

運輸省港湾技術研究所

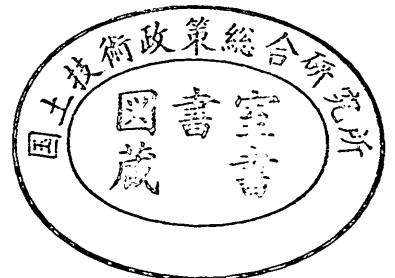
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 29 NO. 3 SEPT. 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第29巻 第3号 (Vol. 29, No. 3), 1990年9月 (Sept. 1990)

目 次 (CONTENTS)

1. 短フェッチ海域の波浪推算モデル
..... 後藤智明・末次広児・永井紀彦..... 3
(Wave Hindcast Model for Short Fetch Sea
..... Chiaki GOTO, Koji SUETSUGU and Toshihiko NAGAI)
2. ベイズ型モデルを用いた海洋波浪の非線型核関数の数値的推定
..... 橋本典明..... 27
(Estimation of Nonlinear Kernel Function of Weakly Nonlinear,
Quasi-Gaussian Irregular Sea Waves..... Noriaki HASHIMOTO)
3. 海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究
..... 福手 勤・山本邦夫・濱田秀則..... 57
(Study on the Durability of Concrete Mixed with Sea Water
..... Tsutomu FUKUTE, Kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)
4. 港の景観構成に関する研究..... 上島顕司・加藤 寛・斎藤 潮..... 95
(A Study on Composition of Portscape
..... Kenji UESHIMA, Hiroshi KATO and Ushio SAITO)

3. 海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの 耐久性に関する研究

福手 勤*・山本邦夫**・濱田秀則**

要 旨

コンクリート中の鉄筋の腐食を引き起こす要因となる塩化物イオンには、コンクリートの練り混ぜ時に混入されるものと、コンクリートの硬化後外部環境より浸入してくるものがある。一般に、長期にわたって海水の作用を受ける海洋環境下の鉄筋コンクリートにおいては、外部環境より浸入してくる塩化物イオンが多量であり、長期材令においてはほぼ飽和状態に達することから、練り混ぜ時に混入される塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響は小さくなる可能性がある。

本研究は、長期にわたって海水の作用を受ける鉄筋コンクリートにおいて、練り混ぜ水として海水を使用することがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響について把握することを主目的としたものである。またあわせて、練り混ぜ水として海水を使用することがコンクリートの強度特性に及ぼす影響、セメントの種類の違いがコンクリートの強度特性やコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響、鉄筋のかぶり厚さの違いが鉄筋の腐食に及ぼす影響についても把握することを目的としたものである。

上述の目的を達成するために、水道水を練り混ぜ水としたコンクリート供試体、および海水を練り混ぜ水としたコンクリート供試体を海洋環境下に20年間暴露し、その間材令5年、10年、15年、および20年において種々の評価試験を行ってきた。本報告は、20年間に得られた成果を総合的にとりまとめたものである。

検討の結果、材令20年程度の長期材令においては、練り混ぜ水として海水を使用したコンクリートの強度特性、鉄筋の腐食、およびコンクリート中の塩化物イオン量は、水道水を使用したコンクリートのものとほとんど変わらないことが確認された。したがって、長期にわたって海水の作用を受ける鉄筋コンクリートにおいては、練り混ぜ水として海水を使用しても、コンクリートの耐久性に及ぼす影響は小さいと判断された。

キーワード：コンクリート、練り混ぜ水、耐久性

* 構造部 材料研究室長
** 構造部 材料研究室

3. Study on the Durability of Concrete Mixed with Sea Water

Tsutomu FUKUTE*
Kunio YAMAMOTO**
Hidenori HAMADA**

Synopsis

There are two origin of chloride ions in concrete. One of them is introduced in concrete at mixing by materials used, and the other is from sea water during its service life under marine environment. Generally, for the reinforced concrete structures under marine environment, the influence of mixing water on corrosion of reinforcing bars may not be so significant as the structures on land, because of the high amount of penetration of chloride ions into concrete from sea water.

In this paper, the influence of sea water as mixing water on the long term durability of concrete under marine environment is studied. In addition, the effects of the type of cement and the cover thickness on the long term physical properties and durability of concrete are also studied. For this purpose, many specimens have been exposed for twenty years at tidal zone of the experimental pool which simulate the ebb and flow of the natural sea condition.

The experimental results obtained are as follows ;

- (1) The concrete strength after 20 years' exposure is not affected by the mixing water.
- (2) The corrosion of bars embedded in concrete after 20 years' exposure is not affected by the mixing water.
- (3) The amount of chloride ions measured in concrete after 20 years' exposure is not affected by the mixing water.

Therefore, it is concluded that the influence of sea water used as mixing water on long term durability of reinforced concrete structures is negligible under marine environment.

Key Words : Concrete, Mixing Water, Durability

* Chief of the Materials Laboratory, Structures Division.

** Member of the Materials Laboratory, Structures Division.

目 次

要 旨	57
1. 研究の概要	61
1.1 目的および背景	61
1.2 研究の方法	61
2. 供試体の製作および養生	63
2.1 使用材料	63
2.2 供試体の製作	65
2.3 供試体の養生	65
3. 試験方法	65
4. 試験結果および考察	69
4.1 コンクリートの強度特性	69
4.2 コンクリートの中酸化速度	73
4.3 コンクリート中の鉄筋の腐食状況	74
4.4 コンクリート中の塩化物イオンおよび酸素	82
4.5 総合的考察	87
5. 結 論	88
6. あ と が き	89
参 考 文 献	89

1. 研究の概要

1.1 目的および背景

海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物に限らず陸上の構造物においても、塩分（塩化物イオン）がコンクリート中の鉄筋周辺にある程度以上存在すると鉄筋の腐食を発生させること、また腐食が進むと構造物の劣化につながる（以下、塩害と称する）は、今やコンクリート構造物の設計や施工に携わる技術者にとっては一般常識となっている。しかしながら、塩害を引き起こす要因となる塩化物イオンには、使用される材料中にあらかじめ存在し、練り混ぜ時にコンクリートに混入されるもの（以下、内在塩化物イオンと略す）と、コンクリート硬化後、外部環境よりコンクリート中に浸入してくるもの（以下、外来塩化物イオンと略す）との2種類があり、これらの2種類の塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響の程度については、必ずしも明らかになっていない部分がある。すなわち、表-1に示すように塩化物イオンの種類、および環境の種類によって分類した時、外来塩化物イオンの鉄筋腐食への影響、および外来塩化物イオンの浸入の少ない環境（陸上構造物をとりまく環境、あるいは海洋構造物においては比較的短い材令での状態）での、内在塩化物イオンの鉄筋腐食への影響については、既に多くの研究が行われ、その影響は大きいことが明らかにされている。一方、外来塩化物イオンの浸入の多い環境（海洋構造物において長期間海水の作用を受ける状態）での、内在塩化物イオンの鉄筋腐食への影響については明らかとなっていないが、外来塩化物イオンが多量であり、しだいに飽和状態に近づいてくることから、内在塩化物イオンが鉄筋の腐食に及ぼす影響は小さくなるという可能性もある。

これらを明らかにするために、外来塩化物イオンの浸入の多い環境（海洋構造物において長期間海水の作用を

受ける環境）において、内在塩化物イオンが鉄筋の腐食に及ぼす影響程度について把握することとした。なお、内在塩化物イオンには、練り混ぜ水として海水を使用することにより混入されるもの、細骨材として海砂を使用することにより混入されるもの等がある。一般に、練り混ぜ水として海水を使用することにより混入される塩化物イオン量の方が海砂を使用することにより混入される塩化物イオン量に比較して多いことから、本研究では海水を使用することによって混入される内在塩化物イオンを対象とした。

つまり、本研究の主目的は、長期間海水の作用を受けるコンクリートにおいて、練り混ぜ水として海水を使用することがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響について把握することである。

また、本研究では、長期間海水の作用を受けるコンクリートにおいて、練り混ぜ水として海水を使用することがコンクリートの強度特性に及ぼす影響、セメントの種類の違いが鉄筋の腐食やコンクリートの強度特性に及ぼす影響、鉄筋のかぶり厚さの違いが鉄筋の腐食に及ぼす影響について把握することも目的とした。

1.2 研究の方法

上述の目的を達成するための方法としては、促進試験を行って評価する方法、および実構造物の環境に近い条件で暴露試験を行って評価する方法が考えられる。前者は、促進試験結果と実際の環境での状態との対応が必ずしも十分には出来ないため後者に比べて信頼性に劣ることから、本研究では後者の方法を用いることとした。暴露試験における評価は、材令1年、5年、10年、15年、および20年で行うこととした。また、暴露試験を行う環境としては、外来塩化物イオンの浸入の多い海洋環境下の感潮部とすることとし、本研究では、自然の潮汐作用を模擬することのできる当研究所内の海水循環水槽内の感潮部で暴露試験を行った。

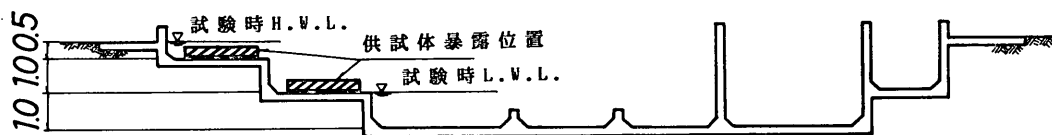
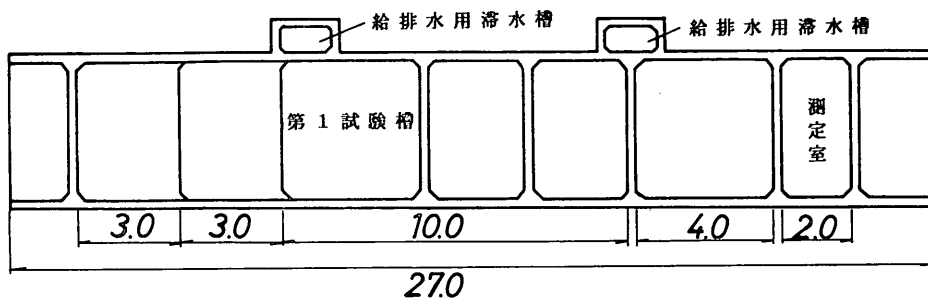
暴露試験を行った海水循環水槽は、図-1に示すような構造であり、1日2回ポンプで海水を給排水し、1.5mの潮位差で自然の潮汐作用を模倣するものである。その水位測定記録の一例を図-2に示す。水槽内の海水は、久里浜湾（神奈川県）より直接汲み上げたものである。その海水の成分を、付表-1に示す。海水の平均温度は夏期で約24℃、冬期で8℃である。

暴露試験を行ったコンクリート供試体は、7種類のセメントを使用し、練り混ぜ水として水道水を使用したもの、および海水を使用したものである。また、それぞれの供試体について、かぶり厚さを2, 4, 7cmと変化した鉄筋を埋め込んだ供試体も加えた。

表-1 2種類の塩化物イオンがコンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす影響

塩化物イオンの種類 環境	外来 塩化物イオン	内在 塩化物イオン
外来塩化物イオンの少ない環境（陸上構造物、海洋構造物においては短い材令のもの）	—	比較的大きい
外来塩化物イオンの多い環境（長期間海水の作用を受ける海洋構造物等）	大きい	不明

平 面 図



断 面 図

(単位：m)

図-1 海水循環水槽の構造および供試体の暴露位置

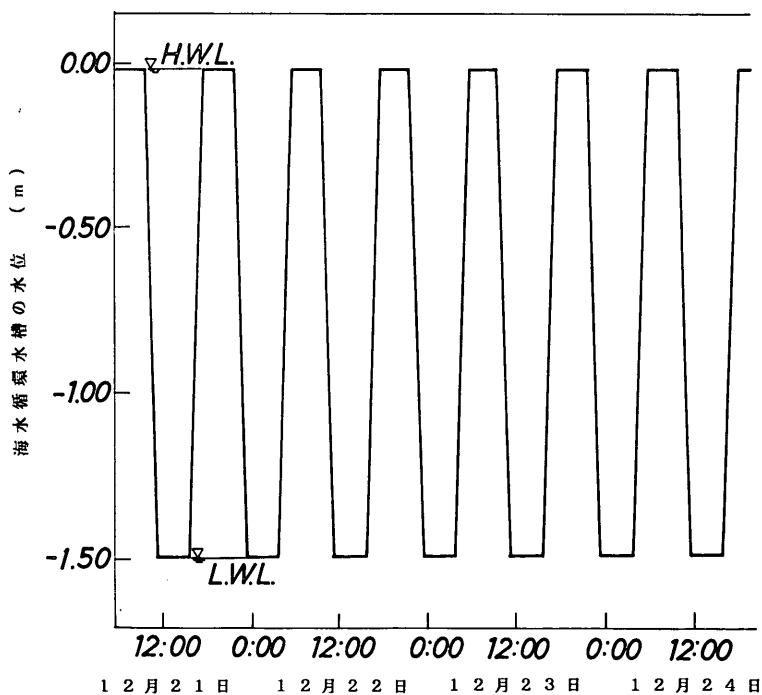


図-2 海水循環水槽の水位測定記録の一例

表-2 セメントの化学分析結果

セメントの種類	記号	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	S (%)	f. cao (%)
普通ポルトランドセメント	N0	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 (SO ₃ 増)	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	H0	1.1	0.5	20.6	5.2	2.7	65.3	1.2	2.5	0.37	0.54	—	0.9
中庸熱ポルトランドセメント	M0	0.8	0.2	23.5	4.5	3.8	63.4	1.2	1.7	0.28	0.48	—	0.5
高炉セメント B種	B0	0.4	0.7	25.7	9.7	2.1	54.1	3.2	2.4	0.46	0.51	0.4	0.3
高炉セメント B種 (SO ₃ 増)	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-3 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 浸水 方法	フロー 値 (mm)	強さ							
			比表面積 (cm ² /g)	標準網 ふはい 88μ残 分(%)	水量 (%)	始発 (時分)	終結 (時分)			曲げ強さ (kgf/cm ²)				圧縮強さ (kgf/cm ²)			
										1日	2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	N0	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 (SO ₃ 増)	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	H0	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	M0	3.19	3260	2.0	25.5	3:02	4:27	良	255	—	25.3	36.0	62.2	—	90	146	317
高炉セメント B種	B0	3.04	3850	1.4	28.8	3:34	5:10	良	255	—	28.1	34.9	62.0	—	97	152	346
高炉セメント B種 (SO ₃ 増)	B2	3.00	4100	1.3	29.0	3:54	5:52	良	253	—	26.8	37.8	63.8	—	95	152	325

表-4 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 ²)	圧縮強さ (3日) (kgf/cm ²)
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO		比表面積 (cm ² /g)	標準網 ふはい 88μ 残分 (%)		
60.6	2.5	32.5	2.98	42.30	0.2	67.2	468

2. 供試体の製作および養生

2.1 使用材料

セメントとして、普通ポルトランドセメント(記号N0およびN2)、早強ポルトランドセメント(記号H0)、中庸熱ポルトランドセメント(記号M0)、高炉セメントB種(記号B0およびB2)、およびアルミナセメント(記号AL)を用いた。記号N0、H0、M0、B0のセメントは、セメントの種類別にそれぞれ市販の3銘柄を等量で混合したものである。また、N2、B2のセメント

は、それぞれN0、B0にりん酸石膏を三酸化硫黄(SO₃)重量で2%増量したものである。りん酸石膏はあらかじめ40℃以下で乾燥させ、44μm以下に微粉碎して使用した。アルミナセメントは市販品である。表-2~4にこれらのセメントの化学成分および物理試験結果を示す。

粗骨材として神奈川県相模川産の川砂利(最大寸法25mm)を用い、細骨材として同産の川砂を用いた。これらの骨材の物理試験結果を表-5に示す。

コンクリートの練り混ぜ水として、水道水および海水を用いた。海水の化学成分を表-6に示す。

表-5 使用骨材の物理的性質

種 別	比 重	吸水量 (%)	フルイに留まるものの重量百分率 (%)											粗粒率	
			フルイの呼び寸法 (mm)												
			30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
細 骨 材	2.61	2.52	0	0	0	0	0	0	0	14	38	63	86	97	2.98
粗 骨 材	2.65	1.05	0	4	21	42	68	96	100	100	100	100	100	100	6.85

注) 神奈川県相模川産

表-6 練り混ぜ水として使用した海水の化学成分

比 重 (20℃)	PH (20℃)	化 学 成 分 (mg/l)						
		Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃
1.024	8.03	10125	387	376	1180	17136	2412	65

表-7 コンクリートの配合

セメント の 種 類	練りま ぜ 水	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 (l)	AE剤 (c.c.)
N0	水道水	25	6.6	3.4	52.7	37.0	153	290	740	1,261	2.9	—
	海水	25	5.6	3.2	53.4	36.0	155	290	718	1,277	2.9	—
N2	水道水	25	6.4	4.0	54.5	37.0	158	290	734	1,251	2.9	—
	海水	25	5.1	3.4	55.2	36.0	160	290	713	1,270	2.9	—
H0	水道水	25	3.7	3.9	53.1	37.0	154	290	738	1,258	2.9	—
	海水	25	5.7	3.1	55.2	36.0	160	290	711	1,263	2.9	—
M0	水道水	25	6.5	4.8	52.4	37.0	152	290	742	1,264	2.9	—
	海水	25	4.6	4.0	53.1	36.0	154	290	720	1,280	2.9	—
B0	水道水	25	3.5	3.0	52.4	37.0	152	290	738	1,258	2.9	—
	海水	25	4.0	3.8	53.1	36.0	154	290	716	1,274	2.9	—
B2	水道水	25	4.2	3.8	54.8	37.0	159	290	729	1,242	2.9	—
	海水	25	4.7	4.1	55.5	36.0	161	290	708	1,258	2.9	—
AL	水道水	25	6.3	3.1	52.1	37.0	151	290	737	1,256	2.9	20
	海水	25	5.1	3.5	52.8	36.0	153	290	716	1,272	2.9	—

注) スランブと空気量は試験値

すべての供試体において、減水剤としてポゾリス No. 5 L (日曹マスタービルダーズ(株)製)を用い、アルミナセメントを使用し水道を練り混ぜ水としたものについては、空気量の調整剤として、AE剤ポゾリス No. 303を使用した。

鉄筋は、JIS G 3112に定められている $\phi 9$ mmの丸鋼を用い、長さは18cmとした。鉄筋はあらかじめ6本について引張試験を実施し、降伏点 4010kgf/cm^2 、引張強度 5950kgf/cm^2 、伸び26%、絞り49%であることを確認した。鉄筋は、コンクリート中へ埋め込む前に10%クエン酸ニアンモニウム溶液によって黒皮を除去し、光沢状態とした。

2.2 供試体の製作

コンクリートの配合条件として、単位セメント量 290kg/m^3 、スランブ5cm、空気量4%を目標とした。配合は表-7に示す通りであり、水セメント比は52~55%、スランブは3.5~6.6cm、空気量は3.0~4.8%であった。

供試体は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の円柱供試体であり、圧縮強度試験用供試体、鉄筋腐食試験用供試体、自然電極電位測定用供試体の3種類のを製作した。

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の形状は、図-3に示す通りである。図に示すように供試体には鉄筋を3本埋め込み、かぶりをそれぞれ2, 4,

7cmと変化させた。また、鉄筋は、コンクリート供試体の高さ方向の中央位置(鉄筋端面はコンクリート供試体の上下面から6cmの位置)に配置した。なお、自然電極電位測定用供試体の鉄筋の上端には $\phi 1\text{mm}$ の穴を開け、それに電位測定用のリード線をハンダ付けした。

コンクリート供試体の練り混ぜには容量200リットルの強制練りミキサーを用い、練り混ぜおよび打設は 20°C の恒温室内で行った。型枠へのコンクリートの打設は2層に分け、各層をパイプレーターにより締め固めた。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、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て、表面より4~5cmの部分を再び締め固めた。

2.3 供試体の養生

製作したコンクリート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日間養生(早強ポルトランドセメントの場合には3日間)を行った後、海水循環水槽内に設置し暴露試験を開始した。ただし、アルミナセメントを使用し、練り混ぜ水として海水を使用したコンクリート供試体は、硬化が遅れ翌日脱型が出来なかったため材令4日で脱型し、ただちに海水循環水槽内に設置した。また、アルミナセメントを使用し、練り混ぜ水として水道水を使用したコンクリート供試体は翌日脱型し、脱型後ただちに海水循環水槽内に設置した。

3. 試験方法

本研究で実施した試験の方法を以下に示す。

(1) コンクリートの圧縮強度試験

試験は、初期材令、1年、5年、10年、および20年において実施した。初期材令は、セメントの種類により変化させ、アルミナセメントを使用し、練り混ぜ水として水道水を使用したものは、材令1日とし、アルミナセメントを使用し、練り混ぜ水として海水を使用したものは、材令4日とした。また、早強ポルトランドセメントを使用したものは、材令7日とし、その他のものは、材令28日とした。

試験方法は、JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準拠し、各材令において、セメントの種類、練り混ぜ水の種類毎に3体ずつ試験を行った。初期材令では片面仕上げ面について石膏でキャッピングを行い、その後の材令では両面ともウッドメタルでキャッピングを行った。

(2) 粉末X線回折

材令20年において、コンクリート中の結晶鉱物を確認

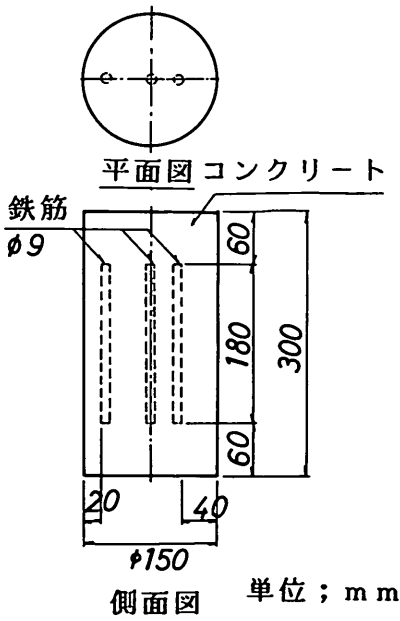


図-3 鉄筋腐食試験用供試体および自然電極電位測定用供試体の形状

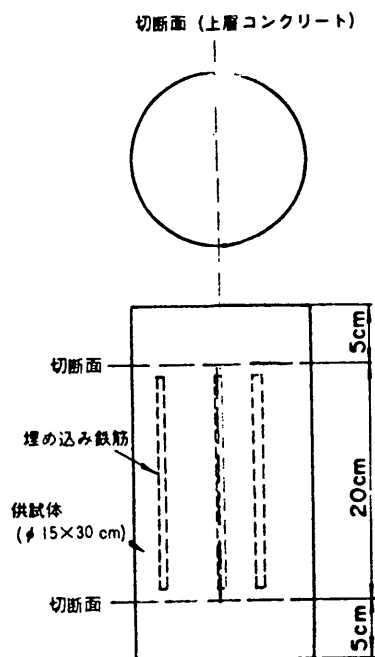


図-4 中性化試験における供試体の切断方法

するため、セメントの種類、および練り混ぜ水の種類毎に2～4試料を採取し、X線回折を行った。

採取位置は、コンクリート供試体の高さ方向の中央位置で、表面からの距離1cmおよび7.5cmの2箇所とした。ただし、一部のコンクリート供試体については、表面からの距離3cm、および5cmの2箇所の試料も採取した。X線回折装置には、回転対陰極形装置を使用した。

(3) コンクリートの中性化深さの測定

測定は、材令1年、5年、10年、および20年において、セメントの種類、および練り混ぜ水の種類毎に3体ずつ実施した。

コンクリート供試体を図-4に示すように上面から5cmおよび25cmで切断し、さらにその中央部を半割として、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。中性化深さは非常に小さかったため、各断面での最大中性化深さのみを測定した。

(4) コンクリート中鉄筋の発錆面積率の測定

コンクリート中鉄筋の発錆面積率の測定は、材令5年、10年、および20年において、かぶり厚さ毎に3～5本の鉄筋について実施した。

コンクリート供試体から取り出した鉄筋について、肉眼で確認できる錆をトレースして、プラニメータによって発錆面積を測定した。測定結果より鉄筋の表面積(50

cm²とした)に対する発錆面積率を求めた。

(5) コンクリート中鉄筋の最大腐食深さの測定

コンクリート中鉄筋の最大腐食深さの測定は、材令20年において行った。

コンクリート供試体から取り出した鉄筋を10%クエン酸ニアンモニウム溶液に浸し、錆を除去した後、錆による断面欠損部分の直径と、断面欠損部分週辺の健全な部分の直径とを比較することにより、腐食深さを求めた。直径の測定には、肉厚計を用いた。なお、測定部は断面欠損部およびその周辺部としたが、鉄筋には加工時より凹凸があったことから、測定値にはそれによる誤差が若干含まれていると考えられる。

(6) コンクリート中鉄筋の自然電極電位の測定

コンクリート中鉄筋の自然電極電位の測定は、暴露試験開始から材令20年まで1、4、7、10月において定期的に行った。なお、測定は、供試体が完全に海水中に浸漬した状態で行った。

基準電極には、海水塩化銀電極を用いた。

(7) コンクリート中鉄筋のアノード分極曲線の測定および不動態のグレイドの判定

コンクリート中鉄筋のアノード分極曲線の測定は、材令10年、15年、および20年において、セメントの種類、練り混ぜ水の種類、およびかぶり厚さの違い毎に1～3本の鉄筋について行った。

コンクリート供試体上面のコンクリートを割裂して露出させた鉄筋にリード線をつなぎ、露出した鉄筋をエポキシ樹脂で被覆した状態で、コンクリート供試体を海水中に浸漬させて測定した。対極としてステンレス鋼を用い、また、基準電極としては、材令10年および15年には飽和甘コウ電極を用い、材令20年には銀塩化銀電極を用いた。なお、材令20年の測定値では、電極による電位差を飽和甘コウ基準電位に補正した。材令10年においては、電位を自然電極電位からスタートし、-1000mVまで陰分極させた後、逆に+1000mVまで陽分極させて、その間の電位および電流を測定した。材令15年および20年においては、自然電極電位からスタートし、逆に+1000mVまで陽分極させた後に-1000mVまで陰分極させて、その間の電位および電流を測定した。測定装置として、ポテンショスタットおよび関数発生器を用いた。

アノード分極曲線の結果より、以下に示す不動態のグレイドを設定し¹⁾、判定を行った。

すなわち、鉄筋の自然電極電位を E_n として、電位 E が、 $E_n + 0.2V < E < +0.6V$ (飽和甘こう電極に対し) の範囲で、

グレイド0：電流密度が一度でも $100\mu A/cm^2$ を越え

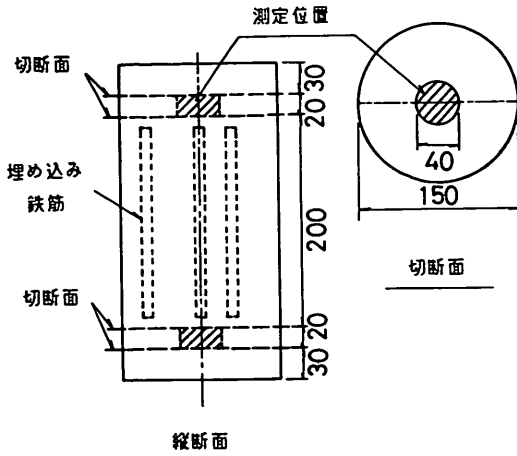


図-5 酸素拡散用試験体の切り出し

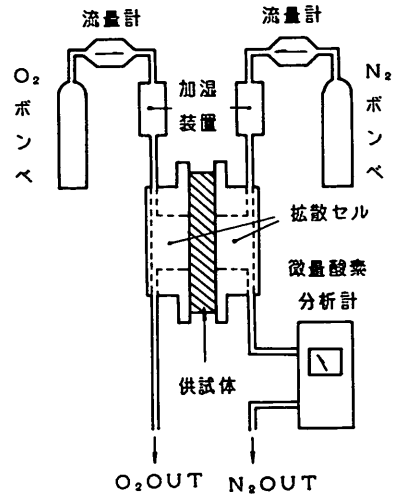


図-6 酸素の拡散試験装置

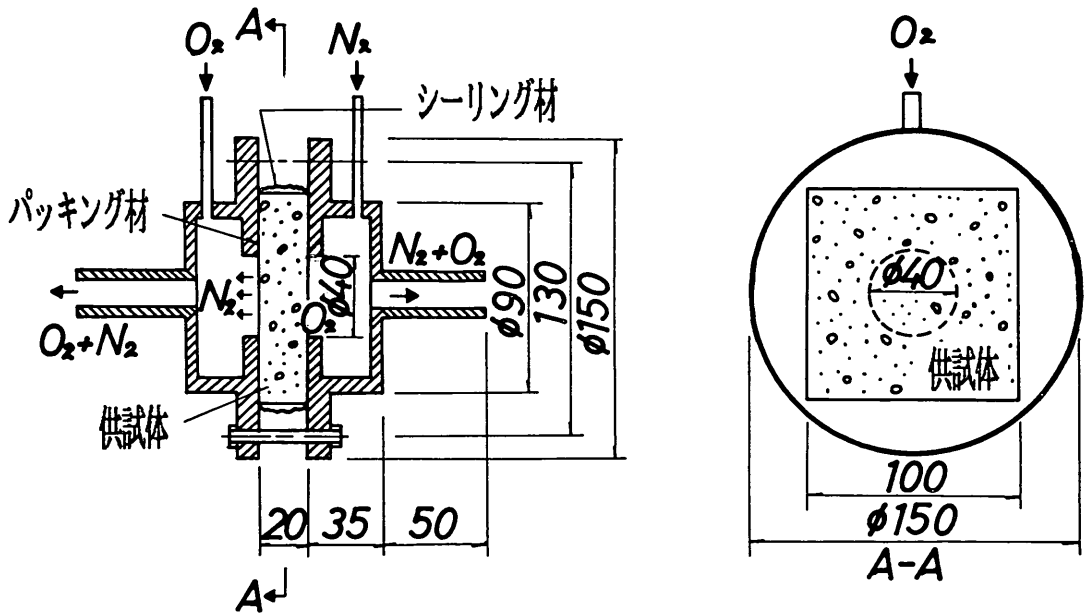


図-7 拡散セルの形状

- るもの（全く不動態がないと判断した）
- グレイド1：電流密度が、 $10\sim 100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの（不完全ではあるが、若干不動態があると判断した）
 - グレイド2：電流密度が一度でも $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド1またはグレイド2に含まれないもの
 - グレイド3：電流密度が、 $1\sim 10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ にあるもの

- グレイド4：電流密度が、一度でも $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越え、かつ、グレイド1、2および3に含まれないもの
- グレイド5：電流密度が、 $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を越えないもの（非常に良好な不動態があると判断される）

- (8) コンクリート中の塩化物イオン量の測定
 コンクリート中の塩化物イオン量の測定は、材令10

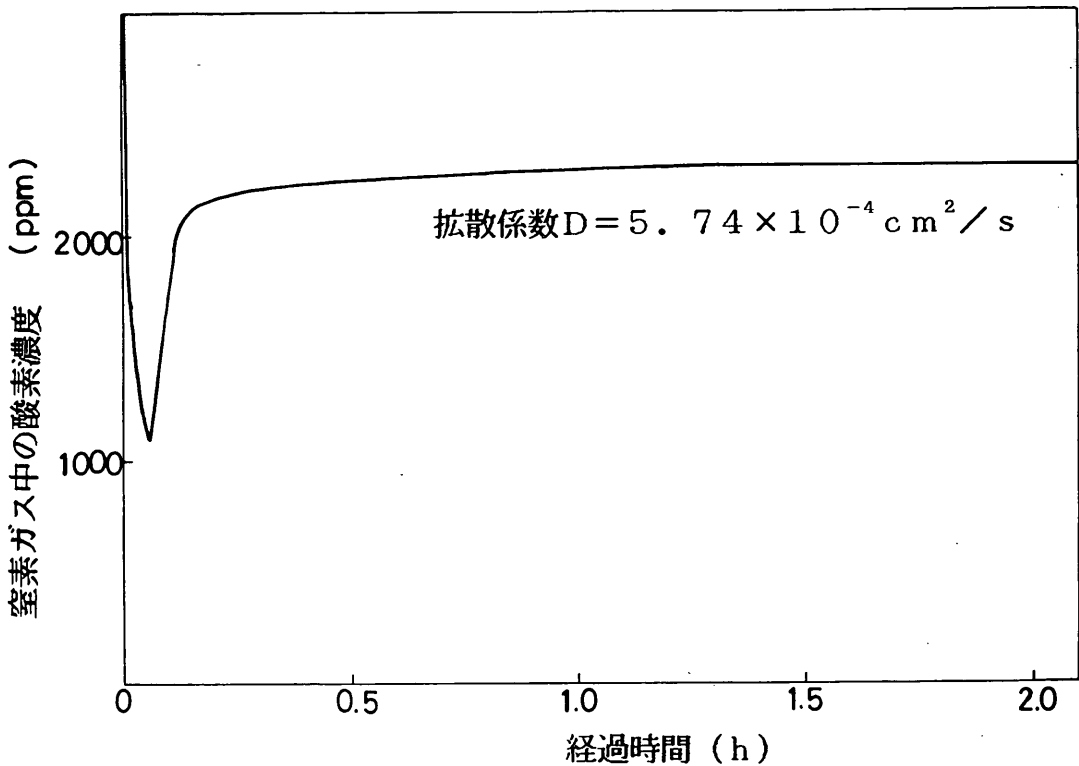


図-8 窒素ガス中の酸素濃度

年、15年、および20年において行った。

コンクリート供試体の、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5~10 g程度採取し、これより粗骨材を取り除いて105 μ ふるいを全通する程度に微粉砕したモルタル分を試料として、試料中の水溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量を測定した。抽出方法としては、全塩化物イオン量については、白金つぼで溶解して抽出する方法を用い、水溶性塩化物イオン量については、20 $^{\circ}$ Cの蒸留水中にて24時間抽出する方法¹⁾を用いた。定量方法としては、全塩化物イオン量、水溶性塩化物イオン量ともクロム酸銀一吸光光度法²⁾を用いた。

(9) コンクリート中の酸素の拡散係数の測定

コンクリート中の酸素の拡散係数³⁾(1気圧のもとで、濃度差によってコンクリート中を透過する気体状態の酸素の拡散係数)の測定は、材令20年においてセメントの種類、および練り混ぜ水の種類毎に行った。

試験体には、図-5に示すように、コンクリート供試体の上下の端部より3 cmから5 cmの間の厚さ2 cmの部分をコンクリートカッターにより切り出したものを用いた。試験体の厚さ、飽水重量(水中に72時間浸漬して吸

水させた後、表面水を布で拭き取ったときの重量)、および絶乾重量(60 $^{\circ}$ Cで炉乾燥し、一定重量となったときの重量)を測定した後、試験体の飽水率が0%, 60%, および80%の時の拡散係数を測定した。なお、飽水率は、次式で算出した。

$$\text{飽水率}(\%) = \frac{(\text{試験時の重量} - \text{絶乾重量})}{(\text{飽水重量} - \text{絶乾重量})} \times 100 \quad \text{一式(1)}$$

拡散係数の測定に用いた試験装置は、図-6に示すようなもので、試験体の両側に拡散セルを取付け、セル内に等圧力(1気圧)の窒素ガス、および酸素ガスを継続して流し、窒素ガス中の酸素濃度を微量酸素分析計で測定するものである。拡散セルの形状は、図-7に示す通りである。

窒素ガス中の酸素濃度は、図-8に示すように、時間の経過とともに一定値となる。その時を定常状態とし、定常状態での窒素ガス中の酸素濃度より次式を用いて酸素の拡散係数を求めた。

$$D = C_2 \cdot Q \cdot L / (A \cdot C_1) \quad \text{一式(2)}$$

ここで、 D : 酸素の拡散係数 (cm^2/s)

C_2 : 定常状態での窒素中の酸素濃度 (ppm)

C_1 : 試験体両面の酸素濃度差 (ppm)

Q : 窒素流量 (cm^3/s)

L : 試験体厚さ (cm)

A : 測定部分の面積 (cm²)

4. 試験結果および考察

4.1 コンクリートの強度特性

1) コンクリートの表面状況

材令5年, 10年, および20年において, コンクリート供試体の表面状況の観察を行った。材令5年および10年においては, 表面にしみやはだ荒れが認められる程度で, ひびわれや剝離の認められる供試体はなかった。材令20年においては, その代表例を図-9に示すように, 表面にひび割れや剝離の認められる供試体があった。これによると, ひび割れや剝離の発生状況には, 使用したセメントの種類によって顕著な違いがみられた。すなわ

ち, 普通, 早強, 中庸熟といったポルトランド系のセメントを使用した供試体の表面には多くのひびわれや剝離が認められたが, 高炉セメントB種, アルミナセメントを使用した供試体の表面にはそれほどひびわれや剝離は認められなかった。ひびわれや剝離の発生の理由は, 主に膨張性生成物であるエトリンガイトの生成によるものと考えられるが, 詳細は(3)強度低下の原因で述べる。

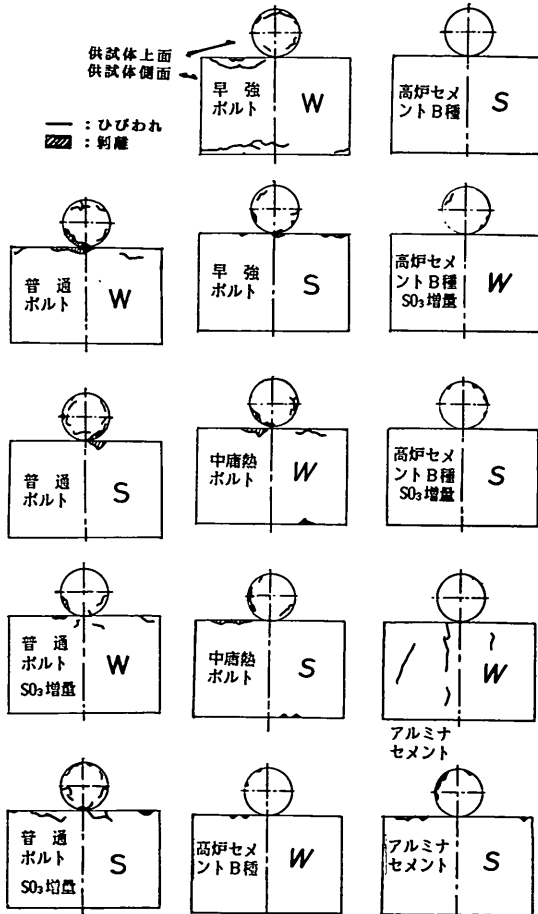
また, 図-9に示すように, 練り混ぜ水の違いによるひびわれや剝離の発生の違いは認められなかった。

(2) コンクリートの圧縮強度

図-10は, 初期材令での圧縮強度に対する各材令での強度比の推移を示したものである。材令と強度比との関係は, ほとんどの供試体でほぼ同様の傾向がみられた。すなわち, 材令5年程度までは強度は増進するが, 材令5年以降は徐々に低下する傾向にあり, 材令20年においては初期強度を下回るという結果であった。材令20年における圧縮強度の初期強度に対する比は, ポルトランド系セメントでは0.76~0.94, 高炉セメントB種では0.98~1.01, アルミナセメントでは0.79であった。材令20年における圧縮強度の初期強度に対する比が比較的大きかったセメント種は, 高炉セメントB種であり, このセメントは, ポルトランド系セメントに比べて耐海水性が若干優れているといえる。

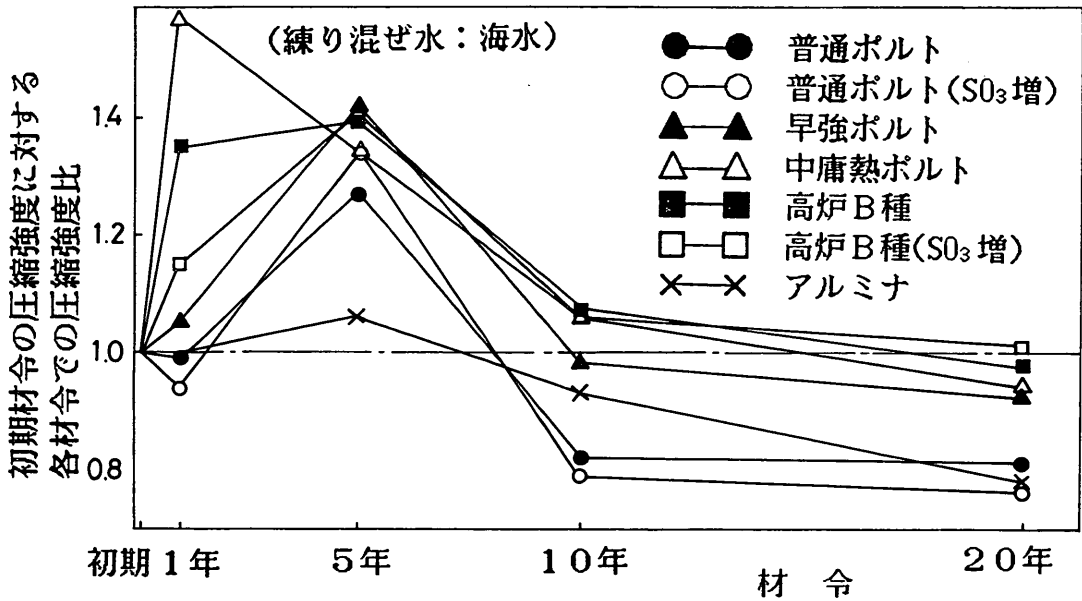
図-11は, 水道水を練り混ぜ水として使用したコンクリートの圧縮強度と海水を練り混ぜ水として使用したコンクリートの圧縮強度との強度比の推移を示したものである。練り混ぜ水として海水を使用すると水道水の場合に比べて若干早強性がでるため, 初期材令においてはほとんどの供試体で強度比が1.0を上回っていた。しかしながら, その後強度比は1.0に近づき, 材令20年における強度比は0.92~1.03となった(ただしアルミナセメントは除く)。このように, ポルトランド系セメント, および高炉セメントB種においては, 水道水を練り混ぜ水としたコンクリートと海水を練り混ぜ水としたコンクリートの長期材令における圧縮強度比がほぼ1.0となったことから, 海水を練り混ぜ水として使用することがコンクリートの長期材令の圧縮強度に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

なお, アルミナセメントにおいて, 練り混ぜ水として海水を使用したコンクリートの強度の発現が遅れた。原因は不明であるが, この現象は以前より知られている⁴⁾。また, アルミナセメントにおいて, 水道水を練り混ぜ水として使用したコンクリートと海水を練り混ぜ水として使用したコンクリートとの強度比が材令20年で1.0を大きく上回ったが, その原因については次の章で述べる。



W : 練り混ぜ水 水道水 S : 練り混ぜ水 海水

図-9 コンクリートのひびわれおよび剝離状況 (材令20年)



早強ボルトランドセメントの初期材令は4日、アルミナセメントの初期材令は1年、その他のセメントの初期材令は28日である。

図-10 初期材令の圧縮強度に対する強度比

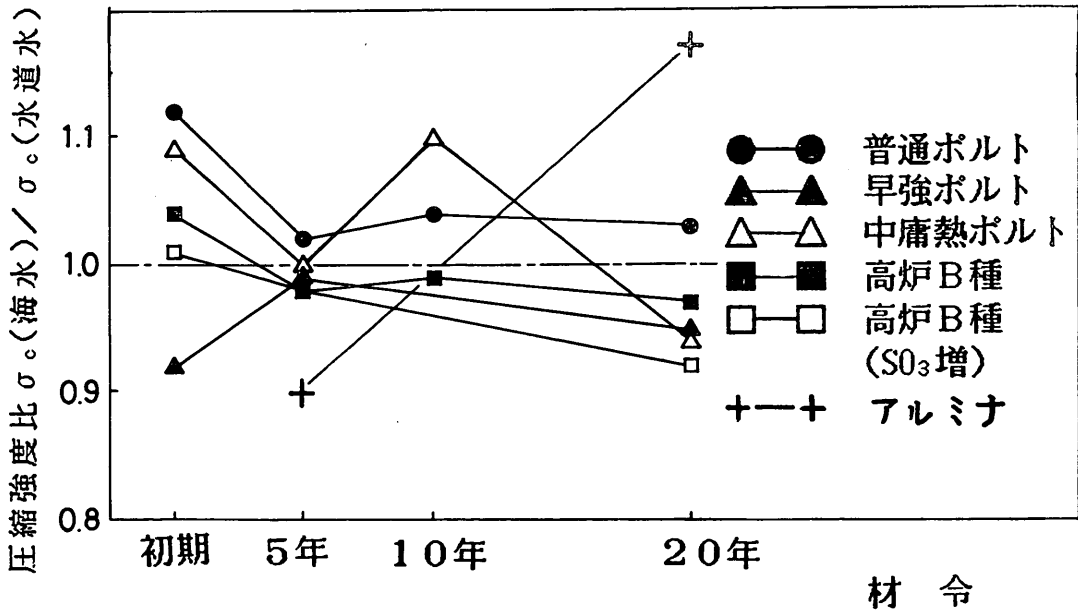


図-11 練り混ぜ水の違いが長期強度に及ぼす影響

表-8 X線回折により確認された生成鉱物

セメント種類	生成鉱物	化学式	回折角(°)
ポルトランド系 および高炉B種	エトリングイト	$C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	9.1付近
	フリーデル氏塩	$C_3A \cdot CaCl_2 \cdot nH_2O$	11.2付近
	水酸化カルシウム	$Ca(OH)_2$	18.0付近
	カルサイト	$CaCO_3$	29.4付近
アルミナ	—	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$	12.3付近
	—	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$	17.3付近
	水酸化アルミニウム	$2(Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$	18.2付近
	メリライト	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2, 2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	31.3付近
	ペロプスカイト	$CaO \cdot TiO_2$	33.0付近

(3) コンクリートの強度低下の原因

コンクリートの強度低下の原因は、ポルトランド系セメントおよび高炉セメントB種と、アルミナセメントとで異なったものであると考えられる。

ポルトランド系セメントおよび高炉セメントB種においては、海水の作用を受けることによる強度低下は、塩化物イオンの浸入による多孔化と硫酸イオンの浸入によるエトリングイトの生成が支配的であるといわれている。すなわち、比較的初期の材令での強度低下の要因は、コンクリート中に浸入した塩化物イオンがコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、コンクリートを多孔化させることにより強度を低下させるものであり、後期の材令では、浸入した塩化物イオンの一部が固定化してフリーデル氏塩となり、これと海水中の硫酸イオンとが反応し膨張性物質であるエトリングイトを生成してコンクリートの表層より膨張破壊を生じさせることにより強度を低下させるといわれている⁵⁾。

材令20年において、コンクリートの粉末X線回折を行った結果、コンクリート中に表-8に示すような生成鉱物の存在が確認された。図-12は、ポルトランド系セメントおよび高炉セメントB種を使用したものに確認されたそれぞれの生成鉱物について、その回折ピークの高さを試料中の石英の20.9°のピーク高さに対する比として(石英のピーク高さを100とする)表したものである。各試料中の石英の含有率が一定であると仮定した場合には、ピークの高さ比から結晶鉱物の量を相対的に比較することが出来ると考えられる。

エトリングイトは、すべての試料でその存在が確認された。セメントの種類の違いによる生成量の差はほとんどみられなかった。また、練り混ぜ水の違いによる生成

量の差も同様にほとんどみられなかった。

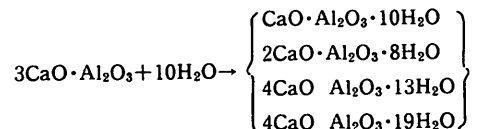
フリーデル氏塩は、高炉セメントB種を使用し、水道水を練り混ぜ水としたコンクリートの中心部の試料を除いて、その他の試料については存在が確認された。高炉セメントB種を使用し、水道水を練り混ぜ水としたコンクリートの中心部に存在が認められなかったのは、塩化物イオンの浸入量が極めて少なかったことによるものと考えられる。練り混ぜ水の違いによる生成量の差は若干認められ、海水を練り混ぜ水として使用したコンクリートの方が水道水を使用したものに対して若干大きい傾向が認められた。

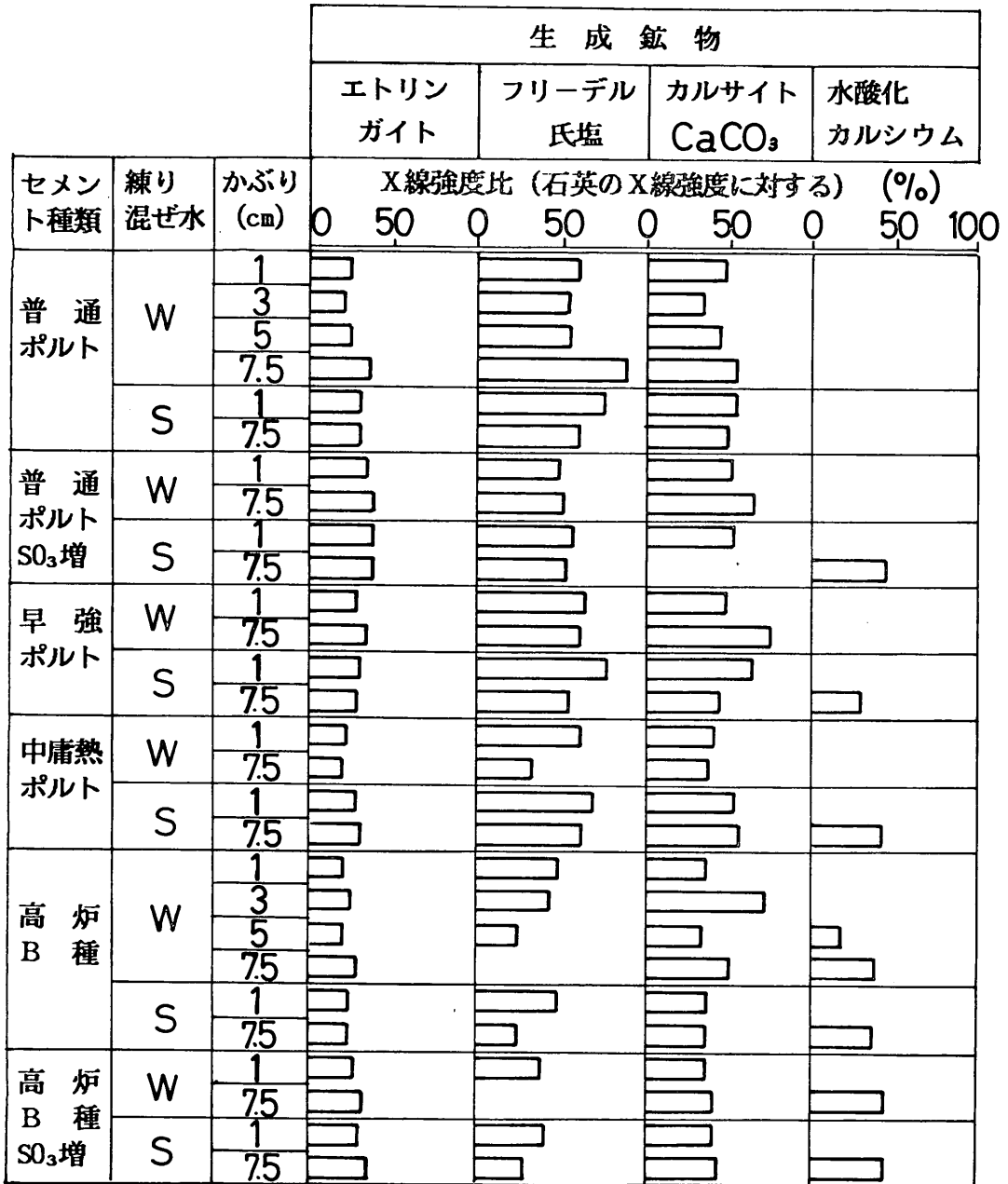
水酸化カルシウムは、海水を練り混ぜ水として使用したコンクリートの中心部には認められた。一方、水道水を練り混ぜ水としたもの、および表面からの距離が小さい部分では認められず、その部分では、塩化物イオンの浸入により水酸化カルシウムの溶出が起こったと考えられる。

カルサイトは、水酸化カルシウムと炭酸ガスとが反応して生成されたものであり、すべての試料で存在が認められた。

以上の結果より、ポルトランド系セメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリートの強度低下は、上述の水酸化カルシウムの溶出による多孔化、およびエトリングイトの生成による膨張劣化が原因と考えられる。

アルミナセメントの水和反応は、一般に次のように考えられている。





W:水道水 S:海水

図-12 生成鉱物のX線強度比 (材令20年)

練り混ぜ水		生成鉱物									
		CaO·Al ₂ O ₃ ·10H ₂ O		3CaO·Al ₂ O ₃ ·6H ₂ O		2(Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O)		メリライト		ペロブスカイト	
		X線強度比 (石英のX線強度に対する) (%)									
		0 50		0 50		0 50		0 50		0 50 100	
W	1	[]		[]		[]		[]		[]	
	7.5	[]		[]		[]		[]		[]	
S	1	[]		[]		[]		[]		[]	
	7.5	[]		[]		[]		[]		[]	

図-13 アルミナセメントを使用したコンクリートの生成鉱物のX線強度比 (材令20年)

→ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ 一式(3)
すなわち、主成分である $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ が水と反応し、準安定な中間化合物を経て、最終的には安定な $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ と $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ に転移する。この転移に際して、水和硬化体の組織の多孔化が起こると共に結晶水の放出による空隙の増加が起こり、強度の低下を招くといわれている。

図-13 は、アルミナセメントを使用したものに確認された生成鉱物について、その回折ピークの高さを試料中の石英の 20.9° のピーク高さに対する比として (石英のピーク高さを 100 とする) 表したものである。

図-13 に示されるように、コンクリート中には $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ および $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ の存在が認められた。したがって、アルミナセメントを使用したコンクリートの強度の低下は、前述したように $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ と $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ への転移による水和硬化体の組織の多孔化および結晶水の放出による空隙の増加に起因するものと考えられる。

コンクリートの表層部と中心部とを比較すると、図-13に示されるように、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の生成量は、表層部で多かったのに対して中心部では少なかった。逆に、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ は、表層部では全く認められなかったのに対して、中心部では存在が認められた。 $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ も同様に表層部で少なかったのに対して中心部では多かった。

また、練り混ぜ水の違いで比較すると、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の生成量については、海水を練り混ぜ水としたものの方が水道水を練り混ぜ水としたものに比較して多い傾

向が認められた。逆に、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ については、水道水を練り混ぜ水としたものの方が海水を練り混ぜ水としたものに比較して多い傾向が認められた。 $2(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ も同様に水道水を練り混ぜ水としたものの方が海水を練り混ぜ水としたものに比較して多い傾向が認められた。これらの結果より、海水には $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ が $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ に転移するのを抑制する作用があると考えられる。したがって、表層部より中心部の方が、また海水を練り混ぜ水としたものより水道水を練り混ぜ水としたものの方が、よりコンクリート内部の空隙が大きくなり、強度の低下量も大きいと考えられる。材令20年において、練り混ぜ水として海水を使用したコンクリートの圧縮強度の方が水道水を使用したものに比較して大きかったという結果は上述の理由によるものと考えられる。

また、以上のほか、図-13 に示すように生成鉱物として、メリライトおよびペロブスカイトが認められたが、これらはアルミナセメントの非水硬性鉱物である。なお、塩化物関連鉱物は、いずれの試料にも認められなかった。

4.2 コンクリートの中性化速度

一般に、コンクリートの中性化は、大気中や水中の炭酸ガスとコンクリート中の水酸化カルシウムとが反応し、コンクリートのアルカリ性を中性化させる現象であり、中性化がコンクリート中の鉄筋位置まで達すると、鉄筋は発錆しやすくなることから、中性化の速度を検討する必要がある。

図-14 は、コンクリート供試体の横断面および縦断面

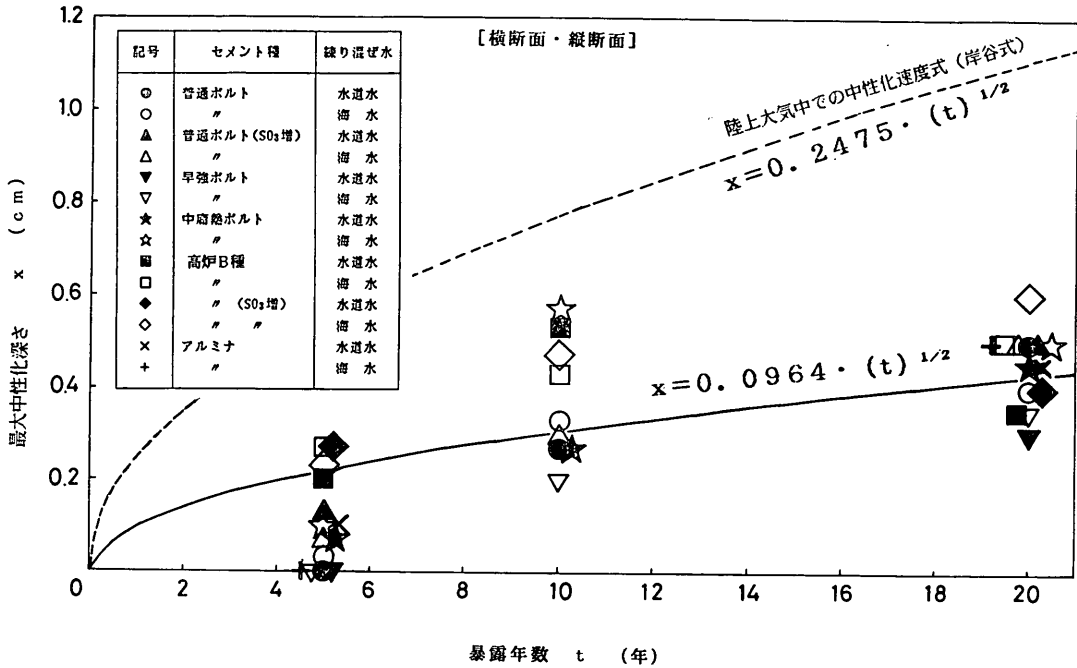


図-14 コンクリートの最大中性化深さ

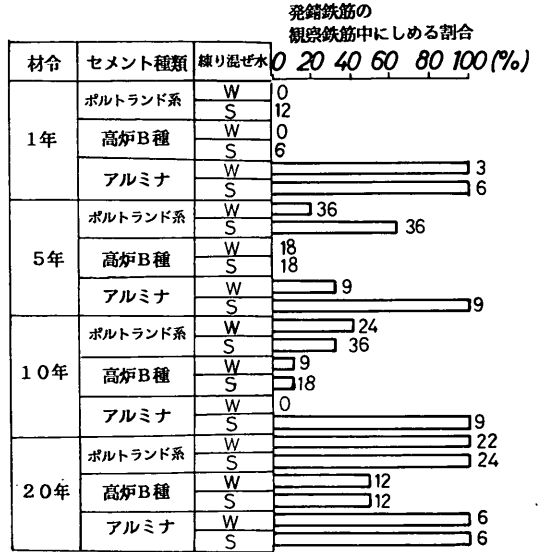
における最大中性化深さの平均値と材令との関係を示したものである。練り混ぜ水の違いによる中性化深さの差はほとんどみられなかったが、セメントの種類の違いによる差は若干みられた。陸上大気中での中性化速度のセメントの種類間の比は、普通ポルトランドセメントの場合を1とすると、早強ポルトランドセメントで0.79、高炉セメントB種で1.41である⁹⁾といわれている。本研究においても陸上大気中の場合と同様の傾向が認められた。

また、図-14中に示した実線は、中性化深さの実験値を近似する線であり、中性化深さは材令の平方根に比例すると仮定して求めたものである。また破線は、陸上大気中での中性化速度の推定線であり、中性化速度式として一般的に用いられている岸谷式⁷⁾に基づくものである。図に示される通り、本試験で得られた感潮部における中性化速度は、陸上大気中の場合と比較すると極めて小さく、近似式によれば陸上大気中の約40%に相当する。ちなみに、近似式により材令50年での最大中性化深さを求めると、約0.7cmである。

4.3 コンクリート中の鉄筋の腐食状況

(1) 表面観察

コンクリート中の鉄筋の発錆状況を明らかにするため、各材令毎に供試体中の鉄筋表面を観察した。



W: 水道水 S: 海水 数字は観察した鉄筋本数である。

図-15 発錆した鉄筋の観察鉄筋中にしめる割合

図-15は、発錆した鉄筋の観察鉄筋中に占める本数割合を求めたものである。

材令1年においては、海水を練り混ぜ水とした供試体をセメントの種類毎に1体ずつ観察した。ただしアルミ

ナセメントについては、海水を練り混ぜ水とした供試体を2体、水道水を練り混ぜ水とした供試体を1体観察した。その結果、ポルトランド系のセメントおよび高炉セメントB種を使用したコンクリート中の鉄筋には、まったく発錆がみられなかったが、アルミナセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、すべて発錆がみられ、そのうち水道水を練り混ぜ水としたものの錆は軽微であったが、海水を練り混ぜ水としたものの錆は明瞭であった。

材令5年においては、海水ならびに水道水を練り混ぜ水とした供試体をセメント種類毎に3体ずつ観察した。その結果、ポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、水道水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋36本のうち7本に発錆がみられ、海水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋36本のうち23本に発錆がみられた。高炉セメントB種を使用したコンクリート中の鉄筋にはまったく発錆がみられなかった。また、アルミナセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、水道水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋9本のうち3本に発錆がみられたのに対して、海水を練り混ぜ水とした場合では鉄筋9本すべてに発錆がみられた。

材令10年においては、水道水を練り混ぜ水とした供試体を普通、中庸熟ポルトランドセメント、および高炉セメントB種について3体ずつ、また海水を練り混ぜ水とした供試体をセメントの種類毎に3体ずつ観察した。ポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、水道水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋24本のうち10本に発錆がみられ、海水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋36本のうち12本に発錆がみられた。高炉セメントB種を使用したコンクリート中の鉄筋には、水道水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋9本のうち1本に発錆がみられ、海水を練り混ぜ水とした場合で鉄筋18本のうち2本に発錆がみられた。また、アルミナセメントを使用し、海水を練り混ぜ水としたコンクリート中の鉄筋には、9本すべてに発錆がみられた。

材令20年においては、海水ならびに水道水を練り混ぜ水とした供試体をセメントの種類毎に2体ずつ観察した。その結果、ポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、練り混ぜ水の違いに関係なく全ての鉄筋に発錆がみられた。高炉セメントB種を使用したコンクリート中の鉄筋には、水道水を練り混ぜ水とした場合、海水を練り混ぜ水とした場合とも鉄筋12本のうち6本に発錆がみられた。また、アルミナセメントを使用したコンクリート中の鉄筋には、6本すべてに発錆がみられた。

練り混ぜ水の違いによる鉄筋の発錆割合の差をみると、図-15に示されるように、ポルトランド系セメントについては、材令5年において海水を練り混ぜ水とした方が鉄筋の発錆割合が高い傾向がみられたが、その他の材令においては顕著な傾向はみられなかった。また同様に、高炉セメントB種については、練り混ぜ水の違いによる発錆割合の差はみられなかった。アルミナセメントについては、材令5年および10年において海水を練り混ぜ水とした方が鉄筋の発錆割合が高い傾向がみられたが、材令20年においては顕著な傾向はみられなかった。

これらの結果より、練り混ぜ水として海水を使用することが鉄筋の発錆の有無に与える影響はあるものと思われる。すなわち、海水を使用することにより発錆の割合が増加する傾向があると思われる。

錆としては、黒い錆が多く、赤い錆も若干観察された。材令10年までにおいては、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。材令20年においては、赤い錆はほとんどすべての鉄筋にみられた。黒い錆は、 Fe_3O_4 （マグネタイト）の成分が多い錆と考えられる。 Fe_3O_4 は、酸素の供給が制限されている場合に存在するものである。一方、赤い錆は、 FeOOH （ゲーサイト、レビドクロサイト、マキナビット等）の成分が多い錆と考えられる。 FeOOH は、酸素の供給が制限されない場合に存在するものである⁹⁾。

また、鉄筋上端部（打ち込み方向に向かって）付近の錆は、その他の部分のものに比較して面積が大きく、かつ厚かった。その理由としては、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締め固められず若干ポーラスになったことにより、酸素の透過量が局部的に大きくなったためと推察される。

(2) 発錆面積率

材令5年、10年、および20年において測定した鉄筋の発錆面積率の結果を図-16に示す。各値は、鉄筋3～5本の測定値を平均した値である。発錆面積率の測定の際には、錆の色の違いにより黒錆と赤錆とに分けて測定した。前述したように、黒錆は Fe_3O_4 の成分の多い錆と考えられ、赤錆は FeOOH の成分の多い錆と考えられるが、錆の色の違いと腐食の深さとの相関性は認められなかった。また、材令20年においては、断面欠損のない黒い皮膜がみられた。これが錆かどうかの判定ができなかったが、図中の材令20年での黒錆の面積率にはその面積も含めた。

図に示されるように、セメントの種類に関わらず材令

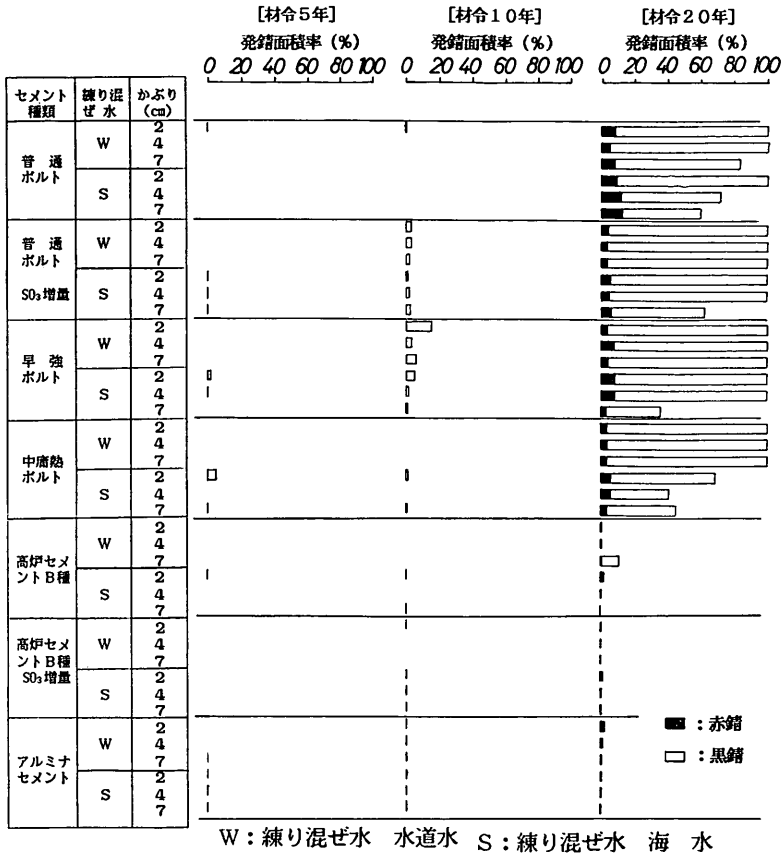


図-16 鉄筋の発錆面積率

5年および10年での発錆面積率は非常に小さかった。材令20年での発錆面積率は、高炉セメントB種およびアルミナセメントでは小さかったのに反し、ポルトランド系のセメントでは極めて大きかった。

練り混ぜ水として海水を使用したことが鉄筋の発錆面積率に及ぼす影響についてみると、各材令ともその影響は小さい。(海水を使用したコンクリート中の鉄筋の発錆面積率(A_s)と水道水を使用したものの発錆面積率(A_w)との差の平均($A_s - A_w$)は、材令5年で+0.7%、材令10年で-1.2%、材令20年で-1.9%であった。)

一方、セメントの種類の違いによる影響をみると、その影響は大きく、特に材令20年においては、その影響は明瞭に認められる。すなわち、普通、早強、中庸熱といったポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の発錆面積率は、高炉セメントB種やアルミナセメントを使用したものに比較して著しく大きいことが認められる。

また、かぶり厚さの違いの影響をみると、材令20年において、普通、早強、中庸熱といったポルトランド系のセメントを使用したものにはその影響がみられる。しかしながら、ポルトランド系のセメントにおいて、かぶり2, 4, 7cmのそれぞれの発錆面積率の平均を求めると、かぶり2cmのもので96%、かぶり4cmのもので89%、かぶり7cmのもので74%と、セメントの種類の違いによる影響に比べて著しく小さい。

以上の結果を整理すると、コンクリート中の鉄筋の発錆面積率を測定した結果、材令20年程度になるとポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋にはかぶり厚さ7cmのものにおいてもかなりの発錆があること、高炉セメントB種やアルミナセメントは、ポルトランド系のセメントに比較して、鉄筋の腐食に対する抵抗性が大きいこと、セメントの種類の違いが発錆面積率に及ぼす影響は大きいこと、練り混ぜ水としての海水の使用が発錆面積率に及ぼす影響は小さいこと、7cm以

セメント	練り混ぜ水	最大腐食深さ (mm)											
		かぶり 2 cm				かぶり 4 cm				かぶり 7 cm			
		0	0.2	0.4	0.6	0	0.2	0.4	0.6	0	0.2	0.4	0.6
普通ポルト	W	..				..	.			...
	S	..				..	.			..	.
普通ポルト SO ₃ 増	W	...				..				..	.
	S	..	.			..				..	.
早強ポルト	W	..	.			..				..	.
	S	..	.			..				..	.
中庸熱ポルト	W	..				..				..	.
	S	...				..				..	.
高炉種 B	W	...				..				..	.
	S	-				..				..	.
高炉種 SO ₃ 増	W	-				..				..	.
	S	-				..				..	.
アルミナ	W	-				..				..	.
	S	...				..				..	.

W : 練り混ぜ水 水道水
S : 練り混ぜ水 海水

図-17 最大腐食深さ (材令20年)

下のかぶり厚さの違いが発錆面積率に及ぼす影響はセメントの種類の違いによる影響に比較して著しく小さいことが確認された。

(3) 最大腐食深さ

材令20年において、セメントの種類、練り混ぜ水の種類、かぶり毎に3本の鉄筋について、それぞれの鉄筋の最大腐食深さを測定した。その結果を図-17に示す。図中の黒丸は、各鉄筋の測定値である。値にはかなりのばらつきがみられるが、すべて0.5mm以下と小さいものであった。

また、セメントの種類の違いが腐食深さに及ぼす影響は少し認められた。すなわち、普通および早強ポルトランドセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食深さは平均で0.14mmであったのに対し、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種、およびアルミナセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食深さは平均で0.09mmと若干小さかった。

一方、練り混ぜ水の違いが腐食深さに及ぼす顕著な影響は認められなかった。

(4) 不動態のグレイドの判定

材令10年、15年、および20年においてコンクリート中鉄筋のアノード分極曲線を測定し、不動態のグレイドの判定を行った。その結果を表-9に示す。表より、発錆面積率の傾向と同様に、練り混ぜ水またはかぶりの影響よりもセメントの種類による影響が卓越していることが認められる。すなわち、高炉セメントB種およびアルミナセメントを用いたコンクリート中の鉄筋の不動態のグレイドの方が、ポルトランド系セメントのものより明らかに良い値を示し、高炉セメントB種およびアルミナセメントを使用したコンクリート中の発錆面積率が著しく小さいこととよく対応している。

(5) 自然電極電位の経年変化

暴露試験を行う当初、コンクリート中の鉄筋の自然電極電位の変化を測定すれば、鉄筋の腐食の有無を定性的

表-9 アノード分極曲線によるコンクリート中鉄筋の不動態のグレードの判定

セメント種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)	コンクリート中鉄筋の不動態のグレード		
			材令 10 年	材令 15 年	材令 20 年
普通ポルトランド	水道水	2 4 7	(測定値なし)	//// 2 //// 2 //// 2	//// 2 //// 2 //// 2
	海水	2 4 7	(測定値なし)	/// 1 //// 2 //// 2	//// 2 //// 2 //// 2
普通ポルトランド SO ₃ 増量	水道水	2 4 7	/// 0.5 /// 0.5 /// 0.5	(測定値なし)	//// 2 //// 2 //// 2
	海水	2 4 7	/// 1 /// 1 /// 1	(測定値なし)	//// 2 0 //// 2
早強ポルトランド	水道水	2 4 7	//// 2 //// 2 //// 2.5	(測定値なし)	0 //// 2 //// 2
	海水	2 4 7	/// 0.5 //// 2 //// 2	(測定値なし)	0 0 //// 2
中庸熱ポルトランド	水道水	2 4 7	(測定値なし)	//// 2 //// 2 //// 2	//// 2 //// 2 //// 2
	海水	2 4 7	(測定値なし)	//// 2 //// 2 //// 2	//// 2 //// 2 //// 2
高炉セメント B種	水道水	2 4 7	(測定値なし)	//// 4 //// 4 //// 4	//// 4 //// 4 //// 4
	海水	2 4 7	(測定値なし)	//// 4 //// 4 //// 4	//// 4 //// 5 //// 5
高炉セメント B種 SO ₃ 増量	水道水	2 4 7	//// 3 //// 3.5 //// 4	(測定値なし)	//// 4 //// 5 //// 4
	海水	2 4 7	//// 3 //// 3.5 //// 3.5	(測定値なし)	//// 4 //// 5 //// 5
アルミナセメント	水道水	2 4 7	//// 4 //// 4 //// 4	(測定値なし)	//// 5 //// 5 //// 5
	海水	2 4 7	(測定値なし)	(測定値なし)	//// 5 //// 5 //// 5

グレードの設定

グレード 0 : 全く不動態がない

グレード 1 :

グレード 2 :

グレード 3 :

グレード 4 :

グレード 5 : 極めて良好な不動態がある

0

/// 1

//// 2

///// 3

//// 4

//// 5

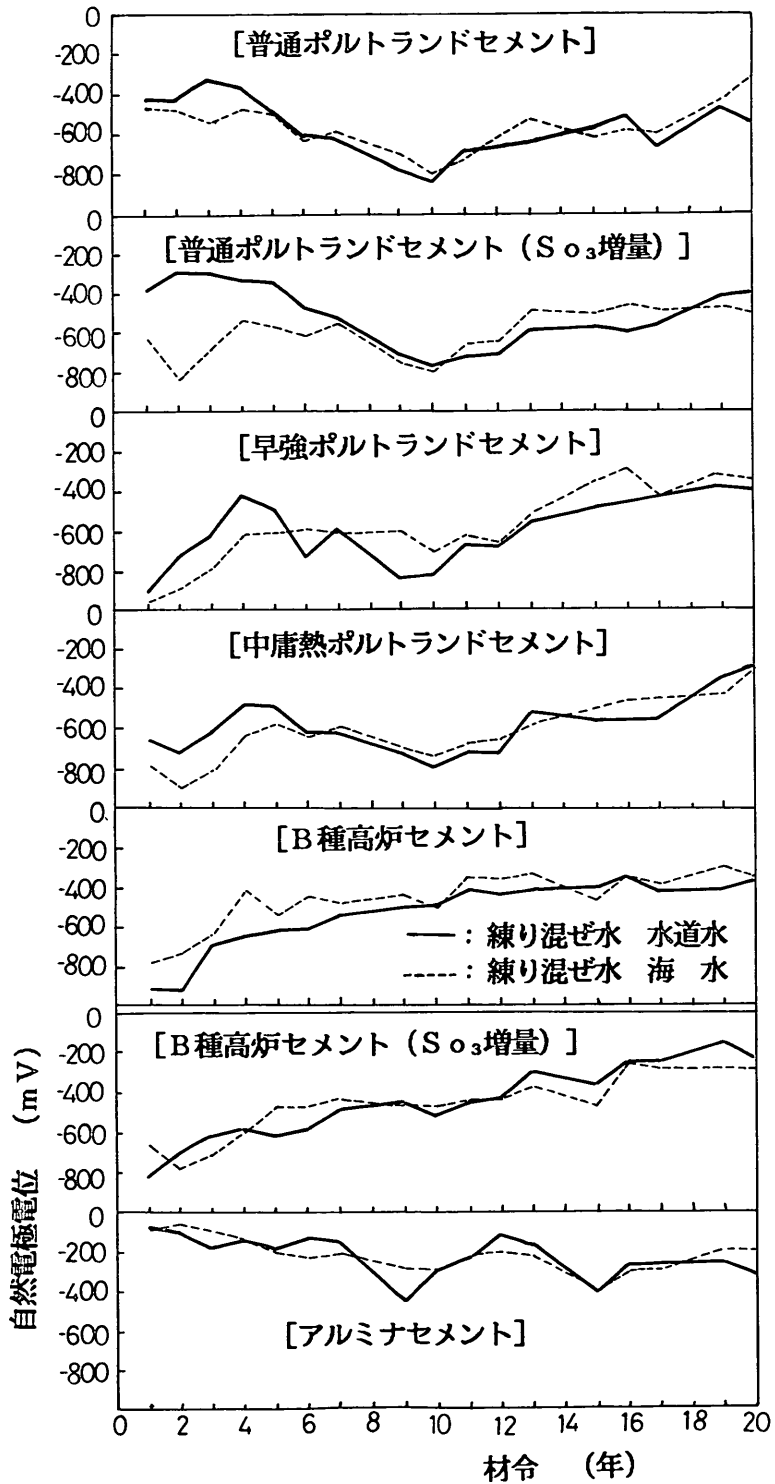


図-18 鉄筋の自然電極電位の推移

に知ることができると考えられたことから、本研究では、セメントの種類と練り混ぜ水の種類の組合せごとに3体ずつの供試体(合計して、供試体42体、鉄筋126本)について、暴露試験開始時から継続して自然電極電位の測定を行った。その経年変化をセメントの種類別に図-18に示す。各年の値は、供試体3体、かぶり2, 4, 7 cm, 測定時期1, 4, 7, 10月の36個の測定値を平均したものである。

図-18中には、水道水を練り混ぜ水としたもの(実線)と海水を練り混ぜ水としたもの(破線)とを区別して示した。図に示されるように、短期材令においては2つの値に若干差がみられるものの、長期材令になるとほぼ同等の値となることが認められる。

自然電極電位の経年変化は、ポルトランド系セメント、高炉セメントB種、アルミナセメントによって傾向が異なっていた。ポルトランド系セメントを使用した供試体中の鉄筋の自然電極電位は、材令10年までは電位が卑に移行し、その後貴に移行する傾向を示した。高炉セメントB種を使用したものは、材令20年まで電位が徐々に貴に移行する傾向を示した。また、アルミナセメントを使用したものは、材令20年まで電位が卑に移行する傾向を示した。

セメントの種類によって自然電極電位の経年変化の傾向が異なるのは、主に鉄筋位置の酸素濃度の違いによるものと考えられる。通常、鉄筋にはアノード部とカソード部が存在し、腐食反応が進行する際には、式(4)で表

されるようにアノード部のアノード反応とカソード部のカソード反応とが同じ速度で起こるものである。

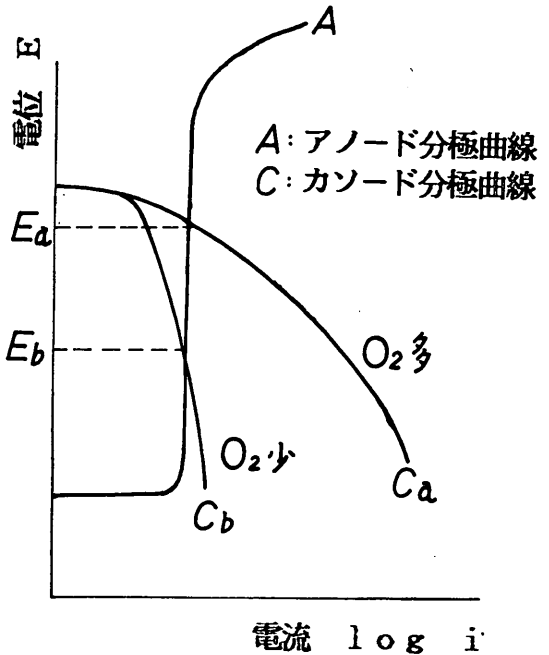
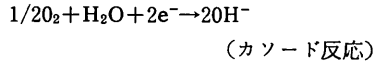
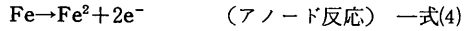


図-19 分極曲線と電位、電流の関係

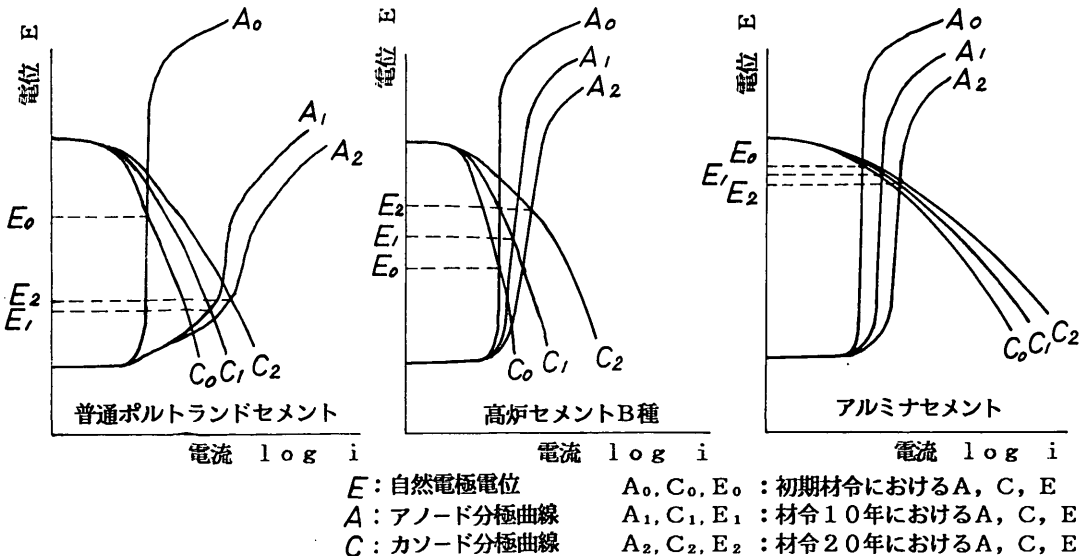
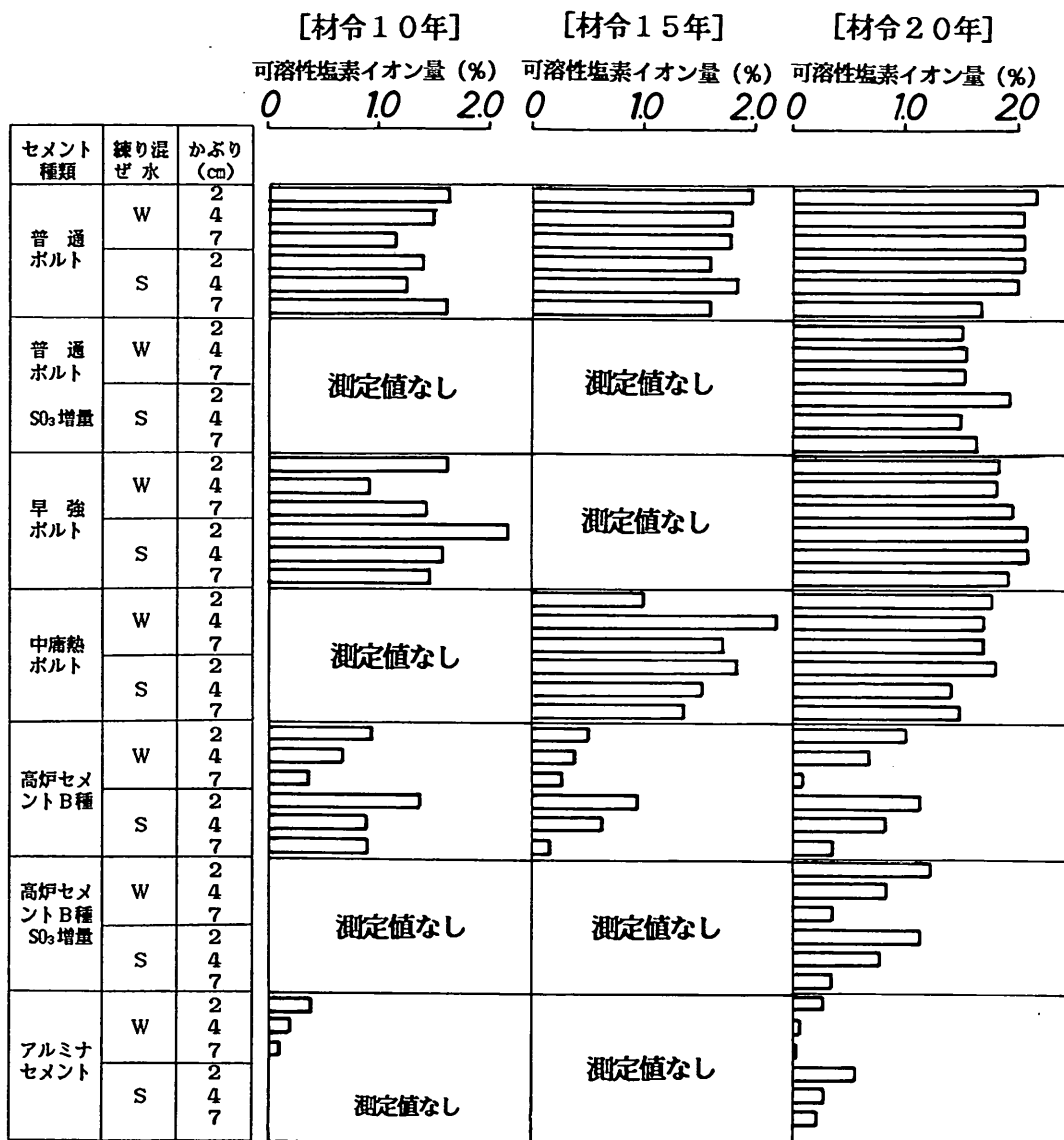


図-20 セメント種類別のアノード分極曲線およびカソード分極曲線(仮想図)



注) モルタルに対する重量百分率である。
練り混ぜ水として海水を使用したことによって
混入された塩素イオン量は0.25%である。

図-21 コンクリート中の可溶性塩化物イオン量

自然電極電位を電気化学的に解釈すると、図-19 に示すようにアノード分極曲線（図中のA曲線）とカソード分極曲線（図中のC曲線）の交点の電位が自然電極電位となる。ここで、カソード反応は、式(4)の下段の式に示すように酸素に律則する反応であることから、カソード分極曲線は、鉄筋位置の酸素濃度によって図中のC_aや

C_bのように変化する（酸素濃度の高い場合にはC_aとなり、酸素濃度の低い場合にはC_bとなる）。したがって、アノード分極曲線が一定の場合には、自然電極電位は、E_aやE_bのように変化する（酸素濃度の高い場合にはE_aとなり、酸素濃度の低い場合にはE_bとなる）。

図-20は、普通ポルトランドセメント、高炉セメント

B種、およびアルミナセメントを使用したもののアノード分極曲線およびカソード分極曲線を仮想的に表したものである。アノード分極曲線は、初期材令においては、鉄筋が良好な不動態を有することから、図中の A_0 のように表されるが、材令10年、20年と進むに連れて塩化物イオンの影響によって A_1 、 A_2 のように変化すると考えられる。また、(4)不動態のグレイドの判定の章で示したように、アノード分極曲線はセメントの種類によって異なっている。一方、カソード分極曲線は、初期材令においては C_0 であるが、材令の経過と共に酸素濃度が高くなり、 C_1 、 C_2 のように変化すると考えられる。そして、セメントの種類によって鉄筋位置の酸素濃度が異なり、アルミナセメントのものの酸素の拡散が最も大きく、次いで普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種となると仮定すれば、カソード分極曲線もセメントの種類によって図に示すように違うものとなる。したがって、材令の経過と共に変化する自然電極電位 E_0 、 E_1 、 E_2 もセメントの種類によって異なってくるものと考えられる。なお、後述する酸素拡散試験の結果によれば、材令20年における酸素の拡散速度は、アルミナセメントのものが最も大きく、次いで普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種となっており、上述の考察を裏付ける結果が得られた。

4.4 コンクリート中の塩化物イオンおよび酸素

(1) コンクリート中の塩化物イオン含有量

材令10年、15年、および20年において、かぶり 2cm、4cm、7cmの鉄筋付近のモルタル分を採取し、可溶性塩化物イオン量、および全塩化物イオン量を測定した。

可溶性塩化物イオン量の測定結果を図-21に示す。図中の塩化物イオン量はモルタルに対する塩化物イオン重量百分率で示している。練り混ぜ水として海水を使用したことによりコンクリート中に含まれた塩化物イオン量は、表-6および表-7より2.59~2.76 kg/m³である。これをモルタルに対する塩化物イオン重量百分率で表すと0.22~0.24%である。この点を考慮すると、外来塩化物イオン量は内在塩化物イオン量に比較してかなり多いことがわかる。例えば、普通ポルトランドセメントを使用したものについてみると、材令10年で平均1.4%、材令15年で平均1.75%、材令20年で平均2.0%の塩化物イオン量が測定された。これは練り混ぜ水として海水を使用したことによって混入された量に対して、材令10年で6.1倍、材令15年で7.6倍、材令20年で8.7倍の値である。また、ポルトランド系のセメントについては、材令10~20年の可溶性塩化物イオン量の差が小さいことから、材令20年における可溶性塩化物イオンはほぼ飽和状態にな

っているものと考えられる。

セメントの種類の違いが塩化物イオン量に及ぼす影響は大きいことが認められた。すなわち、高炉セメントB種、およびアルミナセメントにおける塩化物イオン量は、普通、早強、中庸熱といったポルトランド系のセメントのものに比較して極めて小さい傾向にあった。特に

表-10 塩化物イオン拡散係数

材 令	セメント種	練り混ぜ水	平均拡散係数 (cm ² /s)
10年	普通ポルト	W	2.61×10 ⁻⁷
		S	2.92
	早強ポルト	W	2.19
		S	5.62
	高炉B種	W	0.47
		S	1.11
	アルミナ	W	0.16
		S	0.16
15年	普通ポルト	W	5.63
		S	5.25
	中庸熱ポルト	W	8.35
		S	2.35
	高炉B種	W	0.20
		S	0.24
20年	普通ポルト	W	15.81
		S	7.28
	普通ポルト (SO ₃ 増)	W	0.53
		S	3.38
	早強ポルト	W	14.70
		S	17.33
	中庸熱ポルト	W	3.67
		S	2.02
	高炉B種	W	0.16
		S	0.24
	高炉B種 (SO ₃ 増)	W	0.26
		S	0.22
アルミナ	W	0.22	
	S	0.14	

材令20年になるとその傾向は顕著に現れ、前者の平均値は後者の平均値の30%程度となっていた。一般に、高炉セメントB種やアルミナセメントといった混合セメントは、組織が緻密であること等から塩化物イオンの浸入に対する抵抗がポルトランド系のセメントに比較して大きいといわれているが、本研究においてもそれが再確認された。

練り混ぜ水として海水を使用したことが塩化物イオン量に及ぼす影響をみると、ポルトランド系のセメントにおいてはその影響は認められなかったが、高炉セメントB種、およびアルミナセメントにおいては海水中より浸入してくる塩化物イオン量が少なかったため、その影響は若干認められた(材令20年での高炉セメントB種およびアルミナセメントにおける平均値は、水道水を練り混ぜ水としたもので0.50%、海水を練り混ぜ水としたもので0.58%であった)。しかしながら、その影響はセメントの種類の違いによる影響に比べて小さいものであった。

かぶり厚さ(表面からの距離)の違いが塩化物イオン量に及ぼす影響をみると、練り混ぜ水の違いによる場合と同様に、ポルトランド系のセメントではその影響は認められなかったが、高炉セメントB種、およびアルミナセメントにおいては若干の影響が認められた(材令20年での高炉セメントB種、およびアルミナセメントにおける平均値は、かぶり厚さ7cmのもので0.83%、5cmのもので0.53%、2cmのもので0.21%であった)。

これらの結果から、長期間にわたって海水の作用を受けるポルトランド系セメントを使用したコンクリートには多量の外来塩化物イオンが浸入すること、ポルトランド系セメントは、高炉セメントB種やアルミナセメントといった混合セメントに比較して外来塩化物イオンの浸入に対する抵抗性が小さいこと、多量の外来塩化物イオンが浸入する場合には、練り混ぜ水として海水を使用することによる影響は認められないこと、7cm以下のかぶり厚さの違いによる影響は高炉セメントB種およびアルミナセメントを使用したコンクリートで若干認められる

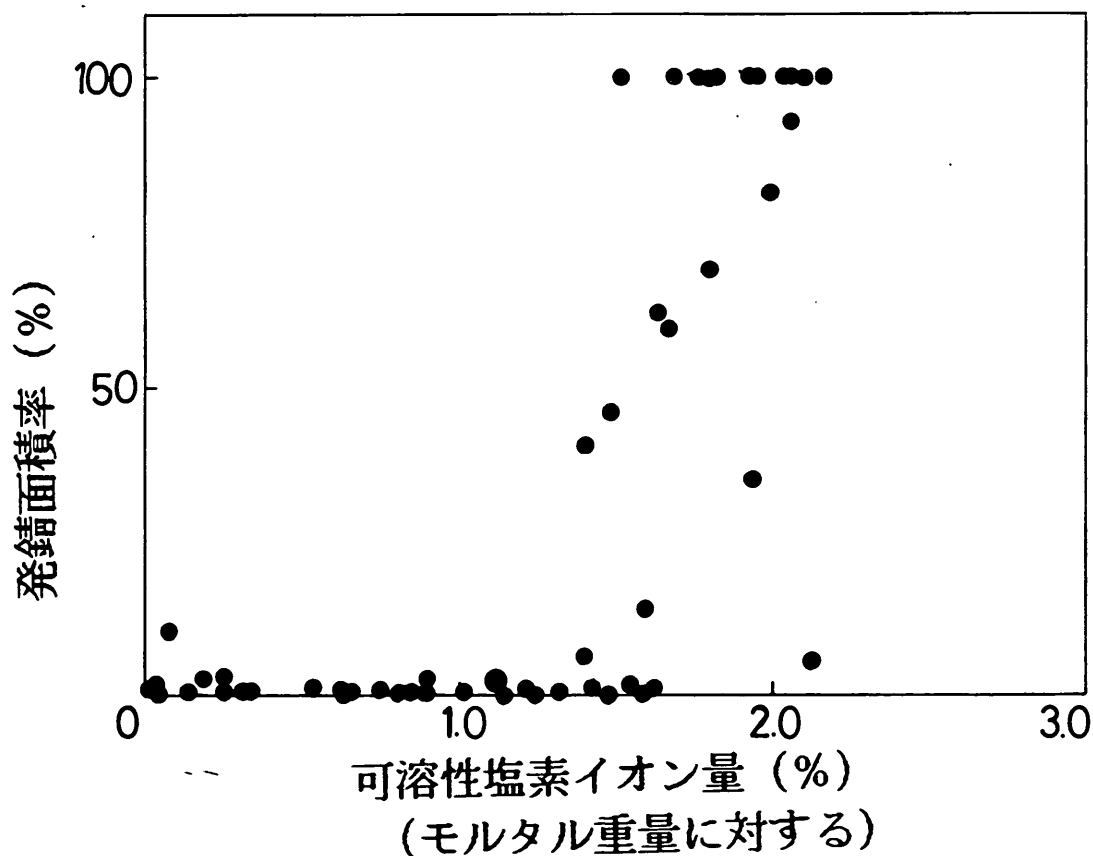


図-22 塩化物イオン量と発錆面積率との関係(材令10年, 20年)

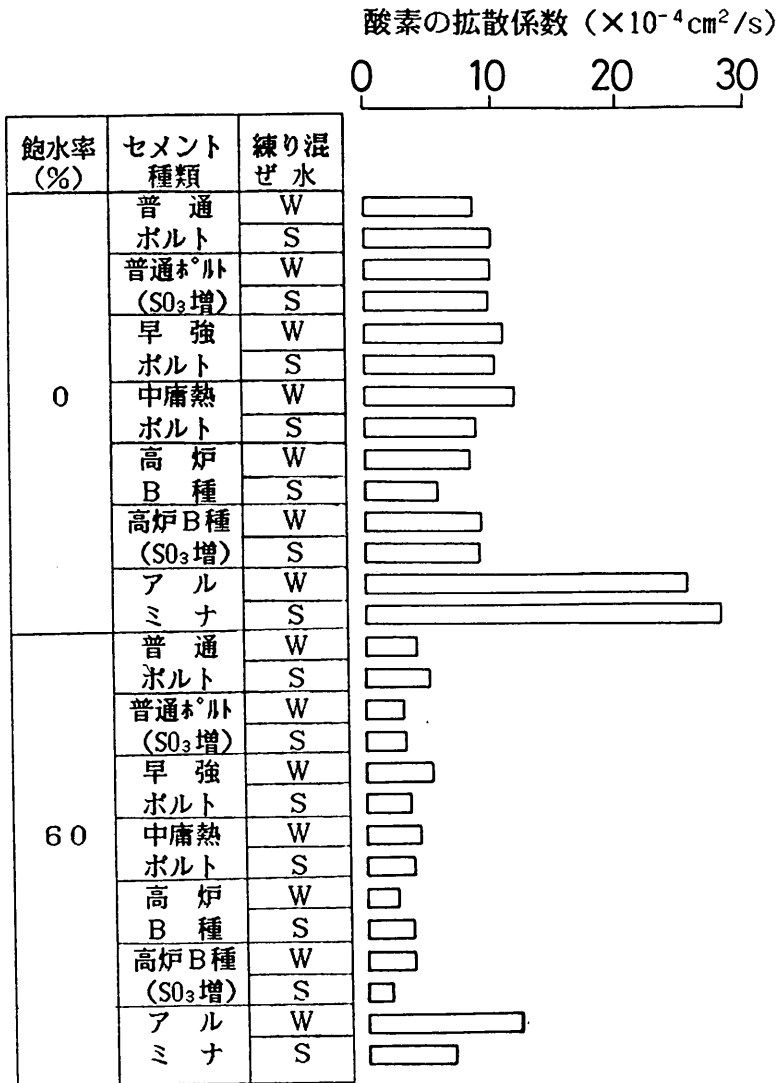
が、その影響程度はセメントの種類の違いによる影響程度に比較して著しく小さいことが認められた。

(2) 塩化物イオンの拡散係数

(1)で示した塩化物イオン量の測定値を用いて、塩化物イオンの拡散係数を算定した。ここで、コンクリート中への塩化物イオンの浸入面は1つであると仮定し、算出式として、1次元の拡散方程式の解である次式を用いた。

$$C_{(t,x)} = C_0 \{1 - \text{erf}(x / (2 \cdot (D \cdot t)^{1/2}))\} \quad \text{—式(5)}$$

ここに、 $C_{(t,x)}$: 時間 t 後の、表面からの距離 x での全塩化物イオン量
 C_0 : コンクリート表面での全塩化物イオン
 x : 表面からの距離
 D : 塩化物イオンの拡散係数
 t : 時間



W : 練り混ぜ水 水道水

S : 練り混ぜ水 海水

図-23 酸素の拡散係数 (材令20年)

erf : 誤差関数

また、材令20年において、ポルトランドセメントを使用したコンクリート中の塩化物イオン量がほぼ飽和に達していると考えられることより、上式中の C_0 として測定値の最大である2.3%を用いることとした。算出した結果より、材令、セメントの種類、および練り混ぜ水の種類毎に平均値を求め、表-10に示した。表に示すように、拡散係数は、普通ポルトランドセメントのもので $2 \sim 15 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 、早強ポルトランドセメントのもので $2 \sim 17 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 、高炉セメントB種のもので $0.2 \sim 0.4 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 、アルミナセメントのもので $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ であった。このように、セメントの種類の違いが塩化物イオンの拡散係数に及ぼす影響は大きいことがわかる。なお、これらの値は、既設構造物の塩化物イオン量の測定値より算出された拡散係数⁹⁾ とほぼ同等の値であった。

(3) 塩化物イオン量と発錆面積率との関係

図-22は、材令10年、および20年における測定結果よ

り、鉄筋周辺の可溶性塩化物イオン量と発錆面積率との関係を示したものである。腐食反応は、塩化物イオン量の他に酸素量、鉄筋の電位、水分量等の因子が複雑に関わって進行するものであることから、塩化物イオン量と発錆面積率との関係は一義的には定まらないが、本研究では、図-22に示すように、可溶性塩化物イオン量がモルタルに対して1.5%以上となると、発錆面積率が増大する明瞭な傾向が認められた。

(4) 酸素の拡散係数

塩化物イオンは、コンクリート中の鉄筋の不動態を破壊し腐食を発生させるものであるのに対して、酸素は、鉄筋の腐食反応(カソード反応)の進行に不可欠なものである。特に、感潮部や海中部におかれるコンクリート中の鉄筋には、通常、酸素の供給が少ないため、その腐食反応の進行速度は酸素の供給量に律則すると考えられている。

そのため、材令20年において、コンクリート供試体の一部を切り出し、酸素の拡散試験を行って、コンクリー

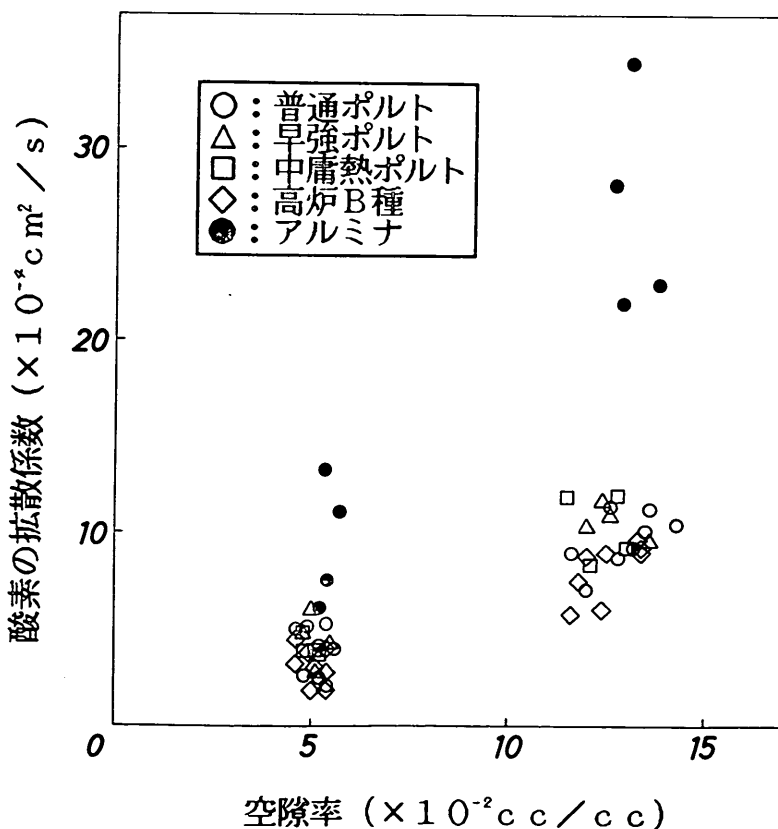


図-24 空隙率と拡散係数との関係

ト中の酸素の拡散係数を測定した。その結果を図-23 に示す。それぞれの値は供試体の上部および下部より切り出した2つの供試体の平均値である。

図に示すように、練り混ぜ水の違いが酸素の拡散係数に及ぼす影響は認められなかった。一方、セメントの種類の違いが酸素の拡散係数に及ぼす影響は認められた。飽水率0%の場合（空隙に水が存在しない状態）のセメントの種類別の平均拡散係数を求めると、普通、早強、中庸熟ポルトランドセメントのものでは $9.35\sim 10.57 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ であったのに対して、高炉セメントのものでは $6.99\sim 9.06 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ と若干小さく、アルミナセメントのものでは $26.80 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ と極めて大きかった。また、飽水率60%の場合においても、拡散係数の値そのものは小さくなるが、セメントの種類の違いによる影響に関しては同様の傾向が認められた。

酸素の拡散係数は、コンクリートの空隙率や空隙構造に高い相関性を持つといわれている。セメントの種類の違いによって拡散係数に差がみられる原因を調べるため、拡散試験に用いた試験体の空隙率の測定を行った。空隙率は次式¹⁰⁾より求めた。

$$\text{空隙率} = (\text{飽水重量} - \text{乾燥重量}) / (\text{飽水重量} - \text{水中重量}) \times (1 - \text{飽水率}/100) \quad \text{—式(6)}$$

その結果、拡散係数と空隙率との関係は、図-24 に示すように、それぞれのセメントによって異なっていることが確認された。したがって、セメントの種類の違いによって拡散係数に差がみられるのは、細孔径の分布状態や細孔のつながり状態といった空隙構造がセメントにより異なっていることによるものと考えられる。

また、アルミナセメントにおいては、塩化物イオンの浸入量は少なかったにも関わらず、酸素の拡散係数は大きかった。その理由としては次のことが考えられる。すなわち、アルミナセメントを使用した供試体のX線回折試験の結果、表層部においては、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ への転移による多孔化の程度が中心部に比較して少ないことが認められた。塩化物イオンは供試体の表層より浸入するが、この場合表層は多孔化の程度が少ないため塩化物イオンの浸入量は少ない。一方、酸素の拡散試験を行った位置は多孔化が進んでいる供試体の中心部であったことより、拡散係数が大きく測定されたためと考えられる。

酸素の拡散係数は、図-25 に示すようにコンクリートの飽水率の程度により大きく変化するため、暴露状態でのコンクリートの飽水率の分布が問題となる。本研究では、コンクリートは、12時間の内5時間は気中、7時間は海水中というサイクルで暴露を行ってきた。ここで

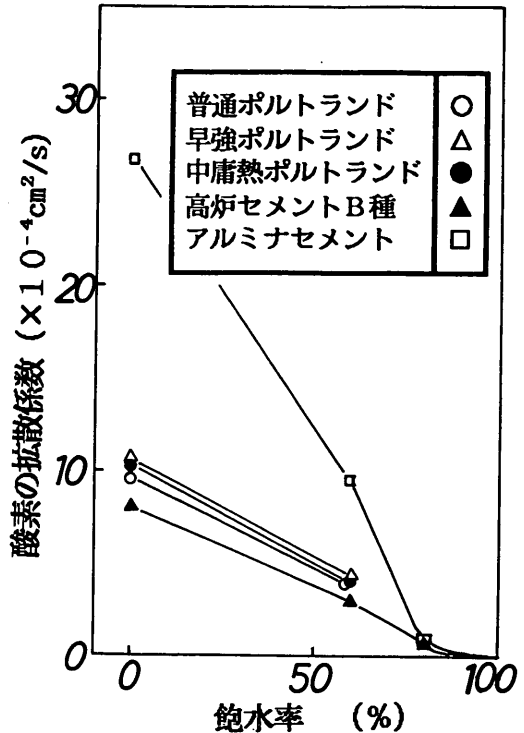


図-25 飽水率と拡散係数との関係

は、コンクリートの乾燥の最も進むと考えられる、気中に出てから5時間後のコンクリートの飽水率の分布を測定した。その測定法には種々あるが、比較的簡易に測定できる方法として、拡散試験を実施した試験体4体を密着させて乾燥させ、測定時に4体を分解し各要素の飽水率を求める方法を用いた。乾燥は一面のみとするため、図-26 中の挿入図に示すように乾燥面のみ残し、他の5面はゴムテープで覆った。この試験方法の精度について、詳細は文献¹¹⁾に譲るが、要素の不連続性による乾燥の進行速度の低下は若干あるものの、比較的精度よく飽水率の分布を求められるようである。

測定結果を図-26 に示す。図に示されるように、乾燥は、コンクリートの表面付近では顕著におこるが、内部では極めて緩慢であり、かぶり2cmの位置の飽水率は95~97%、かぶり3cmより深い位置での飽水率は98%程度であった。また、セメントの種類の違いによる飽水率の分布の違いはそれほど大きくなかった。

この時の酸素の拡散係数はいずれも、図-25 に示す通り、極めて小さい値である。しかしながら、長期間暴露され続けられれば鉄筋位置への酸素の供給が行われると思われる。その供給量の算出は、海水中での酸素の逸散量や

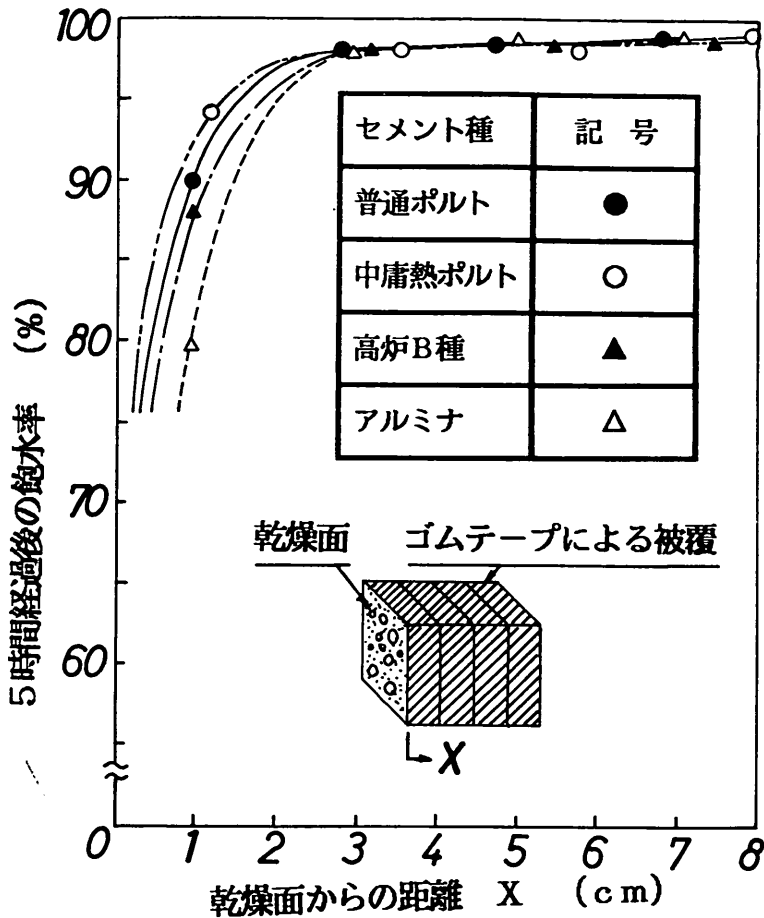


図-26 空气中に暴露してから5時間経過後の試験体の飽水率分布

鉄筋の腐食による酸素の消費量に関する知見が得られな
いたため、本研究では行わなかった。

4.5 総合的考察

これまでの試験結果を、総合的に考察する。

(1) 練り混ぜ水に関する考察

本研究で練り混ぜ水として用いた海水の塩化物イオン
含有量は17g/lであり、海水を練り混ぜ水としたコンク
リートには約2.6~2.8 kg/m³の内在塩化物イオンが混
入されていた。この値は、現在通常の海洋環境下の鉄筋
コンクリート構造物に適用されている塩分総量規制値
0.6 kg/m³の4.5倍程度である。このような多量の内在
塩化物イオンが混入されたにも関わらず、それが、コン
クリート中の鉄筋の腐食やコンクリートの強度特性に及
ぼす影響は、セメントの種類の違いによる影響よりも小
さいことが確認された。

なお、この考察には次のような範囲があることに注意

する必要がある。すなわち、1) あくまでも外来塩化物
イオンの侵入の多い海洋環境下に長期間さらされるコン
クリートについてのことであり、決して外来塩化物イオ
ンの侵入の少ない環境や、外来塩化物イオンの侵入の多
い海洋環境下においても短期材令での場合、ではないと
いうこと、2) コンクリート中の鉄筋の腐食反応が酸素
の律則によると考えられる海洋環境下の感潮部や海中部
での場合であること、3) 比較的早期の材令においてオ
ートクレーブ養生等の鉄筋腐食にとって悪影響となるも
のを受けない場合であること、4) コンクリートにひび
割れがない場合であること、などである。これらの範囲
以外においては、本研究で得られた結果とは異なった結
果が得られる可能性がある。

(2) セメントの種類に関する考察

長期間海水の作用を受けるコンクリートにおいては、
コンクリートの強度特性、コンクリート中の鉄筋の腐食

状況、コンクリート中への塩化物イオンの浸入量、およびコンクリート中の酸素の拡散係数に及ぼすセメントの種類の違いの影響は、大きいことが確認された。

高炉セメントB種は、ポルトランド系のセメントに比較して、それらの性質がすべて優れていた。特に、コンクリート中への塩化物イオンの浸入量は極めて小さく、材令20年における可溶性塩化物イオン量の平均値は、ポルトランド系のセメントの場合の30%程度であった。

アルミナセメントは、コンクリートの強度特性、コンクリート中への塩化物イオンの浸入量についてはポルトランド系のセメントに比較して優れていたが、酸素の拡散係数は大きかった。そのため、長期材令でのコンクリート中の鉄筋の腐食は軽微であったが、比較的早期材令で発錆が認められた。

石膏の増量がコンクリートの強度特性、コンクリート中の鉄筋の腐食状況、コンクリート中への塩化物イオンの浸入量、およびコンクリート中の酸素の拡散係数に及ぼす優位性は、認められなかった。

これらの結果より、塩害対策を行う際、セメントの種類について十分な検討を行うことが大切であることがわかった。また、今回の実験の範囲では、高炉セメントB種の性能が比較的高いことがわかった。

(3) 鉄筋のかぶり深さに関する考察

本研究では、7cm以下のかぶり厚さについて検討した。その結果、ポルトランド系のセメントの場合には、塩化物イオンの浸入量、鉄筋の腐食状況に及ぼすかぶり厚さの違いの影響は、ほとんど認められなかった。一方、高炉セメントB種、およびアルミナセメントにおいてはその影響は若干認められた。しかしながら、その影響程度は、セメントの種類の違いによる影響程度に比較して著しく小さいものであった。

また、現在の港湾構造物の設計においては、海水の作用を受ける部分のかぶり厚さは7cm以上としているが、本研究では、ポルトランド系のセメントを使用した場合、材令20年程度でかぶり厚さ7cmの鉄筋にもかなりの腐食が認められた。しかしながら、本研究の場合には側面や上面のあらゆる方向から塩化物イオンや酸素の作用を受けていたことから、鉄筋は、実際の構造物の場合に比較してかなり厳しい条件にあったものと考えられる。したがって、本研究の結果よりかぶり厚さの設計値に関する考察は出来ないものと考えられる。

5. 結 論

海洋環境下（感潮部）での20年間の暴露試験の結果得られた成果を列記すると以下のとおりである。

- (1) 普通、早強、中庸熱といったポルトランドセメントを使用したコンクリートには、材令20年でひび割れおよび剝離が多数認められた。一方、高炉セメントB種およびアルミナセメントを使用したコンクリートにはひび割れおよび剝離は認められたものの少数であった。
- (2) コンクリートの圧縮強度は、材令5年程度までは増加するが、その後徐々に減少し、材令20年においてはほとんどのもので初期強度を下回る傾向がみられた。材令20年における圧縮強度の初期強度に対する比は、ポルトランド系セメントで0.76~0.94、高炉セメントB種で0.98~1.01、アルミナセメントで0.79であった。また、練り混ぜ水の違いによる長期材令における圧縮強度の差は認められなかった。
- (3) コンクリート中の鉄筋の発錆の有無の観察、発錆面積率、腐食深さ、および不動態のグレイドの判定より、材令20年程度になるとポルトランド系のセメントを使用したコンクリート中の鉄筋はかなり腐食が進むことがわかった。セメントの種類の違いが腐食（発錆の有無、発錆面積率、腐食深さ、および不動態のグレイド）に及ぼす影響は大きく、ポルトランド系セメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食は、高炉セメントB種やアルミナセメントを使用したコンクリート中の鉄筋の腐食に比較して大きいことがわかった。練り混ぜ水の違いが腐食の有無に及ぼす影響は若干あると認められたが、練り混ぜ水の違いが発錆面積率、腐食深さ、不動態のグレイドの判定結果に及ぼす影響はまったく認められなかった。また、7cm以下のかぶり厚さの違いが腐食に及ぼす影響は、ポルトランド系セメントのものでは認められず、高炉セメントB種やアルミナセメントのもので若干認められた。しかし、その値は、セメントの種類の違いによる影響に比較して著しく小さかった。
- (4) 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートには材令20年で約2%（モルタル重量に対して）の可溶性塩化物イオン量が検出され、感潮部で海水の作用を受けるコンクリートには多量の塩化物イオンが浸入することが認められた。セメントの種類の違いが塩化物イオン量に及ぼす影響は大きく、高炉セメントB種およびアルミナセメントを使用したコンクリートの塩化物イオン量は、ポルトランド系セメントを使用したコンクリートのものに比較して著しく小さかった。一方、練り混ぜ水の違いが塩化物イオン量に及ぼす影響は、高炉セメントB種およびア

ルミナセメントを使用したコンクリートには若干認められたものの、ポルトランドセメントを使用したコンクリートにはまったく認められなかった。

- (5) 練り混ぜ水の違いがコンクリート中の酸素の拡散係数に及ぼす影響は認められなかった。一方、セメントの種類が及ぼす影響は若干認められ、最も酸素を通しにくいセメントは、高炉セメント B 種であり、最も通しやすいセメントは、アルミナセメントであった。

これらの成果から、海洋環境下の感潮部や海中中部で長期にわたって海水の作用を受ける鉄筋コンクリートにおいては、練り混ぜ水として海水を使用することが鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす影響は小さいと判断された。

また、長期にわたって海水の作用を受ける鉄筋コンクリートにおいては、セメントの種類の違いが鉄筋コンクリートの耐久性に及ぼす影響は大きいことが確認された。したがって、塩害対策を行う際、セメントの種類について十分な検討を行うことが大切である。

6. あとがき

本研究は小型の供試体による実験であり、得られた成果は、実際の構造物の場合とは異なる可能性はあるが、本研究の範囲では、海洋環境下の感潮部や海中中部で長期にわたって海水の作用を受けるコンクリートにおいては、練り混ぜ水として海水を使用したとしても耐久性に及ぼす影響は小さいことがわかった。

なお、コンクリートの練り混ぜ時に混入される塩化物イオンには、練り混ぜ水として海水を使用することにより混入される塩化物イオンの他に、細骨材として海砂を使用することにより混入されるものもある。本研究は、練り混ぜ水として海水を使用することにより混入される塩化物イオンを対象としたものであり、細骨材として海砂を使用することにより混入される塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響について言及することは出来ない。しかしながら、1) 未洗浄の海砂(陸揚げし、そのまま野積みした海砂)中には約0.18%の塩化物イオンが含まれており¹²⁾、本研究で使用したコンクリートの細骨材として海砂を用いた場合にコンクリート中に混入される塩化物イオン量は約 1.4 kg/m^3 と、練り混ぜ水として海水を使用したことにより混入された塩化物イオン量 ($2.6 \sim 2.8 \text{ kg/m}^3$) に比較して小さいこと、2) 海砂を水道水で洗えば塩分の除去がある程度行えることから、海砂によってコンクリート中に混入された塩化物イオンの存在状態は、練り混ぜ水として海水を

使用したことにより混入された塩化物イオンと同様と思われることを考えると、未洗浄の海砂を使用することがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響も小さくなるという可能性はある。なお、海砂の使用に際しては、海砂中の塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響についての検討のほか、海砂の粒度や岩質がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について検討する必要がある。

最後に、本研究は20年の長期にわたり継続してきたものであり、これまでの20年の間に多くの方々が試験の担当ならびに供試体の管理を行ってきたものである。ここに、謹んで感謝の意を表する次第である。

(1990年6月30日受付)

参考文献

- 1) 大即信明：コンクリート中鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 24, No. 3, 1985年9月
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準(案)，pp. 23～58, 1987年4月
- 3) 日本コンクリート工学協会：耐久性診断研究委員会報告書，pp. 29～36, 1989年6月
- 4) 青木義典・関博・小野寺幸夫：アルミナセメントを使用したプレキャストコンクリートの諸特性について，港湾技術研究所報告，Vol. 9, No. 3, 1970年
- 5) 水上国男：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 化学的腐食，技報堂出版，p. 43, 1986年4月
- 6) 和泉意登志・喜多達夫・前田照信：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化，技報堂出版，pp. 21～22, 1986年4月
- 7) 文献6)，pp. 36～37
- 8) 松島巖：さびについて，セメントコンクリート，No. 467, pp. 30～34, 1986年1月
- 9) 大即信明・森好生・関博：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，土木学会論文報告集，No. 332, pp. 107～118, 1983年4月
- 10) 小林一輔・出頭圭三：各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学，Vol. 24, No. 12, pp. 91～106, 1986年
- 11) 藤原忠司・佐藤嘉一郎・小西俊之：乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について，セメント技術年報，No. 42, pp. 427～430, 1988年
- 12) 日本建築センター：コンクリートの塩化物総量規制とアルカリ骨材反応対策，p. 73, 1987年10月

付表-1 海水循環水槽内の海水の化学成分

測定回数	試料採取日	比重 (20℃)	pH (20℃)	化 学 成 分 (mg/l)						
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃
1	1969年11月12日	1.024	8.13	10525	380	388	1247	18137	2534	67
2	1970年2月3日	1.024	8.03	10125	387	376	1180	17136	2412	65
3	1970年4月22日	1.024	8.12	10705	380	375	1231	17951	2492	84
4	1970年7月21日	1.023	8.05	10025	375	345	1094	16185	2270	62
5	1970年10月30日	1.024	8.10	10405	380	382	1198	18025	2506	80
6	1971年1月23日	1.023	7.60	10125	397	388	1249	18472	2583	118
7	1971年4月9日	1.021	7.95	9550	360	359	1150	16949	2377	114
8	1971年7月30日	1.022	7.75	9900	392	367	1222	17903	2483	129
9	1971年10月29日	1.020	7.70	8625	335	326	1051	13098	2168	133
10	1972年1月28日	1.024	7.65	10050	390	387	1243	18383	2523	120
11	1972年4月10日	1.021	7.78	9900	370	362	1169	17258	2396	113
12	1972年7月27日	1.020	7.58	8600	340	312	1023	15059	2104	114
13	1972年10月24日	1.022	7.70	10050	365	375	1218	17912	2525	120
14	1973年2月2日	1.023	7.55	10250	380	388	1244	18198	2581	110
15	1973年4月25日	1.021	7.75	8700	325	333	1042	15487	2162	104
16	1973年8月8日	1.020	7.75	9150	355	333	1133	15696	2325	101
17	1973年10月25日	1.022	7.40	9600	360	362	1119	17581	2435	125
18	1974年1月29日	1.024	7.85	9900	380	395	1262	18354	2585	98
19	1974年4月12日	1.022	7.75	9750	355	341	1119	16451	2295	103
20	1974年7月29日	1.020	7.30	9450	340	307	1042	16545	2275	105
21	1974年10月17日	1.019	7.70	7925	320	293	1011	14683	2025	110
22	1975年2月20日	1.021	7.20	9750	370	363	1225	17790	2455	119
23	1975年5月12日	1.024	7.50	10050	400	380	1258	18414	2583	91
24	1975年10月4日	1.022	7.65	9300	370	360	1211	17706	2430	137
25	1976年8月18日	1.017	7.30	7900	310	306	993	14622	2018	91
26	1976年1月26日	1.023	7.90	9900	395	384	1300	18767	2615	119
27	1976年5月6日	1.020	7.90	8100	320	320	1049	15469	2160	124
28	1976年7月28日	1.018	7.80	8250	305	320	1062	15529	2177	121
29	1976年10月28日	1.022	7.90	8475	320	345	1127	16109	2267	120
30	1977年1月14日	1.023	7.85	9450	335	360	1131	16658	2334	117
31	1977年6月6日	1.019	7.65	7875	250	328	1012	14991	2099	127
32	1977年8月12日	1.020	7.65	7500	295	348	1085	16185	2269	111
33	1977年11月2日	1.021	8.05	8550	295	340	1079	15893	2161	102
34	1978年3月8日	1.024	8.40	9150	328	361	1191	17312	2446	95
35	1978年6月15日	1.023	8.10	9150	328	362	1211	17718	2463	74
36	1978年7月26日	1.022	8.05	9150	325	506	1985	17453	2441	100
37	1978年11月8日	1.020	7.70	7500	290	299	995	14910	2096	123
38	1979年3月1日	1.024	7.70	9450	350	368	1190	18112	2545	122

海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究

測定 回数	試料採取日	比 重 (20℃)	pH (20℃)	化 学 成 分 (mg/l)						
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	CO ₃
39	1979年4月24日	1.025	7.91	9300	345	374	1210	17985	2364	118
40	1979年8月11日	1.023	7.78	9750	350	387	1237	18575	2584	112
41	1980年2月19日	1.022	7.38	7875	310	319	1045	15290	2167	147
42	1980年6月12日	1.022	7.80	8250	330	339	1109	16490	2272	112
43	1980年8月11日	1.023	7.80	9150	345	364	1193	17943	2483	110
44	1981年1月19日	1.026	7.68	9600	325	377	1252	18617	2591	121
45	1981年6月8日	1.018	7.78	7800	270	311	1034	15521	2164	104
46	1981年9月4日	1.022	7.67	8775	330	352	1166	17720	2398	102
47	1982年2月4日	1.025	7.89	9450	335	394	1250	18619	2559	84
48	1982年5月27日	1.022	7.60	8925	345	361	1174	17430	2455	110
49	1983年2月21日	1.026	7.78	10155	367	378	1231	18307	2537	107
50	1983年5月25日	1.020	8.16	9000	338	330	1103	16451	2292	105
51	1984年6月5日	1.022	7.68	10050	385	338	1244	18147	2542	123
52	1984年8月30日	1.020	7.63	9030	336	338	1081	16553	2242	132
53	1984年12月18日	1.025	8.05	10425	385	371	1273	18826	2624	123
54	1985年5月27日	1.024	7.79	10380	353	387	1228	18079	2483	130
55	1985年7月25日	1.018	7.46	8022	298	309	973	14679	1967	107
56	1985年10月22日	1.023	7.95	9930	363	368	1185	17689	2460	120
57	1986年2月7日	1.026	7.55	10550	382	396	1264	18893	2656	92
58	1986年4月30日	1.024	7.85	10035	366	373	1255	18639	2569	126
59	1986年8月14日	1.021	7.82	9075	342	345	1132	16945	2317	117
60	1986年11月10日	1.022	7.61	9350	334	350	1195	17537	2450	113
61	1987年6月4日	1.020	7.64	9075	326	372	1187	17714	2481	123
62	1987年12月14日	1.023	7.37	8940	326	363	1177	17592	2408	107
63	1988年6月3日	1.022	7.80	9970	373	352	1209	17842	2458	104
64	1988年8月2日	1.020	7.82	7930	311	313	1016	15226	2130	115
65	1988年12月16日	1.022	7.84	9061	338	350	1087	16370	2236	119
66	1989年3月14日	1.023	7.78	10100	364	380	1213	18318	2476	78
67	1989年5月25日	1.022	7.90	9350	351	348	1165	17652	2397	122
68	1989年8月11日	1.024	7.98	9620	352	356	1122	17198	2317	105
	平均	1.022	7.77	9290	346	356	1167	17087	2378	110

付表-2 コンクリートの圧縮強度

セメントの種類	練り混ぜ水	圧 縮 強 度 (kgf/cm ²)				
		初 期	1 年	5 年	10 年	20 年
普通ポルト	水道水	366	—	506	321	321
	海水	409	405	518	335	331
普通ポルト (SO ₃ 増)	水道水	—	—	524	—	381
	海水	388	366	521	307	296
早強ポルト	水道水	*425	—	560	—	376
	海水	*390	411	555	382	358
中庸熱ポルト	水道水	328	—	478	344	356
	海水	356	558	477	379	336
高炉 B 種	水道水	380	—	563	429	401
	海水	395	532	551	423	387
高炉 B 種 (SO ₃ 増)	水道水	363	—	523	—	403
	海水	366	420	513	389	370
アルミナ	水道水	**428	—	672	—	382
	海水	***258	568	603	526	447

各々の値は供試体3本の平均値である。また、初期とは28日をさす。ただし、*は7日を、**は1日を、***は4日をさす。

海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究

付表-3 コンクリート中の塩化物イオン含有量

セメントの種類	練り混ぜ水	かぶり (cm)	可溶性塩化物イオン量 (%)			全塩化物イオン量 (%)		
			10年	15年	20年	10年	15年	20年
普通ポルトランド	水道水	2	1.63	1.97	2.16	1.73	/	2.19
		4	1.48	1.78	2.05	1.55		2.09
		7	1.15	1.77	2.06	1.33		2.09
	海水	2	1.40	1.60	2.06	1.65	/	2.09
		4	1.25	1.83	1.99	1.70		2.04
		7	1.60	1.59	1.68	1.30		1.74
普通ポルトランド (SO ₃ 増)	水道水	2	/	/	1.52	/	/	1.55
		4	/	/	1.55	/		1.59
		7	/	/	1.54	/		1.57
	海水	2	/	/	1.93	/	/	2.00
		4	/	/	1.50	/		1.54
		7	/	/	1.64	/		1.74
早強ポルトランド	水道水	2	1.60	/	1.83	1.63	/	1.90
		4	0.90	/	1.82	1.00		1.89
		7	1.40	/	1.95	1.40		2.06
	海水	2	2.13	/	2.08	2.70	/	2.13
		4	1.55	/	2.09	1.75		2.21
		7	1.43	/	1.93	1.50		2.02
中庸熱ポルトランド	水道水	2	/	1.99	1.77	/	/	1.83
		4	/	2.18	1.69	/		1.79
		7	/	1.70	1.69	/		1.76
	海水	2	/	1.82	1.80	/	/	1.88
		4	/	1.52	1.41	/		1.45
		7	/	1.35	1.48	/		1.58
高炉B種	水道水	2	0.90	0.51	1.03	1.08	/	1.09
		4	0.64	0.38	0.68	0.80		0.71
		7	0.33	0.26	0.08	0.40		0.10
	海水	2	1.33	0.94	1.13	1.50	/	1.17
		4	0.85	0.63	0.63	0.98		0.65
		7	0.87	0.17	0.31	0.98		0.36
高炉B種 (SO ₃ 増)	水道水	2	/	/	1.22	/	/	1.26
		4	/	/	0.82	/		0.85
		7	/	/	0.34	/		0.38
	海水	2	/	/	1.12	/	/	1.17
		4	/	/	0.76	/		0.78
		7	/	/	0.32	/		0.36
アルミナ	水道水	2	0.34	/	0.25	0.36	/	0.33
		4	0.14	/	0.04	0.16		0.04
		7	0.04	/	0.01	0.08		0.01
	海水	2	/	/	0.54	/	/	0.64
		4	/	/	0.26	/		0.30
		7	/	/	0.19	/		0.26

注) 値はすべてモルタル重量に対する塩化物イオン重量百分率である。