

論文 コンクリート表面における塩化物イオン濃度に関する検討

佐伯竜彦*¹・植木 聡*²・嶋 毅*²

要旨: 本研究は、コンクリートへの塩分浸透予測に必要なコンクリート表面における塩化物イオン濃度について検討した。さらに、表面濃度の経時変化の傾向についても検討し、環境条件等の影響を含む拡散係数である等価拡散係数を利用した塩分浸透予測手法を提案した。その結果、変動する環境下における塩分浸透予測手法確立の可能性を示すことができた。

キーワード: 塩化物イオン, 表面濃度, 拡散係数, 表面流束, 塩分浸透予測

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、一般に拡散方程式が用いられているが、実際に計算を行うには、拡散係数の値を設定するとともに境界条件を与える必要がある。具体的には、環境からコンクリート表面を介して内部へ浸透する塩分量、すなわち表面における塩分の流束を把握することが必要とされる。しかし、構造物のおかれている環境が一定であればともかく、干満帯や飛沫帯、海上大気中などの変動する環境下では、コンクリート表面における塩化物イオンの流束を逐次把握することは極めて困難である。したがって、解析の容易さからも表面濃度を設定する方が現実的であり、既往の研究の多くがこの方法によっている。

しかし実際の現象としては、周囲の環境から供給された塩化物イオンがコンクリート表面に徐々に蓄積されていくことから、表面濃度を経時的に変化させた方が、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を再現しやすいことが確かめられている。この経時変化については、例えば、以下のような式が提案されている^{1), 2)}。

$$C_0 = S\sqrt{t} \quad (1)$$

$$C_0 = \alpha\{1 - \exp(-\beta t)\} \quad (2)$$

ここで、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度

S, α, β : 実験定数

表面濃度の経時変化特性、すなわち、上式の実験定数の値は、コンクリートの品質と環境条件に依存すると考えられているが、それらの影響を考慮して事前に値を決定する方法は無く、現時点では、複数回の実測データから回帰して求める方法がとられている。

そこで本研究では、塩化物イオン浸透予測に必要な表面濃度を合理的に設定し、かつ、浸透予測方法を確立するための基礎的な検討を行うことを目的とした。

2. 表面塩化物イオン濃度の定式化

ここでは、比較的簡単なモデルを用いたシミュレーションにより、表面塩化物イオン濃度について検討を加える。

なお、本論文で用いる表面濃度と拡散係数は、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を、線形の拡散方程式を半無限体、表面濃度一定の条件で解いた式(3)により回帰して求めた値を用いることとした。また、以降で用いる文献データも同様に式(3)で計算し直したものである。

* 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

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3)$$

これは、以下の理由による。複雑な環境条件などの影響を忠実に再現しようとする、塩分浸透予測には非線形の拡散方程式を用いることとなる。しかしこの場合、解析解が得られないこと、計算に必要な環境条件が経時変化し、それを把握することが必ずしも容易ではないこと、などの不都合が生じる。そこで著者らは、線形の拡散方程式を用い、非線形現象を線形方程式で評価することによって生じる拡散係数と表面濃度の見かけ上の経時変化を把握して、各時点の塩化物イオン濃度分布を再現するのに最適な拡散係数および表面濃度を得る方法を用いることを提案している³⁾。したがって本研究でも、この方針で検討を行うこととした。さらに以上のことから、本研究で考察する表面濃度は、コンクリート表面における実際の塩化物イオン濃度ではなく、線形の拡散方程式で塩化物イオン濃度分布を計算するための便宜上の濃度である。

拡散方程式の解として式(3)が得られる条件では、表面濃度 C_0 と内部に侵入した塩分の総量 M の関係は、以下ようになる⁵⁾。なお式(4)は、拡散係数と表面流束が時間に対して一定の場合、丸屋らの研究¹⁾で行われている検討と同じ意味を持つ。

$$C_0 = \frac{\sqrt{\pi} M}{2 \sqrt{Dt}} \quad (4)$$

ここで、 D ：材齢 t の時点で最適な拡散係数
(等価拡散係数³⁾)

本来、経時変化するものに対して、時間に関して一定の条件を仮定することの是非については明らかになっていない。そこで、式(4)の適用性を検討するために、表面濃度および拡散係数が経時的に変化する条件を設定してシミュレーションを行った。具体的には、境界条件としてコンクリート表面における塩分の流束を与え、以下の条件で計算を行った。

- ①表面流束と拡散係数を時間に対して一定とし、それぞれの値を5段階設定し(表面流

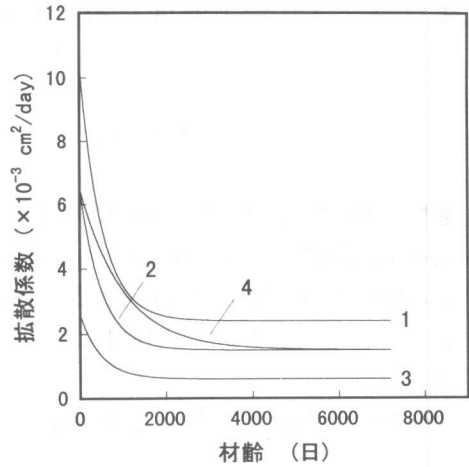


図-1 設定した拡散係数の経時変化

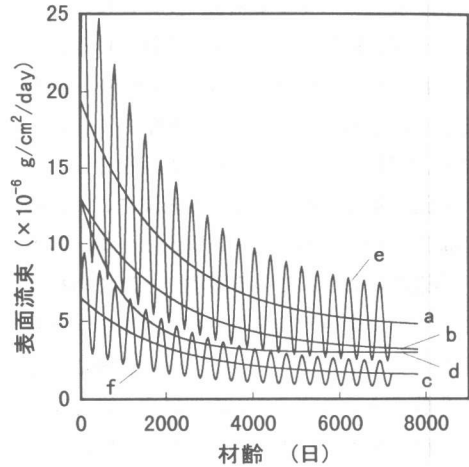


図-2 設定した表面流束の経時変化

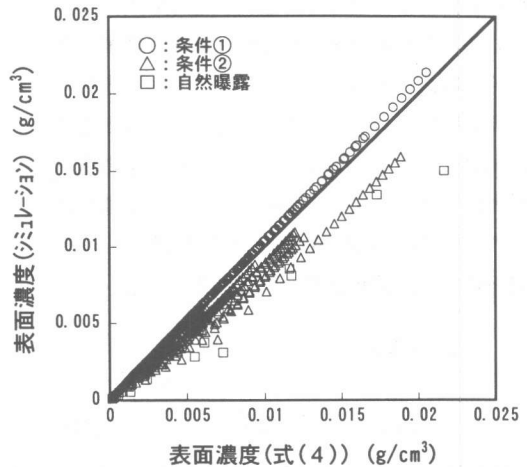


図-3 シミュレーションで得られた表面濃度と式(4)で得られた表面濃度の関係

束：2, 4, 6, 8, $10 \times 10^{-6} \text{g/cm}^2/\text{day}$, 拡散係数：2, 4, 6, 8, $10 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{day}$, 両者を組合せた計 25 条件。

② 拡散係数の経時変化を図-1のように、表面流束の経時変化を図-2のように設定して、両者を組合せた計 24 条件。なお、拡散係数の変化および表面流束の変化についてはそれぞれ既往の研究^{2), 6)}を参考にし、飛来塩分量の季節変動⁷⁾を考慮し表面流束を周期的に変動させるものも加えた。

図-3に、シミュレーションで得られた表面濃度と式(4)で計算した表面濃度の関係を示す。なお、図中には、塩分濃度分布が記載されている既往の研究^{4) 8-11)}のデータも含まれている。図より、条件が実際の環境に近づくほど、式(4)で得られた表面濃度は、実際のあるいはシミュレーションで得られた表面濃度との差が大きくなる傾向にある。しかし、鉄筋腐食を念頭において塩分浸透予測を行う上で重要なのは、正しい表面濃度を得ることではなく、図-4に模式的に示すように鉄筋位置における塩分濃度を再現するのに最適な表面濃度を得ることである。そこで、鉄筋が存在する範囲をコンクリート表面から4~10cmの範囲とし、その範囲における実際のあるいはシミュレーションで得られた塩分濃度と式(4)で得られた表面濃度を用いて計算した塩分濃度を比較した。結果を、図-5に示す。図より、両者の値は良く一致しており、式(4)で求められた表面濃度は鉄筋位置の塩分濃度を計算するのに有効であることが確認できる。

3. 塩分浸透に伴う表面塩化物イオン濃度の変化

2.における検討により、表面濃度は式(4)により表せることが明らかとなった。ここではそれを利用して、表面塩化物イオン濃度の経時変化について検討する。

式(4)を変形すると式(5)が得られる。

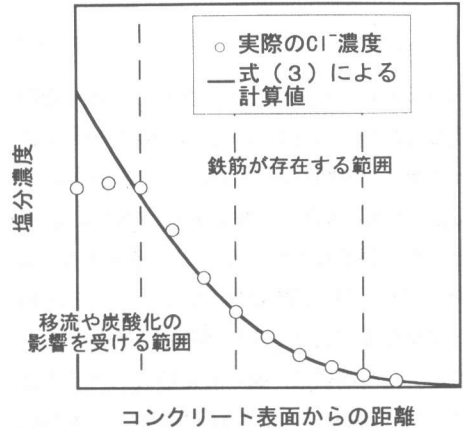


図-4 塩分濃度分布の模式図

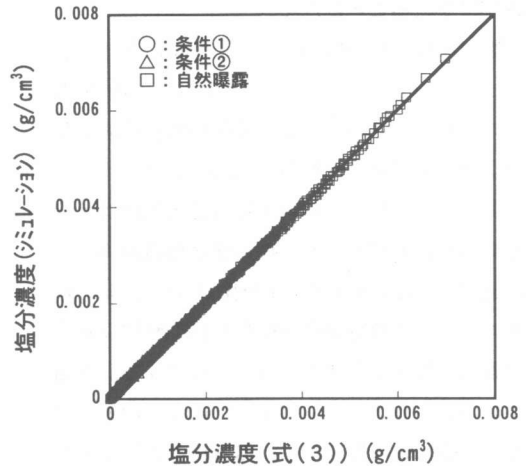


図-5 鉄筋位置での塩分濃度予測結果

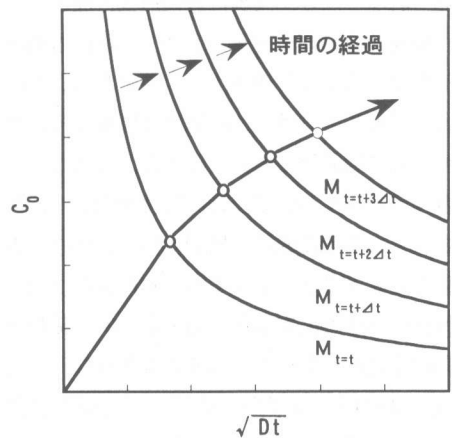


図-6 C_0 と \sqrt{Dt} の経時変化の模式図

$$C_0 \sqrt{Dt} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} M \quad (5)$$

式(5)は、 C_0 と \sqrt{Dt} を変数とした双曲線を表している。したがって、コンクリート中の塩分総量 M が決められたときに、とり得る C_0 と \sqrt{Dt} の値の組合せの集合が式(5)によって示されているわけである。その組合せは理論上無限にあるが、実際には、コンクリートの品質と環境条件によりその値が決定されると考えられる。経時的には、図-6に模式的に示すように、時間の経過により M が増加し、各双曲線上の特定の C_0 と \sqrt{Dt} の組合せの点を通る軌跡が描かれることになる。

図-7に2.の計算条件②と同じ条件でシミュレーションを行った場合の C_0 と \sqrt{Dt} の関係を示す。図より、表面流速と拡散係数の値およびその経時変化特性によって、 C_0 と \sqrt{Dt} の関係、すなわち、両者の組合せの軌跡は大きく異なることがわかる。拡散係数の値が小さいか減衰の大きいものは、初期において曲線の傾きが急で、ある時期から傾きが緩やかになり表面濃度の増加が小さくなる。この傾向は、表面流速の値が大きく減衰が小さいほど、顕著となっている。これに対して、拡散係数の値が大きいか減衰が小さく、かつ、表面流速の値が小さいか減衰の大きなものは、軌跡に明確な変曲点が見られなくなり、直線に近い形状となる。また、表面流速の周期変動は、 C_0 と \sqrt{Dt} の関係にそれほど大きな影響を及ぼしていないことが確認できる。これは、表面濃度に影響するのは表面流速の積分値であるためと考えられる。

各種条件下において、この軌跡が完全に把握できれば、塩分浸透量の増加に伴う表面濃度の変化を捉えることができるが、本研究の検討では軌跡の形状と設定した表面流速・拡散係数との間に定量的な関係を見出すには至らなかった。

図-8に図-3で用いたデータと同じ自然環境下で暴露されたコンクリートについての C_0 と \sqrt{Dt} の関係を示す。用いたデータの範囲は、水セメント比 40~65%、セメントの種類

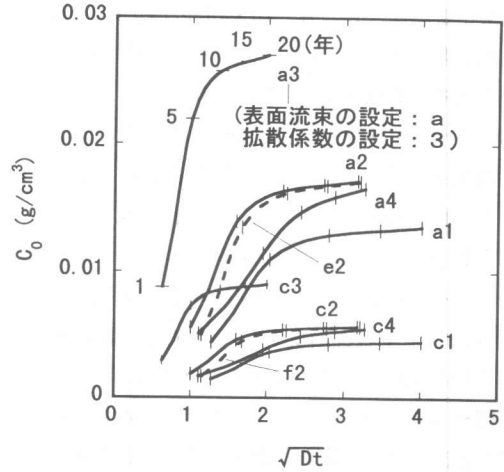


図-7 C_0 と \sqrt{Dt} の関係 (シミュレーション)

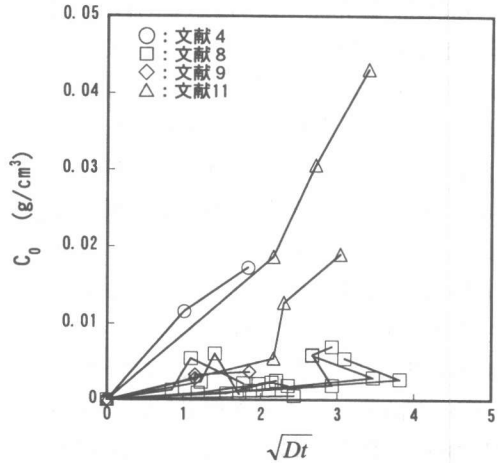


図-8 C_0 と \sqrt{Dt} の関係 (自然暴露)

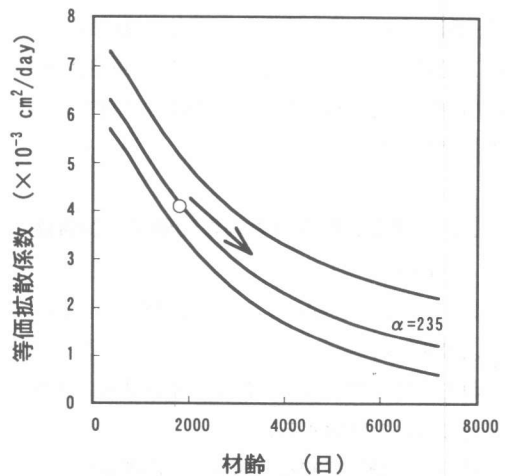


図-9 等価拡散係数の経時変化

が普通セメント・高炉セメント、暴露場所は海中・飛沫帯・海上大気中・内陸、暴露期間は0.5～10年である。図より、一部のデータを除き、実環境下においてはシミュレーションと異なり両者はほぼ直線関係になっている。したがって、一度濃度分布を測定して表面濃度と拡散係数を算出すれば、原点とその点を結んで以後の軌跡を描くことができる。環境条件を定量的に評価する方法が確立されていない現時点において、一度の測定で軌跡を決定できることは極めて有効である。ただし、変曲点が現れなかった原因が、暴露が比較的短期間であったためである可能性もあり、この場合は短期間の測定で長期的な表面濃度を予測しようとする誤った結果を導くことになる。この点については、今後の検討が必要であると考えられる。

4. 塩分浸透予測手法の検討

ここでは、3.において検討した C_0 と \sqrt{Dt} の関係をを用いて、塩分浸透予測を行う方法について検討する。

前述したように C_0 と \sqrt{Dt} の関係が直線であれば、一度の測定で将来の C_0 と \sqrt{Dt} が得られ、式(3)で簡単に濃度分布を予測することができる。しかし、得られるのは \sqrt{Dt} の値で D と t が分離されていないので、軌跡上の点をいつかは通ることは保証されているが、いつ通るかの情報は得られない。しかし、拡散係数の経時変化がわかれば、 D と t が分離されるため塩分浸透予測が可能となる。そこで、図-8中の文献11)のデータを対象に、暴露5年の測定結果から暴露10年の塩分濃度分布の予測を以下のような手順にしたがって試みた。

- ①種々の条件を設定してシミュレーションを行い、図-9のような等価拡散係数の経時変化曲線群を準備する。なお、図-9を求めるための計算条件は、図-10に示される通りで、表面から1.5cmまでの範囲が移流による塩分輸送の影響を受けると仮定し、水分流速 u と乱数で与えられる塩分の表面流

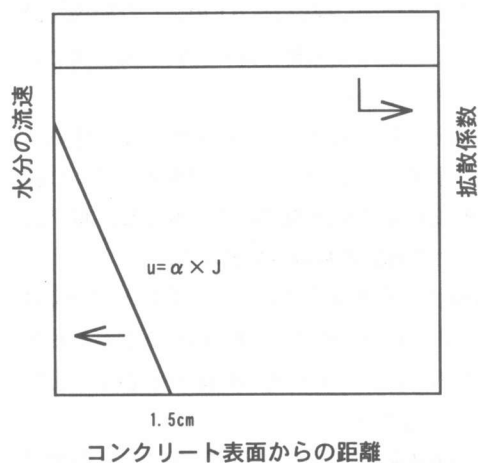


図-10 等価拡散係数を得るための計算条件

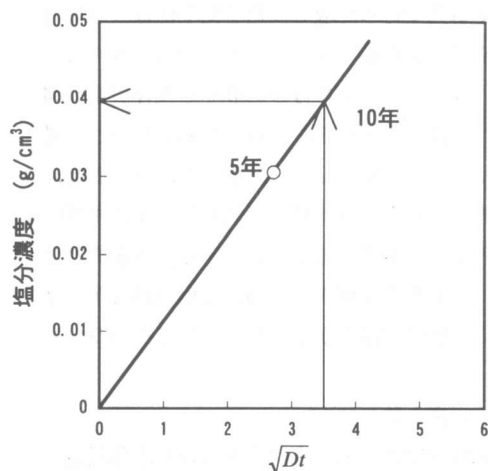


図-11 C_0 の決定方法

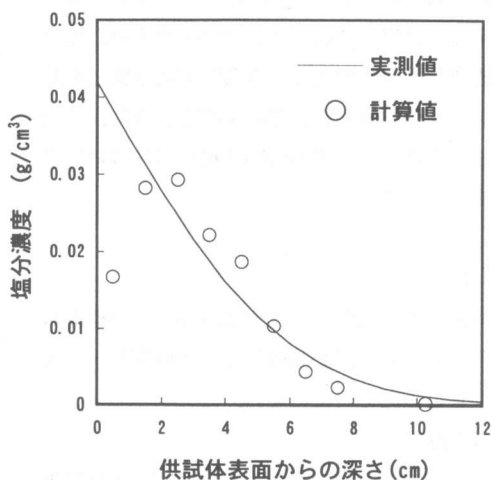


図-12 塩分濃度分布の予測結果

束 J との間には, $u = \alpha J$ のような関係を設定した。また拡散係数は, 時間と位置によらず一定とした。

- ② 塩分濃度測定結果から得られた拡散係数と一致する点を含む曲線を選択し, 以降の経時変化がその曲線に従うと仮定し, 将来における拡散係数の値を求める。
- ③ 図-11 に示すように, 測定で得られた C_0 と \sqrt{Dt} の点と原点を結び, 図-9 で得られた拡散係数と予測したい材齢から \sqrt{Dt} を計算し, C_0 を求める。

予測結果を図-12 に示す。図より, 表面付近を除いて計算値は実測値と良く一致している。

本研究で行った塩分浸透予測手法は, 今後検討すべき課題が数多く残されている。例えば, 図-9 を得るために行った計算の条件設定 (図-10) には根拠が無く, Trial and error で見出したものである。また, 図-11 を得るための測定における誤差が, 予測結果に及ぼす影響の程度等も未検討である。しかし, 本研究によって, 変動する環境下における塩分浸透予測手法の一応の可能性が示されたと考えられる。

5. まとめ

本研究では, 拡散方程式を用いた塩分浸透予測に必要とされる表面塩化物イオン濃度に関して基礎的な検討を行った。さらに, 変動する環境条件の影響を含む等価拡散係数を用いた塩分浸透予測手法を提案し, 実環境下に暴露されたコンクリート中の塩分濃度予測を試みた。今後は, 本予測手法の適用範囲や精度等について検討する予定である。

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) 丸屋剛ほか: コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化, コ

ンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, pp. 597-602, 1989. 6

- 2) 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
- 3) 佐伯竜彦ほか: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 859-864, 1998. 6
- 4) 東邦和ほか: 海水飛沫を受ける RC 構造物の塩分浸透と鉄筋腐食に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 781-786, 1994. 6
- 5) Crank, J. : The Mathematics of Diffusion, Oxford Univ. Press, 1956.
- 6) 谷川伸ほか: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 939-944, 1996. 6
- 7) 加藤恭浩ほか: 新潟県沿岸部における塩害環境の定量的評価, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp. 294-295, 1995. 9
- 8) 迫田恵三ほか: 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 487-492, 1988. 6
- 9) 榊田佳寛ほか: コンクリートの乾湿に伴う塩化物の移動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 787-792, 1992. 6
- 10) 佐々木慎一: コンクリート中の塩化物イオンの浸透と海洋環境条件, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 941-946, 1994. 6
- 11) 山田義智ほか: 飛来塩分量とコンクリート中の塩分浸透過程に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 973-978, 1995. 6