

[32] 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食

正会員 迫田 恵三（東海大学海洋学部）
 正会員 十河 茂幸（大林組技術研究所）
 正会員 ○ 竹田 宣典（大林組技術研究所）

1. まえがき

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物では、当初から含まれる塩分のほかに、飛来塩分等の外部より浸透する塩分によって、鉄筋の腐食が著しく促進される。特に、打継目やひびわれからの塩分浸透による鉄筋の腐食が、コンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響は大きい。しかしながら、種々の海洋環境下においてどの程度影響を及ぼすかは、あまり明確にされていないのが現状である。本研究は、各種セメントを用いたRC供試体および打継目やひびわれのあるRC供試体を、条件の異なる海洋環境下に長期間暴露し、コンクリート中への塩分浸透量および鉄筋の腐食状態を調べるものである。今回は、暴露後1ケ年までの試験結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

供試体の概要を表-1に示す。RC供試体のかぶり厚は2cmとし、鉄筋は、D19異形鋼棒（SD30,横ふし型）を用いた。

塩分が表-1に示す➡の方向からのみ浸透する様に、周面を厚膜型のエポキシ樹脂で塗装を行った。打継目は供試体中央部にもうけ、旧コンクリート面を打設1週間後にワイヤーブラシでけずり同配合のコンクリートを打継いだ。ひびわれ供試体は、あらかじめ曲げひびわれを導入した面が外側に向く様に、ボルトで締め上げ、引張縁の最大ひびわれ幅を0.05mm程度とした。塩分浸透分析用供試体も同様な方法で周面を塗装し塩分の浸透を一方からのみとした。表-2にコンクリートの配合を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（NP）、高炉B種セメント（BB）、耐硫酸塩ポルトランドセメント（SRC）の3種を使用した。

表-1 供試体概要

供試体名	普通供試体	打継目供試体	ひびわれ供試体	塩分分析用供試体
形状 (寸法)	180	180	180	150
塩分浸透方向	➡	➡	➡	➡
セメントの種類	NP, BB, SRC	NP	NP	NP, BB, SRC
暴露場所	飛沫帯 (A), 海中 (B), 海上大気中 (C), 内陸 (D) BB, SRCは海中, 海上大気中のみ			

表-2 コンクリートの配合および性質

配合名	M.S (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				A/E 減水剤 (2/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G			
普通	15	50.0	48.0	168	332	847	935	0.83	12.0	5.0
高炉B種				162	324	851	940	0.83	10.5	4.4
耐硫酸塩				168	332	849	937	0.83	13.0	4.1

2.2 暴露方法

供試体は材令14日まで湿布養生とし、その後塗装を行ない、材令42~50日で暴露を開始した。暴露試験場は、清水港沖

約500mにある防波堤において、飛沫帯被しぶき (A), 海中 (B), 海上大気中 (C) の3環境条件と東京都清瀬市 (海岸線より約30km内陸、D) とした。図-1に暴露状況を示す。表-3に各暴露試験場の環境条件を示す。塩分浸透面が、RC供試体では側向きに、塩分浸透分析用供試体では鉛直上向きに設置した。

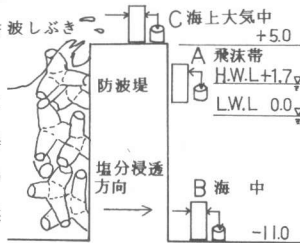


図-1 暴露状況図

表-3 暴露試験場の環境条件

区分	環境条件	暴露場所
A	飛沫帯 堤防側面 H.W.L. +1.7M L.W.L. +0.0M	清水港沖 500m
B	海中 海水温度 18.4℃ pH8.29 Clイオン濃度 18.4% 容存酸素量 7.98ppm	平均気温 18.0℃
C	海上大気中 堤防上 L.W.L. +5.0M位置、一方は強風時、被しぶきを受ける	降水量 2361mm
D	内陸 海岸より約30km内陸 平均気温 15.3℃ 降水量 1460mm	東京都 清瀬市

2.3 測定項目および測定方法

測定は暴露後1ヶ月、6ヶ月、1ケ年において実施した。表-4に測定項目および測定方法を示す。暴露後1ケ年では、RC供試体の解体を行ない、鉄筋の発錆状況を調査した。塩分量分析は、供試体表面から2cmおきにコンクリートドリルを用いて採取した試料により行った。

表-4 測定項目および測定方法

供試体種類	測定項目	試験方法	測定時期
RC供試体	鉄筋の自然電位	ASTM C 876 照合電極には飽和硫酸銅電極を使用	1m,6m,1y
	鉄筋の発錆状況	展開図に腐食状況を写しとり腐食面積率で評価	1y
	塩分量分析	塩素イオン選択性電極を用いた電位差測定法による全塩分量。コンクリート重量に対するNaCl換算値を算出。	1y
φ150mm円柱供試体	塩分量分析	塩素イオン選択性電極を用いた電位差測定法による全塩分量。コンクリート重量に対するNaCl換算値を算出。	1m,6m,1y
φ100mm円柱供試体	コンクリートの劣化状況	圧縮強度 静弾性係数 動弾性係数 超音波速度 (P波)	1m,6m,1y

3. コンクリート中の塩分量と劣化状態

3.1 コンクリート中の塩分量

図-2に暴露後6ヶ月、1ケ年における塩分量の分布図を示す。海上大気中における深さ1cmでの塩分量(以下、特にことわらない限り、コンクリート重量に対するNaCl換算値で示す)は、普通セメント(NP)、高炉B種セメント(BB)、耐硫酸塩セメント(SRC)ともに、1ヶ月で0.02%~0.03%程度、6ヶ月で0.04%程度、1ケ年で0.08%程度であり、経過日数にもなるとほぼ直線的に増加している。海中における深さ1cmでの塩分量は、NP、BB、SRCともに1ヶ月で0.03%~0.035%程度となり、6ヶ月、1ケ年においては、BB、SRC、NPの順に多く、1ケ年では1ヶ月の4倍以上の値であった。また、海中では6ヶ月で、いずれのコンクリートも深さ3cmまで0.036%(砂の絶乾重量の0.1%)以上の塩分が浸透している。SRCは、NPに比べて海上大気中、海中ともに表面部分での塩分量の差はないが、若干深くまで浸透する傾向がある。

砂の絶乾重量の0.1%の塩分が浸透している深さは、暴露後6ヶ月において、飛沫帯で約2cm、海中で約3cm、海上大気中で約1cmであるが、暴露後1ケ年においては、飛沫帯で約7cm、海中で約3~4cm、海上大気中で約2.5cmである。このことから、海中部は飛沫帯に比べて早期に塩分浸透が起るが、6ヶ月以降の塩分の蓄積量は飛沫帯の方が多いと考えられる。暴露後1ケ年において、NPの深さ1cmでの塩分量は、海上大気中と比べて、海中で約1.8倍、飛沫帯で約3倍である。深さ3cmでは、海中で約5倍、飛沫帯で約10倍となる。深さ5cmにおいては、海上大気中、海中では砂の絶乾重量の0.1%以下の塩分量となるが、飛沫帯では砂の絶乾重量の0.2%程度の塩分が浸透している。

3.2 コンクリートの劣化状態

表-5に圧縮強度の推移を示す。圧縮強度はいずれの環境においても増加しており、暴露後1ケ年において、飛沫帯、海中では標準養生を上回っている。静弾性係数、動弾性係数、超音波速度の変化は少なく、コンクリート自体の劣化はみられなかった。

図-3に動弾性係数(E_d)と超音波速度(P_u)の関係を示す。一般には、含水率および圧縮強度が大きくなると、E_d、P_uは大きくなるが、海上大気中、内陸における供試体は、含水率が低くE_d、P_uは小さい。また、飛沫帯、海中における供試体は、標準養生供試体に比べて圧縮強度が大きいのに反してE_d、P_uは逆に小さい。このことより、飛沫帯、海中では、コンクリートの組成に変化が生じている可能性がある。

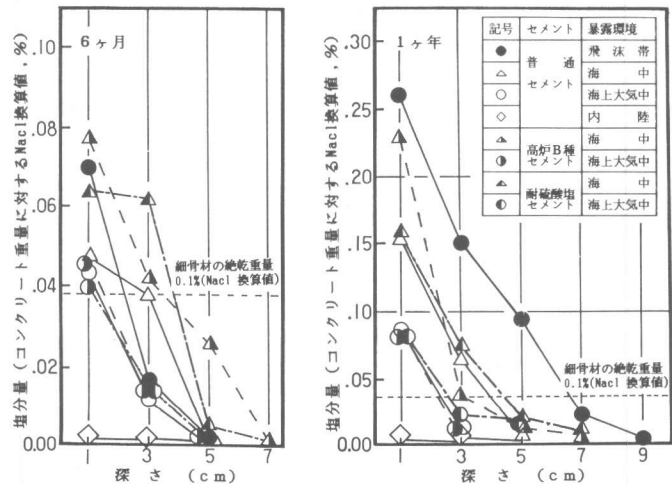


図-2 コンクリート中の塩分量

4. 鉄筋の腐食状態

4.1 環境条件による影響

表-6に暴露後1ヶ月におけるRC供試体の自然電位の平均値、表面から鉄筋位置(かぶり2cm)までの塩分量と鉄筋の腐食面積率を示す。塩分量は、浸透面の向きによって異なり、浸透面を上向きにした方が側方向きにした値より大きくなる。

表-5 圧縮強度の推移

配合名	測定期日	A	B	C	D	E
N P $\sigma_{28} = 359$ kg/cm ²	1ヶ月	355	340	369	407	422
	6ヶ月	478	469	442	479	457
	1ヶ月	549	514	479	456	486
B・B $\sigma_{28} = 356$ kg/cm ²	1ヶ月	--	381	385	--	455
	6ヶ月	--	509	482	--	505
	1ヶ月	--	541	514	--	535
SRC $\sigma_{28} = 377$ kg/cm ²	1ヶ月	--	336	393	--	430
	6ヶ月	--	447	460	--	468
	1ヶ月	--	501	497	--	489

(注) E:標準養生での値
測定期日は暴露開始日からの期日

普通セメントを用いた打継目やひびわれがないRC供試体では、飛沫帯と海中において、鉄筋は表面側に集中して発錆しており錆はごく表面部分のみで孔食は見られなかった。塩分量は飛沫帯と海中とでは、同程度であるが、腐食面積率は前者の方が後より大きい。

自然電位は、飛沫帯では腐食箇所ですべてになっているが、海中部では全体にわたって均一に卑の値を示す。図-4に自然電位の平均値の経時変化を示す。飛沫帯では、暴露後6ヶ月までは、ASTMで90%以上の確率で発錆していると考えられる電位(-350mV)より貴であるが、暴露後1ヶ月では卑となる。海中部では、暴露後6ヶ月の時点で-350mVより卑となる。これは、海中部では飛沫帯より早期に塩素イオンが浸透するために自然電位は卑になるが、海中部では酸素の供給が少ないため、ひびわれ等のない健全なコンクリートでは、腐食の進行が緩やかになるためと考えられる。

高炉B種セメント、耐硫酸塩セメントを用いたRC供試体中の鉄筋は、海上大気中、海中のどちらにおいても腐食は認められなかった。

4.2 打継目、ひびわれの影響

図-5に打継目およびひびわれ供試体の鉄筋の腐食状態を示す。

打継目供試体では、海中、飛沫帯、海上大気中の順に、腐食面積は大きく、打継目を中心に発錆している。海中部での打継目位置での自然電位は、暴露後1ヶ月で-350mV以下になる。ひびわれ供試体は海中、飛沫帯で発錆しているが、海上大気中、内陸では発錆は認められなかった。飛沫帯では、圧縮側の鉄筋も腐食が進行しているが、海中では圧縮側の鉄筋は、ほとんど発錆していない。海中部では鉄筋の全長にわたって発錆し、腐食面積率10%以上のものもあるが、いずれも、ひびわれ箇所の表面側を中心に腐食が進行している。

海中部は水深約10mの位置にあり、約1.0kg/cm²の水圧が作用している。この様な条件下では、水圧の作用により打継目やひびわれを通じて、塩分が浸透しやすいために、飛沫帯よりも腐食が進行したものと考えられる。

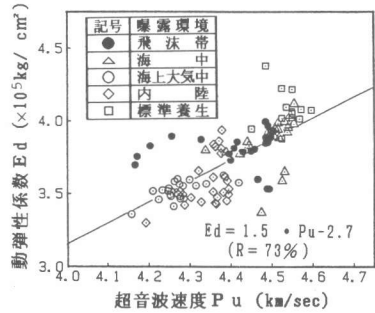


図-3 動弾性係数と超音波速度の関係

表-6 RC供試体の自然電位、塩分量、腐食面積率

供試体種類	測定目	普通			打継目		ひびわれ		
		N	P	B・B	SRC	引張側		圧縮側	
						N	P	N	P
自然電位の平均値(mV)	A	-510	--	--	-383	-485	--	--	
	B	-555	-310	-480	-555	-490	--	--	
	Ca	-110	-55	-40	-30	-50	--	--	
	Cb	-30	-15	-35	-30	-60	--	--	
塩分量(%)	A	0.072 (0.260)	--	--	0.074	0.115	0.074		
	B	0.084 (0.152)	0.087 (0.229)	0.073 (0.157)	0.078	0.120	0.078		
	Ca	0.043 (0.086)	0.011 (0.089)	0.022 (0.089)	0.124	0.025	0.021		
	Cb	0.017	0.008	0.016	0.006	0.009	0.018		
腐食面積率(%)	A	0.004	--	--	0.004	0.005	0.005		
	B	1.78	--	--	2.03	7.23	5.75		
	Ca	0.22	0	0	3.92	9.34	0.31		
	Cb	0	0	0	0.73	0	0		
D	0	0	0	0	0	0			
	0	--	--	0	0	0			

(注1) A:飛沫帯 B:海中 Ca:海上大気中(強風時に被しぶきを受ける) Cb:海上大気中(被しぶきを受けない) D:内陸
(注2) 塩分量はコンクリート重量に対してのNaCl換算値
(注3) A、B、Dについては2本の鉄筋についての平均値

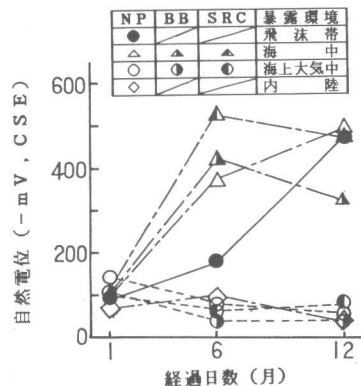


図-4 自然電位の平均値の経時変化

4.3 鉄筋の腐食状態と塩分量および自然電位

図-6に鉄筋の腐食面積率と塩分量の関係を示す。塩分量が0.05% (砂の絶乾重量に対して0.14%, コンクリート中の総塩素イオン量 0.7 kg/m^3) 以上になると腐食面積率は急激に高くなる。図-7に鉄筋の腐食面積率と自然電位の関係を示す。自然電位の平均値が -200mV 以上であるものは、ほとんど発錆していないが、 -400mV 以下となると腐食面積率は高くなる。ただし、海中においては、自然電位が卑になっても発錆していないものもある。図-8に塩分量と自然電位の関係を示す。塩分量が0.05%以下では、自然電位は

-100mV 以上のものが多く、0.05%以上では、 -400mV 以下のものが多い。ASTMで90%以上の確率で発錆していると考えられる電位(-350mV)に対応する塩分量は、コンクリート重量に対して0.05%程度である。

5. まとめ

- (1) 塩分浸透量は、セメントの種類によって大きな差はなく、暴露後1ケ年においては、飛沫帯、海中、海上大気中の順に大きい。
- (2) 暴露後1ケ年では、コンクリート自体の劣化はみられなかった。
- (3) 海中中部のコンクリート構造物における打継目やひびわれは腐食を促進させるため施工上、充分注意が必要である。
- (4) コンクリート中の塩分量がコンクリート重量に対して0.05%以上となると、鉄筋は腐食することが多い。
- (5) 鉄筋の自然電位を測定することにより腐食状態をある程度推定することが可能である。

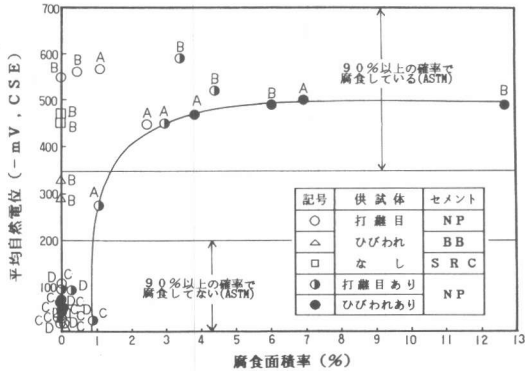


図-7 腐食面積率と平均自然電位の関係

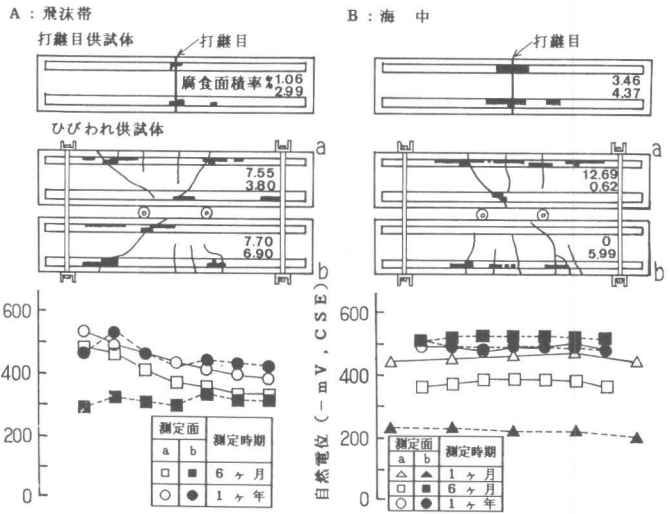


図-5 打継目およびひびわれ供試体の鉄筋の腐食状態

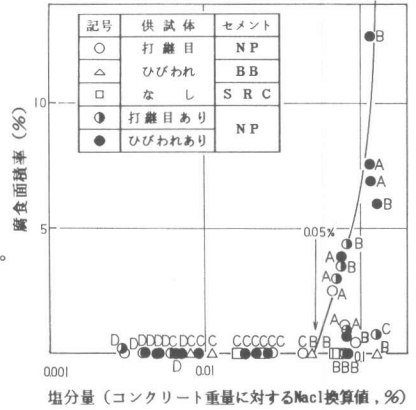


図-6 塩分量と腐食面積率の関係

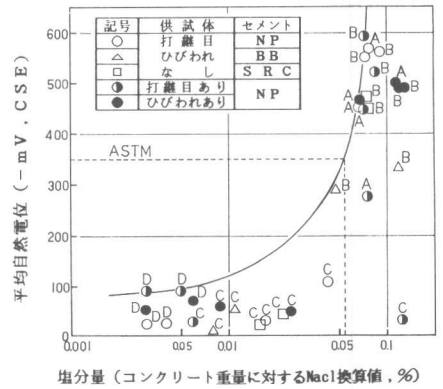


図-8 塩分量と平均自然電位の関係