

論文 塩害環境下におけるコンクリート中の塩分蓄積量に関する一考察

谷川 伸*1・山田義智*2・大城武*3

要旨：本研究は、亜熱帯性海洋気候下の沖縄県において長期間厳しい塩害環境下に暴露した実大RC構造物のコンクリート中に浸透する塩分の分布及び、その積分値である塩分蓄積量について検討した。その結果、外部より塩分がコンクリート中に浸透する際に、飛来塩分、中性化、ひびわれ等がその浸透特性に大きく影響を与えることを確認した。

キーワード：塩分蓄積量，塩分濃度ピーク，中性化，飛来塩分，ひびわれ

1. はじめに

本研究は沖縄県の海岸に隣接して建設された実大RC暴露構造物を対象とし、各飛来塩分環境下毎のコンクリート中の塩分分布や、その積分値である塩分蓄積量について考察を行い、飛来塩分量、中性化、ひびわれ、塗膜の有無等を考慮して、鉄筋の発錆に影響を与える外部環境からコンクリート中への塩分浸透特性について論述する。

なお、本暴露構造物を対象とした塩害劣化に関する研究成果は既発表 [1] である。

2. 試験概略

実大RC暴露構造物は、1984年9月に沖縄県本部町備瀬に建設され、これを対象に実験を行っている(図-1)。本構造物は南側を除いて広く海に面した位置にあり、厳しい塩害環境下である。コンクリートの品質は、普通ポルトランドセメントを用い、W/Cを63%、スランプを18cm、Fcを210kgf/cm²、空気量を4%としている。東側のコンクリートには塩分量0.5% (NaCl/コンクリート重量)を調合時に初期混入し、この部分を有塩部と称す。また、西側部分には塩分を初期混入せず、無塩部と称す。また、北側の海岸側にはアクリルゴム系塗膜防水を施し、この部分を塗膜部と称し、南側の無塗膜部と区別する。

コンクリート中の塩分分析は、暴露構造物の各方位、各部材より直径10cmのコアを採取し、これを約1cm間隔でスライスした後にクラッシュし、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定で可溶性塩分量を分析している。ここでは、コンクリート重量に対する塩分量比 (wt%)で示す。

飛来塩分量は、土研式塩分補集器にてスラブ上で東西南北の各方位について測定している。

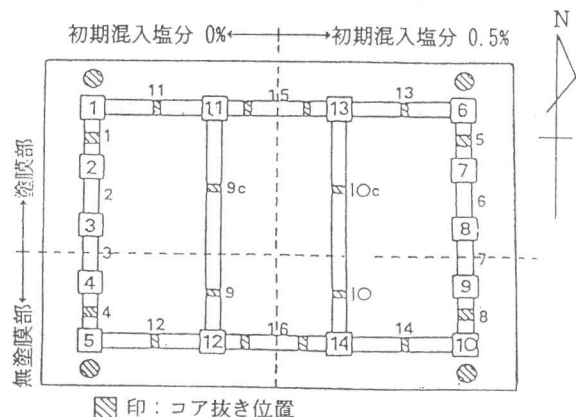


図1. 暴露構造物の平面図

*1東亜合成(株)・金沢大学大学院自然科学研究科博士課程, 工修 (正会員)

*2琉球大学助手 工学部環境建設工学科, 工修 (正会員)

*3琉球大学教授 工学部環境建設工学科, Ph.D. (正会員)

3. 実験結果及び考察

3.1 塩分分布について

図2に有塩部・無塩部，塗膜・無塗膜の条件の違いによる北-南に面した梁部材の打設後各経過年毎の塩分分布を示す。図2-a,bは無塩部，図2-c,dは有塩部についての塩分分布を示す。また，図2-a,cは無塗膜部，図2-b,dは塗膜部についての塩分分布を示す。各図とも縦軸は塩分濃度，横軸は北側コンクリート表面及び南側コンクリート表面を起点とするコンクリート内部位置を示す。

有塩部には打設時に混入した塩分濃度0.5%が全塩分量と見なせるものとし，これを可溶性塩分量に換算し直し[2]，図中に破線で示した。文献[2]ではCl量で扱っているが本研究ではこれをNaCl量に置き換えている。この換算は経過年後の塩分分布から判断すると適当と言える。

無塗膜部では塩分濃度の増加が著しいが，塗膜部では塩分濃度の増加は僅かである。この塗膜部での僅かな塩分濃度の増加は，コンクリート打設後約半年間塗膜をしないで放置した時期があり，この期間中に浸透してきた塩分量だと考えられる。つまりこの塗膜部の塩分分布は，無塩部かつ無塗膜部の半年間の塩分分布とほぼ同じであり，これより上記のことは証明される。従って，暴露を行った10年間の間には，塗膜部には塩分浸透が実質的にはほとんど無いものと言える。

北側と南側の塩分分布の比較から，海に面し飛来塩分量の多い北側の方が塩分浸透量が多いのが図より分かる。後で示すが，飛来塩分量の多少と塩分浸透量の多少とは対応している。

以上，北-南に面した梁部材塩分分布について論述したが，東-西に面した梁部材や柱部材についても塩分分布の性状は定性的には上に述べたことと同じである。

図3にスラブ部材の塩分分布を示す。図3-aは無塩部，図3-bは有塩部であり，いずれも無塗膜部である。

梁部材では測定を行った10年間の期間中経過年毎に塩分濃度が増加したが，スラブ部材では経過6，7年目頃より塩分濃度の増加が頭打ちとなっている。ところで，10年目の塩分濃度が低い値であるが，この原因はコアを採取する際に，この年度は角柱及び屋根スラブ上に設置した暴露供試体の裏側から抜き取っているため，他年度と塩分の浸透条件が同一でないことが考えられる。

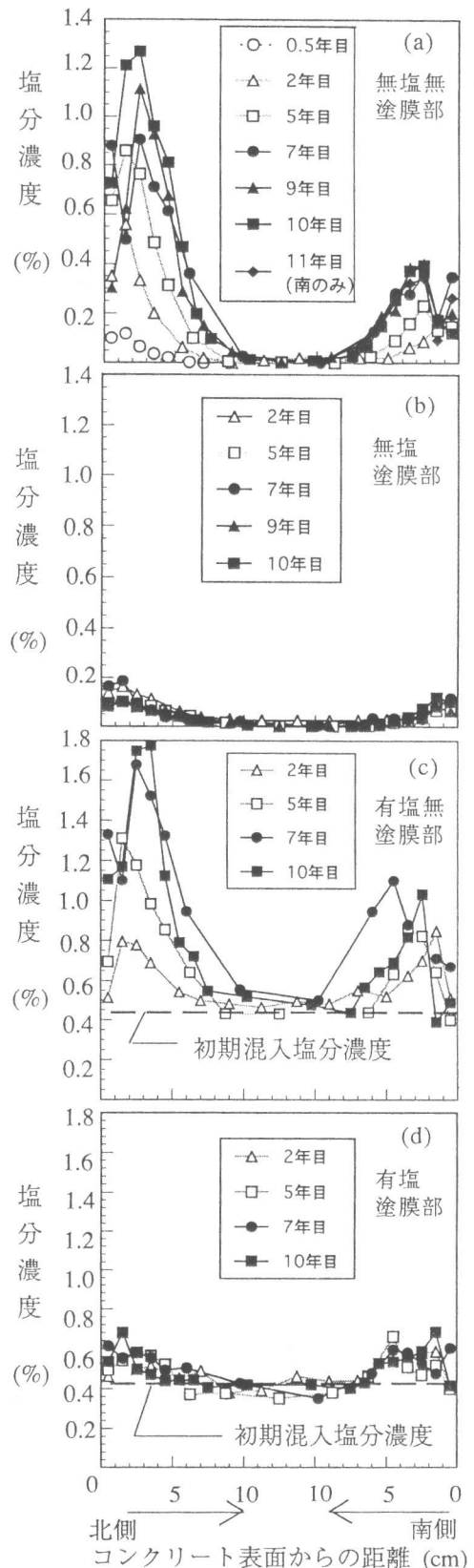


図2. 梁部材塩分分布図

梁及びスラブ部材ともに塩分濃度のピークはコンクリート表面ではなく、内部側に生じている。この塩分濃度のピーク位置は経過年と共に内部へ移動する傾向がある。塩分移動による塩分濃度ピークの形成について、炭酸化が要因となる指摘がなされている[3]。表1に経過10,11年目の各部材位置での中性化深さを示す。中性化深さの判定はフェノールフタレインによる呈色反応によった。炭酸化が塩分濃度ピーク位置の形成に影響を及ぼす可能性は、本研究でも下記の3点により示唆される。

- (1) 中性化深さの浅いスラブ上面ではコンクリート表面側に塩分濃度ピーク位置があり、その移動が見られないケースが多い。
- (2) 中性化は時間と共に内部に進行していくことから、上記した塩分濃度ピーク位置の時間にもなうより内部への移動が説明される。
- (3) 本実験で10年目の塩分濃度ピークは、スラブ上部側を除きコンクリート表面から深さ2-3cmの1cm幅で採取したコンクリート片中（塩分分布では表面深さ2.5cm位置に相当）に多く生じており、中性化深さの位置から平均で約1.2cm内部側である。文献[4]ではコンクリート中のpH勾配を測定し、水セメント比60%のコンクリートでは、フェノールフタレイン法により計られる中性化深さより1.15cm以深に真に中性化していない限界があるとしている。つまり、水セメント比60%のコンクリートの炭酸化は、フェノールフタレイン法により計られる中性化深さより1.15cm以深まで影響しており、本実験で得られたピーク位置と対応する。

3.2 塩分浸透蓄積量について

打設時に塩分が混入していない場合、コンクリート中に蓄積する塩分は、海から飛来した塩分がコンクリート表面に付着し一部がコンクリート内部に浸透する結果生じるものである。また、打設時にコンクリート中に塩分を含む場合にも、初期混入塩分量に累加する形で飛来塩分量の一部がコンクリート表面から浸透蓄積する。

コンクリート表面を介してコンクリート中に流入する塩分量とコンクリート中に経過時間と共に蓄積していく塩分蓄積量の関係は図4に示される。図4-a.は塩分の浸透量と経過時間の関係を幾つかの関数で表している。図4-a.中の式(1)は塩分浸透量が時間と共に増加していく場合である。式(2)は浸透量が経時的に変化しない場合であり、式(3)、式(4)は塩分浸透量が時間ともに比例的あるいは指数的に減少していく場合である。図4-bは図4-aの塩分浸透関数に対応した塩分蓄積量の経時変化を表しており、任意経過時間Tに対して蓄積する塩分量は、式(1)は式(a)、式(2)は式(b)、式(3)は式(c)、式(4)は式(d)に各々対応している。

これらの塩分浸透及び塩分蓄積を実際の現象と照らし合せて考察すると以下のことが言える。式

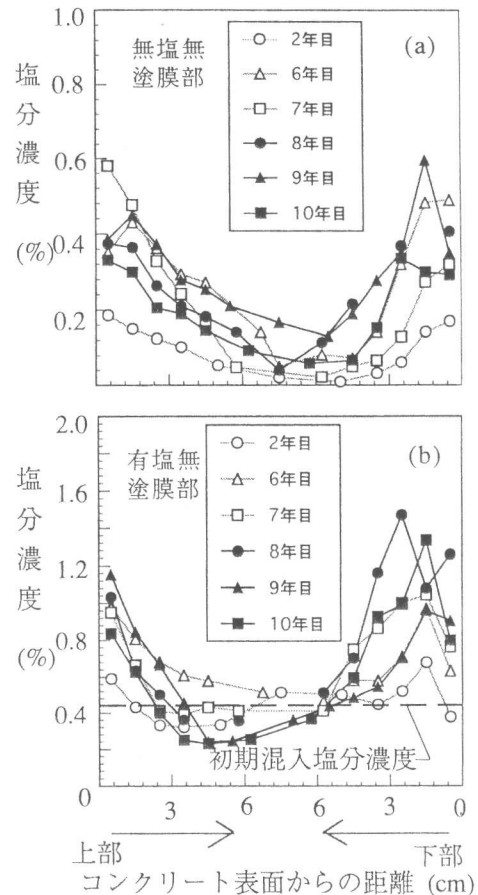


図3. スラブ部材塩分分布図

表 1.10, 11 年目中性化深さ

経過年数	梁部材 (mm)				スラブ	
	北側	東側	南側	西側	上部	下部
10年	11.0	15.9	14.0	13.0	3.5	9.8
11年	15.0	20.0	15.0	15.0	3.0	15.0
平均	13.0	18.0	14.5	14.0	3.3	12.4

(2)の場合は、コンクリート中の塩分濃度になんらかの飽和値があるであろう事や、コンクリート表面は炭酸化等により細孔構造が変化すること、塩分を媒体する細孔の水分が次第に乾燥していくこと等から、コンクリートが打設直後から経過時間後も変わらず I_0 一定で塩分浸透を許すことは考えにくい。また、式(3)の塩分浸透量の経時変化だと、ある経過時間後は蓄積塩分が減少する方向に転じ、これも実現象としては考えにくい。式(4)の経過時間とともに塩分浸透量が指数的に減少する場合だとコンクリート中の蓄積塩分量はある一定値に収束する。コンクリートにひび割れを含まない場合だと、塩分蓄積量が一定値に収束する式(4)、式(d)の浸透量変化及び塩分蓄積が適切であると考えられる。一方、かぶりコンクリートに早期にひび割れが発生し、さらに鉄筋腐食の進行にともないひび割れが進展すると見掛け上コンクリート表面が増大し結果的に塩分浸透量が増大する。塩分浸透量の経時変化は定かではないが、ここでは便宜的にひび割れの進展の影響により式(1)の様に塩分浸透量が時間に関して比例的に増加するものと仮定すると、塩分蓄積量は時間について2次式的に増加する。ただし、ひび割れ部分は無限に進展するわけではなく見掛け上塩分の流入するコンクリート表面も無限に増加するわけではない。従って、ひび割れの進展程度により異なるが、ある時点からは塩分浸透量及び塩分蓄積量は式(4)-式(d)型に移行するものと考えられる。

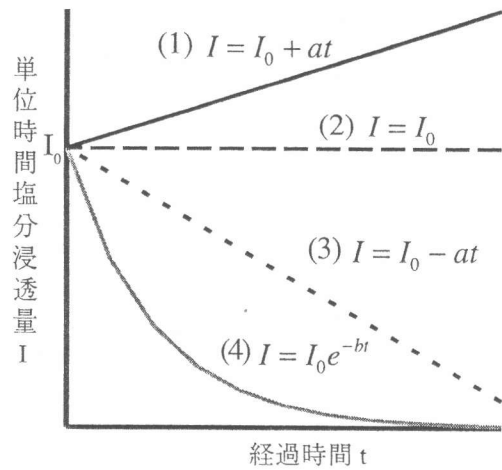


図4-a. 塩分浸透量 - 経過時間関係

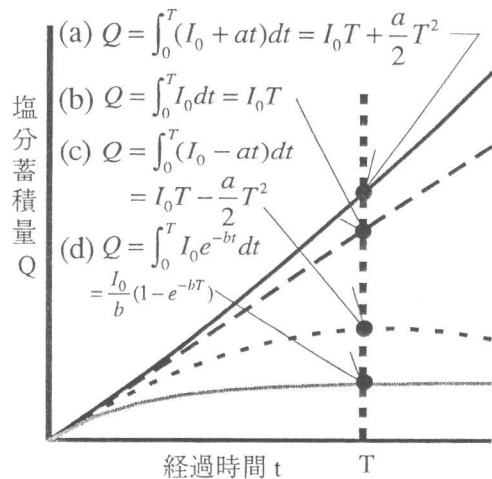


図4-b. 塩分蓄積量 - 経過時間関係

図4. 塩分浸透量及び塩分蓄積量の経時変化概念図

図5に無塩部より採取したコア中の塩分蓄積量の経時変化をプロットする。図中の丸印は無塗膜部の梁、スラブ部材の塩分蓄積量を表し、図中の四角印は有塗膜部の梁、スラブ部材の塩分蓄積量を表す。図中の白抜き印は部材の北側、東側及び上部の塩分蓄積量を表し、黒塗り印は部材の南側、西側及び下部の塩分蓄積量を表す。この図より、コンクリートのひび割れの影響がないと考えられる部位での塩分蓄積量の経時変化は式(d)で表せるものと言える。図中に式(d)にて近似曲線を示す。有塗膜部の塩分蓄積量は、無塗膜部で半年間に蓄積された量とほぼ同じであり、施工時に約半年間塗膜を施さなかった間に塩分が蓄積した事を示し、その値が10年間ほとんど増加しないことより本実験で用いた塗膜の有効性が分かる。なお、暴露期間中に塗膜が目立った劣化は確認されなかった。

表2に近似の際の式(d)の各係数を梁、スラブの方向毎に示す。ここで I_0 は初期塩分浸透量を示している。この値は、各方位の飛来塩分量の多少と対応している。即ち、飛来塩分量の最も多い北側では I_0 は最も大きく、飛来塩分量の最も少ない南側では I_0 は最も小さい。係数bは塩分浸透量の減衰性状を表すもので、この値が大きい程減衰が顕著である。この値に影響を及ぼす因子としては、経時的な細孔構造の変化及びコンクリートの含水状態変化等が考えられる。即ち、コンクリート表面側の細孔量、細孔径に変化があれば塩分浸透量も変化するであろうし、コンクリート中の含水率

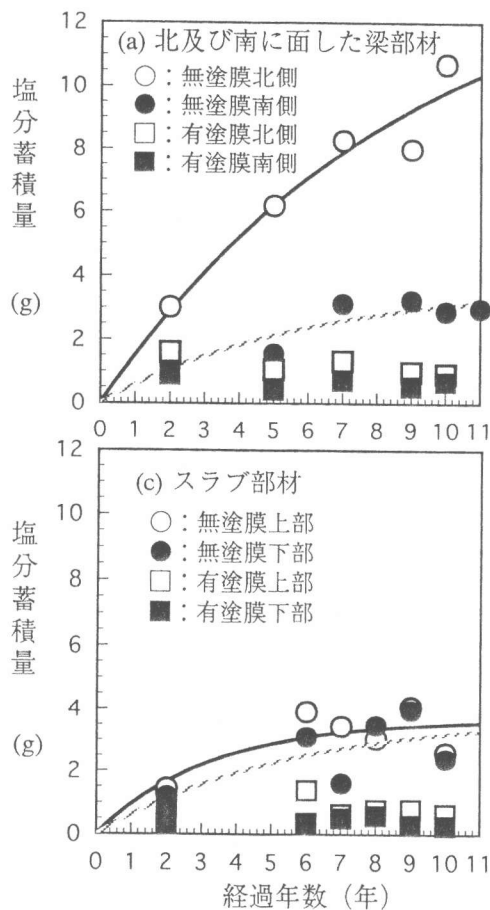


図5. 無塩部・無塗膜コンクリートの塩分蓄積量 経過時間変化

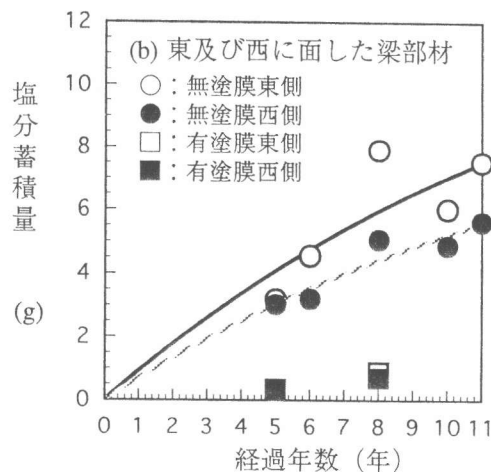


表2. 式 (d) 近似各係数値

	部位	I_0	b	I_0/b	R^2	中性化深さ順位
梁部材	北	1.604	0.108	14.852	0.92	4
	東	0.955	0.065	14.615	0.65	1
	南	0.627	0.166	3.777	0.80	2
	西	0.716	0.068	10.529	0.89	3
スラブ	上	1.111	0.301	3.691	0.71	6
	下	0.674	0.175	3.851	0.60	5

が下がれば塩分を内部において拡散する媒体が減少するので塩分を蓄える容量が小さくなり、見掛け上塩分浸透量を抑える効果を示すものと考えられる。ここで、細孔構造に変化を与える要因として表1の中性化深さと減衰性状を表す係数bを対応してみると南側を除いて、中性化が進んでいる所ほど、係数bの値が小さく塩分浸透量の減少の割合が小さい結果となっている。しかし、文献[5]によれば、水セメント比43%のコンクリートを用い、CO₂濃度10%、湿度60%、温度20℃の条件下で炭酸化処理を行い海岸沿いに暴露した結果、炭酸化部分が塩化物の浸透（流入塩分量に相当）を遅延させる効果があるとしており、本実験結果とは逆となっている。文献[6]において、モルタルを用いた乾湿繰り返しを行わない促進中性化試験では経時的に全細孔量は減少するが、一方、乾湿繰り返し促進中性化試験では、水セメント比65%のものでは細孔量は経時的に増加するとしている。これと対応すると、文献[5]の炭酸化の条件は乾湿繰り返しを行わない場合に相当し、本実験は水セメント比が大きく、自然環境化で炭酸化が進行しており、上記の乾湿繰り返し促進中性化試験に相当するものと考えられる。従って、炭酸化進行の環境条件及び水セメント比の違いが、細孔量増減の違いとなり、上述したように塩分浸透量の減少に関して逆の結果を与えているものと考えられる。

なお、本構造物の南側は、他の方位に比べ日射によりコンクリート中の含水率が低下している可能性があり、上記の理由により中性化の割には係数bが大きいものと推察される。

I_0/b は蓄積塩分量の収斂値である。初期塩分浸透量 I_0 は飛来塩分量に対応し、減衰性状を表す係数bは中性化、含水率が同一であればほぼ等しくなる。係数b値がほぼ同程度の東-西梁部材において、飛来塩分の少ない西側で塩分蓄積量は小さな値で収斂している(表2参照)。即ち、同一中性化・

含水状態において、飛来塩分量の少ない場所程コンクリート中に蓄積する塩分量は小さな値で頭打ちとなることが推察される。

有塩・無塗膜部コンクリートでは、打設3カ月の早期にひび割れが目視にて観察されている。本実験では目視にてひび割れ部は避けるよう心掛けていたが、ひび割れの影響を受けている可能性の高い（採取コアで割れが観察された）、ひび割れの際立っていたスラブ下部、及び部材長が短く必然的にひび割れ近傍よりコアを採取した東西方向に面した梁部材の塩分蓄積量の経時変化を図6に示す。梁部材西側を丸印、スラブ下部を四角印で示す。図中の破線は初期混入塩分で、上述した換算にて梁部材で9.81g、スラブ部材で5.88gである。いずれの塩分蓄積量の経時変化とも10年間までの測定では図4中の式(a)のように塩分蓄積量の増分が経時的に増加する性状を示している。図中には式(a)にて近似した曲線も示す。これより、コンクリート中にひび割れの影響がある場合には、塩分の蓄積増分は増加し、水、酸素の供給性も向上することとあいまって鉄筋腐食をより加速することが推察される。ただし、ひび割れの進展も無限ではなく、ひび割れ影響部のコンクリートでも塩分の蓄積に頭打ちがあるものと考えられる。

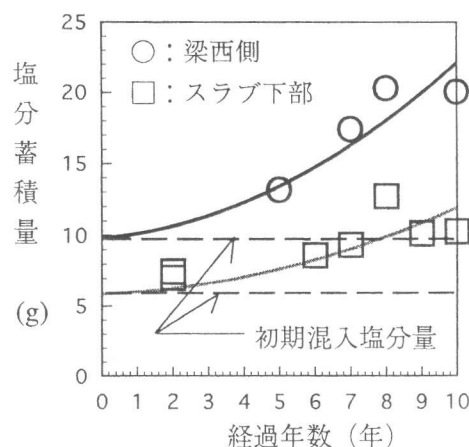


図6. ひび割れ影響部塩分蓄積量経過時間変化

4. まとめ

本研究結果を以下に纏める。

- 1) アクリルゴム系塗膜は、外部より浸透する塩分を長期間遮蔽し続ける。
- 2) コンクリート中に浸透した塩分は、コンクリート表面より内部側で塩分濃度ピークを形成する傾向があった。この塩分濃度ピークの形成メカニズム[7]に関しては解明の余地を残すが、一つの可能性として炭酸化の影響が示唆された。
- 3) ひびわれの生じていないコンクリート中に蓄積される塩分量は、ある一定値に収斂する傾向があり、この性状には飛来塩分量及び中性化等が関連する。また、10年間の測定範囲では、ひびわれ影響部で蓄積される塩分量は、経過時間とともに2次式的に増加した。

謝辞：金沢大学工学部 教授 川村満紀先生からは御助言を頂きました。記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 谷川伸ほか：塩害を受けるRC暴露構造物の劣化評価，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.16,No.1,pp953-958,1994
- 2) 星野富雄ほか：海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物の浸透と暴露環境に関する研究，コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，pp1-6,1994.10
- 3) 小林一輔ほか：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の腐食因子の移動に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.1,No.2,pp62-68,1990
- 4) 樫野紀元：鉄筋コンクリート造構造物の耐久性，鹿島出版会，pp72-76,1988
- 5) 小林一輔ほか：コンクリートの炭酸化と海洋環境下における塩化物の浸透，生産研究，42巻3号，pp75-78,1990.3
- 6) 佐伯竜彦ほか：中性化によるコンクリートの微細組織の変化，土木学会論文集，第420号.Vol.13,pp33-42,1990.8
- 7) 大城武ほか：厳しい環境下での実大RC建物の長期暴露試験について，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.17,No.1,pp961-966,1995