

微小変位レベルの応答観測に基づく地盤反力係数の解釈

Interpretation of coefficient of subgrade reaction based on minute displacement level observation

新潟大学大学院 学生会員 ○大原 健太郎

新潟大学 正会員 大竹 雄

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 正会員 佐名川 太亮

1. 背景と目的

国内外の構造物設計基準が、性能設計の概念に基づく信頼性設計に移行し、定着しようとしている。そして、社会の多様化した要求性能に対して、構造物設計の照査方法は、耐力照査から変位照査に変化しつつある。

現在一般的に、構造物基礎の変位計算では、地盤をバネでモデル化した等価線形解析法が用いられている。この際、地盤の変形特性は地盤の応力とひずみを関連づける「地盤変形係数」、地盤反力度と基礎の変位を関連づける「地盤反力係数」を用いて一次元問題に単純化される。また、「地盤変形係数」と「地盤反力係数」も比例定数を介して関係づけられる。本研究は、この比例定数に着目し、その意味を考察したいと考えている。

従来の地盤変形係数と地盤反力係数のモデル式は、非常に乏しい载荷試験データベースから導出された経験式により導かれてきた。しかし、近年、全国規模の载荷試験データベースからひずみや変位依存性を考慮した地盤変形係数と地盤反力係数が提案されている¹⁾。さらに、微小変位レベルの杭の応答の計測から、地盤の動的変形特性に用いられている履歴モデル(R-Oモデルなど)を用いたモデル化の試みもなされている²⁾。しかしながら、いずれの検討も、地盤変形係数と地盤反力係数を結びつける係数は、回帰分析により定めており、その理論的な考察は不十分である。

本研究では、杭の水平载荷試験において微小変位レベルの応答を観測した既往の研究²⁾をもとに、初期地盤変形係数、初期地盤反力係数の関係を分析することにより、地盤反力係数の意味を力学的に解釈することを目指す。さらに、杭の水平方向地盤反力係数だけでなく、様々な载荷条件における地盤反力係数を合理的に推定するための基礎資料を得ることを目的としている。

2. 静的水平载荷試験と起振器を用いた共振実験

実験の詳細は紙面の都合上割愛するが、概要のみ下記に示す。実験の概要図を図1-(a)に示しており、実験に用いた模型杭は外径150mm、厚さ5.0mm、長さ3400mmの鋼管杭である。模型地盤材料はDr=90%の気乾東北硅砂6号が用いられている。図1-(b)はひずみゲージの貼付け位置を示しており、深度方向に多点観測し、連続的な地盤反力係数を計測している。なお、本実験の特徴は、起振器を用いた共振実験により微小変位における地盤反力係数と変位量の関係を観察している点にある。さらに、静的载荷試験を行うことにより、微小変位レベルから大变位レベルまでの地盤反力係数の非線形特性について考察している。図-2では、杭径の1%の変位量を基準変位とし、基準変位における地盤反

力係数を基準地盤反力係数として、各深度での地盤反力係数と変位をそれぞれで除して正規化したものを示している。正規化することにより、変位依存性は深度に依存しないことが分かる。従って、初期地盤反力係数が把握できれば、任意の変位レベルの地盤変形係数を推定できる可能性がある。図-3は、地表面での正規化地盤反力係数と正規化変位量の関係を示したものであるが、初期地盤反力係数は、基準地盤反力係数(変位が杭径1%の際の地盤反力係数)に比べて約10倍の値をとる。

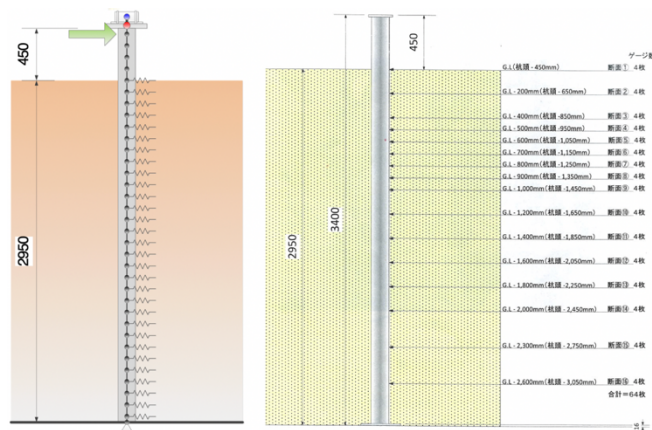


図1-(a)概要図

図1-(b)ひずみゲージの貼付け位置

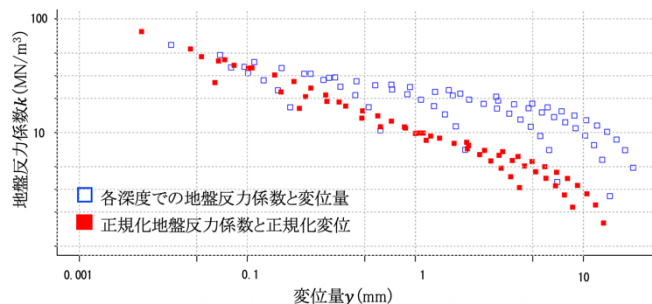


図-2 地盤反力係数と変位関係の正規化

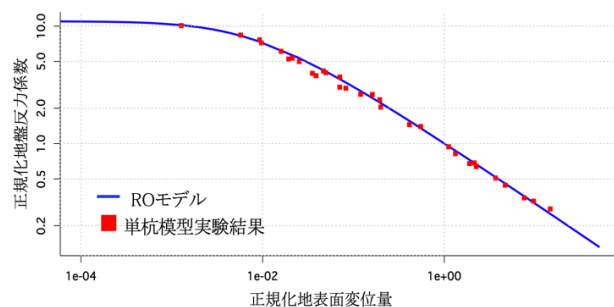


図-3 正規化地盤反力係数と正規化地表面変位量の関係

キーワード 地盤反力係数 拘束圧深度依存性 有効载荷幅

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町 8050 番地 新潟大学大学院

3. 弾性論に基づく地盤反力係数の力学的意味

先に示した既往の研究より、地盤反力係数の変位依存性は、深度によらず同様の履歴モデルでモデル化できることがわかった。そこで、実験において観測されたある地盤反力係数と変位をこの履歴モデルに基づいて、初期地盤変形係数 k_0 に変換し、初期地盤変形係数 E_0 と関係を分析することを試みる。構造物と地盤の相互作用をモデル化している地盤反力係数の力学的考察を行うことは難しいが、“初期”に着目することにより、弾性論による考察を行うことができる。

弾性変形 δ は、荷重度 q 、基礎幅 D 、ポアソン比 ν 、ヤング率 E 、形状係数 I_p により下式で表される。

$$\delta = qD \frac{1 - \nu^2}{E} I_p \quad (1)$$

ここで、 $E/(1 - \nu^2) = E_{eq}$ とおき、 E_{eq} を地盤変形係数と呼称する。なお、地盤変形係数は、ポアソン比 $\nu=0.50$ を仮定した時のヤング率である¹⁾ことから、 ν を包含する指標として記述することにする。

$$\frac{\delta}{D} = \frac{q}{E_{eq}} I_p = y_{eq} \quad (2)$$

ここで、 y_{eq} を変位率と呼称する。ここで、 $q/E_{eq} = \varepsilon^*$ (軸ひずみみたいなもの) とおくと下式が得られる。

$$y_{eq} = \varepsilon^* I_p \quad (3)$$

形状係数 I_p は3次元問題(地盤の変形)を1次元問題(仮想一軸圧縮供体)に変換する係数と解釈することができる。仮想一軸圧縮供試体の仮想軸ひずみ ε^* と供試体の高さ I_p と解釈される。地盤反力係数により地盤をバネでモデル化することは、基礎の形状や環境条件の影響を I_p に集約していることになる。

以上の準備より、荷重度 q と変位 δ との関係を表す地盤反力係数 k_{eq} は下式となる。

$$k_{eq} = \alpha \frac{E_{eq}}{D} \quad \left(\alpha = \frac{1}{I_p} \right) \quad (4)$$

α は、形状係数の逆数で荷重条件に応じて決まる比例定数となる。本稿では、この比例定数を影響係数と呼称することにする。次に、杭基礎の水平変形時の形状係数 I_p について考える。ここでは、任意深度における弾性地盤内における地中円形基礎の水平変位はMindlinの弾性変位解³⁾から下式を得た。

$$\xi = \frac{Q}{16\pi(1-\nu)aG} \Delta h \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{\Delta h(1+\nu)2}{16\pi(1-\nu)a}} = \frac{1}{I_p^*} \quad (6)$$

ξ : 地盤水平変位 Q : 水平荷重 I_p^* : 形状係数
 ν : ポアソン比 a : 杭半径(載荷幅) G : セン断剛性
 Δh : 深さにより決定される無次元定数項

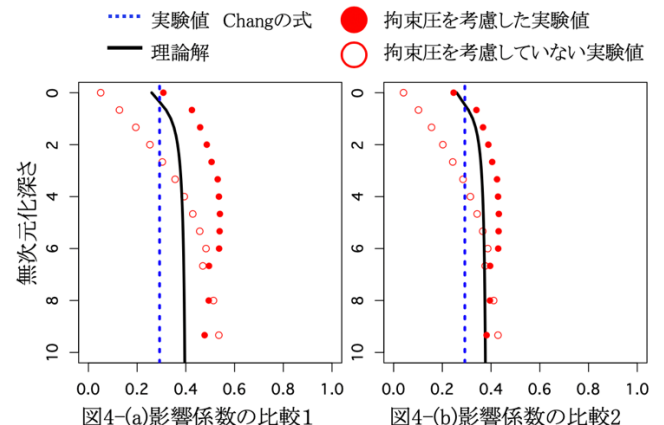
4. 模型実験に基づく検証

図-4は、それぞれの式で逆算された影響係数 α (初期地盤反力係数に対応)と深度(杭径で正規化した無次元深度)の関係をプロットで示したものであり、図-4(a)は有

効載荷幅を杭径の長さとした場合の結果を示し、図-4(b)は有効載荷幅を杭径の80%にした場合の結果を示す。ここで有効載荷幅を杭径の80%にしたのは、これまでの実務設計においてこのような方法が用いられていたことがあるためである。

次に、それぞれの式での影響係数の逆算方法を下記に示す。

まず、模型実験での影響係数だが、対象土層で用いた気乾東北珪砂6号に対して、拘束圧20kPaの条件下で動的



変形試験を実施し、初期せん断剛性 $G_0=58.7(\text{MN/m}^2)$ を得た。この値と実験より得た初期地盤反力係数 k_0 を式(4)に代入することで算定した。図中の点線は、Changの式から求めた影響係数であり、実線は弾性解である式(6)から求めた影響係数である。

また、拘束圧の深度依存性は、文献4)を参考に、拘束圧の1/2に比例するものとした。

拘束圧の深度依存と有効載荷幅を変化させることによってより弾性解に近い結果が得られた。

5. 結論

地盤変形係数と地盤反力係数の関係を表す影響係数に着目して、弾性論に基づいて考察を行った。その結果、初期の地盤変形係数と初期の地盤反力係数は、載荷幅を杭径の80%に設定した上で計算した弾性論からの計算値と概ね一致することが分かった。なお、影響係数は、 I_p と関連する指標であることから、基礎の形状や周辺の環境状況に依存する事がわかる。以上を踏まえて、今後は、3次元FEM解析と載荷実験データから、杭の水平載荷問題に限らず、様々な載荷条件の影響係数を割り出すことにより、汎用的な地盤反力係数の設定方法を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 大竹雄・七澤利明・本城勇介・河野哲也・田辺晶規：基礎の変位レベルと地盤のひずみレベルを考慮した設計用地盤反力係数の推定法，土木学会論文集C，Vol.73，No.4，pp.412-428，2017.
- 2) 佐名川太亮：幅広い変位レベルにおける杭の水平地盤反力係数の評価と変位レベル依存性のモデル化に関する研究，学位論文，2017.
- 3) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社刊，1974.
- 4) 緒方辰男・倉知禎直・古関潤一：地盤変形特性の応力・ひずみレベル依存を考慮した水平方向地盤反力係数の載荷幅依存性，土木学会論文集，No.631/III-48，371-381，1999.9