

コンクリート構造物の塩害劣化三次元シミュレーションの構築

鹿児島大学 学生会員 ○岩永 真弘
鹿児島大学 正会員 武若 耕司

鹿児島大学 正会員 山口 明伸
鹿児島大学 正会員 前田 聡

1. はじめに

近年、塩害によって鉄筋コンクリート構造物の早期劣化が社会問題化している。この塩害のメカニズムは様々な研究により解明されてきたが、実際の鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化を定量的に予測し、評価する手法の開発は、あまり進行しているとは言えない。その理由として、コンクリートは、様々な材料からなり、内部構造が極めて不均一であること、また、人為的要素が絡むため、同じ配合で製造しても、ばらつきがでやすい材料から成るなどの要因が挙げられる。これに対して本研究グループでは、塩害劣化を想定した二次元シミュレーションモデルを提案している。ただし、これは三次元現象を二次元的表現したものであるため、実現象とは逸脱する部分を含まざるを得ないという問題があった。そこで、本研究では、この問題点を解決し、実現象に即した評価・解析を行うために、既往モデルの三次元への拡張を試みた。

2. 塩害劣化三次元シミュレーションの概要

2.1 鉄筋コンクリートの三次元モデル

鉄筋コンクリートは、大きく分けて鉄筋とコンクリートから成るが、そのコンクリートは、毛細管空隙（ $10^{-6} \sim 10^{-3}$ cm）と欠陥空隙（ $10^{-3} \sim 10^{-1}$ cm）を含むセメントペースト、細骨材（0.015～1cm）、粗骨材（0.25cm 以上）に分類される。本モデルでは、コンクリート内に存在する空隙や骨材を球で表現し、それらの径の分布及び、量は使用材料や配合条件に応じて決定できる。具体的には、空隙をあらわす球（以下空隙球と称す）についてはセメントの種類と W/C によって決定し、骨材を表す球（以下骨材球と称す）については粒度分布と単位粗骨材量、細骨材率に応じて設定することができる。また、空隙を表す球（以下空隙球と称す）と骨材球の位置は、コンクリートの品質のばらつきを表現するために、設定体積内にランダムに配置するものとした。さらに、相対湿度等の環境条件の影響を加味するために、想定環境湿度に応じて骨材と空隙を湿潤状態と乾燥状態に分類することとした。一方鉄筋については、対象とする部材の設計かぶりに応じて配置し、局部的な劣化状況を評価するために、電気的な接続は保ち、1cm ごとにセクション分けした設定となっている。図-1 に三次元コンクリートモデルの設定状況の一例を示す。

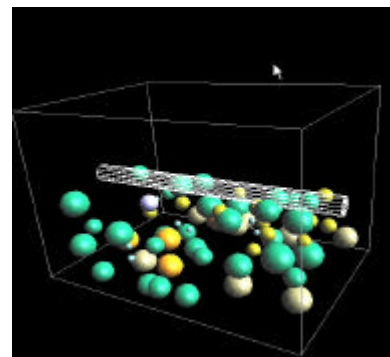


図 - 1 鉄筋コンクリートモデル

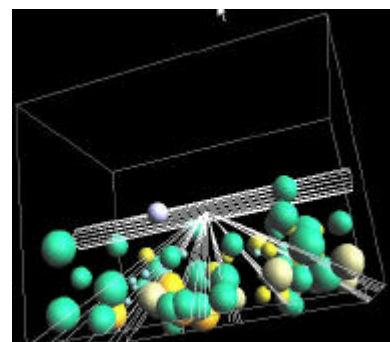


図 - 2 走査線モデル

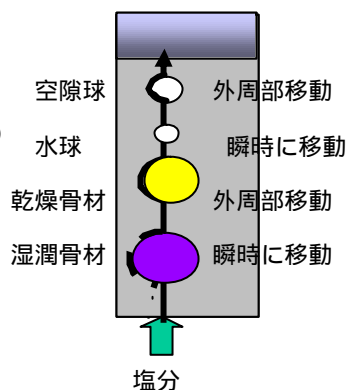


図 - 3 拡散モデル

2.2 腐食因子（塩分）の拡散モデル

塩害劣化は、一般に腐食因子である塩分がコンクリート内部を拡散により浸透することにより鉄筋位置にまで到達し、鉄筋を腐食させ進行する。この塩分の拡散経路はコンクリート部材内に無数に存在するが、本モデルでは、コンクリート表面から各鉄筋セクションへの最短経路を決定するために直線走査線による探索手法を用いた。図-2 は、ある一つの鉄筋セクションから経路探索のための走査線を引いた状況を示したものである。1鉄筋セクション

$$T = \frac{L_2}{12 \cdot D \left(1 - \frac{\sqrt{C_L}}{\sqrt{C_0}} \right)^2} \quad (1)$$

L：実質拡散経路長、 C_L ：許容限界塩分量
D：健全部塩分拡散係数
 C_0 ：コンクリート表面の塩分量

キーワード 塩害シミュレーション 鉄筋コンクリートモデル 塩分拡散係数
連絡先〒890-0065 鹿児島市郡元町 1-21-40 海洋土木工学科 TEL 099-285-8480

当たり数千本となる走査線全てに対し、各走査線が交差する空隙と骨材の影響を図-3のように考えて拡散時間を式(1)を用いて計算し、最も短時間で鉄筋に到達した経路をその鉄筋セクションの塩分拡散経路とした。

3. シミュレーションモデルによる塩分浸透性評価

3.1 走査線における塩分浸透性のばらつき

図-4は、2.2の最短拡散経路決定の際に計算された全走査線の塩分拡散時間を拡散係数で整理した例であり、この結果はモデル内部の塩分拡散係数のばらつきを示している。比較のために、モデル内を細骨材モルタル 24[vol. %]を含むモルタルとした場合と、粗骨材と細骨材をそれぞれ 39[vol. %]と 21[vol. %]配置したコンクリートの場合の2例を示す。なお、いずれの場合も相対湿度は 85% に設定している。図より、粗骨材を加えることにより、コンクリートの塩分拡散係数は全体的に大きくなるとともに、そのばらつきも大きくなることが示唆され、粗骨材が塩分拡散係数に及ぼす影響が大きいという実現象に合致した傾向を示している。

3.2 湿潤骨材周囲の拡散性状の検討

本モデルでは、塩化物イオンが湿潤骨材周囲を迂回する場合、図-3にもあるように便宜的に塩分は骨材を覆う水の中を瞬時に拡散すると設定している。つまり、湿潤骨材周囲の拡散係数は無限大(∞)であるという仮定をしている。そこで、湿潤骨材周囲のスピードを様々に変動させて拡散性状にどの程度の変化が生じるかをモデルにより検討した。図-5はその解析結果の一例である。湿潤骨材を迂回する塩分が、健全部と同じ速度で拡散する場合は、ほとんど塩分拡散係数にばらつきが見られないが、迂回速度が健全部の一万倍と ∞ の場合では、湿潤骨材の影響が現れ、塩分拡散係数にもばらつきが生じていることが分かる。現在の拡散モデルにおける仮定でもある程度の評価が可能ではあるものの、より定量的な評価を行うためには、湿潤骨材周囲での拡散速度についてさらに検討を加える必要があると考えられる。

3.3 見かけの塩分拡散係数

前項ではコンクリート内部の塩分拡散係数のばらつきを全走査線での計算結果を用いて評価する例を示したが、実際の鉄筋コンクリート部材の塩害劣化は、各鉄筋セクションにおける鉄筋までの最短到達時間により評価することとなる。つまり、各鉄筋セク

ション位置で最短の到達時間を選択し、これをかぶり厚で逆算して求めた拡散係数が、一般に言われるコンクリートの見かけの塩分拡散係数に相当する。長さ 20cm(20 個の鉄筋セクションを有する)鉄筋コンクリート部材に対して、各セクション位置での見かけの拡散係数を算出した結果の一例を図-6に示す。なお、ここでは骨材量を一定にし、相対湿度を変化させ、湿潤骨材周囲の速度を健全部の 1 万倍に設定した場合の結果である。図のように、同一配合のコンクリートであっても塩分の到達時間が場所によって異なる結果を示しており、本モデルによるコンクリート品質の不均一性を表現できている。また、相対湿度が大きくなるほど、見かけの塩分拡散係数とそのばらつきが大きくなっており、湿潤状態のコンクリートの方が塩害劣化を生じやすいことも表わされている。

参考文献 1) Koji TAKEWAKA, Toshinobu YAMAGUCHI and Satoshi MAEDA: Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to Chloride Attack, Journal of Advanced Concrete Technology vol1, Number 2, pp 139-146,2003

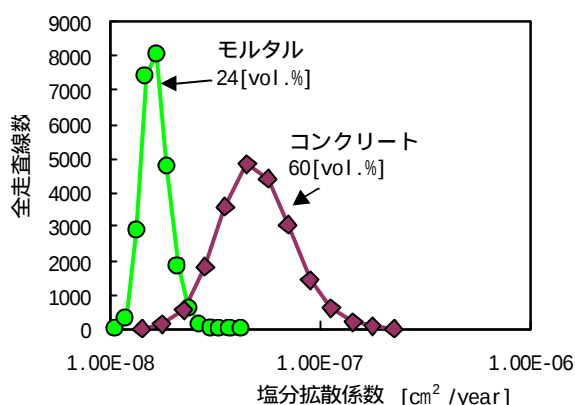


図-4 全走査線における塩分拡散係数

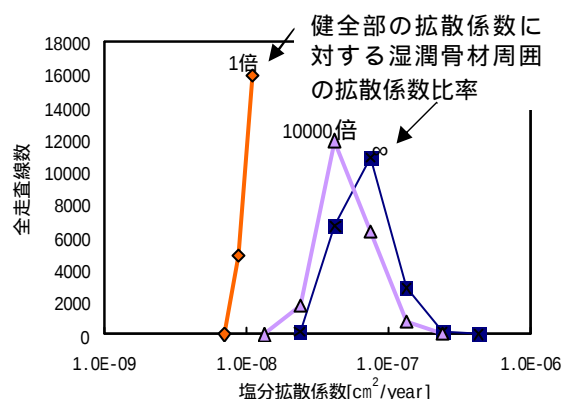


図-5 湿潤骨材周囲の拡散係数検討

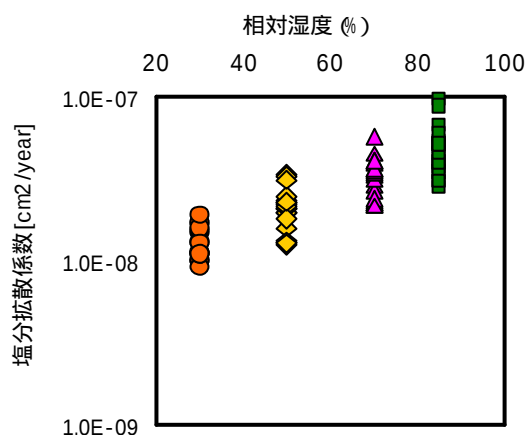


図-6 相対湿度変化における塩分拡散係数