

杭基礎設計のための変形挙動評価体系の構築

新潟大学大学院 自然科学研究科 学生会員 大木 拓馬
 新潟大学 工学部建設学科 正会員 大竹 雄
 鉄道総合技術研究所 正会員 西岡 英俊
 鉄道総合技術研究所 正会員 佐名川 太亮

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された土木構造物の劣化が深刻化し、その維持管理が問題となっている。一方で、国内の設計体系は、規制緩和や社会の要請の高度化、多様化により性能設計に基づいた信頼性設計に移行している。こうした中で、既設構造物が、現在要求される性能（例えば、安全性や復旧性）が確保できていない「既存不適格」と呼ばれる問題が生じている。また、早期復旧のための被災後の残存支持力評価や地震などの大変形時挙動の予測を含めた既設杭の性能評価体系の確立が必要である。

本研究は、以上の背景を踏まえて、杭基礎構造物の鉛直支持特性に着目して、鉛直変位を合理的に予測できる地盤バネ（地盤反力係数）の設定方法について検討する。本研究の特徴は、一般的に地盤バネは、等価線形バネとしてもモデル化されるのに対して、小さな変位レベルから大きな変位レベルまでをシームレスにモデル化する履歴モデルの適用を試みている点にある。これにより、小さな変位レベルから大きな変位レベルまでを、統一的なモデルで計算を行うことができる。さらには、小さな変位レベルの観測から逆解析を踏まえて大変形（地震時など）の挙動評価の精度を向上させることも期待される。

2. 研究の方法

2.1 研究に用いるデータ

研究に用いるデータは、全国で実施された鉛直載荷試験データのうち、ひずみゲージが等間隔に配置され、軸力が観測されている打ち込み杭 14 現場と場所打ち杭 26 現場を対象とした。表-1 にその概要を示す。

表-1 研究に用いた載荷試験データの概要

工法	試験数	杭径(m)	根入れ長(m)
打ち込み	14	0.8~1.0	26.0~82.07
場所打ち	26	1.0~1.5	7.0~70.0

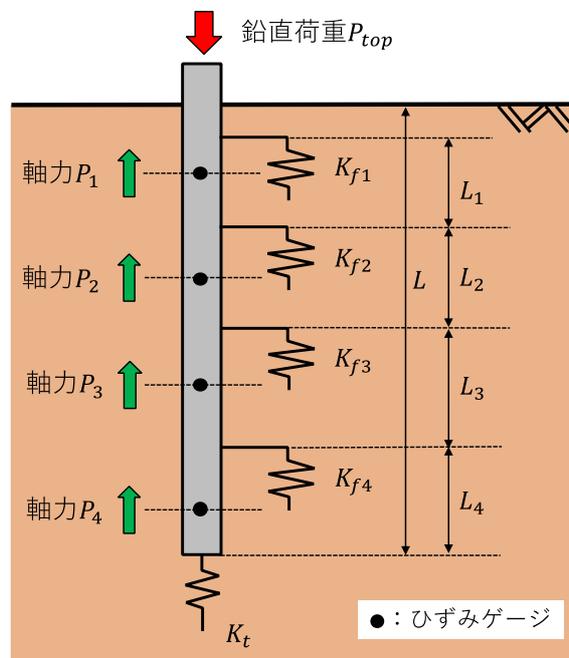


図-1 モデル化の概念図

2.2 地盤バネの同定方法

ひずみゲージ位置で観測される軸力 P_i をもとに、それぞれ区間ごとに力の釣り合い式を考える。例えば、図-1 に示すようなひずみゲージが4つの場合を考える。釣り合い式は、

$$\begin{aligned}
 P_1 + K_{f1}\delta_1 &= P_{top} \\
 P_2 + K_{f1}\delta_1 + K_{f2}\delta_2 &= P_{top} \\
 P_3 + K_{f1}\delta_1 + K_{f2}\delta_2 + K_{f3}\delta_3 &= P_{top} \\
 P_4 + K_{f1}\delta_1 + K_{f2}\delta_2 + K_{f3}\delta_3 + K_{f4}\delta_4 &= P_{top} \\
 K_{f1}\delta_1 + K_{f2}\delta_2 + K_{f3}\delta_3 + K_{f4}\delta_4 + K_t\delta_t &= P_{top}
 \end{aligned} \tag{1}$$

P_{top} : 杭頭荷重, δ_t : 杭先端変位

となる。また、各区間での変位 δ_i を杭先端変位と剛弾性変形量の合計として、以下のように定義する。($i = 2 \sim 4$ でも同様)

$$\delta_i = \delta_t + \sum_i \varepsilon_i L_i = \delta_t \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i L_i}{\delta_t} \right) = \rho_i \delta_t \tag{2}$$

ここで、ひずみは、各区間の軸力平均から算出した。

$$\varepsilon_1 = \frac{P_{top} + P_1}{EA}, \dots, \varepsilon_4 = \frac{P_3 + P_4}{EA}$$

(2)式を(1)に代入し、行列表記にすると、

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho_1 K_{f1} \\ \rho_2 K_{f2} \\ \rho_3 K_{f3} \\ \rho_4 K_{f4} \\ K_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{P_{top} - P_1}{\delta_t} \\ \frac{P_{top} - P_2}{\delta_t} \\ \frac{P_{top} - P_3}{\delta_t} \\ \frac{P_{top} - P_4}{\delta_t} \\ \frac{P_{top}}{\delta_t} \end{pmatrix}$$

$$Hx = z$$

となる。上式中において、 P_{top} 、 P_i 、 ρ_i は载荷試験から決定できる既知量であり、未知量は、ひずみゲージ区間での平均的な周面地盤バネ K_{fi} と杭先端地盤バネ K_t のみとなる。両辺の左側から H^{-1} をかけることで未知量である2つのバネを同定することができる。

3. 同定結果

打ち込み杭 14 現場で 2.2 で示した方法で、地盤バネの同定を行った。ひずみゲージ間で明確に土質区分を分けることができるデータの観測点変位と荷重度を N 値で割ったものの関係を、砂質土と粘土それぞれ図-2、図-3 に示す。図の破線は、打ち込み杭における設計標準での基準周面支持力度の算定式を示している。(砂質土では 3N、粘土では 6N)

バラツキはあるものの、周面摩擦の履歴を逆解析することができた。砂質土は、粘性土に比べてバラツキは少なく、2mm~3mm より変位が大きくなると急激に頭打ちする傾向があることが分かる。この傾向はいずれの現場でも同様である。一方、粘性土では、履歴モデルが場所毎に大きく異なる傾向が読み取れる。粘性土の周面摩擦力度のモデル化の困難さを示していると考えられる。

これらの結果と設計標準の値を比較すると砂質土は逆算した履歴モデルの平均的な値を与えており、粘性土は履歴モデルの下限值を与える式であることが分かる。前述の通り、モデル化の困難さから、設計上コンサーバティブなモデル化を行ってきたことが読み取れる。

4. 今後の展望

ここでは、簡便な仮定に基づいた逆解析により、地盤バネの履歴モデルによるモデル化の可能性を検討

してきた。今後は、この結果を事前情報とし、FEM と統計的手法を組み合わせることで、合理的な推定式を導くことを考えている。また、杭工法や土質区分による異質さを評価できるような階層ベイズ法の適用を検討している。

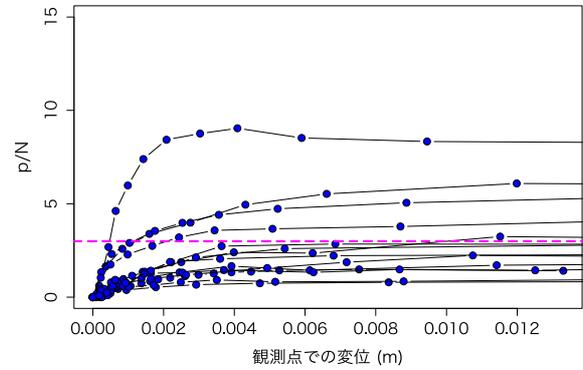


図-2 観測点の変位と荷重度/N 値の関係(砂質土)

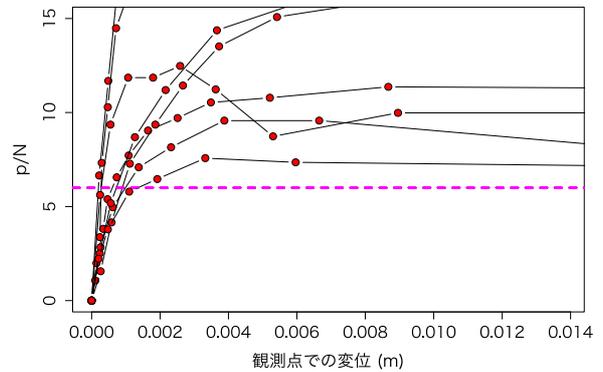


図-3 観測点の変位と荷重度/N 値の関係(粘土)

参考文献

- 1) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説～基礎構造物～，丸善出版，2012
- 2) 佐名川太亮，西岡英俊：幅広い変位レベルに対応した砂地盤における杭の水平地盤反力係数の評価，2016
- 3) 西岡英俊，篠田昌弘，角雄一郎，山手宏幸：洗掘により沈下した直接基礎橋脚に対する鉛直载荷試験および列車走行試験，第 48 回地盤工学研究発表会，2013
- 4) 上野慎也，西岡英俊，佐名川太亮 他：上載荷重を変化させた際の鉄道橋脚の固有振動数の推移と逆解析による橋脚基礎底面の地盤ばね定数の同定
- 5) 中谷聖一，白戸真大，横幕清：杭の軸方向の変形特性に関する研究，土木研究所資料，第 4136 号，2009.03
- 6) 間瀬辰也，中井正一：単杭の杭周面地盤ばねの評価法に関する検討，日本建築学会構造系論文集，Vol. 77, No. 680, pp.1527-1535, 2012
- 7) Randolph, M.F. and Wroth, C.P. : Analysis of deformation of Vertically loaded piles , J. Geot. Eng. Div, ASCE, Vol. 104, No. GT12, pp. 1465-1488, 1978
- 8) 土質工学会：支持力入門，1990
- 9) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社，1976