

群杭基礎の非線形動的相互作用の表現方法

鉄道総合技術研究所 正会員 室野 剛隆
 東京大学生産技術研究所 正会員 小長井一男

1. まえがき 群杭基礎では、いわゆる群杭効果による影響が見られ、その挙動は複雑である。また、近年の設計では、レベル2地震を対象としていることから、地盤の非線形性を考慮することは必須である。地盤の非線形性には、基礎近傍地盤が杭と地盤の相互作用力により非線形化する影響と、自然地盤がせん断振動により非線形化する影響の両者が考えられる。本研究では、前者を「ローカル非線形性」、後者を「サイト非線形性」と呼び、両者の影響を取り入れた群杭基礎の非線形動的相互作用問題の簡易な表現方法を提案するとともに、この2つの非線形性の特性について考察を加える。

2. 群杭のインピーダンスの評価 “等価梁法”¹⁾ 地盤 - 群杭の動的相互作用の影響を簡易にモデル化する方法として、基礎の挙動をフーチング（杭頭）の水平と回転の2自由度に集約した通称 Sway-Rocking モデルで表現することを前提とする。群杭の杭頭インピーダンスは等価梁法を用いて評価する。等価梁法は Konagai *et al*¹⁾により開発された方法で、群杭と杭により取り囲まれた地盤を一体として取り扱い、地盤-群杭系を等価な1本梁に置換するものである。その際には以下に示す4つの仮定をおいている。

- (a) 群杭は杭間隔を一定に保ったまま変形する。また、杭に囲まれた土塊は杭と一体となって挙動する。
- (b) 杭の曲げ変形による摩擦は無視する。
- (c) 杭頭部はフーチングに剛結される。
- (d) 分割された杭要素の上端側および下端側は、地盤の分割要素の切断面と同一平面上に位置する。

また周辺地盤には多治見・下村が開発した3次元薄層要素法を適用し、そのインピーダンスを評価する。これにより地盤中に埋設された群杭の杭頭インピーダンスを効率よく評価することが可能である。

3. 杭頭インピーダンスの非線形性のモデル化 ローカル非線形性とサイト非線形性が p - y 関係に与える影響について、著者らは、遠心力載荷装置を用いた模型杭の杭頭載荷試験および地盤変位載荷試験を実施することにより検討している²⁾。本研究では、この結果を杭頭ばねに適用し、骨格曲線を式(1)の双曲線とし、履歴則に Masing 則を付加する。

$$P(t_{i+1}) = \frac{K(t_{i+1})}{1/y(t_{i+1}) + 1/y_r(t_{i+1})} \quad (1)$$

$P(t_i)$ は時刻 $t = t_i$ における杭頭反力、 $y(t_i)$ は杭と地盤の相対変位、 $K(t_i)$ は杭頭ばね（インピーダンス実部）で、時々刻々変化する各層の地盤のせん断剛性を用いて、上記の等価梁法により算定する。 $y_r(t_i)$ はそのときの基準ひずみで、 $y_r(t) = P_{\max}/K(t)$ で算出される。このとき $P_{\max}$ は土の c 、 ϕ から決定される値であるので地盤のひずみによらず一定値とする。このモデルは、ローカル非線形性の影響を、双曲線型の骨格曲線に Masing 則の履歴を組合わせた形で表現し、サイト非線形性の影響は、時々刻々双曲線の初期勾配をその瞬間の地盤のひずみに応じて低下させることにより表現したものである。時々刻々に算定される骨格曲線を乗り移るようなモデル（RC部材の軸力変動モデルと同様）に相当する。具体的な解析手順を図1に示す。

4. 模型実験のシミュレーション

過去に行った大型せん断土層を用いた4本杭の振動実験の結果⁴⁾をシミュレーションする。この実験ではフ

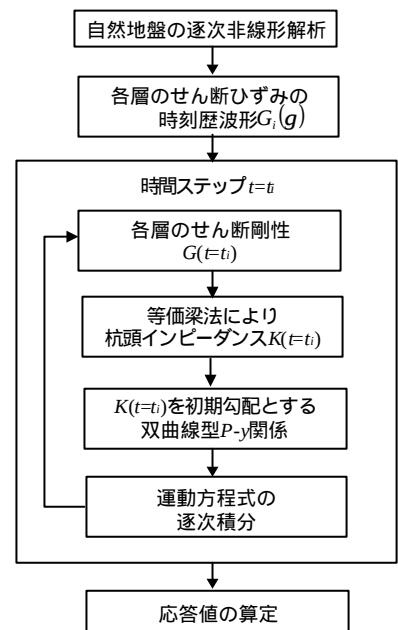


図1 解析フロー

キーワード 群杭基礎、非線形相互作用、ローカル非線形性、サイト非線形性、等価梁法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 （財）鉄道総合技術研究所 TEL042-573-7262

ーチングの重量 W を 150(kN) と 450(kN) の 2 ケースを設定している．実験の詳細は文献 4) を参照されたい．まず，自然地盤を 1 次元でモデル化し，土の非線形構成則として修正 GHE モデル⁵⁾を採用し，各層のせん断弾性係数の時刻歴変化 $G(t)$ を算出した．次に $G(t)$ を用いて等価梁法を用いて時々刻々杭頭インピーダンス $K(t)$ を算出し，式(1)に示す杭頭双曲線ばねを用いて，地盤-杭系の S-R モデルの解析を実施した．以上により求めたフーチング位置での加速度および変位を実験結果と比較して図 2 と図 3 に示す．なお，

インピーダンス $K(t)$ を初期状態のまま一定で行った場合（ローカル非線形の影響のみ考慮），時々刻々変化するインピーダンス $K(t)$ を使用するがその履歴を考慮しない場合（サイト非線形の影響のみ考慮），についても計算を実施した．

- (1) 150kN タイプの場合には，提案法による応答波形と計測波形とは非常によく一致しており，提案法の有効性が確認できる．ただし，サイトの非線形性のみを考慮した場合でも，概ね実験結果を説明できている．なお，ローカル非線形性のみを考慮したモデルでは，実験との一致度はかなり低い．重量が軽い場合には，杭頭に作用する慣性力効果が小さく，慣性力により地盤が非線形化する割合よりも，自然地盤の非線形性の影響の方が相対的に大きかったことを示している．
- (2) 450kN タイプでは，提案法による計算値と実験結果との一致度は相変わらず高い．しかし，150kN タイプでは比較的良好な結果を与えたサイト非線形性のみ考慮したモデルの一致度は，かなり低下している．重量が重い場合には，杭頭部に作用する慣性力効果が大きくなり，慣性力により杭が変形させられ，その結果，杭基礎近傍の地盤が大きく非線形化する．よって，自然地盤の非線形性の影響のみでは評価しきれないことを示している．

5. おわりに

本論文では，群杭基礎の非線形動的相互用問題の簡易な表現方法を提案した．今後はさらに，杭部材の非線形性の影響を導入することを考える．

＜参考文献＞ 1) K. Konagai “An upright single beam equivalent to grouped piles” 生産研究 50(9), pp.13-16, 1998. 2) 多治見，下村：3 次元薄層要素による建物 - 地盤系の動的解析，日本建築学会論文報告集 243, pp.41-51, 1976. 3) 室野，村上，畠中，棚村：地盤変位を受ける単杭の p-y 関係に関する検討，第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集 CD-ROM, 2002. 4) 王，室野，西村：大型せん断土槽を用いた杭基礎と地盤の動的相互作用に関する実験的検討，土木学会論文集 No.661/I-53, pp.57-69, 2000. 5) 西村，室野：GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証，第 25 回地震工学研究発表会，pp.309-312, 1999.

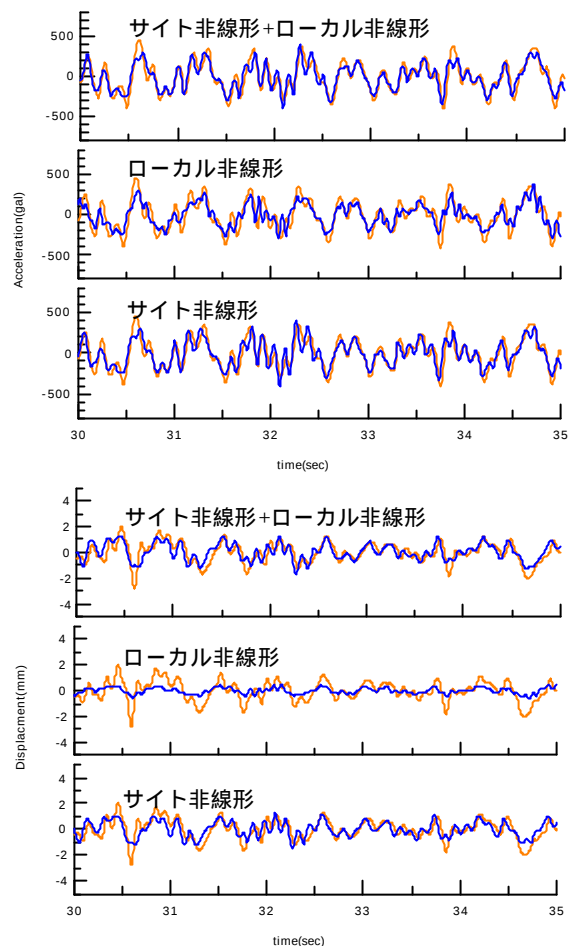


図 2 140kN タイプのシミュレーション結果

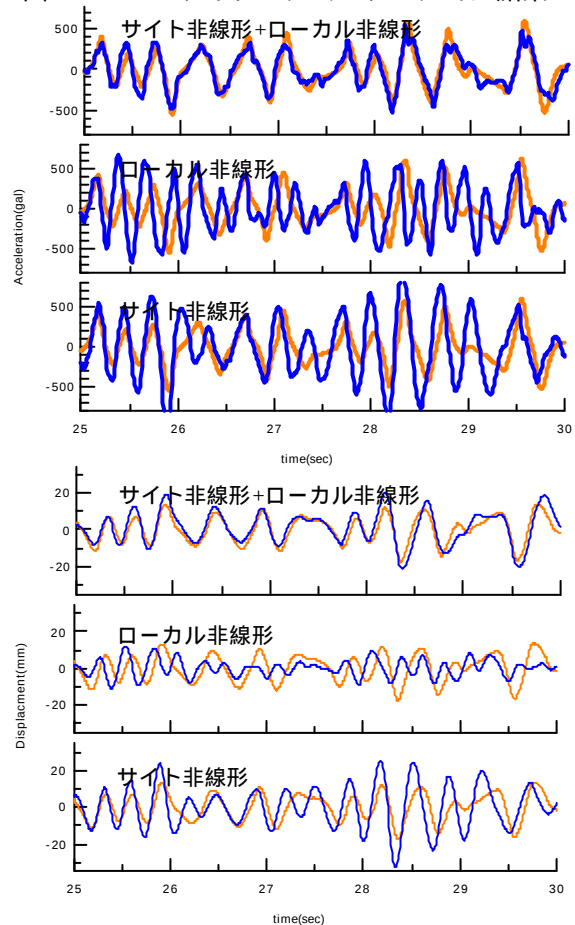


図 3 440kN タイプのシミュレーション結果