

## 回転鋼管杭の施工時情報を用いた現場施工品質評価に向けた基礎研究(その2)

|             |      |       |
|-------------|------|-------|
| ○新潟大学       | 学生会員 | 渡邊 慎也 |
| 新潟大学        | 正会員  | 大竹 雄  |
| 鋼管杭・鋼矢板技術協会 | 正会員  | 鈴木 友之 |
| 鋼管杭・鋼矢板技術協会 |      | 水谷 太作 |

## 1. はじめに

近年、杭基礎の施工品質の問題が、完成後の構造物の傾斜や沈下という不具合として顕在化する事例が増えており、施工時に得られる情報を施工に活用する情報化施工の重要性が高まっている。

本研究で対象とする回転鋼管杭は、施工時情報として杭頭トルクや貫入量といった連続データが施工時に得られる特徴がある。そこで、この施工時情報を有効活用し、施工現場においてリアルタイムに施工品質を確認する方法の開発を目指す。具体的には、杭の最大周面摩擦力度を地盤のN値のみでなく、対象現場で計測された杭頭トルクや貫入量などの施工時情報を用いて施工品質を逐次確認、更新する方法の開発を目指すものである。

その2では、その1で提案した推定式をそれぞれの現場特性を反映してリアルタイム更新する方法を提案する。

## 2. 研究の方法

## (1)更新方法の基本的な考え方

その1で導出した最大周面摩擦力度 $F$ の推定式をそれぞれの現場の特性を反映した式に、現場毎に更新することを考える。

各指標のパラメータベクトルを $\theta$ とすると、これを確率変数としてとらえ、その分布を $\pi(\theta)$ とする。これがベイズ更新における事前分布である。 $\pi(\theta)$ を、現場で計測したデータサンプル $D$ に対する尤度 $f(D|\theta)$ に基づき、事後分布 $\pi(\theta|D)$ へと更新する。パラメータの事後分布 $\pi(\theta|D)$ はベイズの定理により以下の式のように表される。

$$\pi(\theta|D) = \frac{f(D|\theta)}{\int f(D|\theta)\pi(\theta)} \pi(\theta) \quad (1)$$

更新を行う指標は現場において実際に計測される $\ln(N)$ 、 $\ln(T')$ 、 $\ln(S)$ である。2指標間の同時分布を2変量正規分布と仮定しているため、更新するパラメータは各指標の平均 $\mu$ 、標準偏差 $\sigma$ 、そして2指標間の相関係数 $\rho$ となる。

その1で示したように、多変量正規分布の考え方を導入し、多変量の関係を2指標間の関係に分離したことにより、更新する部分が明確になる。

## (2)事前分布の設定方法

ベイズの定理では、事前分布 $\pi(\theta)$ を主観的に設定

することとなっている。しかし、ここではできる限り、工学的な意味を持たせることを考えて、収集したデータから事前分布をモデル化することとした。

全現場それぞれのデータセットから復元抽出法(ブートストラップ法)を用いて各指標のパラメータの分布を推定し、それを重ね合わせ、それら全体を包括するように最尤法を用いて確率密度関数を当てはめた。

当てはめに用いる確率密度関数は、各パラメータの定義域条件に従い、表-1の通りとした。またベータ分布は、変数変換を施すことにより、定義域を $0 < \rho < 1$  から  $-1 < \rho < 1$  へと拡張している。表-2と図-1は、最尤法により設定した事前分布が描かれている。

## (3)ベイズ更新方法

各パラメータの事前分布から事後分布への更新には、粒子フィルタを用いる。粒子フィルタとは、逐次モンテカルロ法とも呼ばれ、推定したい事後分布の形状に合わせて粒子を生成し、その分布を近似する手法である。分布の更新において尤度となるデータサンプルの決定方法を次の2通り設定した。

- ① 各現場において地表面からの深度5mごとに新たに計測したサンプルのみを尤度とし、事後分布へと更新する。
- ② 深度5mごとにそれまでに計測されたサンプル全てを尤度として更新する。

更新したパラメータの事後分布から算出した代表値を多変量正規分布の新たなパラメータとし、その1に示した多変量正規分布の考え方で逐次推定式を更新する。

## 3. 研究結果

ブートストラップ法により推定した各パラメータの分布と、確率密度関数を当てはめた結果を図-1に示した。これを事前分布とし、前述の方法で推定式の更新を行った。

図-2には、A現場の更新結果を示している。最大周面摩擦力度 $F$ の推定結果(青線)を、推定式を更新しない場合の推定結果(緑線)と、現行の道路橋示方書によるN値のみに基づく評価結果(黒線)とともに示した。また、事前分布の更新方法別に分けて結果を示している。

更新方法②については、深度5mごとに新たに得た

キーワード 回転鋼管杭, 施工時情報, 周面摩擦, 多変量正規分布, ベイズ更新  
連絡先 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050 番地 TEL025-262-7479

データサンプルにより更新した推定式に再度、その深度まで計測したデータ値を代入し、推定値を得ている。さらにこの現場において推定式を更新した場合の、推定式の回帰係数と分散の推移を表-2に示した。

図-2を見ると、更新方法にかかわらず、推定式を更新した場合の推定結果は、深度30m付近の実測値付近を推定していることからわかるように、推定式を現場データに基づき更新することにより、実測値に近い推定が可能になる可能性が示唆される。更新方法②に関しては、推定式の更新回数が多い、つまり、尤度に用いるサンプル数が多いほど、より実測値に近い推定ができています。

更新結果は、A現場の最大周面摩擦力度 $F$ の計測データの特徴を適切に捉えている。これより、この現場特性に応じて推定式を更新し、合理的な推定式を選択していることがわかる。

表-1 事前分布のモデル化

| パラメータ                  | 条件                    | 確率密度関数      | 分布パラメータ       |
|------------------------|-----------------------|-------------|---------------|
| $\mu_{\ln X}$          | なし                    | 正規分布        | $\mu, \sigma$ |
| $\sigma_{\ln X}$       | $\sigma > 0$          | 対数正規分布      | $\mu, \sigma$ |
| $\rho_{\ln X - \ln Y}$ | $-1 \leq \rho \leq 1$ | ベータ分布(変数変換) | $p, q$        |

表-2 事前分布のパラメータ

| パラメータ        | 分布パラメータ            |                 |                   |                 |                    |                 |
|--------------|--------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| $X$          | $\ln(N)$           |                 | $\ln(T')$         |                 | $\ln(S)$           |                 |
| $\mu_X$      | $\mu = 2.06$       | $\sigma = 0.84$ | $\mu = 6.13$      | $\sigma = 0.81$ | $\mu = -1.71$      | $\sigma = 0.18$ |
| $\sigma_X$   | $\mu = 0.11$       | $\sigma = 0.24$ | $\mu = -0.37$     | $\sigma = 0.29$ | $\mu = -1.30$      | $\sigma = 0.46$ |
| $X-Y$        | $\ln(N) - \ln(T')$ |                 | $\ln(N) - \ln(S)$ |                 | $\ln(T') - \ln(S)$ |                 |
| $\rho_{X-Y}$ | $p = 11.91$        | $q = 1.50$      | $p = 1.88$        | $q = 4.45$      | $p = 1.66$         | $q = 2.60$      |

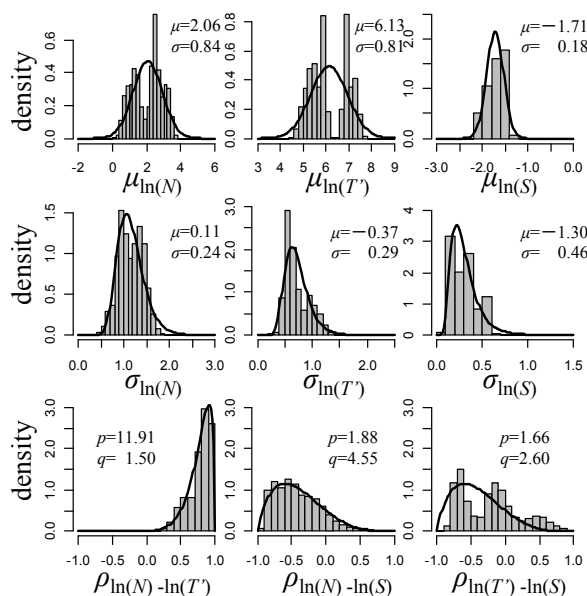


図-1 事前分布の設定

#### 4. まとめと今後の課題

本研究は、回転鋼管杭を対象として、現場で計測される施工時情報を有効活用して施工の品質を現場で確認する方法を開発した。その1では、欠損データを含むデータセットから合理的に重回帰式を導く方法に主眼を置いて記述した。その2では、それをさらに現場毎の特性に応じた合理的な推定式に更新する方法を提案し、その有効性を検証した。

今後は、より精度の良い推定式や事前分布の作成、また推定結果検証の妥当性の確保のために、データベースを拡充することが大きな課題となる。

各指標の相関性や更新過程を分析し、地盤工学的視点からの考察も必要になると考えている。

本研究は日本鉄鋼連盟「鋼構造研究・教育助成事業」の助成金を受けて実施しました。記して深謝いたします。

#### 参考文献

- 1) Jianye Ching and Kok-Kwang Phoo :Modeling parameters of structured clays as a multivariate normal distribution, 2012

表-3 A現場における推定式の更新過程

| 更新回数 | 更新方法①による更新 |       |       |      |      | 更新方法②による更新 |       |       |      |      |
|------|------------|-------|-------|------|------|------------|-------|-------|------|------|
|      | 回帰係数       |       |       | 定数   | 分散   | 回帰係数       |       |       | 定数   | 分散   |
| 1    | 0.41       | 0.18  | -0.79 | 1.21 | 0.20 | 0.41       | 0.18  | -0.79 | 1.21 | 0.20 |
| 2    | 0.47       | 0.17  | -0.70 | 0.99 | 0.17 | 0.55       | -0.02 | -1.42 | 1.01 | 0.19 |
| 3    | 0.57       | 0.13  | -0.44 | 0.92 | 0.14 | 0.55       | -0.08 | -0.78 | 2.09 | 0.23 |
| 4    | 0.53       | 0.19  | -0.24 | 0.94 | 0.15 | 0.52       | 0.03  | -0.58 | 1.61 | 0.20 |
| 5    | 0.53       | 0.23  | -0.72 | 0.06 | 0.11 | 0.62       | -0.04 | -0.74 | 1.53 | 0.18 |
| 6    | 0.57       | 0.15  | -0.51 | 1.25 | 0.13 | 0.64       | -0.01 | -0.64 | 1.56 | 0.16 |
| 7    | 0.60       | 0.16  | -0.74 | 0.99 | 0.11 | 0.65       | 0.02  | -0.61 | 1.55 | 0.15 |
| 8    | 0.46       | 0.09  | -0.51 | 1.31 | 0.22 | 0.59       | 0.13  | -0.42 | 1.13 | 0.13 |
| 9    | 0.63       | -0.10 | -0.81 | 1.67 | 0.20 | 0.53       | 0.18  | -0.32 | 1.08 | 0.15 |
| 10   | 0.31       | 0.20  | -0.19 | 1.64 | 0.25 | 0.52       | 0.18  | -0.31 | 1.09 | 0.15 |

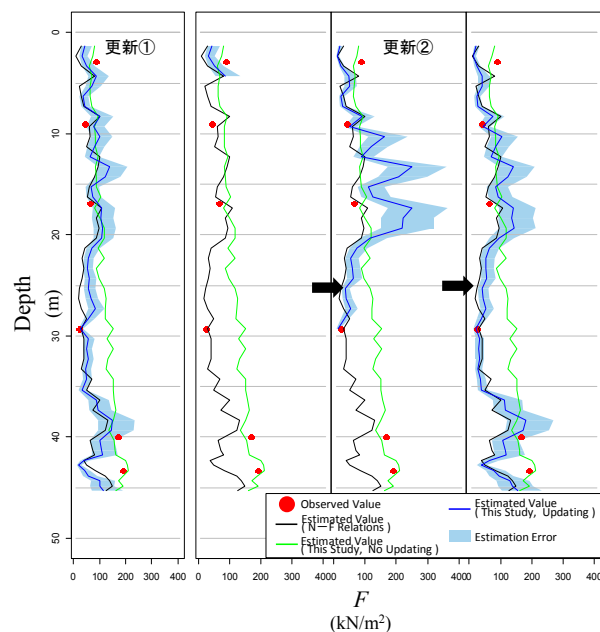


図-2 A現場における推定式の更新と当てはまり