

コンクリート中への塩化物イオン浸透性に関する研究

A Study on Chloride Penetration into Concrete

林 大 介 横 関 康 祐
渡 邊 賢 三 坂 田 昇

要 約

本報では、塩害を受けるコンクリート構造物の高精度な劣化予測手法の確立を目的とした研究のうち、8.5年間の暴露試験、急速塩化物イオン浸透性試験及び室内浸漬試験の検討結果を示した。暴露試験結果より、①コンクリート中への塩化物イオンの浸透量は干満帯よりも海中の方が多い傾向があり、スランブ、塩化物イオン浸透面及び養生材齢の影響はほとんどないこと、②表面塩化物イオン量は単位セメント量が多いほど多くなり、土木学会コンクリート標準示方書の推定値よりも大きくなる傾向があること、③普通セメント及び高炉セメントB種の見掛けの拡散係数は、干満帯よりも海中の方が大きい傾向があり、土木学会コンクリート標準示方書の推定式よりも大きな値となることなどが分かった。また、急速塩化物イオン浸透性試験結果より、①W/Cが高く、単位セメント量が多いほど、またセメントの混和材置換率が低いほど塩化物イオンの浸透性が高いこと、②急速塩化物イオン浸透性試験結果の対数と暴露試験の見掛けの拡散係数の対数との間には相関があることなどが分かった。さらに、室内浸漬試験結果より、見掛けの拡散係数はアレニウスの理論に従って温度が高いほど大きくなり、30℃を1とした場合、10℃で0.7程度、50℃で1.3程度であることなどが分かった。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験概要
- III. 実験結果
- IV. まとめ
- V. おわりに

I. はじめに

海洋環境下に供用されるコンクリート構造物の塩害が問題視されるようになって久しい。最近では、性能照査型設計が取り入れられるようになり、また、ライフサイクルを考慮した維持管理が行われつつあるなどの背景から、改めてコンクリート構造物の塩害に関する知見の蓄積が求められている。筆者らは1991年11月より実海洋環境における暴露試験を開始するとともに、室内試験などによる検討を行ってきた^{1)~10)}。これら一連の研究の目的は、塩害を受けるコンクリート構造物の劣化過程を精度良く予測する手法の確立であり、さらには、部分安全係数を低減した合理的な耐久性能設計手法や適切な維持管理計画策定手法の確立を目的としている。

本報では、一連の研究のうち、8.5年間にわたる暴露試験、急速塩化物イオン浸透性試験及び室内浸漬試験の結果を整理し、コンクリートの塩化物イオン浸透性に影響を及ぼす要因について検討した結果を示す。

II. 実験概要

1. 実験目的

本研究で実施した各試験の要因をTable 1に示す。暴露試験は、常に海水と接するような厳しい海洋環境に曝されたコンクリートの

実データを基に、塩化物イオン浸透性に影響を及ぼす要因について検討するために実施した。また、急速塩化物イオン浸透性試験は、施工条件や環境条件の影響を考慮できないものの配合条件の影響を簡易に検討できることから、コンクリート配合の影響を詳細に検討するために実施した。室内浸漬試験は、1ヵ所における暴露試験では要因にすることができない環境温度の影響を検討するために実施した。

2. 使用材料

使用材料をTable 2に、セメント及び混和材の化学成分をTable 3にそれぞれ示す。また、各実験に用いたコンクリートの配合をTable 4に示す。

Table 1 試験要因
(Experimental Factors)

試験	試験要因
暴露試験	配合条件：セメント種類、W/C、スランブ 環境条件：暴露場所（干満帯、海中） 施工条件：塩化物イオン浸透面、養生材齢
急速塩化物イオン浸透性試験	配合条件：セメント種類、混和材置換率、W/C、スランブ
室内浸漬試験	環境条件：環境温度

Table 2 使用材料
(Properties of Materials)

種別	記号	摘要
結合材	OPC	普通ポルトランドセメント、密度3.15(g/cm ³)、粉末度3390(cm ² /g)
	BS	高炉スラグ微粉末、密度2.89(g/cm ³)、粉末度4360(cm ² /g)
	FA	フライッシュ、密度2.77(g/cm ³)、粉末度3510(cm ² /g)
	SF	シリカフェム、密度2.20(g/cm ³)
細骨材	S	川砂、密度2.60(g/cm ³)（暴露試験、急速塩化物イオン浸透性試験）
	S	山砂、密度2.61(g/cm ³)（室内浸漬試験）
粗骨材	G	砕石、Gmax：20mm、密度2.65(g/cm ³)
混和剤	Ad	AE減水剤

キーワード：コンクリート構造物、塩害、暴露試験、表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数、急速塩化物イオン浸透性試験、アレニウスの理論

3.実験方法

(1) 暴露試験

Table 4 に示した配合のコンクリートを用いて 250×250×250mm の供試体を作製し、湿潤養生を行った。その後、供試体の4面をエポキシ樹脂で被覆し、年平均 15℃の福島県太平洋沿岸の干満体及び海中に暴露した。暴露試験の要因を Table 5 に示す。暴露開始後 1, 2, 3 及び 8.5 年を経過した時点で、供試体より φ50mm のコア試料を採取し、表面から 10mm 間隔で 4 スライスを採取して塩化物イオン量の深さ方向の分布を測定した。塩化物イオン量の測定は、「JCI-SC4：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」の全塩分定量方法に準じた。さらに、得られた塩化物イオン量の分布より、最小二乗法によってフィックの拡散方程式の解である式(1)に最も適合する表面塩化物イオン量及び塩化物イオンの見掛けの拡散係数(以下、見掛けの拡散係数と表記)を算出した。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \cdots (1)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：深さ x 、時刻 t における塩化物イオン量

C_0 ：表面塩化物イオン量

D ：見掛けの拡散係数

erf ：誤差関数

(2) 急速塩化物イオン浸透性試験

Table 4 に示した配合のコンクリートを用いて、φ100×h200mm の供試体を作製し、28日間水中養生を行った後、中央部より φ100×h50mm の供試体を2片切り出して試験に供した。試験では、まず前処理として供試体側面をエポキシ樹脂で被覆し、真空ポンプで空気を抜いた後、供試体を立ててセルに取り付けた。次に供試体の正極の面に 0.3N(規定)の NaOH を、負極の面に 3%の NaCl をそれぞれ満たし、10V の低電圧をかけて電流量を6時間測定した。AASHTO T-277 では、負荷電流を 60V としているが、本試験では、供試体の著しい温度上昇が懸念されたため 10V とした。なお、既往の研究によれば、試験によって得られる電流量が高いほど塩化物イオンの浸透性が高く、電流量と見掛けの拡散係数の間には、それぞれの対数の間に正の相関を示す関係があることが報告されている¹¹⁾。

(3) 室内浸漬試験

Table 4 に示した配合のコンクリートを用いて、100×100×100mm

Table 3 セメント及び混和材の化学成分

(Chemical Compositions of Cement and Admixtures)

セメント, 混和材	化学成分 (%)										
	ig.loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	MnO	TiO ₂
普通ポルトランドセメント	1.14	0.10	21.68	5.69	2.64	—	64.19	1.27	2.09	0.08	0.30
高炉スラグ微粉末	1.8	—	31.9	12.8	—	0.3	43.2	6.0	1.9	—	—
フライッシュ	3.26	—	58.51	23.90	3.48	—	4.40	1.07	0.95	—	—
シリカフェーム	1.22	—	96.7	—	0.01	—	0.13	0.18	—	—	0.02

Table 4 コンクリート配合

(Mix Proportions of Concrete)

実験	No.	セメント種類	混和材 置換率(%)	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
								W	C ^(※)	S	G	
暴露試験	1,2,7	普通セメント (OPC)	—	55	8±2	5±1	48	158	287	881	965	
	3,4			55	18±2		48	175	318	847	928	
	5,6			40	8±2		45	158	395	785	971	
	1,2,7	高炉セメント B種 (OPC+BS)	45	55	8±2		48	155	282(127)	883	968	
	3,4			55	18±2		48	175	318(143)	843	924	
	5,6			40	8±2		45	155	388(175)	788	973	
	1,2,7	フライアッシュセメント B種 (OPC+FA)	20	55	8±2		48	145	264(53)	899	984	
	3,4			55	18±2		48	158	287(57)	872	954	
	5,6			40	8±2		45	145	363(73)	802	990	
	1,2	普通セメント+シリカ フェーム (OPC+SF)	10	55	8±2		48	160	291(29)	873	955	
5,6	40			8±2	45	160	400(40)	776	958			
急速塩化物 イオン浸透性 試験	1	普通セメント (OPC)	—	55	8±2	5±1	48	160	291	874	961	
	2			55	8±2		48	165	300	894	988	
	3			55	18±2		48	175	318	844	928	
	4			40	8±2		45	160	400	779	966	
	5			70	8±2		50	160	229	936	950	
	6	高炉セメント (OPC+BS)	45	55	8±2		48	155	282(127)	879	967	
	7			45			55	48	160	291(131)	863	953
	8			20			55	48	160	291(58)	865	955
	9			70			55	48	160	291(204)	860	950
	10			45			40	45	155	388(175)	783	971
	11	フライアッシュセメント (OPC+FA)	20	45	40		45	165	413(186)	756	942	
	12			20	40		45	165	413(83)	760	946	
	13			70	40		45	165	413(289)	752	937	
	14			45	70		50	155	221(99)	942	956	
	15			20	55		8±2	48	160	291(58)	856	946
	16	普通セメント+シリカ フェーム (OPC+SF)	10	55	8±2		48	160	291(29)	862	952	
	17			30	55		8±2	48	160	291(87)	852	940
	18			20	40		8±2	45	155	375(75)	787	978
	19			20	40		8±2	45	165	412(82)	756	941
	20			20	40		18±2	45	160	400(80)	776	950
	21	普通セメント+シリカ フェーム (OPC+SF)	10	40	8±2		45	165	412(41)	756	941	
	22			30	40		8±2	45	165	413(124)	749	932
	23			20	70		8±2	50	145	207(41)	957	972
	24			10	55		48	170	309(31)	842	929	
	25			5	55		48	170	309(15)	844	935	
	26	普通セメント+シリカ フェーム (OPC+SF)	15	55	8±2		48	170	309(46)	839	927	
	27			10			40	45	170	425(43)	746	929
	28			5			40	45	170	425(21)	749	932
	29			15			40	45	170	425(64)	741	924
室内浸漬試験	1			普通セメント (OPC)		—	50	12±2.5	4.5±1.5	44	168	336

(※)：() 内の数字は混和材の単位量を表す。

Table 5 試験要因

(Experimental Factors and Levels)

No.	結合材種類	W/C (%)	スランブ (cm)	塩化物イオン 浸透面(※)	養生 材齢 (日)	暴露 場所	暴露 期間 (年)
1	普通セメント 高炉B種 フライッシュB種 普通セメント+シリカ	55	8	打設直交面	5	干満帯 海中	1,2,3,8.5
2		55	8	打設上面, 下面	5		
3		55	18	打設直交面	5		
4		55	18	打設上面, 下面	5		
5		40	8	打設直交面	5		
6	普通セメント+シリカ	40	8	打設上面, 下面	5		
7		55	8	打設直交面	28		

(※)：「打設上面, 下面」では、供試体の上面及び下面より、それぞれコア試料を採取して塩化物イオン量の試験を行った。

Table 6 塩化物イオン量の試験結果

(Chloride Content)

暴露場所	セメント種類	No. 浸透面	年数	普通セメント				高炉セメントB種				フライアッシュセメントB種				普通セメント+シリカフェーム			
				表面からの深さ(mm)				表面からの深さ(mm)				表面からの深さ(mm)				表面からの深さ(mm)			
				0-10	13-23	26-36	39-49	0-10	13-23	26-36	39-49	0-10	13-23	26-36	39-49	0-10	13-23	26-36	39-49
干満帯	No.1 直交	1	10.28	3.57	0.13			9.81	1.37	0.10		9.44	3.73	0.38					
		2	11.33	5.58	2.79	0.87		11.49	4.29	0.50	0.24	10.72	5.85	1.99	0.79	11.37	4.15	0.47	0.29
		3	13.13	6.45	2.76	0.69		12.74	3.71	0.46	0.23	12.01	5.544	1.155	0.231	12.64	3.45	0.46	0.23
		8.5	14.27	8.34	5.83	2.75		14.94	5.41	1.13	0.26	10.92	7.67	2.04	0.15	13.85	4.84	0.16	0.02
	No.2 上面	2	11.47	6.12	2.47	0.46		10.40	5.74	1.15	0.16	8.99	3.66	0.87	0.29	8.75	2.69	0.48	0.27
		3	11.28	4.84	1.38	0.92		11.59	1.62	0.46	0.23	10.63	3.696	0.693	0.231	10.57	2.07	0.23	0.23
		8.5	13.67	8.94	6.44	3.32		12.21	10.25	2.95	0.32	12.18	9.072	0.281	0.164	14.89	7.61	0.75	0.18
	No.2 下面	2	7.93	5.88		1.79		13.32	4.37		0.14	14.25	9.15		1.96	12.50	3.27		
		3	12.21	7.83	4.84	1.84		13.67	6.26	0.93	0.23	14.55	9.471	3.003	0.462	16.32	3.22	0.46	0.23
		8.5	8.56	5.15	2.91	1.28		9.76	2.34	0.22	0.23	10.53	5.32	0.44	3.34	14.30	6.86	0.33	0.22
	No.3 直交	1	10.69	3.44	0.17			9.19	0.85	0.09		9.95	3.24	0.17					
		2	12.04	6.01	2.70	0.42		11.86	5.06	1.15	0.15	10.91	8.13	4.2	1.05				
		3	11.67	6.41	2.98	0.69		14.40	3.43	0.23	0.23	13.22	7.065	1.367	0.228				
	No.4 上面	8.5	15.34	7.41	3.65	1.57		14.25	5.02	0.48	0.14	10.80	8.88	1.87	0.15				
		2	8.39	3.86	1.25	0.18		8.67	1.16	0.22	0.12	8.43	4.64	1.68	0.15				
		3	9.84	5.88	1.14	0.46		12.80	1.60	0.23	0.23	12.31	5.014	0.684	0.228				
	No.4 下面	8.5	8.50	3.70	1.58	0.46		15.03	9.81	2.89	0.18	11.78	10.80	2.17	0.02				
		2	12.32	6.50		1.39		13.32	4.76		0.17	13.43	6.92		0.24				
		3	16.71	7.78	3.43	1.37		20.11	6.40	0.46	0.23	16.18	7.521	1.823	0.456				
	No.5 直交	8.5	16.05	8.50	4.41	2.11		13.02	4.46	0.31	0.18	10.09	5.50	0.66	0.11				
		1	11.82	1.34	0.09			9.54	0.43	0.08		9.78	0.8	0.09					
		2	11.66	5.82	1.52	0.32		12.68	1.09	0.67	0.18	13.86	3.82	0.29	0.27	11.19	1.35	0.35	0.25
	No.6 上面	3	13.44	4.17	0.46	0.46		16.17	1.39	0.69	0.23	14.38	3.48	0.464	0.232	12.56	0.70	0.47	0.23
		8.5	12.03	6.04	1.31	0.07		13.57	0.82	0.15	0.15	16.32	5.84	0.05	0.08	18.93	2.75	0.19	0.18
		2	9.95	2.29	0.26	0.23		9.07	0.42	0.17	0.17	9.61	3.03	0.27	0.33	12.38	0.96	0.40	0.23
	No.6 下面	3	12.28	1.62	0.46	0.46		10.40	0.46	0.46	0.46	10.67	1.392	0.464	0.232	19.30	0.70	0.47	0.23
		8.5	15.35	8.10	0.87	0.04		16.24	3.23	0.15	0.17	16.63	5.817	0.077	0.152	22.70	2.54	0.28	0.26
		2	12.36	4.22		0.18		13.82	2.60		0.34	16.27	5.32		0.25	13.55	0.89		
	No.7 直交	3	13.67	3.71	0.46	0.46		18.25	2.31	0.46	0.23	16.94	4.64	0.464	0.464	16.97	0.70	0.47	0.23
		8.5	12.28	5.39	0.67	0.15		15.24	1.61	0.03	0.17	13.11	4.10	0.18	0.27	16.25	1.75	0.27	0.22
		1	8.23	2.29	0.46			6.92	1.07	0.07		6.82	3.88	0.58					
海中	No.1 直交	2	9.45	5.80	2.16	0.53		7.78	4.49	0.81	0.21	9.51	5.82	2.62	0.46				
		3	11.52	5.76	1.84	0.46		10.19	4.40	0.70	0.46	11.09	5.54	1.85	0.23				
		8.5	16.76	9.49	6.58	3.40		8.99	4.49	0.85	0.15	14.50	6.44	1.28	0.11				
	No.2 上面	1	13.67	6.54	1.53			13.04	2.34	0.08		10.13	4.43	0.57					
		3	14.51	8.75	5.76	2.76		12.74	5.33	0.70	0.46	12.47	8.78	1.85	0.23	11.72	7.58	0.69	0.46
		8.5	10.00	10.79	8.68	6.97		10.98	8.97	3.79	0.59	9.48	8.58	5.17	1.21	13.59	10.52	5.76	1.26
	No.2 下面	3	18.65	9.67	5.30	1.84		12.74	2.32	0.46	0.23	10.63	5.31	0.92	0.46	12.64	4.60	0.69	0.46
		8.5	16.13	12.75	9.08	8.33		11.99	8.88	2.44	0.32	11.12	11.11	4.91	1.14	10.96	9.03	4.45	0.32
		3	15.89	10.82	6.22	3.68		13.21	3.94	0.46	0.23	10.86	6.93	2.08	0.23	15.40	8.96	0.69	0.46
	No.3 直交	8.5	9.81	9.65	7.74	7.40		11.16	9.94	2.93	0.40	7.12	9.06	4.77	1.26	10.55	11.06	7.34	1.39
		1	13.65	5.77	1.21			15.99	1.37	0.09		12.27	5.32	0.72					
		3	18.31	11.45	6.41	2.98		14.40	5.03	0.69	0.23	12.31	9.57	2.73	0.46				
	No.4 上面	8.5	13.92	13.45	9.33	7.00		12.95	9.71	4.84	0.97	9.96	9.15	5.61	1.23				
		3	17.40	10.30	5.04	0.69		19.88	7.31	0.91	0.46	11.62	5.24	0.68	0.46				
		8.5	22.34	13.94	7.45	10.43		16.50	12.73	5.50	1.13	8.53	7.27	3.49	0.23				
	No.4 下面	3	14.19	9.16	5.72	2.98		10.97	2.74	0.69	0.46	12.99	9.12	2.73	0.46				
		8.5	9.69	11.36	8.99	6.57		9.70	6.88	2.31	0.34	7.27	4.69	0.49	0.81				
		1	14.37	3.16	0.10			11.61	0.87	0.09		14.56	3.28	0.09					
	No.5 直交	3	17.15	8.80	2.09	0.46		15.71	3.47	0.46	0.23	14.62	6.03	0.70	0.46	16.04	10.46	0.47	0.23
		8.5	15.52	12.42	8.00	4.37		14.75	7.74	0.39	1.04	10.34	9.73	2.52	0.14	13.26	11.21	0.84	0.23
		3	19.46	8.57	1.39	0.46		14.55	3.47	0.23	0.46	16.24	4.87	0.23	0.46	15.35	2.79	0.47	0.47
	No.6 上面	8.5	24.54	12.42	7.04	2.76		17.27	5.00	0.43	0.16	17.27	13.46	3.34	0.24	11.85	10.68	1.02	0.25
		3	17.38	8.57	2.32	0.23		13.86	2.77	0.46	0.69	11.14	6.03	0.23	0.23	19.53	3.72	0.70	0.47
		8.5	14.47	11.56	7.04	4.87		13.61	7.78	0.60	0.16	11.82	7.70	0.77	0.11	11.92	8.34	0.47	0.25
	No.7 直交	1	12.11	5.69	1.23			9.10	1.34	0.12		7.83	3.20	0.30					
		3	13.13	8.29	5.99	2.99		10.19	4.87	0.70	0.46	9.70	6.24	2.08	0.46				
		8.5	13.55	12.01	7.97	6.58		10.95	8.90	4.19	0.81	9.32	7.84	4.49	0.82				

の供試体を作製し、7日間水中養生を行った後、側面の1面を除く5面をエポキシ樹脂で被覆した。試験では、10, 30 及び 50℃ に設定された 3%人工海水に供試体を浸漬し、試験開始後 14, 70, 140 日を経過した時点で、供試体表面から 7mm 間隔で 5 スライスを採取し、塩化物イオン量を測定した。塩化物イオン量の測定は、「JCI-SC4: 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」の全塩分定量方法に準じた。さらに得られた塩化物イオン量分布より、最小二乗法によって、式(1)に示したフィックの拡散方程式の解に最も適合する見掛けの拡散係数を算出した。

III. 実験結果

1. 暴露試験

(1) 塩化物イオン量の分布
塩化物イオン量の試験結果を Table 6 に示す。

暴露試験の供試体の塩化物イオン量にはばらつきがあったものの、概ね以下に示す傾向が認められた。

(a) 塩化物イオン量分布の経年変化

普通セメントを使用した No.1 供試体の干満帯及び海中における塩化物イオン量分布を Fig.1 に示す。また、表面からの深さ 0-10mm 及び 13-23mm における暴露 3 年時と 8 年時の塩化物イオン量の違いを Fig.2 に示す。

Fig.1 に一例を示すように、コンクリート中への塩化物イオンの浸透量は、暴露環境にかかわらず経年に伴って増加する傾向があった。Fig.2 に示すように、3 年時から 8.5 年時にかけての表面 0-10mm における塩化物イオン量は、干満帯ではほとんど変わらない傾向であったのに対し、海中では減少する傾向があった。それより内部の塩化物イオン量については、干満帯及び海中ともに増加する傾向があった。海中に暴露した供試体の塩化物イオン量が表面で減少し、内部で増加した理由として、長期間にわたる暴露期間中に付着した貝や汚れなどの影響が考えられる。既往の研究により、表

面被覆を施したコンクリートには、同様の傾向がみられることが明らかとなっている¹²⁾。

(b) 暴露場所の影響

干満帯と海中に暴露した供試体の塩化物イオン量(深さ 0-10mm 及び 13-23mm)の違いを Fig.3 に示す。干満帯と海中に暴露した供試体の塩化物イオン量を比較すると、表面の 0-10mm の値はほぼ同程度であり、それより深い範囲では海中の方が多く浸透している傾向があった。

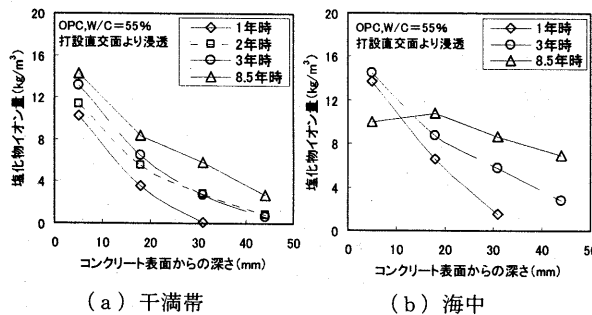


Fig.1 塩化物イオン量の分布 (普通セメント, No.1)
(Chloride Content (OPC, No.1))

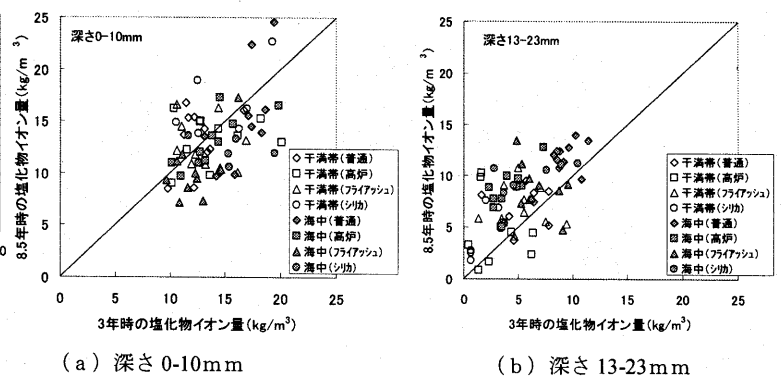


Fig.2 3年時及び8年時の塩化物イオン量の比較
(Chloride Content at 3years and 8.5years)

(c) セメント種類の影響

打設直交面より塩化物イオンを浸透させた供試体の暴露 8.5 年時における塩化物イオン量 (深さ 0-10mm 及び 26-36mm) を、セメント種類によって整理した結果を Fig.4 に示す。

セメント種類の異なる供試体の塩化物イオン量を比較すると、干満帯及び海中ともに、表面 0-10mm ではばらつきが大きく明確な傾向は認められなかったものの、それより内部では混合セメントを使用した供試体の方が少ない傾向があった。

(d) コンクリート配合の影響

打設上面より塩化物イオンを浸透させた暴露 8.5 年時における塩化物イオン量 (深さ 0-10mm 及び 26-36mm) を、コンクリート配合によって整理した結果を Fig.5 に示す。

同一スランブ (8cm) で水セメント比が 40% と 55% の供試体の塩化物イオン量を比較すると、ばらつきは大きいものの、干満帯及び海中ともに、表面 0-10mm では水セメント比 40% の方が多く、それより内部では水セメント比 55% の方が多い傾向があった。また、水セメント比 55% でスランブの異なる供試体間には、明確な傾向は認められなかった。

(e) 塩化物イオン浸透面の影響

打設直交面より浸透した塩化物イオン量と打設上下面より浸透した塩化物イオン量 (深さ 0-10mm 及び 26-36mm) の違いを Fig.6 に示す。

暴露 3 年時において、浸透面の異なる供試体間の塩化物イオン量を比較すると、表面 0-10mm の値には明確な傾向が認められず、内部 26-36mm の値には、直交面よりも、上面が少なく下面が多い傾向があった。しかし、この違いは小さく、8.5 年時では表面 0-10mm の値及び内部 26-36mm の値ともに明確な傾向は認められなかった。

(f) 暴露前の養生材齢の影響

試験開始前に 5 日間養生を行った供試体と 28 日間養生を行った供試体の塩化物イオン量の違い (深さ 0-10mm 及び 26-36mm) を Fig.7 に示す。

5 日養生の供試体と 28 日養生の供試体の塩化物イオン量を比較すると、表面 0-10mm の値は、3 年時まで 28 日養生の方が少ない傾向

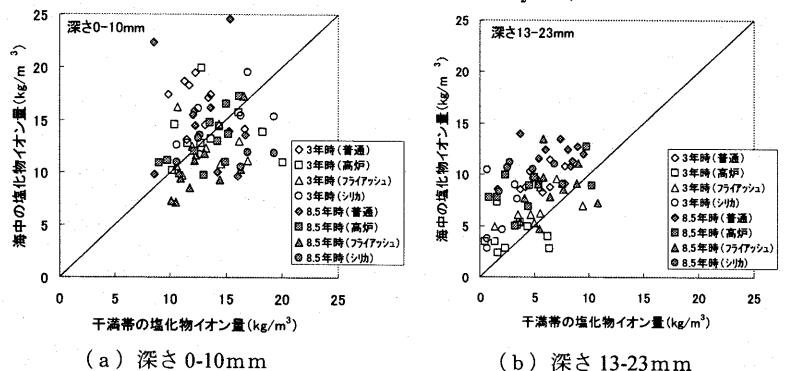


Fig.3 干満帯及び海中の塩化物イオン量の比較
(Chloride Content at Tidal Zone and Under Water)

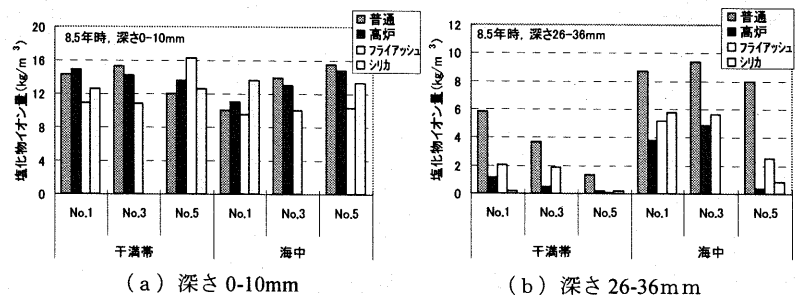


Fig.4 供試体の塩化物イオン量 (セメント種類の影響)
(Chloride Content (Effect of Cement Type))

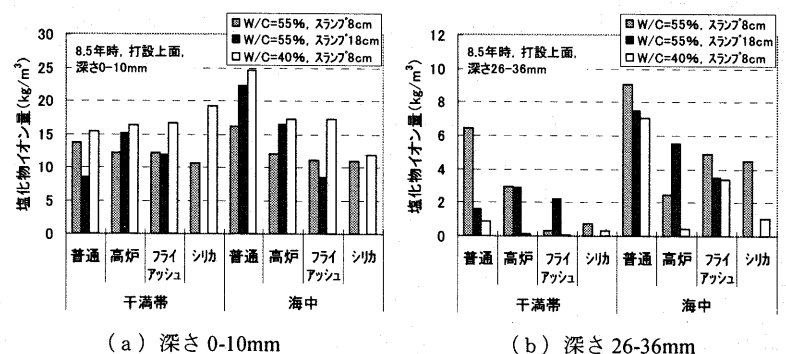


Fig.5 供試体の塩化物イオン量 (コンクリート配合の影響)
(Chloride Content (Effect of Mix Proportion))

があったが、8.5 年時には明確な傾向は認められなかった。また、内部の 26-36mm には明確な傾向が認められなかった。

(2) 表面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数

暴露試験で得られた各供試体の塩化物イオン量の分布を基に、表

面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数を算出した結果を Table 7 に示す。

(a) 表面塩化物イオン量

①表面塩化物イオン量の経年変化

高炉セメント B 種の No.1, No.3 及び No.5 供試体の干満帯及び海中における表面塩化物イオン量の経年変化を Fig.8 に示す。

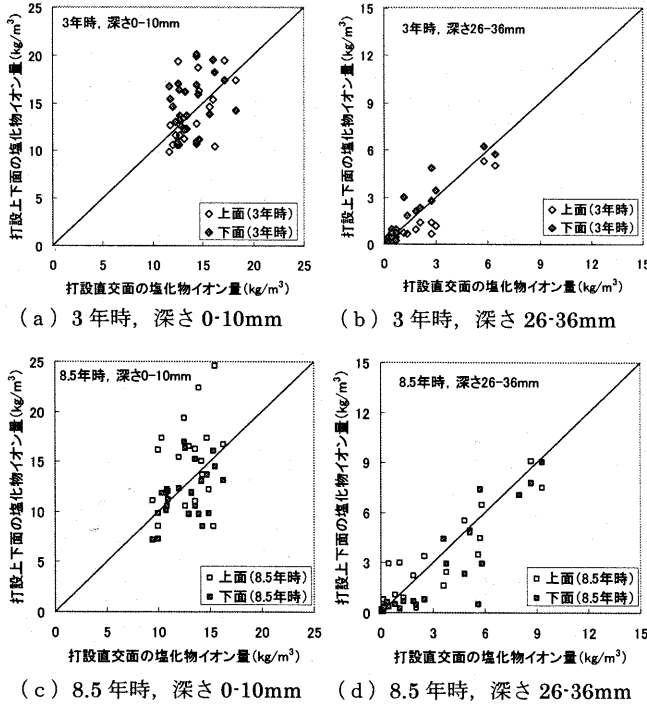


Fig.6 浸透面の違いによる塩化物イオン量の違い

(Chloride Content (Effect of Direction on Chloride Penetration))

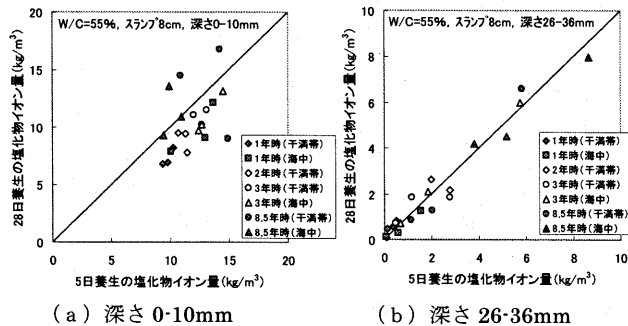


Fig.7 養生期間の違いによる塩化物イオン量の違い

(Chloride Content (Effect of Age at the time of Exposure))

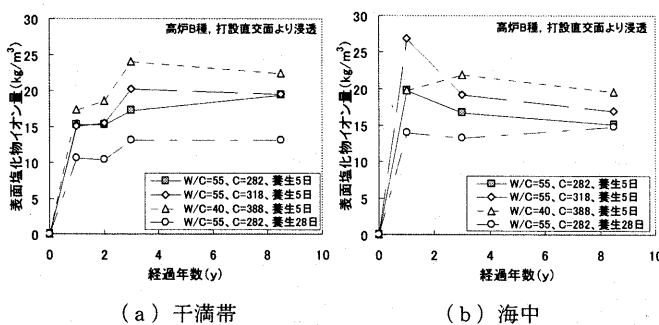


Fig.8 表面塩化物イオン量 (高炉セメント B 種)

(Amount of Chloride on the Surface (OPC+BS))

Fig.8 に一例を示すように, 供試体の種類にかかわらず, 表面塩化物イオン量は経年とともに増加し, 暴露 3 年時以降, 一定値に収束していく傾向があった。ただし, 前述のように, 貝や汚れの影響が考えられる海中の供試体では, 全 36 体中, 26 体において, 3 年時から 8.5 年時における表面塩化物イオン量の低下が認められた。

②表面塩化物イオン量と単位セメント量の関係

Table 7 表面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数

(Amount of Chloride on the Surface and Diffusion Coefficient)

セメント種類		普通セメント		高炉B種		フライッシュB種		普通セメント+シリカ			
暴露場所	No. 浸透面	年数	C ₀ (kg/m ³)	D (cm ² /s)	C ₀ (kg/m ³)	D (cm ² /s)	C ₀ (kg/m ³)	D (cm ² /s)	C ₀ (kg/m ³)	D (cm ² /s)	
干満帯	No.1 直交	1	14.6	3.11E-08	15.3	1.84E-08	12.9	3.82E-08			
		2	13.3	4.58E-08	15.3	2.04E-08	13.1	4.06E-08	15.1	2.05E-08	
		3	15.9	2.61E-08	17.2	1.17E-08	15.7	1.71E-08	17.1	1.14E-08	
		8.5	15.9	1.99E-08	19.4	5.20E-09	15.1	7.90E-09	19.7	3.70E-09	
	No.2 上面	2	14.2	3.81E-08	13.9	2.75E-08	11.4	2.64E-08	11.4	2.08E-08	
		3	13.6	2.35E-08	16.4	8.80E-09	13.9	1.43E-08	14.8	9.30E-09	
		8.5	15.2	2.48E-08	17.8	9.00E-09	19.1	5.50E-09	20.6	5.30E-09	
	No.2 下面	2	9.3	9.19E-08	17.6	2.00E-08	16.8	6.30E-08	18.3	1.24E-08	
		3	14.2	4.81E-08	18.0	1.29E-08	19.2	2.46E-08	23.0	9.10E-09	
		8.5	9.9	1.59E-08	13.4	3.70E-09	11.8	1.77E-08	19.9	4.80E-09	
	No.3 直交	1	15.1	3.02E-08	15.1	1.50E-08	14.0	3.10E-08			
		2	14.8	3.78E-08	15.5	4.50E-09	13.9	5.87E-08			
		3	14.2	2.93E-08	20.2	9.60E-09	17.6	1.80E-08			
		8.5	17.8	1.16E-08	19.5	4.20E-09	16.2	7.70E-09			
	No.4 上面	2	10.6	2.99E-08	12.7	1.13E-08	10.8	3.41E-08			
		3	12.4	2.04E-08	19.0	7.30E-09	16.4	1.45E-08			
		8.5	10.3	8.70E-09	20.3	7.90E-09	18.9	7.60E-09			
	No.4 下面	2	1.2	5.47E-08	17.4	2.20E-08	17.4	2.95E-08			
		3	19.6	2.87E-08	27.8	1.11E-08	20.7	1.87E-08			
		8.5	18.4	1.37E-08	17.9	4.10E-09	14.0	5.60E-09			
	No.5 直交	1	19.0	1.62E-08	17.3	1.12E-08	16.4	1.41E-08			
		2	15.0	2.97E-08	18.6	1.15E-08	19.0	1.61E-08	16.2	1.21E-08	
		3	17.8	1.31E-08	24.0	7.20E-09	19.8	1.04E-08	19.2	6.50E-09	
		8.5	15.9	6.10E-09	22.4	1.70E-09	23.2	3.70E-09	28.6	2.40E-09	
	No.6 上面	2	13.7	1.56E-08	14.6	8.10E-09	12.8	1.93E-08	18.7	1.02E-08	
		3	17.0	9.80E-09	15.0	8.30E-09	15.1	8.90E-09	30.0	5.20E-09	
		8.5	21.3	5.20E-09	23.6	2.80E-09	23.5	3.70E-09	30.0	2.40E-09	
No.6 下面	2	16.1	2.16E-08	19.1	1.48E-08	21.1	2.27E-08	24.2	5.90E-09		
	3	18.2	1.23E-08	27.1	7.30E-09	22.8	1.16E-08	27.4	5.30E-09		
	8.5	16.5	5.10E-09	24.2	2.00E-09	18.0	3.90E-09	24.8	2.30E-09		
No.7 直交	1	11.2	3.34E-08	10.6	1.94E-08	9.3	5.32E-08				
	2	11.9	4.16E-08	10.4	2.85E-08	11.9	4.40E-08				
	3	14.4	2.24E-08	13.1	1.74E-08	14.1	2.11E-08				
	8.5	18.4	2.05E-08	13.1	1.74E-08	19.2	5.60E-09				
海中	No.1 直交	1	18.1	5.00E-08	19.8	2.05E-08	13.7	4.28E-08			
		3	16.2	5.54E-08	16.7	1.58E-08	17.6	2.10E-08	16.5	1.82E-08	
		8.5	11.8	1.36E-07	15.1	1.15E-08	13.1	1.68E-08	17.7	1.42E-08	
	No.2 上面	3	21.6	3.52E-08	17.8	9.50E-09	13.8	1.88E-08	16.4	1.51E-08	
		8.5	16.7	6.99E-08	16.7	8.50E-09	16.5	1.38E-08	15.4	1.15E-08	
		No.2 下面	3	17.9	6.18E-08	17.9	1.17E-08	14.5	2.30E-08	21.5	1.65E-08
			8.5	10.5	2.33E-07	16.6	9.50E-09	12.3	1.75E-08	16.1	1.80E-08
	No.3 直交		1	18.2	4.48E-08	26.9	1.40E-08	16.5	4.31E-08		
			3	21.2	4.76E-08	19.2	1.31E-08	17.3	2.57E-08		
		8.5	16.4	5.90E-08	16.9	1.28E-08	14.1	1.69E-08			
	No.4 上面	3	21.7	2.92E-08	26.4	1.38E-08	15.2	1.66E-08			
		8.5	22.2	4.90E-08	21.9	1.28E-08	12.4	1.14E-08			
		No.4 下面	3	16.0	5.89E-08	18.9	1.72E-08	17.5	2.51E-08		
			8.5	12.4	1.04E-07	13.0	9.30E-09	8.1	2.91E-07		
	No.5 直交		1	21.2	2.32E-08	19.8	1.35E-08	21.5	2.35E-08		
			3	22.2	1.94E-08	21.9	9.70E-09	19.3	1.51E-08	23.8	1.53E-08
		8.5	18.1	2.75E-08	19.6	6.40E-09	16.3	8.60E-09	21.4	6.30E-09	
	No.6 上面	3	25.6	1.60E-08	19.9	1.06E-08	22.1	1.15E-08	21.1	1.01E-08	
		8.5	27.9	1.31E-08	23.9	3.70E-09	25.0	8.00E-09	19.5	6.70E-09	
		No.6 下面	3	22.5	1.88E-08	18.3	1.21E-08	15.8	1.45E-08	26.9	1.01E-08
			8.5	16.3	3.21E-08	19.3	5.40E-09	17.2	5.80E-09	17.9	5.80E-09
No.7 直交	1		16.1	4.83E-08	14.0	1.93E-08	10.7	3.85E-08			
	3		14.6	6.63E-08	13.3	1.79E-08	12.5	2.63E-08			
	8.5	15.1	5.67E-08	14.8	1.27E-08	12.6	1.46E-08				

コンクリートの単位セメント量が増加するとともに表面部に吸着される塩化物イオン量も増加すると推察されることから、筆者らは、表面塩化物イオン量と単位セメント量の間には相関があることを考察している¹⁰⁾。この考察に基づき、暴露試験によって得られた表面塩化物イオン量を、暴露場所及びセメント種類ごとに式(2)のように帰した。

$$C_0 = a \cdot W_c \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 C_0 ：表面塩化物イオン量 (kg/m^3)

W_c ：単位セメント量 (kg/m^3)

a ：定数

ここでは、表面塩化物イオン量の経年変化を考慮せず、暴露3年時以降のほぼ一定値に収束したと考えられる範囲のデータを用いた。ただし、海中の暴露8.5年時のデータは貝や汚れなどの影響を受けた可能性があるため、用いないこととした。

一方、「土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)」では、表面塩化物イオン量を汀線からの距離によって推定する方法を示しており、最も厳しい「飛沫帯」で $13.0 (\text{kg/m}^3)$ と定めている⁸⁾。

式(2)の回帰結果を、コンクリート標準示方書の「飛沫帯」の値と併せて Fig.9 に示す。

同図より、表面塩化物イオン量は単位セメント量の増加に伴って増加する傾向が認められた。また、試験結果をコンクリート標準示方書の値と比較すると、ほとんどの試験結果がコンクリート標準示方書よりも大きな値であった。このことより、本試験のような特に厳しい海洋環境下では、実際の表面塩化物イオン量がコンクリート標準示方書で推定される表面塩化物イオン量を上回る可能性があると考えられる。さらに、同図より、表面塩化物イオン量の値は大きくばらついていることが確認できる。このばらつきを適切に評価することが今後の課題と考えられる。

(b) 見掛けの拡散係数

①見掛けの拡散係数の経年変化

高炉セメントB種のNo.1, No.3及びNo.5供試体の干満帯及び海中における表面塩化物イオン量の経年変化を Fig.10 に示す。

Fig.10 に一例を示すように、供試体の種類にかかわらず、見掛けの拡散係数は経年とともに減少する傾向があった。

②見掛けの拡散係数と水セメント比の関係

各供試体の塩化物イオン量分布に確認された傾向より、見掛けの拡散係数に影響を及ぼす要因として、暴露場所、セメント種類及び水セメント比が考えられる。コンクリート標準示方書(施工編)に

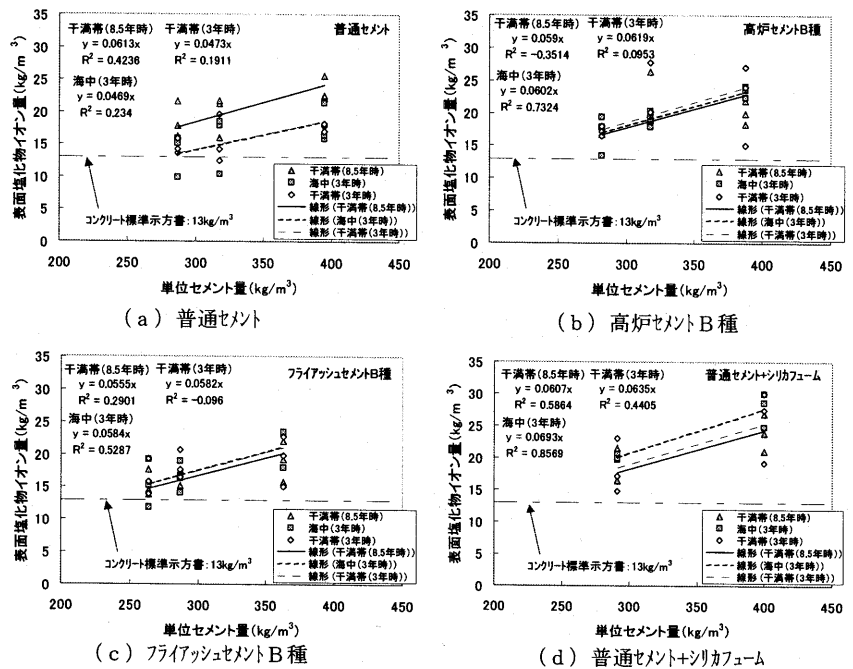


Fig.9 表面塩化物イオン量と単位セメント量の関係

(Relationship between Amount of Chloride on the Surface content and Cement Content)

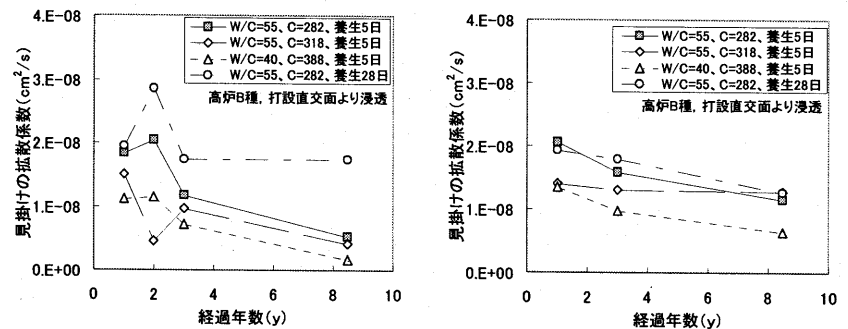


Fig.10 見掛けの拡散係数 (高炉セメントB種)

(Diffusion Coefficient (OPC+BS))

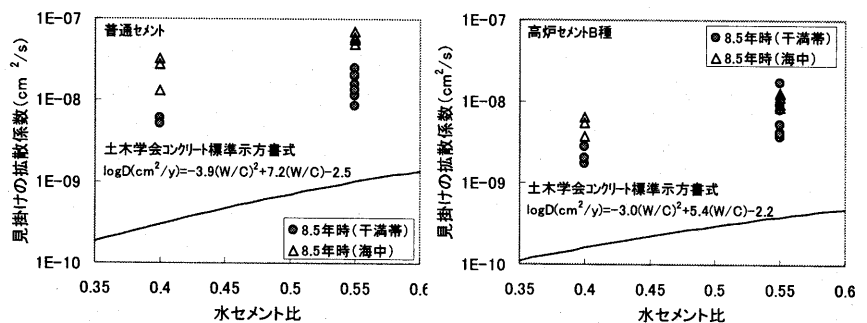


Fig.11 見掛けの拡散係数と水セメント比の関係

(Relationship between Diffusion Coefficient and W/C)

おいても、普通ポルトランドセメント及び高炉セメントやシリカフュームを使用する場合について、見掛けの拡散係数を水セメント比によって推定する方法が示されている¹³⁾。普通セメント及び高炉B種の供試体の暴露8.5年時における見掛けの拡散係数と水セメント比の関係をコンクリート標準示方書の式と併せて Fig.11 に示す。な

お、コンクリート標準示方書に示されている式の単位は (cm²/y) であるので、図中、単位を (cm²/s) に統一して示した。

同図より、普通セメント及び高炉セメントとも、見掛けの拡散係数は水セメント比が高くなるほど大きくなる傾向があった。また、干満帯と海中の見掛けの拡散係数を比較すると、海中の方が大きな値を示す傾向があった。試験結果をコンクリート標準示方書の式と比較すると、全ての試験結果がコンクリート標準示方書よりも大きな値であった。このことより、厳しい環境下における見掛けの拡散係数は、コンクリート標準示方書の推定値よりも大きくなる可能性があると考えられる。また、表面塩化物イオン量と同様、見掛けの拡散係数もばらつきの大きな結果となっており、これを適切に評価することが今後の課題と考えられる。

2. 急速塩化物イオン浸透性試験

(1) 電流量に影響を及ぼす要因

前述のとおり、急速塩化物イオン浸透性試験によって得られる電流量は、その値が大きいくほど、塩化物イオン浸透性が高いことを示している。配合条件が塩化物イオン浸透性に及ぼす影響を把握するために、試験結果を式 (3) によって回帰した。ここで、要因としたのは水セメント比、単位セメント量及び混和材置換率である。

$$C_{10} = a \cdot (W/C) + b \cdot W_c + c \cdot P_{Ad} + d \cdot \dots (3)$$

ここに、 C_{10} : 電流量 (クーロン)

W/C : 水セメント比 (%)

W_c : 単位セメント量 (kg/m³)

P_{Ad} : 混和材置換率 (%)

a, b, c, d : 係数

回帰結果を Table 8 に示す。

本試験の範囲において、電流量は、全てのセメント種類において水セメント比が高いほど高くなり、また、高炉セメントを除き、単位セメント量が多いほど高くなる結果となった。単位セメント量が多いほど電流量が高くなる理由として、単位セメント量が増加することによって 1m³あたりの骨材量が減少するため、塩化物イオンが

Table 8 式 (3) の係数

セメント種類	式 (3) の各係数の値				決定係数 R ²
	a	b	c	d	
普通セメント	46.528	6.654	—	-3912.813	0.886
高炉セメント	3.646	-0.00587	-5.430	394.986	0.776
フライッシュセメント	20.298	1.747	-2.344	-945.637	0.528
普通セメント+シリカフェーム	6.640	0.557	-13.000	-517.264	0.974

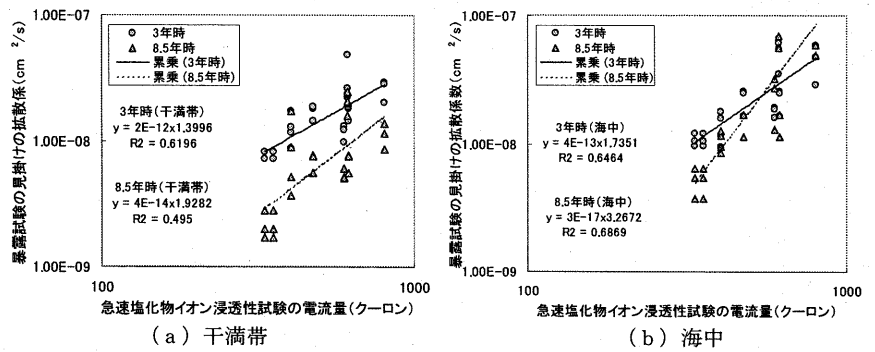


Fig.12 見掛けの拡散係数と電流量の関係

(Relationship between Diffusion Coefficient and Total Charge Passed)

浸透しやすくなることなどが考えられる。なお、高炉セメントについては、単位セメント量にかかる係数 b の値が小さいことから、その影響はほとんどないという結果であり、今後さらに多くのデータを蓄積し、その傾向を確認する必要がある。また、全ての混合セメントにおいて、混和材置換率が下がるほど、電流量が高くなる結果となった。

(2) 暴露試験結果との関係

前述のように、既往の研究により、急速塩化物イオン浸透性試験の電流量の対数と実環境における見掛けの拡散係数の対数との間には正の相関があると報告されている¹³⁾。本研究における急速塩化物イオン浸透性試験結果と暴露試験 3 年時及び 8.5 年時における干満帯及び海中の見掛けの拡散係数との関係を Fig.12 に示す。同図より、急速塩化物イオン浸透性試験結果と暴露試験結果には、ばらつきはあるものの、相関があることが確認された。このことより、急速塩化物イオン浸透性試験で得られた電流量を、実環境における見掛けの拡散係数として評価することが可能であることが考えられる。

3. 室内浸漬試験

各温度条件で浸漬した供試体の試験開始後 140 日間における塩化物イオン量の分布及び見掛けの拡散係数と試験期間の関係を Fig.13 に示す。

温度条件の異なる人工海水に浸漬した供試体の塩化物イオン量を

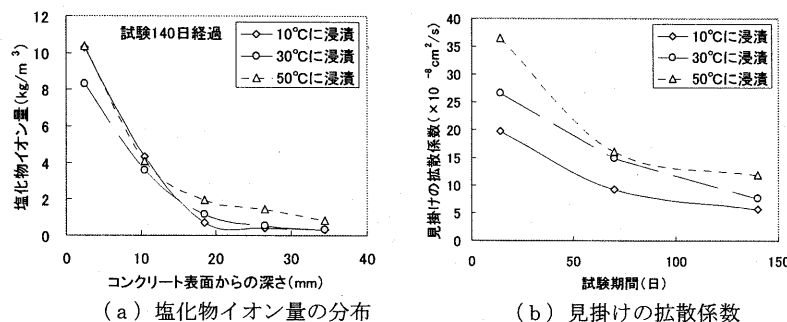


Fig.13 室内浸漬試験結果

(Results of Immersing Test)

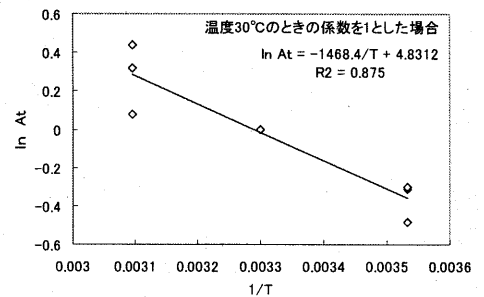


Fig.14 アレニウスプロット

(Arrhenius Plot)

比較すると、表層部の 0-5mm では 30℃に浸漬した供試体の値が若干小さいものの、ほぼ同程度であった。内部については、海水の温度が高いほど多くの塩化物イオンが浸透する傾向が認められた。見掛けの拡散係数についても、海水の温度が高いほど大きな値を示す傾向となった。自然界の多くの反応の速度定数は、温度が高くなるほど指数関数的に反応が進行するというアレニウスの理論に従うとされている¹⁴⁾。室内促進試験で得られた海水温度ごとの見掛けの拡散係数について、30℃における見掛けの拡散係数を 1 とした場合のアレニウスプロットを Fig.14 に示す。同図より、室内浸漬試験の結果は概ねアレニウスの理論に従っており、30℃の見掛けの拡散係数を 1 とすれば 10℃は 0.7 程度であり、50℃は 1.3 程度であった。

IV.まとめ

- a. 暴露試験におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透量は、経年とともに増加する傾向があり、干満帯よりも海中の方が多い傾向があった。また、混合セメントを使用した供試体の方が普通ポルトランドセメントを使用した供試体よりも少ない傾向があり、同一セメント種類では、水セメント比が高いほど多くなる傾向があった。スランプ、塩化物イオン浸透面及び養生材齢などは、暴露 8.5 年時の塩化物イオン量にほとんど影響を及ぼさなかった。
- b. 本試験の範囲において、表面塩化物イオン量は単位セメント量が多いほど多くなる傾向があり、ほとんどの試験結果が土木学会コンクリート標準示方書の「飛沫帯」の推定値である 13kg/m³ よりも大きな値となった。
- c. 普通ポルトランドセメント及び高炉セメント B 種を使用したコンクリートの見掛けの拡散係数は水セメント比が高いほど大きくなる傾向があった。さらに、見掛けの拡散係数は干満帯と海中の違いによっても影響を受け、海中の方が干満帯よりも大きな値を示す傾向があった。
- d. 普通ポルトランドセメント及び高炉セメント B 種を使用したコンクリートの干満帯及び海中の見掛けの拡散係数は、土木学会コンクリート標準示方書の推定式よりも大きな値を示した。
- e. 急速塩化物イオン浸透性試験では、暴露試験と同様に水セメント比が高いほど、また単位セメント量が多いほど塩化物イオンの浸透性が高くなる結果となり、混合セメントを使用する場合は、混和材置換率が低いほど塩化物イオンの浸透性が高くなる結果となった。
- f. 本試験の範囲において、急速塩化物イオン浸透性試験結果の対数と暴露試験の見掛けの拡散係数の対数との間には正の相関が認められた。
- g. 室内浸漬試験において、見掛けの拡散係数は、アレニウスの理論に従って温度が高いほど大きな値となり、30℃を 1 とした場合、10℃で 0.7 程度、50℃で 1.3 程度となる結果であった。

V.おわりに

本報では、コンクリート中への塩化物イオン浸透性に影響を及ぼす要因について検討した。今後、これらのデータを基に、精度の高い劣化予測手法の検討、表面塩化物イオン量及び見掛けの拡散係数のばらつきの評価及び確率論を取り入れた劣化予測手法について検討を進める予定である。

謝 辞

本研究の一部は、東京電力（株）との共同研究で行われたものです。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本, 本橋, ミスラ, 堤; コンクリートの塩化物浸透性に及ぼす施工条件の影響, 土木学会第 46 回年次学術講演会, 第 V 部門, (1991.9), pp.312-313.
- 2) Motohashi ほか; Chloride Penetration into Concrete under Simulated Field Conditions, 鹿島技術研究所年報, 第 39 号, (1991), pp.1-6
- 3) 本橋, ミスラ, 須田, 山本, 横関; 配合及び水と和度がコンクリートの塩素イオン浸透性に及ぼす影響, 鹿島技術研究所年報, 第 40 号, (1992), pp.1-8.
- 4) 堤, ミスラ, 横関, 本橋; 混和材の種類及び置換率がコンクリート塩化物浸透性に及ぼす影響, 土木学会第 48 回年次学術講演会, 第 V 部門, (1994) .
- 5) 本橋, ミスラ, 山本, 横関, 岡田; 海洋環境に暴露したコンクリート供試体中への塩化物の浸透, 鹿島技術研究所年報, 第 41 号, (1993), pp.1-6.
- 6) 岡田, 堤, 横関, 本橋; コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度の定量化に関する実験的検討, 土木学会第 50 回年次学術講演会, 第 V 部門, (1995), pp.286-287.
- 7) Yamamoto ほか; Proposed Durability Design For RC Marine Structures, Proceeding of the International Conference under Service Conditions, CONSEC'95, Vol.1, (1995), pp.544-553.
- 8) Yokozeki ほか; A Rational Model to Predict the Service Life of RC Structures in Marine Environment, Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, (1997), pp.777-799.
- 9) 横関, 岡田, 渡邊, 堤; ひび割れを有する鉄筋コンクリートの塩化物浸透挙動と寿命予測に関する研究, コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集, (1998), pp.1-6.
- 10) Watanabe ほか; Chloride Penetration into Concrete Specimens Exposed in Marine Environment, Proceedings Third International Conference Concrete Under Service Conditions, (2001), pp.538-545.
- 11) 鳥居ら; コンクリートの塩素イオン透過性に関する研究, セメント技術大会, 第 44 回, (1990), pp.584-589.
- 12) 守分, 三浦, 長滝, 大即; 既設コンクリート構造物に施工した表面塗装材料の耐久性評価, 土木学会論文集, No.520/V-28, (1995), pp.99-110.
- 13) 土木学会; コンクリート標準示方書 (施工編), (2002) .
- 14) ムーア; 物理化学 (第 4 版), 東京化学同人, (1974) .