論文 鉄筋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モデル の構築

岩永 真弘^{*1}・武若 耕司^{*2}・山口 明伸^{*3}・前田 聡^{*4}

要旨:本研究では,海洋環境下における実構造物の塩害劣化をシミュレーションするために 著者らが開発した鉄筋コンクリートの二次元モデルを,より実現象に即した三次元に拡張す ることを試みた。この三次元モデルの概要を示すとともに,このモデルを用いて実施したコ ンクリートの塩化物イオン拡散係数や酸素拡散係数の解析結果と実験結果とを比較すること により,本モデルの妥当性を検討した結果ある程度の精度で解析できることがわかった。ま た,初期ひび割れ解析モデルと結果についても述べる。

キーワード: 塩害,塩化物イオン拡散係数,酸素拡散係数,初期ひび割れ,三次元モデル

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害に関してはこれま でに多くの研究成果や観測データが報告されて おり,劣化現象の主要メカニズムはほぼ明らか となっている。にも拘らず,実際の構造物の塩 害劣化を定量的に評価・予測するための手法の 開発は未だ試行錯誤の段階であり,実用レベル に達しているとは言い難い。この理由としては, 塩害自体が極めて複雑な劣化現象であることは もちろん,コンクリート品質のばらつきを始め とする各種要因の影響が十分に把握できていな いこと,実験が長期にわたるため収集できるデ ータに限りがあること等が挙げられる。さらに, 既往の評価技術が高度な専門知識と経験を必要 とするため,専門家以外にはその適用が困難で あることも大きな原因と言える。

これに対して著者らは,鉄筋コンクリートを 解析用にモデル化し,これら品質のばらつきの 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のコン クリートモデルを三次元へ拡張することを試み, 塩害劣化の主要因となる塩化物イオンと酸素の コンクリート中への拡散性状によってその妥当 性を検討した。

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





*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (正会員)
*2 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)
*3 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 博(工) (正会員)
*4 鹿児島大学産学官研究員 工学部海洋土木工学科 博(工) (正会員)

では,かぶり部のコンクリート内に存在する空 隙や骨材は全て球体で表現され,個々の球体の 径,分布および量は,使用材料の粒度条件やコ ンクリート全体の配合条件に合致する範囲でラ ンダムに決定されている。球以外の部分につい ては,セメント硬化体(以下健全部と称する) と仮定した。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されるが,解析 の際に局所的な表面塩分濃度の違いや腐食進行 状況を評価するため,電気的な接続は保ったま ま長さ 1cm ごとのセクションに分割されている。 なお、本稿における解析では全てかぶりを 5cm と仮定している。図 - 1 に鉄筋コンクリート三次 元モデルのイメージ図を示す。

2.2 空隙分布と骨材分布

(1) 空隙分布

コンクリート中に存在する空隙は,ゲル空隙, 毛細管空隙,および気泡等を含む欠陥空隙に大 別できる。本モデルでは,このうちコンクリー トの耐久性に影響を与えると考えられる毛細管 空隙と欠陥空隙の二つを考慮した。なお,便宜 上ここでは,毛細管空隙を細孔球,欠陥空隙を 欠陥球と称する。これらの細孔球と欠陥球は、 セメントの種類とW/Cに応じて³⁾,下村らの提案 する細孔容積分布密度関数(V'(r))である式(1)を 用いてコンクリート内の空隙をモデル化した²⁾。

$$V'(r) = V(\infty) \cdot B \cdot C \cdot r^{C-1} \cdot \exp(-Br^{C}) \quad (1)$$

ここで, r:細孔半径(m), V():単位体積当 たりにおける総細孔容積(m³/m³), B, C: 係数(本 モデルではW/Cの関数として扱う)³⁾である。

表 - 1 に ,本研究で用いた細孔球分布および欠 陥球分布におけるパラメータの一例を示す。な お個々の空隙球の径と位置は, 乱数を用いてモ デル容積内にランダム配置されている。

(2) 骨材分布

コンクリート中の骨材は,コンクリートの品 質に大きな影響を及ぼすことが実験的に明らか になっており,その径や分布を表現することは 物質移動の観点からしても極めて重要であると 考えられる。そこで,粗骨材,細骨材について は,土木学会規定の標準粒度に準じて表-2,表 -3 のように設定し,通過百分率内でランダムに 決定される。これらは空隙分布と同様に球体モ デルとして表現した。骨材球においては,モデ ル容積内で骨材同士が重ならないようにランダ ムに配置される。なお,骨材量については標準 配合に準じて表 - 4 のように設定している。 2.3 相対含水率

コンクリートの含水状態が塩害に及ぼす影響 を評価するため,モデルコンクリート中に配置 した細孔球と欠陥球を空隙水球と空隙乾球に分 け,総細孔容積に対する水球容積の比によって 相対含水率を表現した。また,骨材の周囲に存 在する遷移帯部分の含水状態は,塩分や酸素と いった腐食因子の拡散に大きな影響を及ぼすと

表 - 1 空隙分布のパラメータ値

	細孔分布			欠陥分布			
W/C	V()	В	С	V()	В	С	
40	0.000016	400000	0.8	0.0337	12000	1.2	
50	0.000044	150000	0.8	0.0433	12000	1.2	
60	0.000112	60000	0.8	0.0529	12000	1.2	
70	0.000264	25000	0.8	0.0625	12000	1.2	

表-2 粗骨材の粒度分布

(寸法単位 mm)		粗骨材の	粒度分布		
ふるいの呼び寸法	25	20	10	5	2.5
通過質量百分率(%)	100	90-100	20-55	0-10	0-5

(寸法単位 mm)

表-3 細骨材の粒度分布

ふるいの呼び寸法	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
通過質量百分率(%)	100	90-100	80-100	50-90	25-65	10-35	2-10

考えられるため,骨材球についても,相対含水 率に応じて湿潤骨材と乾燥骨材の2種類に分け て取り扱っている。

2.4 腐食因子の拡散条件の設定

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。これら腐食因子の浸透速度を 拡散係数として表すこととし,その拡散経路はコ ンクリート部材内に無数に存在することになるが, 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 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(図-3)。なお,拡散経路が空隙球や骨 材球を通る際には,腐食因子の特性を考慮した拡 散条件を設定した。

まず塩分の拡散の場合は,図-4に示すように, 水を含む空隙球(以下,空隙水球)では直線経 路上の水中を,湿潤骨材では骨材の外周部を迂 回する経路をとると仮定し,その際の拡散係数 は,1.95×10⁻⁵ cm²/sec(25 溶液中での拡散係 数³⁾)を用いた。また空隙乾球や乾燥骨材球で は,その外周部を健全部の速度で拡散するもの とした。これらの仮定を踏まえ,鉄筋腐食が開始 するために必要な塩分量が各走査線上を通って鉄 筋セクションに到達すると仮定した場合の時間T は,式(2)によって算定される。⁴⁾。

$$T = \frac{L_{cl}^{2}}{12 \cdot D_{cl} \left(1 - \sqrt{C_{L}} / \sqrt{C_{o}} \right)^{2}}$$
(2)

ここで,*L_{cl}*:修正拡散経路長,*D_{cl}*:健全部拡 散係数,*C_L*:腐食発生限界塩分量,*Co*:コンク リート表面の塩分量である。

各鉄筋セクションから分布させた走査線(図-3)により求めた各拡散経路の中から,この時間 Tの最も短い経路すなわち最短到達時間T_{min}で,そ の鉄筋セクションの腐食開始年数が決定されるこ とになる。したがって,その時の見かけの塩分拡 散係数*D_x*は,かぶりを*L_R*とすれば(3)式によ り求めることができる。

表 - 4 コンクリートモデルの骨材量 (体積割合)

W/C	粗骨材割合	細骨材割合			
0.4	0.366	0.301			
0.5	0.382	0.312			
0.6	0.393	0.321			
0.7	0.401	0.327			



図 - 3 走査線手法のイメージ 溶液内:溶液内拡散係数 外周部:健全部拡散係数 外周部:健全部拡散係数 外周部:溶液内拡散係数 健全部:1.E-08[cm²/s]

図 - 4 塩分拡散経路

塩分

溶液内:溶液内拡散係数 気相内:気中拡散係数 外周部:気中拡散係数 外周部:溶液内拡散係数 健全部:1.E-04[cm²/s]



図 - 5 酸素拡散経路

$$Dx = \frac{L_R^2}{12 \cdot T_{\min} \left(1 - \sqrt{C_L} / \sqrt{C_o} \right)^2}$$
(3)

酸素の拡散経路は図 - 5 に示すように設定し ている。ここでは,水溶液中の溶存酸素の拡散 係数の値を参考にして,空隙水球中の拡散係数 を 5.0 × 10-⁶ cm²/secと仮定した。また,気中では 急速に拡散すると考えられが,正確な値は不明 のため,健全部の拡散係数Doxの例えば 100 倍と 仮定した。塩分同様に,これらの仮定を踏まえ て各拡散経路長を修正し,各鉄筋セクションの 最短経路長Loxを求めれば,見かけの酸素拡散係 数Dox'は(4)式によって算出できる。

$$D_{ox}' = \left(\frac{L_R}{L_{ox}}\right)^2 D_{ox} \tag{4}$$

表 - 5 ひび割れ幅(mm)の拡散係数設定

ひび割れ幅	拡散係数
0 ~ 0.05	1 倍
0.05 ~ 0.1	10 倍
0.1 ~ 0.15	10 ³ 倍
0.15 ~ 0.2	10 ⁵ 倍

(健全部に対する塩分拡散係数比率)

2.5 初期ひび割れ

実際の鉄筋コンクリート構造物では,様々な 原因により材齢初期の段階でひび割れが発生す ることが少なくない。この初期ひび割れの存在 は,腐食因子の侵入を容易にし,塩害に対する 構造物の耐久性を著しく低下させる要因となる。 そこで,本モデルでは,ひび割れを有する試験 体を用いた塩化物イオン拡散セル試験およびそ のFEM解析によって算出した健全部に対するひ び割れ部の拡散係数比率に着目し⁵⁾ひび割れを モデル化している(表 - 5 参照)。また,初期ひ び割れをコンクリートモデルの中央部に位置さ せ,図 - 6に示すように,その形状および表面の ひび割れ幅で 5 つのパターンに分類した初期ひ び割れを仮定し,先述した拡散経路とひび割れ モデルの両面から劣化因子の到達経路を解析す



図-7 塩分拡散係数とW/Cの関係

ることを試みた。

3.解析結果と考察

コンクリートの塩分拡散係数の解析結果の一 例を図 - 7 に示す。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,三次元コン クリートモデルによる見かけの塩分拡散係数の 解析結果は,実構造物における実測値とほぼ対 応する値を示している。また,二次元モデルと 三次元モデルの解析結果を比較すると,二次元 モデルでは拡散係数の平均値が W/C と直線的な 相関があるのに対し,三次元モデルでは低 W/C では変化が少なく高 W/C において拡散係数が 大きく増加する傾向となっていることが分かる。 モルタルに関しては二次元モデルと三次元モデ ルでほぼ同様の結果であったことから,コ ンクリートに関するこの傾向は二次元モデ ルでは表現が難しかった粗骨材による塩分 移動の遮蔽効果と,遷移帯の連結に伴う促 進効果の複合現象を捉えたものであると考 えられる。また,品質のばらつきは実測値 よりも小さいものとなっているが,実構造 物の品質のばらつきが初期の微細ひび割れ や締固め不十分等の欠陥を含む可能性を考 えれば,モデルによる再現性は決して低く なく,さらに検討の必要があるものの,本 三次元モデルはコンクリート中の塩分浸透 特性を概ね良く捉えていると言える。

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 - 8 に示す(図中の%は相 対含水率を示す)。なお,解析値はモデル中 の 19 の鉄筋セクションにおける見かけの 酸素拡散係数の平均値を示している。本モ デルによる解析値は,相対含水率 50%で既 往の文献による実測値とほぼ同程度の値を 示しており,相対含水率 80%ではやや大き い値となっているものの,二次元モデルの 場合と比較して,実測値に近い値を得るこ とができている。また相対含水率が高くな ると水分による遮蔽性が顕著となり酸素拡 散係数は低下するという傾向を良く捉えて いる⁷⁰。

次に,初期ひび割れを有するコンクリー トの鉄筋位置における見かけの塩分拡散係 数の解析結果をひび割れ幅が極大の場合を 図 - 9 に,中の場合を図 - 10 にそれぞれ示 す。なお,いずれも W/C=0.5,相対含水率 85%および0%,さらに比較のために相対含 水率 85%で初期ひび割れが存在しないケー スの結果も示しており,横軸の数値は鉄筋 セクション位置(番号)を表す。なお,コ ンクリート内部が完全な乾燥状態である相 対含水率0%という条件は,実現象に即した設定 ではないものの,塩分浸透とひび割れの影響を確



認するうえで ,ケーススタディとしては効果的な 条件あると考えられる。

ひび割れ極大の場合,ひび割れ位置を中心に 拡散係数は大きくなる傾向にあり,その影響範 囲は,相対含水率0%,85%のいずれの場合もひ び割れ中心位置から±5cm程度となっている。ひ び割れ中の場合でも、相対含水率0%の結果から ほぼ同様の影響範囲が確認できるが,相対含水 率 85%ではひび割れの影響に加え,湿潤骨材や 空隙水球による塩分浸透性の促進効果の影響が 大きくなるため,相対含水率0%のひび割れ解析 結果と異なる傾向を示すと考えられる。また、 特に相対含水率が低い状態では水分による塩分 浸透性の増加が小さく,ひび割れの影響による 塩分浸透性の増加が顕著に現れやすいため,相 対含水率 0%の表面ひび割れ幅中においてもコ ンクリートの塩分拡散に与える影響は比較的広 範囲となることが考えられた。 なお既往の研究 によると,表面ひび割れ幅 0.3mmの初期ひび割 れを含んだ塩化物イオンの拡散係数の実測値と して,1.2×10⁻⁵ cm²/sec程度という報告があり, 本モデルの結果は概ね妥当であることが確認で きる⁸⁾。

次に,図-11 にこの解析で用いたひび割れパ ターンと各鉄筋セクションにおける腐食開始年 数の平均値との関係について示す。まず,ひび 割れパターンのいかんに関わらず,W/C が大き いほど腐食発生までの時間が短くなっている。 また,低W/C でひび割れの影響が少ない高品質 なコンクリートであれば,腐食発生までの時間 が長くなるという結果を得られた。

4.まとめ

本研究は,塩害劣化を想定した三次元シミュ レーションの基礎モデルの開発を試みるととも に,その妥当性を検討したものである。その結 果,本モデルにより腐食因子である塩分や酸素 といった腐食因子の侵入に対してある程度の精 度で解析できることがわかった。また,初期ひ び割れが生じている場合においても本モデルが 適用可能であるだけでなく,本モデルを用いて 初期ひび割れの影響やその範囲をある程度再現



参考文献

- 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,pp1659-pp1664,2002
- 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) 松武進太郎ほか:鉄筋コンクリート構造物の 塩害評価に関するコンピュータシミュレー ション,コンクリート工学年次論文 集,Vol.20,No.1,pp197-pp202,1992
- 4) 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
- Bazant,Z.P. : Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures Theory, Journal of the Structural Division ,Vol.105,1979
- 6) 安田寛生ほか:ひび割れを有する鉄筋コンク リートの鉄筋腐食シミュレーション,土木学 会第 55 回年次学術講演会概要 集,V-288,2000.9
- 7) 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
- 8)橋口大輔ほか:初期に導入したひび割れがコンクリートの耐久性へ及ぼす影響に関する研究,コンクリート工学論文集,Vol.26,No.1,2004