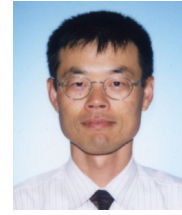


# 塩化物イオンのコンクリートへの浸透予測に関する研究



中国土木施工管理技士会連合会  
アイサワ工業株式会社  
細谷多慶

## 1. はじめに

コンクリート構造物の適切な耐久性評価には、設計ならびに維持管理の各段階における詳細な耐久性予測が重要となる。ところが、実環境下におかれるコンクリート構造物はさまざまな劣化作用を受けるため、コンクリート構造物の耐久性を正確に予測するためには、塩害、中性化、凍結融解、アルカリ骨材反応、化学的侵食等の劣化メカニズムにおける劣化因子の浸透予測が重要となる。中でも塩害はコンクリート構造物内部の補強材の耐久性に大きく影響するため、塩害の劣化因子である塩化物イオンの浸透予測はコンクリート構造物の耐久性を予測する上で最も重要となる。本研究は、コンクリート構造物の耐久性に最も大きな影響を与える塩化物イオンの浸透性を実験的アプローチと解析的アプローチの両面から評価し、数値解析に必要となる飽和塩化物イオン量と拡散係数ならびに境界条件となるフィルム係数について算出方法も含めて検討を加え、FEM 解析による塩化物イオンのコンクリート構造物への浸透予測手法を提案するものである。

## 2. FEM 解析の必要性

土木学会コンクリート標準示方書では、塩化物イオンの侵入に関するコンクリート構造物の性能照査にあたり、想定する耐用年数時点の鋼材位置において式 1 に示す Fick の第 2 法則に基づく拡散方程式の解を用いて推定した塩化物イオン濃度に着目している。

$$C(x,t) - C_i = C_{a0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad \text{式 1}$$

ここで、 $C_{a0}$  : コンクリート表面の全塩化物イオン(%),  $x$  : かぶり(cm),  $t$  : 時間 (年),  $D_{ap}$  : 浸せき試験による見かけの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ ),  $C_i$  : コンクリート単位質量あたりの初期全塩化物イオン(% )である。

この手法は、拡散方程式の解を用いて回帰分析によりコンクリート表面の塩化物イオンならびに見掛けの拡散係数を算出し、想定する耐用年数時点の塩化物イオンの浸透予測を行う方法である。しかし、拡散方程式の解を用いて塩化物イオンの浸透予測を行う手法では、浸せき時間、供試体形状、浸透方向、材料等に対して様々な条件を設定し、浸透予測を行うため、求めた塩化物イオン浸透予測結果の適応条件は限定的なものとなる。そこで、コンクリート構造物の適切な耐

久性評価のためには、実環境下におけるコンクリート構造物に対する塩化物イオンの正確な浸透予測手法の開発が必要となる。実際のコンクリート構造物は、使用目的、使用条件、使用環境に応じて様々な設計がなされ、その形状は多種多様となり、コンクリート構造物の耐久性に影響を与える塩化物イオンは、あらゆる方向からコンクリート内部に浸透してくる。一方、コンクリート構造物を取り巻く外部環境条件は一様でなく、コンクリート内部に浸透する塩化物イオンは場所的な強弱、時間的な不均一性を有する。よって、様々な条件を考慮した実環境下のコンクリート構造物に対する塩化物イオンの浸透予測を行うためには、FEM を用いた数値解析による予測手法が最も有効と考えられる。

### 3. 研究結果

#### 3.1 飽和塩化物イオン量 Ca の算出

塩化物イオンの浸透を正確に予測するためには、最終的な表面塩化物イオン量と初期塩化物イオン量の差である飽和塩化物イオン量 Ca の把握が重要となる。土木学会提案式における誤差関数を用いた Fick の第 2 法則に基づく拡散方程式の解を用いて推定する予測手法では、測定した塩化物イオン分布曲線から表面塩化物イオン量を推定し、飽和塩化物イオン量を算出している。しかし、浸せき期間あるいは浸せき条件によっては算出した値が最終的な飽和塩化物イオン量となっておらず、塩化物イオン量の予測結果が危険側に予測される可能性がある。また、表面塩化物イオンの直接の測定は困難であり、表面近傍における塩化物イオンの分布から推定する場合、測定者によって多くの誤差を含む可能性がある。そこで、本研究では下記に示す様々な方法により飽和塩化物イオン量を算出し、塩化物イオンの浸透予測を行った。

- (1) モルタル薄片供試体の長期浸せきによる飽和塩化物イオン量の算出 (図-1)
- (2) セメントペースト薄片供試体による飽和塩化物イオン量の算出 (図-2)
- (3) モルタル粉状供試体による飽和塩化物イオン量の算出
- (4) 土木学会提案式による表面塩化物イオン量の算出

FEM 解析を用いた塩化物イオンの浸透予測では、浸せき期間 400 日におけるモルタル薄片供試体から算出した飽和塩化物イオン量を用いた。しかし、飽和塩化物イオン量の算出に長時間が必要であるため、実務的には短時間で算出できるセメントペースト薄片供試体あるいはモルタル粉状供試体を用いた飽和塩化物イオン量の算出方法が有効な手法と考えられる。

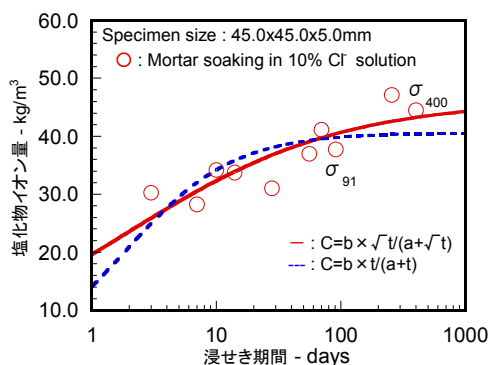


図-1 モルタル薄片供試体の Ca

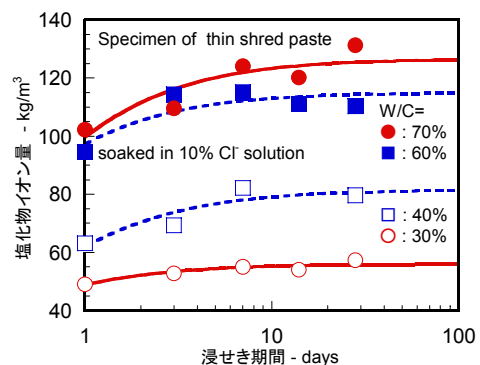


図-2 セメントペースト薄片供試体の Ca

### 3.2 拡散係数 D の算出

塩化物イオン浸透予測を行う際に必要となる拡散係数 D の概念図を図- 3 に示す。また、本研究で用いた拡散係数の算定式を式 2 に示す。本研究における拡散係数は概念図の分子項/分母項で表されるように任意の時間における塩化物イオン浸透性を表す係数であり、時間的範囲を考慮した拡散係数となる。一方、式 1 に示す算定式で取り扱う拡散係数は図中の一つの D であり、一つの時間における塩化物イオン浸透性を表す拡散係数となる。よって、長期にわたる高精度な FEM 解析を行う場合には、時間的範囲を考慮した拡散係数を用いる必要があると考える。

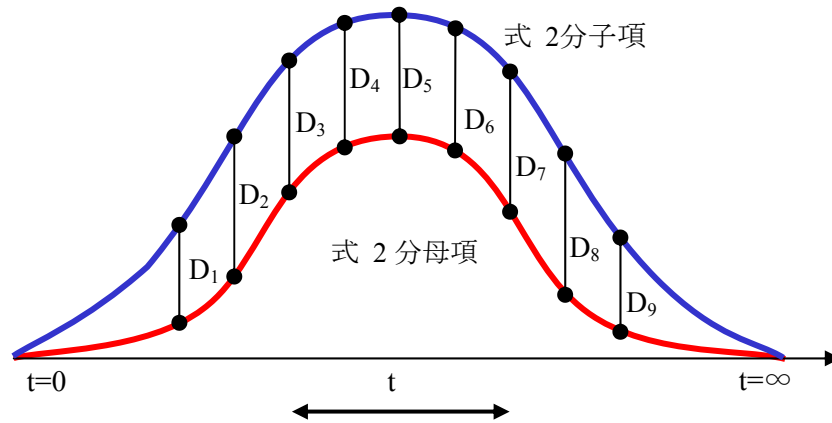


図- 3 拡散係数 D の概念図

$$D = \frac{\int_0^t \left( C(0,t) \cdot q_t - \int_0^L C(x,t) \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} dx \right) dt}{\int_0^t \int_0^L \left( \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right)^2 dx dt} \quad \text{式 2}$$

ここで、D：塩化物イオン拡散係数(m<sup>2</sup>/day)、C(x,t)：任意位置および任意時間における塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)、C(0,t)：供試体表面における塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)、L：供試体表面から端部までの距離(m)、x：供試体表面からの距離(m)、t：浸せき期間(day)である。

### 3.3 フィルム係数 H<sub>F</sub> の算出

本研究では、FEM 解析で必要となる境界条件として供試体表面での塩化物イオンのやりとりを表すフィルム係数 H<sub>F</sub> を提案する (式 3)。図- 4 に 1 方向からの浸透を受ける場合の供試体表面と供試体内部での塩化物イオンの関係を示す。塩化物イオンの浸透において単位時間、単位面積当たりに浸透する塩化物イオン量 q<sub>t</sub> は、供試体内部において単位時間当たりに増加した塩化物イオン量 ΔQ/Δt に等しく、供試体表面における浸透可能な塩化物イオン量 C<sub>a</sub>-C<sub>surface</sub> に関係すると考えられ、この関係を表す係数をフィルム係数とする。フィルム係数は、材料特性に応じた最終的な表面飽和塩化物イオン濃度を考慮した係数である。図- 5 に q<sub>t</sub> と C<sub>a</sub>-C<sub>surface</sub> の関係を示す。

$$q_t = H_F \cdot (C_a - C_{surface}) \quad \text{式 3}$$

ここで、 $q_t$ ：単位時間、単位面積あたりに浸透する塩化物イオン量( $\text{kg/day}\cdot\text{m}^2$ )、 $H_F$ ：フィルム係数( $\text{m/day}$ )、 $C_a$ ：飽和塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_{\text{surface}}$ ：任意時間における表面塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ )である。

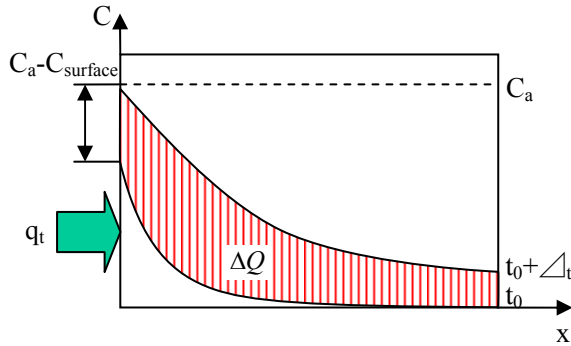


図- 4 塩化物イオンの浸透

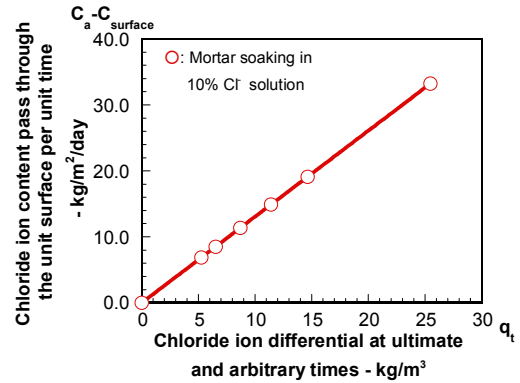


図- 5  $q_t$  と  $C_a - C_{\text{surface}}$  の関係

### 3.4 解析結果

本研究で算出した飽和塩化物イオン量，拡散係数，フィルム係数を用いて一方向からの浸透を受ける場合の単一材料ならびに複合材料から構成される供試体に対して塩化物イオンの浸透予測を行った結果を図- 6，図- 7，図- 8，図- 9に示す。図中の点は実測値，曲線は解析値である。これらの図から明らかなように実測値と解析値はよく一致し，本手法の妥当性が確認できる。

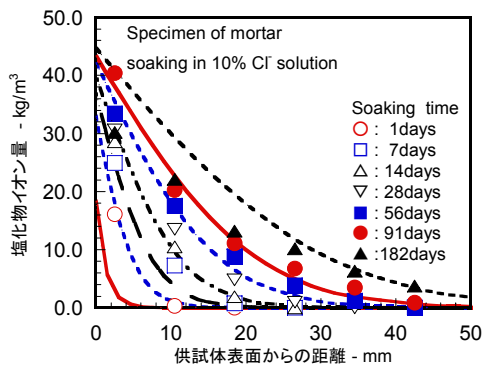


図- 6 モルタル供試体

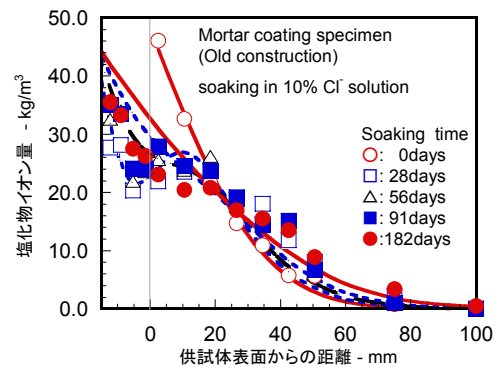


図- 7 モルタル+モルタル供試体

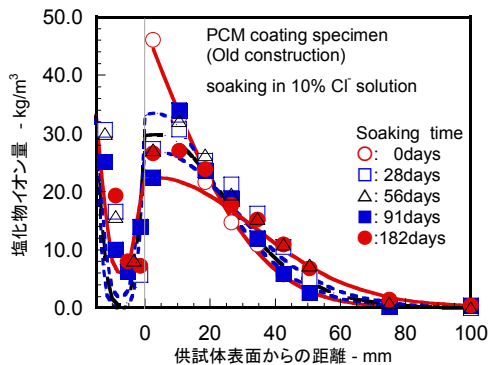


図- 8 PCM+モルタル供試体

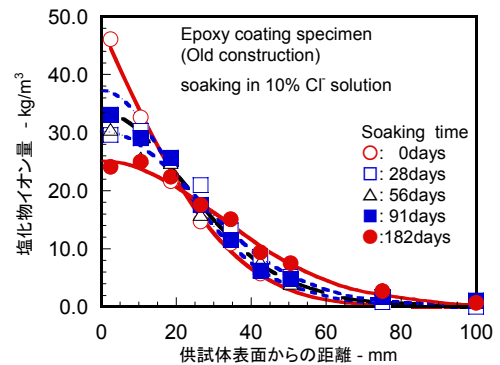


図- 9 エポキシ樹脂+モルタル供試体

FEM 解析を用いて単一材料ならびに複合材料に対する一方向からの塩化物イオンの浸透を受ける場合の塩化物イオン浸透予測が可能である事がわかった。そこで、実環境下におけるコンクリート構造物の塩化物イオン浸透性を把握するために、多方向からの浸透を受ける場合の任意形状の供試体に対して FEM 解析を用いて塩化物イオンの浸透予測を行った。図- 10、図- 11 に FEM 解析結果を示す。これらの図から明らかなように FEM 解析を用いて任意形状のコンクリート構造物に対する 2 次元ならびに 3 次元の塩化物イオン浸透予測が可能である事がわかる。

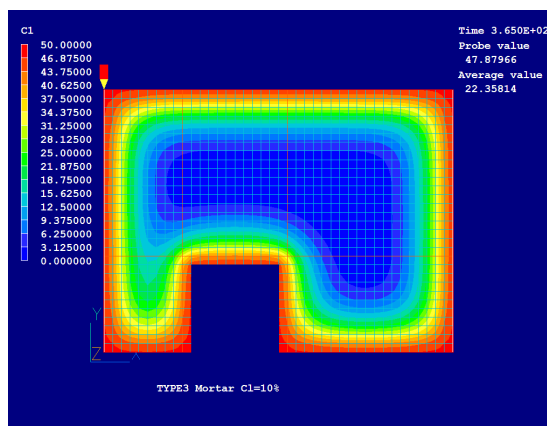


図- 10 2次元 FEM 解析

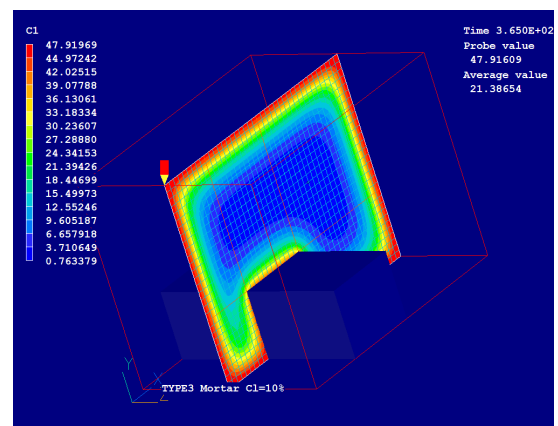


図- 11 3次元 FEM 解析

#### 4. 結論

FEM 解析を用いた塩化物イオン浸透予測では、長期浸せき期間を考慮した飽和塩化物イオン量ならびに拡散係数を用いることにより長期における塩化物イオンの浸透予測結果の信頼性が向上し、新設構造物の設計ならびに既設構造物の維持管理に対する適切な計画が可能となった。また、複合材料から構成される構造物に対する塩化物イオン浸透予測が可能であることから、従来手法では困難であった表面被覆工法により表面補修を行ったあるいは行う場合のコンクリート構造物に対する塩化物イオンの浸透予測が可能となり、補修が必要となるコンクリート構造物に対して適切な維持管理メンテナンス計画が可能となった。さらに、任意形状のコンクリート構造物に対する塩化物イオン浸透予測が可能であることから、構造物の部分的な検討ではなく構造物全体の耐久性を考慮した設計が可能となった。以上より、FEM 解析を用いた塩化物イオンの浸透予測は、高精度なコンクリート構造物の耐久性予測手法の一つとして有効であると考えられる。

#### 参考文献

1. コンクリート中の微細なひび割れが塩分浸透性に及ぼす影響：細谷多慶，森脇拓也，綾野克紀，阪田憲次，コンクリート工学年次論文報告集，第 26 巻，第 1 号，1011 項～1016 項，2004 年 6 月
2. 劣化したコンクリートの塩分浸透性に関する研究：細谷多慶，森脇拓也，綾野克紀，阪田憲次，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集，第 4 巻，143 項～148 項，2004 年 10 月
3. コンクリート中の塩化物イオンの拡散および固定化の予測に関する研究：細谷多慶，森脇拓也，綾野克紀，阪田憲次，コンクリート工学年次論文報告集，第 27 巻，第 1 号，685 項～690 項，2005 年 6 月