

## 海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察

SOME CONSIDERATION FOR THE CHLORIDE CONTENT  
OF THE CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT大 即 信 明\*・森 好 生\*\*・関 博\*\*\*  
By Nobuaki OHTSUKI, Yoshio MORI and Hiroshi SEKI

## 1. ま え が き

コンクリート部材の耐久性に及ぼす大きな要因の 1 つとして、従来より塩分の影響には多くの関心が寄せられている。その理由としては、コンクリート内部の制限値を越えた塩分の存在は、鋼材に対して有害な影響を与えると考えられているからである。特に、塩素はコンクリート中の鋼材の腐食防止の観点から好ましくないと考えられている。このため、土木学会コンクリート標準示方書などにおいては、鉄筋コンクリートの練りませ水として海水の使用を禁止し、また、細骨材としての海砂の塩素含有量についても厳しく規制を設けている。

しかし、長期間にわたって海水の作用を受けるコンクリート構造物にあっては、外部より塩分が浸透してくる。浸透によってコンクリート中に蓄積される塩分量が著しく大きいときには、コンクリート練りませ時に材料中に含まれる塩分を規制することの必要性は低下することとなる。このような事項を明らかにするため、海洋環境下にあるコンクリート部材に及ぼす塩分の影響についての研究は重要と考えられる。

上記の事情を考え、本研究の主目的は、長期間海洋環境下にあるコンクリートを対象として、練りませ時に海水練りコンクリートとしたことによって含まれる塩分のコンクリート内部の鉄筋の腐食に及ぼす影響を検討することである。また、この補足資料として海洋環境下のコンクリートに含まれる塩分の実態も検討した。さらに、コンクリートの最も重要な物性である圧縮強度については、海水練りコンクリートとしたことの影響とともに、圧縮強度自体の経年変化についても検討を加えた。

すなわち、検討した内容は、海洋環境下に長期間（5

年以上）暴露されたコンクリートを対象として、① コンクリート中に存在する塩分（塩素）の実態を把握し、練りませ時よりコンクリート中に含まれる塩分（塩素）と比較検討する、② これが本研究の主目的であるが、海水練りコンクリートと通常の水道水練りコンクリート中の鉄筋の腐食を比較することによって、練りませ時よりコンクリート中に含まれる塩分がコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響を検討する、③ コンクリートの長期の圧縮強度について、海水練りコンクリートと水道水練りコンクリートの相違を検討し、さらに、長期の圧縮強度の経年変化について検討する、の 3 項目である。

上記内容の検討を行うために、既設構造物の調査および供試体の暴露試験を実施した。なお、供試体の暴露試験結果は、材令 5 年および 10 年について報告するが、今後材令 20 年まで試験を継続する予定である。

## 2. 塩素含有量の測定について

本研究では、塩分に関して特にコンクリート中の鋼材腐食に有害な影響を及ぼすといわれている塩素についてその含有量を測定した。本研究中で、塩素の測定は重要であり、かつ、その測定方法も十分確立したものでないため、用いた測定方法について述べる。

コンクリート中の塩素含有量の測定値は、いかなる状態の塩素を測定するのかわかる。すなわち、塩素はフリーデル氏塩のような完全な化合物中の塩素として存在するものと間隙水中に完全なイオンの形で存在するものを両極端として、両者の中間的な種々の形態のものが存在すると考えられる。このような塩素に対して、化合物として固定されているものまですべてを対象とするのか、あるいは、水溶性のもののみを対象とするのかわかる。さらに、水溶性の塩素の量も、抽出する際の水の温度および抽出に要する時間によっても異なり、現状では一義的に対象とする塩素を定めることはできない。

\* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所構造部主任研究官

\*\* 正会員 運輸省第 2 港湾建設局青森港工事事務所長

\*\*\* 正会員 工博 早稲田大学助教授 工学部土木工学科

ここでは、1つの考えとして、セメント協会コンクリート専門委員会提案の方法<sup>1)</sup>に準じて、次の2方法により、塩素含有量を測定した。すなわち、①コンクリート中のモルタルを微粉碎した試料を白金のつぼに入れ、炭酸ナトリウム合剤を用い、800°Cで30分間溶解する。その後冷却し、水の入ったピーカー中で温めながらガラス棒で融成分を細かく砕くことによって水に抽出された塩素で、「全塩素」と称するもの、および、②コンクリート中のモルタルを微粉碎した試料を80°Cの湯に約5分間入れ、水に抽出された塩素で、「水溶性塩素」と称するもの、の2つをいずれもモルタルに対する重量百分率で表示し、塩素含有量を示す基準として採用した。

なお、一般には同一試料については、全塩素の方が水溶性塩素よりもやや大きな値を示す。

### 3. 既設構造物の調査概要<sup>2)-4)</sup>

建設後15~44年経過したコンクリート岸壁、護岸および棧橋の塩素含有量を調査した。これらから採取した試料はほとんどが感潮部よりやや上部の飛沫部からのものであるが、棧橋に用いたプレキャスト鉄筋コンクリートくいは、土中部、海中部、感潮部および飛沫部のそれぞれから試料を採取した。また、浸せき後およそ15年経過した海中部の根固めブロックの塩素含有量も調査した。

### 4. 暴露試験の概要

暴露試験のおもな検討事項は、長期間にわたって海水の作用を受けるコンクリートを対象として、練りませ水

として海水を使用することが鋼材の腐食に及ぼす影響を調べることである。さらに、関連した検討事項として、セメントの種類およびかぶり厚が鋼材の腐食に及ぼす影響、および、練りませ水として海水を使用することおよびセメントの種類がコンクリートの長期強度に及ぼす影響の2つが挙げられる。

#### (1) 供試体の製作および暴露

##### a) 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント (NO および N2)、早強ポルトランドセメント (HO および H2)、中庸熱ポルトランドセメント (MO)、B種高炉セメント (BO および B2)、およびアルミナセメント (AL) を用いた。N2、B2のセメントは、NO、BO (市販セメント) にそれぞれ化学せつこうを SO<sub>3</sub> 重量で2%増量したものである。表-1~3 に使用したセメントの化学成分および物理試験結果を示す。ここで、SO<sub>3</sub> 量を変化させて検討したのは、昭和44年に JIS R 5210~5213 が改正され、セメント中の SO<sub>3</sub> 量が2%程度増加したためである。このため、SO<sub>3</sub> 量の変化がコンクリートの長期耐海水性にどの程度の影響を与えるかを検討することが必要となった。しかしながら、本報告では、SO<sub>3</sub> 量に関する考察は行わなかった。

試験に用いた細骨材および粗骨材は神奈川県相模川産のもので、その物理的性質を表-4 に示す。

コンクリートの練りませ水には、海水と水道水を使用した。海水の成分は表-5 に示すものである。

減水剤として、ポゾリス No. 5L を用い、空気量の調整には、AE 剤ポゾリス No. 303 を使用した。

鉄筋は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に定

表-1 セメントの化学分析結果

セメントの種類	記号	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	S (%)	f. cao (%)
普通ポルトランドセメント	NO	0.8	0.3	21.7	5.5	3.1	64.7	1.3	2.0	0.30	0.57	—	0.9
普通ポルトランドセメント	N2	1.7	0.3	20.7	5.2	2.9	63.3	1.2	3.9	0.27	0.56	—	0.9
早強ポルトランドセメント	HO	1.1	0.5	20.6	5.2	2.7	65.3	2.2	2.5	0.37	0.54	—	0.9
中庸熱ポルトランドセメント	MO	0.8	0.2	23.5	4.5	3.8	63.4	1.2	1.7	0.28	0.48	—	0.5
B種高炉セメント	BO	0.4	0.7	25.7	9.7	2.1	54.1	3.2	2.4	0.46	0.51	0.4	0.3
B種高炉セメント	B2	1.3	0.6	24.4	9.3	2.0	53.2	3.0	4.3	0.44	0.48	0.4	0.4

表-2 セメントの物理試験結果

セメントの種類	記号	比重	粉末度			凝結		安定性	フロ一値	強 さ									
			比面積 (cm <sup>2</sup> /g)	表積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準ふるい 88μ残分 (%)	水量 (%)	始発 (時分)			終結 (時分)	浸水法	曲げ強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )			
												1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	NO	3.14	3180	1.6	27.5	2:28	3:28	良	250	—	32.9	46.1	69.0	—	131	226	422		
普通ポルトランドセメント	N2	3.12	3570	1.6	27.8	2:50	3:50	良	249	—	39.0	47.3	72.6	—	159	231	380		
早強ポルトランドセメント	HO	3.13	4290	0.7	29.0	2:23	3:26	良	259	30.8	47.7	62.4	74.7	115	226	338	447		
中庸熱ポルトランドセメント	MO	3.19	3260	2.0	25.5	3:02	4:27	良	255	—	25.3	36.0	62.2	—	90	146	317		
B種高炉セメント	BO	3.04	3850	1.4	28.8	3:34	5:10	良	255	—	28.1	34.9	62.0	—	97	152	346		
B種高炉セメント	B2	3.00	4100	1.3	29.0	3:54	5:52	良	253	—	26.8	37.8	63.8	—	95	152	325		

表-3 アルミナセメントの化学分析および物理試験結果

化学成分 (%)			比重	粉末度		曲げ強さ (1日) (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強さ (3日) (kgf/cm <sup>2</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO		比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準ふる るい88μ 残分(%)		
60.6	2.5	32.5	2.98	42.30	0.2	67.2	468

表-4 使用骨材の物理試験結果

種 別	比 重	吸 水 量 (%)	粗 粒 率
細 骨 材	2.61	2.52	2.98
粗 骨 材	2.65	1.05	6.85

表-5 海水の化学成分

試 料 採取日	比重	pH	化 学 成 分 (mg/l)						
			[20°C]	[20°C]	Na	K	Ca	Mg	Cl
1970年 2月3日	1.024	8.03	10125	387	376	1180	17136	2412	65

めているφ9mmの丸鋼を用い、コンクリート中の埋込み長さを18cmとした。埋込み鉄筋は、10%クエン酸アンモニウムによって黒皮を除去し、ベンジンによって油を除去して、光沢のみられる状態として使用した。

b) 供試体の製作

コンクリートの配合条件は、粗骨材の最大寸法25mm、単位セメント量290kg/m<sup>3</sup>、スランプ5cm、空気量4%を目標とした。配合結果を表-6に示す。

供試体はφ15×30cmで、圧縮強度試験用供試体、鉄筋腐食試験用供試体、および自然電極電位測定用供試体の3種を製作した。鉄筋腐食試験用供試体は、埋め込まれた鉄筋の腐食傾向を測定するとともに、供試体の上下両端をカッターにより

切断して、コンクリートの中性化試験に供した(4.(2)参照)。

鉄筋腐食試験用供試体に埋め込む鉄筋の本数は1個の供試体について3本とし、かぶりをそれぞれ2cm、4cm、7cmと変化させた。

また、埋込み鉄筋の電気化学的な傾向を検討する自然電極電位測定用供試体は、鉄筋腐食試験用供試体と同様のもので、各鉄筋の上端にφ1mmの穴をあけ、それに電位差測定用のリード線を接続したものである。

コンクリートの練りまぜは、容量200lの強制練りミキサを用いた。コンクリートの打込みは恒温室内で行った。鉄筋腐食試験用供試体および自然電極電位測定用供試体では、型枠にコンクリートを2層に分けて詰め、各層を棒状振動機で締め固めた。コンクリートを上面まで打ち込んだ後に鉄筋の固定金具を取り外し、表面より4~5cmの部分振動機により再び締め固めて、コンクリートの表面を金ごて仕上げた。

c) 供試体の養生および暴露

成形したコンクリートの供試体は恒温室内に静置して翌日脱型し、標準養生水槽(水温21°C)に移して6日間

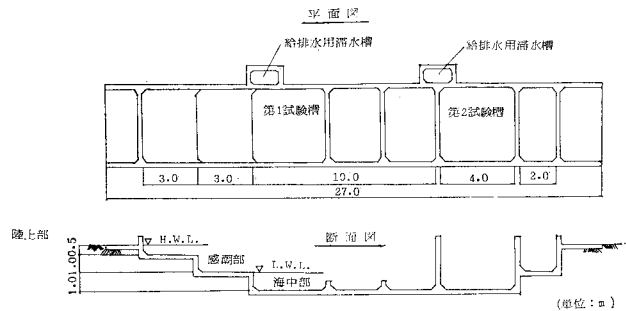


図-1 海水循環水槽概略図

表-6 コンクリートの配合

セメントの種類	記号	練りま ぜ水	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 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	減水剤 (L)	AE剤 (c.c.)
普通ポルトランド セメント	NO	水道水	25	6.6	3.4	52.7	37.0	153	290	740	1261	2.9	—
		海水	25	5.6	3.2	53.4	36.0	155	290	718	1277	2.9	—
	N2	水道水	25	6.4	4.0	54.5	37.0	158	290	734	1251	2.9	—
		海水	25	5.1	3.4	55.2	36.0	160	290	713	1270	2.9	—
早強ポルトランド セメント	HO	水道水	25	3.7	3.9	53.1	37.0	154	290	748	1258	2.9	—
		海水	25	5.7	3.1	55.2	36.0	160	290	711	1263	2.9	—
中庸熱ポルトランド セメント	MO	水道水	25	6.5	4.8	52.4	37.0	152	290	742	1264	2.9	—
		海水	25	4.6	4.0	53.1	36.0	154	290	720	1280	2.9	—
B種高炉セメント	BO	水道水	25	3.5	3.0	52.4	37.0	152	290	738	1258	2.9	—
		海水	25	4.0	3.8	53.1	36.0	154	290	716	1274	2.9	—
	B2	水道水	25	4.2	3.8	54.8	37.0	159	290	729	1242	2.9	—
		海水	25	4.7	4.1	55.5	36.0	161	290	708	1258	2.9	—
アルミナセメント	AL	水道水	25	6.3	3.1	52.1	37.0	151	290	737	1256	2.9	20
		海水	25	5.1	3.5	52.8	36.0	153	290	716	1272	2.9	—

注) スランプ、空気量は測定値

養生（早強ポルトランドセメントの場合は3日間）を行った後、海水循環水槽内の鉄筋の腐食環境として最も厳しいと考えられる感潮部に設置した。

海水循環水槽は、図-1に示す構造であり、1日2回ポンプで海水を給排水し1.5mの潮差で自然の潮汐作用に似た状態を再現するものである。循環水槽の海水は、久里浜湾に面した当研究所の護岸に隣接した井戸から採取している。水槽内の海水の化学成分は、湾内に流入する河川の影響を若干受けるが、ほぼ表-5に示すものである。また、海水の温度は夏期で約24°C、冬期で約8°Cである。

(2) 試験方法

a) コンクリートの圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」により行った。初期材令、1年、5年、および10年の各材令において試験に供した。

b) コンクリートの中性化

鉄筋腐食試験用供試体を図-2に示すように上面から5cmおよび25cmで切断し、さらに上面から5cmの部分を実験としてフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹き付け着色状態をトレースした。試験は、材令1年、5年および10年で行い、最大中性化深さを測定し、平均中性化深さはプランメーターにより中性化部分の面積を測定して計算した。

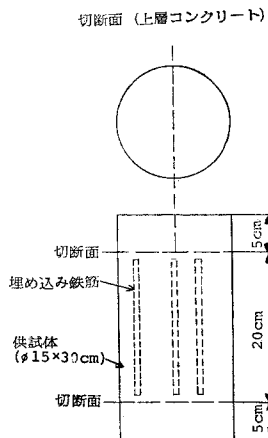


図-2 鉄筋腐食試験用供試体およびその切断面

c) コンクリートの塩素含有量

鉄筋腐食試験用供試体に関して、かぶりがそれぞれ2, 4, 7 cmの鉄筋近傍のコンクリートを5~10g採取して、2.に述べた方法により全塩素量もしくは水溶性塩素量を測定し、材令10年で試験を行った。

なお、塩素含有量はコンクリートからモルタルを採取する際に粗骨材の混入を防止することが困難であったため、測定値がややばらつくようであった。

d) コンクリート中の鉄筋の腐食状況

中性化試験を行った後に、鉄筋腐食試験用供試体を割裂して鉄筋を取り出し、表面の腐食状況を調べた。鉄筋に接したコンクリートについては、供試体割裂後ただちにフェノールフタレイン1%アルコール溶液を吹き付けて、その部分のコンクリートが中性化しているかどうか

確かめた。

供試体より取り出した鉄筋について、肉眼で観察できる腐食部分をトレースして、プランメーターによって腐食面積を測定した。

e) コンクリート中の鉄筋の電気化学的性質

i) 自然電極電位

基準電極として海水塩化銀電極を用いて、コンクリート供試体中の埋込み鉄筋の自然電極電位を測定した。測定時には供試体が海水中に完全に浸っているようにした。

ii) 動電位分極曲線

材令10年において、鉄筋腐食試験用供試体を用いて動電位分極曲線を測定した。供試体下層部分のコンクリートを圧壊して鉄筋下端を露出させ、下端にリード線を接続した。基準電極および対極は、それぞれ甘コウ電極およびステンレス鋼を使用した。本研究では、鉄筋の電位を自然電極電位からスタートさせ、-1000 mVまで陰分極させた後、さらに+1000 mVまで陽分極させ、その間の電流を測定した。

5. コンクリート中の塩素量の実態

(1) 既設構造物中の塩素量

建設後15~44年経過したコンクリート岸壁および護岸の塩素含有量を表-7に示す。これらの構造物は、感潮部よりやや上方の飛沫部にあり、比較的少ない塩素含有量である。また、浸せき後およそ15年経過した海中部の根固めブロックの対角線方向の塩素含有量を図-3に示す。隅角部より10, 20, 30 cmの位置の塩素含有量はそれぞれ1.66, 0.76, 0.35%と比較的多くの塩素を含んでいるが、40~80 cmの位置での塩素含有量は0.1

表-7 コンクリート岸壁および護岸中の全塩素含有量 (%)

構造物	試験時 までの 経過年数	かぶり (cm)		
		0~4	8~12	16~20
七尾港岸壁	18年	0.24	0.22	0.23
		0.32	0.32	0.38
		0.29	0.37	0.34
		0.29	0.32	0.21
		0.29	0.31	0.29
滝港護岸	44年	0.26	0.12	0.04
		0.20	0.12	0.05
		0.23	0.14	0.05
		0.23	0.10	0.02
		0.13	0.10	0.05
		0.21	0.12	0.04
津港護岸	15年	0.13	0.08	0.06
		0.08	0.07	0.06
		0.08	0.07	0.06
		0.10	0.07	0.06
宇治山田護岸	15年	0.10	0.06	0.03
		0.07	0.06	0.06
		0.08	0.09	0.07
		0.08	0.07	0.07

深さ (cm)	塩素含有量
10	1.66
20	0.76
30	0.35
40	0.09
50	0.06
60	0.07
70	0.08
80	0.08

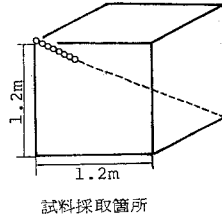


図-3 根固めブロック中の水溶性塩素含有量(%)  
(コンクリートの概略の仕様:ポルトランドセメント,  $G_{max}$  40mm, セメント量 400 kg/m<sup>3</sup>, W/C=65%)

表-8 栈橋床版および文献 7, 9) にみられる塩素含有量および見掛けの拡散係数

データの種類	経年 過数	かぶり (cm)	塩素 含有 量 (%)	計算値	
				$c_0$ (%)	$D'$ *
① スラブコンクリート $C=315 \text{ kg/m}^3$ $W/C=36\%$	20年	2.5	0.08	0.10	0.39
		7.5	0.05		
		12.5	0.035		
		17.5	0.03		
② スラブコンクリート $C=480 \text{ kg/m}^3$ $W/C=43\%$	20年	2.5	0.63	0.56	0.13
		7.5	0.21		
		12.5	0.10		
		17.5	0.02		
③ スラブコンクリート (はり部) $W/C=60\%$	15年	2.5	0.29	0.28	0.26
		2.5	0.16		
		7.5	0.10		
		7.5	0.06		
		15.0	0.02		
15.0	0.05				
④ モルタル $W/C=40\%$ (文献 9))	0.5年	0.5	0.35	0.94	0.11
		1.25	0.15		
		1.75	0.01		
	1.0年	0.5	0.50		
		1.25	0.30		
		2.0	0.15		
	2.0年	2.75	0.01		
		0.25	1.00		
		0.90	0.52		
		1.5	0.38		
2.25	0.25				
3.1	0.08				
ベースト $W/C=40.0\%$ (文献 7))					0.694

\* ( $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ )

%以下となる。さらに、建設後それぞれ15年および20年経過した感潮部に近い飛沫部にある栈橋床版の塩素含有量(全塩素)を表-8に示す。また、20年を経過した飛沫部、感潮部、海中部、土中部を貫通するプレキャスト鉄筋コンクリートくいの塩素含有量(全塩素)を図-4に示す。このデータからはプレキャスト部材であっても特に塩素含有量(全塩素)が小さいということは認められなかった。

なお、海水を練りませ水として用いた場合のモルタル

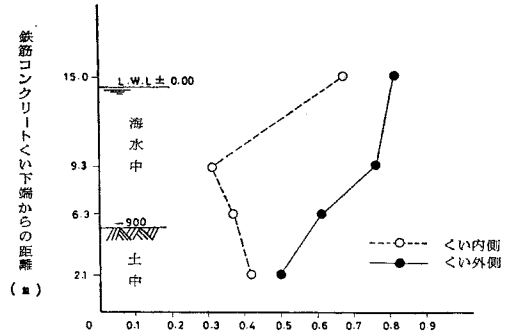


図-4 プレキャスト RC くいの塩素含有量(%)  
(くいの内側, くいの外側ともかぶりおよそ 2.5 cm 程度である)

中の塩素含有量は 0.25%, 海砂中の塩分規制値として塩分 0.1% (NaCl 換算) とした場合のモルタル中の塩素含有量はおよそ 0.04% 程度である。

### (2) 暴露試験供試体中の塩素含有量

海洋環境下に暴露したコンクリート供試体のかぶり別(2, 4, 7 cm)の塩素含有量を表-9, 表-10に示す。表-9には、4. で示した供試体の暴露期間10年における塩素含有量およびこれに及ぼすセメントの種類、かぶり、練りませ水(海水, 水道水)の影響を示す。表-10には、著者の既往の研究<sup>5)</sup>より暴露期間5年における塩素含有量およびこれに及ぼす暴露環境、かぶり、骨材、打継目の影響を示す。なお、沖縄産骨材を用いた供試体等の製作方法などは鉄筋腐食試験用供試体と同様である。

表-9, 表-10より長期間海洋環境に暴露されたコンクリート中の塩素含有量は、練りませ時に材料(練りませ水あるいは細骨材)より混入する塩素含有量に比較して著しく多いことがわかる。また、セメント種別には、単位セメント量、水セメント比など大差ない(表-6)にもかかわらず、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いたものの塩素含有量は、B種高炉あるいはアルミナセメントを用いたものの塩素含有量よりも多いことが認められる。

### (3) 塩素の拡散係数

海水中に含まれる各種イオンのうち、コンクリート中に深く浸透するのは、塩素イオンのみであるといわれている<sup>6)</sup>。塩素イオンの拡散については、一次元の拡散方程式より  $c/c_0 = 1 - \text{erf}(x/\sqrt{2D't})$  ( $x$ : 表面からの距離 (cm),  $c$ :  $x$ での塩素含有量 (%),  $c_0$ :  $x=0$ での  $c$ ,  $D'$ : 見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) なる式が導かれている。文献 7)~9)においては、上式を考慮して見掛けの拡散係数が求められており、塩素の拡散について有益な情報が

表—9 コンクリート中の塩素含有量 (その 1)

セメントの種類	かぶり (cm)	全 塩 素 (%)		水溶性塩素 (%)	
		水道水練り	海水練り	水道水練り	海水練り
普通ポルトランドセメント (NO)	2	1.73	1.65	1.63	1.40
	4	1.55	1.70	1.48	1.60
	7	1.33	1.30	1.15	1.25
早強ポルトランドセメント (HO)	2	1.63	2.70	1.60	2.13
	4	1.40	1.75	1.40	1.55
	7	1.00	1.50	0.90	1.43
B 種 高 炉 セメント (BO)	2	1.08	1.50	0.90	1.33
	4	0.80	0.98	0.64	0.85
	7	0.40	0.98	0.33	0.87
アルミナセメント (AL)	2	0.36		0.34	
	4	0.16		0.14	
	7	0.08		0.04	

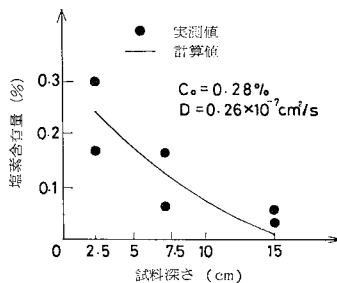
注) モルタルに対する重量百分率である。

表—10 コンクリート中の塩素含有量 (その 2)

	かぶり (cm)	水 溶 性 塩 素 (%)			備 考
		感潮部	海中部	陸上部	
河川産骨材 (普通ポルト) W/C=42%	2	0.48	0.69	0.08	骨材最大寸法 25 mm 打設後 28 日で暴露
	4	0.34	0.38	0.05	
	7	0.15	0.25	0.05	
沖縄産骨材 1 本部砕石 (普通ポルト) W/C=44%	2	0.56	0.83	0.10	骨材最大寸法 40 mm 打設後 28 日で暴露
	4	0.55	0.70	0.07	
	7	0.33	0.50	0.07	
沖縄産骨材 2 宮古砕石 (普通ポルト) W/C=45%	2	0.40	0.49	0.17	骨材最大寸法 25 mm 打設後 28 日で暴露
	4	0.44	0.48	0.10	
	7	0.40	0.41	0.10	
打継目供試体 河川産骨材 (早強ポルト) W/C=50%	2		0.88		骨材最大寸法 25 mm 打設後 50 日で暴露
	4		0.50		
	7		0.38		

与えている。

本研究では、既設構造物の塩素含有量より、上式を用いて見掛けの拡散係数の算出を行った。この場合、上式の計算上の仮定を満たすため、コンクリートに対し、塩素の浸透面が1つつ直角方向であり、 $x$ が大なるとき塩素含有量が0に近くなるような分布を有する測定値を使用した。これらの測定値を用いて最小2乗法により $c_0$ 、 $D'$ を求めその結果を表—8、図—5に示す。なお、計算は表—8に示した①~④のデータおのおのについて行い、図—5には③の測定値と表—8に示す $c_0$ 、 $D'$ を用いた計算値を示す。試料としてコンクリート、モルタル、ペースト、測定した環境として飛沫部、海中部、NaCl溶液中と種々条件



図—5 栈橋床版中の全塩素含有量 (表—8 ③ に対応) の実測値および計算値

の異なるものを対象としたが、見掛けの拡散係数はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  程度と思われる。

(4) ま と め

(1) 海洋環境下に長期間暴露されたコンクリートには、多量の塩素が含有されている。たとえば、普通ポルトランドセメントを用い、かぶり7cm、暴露期間10年の場合の塩素含有量は、モルタル重量に対して1.0%を越える。

(2) コンクリートの塩素含有量は、使用するセメントの種類によって相違が認められる。

(3) 普通ポルトランドセメントを用いた既設構造物コンクリート中の塩素の見掛けの拡散係数はおよそ  $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  である。

6. 海水練りおよび水道水練りコンクリート中の鉄筋の腐食

(1) 鉄筋の腐食状況

a) 表面観察

材令5年で、海水練りおよび水道水練りコンクリートの供試体をセメントの種類ごとに3本ずつ試験した。各種のポルトランドセメントを用いた供試体中の鉄筋は、海水練りの場合36本のうち23本が腐食し、水道水練りの場合36本のうち7本が腐食していた。B種高炉セメントを用いた供試体中の鉄筋では、海水練りおよび水道水練りを含む36本のすべての鉄筋に腐食が認められなかった。アルミナセメントを用いた供試体中の鉄筋は、海水練りの場合9本すべてが腐食し、水道水練りの場合9本のうち3本が腐食していた。参考までに、腐食が比較的顕著なものとして、普通ポルトランドセメントを用いた海水練りコンクリート中の鉄筋腐食の一例を図—6に示す。

材令10年では、海水練りコンクリートの供試体をセメントの種類ごとに3本ずつ、また、水道水練りのものを普通、中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントについて3本ずつ試験した。普通および中庸熱ポルトランドセメントを用いた供試体中の鉄筋は、海水練りの場合36本のうち12本が腐食し、水道水練りの場合18本のうち4本が腐食していた。B種高炉セメントを用いた供試体中の鉄筋は、海水練りの場合18本のうち2本が腐食し、水道水練りの場合9本のうち1本が腐

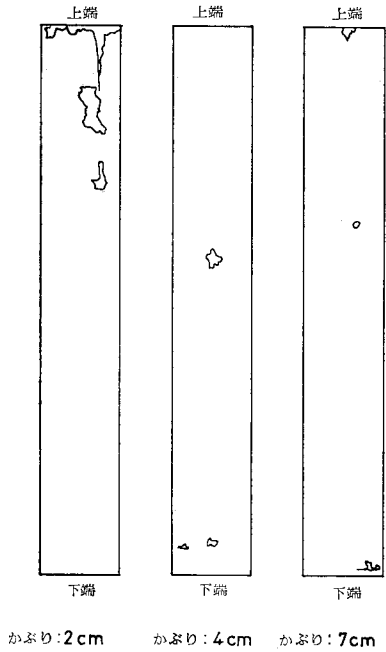


図-6 材令5年普通ポルトランドセメントを用いた海水練りコンクリート中の鉄筋腐食状況例

食していた。アルミナセメントを用いた海水練り供試体中の鉄筋は9本すべてが腐食していた。

鉄筋の腐食の程度は、いずれの場合にも軽度であり、かぶりのコンクリートをはく離させたものやコンクリート表面に錆を溶出させたものはなかった。錆としてはFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と思われる黒いものが多く、FeOOHと思われる赤い錆も若干観察された。赤い錆はアルミナセメントを用いたものに多くみられ、また、かぶりの小さなものにもみられた。鉄筋上端部付近の腐食はその他の部分に比較して腐食面積が大きく錆が厚かった。鉄筋が腐食していた場合においても、その周辺のコンクリートに中性化は認められなかった。

なお、アルミナセメントを用いた海水練り供試体中の鉄筋のすべてが腐食していたことの原因として、アルミナセメントの硬化が材令1日で脱型できないほど遅かったことが考えられる。

また、鉄筋上端部付近の腐食が大きかった理由としては、ブリージング水の影響あるいは鉄筋固定金具の取り外し後に打ち足したコンクリートが十分に締め固められず若干ポーラスになったことなどが考えられる。ただし、鉄筋の取り出し時に観察した限りでは何ら異常は認められなかった。

アルミナセメントを用いた海水練りを除外して、材令5年と10年における鉄筋の腐食を合わせると、かぶり2, 4, 7cmの鉄筋は、それぞれ66本のうち25, 13, 14本が腐食していた。

表-11 鉄筋の腐食面積率（上端部も含む）

セメントの種類	記号	練りませ水	かぶり					
			2 cm		4 cm		7 cm	
			5年	10年	5年	10年	5年	10年
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	4.3	5.3	0.3	1.0	1.1	0.0
			1.5	0.8	0.0	0.0	0.7	0.0
	海水	2.1	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	
		0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	
	N2	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
海水	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3		
	1.9	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0		
早強ポルトランドセメント	HO	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
海水	0.0	2.0	0.9	0.0	0.0	0.0		
	4.8	4.3	2.4	0.0	0.0	0.0		
中庸熟ポルトランドセメント	MO	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
海水	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5		
	5.9	1.8	0.0	0.0	0.2	0.8		
B種高炉セメント	BO	水道水	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
海水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2		
アルミナセメント	AL	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
海水	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
B2	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
海水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
AL	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
海水	1.5	2.3	0.4	1.7	0.4	1.5		
	2.0	1.3	0.4	0.5	0.6	1.3		
AL	水道水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
海水	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2		
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

なお、上記の鉄筋腐食の試験結果に関して普通ポルトランドセメントを用いた水道水練りならびに早強および中庸熟ポルトランドセメントを用いた海水練りコンクリート中のかぶり2cmの鉄筋が、材令5年、10年ともにその腐食が顕著であること、普通ポルトランドセメント

を用いた海水練りコンクリート中の鉄筋がかぶり 2, 4, 7 cm のいずれにおいても、材令 5 年で腐食し、材令 10 年ではほとんど腐食していなかったことなどの特異点がある。これらについては、今後さらに検討していく必要

がある。

b) 腐食面積率

鉄筋の腐食面積率の測定結果を 表—11, 表—12 に示す。なお、腐食面積率は、鉄筋の表面積を 50.0 cm<sup>2</sup> として算定した。また、前述したように、鉄筋上端部の腐食には供試体製作時の特殊な影響が考えられるので、この部分を含むものと含まないものとの腐食面積率を示す。腐食面積は、セメント、練りませ水およびかぶりの組合せが同一であっても供試体によって相当の開きがあった。

(2) コンクリート中の鉄筋の電気化学的測定

電気化学的な手法は確立されたものではなくデータの意味も十分明確ではないが、ある程度の意味はあるものと考え、試験結果を示す。

a) 自然電極電位

コンクリート中の鉄筋の自然電極電位は、セメントの種類と練りませ水の組合せごとに 3 本ずつの供試体（合計 42 供試体 126 鉄筋）について、暴露開始時から継続して測定している。自然電極電位の経年変化を 図—7 に示す。これらの値は、セメントの種類別に、供試体かぶり 2, 4, 7 cm, 年間に 1, 4, 7, 10 月の 4 回測定し、計 36 個の測定値を平均したものである。なお、材令 5 年頃まで、測定月による変動がかなり大きかった。

自然電極電位の経年変化は、各種のポルトランドセメント、B種高炉セメント、アルミナセメントによって傾向が異なった。各種のポルトランドセメントを用いたものは、電位が徐々に卑に移行する傾向を示し、材令 10 年では -710~-850 mV となった。B種高炉セメントを用いたものは、電位が徐々に貴に移行する傾向を示し、材令 10 年では -470~-520 mV となった。アルミナセメントを用いたものは、電位が徐々に卑に移行する傾向を示し、材令 10 年では -240~-270 mV となった。

表—13 かぶり別の自然電極電位 (mV)

セメントの種類	かぶり 2 cm		かぶり 4 cm		かぶり 7 cm	
	全平均	材令 10 年	全平均	材令 10 年	全平均	材令 10 年
普通ポルトランドセメント	-569	-853	-559	-633	-565	-649
B種高炉セメント	-571	-463	-591	-462	-587	-380
アルミナセメント	-211	-359	-193	-232	-133	-195

表—14 練りませ水別の自然電極電位 (mV)

セメントの種類	水道水練り		海水練り	
	全平均	材令10年	全平均	材令10年
普通ポルトランドセメント	-544	-844	-584	-817
B種高炉セメント	-659	-499	-560	-517
アルミナセメント	-184	-281	-177	-242

表—12 鉄筋上端部を除いた部分の腐食面積率 (%)

セメントの種類	記号	練りませ水	かぶり						
			2 cm		4 cm		7 cm		
			5年	10年	5年	10年	5年	10年	
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	0.1 0.0	0.4 0.6	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
		海水	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	
	N2	水道水	0.0 0.0	/	0.0 0.0	/	0.0 0.0	/	
		海水	0.0 0.2 0.0	0.0 0.0	0.0 0.4	0.0 0.0	0.0 0.1	0.0 0.5	
	早強ポルトランドセメント	HO	水道水	0.0 0.0 0.0	/	0.0 0.0 0.0	/	0.0 0.0 0.0	/
			海水	2.9 0.1 3.6	0.0 0.0 0.6	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
中庸熱ポルトランドセメント	MO	水道水	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	
		海水	0.1 3.6 12.9	0.0 1.8 0.8	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.4 0.0	0.5 0.8 0.0	
B種高炉セメント	BO	水道水	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	
		海水	0.1 0.0 0.0	0.0 0.0 0.2	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.2	
アルミナセメント	AL	水道水	0.0 0.0 0.0	/	0.0 0.0 0.0	/	0.0 0.2 0.0	/	
		海水	0.3 0.0 0.0	0.4 0.8 0.3	0.4 0.2 0.0	0.3 0.0 0.0	0.0 0.2 0.0	0.0 0.5 0.5	



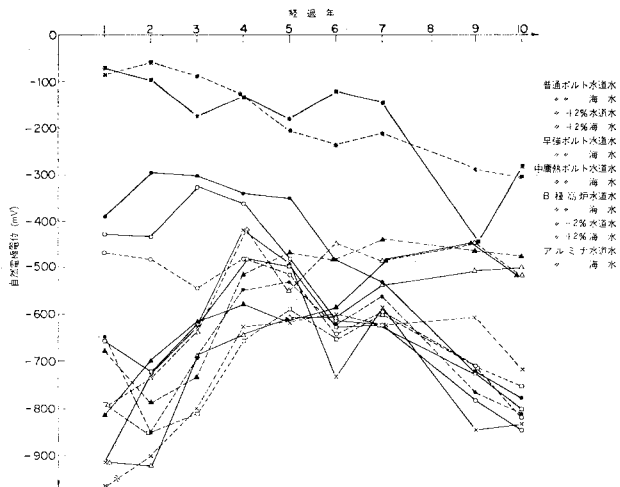


図-7 自然電極電位の経年変化

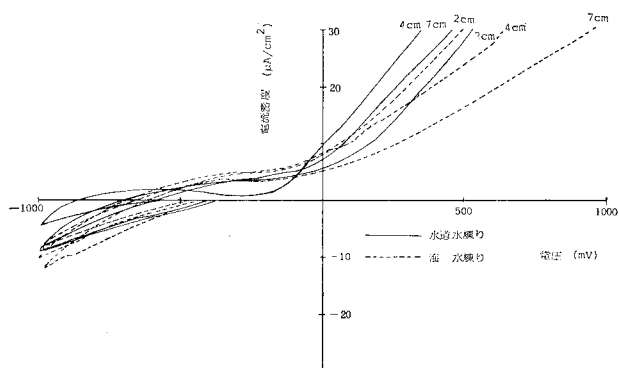


図-8 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の鉄筋の動電位分極曲線 (材令 10 年)

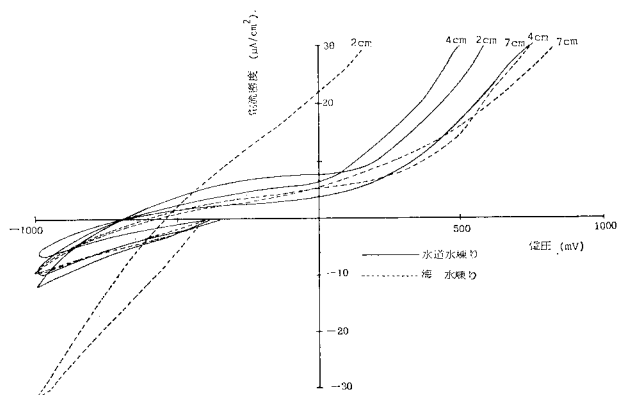


図-9 早強ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の鉄筋の動電位分極曲線 (材令 10 年)

コンクリート中の鉄筋の自然電極電位をかぶり別あるいは練りませ水別に整理したものを、表-13、表-14に示す。材令 10 年における自然電極電位は、2, 4, 7 cm の順に貴となっていた。一方、10 年間の平均値は、材令 5

年頃までの測定値の変動が多いこともあってか、かぶりによる差が小さかった。また、海水練りと水道水練りの自然電極電位は、材令 1~2 年では差の大きなものもあったが、材令 10 年ではその差は小さい。

b) 動電位分極曲線

コンクリート中の鉄筋の動電位分極曲線の測定結果の一部を図-8~10に示す。

普通および早強ポルトランドセメントを用いたものは B 種高炉セメントを用いたものに比較して、鉄筋の電位が強制的に変化させられる際に流れる電流が著しく大きかった。また、練りませ水による差異は明確ではなかった。

(3) まとめ

(1) 材令 10 年での腐食は総じて軽微である。高炉セメントを用いたものは比較的腐食は少なく、また、海水練りの腐食量はやや多い。

(2) 電気化学的測定では、高炉セメントを用いたものの防食性能がポルトランドセメント系を用いたものに比較して優れていると判断される。海水練りと水道水練りを比較すると、自然電極電位は材令 1~2 年程度までは差のやや大きなものもあるが、その後の自然電極電位や動電位分極曲線では両者の相違は認めにくい。

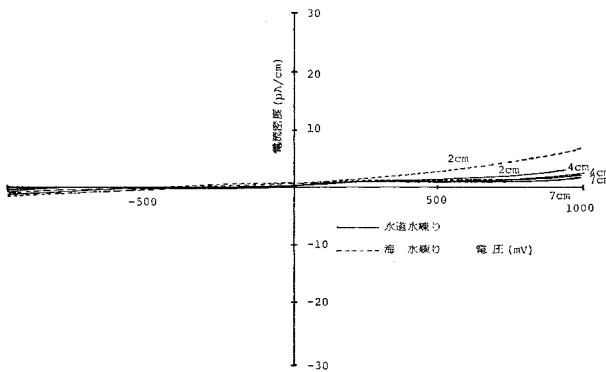
7. 海水練りおよび水道水練りコンクリートの圧縮強度および中性化

(1) 圧縮強度の経年変化

コンクリートの圧縮強度に用いた供試体数は、原則としてセメントの種類と練りませ水の組合せごとに 3 本であり、材令 28 日、1 年、5 年、10 年において試験を実施した。圧縮強度の試験結果を表-15に示す。

各種ポルトランドセメントおよび B 種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの圧縮強度はいずれの場合にも、水道水練りのものと相違はほとんど認められなかった。

コンクリートの圧縮強度は、材令 5 年のものが最も大きく、材令 10 年では強度の低下が顕著であった。材令 5 年から 10 年にかけての減少割合は、普通および早強



図一10 B種高熱セメントを用いたコンクリート中での鉄筋の動電位分極曲線 (材令 10 年)

ポルトランドセメントの場合 3~4 割, 中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高熱セメントの場合 2割強であった。また, 材令 10 年の圧縮強度は, 材令 28 日の強度に比較して普通ポルトランドセメントの場合 0.79 から 0.88 とやや小さく, B種高熱セメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの場合 1.03 から 1.07 とやや大きかった。早強ポルトランドセメントの場合は, 材令 7 日の強度とほぼ同じであった。

(2) 中性化の経年変化

材令 1年では, いずれの供試体も, 表面が中性化している程度であり, コンクリートの内部への中性化の進行はみられなかった。

材令 5年および 10年における中性化の試験結果を表

表一15 コンクリートの圧縮強度の経年変化 (kgf/cm<sup>2</sup>)

セメントの種類	記号	練りませ水	圧 縮 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )				海水練り/水道水練り			σ <sup>10年</sup> σ <sup>28日</sup>
			28 日	1 年	5 年	10 年	28 日	5 年	10 年	
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	366(35.9)	—	509(49.9)	321(31.5)	1.12	1.02	1.04	0.88
		海水	409(40.1)	405(39.7)	518(50.8)	335(32.8)				0.82
	N2	水道水	—	—	524(51.4)	—	—	1.00	—	—
		海水	388(38.0)	366(35.9)	521(51.1)	307(30.1)				0.79
早強ポルトランドセメント	HO	水道水	*425(41.7)	—	560(54.9)	—	0.92	0.99	—	—
		海水	*390(38.2)	411(40.3)	555(54.4)	382(37.4)				0.98
中庸熱ポルトランドセメント	MO	水道水	328(32.1)	—	478(46.8)	344(33.7)	1.09	1.00	1.10	1.05
		海水	356(34.9)	558(54.7)	477(46.7)	379(37.1)				1.06
B 種 高 熱 セ メ ン ト	BO	水道水	380(37.2)	—	563(55.2)	429(42.0)	1.04	0.98	0.99	1.03
		海水	395(38.7)	532(52.1)	551(54.0)	423(41.5)				1.07
	B2	水道水	363(35.6)	—	523(51.3)	—	1.01	0.98	—	—
		海水	366(35.9)	420(41.2)	513(50.3)	389(38.1)				1.06
アルミナセメント	AL	水道水	**428(41.9)	—	672(65.9)	—	—	0.90	—	—
		海水	***258(25.3)	568(55.7)	603(59.1)	526(51.5)				—
						平均	1.04	0.98	1.04	0.98

注) おのおの値は3本である。また \* は 7 日, \*\* は 1 日, \*\*\* は 4 日の強度である。( ) 内は N/mm<sup>2</sup>。

—16 に示す。中性化の区域が狭く, 平均中性化深さを測定することが困難であったので, 最大中性化深さを測定した。最大中性化深さは, 供試体上部の隅角部や粗骨材の粗粒分が表面近くに存在するような箇所が生じていた。練りませ水の違いおよびセメントの種類による中性化の差異はなかった。

また, 既設構造物調査では, 極端に大きな例を含めて, 平均中性化深さは 0.12~3.7 cm の範囲にあり, 一般にはコンクリートの中性化はコンクリート表層に限られた現象であると思われる。

8. 考 察

a) コンクリート中への塩素の浸透について

海洋環境においてコンクリート表面から浸透する塩素量は著しく多く, いわゆる感潮部, 海中部で表面からの距離が比較的小さい範囲では, 既設構造物 (根固めブロック等), 材令 10 年の供試体とも, その塩素含有量は, 海水を練りませ水として使用することによって混入する塩素含有量 (0.25% 程度) を上回る。

ここで, 感潮部にある水道水練りコンクリート中の塩素含有量が 0.25% に達する年数を表一9 より予測することを考える。塩素のコンクリート中への浸入は, Fick の法則に従うことが認められており<sup>7),9)</sup>, この場合, 任意の場所の塩素含有量は時間に関して凸な関数となる。このとき, 直線近似で内挿により, ある塩分含有量に達する時間を求めると大きめの値となる。そのため, 直線

表—16 コンクリートの中性化

セメントの種類	記号	練りませ水	最大中性化深さ (mm)					
			横断面				縦断面	
			上面		下面		5年	10年
			5年	10年	5年	10年		
普通ポルトランドセメント	NO	水道水	0 0 0	4 0 4	0 0 0	2 3 2	0(4) 0(2) 0(3)	0(6) 0(7) 0(2)
		海水	1 0 0	2 5 0	0 0 0	5 5 0	0(5) 0(3) 0(3)	0(4) 0(2) 0(5)
	N2	水道水	3 0 0	/	2 2 0	/	0(3) 0(1) 0(1)	/
		海水	1 1 0	0 2 3	0 0 0	4 2 3	0(5) 0(3) 0(3)	0(8) 0(4) 0(3)
早強ポルトランドセメント	HO	水道水	0 0 0	/	0 0 0	/	0(0) 0(2) 0(0)	/
		海水	0 0 0	0 3 2	0 0 0	2 2 2	0(0) 0(0) 0(0)	1(2) 0(5) 0(4)
中庸熱ポルトランドセメント	MO	水道水	0 1 1	2 3 3	0 0 0	0 2 3	0(2) 0(3) 0(2)	0(6) 1(8) 0(6)
		海水	0 1 2	0 2 2	0 0 0	9 3 5	0(3) 0(3) 0(3)	0(4) 0(8) 4(4)
B種高炉セメント	BO	水道水	1 3 2	7 4 4	2 2 2	6 6 4	0(5) 0(4) 0(4)	3(8) 0(5) 0(4)
		海水	2 2 2	3 6 4	3 2 3	4 4 4	0(5) 0(4) 0(5)	4(6) 4(5) 3(5)
	B2	水道水	2 2 2	/	2 3 2	/	0(3) 0(3) 0(3)	/
		海水	2 2 2	6 4 3	2 1 4	5 5 4	0(4) 0(6) 0(5)	4(6) 3(5) 4(7)
アルミナセメント	AL	水道水	0 1 2	/	1 1 1	/	0(0) 0(0) 0(0)	/
		海水	0 0 0	20 3 15	0 0 0	6 10 5	0(1) 0(1) 0(1)	3(4) 5(5) 4(7)

( ) 内の数字は供試体隅角部

近似で表—9よりかぶり7cmにおいて塩分含有量が0.25%に達する時間を求めると、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、B種高炉セメントを用いたものでおのおの約2年、2年、6年程度となり、Fickの法則に従うとすればそれ以下の年数となる。

なお、既設の棧橋の塩素含有量測定結果などより、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート中の塩素の目掛けの拡散係数はおよそ $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ であった。

b) 海水練りコンクリートと水道水練りコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響について

a) より、塩素含有量がコンクリート内部の鉄筋の不働態皮膜を破壊してその後の腐食反応の発生の条件となると考えると、海水練りと水道水練りコンクリート部材が鉄筋の腐食で使用期間が定まる場合には、両者の使用

期間の相違は、かぶり7cmの場合で長くて2~6年、かぶりがより小さい場合にはさらに短くなると考えられる。また、コンクリート硬化前に浸透した塩素の方がより多くフリーデル氏塩のような化合物に固定され、腐食反応に関与しないと考えられ<sup>10)</sup>、この使用期間の差はさらに小さいと考えられる。

電気化学的には、図—7より材令1~2年程度までは海水練りコンクリートの自然電極電位の方が水道水練りコンクリートのものと差のあるものもあるが、材令10年では両者の差はほとんどなく、また、材令10年での動電位分極曲線の差も少ないことが、裏付けとなると考えられる。

したがって、コンクリート中への塩素の浸透速度の大きな感潮部において、本研究の範囲では、練りませ時に海水を使用することによって混入している塩素は、後から海洋環境より浸透してくる塩素に対して無視してもいいように思われる。

なお、上記はかぶり7cm以下の場合であって、かぶりが大きくなると、海洋環境より浸透してくる塩素の影響は小さくなるので、上記の推論とは異なってくる。

c) 圧縮強度の経年変化について

表—15より、各種ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントを用いた海水練りコンクリートの圧縮強度はいずれの場合にも、水道水練りのものと相違はほとんど認められなかった。

材令10年におけるコンクリートの圧縮強度は、材令5年のものに比較して、かなり減少していた。その減少割合は、普通および早強ポルトランドセメントを用いたものが比較的大きかった。また、材令10年の圧縮強度は、材令28日のものに比較して、普通ポルトランドセメントの場合にはやや小さく、中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの場合にはやや大きかった。中庸熱ポルトランドセメントおよびB種高炉セメントの早期の強度は比較的小さいので、この意味では当然のこととも考えられる。なお、経年による強度の減少については、今後さらに検討していく必要がある。

d) セメント種の塩素含有量および鉄筋の腐食に及ぼす影響について

塩素含有量に関して、B種高炉セメントを用いたコンクリートの塩素含有量は、表—9より、各種のポルトランドセメントを用いたものに比較して半分以下であった。また、塩素含有量との直接の関係は不明であるが、B種高炉セメントを用いたコンクリート中の鉄筋の腐食は少なかった。さらに、B種高炉セメントを用いたコンクリート中の鉄筋の自然電極電位が徐々に貴に移行していること、および、分極時に流れる電流が小さいなどの理由により、鉄筋の腐食を防止するコンクリートの機能

が優れ、今後とも鉄筋の腐食が少ないものと考えられる。

また、中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートは、普通および早強ポルトランドセメントを用いたものに比較して鉄筋の腐食が少なかった。

e) かぶりの塩素含有量および鉄筋の腐食に及ぼす影響について

塩素含有量は、既設構造物および暴露試験供試体ともに、かぶりが小さいほど大きい。また、表—11、表—12より、かぶり 2 cm の鉄筋は、かぶり 4 cm、7 cm のものに比較して、腐食しているものの割合が高く、かつ腐食面積が大きかった。

## 9. 結 論

コンクリート供試体を、海水あるいは潮風に 10 年間暴露して、コンクリート中の塩素含有量、鉄筋の腐食および圧縮強度の経年変化を試験し、あわせて、塩素含有量については、既設構造物調査を行った。明確な結論を得るためには、さらに長期の試験などを必要とするが、これまでの試験結果からコンクリート中の塩素が鉄筋の腐食、コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について、以下に述べる成果が得られた。

(1) 海洋環境においてコンクリート表面から浸透する塩素量は著しく多く、いわゆる海中中部、感潮部で表面からの距離が比較的小さい範囲では、既設構造物、材令 10 年の供試体とも、塩素含有量は、練りませ時に海水を使用したため混入する塩素含有量を上回る。

(2) コンクリート中への塩素の浸透が比較的大きな感潮部という暴露条件下で、水セメント比 50% 程度のコンクリートでは、練りませ時に海水を使用したため混入した塩素が鉄筋の腐食(かぶり 7 cm までの範囲)およびコンクリートの圧縮強度に与える影響は、予想外に少なく、工学上無視し得る可能性もある。

(3) コンクリートの長期強度は、材令 5 年から 10 年にかけて減少する傾向が認められた。

(4) B種高炉セメントを用いたコンクリートは、普

通および早強ポルトランドセメントを用いたものに比較して塩素の浸透が少なく、鉄筋の腐食およびコンクリート強度の経年変化が少ない。

謝 辞：本暴露試験および既設構造物調査は、1970 年より継続しているものである。研究の発端は、赤塚雄三元港湾技術研究所材料施工研究室長のご示唆によるものであり、この 10 数年間には、元研究員の浅岡邦一氏、田淵民雄氏、佐々木克彦氏、小野寺幸夫氏、丸山浩氏、故九嶋茂雄氏、藤沢孝夫氏、堀井義一氏および現研究員下沢治氏に試験の一部を担当していただいた。また、港湾技術研究所構造部土田肇部長、善一章主任研究官およびセメント協会の方々等に種々のご示唆とご協力をいただいた。ここに、謹んで感謝の意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) セメント協会コンクリート専門委員会：硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告，No. F-18, 1967.
- 2) 関 博・小野寺幸夫・丸山 浩：長期間海岸環境中に暴露された無筋コンクリート構造物の劣化状況調査，港湾技研資料，No. 142, 1972.
- 3) 関 博・堀井義一：建設後 20 年を経過した鉄筋コンクリートさん橋の劣化状況調査，港湾技研資料，No. 255, 1977.
- 4) 第一港湾建設局酒田港工事事務所：酒田港（本港地区）—9.0 m 岸壁劣化調査および改良工事，第 17 回管内工事報告会，1979.
- 5) 大即信明：港湾環境におけるコンクリートの耐久性について，昭和 56 年港湾技術研究所講演会講演集，1981.
- 6) 森 好生・野木孝次：コンクリートの耐海水性に関する研究—材令 10 年試験結果報告—，セメントコンクリート，No. 417, 1981.
- 7) 近藤連一・佐竹 実・牛山宏隆：セメント硬化体中のイオン拡散，セメント年報 28, 1974.
- 8) Page, C.L., N.R. Short and A.El. Tarras: Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol. 11, No. 3, 1981.
- 9) GjØrv, O.E. and Ø. Vennesland: Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 9, No. 2, 1979.
- 10) Kalousek, G.L. and E.J. Benton: Mechanism of Seawater Attack on Cement Paste, ACI Journal, Vol. 67, No. 2, 1970.

(1982.3.1・受付)