

京都大学大学院	学生会員	○小濱 健吾
大成建設株式会社	正会員	下村 泰造
大阪大学大学院	正会員	貝戸 清之
京都大学経営管理大学院	フェロー会員	小林 潔司

## 1. はじめに

空港施設のアセットマネジメントにおいて、地盤沈下予測は重要な課題となる。設計・施工段階では、地盤条件に多大な不確実性が介在するために、沈下過程を確定的に予測することは困難である。本研究では、不同沈下を考慮した1次元圧密モデルを用いて、地盤沈下過程に関するサンプルパスを作成するとともに、サンプルパスを荷重平均した混合地盤沈下モデルを作成する。さらに空港の供用開始後、地盤沈下量を継続的にモニタリングすることにより、混合地盤沈下モデルをMCMC（マルコフ連鎖モンテカルロ）法を用いてベイズ更新するハイブリッド型地盤沈下モデルを提案する。具体的に、空港舗装を対象として、地盤沈下予測とモニタリング情報を用いた地盤沈下予測管理問題への適用事例を示す。

## 2. 基本モデル

### (1) 地盤沈下サンプルパスの発生

本研究では、空港地盤の沈下過程を、地盤の不同沈下過程を考慮した確率的1次元圧密モデル（以下1次元モデルと呼ぶ）を用いて表現する。そのために、対象とする空港地盤を平面メッシュに分割するとともに、各平面メッシュに対して垂直方向にもメッシュ分割した3次元地盤モデルを用いる。1次元モデルを用いることにより、各平面メッシュごとに、地盤沈下量の経年的変化を予測することができる。しかし、地盤条件には多くの不確実性が介在する。このため、地盤条件をランダムに変化させた1次元圧密モデルを用いて、多数の地盤沈下シナリオを発生させることとする。乱数発生により各3次元メッシュの地盤条件を確定する。このようにして求めた地盤沈下過程は、乱数発生により求めた地盤条件シナリオに対して求めた沈下過程の1つのサンプル（以下、サンプルパス  $f_i(t, k)$  ( $k = 1, \dots, K$ ) と呼ぶ）を意味している。

### (2) 混合地盤沈下モデルの定式化

混合地盤沈下モデルを、1次元モデルで作成した平面メッシュ  $i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) のサンプルパス  $f_i(t, k)$  ( $k = 1, \dots, K$ ) の荷重和

$$\hat{y}_i^t = \sum_{k=1}^K \hat{\omega}_i(k) f_i(t, k) + \hat{\varepsilon}_i \quad (t = 0, \dots, \bar{T}) \quad (1)$$

として表現する。ここに、 $\hat{\varepsilon}_i$  は、測定誤差を表す確率変数であり、互いに独立な1次元正規分布  $\mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$  に従うと仮定する。また、 $\hat{\omega}_i(k)$  は、地盤沈下パス  $k$  に対して割り当てられた重みであり、

$$\sum_{k=1}^K \hat{\omega}_i(k) = 1 \quad (i = 1, \dots, I) \quad (2)$$

が成立する。

### (3) 混合地盤沈下モデルのベイズ更新

初期時点から時点  $T$  にいたる各時点  $t$  ( $t = 0, \dots, T$ ) において、各メッシュの地盤沈下量に関するモニタリング情報が計測され、地盤沈下量に関するデータ  $\mathbf{y}_i^{0,T} = (\bar{y}_i^0, \dots, \bar{y}_i^T)$  ( $i = 1, \dots, I$ ) が獲得できたと考えよう。モニタリング結果全体をベクトル  $\mathbf{y}^{0,T} = (\bar{y}_1^{0,T}, \dots, \bar{y}_I^{0,T})$  と表す。ここで、ひとまず重みベクトル  $\boldsymbol{\omega}_i$  を与件とし、確率誤差項のみが確率変数と考える。確率誤差項の分散の逆数  $\phi$  も与件とする。この時、モニタリング結果  $\mathbf{y}_i^{0,T}$  が観測される尤度は

$$\mathcal{L}(\mathbf{y}_i^{0,T} | \boldsymbol{\omega}_i, \phi_i) \propto \prod_{t=0}^T \phi_i^{1/2} \exp \left[ -\frac{\phi_i}{2} \left\{ \bar{y}_i^t - \sum_{k=1}^K \omega_i(k) f_i(t, k) \right\}^2 \right] \quad (3)$$

と表される。つぎに、 $\boldsymbol{\omega}_i$  の事前確率密度関数が、ディリクレ分布、分散の逆数  $\phi_i$  がガンマ分布に従うと仮定しよう。この時、 $\boldsymbol{\omega}_i, \phi_i$  ( $= \sigma_i^{-2}$ ) の事後分布は

$$\begin{aligned} & \pi(\boldsymbol{\omega}_i, \phi_i | \mathbf{y}_i^{0,T}) \\ & \propto \mathcal{L}(\mathbf{y}_i^{0,T} | \boldsymbol{\omega}_i, \phi_i) D(\boldsymbol{\omega}_i | \boldsymbol{\alpha}^{(0)}) g(\phi_i | \beta^{(0)}, \gamma^{(0)}) \\ & \propto \phi_i^{\beta^{(0)} + (T-1)/2} \exp \left[ -\phi_i \left\{ \gamma^{(0)} + \frac{1}{2} \sum_{t=0}^T \left( \bar{y}_i^t - \sum_{k=1}^K \omega_i(k) f_i(t, k) \right)^2 \right\} \right] \prod_{k=1}^K \omega_i(k)^{\alpha_k^{(0)} - 1} \quad (4) \end{aligned}$$

となる。

### (4) ベイズ予測モデル

初期時点  $t = 0$  から時点  $t = T$  に至るまでのモニタリング情報  $\mathbf{y}_i^{0,T}$  と、混合地盤沈下モデルのパラメータの事後分布  $\pi(\boldsymbol{\omega}_i, \phi_i | \mathbf{y}_i^{0,T})$  を与件としよう。その上で、時点  $t = T$  以降の地盤沈下量を予測する問題を考えよう。時点  $t = T$  における平面メッシュ  $i$  の地盤沈下量ベクトルの実測値（モニタリング情報）を  $\bar{y}_i^T$  と表そう。一方、時点  $t = T$  以降の時点  $\tilde{t}$  ( $> T$ ) の地盤沈下量の時点  $t = T$  における予測値を  $\hat{y}_i^{\tilde{t}}(T)$  と表そう。この時、時点  $\tilde{t}$  における

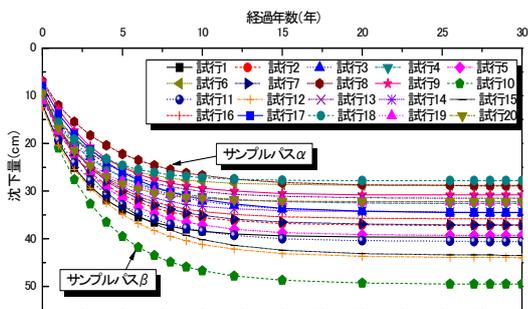


図-1 不同沈下シミュレーション結果の例

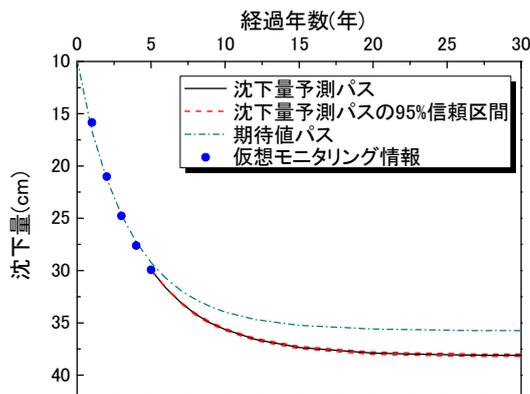


図-3 5年度における沈下量予測結果

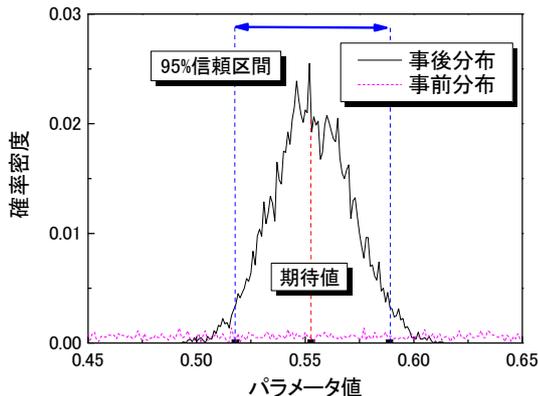


図-2 パラメータ $\omega_{73}(1)$ の事後分布

地盤沈下量の期待値  $E[\tilde{y}_i^t(T)]$  は、事後分布からの標本サンプル数  $\bar{n} - \underline{n}$ 、および標本サンプル  $n$  における時点  $t = T$  の予測残差  $\xi_i^{T,n}$  を用いて、

$$E[\tilde{y}_i^t(T)] = \frac{\sum_{n=\underline{n}+1}^{\bar{n}} \omega_i^n(k) f_i(\tilde{t}, k) + \xi_i^{T,n}}{\bar{n} - \underline{n}} \quad (5)$$

と表される。

### 3. 適用事例

本研究では、海上空港であるH空港を対象としてとりあげる。まず始めに、2.(1)で示した1次モデルにより地盤の不同沈下をシミュレーションした。すべての3次元ブロックに対して土質定数を確率分布からランダムに発生させ、モンテカルロシミュレーションを行った。図-1に不同沈下シミュレーションによって発生させたサンプルパスの一例を示す。

続いて1次モデルで得られた20本のサンプルパスを用いて、混合地盤沈下モデルを推計した。1次モデルで求めたサンプルパスは、互いに強い相関関係にある。したがって、多重共線性の問題を避けるため、20本のサンプルパスの中で予測沈下量の上限值と下限値を規定する2本のサンプルパス（サンプルパス $\alpha$ 、サンプルパス $\beta$ ）を用いて混合地盤沈下モデルを推計することとした。

最後に、空港供用後の継続的モニタリングによって得

られるモニタリング情報を用いて、混合地盤沈下モデルを更新する問題を考えよう。現時点においては、空港が供用されておらず、モニタリング情報が蓄積されていない。そこで、各平面メッシュの地盤沈下量のモニタリング結果を仮想的に作成し、混合地盤沈下モデルのベイズ更新を試みる。本適用事例では平面メッシュとして  $i = 73$  をとりあげた。

いま、空港の運営・管理中の期間を、1) 初年度から6年度、2) 6年度からそれ以降の期間の2つに分割しよう。供用開始後、毎年定期的に地盤沈下量がモニタリングされ、供用開始後5年度の時点に、混合地盤沈下モデルをベイズ推計する問題を考える。各パラメータの標本サンプルをMCMC法により抽出した。パラメータ  $\omega_{73}(1)$  の事後確率密度分布を図-2に示している。同図にはパラメータの事前分布も示しているが、ベイズ更新により混合地盤沈下モデルにおけるパラメータ分布の分散が小さくなっている。

つぎに、5年度にベイズ更新された混合地盤沈下モデルを用いて、6年度以降の地盤沈下パスを予測した結果を図-3に示す。供用後30年度における95%信頼区間の下限は37.99cm、上限は38.22cmであり、ベイズ更新の結果、混合地盤沈下モデルの推計精度が向上し、より正確な地盤沈下リスクの管理が可能になることが判明した。

### 4. おわりに

本研究では、空港施設のアセットマネジメントにおいて重要な課題となる地盤沈下の継続的モニタリングとモニタリング情報を用いた地盤沈下予測結果をベイズ更新するための方法論の提案を試みた。今後、空港地盤の沈下過程を継続的にモニタリングすることにより、混合地盤沈下モデルのベイズ更新の有効性を、現実のモニタリング情報を用いて検証することが必要である。