

水平地盤反力係数の変位レベル依存性が基礎の水平抵抗に与える影響

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○笠原 康平
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 佐名川 太亮
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 西岡 英俊

1. はじめに

杭の水平地盤反力係数は、変位量の増加に伴い地盤反力係数が低下する変位レベル依存性を有することが知られている。特に、杭の水平地盤反力係数 k_h は、地盤の拘束圧の影響により地盤深さごとに地盤反力係数が異なることから、非常に複雑な挙動を示す。道路橋示方書¹⁾や鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造物²⁾(以下基礎標準とする)では、地盤反力係数の変位レベル依存性は直接的には評価されておらず、例えば基礎標準では基準変位を杭頭変位 10mm に設定し、等価線形剛性による評価式が用いられている。しかしながら、これら設計基準では、地震時の挙動評価を主たる目的とした評価式となっており、微小変位から大変位までの連続的な変位レベル依存性について定量的に評価するには至っていない。そこで本研究では、微小変位から大変位における変位レベル依存性が構造物全体に与える影響を評価することを目的として、まず相互作用ばねの変位レベル依存性を RO モデルでモデル化し、ラーメン高架橋模型を対象とした振動実験の再現解析から検証を行う。さらに、静的非線形解析を実施し、基礎全体系における剛性の変位レベル依存性について評価する。

2. モデル化の検証

水平地盤反力係数の変位レベル依存性について検討するため、文献3)に示されるラーメン高架橋模型(約 1/10 スケール)を対象とした振動実験の再現解析を行った。再現解析に当たっては、地盤変位が構造物に及ぼす影響を考慮するため、図-1に示すように非線形応力ひずみ関係を有する自由地盤ばねを設定し、土柱と各杭の水平地盤ばねを接続した。なお、文献3)で実施した振動実験において部材に損傷が見られなかったことから、部材は線形モデルとし、杭体および柱の断面剛性は曲げ試験および軸圧縮試験の結果を用いた。また、スラブとフーチングはヤング率を $2.05 \times 10^8 \text{kN/m}^2$ とした。

水平地盤反力係数 k_{hr} に関しては、直径 300mm の円形の水平平板載荷試験の結果から、基準水平地盤反力係数 k_{hrB300}

(載荷幅 B の 1%変位時の地盤反力係数)が深度の 0.5 乗に比例するよう設定することで拘束圧依存性を考慮した。さらに、上記水平平板載荷試験と振動実験における杭の載荷幅 B が異なることを踏まえ、道路橋示方書および鉄道標準を参考に、 $k_{hr}/k_{hrB}=(B/0.3)^{-3/4}$ の関係式を用いて地盤反力係数の載荷幅依存性を考慮した。地盤ばねの変位レベル依存性については、(1)~(3)に示す RO モデルを用いてモデル化した。

$$\delta = \frac{p}{k_{h0}}(1 + \alpha|p|^\beta) \quad (1), \quad \alpha = \left(\frac{2}{\delta_y k_{h0}} \right)^\beta \quad (2), \quad \beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (3)$$

ここで、 p : 載荷応力 (kN/m^2)、 k_{h0} : 初期水平地盤反力係数 (kN/m^3)、 δ_y : 基準変位 (m)、 h_{\max} : 最大減衰

キーワード 水平地盤反力係数, 杭基礎, 変位レベル依存性

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室 TEL 042-573-7261

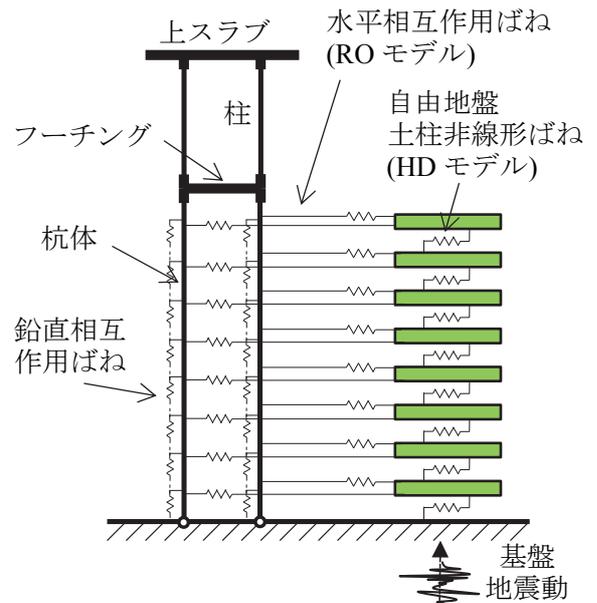


図-1 解析モデルの概要

定数である。この時、起振器および静的水平荷試験から得られた地盤反力係数の変位レベル依存性を RO モデルでフィッティングした結果、初期水平地盤反力係数 k_{h0} を基準水平地盤反力係数 k_{hr} の 10 倍、 δ_y を 1.20^{-5} 、 h_{max} を 0.22 に設定することで図-2 のように変位が杭径の 10^{-3} %~10 %程度までの非線形特性を精度よく表現できることを確認している。

土柱間のせん断ばね(自由地盤ばね)の非線形モデルに関しては、双曲線モデルで表現し、上限値を最大せん断強度および初期剛性を三軸試験の結果を基に拘束圧依存性を考慮して深度ごとに設定した。また、レーリー減衰を適用して、 $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 0.001$ と設定した。

モデル化の検証のため、0.1~15 Hz にエネルギーを有する最大加速度 20gal および 100gal のホワイトノイズ(以下それぞれ WN20gal, WN100gal) を用いた再現解析を行った。この結果、図-3、図-4 のように WN20gal 入力時と WN100gal 入力時の両者において実験値が精度よく再現されており、解析モデルの妥当性が確認された。この時、解析結果において、杭頭と地盤の相対最大変位が、WN20gal 入力時は $2.3 \times 10^{-4}m$ 、WN100gal 入力時は $1.7 \times 10^{-3}m$ であった。このことから、解析モデルでは杭径の 4.0^{-1} % までの微小変位レベルおよび 3.3 % までの変位が表現できていると考えられる。

3. 杭全体剛性の変位レベル依存性についての評価

上記のモデルを用いて水平地盤反力係数の変位レベル依存性が基礎全体の水平抵抗に与える影響について検証した。検証に当たっては、フーチング重心位置に静的荷重を作用させ、杭頭における水平変位と基礎の水平剛性(作用荷重/杭頭水平変位量)の関係を求めた。この結果、図-5 のような結果が得られた。杭頭変位 y/y_r が 0.1 より大きい場合には累乗の関係を有しているが、0.1 より小さい微小変位レベルでは、収束傾向を示すことが確認され、非線形挙動が異なることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、まずラーメン高架橋模型を対象とした振動実験の再現解析を行い、RO モデルを適用した本解析モデルを用いることで、微小変位および大変位が生じた時の実験値を精緻に再現できることを確認した。さらに、水平地盤反力係数の変位レベル依存性が基礎の水平抵抗に与える影響について検証するため、静的解析による数値実験を実施した。この結果、杭径の 0.1% を境に基礎の全体水平剛性は異なる特性を示すことが明らかになった。

参考文献 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 2) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物) 3) 佐名川ら：斜杭ラーメン高架橋を対象とした地盤変位作用時の動的挙動に関する実験的検討，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol. 71, No. 3, 163-176, 2015.

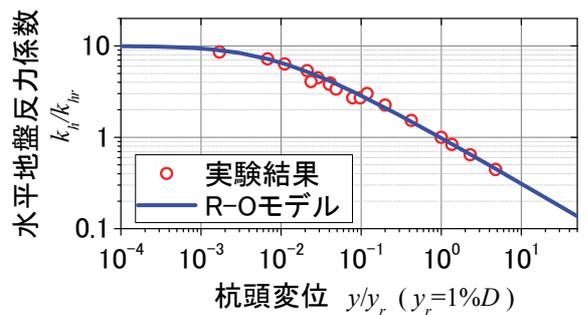


図-2 地盤反力係数の変位レベル依存性のモデル化

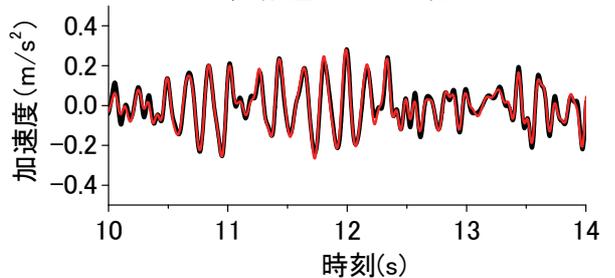


図-3 フーチングにおける時刻歴応答加速度(WN20gal 入力時)

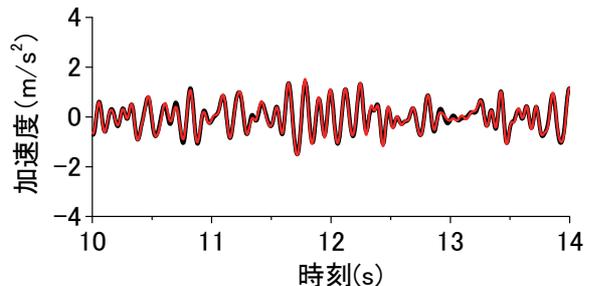


図-4 フーチングにおける時刻歴応答加速度(WN100gal 入力時)

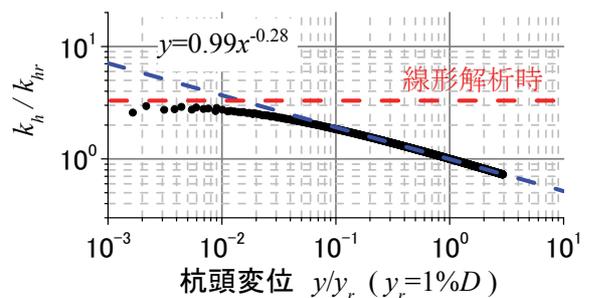


図-5 杭全体剛性の変位レベル依存性