

移流拡散方程式を用いたコンクリート表層部への塩分侵入における乾湿繰り返しの影響の評価

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○三歩一 奏人
 京都大学大学院工学研究科 学生員 野口 恭平
 京都大学大学院工学研究科 学生員 秦 聡一郎

京都大学大学院工学研究科 正会員 安 琳
 東京電力(株) (研究当時京都大学大学院生) 金城 佑紀
 京都大学大学院工学研究科 正会員 白土 博通

1. 序論 飛来塩分に起因する海岸近辺のコンクリート構造物の劣化は塩害の大きな項目の1つであり、塩分付着量の定量的評価、及び浸透塩分量予測は内部の鋼材の劣化予測、引いては部材の維持管理において重要である。また、腐食は一度顕在化すると進行が速いため、潜伏期を正確に評価することが求められる。コンクリート表層部の塩化物イオン濃度分布は Fick の拡散方程式を利用し、見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を設定して評価されるが、この2つのパラメータは環境の変化を考慮して設定しなければ精度が低下する可能性がある。コンクリート外部環境の変化として、雨と湿度変化による乾湿の繰り返し、及び海陸風による塩分供給の繰り返しが考えられるが、それらを踏まえた塩化物イオンの浸透機構は十分に解明されていない。本研究では飛来塩分の侵入に着目し、室内試験、数値計算を基にコンクリート表層部への塩分侵入における乾湿繰り返しの影響を検討する。

2. 乾湿繰り返し試験 乾湿の繰り返しがコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布に及ぼす影響を調べるために室内試験を恒温恒湿室内で行った。まずコンクリート供試体(150×150×50mm)のうち150×50mmの一面から10%塩化ナトリウム水溶液を1分間侵入させ、その後一定時間乾燥させた。浸入面以外はエポキシ樹脂で覆うことで水の出入りが生じないようにした。この浸入と乾燥の操作を1サイクルとし全部で20サイクル行った。20サイクル終了後に浸入面から15mmごとの全塩化物イオン濃度(質量濃度)を電位差滴定により測定した。また、浸入方法は毛細管の吸水原理を利用し1分間塩水に漬ける方法(浸漬)と、蒸気拡散による吸湿原理を利用し霧吹きで塩水を吹付ける方法(霧吹き)の2つを用いており、それぞれ3つの供試体に対し

表1 各 case の浸入・乾燥時間

case No.	浸入時間	乾燥時間
1	1 min	30 min
2	1 min	2 h
3	1 min	12 h
4	1 min	3 days

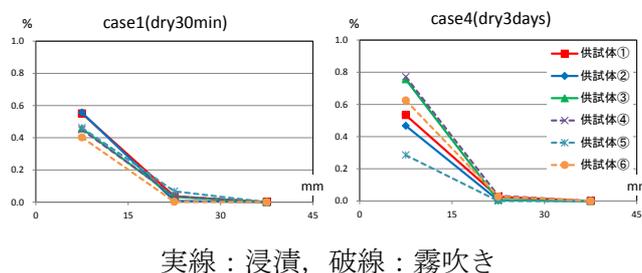


図1 case1, case4 の塩化物イオン質量濃度分布

て行った。乾燥時間を4通りに変えて同様の操作を行った(表1)。case1とcase4の実験結果を図1に示す。乾燥時間が長いほど内部の塩化物イオン濃度が大きくなると分かった。蒸発の際、塩化物イオンは内部に残るが、乾燥時間が長くなるほど水の蒸発量及び内部への移動量が多くなり各サイクルでの吸収量が増加するため、塩化物イオンの侵入量が多くなることが要因と考えられる。一方で、霧吹きと浸漬の違いが顕著に表れなかった原因として供試体の個体差や計測回数が少ないことが考えられる。また、霧吹きによる浸入方法の改善が必要である。より詳細な塩化物イオン濃度分布を得るために、測定精度を高める必要がある。

3. 乾湿繰り返し後の塩化物イオン濃度分布計算 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150mm

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

の1次元領域とし、奥行と幅は考えないものとする。

3.1 飽和度分布計算 飽和度分布を求める際の支配方程式は Fick の拡散方程式 (式(1)) である。拡散係数 $D(\theta)$ は、浸漬の場合では毛細管の吸水による拡散が支配的な範囲では式(2)を、蒸気拡散が支配的な範囲では式(3)を用いた³⁾。また霧吹きは全領域で式(3)を適用した。式中の拡散係数は別途室内試験を行い決定した。

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

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)

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

$D_w^0 = 1.723 \times 10^{-6}$: 完全乾燥での水の拡散係数(mm²/s)

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

$$\alpha_0 = 0.98, \quad \theta_c = 0.071, \quad N = 0.8$$

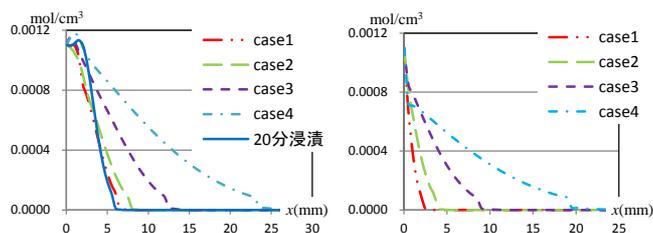
$D_d^s = 1.820 \times 10^{-4}$: 飽和状態での水の拡散係数(mm²/s)

3.2 塩化物イオン濃度計算 塩化物イオン濃度 C_t (mm²/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(mol/mm²/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。

図2に20サイクル目の浸入後の塩化物イオン濃度分布の計算結果を示す。浸漬の場合、乾燥時間の長い case3, case4 では浸入終了後の塩化物イオン分布は浸入面から2mm付近でピークを示す。これは表層部で水の移流が支配的なためと考えられる。一方、霧吹きの場合はピークは見られず、乾燥時間や浸入面からの距離に関わらず拡散が支配的と分かる。また、

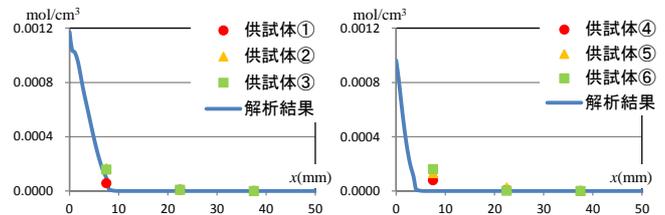


左図: 浸漬, 右図: 霧吹き

図2 20サイクル目の浸入後の塩化物イオン分布

図中の実線は乾燥なしで吸水を20分間継続させた計算結果である。乾湿を繰り返す方がサイクルごとの毛細管による吸水力が大きくなるため、塩化物イオン濃度、塩化物イオン到達域は大きくなると分かる。

4. 室内試験と数値計算の比較 図3に乾燥時間が2時間の場合の室内試験と数値計算の比較を示す。浸漬は両者の差は小さいが測定箇所不足により解析の妥当性は問い難い。今後、室内試験の精度を高めるとともに試料の採取方法を検討し、解析の妥当性を検証する必要がある。また、霧吹きは全領域で蒸気拡散を仮定したが、粒径が大きく部分的に毛細管による吸水が生じたため両者の間に差が生じたと考えられる。また、拡散係数、境界条件は試験的に導入したため、室内試験あるいは現地観測の結果を表すよう最適値を決定する必要がある。



左図: 浸漬, 右図: 霧吹き

図3 室内試験と数値計算の比較

5. 結論と課題

- 1) 室内試験より、乾燥時間とともに各サイクルでの吸収量が増加し内部の塩化物イオン濃度が大きくなると分かった。乾燥時間が長くなると毛細管による吸水力つまり移流の影響が大きくなるためと考えられる。
- 2) 乾湿を繰り返すことで内部の塩化物イオンの濃度及び到達域は大きくなることが分かった。
- 3) 室内試験や数値解析を通して霧吹きで用いる拡散係数、制約条件を決定する必要がある。

謝辞 室内試験では、京都大学技術職員平野裕一氏、と宮坂康弘氏の御協力を得た。ここに記して謝意を表す。

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