

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1)

○新潟大学
新潟大学
鋼管杭・鋼矢板技術協会
鋼管杭・鋼矢板技術協会

正会員 大竹 雄
学生会員 渡邊 慎也
正会員 後藤 宏輔
正会員 藤井 義法

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1では、実際の計測データに基づいて、最大周面摩擦力度の合理的な推定式の導出方法を示す。

2. 研究に用いるデータ

既往の回転鋼管杭の鉛直載荷試験データ、施工時情報データ、地盤調査データ(N値計測)から、深度 $Z(m)$ 、杭頭トルク $T(kN \cdot m)$ 、杭頭荷重 $P(kN)$ 、一回転あたりの貫入量 $S(m)$ 、N値、最大周面摩擦力度 $F(kN/m^2)$ を収集整理してデータベースを構築した。

図-1は、データセットの一例である。 T や S などの施工時情報は連続値をとるが、N値と F は離散値をとる。従って、連続値と離散値との対応については、連続値をある範囲で平均して関連づけることとした。

N値は、基本的に深度1m間隔に計測されるため、図-1に示すように、N値の計測深度から $\pm 0.5m$ の範囲に含まれた連続値の平均値をN値との対応値として扱うこととした。 F はひずみゲージ間で測定された値の平均値を F との対応値として扱うこととした。図-1は、灰線が各指標の連続値、青丸がN値の深度に対応した離散値を示している。

なお、周面摩擦力は、翼径の10%が沈下した時点での周面摩擦力を採用している。また、杭頭トルクは、杭先端の翼底面と地盤面との摩擦力により生じているとの仮定に基づいて、翼半径の3乗で正規化することとした。翼半径を $r_0(m)$ とすると、正規化トルク T' は下式で表される。

$$T' = T / r_0^3 (kN/m^2) \quad (1)$$

表-1は、収集したデータベースの特徴が示されている。表には、データ数と相関係数、それぞれの指標の平均と標準偏差、変動係数が整理されている。

ただし、全てのデータが存在するのは、3現場(13データ)のみである。特に、載荷試験データが少ないため、最大周面摩擦力度 F のデータ数が極めて少ない。これに対して、施工時情報や地盤情報のデータ数は充実している。このように、指標間ごとに存在

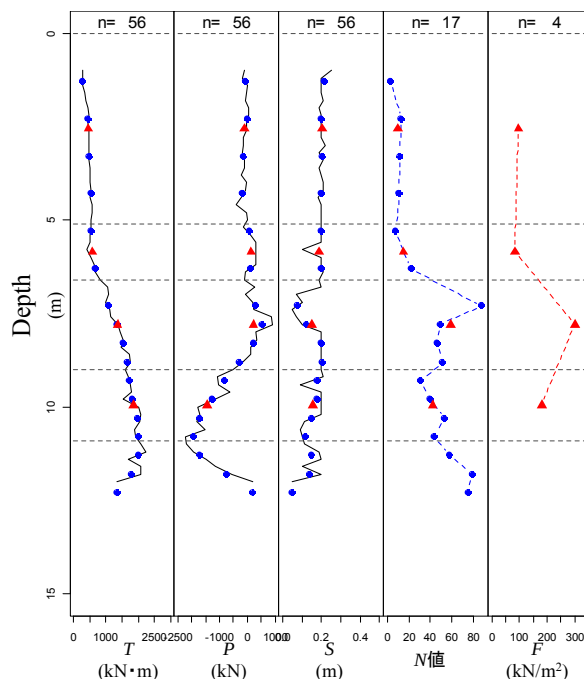


図-1 データセットの一例

表-1 データベースの特徴

データ数 相関係数	$\ln(F)$	$\ln(N)$	$\ln(T')$	$\ln(S)$	平均 ($\ln X$)	標準 偏差 ($\ln X$)	変動 係数 (X)	分布型 X
$\ln(F)$		123	13	13	4.13	0.70	0.83	対数正規
$\ln(N)$	0.52		437	437	1.48	1.38	1.47	対数正規
$\ln(T')$	0.69	0.75		473	5.88	0.82	1.20	対数正規
$\ln(S)$	-0.07	-0.27	-0.28		-1.84	0.40	0.38	対数正規

するデータ数に多寡が生じている。この点が、本研究において、推定式導出上の課題となる。

3. 研究の方法

欠損データを含むデータベースから合理的な推定式を提案するため、多変量正規分布の条件付分布を用いて推定式を作成することとした。以下に、多変量正規分布の条件付分布と回帰分析の関係について記述する。

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ を推定式作成に用いる確率変数ベクトルであるとする、そのパラメータは、1次の期待値ベクトル $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p\}'$ と、共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma} = \{\sigma_{ij}\}$ $i, j = 1, 2, \dots, p$ と記述される。ただし、共分散行列は対称、非特異行列とする。ここで、確率変数ベクトル $\mathbf{x}$ を下記のように分離して考える。

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}]'$$

このとき $\mathbf{x}^{(1)}$ 、 $\mathbf{x}^{(2)}$ はそれぞれ次のような $q \times 1$ 、

キーワード 回転鋼管杭、施工時情報、周面摩擦、欠損データ、多変量正規分布
連絡先 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050 番地 TEL 025-262-7479

$(p-q) \times 1$ の $\mathbf{x}$ の部分ベクトルである.

$$\mathbf{x}^{(1)} = [X_1, X_2 \cdots X_q]^T, \quad \mathbf{x}^{(2)} = [X_{q+1}, X_{q+2} \cdots X_p]^T$$

この分割に対応して, $p \times 1$ の期待値ベクトルおよび $p \times p$ の共分散行列を次のように分割する.

$$\boldsymbol{\mu}^{(1)} = [\mu_1, \mu_2 \cdots \mu_q]^T, \quad \boldsymbol{\mu}^{(2)} = [\mu_{q+1}, \mu_{q+2} \cdots \mu_p]^T$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{11} & \boldsymbol{\Sigma}_{12} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{21} & \boldsymbol{\Sigma}_{22} \end{bmatrix}$$

ここで, $\boldsymbol{\Sigma}_{11}$ は $q \times q$, $\boldsymbol{\Sigma}_{12}$ は $q \times (p-q)$, $\boldsymbol{\Sigma}_{21} = \boldsymbol{\Sigma}_{12}'$, $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$ は $(p-q) \times (p-q)$ であり, $\boldsymbol{\Sigma}_{22}$ は非特異であるとする.

このとき, $\mathbf{x}^{(2)}$ が与えられたときの $\mathbf{x}^{(1)}$ の条件付分布である $f(\mathbf{x}^{(1)}|\mathbf{x}^{(2)})$ は正規分布となり, その期待値は以下式で表される.

$$E[\mathbf{x}^{(1)}|\mathbf{x}^{(2)}] = \boldsymbol{\mu}^{(1)} + \boldsymbol{\Sigma}_{12}\boldsymbol{\Sigma}_{22}^{-1}(\mathbf{x}^{(2)} - \boldsymbol{\mu}^{(2)}) \quad (2)$$

これは, すなわち回帰分析に等しく, 切片と勾配として表示しなおすと下式のように記述できる.

$$\text{切片: } \boldsymbol{\mu}^{(1)} - \boldsymbol{\Sigma}_{12}\boldsymbol{\Sigma}_{22}^{-1}\boldsymbol{\mu}^{(2)} \quad (3)$$

$$\text{勾配: } \boldsymbol{\Sigma}_{12}\boldsymbol{\Sigma}_{22}^{-1} \quad (4)$$

なお, 分散は下式で表される.

$$\text{var}[\mathbf{x}^{(1)}|\mathbf{x}^{(2)}] = \boldsymbol{\Sigma}_{11} - \boldsymbol{\Sigma}_{12}\boldsymbol{\Sigma}_{22}^{-1}\boldsymbol{\Sigma}_{21} \quad (5)$$

以上より各指標のパラメータ, つまり平均と分散, 2 指標間の共分散が分かれば, 多変量正規分布の条件付分布を用いて, 推定式を作成することができる. ただし, 各指標が正規分布に従うことが前提条件となっている. 従って, 各指標に対して BoxCox 変換や対数変換を施すことにより, 分布形状を正規分布に近づける操作が必要となる.

4. 研究結果

図-2 に各指標のヒストグラムを示す. 変換前 (左図) は対数正規分布に近い分布をしていることが分かる. この点を考慮して, 杭頭荷重以外の各指標を対数変換して右図を得た. なお, N 値は 0 以下の値を除去して対数変換を行っている. この結果より, 対数変換することで概ね正規分布に近い分布形状となっていることから, 簡易さを優先して, 対数変換を用いることとした. なお, 杭頭荷重 P は, 周面摩擦力推定に際して強い説明力を有していないことから説明変数からは除外した.

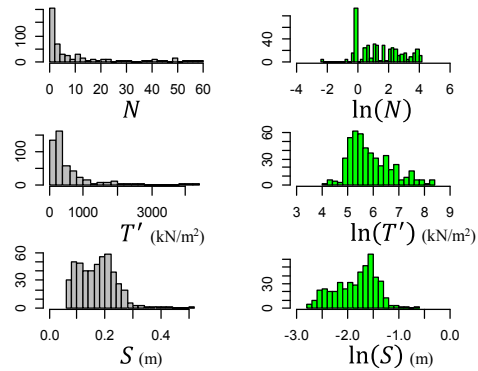
以上の準備より, この推定式作成に用いる確率変数ベクトルは, $\mathbf{x} = \{\ln(F), \ln(N), \ln(T'), \ln(S)\}'$ となり, 以下の推定式を得ることができた.

$$\ln(F) = 0.01 \ln(N) + 0.60 \ln(T') + 0.23 \ln(S) + 0.98 \quad (6)$$

$$\text{var}[\ln(F)] = 0.50 \quad (7)$$

図-3 は, 载荷試験が実施されている 3 現場の周面支持力の計測値 (赤丸) と推定式 (緑実線) の比較を行った図である. 計測値の平均的な特性を良く表現していることが分かる.

N 値に対応させて集計したデータ



F に対応させて集計したデータ

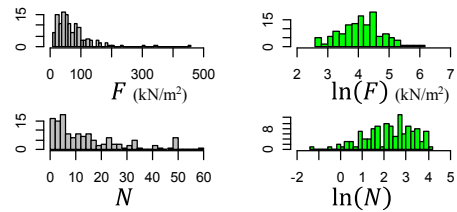


図-2 各指標のヒストグラム

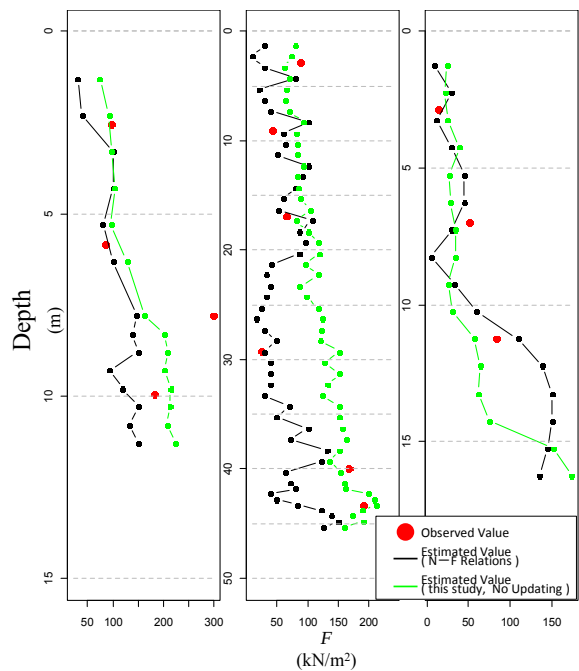


図-3 導出された式と元データの関係

5. まとめ

欠損データを含むデータベースから, 多変量正規分布の条件付き分布から, 合理的な推定式を導出する方法を提案した. この提案式は, その 2 で検討する現場毎の推定式の更新のための基本的な情報となるものである.

参考文献

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