

土の非線形性を考慮した群杭基礎の動的相互作用の新たな表現方法

室野剛隆¹・小長井一男²

¹ (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: murono@rtri.or.jp

² 東京大学生産技術研究所教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

日本ではその国土事情により、軟弱な地盤に土木構造物が建設されることが多い。その場合、基礎形式としては群杭基礎が用いられることが多い。群杭基礎では、杭と杭との相互作用による効果（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、近年の設計体系では、いわゆるレベル2地震をも想定地震として設定していることから、地盤の非線形性を考慮することは必須である。地盤の非線形性の影響には、杭基礎近傍地盤が杭と地盤の相互作用力により塑性化する影響と、自然地盤が地震波を伝えるためにせん断変形することによる塑性化する影響の2つの側面がある。本研究では、等価梁法により群杭のインピーダンスを効率的に評価するとともに、時々刻々変化する地盤のひずみに依存した双曲線型の履歴則を杭頭ばねに与えることにより、上記の2つの非線形性の影響を考慮することにより、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。

Key Words : Soil-pile interaction, non-linear, group pile, equivalent uplight beam

1. はじめに

地盤一群杭基礎構造物の動的相互作用を考慮した地震時挙動は、薄層要素法^{1),2),3)}、有限要素法^{4),5)}などの解析法により評価を行うことができるが、群杭を扱うには複雑な定式化が必要である。さらに薄層要素法は振動数領域での定式であることから、線形問題に限定される。一方、有限要素法は非線形問題にも適用可能であり、近年では3次元解析にまで拡張されて地盤一群杭系の非線形相互作用問題が詳細に解析できるようになった。ただし、3次元解析を実施する場合には、多くの情報量が必要であり、解析領域全体にわたりそのパラメータを決定するのは容易ではない。また、膨大な情報が得られるものの、必要とする情報は限られていることが多い（例えば橋脚や基礎の加速度や変形等）。そこで、従来から、地盤-基礎間の動的相互作用問題を、スウェーとロッキングの杭頭インピーダンスで評価することがよく行われてきた。一般にはSRモデルと呼ばれ、耐

震設計実務の分野でも広く使われている⁶⁾。このような簡易な表現方法を用いたモデルは、設計において利用価値が高いだけでなく、相互作用現象を端的に記述したモデルであり、現象を理解するためには有用な手法である。

さて、SRモデルでは杭頭部のインピーダンスの評価方法が重要となる。地盤を弾性体とした場合には、振動数依存の形で理論解が得られる⁷⁾。しかし、近年の設計体系ではレベル2地震をも対象としており⁸⁾、もはや弾性理論解をそのまま適用することは出来ず、杭頭インピーダンスについても地盤や杭部材の非線形性を考慮せざるを得ない。杭頭ばね（杭頭インピーダンスの実数部に相当する）の非線形性のモデル化では、地盤一群杭系を3次元有限要素法や梁-ばね系としてモデル化し、その静的荷重増分解析により杭頭部の荷重-変位関係（ P - δ 関係）を算出し、これを杭頭ばねの非線形骨格曲線として扱う場合が多い^{6),9),10)}。この場合、得られる P - δ 関係は、一般には双曲線状の形状を示す。これは上部構

造物からの慣性力が杭に伝達され、杭と地盤間の相互作用により、杭周辺地盤が非線形化する影響を取り入れたものであると言える。しかし、実際の地震時の挙動を考えた場合には、上記のような杭基礎近傍地盤が杭との相互作用力により非線形化すると共に、自然地盤（杭の影響を受けない地盤）が地震動によりせん断変形しており、それにより自然地盤そのものも非線形化している。本研究では、前者を“ローカルな非線形性”，後者を“サイトの非線形性”と呼ぶこととする。先に述べた杭頭ばねの非線形特性の決定方法では、ローカル非線形性のみを考慮しており、後者の影響の評価は不十分といえる。また、両者の影響がお互いにどの程度であるかも判然としていない。

本研究は、複雑な群杭と地盤の動的相互作用を簡易な SR モデルで表現するとともに、ローカル非線形性とサイト非線形性の両者の影響も簡易な形で取り入れる方法を検討した。そして、提案モデルを用いて過去に行われた大型模型杭の振動実験をシミュレーションし、モデルの有効性を示すとともに、ローカル非線形性とサイト非線形性のお互いの影響度についても検討する。

2. 前提条件

本研究では、鉄道構造物や道路橋などの一般的な規模の橋梁構造物の群杭基礎を対象とする。杭間隔としては、杭径 D に対して 3D 前後を想定している。また、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、基礎の自由度をフーチング（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（SR モデル）で表現することを前提とする（図 1）。非線形性を考慮するものとして、地盤の他にも杭部材の非線形性の影響を考慮する必要があるが、本研究では、地盤の非線形性のみに着目する。

3. 群杭インピーダンスの評価“等価梁法”

(1)等価梁の運動方程式

群杭の杭頭インピーダンスを等価梁法を用いて評価する。等価梁法は Konagai et al¹¹⁾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。詳細は文献11)に述べられているが、本研究においても等価梁の考え方は重要なた

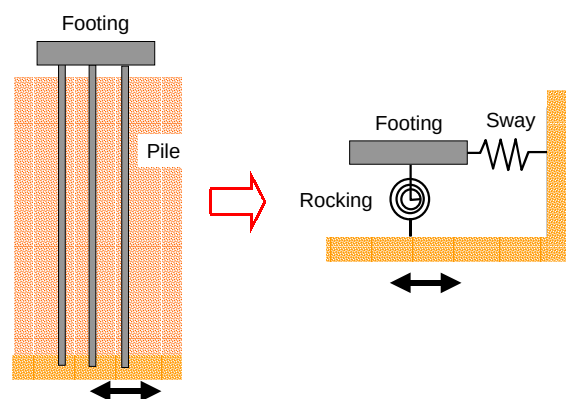


図 1 群杭基礎の Sway-Rocking モデル

め、以下に簡単にまとめる。等価梁法では、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。ただし、このことは、各杭の断面がこの平面に平行であることを意味しているわけではない。

上記の(a)および(d)の仮定により、全ての地盤-杭系の分割断面には、それぞれ並進成分 $\{\mathbf{u}\}$ と鉛直成分 $\{\mathbf{w}\}$ の 2 自由度しか存在しないことになる。

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n_L} \end{Bmatrix}, \quad \{\mathbf{w}\} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{n_L} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 n_L は地盤-杭系の鉛直方向の分割数である。回転挙動は等価梁の最外縁 ($r = R_0$) 位置での鉛直変位 $\{\mathbf{w}\}$ により表現できる。並進挙動時には、 n_p 本の杭は全く同一に挙動（仮定(a)）するので、等価梁の曲げ剛性は単純に個々の杭の曲げ剛性 EI を n_p 倍する ($n_p EI$) ことで評価できる。次に、仮定(c)と(d)により、各杭の軸方向の挙動により等価梁の回転挙動が支配されるので、等価梁のロッキングを記述するためには、もう一つの曲げ剛性 EI^G を定義する必要がある。このパラメータ EI^G は、RC 部材の剛性を評価するときと同様の考え方により評価することができる。最終的に、等価梁の力（水平 $\{\mathbf{p}_x\}$ とモーメント $\{\mathbf{M}\}$ ）と変形の関係は、次式により得られる¹¹⁾。

$$\begin{bmatrix} \{\mathbf{p}_x\} \\ \{\mathbf{M}/R_0\} \end{bmatrix} = [\mathbf{F}_H] \begin{bmatrix} \{\mathbf{u}\} \\ \{\mathbf{w}\} \end{bmatrix} \quad (2)$$

よって、等価梁の運動方程式が次式のように得られる。

$$([\mathbf{F}_H] - \omega^2 [\mathbf{M}_H]) \begin{bmatrix} \{\mathbf{u}_x\} \\ \{\mathbf{w}\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\mathbf{p}_x\} \\ \{\mathbf{M}/R_0\} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 周辺地盤の波動方程式の解

周辺地盤には多治見・下村¹⁾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。ただし、 $r=r_0$ のところに円形の鉛直孔があり、この孔壁と等価梁とが結合することになる。そこで、孔壁に外力が作用したときの変位と力の関係性を評価する。最終的には、下記のような変位と加振力の関係性が求められる¹⁾。

$$\begin{bmatrix} \{\mathbf{p}_x\} \\ \{\mathbf{M}_y\} \\ \{\mathbf{R}_0\} \end{bmatrix} = [\mathbf{R}_H] \cdot \begin{bmatrix} \{\mathbf{V}_r\} \\ \{\mathbf{V}_z\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、 $\{\mathbf{V}_r\}$ と $\{\mathbf{V}_z\}$ はそれぞれ半径方向および鉛直方向の変位ベクトルである。

(3) 地盤－等価梁系のインピーダンスの評価

以上より、周辺地盤と等価梁を含めた全体形の運動方式は、式(3)の等価梁の運動方程式に、式(4)で表される地盤からの抵抗力を加え、かつ境界面での変位の連続条件

$$\{\mathbf{V}_r\} = \{\mathbf{u}\}, \{\mathbf{V}_z\} = \{\mathbf{w}\} \quad (5)$$

を考慮して、

$$([\mathbf{R}_H] + [\mathbf{F}_H] - \omega^2 [\mathbf{M}_H]) \begin{bmatrix} \{\mathbf{V}_x\} \\ \{\mathbf{V}_z\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\mathbf{p}_x\} \\ \{\mathbf{M}/R_0\} \end{bmatrix} \quad (6)$$

が得られる。

4. 地盤の非線形性の影響のモデル化

地盤－基礎系の動的相互作用問題を考えた場合、冒頭に述べたように、ローカル非線形性（上部構造物の振動により発生する慣性力が杭に伝達されて、杭周辺地盤が非線形化する影響）とサイト非線形性（自然地盤が地震動の波動伝播によりせん断変形して発生する非線形化）の2つを考慮することが重要

である。

著者の一人は、遠心力载荷装置を用いた模型杭の杭頭载荷試験およびせん断棒を強制的に変形させる地盤変位载荷試験を実施し、後者の実験で得られる p - y 関係は、前者で得られる p - y 関係に比べて、大幅に小さくなることを明らかにしている¹²⁾。この特徴を模擬するためには、地盤反力係数を算定する際に用いる地盤の弾性係数 G を、各ステップごとに自然地盤のひずみ γ に依存させて変化させることで表現できることを示している。

これらの結果を参考に、本研究では、以下のような、逐次非線形解析に用いることが可能な杭頭ばねの非線形モデルを提案する。

- (a) 杭基礎近傍地盤の塑性化（ローカル非線形性）は、杭頭ばねの骨格曲線を双曲線で与えることにより評価する。

$$P = \frac{K_0}{1/y + 1/y_r} \quad (7)$$

ここに、 P は杭頭反力、 y はフーチングと地表面との相対変位、 K_0 は地盤-群杭系の杭頭部における $y=0$ における接線ばね定数、 y_r が規準変位で、式(8)により算定する。

$$y_r = \frac{P_{\max}}{K_0} \quad (8)$$

ここに、 $P_{\max}$ は杭頭反力の上限值である。

- (b) 履歴法則は、Masing 則を用いる。
(c) 杭頭ばね定数 K_0 は、3章で述べた等価梁法により算定する。
(d) サイト非線形性の影響を加味するために、自然地盤の動的解析を実施することで地盤のせん断剛性の時刻歴を算定し、時々刻々に式(6)を解くことにより杭頭ばね定数 K_0 を算定・更新する。この考え方は、著者らの静的な実験でも妥当性のあることは検証済みである¹²⁾。
(e) 一方、双曲線を規定するもうひとつのパラメータの上限值 $P_{\max}$ は、基本的には地盤の強度定数（粘着力度 c 、内部摩擦角 ϕ ）に依存することから、一定値とする。

以上のようなモデルを数式表現すると、以下のようになる。

$$P(t_i) = \frac{K(t_i)}{1/y(t_i) + 1/y_r(t_i)} \quad (9)$$

ここに、 $P(t_i)$ は時刻 $t=t_i$ における杭頭反力、 $y(t_i)$ は時刻 $t=t_i$ における杭と地盤の相対変位、 $K(t_i)$ は

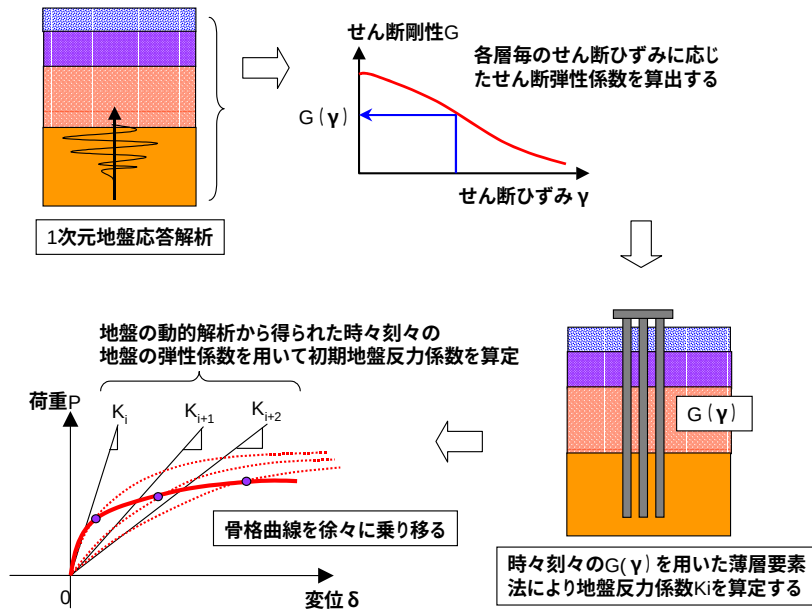


図2 提案するモデルの計算手順の概念図

時刻 $t = t_i$ における杭頭インピーダンスで、上記(d)により算定する。 $y_r(t_i)$ はそのときの基準ひずみで、

$$y_r(t) = \frac{P_{\max}}{K(t)} \quad (10)$$

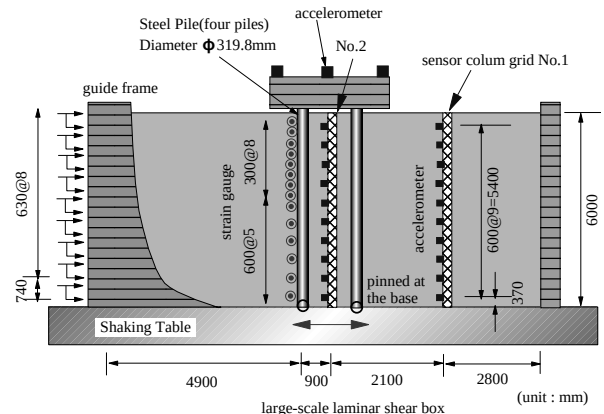
で算出される。このとき $P_{\max}$ は、(e)の仮定により、地盤のひずみによらず一定値とする。

このモデルは、ローカル非線形性の影響を双曲線の骨格曲線に Masing 則の履歴を組合わせて表現し、サイト非線形性の影響を、時々刻々双曲線の初期勾配をその瞬間の自然地盤のひずみより低下させることにより表現したものである。具体的には、時々刻々に算定される骨格曲線を読み移るようなモデルに相当する。具体的な解析手順を図2に示す。

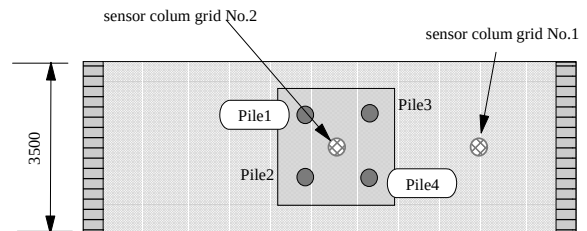
なお、このスキームにより動的解析を実施すると、履歴曲線が安定せず、極端に解の安定性が悪くなる。それを回避するための方法として、実際の計算においては、せん断剛性の時刻歴波形をスムージングして用いる必要がある。これにより履歴曲線も安定し、計算上の安定性も大幅に向上する。その例は5章に示す。

5. 模型実験のシミュレーション

著者らは過去に、科学技術庁防災研究所が所有している大型せん断土層を用いた4本杭の振動実験を実施した¹³⁾。この実験結果を、提案している手法によりシミュレーションすることで、モデルの妥当性を検証するとともに、ローカル非線形性およびサイト非線形性の特徴について検討する。



(a) 模型断面図



(b) 模型平面図

図3 模型全体図と計測器取り付け位置

(1) 実験概要

実験の概要図を図3に示す。この実験ではフーチングの質量を 150kN と 450kN の2ケースを設定している。杭は外径 319.8mm、内径 312.8mm の鋼管杭であり、杭間隔は 6D となっている。杭先端はせん断土層にピンで結合されている。また、杭頭の結合は、鋼板のフーチングに穴を開け、杭を挿入した後にモルタルを流し込み、固定度を向上させている。

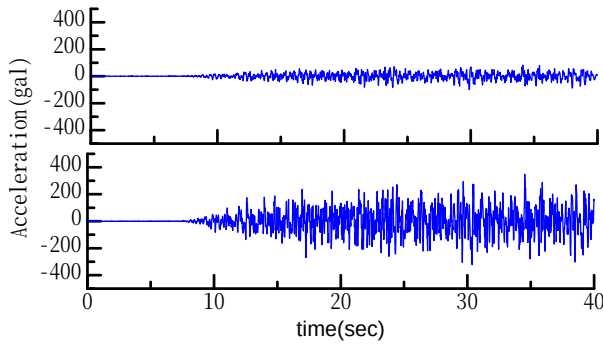


図4 実験に用いた入力波の例。
上段が 100gal, 下段が 400gal のホワイトノイズ

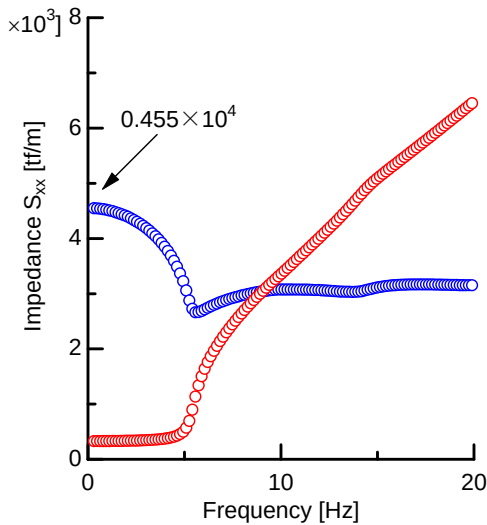


図5 杭頭インピーダンス

地盤については、自然乾燥状態の霞ヶ浦砂をホッパーから空中落下させて作成した。入力波は、ホワイトノイズの最大値を 100gal, 200gal, 400gal に調整したものである（図4 参照）。詳細は文献13)を参照していただきたい。

また、本実験に先立ち、衝撃振動試験[IMPACT]を実施し、地盤－杭系の微小変形領域での固有振動数を測定している。その結果、15[tonf]の模型で約 12[Hz]であった。

(2)静止状態での杭頭インピーダンス

微小ひずみ時のせん断弾性係数を用いて、3章で示した方法により、杭頭インピーダンスを算定し、図5に示す。模型ではフーチング下面と模型地盤面との間には約 300mm の空隙がある。そこで、薄層要素法でインピーダンスを求める際に、本来の地盤モデルに加え、最上層に剛性がゼロに近い 300mm の仮想の地盤要素を設けて計算を実施した。

また、地盤の弾性係数は、その応力依存性と作成地盤の構造異方性を考慮した方法により算定した。

まず、砂の鉛直方向の弾性係数 $E_{\max v}$ を式(11)により求める¹⁴⁾。

$$\frac{E_{\max v}}{p_r} = A \cdot f(e) \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{p_r} \right)^m \quad (11)$$

ここで、 p_r は基準応力、 A および m は実験定数で $A = 2.08 \times 10^4$ 、 $m = 0.5$ となる。 $f(e)$ は間隙比係数と呼ばれ、豊浦砂の場合、Hardin&Richart¹⁵⁾が提案した式(12)がよく用いられる。

$$f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (12)$$

ここで、 e は間隙比である。次に、式(10)で求めた $E_{\max v}$ から、杭の p - y 関係において初期地盤反力係数が得られる弾性係数として E_{secv} を

$$E_{\text{secv}} = \alpha \times E_{\max v} \quad (13)$$

として低減した。さらに、空中落下法により作成した砂地盤は構造異方性とそれにより生じる誘導異方性が存在し、水平方向の弾性係数は鉛直方向の弾性係数より小さくなる。低減係数としてTatsuoka&Kohata¹⁴⁾による水平方向と鉛直方向の弾性係数比である 1/2 を用い、水平方向の割線弾性係数 E_{sech} を

$$E_{\text{sech}} = \frac{1}{2} E_{\text{secv}} \quad (14)$$

により算定した。また、ポアソン比は 0.3 とした。

式(13)に示すように、弾性係数を低減する理由として、模型作成時に、杭を打設後に砂を空中落下により作成するために、どうしても杭周辺の地盤は緩んでしまうことなどが考えられる。例えば、過去の研究でも、神田ら¹⁶⁾や室野ら¹²⁾などは低減率 α として 1/5 を採用している。本研究では、衝撃振動試験で測定した固有振動数と概ね一致するような値を選択した。その結果として、 $\alpha = 1/3$ とした。

(3)自然地盤の挙動

自然地盤は 1 次元でモデル化する。土の非線形構成則は、修正 GHE モデル¹⁷⁾を採用した。修正 GHE モデルは土の変形特性と強度特性の両者を満足するように開発されたものであり、その有効性は文献17)に示されている。このモデルを用いて、逐次非線形解析を実施した。各層の応力 τ ～ ひずみ γ 関係から、各層の時々刻々の割線剛性 $G(t)$ を求めた。割線剛性 $G(t)$ は、応力-ひずみ関係が反転する度に、一つ前の反転点と新たな反転点とを結ぶ剛性とした。

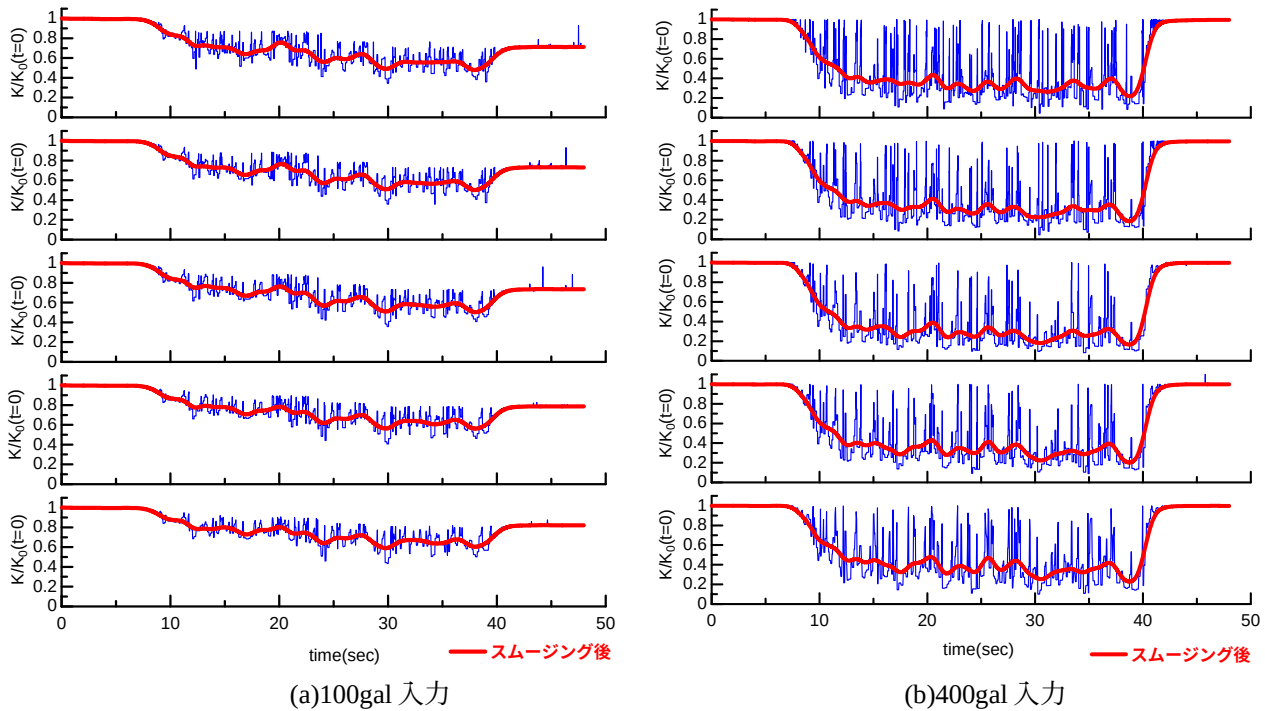


図 6 時々刻々に変化するせん断弾性係数を用いた算出した初期地盤ばねの時刻歴

こうして得られた $G(t)$ を用いて算出した K_0 の時刻歴を図 6 に示す（図では初期の K_0 に対する比率で表示）。ただし、一般に求まる $G(t)$ は非常に凸凹しているの、この値をそのまま用いて計算をすると、計算が発散することがある。そこで、式(14)のようにスムージングを行った。このスムージングを何回も施す。

$$G(t_i) = 0.25G(t_{i-1}) + 0.75G(t_i) + 0.25G(t_{i+1}) \quad (14)$$

その結果も図 6 には示してある。

(4)非線形解析の結果

ここでは、杭先端がピンで結合されていることから回転成分がほとんど発生していなかったの、計算を簡略化するために、回転自由度を無視した 1 自由度系で評価する。

また、入力波については、地盤の動的解析により得られた地表面の計算波形をフーリエ変換し、有効入力係数を乗じて、逆フーリエ変換により時間領域に戻したものをを用いた。有効入力係数は、3 章で述べた等価梁の考え方に対して算出した。

フーチングの加速度および水平変位（地盤とフーチングの相対変位）の時刻歴を図 7 と図 8 に示す（紙面の都合上 400gal 入力のみ）。なお、この検討では、サイトの非線形性のみを考慮した場合（初期勾配 K_0 を時々刻々変化させた線形解析に相当）とローカルな非線形性のみを考慮した場合（通常の双

曲線モデルに相当。 K_0 は一定）についても解析を実施した。

- 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、150kN タイプの実験ではサイトの非線形性のみを考慮した場合でも、加速度、変位とも概ね実験結果を説明できている。しかし、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。つまり、上部重量が小さい場合には、上部重量からの慣性力による影響は小さく、結果的にサイトの非線形性が卓越したと考えられる。
- 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、悪くなっている。ローカル非線形性とサイトの非線形性の両者の影響が現われていると考えられる。

以上のことから、ローカル非線形とサイト非線形について、次のような特性を推察される。

- 1) 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、その結果、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（サイトの非線形性）の方が相対的に大きい。

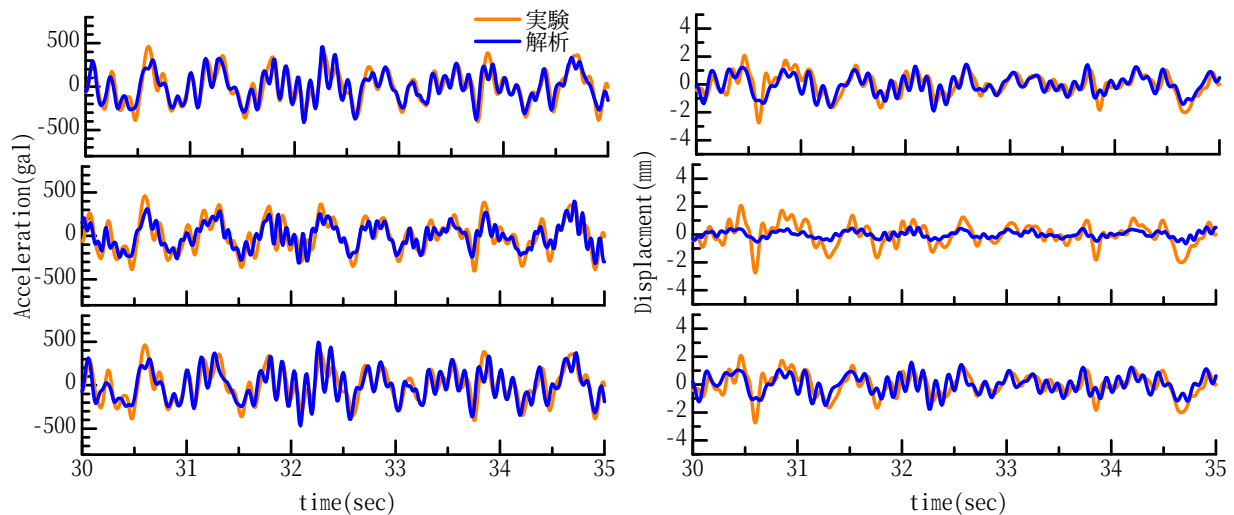


図7 140kN タイプの実験結果のシミュレーション
(上から順に、提案法(サイト非線形+ローカル非線形)、ローカル非線形のみ、サイト非線形性のみ)

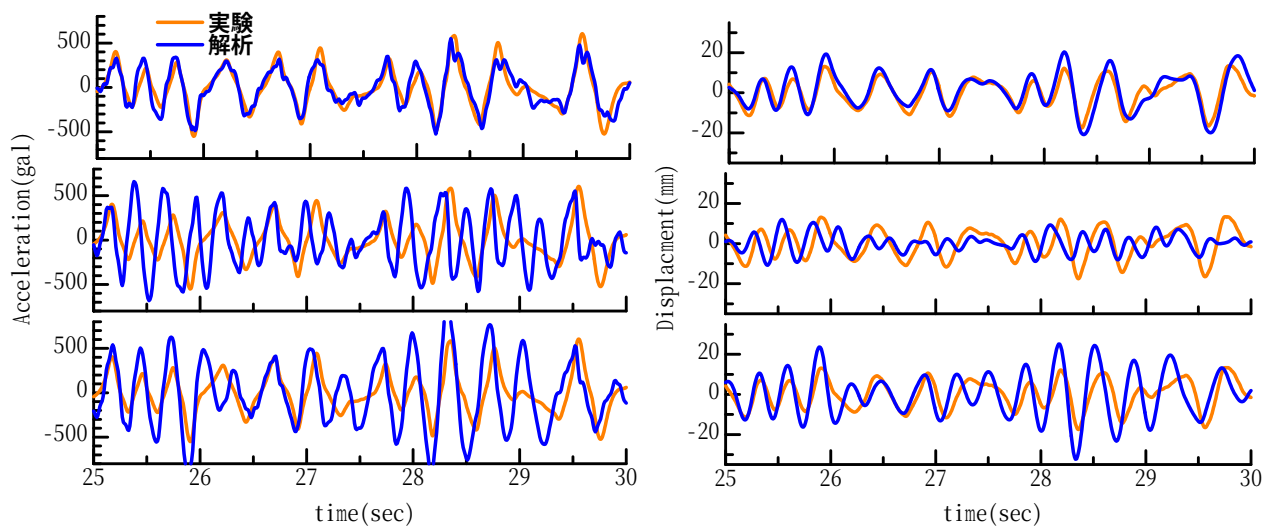


図8 450kN タイプの実験結果のシミュレーション
(上から順に、提案法(サイト非線形+ローカル非線形)、ローカル非線形のみ、サイト非線形性のみ)

- 2) 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（ローカルな非線形性）する。よって、サイト非線形性の影響のみでは評価しきれない。

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。

- (1) 等価梁法により群杭のインピーダンスを効率的に評価するとともに、時々刻々変化する地盤のひずみに依存した双曲線型の履歴則を杭頭ばねに与えることにより、サイトの非線形性およびローカルな非

線形性の2つの非線形性の影響を考慮するモデルを提案した。

- (2) 過去に行った杭基礎の振動実験をシミュレーションした。その結果、提案モデルは、入力レベルが小さくものから大きいものまで、また、模型重量も軽いものから重いものまで、精度良くシミュレーションすることができた。

参考文献

- 1) 田治見宏，下村幸男：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 第243号，pp.41-51，1976。
- 2) 竹宮宏和，片山吉史：フレキシビリティ法による群杭基礎の動的解析と設計への提案，土木

- 学会論文集 No.489/I-27, pp.207-215, 1994.
- 3) 長谷川正幸, 中井正一: 成層地盤における群杭効果を考慮した構造物-杭-地盤系の三次元振動解析, 清水建設研究報告, 第 46 号, pp.35-45, 1987.
 - 4) Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic Evaluation of Pile Foundations with Three Different Methods Based on Three-Dimensional Elastic Finite Element Analysis, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.1, pp.113-132, 2000.
 - 5) 大槻 明, 福武毅芳, 藤川 智, 佐藤正義: 液化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集 No.495/I-28, pp.101-110, 1994.
 - 6) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 丸善出版,
 - 7) Kaniya, A. M. and Kausel, E.: Dynamic stiffness and seismic response of pile groups, Research report R82-03, Massachusetts Institute of Technology., 1982.
 - 8) 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会: 土木構造物の耐震設計法に関する第 3 次提言と解説, 2000.
 - 9) 佐藤忠信: 動的相互作用の解析法, 講座(地盤と構造物の動的相互作用の解析法), 土と基礎, Vol.40, No.8, pp.63-70, 1992.
 - 10) 土岐憲三, 清野純史, 小野祐輔, 古川愛子: 杭基礎・地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について, 土木学会論文集 No.710/I-60, pp.235-245, 2002.
 - 11) Konagai, K., Ahsan, R. and Murayama, D.: Simple Expression of the Dynamic Stiffness of Grouped Piles in Sway Motion, *Journal of Earthquake Engineering* 4(3), pp.355-376, 2000.
 - 12) 室野剛隆, 村上昌彦, 畠中仁, 棚村史郎: 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.
 - 13) 王海波, 室野剛隆, 西村昭彦: 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.
 - 14) Tatsuoka, F. and Kohata, Y.: Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, *Proc. of Int. symp. on Pre-failure Deformations of Geotechnicals*, Balkema, Vol.2, pp.947-1066, 1994.
 - 15) Hardin, B. O. and Richart F. E. Jr: Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of the SMF Div., ASCE*, Vol.95, No.SM6, pp.1531-1537, 1963.
 - 16) 神田政幸, 竹村次朗, 日下部治: 砂地盤中の単杭の p - y 関係のモデル化, 土木学会論文集 No.645/III-50, pp.191-207, 2000.
 - 17) 西村昭彦, 室野剛隆: 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.

(2003. 6. 30受付)

SIMPLE NUMERICAL EVALUATION OF NON-LINEAR SOIL GROUPED-PILE DYNAMIC INTERACTION

Yoshitaka MURONO and Kazuo KONAGAI

We develop a simple approach for the evaluation of such non-linear dynamic pile-soil-pile interaction. The non-linear response analysis of the one dimensional horizontally layered soil column, without the presence of any foundation, is carried out. The secant shear modulus is determined for each soil layer. In order to express the effects of the local non-linearity, the Thin-layer method scheme with equivalent-single-upright-beam analogy is employed to the secant shear modulus at a particular time, and the dynamic stiffness of pile cap at that time is obtained. To express the effects of the site non-linearity, the Hyperbolic model with the Massing rule is adopted, in which the instant pile cap stiffness obtained from above procedure is set to the initial stiffness at the time. We demonstrate that the newly proposed model can simulate the results of shaking test briefly for small acceleration level to large acceleration level.