

移流拡散方程式による乾湿の激しい環境下でのコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布評価

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○白井 睦弥
 京都大学大学院工学研究科 正会員 平野 裕一
 京都大学大学院工学研究科 正会員 白土 博通

丸紅(株) (研究当時京都大学大学院生) 三歩一 奏人
 京都大学大学院工学研究科 正会員 安 琳

1. 序論

沿岸部に位置するコンクリート構造物は飛来塩分による塩害が深刻である。そのため、効率的に維持管理するためには、コンクリート表面に付着した塩分の浸透過程を予測し、内部の塩化物イオン濃度分布を把握することが重要である。現行のコンクリート標準示方書では、コンクリート内部の塩化物イオン濃度分布は、Fick の拡散方程式に基づいて評価する手法が用いられている。その場合、表面の塩化物イオン濃度と見かけの拡散係数により計算される。しかし、乾湿が激しい場所においては、吸水や蒸気拡散といった水の移動に伴う塩化物イオンの移動が顕著であるため、その影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、沿岸部など、乾湿の激しい地域におけるコンクリート構造物の内部の塩化物イオン濃度の予測精度の改善を目的とし、移流拡散方程式により評価する手法を提案する。乾湿繰り返し室内試験から得た塩化物イオン濃度分布と移流拡散方程式に基づいて計算した塩化物イオン濃度分布とを比較することで、移流拡散方程式に基づく計算モデルの妥当性を検討した。

2. 乾湿繰り返し試験

直径 100mm、高さ 100mm の円柱型のモルタル及びコンクリート供試体 (W/C = 0.6) を用いた。浸漬面以外のすべての面をエポキシ樹脂で被覆し、浸漬面以外では水の出入りが生じないようにした。その後、供試体を 10%塩化ナトリウム水溶液に 30 分浸漬させ、50℃に保った乾燥装置で乾燥させるという一連のサイクルを 10 回繰り返した。サイクル中の乾燥時間は case1 では 3 日、case2 では 1 日とした。試験に用いた供試体は各ケース 2 つずつである。10 サイクル終了後、供試体内部の深さ毎の全塩化物イオン濃度を電位差滴定により測定した。その結果を図 1 に示す。深さ 20mm 以深ではあまり差異が見られな

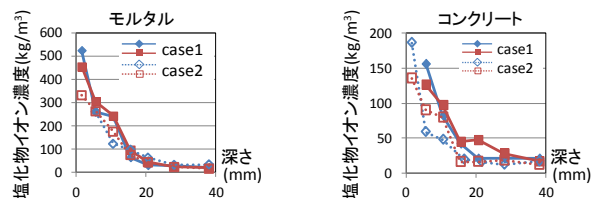


図1 室内試験による塩化物イオン濃度分布

いものの、表面付近においては乾燥時間の長い case1 の方が濃度が高くなる傾向が見られた。これは、case1 の方が乾燥時間が長いため、各サイクルでの浸漬時の吸水量が多くなることで、内部の塩化物イオン量が多くなると共に、乾燥時の移流の影響で表面付近に塩化物イオンが移動したためと考えられる。

3. 塩化物イオン濃度分布の予測シミュレーション

乾湿繰り返し後の塩化物イオン濃度分布を、有限差分法を用いて移流拡散方程式から計算し、室内試験の各ケースの再現を試みた。まずコンクリート細孔内の飽和度分布を求め、それを利用して塩化物イオン濃度を計算した^{1),2)}。計算領域は浸入面から 100mm の 1 次元領域とし、奥行き、幅は考えないものとする。

3.1 飽和度分布計算

簡単のため、コンクリート内の水分の移動は拡散によるものだけとし、拡散方程式 (式(1)) を用いた。拡散係数 $D(\theta)$ は、浸漬時の浸漬面付近で毛細管の吸水が起こる範囲では式(2)を、乾燥時と浸漬時のある程度深部で毛細管の影響が及ばない範囲では式(3)を用いた³⁾。また、コンクリート内部は等温とし、ヒステリシスは無視した。式中の拡散係数は別途室内試験を行い決定した。計算結果を図 2 に示す。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

θ : 細孔中の飽和度, x : 浸入面からの深さ (mm),

t : 経過時間 (s), $D(\theta)$: 水の拡散係数 (mm²/s)

キーワード コンクリート, 塩化物イオン濃度分布, 乾湿繰り返し, 移流拡散方程式

$$D_w(\theta) = D_w^0 \exp(n\theta), \quad n=6 \quad (2)$$

D_w^0 : 完全乾燥状態での水の拡散係数 (mm^2/s)

モルタル: $D_w^0 = 5.533 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$,

コンクリート: $D_w^0 = 9.080 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$

$$D_d(\theta) = D_d^s \left(\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \{(1 - \alpha_0)/(1 - \theta_c)\}^N} \right) \quad (3)$$

$\alpha_0 = 0.05$, $\theta_c = 0.75$, $N = 16$

D_d^s : 飽和状態での水の拡散係数 (mm^2/s)

モルタル: $D_d^s = 2.850 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$

コンクリート: $D_d^s = 1.400 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{s}$

3.2 塩化物イオン濃度分布計算

塩化物イオン濃度 C_t (mm^2/s) の計算は移流拡散方程式 (式(4)) を用いた。

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot (j_{c,cl} + j_{d,cl}) \quad (4)$$

$j_{c,cl}, j_{d,cl}$: 移流, 拡散による流量フラックス ($\text{mol}/\text{mm}^2/\text{s}$)

なお計算には固定塩化物イオンと自由塩化物イオンの両方を考慮し, 全塩化物イオンはその和を示す。

また, 境界条件として, 浸漬時の浸漬面における塩化物イオン濃度は 1 度目の浸漬時では溶液の濃度と同じとした。2 度目以降の浸漬時ではその前の乾燥後の濃度からある程度の時間 (Δt) をかけて溶液中の濃度に近づくように設定した。これは, 内部に含まれる塩化物イオン量が実験結果と同程度になるようにするためである。そのため, Δt は繰り返し計算を行うことで試行錯誤的に定めた。また, 乾燥時の浸漬面では全塩化物イオンの流量フラックスはゼロとした。各 case の計算結果と実験によって得られた濃度分布の比較を図 3 に示す。表面から 2mm 程度までの塩化物イオン濃度の計算結果を見ると, 急激に変化しているのが分かる。これは, 乾燥時に乾燥装置を用いたため, 実験結果から計算で求めた乾燥中の水の拡散係数 $D_d(\theta)$ が大きくなり, 浸漬面方向への水の移動が活発になり, 移流の影響が顕著に現れたと考えられる。表面から 10 mm 以深では概ね実験結果に近い濃度分布を得た。そのため, Δt を適切に定めることができれば, このモデルによる塩化物イオン濃度分布の予測ができることが示唆された。今後, 実験により表面での塩化物イオン濃度変化のメカニズムを捉える必要がある。

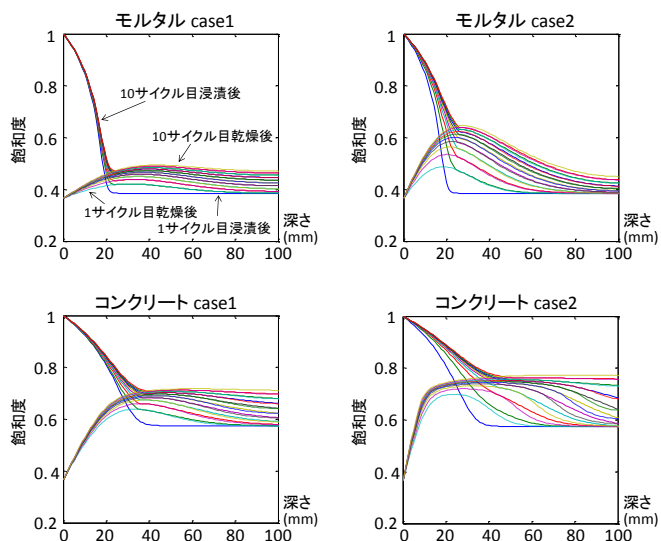


図 2 飽和度分布

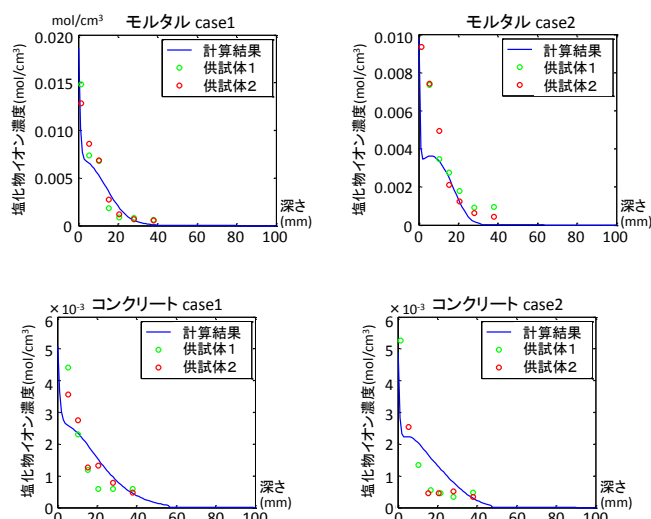


図 3 塩化物イオン濃度分布

4. 結論

- 1) 移流の影響により乾燥時間が長い方が表面付近の塩化物イオン濃度が高くなると考えられる。
- 2) 浸漬時の表面での塩化物イオン濃度変化のメカニズムを捉えることができれば, 移流拡散方程式に基づいたモデルを用いて塩化物イオン濃度分布の予測ができることが示唆された。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 15H02261 の助成を受けた。

参考文献

- 1) Li et al., THINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY ISSN, Vol.13, No. 5, 1007-0214, 19/25, pp696-701, October, 2008
- 2) Lin et al., Cement & Concrete Composites 32, pp571-579, 2010
- 3) S.F.Wong et al. Magazine of Concrete Research, pp205-220, 2001