

工ボキシ樹脂塗装鉄筋の塩分環境下における防食性

琉球大学工学部 正員 〇 具 志 幸 昌
 琉球大学工学部 正員 和 仁 屋 晴 謹

1. まえがき 沖縄県下ではRC構造物の塩害が広汎かつ深刻に拡がっている。海砂の使用、亜熱帯・海洋性気候、まわりが海という島国環境がその主たる原因である。特に海岸地帯のRC構造物のコンクリート中の塩分量が多いことが判明している。海岸RC構造物の塩害防止方法としては、陰極防錆法の適用、コンクリート表面の塗覆、工ボキシ塗装鉄筋等の使用が考えられる。今回、東大生研小林一輔教授を代表者とする昭和58年度科学研究費総合A「工ボキシ樹脂塗装鉄筋に関する研究」の分担研究として「塩分環境下の防食性」というテーマで実験を行ったので、その初年度分(一部2年目迄)の結果を発表する。

表-1 実験計画法によるわりつけ
A シリーズ

実験 番号	因子 列番	W/C (1)	塩分 (2)	膜厚 (4)	かぶり (7)	因子	水 準	
							1	2
1		1	1	1	1	W/C (%) 塩分 (%) 膜厚 (μ) かぶり (cm)	60	45
2		1	1	2	2			
3		1	2	1	2		0.2	1.0
4		1	2	2	1			
5		2	1	1	2		100	300
6		2	1	2	1			
7		2	2	1	1		3	5
8		2	2	2	2			

* 配合コンクリート重量に対するパーセント

2. 実験概要 12×20×30 cmの直方体に鉄筋を3本5 cm間隔に並べた供試体を作り、Aシリーズは屋外に、Bシリーズは浪の静かな海岸護岸上に設置した。各シリーズの因子・水準は表1, 2の通りである。膜厚とは工ボキシ樹脂の塗装厚であり、塩分量は配合時のコンクリート重量に対する値である。鉄筋はSD30で、黒皮付鉄筋(BL)は径19 mm, 重鉛めき鉄筋(ZN)は400 g/m²の重鉛付着量で、16 mm径であり、工ボキシ樹脂塗装鉄筋(EP)は膜厚100, 200, 300 μの3種でいずれも16 mmである。Bシリーズは200 μのみを使用した。1個の供試体中には3種の鉄筋を並置した。鉄筋の長さは45 cmで、両端は穴をあけた型枠の外に出し、かぶりを確保した。セメントは普通ポルトランドセメントで、比重3.16, 28日圧縮強度39.7 kg/cm²である。骨材は硬質石灰岩の碎石・砕砂であり、碎石は比重2.70, 吸水量0.34%, 最大寸法20 mmで、砕砂は比重2.62, 吸水量0.61%, 粗粒率2.70である。配合は表3の通りで、鉄筋位置の塩分量(コンクリート乾燥重量に対する)は暴露供試体と同時に製作した塩分測定用供試体の1年目の塩分量分布から採用した。

表-2 実験計画法によるわりつけ
B シリーズ

実験 番号	因子 列番	W/C (1)	かぶり (2)	因子	水 準	
					1	2
1		1	1	W/C (%) かぶり (cm)	60	45
2		1	2			
3		2	1		3	5
4		2	2			

表-3 コンクリートの配合および4週強度

供試体 番号	ス ラン プ (cm)	空 気 量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg)				濃和剤 (CC%)	NaCl (%)	4週 強度 (kg/cm ²)	鉄筋位 置塩分 (%) [※]	
					W	C	S	G					
A シ リ	1	9.0	3.65	59.2	44.8	169	285	827	1049	712	4669	281	0.101
	2	10.5	3.95	59.2	44.8	168	284	824	1045	710	4665	296	0.098
	3	10.5	3.75	59.2	44.8	168	285	826	1048	711	23324	280	0.604
	4	7.0	4.60	52.5	44.9	149	285	840	1062	711	23559	315	0.522
B シ リ ズ	5	9.5	3.80	44.2	41.9	166	375	743	1061	940	4701	378	0.090
	6	9.5	3.90	44.2	41.9	166	375	742	1060	939	4696	405	0.102
	7	7.0	3.30	39.2	41.9	151	385	762	1088	964	24097	431	0.577
	8	2.0	2.45	38.5	41.9	150	389	771	1100	974	24349	425	0.526
C シ リ ズ	1	14.0	5.80	60.8	44.9	167	274	809	1023	686	--	252	0.014
	2	14.5	6.65	60.8	44.9	165	272	802	1014	679	--	241	0.014
	3	8.5	4.80	44.8	41.9	166	370	734	1048	927	--	344	0.021
	4	10.0	5.75	44.8	41.9	164	366	727	1037	918	--	324	0.018

*セメント量(%)の0.2%, **コンクリート乾燥重量に対するNaClパーセント

アメリカで広く使われている銅/硫酸銅電極に対する自然電位の測定を供試体鉄筋の真上で4 cmおきに5ヶ所で行い、鉄筋腐食の有無を調査した。また、鉄筋腐食による供試体のひびわれ状況を調査し、位置・幅等を記録した。ひびわれ状況を表4に、1本の鉄筋の電位の平均値を表5に示す。Aシリーズ供試体のうち、各実験番号につき2個づつから、14ヶ月目に鉄筋をとり出し、腐食状況を調査し、錆面積等を測定した。

3. 結果と考察 鉄筋腐食によるひびわれは1年目は塩分1%の供試体のみに生じており、BLの上は全部に、ZNはかぶり3 cmのみに生じていた。BLの方は幅が広く、ZNの方は概してうすく、全長にわたらないものや、ようやく認められるものもあった。2年目では上記鉄筋の上のひびわれの幅や長さが増加しており、他に、0.2%塩分の供試体のZNの上にもひびわれが生じていた。鉄筋の間隔がせまいので、鉄筋間のひびわれ

水(表面に現れ水ない)、デラミネーショ

ンが底面に発生しており、かぶりの厚いZ
Nの上にひびわれが現れ水ない一因とな
っている。デラミネーションも材令にとも
ない数がふえている。ひびわれ発生に関する
分散分析結果は、BLでは塩分量のみが、
ZNでは塩分、かぶり厚、および水うの
交互作用が夫々有意(いずれも1%以下の
危険率で)となっていた。

自然電位はAシリーズの塩分0.2%の供
試体とBシリーズとではZNの方がBLよ
りも高い(絶対値)。この場合、BLはZ
Nにより陰極防錆されている。この傾向は
2年目まで継続している。ZNは腐食が進行
している。塩分1%の供試体ではBL、
ZN両方共に電位が高く、腐食が進行して

いる。BLとZNとが共存する場合、塩分量が少ない
時はマクロセルを形成し、BLはZNにより陰極防錆
され、塩分量が多くなると、マイクロセルに移行し、
ZNの陰極防錆効果はなくなる。EPの方は電位が測
定できないが、低い電位を示すのが殆どで、腐食は生
じていない。膜厚が100μの場合、塗膜に欠陥が多か
ったせいか、高電位を示すものがあり(10、7)、鉄
筋をとり出した際微量の錆がみとめられた。電位の平
均値について分散分析を行なった結果、BLについて
は塩分量および塩分量とw/cとの交互作用とが、ZN
については塩分量、w/c、かぶり厚と塩分量との交互
作用が、EPについては、膜厚、塩分量、かぶり厚、
w/cと塩分量との交互作用とが、夫々有意となった。

とり出した鉄筋の腐食状況は塩分量1%の場合、B
Lは全面腐食で断面欠損も大きく、ZNは白色の物質
が表面を被い、所々に赤褐色の鉄錆のかたまりがあつた。0.2%の塩分の場合はZNに白色のひろがりが見られ
、所々に赤錆があつた。

4.まとめ 1).EPのうち200,300μのものは高い耐食性を示し、特に300μのものは高塩分量のもと
での耐食性が大きい。100μの場合でも欠陥部の腐食はあったが、ごく微量である。 2).BLとZNとが共
存する場合、塩分量が少ない場合、ZNはBLを陰極防錆し、自らは錆びる。塩分量が多くなると、この作用は
なくなり、両者共に腐食する。 3).鉄筋間隔とかぶり厚との相互関係に依存すると思われるが、鉄筋相互間
にデラミネーション(表面に現れ水ないひびわれ)が発錆と共に進行し拡がる。 4).ZNは高塩分のもとで
は使用に適さないし、低塩分のもとでも普通鉄筋との併用はさけるべきである。 5).かぶりや水セメント比
は高塩分環境下では耐食のきめ手とはなり得ない。

表-4 ひびわれ状況

供試体 番号	ひびわれ状況								最大幅 (mm)		
	8ヶ月				12ヶ月				23ヶ月		
	表・側面	端	面	面	表・側面	端	面	面	表・側面	端	面
3-1	B1		D11,D21	B1	D1,D2				0.5	1.4	---
3-2	B1		D11	B1	D1,D2				0.6	1.0	---
3-3	B1		D11	B1	D1,D2	B1		D1,D2	0.75	1.3	3.1
3-4	B1		---	B1	D1,D2	B1 ~ Z1		D1,D2	0.35	0.7	1.4
3-5	B1		---	B1	D1,D2	B1		D1,D2	---	0.75	1.25
3-6	B1 ~ Z1		---	B1 ~ Z1	D1,D21	B1 ~ Z1		D1,D21	0.4	0.4	1.40
4-1	B1,Z11	D2		B1,Z11	D2			---	1.0	1.4	---
4-2	B1,Z11,E11	D21		B1,Z1,E11	D2			---	0.95	1.5	---
4-3	B1,Z1	D2,D31		B1,Z1	D2,D31	B1,Z1		D2,D3	0.7	1.25	2.0
4-4	B1,Z1	---		B1,Z1	D21	B1,Z1		D2	1.0	1.5	1.70
4-5	B1,Z1	D31		B1,Z1	D21,D31	B1,Z1		D2,D3	0.2	0.6	1.55
4-6	B1,Z1	D2		B1,Z1,E11	D2	B1,Z1		D2,D3	0.7	1.2	2.2
7-1	B1,Z1			B1,Z1	D21			---	0.5	0.8	---
7-2	B1,B2			B1,B2,E11	D21			---	0.5	0.75	---
7-3	B1,Z11,E11			B1,Z1,E11	D2,D3	B1,Z1,E11		D2,D3	0.6	1.35	2.70
7-4	B1,Z1			B1,Z1	D2	B1,Z1		D2,D3	0.75	1.1	1.95
7-5	B1,Z11,E11			B1,Z1,E1	D21,D31	B1,Z1,E11		D2,D3	0.55	1.0	1.70
7-6	B1,Z11			B1,Z1	---	B1,Z1		D2,D3	0.70	1.0	1.90
8-1	B2	D1		B2	D1			---	0.4	0.9	---
8-2	B11,B2	D11		B11,B2	D1			---	0.6	1.1	---
8-3	B2			B2	D11	B2		D1,D31	0.75	1.0	2.85
8-4	B2	D11		B2	D1,D31	B2		D1,D31	0.60	1.15	2.4
8-5	B1	D11		B1	D1,D31	B1		D1,D3	0.55	1.2	2.5
8-6	B1			B1	---	B1		D1	0.7	0.9	2.1

B1, Z1, E1は表面又は裏面上の全長にわたるひびわれ、B11, Z11, E11は同上のひびわれで全長に
広がらないもの。B2は側面の全長にわたるひびわれ。D1はBLとZN間、D2はBLとEP間、D3はZN
とEP間のデラミネーションで更にD11とあるのは片側端面のみに生じているもので、D21, D31について
も同じ。

表-5 平均自然電位(×10⁻³ボルト)(負値)

A シリーズ								B シリーズ							
供試体 番号	BL	ZN	EP	供試体 番号	BL	ZN	EP	供試体 番号	BL	ZN	EP	供試体 番号	BL	ZN	EP
1-1	31	497	32	5-1	30	419	59	1-1	+41	240	---	3-1	+39	182	---
1-2	159	448	51	5-2	31	421	135	1-2	+43	267	45	3-2	+33	241	58
1-3	136	466	62	5-3	18	439	126	1-3	+61	265	20	3-3	+39	283	---
1-4	142	523	88	5-4	+2	320	24	1-4	+81	274	---	3-4	+57	225	51
1-5	34	257	29	5-5	+13	340	59	1-5	+64	256	---	3-5	+66	246	41
1-6	10	402	17	5-6	7	387	33	1-6	-40	187	57	3-6	+21	287	49
平均	82	439	43	平均	12	388	73	平均	+42	248	20	平均	+32	244	34
2-1	77	373	---	6-1	47	500	113	2-1	+43	229	---	4-1	+75	145	+11
2-2	90	366	---	6-2	44	539	47	2-2	+70	240	---	4-2	+64	199	---
2-3	74	362	---	6-3	73	456	---	2-3	-17	182	---	4-3	+36	101	---
2-4	210	454	76	6-4	68	499	---	2-4	+101	224	+18	4-4	+53	184	4
2-5	19	330	---	6-5	34	459	---	2-5	-43	311	---	4-5	+60	83	+
2-6	44	265	38	6-6	26	327	---	2-6	+58	201	---	4-6	+65	211	-3
平均	86	358	18	平均	49	463	27	平均	+30	231	+3	平均	+57	154	+2
3-1	507	504	191	7-1	602	542	475	3-1	+39	182	---	5-1	+75	145	+11
3-2	500	509	133	7-2	573	575	709	3-2	+33	241	58	5-2	+64	199	---
3-3	479	556	664	7-3	549	519	253	3-3	+39	283	---	5-3	+36	101	---
3-4	584	564	126	7-4	532	525	572	3-4	+57	225	51	5-4	+53	184	4
3-5	478	558	177	7-5	508	475	305	3-5	+66	246	41	5-5	+60	83	+
3-6	564	552	45	7-6	509	530	---	3-6	+21	287	49	5-6	+65	211	-3
平均	579	536	224	平均	548	528	273	平均	+32	244	34	平均	+75	145	+11
4-1	470	546	222	8-1	529	530	385	4-1	+75	145	+11	8-1	+75	145	+11
4-2	457	460	145	8-2	587	587	---	4-2	+64	199	---	8-2	+64	199	---
4-3	372	430	---	8-3	551	742	---	4-3	+36	101	---	8-3	+36	101	---
4-4	426	457	---	8-4	580	629	---	4-4	+53	184	4	8-4	+53	184	4
4-5	526	593	174	8-5	512	517	---	4-5	+60	83	+	8-5	+60	83	+
4-6	380	449	164	8-6	592	606	92	4-6	+65	211	-3	8-6	+65	211	-3
平均	439	474	84	平均	559	602	61	平均	+57	154	+2	平均	+57	154	+2