

塩害劣化シミュレーションモデルにおける各種パラメータ設定に関する検討

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 武若 耕司
 鹿児島大学大学院 学生員 前田 聡
 鹿児島大学工学部 非会員 戸高 規行

1. はじめに

著者らは、これまでに鉄筋コンクリートの塩害劣化現象を定量的に評価する手法として、塩害劣化シミュレーションモデルを提案し、その構築を目指している¹⁾。しかしながら、モデル化にあたって必要な塩化物イオンの拡散性状と鉄筋腐食速度などを支配する各種パラメータについての検討において未だ不十分な点も残されている。そこで本研究では、これらのパラメータを再検討、あるいは新たに導入し、塩害劣化シミュレーションモデルを改良することを試みた。

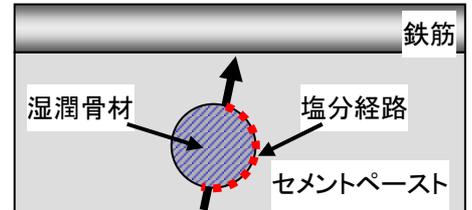


図-1 モデルと塩分経路

2. 塩化物イオンの拡散性状に関するパラメータの設定

本シミュレーションでは、コンクリートをセメントペースト、細孔空隙、欠陥空隙、および骨材でモデル化し、配合や環境条件に応じて、その量、配置、含水状態を決定している。塩化物イオンの拡散性状は、これらのパラメータによって変化する拡散経路と拡散係数によって評価されることになるが、塩化物イオンが図-1に示すような湿潤骨材の周囲を迂回する経路をとる場合、迂回経路の塩分拡散係数を別途に設定する必要がある。これは、骨材表層部に遷移帯と呼ばれるポーラスな領域が存在しているためであるが、これまでのモデルでは、この部分の拡散係数について十分に検討していなかった。そこで、まず図-2のように、遷移帯の拡散係数 (D_{itz}) を変化させたシミュレーションを繰り返し、 D_{itz} とコンクリートのみかけ拡散係数 (D_{ap}) の関係を明らかにした。一方、既往の研究²⁾を参照すれば、今回のモデルコンクリートの見かけの拡散係数は、そのコンクリートのセメントペースト部の拡散係数の、およそ1.1倍に相当し、このことを考慮して各W/Cごとにコンクリートに予想される拡散係数を別途求め（図-2中の黒点）、この値よりそれぞれのW/Cにおける D_{itz} を逆算して求めた。その結果を表-1に示す。

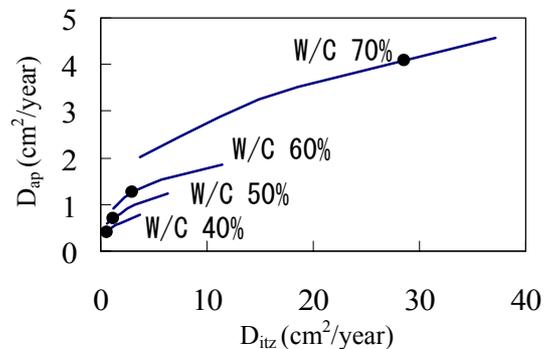


図-2 D_{itz} と D_{ap} の関係

表-1 拡散係数 (D_{itz}) の設定値

W/C	塩分拡散係数 (cm ² /year)		
	D_p	D_{itz}	D_{ap}
40%	0.37	0.57	0.40
50%	0.63	1.14	0.69
60%	1.14	2.96	1.25
70%	3.72	28.63	4.09

D_p : セメントペースト部の拡散係数
 D_{itz} : 湿潤骨材周囲の拡散係数
 D_{ap} : 見かけの拡散係数

3. 鉄筋腐食速度に関するパラメータの設定

3.1 コンクリートの比抵抗

本モデルでは鉄筋を長さ 1cm のセクションに分割し、それぞれの周囲の塩化物イオン濃度に応じてアノード部とカソード部に区別した上で、両者を流れる腐食電流量からアノード部における鉄筋腐食量を算定する。この腐食電流は鉄筋中およびコンクリート部分の流れ、その際に鉄筋に分極を生じるための抵抗（分極抵抗）およびコンクリート

表-2 比抵抗の測定結果路

Cl ⁻ 量 (kg/m ³)	暴露環境湿度(%)		
	~50	70~80	90~
0	211.3	19.4	19.0
1.2	196.8	18.5	19.4
2.4	181.0	20.0	23.0

単位: kΩ cm

キーワード 塩害, シミュレーションモデル, 遷移帯, 比抵抗, ミクロセル腐食

連絡先 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市 1-21-40 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 TEL 099-285-8480

トの電気抵抗（比抵抗）に影響を受けることになる。既往の研究では、分極抵抗は考慮されているものの、比抵抗は検討されていなかった。そこで、コンクリートの比抵抗について実験的に検討し、その影響を導入することを試みた。実験には、等間隔に4本のチタン棒($\phi 1.0\text{mm}$)を埋設した $50\times 110\times 20\text{mm}$ の薄型モルタル試験体(OPC, W/C 60%)を用いた。試験体は、あらかじめ塩化物イオン量を0, 1.2, 2.4 kg/m^3 に調整した3種類を製作し、暴露環境湿度50%以下, 70~80%, 90%以上の3水準において、それぞれの試験体の比抵抗を4点電極法で経時的に測定した。表-2に、比抵抗の測定結果を示す。この結果に基づき、コンクリートの比抵抗の効果をシミュレーションモデルに導入した。

3.2 ミクロセル腐食

コンクリート中の鉄筋腐食は、マクロセル腐食とミクロセル腐食が複合的に発生している。一般に塩害環境では、腐食速度の大きいマクロセル腐食が支配的であると言われており、本シミュレーションモデルでもマクロセル腐食のみを考慮していた。しかしながら、W/Cが大きくなると、ミクロセル腐食の影響が大きくなるという実験結果も報告されている。そこで、マクロセル腐食に加えて、ミクロセル腐食のモデル化とその導入を試みた。ここでは、既往の実験結果³⁾を踏まえ、アノード部におけるマクロセル腐食とミクロセル腐食で消費する腐食電流の割合を5:1とし、図-3に示すようなモデルで表現した。

4. シミュレーション結果

4.1 塩化物イオン拡散性状の影響

表-1で設定した拡散係数を用いた場合のシミュレーション結果を図-4に示す。なお、ここではコンクリートの相対含水率80%のコンクリートを例とし、鉄筋に塩分が到達するまでの時間を示している。これまでの結果と比較すると、全体的に塩分到達時間が長期になっており、特に D_{iz} を小さく設定している低W/Cで、その影響が大きくなることが分かる。つまり、これまでのモデルは、特に低W/Cにおいて骨材による塩化物イオンの遮蔽効果を過小評価していたと考えられる。

4.2 鉄筋腐食速度の影響

コンクリートの比抵抗と、ミクロセル腐食を導入したシミュレーション結果を図-5に示す。なお、同図は相対含水率50%におけるシミュレーション結果を、鉄筋の腐食速度係数として示してある。まず比抵抗のみを導入した場合、その影響でこれまでのモデルと比較して腐食速度が大きく低下し、W/Cの影響がほとんど見られなくなっている。しかし、これにミクロセル腐食の影響を加味すると、腐食速度とW/Cの相関が再度表れる結果となった。これら3ケースのシミュレーション結果を併せて考えれば、これまで比抵抗を考慮しておらず過大評価していた腐食速度を修正するとともに、実現象と同様、低W/Cではマクロセル腐食が支配的であり、高W/Cではミクロセル腐食の影響が増大する傾向を捉えており、ある程度の妥当性を確認できたと考えられる。

参考文献

- 1) K.Takewaka, T.Yamaguchi, S.Maeda: Simulation model for deterioration of concrete structure due to chloride attack, Journal of Advanced Concrete Tecnology, Vol.1, No.2, pp.139-146, July 2003
- 2) 加藤佳孝: 遷移帯がコンクリートの物質移動現象に及ぼす影響, 東京大学学位論文
- 3) 宮里ら: モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.83-93, 2001

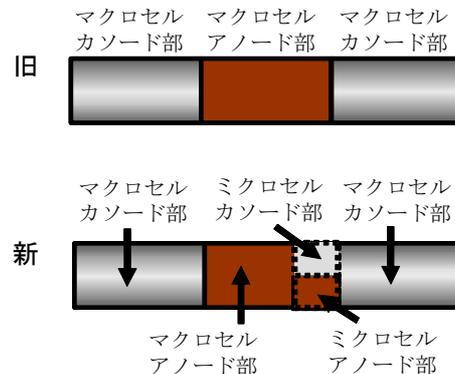


図-3 腐食モデルの概要

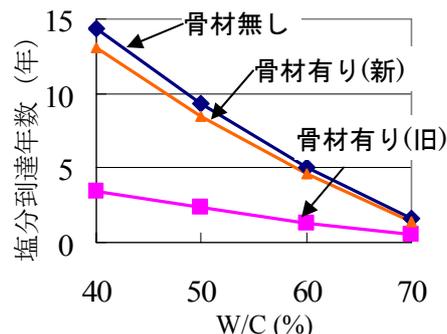


図-4 塩分到達時間

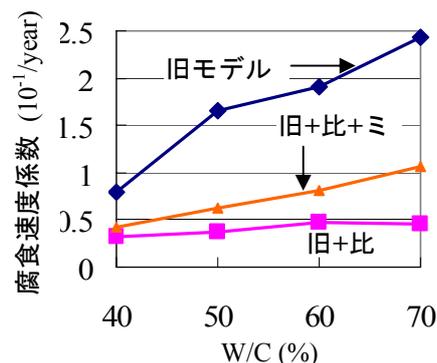


図-5 腐食速度係数