

[1065] 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

正会員 ○大 城 武 (琉球大学工学部)
 堀 園 義昭 (琉球大学大学院)
 正会員 谷 川 伸 (東亜合成化学工業研究所)
 永井 健太郎 (東亜合成化学工業研究所)

1. まえがき

近年、鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化が社会的に大きくクローズアップされ、その耐久性が再考されている。本研究は、塩害の主要因である塩素イオンのコンクリート中への浸透過程を解明することを目的とし、実構造物の暴露試験、塩水噴霧による乾湿繰り返し促進試験及び拡散方程式の差分法による数値解析等を行い、試験と解析結果との相関性について論述している。

2. 研究項目及び試験概要

(1)実構造物の暴露試験は昨年発表した研究[1]の継続であり、暴露期間2.5年での塩分量分布及び自然電位の経時変化を測定している。

(2)塩水噴霧促進試験は、50℃、NaCl 3%水溶液噴霧(48時間)と60℃強制乾燥(24時間)の試験条件の下で行い、塩分量分布、鉄筋の腐食面積、及び自然電位の変化等を求めている。

(3)コンクリートスライス片については、50℃、NaCl 3%水溶液で浸漬試験を行い、経時的な濃度増加曲線を求めている。また、

円柱供試体の20日間の浸漬試験から拡散係数を求めている。さらに、乾燥時の表面塩分濃度の上昇過程を解明するために、円柱供試体を浸漬後、24時間60℃で乾燥して表面塩分濃度の上昇率を求めている。

(4)フィックの拡散方程式を差分方程式に置換し、経時的に変化する初期条件のもとで数値解を求めている。

本試験に用いたコンクリートの調合を表-1に示す。塩分量測定はJCI基準(案)[2]に準じて行っている。

3. 実構造物の暴露試験結果及びその考察

実構造物[1]の北及び南側の屋根スラブ下のはりから採取したコアの試験結果を図-1に示している。初期混入塩分0%

表-1 コンクリート調合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					減水剤
				水	セメント	砂	砕砂	粗骨材	
20	8-10	1.5	50	180	360	455	195	1097	720
20	15-18	1.5	60	190	317	459	197	1097	634
20	15-18	1.5	70	190	271	486	208	1097	542

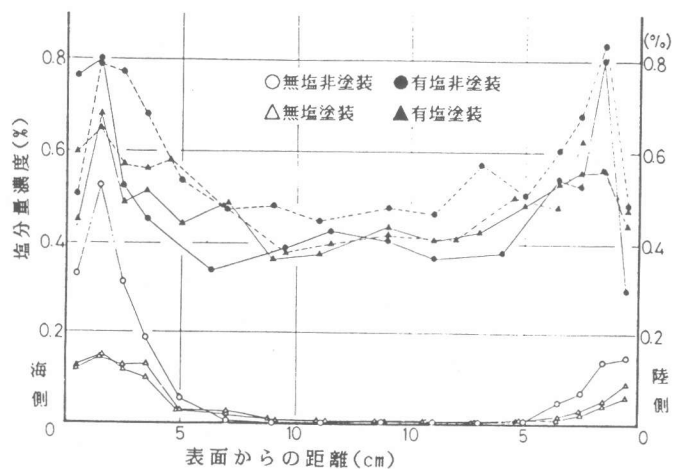


図-1 塩分量濃度分布図

のコア（無塩と略称）では、中央部で0%の塩分量を示し、0.5%のコア（有塩と略称）は0.35~0.45%の可溶性塩分量を示している。

両側表面において、外部からの潮風及び海水飛沫により多量の塩分が浸透していることが分かる。また、表面では雨水による洗い流しにより、測定時に塩分量の低下も表れている。表面付近での塩分集中は、有塩及び無塩のいずれの場合にも表れている。

図中で塗装と示されているのは、アクリルゴム系塗膜を施した位置から採取したコアであり、浸透塩分量は非塗装に比して少ない。ここに表れている塩分量は、この塗膜を施すまでの3カ月間に浸透したものであり、塗膜による塩分浸透阻止の効果を認めることが出来る。

暴露構造物の柱の自然電位の経年変化を図-2に示している。柱の位置により差異は表れているが、いずれの柱についても経年的に卑に移行している。暴露初期に-150~-200mVに分布していた自然電位は、-250~-290mVの範囲に分布し、鉄筋の腐食環境が悪化していることを示している。

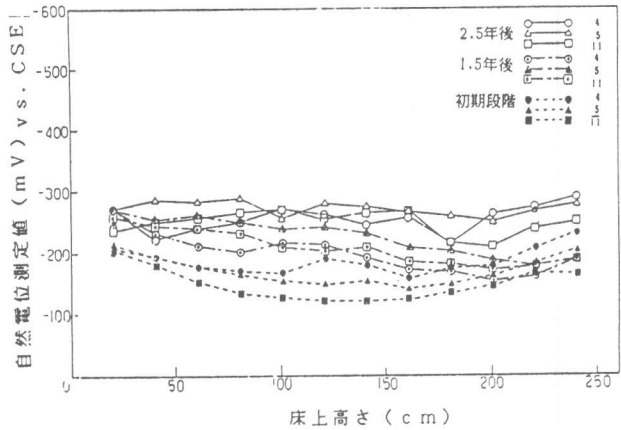


図-2 自然電位測定結果

4. 差分方程式による数値解析法

4.1 フィックの拡散方程式

一般にコンクリート中への塩分浸透現象は、構造物が気相不均一系で、しかも、ホモジェニティが部分的に異なっているために、厳密にはフィックの拡散理論では説明出来ない。しかし、解析的にはこの理論を用いて有益な情報を与えている。本研究では解析的手法としてフィックの拡散方程式を用いているが、この方程式を種々の初期条件で解くことは困難である。本解析では、この方程式を差分方程式に置換して、経時的に変化する初期条件のもとで数値解析を行っている。

本解析に用いた差分法は前進差分法であり、表面からの距離 x 軸を m 個に区間 h で分割し、時間 t 軸を n 個に区間 k で分割する。フィックの拡散方程式は下記の差分方程式で書き表すことが出来る。

$$C_{m,n+1} = r C_{m-1,n} + (1-2r)C_{m,n} + r C_{m+1,n} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

$$r = \frac{K \cdot k}{h^2} \quad K: \text{拡散係数} \quad C: \text{物質の濃度}$$

上式は、時間 $(n+1) \cdot k$ 、位置 $m \cdot h$ なる点における物質の濃度が、時間 $n \cdot k$ 、位置 $(m-1) \cdot h, m \cdot h, (m+1) \cdot h$ の3点における物質濃度によって計算できることを表している。

4.2 コンクリートの表面塩分濃度

初期条件として、コンクリートと外部環境との境界面における塩分濃度の設定が必要となる。この面での塩分濃度の経時的变化を解明するために、厚さ1cmに切断したコンクリートスライス片を塩水槽（50℃、NaCl 3%）に浸漬し、経時的にその塩分濃度の測定を行っている。その結果を図-3に示しているが、コンクリートの水セメント比により差異が表れている。浸漬後から急激

に濃度の増加があり、その後増加は緩やかになり飽和濃度 C_0 に達している。水セメント比50%の場合、60%及び70%に比して塩分濃度増加率は低いが飽和濃度は高くなる傾向を示している。

上記の増加過程及び飽和濃度を関数式で求めるために、これらの測定値を e 関数で近似している。この手法は測定値を被説明係数、浸漬時間を説明係数として、シュミットの直交化法を用いた直交多項式で近似している。多項式の次数については2次から6次まで試算し、最も良い近似式として6次の直交多項式を採用している。ここで用いた基本形を次式に示す。

$$C = A_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{\tau_0}\right) \right) + A_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{x}{\tau_1}\right) \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 C :塩分濃度 (%)、 x :浸漬時間 (日)、 A_0, A_1, τ_0, τ_1 :近似計算で得られる係数

上記の係数 τ_0, τ_1 は前述の直交多項式をスペクトラム解析して得られるものであり、同多項式の勾配を極大にする値である。係数 A_0, A_1 は最小二乗法によって測定値に対して決定される定数である。即ち、 τ_0, τ_1 は塩分濃度増加傾向を示し、 A_0, A_1 は飽和濃度 C_0 を表している。図-3は e 関数近似結果を示し、係数の計算結果を表-2に示している。

5. 数値解析の暴露構造物への適応

暴露構造物の手すりから採取したコアの塩分量分布を用いて、本解析に必要なコンクリートの表面濃度及び拡散係数を求めている。表面濃度は測定結果を直交多項式で近似し、その式に試験面からの距離を0cmとしたときの濃度を表している。この値を定めた後、数値計算で拡散係数を変化させ、測定値との残差二乗和を最小にするような値を本解析における拡散係数と定めている。その結果、表面濃度及び拡散係数は、各々、0.466%、 $8.51 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$ となっている。

上記の表面濃度の値は暴露期間2.5年の測定値から得られたものであり、この濃度は時間に伴って変化する値である。本解析は、この経時的に変化する初期条件を用いることを目的としている。ここでは、初期条件として、図-3に示されている浸漬試験から求められた増加曲線と同一の型をとるものと仮定する。ここで問題となるのは、式(2)中の時間 x と暴露期間 t_e との関係である。このため、表面濃度 C_0 (0.466%) が浸漬試験の何日目 (t_p) に対応するかを求める。即ち、図-3を用いて C_0 に対応する t_p を求める。この t_p と暴露期間 t_e との比、 $T = t_p / t_e$ を濃度時間比と定義している。この結果、暴露期間に濃度時間比 T を乗じた値を式(2)の x 値として採用することにする。このようにして経時的に表面濃度を変化させ、変化した値を初期条件とし式(

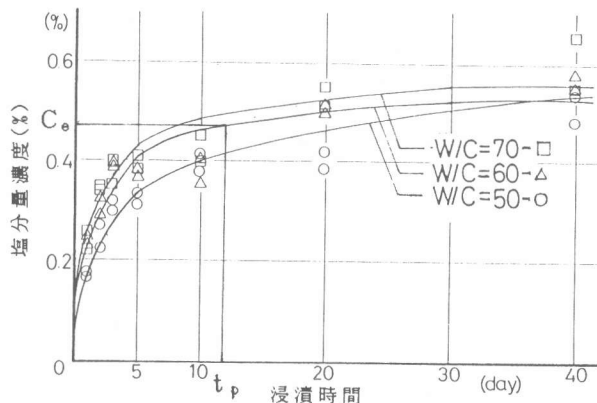


図-3 e関数近似曲線

表-2 諸係数の近似計算結果

W/C	A_0	A_1	C_0	τ_0	τ_1
50	0.3325	0.3069	0.6394	2.125	35.3
60	0.3992	0.1478	0.5470	1.8	17.5
70	0.4200	0.1470	0.5671	1.95	17.25

1)の差分方程式の数値解を計算する。ここで求められた計算結果を図-4に示している。図中の暴露2.5年の測定値は、前述の係数を求める際に用いた値である。暴露期間を変化させて、それに対応する塩分濃度を求めることが出来る。1.5年暴露後の測定値と解析結果の比較は、本解析が塩分浸透の過程を解明するのに有効であることを表している。

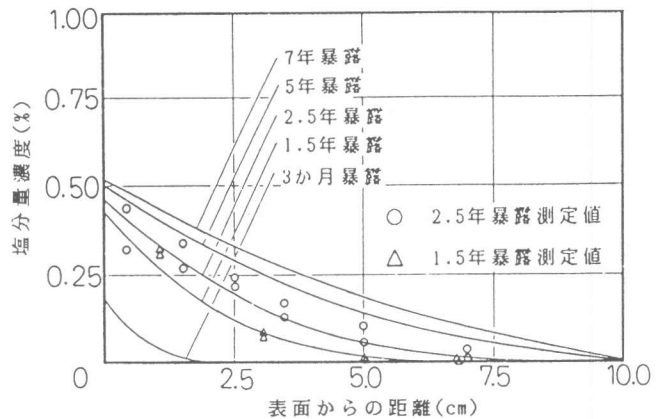


図-4 実構造物解析結果

6. 塩水噴霧促進試験と数値解析の促進試験結果への適応

6.1 促進試験結果及び考察

本研究では、前述の自然暴露試験とともに塩水噴霧・乾燥繰り返し促進試験を行っている。促進試験に用いる供試体の形状及び寸法を図-5に示している。鉄筋(φ16mm)を定位置に固定するために鉄筋の両端部に所定の径の亚克力棒を接着し、コンクリート硬化後にコンクリート面で切断している。かぶり厚は30mmと50mmの二種類である。

噴霧する食塩水の濃度は、海水のNaCl濃度が3.3~3.6%であることを考慮して3%とした。1サイクルを50℃ 48時間塩水噴霧、60℃ 24時間乾燥と定めている。一部の供試体については、暴露構造物と同種の亚克力系塗膜を施して、塗装供試体と略称している。

20サイクル後の試験結果を図-6に示している。これによれば、水セメント比50%の場合は表面部分の濃度が高く、浸透量は少ない。しかし、水セメント比60%と70%の場合は、分布形状がほぼ同じく、水セメント比による明確な差は表れていない。図中には亚克力系塗膜を施した供試体の試験結果も示されているが、塗膜の塩分浸透阻止の効果が明らかに表れている。鉄筋の発錆については、塩分量の増加に伴って発錆率も大きくなっている。即ち、塩分量0~0.02%では鉄筋の20%にわずかな点錆が見られるが、塩分量が0.1%以上では全ての鉄筋に発錆が認められた。

6.2 数値解析の促進試験結果への適応

6.2.1 コンクリート中の塩分拡散係数及び塩分濃縮倍率

数値解析に際して、コンクリートの拡散係数を求めておく必要がある。そのために、円柱供試

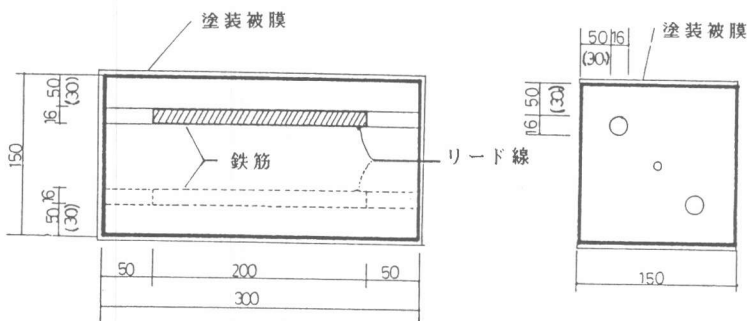
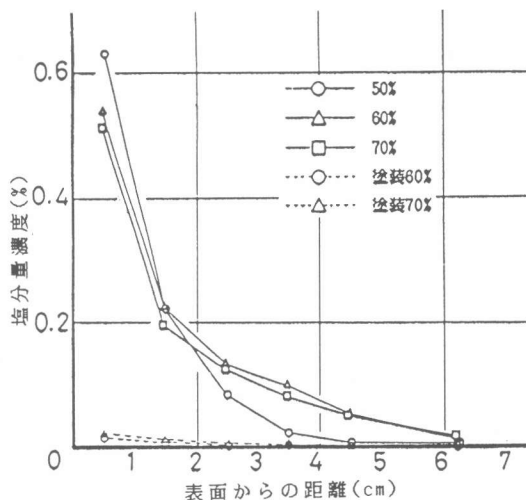


図-5 促進試験供試体

体（φ10×20cm）を縦、横に等分割し、1つの円柱供試体から4つの供試体を作っている。半円形の一面のみからの浸透を考え、他の全ての面はエポキシ樹脂で被覆している。これらの供試体を塩水槽（50℃、NaCl3%）に20日間浸漬し、同一水準で2個の供試体の塩分量測定を行い、残り2個は60℃で24時間強制乾燥後塩分量測定を行っている。これらの測定値から求めた拡散係数を表一3に示す。表中の値は、一般に言われている拡散係数よりも大きくなっている。この原因は、浸漬試験条件が50℃と高いことによるもので、温度の増加に伴って拡散係数が大きくなる傾向と一致している[3]。



図一6 促進試験結果（20サイクル）

さらに、24時間乾燥した場合、表面濃度が高くなるのが本実験で明らかになっている。ここでは、乾燥後の表面濃度（浸漬＋乾燥）と浸漬後の表面濃度の比を濃縮倍率 k と定義している。これらの測定結果を表一4に示している。表中の t_{20} は図一3に示されている t と同じく、本供試体の表面濃度 C_{20} に対応したスライス片試験の浸漬時間である。

表一3 拡散係数

W/C	表面濃度 (%)	n	拡散係数 D × 10 ⁻⁷
50	0.3271	1.40	2.512
60	0.3281	1.63	4.266
70	0.2338	2.08	12.026

注) $D = 10^{-8} \times 10^n$ (cm² / SEC)

表一4 乾燥による濃縮倍率

W/C	表面濃度 (%)		k 濃縮倍率	t ₂₀ (日)
	浸漬	浸漬＋乾燥		
50	0.3271	0.4485	1.37	4.125
60	0.3281	0.4564	1.39	2.625
70	0.2338	0.4243	1.82	1.45

6.2.2 塩水噴霧促進試験結果の数値解析

ここでは、塩水噴霧・乾燥繰り返し作用を受けるコンクリート中の塩分浸透に関する解析法を提案している。解析に際して下記の仮定を用いている。

(1) 塩水噴霧過程における塩分濃度の濃縮過程は、スライス片供試体浸漬試験の経時変化曲線（図-3）と一致する。但し、濃縮時間は一致するとは限らず、さきに定義した濃縮時間比を導入する。

(2) 強制乾燥過程における表面濃度は、表一4に示された濃縮倍率を噴霧終了時の表面濃度に乗じた値とし、この値は乾燥時間（24時間）後に到達する。

(3) 表面濃度は無限に増加するのではなく、コンクリートの飽和塩分量 C_0 に収束する。

これらの仮定を図示すると、図一7の様に表される。経時的に変化する表面濃度は、前述の濃縮時間比を促進時間に乗じて、式(2)中の x に代えて $x \cdot T$ を用いて計算している。さらに、乾燥

過程において、浸透型と停止型の2種のモデルを新たに提案している。浸透型モデルとは、乾燥過程で表面濃度が増加し、この初期条件下で噴霧時と同様に浸透が行われるものと仮定している。停止型モデルでは、表面濃度は増加するが浸透は停止した状態を仮定している。後者モデルは飽和濃度 C_0 に達する以前に意義をもつもので、それ以後は噴霧した時にのみ飽和濃度 C_0 の初期条件で浸透が行われる。

これらの仮定のもとで数値解析を行い、その結果と促進試験の測定結果を図一8、9に示している。

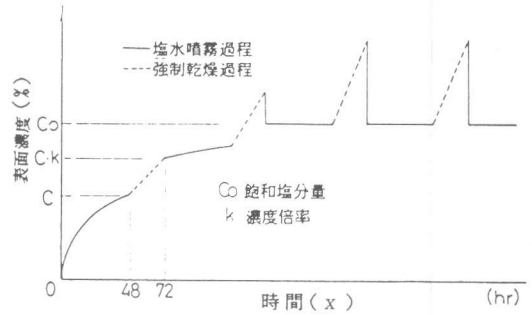
水セメント比50%の場合は(図一8)、浸透型モデルによく一致しており、乾燥過程においても内部への浸透が行われていることを示している。水セメント比60%の場合(図一9)、塩分が内部で拡散することと、表面へ水分に伴って塩分が溶出する現象を示している。

7. まとめ

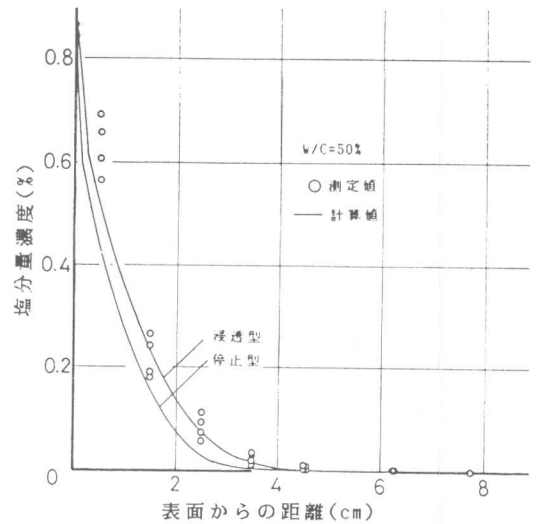
暴露構造物の試験では、塩分の浸透が著しく大きいことが明らかになり、また、自然電位測定結果は、鉄筋腐食の環境の悪化を示している。本提案の数値解析は、スライス片の浸漬試験の結果を用いて暴露構造物の塩分量をシュミレートすることを可能としている。さらに、この解析法を塩水噴霧・乾燥繰り返し試験に適用し、その解析値と測定値の比較検討を行っている。これらの数値解析は、初期条件を経時的に変化させて解析することが可能で、解を比較的容易に求めることができる合理的な方法である。

参考文献

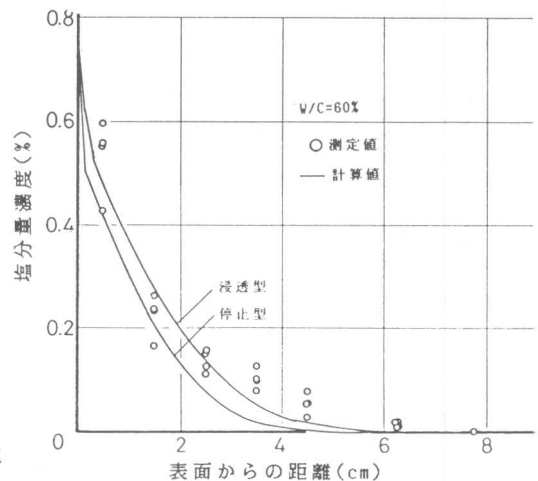
- [1] Oshiro, T., Tanigawa, S. and Nagai, K.: Field Exposure Test for Deterioration of RC Structure, Trans. of JCI, pp161-168, 1986.
- [2] コンクリート工学協会: コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法のJCI基準について、コンクリート工学、Vol. 22, No. 12, 1984.
- [3] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5, 鉄筋コンクリート工事、1986.



図一7 表面濃度の増加過程



図一8 促進試験解析結果 (W/C 50%)



図一9 促進試験解析結果 (W/C 60%)