

## 論文 等価拡散係数を用いたコンクリートの塩分浸透予測手法の検討

佐伯竜彦\*<sup>1</sup>・嶋 毅\*<sup>2</sup>・長瀬重義\*<sup>3</sup>

**要旨**：本研究では、コンクリートの品質だけでなく環境条件の影響も含んだ塩化物イオン拡散係数を等価拡散係数と定義し、その値および経時変化特性に与える種々の影響を明らかにするため、乾湿繰り返し塩分浸透試験および解析によるシミュレーションを行い基礎的な検討を行った。

**キーワード**：塩分浸透、乾湿繰り返し、等価拡散係数

### 1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測には、通常、拡散係数を一定値とした線形の拡散方程式が用いられている。しかし、干満帯や飛沫帯、海上大気中等においては、乾燥や水分の供給によりコンクリート中の含水状態が変化することから塩化物イオン拡散係数は表面からの位置および時間によって変化すると考えられる。さらに、塩水が直接コンクリートに浸透することにより、塩化物イオンが輸送される場合もある。このような場合には、非線形性や移流の影響を考慮しないと正確な浸透予測は行えない。

一方、これらの影響を全て考慮して塩分浸透予測を行うためには、温度・湿度・降水条件・波しぶきを受ける頻度などが正確に把握されている必要がある。これらの条件は、実験室レベルでは把握可能であっても、実環境下では不可能に近く、非線形解析の実構造物への適用は現実的でない。したがって、通常はある暴露期間を経過した構造物の塩化物イオン濃度分布を測定し、線形の拡散方程式の解にその分布をあてはめて拡散係数を逆算する方法が採られている。ここで得られた拡散係数は、厳密な意味での拡散係数ではなく、環境条件やコンクリート内部の状態の影響を含んだ見かけ上の拡散係数であ

り、経時変化することが知られている<sup>1-4)</sup>。したがって、ある時点の濃度分布から得られた拡散係数は、その時点の濃度分布を再現するには最適であるが、それ以降の予測を行うには不適当である<sup>5)</sup>。しかし逆に言えば、経時変化特性を把握していれば、それぞれの時点の濃度分布を計算するのに最適な拡散係数を得られることになり、複雑な環境条件等を考慮しなくても良いことになる。本研究では、この拡散係数を「等価拡散係数」と定義し、等価拡散係数の値および経時変化特性に及ぼす種々の影響を検討し、等価拡散係数を用いた塩分浸透予測手法確立の準備段階として基礎的な知見を得ることを目的とした。

なお、コンクリート中の物質の拡散を扱う場合に、「見かけの拡散係数」という語句が用いられることがあるが、この語句はコンクリート中の固相部分も拡散に有効な面積として断面積を定義していることを意味しており、本研究で定義する等価拡散係数とは意味が異なる。

### 2. 等価拡散係数による塩分浸透予測手法の概要

等価拡散係数は、コンクリートの品質だけでなく環境条件の影響も含んだ拡散係数である。言い換えれば、拡散係数によって環境条件を評

\* 1 新潟大学助教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

\* 2 新潟大学大学院 自然科学研究科環境システム科学専攻

\* 3 新潟大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

価していることになる。コンクリートの品質だけが塩分浸透性に及ぼす影響を評価する方法は、種々の物質透過性試験が提案されており、検討の余地はあるものの、基本的には確立されつつあるものと思われる。一方、環境条件の評価については、特定の地点における暴露結果を用いた評価例は見られるものの<sup>2-4)</sup>、系統的な取り扱いはなされていない。さらに塩分浸透性は、コンクリート暴露面の方向、遮蔽物の有無、といった局所的な状況の影響を大きく受けることが確認されており<sup>6)</sup>、定性的にはともかく、定量的かつ普遍的な環境条件評価方法の確立は困難であると思われる。

以上のような状況を踏まえ、本研究では、最低一度は実構造物中の塩化物イオン濃度分布を測定することを前提とした塩分浸透予測手法を構築することを最終目標としている。コンクリート構造物を建設する前に塩分浸透速度が完全に把握できれば、前もって塩害対策を講ずることができ理想的ではあるが、本研究は一度の点検を行うことによりその後の浸透性状を精度良く予測し、適切な維持管理をすることにより構造物の耐久性を確保するとの立場をとるものである。

図1により、本研究で提案する等価拡散係数を用いた塩分浸透予測手法の概要を説明する。

(a) まず、対象となる構造物中の塩化物イオン濃度分布を測定し、得られた濃度分布に最適な線形方程式の拡散係数、即ち等価拡散係数を算出する。(b) また、常時飽水状態にあるコンクリートを対象として物質透過性試験等により、コンクリートの品質のみに依存する拡散係数を別途求める。(c) 次に、コンクリートの品質のみに依存する拡散係数、測定を実施した時点の暴露期間と得られた等価拡散係数の値より、環境条件とコンクリートの性質より決まる等価拡散係数の経時変化曲線群から対象となっているコンクリートに該当する曲線を選択する。この等価拡散係数の経時変化曲線群は、既存の構造物の調査および数値シミュレーションによ

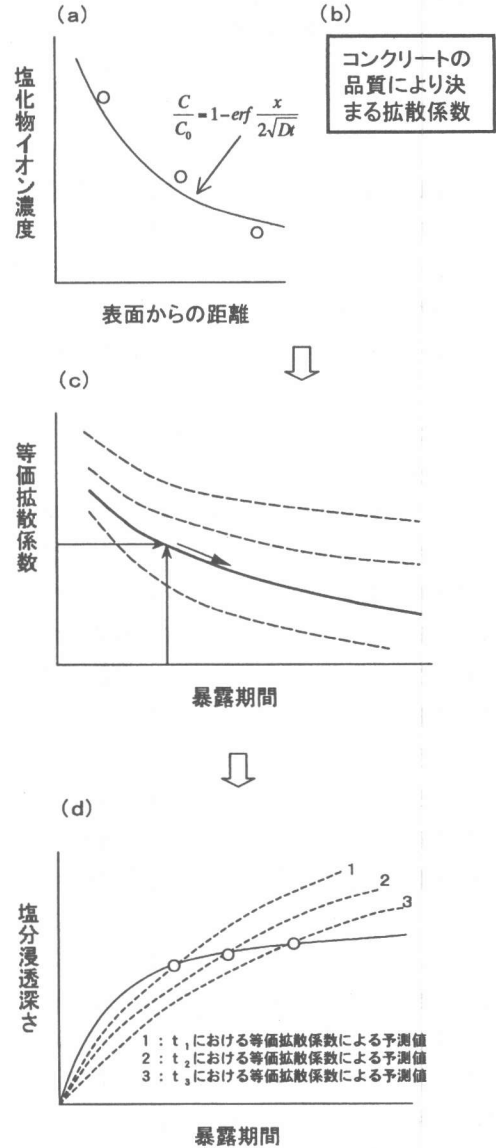


図1 等価拡散係数による塩分予測手法の概要

表1 乾湿繰り返し条件

水セメント比 (%)	1サイクルの乾湿組合せ (乾燥(日) - 湿潤(日))
4.5	2-1, 4-2
5.5	2-1, 4-2
	3-1, 6-2
6.5	2-2, 4-4, 4-1
	2-1, 4-2

り予め準備しておくものとする。(d)最後に、任意の暴露期間にそれぞれ最適な等価拡散係数を用いて、塩化物イオンの浸透を予測する。このようなシステムを構築することにより、適切な耐久性評価および維持管理の効率化が達成できるものと思われる。ただし、本予測手法の適用には、環境が時代によって変化しないことが前提となる。

なお、対象とする構造物におけるの測定を複数回行うこととすれば、物質透過性試験等によるコンクリートの品質のみに依存する拡散係数を求める過程は省略することが可能である。さらに、施工不良等の初期欠陥の影響やコンクリートの経年変化に起因する物質透過性の変化も評価することができ、実構造物のコンクリートと供試体レベルのコンクリートの相違による予測結果の誤差を修正できる可能性もある。

### 3. 乾湿繰り返し試験における塩分浸透性状

本研究では、干満帯・飛沫帯・海上大気中等でコンクリート内部の含水状態が経時的に変化し、かつ移流による塩分の輸送がある環境を模擬するものとして乾湿繰り返し試験を行った。

#### 3.1 実験概要

実験には、 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$  のモルタル供試体を用いた。水セメント比は、45%、55%および65%の三種類である。

供試体は、材齢 28 日まで水中養生を行い、その後  $4 \times 16\text{cm}$  の一面を除いた他の五面をシールし、乾湿繰り返し塩分浸透試験を行った。乾燥条件は、温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% であり、湿潤期間は 3.5% 塩化ナトリウム水溶液に供試体を浸漬した。表 1 に、本研究で行った乾湿繰り返し条件（1 サイクルの乾燥期間と湿潤期間）を示す。

所定の材齢において、供試体のシールの無い面から 5 mm ごとに試料を採取し、JCI 規準(案)に従って塩分量の測定を行った。

### 3.2 数値計算による塩分浸透シミュレーション

本研究では、実験において実施できる乾湿繰り返し条件のパターンに限られるために、それを補完する目的で、数値計算による塩分浸透シミュレーションを行った。計算では、乾湿繰り返しによる水分移動と塩化物イオンの拡散および移流による移動を考慮した。水分の逸散および浸透は、拡散方程式を用いて計算を行った<sup>7)</sup>。塩化物イオンの移動に関する基礎方程式は、式(1)の通りである<sup>5)</sup>。なお実験においては、供試体の含水率は時間および暴露面からの位置により変化するため、塩化物イオン拡散係数の含水率依存性は式(2)により考慮した<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u' \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D' \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$D'/D_0 = 0.0032 \times 10^{0.025w} \quad (2)$$

ここで、 $C$  : 可溶性塩化物イオン濃度

$u'$  : 塩化物イオンの固定化の影響を考慮した流速<sup>5)</sup>

$D'$  : 塩化物イオンの固定化の影響を考慮した拡散係数<sup>5)</sup>

$D_0$  : 飽水状態における拡散係数

$w$  : 相対含水率

流速は、水分移動解析の結果から計算した。また、境界条件は以下の通りとなる。

$$x = 0 \text{ (暴露面)} \\ C = \alpha \{1 - \exp(-\beta t')\} \quad (3)$$

$$x = l \text{ (シール面)} \\ \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$  : 水セメント比によって決まる定数

$\beta$  : 水セメント比と乾湿繰り返し条件によって決まる定数

$t'$  : 実験開始からの時間

式(3)の定数 $\alpha$ および $\beta$ は、塩化物イオン濃度分布測定結果から表面濃度を外挿し、実験条件ごとに、回帰して求めた。

図2に供試体の重量変化予測結果の一例を、図3に塩化物イオン濃度分布予測結果の一例を示す。図より、計算値と実験値は一致しており、水分移動、塩分移動ともに精度良く予測できることが確認できる。また図4は、実施した全実験結果と計算値を比較したものであるが、本研究で行った解析は、水セメント比や乾湿繰り返し条件によらず有効であると言える。このことから、実験を実施していない種々の乾湿繰り返し条件についてのシミュレーション結果も十分な信頼性を有するものと判断される。

#### 4. 等価拡散係数の経時変化特性

乾湿繰り返し実験は、開始から半年程度しか経過していないため、ここでは線形拡散方程式の解にシミュレーションにより得られた塩化物イオン濃度分布を当てはめて得られた等価拡散係数の経時変化について検討を行う。なお供試体表面における塩化物イオン濃度は、3.2で述べたように実験結果に基づいた回帰式(3)で求めることを基本としているが、実験を行わなかった乾湿繰り返し条件については回帰式が得られていないので、水セメント比の違いにのみ依存する値 $\alpha$ を表面濃度とし、経時変化しないものと仮定した。この仮定は $t' = \infty$ において厳密に成り立つが、本研究で行った実験の範囲では、おおよそ100日前後で表面濃度が一定値に収束する傾向にあるため長期間の塩分浸透を対象として計算を行う場合には、問題は無いものと思われる。

図5に、乾湿繰り返し1サイクル中の湿潤期間を1日とし、乾燥期間を変化させた場合の等価拡散係数の経時変化を示す。図より、乾燥期間が長くなるほど等価拡散係数の値が小さくなっている。また、等価拡散係数は経時的に減少する傾向があるが、減少の程度は乾燥期間の長さによって異なることが確認できる。

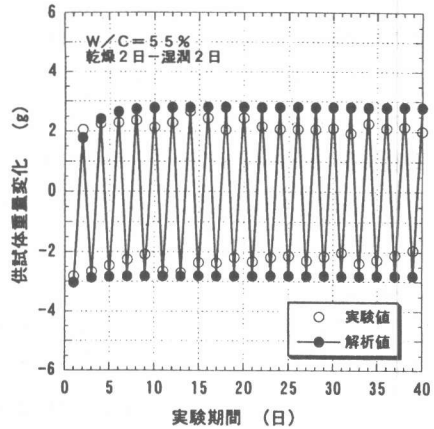


図2 供試体重量変化の予測結果

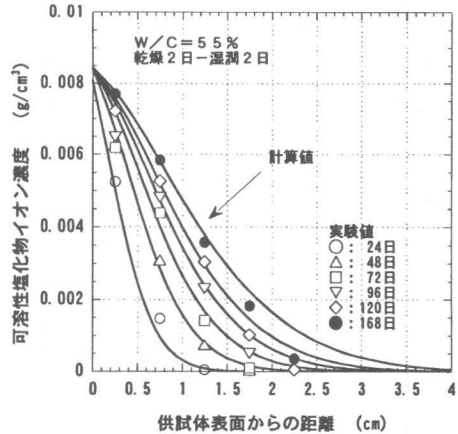


図3 塩化物イオン濃度分布の予測結果

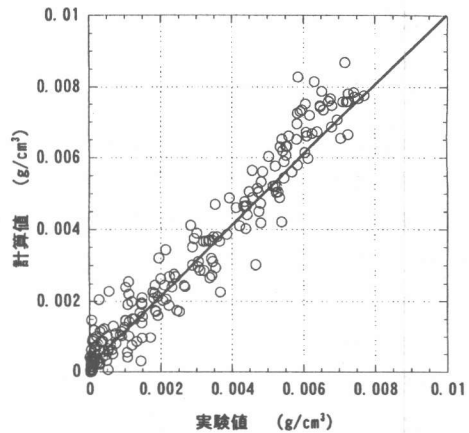


図4 実験値と計算値の関係

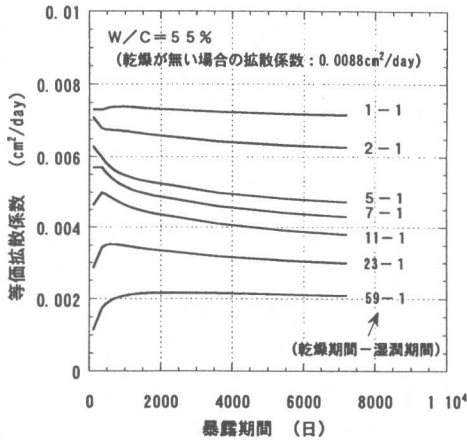


図5 等価拡散係数に及ぼす乾燥期間の影響

図6は、同一乾湿繰り返し条件における等価拡散係数の経時変化に及ぼす配合の影響を示したものである。図より、経時変化の傾向は配合によらず同じであるが、変化量は水セメント比の大きいものの方が大きい。この傾向は、どのような乾湿繰り返し条件でも同様であり、コンクリートそのものの透過性が大きいと、環境の影響を受けやすいと考えられる。

図7は、1サイクル中の湿潤期間を0.2日、乾燥期間を0.1~0.8日として、1サイクルの期間を短くした計算例である。図より、乾燥期間0.1日の等価拡散係数の値が、乾燥が無い場合の拡散係数を上回っていることがわかる。

図8は、1年のうち9ヶ月(期間A)は乾燥0.8日-湿潤0.2日を1サイクルとし、残り3ヶ月(期間B)は乾燥0.5日-湿潤0.5日を1サイクルとして計算した結果を示したものである。図には、期間AとBの終了時点における等価拡散係数を示してある。図より、期間Aに比べて塩分が浸透しやすい期間Bの終了時の拡散係数が大きくなっており、暴露期間の増加とともにAとBの差が減衰していく傾向が見られる。この結果は、拡散係数を求めるための塩化物イオン濃度分布の測定を1年のうちのどの時期に行うかによって異なる結果が得られる可能性があることを示唆しているものと思われる。

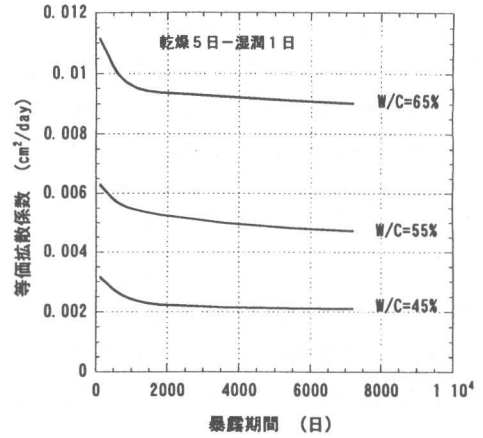


図6 等価拡散係数に及ぼす配合の影響

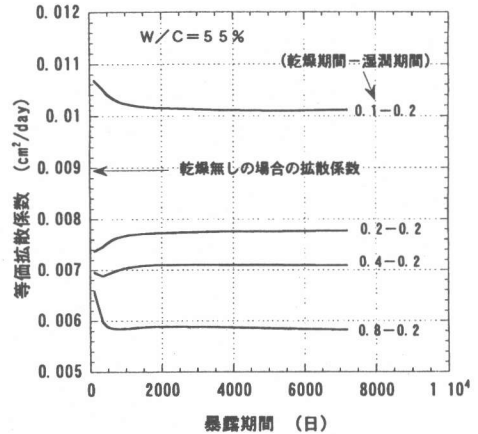


図7 1サイクルの期間が短い場合の等価拡散係数の経時変化

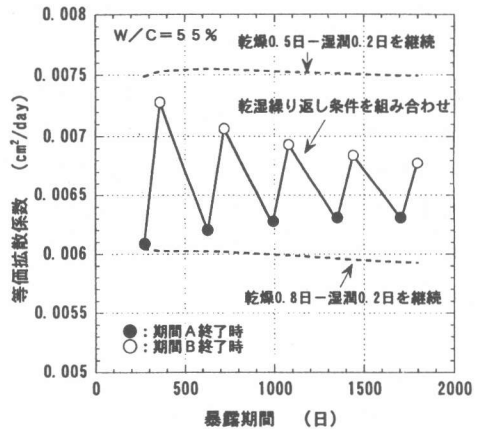


図8 異なる乾湿繰り返し条件を組み合わせた場合の等価拡散係数の経時変化

## 5. まとめと今後の課題

本研究は、コンクリートの品質だけでなく環境条件の影響も塩分浸透予測に反映させるために、等価拡散係数を用いる予測手法を考案し、その実用化の準備段階として実験的および解析的な基礎検討を行った。その結果、乾湿繰り返し条件下にあるモルタルの等価拡散係数は、経時変化することが確かめられ、水セメント比と乾湿繰り返し条件が等価拡散係数の値と経時変化特性に大きく影響を及ぼすことが確認できた。しかし、課題として以下の点が残された。

- ①表面濃度の検討：今回の検討では、実験結果を回帰することにより表面塩分濃度の経時変化を考慮したが、実験によらず表面濃度を求める方法を検討する必要がある。
- ②電気的吸着の影響の検討：丸屋らの塩分浸透モデルによれば、正に帯電している細孔壁に塩化物イオンが引き寄せられて浸透する機構がある<sup>8)</sup>。もし、電気的な影響を強く受けて移動が自由でないイオンとほとんど影響を受けていないイオンを区別せずに拡散方程式中の濃度に用いたとしたら、実際より大きな濃度勾配を見積っていることとなり、それを相殺する形で拡散係数が見かけ上小さく算出される可能性があると考えられる。常時海水中にあり、乾湿繰り返しを受けないコンクリートの拡散係数が経時的に減少する傾向が報告されていることから<sup>3)</sup>、電気的吸着が拡散係数に与える影響は小さくないと思われる。本研究で解析の検証のために行った乾湿繰り返し実験では、試験期間が短かったためこの影響が現れなかった可能性があり、長期的な検討が必要と考えられる。

今後は上記の課題について検討し、等価拡散係数を用いた塩分浸透予測手法の確立を目指す予定である。

## 謝 辞

本論文は、文部省科学研究費（課題番号 09750538）の交付を受けて行った研究の一部を取りまとめたものである。

## 参考文献

- 1) 辻 恒平ほか：乾湿繰り返し法によるコンクリート中への塩分の浸透・拡散の評価，土木学会第 39 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 37-38，1984. 10
- 2) 濱田秀則ほか：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，Vol. 7，No. 1，pp. 11-22，1996. 1
- 3) 杉山隆文ほか：コンクリートの塩化物イオン拡散係数の経年変化を考慮したシミュレーション解析の一例，セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム論文集，pp. 53-58，1996. 4
- 4) 金谷光秀ほか：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 747-752，1996. 6
- 5) 佐伯竜彦ほか：不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 963-968，1996. 6
- 6) 宝島由治ほか：新潟県沿岸における塩害環境に関する研究，土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 448-449，1994. 9
- 7) 佐伯竜彦ほか：初期養生以降のセメントの水和の影響を考慮した中性化進行予測，土木学会論文集，No. 508，pp. 33-44，1995. 2
- 8) 丸屋 剛ほか：乾湿繰り返しによるコンクリートへの塩化物イオンの浸透に関する考察，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集，第 5 部，pp. 242-243，1995. 9