

塩害劣化三次元シミュレーションモデルによる腐食因子の浸透性評価に関する検討

鹿児島大学大学院 学生会員 ○岩永 真弘 鹿児島大学工学部 正会員 武若 耕司
 鹿児島大学工学部 正会員 山口 明伸 鹿児島大学工学部 正会員 前田 聡

1. はじめに

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、あまり進んでいるとは言えない。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、ばらつきの出やすい材料であること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、これらのばらつきの影響も考慮した塩害劣化二次元シミュレーションモデルを提案している¹⁾。ただし、これは三次元現象を二次元的に簡略化して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かった。そこで、本研究では、より実現象に即した評価・解析を行うために既往モデルを三次元へ拡張し、そのモデルの妥当性について検討した。

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、コンクリートはさらに、毛細管空隙や気泡等の空隙を含むセメントペースト、細骨材、粗骨材に分類される。本モデルでは、かぶり部のコンクリート内に存在する空隙や骨材は球で表現し、それらの径、分布および量は使用材料や配合条件に応じて決定できるようになっている。具体的には、空隙を表す球（ここでは、毛細管空隙を細孔空隙球、欠陥空隙を欠陥空隙球と称す）の数(空隙量に相当)についてはセメントの種類と W/C によって決定し、その径分布は下村ら²⁾の細孔容積分布密度関数を用いた。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、細骨材量、粗粒率等に応じて設定することができる。また、空隙球と骨材球の位置は、コンクリートの品質のばらつきを表現するために、モデル内にランダムに配置し、その際、骨材球同士は隣あっても重複しないものと設定する。さらに、コンクリート中の水分の影響を加味するために、相対含水率に応じて骨材や空隙を湿润状態あるいは乾燥状態に設定するようにした。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、局所的な腐食状況を評価できるように、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イメージ図を示す。

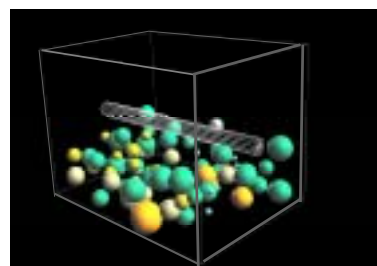


図.1 鉄筋コンクリートモデル

2.2 腐食因子の拡散モデル

コンクリート中への塩分や酸素の浸透性状は、内部鉄筋の腐食開始年数や腐食量を推定する上で極めて重要である。これら腐食因子の拡散経路はコンクリート部材内に無数に存在する。本モデルでは、この点に対応させながらコンクリート表面から各鉄筋セクションへの腐食因子の浸透最短経路を求めるため、直線走査線による探索手法を用いた。この場合、拡散経路が空隙球や骨材球を通る際には、それぞれの含水状態に応じて拡散性能を設定した。例えば、塩化物イオン(Cl^-)の拡散経路については(図.2)、水を含む空隙球(以下、空隙水球)や湿润骨材においては、 Cl^- は水中を拡散するものとし、その際の拡散係数としては、 25°C の溶液中の値 $2.0 \times 10^{-5} [\text{cm}^2/\text{sec}]$ を用い³⁾、乾燥空隙球や乾燥骨材球ではこれらの外周部を拡散するものとした。以上を踏まえ、各走査線を通して鉄筋腐食が開始するのに必要な塩分量が鉄筋セクションに蓄積すると仮定した場合の時間 T は、式(1)⁴⁾によって算定される。そして、この時間 T の最も短い経路で、その鉄筋セクションの腐食発生時間が決定されることになる。このような手法により、空隙や骨材の分布状況によって生じるコンクリート内の塩分拡散性状のばらつきを表現できる。

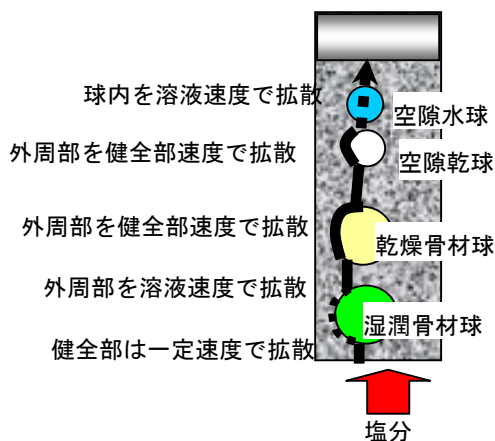


図.2 塩分拡散経路

また、最も短時間で鉄筋に到達した $T_{\min}$ と最小かぶり厚さ L_R を式(2)に代入することにより、一般に使われる見かけの塩分拡散係数を求めることが出来る。一方、酸素の拡散

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

$$D = \frac{L_R^2}{12 \cdot T_{\min} \left(1 - \sqrt{C_L} / \sqrt{C_o}\right)^2} \quad (2)$$

C_L : 不働態皮膜を破壊する鉄筋表面の塩分量
 L : 実質拡散経路長 D : 健全全部塩分拡散係数
 C_o : コンクリート表面の塩分量
 本モデルは C_L : 0.1%, C_o : 0.9% (コンクリート重量)

$$D_{oA} = D_{oc} \cdot \left(\frac{L_R}{L_x}\right)^2 \quad (3)$$

L_x : 最短到達経路長
 L_R : 最小かぶり厚
 D_{oc} : 健全全部酸素拡散係数

経路は図. 3 のように考えた。ここで、水溶液中の酸素の拡散係数は $1E-05 \sim 1E-06$ [cm²/sec] 程度とされていることから今回 $5E-06$ [cm²/sec] と設定し溶存酸素拡散係数としてこれを用い、

気相では急速に拡散するため、基本拡散係数の100倍と設定した。なお、見かけの酸素拡散係数は、式(3)を用いて算出できる。

以上を踏まえて解析手順として図. 4 のように

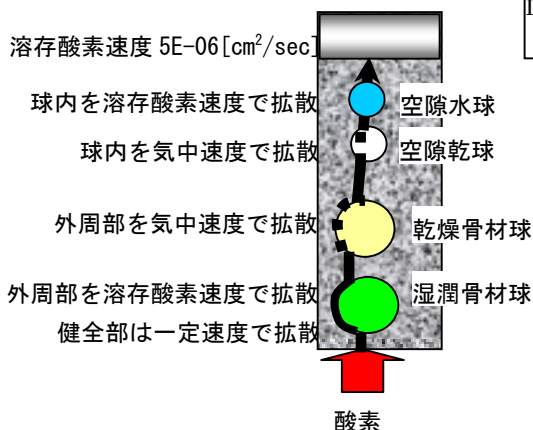


図. 3 酸素拡散経路

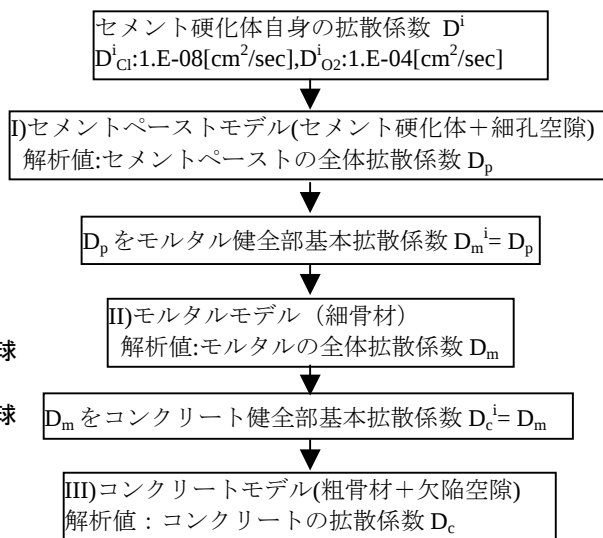


図. 4 解析 STEP

行い、塩化物イオンおよび酸素拡散性の観点から本モデルの妥当性を検証した。

3. 解析結果

図. 5 にコンクリートの塩化物イオン拡散係数の解析結果の一例を示す。各解析値は、モデル中にある 19 の鉄筋セクション位置における解析結果を個別に示したものである。これより、本 3 次元モデル使用した解析結果から実構造物における実測値とほぼ同様な拡散係数の値を得ることが出来ており、W/C との関係に更なる検討は必要であるが、本モデルでコンクリート中の塩化物イオン浸透予測はある程度可能であると考えられる。また、コンクリートの酸素拡散係数の解析結果の一例を図. 6 に示す。なお、解析値はモデル中の 19 の鉄筋セクションそれぞれにおいて算定した値の平均値を求めた。解析値は相対含水率が高いほど水分による遮蔽性が顕著となり、酸素拡散係数は低下する傾向にあり、文献 5) の傾向と一致し、また、相対含水率 50% においては、実測値とほぼ同程度の値が得られた。

参考文献 1) 山口明伸ほか：鉄筋コンクリートのモデル化とそれを用いた塩害評価シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 1, 2002 2) 下村匠ほか：細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 14, No. 1, 1992 3) 横関康祐ほか：水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル，土木学会論文集，No. 725/V-58, 2003 4) Bazant, Z. P. : Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures Theory, Journal of the Structural Division, Vol. 105, 1979 5) 小林一輔ほか：各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol. 24, No. 12, pp91-106, 1986

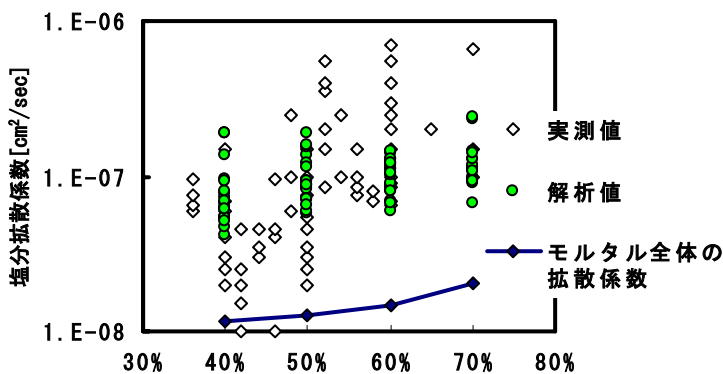


図. 5 w/c と塩分拡散係数の関係 (相対含水率 80%)

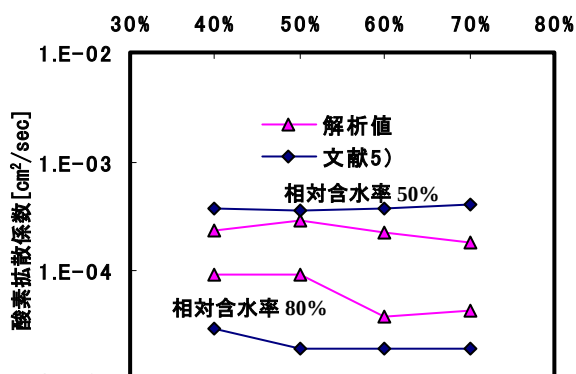


図. 6 w/c と酸素拡散係数の関係