

## 鉱物質混和材の混入およびコンクリート表面被覆の 塩害防止効果の定量的評価に関する研究

濱田, 秀則  
運輸省港湾技術研究所構造部

福手, 勤  
運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室

R. N. Swamy  
The University of Sheffield : Professor

谷川, 伸  
金沢大学大学院自然科学研究科

他

<https://hdl.handle.net/2324/4488450>

---

出版情報 : 土木学会論文集. 538 (V-31), pp.169-181, 1996-05-20. Japan Society of Civil Engineers  
バージョン :  
権利関係 :



# 鉱物質混和材の混入および コンクリート表面被覆の塩害防止効果の 定量的評価に関する研究

浜田秀則<sup>1</sup>・福手勤<sup>2</sup>・R. N. Swamy<sup>3</sup>・谷川伸<sup>4</sup>・J. C. Lai<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部 (〒239 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

<sup>2</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室

<sup>3</sup>Professor, Ph. d., The University of Sheffield, England, U. K.

<sup>4</sup>正会員 工修 金沢大学大学院 自然科学研究科

東亜合成(株)建材事業部 (〒105 東京都港区西新橋1丁目14番1号)

<sup>5</sup>Ph. d., 交通部台湾区国道新建工程局 台湾 R. O. C.

本研究は、鉱物質混和材の混入あるいはコンクリートの表面被覆によるコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散の抑制効果を、RC構造物の塩害防止効果の観点から定量的に評価することを試みたものである。水セメント比を3水準変化させたコンクリート、鉱物質混和材を混入したコンクリートおよびアクリルゴム系塗料により表面被覆を施したコンクリートに対して乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験を実施した。また、これまでに多数の研究者により発表されてきた塩化物イオン浸透促進試験のデータを収集整理し、本実験結果と比較検討した。これらの実験および文献調査の結果をもとに上記2手法の塩害防止効果の定量的評価を試みた。

**Key Words :** chloride ion penetration, concrete surface coating, mineral admixture, chloride environments, chloride attack, wetting and drying, durability, steel corrosion, service life

## 1. はじめに

塩化物イオンの浸入に起因するコンクリート中の鉄筋の腐食は、現在多くの沿岸構造物あるいは海洋構造物の劣化の主要な原因となっている。コンクリート中の鉄筋は通常は良く防食されていると言われている。すなわち、高アルカリ性のセメント水和物が鉄筋表面に不動態被膜を形成し、それにより鉄筋は腐食から保護されている。しかし、許容濃度以上の塩化物イオンが鉄筋表面に存在すると、不動態被膜は破壊され鉄筋は腐食を開始する。塩化物イオンは、骨材に付着している場合や練混ぜ水あるいは混和剤に含まれている場合などのように練混ぜ時からコンクリート中に存在する場合もある。一方、コンクリートの置かれた環境条件によっては、硬化後外部環境より浸入してくる場合もある。

外部から浸入してきた塩化物イオンによっても、コンクリート中の鉄筋表面の不動態被膜は破壊され、水分および酸素の供給条件下で鉄筋の腐食は進行する。これがいわゆる塩害である。

RC構造物の塩害に関しては、これまでに多くの研究がなされており、そのメカニズムあるいは各種防止法に関して多くの知見が得られている。鉱物質混和材の混入あるいはコンクリートの表面被覆等もコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散を抑制する有効な方法であることが多数報告されている。しかし、これらの手法のコンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散の抑制効果を塩害防止の観点から、供用期間を考慮して定量的に評価する手法は未だ確立されているとは言い難い。

一方、コンクリート中への塩化物イオンの浸透・拡散に関する研究は室内実験を中心に実施されることが多いが、これらの研究結果の相互

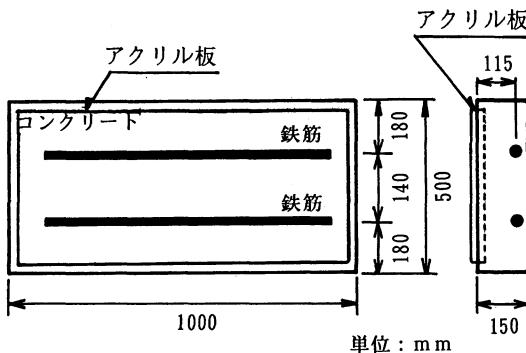


図-1 供試体の形状、寸法

比較、あるいは実環境での暴露試験結果との比較はこれまでにはあまり報告されていないのが現状である。

本研究は、鉱物質混和材の混入およびコンクリートの表面被覆によるRC構造物の塩害防止効果を定量的に評価することを主眼としている。まず、各種供試体を用いた乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験を実施した。また、文献調査を実施し、これまでに発表されている塩化物イオン浸透促進試験データの収集整理を行った。その整理結果と本実験結果とを比較することにより、本実験において用いた乾湿繰返し方法の位置づけを明確にした。一方、筆者等が過去において実施した、実環境に暴露されたコンクリート中の塩化物イオン含有量に関する文献調査の結果と本研究において実施した乾湿繰返し促進試験結果を比較検討することにより、乾湿繰返し試験の促進効率を推定した。以上の結果をもとに、鉱物質混和材の混入およびコンクリートの表面被覆の塩害防止効果の供用期間を考慮した定量的評価を試みた。

## 2. 塩化物イオン浸透促進実験の方法

### (1) 概要

本実験においては、鉄筋コンクリートスラブ供試体を合計10体製作し、それらの供試体の上部表面を対象に4%NaCl溶液の浸せきと気中乾燥を繰り返す乾湿繰返し試験を行った。実験上の要因は、コンクリートの水セメント比(W/B=0.45, 0.60, 0.75)、鉱物質混和材の混入(高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム)およびアクリルゴム系高弹性材料によるコンクリートの表面被覆である。乾湿の繰返しは最長70サイクルまで実施し、その間、10, 20, 60および70サイクルを終了した時点でコンクリ

表-1 供試体の一覧

供試体番号	W/B	鉱物質混和材(置換率)	表面被覆の有無
1	0.45	—	—
2	0.60	—	—
3	0.75	—	—
4	0.45	—	有り
5	0.60	—	有り
6	0.75	—	有り
7	0.60	高炉スラグ(65%)	—
8	0.60	フライアッシュ(30%)	—
9	0.60	シリカフューム(10%)	—
10	0.75	高炉スラグ(65%)	—

表-2 セメントおよび鉱物質混和材の化学成分

	(%)					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	LO.I
セメント	21.0	5.3	3.1	64.4	2.6	—
高炉スラグ	34.2	11.3	1.2	41.6	8.2	—
フライアッシュ	51.4	28.1	11.1	1.4	1.6	3.5
シリカフューム	97.0	—	—	—	—	1.1

ート中の塩化物イオン含有量を測定した。

### (2) スラブ供試体の形状、寸法

図-1に供試体の形状および寸法を示す。寸法は150×500×1000mmであり、上部表面からのかぶりが115mmの位置に直径20mmの異形鉄筋を2本埋設した。また、各々の供試体の上部表面の周囲にはNaCl溶液を貯留するためのアクリル製フレームを設置した。このフレームについては以下の(5)において詳述する。表-1に作製した供試体の一覧を示す。供試体No.1, No.2, No.3は鉱物質混和材無混入かつ表面被覆を施していない供試体である。供試体No.4, No.5, No.6には鉱物質混和材は混入していないが、各々の上部表面に表面被覆を施した。供試体No.7, No.8, No.9, No.10は表面被覆は施していないが、それぞれ鉱物質混和材を混入している。

### (3) コンクリートの使用材料および配合

すべての供試体において、普通ポルトランドセメント(ASTM Type I)を使用した。セメントの比表面積は3450cm<sup>2</sup>/gであり、JIS R 5210に示されている2500cm<sup>2</sup>/g以上という基準を満足している。また、セメントの化学成分を表-2に示す。細骨材として碎砂を使用した。その吸水率は1.37%であり、表乾比重は2.60である。粗骨材として天然砂利と碎石を混合したものを使用した。その最大寸法は10mm、吸水率は0.80%，表乾比重は2.62である。鉱物質混和材はセメントに対する質量比で置換した。すなわち、

表-3 コンクリートの配合比率

供試体番号	W/B	配合比率 (質量、kg)				
		セメント	水	粗骨材	細骨材	混和材
1, 4	0.45	350	158	1250	590	_____
2, 5	0.60	350	210	1250	590	_____
3, 6	0.75	350	263	1250	590	_____
7	0.60	122	210	1250	590	228 (高炉スラグ)
8	0.60	245	210	1250	590	105 (フライアッシュ)
9	0.60	315	210	1250	590	35 (シリカフューム)
10	0.75	122	263	1250	590	228 (高炉スラグ)

表-4 コンクリートの圧縮強度

供試体番号	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
	7日	28日	128日	242日	556日
1, 4	54	72	70	71	81
2, 5	32	46	45	46	50
3, 6	22	31	33	34	37
7	17	33	35	47	53
8	17	26	33	33	42
9	35	50	55	61	65
10	15	23	29	35	43

供試体No. 7およびNo. 10においては高炉スラグ微粉末を65%, No. 8においてはフライアッシュを30%, No. 9においてはシリカフュームを10%セメントに対して置換した。また、水結合材比以外の配合上の要因を可能な範囲で統一するために、すべての供試体において骨材結合材比を5.26/1, 全骨材に対する細骨材の質量比を32%に統一した。表-3に全供試体のコンクリートの配合比率(質量表示)を示す。表-4にコンクリートの、100mm立方体型供試体による圧縮強度の測定結果を示す。なお、強度試験用供試体のコンクリートの養生はスラブ供試体と同一である。

#### (4) 鉱物質混和材

使用した鉱物質混和材の化学成分を表-2に示す。高炉スラグ微粉末は、"Civil and Marine Limited, Essex, England"社の製品である。粉末度は4170cm<sup>2</sup>/gであり、2750cm<sup>2</sup>/g以上と規定しているBS(英国規格)6699:1986 "Ground granulated blast furnace slag for use with Portland cement"を満足している。

フライアッシュは、"Boral Pozzolan Limited, Herts, England"社の製品である。そのMgO含有量は1.62%であり、MgO含有量4%以下と規定しているBS 3892:part1:1982 "Pulverized-fuel ash for use as a

表-5 コンクリートの表面被覆材料の仕様

	主成分	塗布量 (kg/m <sup>2</sup> )	形成膜厚 (μm)
下塗り材	合成樹脂系	0.3	30
中塗り材	アクリルゴム系	1.7	900
上塗り材	アクリルウレタン系	0.3	100

cementitious component in structural concrete"を満足している。

また、シリカフュームは、"Elkem Materials Limited, England"社の製品であり、その比重は2.2である。

#### (5) コンクリートの打設および養生

練り混ぜられたコンクリートは供試体の型枠に3層に分けて投入し、各層ごとに棒状パイプレーダで締め固めた。コンクリートがまだ固まらない段階で、高さ50mmの四辺形のアクリル製フレームをスラブ供試体の上部表面に取り付けた。このフレームはコンクリートが硬化した後にコンクリートと一体化して、NaCl溶液を上部表面に貯留しておくためのものであり、いわば堤防の役目を果たすものである。打設終了後、ポリエチレンで覆った湿潤養生を材齢24時間まで継続し、その後供試体の上部表面に水道水を満たした状態を6日間継続した。材齢7日で脱型し、その後21日間実験室内で気中養生を行った。年間を通しての実験室内の平均気温は15°C程度、また平均湿度は70%R.H.程度である。

#### (6) コンクリートの表面被覆材料

本実験において使用したコンクリートの表面被覆は3層構造となっている。すなわち、1層目がプライマー、2層目が中塗り、3層目が上塗りである。被覆膜の合計膜厚は約1000μmである。各層に使用した被覆材料およびその性質を表-5に示す。主膜を構成する中塗り材はアクリルゴム系の材料であり、その組成は54%(質量)がアクリルゴム、残りの46%が無機系フィラーおよび顔料である。なお、本実験において3層の被覆を行うために要した時間はおよそ14日である。

#### (7) 乾湿繰返しの方法

材齢28日までの養生を終了した後に、乾湿繰返し促進試験を開始した。4%のNaCl溶液を7日間供試体の上部表面に貯留し、その後溶液を除去し3日間実験室内での自然乾燥を行った。すなわち、10日間を1サイクルとし70サイクル

表-6 コンクリート中の塩化物イオン含有量の測定結果一覧  
(Cl<sup>-</sup> v. s. セメント、 質量%)

供試体番号	試料採取深さ (mm)	乾湿繰り返しサイクル数			
		10	20	60	70
No. 1 W/C =0.45 被覆無	5~25	1.38	1.53	2.52	2.36
	25~45	0.08	0.34	0.83	0.72
	45~65	0	0.06	0.09	0.06
	65~85	0	0	0.05	0.06
	85~105	0	0	0.05	0.01
No. 2 W/C =0.60 被覆無	5~25	2.42	2.64	4.30	4.34
	25~45	0.43	0.85	2.77	2.67
	45~65	0.23	0.51	1.54	1.73
	65~85	0.11	0.32	0.74	0.74
	85~105	0	0.14	0.21	0.24
No. 3 W/C =0.75 被覆無	5~25	3.33	4.05	5.07	4.73
	25~45	1.23	1.43	3.43	3.46
	45~65	0.59	0.95	2.51	2.58
	65~85	0.21	0.55	1.69	1.80
	85~105	0.11	0.23	1.21	1.12
No. 4 W/C =0.45 被覆有	5~25	0	0	0.05	0.10
	25~45	0	0	0.05	0.03
	45~65	0	0	0.05	0.01
	65~85	0	0	0.05	0.01
	85~105	0	0	0.05	0.01
No. 5 W/C =0.60 被覆有	5~25	0	0	0.23	0.06
	25~45	0	0	0.08	0.01
	45~65	0	0	0.12	0.01
	65~85	0	0	0.05	0.03
	85~105	0	0	0.05	0.03

供試体番号	試料採取深さ (mm)	乾湿繰り返しサイクル数			
		10	20	60	70
No. 6 W/C =0.75 被覆有	5~25	0	0	0.17	0.17
	25~45	0	0	0.10	0.03
	45~65	0	0	0.05	0.01
	65~85	0	0	0.05	0.03
	85~105	0	0	0.08	0.03
No. 7 W/B =0.60 BB:65% 被覆無	5~25	1.09	1.81	2.62	2.67
	25~45	0.17	0.48	0.14	0.10
	45~65	0	0.09	0.07	0.01
	65~85	0	0	0.03	0.03
	85~105	0	0	0.03	0.01
No. 8 W/B =0.60 FA:30% 被覆無	5~25	2.90	3.44	4.41	4.41
	25~45	0.11	0.55	0.50	0.55
	45~65	0	0.18	0.17	0.06
	65~85	0	0.09	0.24	0.03
	85~105	0	0	0.08	0.01
No. 9 W/B =0.60 SF:10% 被覆無	5~25	0.75	1.24	2.43	2.22
	25~45	0.08	0.14	0.33	0.14
	45~65	0	0.10	0.04	0.07
	65~85	0	0	0.11	0.03
	85~105	0	0	0.12	0.06
No. 10 W/B =0.75 BB:65% 被覆無	5~25	3.07	3.98	3.81	3.00
	25~45	1.09	1.40	0.39	0.20
	45~65	0.35	0.67	0.22	0.09
	65~85	0.17	0.24	0.12	0.03
	85~105	0.04	0.11	0.12	0.08

BB : 高炉スラグ、 FA : フライアッシュ、 SF : シリカフューム

まで乾湿繰返しを実施した。なお、 NaCl溶液の加熱は行っておらず、 使用した溶液の年間の平均温度は約15°C程度である。

#### (8) コンクリート中の塩化物イオン含有量の測定方法

塩化物イオン含有量を測定するための試料は、 直径が20mmのハンマードリルを用いて供試体の上部表面より鉛直方向にコンクリート粉を採取した。各回の計測に際し、 供試体の上部表面の6ヶ所においてドリルにより削孔し、 各々の削孔箇所において、 コンクリート表面からの深さが5~25mm, 25~45mm, 45~65mm, 65~85mmおよび85~105mmの異なる深さの場所より試料を採取した。同一の深さより採取した6試料を等量混合したものを一試料として塩化物イオン含有量の定量を行った。

コンクリート粉末試料中の塩化物イオン含有量の定量は、 BS 1881 : part 124 :1988

"Method for analysis of hardened concrete"

に準拠して実施した。この方法では、 塩化物イオンの抽出液として高温に加熱した硝酸溶液を使用し、 塩化物イオンの滴定液として硝酸銀を使用している。この方法は基本的にはJCI (日本コンクリート工学協会)において定められている規準<sup>1)</sup>と同様の考え方であるが、 JCI法において規定されている炭酸カルシウムを加え煮沸するという工程はBS法においては規定されていない。なお、 生データとしては、 コンクリート質量に対する塩化物イオン濃度が得られることになるが、 当初の配合を基にセメント質量に対する塩化物イオン濃度に換算した。また、 2回の測定の平均値を計測値として取り扱った。なお、 削孔箇所は元の供試体のモルタル

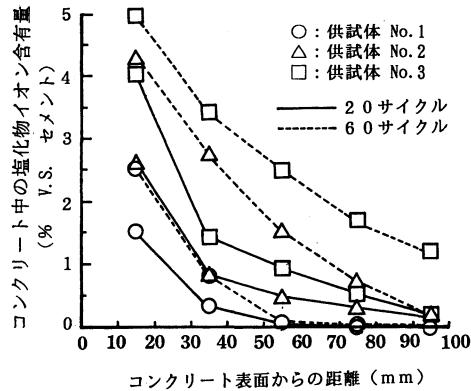


図-2 普通コンクリート中の塩化物イオン含有量

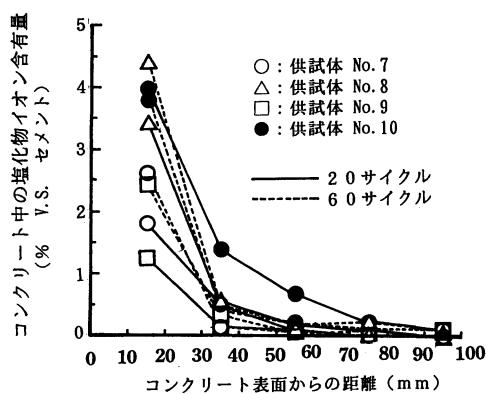


図-4 鉱物質混和材を混入したコンクリート中の塩化物イオン含有量

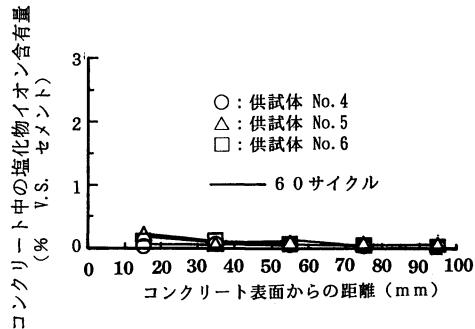


図-3 表面被覆を施したコンクリート中の塩化物イオン含有量

ル部分と同配合のモルタルにより埋め戻した。また、表面被覆供試体については、埋め戻し表面を同一材料、同一仕様にて被覆した。

### 3. 塩化物イオン浸透促進実験の結果

表-6に塩化物イオン含有量の測定結果の一覧を示す。これによると、60サイクル終了時と70サイクル終了時でコンクリート中の塩化物イオン含有量にほとんど差が認められず、むしろ70サイクル時の方が小さくなっている場合もある。これより、本実験で用いた乾湿繰返し法においては、60サイクルを終了した時点でコンクリート中の塩化物イオン含有量はほぼ定常状態に収束しているものと考えられる。

図-2～図-4に20サイクル終了時および60サイクル終了時のコンクリート中の塩化物イオン含有量の分布状況を示す。図-2は供試体No.1, No.2, No.3の測定結果である。この図よりわかるとおり、コンクリート表面からの深さが

増大するにつれて塩化物イオン含有量が減少し、一方、乾湿繰返しサイクル数が増加するにつれて含有量が増大するという典型的な分布傾向が認められる。また、水セメント比が大きくなる程コンクリート中の塩化物イオン含有量は大きくなっている。

図-3は表面被覆を施している供試体の、60サイクル終了時の測定結果を示している。この図によると、いずれの供試体の場合もコンクリート中の塩化物イオン含有量はほとんど零に近い。すなわち、コンクリート表面に形成されている塗膜により、外部環境からの塩化物イオンの浸入がほぼ完全に遮断されている。また、表面被覆による塩化物イオンの浸透防止効果はコンクリートの水セメント比には影響されず、いずれのコンクリートの場合も同等である。

図-4は鉱物質混和材を含む供試体の20サイクルおよび60サイクル終了時の塩化物イオン含有量を示している。この場合も、コンクリート表面からの深さが増大するにつれて塩化物イオン含有量が減少し、乾湿繰返しサイクル数が増加するにつれて増大するという典型的な分布の傾向を示している。本図と図-2を比較してみると、鉱物質混和材を混入したコンクリートにおいては無混入の場合に比べてコンクリートの表面からの距離が30mmより深い領域において塩化物イオン含有量が小さくなっているものの、30mm以下においてはさほど大きな差異は認められないことがわかる。

以上の実験結果より、鉱物質混和材の混入は外部環境からのコンクリート中の塩化物イオ

ンの浸入量を小さくする効果があると言える。一方、コンクリートの表面被覆は外部環境からの塩化物イオンの浸入をほぼ完全に遮断することができるものと考えられる。

#### 4. 乾湿繰返し試験の塩化物イオン浸透促進効果に関する考察

##### (1) 他の促進試験結果との比較

コンクリート中への塩化物イオン浸透促進試験として未だ規格化された方法はなく、各研究者が種々の方法を用いているのが現状である。それらの方法の促進効果を考察し、かつ定量化する試みはこれまでになされていない。本項においては、これまでに多くの研究者により発表された促進試験の結果を整理し、本実験で用いた乾湿繰返し法の促進効果に関する考察を行う。

##### a) 塩化物イオン拡散の基礎方程式

コンクリート中の塩化物イオンの拡散を表す基礎方程式として、式(1)に示すFickの拡散方程式が広く用いられている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、  
C : コンクリート中の塩化物イオン含有量

t : 暴露期間

x : コンクリート表面からの距離

D : 拡散係数

式(1)を、  
t = 0において C = 0, x = 0において C = C<sub>0</sub> (C<sub>0</sub>は一定) という初期条件および境界条件を基に解くと、式(2)を得ることが既に示されている。

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

ここに、  
C<sub>0</sub> : コンクリート表面における塩化物イオン含有量 (一定)

erf : 誤差関数

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (3)$$

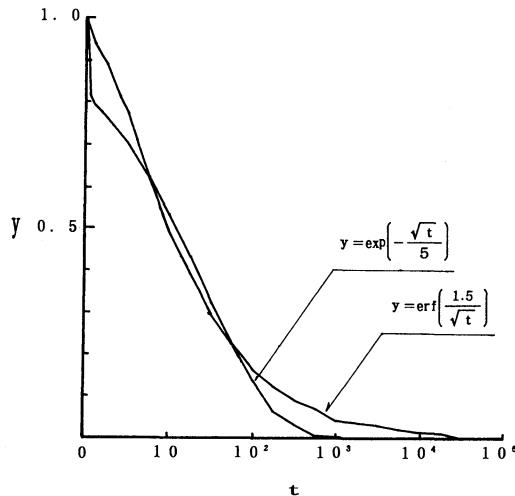


図-5 誤差関数と指数関数の比較の一例

##### b) 指数関数による誤差関数の代用

上記の式(2)においては、変数は x および t の 2 つである。ここで、コンクリート表面からの距離が一定、すなわち x が一定の場所での塩化物イオン含有量を対象とすれば、式(2)は以下の式(4)のように表すことができる。

$$C(t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{A}{\sqrt{t}} \right) \quad (4)$$

ここに、

$$A = \frac{x}{2\sqrt{D}} \quad (\text{一定値})$$

式(4)は、式(1)を基礎とした場合のある一定の深さ x におけるコンクリート中の塩化物イオン含有量の経時変化を示している。しかし、式(3)に示すとおり、誤差関数はかなり複雑であり近似曲線などに用いるのは不便である。ある程度の誤差を許容する範囲においては、ある種の簡易な関数で代用することも可能であると思われる。そこで、誤差関数と比較的似た形状を示す指数関数で誤差関数の代用をすることを考えた。図-5に誤差関数 (y = erf(1.5 / t<sup>1/2</sup>)) と指数関数 (y = exp(-t<sup>1/2</sup> / 5)) を比較したものの一例を示す。なお、本図の作成に際しては参考文献<sup>2)</sup>に示される誤差関数の数値一覧表を参照した。図よりわかるとおり、両関数が完全に一致するわけではないが、適切な定数を与

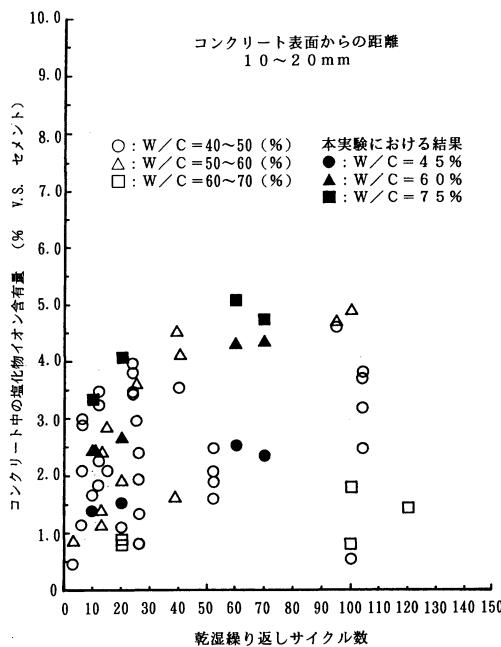


図-6 乾湿繰り返し試験における乾湿繰り返しサイクル数と塩化物イオン含有量の関係

えれば、両関数は比較的近い曲線を表すことが可能である。したがって、式(4)を以下の式(5)で代用することにより、次項c)における考察の一助とした。

$$C(t) = C_0 \left( 1 - \exp \left( -\frac{\sqrt{t}}{A} \right) \right) \quad (5)$$

ここに、 $A : x / (2 D^{1/2})$  の関数として定まる定数

### c) 本実験で用いた乾湿繰り返し法の促進効果に関する考察

本研究で用いた乾湿繰り返し法が、他の促進方法に比べてどの程度の促進効果を有するかを検討するために文献調査を行い、既往の研究の結果<sup>3)~18)</sup>を整理した。図-6~図-9にその整理結果を示す。塩化物イオン浸透促進試験としては、人工的な乾湿繰り返しを行っているものが数量的には最も多かったが、その試験条件は多岐にわたっていた。図-6~図-8は乾湿繰返

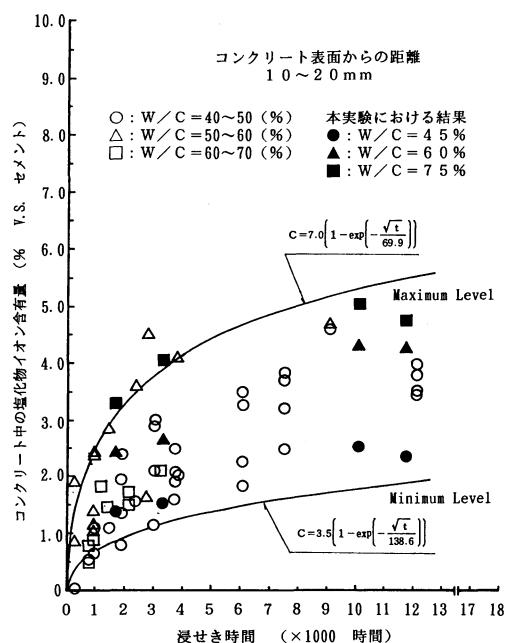


図-7 乾湿繰り返し試験における浸せき時間と塩化物イオン含有量の関係

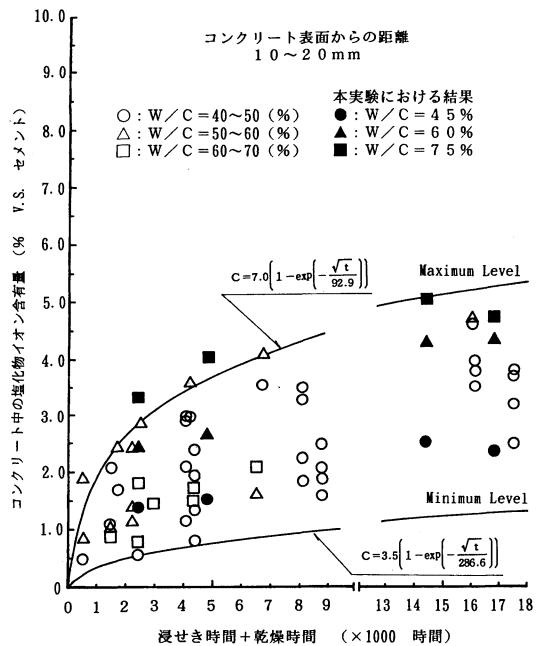


図-8 乾湿繰り返し試験における試験時間(浸せき時間+乾燥時間)と塩化物イオン含有量の関係

し条件が異なるデータを総合しグラフ化したものであるが、これらの図中においてはコンクリートの水セメント比(W/C)のみ分類して表示している。

図-6はコンクリート表面からの距離が10~20mmにおける塩化物イオン含有量について、乾湿繰返しサイクル数を指標として整理したものである。サイクル数の増加に伴い塩化物イオン含有量も増加する傾向が感じられるものの、100サイクルを実施した場合でもかなり低濃度のデータが示されている場合もあり、乾湿繰返しサイクル数と塩化物イオン含有量との間に明確な相関性を認めることは難しい。

図-7は、コンクリート表面からの距離が10~20mmにおける塩化物イオン含有量について、乾湿繰返しにおける浸せき時間を指標として整理したものである。データのばらつきはあるものの、浸せき時間が増加するにつれて塩化物イオン含有量が増大する傾向が認められる。同図中に指指数関数曲線で示した概略の最大レベルと最小レベルも併せて示すが、ほぼこの2つの曲線の範囲内にデータは存在するようである。同図中に本実験での結果も併せて示すが、水セメント比が0.75(■)のデータは最大レベルの近傍にあり、水セメント比が0.45(●)のデータは最小レベルの近傍にある。

図-8は、コンクリート表面からの距離が10~20mmにおける塩化物イオン含有量について、乾湿繰返しの試験時間(浸せき時間と乾燥時間の合計)を指標として整理したものである。データのばらつきはあるものの、図-7と同様に試験時間が増加するにつれて塩化物イオン含有量が増大する傾向が認められる。同図中に指指数関数曲線で示した概略の最大レベルと最小レベルも併せて示すが、ほぼこの2つの曲線の範囲内にデータは存在するものと思われる。同図中に、本実験における測定結果も併せて示すが、水セメント比が0.75(■)の場合はほぼ最大レベル上にあり、水セメント比が0.45(●)の場合は最小レベルの近傍にある。

以上の図-7および図-8より考察して、本実験で用いた乾湿繰返し法の試験条件は概ね平均的なものであり、試験方法としては妥当なものであると判断される。また、水セメント比が0.75といった貧配合のコンクリートを用いて試験を行った場合はコンクリート中の塩化物イオン含有量はほぼ最大レベルの値を示すものと考えられる。

図-9は、連続浸せき試験のデータについてコンクリート表面からの距離が10~20mmにおける

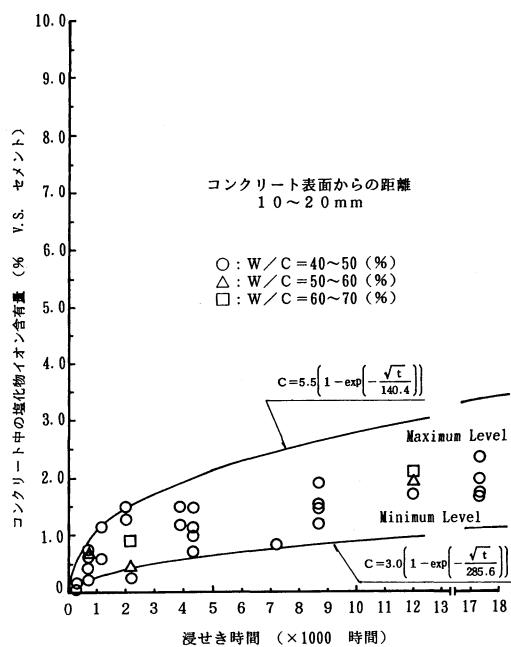


図-9 連続浸せき試験における浸せき時間と塩化物イオン含有量の関係

る塩化物イオン含有量を浸せき時間を指標として整理したものである。図-7、図-8と本図を比較してわかるとおり、塩化物イオン含有量は乾湿繰返しの場合よりもかなり小さい。これより、乾湿繰返しを実施することによりコンクリート中への塩化物イオンの浸入が促進されていることは明らかである。

## (2) 実環境との比較による促進効率の推定

筆者等は、過去において海洋環境下にあるコンクリート中への塩化物イオンの浸透、拡散に関する文献調査を実施し、種々の海洋環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの含有量について考察している<sup>19), 20), 21)</sup>。この研究においては、1980年以降に発表された文献51編を収集し、計1191個のデータを解析している。その結果と本室内実験より得られた結果を比較することにより、乾湿繰返し試験の促進効率の推定を試みる。ここで、「促進効率」の意味を以下のように定義する。すなわち、コンクリート中の塩化物イオン含有量がある一定値に到達するために、実際の環境に暴露された場合に要する時間と乾湿繰返し促進試験の場合に要する

表-7 乾湿繰返し試験の促進効率の推定結果

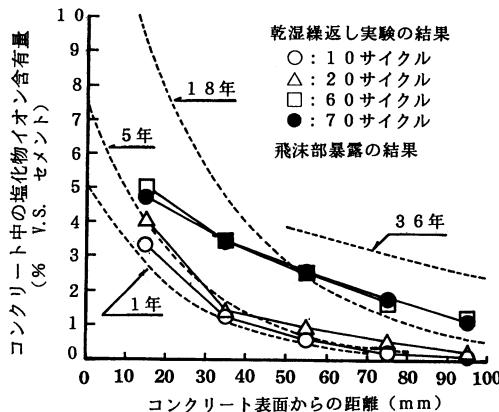
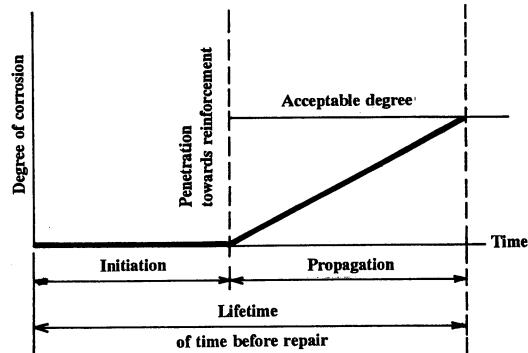


図-10 飛沫環境下と乾湿繰返し環境下のコンクリート中の塩化物イオン含有量の比較

時間の比率を促進効率と定義する。当然ではあるが、対象とする海洋環境の環境条件が異なれば促進効率も異なる値を取る。本文中における検討では、海洋環境の中でも比較的厳しい部類に属する飛沫部をその対象とし促進効率の推定を行った。

図-10は、飛沫部に暴露されたコンクリート中の塩化物イオン含有量の最大レベルの時間的推移と本実験の供試体No.3 (W/C=0.75) のコンクリート中の塩化物イオン含有量の測定結果を同一の図中に示したものである。促進効率を的確に評価するためには比較対象とするコンクリートがほぼ同等であることが必要となる。図-10に示した飛沫部暴露のデータは図中に示した暴露期間における最大レベルを示しており、コンクリートの配合、材料は明確ではないが最も低品質のコンクリートを用いた場合のデータであると考えられる。一方、乾湿繰り返し試験の結果として、供試体No.3を用いたのは、図-7および図-8に示したとおり、このコンクリートの水セメント比が0.75とかなり貧配合であり、本実験で採用した乾湿繰り返し環境でのほぼ最大レベルに近い塩分含有量を示したためである。すなわち、図-10に示される点線（飛沫環境下での最大レベル）と実線（本乾湿繰り返し試験での最大レベル）を比較することにより、実環境である飛沫部と促進環境である乾湿繰り返し環境の比較を行い、促進効率を定義することが可能であると考えられる。なお、乾湿繰り返し60サイクル終了時と70サイクル終了時で塩化物イオン含有量にほとんど差が認められないことより、本比較においては60サイクル (600日=1.65年)

	コンクリート表面からの距離		
	35 mm	55 mm	70 mm
促進効率	6.7	11.0	13.3

図-11 塩害劣化の過程<sup>22)</sup>

時の結果を用いることにした。図-10よりわかるとおり、実環境の場合の分布状況と乾湿繰り返し試験の場合の分布状況は必ずしも同型であるとは言い難い。したがって、促進効率の推定に際してはコンクリート表面からの距離が35mm, 55mm, および70mmの場合という制約条件を設けた。図-10より推定した促進効率を表-7に示す。コンクリート表面からの距離が35mmの場合は6.7, 55mmの場合は11.0, 70mmの場合は13.3という推定値を得た。距離が35mmの場合を例に取ると、乾湿繰り返し60サイクル終了時と同一の塩化物イオン含有量を得るために実環境の場合約11年要することになり、促進効率は6.7 (=11/1.65)と算出された。深さが55mmおよび70mmの場合も同様の考え方で計算した。

## 5. 塩害防止効果の定量的評価

### (1) 評価の基本的な考え方

K. Tuttiによると、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化過程は図-11のよう示されている<sup>22)</sup>。本図に示されるとおり、Tuttiは塩害の劣化過程を大きく2つに区分し、各々を、"Initiation period"と"Propagation period"と名付けている。両者の境界は鉄筋の腐食開始である。また、宮川等は塩害劣化の過程をさらに細分している<sup>23)</sup>。これによると、一連の過

表-8 潜伏期間の推定結果

供試体番号	対象としたかぶり		
	35mm	55mm	70mm
1	3.9年 (n=21)	21年 以上	25年 以上
2	1.8年 (n=10)	5.1年 (n=17)	8.7年 (n=24)
3	0.6年 (n=3)	2.4年 (n=8)	5.5年 (n=15)
4	12年 以上	21年 以上	25年 以上
5	12年 以上	21年 以上	25年 以上
6	12年 以上	21年 以上	25年 以上
7	12年 以上	21年 以上	25年 以上
8	3.7年 (n=20)	21年 以上	25年 以上
9	12年 以上	21年 以上	25年 以上
10	0.8年 (n=4)	19.6年 (n=65)	25年 以上

推定期間 (年) =  $n \times 10$  (日) / 365 (日) × r

n : コンクリート中の塩化物イオン含有量が0.4%に達したときの

乾湿繰り返しサイクル数

r : 促進効率

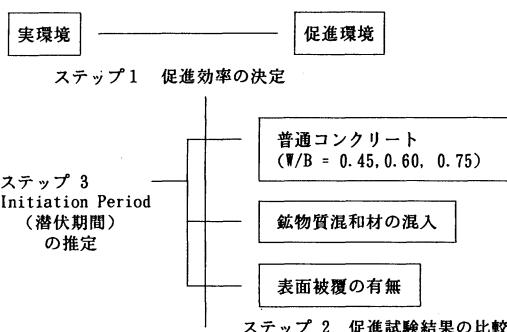


図-12 塩害防止効果の評価の基本的考え方

程を「潜伏期」、「進展期」、「加速期」および「劣化期」の4つに区分しているが、Tuttiによる"Initiation period"と宮川による「潜伏期」は全く同一の期間を指している。すなわち、鉄筋周囲の塩化物イオン濃度が必要濃度（臨界濃度）に到達するまでの期間が

"Initiation period (潜伏期)"の期間と考えることができる。

鉄筋腐食が始まる際の塩化物イオンの臨界濃度に関しては、これまでに比較的多くの論文が発表されている。それらの、提案値は必ずしも一致するものではないが、本文中においてはセメント質量に対する0.4%を鉄筋の発錆が開始するための臨界濃度とみなして<sup>24)</sup>、以後の考察を進めた。図-12に評価の基本的な考え方を示す。まず、第一段階において実環境と促進環境

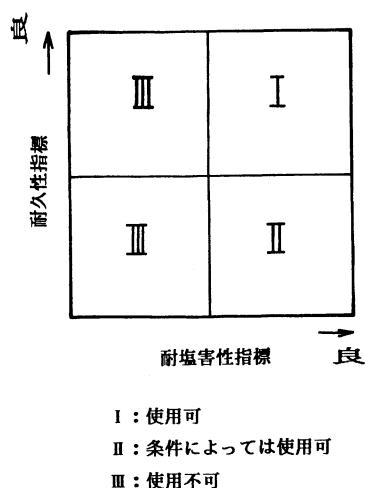
を定量的に関連づける必要があるが、これについては前章において既に述べた。第2段階においては、室内実験の結果を基に条件の異なる各種コンクリートに関する塩化物イオン含有量の比較を行う。そして、最終的には飛沫部という実環境に暴露された場合を想定し、条件の異なる各種コンクリートの場合の潜伏期間を推定する。なお、表-7に示した促進効率があらゆるコンクリート、例えば低水セメント比のコンクリート、鉱物質混和材を含むコンクリートに適用可能であるかは現時点で明示するのは難しいが、本考察中においては、「ある一つの環境条件があらゆるコンクリートに対して同等に作用する」という仮定の基に表-7に示した促進効率をすべての供試体に適用した。

## (2) 潜伏期間の推定結果

表-8に潜伏期間の推定結果を示す。表に示すとおり、コンクリート表面からの距離が35mm、55mmおよび70mmの場合について潜伏期間の推定を行った。

普通コンクリート（供試体No.1～No.3）について見てみると、水セメント比が60%と75%の場合、かぶりが70mmとしても潜伏期間は10年未満である。一方、水セメント比が45%の場合はかぶりが55mmの場合は潜伏期間が21年以上であり、コンクリートの水セメント比が構造物の寿命に及ぼす影響は極めて大きいことがわかる。

コンクリートに表面被覆を施した場合は、乾湿繰り返しを60サイクル実施した後でも、コンクリート中の塩化物イオン含有量は鉄筋腐食に関



する臨界濃度とみなした0.4%以下であった。すなわち、本実験結果の範囲では表面被覆を施した供試体に関しては潜伏期間を推定することは不可能である。

鉱物質混和材を含むコンクリートについて見てみると、対象とするコンクリート表面からの距離が異なるとその効果も異なるという結果であった。すなわち、コンクリート表面からの距離が比較的小さい領域(35mm)よりも大きい領域(55mmおよび70mm)においてその効果が顕著に認められた。したがって、鉱物質混和材を混入したコンクリートを用いる場合は、鉄筋のかぶり深さを少なくとも50mm程度以上確保することにより、その効果を大きくすることができるものと考えられる。

以上の推定結果より、鉱物質混和材の適切な混入あるいは信頼性のある材料を用いてコンクリートの表面被覆を施し、かつ表面被覆の適切な維持管理を行うことにより、塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の寿命を大幅に延伸させることができると見える。

### (3) コンクリート表面被覆材料の評価について

上述したとおり、信頼性のある材料を用いてコンクリートに表面被覆を施せば、塩害環境下でのコンクリート構造物の寿命を延伸させることが可能であることが示された。しかし、この結論は使用した被覆材料が使用環境下で十分な耐久性を有するか、あるいは塗り替えなどの適切な維持管理を施した場合でのみ適用されるものである。筆者の一部は、過去においてコンク

リート表面被覆材料の評価の考え方を提案している<sup>25), 26)</sup>。図-13にその考え方を示す。基本的には、被覆膜による塩化物イオンの浸透防止性(耐塩害性指標)と被覆膜自身の耐久性(耐久性(耐候性)指標)の双方より評価すべきであるとの考え方である。本研究で得られた結果(表-8)は、図-13で示した評価図の「I」に相当する材料を用いた場合、あるいは「II」に相当する材料を用いかつ十分な維持管理を施した場合に適用されるものであり、すべての材料に対して成立するものではない。

## 6. 結論

本実験および考察より得られた結論を以下にまとめる。

1. 今回の実験において用いた乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験においては、乾湿繰返しを60サイクル終了した時点でのコンクリート中の塩化物イオン含有量はほぼ定常状態となつた。
2. 普通コンクリートの場合、コンクリートの水セメント比が小さくなるとコンクリート中の塩化物イオン含有量も小さくなる。特に、水セメント比0.45のコンクリートは塩化物イオンの浸入防止に関して、かなり優れていることが示された。
3. コンクリートの水結合材比が同じであれば、鉱物質混和材を含むコンクリートの方が普通コンクリートよりも塩化物イオンの浸入は少なくなる。また、その効果はコンクリート表面からの距離が比較的大きな領域において顕著である。
4. 鉱物質混和材を混入した場合でも、水結合材比は可能な限り小さくする方が望ましい。
5. 今回実験に用いたコンクリートの表面被覆材料は、外部環境からコンクリート中への塩化物イオンの浸入をほぼ完全に防止した。
6. 今回実験に用いたコンクリートの表面被覆の場合は、水セメント比の大きな(今回は0.75)低品質コンクリートでも外部環境からのコンクリート中への塩化物イオンの浸入をほぼ完全に防止した。
7. 実環境での暴露に関する文献調査の結果と乾湿繰返し試験の結果を比較することにより、乾湿繰返し試験の促進効率を推定することができた。
8. 鉱物質混和材の混入およびコンクリートの表面被覆の塩害防止効果の定量的評価、すな

わち潜伏期間の推定ができた。

9. 高炉水砕スラグ、フライアッシュ、シリカフュームといった鉱物質混和材をコンクリートに混和することにより、鉄筋コンクリート構造物の塩害環境下における寿命を延伸させることが可能である。
10. コンクリート中の塩化物イオン含有量が少ない時期に信頼性の高い材料により表面被覆を施し、その適切な維持管理を行うことにより、塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の寿命を大幅に延伸させることが可能である。

謝辞：本研究を実施するに際して、英国シェフィールド大学技術員の、N. Morton氏およびA. Smart氏の多大なる御協力をいただきました。また、本論文の作成に際しまして金沢大学工学部の川村満紀教授に貴重な御示唆をいただきました。ここに記してお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) JCI-SC, 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規準（案），日本コンクリート工学協会，1987.
- 2) *An Engineering Data Book*, Edited by A. J. Munday and R. A. Farrar, Published by THE MACMILLAN PRESS LTD, Basingstoke and London, p. 40.
- 3) H. G. Midgley and J. M. Illston : The Penetration of Chloride into Hardened Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, pp. 546 - 558, 1984.
- 4) P. S. Mangat and Kribanandan Gurusamy : Chloride Diffusion in Steel Fibre Reinforced Concrete Containing PFA, *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp. 640 - 650, 1987.
- 5) P. S. Mangat and Kribanandan Gurusamy : Chloride Diffusion in Steel Fibre Reinforced Marine Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp. 385 - 396, 1987.
- 6) Neal S. Berk, Donald W. Pfeifer and Thomas G. Weil : Protection Against Chloride-Induced Corrosion, *Concrete International*, December, pp. 45 - 55, 1988.
- 7) Stella L. Marusin : Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete and Concrete Containing Condensed Silica Fume, *American Concrete Institute, SP 109*, pp. 1114 - 1133, 1988.
- 8) P. Balaguru and V. Ramakrishnan : Chloride Permeability and Air-void Characteristics of Concrete Containing High Water Reducing Admixture, *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp. 401 - 414, 1988.
- 9) Stella L. Marusin : Evaluating Sealers, *Concrete Internationals*, November, pp. 79 - 81, 1989.
- 10) C. L. Page and P. Lambert : Investigation of Reinforcement Corrosion, I. The Pore Electrolyte Phase in Chloride-contaminated Concrete, *Materials and Structures*, 24, pp. 243 - 252, 1991.
- 11) 谷川伸, 永井健太郎, 宮沢健: アクリルゴム系塗膜材被覆によるコンクリートの塩害防止効果, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp. 411 - 416, 1987.
- 12) 大城武, 堀園義昭, 谷川伸, 永井健太郎: コンクリート中への塩素イオンの浸透に関する実験的及び解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp. 369 - 374, 1987.
- 13) 飛坂基夫, 柳啓: 硬化コンクリート中への塩素イオンの浸透性に関する2, 3の検討, コンクリート工学年次論文報告集, 9-1, pp. 439 - 442, 1987.
- 14) 桧田佳寛, 友沢史紀, 安田正雪, 原謙治: コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, 10-2, pp. 493 - 498, 1988.
- 15) 高橋正行, 外門正直, 志賀野吉雄: 乾・湿繰返し作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp. 529 - 532, 1989.
- 16) 鳥居和之, 川村満紀: 種々のポゾラン材料を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp. 489 - 494, 1990.
- 17) 氏家勲, 小林清和, 佐藤良一, 長滝重義: 内部ひびわれを有するかぶりコンクリートの塩分浸透性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 843 - 848, 1992.
- 18) 村上祐治, 山下英俊, 鈴木篤, 大津正康: コンクリートの塩分浸透における乾燥及び微細構造の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 831 - 836, 1992.
- 19) 浜田秀則, R. N. Swamy: 種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入過

- 程および浸入量に関する一考察, コンクリート工学論文集, 第7巻, 第1号, pp.11 - 22, 1996年1月.
- 20) R. N. Swamy, H. Hamada, J. C. Laiw : A Critical Evaluation of Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment, CORROSION AND CORROSION PROTECTION OF STEEL IN CONCRETE, *Proceedings of International Conference held at the University of Sheffield*, pp. 404 - 419, July 1994.
- 21) 浜田秀則, R. N. Swamy : 種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透に関する一考察, 港湾技研資料, No. 810, Sep. 1995.
- 22) K. Tutti : Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, *ACI Special Publication No.65*, pp. 223 - 236, 1980.
- 23) 宮川豊章, 小林和夫, 藤井学 : 塩分雰囲気中ににおけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, pp. 47 - 54, 1984. 4.
- 24) D. W. Pfeifer, W. F. Perenchio, W. G. Hime : A Critique of the ACI 318 Chloride Limits, *PCI JOURNAL*, Vol. 37, No. 2, pp. 68 - 71, March-April 1992.
- 25) 濱田秀則, 福手勤, 阿部正美, 山本邦夫 : コンクリートの表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について, 港湾技研資料, No. 706, June. 1991.
- 26) 濱田秀則, 福手勤, 阿部正美, 山本邦夫 : コンクリートの表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp. 533 - 538, 1991.

(1995. 8. 1受付)

### QUANTITATIVE EVALUATION OF THE PREVENTIVE EFFECTS OF MINERAL ADMIXTURES AND SURFACE COATING MATERIALS ON CONCRETE STRUCTURES AGAINST CHLORIDE ATTACK

Hidenori HAMADA, Tsutomu FUKUTE, R.N.SWAMY, Shin TANIKAWA  
and J.C.LAIW

The preventive effects of mineral admixtures and concrete surface coatings against chloride attack is reported. Concretes of high, low and medium water to binder ratio, with and without mineral admixtures, or with and without a protected surface coatings were designed. Reinforced concrete slab specimens were subjected up to 70 cycles of wetting and drying by ponding 4.0% sodium chloride solution and drying in atmospheric air. And, a literature survey was conducted. As a result, it can be said that the service life of concrete structures incorporating mineral admixtures or protected with surface coating materials becomes significantly longer than that of the structures made of plain concretes when exposed to chloride environments.