点検・検査情報を活用したコンクリート構造物の中性化進行予測に関する確率論的考察

早稲田大学 学生会員 ○萩野統也 早稲田大学 正会員 秋山充良
東京都市大学 正会員 吉田郁政

1. はじめに

中性化とは，大気中の二酸化炭素がコンクリート内に浸入し，水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより細孔溶液のpHを低下させる現象である[1)]．炭酸化反応がコンクリートの強度や収縮に与える影響は小さく，コンクリート構造物の性能は変わらないとみなせることから，中性化による劣化現象としては鋼材腐食のみに着目できる．そのため，中性化の進行予測では，中性化深さと鋼材位置の比較が重要となる．

中性化に限らず，塩害なども含め，この種の環境作用による劣化の進行予測には非常に大きな不確定性を伴う．例えば，構造物周辺の環境の変動，劣化予測式が持つモデル誤差，あるいはその予測式に使われるコンクリートや鉄筋の物性値が持つバラツキなどである．そのため，設計段階で建設後30年や50年後に予測される中性化深さの値は相当に大きなバラツキが含まれると考えなければならない．既存構造物を対象とする場合には，点検・検査結果を用いることで，この将来的な劣化予測に含まれるバラツキを低減することが可能である．具体的には，建設後t_1 年で得られた観測情報を再現するように劣化予測に関わる 変数を同定することで，設計段階では大きな不確定性を持つと扱わざるを得なかった劣化予測変数の不確定性が大きく低減される．ただし，この変数の同定は一般に容易ではなく，観測情報と劣化予測変数の関係式が非線形の場合や，劣化予測変数に非ガウス変数が含まれると，陽な形で解を表現できなくなる．この問題に対し，参考文献[2)]では，Sequential Monte Carlo Simulation (SMCS)を用いることで，このような場合でも点検・検査情報から塩害劣化予測に関わる多数の変数を同時更新し，将来的な鋼材腐食の発生確率や，RCスラブの曲げによる破壊確率を算定している．

本研究では，参考文献[2)]に示される手法を中性化の進行予測に応用する．建設後t 年で中性化深さが閾値に到達する確率に対し，t_1年（$t_1 < t$)で得られる点検情報がその確率に及ぼす影響などを検証する．

2. 中性化による鋼材腐食発生確率の算定法とSMCSを用いた確率変数の更新

本研究では，確率論的なアプローチで中性化による鋼材腐食の発生可能性を評価した参考文献[3)]を参考に，コンクリートの中性化深さが鉄筋表面位置に達したとき（コンクリートの中性化深さ＝かぶり）を限界状態とする．つまり，中性化による鋼材腐食発生確率は，式(1)の限界状態関数g_1 が$g_1 < 0$ となる確率として与えられる．

$$g_1 = C - x_1 \cdot X_{AVE}(t) \quad (1)$$

$$X_{AVE}(t) = \alpha \cdot \kappa \cdot \gamma \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$\gamma = ((\mathrm{W/C}) - 0.25)/\sqrt{(0.3(1.15 + 3(\mathrm{W/C}))} \quad (3)$$

ここに，C はかぶり，x_1は中性化深さの予測式のモデル誤差を表現する確率変数，α，κ，γはそれぞれ，環境係数，仕上げ材係数，水セメント比による品質係数，W/Cは水セメント比(%)である．式(2)の中性化予測式は和泉式[3)]である．

表－1 確率変数のパラメータと分布形

不確定変数名	分布形	平均値	変動係数/標準偏差	
水セメント比	正規	0.45	標準偏差	0.1
かぶり	正規	30mm	標準偏差	10mm
モデル誤差x_1	対数正規	式(2)の計算値	変動係数	0.4

本検討では，環境係数は一般大気中を想定して1.0とし，仕上げ材係数も1.0とした．水セメント比W/C，かぶり，およびモデル誤差x_1 は確率変数として扱い，**表－1**のパラメータおよび分布形を持つと仮定している．この条件において式(1)で$g_1 < 0$となる確率をt 年毎に計算すると，中性化による鋼材腐食発生確率の経時変化を求めることができる．一方，適当な年数t_1 において，点検により中性化深さが与えられたとすると，その観測値を実現するように劣化予測に関わる確率変数を更新することができる．本研究では，この更新手法としてSMCSを用いる[2)]．SMCSで

key words: 中性化，Sequential Monte Carlo Simulation，損傷確率，かぶり，鋼材腐食
連絡先: 〒169-8555 東京都新宿区 3-4-1 早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 TEL: 03 (5286) 2694

必要となる，観測値とそれに関わる確率変数および観測誤差の関係を示す観測方程式として，本研究では以下の式(4)を想定する．

$$z = x_1 \cdot X_{AVE}(t) + v \qquad (4)$$

ここに，v は観測量誤差を表しており，標準偏差1.0のガウス分布を仮定する．

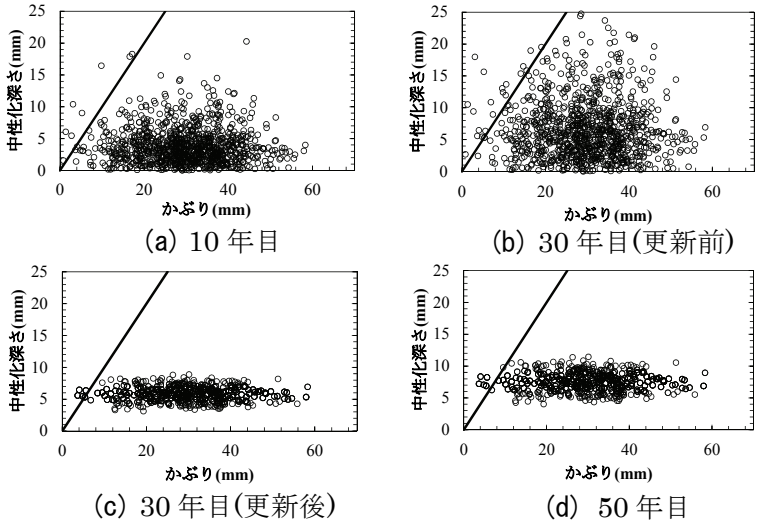
中性化深さの観測値z として，本研究では，**表－2**のケース1～3を用いる．いずれもt_1 =30年での観測値と仮定した．表中，50%フラクタイルとは，**表－1**の条件で計算されるt_1 =30年での中性化深さの分布の中央値を意味する．

表－2 想定した観測情報

観測中性化深さ（mm）	ケース1	5%フラクタイル	1.02
	ケース2	50%フラクタイル	5.91
	ケース3	95%フラクタイル	16.06

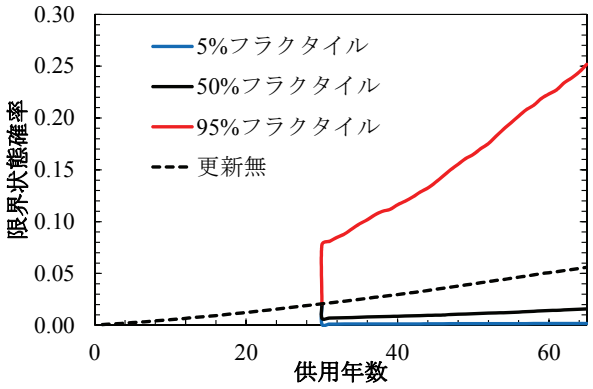
3. 解析結果

式(1)の限界状態が負となる確率は，Monte Carlo Simulation(MCS)にて計算する．SMCSでは，MCSの各サンプルの値を観測値に基づき更新する．建設後10年，30年，および50年における中性化深さとかぶりの各サンプルの値をプロットしたものを**図－1**に示す．t_1 =30年において観測情報を与えることから，t_1 =30年の場合のみ更新前と更新後の2つの図が示されている．なお，更新する際は，**表－2**のケース2の条件を用いている．SMCSを使って，観測情報を反映させない場合，**図－1**(a)と(b)に示されるように，計算される中性化深さには非常に大きなバラツキが存在する．一方，観測情報を反映させると，t_1 =30年で中性化深さが5.91mmとなるように確率変数が更新されることから，更新後は，各変数のバラツキが小さくなり，予測される中性化深さの値の幅が相当に小さくなることが確認される．



図－1 かぶりと中性化深さの関係(ケース 2)

一方，式(1)の限界状態が負となる確率を求めたものを**図－2**に示す．**表－2** の仮定した観測情報から明らかなように，設計時に予想された通りの中性化深さが t_1 =30 年で得られた場合（ケース 2），更新前と更新後で限界状態確率はあまり大きく変化しないのに対して，設計時の予想よりも相当に大きく中性化深さが得られた場合（ケース 3），あるいは，相当に小さく中性化深さが得られた場合（ケース 1）には，限界状態確率は更新無の場合と比べ大きく変動する．SMCS を用いることで，このような観測情報を反映した限界状態確率の算定が可能となる．



図－2 経過時間(year)と限界状態確率の関係

4. まとめ

点検・検査情報の結果に合致するように，予測に関わる変数を更新し，将来予測の精度を高める手法として本研究ではSMCSを用いた．Monte Carloベースであることから，観測値と劣化予測に関わる各変数の関係が非線形であっても，また，そこに非ガウス変数が含まれていても対応でき，非常に汎用性の高い手法である．

参考文献 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編，2007. 2) Akiyama, M., Frangopol, D.M., Yoshida, I.: Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides, Engineering Structures, Vol. 32, No.11, pp. 3768-3779, 2010. 3) 中山隆弘，松原多孝：信頼性設計によるRC構造物のかぶりの算定，構造工学論文集，Vol. 38A, pp.509-516, 1992.