

# 論文 飛来塩分量とコンクリート中への塩分浸透過程に関する一考察

山田義智<sup>\*1</sup>・大城武<sup>\*2</sup>・谷川伸<sup>\*3</sup>・伊部博<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究は、飛来塩分量及び塩分濃度ピークの経時移動を考慮した境界条件を定式化し、非定常拡散方程式をF.E.M.により解くことでコンクリート中への塩分浸透量を解析的に求める手法について論述した。この境界条件を10年間の塩分浸透測定値より定式化する際には修正シンプレス法を用いている。本研究の解析結果は、異なる飛来塩分環境下におけるコンクリートの塩分浸透量の経時変化を良く表し、鉄筋の発錆予測に有効である可能性を示した。

**キーワード：**塩分浸透、飛来塩分量、境界条件、修正シンプレス法、F.E.M.、発錆予測

## 1. はじめに

海岸に隣接して建設されるRC構造物では、海より飛来する塩分による劣化・損傷は重大な問題である。四方を海で囲まれ、夏期における台風、冬期に東シナ海からの季節風を受ける沖縄県では、高温多湿の亜熱帯性気候もあいまって、飛来塩分による塩害はRC構造物に耐久性上の支障を生じさせる懸念がある。また、この問題は沖縄県に止まらず、東北・北陸や北海道あるいはウォーターフロント地域等の海岸沿いに建設されるRC構造物の耐久性問題にも無関係ではないものと考える。

本研究は、沖縄県において海岸に隣接して10年間及び5年間暴露した実大RC構造物の各経過年時におけるコンクリート中の塩分浸透量の測定値と、その暴露地点における1年間の飛来塩分量の測定結果を用い、コンクリート中への塩分浸透の過程を解析的に推定する手法について論述する。

なお、実大暴露RC構造物の設置概要及びコンクリート中への塩分浸透状況や、飛来塩分量の補集方法等については既発表である[1][2][3]。

## 2. コンクリート中への塩分浸透過程の考察

実大暴露RC構造物は沖縄県本部町備瀬と国頭村辺土名の海岸沿いに設置され、各々建設後10年及び5年が経過している。使用したコンクリートの調合は、沖縄県内のRC建築物として一般的なものを用いている。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、使用した粗骨材の最大寸法は20mmで、一般的な絶乾比重及び吸水率は各々2.70, 0.56%である。また、細骨材の一般的な絶乾比重及び吸水率は各々2.57, 1.3%である。表-1に両暴露RC構造物のコンクリート調合を掲げる。

表-2に実大暴露RC構造物の各設置地での各方位（辺土名は北西のみ）の一年間の飛来塩分量を纏めて示す。

表-1. コンクリート調合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE (1)	
			W	C	S	G		
備瀬	18	4	63	183	291	937	900	2.91
辺土名	18	4	62.5	184	295	877	929	2.95

表-2. 方位別年間飛来塩分量

備瀬 (*単位: mg/dm <sup>2</sup> )				辺土名
北	東	南	西	北西
4925.9	2110.2	1103.9	1279.2	22370.9

\*測定期間：備瀬 1993.12～1994.12  
辺土名 1990.07～1991.07

\*1 琉球大学助手 工学部環境建設工学科、工修（正会員）

\*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科、Ph.D.（正会員）

\*3 東亜合成（株） 製品研究所、工修（正会員）

\*4 （株）小野田 リフレッシュ事業部（正会員）

両実大暴露RC構造物のコンクリート中の塩分分布の測定値を、図-1に経過時間毎に示す。塩分量分析は、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定にて可溶性塩分量を分析した。図中の縦軸は可溶性塩分濃度（NaClコンクリート重量比。以後、本論文中の塩分濃度はこの単位を使用）を示し、横軸は北及び北西側コンクリート表面を起点とする塩分測定位置を示す。図中の左半分は柱、梁部材の北及び北西側に面したコンクリートの塩分分布を示し、右半分は同一部材の南及び南東側に面したコンクリートの塩分分布を示す。

塩分濃度は経過年毎に増加し、飛来塩分量の多い方位方向の増加が著しい。塩分濃度のピークは、コンクリート表面ではなく、表面より内部に位置している。この塩分濃度のピーク位置は、経過5年までは表面より1.5cm内部であるが、7年目以降は表面より2.5cm内部に位置し、年月が経つと内部へ移動している。また、この塩分濃度ピークよりコンクリート表面側では塩分濃度が低下し、その塩分分布には規則性が見られない。そこで、本研究では、鉄筋が位置する塩分濃度ピークから内部側コンクリートの塩分濃度シミュレーションのみを対象としている。

### 3. 塩分の浸透解析手法

#### 3-1. 数値計算の概要

コンクリート中の塩分浸透量を推定する為に、乾湿繰り返し実験等でコンクリート表面で塩分濃度の経時変化を求め、それを境界条件として定式化し非定常拡散方程式を解く方法[4]がある。しかし、今回の様に実際の塩分分布の測定値よりコンクリート表面塩分濃度の経時変化を求める場合には問題点があり、これを図-2に示す。図-2中の◆印及び破線は経過x年目の測定値と推定塩分分布とを各々示す。また、○印及び実線はx年目から更に幾年か経過したy年目の測定値と推定塩分分布とを各々示す。ここで、本測定結果の様に経過時間と共に塩分濃度ピークが移動し、かつ、表面側で塩分濃度が低下する場合には、図中A点とB点の関係の様に測定する位置によっては、経過時間が長くても塩分濃度が低下するデータが得られる。従って、各々の経過年毎にA点及びB点から内部側のデータを近似し、各経過年後の表面濃度を求めるとき経過時間の長い場合が $SC_y$ で、短い場合が $SC_x$ となり、経過時間が長いほど表面塩分濃度は低下する結果となる。また、表面側では塩分分布は不規則であり、同じ経過y年目の塩分分布でもA'点の様に急激に塩分濃度が低下する場合がある。仮にこのA'点を除き、C点から内部側データで近似すると、表面濃度は $SC_y$ となり $SC_x$ より高い値となる。この様に塩分濃度ピーク位置が移動し、かつ、表面側での塩分濃度の低下とその低下に不規則性がある場合には表面濃度の経時変化は安定して得られない場合を考えられ、これを境界条件とするには問題がある。

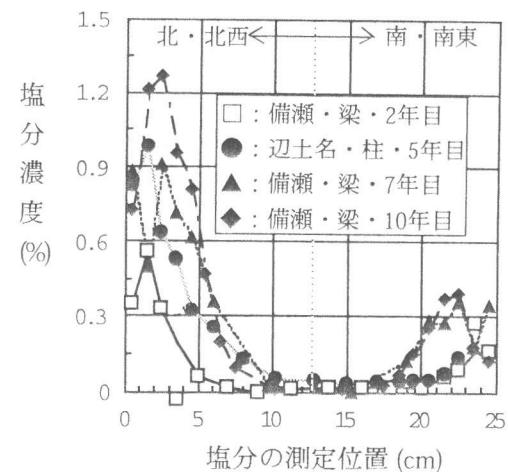


図-1. 塩分濃度分布図

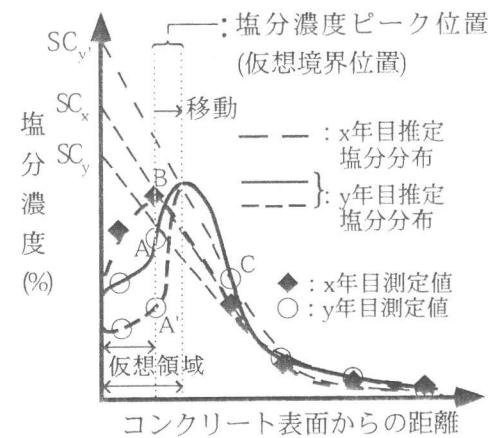


図-2. 表面塩分濃度決定の問題点概略

そこで、本研究では移動する塩分濃度ピーク位置を塩分分布の測定値より推定し、その位置を仮想境界位置とし、コンクリート表面から仮想境界位置までを塩分濃度一定の仮想領域とする。そして、前述したコンクリート表面側の測定値の悪影響を取り除く為、仮想境界位置より内部の測定値を用い仮想領域での塩分濃度の経時変化を定式化し、それを境界条件とする。この方法によれば、鉄筋が位置する塩分濃度ピーク位置以深では精度の良い解が得られるものと考える。

塩分濃度分布を表す非定常拡散方程式を式(1)に示す。これを解くには初期条件と2つの境界条件が必要である。その境界条件のひとつが、今回定式化する仮想領域での塩分濃度 $C_v$ であり、ディリクレ型の境界条件である。他方の境界条件はコンクリート表面から $x=12.5\text{cm}$ の位置（部材断面中央）でノイマン型の境界条件を与えた。初期条件は、コンクリート打設時に塩分は存在しないとして対象領域内で塩分濃度 $c=0$ とした。ここで、 $t$ は経過時間、 $X_v$ は仮想境界位置である。

$$\text{基本式: } \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{初期条件: } c = 0 \quad (t=0)$$

$$\text{境界条件: } c = C_v \quad (x \leq X_v), \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (x = 12.5\text{cm})$$

ここで、境界条件の仮想境界位置 $X_v$ が経過時間と共に移動する為、空間分割の自由度の観点から式(1)の数値解析手法として有限要素法を採用した。式(2)に解析対象全体の有限要素式を示す。

$$[K]\{\phi\} + [C]\left\{\frac{\partial\phi}{\partial t}\right\} = \{F\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\phi\}$ は節点塩分濃度ベクトル、 $[K]$ は拡散項係数行列、 $[C]$ は時間項係数行列、 $\{F\}$ は、今回境界条件による既知項で、一般に流束ベクトルと呼ばれる。

式(2)は空間に関しては離散化されているが、時間に関しては離散化されていない。そこで、時間に関する離散化手法としてθ法（差分陰解法）を用いる。これを式(3)に示す。今回は、安定性の観点からθの値を0.52とした。また、今回の解析では、時間刻みは0.1年、空間刻みは0.25cmである。

$$\left(\theta[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t+\Delta t)\} = \left(-(1-\theta)[K] + \frac{1}{\Delta t}[C]\right)\{\phi(t)\} + \{F\} \quad (3)$$

### 3-2. 仮想境界位置移動の定式化及び、

#### 経過年数と仮想領域塩分濃度との関係

図-3に経過10年目までの実測値による塩分濃度ピーク位置を○印にて示す。ここで、塩分測定用の供試体は1cm幅にスライスし、塩分濃度ピーク位置はそのスライス片の中央位置で代表させている。従って、塩分濃度ピークの移動が階段状で不連続であるが、実際には連続的に移動しているものと考えられる。図-3には筆者の一人が過去に調査した例の内、今回の暴露RC構造物の水セメント比63%に近いと予測される推測31年経過したコンクリートの塩分濃度ピーク位置も併せて示している。

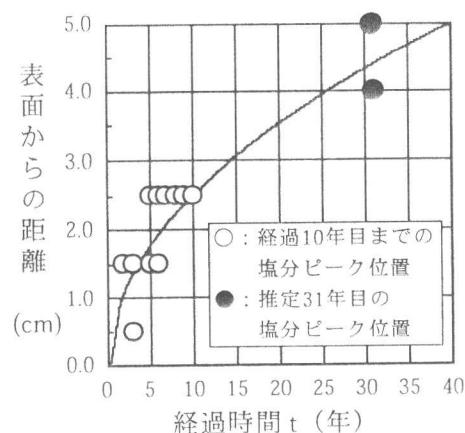


図-3. 塩分濃度ピーク位置の移動

本解析では、この塩分濃度ピーク位置を仮想境界位置として与える必要がある。そこで、図-3の実測値を $\sqrt{t}$ 則にて近似し、これを仮想境界位置と経過時間関係として式(4)にて定式化した。これを実線で図-3に示す。ここで、塩分濃度ピーク位置の経時移動が $\sqrt{t}$ 則で表せることから、その移動現象に炭酸化の影響の可能性がある[5]。

$$x_i = 0.7905\sqrt{t} \quad (4)$$

経過時間と仮想領域塩分濃度の関係を定式化するためには、各経過時間毎のコンクリート中の塩分分布の測定値を式(1)の非定常拡散方程式にて近似し、仮想領域塩分濃度の経時変化を知る必要がある。

測定値を式(1)の拡散方程式にて近似する際に、仮想領域塩分濃度 $C_v$ 及び、拡散係数Dは未知数である。これら未知数は、塩分分布の解析仮定値 $f(x_i, C_v, D, t)$ が実測値 $g(x_i, t)$ との間に式(5)で示す応答関数Rを最小とする様に修正シンプレス法にて求めた。ここで、 $x_i$ はコンクリート中の位置を示し、 $t$ は経過時間を示す。

$$R = \sum_i^n [g(x_i, t) - f(x_i, C_v, D, t)]^2 \quad (5)$$

シンプレス法は最適化問題の連続探査法である。n個の未知要素を含む場合、図-4に示す応答曲面上のシンプレスと呼ばれるn+1多角形（今回は三角形）を用い、その多角形の各頂点で応答を計算する。そして最も応答の悪い頂点を除き、新たな頂点を設定し新しいn+1多角形を考える。これを繰り返し、応答曲面上でn+1多角形を移動させ、最適応答点を探査する手法である。修正シンプレス法は、応答曲面上でn+1多角形を移動させ最適応答点を探査する際に、収束性が良くなるよう工夫したものである。

図-5に備瀬の四方位での、経過時間と仮想領域塩分濃度の関係を示す。

図中の縦軸は仮想領域塩分濃度 $C_v$ を示し、横軸は経過時間tを示している。コンクリート中の塩分濃度にはある飽和値があると考えられる。ここでは、この飽和値を筆者の一人が行った実測調査例の最大値より1.8%と仮定した。この飽和値に収束するよう式(6)で備瀬における四方向の、経過時間と仮想領域塩分濃度の関係を近似したところよい結果を得た。ここで式中の係数Sを濃度係数と称し、各方位での値を図中に纏めて示す。

$$C_v = 1.80 \times \{1.0 - \exp(-S \times t)\} \quad (6)$$

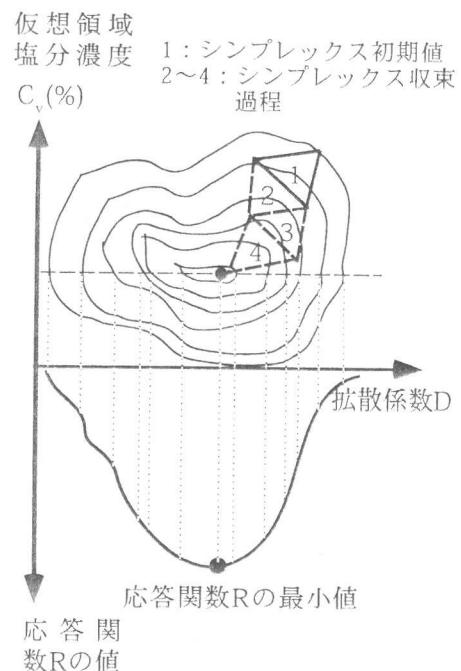


図-4. シンプレックス法概念図

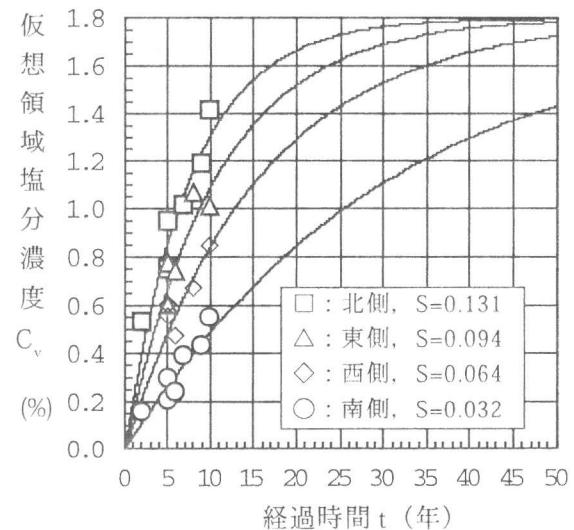


図-5. 経過時間と仮想領域塩分濃度の関係

### 3-3. 飛来塩分量と仮想領域塩分濃度との関係及び拡散係数

前節の境界条件は、仮想領域塩分濃度と経過時間との関係を得る為に一定値として近似したが、実際には式(6)で示される様に経過時間によって変化しなければならない。そこで、式(1)の拡散方程式の境界条件、即ち仮想領域での塩分濃度の経時変化を式(6)とし、上記と同様に修正シンプソン法にて再び実測値の近似を行い、式(6)中の濃度係数S及び拡散係数Dを求め直した。得られた濃度係数Sを対応する各飛来塩分量毎に整理し図-6に示す。

図-6の縦軸は求め直した式(6)の濃度係数Sであり、横軸はコンクリート表面の法線方向方位の一年間の飛来塩分量である。図-6より濃度係数Sは、年間飛来塩分量が約5000mg/dm<sup>2</sup>/yearを越えてからあまり増加する様子が見られず、ある一定値に収束する傾向がある。そこで、その収束性を表す様に指數関数を用い、濃度係数Sと年間飛来塩分量A<sub>b</sub>の関係を式(7)にて近似する。式(7)の関係を図-6に実線にて示す。多少のばらつきが見られるが比較的良い近似である。

$$S = 0.17 \times \{1.0 - \exp(-3.631 \times 10^{-4} \times A_b)\} \quad (7)$$

図-7に拡散係数と経過時間の関係を示す。拡散係数は0.1cm<sup>2</sup>/year～5.1cm<sup>2</sup>/yearの範囲でかなりばらついているが、時間が経つに連れて次第に減少する傾向がうかがえる。この現象については今後の検討課題である。本来なら式(1)の中で拡散係数の経過年低下も考慮にいれて再び実測値を近似しなければならないが、拡散係数が大きくばらつくので、今回は拡散係数は一定値として扱った。

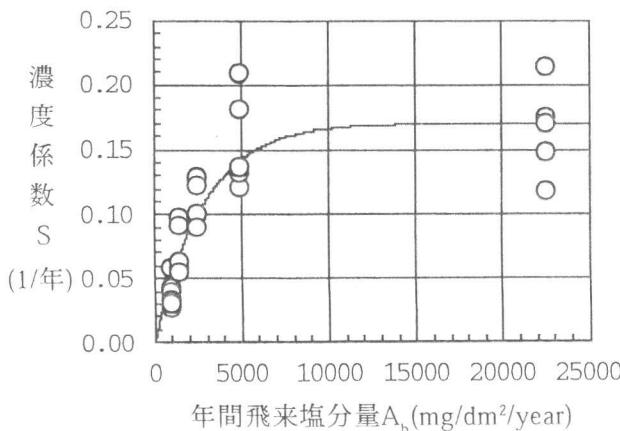


図-6. 濃度係数Sと年間飛来塩分量A<sub>b</sub>の関係

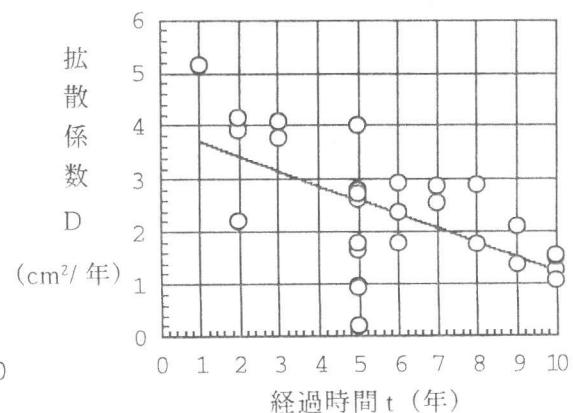


図-7. 拡散係数と経過時間の関係

#### 4. 数値解析例

大気中塩害環境下におけるコンクリート中の経年後の塩分浸透状況を算定するには、コンクリート構造物の設置地点における飛来塩分量から、式(7)を用い濃度係数Sを決定後、式(6)と式(4)を考慮した境界条件により式(1)の非定常拡散方程式を式(3)の有限要素法にて解けば良い。計算例として、飛来塩分量の異なる環境下における各経過年後の塩分浸透過程を図-8と図-9にそれぞれ示す。

図-8、図-9は、それぞれ備瀬の北側と南側に面した梁部材の2年目、5年目、10年目の各経過年毎の塩分濃度ピーク位置以深の塩分分布を上述の手順で計算し、実測値と比較したものである。点線及び丸印は経過2年目、破線及び三角印は経過5年目、実線及び四角印は経過10年目の解析値と実測値を各々示している。解析に用いた拡散係数は、解析対象となる部材の実測値を3-3節において修正シンプソン法により近似した際に得られた拡散係数値を用いており、図中に各々の値を示す。

この両図から分かるように、解析による塩分濃度ピーク位置移動は実測値のそれを良く表し、鉄筋が位置する塩分濃度ピーク以深の塩分分布の解析値も実測値と良く一致している。

塩分により鉄筋の発錆面積が顕著な上昇を見せる際の閾値は、C1量で $1.2\text{kg}/\text{m}^3 \sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ であるとされており[6]、図-9中にその範囲を可溶性塩分濃度(NaCl量)に換算し点線にて示す。備瀬暴露RC構造物において、かぶり厚さ4cmで南側に面した柱の主筋は4.5年目で腐食率約8%[7]となり、発錆が明確となっている。図-9より、かぶり厚さ4cmに位置する鉄筋は、経過4.5年目で発錆閾値範囲内にあることが予想される。一例ではあるが、上記の備瀬南側柱の主筋発錆の事実と一致している。

鉄筋の発錆が鉄筋周りの塩分濃度のみに影響を受けるものと仮定すると、図-9より、この備瀬の南側に面する飛来塩分環境下では、かぶり厚さ3cmならば経過約2年目、かぶり厚さ7cmならば経過約10年目で各々鉄筋の発錆が明確になるものと推定される。

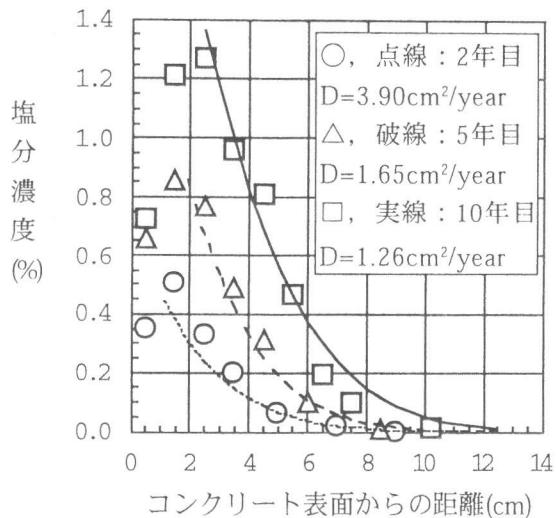


図-8. 実測値と解析値の比較（備瀬北側）

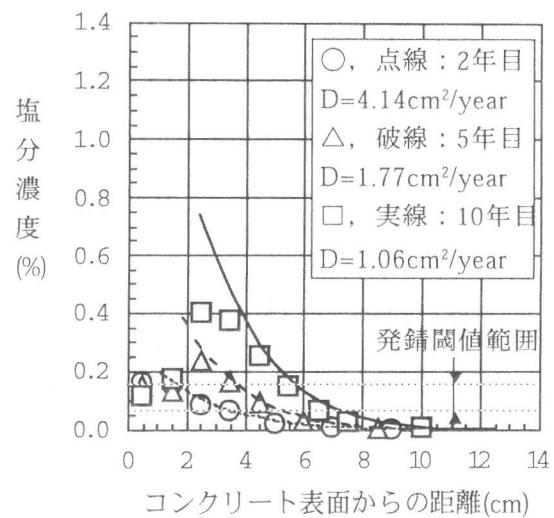


図-9. 実測値と解析値の比較（備瀬南側）

## 5. まとめ

本研究では、大気中の塩害環境下における飛来塩分量と境界位置が経時移動する仮想領域での塩分濃度との関係を境界条件として定式化した。この境界条件にて非定常拡散方程式を解くことで、各飛来塩分環境下における任意かぶり厚さ位置の塩分濃度を推定でき、鉄筋の発錆予測に有効である可能性を示した。今後、水セメント比や温・湿度等の環境条件の影響、仕上げ材の効果等を考慮に入れ、より一般性の高い解析手法とし、その有効性を確認するのが課題である。

## 【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論文報告集, 16-1, pp.953-958, 1994
- 2) 大城武, ほか : 塩害環境下におけるRC構造物の劣化過程について, コンクリート工学年次論文報告集, 16-1, pp.947-952, 1994
- 3) 佐藤旅人, ほか : 沖縄県における飛来塩分特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.145-146, 1994
- 4) 大城武, ほか : 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
- 5) 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塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, 第1巻第2号, pp.69-82, 1990.7
- 6) 岸谷孝一, 西澤紀昭, ほか編 : コンクリートの耐久性シリーズ塩害(I), 技報堂出版
- 7) 大城武, ほか : 塩害による鋼材腐食に関する暴露実験, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.569-574, 1989