

群馬大学工学部 学生会員 村田 陽子
 群馬大学工学部 正 会 員 杉山 隆文
 群馬大学工学部 正 会 員 辻 幸和
 群馬大学大学院 学生会員 山本 隆信

1. はじめに

塩化物イオンの浸透は、コンクリートの品質、施工方法、マクロおよびミクロを含めた環境条件などが複雑に関連しており、その浸透メカニズムをミクロレベルで解明することは困難と思われる。しかし、各種要因の影響度の大小を把握することで、工学的なレベルでのシミュレートは可能であり、実用的である。

本論文では、気温変動と塩化物イオンの拡散について、解析的に検討した結果の一部を報告する。アレニウス式にしたがって、コンクリートの細孔溶液中の塩化物イオンの拡散係数および細孔組織の塩化物イオンの固定化量を定式化して、気温変動の影響を考察した。

2. 塩分浸透モデル

常時潤潤状態の環境下では、塩化物イオンは細孔溶液中を拡散と固定化を繰り返しながら、コンクリート中を移動する。そして、細孔溶液中の自由塩分は、次式の Fick の式にしたがって拡散する：

$$J_{Cl} = -D_{Cl} \frac{\partial c_f}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 J_{Cl} ：細孔断面におけるフラックス、 c_f ：細孔溶液中の濃度、 D_{Cl} ：コンクリートの塩化物イオン拡散係数、 x ：距離である。

コンクリート中の塩分量は、自由塩分量、固定化された塩分量、その合計の全塩分量の3つに分けて考える必要がある。これらの関係は、一般に次式で定式化される：

$$Q_{全} = c_f Ws + Q_{固} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{全}$ ：全塩分量、 Ws ：空隙比、 $Q_{固}$ ：固定化された塩分量である。

本解析では、境界条件として、 $c_f = 0.5 \text{ mol/L}$ ($x = 0$, $t > 0$) とした。

3. 塩化物イオン拡散係数と固定化の温度依存性

拡散係数と温度 (T) および固定化量と温度 (T) の関係は、次式で示すアレニウス式で、定式化した：

$$D \propto e^{\frac{E_D}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T(t)} \right)} \quad Q_{固} \propto e^{\frac{E_b}{R} \left(\frac{1}{T(t)} - \frac{1}{293} \right)} \quad (3)$$

ここで、 E_D ：拡散における活性化エネルギー、 E_b ：固定化における活性化エネルギー、 R ：気体定数である。つまり、気温が高くなると拡散係数は大きくなり、逆に固定化量は減少するとした。固定化量に及ぼす気温の影響では、物理的な吸着、固定化およびフリーデル氏塩の溶解に関連していると思われる。また、固定化には水酸化物イオン濃度（アルカリ度）の影響も考えられるが、その影響を定量化できるデータが不十分であるために、本解析では水酸化物イオン濃度は一定とした。さらに、拡散係数の経時的な減少および施工方法による影響で、表層部の品質の違いが拡散係数に及ぼす影響も定量化した。

解析に当たっては、有限差分における陽解法を用いた数値解析を行った。安定性の条件は、 $\Delta t / \Delta x^2 \leq 0.5$ であり、時間の刻み Δt は 5 日、位置の刻み Δx は 5 mm とした。

4. 気温変動の定式化

気温変動は、北海道におけるオホーツク海や日本海の年間の気温変動を参考に sin 関数で表現した：

キーワード：塩化物イオン、拡散係数、有限差分法、気温変動

〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1 電話：(0277)30-1613 Fax：(0277)30-1601

$$T(t) = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin \left(2\pi \frac{t - t_0}{365} \right) \quad (4)$$

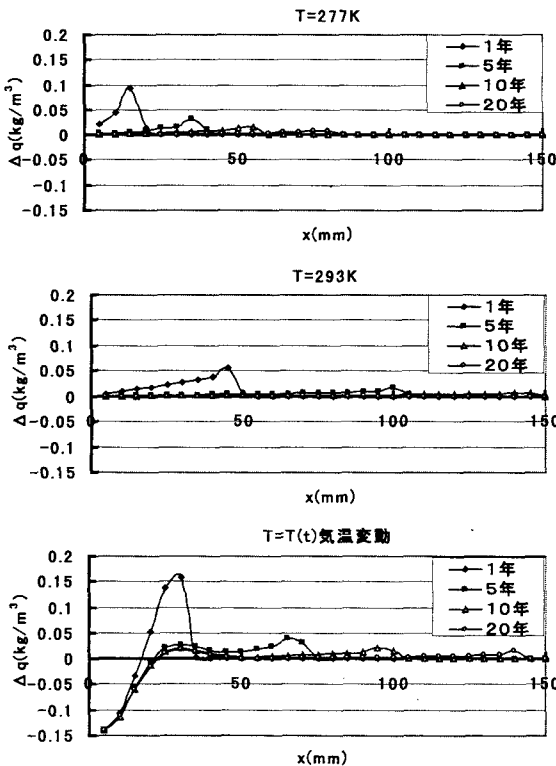
ここで、 $T_{\max}$ ：最高気温（293K、20℃）、 $T_{\min}$ ：最低気温（275K、2℃）、 t_0 ：初期値の設定日である。

本研究では、気温を一定とした場合（293K、20℃および 277K、4℃）についても解析を行った。その際、気温変動に依存する拡散係数および固定化量以外のインプットデータは、すべて同じ値を用いた。

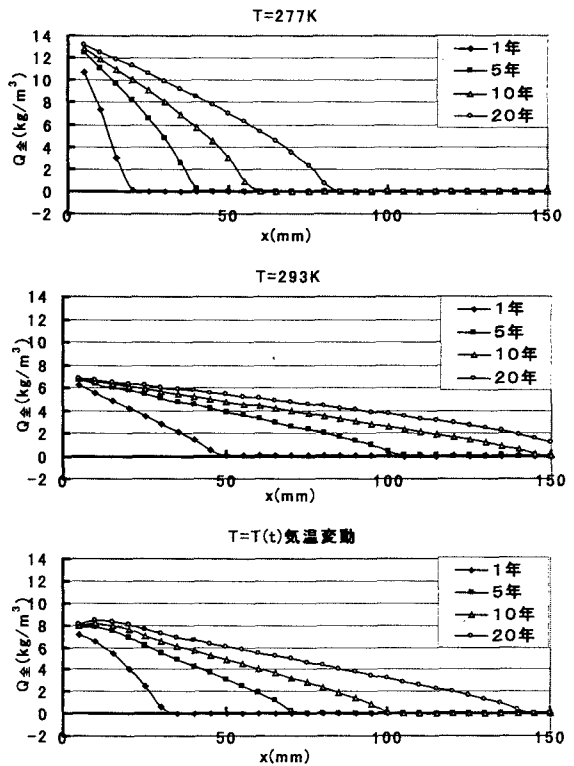
5. 解析結果および考察

図－1は、自由塩分の拡散量 Δq (kg/m³)と拡散距離 x (mm)の関係である。ただし、気温変動を考慮した解析の初期値は、7月1日に設定したので、計算結果は各経過年後の7月1日の解析値である。気温を一定にした場合、経過年が増加すると Δq のピークがコンクリート内部に移動しており、ピーク時の値は減少している。したがって、細孔溶液中の塩化物イオンの拡散は、経過年ごとにその拡散量を減らしながらコンクリート内部で活発になる。これは、固定化量に関係するセメント水和物量および溶液中の自由塩分量によるものと思われる。一方、気温変動を考慮した場合、その時の気温に従って Δq と拡散距離の関係は変化するが、 Δq が負の値を示すなど、内部から表面方向へ拡散する場合もあることが示された。つまり、細孔溶液中の自由塩分濃度が増減していることを示唆している。

図－2は、全塩分量 Q (kg/m³)と拡散距離 x (mm)の関係である。気温を 293Kと一定にした場合が、277Kのときよりも、拡散距離は大きく、表層部の全塩分量は小さい。また、気温変動を考慮した場合の拡散距離および全塩分量は、それらの値の中間的な値を示している。このように、気温変動がコンクリート中の塩分量の分布に及ぼす影響を無視できない場合があることが推察される。



図－1 自由塩分の拡散量 Δq (kg/m³)



図－2 全塩分量 Q (kg/m³)

6. まとめ

気温変動が拡散係数および固定化量に及ぼす影響を考慮したモデルを用いて、コンクリート中の自由塩分の拡散量および全塩分量の分布を解析的に求めた。