

論文

[1135] コンクリートの乾湿にともなう塩化物の移動について

正会員 梶田佳寛 (建設省建築研究所)
 正会員○天沼邦一 (エヌエムビー中央研究所)
 正会員 吉崎芳郎 (八洋コンクリートコンサルタント)
 正会員 御所窪邦男 (八洋コンクリートコンサルタント)

1. はじめに

近年、海浜・海洋構造物が多く建設されるようになって、鉄筋コンクリート中への塩化物の浸透や塩化物によって不具合の生じた構造物の補修が行われるようになり、既にコンクリート中に含まれた塩化物量とともに、浸透した塩化物が種々の条件により更にコンクリート内部に移動する現象が問題となりつつある。これらの条件には、更なる塩化物の付加、乾燥湿潤および温度変化等の気候の影響、中性化の度合いなどが考えられる。[1]

これらの塩化物移動の条件のうち、今回の試験においてはコンクリート中に既に浸透してしまった塩化物が、主として乾湿および温度等の影響で、どのように移動するのかについて検討したものである。

2. 試験の概要

2.1 試験体

試験体は、表-1に示す調合のコンクリートを用いて10×10×40cmの角柱に成型し、その打設面、底面および端部をエポキシ樹脂でシールしたものを、材令28日で海洋環境下の飛沫帯に2年間暴露し、塩化物を浸透させたものである。[2]

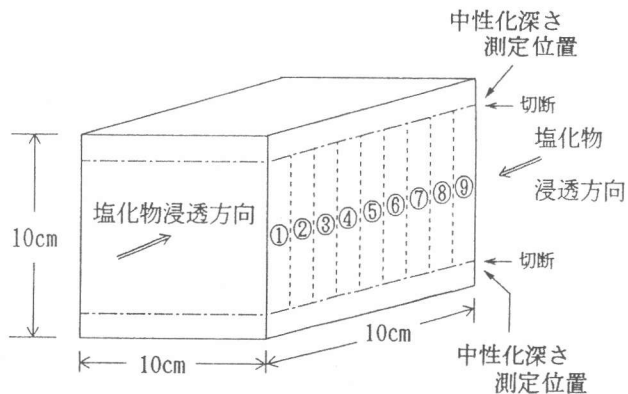
塩化物の移動を計測するための試験体は、上記試験体を室内に約3ヵ月保存した後、端部を除く位置から10×10×10cmの立方体を2個切出し、切断面および打設面、底面の4面をエポキシ樹脂でシールしたものである。

2.2 保存条件

各試験体の保存条件を表-2に示す。

2.3 塩化物分析方法

コンクリート中に含まれる塩化物量(塩化物イオン量)は、図-1に示すように試験体を側面(塩化物浸透面)から1cm毎にカットし、JCI 規準「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に示される全塩分および可溶性塩分の分析方法に準じて行った。



①~④, ⑥~⑨は10mm, ⑤は20mmの厚さでカット

図-1 試験体の塩化物分析試料採取位置

2.4 含水率測定方法

カットした試験片を粉碎前に 105°Cで乾燥し、乾燥前後の重量変化を含水率とした。

表-1 コンクリートの調合と物性試験結果

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					スラブ (cm)	空気量 (%)	塩化物量 (kg/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad.				7日	28日
20	65	48	185	285	869	940	0.028	18.5	4.3	0.137	191	308

表-2 試験体の乾湿等の保存条件

試験体No.	保存条件	保 存 環 境	測定材令
1, 2, 3, 4	湿 潤	霧室 (温度20°C, 湿度95RH%以上)	1, 3, 6, 12ヵ月
5, 6, 7	乾湿繰り返し	霧室1ヵ月, 乾燥 (温度20°C, 湿度60RH%) 1ヵ月を1サイクルとし, 1, 2, 4サイクル繰り返し	2, 4, 8ヵ月
8, 9	乾 燥	乾燥 (温度30°C, 湿度60RH%)	3, 6ヵ月
10		乾燥 (温度20°C, 湿度60RH%)	12ヵ月
11	密 閉	試験前3ヵ月気乾保存後, 1材料樹脂による全面被覆	12ヵ月
12		霧室1ヵ月吸水後, 1材料樹脂による全面被覆	12ヵ月
13	屋外暴露	茅ヶ崎海岸より約2.5km離れた建屋屋上に暴露	12ヵ月
14	基 準	初期値測定用	試験開始時

(注) 試験体は各保存条件, 各材令ごとに1個ずつとした。

2.5 中性化深さ測定方法

中性化深さ測定用に切断した試験片を用いて, フェノールフタレインの1%アルコール溶液を噴霧し, 赤色に変色しない部分の表面からの深さを中性化深さとした。

3. 試験結果

3.1 暴露期間中の塩化物浸透量

海洋環境下に暴露しておいた期間中の全塩化物浸透状況は暴露開始後材令6, 12, 24ヵ月で確認した。試験結果を表-3および図-2に示す。なお材令24ヵ月の測定結果を基準コンクリートの全塩化物量とした。

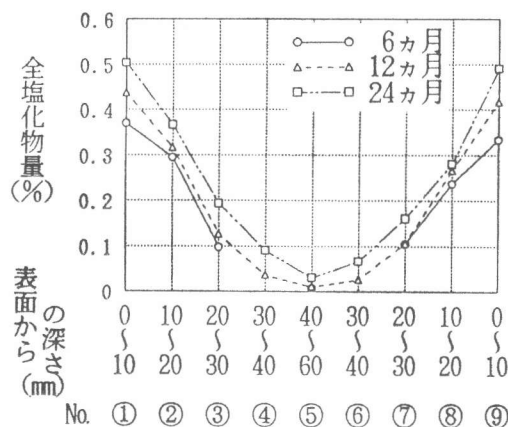


図-2 全塩化物の分布

表-3 暴露期間中の全塩化物分析結果

曝露材令	全 塩 化 物 量 (対絶対乾コンクリート重量: Cl ⁻ %)								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
6ヵ月	0.369	0.294	0.097	--	0.007	--	0.104	0.236	0.332
12ヵ月	0.435	0.315	0.125	0.035	0.010	0.025	0.105	0.265	0.415
24ヵ月	0.502	0.365	0.192	0.090	0.030	0.066	0.160	0.280	0.490

3. 2 各種の保存条件下における塩化物量・含水率および中性化深さ測定結果

試験体の保存条件別および表面からの深さ別の塩化物量（全塩化物量および可溶性塩化物量）を表-4に、含水率を表-5に示す。

なお試験開始時の中性化深さは約2mmであり、各試験終了時の中性化深さもほぼ同等であった。

表-4 塩化物分析結果

試験体 No.	保存条件	測定材令	塩 化 物 量 (対絶対乾コンクリート重量: Cl ⁻ %)										
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均	
1	湿 潤	1ヵ月	0.463	0.426	0.223	0.100	0.044	0.093	0.177	0.341	0.342	0.225	
			0.327	0.246	0.114	0.050	0.016	0.045	0.090	0.178	0.195	0.127	
2		3ヵ月	0.347	0.363	0.279	0.108	0.054	0.119	0.250	0.324	0.248	0.214	
			0.242	0.227	0.165	0.060	0.026	0.068	0.147	0.205	0.172	0.133	
3		6ヵ月	0.329	0.336	0.280	0.157	0.067	0.119	0.204	0.272	0.250	0.208	
			0.259	0.253	0.193	0.114	0.047	0.082	0.147	0.207	0.195	0.154	
4		12ヵ月	0.255	0.278	0.251	0.160	0.105	0.114	0.194	0.239	0.218	0.191	
			0.183	0.191	0.169	0.103	0.060	0.076	0.127	0.154	0.155	0.127	
5		乾 湿 繰り返し	2ヵ月 1サケル	0.477	0.364	0.206	0.084	0.031	0.081	0.186	0.331	0.372	0.216
				0.251	0.182	0.102	0.038	0.011	0.036	0.091	0.166	0.194	0.108
4ヵ月 2サケル			0.427	0.383	0.224	0.109	0.053	0.103	0.186	0.324	0.336	0.219	
			0.282	0.223	0.133	0.054	0.024	0.054	0.102	0.207	0.240	0.134	
8ヵ月 4サケル	0.353		0.343	0.266	0.118	0.056	0.134	0.213	0.306	0.207	0.205		
	0.259		0.251	0.188	0.079	0.033	0.091	0.148	0.214	0.169	0.146		
8	乾 燥 30℃, 60RH%	3ヵ月	0.427	0.383	0.224	0.109	0.053	0.103	0.186	0.324	0.336	0.219	
			0.282	0.223	0.133	0.054	0.024	0.054	0.102	0.207	0.240	0.134	
9	6ヵ月	0.466	0.415	0.248	0.108	0.042	0.069	0.165	0.307	0.282	0.214		
		0.390	0.320	0.174	0.071	0.027	0.041	0.114	0.245	0.230	0.163		
10	乾 燥 20℃, 60RH%	12ヵ月	0.477	0.339	0.207	0.100	0.048	0.101	0.216	0.343	0.361	0.224	
			0.359	0.251	0.153	0.066	0.018	0.040	0.166	0.266	0.310	0.164	
11	密 閉	12ヵ月	0.488	0.330	0.187	0.108	0.050	0.070	0.187	0.296	0.464	0.223	
			0.311	0.215	0.129	0.061	0.026	0.043	0.103	0.218	0.362	0.149	
1ヵ月 霧室養生後 12ヵ月		0.491	0.342	0.218	0.116	0.043	0.064	0.123	0.241	0.430	0.211		
		0.344	0.234	0.143	0.076	0.023	0.038	0.078	0.158	0.292	0.141		
13	屋外暴露	12ヵ月	0.432	0.359	0.187	0.134	0.034	0.074	0.174	0.313	0.312	0.205	
			0.353	0.265	0.132	0.060	0.017	0.045	0.130	0.238	0.223	0.148	
14	基準コンクリート	—	0.502	0.365	0.192	0.090	0.030	0.066	0.160	0.280	0.490	0.220	
			0.244	0.175	0.096	0.048	0.013	0.038	0.088	0.159	0.224	0.109	

注) 塩化物量欄の上段は全塩化物量を示し、下段は可溶性塩化物量を示す。

表-5 含水率測定結果

試験体 No.	含 水 率 (%)									
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均
1	5.05	3.76	3.19	3.15	3.24	3.46	3.29	3.47	4.20	3.60
2	4.43	3.88	4.25	3.51	3.53	3.60	4.08	4.02	3.82	3.86
3	4.06	3.92	3.89	4.23	3.78	4.16	4.17	3.78	4.27	4.00
4	3.99	3.67	4.30	3.78	4.48	4.21	4.40	3.92	4.10	4.13
5	3.78	3.13	3.34	2.89	2.85	2.84	2.84	3.02	3.38	3.09
6	3.19	2.83	2.93	2.96	3.16	3.10	3.47	2.98	3.07	3.08
7	3.75	3.67	3.96	3.38	3.32	3.42	3.64	3.85	3.24	3.56
8	4.25	3.19	3.08	3.10	3.09	3.16	2.66	2.76	2.35	3.07
9	2.18	2.78	2.86	2.72	2.51	2.31	2.56	2.19	1.94	2.46
10	2.81	2.57	2.59	2.53	2.97	2.88	2.73	2.44	2.63	2.71
11	3.01	2.62	2.76	3.25	3.62	3.31	2.90	3.31	3.47	3.19
12	4.19	3.73	3.59	4.30	3.33	3.46	3.28	3.48	3.77	3.65
13	3.56	3.11	2.66	2.53	2.97	2.81	2.67	2.85	3.03	2.92

全塩化物量の平均値と材令の関係を図-3に、全塩化物量および可溶性塩化物量について、表面からの深さ別にそれぞれの塩化物量の合計を100とした時の各位置における比率（塩化物量比）の分布を図-4に示す。図-4では浸透面の2面からの同一深さの平均値を用いた。また、含水率の深さ方向の分布を図-5に示す。

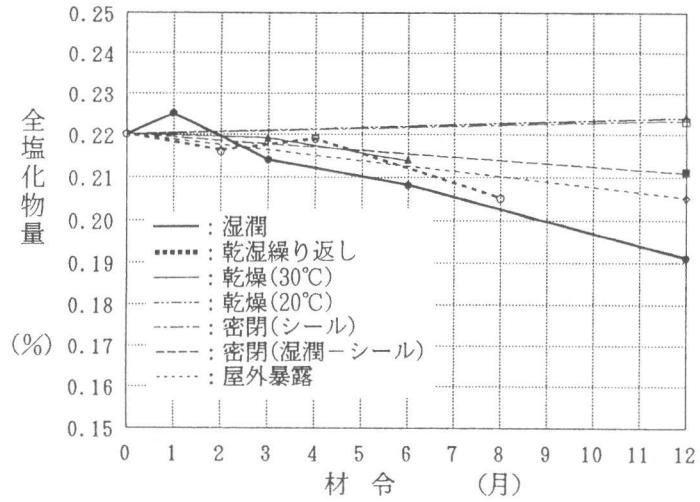


図-3 全塩化物量平均値と材令の関係

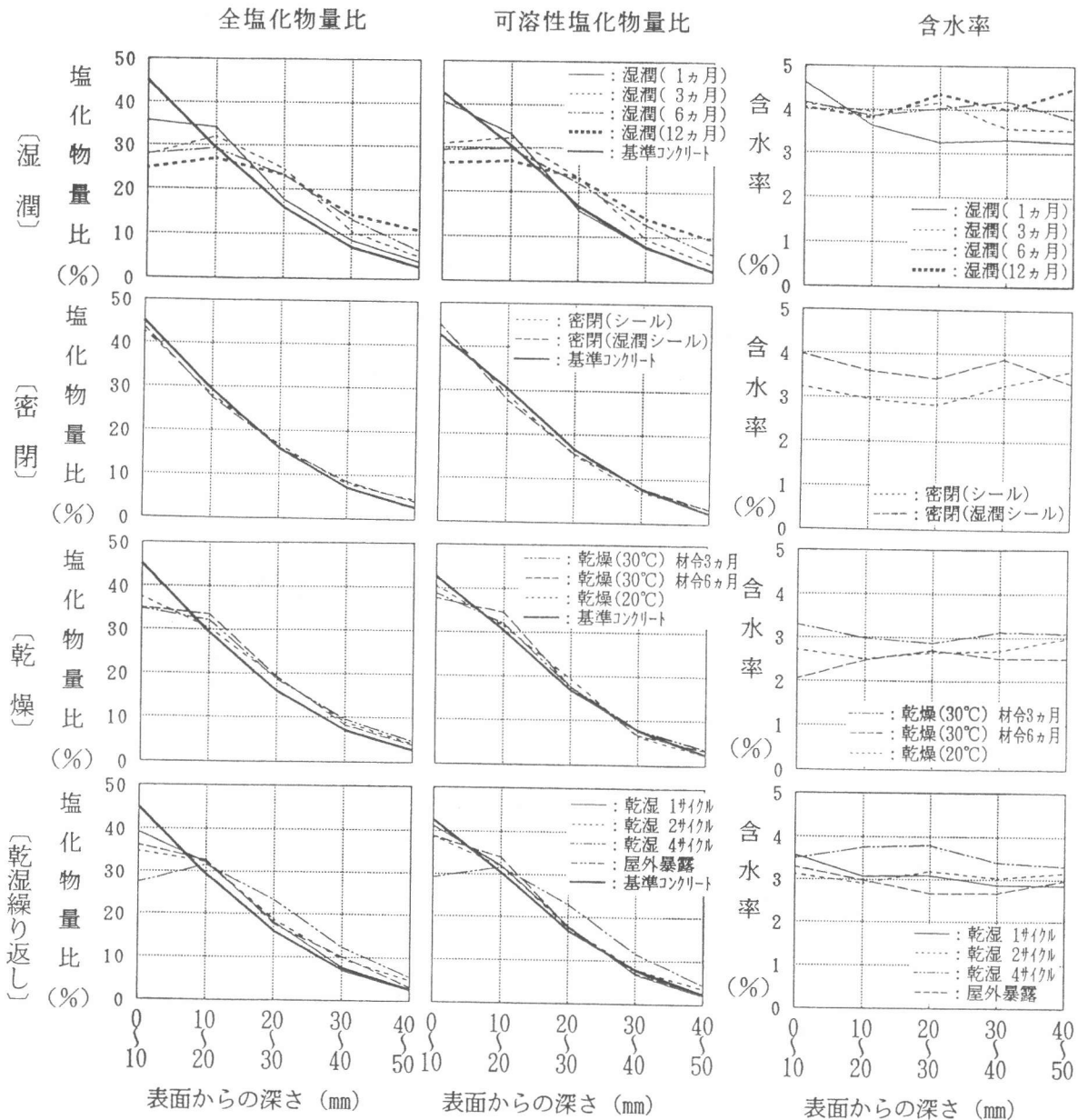


図-4 塩化物の分布

図-5 含水率の分布

4. 考察

4. 1 湿潤環境下における塩化物

図-3によれば、霧室における湿潤下の全塩化物量は、材令とともに減少する傾向にあることがわかる。この理由として、表面部分は常に水に洗われる状態になっており、塩化物が流出するためと考えられる。図-4で表面からの深さ別に見ると、特に表面から深さ1 cmまでの全塩化物量の減少が著しい。しかし、1~2 cmより深い箇所においては全塩化物量は増加の傾向を示しており、表面部分の塩化物が内部へ移動していることがうかがえる。全塩化物には可溶性のものと固定されたものがあり、可溶性塩化物が濃度勾配による拡散や、水分の浸入によって移動すると言われている。また固定化の比率は、安定性に乏しいと報告 [3]されているが、図-4によれば可溶性塩化物の挙動も同様な傾向を示しており、以下の考察では、全塩化物の移動を主として検討した。

コンクリートの含水率の変化をみると、材令1ヵ月では表面部分の含水率の増加がみられ、その後材令が進むにつれて内部の含水率が増加していくことがわかる。このことから湿潤下においては材令の経過とともに表面から内部へ水分が浸入していくことがわかる。

以上のことから、湿潤下における塩化物の移動はコンクリートの表面部分では水によって洗い流され、内部では濃度差による拡散移動だけでなく、水の浸入にともなう塩化物の移動があると考えられる。

4. 2 密閉環境下における塩化物

試験体にシールを施し外部との水分の移動がない条件下では、霧室1ヵ月後にシールしたものに若干の全塩化物量の減少がみられるが、気乾状態でシールしたものでは全塩化物の減少はみられない。またコンクリート内部での塩化物の分布をみると、全塩化物も可溶性塩化物も若干内部へ移動している傾向がみられるものの、その量はわずかで初期値からの変化は極めて少ない。含水率の分布も表面から内部までほぼ均一である。

密閉下における塩化物の移動は、水分の移動がないため、細孔溶液中の塩化物の濃度差による拡散が主な要因であると考えられる。

4. 3 乾燥環境下における塩化物

湿度60RH%の乾燥下では、全塩化物量の平均値は基準コンクリートと比較すると、20℃では若干増加し、30℃で若干減少しているが、湿潤下と異なり外部への塩化物の流失がないと考えられるため、全体としては基準コンクリートとかわっていないと言えよう。

図-4における全塩化物の分布は表面から深さ1 cmまでは減少がみられ、内部では若干の増加がみられる。このことから表面部分の塩化物が内部へ移動していることがうかがえる。可溶性塩化物についても同様な傾向がみられる。

乾燥下における含水率の分布をみると、内部よりも表面付近で小さくなっている。このことから乾燥下では、水分は内部から表面に向かって移動していくことがわかる。乾燥下での水分の移動を考えると、塩化物の移動はむしろ内部から表面部分への移動となるはずであるが、実験結果によれば、密閉下よりも更に内部への移動が大きいことが認められる。この理由として、乾燥によって表面に近い側の含水率が低下すると細孔溶液中の塩化物の濃度が高くなり、内部との濃度勾配がより大きくなって、内部へ拡散していく速度が大きくなる。この結果、水分の移動にとも

なって表面に移動する塩化物量よりも、拡散によって内部へ移動する塩化物量が多くなることが考えられる。

4. 4 乾湿繰り返しおよび暴露環境下における塩化物

乾湿繰り返しにおける塩化物の移動は、傾向として湿潤下と乾燥下のほぼ中間に位置し、塩化物の移動量は同一材令における塩化物移動量の約 1/2 の値を示している。これは今回の試験における乾湿繰り返しサイクルが 1 ヶ月湿潤、1 ヶ月乾燥の繰り返しというかなり長いサイクルで、かつ湿潤期間と乾燥期間とが同じ長さであったためと考えられる。

屋外暴露下では、全塩化物は表面から深さ 20mm までは、乾湿繰り返しと若干の違いがみられるものの、それより深い位置での塩化物の分布は、乾湿繰り返しと同程度である。表面部分で若干の差がみられるのは、屋外暴露下での降雨による試験体表面からの塩化物の流出状況が、霧室と異なるためと考えられる。しかしコンクリート内部では、少量の降雨および湿度の変化等による表面での水分の出入りの影響は受けにくいいため、屋外暴露におけるコンクリート内部の塩化物の移動は、乾湿繰り返しとほぼ同様な分布になったものと考えられた。

5. まとめ

既に塩化物が浸透してしまったコンクリート中の塩化物の移動について、水の挙動が与える影響を検討した結果、以下のことが推察された。

- ① コンクリート表面を水が流れると、塩化物は外部に移動し洗い流される。
- ② 湿潤下では、塩化物は水分の浸入と、濃度勾配による拡散によって内部へ移動する。
- ③ 密閉下では、塩化物は濃度勾配による拡散によってのみ内部へ移動する。
- ④ 乾燥下では、表面側の含水率の低下による塩化物濃度の上昇によって濃度勾配がより大きくなり塩化物が内部へ移動する。

なお、本試験を行うにあたり、東京大学生産技術研究所、魚本健人教授の御好意により伊豆海岸公園内の暴露試験場に、試験体を置かせて頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.1-14，1991.8
- 2) 天沼邦一・柘田佳寛・根本徹・瀬上光男：表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリート造の塩害防止抑制効果に関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.1，pp.551-556，1991.6
- 3) 染谷健司・大即信明・Tiong-Huan Wee・長滝重義：セメント硬化体中における塩素イオンの固定化性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.603-608，1989.6