

フライアッシュコンクリートの中性化深さのベイズ予測

田坂誠一* 服部信彦**

Bayesian Prediction of Carbonation Depth of Fly Ash Concrete

Seiichi TASAKA Nobuhiko HATTORI

ABSTRACT

Some characteristics of the carbonation depth of fly ash (FA) concrete are examined through an accelerated carbonation test. The concrete specimens having 20% and 40% replacements of the ordinary Portland cement with FA (type II), and FA/C (FA to cement ratio) of 50% with a replacement of fine aggregate (sand) by FA are used. It is shown that the carbonation depth is highly correlated with both the water cement ratio and the inverse of the compressive strength of concrete. The temporal behavior of the carbonation depth of FA concrete is predicted by using the Bayesian inference procedure. The Markov chain Monte Carlo (MCMC) method implemented by WinBUGS is used, and it is found that the square-root-t-law cannot precisely predict the temporal variation of the carbonation depth of concrete.

KEY WORDS: carbonation depth, fly ash concrete, Bayesian prediction

1. はじめに

近年、地球環境問題への取り組みとして廃コンクリートの再利用や産業副産物のコンクリート材料への利用等が進められている。特に、石炭火力発電所のフライアッシュや製鉄高炉から排出される高炉スラグは、コンクリート用材料として広く用いられており、一部は JIS 規格にも制定されている。このうち、フライアッシュはコンクリートの流動性の向上、水和熱・乾燥収縮・ひび割れの低減、アルカリシリカ反応の抑制等、コンクリートの品質や施工性を改善する効果のあることが知られている¹⁾。

ところで、コンクリートは強アルカリ性の材料であるが、空気中の二酸化炭素が表面から内部に向けて浸透することにより、経年的に中性化が進行する。中性化が進行すると内部の鉄筋が発錆し、鉄筋の断面欠損や周辺コンクリートの膨張亀裂による剥落などの劣化が生じ、構造耐力や耐久性に影響を及ぼす。特に、フライアッシュは水和反応の過程で生成される水酸化カルシウムを消費するポゾラン反応を引き起こすため、

中性化進行を促進させることが指摘されており¹⁾、中性化への対策を含め更なる検討が必要である。

一方、従来よりコンクリートの中性化深さの時間的進行予測は \sqrt{t} 則を用いて行われることが多いが、必ずしもこれに適合しないような事例も報告されており^{2~5)}、より精度の高い手法の開発が必要である。また、一般に予測には不確実性が伴うため、確定論的な手法では不確定な変動を考慮できない。このため、確率統計的手法に基づく予測手法の開発が望まれるところである。

本研究は、フライアッシュ微粉末を内割り・外割り調合したコンクリート試験体を対象に、促進中性化試験を行って中性化深さの特性を考察するものである。また、中性化深さ進行の不確実性を考慮した高精度予測を行う目的のため、中性化深さの統計的数式モデルを提案し、ベイズ推定法を適用してパラメータ推定を行う⁶⁾。ベイズ推定では、推定するパラメータの数が多くなると事後分布の計算が困難となる。ここでは、マルコフ連鎖モンテカルロ法の一つである WinBUGS を用いて数値的に事後分布を求め、不確実性の定量的評価に基づく中性化進行予測を行う。

* 建築学科 ** 建築・都市システム工学専攻

表 1 試験体調合一覧

記号	W/C	W/(C+FA)	W	C	FA/(C+FA)	FA/C	S	G	混和剤 CXwt%
	%	%	kg/m ³	kg/m ³	%	%	kg/m ³	kg/m ³	
N50	50%	50%	180	360	0	0	720	950	0.70%
NF50-20IN	62%	50%	190	305	20%	25%	720	950	
NF50-40IN	84%	50%	210	250	40%	67%	720	950	
NF50-50UT	50%	33%	180	360	33%	50%	540	950	
N60	60%	60%	216	360	0	0	720	950	
NF60-20IN	75%	60%	210	280	20%	25%	720	950	
NF60-40IN	100%	60%	200	200	40%	67%	720	950	
NF60-50UT	60%	40%	216	360	33%	50%	540	950	

C: セメント、FA: フライアッシュ、S: 細骨材、G: 粗骨材

2. 実験概要

2. 1 コンクリート概要

本研究では、JIS A 6201 (コンクリート用フライアッシュ) に規定されたフライアッシュ II 種と普通ポルトランドセメントを混合したフライアッシュコンクリートの試験体を製作し、促進中性化試験を行った。

コンクリートは、水セメント比 (フライアッシュ内割りでは、水結合材比) を 50% と 60% の 2 種類として調合を行った。フライアッシュ内割りでは置換率を 20% と 40% (NF50-20IN、NF50-40IN、NF60-20IN、NF60-40IN) とし、外割りでは添加率を 50% (NF50-50UT、NF60-50UT) と設定した。内割りでは水結合材比と置換率を、外割りでは水セメント比と添加率をそれぞれ調合の特性値としている。本実験に用いたコンクリートの調合を表 1 に示す。また、表 2 に各調合のコンクリートのスランプと 4 週圧縮強度を示す。

表 2 スランプと圧縮強度

記号	スランプ	圧縮強度
	cm	N/mm ²
N50	21.0	36.1
NF50-20IN	20.1	26.7
NF50-40IN	22.0	17.6
NF50-50UT	9.9	41.8
N60	22.3	29.2
NF60-20IN	18.7	16.2
NF60-40IN	22.4	11.4
NF60-50UT	24.1	29.2

2. 2 促進中性化試験

促進中性化試験用試験体は、寸法を 10cm×10cm×40cm とし、各調合ごとに 2 体製作した。促進面は長手方向の両側面とし、それ以外の表面はエポキシ樹脂を塗布して中性化が進行しないようにした。中性化促進条件は、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% とした。促進期間は、4 週と 10 週の 2 種類とし、促進期間終了後に試験体を割裂して、JIS A 1152 (コンクリートの中性化深さの測定方法) に基づき、フェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。写

真 1 に試験体状況の一例を示す。

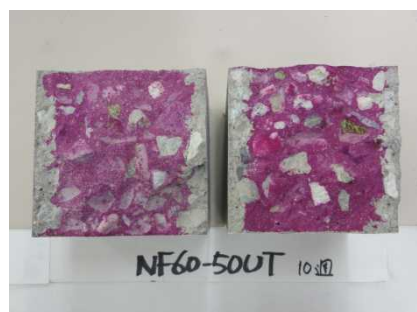


写真 1 試験体状況 (NF60-50UT、10 週)

2. 3 試験結果

各試験体の中性化深さの進行状況を図 1 に示す。フライアッシュを内割り混合したコンクリートの中性化進行は、混同しないものもしくは外割り混合したものと比較してより速いことがわかる。フライアッシュを外割り混合しても、混合しないものと比較して中性化速度はそれほど変わらないので、中性化速度は主に水セメント比 (水結合材比ではなく) に依存することが確認できる。

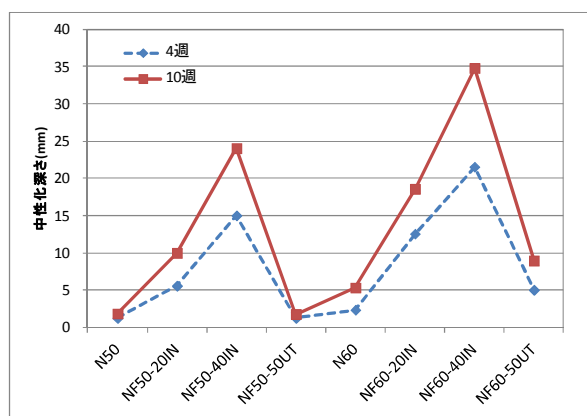


図 1 中性化深さ測定結果

また、N50 と NF50-50UT では 4 週と 10 週で中性化深さはあまり変化していないが、それと比較して水セ

メント比が大きいN60とNF60-50UTでは中性化がより深く進行している。

コンクリートの中性化深さは水セメント比や圧縮強度と強い相関があることが知られている。図2は全試験体について4週と10週における中性化深さと水セメント比との関係を示したものである。10週の方が相関が良いが、いずれの場合も非常に強い相関が見られる。また、図3は中性化深さと圧縮強度の逆数の関係を表したものである。これにも強い相関が見られるが、水セメント比と比較するとやや相関は弱い。

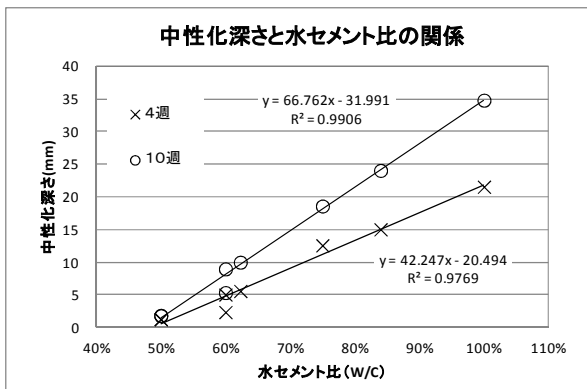


図2 中性化深さと水セメント比の関係

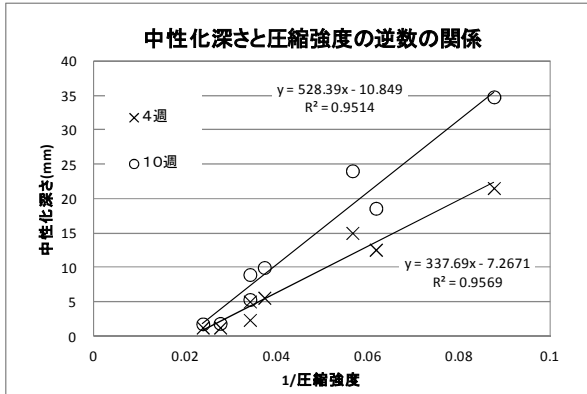


図3 中性化深さと圧縮強度の関係

3. ベイズ推定

本研究で用いたベイズ推定手法の概要を示す。詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

3.1 統計的数式モデル

コンクリートの材令を t とし、 t の時点における中性化深さを $C = C(t)$ と表す。 C は次式でモデル化される。

$$C = At^B + \varepsilon \quad (1)$$

あるいは、

$$\ln C = \ln A + B \ln t + \varepsilon' \quad (2)$$

ここに、 ε (あるいは ε') はモデルの誤差を表す確率変数で、平均値が零、標準偏差が σ (あるいは σ') の正規分布を持つものとする。また、 A 、 B 及び σ (あるいは σ') は未知パラメータであり、ベイズの定理より推定される。この数式モデルを用いれば、中性化深さを高精度に予測でき、かつパラメータが含む不確定性が中性化深さに及ぼす影響を定量的に評価できる。

3.2 ベイズの定理

未知パラメータをまとめて θ と表し、この事前分布を $f(\theta)$ と表すと、ベイズの定理よりデータ x が与えられたときの θ の事後分布は次のように求められる。

$$f(\theta|x) = \kappa L(x|\theta)f(\theta) \quad (3)$$

ここに、 $L(x|\theta)$ は尤度関数、 κ は正規化係数である。

3.3 マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC)

事後分布を解析的に求めることは一般には困難であるので、ここでは WinBUGS⁷⁾を用いた MCMC により数値的に事後分布を求め、パラメータ推定を行う。なお、尤度関数はデータが正規母集団から生成されたものとして設定した。また、(1)の場合の事前分布は次のように設定した。

$$A, B \sim N(0, \sigma_0^2), \sigma^2 \sim IG(\nu_0, \lambda_0) \quad (4)$$

ここに、 N は正規分布、 IG は逆ガンマ分布を表す。また、記号 \sim は左辺の確率変数が右辺の確率分布に従うことを意味する。(2)の場合は、 $\ln A$ と σ'^2 に対して(4)と同様に設定した。このとき、 A の事前分布は対数正規分布となる。

パラメータの分布に対して何らかの事前情報がある場合は、それを反映させた事前分布を設定すればよい。しかし、ほとんど情報がない場合は、いわゆる無情報事前分布を仮定することが適切である。ここでは、無情報であることを近似的に表現するため、 σ_0^2 には十分大きい値を、 ν_0 と λ_0 には十分小さな値を設定した。

3.4 推定結果

実験データが少ない場合、ベイズ推定を行うとパラメータの不確定性が大きくなり、予測の幅が拡大する。実験データがある程度存在する場合でも、データのばらつきが大きいと推定結果の不確定性も増大する。こ

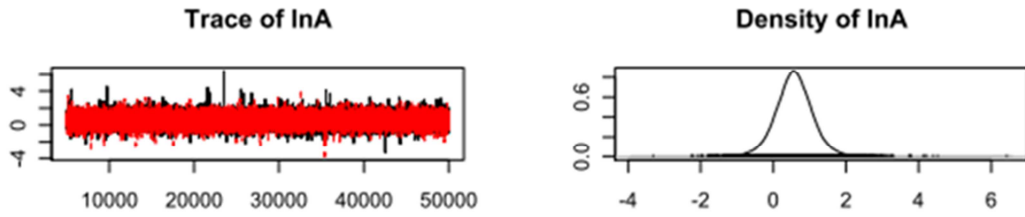


図4 パラメータ lnA のサンプルと事後分

ここでは、結果の一例として W/C が 60% の試験体を対象に中性化深さのベイズ予測結果を示す。

試験体 N60 と NF60-50UT の 4 週と 10 週の時点の中性化深さデータ (4 データ) に、文献⁸⁾より 4 週、8 週及び 13 週の 6 データを追加し、計 10 データを用いてベイズ推定を行った。追加データは文献の図から値を読み取って数値化した。(1)に基づく MCMC の 1 連鎖当りのサンプル数は 10 万 (初期値の影響を排除するため最初の 1 万は破棄) とし、初期値を若干変えて 2 連鎖実施した。(2)ではサンプルを 5 万 (同様に最初の 5 千は破棄) とし 2 連鎖とした。

(1)はパラメータ B に関して非線形性を持つが、(2)はパラメータを lnA と B とみれば線形モデルである。中性化深さ C もしくは lnC を MCMC により推定するとき、事後分布を模擬する乱数が定常状態に達している必要があるが、(1)と(2)を比較すると、(2)の方がかなり収束が速いことが確認されており⁶⁾、上記のサンプル数の違いはこの理由によるものである。また、事後サンプルは定常状態に収束しており、初期値の影響は除去されている。参考のため、図4に lnA のサンプルと事後分布を示す。事後分布は平均値と中央値がほぼ等しく、分布は概ね左右対称であり、正規分布に近いことがわかる。

図5に(1)に基づく結果を示す。実線は中性化深さの平均値、上下の破線はそれぞれパラメータの平均値+標準偏差及び平均値-標準偏差に基づく中性化深さを表している。なお、WinBUGS によるパラメータの推定結果は以下のようなものである。結果によれば、平均的な中性化深さの進行は \sqrt{t} 則よりもやや速い(0.62)ことがわかる。

A : 平均値=2.32、標準偏差=1.02

B : 平均値=0.62、標準偏差=0.19

また、図6は同じデータを用い、(2)に基づいてベイズ推定を行った結果である。縦軸は対数中性化深さを表している。

データの追加がベイズ推定に及ぼす影響を調べるた

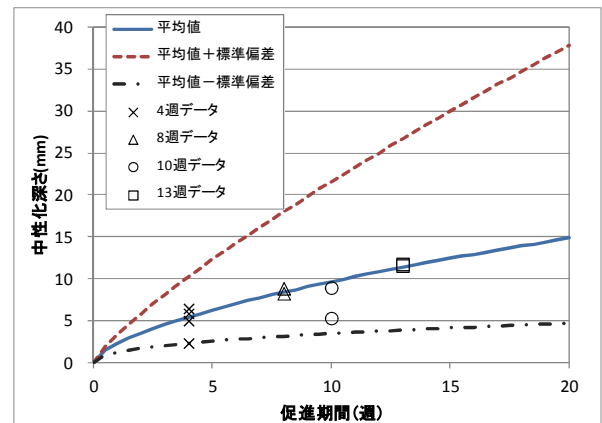


図5 (1)によるベイズ推定結果

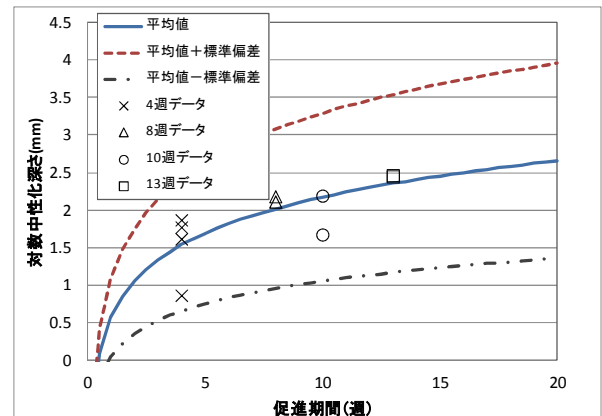


図6 (2)によるベイズ推定結果

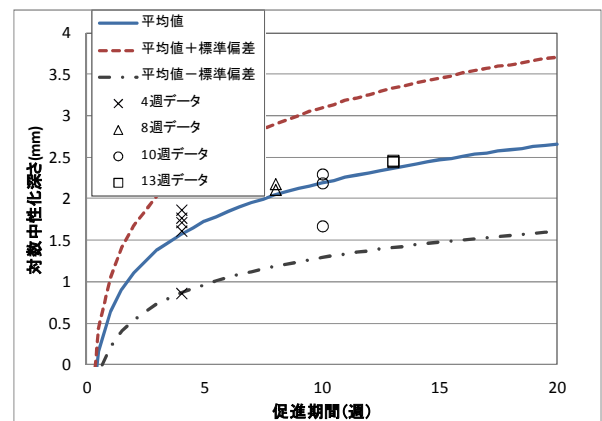


図7 (2)によるベイズ推定結果 (12 データ)

め、W/C が 62% (FA50-20IN) の 4 週、10 週の 2 データを追加し、(2)に基づいて同様の計算を行った結果を図 7 に示す。図 6 と 7 を比較すると、平均値の時間的進行はほとんど変化がないが、平均値±標準偏差の範囲がやや縮小しており、データの増加により不確実性が減少していることがわかる。

4. 結語

本研究では、フライアッシュコンクリートを対象に、フライアッシュの調合の違いが中性化深さ特性にどのように影響を及ぼすかについて、促進中性化試験を行って検討を加えた。また、将来の中性化深さ進行を高精度に予測し、かつ予測に纏わる不確実性を考慮できるベイズ推定法に基づく計算例を示した。主たる結論は以下のようである。

- 1) フライアッシュを内割り置換したコンクリートは、無混合や外割り混合のコンクリートに比較して中性化進行が速いことが確認された。
- 2) 本研究の実験に用いたコンクリートの範疇では、中性化深さと水セメント比は非常に強い相関を示し、圧縮強度の逆数との相関より高い相関係数を示した。
- 3) 中性化深さ進行に係る \sqrt{t} 則は、必ずしも精度的に十分とはいえない場合がある。予測に付随する不確実性の定量的評価を取り入れた高精度予測を行うには、本研究に用いたベイズ推定手法が有効である。
- 4) ベイズ推定に MCMC を組み合わせた予測手法は応用性に優れており、特に WinBUGS は煩雑な解析の手続きを必要とせず、非線形数式モデルのパラメータ推定に活用できる。

謝辞

本研究の一部は、社団法人グリーンコンクリート研究センターの支援を受けて行われたものである。ここに、記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説、日本建築学会 (2007).
- 2) 阿部道彦、榊田佳寛 他：促進中性化試験法の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、409 号、1-10 (1990).
- 3) 玉井孝幸、嵩 英雄 他：25 年経過した実大 RC 壁体における普通および流動化コンクリートの中性化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、614 号、1-7 (2007).
- 4) 呉 富栄、榊田佳寛：フライアッシュコンクリートの暴露試験に基づく中性化進行長期予測、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）9 月(2006).
- 5) M.G. Alexander、 J.R. Mackechnie、 W. Yam : Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities、 Cement and Concrete Composites、 29、 750-759 (2007).
- 6) S. Tasaka, M. Shinozuka, S. R. Chaudhuri, U.J. Na: Bayesian Inference of Carbonation Depth of Concrete Using MCMC, 明石工業高等専門学校研究紀要、 52、 45-50 (2009).
- 7) The BUGS Project : <http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/winbugs/contents.shtml>.
- 8) 黄 光律、野口 貴文、友澤 史紀：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化進行の予測、日本建築学会構造系論文集、 541 号、 9-15 (2001).