5) 異種金属接触腐食

各種ステンレス鋼と普通鋼との異種金属接触腐食試験(10年間暴露)における、各鋼材の腐食速度を表 3 - 9 に示す。ステンレス鋼の腐食速度は、水中部、干満帯に関係なく、いずれも 1.1×10^{-4} mm/yr 以下の極めて小さい値であった。これらは、母材腐食試験

で得られた値(表3-7)とほぼ同程度であった。一方、普通鋼 SM400B の腐食速度は水中部で 0.063~0.079mm/yr、干満部で 0.040~0.041mm/yr となり、水中部における腐食速度の方が大きい値となった。水中部、干満部共に、接触しているステンレス鋼の種類による腐食速度の差異は明確ではなかった。

表 3-9 異種金属接触腐食試験における各鋼材の腐食速度(10年間暴露)

環境	鋼種	重量減 [g]	腐食速度	
			[g/m ² h]	[mm/yr]
水中部	SUS304	0.067	0.3 × 10 ⁻⁴	0.3 × 10 ⁻⁴
	SM400B	67.448	0.071	0.079
	SUS316L	0.194	1.0 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁴
	SM400B	55.618	0.057	0.063
	SUS329J4L	0.028	0.1 × 10 ⁻⁴	0.1 × 10 ⁻⁴
	SM400B	66.084	0.070	0.077
干満部	SUS304	0.028	0.1 × 10 ⁻⁴	0.1 × 10 ⁻⁴
	SM400B	35.099	0.037	0.041
	SUS316L	0.182	0.9 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻⁴
	SM400B	35.320	0.037	0.041
	SUS329J4L	0.010	0.1 × 10 ⁻⁴	0.1 × 10 ⁻⁴
	SM400B	34.432	0.036	0.040

注: SM400B の値は 2 枚の平均値

ところで、普通鋼 SM400B の腐食速度において、干満部における値は特に、母材腐食試験で得られた腐食速度 0.067mm/yr よりも小さい値となっているが、その理由としては以下のことが考えられる。すなわち、普通鋼 SM400B はステンレス鋼と接触していない面は著しく腐食していたものの、ステンレス鋼と接触していた面はほとんど腐食していなかったため、腐食速度を試験片全体の面積から算出すると実際よりも過小な評価となってしまふ。そこで、SM400B の腐食速度を(1)式で求めた補正值により補正した。補正後の腐食速度と、母材腐食試験で得られた腐食速度を基準とした異種金属接触腐食性の倍率を表3-10にまとめた。

$$\text{補正值} = \frac{\text{SM400B単独試験片の面積 [cm}^2\text{]}}{\text{SM400B単独試験片の面積 [cm}^2\text{]} - \text{SUSと接触している面積 [cm}^2\text{]}} \quad (1)$$

面積補正をした結果、SM400B の腐食速度は水中部で 0.108 ~ 0.136mm/yr、干満部で 0.069 ~ 0.071mm/yr となった。SM400B 単独での腐食速度に基づきそれぞれの腐食性の倍率を求めると、水中部では平均 1.88 倍、干満部では平均 1.05 倍となり、干満部では異種金属接触の影響がより小さい結果となった。干満部では乾湿繰返しになるために普通鋼単

独での腐食速度は大きくなるが、水に漬かっている時間が少ないために、ステンレス鋼を接触させても腐食速度への影響、すなわち腐食倍率は小さいものと考えられる。

表 3-10 異種金属接触腐食性の倍率(10年間暴露、SUS/SM400B の面積比 = 1:1)

環境	鋼種	腐食速度 (A) [mm/yr]	補正值(B) (A×1.72) [mm/yr]	単独腐食試験片の腐食速度 (C) [mm/yr]	異種金属接触腐食性の倍率	
					B/C	平均
水中部	SUS304/SM400B	0.079	0.136	0.067	2.03	1.88
	SUS316L/SM400B	0.063	0.108		1.63	
	SUS329J4L/SM400B	0.077	0.132		1.98	
干満部	SUS304/SM400B	0.041	0.071	0.067	1.06	1.05
	SUS316L/SM400B	0.041	0.071		1.06	
	SUS329J4L/SM400B	0.040	0.069		1.03	

4. 耐食性金属材料の微生物腐食特性に関する検討

海水環境などでは、ステンレス鋼の表面に海水中に生息する微生物を含む付着物皮膜(バイオフィルム、biofilm)が形成され、ステンレス鋼のすき間腐食や孔食の感受性が高まることが知られている¹⁾。最近では、河川や湖水などの淡水中のような比較的穏やかな環境下でも、同様の現象が報告されつつある²⁾。そこで、ダム湖や河川などの淡水環境において、ステンレス材料の腐食に及ぼす微生物の影響を調査するために、暴露試験を実施した。

4.1 試験材料

暴露試験には、ステンレス鋼 3 種(SUS304、SUS316L、SUS329J4L)と、普通鋼 SM400B を用いた。それぞれの化学成分については、表3-5を参照されたい(SM400Bについては表中の“A”を参照)。

試験片の形状および寸法を図4-1に示す。ステンレス鋼を溶接した場合の溶接部における腐食特性についても把握するために、試験片には表4-1、表4-2に示す材料および条件で溶接部を設けた。溶接後の試験片の表面処理は、以下の要領で4通りの水準を設定した。

(1) 浸せき型酸洗い

溶接後のスパッタ、スラグ、異物等を除去後、試験片をアセトンで脱脂し、オーステナイト系ステンレス鋼用酸洗剤(浸せき用)中に所定の時間浸せきした。浸せき後の試験片を水洗、乾燥後、試験に供した。

(2) 塗布型酸洗い

溶接後のスパッタ、スラグ、異物等を除去後、試験片をアセトンで脱脂し、オーステナイト系ステン

レス鋼用酸洗剤（塗布用）を試験片全面に均一に塗布し、室温で所定の時間放置した。その後、試験片を水洗、乾燥し試験に供した。

(3) グラインダー仕上げ

ステンレス用砥石（粒度#36）でスパッタ、スラグおよび変色部を除去した後、ステンレス用ペーパーホイル（粒度#240）で溶接部および試験片裏面の変色部を研磨した。

(4) 未処理

チッピングハンマーでスパッタ、スラグを除去した後、ワイヤブラシで溶接部を除去した。試験片裏面の変色部についてはそのままとした。

なお、SM400B は暴露環境の腐食性を総合的に評価するために暴露したものであり、溶接は行わず、機械仕上げを行い脱脂洗浄した。

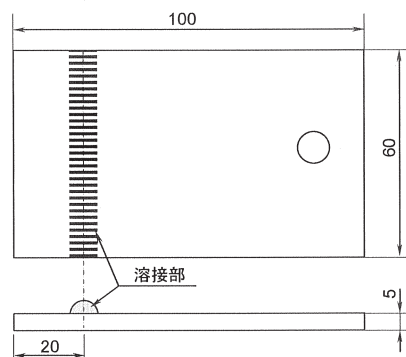


図 4 - 1 暴露試験片の形状および寸法

表 4 - 1 溶接材の化学組成 (wt%)

母材 (SUS)	溶接棒	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	棒径
304	WEL308	0.062	0.43	1.42	19.55	9.60	-	-	4mm
316L	WEL316L	0.030	0.39	1.56	19.62	12.83	2.53	-	4mm
329J4L	WEL329J4L	0.029	0.28	0.73	25.58	9.31	3.93	0.26	4mm

表 4 - 2 溶接条件

電流 [A]	電圧 [V]	速度 [mm/min]	入熱 [J/cm]	予熱
140	25	200	10500	なし

4. 2 試験方法

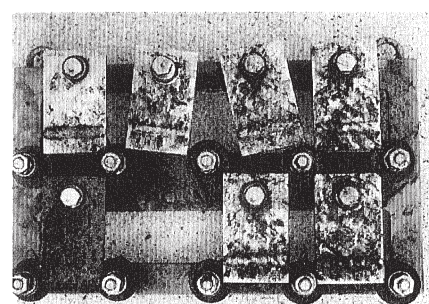
暴露試験は、(1) セケ宿ダム湖、(2) 江戸川開門、(3) 大町ダム湖、(4) 奈良俣ダム湖の 4 箇所（淡水）で実施した。いずれの試験片も取り付け枠に固定し、水深約 1~1.5m に暴露した。所定の期間暴露後の試験片について、付着物の除去前後における外観観察、電位測定を行った。また、試験片調査時に各暴露場所から採取した水について、代表的な水質項目を JIS

K 0101 「工業用水試験法」に準拠して分析した。また、硫酸塩還元細菌（SRB）を MPN 算出法³⁾で、従属栄養細菌を RGY 寒天平板培養法⁴⁾で分析した。

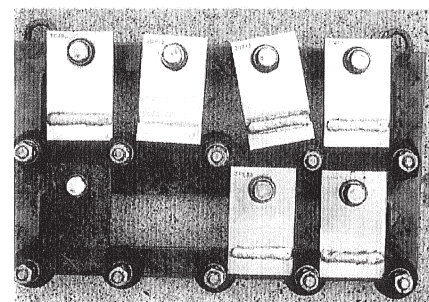
4. 2 試験結果

4. 2. 1 暴露試験片の外観

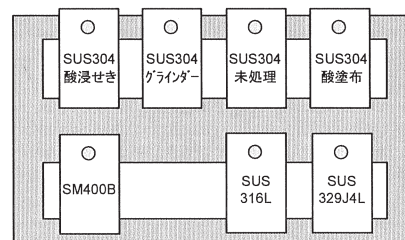
セケ宿ダム湖において 2 年間暴露後の試験片外観写真を図 4 - 2 に示す。いずれの暴露箇所においても、暴露後の試験片表面には無数の藻が付着していた。付着物中に含まれる微生物について同定したところ、表 4 - 3 に示すような多くの種類が存在していることが明らかとなった。



(a) 水洗前



(b) 水洗後



(c) 試験片の配置

図 4 - 2 暴露試験片の外観写真（セケ宿ダム湖、2 年間暴露後）

暴露 1 年後の調査では、セケ宿ダム湖および大町ダム湖に暴露していた SUS304（塗布型酸洗い）および SUS316L（浸せき型酸洗い）の溶接部近傍にご

く微小な孔食が観察されたが、暴露2年後の調査では、いずれの試験片にも表面処理の影響や孔食は認められなかった。

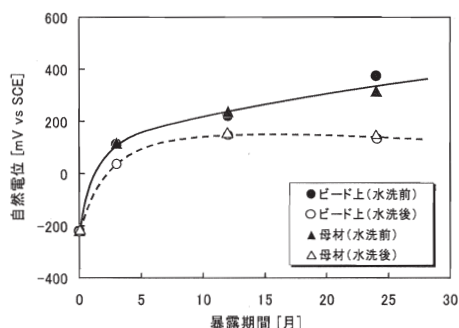
表4-3 SUS304 試験片表面に付着した微生物（七ヶ宿ダム、2年間暴露後）

番号	微生物の種類	同定確率 [%]
1	Rhodococcus equi	97.6
2	Oerskovia spp	99.9
3	Bacillus subtilis	90.9
4	Bacillus pumilus	90.9
5	Bacillus megaterium	99.9
6	Aeromonas salmonicida	82.9
7	Pseudomonas fluorescens	79.3
8	Aeromonas sobria	97.6

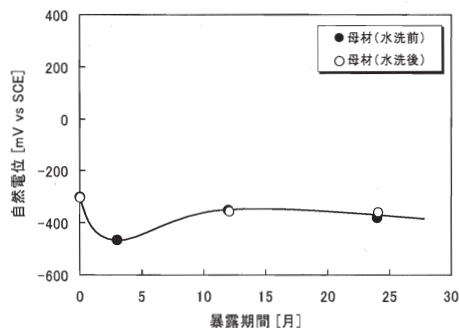
注：アピ同定検査法による

4.2.2 暴露試験片の自然電位

暴露試験片の自然電位は、飽和カロメル電極（SCE）を基準電極として計測した。結果の一例として、七ヶ宿ダム湖に暴露した SUS304（未処理）と SM400B の、暴露期間中における自然電位の経時変化を図4-3に示す。また、各暴露箇所における暴露2年後の試験片の自然電位を表4-4に示す。



(a) SUS304（未処理）



(b) SM400B

図4-3 暴露期間中における試験片表面の自然電位の経時変化（七ヶ宿ダム湖）

普通鋼 SM400B は暴露期間を通じて自然電位に大きな変動が無かったのに対し、ステンレス鋼（SUS304、SUS316L、SUS329J4L）はいずれも、暴露によって200～600mVも自然電位が上昇（貴化）した。これはいずれの暴露箇所においても共通した現象である。江戸川河口に暴露した試験片については、いずれも他に暴露したものに比べて卑の電位となった。これは、江戸川河口付近の水質が他と異なる（表4-5）ことが理由の一つとして考えられるが、詳細については不明である。

試験片表面の洗浄前後における自然電位の違いを見ると、洗浄前の方が洗浄後に比べて、最大で約350mV高くなっていることがわかった。これは、微生物等の付着によって、ステンレス鋼の自然電位が貴化されたためだと考えられる。今回の暴露試験では、いずれのステンレス鋼にも著しい局部腐食の兆候は認められなかったが、これは微生物の付着によってステンレス鋼の自然電位が貴化されたとはいえ、孔食電位あるいはすき間腐食電位を上回る電位には至らなかったためであると考えられる。しかしながら図4-3(a)に示したとおり、SUS304鋼（水洗前）の自然電位は暴露期間の経過と共に上昇傾向にあるため、今後さらなる暴露の継続により、局部腐食の発生に繋がる可能性も考えられる。

ステンレス鋼の種類、あるいは溶接後の表面処理方法の違いに着目し検討したが、明確な差異は認められなかった。

以上、暴露試験の結果、淡水といえどもステンレ

表4-4 暴露試験片の自然電位（暴露2年後、母材）

試験片	表面洗浄	江戸川	七ヶ宿	奈良俣	大町
SUS304 酸浸せき	前	-103	238	301	398
	後	-186	245	261	376
	前後	83	-7	40	22
SUS304 グラインダー	前	50	340	284	397
	後	-166	151	253	388
	前後	216	189	31	9
SUS304 未処理	前	202	372	266	395
	後	-145	139	245	360
	前後	347	233	21	35
SUS304 酸塗布	前	5	106	281	428
	後	-147	-125	265	396
	前後	152	231	16	32
SUS329J4L 酸浸せき	前	-155	434	362	441
	後	-194	224	357	415
	前後	39	210	5	26
SUS316L 酸浸せき	前	241	480	339	455
	後	27	282	331	428
	前後	214	198	8	27
SM400B	前	-626	-357	-500	-488
	後	-634	-344	-504	-495
	前後	8	-13	4	7

表 4-5 各暴露箇所における水質分析結果

場所・分析時期 分析項目	江戸川河口			七ヶ宿ダム湖			奈良俣ダム湖			大町ダム湖		
	3ヵ月後	1年後	2年後	3ヵ月後	1年後	2年後	3ヵ月後	1年後	2年後	3ヵ月後	1年後	2年後
水温 [°C]	15.9	34.1	26.4	15.9	23.3	21.2	14.0	18.1	21.4	15.8	32.0	16.0
pH	7.70	8.7	8.9	7.12	7.92	8.2	6.5	8.2	7.2	7.92	8.03	8.4
電気伝導度 [μS/cm]	296	252	270	72.1	61.7	66	35.8	26.2	29	102.5	56.9	56
酸化還元電位 [mV]	230	196.9	-	155	181	-	122	193	-	247	184	-
硫酸塩還元細菌 [cell/100ml]	4300	4300	23000	200	91	30以下	91	36	30以下	210	30以下	36
従属栄養細菌 [cell/100ml]	2200	46000	240000	-	11000	4100	-	4400	3000	-	280	680
Na ⁺ [ppm]	15	14	17	4.2	3.8	3.8	2.0	1.6	1.9	5.8	2.8	3.2
Ca ²⁺ [ppm]	24	19	22	7.6	3.8	5.1	1.9	0.24	1.4	9.9	6.2	6.0
Mn ²⁺ [ppm]	0.01以下	0.08	0.07	0.02	0.01以下	0.01以下	0.02	0.01	0.01以下	0.04	0.05	0.06
Cl ⁻ [ppm]	19	20	22	2.3	3.7	3.7	1.1	1.1	1.2	6.7	2.3	3.2
SO ₄ ²⁻ [ppm]	32	34	28	5.7	7.1	7.1	1.6	1.2	1.4	11	6.9	7.8
DO [ppm]	7.8	6.2	9.0	10.8	7.9	7.9	10.7	7.9	7.7	9.4	8.4	8.8

ス鋼表面には多数の微生物が付着し、これにより自然電位が著しく上昇することが明らかとなった。

5. 防食塗料のダム・河川環境における耐食性評価

河川管理施設に優れた性能の高耐久性塗料を利用することは、施設の耐久性向上及び維持管理労力軽減に非常に効果があるものと期待される。現状では、高耐久性塗料の河川環境における防食性や施工性に関するデータは、海洋環境での場合に比べて不足している。河川環境は多くは淡水であるので、海洋環境に比べて穏やかな腐食環境と考えられがちであるが、場合によっては海洋環境よりも腐食しやすい場合も知られているため、河川環境におけるデータの一層の充実が必要とされている。このような現状を踏まえ、河川環境下で優れた防食性や施工性を発揮すると期待される塗装系を対象に、江戸川河口堰下流における暴露試験を実施し、それらの河川環境における長期耐久性について調査した。なお、江戸川における暴露試験は、本課題に先立って実施された研究課題「河川管理施設への高耐久性塗料の適用に関する調査」（平成5～9年度）、「新素材の河川管理施設への適用に関する調査」（平成10～13年度）の、継続調査である。

5. 1 試験内容

5. 1. 1 概要

河川鋼構造物用塗料の用途によって、以下の2種類の暴露試験を行った。

1) 新設仕様塗料の暴露試験

新設構造物用の様々な塗装仕様を施した試験片を所定の期間暴露後、塗膜の劣化性状から塗装仕様の耐久性を調べた。

2) 塗替仕様塗料の暴露試験

塗替えの対象となることの多い典型的な塗替仕様で塗った試験片を、1年間暴露し回収した。回収した試験片を所定の処理により塗替仕様で塗替え、再

度、所定の期間暴露後、塗膜の劣化性状から塗替仕様と素地調整等の耐久性を調べた。

5. 1. 2 試験材料

試験片の形状および寸法を図5-1に示す。125×500mmの鋼板に溶接により突起部を接合し、突起部分やその付け根部分などの評価も行うことを目指した。2つの突起は端部の処理を2Rと1Cと変えてある。この板に表5-1～4に示す21種類の塗装系を塗装したものを、新設仕様試験片とした。新設仕様の塗装系は①水中部用エポキシ樹脂系、②水中部用ターナルエポキシ系、③大気部用塗装系、④その他の水中部用塗装の、4つのグループに分類することができる。新設仕様試験片には損傷部分からの錆の進行を見るために、素地に達する傷を図のように入れた。

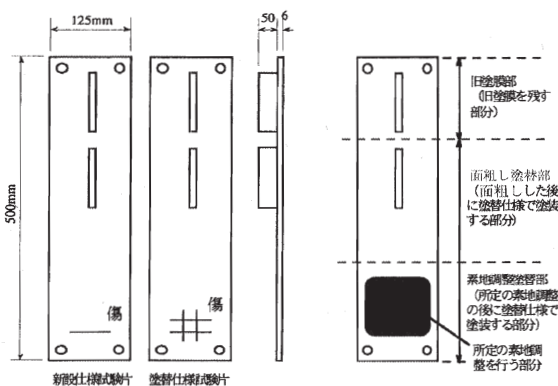


図 5-1 試験片の形状

図 5-2 塗替試験片

塗替仕様試験片は、実際の河川管理施設で比較的多く使用されている旧仕様の塗装（A1、A2、B1、B2、C、D、E）を施し1年間暴露した後、塗替塗装を行い、再度暴露して評価することとした。塗替時に錆が出る部分を多くするため、素地に達する傷を井の字型に入れた。塗替塗装においては、図5-2

に示すように旧塗装を残す部分（旧塗膜部）、#80～120のサンドペーパーによる面粗しの後に塗替塗装で塗装する部分（面粗し塗替部）、所定の素地調整を行った後に塗替仕様で塗装する部分（素地調整塗替部）の3つの部分を設定して製作した。塗替塗装仕様は、表5-5に示した組合せで行った。なお、新設塗装仕様および塗替塗装仕様ともに、1つの仕様につき試験片を3体用いて評価した。

5. 1. 3 試験方法

江戸川河口堰の下流側に、護岸から水中部までわたる暴露架台を設置し、試験片を干満帯と水中部に暴露した（図5-3）。所定の暴露期間後、試験片を引き上げ、ブラシなどで付着生物類を除去した。洗浄した試験片について、ASTM D 714に準拠して塗膜状況の外観調査を実施した。外観調査後の一部の試験片については、密着試験、インピーダンス測定、衝撃試験を行った。また、試験片の傷部周辺については、ふくれ発生状況を確認後、適当な寸法の試料を作製し、EPMAによる元素分析を行った。

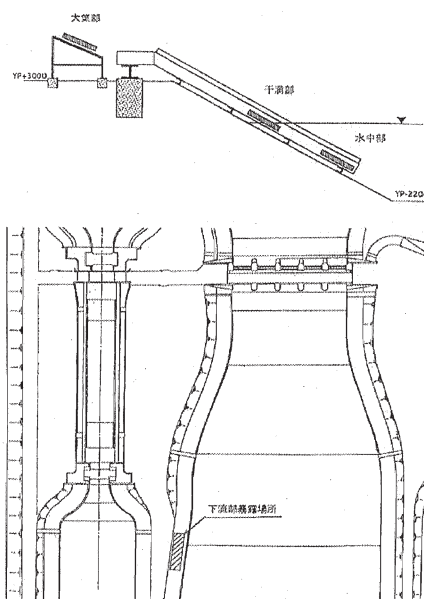


図5-3 江戸川河口堰下流における暴露試験方法

5. 2 試験結果

5. 2. 1 暴露試験後の試験片の外観

1) 新設塗装系

a) 水中部用エポキシ樹脂系

水中部用のエポキシ樹脂系塗料の調査結果を表5-1に示す。表中の評価は全体の評価であり、傷部の評価が全体評価と異なる場合は、その内容を表中に記載した。結果を整理すると、下記の通りである。

①干満帯においては、N-04を除く全ての仕様が7.5年間経過しても良好であった。N-04は中塗りにMIOがあり、その上塗が損耗していた。

②水中部では、N-02のジンクリッチペイント/エポキシの塗装系の一般部は良好であったが、傷部周辺に小さなふくれが生じた。通常のエポキシ樹脂系であるN-01には一般部にふくれが生じたことから、ジンクリッチペイントの有効性は明らかである。

③ジンクリッチペイントの無機系、有機系の有意差は認められなかった。

④N-05は、エポキシMIO層まで塗装した段階で1年間暴露し、引き続きエポキシ樹脂塗料中塗/上塗を塗装した。これは、上塗を現地で塗装することを想定した仕様であるが、全面にふくれ、はがれが発生し、1年間暴露を行わなかった仕様に比べて明らかに悪い結果となった。エポキシMIOは次の層の塗装まで期間があるときに使用される塗料であるが、屋外に1年間放置した場合には塗膜の性能が著しく低下することが明らかとなった。

b) 水中部用タールエポキシ樹脂系

水中部用のタールエポキシ樹脂系の調査結果を表5-2に示す。結果を整理すると、下記の通りである。

①干満帯においては、全ての仕様が7.5年間経過しても良好であった。

②水中部ではN-06、N-07、N-09のジンクリッチペイント/タールエポキシ系が最も良好であった。

③N-07とN-08およびN-09とN-10でタールエポキシと変性エポキシの違いを見ると、タールエポキシの方が良好であった。

④ジンクリッチペイントの有無による防食性能の差は認められなかった。

c) 大気部用塗装系

大気部用塗装系の調査結果を表5-3に示す。結果を整理すると、下記の通りである。

①干満帯では、従来型大気仕様であるN-13のみ全面にふくれ、錆が発生した。

②大気部用の重防食仕様であるN-11、N-12は、干満帯では良好な結果であったが、水中部では上塗のウレタンやふっ素樹脂塗料は耐久性に寄与せず、ふくれや点さびが発生した。

d) その他の水中部用塗装系

その他の水中部用塗装系の調査結果を表5-4に示す。結果を整理すると、下記の通りである。

①干満帯においては、N-15、N-21で異常が認められた。N-15は上塗のエポキシがやや損耗し、N-21で

は上塗のシリコン系防汚塗料がはがれを生じた。

②水中部では、塗膜の厚い N-16、N-17、N-18 が良好であった。

③ステンレス用プライマーにポリウレタン用中塗・上塗を施した N-22 は、干満帯では異常がなかった

ものの、水中部で全面ふくれを発生した。

2) 塗替塗装系

a) 旧塗装部

干満帯の旧塗装部は、塩ゴム系の塗装系が暴露 2 年目頃に著しく劣化 (われ、はがれ) した。エポキ

表 5-1 新設用塗料試験片の塗装仕様と暴露試験後の外観観察結果 (水中部用エポキシ樹脂系塗料)

試験片 番号	塗装系(膜厚μm)	塗装系の概要	H10年度		H13年度			H16年度		
			干満帯	水中部	干満帯		水中部	干満帯		水中部
			1.5年経過	3.3年経過	4年経過	5.5年経過	7年経過	6年経過	7.5年経過	9年経過
N-01	有機ジンクリッチプライマー(15) パワーツール 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(60) エポキシ中塗(40) エポキシ上塗(40)	通常のエポキシ樹脂系仕様	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ ふくれ 2所及び 傷部 ふくれ 4F
N-02	有機ジンクリッチプライマー(15) パワーツール 有機ジンクリッチペイント(75) 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(60) エポキシ中塗(40) エポキシ上塗(40)	N-01に有機ジンクリッチペイントを追加した仕様。有機ジンクリッチペイントの防食効果を確認する。	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F
N-03	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(60) エポキシ中塗(40) エポキシ上塗(40)	N-02のジンクリッチペイントを無機にしたもの。有機(N-02)と無機(N-03)の差を見る。	◎	◎ 傷部 ふくれ 4D~ 6D	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4M	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4M
N-04	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) 厚膜形エポキシ下塗(100) エポキシ MIO(60) エポキシ中塗(40) エポキシ上塗(40)	N-03のエポキシがMIOとなった仕様。	◎	◎	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	△ 表面損耗 フクレ 4M	△ 表面損耗 フクレ 4M	◎ 傷部 ふくれ 4F
N-05	サンドブラストSa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) 厚膜形エポキシ下塗(100) エポキシ MIO(60) 1年間大気中暴露 エポキシ中塗(40) エポキシ上塗(40)	N-04と同じ仕様で、エポキシMIOで1年間暴露する。	◎	—	◎	—	× (3年経過)	◎	◎	× ふくれ はがれ (6年経過)

評価：◎良、○やや良 (ふくれ 8F、8M、6F、4F より少ない)、△悪い、×極めて悪い

表 5-2 新設用塗料試験片の塗装仕様と暴露試験後の外観観察結果 (水中部用タールエポキシ樹脂系塗料)

試験片 番号	塗装系(膜厚μm)	塗装系の概要	H10年度		H13年度			H16年度		
			干満帯	水中部	干満帯		水中部	干満帯		水中部
			1.5年経過	3.3年経過	4年経過	5.5年経過	7年経過	6年経過	7.5年経過	9年経過
N-06	無機ジンクリッチプライマー(15) パワーツール タールエポキシ(150) タールエポキシ(150)	タールエポキシの基本仕様	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
N-07	有機ジンクリッチプライマー(15) パワーツール 有機ジンクリッチペイント(75) タールエポキシ(150) タールエポキシ(150)	N-06にジンクリッチペイントを追加した仕様。ジンクリッチペイントの効果を見る。	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
N-08	有機ジンクリッチプライマー(15) パワーツール 有機ジンクリッチペイント(75) 変性エポキシ(100) 変性エポキシ(100)	N-07のタールエポキシを変性エポキシに変えた仕様。タールエポキシと変性エポキシの防食性の差を見る。	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	△ 点さび
N-09	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) タールエポキシ(150) タールエポキシ(150)	N-07のジンクリッチペイントを無機に変えた仕様。有機と無機の耐食性の差を見る。	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
N-10	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) 変性エポキシ(100) 変性エポキシ(100) 変性エポキシ(100)	N-09のタールエポキシを変性エポキシに変えた仕様。タールエポキシと変性エポキシの防食性の差を見る。	◎	◎ 傷部 ふくれ 4M	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4M	◎	◎	△ 点さび

評価：◎良、○やや良 (ふくれ 8F、8M、6F、4F より少ない)、△悪い、×極めて悪い

表 5 - 3 新設用塗料試験片の塗装仕様と暴露試験後の外観観察結果（大気部用塗料）

試験片 番号	塗装系(膜厚 μm)	塗装系の概要	H10年度		H13年度			H16年度		
			干満帯	水中部	干満帯		水中部	干満帯		水中部
			1.5年経過	3.3年経過	4年経過	5.5年経過	7年経過	6年経過	7.5年経過	9年経過
N-11	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ミストコート(150g/m ²) 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(60) ポリウレタン用中塗(30) ポリウレタン上塗(25)	大気中の標準仕様	◎	◎ 傷部 ふくれ 4D	◎	◎	△	◎	◎	△ ふくれ2F 点さび
N-12	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチプライマー(75) ミストコート(150g/m ²) 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(60) ふっ素用中塗(25)	N-11に比べさらに耐候性に優れたふっ素樹脂系塗料による仕様	◎	◎ 傷部 ふくれ 2F	◎	◎	△	◎	◎	× ふくれ2F 全面点さび
N-13	エッチングプライマー(15) 鉛系油性錆止め 1種(35) 鉛系油性錆止め 2種(35) フェノールMIO(45) 塩ゴム中塗(35) 塩化ゴム上塗(30)	従来型の大気中仕様比較用	△	×	△	△	×	×	×	×

表 5 - 4 新設用塗料試験片の塗装仕様と暴露試験後の外観観察結果（その他の水中部用塗装系）

試験片 番号	塗装系(膜厚 μm)	塗装系の概要	H10年度		H13年度			H16年度		
			干満帯	水中部	干満帯		水中部	干満帯		水中部
			1.5年経過	3.3年経過	4年経過	5.5年経過	7年経過	6年経過	7.5年経過	9年経過
N-14	サンドブラスト Sa2.5 無機ジンクリッチペイント(75) ビニルエステルガラスフレーク塗料(300) ビニルエステルガラスフレーク塗料(300)	耐衝撃性に優れた塗料 ジンクリッチペイントで防食性の向上を目指している	◎	-	◎	◎	◎ (3年経過)	◎	◎	○ フクレ 2F (6年経過)
N-15	専用プライマー ビニルエステルガラスフレーク塗料(300) ビニルエステルガラスフレーク塗料(300) エポキシ樹脂塗料上塗(40)	耐衝撃性に優れたガラスフレーク塗料	◎	◎	◎	◎	◎	○ 表面損耗	○ やや 表面損耗	△ ふくれ
N-16	専用プライマー エポキシガラスフレーク塗料(200) エポキシガラスフレーク塗料(200) エポキシ樹脂塗料上塗(40)	耐衝撃性に優れた塗料 ビヒクルがエポキシ	◎	◎ 傷部 ふくれ 4F	◎	◎	◎ 傷部 ふくれ 4M	◎	◎	◎
N-17	専用プライマー(15) ウレタンエラストマー(2000)	1回塗りで超厚膜を得られる塗料を試みる。	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
N-18	無機ジンクリッチペイント(15) 超厚膜形エポキシ樹脂塗料(2000)	1回塗りで超厚膜を得られる塗料を試みる。	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
N-19	専用プライマー(15) 耐衝撃用エポキシ樹脂塗料(500)	船舶などに使われる水海用塗料を試みる。	◎	◎	◎	◎	○	○ 糸状ふくれ	◎	△ ふくれ
N-21	無機ジンクリッチプライマー(15) 厚膜形エポキシ下塗(100) 厚膜形エポキシ下塗(100) 専用バインダーコート(40) シリコン系防汚塗料(75) シリコン系防汚塗料(75)	シリコン系の防汚塗料	◎	-	◎	◎	× (3年経過)	△ 膨潤はがれ	× 膨潤はがれ	× ふくれ (6年経過)
N-22	ステンレス用プライマー(40) ステンレス用プライマー(40) ポリウレタン用中塗(30) ポリウレタン用中塗(25)	ステンレス専用塗料	◎	-	◎	◎	× (3年経過)	◎	◎	× (6年経過)

評価：◎良、○やや良（ふくれ8F、8M、6F、4Fより少ない）、△悪い、×極めて悪い

(注：N-20は欠番)

シ系、タールエポキシ系は7.5年暴露後も良好であったが、エポキシ/MIO/エポキシの塗装系(A2)ではMIO層の露出が見られた。一方、水中部ではふくれ、はがれの発生が認められ、異常が無かったのはタールエポキシ塗装系のみであった。塩ゴム系は剥離が全面に広がり、著しい劣化を示した。

b) 面粗し塗替部

干満帯においては、A1-01、A1-02、A1-04、A1-06、A2-02、A2-04のうちA1-02に一部上塗の損耗が認められたが、その他については概ね良好であった。また、旧塗装が塩ゴム系(C、D、E)では、面粗し後に塗装した塗替塗装のはがれが多く出た。一方、水

中部では面粗し部でのふくれやはがれが多く見られ、A1-01、A1-02、A1-04、A1-06、A2-02、A2-04とも7.5年経過では異常が生じた。このことから、面粗しなどの簡易な素地調整は、塗替塗装時の素地調整としては不適切であると考えられる。

c) 素地調整塗替部

水中部における7.5年間暴露後の外観観察結果を表5-5に示す。ジンクリッチペイント/エポキシMIO/エポキシ(A1)の塗替では、パワーツールよりもサンドブラストによる素地調整の方が良好な結果となった。本来大気部用の仕様であるふっ素樹脂系上塗を用いた仕様は、全面にふくれが発生した。

A1 からジンクリッチペイントを除いた仕様である A2 の塗替は、パワーツールによる素地調整では不十分であり、サンドブラスト/変性エポキシ、サンドブラスト/水中施工形塗料が良好な結果となった。

一方、旧塗膜がタールエポキシ系 (B1、B2) の場合、サンドブラストを行った塗装系が良好な結果となった。旧塗装でジンクリッチペイントを使わない B2 をタールエポキシで塗替える場合には、素地調整をパワーツールで行っても良好な結果が示された。

旧塗膜がタールエポキシ/塩ゴム系の場合は、スweepブラスト (Sa 1.5) /変性エポキシではふくれが

認められたが、十分なブラスト処理 (Sa 2.5) を行った試験片では良好な結果となった。

旧塗装が油性錆止めフタル酸/フェノール MIO/塩化ゴム (E) の場合はパワーツールおよびスweepブラストのみを設定したが、全ての塗替塗装系で極めて悪い結果となった。

暴露試験の結果を総合的に見ると、塗替塗装はブラスト処理で旧塗装を除去し有機ジンクを使用する A1-01 仕様が望ましいと言える。また、部分的な補修には、水中施工形パテも十分適用可能であると思われる。

表 5 - 5 塗替用塗料試験片の塗装仕様と暴露試験後の外観観察結果

塗替塗装仕様 (標準膜厚 μm)	旧塗装系	A1 厚膜ZRP エポ下 エポ MIO エポ 中・上	A2 — エポ下 エポ MIO エポ 中・上	B1 厚膜ZRP タールエポ×3	B2 — タールエポ×3	C — タールエポ×2 塩ゴム×2	D — エポ下×2 塩ゴム×2	E — 油性錆止め フェノール MIO 塩ゴム×2
01. (サンドブラスト) 有機ZRP(70)/ミストコート/変性エポ下塗(100×2)/エポキシ中塗(40)/エポキシ上塗(40)		(A1-01) ○						
02. (パワーツール) 有機ZRP(70)/ミストコート/変性エポ下塗(100×2)/エポキシ中塗(40)/エポキシ上塗(40)		(A1-02) △ ふくれ	(A2-02) △ ふくれ					
03. (サンドブラスト) 変性エポ下塗(60×2)/エポキシ中塗(40)/エポキシ上塗(40)						(C-03) [スweepブラスト] △	(D-03) [スweepブラスト] ○	
04. (パワーツール) 変性エポ下塗(60×2)/エポキシ中塗(40)/エポキシ上塗(30)		(A1-04) △ ふくれ	(A2-04) × ふくれ			(C-04) [上塗を取る] ×	(D-04) [上塗を取る] △	(E-04) [上塗を取る] ×
06. (パワーツール) 変性エポ下塗(60×2)/ふっ素用中塗(40)/ふっ素上塗(30)		(A1-06) ×						(E-06) ×
07a. (サンドブラスト一度打ち) Sa 1.5 ビニルエステルガラスフレーク塗料用下塗(80)/ビニルエステルガラスフレーク用中塗(350)/ビニルエステルガラスフレーク用上塗(350)					(B2-07) ◎			
07b. (サンドブラスト二度打ち) Sa 2.5 ビニルエステルガラスフレーク塗料用下塗(80)/ビニルエステルガラスフレーク用中塗(350)/ビニルエステルガラスフレーク用上塗(350)						(C-07) ◎		
08. (サンドブラスト) 有機ZRP(70)/ミストコート/タールエポ下塗(60×3)				(B1-08) ◎		(C-08) ○		
09. (パワーツール) タールエポ下塗(60×3)				(B1-09) △ ふくれ	(B2-09) ◎			
10. (パワーツール) 変性エポ下塗(60)/変性エポ中塗(60)/変性エポ上塗(60)				(B1-10) △ ふくれ	(B2-10) × はがれ			
11a. (サンドブラスト) 水中施工塗料パテ型(2000)			(A2-11) ◎			(C-11) ◎		
11b. (サンドブラスト) 水中施工塗料塗り型(2000)					(B2-11) ○ ふくれ		(D-11) △	
12. (パワーツール) 変性エポ下塗(60)/超厚膜形エポキシ(300)/エポキシ中塗(40)/エポキシ上塗(40)			(A2-12) △ ふくれ		(B2-12) △ ふくれ			(E-12) ×
13. (パワーツール) 無溶剤形塗料			(A2-13) ×		(B2-13) ×		(D-13) ×	(E-13) ×

評価: ◎良、○やや良 (ふくれ 8F、8M、6F、4F より少ない)、△悪い、×極めて悪い (注1: 特記にない限り、ブラスト処理は Sa 2.5 である 注2: ZRP → ジンクリッチペイント)

5. 2. 2 インピーダンス測定および密着試験の結果

新設用塗料試験片(水中部用エポキシ樹脂系塗料)を干満帯に暴露したうち、著しい劣化が生じた N-05 を除いた N-01~04 について、インピーダンス測定および密着試験を実施した。インピーダンス測定にはインピーダンスメーター(三田無線研究所製 D-50)を用いた。電極面積は $4 \times 4 \text{cm}^2$ 、使用溶液は 3%NaCl 水溶液とした。また、密着試験にはアドヒージョンテスター(elcometer 社製)を用いた。結果を表 5-6 および表 5-7 に示す。

表 5-6 インピーダンス測定結果

試験片	f [Hz]	D [tan δ]	C [nF]	G [μS]	R [1/G]
N-01	200	0.09	0.358	0.042	2.38E+07
	500	0.09	0.342	0.092	1.09E+07
	1000	0.08	0.329	0.174	5.75E+06
N-02	200	0.12	0.468	0.072	1.39E+07
	500	0.13	0.435	0.171	5.85E+06
N-03	200	3.23	0.0074	0.030	3.33E+07
	500	2.34	0.0068	0.050	2.00E+07
	1000	1.47	0.0065	0.060	1.67E+07
N-04	200	0.11	0.511	0.073	1.37E+07
	500	0.11	0.478	0.160	6.25E+06
	1000	0.10	0.456	0.300	3.33E+06

表 5-7 密着試験の結果

試験片	密着力 [MPa]	剥離状況
N-01	2.1	接着剤-エポキシ塗装界面剥離100%
N-02	3.5	接着剤-エポキシ塗装界面剥離100%
N-03	0.6	エポキシ塗装凝集破壊100%
N-04	4.0	接着剤-エポキシ塗装界面剥離100%

インピーダンス測定の結果を見ると、N-03(無機ジンクリッチペイントを用いた塗装仕様)において tan δ が 1 以上となっていることから、劣化が生じているものと考えられる。その他の塗装仕様については良好であった。N-01、N-02、N-04 については、ほぼ同程度の値となっており、塗装仕様による有意差は認められない。

密着試験の結果を見ると、N-03 以外は接着剤剥離で 2.1MPa 以上であることから、異常な値とは判定できない。N-03 は、エポキシ層の凝集破壊で 0.6MPa の値となった。これはエポキシ層の劣化が生じているためと考えられる。N-03 の破壊層は中間のエポキシ層であったことから、本試験ではジンクリッチペイントの有機系と無機系の性能差、あるいはエポキシ MIO 層の有無の差を見出すことはできなかった。

5. 2. 3 傷部の調査

新設用塗料試験片(水中部用エポキシ樹脂系塗料)

を干満帯に暴露したうち、著しい劣化が生じた N-05 を除いた N-01~04 について、電子線マイクロアナライザー(EPMA)による傷部断面の元素分析を行った。分析に供する試料は、試験片から傷部を中心として図 5-4 に示すように切り出した後、エポキシ樹脂に埋め込み、表面を研磨して作製した。元素分析は、特に傷部およびふくれを中心に行った。

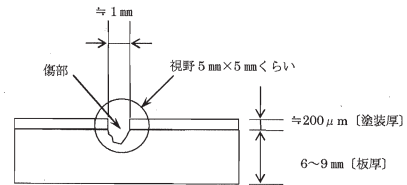


図 5-4 元素分析に供した試料

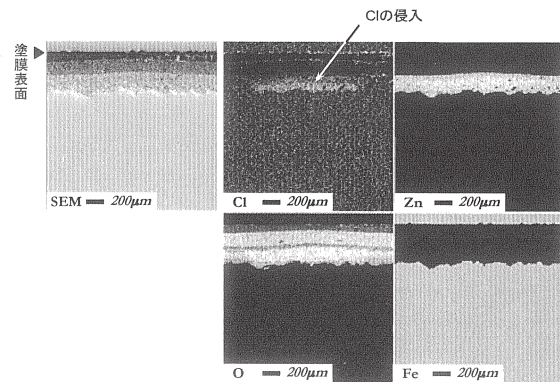


図 5-5 ふくれ発生部における試験片断面の元素分析結果(N-02)

EPMA によるマッピング像の一例を図 5-5 に示す。この図は N-02(有機ジンクリッチプライマー/パワーツール/有機ジンクリッチペイント/厚膜形エポキシ下塗×2/エポキシ中・上塗)のふくれ部の分析結果である。Cl と Zn の分布から、塩素がジンクリッチペイント層に侵入していることがわかる。他の試験片では、傷部からの侵入と思われる Cl 元素の存在が認められたが、図 5-5 の場合には周囲に塗膜の欠損等が無いことから、この塩素は塗膜表面から侵入しジンク層に蓄積されたものであると推定される。ふくれが発生した部分では確実にジンク層に塩分が蓄積されていることから、傷部とのアノード反応ともあいまって、ふくれへと成長したものと考えられる。N-02 のふくれは、外観上ははず肌のようにも見えるが、塩分の蓄積の大きいところからふくれになるものと予測される。なお、元素分析の結果においても、ジンクリッチペイントの有機系と無機系

で、明確な性能差は確認できなかった。

5. 2. 4 衝撃試験の結果

新設用塗料試験片のうちN14~19について、ガードナー衝撃試験を行った。試験片は水中に1年間暴露したものおよび9年間暴露したものを使用した。衝撃試験は、室内で16日間の水中浸せきをした直後の状態（湿潤状態）と、引き上げ後室内で1ヶ月間乾燥した状態（乾燥状態）について試験を行った。各試験片において、衝撃によるピンホール等の異常が発生しない最大の衝撃値を図5-6にまとめた。なお、図中の試験体番号の末尾が1のものは1年間暴露後の試験片、3のものは9年間暴露後の試験片を示している。

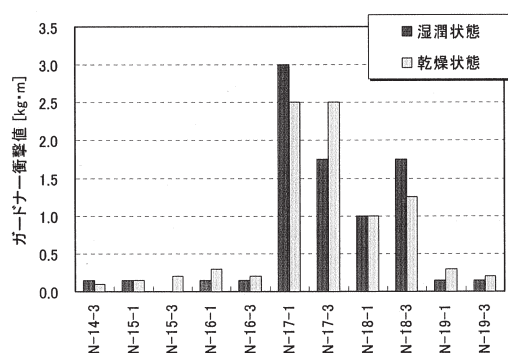


図5-6 衝撃試験の結果

衝撃試験の結果、湿潤状態と乾燥状態で明確な差異は認められなかった。また、暴露期間の長短による有意差も特に見られなかった。耐衝撃性の高い仕様はN-17（ウレタンエラストマー）およびN-18（超厚膜形エポキシ樹脂塗料）であり、それぞれ塗膜が厚いことが寄与しているようである。

山崎⁵⁾によると、ガードナー試験における一般塗膜の衝撃値は、タールエポキシ樹脂系（500 μ m）で0.3kgm、ガラスフレーク系（800 μ m）で0.5kgmである。他の未発表資料等からは、ガラスフレーク入りポリエステル（950 μ m）で1.25kgm、ウレタン塗装（1800 μ m）で0.5kgmなどの値が得られた。これらのデータと比較し、N-17およびN-18の衝撃値は相当に大きな値である。特にN-17は、耐衝撃性の高いウレタンエラストマーであることが大きな要因であると推定される。その他の塗装仕様では、特に格段の耐衝撃性があるとは、認められなかった。

6. 高分子系新材料の河川管理施設への適用性

近年では、高分子系材料の一つである繊維強化バ

ラスチック（FRP）が工業材料として利用されている。これらの材料は軽量、高強度、高耐食性といった優れた特徴を有することから、高い力学的特性が求められる航空機の一次構造部材から、化学プラントの装置材料のような高い耐薬品性が求められる用途まで、既に幅広い分野で実用化されている。水門分野においても、鉄鋼材料の代替としてFRPの展開が期待され既に扉体などで活用されている事例もあるが、河川環境での耐久性に関する実証データが無いこと、保守管理方法についての標準化がなされていないことなど、ユーザーが安心して利用できる環境が未だ整備されていないのが現状である。

そこで、河川環境におけるFRPの長期耐久性に関する基礎資料をまとめるために、既に供用されているFRP水門の経年劣化状況を調査するとともに、実験室における水門用FRPの耐久性試験を行った。

6. 1 FRP製扉体の解体試験

6. 1. 1 試験方法

実際に供用されているFRP水門の経年劣化状態を定量的に評価するため、農業用水の樋門に使用されているFRP製扉体（供用開始から35年以上経過）を解体し、その力学特性を調べた。回収したFRP製扉体の外観写真を図6-1に、概要を表6-1に示す。

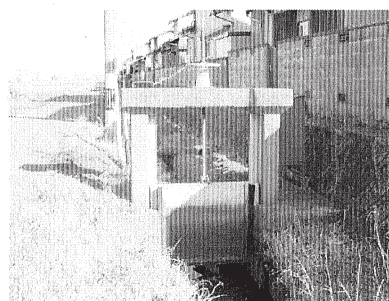


図6-1 解体調査を行ったFRP製扉体

表6-1 解体調査を行ったFRP製扉体の概要

施工年度	1969年以前
経過年数	35年以上
ゲート形式	スライドゲート
扉体の構造形式	プレートゲータ形式
扉体の成形方法	ハンドレイアップ法
扉体寸法	縦1m×横1.15m
稼動状況	常時稼動
外観上の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・吸水による問題発生は無い ・扉体表面に水垢の付着がある ・摺動部における損傷、摩耗は無い ・若干の変色が認められる

強度試験は図6-2に示すように、解体した扉体のスキンプレートおよび主桁（溝型材）から、所定の

寸法および数量（引張試験については $8 \times 25 \times 250\text{mm}$ の試験片を 5 本）採取し、JIS 規格に準拠して行った。この扉体については、供用前すなわち初期の強度に関するデータが入手できなかったため、全く同じ積層構成の平板および溝型材を新たに作製し、同様の方法で強度試験を行い、双方のデータを比較した。

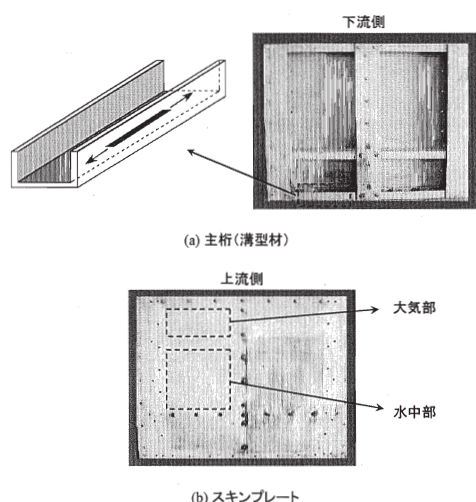


図 6-2 引張試験片の採取方法

6. 1. 2 試験結果

解体した FRP 水門の強度試験結果の一例として、引張強度を図 6-3 に、ヤング率を図 6-4 に示す。なお、グラフの値は 5 本の試験片の平均値を示している。引張強度については、回収扉体のスキムプレートおよび桁ともに、新たに製作した FRP の強度をおよそ 10% 程度下回る結果となった。一方、ヤング率を見ると、スキムプレート部についてはいずれもほぼ同程度の値となったが、回収扉体の桁の値は新材のおよそ 75% 程度であった。

強度試験後の試験片について、フーリエ変換型赤外分光分析装置 (FT-IR) による化学構造分析、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDS) による元素分析、示差走査熱量計 (DSC) による熱分析等を行ったが、回収扉体の FRP は繊維・樹脂ともに健全であり、また、外部からの劣化因子の侵入も認められなかった。このことから、回収扉体の強度およびヤング率が新規に作製した FRP よりも低い値となったのは、扉体の経年劣化によるものではなく、FRP 製作上のバラツキなど他の要因によるものであると推察されるが、詳細な解析については今後の検討課題としたい。

この他に曲げ試験、シャルピー衝撃試験、バーコ

ル硬さの測定等を行ったが、いずれも回収扉体の劣化を示す特性の低下は認められなかった。

以上の解体調査結果から、FRP で作製された水門は、いずれも最低限の維持管理のみで竣工後 30 年以上健全性を保持できる、十分な耐久性を有していることが明らかとなった。この特徴により FRP 水門は、短期間での塗装の更新を余儀なくされるような厳しい腐食環境にある箇所や、塗装の更新自体が困難である箇所などにおいて、従来の鋼製水門に対し優位性を発揮できるものと考えられる。

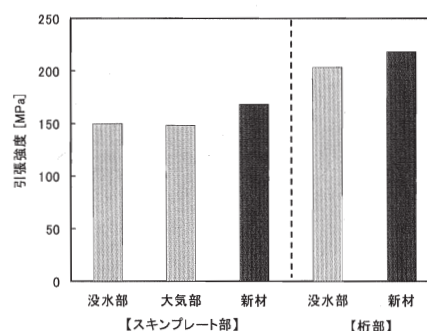


図 6-3 解体した FRP 扉体の引張強度

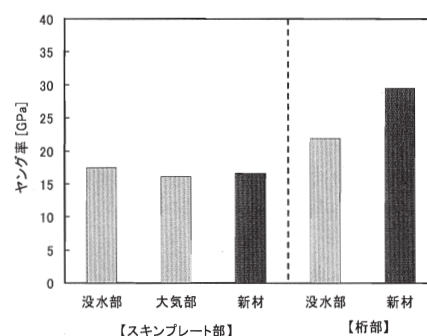


図 6-4 解体した FRP 扉体のヤング率

6. 2 室内における水門用 FRP の耐久性試験

6. 2. 1 試験方法

水門用 FRP の耐候性や耐水性に関する基礎的知見を得るために、現在、水門用として主に使われている成形法の異なる 3 種類の FRP を対象とし、促進耐候性試験および耐水性試験を行った。

1) 促進耐候性試験

水門用 FRP の耐候性試験には、ハンドレイアップ法、注型法、引抜成形法で作製したガラス繊維強化プラスチック (GFRP) 積層板を使用した。試験片は JIS K 7055 「ガラス繊維強化プラスチックの曲げ

試験方法」に準拠した短冊状とし、寸法は厚さ 4～10mm、幅 15mm、長さ 200mm とした。この試験片を JIS K 7350-2「プラスチック—実験室光源による暴露試験方法第 2 部：キセノンアーク光源」に基づき、実験室内に設置した促進耐候性試験機のチャンパー内にセットし、所定の時間キセノンアーク光源（250～800 nm）に暴露した。暴露に伴う特性の変化を、試験片表面の光沢度、試験片の曲げ強度、曲げ弾性率などで評価した。

2) 耐水性試験

水門用 FRP の耐水性は、促進耐候性試験に用いたものと同じ試験片を使用して浸せき試験を行い、試験片の質量、厚さ、曲げ強度、曲げ弾性率試の変化により評価した。浸せき試験における環境液は、20～25℃に保った蒸留水とした。

6. 2. 2 試験結果

1) 促進耐候性試験結果

実験室において人工光源に暴露した際の、FRP 表面の光沢度保持率（初期値で無次元化した値）の経時変化を図 6-5 に、曲げ強度保持率の経時変化を図 6-6 に示す。これらの図を見ると、FRP の劣化挙動は成形方法によって若干傾向が異なっていることがわかる。これは、それぞれの成形方法によって用いる繊維の強化形態が異なるとともに、得られる FRP の繊維含有率も異なるためである。したがって FRP 製品の作製時には、素材の選定はもとより、用途やコストなどを踏まえて最適な成形方法を選択することが重要となる。

図 6-5 を見ると、全てのケースにおいて暴露開始直後から光沢度が著しく低下し、およそ 2500 時間後には初期の 20%以下まで低下していることがわかる。一方、曲げ強度保持率（図 6-6）では、引抜成形品でわずかに低下が認められたものの、他は 2500 時間の暴露後も初期強度からほとんど変化しなかった。これらの結果から、実験を行った範囲内では、紫外線照射による FRP の劣化は表面のごく近傍でのみしか生じておらず、それゆえほとんど強度低下はなかったものと考えられる。

一般に FRP 成形品の表面は「ゲルコート」と呼ばれる樹脂層が 0.3～0.5mm 程度の厚さで適用される。これは FRP 表面への美観付与と、FRP 本体の保護を目的とするものである。通常ゲルコートには、成形品の用途に応じて耐熱性、耐薬品性、耐候性等に優れた樹脂が用いられる。例えば、紫外線に対する高い耐性を有する樹脂をゲルコートとして用いること

により、水門用 FRP の紫外線による美観低下は大幅に改善されるものと思われる。

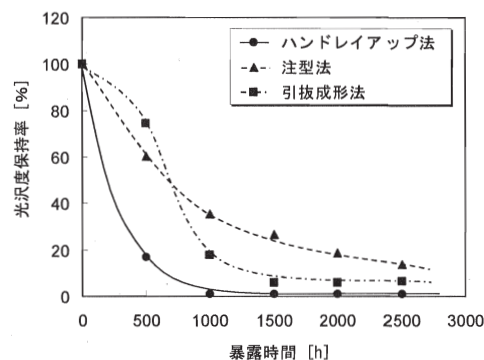


図 6-5 キセノンアーク光源に暴露した際の FRP 表面の光沢保持率の経時変化

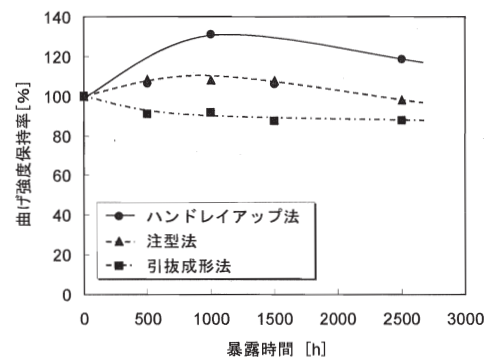


図 6-6 キセノンアーク光源に暴露した際の FRP の曲げ強度保持率の経時変化

2) 耐水性試験結果

2500 時間の浸せきにおいて、FRP の厚さ変化率（初期値に対する増分の割合）は最大で+0.61%、質量変化率は最大で+1.4%という結果となり、膨潤を伴う若干の吸水が認められた。浸せき過程における FRP の曲げ強度保持率の経時変化を図 6-7 に示す。

ハンドレイアップ法で成形した FRP 積層板を除き、いずれの曲げ強度も浸せき開始直後から低下しはじめ、およそ 500 時間経過後までに初期強度のおよそ 85%まで低下した後は、ほぼ一定となった。この強度低下は膨潤による FRP の物理的劣化に起因したものであると考えられる。実際の水門扉には水圧によっておよそ 10MPa の応力が作用するが（10m²程度の小型扉体を想定）⁶⁾、これに対し、本試験終了時における FRP の曲げ強度の絶対値は 120～400MPa と十分大きい。このことから、試験の範囲内では FRP の吸水量は非常に少なく、許容限度を超

えた顕著な強度低下は生じなかったと判断することができる。

以上の耐久性試験の結果から、水門用 FRP は紫外線の影響で美観は徐々に低下していく一方で、良好な耐水性を有していることが明らかとなった。このことから FRP は特に、常時没水状態にあるような水門への適用が望ましいと考えられる。

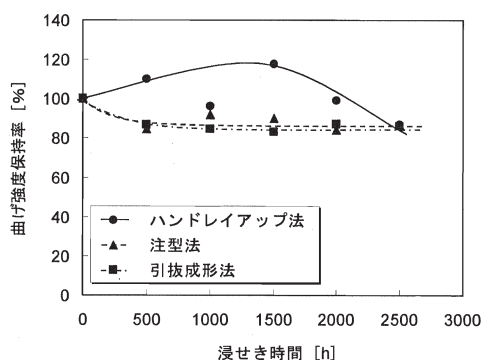


図 6-7 イオン交換水 (20~25°C) 浸せき時における FRP の曲げ強度保持率の経時変化

7. まとめ

(1) アルミニウム合金材料への塗装の効果

アルミニウム合金材料に対し、素地調整 2 種 (シンナー/ブラスト)、プライマー 2 種 (Cr フリー/従来タイプウォッシュプライマー)、下塗 1 種 (エポキシ)、上塗 2 種 (ウレタン/ふっ素) の組み合わせで塗装を施し、淡水環境で暴露試験を行った。いずれの塗装仕様も 2 年間の暴露で 3~6 μm 程度の膜厚の減少が見られたが、塗膜自体の劣化は認められず、アルミニウム素地への防食効果が確認できた。

(2) ステンレス鋼材の耐食性

① 10 年間にわたる汽水域でのステンレス鋼 (SUS304、SUS316L、SUS329J4L) の暴露試験の結果、いずれの腐食速度も水中部・干満部共に 1.1×10^{-4} 以下と極めて小さかった。

② ステンレス鋼を炭素鋼と接触させた場合には、ステンレス鋼の自然電位は炭素鋼とほぼ同じレベルまで低下し、孔食やすき間腐食が発生しにくくなった。しかしその一方で、炭素鋼の腐食は単独使用の場合よりも加速され、腐食速度は水中部で 1.88 倍、干満部で 1.05 倍となった。

(3) ステンレス鋼材の微生物腐食特性

ステンレス鋼 (SUS304、SUS316L、SUS329J4L) を淡水中に暴露した結果、表面に多数の微生物が付

着し、これがステンレス鋼の自然電位を上昇させることが明らかとなり、微生物がステンレス鋼の腐食性に影響を与える可能性があることを確認した。

(4) 防食塗料の耐食性

① 新設塗装では、ジンクリッチペイントを用いたエポキシ樹脂系塗料の耐久性が良好であった。また、大気部用の重防食仕様であるポリウレタンやふっ素樹脂を用いた塗装系は、部材の没水時間率を十分に考慮すれば、防食性と景観性を兼ね備えた仕様として河川構造物にも適用可能である。

② 塗替塗装時においては、面粗しなどの簡易な素地調整では良好な結果が得られなかった。ブラスト処理で旧塗装を十分除去し、有機ジンクリッチペイントを用いる仕様が最も望ましい。また、部分的な補修には水中施工形パテも十分適用可能である。

③ ジンクリッチペイントを用いた仕様で見られたふくれの発生は、ジンクリッチ層への塩素の侵入が一因となっていると思われる。

④ ウレタンエラストマーあるいは超厚膜形エポキシ樹脂塗料を用いた塗装仕様は、高い耐衝撃性を有することが確認できた。

(5) 高分子系新材料の適用性

供用中の FRP 製扉体の解体調査を行った結果、FRP は河川環境において 30 年以上も健全性を保持できる、十分な耐久性を有していることが明らかとなった。また、各種耐久性試験の結果から、FRP は常時没水状態にあるような扉体への適用が望ましいとの知見が得られた。

参考文献

- (社) 腐食防食協会:「腐食・防食ハンドブック」、丸善、p.87、平成 12 年 2 月
- 安西敏雄、中野光一、西尾一政、松川清孝:「ダム貯水における SUS304 溶接部の生物皮膜付着と微生物腐食」、溶接学会論文集、第 23 巻、第 4 号、pp.613-621、平成 17 年 11 月
- 土壤微生物研究会:「新編 土壤微生物実験法」、養賢堂、平成 6 年 2 月
- 日本水道協会:「水試験法・解説 (2001 年版)」、日本水道協会、平成 13 年
- 山崎 曜:「超厚膜塗装技術の現状と問題点」、表面技術、第 46 巻、第 6 号、pp.520-524、平成 7 年 6 月
- ダム・堰施設技術基準委員会: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