

モンテカルロ法を用いた鉄筋コンクリート内における塩化物イオン拡散のモデル化

中央大学 学生員 ○川又 裕夢
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

これまで我が国では、コンクリート構造物は耐久性に富んでおり、半永久的にメンテナンスフリーと考えられていた。そのため、高度経済成長期にはコンクリートを用いた道路構造物が大量に建設された。しかし、実際にはコンクリート構造物は中性化、凍害、塩害、ASR や繰返し荷重による疲労等の劣化により、供用期間は 50 年程度である。そのため、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の老朽化は、現代では深刻な問題となっている。

本研究では、コンクリートの劣化に関して塩害を対象とする。塩害腐食に対しては多くの実験的研究がなされているが多くは時間的制約から高濃度の塩水に供試体を浸けることで塩分浸透を高速化させている。このため腐食が鉄筋に均質的に拡がりやすい傾向がある。実際のコンクリートは骨材の配置はランダムであり、また鉄筋の腐食の拡散は偏りを有し、図-1 のように特定箇所に集中する傾向がある。そのため促進試験等の試料を用いた試験では、そのような状態を正確に再現することはできない。そこで、実現を追うため、コンクリート内部における塩化物イオンの拡散経路についてモンテカルロシミュレーションを用いたプログラムを構築し、実構造物の点検結果等との比較を行う。それにより再現性の高いプログラムによるモデル化を行なうことを目的とする。著者らは昨年このモデルの提案を行っているが本年度はコンクリート中に滞留する塩化物イオンの影響を加えた改良モデルを作成した。

2. 研究方法

本研究では、鉄筋コンクリートのかぶり中の鉄筋に到達する塩化物イオンの拡散解析をモンテカルロシミュレーションにより行う。この際、図-2 に示すフロー図に従い、VBA を用いてプログラムを構築する。なお骨材は、粗骨材と細骨材の配置位置をランダムに決定する。試行結果を土木研究所が所有する橋梁で行われた調査結果³⁾と比較することで、プログラムの再現性を検証する。

プログラム完成後は再現性の高いプログラムを利用し、鉄筋の条件別腐食性状について調べる。条件とは骨材の配置面積や最大寸法、かぶり厚さを変えることである。各種条件により得られた塩化物イオン濃度のデータをヒストグラムにより可視化する。これより、鉄筋の腐食性状が条件によりどのように異なるか調査する。



図-1 腐食の偏り¹⁾

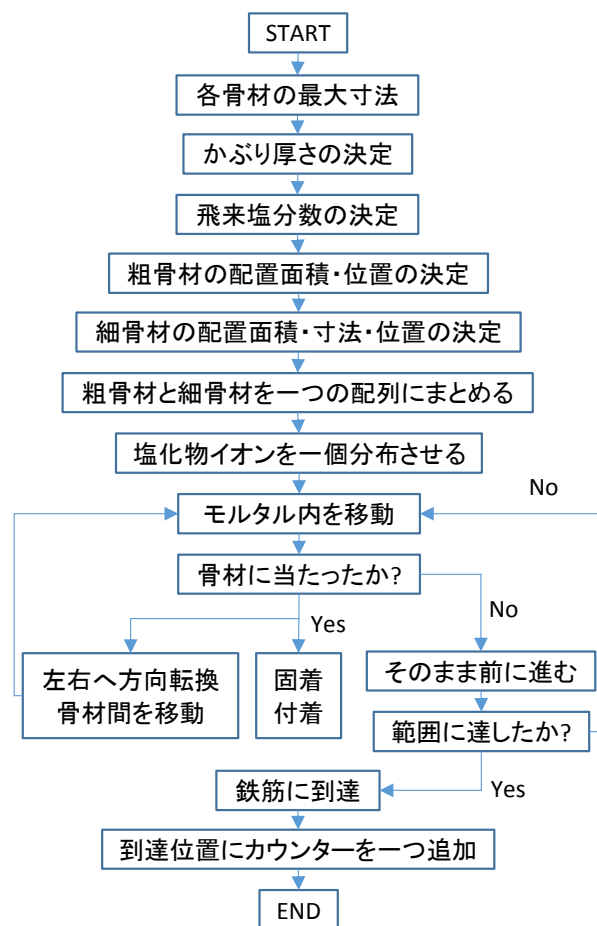


図-2 シミュレーションのフロー図

2. 1 調査結果との比較

調査結果との比較は、塩害データベースを参考に、検証のために用いる構造物表面からの距離およびコンクリート断面の横幅は、調査にて採取した

キーワード 塩害, モンテカルロシミュレーション

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 TEL.03-3817-1711

試料採取位置、試料の横幅に合わせるものとする。

プログラムの試行結果は実測データ及び式(1)に示すフィックの拡散方程式の第2法則⁴⁾と比較を行う。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) + C_i \cdots \text{式(1)}$$

$C(x, t)$: 深さ x [cm], 建設時からの時刻 t [年]における塩化物イオン濃度[kg/m³]

C_0 : 表面における塩化物イオン濃度[kg/m³]

D_{ap} : 塩化物イオンの見かけの拡散係数[cm²/年]

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度[kg/m³]

erf : 誤差関数

2. 2 骨材の最大寸法の決定

骨材の最大寸法による影響を調べるために、2種類の粗骨材を設定する。最大寸法は表-1より、それぞれ20mmと25mmのものとする。これは鉄筋コンクリートにて一般的に用いられている大きさである。

また、細骨材の最大寸法は5mmとする。かぶり厚さは粗骨材の大きさと表-2に示す基本かぶりの値を考慮し、20mmの時60mm、25mmの時70mm、横幅は粗骨材を充分配置できるよう100mmとし、骨材配置面積は70%とする。

2. 3 骨材の配置面積の決定

骨材はコンクリート体積の70%を占め⁷⁾、これを粒径で分類すると、表-3より細骨材30%と粗骨材40%に分けることができる。本研究では、骨材の配置面積は任意断面における断面積の30%、50%、70%、90%と設定することで塩化物イオンの拡散経路への影響を調べる。

2. 4 かぶり厚さの決定

かぶり厚さを変化させることで、鉄筋位置における塩化物イオン濃度にどのような影響が現れるかを調べる。変化させる距離は、粗骨材の最大寸法によって区別する。最大寸法が20mmの場合、かぶり厚さは35mm、60mm、85mmとする。最大寸法が25mmの場合、かぶり厚さは40mm、70mm、100mmとする。

2. 5 塩化物イオン濃度の算出

拡散シミュレーションを行い、鉄筋の各位置における塩化物イオン濃度をヒストグラムにより統計分析する。それにより、鉄筋の腐食性状を塩化物イオン濃度により再現する。

3. 解析結果

かぶり厚さは設定した粗骨材の最大寸法が25mmであるため70mmとし、横幅は100mm、骨材の配置面積は細骨材30%、粗骨材40%と設定し、解析を行った。粗骨材と細骨材はランダムに配置しており、粗骨材の寸法は一边25mmの正方形、細骨材の寸法は一边を1mmから5mmの5段階とする正方形で表した。プログラムは先に粗骨材の配置を決定し、その後に細骨材の配置を決定するものである。そのため、細骨材が粗骨材と重なった場合、その部分は密着しているものと考え、塩化物イオンは通行不可とする。

本稿投稿時においては予想外に塩分の透過経路を

表-1 粗骨材の最大寸法⁵⁾

構造物の種類	粗骨材の最大寸法		
鉄筋コンクリート	一般の場合	20または25mm	部材最小寸法の1/5または鉄筋の最小あきの3/4および
	断面の大きい場合	40mm	かぶりの3/4以下

表-2 基本かぶり⁶⁾

c(mm)	環境条件	スラブ	梁	柱
	一般の環境	25	30	35
	腐食性環境	40	50	60
	特に厳しい腐食性環境	50	60	70

表-3 コンクリートの細骨材率の概略値⁸⁾

粗骨材の最大寸法 [mm]	骨材の体積比 [%]	AE剤使用	細骨材の体積割合	AE減水剤使用	細骨材の体積割合
		細骨材率 s/a [%]	[%]	細骨材率 s/a [%]	[%]
20	70	44	30.8	45	31.5
25		42	29.4	43	30.1

見出すのが難しく図-1を良く表現するようなヒストグラムは得られていないが、3月の発表会で結果を示す予定である。

4. おわりに

本研究では、現実との一致を図るため、実際のかぶり厚さや最大寸法、骨材の割合に基づき塩化物イオンの拡散に関するプログラムを構築した。しかし、骨材と骨材の間を通過するプログラムについては現在取り組んでおり完成はしていない。また、拡散のプロセスは塩化物イオン濃度が関係してくる。このことから今後の課題として、塩化物イオン濃度を考慮した塩化物イオンの拡散プログラムの構築が挙げられる。またプログラム完成後の課題として、再現性の検証及び、2.2、2.3、2.4にて示す条件による鉄筋位置における塩化物イオン濃度への影響を調べることが挙げられる。

参考文献・出典

- 1) 村上祐貴：鉄筋腐食を生じたRC梁の残存耐荷性能に関する研究、2008 p14
- 2) 土木学会関東支部第42回技術研究発表会、2015
- 3) 渡辺博志、古賀裕久：土木研究所研究報告書、2006
- 4) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編] p171
- 5) 田沢栄一：エースコンクリート工学 p111
- 6) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの設計 限界状態設計法と許容応力度設計法 p185
- 7) 桜井邦明、近松竜一ら：フレッシュコンクリートの変形特性に及ぼす骨材の粒度構成の影響、コンクリート工学年次論文集、2006(一部参照)
- 8) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[施工編] p86