

飽和コンクリート中における塩化物イオンの移動のモデル化

広島大学大学院工学研究科
 広島大学大学院工学研究科
 広島大学大学院工学研究科
 広島大学工学部

正会員 河合 研至
 正会員 佐藤 良一
 学生会員○石田 剛朗
 非会員 南 順子

1 はじめに

コンクリート構造物の供用期間における耐久性を評価するには、劣化の進行予測を行うことが重要である。また、近年構造物の設計法が性能照査型設計法へと移行したことに伴い、正確な劣化進行予測の必要性はますます高まっているといえる。コンクリートの劣化の代表的なものとしては、塩害や中性化による鉄筋腐食が挙げられる。これらの問題に対しては、過去から現在に至るまで数多くの劣化進行予測に関する研究が行われているが、現状では十分な予測方法の確立には至っていない。そこで本研究では、将来複合的な劣化進行予測を行うことを目標として、飽和コンクリート中における塩化物イオンの移動のモデル化を行い、一次元有限要素法を用いた解析と実験結果との比較を行った。

2 解析モデル

塩化物イオンの移動モデルの概念を図1に示す。コンクリートの微小要素を液相と固相に分けてモデル化した。また、水和は十分に進行しているものと仮定し、全体の体積は一定とした。ただし、フリーデル氏塩が生成する場合には液相と固相の体積比が変化するものとする。塩化物イオンの移動には、濃度拡散とフリーデル氏塩の生成による固定が関与すると仮定し、濃度拡散はFickの第2法則に従い、一次元方向のみを考えるものとした。また、フリーデル氏塩の生成に関しては、反応を1次反応と仮定した。これらの支配方程式は以下ようになる。

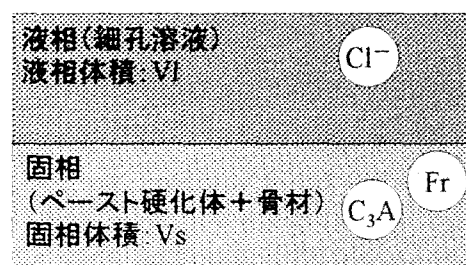


図1 モデルの概念

$$\frac{\partial C_{Cl}}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C_{Cl}}{\partial x^2} + 2q$$

$$q = \begin{cases} -kC_{Cl}C_{C_3A} & (C_{Cl} \geq C_{frmn}) \\ 0 & (C_{Cl} < C_{frmn}) \end{cases}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_s + V_l) = 0$$

C_{Cl} : 微小要素の液相における塩化物イオン濃度
 K : 微小要素の液相における Cl^- の拡散係数
 q : フリーデル氏塩の生成速度
 k : フリーデル氏塩の生成速度係数
 C_{frmn} : フリーデル氏塩の生成下限濃度
 C_{C_3A} : 微小要素の固相における C_3A 濃度
 V_s : 固相体積
 V_l : 液相体積

3 実験概要

3.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント（以下NCと称す）とエコセメント（以下ECと称す）の2種類を使用した。化学組成、鉱物組成を表1に示す。ECはNCと比較して化学組成ではClの含有量が多く、鉱物組成では C_3A の含有量が多いなどの特徴がある。

表1 化学組成および鉱物組成

セメント	化学組成(%)									セメント	鉱物組成(%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NC	20.1	5.04	3.08	64.3	1.13	2.09	0.30	0.37	0.01	NC	64.8	9.4	8.2	9.4
EC	17.1	7.94	4.36	61.4	1.80	3.74	0.24	0.02	0.054	EC	52.2	9.6	13.7	13.3

3. 2 塩化物イオンの拡散実験

供試体には $W/C=0.60$ のコンクリートを使用し、 $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ の型枠に打設後、脱型して水和が十分に進行するまで水中養生を行った。養生終了後供試体を所定の幅にスライスし、前処理として24時間の真空脱気および24時間の純水浸漬を行った。その後、図2に示す拡散セルに設置した。定期的に3%NaCl溶液側と純水側のセル溶液を採取し、 Cl^- 濃度を測定することにより、 Cl^- の移動量を求めた。

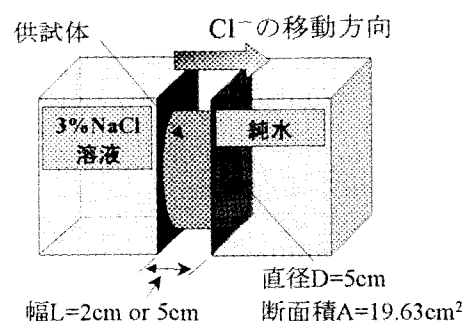


図2 拡散セル

4 実験結果および考察

拡散セル実験から得た Cl^- 移動量の経時変化および解析結果を図3、図4に示す。NaCl側からの流出量および純水側への流入量を示しているが、NC5cmの供試体については実験開始から350日を経過しても純水側の Cl^- 濃度は検出可能なまでに達しなかった。

Cl^- 流入量に関しては、それぞれ実験値と解析値は良く一致している。NC5cmに関しても、解析結果は実験結果と同じく、ほとんど流入量は増加しなかった。これらのことから、ある程度モデルの妥当性が確認された。しかしながら、 Cl^- 流出量に関しては解析値は概ね実験値よりも低い値を示しており、これは実際の Cl^- の拡散現象が一次元方向だけでなく三次元的に起きているためと考えられる。

また、表2に実験結果より求めた拡散係数および解析に用いた条件を示す。筆者らの過去の研究から、 $W/C=0.60$ のセメントペーストと比較した場合、ECはNCに比べ空隙量が多いという結果が得られており、このことを考慮して解析条件ではECの液相体積比をNCよりも大きく設定している。また、ECは C_3A の含有量が多いことから、フリーデル氏塩の最大生成量も大きく設定している。しかしながら、実験結果と合致するためには、解析条件において拡散係数を $\text{EC5cm} > \text{EC2cm} > \text{NC2cm}$ のように設定せねばならず、これは実験から得られた拡散係数とオーダーは異なるものの、定性的な傾向は同様である。よって、空隙量やフリーデル氏塩による固定の他に、ECとNCの塩化物イオンの移動速度の違いに影響を与えている因子が存在すると考えられる。

5 結論

飽和コンクリート中における塩化物イオンの移動のモデル化を行い、拡散セル実験と解析結果の比較を行った。その結果、ある程度モデルの妥当性は確認されたが、より精度良く解析を行うためには、三次元拡散や本モデルに含まれていない他の因子を考慮する必要があると考えられる。

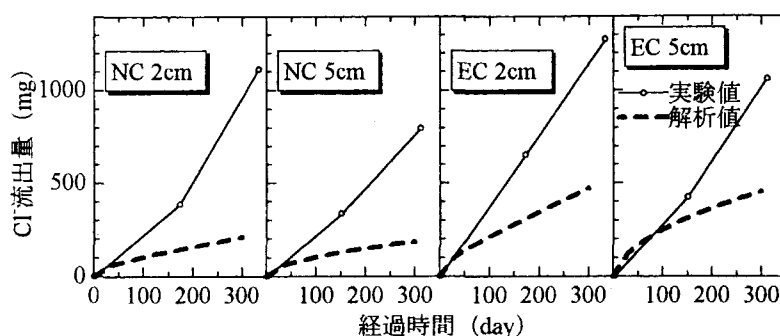


図3 Cl^- 流出量 (NaCl側)

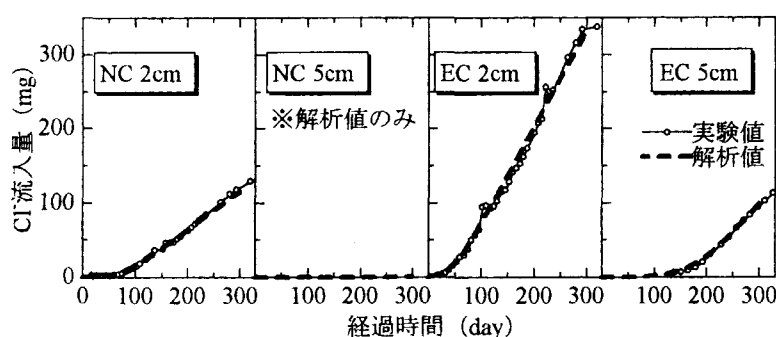


図4 Cl^- 流入量 (純水側)

表2 拡散係数および解析条件

		拡散係数 (cm^2/sec) (実験結果)	解析条件			
			拡散係数 (cm^2/sec)	フリーデル氏塩の 生成速度係数	固相体積比	液相体積比
NC	2cm	3.43×10^{-8}	4.40×10^{-7}	9.15	0.91	0.09
	5cm	—	4.40×10^{-7}	9.15	0.91	0.09
EC	2cm	8.26×10^{-8}	9.49×10^{-7}	9.15	0.88	0.12
	5cm	1.00×10^{-7}	1.45×10^{-6}	9.15	0.88	0.12