

システムダイナミクスを用いたコンクリートの中性化進行予測の検討

大成建設 土木技術研究所 正会員 ○石原 明日子
 大成建設 土木技術研究所 正会員 大脇 英司
 大成建設 土木技術研究所 正会員 岡本 修一

1. はじめに

コンクリート構造物は、周辺の環境や材料や施工手順から複雑な影響を受ける。従ってコンクリート構造物の設計や性能照査、劣化予測を行なうためには、複数の内的・外的要因による複数の劣化事象を考慮する必要がある。しかし、複数の要因によるコンクリートの複合的な劣化については研究例が少なく、また性能評価のためのシミュレーションにおいてもモデルが複雑になるため、モデルの構造や、パラメータの確認や変更が容易な手法を用いることが有効である。本研究では、視覚的に劣化機構をモデル化でき、かつモデルやパラメータを容易に変更できるシステムダイナミクス（SD）について、中性化進行予測をモデルケースとしてその適用性について検討した。炭酸ガスのコンクリート内への拡散と、それに伴う炭酸ガスと水酸化カルシウムとの化学反応について、劣化予測のモデル化を行なった。主に通常の SD モデルは時系列のデータのみを扱うが、ここでは SD の構成要素に位置情報を持たせることにより、コンクリート内部の各位置における化学物質の濃度の経時変化を求めることができた。

2. モデルの構築

コンクリートの中性化は、炭酸ガスの拡散と炭酸ガスと $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の反応で構成される一連のシステムとして扱った。そのシステムは、下記の手順でモデル化した。SD による解析は、市販のソフトウェアで行なった。

2-1 モデルの全体構造

コンクリートの中性化進行予測モデルの全体構造は、式 1 に表す通り炭酸ガスが表面から内部に深さ方向に拡散によって浸透しつつ、同時に浸透した炭酸ガスがコンクリート中の水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応して、炭酸カルシウム CaCO_3 が生成し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少することによりコンクリートがアルカリ性から中性となって鉄筋の防錆性が失われる現象と仮定した（図 1）。

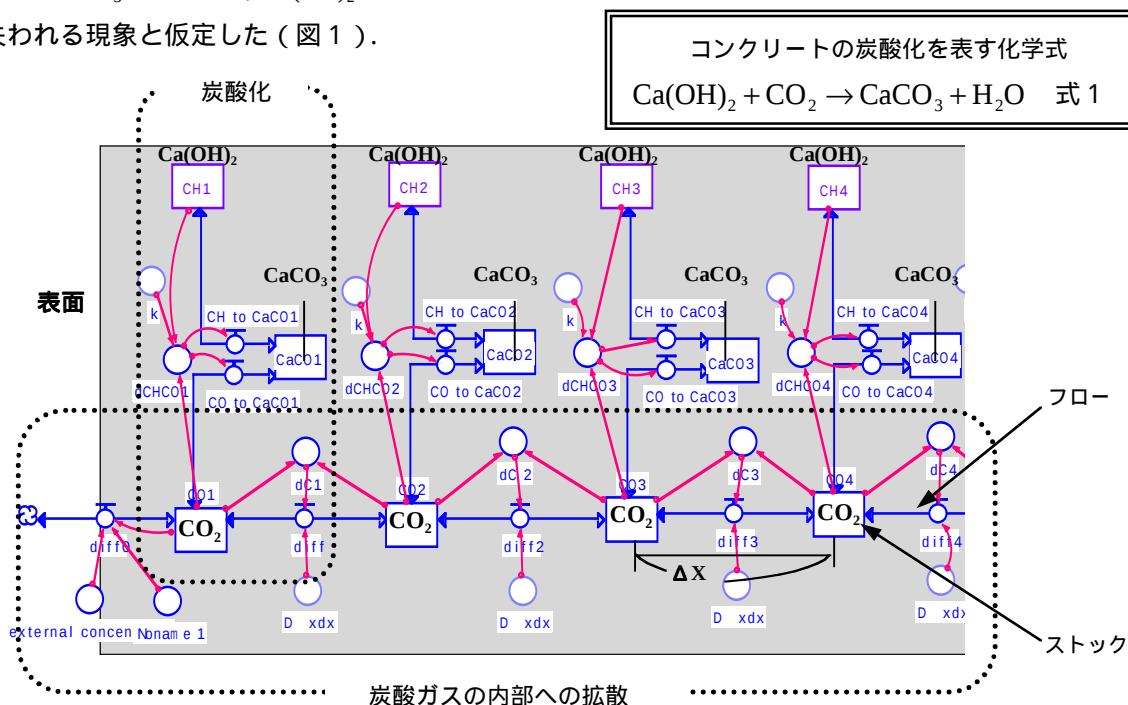


図 1 コンクリートの中性化進行予測モデルの全体構造

キーワード : システムダイナミクス, 炭酸化, 拡散, 水酸化カルシウム, コンクリート

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社 TEL 045-814-7228

2-2 モデルの基本構造

炭酸ガスのストック（蓄積量）を各々深さ方向のみの位置情報を含む形でストックを並べ、各ストック間は隣接するストック同士の濃度勾配により Fick の第二法則に従って拡散するものとしてフロー（単位時間当たりのストックの変化量）で連結した（図1）。コンクリート中に拡散した炭酸ガスの蓄積量とコンクリート内部に残存する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とがそれらの濃度に依存して、炭酸化カルシウムを生成するものとしてフローで連結した（図1）。なお今回はコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 の移動は考慮にいれないとした。

2-3 モデル式及びパラメータ

モデルには、梶田ら¹⁾の式を用いた。式2の右辺第1項は炭酸ガスの拡散速度を、右辺第2項は炭酸ガスと水酸化カルシウムとの化学反応速度を表す。また、設定されたパラメータは表1に示す通りである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k C C_a \quad \text{式 2}$$

C：炭酸ガス濃度（mol/cm³, mol/l）

C_a：水酸化カルシウム濃度（mol/cm³, mol/l）

k：反応速度定数（1/day）

表1 数値計算に用いたパラメータ

Δt(計算のステップ)	5	day
Δx	0.5	cm
D(炭酸ガスの拡散係数)	0.005	cm ² /day
k(反応速度定数)	10000	1/day
コンクリート内部の Ca(OH) ₂ 初期濃度	1.30E-06	mol/cm ³
コンクリート表面部の CO ₂ 体積濃度	3.00E-07	mol/cm ³

3．結果と考察

図1に示すSDモデルのシミュレーションを行なった。各点の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の濃度が最初の濃度の80, 70, 60, 50, 40, 30, 20%の場合における時間を中性化時間とし、中性化深さと中性化時間との関係を示した。その結果、梶田ら¹⁾の同じパラメータを用いた場合の計算結果を比較したところ一致していた(図2)。これはSDの

ストック、フロー等を用いたモデルが拡散、化学反応が同時に起こる現象のシミュレーション手法として適当であることを示す。

4．まとめ

SDを用いたコンクリートの劣化予測を行なった結果、SDがコンクリートの劣化予測のシミュレーション手法として適当であることが示された。本研究のようにSDの位置情報を含む構成要素を配置することには次のような利点がある。まず、実現象により近く、コンクリートの内部空間の各々の位置での劣化性状を表現できる、例えばコンクリートの内部がひびわれ、化学的劣化等によって部分的に拡散係数が異なる場合であっても、コンクリート中の各位置における拡散係数を容易に設定できる。そして、コンクリートの中性化に限らず、媒体内に侵入した物質がその媒体内に存在する物質と化学反応をしつつ、媒体内を拡散していく現象を容易にモデル化できる。

<参考文献>

¹⁾ 梶田佳寛、棚野博之：コンクリートの中性化進行予測

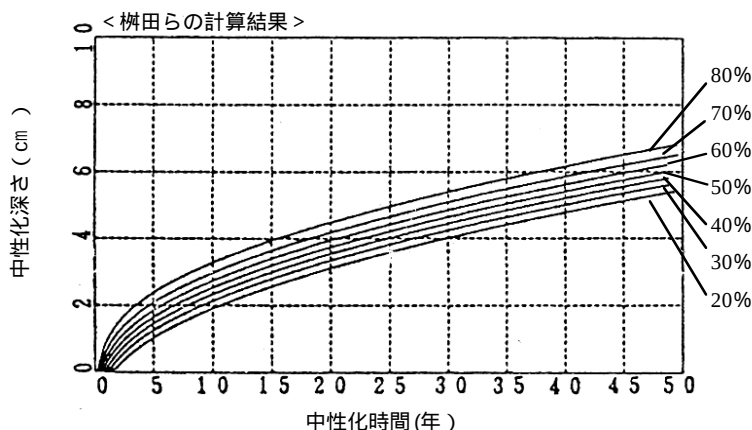
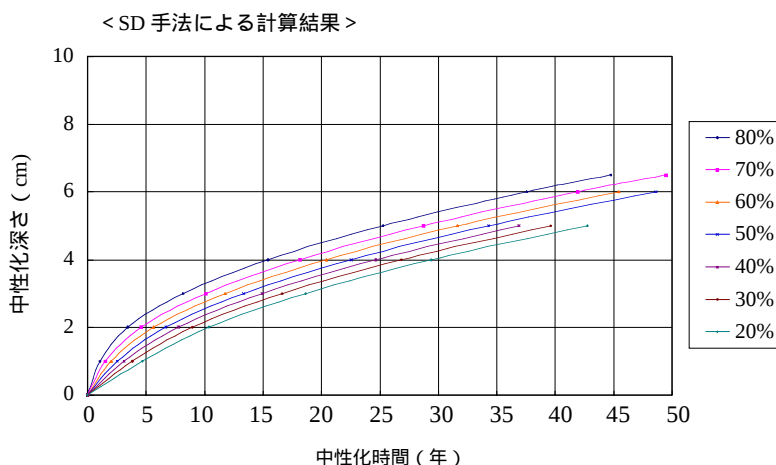


図2 SDによる中性化進行状況の計算例の比較¹⁾