

# 鋼構造部材のコンクリート境界部における 経時的な腐食挙動に関する研究

貝沼重信<sup>1</sup>・細見直史<sup>2</sup>・金仁泰<sup>3</sup>・伊藤義人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 九州大学大学院 助教授 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail:kai@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 修(工) (㈱東京鐵骨橋梁 技術本部技術研究所 (〒302-0038 茨城県取手市下高井1020))

<sup>3</sup>正会員 博(工) 名古屋大学大学院 助手 工学研究科社会基盤工学専攻

(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

<sup>4</sup>フェロー会員 工博 名古屋大学大学院 教授 工学研究科社会基盤工学専攻

(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

下路トラス橋において、斜材がコンクリート床版との境界部で局部腐食することで破断した事例が報告されている。この部位は波形鋼板ウェブPC橋のウェブとコンクリートフランジの境界部にも見られる。今後、この境界部に致命的な腐食損傷が生じることも考えられる。本研究では鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食特性を明らかにするために、部分的にコンクリートを巻き立てた鋼板の腐食促進実験を行った。この結果をバリオグラムと回帰樹により分析することで、腐食特性の分類と腐食領域の分割を行った。また、局部腐食が卓越する境界部と全面腐食が卓越する一般部などの腐食挙動を明らかにした。さらに、コンクリート境界部における鋼構造部材の腐食挙動の評価・予測法を提案した。

*Key Words : local corrosion, steel, concrete, accelerated exposure test, variogram, regression tree*

## 1. はじめに

下路トラス橋において、斜材がコンクリート床版との境界部で破断した損傷事例が報告されている<sup>1)</sup>。この損傷の発生原因は、コンクリートとの境界部に雨水や凍結防止剤などが長時間停滞による局部腐食であると言われている<sup>2)</sup>。この部位は波形鋼板ウェブPC橋(波形鋼板ウェブ埋込みタイプ)のウェブとコンクリートのフランジの境界部などにもあり、今後、この部位にトラス橋と同様の腐食損傷が生じることが懸念される。鋼構造部材のコンクリート境界部に局部腐食が一旦生じると、塗装の塗替え時にさびを十分に除去した上で塗装することは困難となる。そのため、再塗装による境界部の防食・腐食遅延効果が期待できない場合が少なくない。また、境界部の腐食損傷を長期間放置すると、主部材が破断することで人命に関わる重大な事故に繋がる恐れがある。したがって、鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動を明らかにした上で、この腐食に対して適切な予防・遅延対策を行う必要がある。しかし、鋼部材がコンクリートとの境界部における基本腐食特性(通気差系のマクロセル腐食)は知られているものの、その経時的な腐食挙動の詳細については明らかにされていない。

通気差系のマクロセル腐食の主な発生要因として、以下に示す2点が考えられる。

- 1) コンクリート表面に滞水した塩水が表面張力によって、境界線から上方に若干吸い上げられる部分のカソード部、とその上方のコンクリート外部における鋼板のアノード部が明確に分離されている。
- 2) 1)の境界線から上方および下方に位置する鋼板部の溶存酸素濃度の差による通気差電池が形成される。

本研究ではコンクリート境界部における鋼構造部材の経時的な腐食挙動を明らかにすることを目的とした。そのために、コンクリート境界部を有する鋼板のモデル供試体の腐食促進実験を行った。この実験データに対して、バリオグラム分析および回帰樹分析することで、腐食特性の分類、その違いによる領域分割やコンクリート境界部における鋼板の腐食挙動の経時変化について検討した。また、下路トラス橋における斜材とコンクリート床版の境界部の腐食損傷データを整理・分析することで、腐食実験結果の腐食促進倍率を算出した。さらに、鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動の評価・予測法を提案した。

表-1 鋼材の化学成分および機械的性質

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
0.16	0.39	1.46	0.014	0.005	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.005	395	542	24

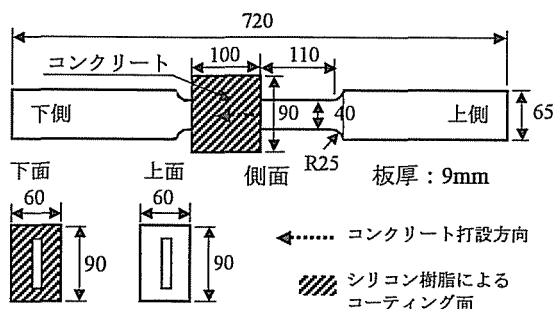


図-1 供試体の形状および寸法 (単位: mm)

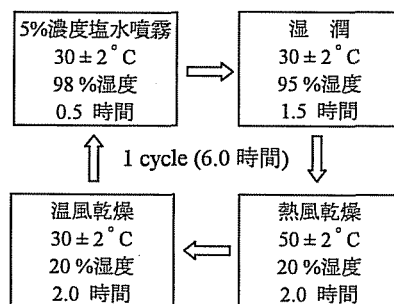


図-2 腐食促進実験の腐食サイクル

表-2 コンクリートの示方配合

圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	水セメント比 W/C (%)	細骨材料 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	混和材料 (AE減水剤)
45	40	43	160	400	746	991	4.8

## 2. 腐食促進実験

### (1) 供試体

供試体の鋼板には、表-1に示す化学成分と機械的性質を有する板厚9mmのSM490材を用いた。供試体の形状と寸法を図-1に示す。供試体は長手方向の中央を着目部とするため、図中の鋼板の長手方向中央から片側に100×90×60mmのコンクリートを巻き立てることで計24体製作した。なお、鋼板の表面粗さは、グリットブラスト処理により約70 $\mu$ mとした<sup>3)</sup>。コンクリートの示方配合は、標準的な波形鋼板ウェブPC橋に基づき、表-2に示す配合とした。コンクリート部の上面を除く側面と下面は、塩水や外気がコンクリート中に浸入しないように、シリコン樹脂でコーティングした。

一般的に鋼構造部材には塗装が施されている。しかし、供試体の鋼板を塗装すると、後述する腐食実験では、1) 塗膜劣化による腐食がほとんど生じないこと、2) 実構造物の塗膜劣化後の腐食挙動を模擬することが困難なこと、および、3) 本実験では鋼コンクリート境界部の通気差系のマクロセル腐食をシミュレートすることに着目していること、などから本研究では、鋼板部を無塗装とすることとした。

### (2) 実験方法

腐食促進実験には複合サイクル腐食試験機を用いた。腐食サイクルには図-2に示すようなS6-cycleを用い<sup>3)-6)</sup>、その繰返し回数を600cycle毎に600cycleから2400cycleとすることで実験を行った<sup>3)-5)</sup>。なお、供試体はJIS規格に従い鉛直方向(塩水噴霧落下方向)に対して約15度傾けて設置した。腐食実験には600cycle毎に各5体、計20体の供試体を用いた。

波形鋼板ウェブPC橋などの鋼コンクリート構造物では、腐食に対して鋼とコンクリートの部材の接合部(コンクリート内部)を健全な状態で維持することが重要となる。そのため、鋼部材のコンクリート境界線からその接合部への腐食進入深さを検討する必要がある。そこで、まず、供試体の鋼板とコンクリートの境界線からの肌隙深さを測定した。この測定は実験を行わない4体の供試体(S6-0cycle)の鋼コンクリート境界部にインクを塗布・浸透させ、コンクリートを除去することで行った。また、実験終了後の供試体の境界内部への腐食進入深さは、外観観察を行った後、肌隙深さと同様な方法で測定した。コンクリートとさび除去後の供試体の腐食表面性状は、レーザーフォーカス深度計(スポット径:30 $\mu$ m $\phi$ 、分解能:0.1 $\mu$ m)で測定した<sup>3)-5)</sup>。その測定範囲はコンクリート境界線からコンクリート内部側に

表-3 腐食供試体の実測データおよび腐食表面性状データの分析結果

腐食サイクル数 $t_c$ (cycle)	供試体 No.	境界内部への 腐食進入深さ $p_c$ (mm)		バリオグラム のパラメータ		板幅方向の 平均腐食深さ $d_c$ (mm)		$d_{cmax}$ の発 生位 置 $x^*, y^*$ (mm)	楕形図 の 最小分割 領域 $x^*, y^*$ (mm)	最小分割領域の 平均腐食深さ $d$ (mm)		全アノード領域の 平均腐食深さ $d_{anion}$ (mm)		各アノード領域の 平均腐食深さの最大値 $d_{anox}$ (mm)		最大腐食深さ $d_{max}$ (mm)		
		平均値 $P_{cmean}$	最大値 $P_{cmax}$	レンジ $h$ (mm)	シル $\gamma$ ( $mm^2$ )	腐食 特性 Type	平均 値 $d_{cmean}$			最大 値 $d_{cmax}$	境界部 $d_b$	一般部 $d_g$	境界部 $d_{anion}$	一般部 $d_{anion}$	境界部 $d_{anox}$	一般部 $d_{anox}$	境界部 $d_{max}$	一般部 $d_{max}$
												Type A	Type B, C	Type A	Type B, C	Type A	Type B, C	
0	1	3.5	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	2	9.6	11.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	3	4.9	5.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	4	8.0	9.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
600	5	6.7	8.4	3.8	0.0017	A	0.084	0.101	5.1	6.6(X)	0.102	0.083	0.204	—	0.204	—	0.389	0.304
	6	0	0	3.5	0.0017	A	0.117	0.285	6.3	14.3(X)	0.166	0.109	0.362	—	0.362	—	0.726	0.380
	7	9.0	15.4	5.4	0.0024	B	0.105	0.122	12.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	6.0	8.5	—	—	B	0.066	0.074	17.3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.474
1200	9	0	0	—	—	B	0.068	0.082	18.3	—	—	—	—	—	—	—	—	0.339
	10	5.3	7.8	10.9	0.0333	A	0.183	0.596	16.0	23.3(X)	0.420	0.124	0.653	—	0.786	—	1.194	0.899
	11	8.1	10.3	4.7	0.0441	A	0.181	0.660	3.7	26.5(X)	0.334	0.119	0.616	—	0.881	—	1.412	1.152
	12	13.4	15.5	6.4	0.0377	B	0.172	0.394	3.1	18.7(Y)	—	—	—	—	0.562	—	0.863	1.189
1800	13	5.5	6.8	9.8	0.1061	B	0.247	0.752	2.6	4.7(X)	—	—	—	—	0.859	—	1.264	1.729
	14	12.4	16.8	—	—	C	0.255	0.505	1.8	67.7(X)	—	—	—	—	0.655	—	0.921	1.295
	15	4.6	8.7	12.7	0.0302	A	0.153	0.449	14.8	16.9(X)	0.427	0.098	0.808	—	1.020	—	1.508	0.824
	16	7.4	9.6	3.7	0.0291	A	0.153	0.553	10.3	14.5(X)	0.353	0.109	0.854	0.396	1.021	0.396	1.784	1.214
2400	17	5.6	8.0	6.6	0.0901	B	0.262	0.759	16.0	36.7(X)	—	—	—	—	0.695	—	0.919	1.583
	18	1.8	5.6	7.9	0.0268	B	0.182	0.285	8.4	25.1(Y)	—	—	—	—	0.595	—	0.595	1.789
	19	10.5	16.0	9.7	0.0666	B	0.194	0.555	3.5	56.5(X)	—	—	—	—	0.719	—	0.949	1.346
	20	4.8	6.2	7.2	0.0814	A	0.335	1.080	4.8	14.5(X)	0.748	0.240	1.257	0.730	1.327	0.730	2.092	1.565
2400	21	3.3	5.8	7.6	0.0814	A	0.237	0.583	10.6	16.3(X)	0.406	0.227	0.938	0.481	1.220	0.481	1.731	0.926
	22	4.7	8.1	8.0	0.0425	A	0.284	1.068	4.1	11.9(X)	0.819	0.241	1.126	—	1.206	—	1.791	1.187
	23	2.3	4.2	4.7	0.0664	A	0.227	0.783	5.0	8.5(X)	0.587	0.236	0.906	0.553	2.059	0.553	2.372	1.131
	24	8.7	12.7	—	—	C	0.338	0.484	5.9	33.7(X)	—	—	—	—	0.551	—	1.637	2.208

※ X: コンクリート境界線から供試体の長手方向の距離, Y: 材端から供試体の板幅方向の距離

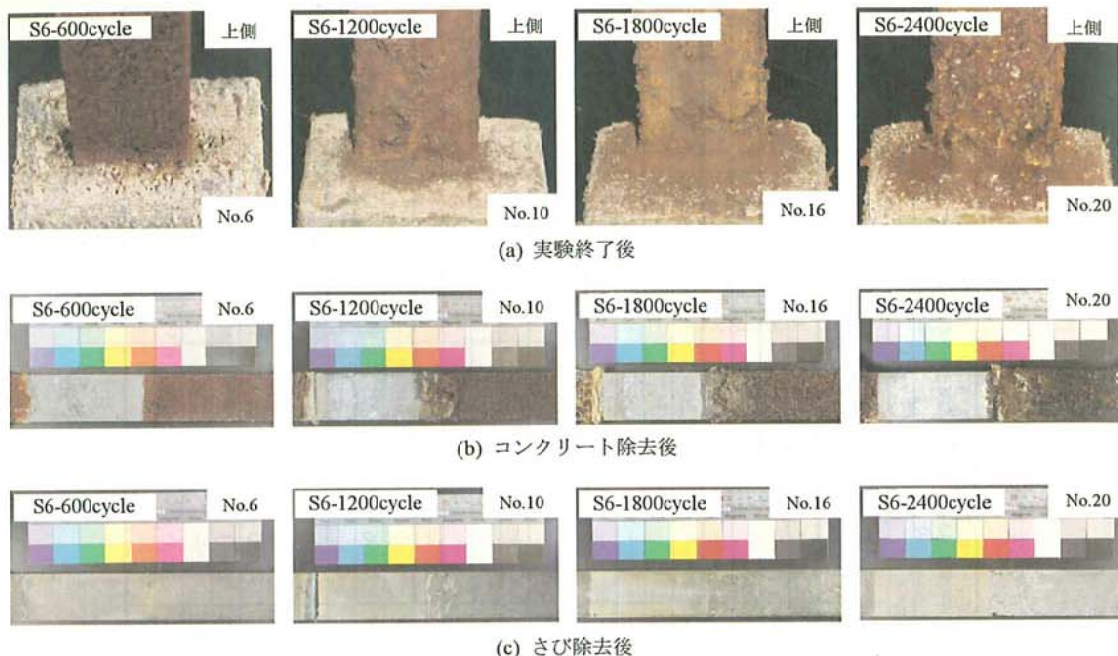


図-3 供試体の腐食状況

20mm, 境界線から鋼板上側に100mmの計120mm, 板幅40mmとした。測定ピッチは $100 \times 100 \mu\text{m}$ とした。この条件に基づき測定することで、各供試体毎に約48万点の腐食表面性状のデータを得た。

### 3. 実験結果

実験終了後の供試体の実測データおよび腐食表面性状データを3. (2)～(4)で後述する各方法で分析した結果を表-3に要約して示す。

#### (1) 供試体の腐食状況

実験終了後の供試体の腐食状況を図-3に示す。図-3(a)は境界部の腐食状況を示している。S6-600cycleでは、供試体の全表面が赤褐色のさび層で一様に覆われていた。これは、ブラスト処理による表面の微視的な凹凸、金属組織や構成成分などの微小なばらつきにより微視的なマイクロセルが多数形成されたためである<sup>3)-5)</sup>。

S6-1200cycleについては、S6-600cycleの赤褐色のさび層の厚さが増していた。また、コンクリート境界線近傍では、そのさびがところどころ剥離していた。これは、S6-600cycleのマイクロセル腐食に対して、S6-1200cycleでは境界線近傍にマクロセルが形成されたことで、アノード部の腐食が著しくなったこと

が原因と考えられる。赤褐色のさび層の下層には、暗赤褐色のさび層が生じていた。また、境界線の近傍には、通気差系のマクロセル腐食によるさびこぼが生じていた。

S6-1800cycle以降では、供試体のほぼ全面から生じたマイクロセル腐食によるさびが剥離しており、その剥離さびがコンクリートの上面に堆積していた。また、境界線近傍のさびこぼも著しく成長していることから、この部分にマクロセルによる著しい局部腐食が生じたと言える。これらの傾向は、供試体によらずほぼ同様であった。

図-3(b)はコンクリート除去後の供試体を示している。S6-600cycleではコンクリート内部に腐食が進入していない供試体も2体(No.6およびNo.9)あった。その他の供試体は、腐食サイクル数によらず、境界線近傍のコンクリート内部には腐食が進入していた。境界線近傍以外のコンクリート内部については、腐食していなかった。

図-3(c)にさび除去後について示す。腐食サイクル数が増加するとともに、腐食孔の数や深さが増加する傾向にあった。S6-600cycleの全供試体で、全面腐食が生じていた。なお、No.5とNo.6の供試体については、境界線近傍に軽微な局部腐食が生じていた。S6-1200cycle以降では、全供試体で境界線近傍より上側の領域で局部腐食が生じていた。また、境界線に沿って溝状の局部腐食が生じていた供試体もあった。

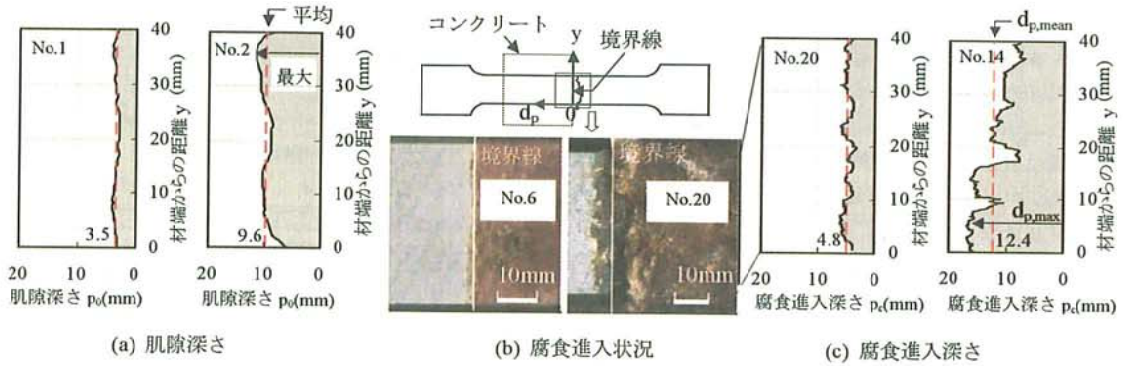


図-4 供試体の肌隙深さと腐食進入深さ

## (2) コンクリート内部への腐食進入深さ

供試体のコンクリート境界線からの肌隙深さ $p_0$ を図-4(a)に示す。各供試体の肌隙深さやその板幅方向の分布形状は、一様ではなく、大きくばらついていた。なお、供試体4体(S6-0cycle)の肌隙深さの平均値は、6.5mmであり、最大値は11.6mmであった。

実験終了後の供試体のコンクリート内部への腐食進入状況を図-4(b)に示す。S6-600cycleではNo.5, 7, 8の供試体、S6-1200cycle以降は全供試体でコンクリート内部に腐食が進入していた。

図-4(c)に実験終了後の板幅方向の腐食進入深さ $p_c$ の分布を示す。9体(No.5, 10-13, 16, 17, 20および23)の供試体では、境界線からコンクリート内部にほぼ均一に腐食が進入していた。それ以外の供試体では、腐食進入深さが板幅方向に大きくばらついていた。

腐食サイクル数 $n_c$ と腐食進入深さ $p_c$ の関係を図-5に示す。○と□のプロットは、それぞれ板幅方向の平均腐食深さ $p_{c,mean}$ と最大腐食深さ $p_{c,max}$ を示している。図中に各腐食サイクルの供試体における平均値 $m$ の $\pm s$ ( $s$ :標準偏差)も示す。S6-600cycleでは、コンクリート内部に腐食が進入しなかった供試体もあったため、 $p_c$ のばらつきが他の腐食サイクル後に比べて大きくなっている。S6-1200cycle以降については、 $n_c$ によらず、 $p_{c,max}$ と $p_{c,mean}$ は増加していない。 $p_{c,max}$ および $p_{c,mean}$ は、ばらついているものの、それぞれ7mmおよび10mm程度となっている。なお、最大の腐食進入深さは、16.8mm(No.14)であった。図-4(a)で示したように、鋼板とコンクリートには、供試体製作時に肌隙が生じており、この肌隙深さ程度しか腐食は進入していない。また、腐食サイクル数 $n_c$ による腐食進入深さ $p_c$ の経時性は見られない。

本供試体に用いた高強度コンクリート(W/C=40

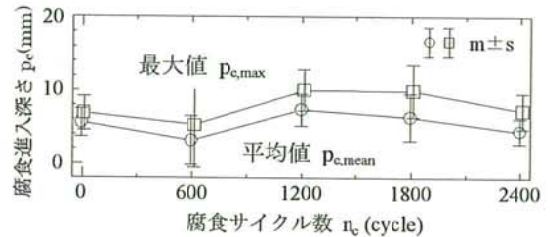


図-5 腐食進入深さと腐食サイクル数の関係

%)の表面からの中性化深さを試算すると<sup>7)</sup>、供用期間50年で約0.2mmとなる。したがって、コンクリート上面からの中性化によって、コンクリート内部に腐食は進行しないと考えられる。ここで、普通コンクリート(W/C=60%)について、同様な試算を行うと、供用期間50年で13mm程度であり、肌隙深さと同程度となる。したがって、コンクリート上面からの中性化を考慮しても、鋼板の腐食進入深さは肌隙程度しか進行しないものと考えられる。

## (3) 局部腐食の平均腐食深さ

### a) 腐食表面性状

各腐食サイクル後の供試体の腐食表面性状と板幅方向の平均腐食深さ $d_c$ を図-6に示す。 $d_c$ は供試体の長手方向の測定ピッチ(100 $\mu$ m)毎の板幅方向の腐食深さから算出した。図-6(a)と(b)は、S6-600cycle終了後について示している。図-6(a)の供試体(No.6)では、境界線近傍の一部の領域に最大で約700 $\mu$ mの通気差系マクロセル腐食が生じている。その他の領域については、ミクロセルによる全面腐食が生じている。板幅方向の平均腐食深さ $d_c$ は、境界線から上側に約6mmの位置で最大(約0.3mm)となっている。一方、全面腐食の領域については、 $d_c$ が約0.1mmとなっている。このような腐食はNo.5の供試体にも生じていた。図-6(b)の供試体(No.9)の境界線近傍に

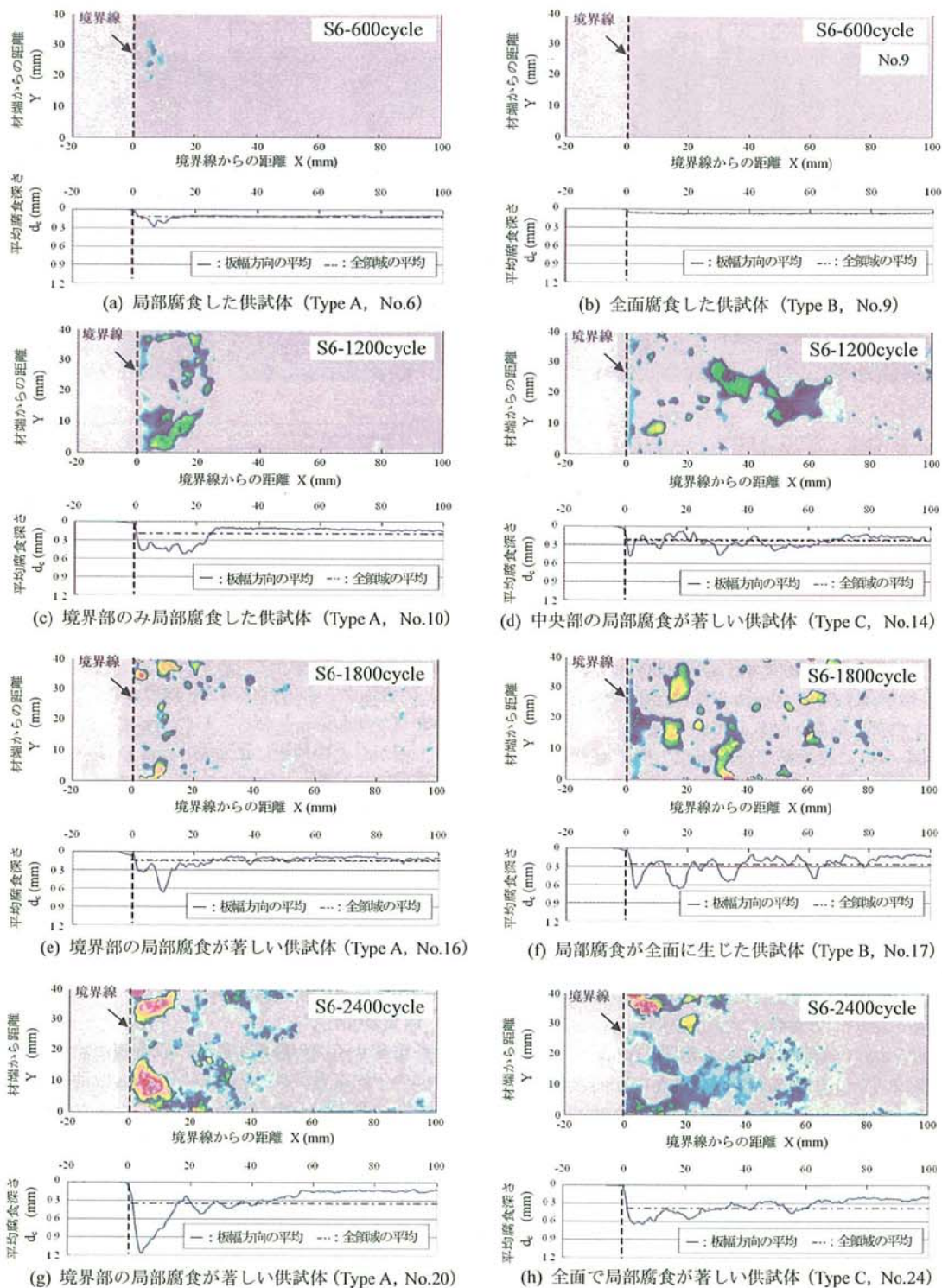


図-6 腐食性状と板幅方向の平均腐食深さ

は、図-6(a)のように局部腐食が生じておらず、境界線近傍とそれ以外の領域で $d_c$ は同程度となっている。したがって、全面腐食のみが生じていたと言える。このような腐食は、No.7とNo.8の供試体にも生じていた。これらの供試体の腐食深さの最大値は、0.3～0.5mm程度であった。

以上から、境界部を有する鋼板の腐食は、S6-600 cycle程度で全面腐食から境界線近傍の局部腐食が卓越する腐食特性に移行すると言える。また、境界線近傍の局部腐食は、全面腐食の場合に比べて著しく進行すると言える。

図-6(c)～(h)はS6-1200cycle以降の腐食性状を示している。図-6(c)、(e)および(g)の供試体(No.10, No.16およびNo.20)では、各腐食サイクル数 $n_c$ (S6-1200～2400cycle)で最大腐食深さは、それぞれ約1.2mm, 1.8mm, 2.1mmとなっていた。これらはいずれも境界線から上側に20mmの範囲以内に位置している。図-6(c)の供試体(No.10)では、この範囲内に腐食深さの複数の腐食孔が分散して生じた結果、 $d_c$ が同程度となった。S6-1800cycle以降の供試体では、 $n_c$ が増加するとともに複数の腐食孔が増大・合体することで、境界線近傍の定点で $d_c$ が著しく大きくなったものと考えられる。

図-6(d)、(f)および(h)の供試体(No.14, No.17およびNo.24)の腐食性状は、前述した図-6(c)、(e)および(g)の供試体とは異なり、境界線から20mmの範囲外でも著しい腐食が生じている。その結果、供試体長手方向の $d_c$ の変動は、境界線からの距離によらず同様となっている。これは、境界部のマクロセルが形成された後に、その上側にもさびこぶが生じたことによる通気差濃淡電池の形成作用と考えられる。

境界線近傍に生じる局部腐食は、マクロセルが形成される位置やその数、およびアノード領域の大きさにより形態が異なる。図-6(c)、(e)および(g)に示すように、局部腐食が境界線近傍に集中して生じた供試体は、8体(No.10, 11, 15, 16および20～23)であった。一方、局部腐食が境界線近傍以外に生じた供試体は、7体(No.12～14, 17～19および24)であった。また、図-6(c)、(d)および(f)に示すように、境界線に沿って溝状に局部腐食していた供試体は6体(No.10, 11, 13, 14, 17および19)であった。

## b) 腐食特性による分類

a)で前述したように、コンクリートの境界部を有する鋼板の腐食特性には、局部腐食が境界線近傍に集中する場合と、それ以外の領域に分布する場合がある。そこで、各供試体の腐食性状を空間的な自己

相関構造の相違により統計的に分類することとした。

全面腐食のように、確率場が2次定常性を有する場合には、コログラムにより確率過程の空間的な自己相関構造を推定することが可能と考えられる<sup>9)</sup>。しかし、コンクリート境界線近傍に局部腐食が集中して生じる場合には、確率場が全領域において2次定常性を有していないため、コログラムを適用することはできない。そこで、本研究では確率場が2次定常性を有していなくても本質的定常性を有していれば、確率過程の空間的な自己相関構造の推定が可能なバリオグラムを適用することとした<sup>9)</sup>。

任意の位置( $i$ 点)の腐食深さ $z_i$ と距離 $h$ 離れた位置( $j$ 点)の腐食深さ $z_j$ のバリオグラム $\gamma(h)$ は次式で与えられる<sup>9),10)</sup>。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{N(h)} (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

$N(h)$ : ユーグリット距離 $h$ ( $=i-j$ )

となる対の総数

$z_i$ :  $i$ 点の腐食深さ,  $z_j$ :  $j$ 点の腐食深さ

典型的な腐食特性を示した供試体のバリオグラムを図-7に示す。図の縦軸は分散 $\gamma(h)$ であり、横軸はユーグリット距離 $h$ である。 $\gamma(h)$ が一定となるとき $\gamma(h)$ の値はシルと呼ばれ、シルの存在は、腐食深さに空間的自己相関性があることを意味する。シルまでの最小距離 $h$ はレンジである。これらの値は、2次定常性が成立する領域のバリオグラムが球型モデルであると仮定して非線形最小2乗法<sup>11)</sup>により求めた。その結果を図中に破線で示す。図-7(a)は図-6(g)の境界線近傍が局部腐食した供試体のバリオグラムである。シルとレンジは、それぞれ0.08 mm<sup>2</sup>, 7.2 mmとなっている。 $h$ が20mm以上となると、 $\gamma(h)$ は著しく増加している。これは局部腐食が境界線近傍に集中することで、全領域で2次定常性が成立しないことを意味する。以後、この傾向を示す供試体の腐食性状をType Aと呼ぶ。なお、Type Aに分類される供試体は、10体(No.5, 6, 10, 11, 15, 16および20～23)であった。

図-6(f)の局部腐食が全領域で生じた供試体のバリオグラムを図-7(b)に示す。この供試体のシルおよびレンジは、0.09mm<sup>2</sup>および6.6mmとなっている。 $\gamma(h)$ は $h$ が6.6mm以上で変動しているが、約0.09mm<sup>2</sup>でほぼ一定になっている。これは、局部腐食が境界線からの距離によらず、全面でほぼ一様に分布しており、2次定常性が全領域でほぼ成立することを意味する。以下、この傾向を示す供試体の腐食性状をType B

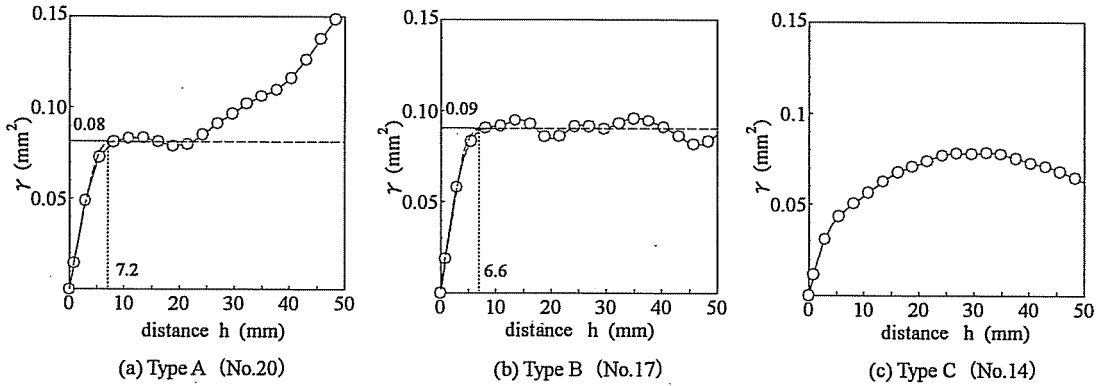


図-7 腐食特性のバリオグラム

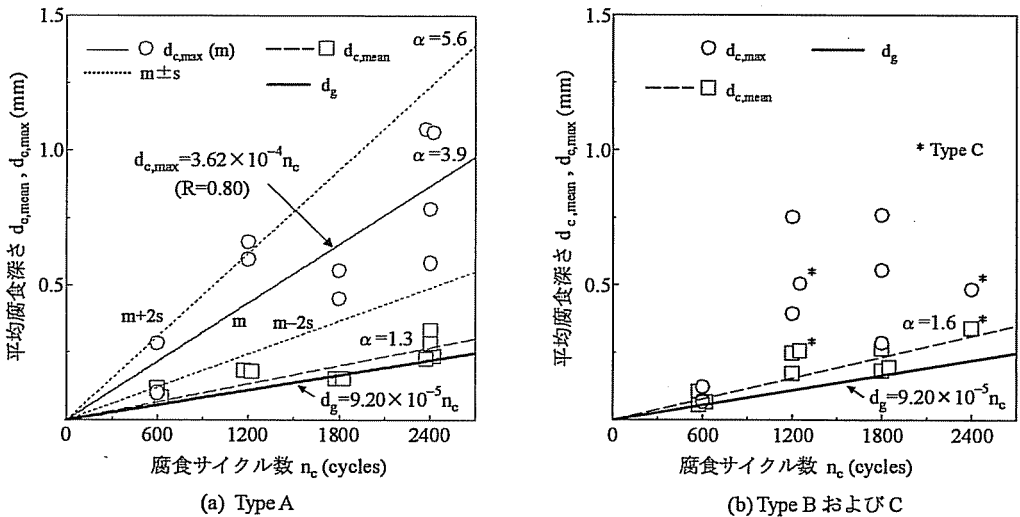


図-8 板幅方向断面の平均腐食深さとその最大値

と呼ぶ。Type Bの供試体は、8体 (No.7~9, 12, 13 および17~19) であった。

図-7(c)は図-6(d)の供試体長手方向の中央部に著しい局部腐食が生じた供試体のバリオグラムである。 $\gamma(h)$ には明確なシルが無く、 $h$ が25mm以上となると減少している。そのため、シルとレンジを推定できない。これは、局部腐食が中央部に集中し、アノード領域が大きくなった結果、バリオグラムが球型モデルとならなかったためである。このように、境界線近傍以外に局部腐食が集中して生じた供試体の腐食性状をType Cと呼ぶ。なお、Type Cに分類された供試体は、No.14と24の2体であった。

c) 全表面領域の平均腐食深さ

腐食サイクル数 $n_c$ と板幅方向の平均腐食深さ $d_{c,mean}$ 、その最大値 $d_{c,max}$ との関係を図-8に示す。図中の太実線は、3.(4) b)で後述する全面腐食が生じた領域の平均腐食深さ $d_g$ と $n_c$ の回帰直線である。細

実線、点線および破線は、それぞれ、 $n_c$ と $d_{c,max}$ の回帰直線( $m$ )、 $m \pm 2s$  ( $s$ : 標準偏差)、 $n_c$ と $d_{c,mean}$ の回帰直線である。また、 $\alpha$ は $d_g$ に対する $d_{c,max}$ と $d_{c,mean}$ の比である。図-8(a)はType Aの供試体、図-8(b)はType BとCの供試体について示している。Type AとBの $d_{c,mean}$ は、 $n_c$ とほぼ比例関係にあり、 $\alpha$ はそれぞれ1.3と1.6となっている。以上から、 $d_{c,mean}$ は腐食性状 (Type Cを除く) によらず、 $n_c$ と比例関係にあり、Type Aの $d_{c,mean}$ は、Type Bに比べ小さくなると言える。Type Aの $d_{c,max}$ の $\alpha$ は3.9となっている。Type Aの $d_{c,max}$ についても、 $n_c$ との関係に線形増加の傾向がある。この $n_c$ と $d_{c,max}$ の関係は、次式で近似できる。

$$d_{c,max} = 3.62 \times 10^{-4} \cdot n_c \quad (2)$$

$n_c$ : 腐食サイクル数 (cycle)

$d_{c,max}$ : 板幅方向の平均腐食深さの最大値 (mm)



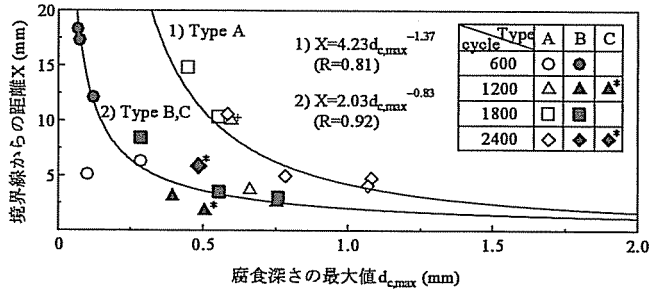


図-9 平均腐食深さの最大値とその発生位置の関係

Type Bの $d_{c,max}$ については、Type Aに比べばらつきが大きく、 $n_c$ と $d_{c,max}$ の関係に相関性が見られない。これは、境界線近傍以外にも局部腐食が生じたためである。

板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ と境界線からその発生位置までの距離 $X$ の関係を図-9に示す。図中の実線はType AとType B, Cの累乗回帰曲線である。なお、図-6(a)に示すように、S6-600cycleのType Aの供試体は、境界部近傍の局部腐食が軽微であるため、そのデータは回帰解析に用いていない。図-9の $\Delta^*$ のプロットは図-6(c)に示すように、境界線から2~18mmの範囲内で $d_c$ が同程度であったため、 $d_{c,max}$ の位置をその範囲の平均値(10mm)とした。腐食性状の違いによらず、 $d_{c,max}$ と $X$ の関係には、腐食サイクル数 $n_c$ による経時性が見られない。しかし、 $d_{c,max}$ が増加するとともに、 $X$ はほぼ累乗関数に従い減少しており、最終的には3mm程度になるものと考えられる。Type BとCの累乗回帰曲線は、Type Aの回帰曲線の左側に位置している。また、Type BとCの $d_{c,max}$ の位置は、Type Aと同程度になっている。以上から、腐食性状によらず、板幅方向の平均腐食深さの最大値は、境界線近傍に位置し、腐食が進行することで、コンクリート境界線から約3mm上側に位置すると考えられる。また、Type BとCの腐食特性となる場合、 $d_{c,max}$ の発生位置は、Type Aよりも早期に境界線近傍に移行すると考えられる。

#### (4) 腐食領域の分割とその領域の平均腐食深さ

前述したように、コンクリート境界部を有する鋼板には、全面腐食と局部腐食が混在するため、領域により腐食挙動が著しく異なる。そこで、各供試体の腐食表面性状を確率モデルの階層的な精密化(樹形図)と見なすことで、腐食挙動の相違により領域分割する。その後、分割後の各領域における平均腐食深さについて検討する。

##### a) 回帰樹分析による腐食領域の分割

ここでは、表面性状が空間的に異なる領域を分割

するため、腐食深さを反応変量 $y$ とし、境界線から上方への距離 $X$ 、および材端からの距離を予測変量 $Y$ として、樹形モデルの回帰樹<sup>12), 13)</sup>を適用する。回帰樹分析により、コンクリート境界線近傍で特有の腐食性状となる領域とそれ以外の領域を分割する。回帰樹分析は対象データの集合を均一と見なせるデータの集合へと2分割手順を繰り返す手法である。回帰樹では反応変量 $y$ は正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うものとする。また、回帰樹の各分割点(以下、節点と呼ぶ)における平均と分散を一定とすることで、反応変量 $y$ の平均と分散の変動に基づき分割する。ある反応変量 $y_i$ に対する尤離度 $D$ は、次式で与えられる。

$$D(\mu; y_i) = (y_i - \mu)^2 \quad (3)$$

節点での平均と分散を一定とすると、平均腐食深さ $\mu$ の最小尤離度の推定量 $\bar{\mu}$ は、 $y_i$ の平均となる。したがって、各節点における尤離度 $D$ は、その節点に属する反応変量 $y_i$ の和として次式で定義できる。

$$D(\bar{\mu}; y) = \sum D(\bar{\mu}; y_i) \quad (4)$$

節点の尤離度 $D$ は、領域内の腐食深さが全て等しい場合は0となり、ばらつきが大きいほど増大する。回帰樹はある領域内の尤離度 $D$ の減少量が最大となる位置で領域を2分割していくため、樹木の分割が進むほど $D$ は小さくなる。この2分割の条件は分割後の領域内のばらつきが最小となるように選択する。樹木を細分割化するほど、節に属する腐食深さは均質になるが、過度に細分化すると、腐食挙動の傾向が識別困難になる。そこで、本分析では複雑度パラメータ $c_p$ を用いて剪定を行った<sup>14)</sup>。なお、 $c_p$ はS6-600cycleの全面腐食の供試体の最小領域分割数が1となる $c_p$ 値(0.01)とした。

回帰樹分析から求めた樹形図を図-10に示す。図-10(a)は図-6(g)のType A、図-10(b)は図-6(f)の

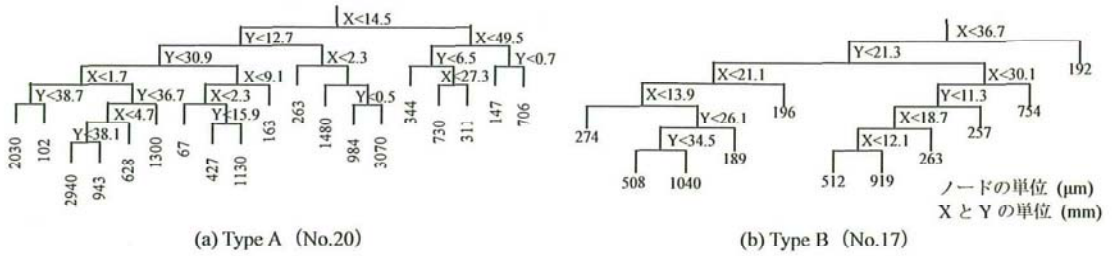


図-10 樹形図

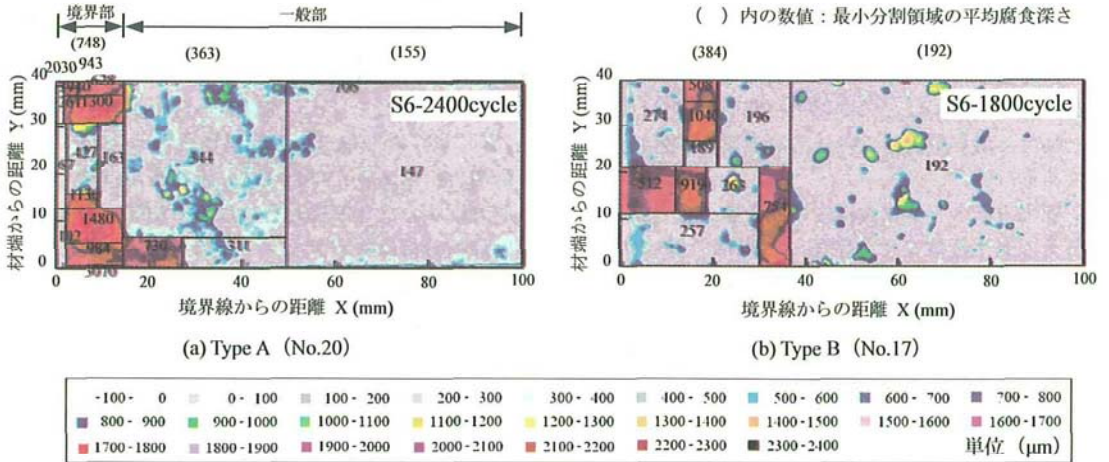


図-11 空間分割図と各分割領域の平均腐食深さ

Type Bの供試体に対する樹形図である。樹木の分岐点に示す数値は、図-11の境界線および材端からの距離  $X$  と  $Y$  である。不等号式は  $X$  あるいは  $Y$  の座標における領域分割を意味する。また、樹木の末端（ノード）の数値は、分割後の領域における平均腐食深さである。Type Aの供試体では、まず、境界線から14.5mmと49.5mmの位置で3領域に分割（以下、最小分割領域と呼ぶ）され、その後、19領域に分割されている。一方、局部腐食がほぼ全域に生じたType Bの供試体については、最小分割領域（境界線から36.7mm離れた位置）で2分割され、その後、11領域に分割されている。Type Aでは全て最小分割領域が長手方向に2あるいは3分割されたが、Type BではNo.13, 17および19の3体の供試体のみが板幅方向に分割された。

図-10の樹形図により求めた空間分割図と各分割領域の平均腐食深さを図-11に示す。各空間分割領域に示す数値は、各領域内の平均腐食深さであり、括弧内の数値は、最小分割領域の平均腐食深さである。図-11(a)に示すType Aの供試体では、境界線から  $X$  が14.5mmまでの範囲内の最小分割領域における平均腐食深さは、他の最小分割領域に比べ著しく大きくなっている。これは、境界線から上側に14.5

mmの範囲で他の領域とは異なる境界部特有の通気差系マクロセル腐食が生じたことを意味する。この腐食特性は、4.(1)で後述する対象橋梁の部材の腐食特性に類似している。

以後、この領域をType Aの供試体の境界部と呼び、その他の領域を一般部と呼ぶ。なお、Type BとCの供試体は、局部腐食が全面に分布していたため、以後、境界部と一般部を区別はしない。

#### b) 境界部領域とその平均腐食深さ

3.(4) a)では回帰樹分析により各供試体の腐食挙動の相違による領域分割を行った。ここでは、Type Aの供試体の最小分割領域の分割位置とその平均腐食深さを用いて、局部腐食が生じる領域（境界部領域）、および腐食領域別（境界部と一般部）の平均腐食深さの経時性について検討する。

図-12に腐食サイクル数  $n_c$  と局部腐食が生じる境界部領域（境界線からの距離  $X$ ）の関係を示す。図中の実線はS6-1200cycleから2400cycleのデータの累乗回帰曲線である。なお、S6-600cycleのデータは、3.(3) c)で前述したように、境界部の局部腐食の発生が初期段階であることから、回帰解析には用いていない。境界部領域 ( $X$ ) は  $n_c$ が増加するとともに、累乗関数に従い減少する傾向にある。S6-1200cycle

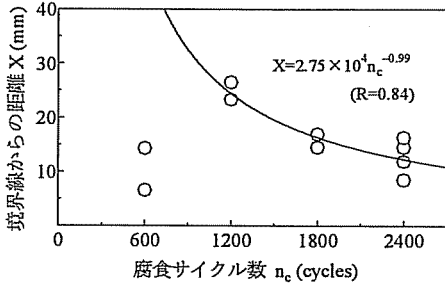


図-12 腐食サイクル数と境界部領域の大きさの推移

以降の $n_c$ と境界部の局部腐食が生じる領域（境界線からの距離） $X$ との関係は、次式で近似できると考えられる。

$$X = 2.75 \times 10^4 n_c^{-0.99} \quad (5)$$

$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

$X$  : 境界線からの距離 (mm)

腐食サイクル数 $n_c$ と各最小分割領域（境界部と一般部）の平均腐食深さ $d$  ( $d_b$ および $d_g$ ) の関係を図-13に示す。図中の実線は、 $n_c$ に対する境界部と一般部の平均腐食深さの回帰直線である。また、点線は境界部の回帰直線 $m$ の $\pm 2s$  ( $s$ : 標準偏差)を示している。境界部の平均腐食深さは、一般部と同様に $n_c$ が増加するにしたがって線形増加する傾向にある。 $d_b$ と $d_g$ の線形回帰を行った結果、S6-cycleの腐食サイクル数 $n_c$ と $d_b$ 、 $d_g$ の関係は、近似すると次式で表すことができる。

$$d_b = 2.60 \times 10^{-4} n_c \quad (6)$$

$$d_g = 9.20 \times 10^{-5} n_c \quad (7)$$

$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

$d_b$  : 境界部の平均腐食深さ (mm)

$d_g$  : 一般部の平均腐食深さ (mm)

式(6)および式(7)の傾きの $\alpha$ から、一般部に対して境界部の平均腐食深さは約3倍となる。

### c) アノード領域の平均腐食深さ

3. (3) a)で前述したように、境界部を有する鋼板の局部腐食は、マクロセルが形成される位置やその数、およびアノード領域の大きさによって様々な形態となる。そのため、3. (4) b)では最小分割領域内の平均腐食深さについて検討した。しかし、この領域内にはアノード領域とカソード領域が混在する。そこで、最小分割領域の平均腐食深さよりも腐食深

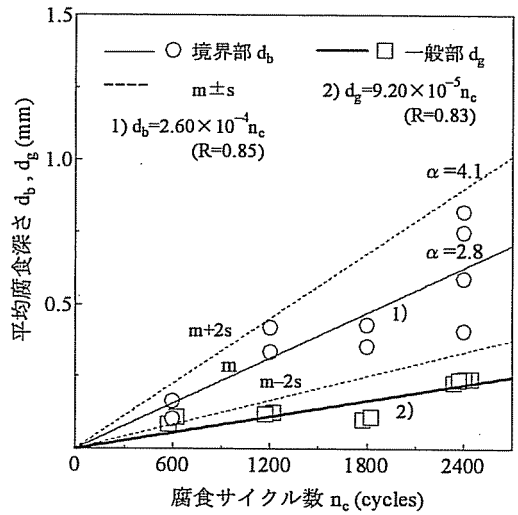


図-13 境界部と一般部の平均腐食深さ

さが大きくなる領域をアノード領域と定義する。

図-11(a)および(b)の赤網掛けで示す領域は、アノード領域を示している。Type Aのアノード領域は、境界線近傍に集中している。一方、Type Bは境界部以外にアノード領域が存在している。

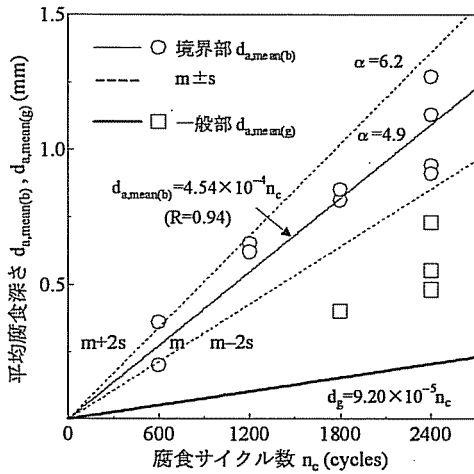
腐食サイクル数 $n_c$ とアノード領域の平均腐食深さ $d_{a,mean}$ の関係を図-14に示す。アノード領域の平均腐食深さ $d_{a,mean}$ は、境界部あるいは一般部における全アノード領域の平均腐食深さである。図-14(a)はType Aについて示している。図中の細実線と点線は、 $n_c$ と $d_{a,mean(b)}$ の回帰直線 $m$ とその $\pm 2s$ である。太実線は $n_c$ と一般部の平均腐食深さ $d_g$ の回帰直線であり、 $\alpha$ はこの回帰直線に対する $d_{a,mean}$ の回帰直線の勾配の比である。境界部の全アノード領域の平均腐食深さ $d_{a,mean(b)}$ のデータのばらつきは、図-8(a)の板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$ と図-13の境界部の平均腐食深さ $d_b$ に比べて小さい。これは、 $d_{c,max}$ と $d_b$ には、カソード領域の腐食深さも平均腐食深さに含まれるためである。境界部の $d_{a,mean(b)}$ は $n_c$ と次式に示すような比例関係にある。

$$d_{a,mean(b)} = 4.54 \times 10^{-4} n_c \quad (8)$$

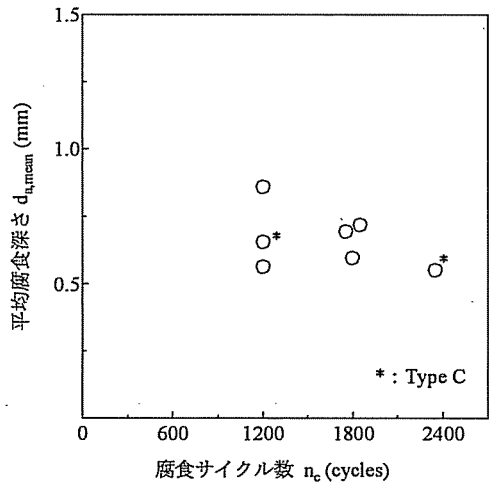
$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

$d_{a,mean(b)}$  : 境界部の全アノード領域の平均腐食深さ (mm)

一般部の $d_{a,mean(g)}$ は $n_c$ によらず、境界部の $d_{a,mean(b)}$ に比べて小さい。一般部の平均腐食深さ $d_g$ に対して、 $\alpha$ が4.9となっていることから境界部の全アノード



(a) Type A



(b) Type B および C

図-14 境界部と一般部の全アノード領域における平均腐食深さ

領域の平均腐食深さ  $d_{a,mean(b)}$  は、一般部の平均腐食深さの約5倍になると考えられる。Type Bの供試体の  $n_c$  と  $d_{a,mean}$  の関係を図-14 (b) に示す。Type BとCについては、Type Aと異なり、 $n_c$  と  $d_{a,mean}$  には経時性が見られない。

次に、各アノード領域の平均腐食深さの最大値について検討する。腐食サイクル数  $n_c$  と各アノード領域の平均腐食深さの最大値  $d_{a,max}$  の関係を図-15 に示す。図中の細実線と点線は、 $n_c$  と  $d_{a,max(b)}$  の回帰直線とその  $\pm 2s$  である。図-15 (a) はType Aについて示している。境界部に位置する最大アノード領域の平均腐食深さ  $d_{a,max(b)}$  は、図-14 (a) に示す境界部の全アノード領域の平均腐食深さ  $d_{a,mean(b)}$  と同様に、 $n_c$  と比例関係にある。腐食サイクル数  $n_c$  と  $d_{a,max(b)}$  の関係は、次式で近似することができる。

$$d_{a,max(b)} = 6.03 \times 10^{-4} n_c \quad (9)$$

$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

$d_{a,max(b)}$  : 境界部の各アノード領域の平均腐食深さの最大値 (mm)

式(9)の傾きから境界部の各アノード領域の平均腐食深さの最大値  $d_{a,max(b)}$  は、一般部の平均腐食深さ  $d_g$  の約7倍になると考えられる。図-15 (b) にType BとCの  $n_c$  と  $d_{a,max}$  の関係を示す。Type BとCの  $d_{a,max}$  は、図-14 (b) の  $d_{a,mean}$  と同様に経時性が見られない。

#### (5) 最大腐食深さ

これまででは、各腐食領域内の平均腐食深さについて

検討してきた。ここでは、3. (4) b) で前述したType Aの境界部と一般部、およびType Bの全領域の最大腐食深さ  $d_{max}$  の経時性について検討する。

最大腐食深さ  $d_{max}$  と腐食サイクル数  $n_c$  の関係を図-16 に示す。図中の細実線は、Type Aの境界部とType B, Cの最大腐食深さ  $d_{max}$  の  $n_c$  に対する回帰直線である。また、点線はそれらの回帰直線  $m$  の  $\pm 2s$  ( $s$ : 標準偏差) である。太実線は 3. (4) b) で前述した  $n_c$  と一般部の平均腐食深さ  $d_g$  の回帰直線であり、 $\alpha$  はこの回帰直線に対する  $d_{max}$  の回帰直線の勾配の比である。図-16 (a) はType Aについて示している。境界部の最大腐食深さ  $d_{max,b}$  は、 $n_c$  と比例関係にある。その回帰直線の傾きは  $d_g$  の約10倍になっている。一方、一般部の最大腐食深さ  $d_{max,g}$  は、S6-1200cycleまでは、境界部と同様に線形的に増加しており、S6-1200cycle以降は  $n_c$  によらず同程度となっている。

図-16 (b) にType BとCの供試体の  $n_c$  と  $d_{max}$  の関係を示す。Type Bの  $d_{max}$  は、Type Aの境界部の  $d_{max}$  と同様の傾向を示している。Type AとB,Cの  $d_{max}$  の回帰解析から、いずれも相関係数  $R$  が0.91と高いことから、S6-600cycleから2400cycleの  $n_c$  と  $d_{max}$  の関係は次式で近似できる。

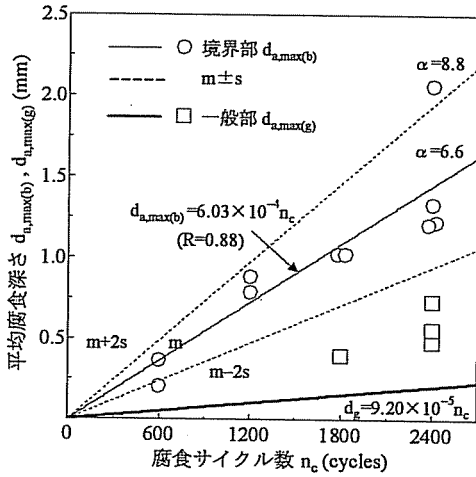
$$d_{max,b} = 8.72 \times 10^{-4} n_c \quad (10)$$

$$d_{max} = 9.35 \times 10^{-4} n_c \quad (11)$$

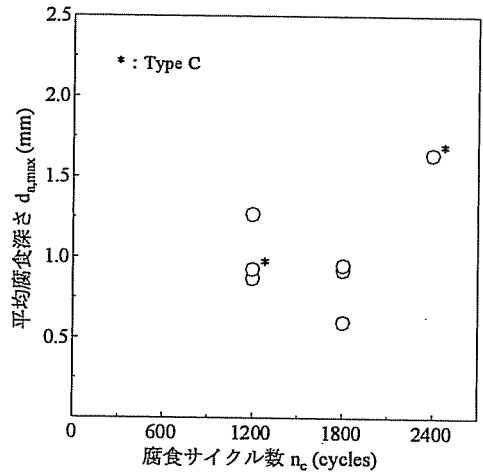
$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

$d_{max,b}$  : Type Aの境界部の最大腐食深さ (mm)

$d_{max}$  : Type Bの最大腐食深さ (mm)

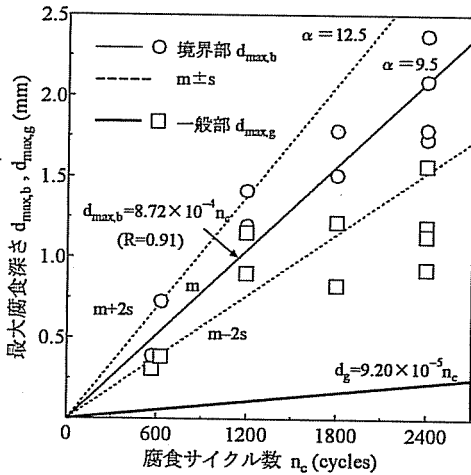


(a) Type A

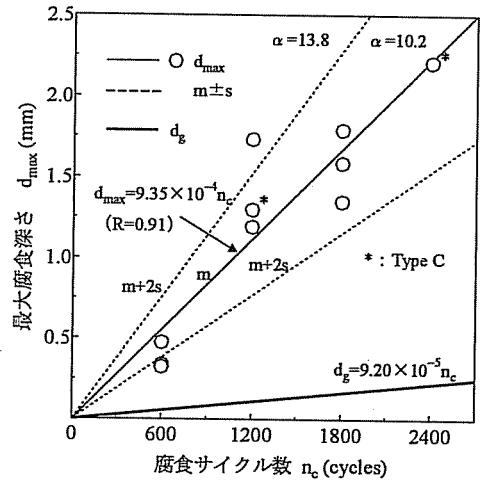


(b) Type B および C

図-15 腐食サイクル数と各アノード領域の平均腐食深さの最大値の関係



(a) Type A



(b) Type B および C

図-16 腐食サイクル数と最大腐食深さの関係

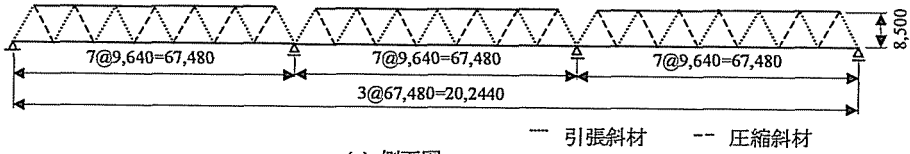
以上から、最大腐食深さはType AやType Bの腐食性状によらず、 $n_c$ の増加にともなって線形増加すると言える。また、最大腐食深さ $d_{max}$ は一般部の平均腐食深さ $d_g$ の約10倍となる。一般部の最大腐食深さ $d_{max,g}$ については、S6-1200cycle以降で増加しないと云える。

(6) 一般部の平均腐食深さと各腐食深さの関係

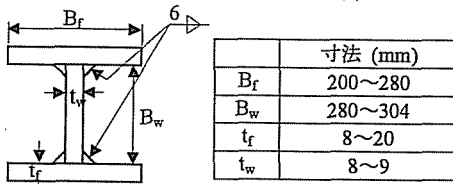
(1)~(5)で示した腐食サイクル数 $n_c$ と各腐食深さ $d_{(m)}$  (式(2), (6), (8), (9), および(10))の関係式は、式(7)の $n_c$ と一般部の平均腐食深さ $d_g$ の関係式と前述した $\alpha$ から次式で示すことができる。

表-4 一般部の平均腐食深さと境界部の各腐食深さの関係

腐食深さ $d_{(m)}$ (mm)		$\alpha$
一般部	平均腐食深さ $d_g$	1.0
境界部	板幅方向の平均腐食深さの最大値 $d_{c,max}$	3.9
	平均腐食深さ $d_b$	2.8
	全アノード領域の平均腐食深さ $d_{a,mean(b)}$	4.9
	各アノード領域の平均腐食深さの最大値 $d_{a,max(b)}$	6.6
	最大腐食深さ $d_{max,b}$	9.5



(a) 側面図



(b) 引張斜材の諸寸法

図-17 対象橋梁

表-5 対象橋梁の諸元

	3 径間連続下路平行弦ワーレントラス
橋格	1 等橋 (TL-20)
橋長	610.400m
支間長	3×67.480m×3 連
縦断勾配	0.25% 放物線勾配
横断勾配	車道部 1.5% 放物線勾配 歩道部 1.0% 直線勾配
塗装	フタル酸系塗装

$$d_{(m)} = \alpha \cdot d_g \quad (12)$$

$d_{(m)}$ : 各腐食深さ ( $d_{c,max}$ ,  $d_b$ ,  $d_{a,mean(b)}$ ,  $d_{a,max(b)}$  および  $d_{max,b}$ ) (mm)

$\alpha$ :  $d_g$  に対する各腐食深さの倍率

$d_g$ : 一般部の平均腐食深さ (式(7)) (mm)

式(12)の $d_g$ に対する各腐食深さの $\alpha$ を表-4にまとめて示す。なお、 $\alpha$ は各腐食深さの平均値に関する係数である。供試体の腐食挙動には、ばらつきが生じていた。そこで、平均値 $\alpha$ に対して、ばらつきを考慮するための係数を $\alpha$ の $m+2s$  ( $m$ : 平均,  $s$ : 標準偏差)を $\alpha$ の $m$ で除すことで算出した。その結果、その係数は各腐食深さによらず約1.4であった。したがって、式(12)に $+2s$ のばらつきを考慮した $d_{(m+2s)}$ は次式で表すことができる。

$$d_{(m+2s)} = 1.4 \times \alpha \cdot d_g \quad (13)$$

$\alpha$ :  $d_g$  に対する各腐食深さの倍率

$d_g$ : 一般部の平均腐食深さ (式(7)) (mm)

#### 4. 鋼構造部材のコンクリート境界部における腐食挙動の評価・予測法

これまで、実験結果から鋼板のコンクリート境界部の経時的な腐食挙動を検討してきた。ここでは、実験結果と実構造部材の実測データの相関性を検討することで、実環境に対する腐食実験の促進倍率を検討する。さらに、鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動の評価・予測法を提案する。

#### (1) 実構造部材のコンクリート境界部の腐食深さ

対象橋梁は図-17および表-5に示す諸元を有する3径間連続3連下路ワーレントラス橋である。その斜材にはコンクリート床版との境界部で腐食損傷が生じていた。この橋梁は冬期に多量の凍結防止剤が散布される腐食環境下に曝されている。腐食深さの測定は、ノギスにより全斜材のコンクリート境界線近傍の腐食深さ(境界部のアノード領域の平均腐食深さ $d_{a,mean(b)}$ に相当)を対象として行われた。なお、実測時の対象橋梁の供用年数は30年であった。

本研究では雨水や凍結防止剤が停滞しやすく厳しい腐食環境下に曝されるH断面の斜材(引張部材, 108本)の実測データを用いた。斜材腐食状況と腐食深さの測定値の例を図-18に示す。全引張斜材にはコンクリート床版との境界線近傍で腐食損傷が生じていた。その中で、1本の斜材が腐食により破断し、4本の斜材・ウェブの一部で腐食深さが板厚(8mm)に達していた。また、ウェブの一部で4mm以上の板厚が減少した斜材は9本あった。なお、これらの斜材の著しい腐食損傷は、いずれもコンクリート床版との境界線から数mm程度上部に位置しており、本研究の実験結果とほぼ一致している。

実測データと腐食実験結果を比較・検討するために、実測データから各斜材の平均値と最大値を算出した。これらの値は、それぞれ3.(4)c)で前述したType Aの境界部の全アノード領域における平均腐食深さ $d_{a,mean(b)}$ と境界部の各アノード領域の平均腐食深さの最大値 $d_{a,max(b)}$ に相当する。

各斜材の実測データから求めた腐食深さの平均値と最大値のヒストグラムを図-19に示す。図の縦軸は全斜材数(108本)に対する相対頻度である。図中の実線は実測データにフィットさせた正規分布である。

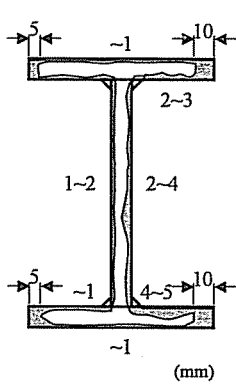


図-18 斜材腐食状況と腐食深さの測定値の例

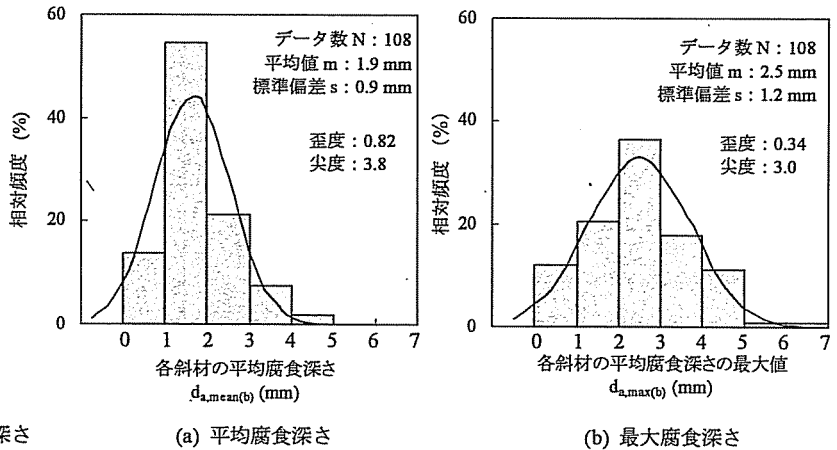


図-19 各斜材の実測データのヒストグラム

腐食深さの平均値と最大値のデータの分布は、ほぼ正規分布になっている。

## (2) 各腐食深さの評価・予測法

### a) 実環境に対する腐食促進実験の腐食促進倍率

3. (4) a) で前述したように、Type Aの腐食特性を示す供試体では、コンクリートとの境界線近傍でマクロセルによる局部腐食が著しく生じており、対象橋梁の斜材の腐食挙動と類似している。そこで、以後、Type Aの腐食挙動に基づき各検討を行う。

3. (3) c), (4) b) および c) で前述したように、Type Aの供試体の境界部領域における板幅方向の平均腐食深さの最大値  $d_{c,max}$ 、平均腐食深さ  $d_b$ 、全アノード領域の平均腐食深さ  $d_{a,mean(b)}$ 、および各アノード領域の平均腐食深さの最大値  $d_{a,max(b)}$  は、いずれも  $n_c$  と比例関係にある。ここでは、4. (1) で前述した実測が比較的容易な  $d_{a,mean(b)}$  と  $d_{a,max(b)}$  を用いて、腐食促進倍率  $A_c$  を算出する。 $A_c$  の算出には、実構造部材の塗膜が劣化するまでの期間（以下、塗膜劣化期間と呼ぶ。） $t_p$  と各部材の腐食環境のばらつきを考慮する。

1年間は腐食サイクル数  $n_c$  が 1460 cycle の腐食実験期間に相当する。そこで、各部材の実測データの  $d_{a,mean(b)}$  と  $d_{a,max(b)}$  に対する  $A_c$  は、式(8)と式(9)により、供用年数  $t$ 、塗膜劣化期間  $t_p$  および塗膜劣化後の供用年数  $t_s$  を用いて、それぞれ次式で示すことができる。

$$A_c = \frac{4.54 \times 10^{-4} \times 1460(\text{cycle})}{d_{a,mean(b)} / t_s} = 0.663 \times \frac{t_s}{d_{a,mean(b)}} \quad (14)$$

$$A_c = \frac{6.03 \times 10^{-4} \times 1460(\text{cycle})}{d_{a,max(b)} / t_s} = 0.880 \times \frac{t_s}{d_{a,max(b)}} \quad (15)$$

$$t_s = t - t_p \quad (16)$$

$A_c$  : 腐食促進倍率

$d_{a,mean(b)}$  : 境界部の全アノード領域の平均腐食深さ (mm)

$d_{a,max(b)}$  : 境界部の各アノード領域の平均腐食深さの最大値 (mm)

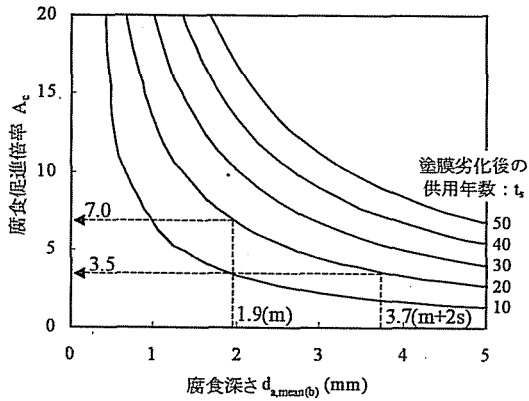
$t_s$  : 塗膜劣化後の供用年数 (年)

$t$  : 供用年数 (年)

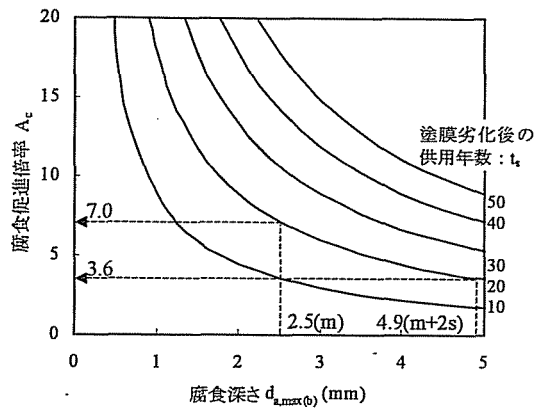
$t_p$  : 塗膜劣化期間 (年)

式(14)と式(15)から求めた腐食深さ  $d_c$  と塗膜劣化後の供用年数  $t_s$  に対する腐食促進倍率  $A_c$  との関係は図-20に示すように図示できる。

ここで、対象橋梁の斜材の腐食促進倍率  $A_c$  を試算する。この橋梁の塗膜劣化期間  $t_p$  を 10年<sup>15)</sup> と仮定すると、実測時の供用年数が 30年であるから、塗膜劣化後の供用年数  $t_s$  は、20年となる。また、図-19より  $d_{a,mean(b)}$  と  $d_{a,max(b)}$  の平均値  $m$  は、それぞれ 1.9mm、2.5mm である。これらの値に相当する  $A_c$  は図-20から約 7.0 となる。この値は全部材の境界部の平均的な腐食深さを予測する際に有用となる。しかし、この  $A_c$  の値により各部材の腐食深さを予測すると、各部材の腐食環境が異なるため危険側に評価する場合も考えられる。そこで、 $m+2s$  ( $s$  : 標準偏差) に対する  $A_c$  により、各部材に対する非超過確率 97.5% の各腐食深さ（最大値に相当）を予測する。図-19より  $d_{a,mean(b)}$  と  $d_{a,max(b)}$  の  $m+2s$  は 3.7mm、4.9mm であるため、 $A_c$  の値は図-20から約 3.5 となる。



(a) 平均腐食深さを複数箇所から計測した場合



(b) 最大腐食深さを計測した場合

図-20 境界部の腐食深さと供用年数による腐食促進倍率の算出

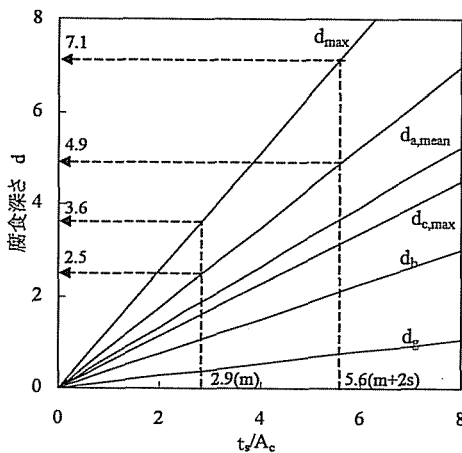


図-21  $t_s/A_c$  と各腐食深さの関係

対象橋梁の斜材における腐食深さの実測値から求めた  $d_{a,mean(b)}$  と  $d_{a,max(b)}$  の平均値  $m$  に対する  $A_c$  の値はともに約7.0になる。また、 $m+2s$  に対する  $A_c$  の値はともに約3.5になる。したがって、本研究のType Aの腐食特性を有する供試体の腐食挙動は、対象橋梁の斜材の腐食挙動をほぼシミュレートしているものと考えられる。

鋼構造物の腐食速度は、様々な腐食因子や作用応力<sup>16)</sup>などにより異なるが、本研究の  $A_c$  の算出方法を用いることで、これらの因子の影響を考慮できるものとする。

#### b) 腐食深さの予測方法

ここでは、腐食促進倍率  $A_c$  を用いてコンクリート境界部を有する鋼板の経時的な腐食挙動の予測方法について検討する。腐食サイクル数の1cycleが6時間であることから、実構造部材の塗膜劣化後の供用年数  $t_s$  は  $A_c$  を用いて、次式で示すことができる。

$$t_s = A_c \cdot n_c \times \frac{6(\text{hr})}{24(\text{hr}) \times 365(\text{day})} = 6.85 \times 10^{-4} \cdot A_c \cdot n_c \quad (17)$$

$t_s$  : 塗膜劣化後の供用年数 (年)

$A_c$  : 腐食促進倍率

$n_c$  : 腐食サイクル数 (cycle)

式(12)あるいは式(13)に式(7)と式(17)を代入することで、鋼構造部材のコンクリート境界部における各腐食深さ  $d$  は、塗膜劣化後の供用年数  $t_s$  と促進倍率  $A_c$  を用いて次式で示すことができる。

$$d_{(m)} = \alpha \times 9.20 \times 10^{-5} \times \frac{t_s}{6.85 \times 10^{-4} \times A_c} \quad (18)$$

$$= 0.134 \times \alpha \cdot \frac{t_s}{A_c}$$

$$d_{(m+2s)} = 1.4 \times d_{(m)} \quad (19)$$

$d$  : 各腐食深さ ( $d_{a,mean(b)}$ ,  $d_{a,max(b)}$ ,  $d_{c,max}$ ,  $d_b$  および  $d_{max(b)}$ ) (mm)

$\alpha$  : 表-4参照

$t_s$  : 塗膜劣化後の供用年数

$A_c$  : 腐食促進倍率

式(18)の  $t_s/A_c$  と各腐食深さ  $d$  の関係を図-21に示す。この図から各腐食深さ  $d$  は、式(14)あるいは式(15)の  $A_c$  を用いることで容易に算出できる。また、 $A_c$  の平均値  $m$  に各部材の腐食環境によるばらつき  $+2s$  ( $s$  : 標準偏差) を考慮した  $m+2s$  を用いれば、最も厳しい腐食環境における部材の各腐食深さ  $d$  を評価できるものと考えられる。板幅方向の平均腐食深



さ(断面減少量が最大となる断面)については、部材の残存断面を評価する際に有用となる。さらに、境界部および一般部の平均腐食深さについては、境界部に局部腐食が生じた領域の平均板厚減少量、および全面腐食による板厚減少量を評価する上で有用となる。

### (3) 実測値による各腐食深さの評価方法

(2) a) で前述したように、本研究のType Aの腐食特性を有する供試体の腐食挙動は、実構造部材の腐食挙動をシミュレートしている。そこで、 $d_{a,mean(b)}$ あるいは $d_{a,max(b)}$ の実測値から表-4の各腐食深さを評価する方法について検討する。

表-4に示すように、一般部の平均腐食深さ $d_g$ を基準値(1.0)とすれば、他の各腐食深さは係数 $\alpha$ を用いて表すことができる。そこで、 $d_{a,mean(b)}$ と $d_{a,max(b)}$ の係数 $\alpha$ は、それぞれ4.9と6.6であることから、これらの値を基準値(1.0)とすることで、他の各腐食深さとの関係は $\alpha$ を用いて、次の評価式で示すことができる。

$$d_{(m)} = \begin{cases} \alpha / 4.9 \cdot d_{a,mean(b)} \\ \alpha / 6.6 \cdot d_{a,max(b)} \end{cases} \\ = \begin{cases} 0.204 \cdot \alpha \cdot d_{a,mean(b)} \\ 0.152 \cdot \alpha \cdot d_{a,max(b)} \end{cases} \quad (20)$$

また、3. (6) で前述したように、平均値 $\alpha_{(m)}$ に対して、 $+2s$ のばらつきを考慮した $\alpha_{(m+2s)}$ ( $m$ : 平均、 $s$ : 標準偏差)は、各腐食深さによらず $\alpha_{(m)}$ の1.4倍となる。したがって、各部材の平均腐食深さに対して、各腐食挙動のばらつきを考慮した評価式(ばらつきの最大に相当)は、次式で示すことができる。

$$d_{(m+2s)} = 1.4 \times d_{(m)} \quad (21)$$

式(20)と式(21)を用いることで、 $d_{a,mean(b)}$ あるいは $d_{a,max(b)}$ の実測値から各腐食深さの平均値と最大値を簡便に評価することができる。

## 5. まとめ

本研究ではコンクリート境界部における鋼構造部材の経時的な腐食特性を明らかにするため、モデル供試体の腐食促進実験を行った。また、実験データに対して、バリオグラムおよび回帰樹による分析を行うことで、境界部の経時的な腐食挙動を明らかに

した。さらに、境界部に腐食損傷が生じたトラス橋の実測データを整理・分析することで、鋼構造部材の経時的な腐食挙動を評価する手法を示した。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) コンクリートに埋め込まれた鋼板のコンクリート内部への腐食の進入深さは、鋼板とコンクリートの肌隙深さ程度である。この腐食の進行には経時性が無い。
- (2) S6-cycleの腐食促進実験において、鋼板とコンクリート境界部近傍における鋼板の腐食は、S6-600cycle以内では全面腐食、それ以降では境界部近傍が局所腐食する腐食特性に移行する。コンクリート境界線近傍に生じる最も著しい局部腐食は、境界線から数mm上部に位置する。
- (3) コンクリート境界部を有する鋼板に生じる様々な腐食特性をバリオグラムで分析することで、境界部近傍に局部腐食が集中する腐食特性(Type A)と、一般部に局部腐食が発生する腐食特性(Type B, C)に空間統計学的に分類できる。また、Type Aに対して、回帰樹分析することで、腐食挙動を考慮した領域分割(境界部と一般部)が可能である。
- (4) 腐食性状(Type A, B, C)によらず、最大腐食深さはS6-cycle数と比例関係にあり、一般部の全面腐食の平均腐食深さの約10倍となる。一般部の最大腐食深さについては、S6-1200cycle以降ほとんど増加しない。
- (5) Type Aの境界部の各種の腐食深さ(板幅方向の平均腐食深さの最大値、境界部領域の平均腐食深さ、全アノード領域の平均腐食深さ、各アノード領域の平均腐食深さおよび最大腐食深さ)は、S6-cycle数と比例関係にある。この関係を一般部の平均腐食深さを用いて定式化した。
- (6) 鋼構造部材のコンクリート境界部におけるアノード領域の腐食深さの実測データと塗膜劣化期間から、実環境に対するS6-cycleの腐食促進倍率を算出する方法を提案した。また、その促進倍率を用いて、コンクリート境界部を有する鋼構造部材の各腐食深さを予測する手法を提案した。
- (7) アノード領域の腐食深さの実測データにより、板幅方向の平均腐食深さの最大値、境界部領域の平均腐食深さ、および最大腐食深さを簡便に評価する方法を提案した。

本研究では、鋼材とコンクリート境界部の塗膜劣化後の腐食挙動について定量的な評価を行った。今

後は、塗膜劣化の経時性についても定量的な評価を行う必要がある。また、鋼構造部材の腐食促進倍率を定式化するためには、様々な実環境下における構造物や暴露試験からデータを収集する必要がある。

謝辞：本研究の一部は、平成14年度 文部科学省科学研究費補助金 若手研究(B) (課題番号：13750457) (代表：貝沼重信)、平成15年度 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(B) (2) (課題番号：15360237) (代表：伊藤義人)、(財)石田財団(代表：貝沼重信)、(財)前田記念工学振興財団(代表：貝沼重信)および(社)日本鉄鋼連盟(代表：伊藤義人)の研究助成金を用いて実施した。本研究の遂行の際には、(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所の中山武典氏に御助言を頂いた。供試体の製作の際には、大同工業大学 工学部都市環境デザイン学科の木全博聖講師、(株)ピーエス三菱 技術本部の大浦隆氏、トピー工業(株) 技術研究所の酒井吉永氏および長屋五郎氏に御協力頂いた。また、供試体に用いた鋼材は、(株)神戸製鋼所に御提供頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 東海構造研究グループ (SGST)：橋梁の補修・補強の事例研究，平成9年度～平成10年度 活動報告集，1998。
- 2) 土木学会鋼構造委員会，鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼橋における劣化現象と損傷の評価 (鋼構造シリーズ ⑦)，丸善，1996。
- 3) 伊藤義人，岩田厚司，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1021-1029，2002。
- 4) Kainuma, S., Hosomi, N., Kim, I.T. and Itoh, Y.: Fatigue Behavior of Corroded Out-of-plane Gusset Welded Joints, The Second International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, CD-ROM, Busan,

2002.

- 5) 貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人，柿海信宏：面外ガセット溶接継手の腐食特性と疲労挙動に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.49A，pp.707-715，2003。
- 6) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集，No.570/L-40，pp.129-140，1997。
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '03 [基礎編]，報光社，2003。
- 8) 奥村誠，藤井堅，坪井誠人：空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化，土木学会論文集，No.672/VI-50，pp.109-116，2001。
- 9) 間瀬茂，武田純：空間データモデリング，共立出版，2001。
- 10) Wackernagel, H. (地球統計学委員会 訳)：地球統計学，森北出版，2003。
- 11) Cressie, N.: Fitting variogram models by weighted least squares, *J. Internat. Assoc. Math. Geol.*, Vol.17, pp.563-586. 1985.
- 12) Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. and Stone, C. J.: *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group, California, 1984.
- 13) J. M. チェンバース, T. J. ヘイスティ編：Sと統計モデル ～データ科学の新しい波～，共立出版，1994。
- 14) Therneau, T. M. and Atkinson, E. J.: *An Introduction to Recursive Partitioning using the RPART Routines*, Technical report, Mayo Foundation, 1997.
- 15) 松田哲夫，藤原博，佐久間智：鋼橋塗装の実態調査—全国の塗膜劣化データの統計処理の評価—，日本道路公団試験所報告，Vol.18，pp.97-106，1991。
- 16) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面性状と残留耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，1998。

(2004. 2. 24 受付)

## TIME-DEPENDENT CORROSION BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL MEMBERS IN BOUNDARY WITH CONCRETE

Shigenobu KAINUMA, Naofumi HOSOMI, In-Tae KIM and Yoshito ITOH

In through truss bridges, severe corrosion damages have been observed at the diagonal members in boundary with concrete slab. The similar structural details are also used at boundary of web and flange in corrugated steel web PC bridges. In the future, the similar type of corrosion damages with the truss bridges seems to occur in the PC bridges. In this study, in order to clarify the corrosion behavior for the steel structural members in boundary with concrete, accelerated exposure tests were carried out on model specimens. And classification of the corrosion characteristics and the corrosion regions were analyzed using variograms and regression trees. As the result, corrosion behaviors at boundary and general corrosion region and that of anode region were clarified. Quantitative evaluation and estimation methods for corrosion behaviors in boundary with concrete of the steel members were also proposed.