

論文 ニューラルネットワークによる塩分浸透解析の要因設定

安里丞治*1・山田 義智*2・大城 武*3・SORN VIRI*4

要旨：本研究は、蓄積塩化物イオン量に着目し、塩分浸透解析の境界条件式を構成する諸要因の値をニューラルネットワークで設定する方法を提案する。ここで、境界条件式とは、コンクリートの表面濃度および表面でのフラックス量を表わす式である。また、本研究では、上述の境界条件式(表面濃度)と誤差関数による解析解を用いて仕上げおよび被覆補修の効果も考慮できる塩分浸透解析法を提案し、その解析法の有用性を検討する。

キーワード：蓄積塩化物イオン量, 境界条件式, ニューラルネットワーク, 塩分浸透解析

1. はじめに

コンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、誤差関数を用いた解析解(式(5))で近似的に表す事ができ、この解析解を用いて種々の環境下のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を合理的に求めようとする研究が行われている¹⁾²⁾。

本研究でも、この解析解を用いて様々な環境下におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を求める手法を提案するが、コンクリート中に経時的に蓄えられる蓄積塩化物イオン量に着目している点が従来の研究とは異なる。この蓄積塩化物イオン量を求める事により、塩化物イオン濃度分布を解析解で表す為に必要な表面濃度が決定できる。また、蓄積塩化物イオン量の時間微分値は、外部環境からコンクリート中に浸透するフラックス量(以後、浸透塩化物イオン量と称す)であり、これは数値解析で塩分浸透予測を行う際の境界条件となる³⁾。

本研究では、最初にニューラルネットワークを用いて様々な環境下におけるコンクリート中の蓄積塩化物イオン量を学習させる。次に、この学習結果を用いて、境界条件式を構成する諸要因の値を求め、これらの値を再びニューラルネットワークで学習させる。このニューラル

ネットワークを用いることにより、解析解や数値解析の境界条件式を各々設定できる。ここで、境界条件式とは、解析解を用いる場合は表面濃度を求める式を指し、数値解析を用いる場合は浸透塩化物イオン量を求める式を指す。

さらに、本研究では、上述の解析解と境界条件式を用いて、仕上げ等の影響も考慮できる塩分浸透解析法を提案し、その有用性を検討する。

2. ニューラルネットワークの構築

本研究では、様々な環境下に設置されたコンクリート中の塩化物イオン量に関するデータを既往の文献および筆者らの行った暴露試験より収集した。収集したデータの条件は、文献4)に詳細に記述されている。

得られたデータを学習データと検討データに分け、学習データはニューラルネットワークの学習に用い、検討データは学習には用いず、提案する塩分浸透解析法の検討に用いた。

本ニューラルネットワークシステムは、蓄積塩化物イオン量を学習するNN-1システムと、浸透塩化物イオン量を決定する諸要因の値を学習するNN-2システムである(図-1参照)。

以下に各々のシステムの構築方法を示す。

-
- | | | |
|------------|----------------------|-------|
| *1 琉球大学大学院 | 理工学研究科環境建設工学専攻 | (正会員) |
| *2 琉球大学助手 | 工学部環境建設工学科 博士(工学) | (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) |
| *4 琉球大学大学院 | 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修 | (正会員) |

2.1 NN-1 システムの構築方法

本研究では、学習データのみならず検討データの誤差も同時に監視しており、検討データの誤差が増加する場合は、その時点で学習を打ち切る事で過学習問題と外挿問題に対処した。また、得られた学習結果が、蓄積塩化物イオン量の経時変化特性を満たす様に学習が行われている事の確認も行った。ここで、蓄積塩化物イオン量の経時変化特性は、文献5)、6)で解析的および実験的に示しており、ある収束値をもつ緩やかなS字型増分あるいは指数増分傾向を示す。

蓄積塩化物イオン量の経時変化特性を満足し、かつ、学習誤差が最小となるように中間層を検討したところ、1層2ユニットが適切であった。

入力層は、図-1に示すように設置環境条件、水セメント比(%), 経過時間の3項目とした。なお、設置環境条件には、飛沫帯, 海中, 大気中, 水掛かりの細分項目を設定している。この細分項目の入力値として、大気中以外には、該当する場合に"1"を入力し、該当しない場合は"0"を入力した。大気中においては、当地における飛来塩分量 $q(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year})$ を入力した。また、水掛かりは、表面における洗い流しに影響を与えるものとして採用した。中性化深さや温度も入力値として考えられるが、これらのデータは不足しているため、今回は採用しなかった。なお、水掛かりのない環境は、陸上大気中で、かつ、屋根スラブ等で覆われ、直接水が掛からないと判断される場所を対象とした。経過時間は、暴露年数を代入値とした。

出力値は、実測の塩化物イオン量分布を積分して得られる蓄積塩化物イオン量 Q とし、その値は全塩分量で示している。

本研究では、ニューラルネットワークの学習に拡張Kalmanフィルタ法⁷⁾を適用し、学習に要した回数は578回であった。表-1に学習データ数および検討データ数(括弧内)の内訳を示す。

2.2 NN-2 システムの構築方法

学習後のNN-1を用いて蓄積塩化物イオン量の経時変化を求め、図-2に示す。図より、NN-

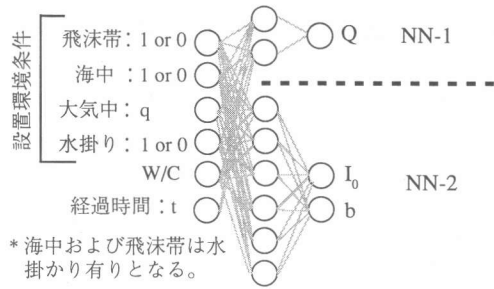


図-1 NN-1およびNN-2の構成

表-1 学習・検討データの個数

経年	W/C	飛沫帯	海中	大気中
(0 ≤ year < 5)	W/C < 40	0 (0)	0 (0)	3 (0)
		0 (0)	0 (0)	15 (0)
	40 ≤ W/C < 50	1 (0)	0 (0)	0 (0)
		6 (0)	0 (0)	0 (0)
	50 ≤ W/C < 60	5 (1)	3 (1)	3 (0)
26 (7)		15 (4)	15 (0)	
W/C ≥ 60	3 (4)	0 (0)	6 (1)	
	16 (18)	0 (0)	42 (7)	
(5 ≤ year < 10)	W/C < 40	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		0 (0)	0 (0)	0 (0)
	40 ≤ W/C < 50	1 (1)	0 (0)	0 (1)
		4 (5)	0 (0)	0 (6)
	50 ≤ W/C < 60	1 (2)	1 (2)	1 (0)
5 (12)		5 (12)	7 (0)	
W/C ≥ 60	0 (1)	0 (0)	14 (2)	
	0 (6)	0 (0)	107 (14)	
(10 ≤ year < 15)	W/C < 40	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		0 (0)	0 (0)	0 (0)
	40 ≤ W/C < 50	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		0 (0)	0 (0)	0 (0)
	50 ≤ W/C < 60	0 (0)	1 (0)	0 (0)
0 (0)		5 (0)	0 (0)	
W/C ≥ 60	0 (0)	0 (0)	7 (3)	
	0 (0)	0 (0)	60 (25)	
(15 ≤ year ≤ 20)	W/C < 40	0 (0)	0 (0)	0 (0)
		0 (0)	0 (0)	0 (0)
	40 ≤ W/C < 50	0 (0)	0 (0)	1 (1)
		0 (0)	0 (0)	4 (4)
	50 ≤ W/C < 60	1 (1)	0 (0)	0 (0)
3 (4)		0 (0)	0 (0)	
W/C ≥ 60	0 (0)	0 (0)	0 (0)	
	0 (0)	0 (0)	0 (0)	

*上段は蓄積塩化物イオン量データ数で、下段(ハッチ部)は、各かぶり位置の塩化物イオン濃度データ数を示す。

1で得られた蓄積塩化物イオン量の経時変化は、収束値をもつ緩やかなS字型増分あるいは指数増分を満足していることが分かる。

得られた蓄積塩化物イオン量 $Q(\text{g}/\text{cm}^2)$ の経時変化は、次の指数関数⁶⁾で近似できる。

$$Q = \frac{I_0}{b}(1 - e^{-bt}) \quad (1)$$

ここで、 I_0 は初期浸透塩化物イオン量($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$)を、 b は低減係数($1/\text{year}$)を表わす。

図-2(a),(b)より、海中に比べ飛沫帯での蓄積塩化物イオン量が多いことが分かる。また、図-2(c)の大気中の飛来塩分量は、海岸近くに暴露

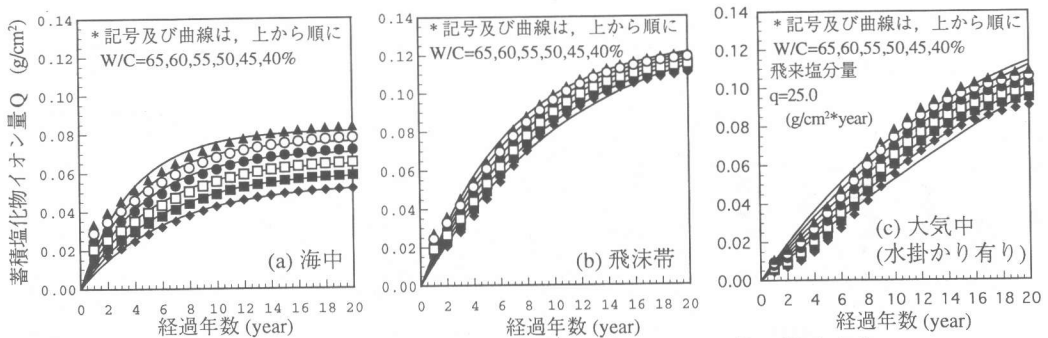


図-2 各環境下における蓄積塩化物イオン量の経時変化

表-2 NN-2の学習範囲

設置環境条件	海中, 飛沫帯, 大気中 (水掛かり有り), 大気中 (水掛かり無し)
水セメント比(%)	40,45,50,55,60,65
大気中の飛来塩分量 (mg/cm²*sec)	5,10,25,50,75,100

した構造物の海側の飛来塩分量とほぼ等しい量である。そのため、蓄積塩化物イオン量は、飛沫帯に近い値になっている。なお、何れの環境下においても水セメント比の高い場合、蓄積塩化物イオン量が多くなっている。

式(1)の時間微分値は、浸透塩化物イオン量 I ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{year}$)を表し、次式で表される。

$$I = I_0 e^{-bt} \quad (2)$$

境界条件式を構成する要因は上式の I_0 と b である。この要因の設定方法としては、まず、表-2に示す条件毎に NN-1 より蓄積塩化物イオン量の経時変化を求める。次に、その変化量を式(1)で近似することで、 I_0 と b を求め、これらの値を NN-2 で学習させた。なお、NN-2 の入力値は、NN-1 から経過時間を除いた5項目である。中間層は1層6ユニットとし、学習誤差が1%以下になるまで学習させた。また、表-2に示す以外の数例の条件で I_0 と b を推定した結果は、NN-1 と式(1)より同定される値と5%以下の誤差であり、外挿問題の恐れは無いものと考えられる。

筆者らは、Langmuir吸着理論の考え方や洗い流し作用を考慮して、大気中における飛来塩分量 q ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) と浸透塩化物イオン量 I の関係を次式にて定式化することを提案した³⁾。

$$I = \frac{mkV_0q}{(V_0+kq)} - \alpha m C_0 \quad (3)$$

ここで、 k は比例定数、 V_0 は離脱量 ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$) である。また、 α は流失量 (cm/sec)、 C_0 は表面濃度 (mg/cm^3) である。さらに、 m は飽和面積率で、その値は水セメント比 (W/C (%)) より次式で表される。

$$m = \frac{0.526W/C - 7.61}{57.4} \quad (4)$$

ここで、式(3)の右辺第一項は、式(2)の I_0 と等価である。また、式(3)の右辺第二項の洗い流し作用による流失効果は、式(2)の指数関数 e^{-bt} により近似的に表されている。

図-3では、NN-2で得られた I_0 値とそれと等価である式(3)の右辺第一項の値を q 値毎に比較している。ここで、式(3)中の係数には文献3)で得られた値を用いている。水セメント比が高く、飛来塩分量が大きい場合には NN-2 の結果が式(3)右辺第一項の値に比べ若干小さくなるが、ほぼ一致している。また、図中には、NN-2 で得られた各水セメント比毎の飛沫帯における I_0 の値を点線で示す。飛沫帯では大気中と同様に乾湿があり、また、多量の塩化物イオンが供給される環境にある。従って、図中の点線のように飛沫帯の I_0 値は、大気中の収束値に近い値となる。

低減係数 b の値を各環境毎に図-4に示す。式(2),(3)より、 b 値が大きいと洗い流し作用も大きい事ことが分かる。 b 値は、海中、飛沫、大気中の順に大きく、水に濡れる機会が多い場合に洗い流し作用が大きい事を表している。なお、大気中の水掛かり有り と無し とではあまり差は見られない。また、大気中において、同じ水セメント比でも飛来塩分量の多い環境においては、

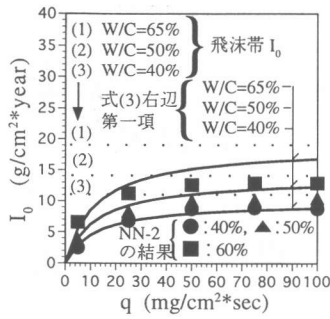


図-3 I_0 と q の関係

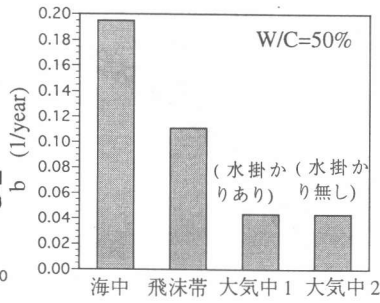


図-4 各環境下の b 値の傾向

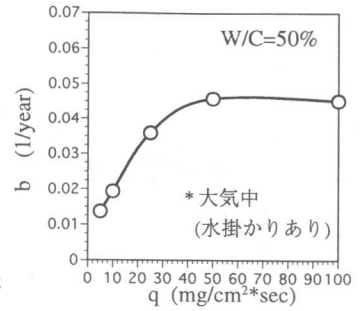


図-5 b と q の関係

表面濃度が大きくなるため、式(3)の右辺第二項より洗い流し作用は大きく、従って b 値も大きくなると考えられる。NN-2で得られた b 値は、図-5に示すようにこの性状を表している。また、飛来塩分量 q が $50(\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ をこえると b 値がほぼ一定値となる。この理由は、図-3に示すように、 q が 50 を越えると I_0 はほとんど変化せず、表面濃度が同じになるため流失量が一定となり、 b 値も変化しないためである。

以上の定量的および定性的検討から、NN-2で得られる I_0 と b 値は合理的な値である。

3. 塩化物イオン濃度分布の推定方法

本研究では、ある条件下のコンクリート中の塩化物イオン濃度 C の分布を表すものとして、文献1),2)と同様に、次式の解析解を仮定した。

$$C = C_0 \left(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (5)$$

ここで、 C_0 は表面濃度 (mg/cm^3)、 x は表面からの距離 (cm)、 D は見掛けの拡散係数 (cm^2/year)、 $\text{erf}(\cdot)$ は誤差関数、 t は時間 (year) である。

本研究では、式(5)の積分値が蓄積塩化物イオン量 Q であることより、次式で表面濃度 C_0 を決定する。ここで、この表面濃度 C_0 は必ずしも一定値ではなく、文献1),2)の表面濃度と同じように、設置環境条件や経過年数等により変化する。

$$C_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} Q = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \frac{I_0}{b} (1 - e^{-bt}) \quad (6)$$

見掛けの拡散係数は、環境条件や水セメント比を考慮できる様に、文献8)の方法を用いた(式

(7)参照)。ここで、温度 25°C を仮定し、 β 値は海中 1.0 、飛沫帯 1.7 、大気中 0.73 の値を用いた。

$$\left. \begin{aligned} D_o &= 0.02795e^{0.0813 \cdot W/C} \\ D &= \beta D_o \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

本解析手法の手順は、まず、NN-2にて I_0 と b を決定し、次に式(7)、式(6)を用いて拡散係数および表面濃度を求めて、式(5)よりコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を推定する。

学習データを用いて、上述の方法で得た塩化物イオン濃度 ($\text{wt}\%$) の解析値と実測値の比較を行い、図-6に各環境毎に示す。図中の□記号は海中、○記号は飛沫、△記号は大気中(水掛かり有り)、◇記号は大気中(水掛かりなし)である。全体的に良い一致を示しているが、中性化の影響と思われる塩化物イオンの内部移動がある場合や、表層近くで塩化物イオン濃度の高い場合は、実測値に比べ解析値は低い値となっている。

上述の手法では見掛けの拡散係数を一定値としたが、佐伯らは、経時変化特性を考慮した等価拡散係数を提唱している¹⁾。また、竹田らは見掛けの拡散係数は、経時的に低下するとしている²⁾。そこで、本研究でも見掛けの拡散係数が次式のように指数的に経時低下するものとして、式(5)の解が学習データを近似するように修正シンプレックス法³⁾を用いて係数 γ を求めた。

$$D_r = D e^{-\gamma t} \quad (8)$$

得られた結果を図-7に示す。ここで、 γ 値は $0 \sim 3.1$ の範囲でばらつく結果となった。特に経過3年未満ではばらつきが大きい。また、環境

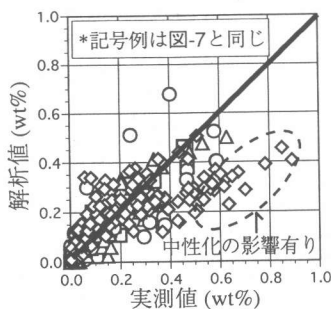


図-6 解析値と学習データの比較

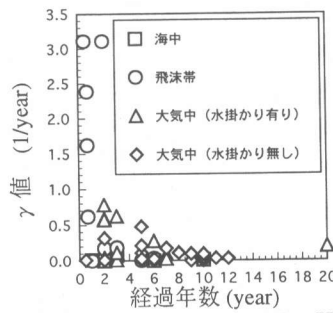


図-7 γ と経過時間の関係

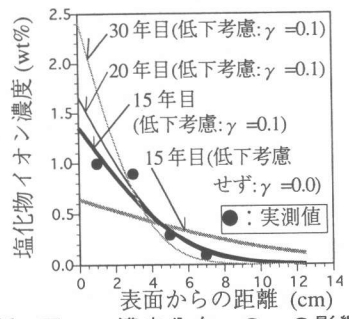


図-8 濃度分布への γ の影響

条件の違いによる差は認められなかった。そこで、今回は経過3年以降の全環境の γ 値の平均値(0.1)を式(8)に用いる γ 値として採用した。なお、式(8)から得られるDrは、予測の対象とする経過時間tにのみ適用される定数である。

図-8に見掛けの拡散係数の低減効果を考慮する場合としない場合の塩化物イオン濃度分布を比較する。図中には、未学習の検討データで経過15年目の飛沫帯環境下の実測値も併せて示す。図より、見掛けの拡散係数を低下させると、同じ蓄積塩化物イオン量であっても内部側には塩化物イオンが多くは浸透せず、表面付近で塩化物イオン濃度が高くなるのが分かる。なお、実測値との比較では、見掛けの拡散係数の経時低下を考慮した方が良く一致した。一方、図中に示すように、式(8)による拡散係数の低減を20年以上継続すると、内部側の塩化物イオン濃度を過小に評価することが分かる。従って、この手法による拡散係数の低減量には限界があると考えられるが、今回は低減量の限界を同定するには至らなかった。また、本研究では蓄積塩化物イオン量の学習を経過20年以内のデータでしか行っていない。従って、この学習結果から得られる表面塩化物イオン濃度も、経過20年以上となる場合は実際と異なることも考えられる。以上の理由から、本手法による塩化物イオン濃度分布の推定値が定量的に信頼できる範囲は、経過20年以内であると考えられる。

図-9には、未学習の検討データ(全て経過20年以下)を用いて、本手法による解析値と実測値の比較を行った結果を示す。ここで、記号□

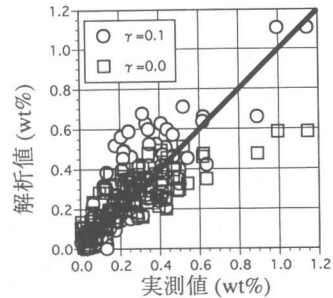


図-9 解析値と検討データの比較

は見掛けの拡散係数の低下を考慮しない場合、記号○は低下を考慮する場合である。解析値は実測値とよく一致しており、本手法が経過20年以内では有効であることが分かる。なお、見掛けの拡散係数の低下を考慮した場合は、考慮しない場合に比べて、塩化物イオンが高濃度の範囲(0.6~1.2wt%)で精度が良くなった。

4. 仕上げ・被覆補修を考慮した塩分浸透解析

建築構造物においては、コンクリート表面に仕上げが施されることが多い。提案する手法では、この仕上げ材による飛来塩分の遮蔽率が求まれば、遮蔽率に応じて飛来塩分量を減じることで、塩分浸透解析が行える。また、予防的な補修工法として、経年後に表面被覆を施す場合でも、本解析手法では被覆を施すまでに貯えられた蓄積塩化物イオン量が被覆後も変化しない(遮蔽効果100%の場合)ことを用いて、被覆後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を求める事ができる。

上述の仕上げ効果や予防的な被覆後の解析事例を図-10に示す。図中に解析条件も纏めて示

す。なお、仕上げ・被覆補修が施された場合、表層における水分移動にともなう塩化物イオンの移動が減少すると考えられ、見掛けの拡散係数は式(8)の値より小さくなると思われるが、ここでは安全側として式(8)で与えた。

池永は、種々の塗膜系仕上げ材の塩水浸せき試験を行い、仕上げ材の遮蔽率は38.4～99.2%で、多数が90%以上との報告をしている⁹⁾。本研究では、この結果に仕上げの劣化も想定して、遮蔽率は75%と仮定した。

図-10より、当初から仕上げを施した場合は、施さない場合に比べて浸透量が少ないことが分かる。例えば、限界塩分濃度を0.05(wt%)とすると、その濃度に達するかぶり厚さは、仕上げなしの場合に比べて10mm以上小さくなった。また、塩害の予防的補修として経過10年後に被覆を施した場合、表層部分の塩化物イオンが拡散により内部に移動する事が分かる。この例では、被覆後10年目に鉄筋位置(かぶり7cm)で限界塩分濃度をこえる結果となった。

上述のように、簡便な誤差関数の解析解を用いて仕上げ・被覆の効果を考慮できる本解析手法は、耐久設計や補修計画等に適用し易く、有用であると考ええる。

5. まとめ

本研究では、ニューラルネットワークにより設定した境界条件式を解析解に適用し、様々な環境下におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度を予測する解析手法を提案した。その結果、本手法は、実測値を良く表すことが確認された。

また、本手法は、仕上げや被覆補修が施された場合にも応用可能であり、ここでは一例について試算を行い、その適用性を示した。なお、本論文では、ニューラルネットワークにより設定した境界条件式の構成要因(I_0, b)を用いて表面濃度を求める事を中心に述べたが、構成要因(I_0, b)は、数値解析に用いる境界条件(浸透塩化物イオン量 $I = I_0 e^{-bt}$ (フラックス量))も設定できる。

今後の課題として、経過20年を越えるデータ

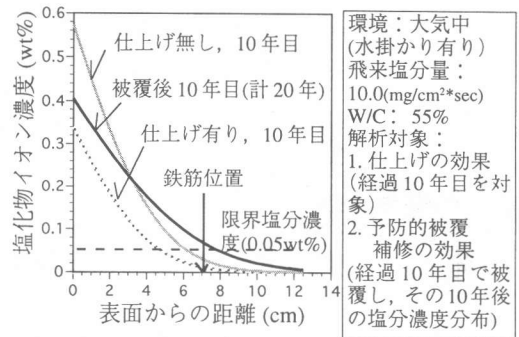


図-10 仕上げおよび予防的被覆の効果

の学習や、コンクリート中に蓄えられる塩化物イオン量の飽和量に関する研究が必要である。

参考文献

- 1) 嶋毅, 佐伯竜彦: 等価拡散係数の経時変化のメカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, pp.121-126, 2000.
- 2) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp91-104, 1998.8.
- 3) 山田義智, 大城武, 榊田佳寛: 塩害環境下におけるコンクリートへの塩化物イオンの浸透に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第501号, pp13-18, 1997.11.
- 4) 新垣貴裕, 山田義智, 大城武, 榊田佳寛: ニューラルネットワークによるコンクリート中への塩分浸透の予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp257-262, 1998.
- 5) 山田義智, 大城武, 榊田佳寛: コンクリート中への塩化物イオン浸透性状に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp961-962, 1999.9.
- 6) 谷川伸, 山田義智, 大城武, 川村満紀: 厳しい塩害環境下での鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第487号, pp11-19, 1996.9.
- 7) 金城寛, 中園邦彦, 玉城史朗, 山本哲彦: 拡張Kalmanフィルタ法によるリカレントニューラルネットワークを用いた時系列パターン学習, システム制御情報学会論文誌, Vol.10, No.8, pp401-411, 1997.
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.411-412, 1986.
- 9) 池永博威: 塗膜系仕上材の耐候性劣化と遮塩性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第432号, pp.11-18, 1992.2.