

地盤の非線形性を考慮した杭の地震時の水平抵抗特性

室野 剛隆* 西岡 英俊** 野上 雄太***

Seismic p - y Model of Pile Foundation Taking into Account Soil Non-linearity

Yoshitaka MURONO Hidetoshi NISHIOKA Yuta NOGAMI

It is well known that a behavior of a pile supported structure is strongly affected by non-linear dynamic soil-structure interaction (SSI) during a severe earthquake. There are two major factors which affect the nonlinear SSI, the one is the local nonlinearity and the other is the site nonlinearity. A detailed p - y model of a pile foundation has been developed in this paper by taking into account both of these two effects. In the current seismic design procedure, however, a very simple p - y curve is conventionally used. The applicability of this conventional p - y model is confirmed by comparing the simulated result obtained by the newly developed detailed model with that by the conventional model.

キーワード：杭基礎の水平抵抗，非線形，サイト非線形性，ローカル非線形性

1. はじめに

わが国では、軟弱な地盤に構造物を建設することが多く、杭形式の基礎が用いられることが多い。この場合、構造物の地震時挙動は、地盤と基礎との動的相互作用の影響を強く受けることはよく知られている。特に、兵庫県南部地震以降は、大地震時に対する設計法の高度化が求められており、地盤の非線形性を考慮した非線形動的相互作用を解析対象として取り扱わねばならない。

非線形動的相互作用の影響を考慮するには FEM 解析などによる解析が有効であることは間違いないが、設計実務においては、モデルおよび結果の解釈の明快さから、骨組みモデルが一般的には用いられる。骨組みモデルでは、地盤と基礎との相互作用の影響は地盤ばねを介して表現される。この際、地盤ばねの地盤反力と変位の関係（抵抗特性）は非線形性ばねとして取り扱われる。

杭基礎の抵抗特性の非線形性には、2つの非線形性がある。1つはローカル非線形性（Local nonlinearity）であり、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、杭周辺地盤が局所的に非線形化する影響である。もう1つの非線形性は、サイト非線形性（Site nonlinearity）であり、自然地盤が地震動によりせん断変形して非線形化することによる影響である。例えば、田蔵ら¹⁾は模型杭基礎の振動実験を実施し、その伝達関数を用いて、2つの非線形性の存在を指摘している。また著者の一人は²⁾、大型せん断土槽を用いた杭基礎の振動実験および解析から、その2つの非線形性の影

響を定量的に評価する手法を提案している。

しかし、現行の設計法^{3) 4)}で用いている地盤ばねは、杭基礎の載荷試験結果を基に単純なバイリニア型でモデル化されている。このバイリニア型モデルは初期勾配と上限値から構成されており、取扱いが容易であり設計実務上は扱いやすい。このモデルは、数多くの載荷試験の結果からモデル化されたものであるから、先述した定義からすると、もっぱらローカル非線形性のみを考慮していると言える。ただし、この時の初期勾配はある程度のひずみレベルを想定したものとされており、サイトの非線形性がある程度考慮されたばね剛性になっているとも解釈できる。そこで、本論文では、ローカル非線形性とサイト非線形性を考慮した地盤ばね²⁾と、現行のバイリニア型の地盤ばねを比較することで、現行の設計法で用いている地盤ばねの適用性について検討した。

2. ローカル及びサイト非線形性を考慮した地盤ばね

(1) ローカル及びサイト非線形性を考慮した地盤ばね

ローカル非線形性とサイト非線形性を考慮する方法は、著者らの方法²⁾に従った。重要な事項なので以下に簡単に示すが、詳細は文献²⁾を参考されたい。

一般に地盤ばね反力 p は、式(1)に示すように地盤ばね剛性 k と地盤と基礎との相対変位 y の関数 f となる。この関係を p - y 関係と呼ぶ。

$$p = f(k, y) \quad (1)$$

地盤反力の微小変化量 dp は

$$dp = \frac{\partial f}{\partial y} dy + \frac{\partial f}{\partial k} dk \quad (2)$$

* 構造物技術研究部（耐震構造）

** 構造物技術研究部（基礎・土構造）

*** ジェイアール東日本コンサルタンツ(株)（前 構造物技術研究部）

特集：基礎構造物の設計技術

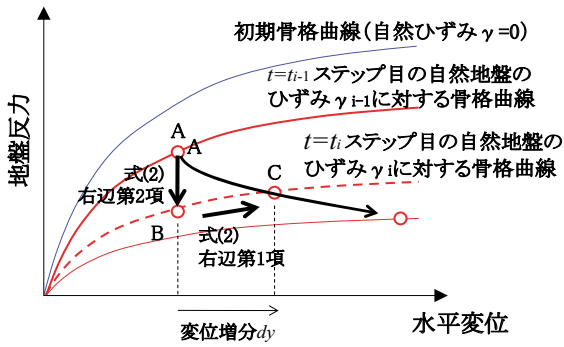


図1 サイト非線形性とローカル非線形性を考慮した地盤ばねの考え方

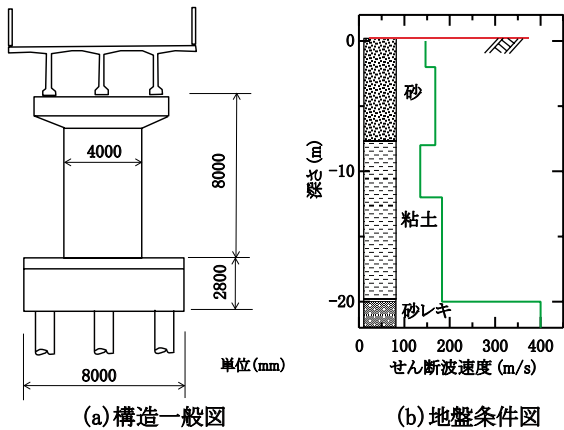


図2 検討対象構造物および地盤条件

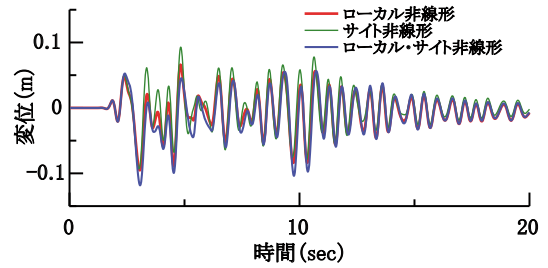
と表わせる。ここで、右辺第1項が地盤と基礎の相対変位に起因する項で、ローカル非線形性による項に相当する。一方、第2項は地盤のせん断弾性係数の変化に起因する項で、サイト非線形性による項に相当する。参考文献2) では、式(1)の具体的な $p-y$ 関係としては、式(3)に示す双曲線モデルが使われている。

$$p = \frac{k_0}{1/y + 1/y_r} \quad (3)$$

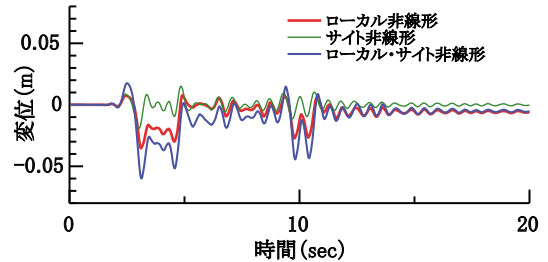
ここに、 k_0 は初期接線剛性、 y_r が規準変位で水平抵抗の上限値 p_e を k_0 で除して求める。

式(2)を模式的に表現すると図1のようになる。時刻 $t=t_{i-1}$ の状態をAとする。次の時刻 $t=t_i$ では、自然地盤のひずみ γ に応じた $p-y$ 曲線(点B)に乗り移り、その骨格曲線上を変位の増分 dy だけ移動する。このようにして、時刻 $t=t_i$ での状態Cに至る。

時刻 $t=t_i$ での $p-y$ 曲線は以下の手順で求める。まずその時刻のひずみ γ を自然地盤の動的解析から算定し、そのひずみに応じた土のせん断剛性 $G(\gamma)$ を算出する。地盤ばね剛性 k はせん断剛性 G の関数なので、この $G(\gamma)$ を用いることにより、時刻 $t=t_i$ での初期接線剛性 $k_0(\gamma)$ が求まり、式(3)より各時刻の $p-y$ 曲線が得られる。つまり、地盤ばねが自然地盤のひずみレベルに応じて変化し、それが系の力の釣合いを保ちながら、徐々に乗り移っているモデルに相当する。これは、RC部材の軸力



(a) 橋脚天端変位



(b) フーチング変位

図3 プロトタイプ橋脚の応答変位

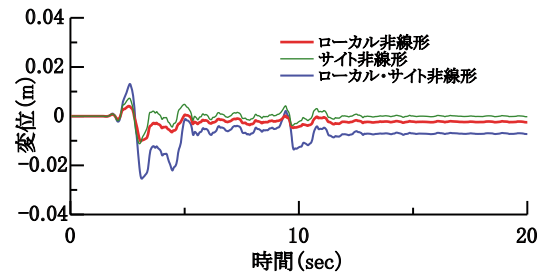


図4 フーチング変位

(上部構造物の重量を1/10にした場合)

変動モデルと計算の考え方は似ている。なお、本モデルの有効性については、文献2)を参照されたい。

(2) 提案モデルを用いた試計算

図2に示す橋脚～基礎～地盤系に対して、鉄道の耐震標準⁴⁾で用いているスペクトルII地震波(基盤波)を入力して動的解析を実施した。なお、ここでは基礎のモデル化の相違による影響に主眼を置いているので、橋脚は線形として扱った。

図3に解析結果の一例を示す。ここで、ローカル非線形性のみを考慮した解析では、式(2)の第1項のみを考慮した場合、サイト非線形性のみを考慮した解析とは、式(2)の第2項のみを考慮した場合である。上部構造物の変位に関しては、各手法による顕著な差は見られないが、フーチングにおいては、手法による差が顕著に表れており、サイト非線形性のみを考慮したモデルでは、変形量を大幅に過小評価してしまう。ローカル非線形性のみを考慮したモデルでも、6割程度にしか表現できない。両者の影響を考慮することが重要であることが分かる。なお、本検討では、橋脚を線形として扱っており大きな応答加速度(1000gal以上)が作用し、結果的に基礎に

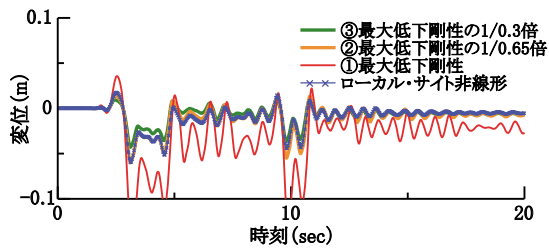


図5 フーチング変位に対する簡易モデルの適用性の検討結果

伝達される慣性力が卓越するので、ローカル非線形モデルの方が適合性が良かったものと判断できる。

そこで、仮定の橋脚モデルとして、上部構造物重量を1/10倍にしたモデルについても検討した。固有周期がプロトタイプのもつと変化すると、応答加速度が変化してしまうので、剛性も1/10倍にして固有周期を一定とした。これにより慣性力はプロトタイプ橋脚の1/10になる。解析結果の一例として変位の時刻歴波形を図4に示す。サイト非線形モデルとローカル非線形モデルとほぼ同じような変形量が発生している。プロトタイプ橋脚に比べて慣性力が1/10になり、慣性力が杭を通して近傍地盤を非線形化させる効果が図3に比べると大幅に減少し、両者の影響度がほぼ同じ程度になったことが分かる。

慣性力の影響が卓越するような条件下では、ローカル非線形が卓越し、地盤変位の影響が卓越するような条件下では、サイト非線形が卓越することが分かった。ただし、いずれの場合も、サイト非線形性とローカル非線形性の両者を考慮した結果に対して、いずれか一方の非線形性のみを考慮したモデルでは、地震応答を過小に評価してしまう。提案するモデルの場合は、このような複雑な非線形性の相互作用を自動的に評価できる点に、大きなメリットがある。

(3) ローカル及びサイト非線形性の簡易な表現方法

図1のように $p-y$ 曲線が時々刻々変化する詳細なモデルはその適用性は高いものの、設計実務で用いる場合には、手続きが煩雑になりがちである。また、設計実務においては、動的解析よりも静的解析による場合が圧倒的に多い。静的解析では、当然 $p-y$ 曲線を時々刻々に変化(以下、変動 $p-y$ モデル) させることは出来ない。

このような現状を踏まえて、ここでは、予めサイト非線形性を見込んで初期勾配を低減させて設定し、 $p-y$ 曲線を時々刻々変化させないモデル(以下、固定 $p-y$ モデル)を用いて、その適用性を検討する。

具体的には、①自然地盤の地震応答解析の結果得られた各層の最大せん断ひずみ γ_{max} に相当する剛性低下率 G/G_0 、②各層の最大せん断ひずみ γ_{max} に0.65を乗じた有効ひずみ γ_e に相当する剛性低下率 G/G_0 、③各層

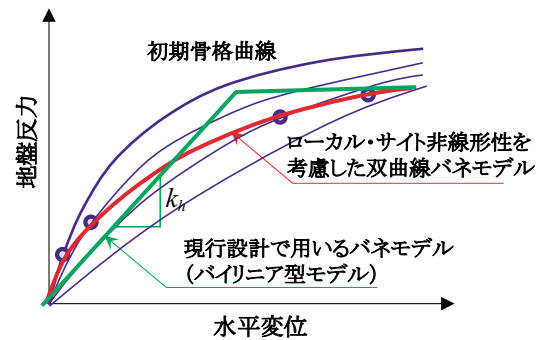


図6 現行の設計で用いている地盤ばね

の最大せん断ひずみ γ_{max} に0.30を乗じた有効ひずみ γ_e に相当する剛性低下率 G/G_0 を、式(3)の初期勾配 k_0 に乗じてサイト非線形性を簡易に考慮した双曲線型固定 $p-y$ モデルを用いた場合について検討を行った。得られた応答波形の一例として変位波形を図5に示す。この場合では、②のケースの適合度がかかなり高いことが分かった。これは、固定 $p-y$ モデルでも、初期勾配を適切に低減させることで、簡易にローカル・サイト非線形性を考慮した杭の水平抵抗を評価できることを示唆しており、静的解析において、ローカル・サイト非線形性を考慮するための1つの方法であると言える。

3. バイリニア型地盤ばねの適用性

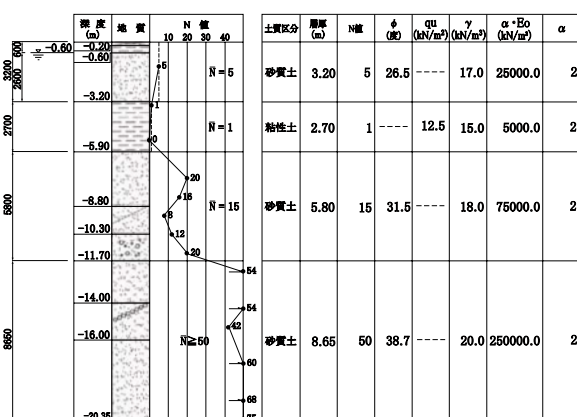
現行の設計基準では、慣用的に図6に示すようなバイリニア型の固定 $p-y$ 関係を用いている。実際の $p-y$ 関係には、2章で述べたようにローカル非線形性とサイト非線形性が複雑に影響しあっており、単純なバイリニア型の固定 $p-y$ モデルでは十分ではない。しかし、その取扱いが容易なことから、設計実務の観点からは優れたモデルであり、どの程度、このバイリニア型モデルが適用性を有しているのかを検討することとした。

(1) 検討方法

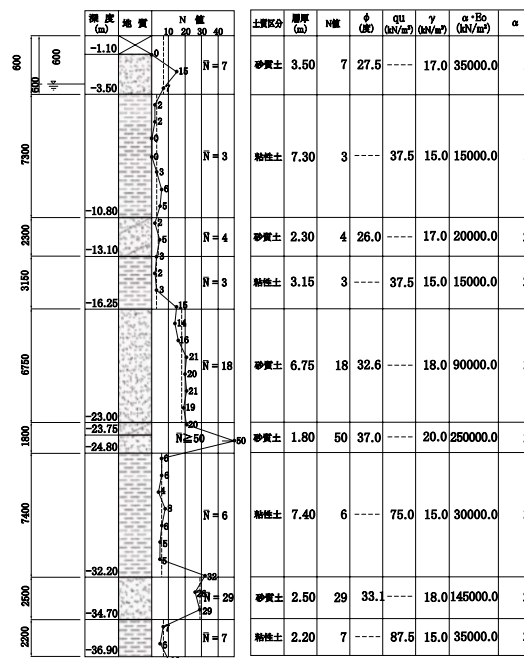
载荷試験などから得られる実際の杭の $p-y$ 関係は図6の点線に示すように、双曲線状の非線形性を示す。これは、ローカル非線形性の影響のみを考慮していると解釈できる。この双曲線状の $p-y$ 関係を、現行の設計では図6の実線で示すような初期勾配 k_i (設計水平地盤反力) と上限値 p_e (有効抵抗土圧) を有するバイリニア型で近似している。

バイリニア型モデルの初期勾配 k_i の算定式は、実杭の水平载荷試験データを基に、杭頭変位10mm時の状態から逆算して得られる値として、統計的に設定されている⁵⁾。すなわち、バイリニア型モデルの初期勾配 k_i は地盤にある程度のひずみが生じた時点での等価線形剛性に相当するため、図6に示すように载荷試験等で得られる実際の

特集：基礎構造物の設計技術



(a) ケース1



(b) ケース2

図7 対象地盤の構造

p - y 関係の初期勾配 k_0 よりもかなり小さく設定される。その結果、現行の設計で用いているバイリニア型の地盤ばねは、むしろローカル・サイト両非線形性を考慮した双曲線ばねに近いものになっている可能性もある。そこで、サイト・ローカル両非線形性を考慮した地盤ばねを用いた静的非線形解析（プッシュ・オーバー解析）を実施した結果と、現行の設計で用いているバイリニア型の地盤ばねを用いたプッシュ・オーバー解析を実施し、両者を比較することで、現行の設計用の地盤ばねの地震時における適用性を検討する。

なお、検証材料としては、過去に実施された実杭の水平載荷試験結果を用いることとした⁶⁾。対象とした杭の載荷試験は、鋼管杭（打込み工法）の2ケースで、図7に地盤構造を示す。ケース1は杭長15.7m、杭径609.6mm、ケース2は杭長33.6m、杭径1200mmである。

(2) ローカルおよびサイト非線形ばねの設定

地盤ばねの p - y 関係は式(3)に示す双曲線モデルとする。初期勾配 k_0 および上限値 p_e は、プッシュ・オーバー解析で得られた杭頭部の荷重～変位関係が、杭の水平載荷試験結果にフィッティングするように、式(4)、(5)で得られた値を補正して用いた。

$$k_h = f_{rk} (0.6\alpha E_0 D^{-3/4}) \quad (4)$$

ここに、 α は補正係数、 E_0 は地盤の変形係数、 D は杭径、 f_{rk} は地盤抵抗係数である。

$$p_e = f_{rp} \alpha \gamma_e z K_p \text{ (砂質)}$$

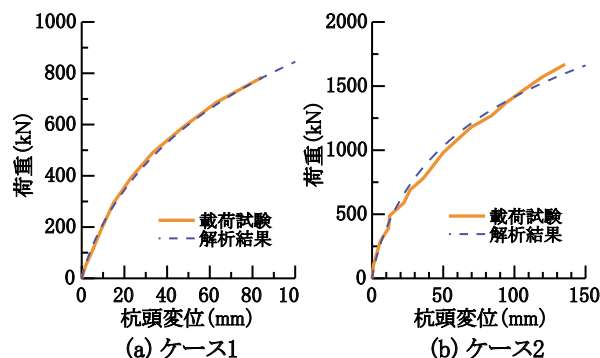


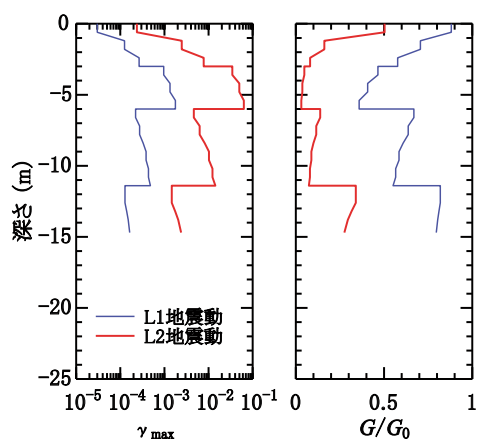
図8 載荷試験のフィッティング結果

$$p_e = f_{rc} (1 + z/2D) (\gamma_e \cdot z + 2c) \text{ (粘性土)} \quad (5)$$

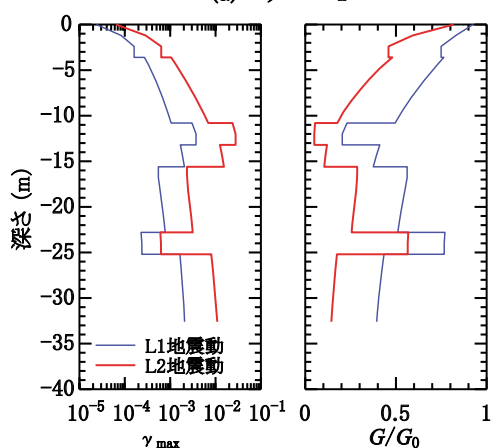
ここに、 p_e は深さ z における有効抵抗土圧力度、 α は杭前面の形状係数 (= 3)、 γ_e は深さ z までの平均有効単位体積重量、 K_p は受働土圧係数、 D は杭径、 c は粘着力、 f_{rp} 、 f_{rc} は地盤抵抗係数である。

図8に荷重～変位関係を示す。両ケースともに載荷試験結果を良好にフィッティングできている。載荷試験では、杭頭部に載荷された水平力が杭に伝達され、杭周辺地盤が局部的に非線形化されるので、この結果は、ローカル非線形性のみを考慮した結果に相当する。

次に、上記で得られた p - y 関係に対してサイト非線形性を取り入れる。そのために、当該地盤の非線形動的解析を行った。地盤の構成則はGHE-Sモデル⁷⁾を使用し、GHE-Sモデルのパラメータは一般化パラメータ⁸⁾を採用した。第2章(3)で示したように、地震応答解析の結果



(a) ケース1



(b) ケース2

図9 自然地盤の最大せん断ひずみと剛性低下率の深さ方向分布

得られた各層の最大せん断ひずみ γ_{max} に0.65を乗じた有効ひずみ γ_e を算出し、 γ_e に相当する剛性低下率 G/G_0 を各層の $G/G_0 - \gamma$ 関係から算定した。図9に算出したせん断ひずみ γ_e および剛性低下率 G/G_0 の深さ方向分布を示す。L1地震のように地震動レベルが小さいとせん断ひずみ γ_e は平均的には0.01～0.1%程度以下となっており、両ケースとも剛性低下率 G/G_0 はそれほど低下していない。L2地震ではせん断ひずみが1%を超える層が多数ある。そのため、剛性低下率 G/G_0 は0.3程度以下の層が多いことが分かる。

図9に示す深さ方向の剛性低下率を、先に求めた各層の初期勾配 k_0 に乗じて、サイトの非線形性を簡易的に考慮した(第2章(3)参照)。このばねを用いてプッシュオーバー解析を実施して得られた杭頭の荷重～変位関係を図10、11に示す。各図とも、ローカル非線形性のみを考慮した結果を破線、サイト非線形性も考慮した結果を実線で示してある。図10、11より、L1地震を入力した場合は、各層のひずみレベルが小さいことから剛性がそれほど低減せず、荷重～変位関係はローカル非線形性のみを考慮した場合より若干小さい結果を得ている。一方、L2

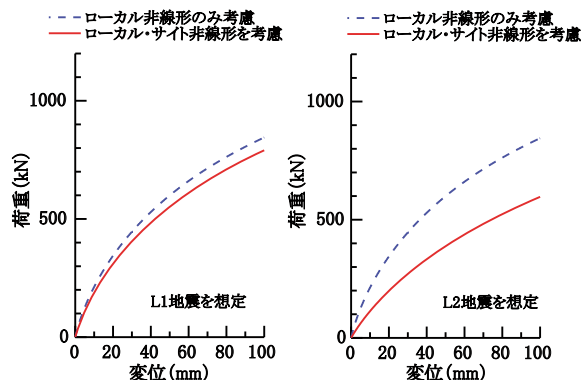


図10 ケース1における杭頭荷重～変位関係

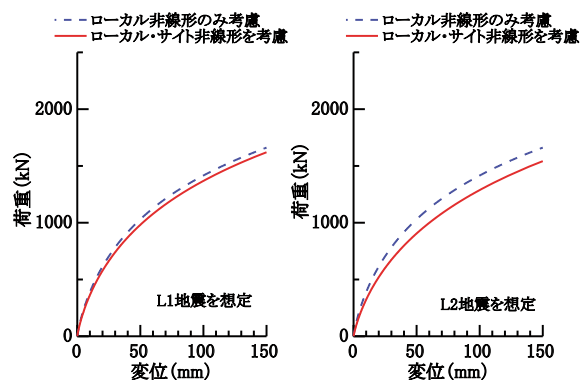


図11 ケース2における杭頭荷重～変位関係

地震の場合は、剛性が大きく低下した結果、L1地震を想定した場合よりも、荷重～変位関係が低下していることが分かる。ただし、ケース1とケース2では、その度合いが異なっている。図9の剛性低下率の深さ方向分布を見ると、ケース1では地表付近で剛性が大きく低下しているのに対し、ケース2では地表付近の剛性は比較的大きく、地中部で剛性が低下している。この差がサイト非線形性を考慮した杭頭の荷重～変位関係に現れたものと考えられる。

(3) バイリニアモデルとの比較

図10および図11に示した実線が、ローカル非線形性とサイト非線形性の両者を考慮した場合の杭頭部の荷重～変位関係である。この結果と、現行の設計標準で用いられているバイリニア型の地盤ばねモデルを用いた場合の杭頭部の荷重～変位関係とを比較することで、バイリニア型の地盤ばねモデルの適用性を検討する。バイリニア型モデルの初期勾配 k_b および上限値 p_e については、式(4)、(5)に示した値を用いるが、表1に示すように補正を行った。得られた荷重～変位関係を図12に示す。

ケース1においては、L1地震動を想定した場合には、バイリニア型モデルを用いた杭頭部の荷重～変位曲線は、ローカル・サイト非線形性を考慮した荷重～変位曲線を過小に評価している。L2地震動を想定した場合には、60mm以上の領域では過小評価にはなっているもの

特集：基礎構造物の設計技術

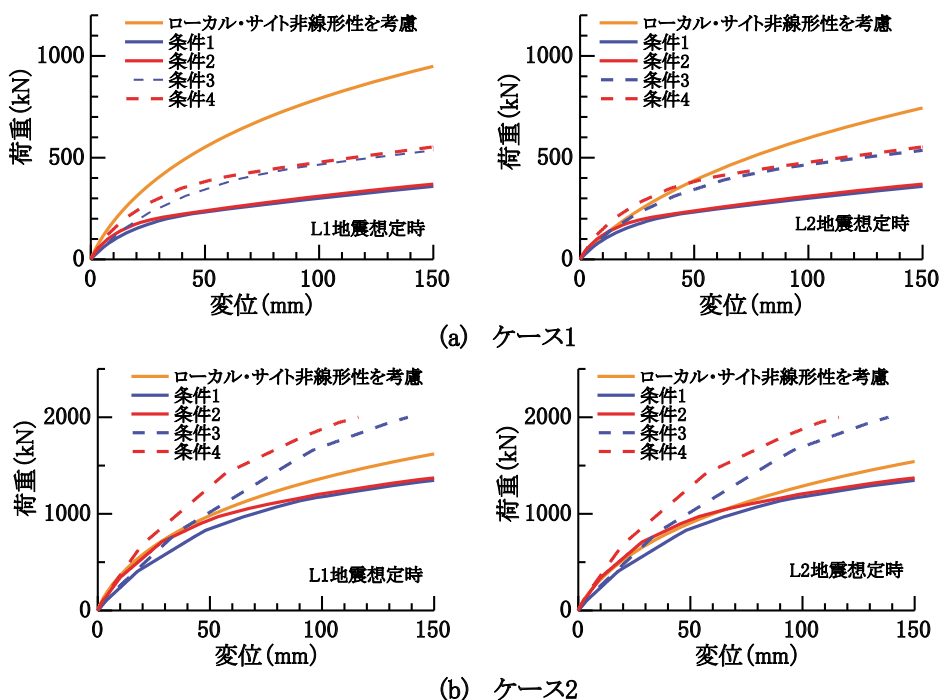


図12 バイリニア型モデルの適用性検討結果

表1 k_h および p_e の組み合わせ

	$k_h = f_{rk} (0.6\alpha E_0 D^{-3/4})$	$p_e = f_{rp} \alpha \gamma_e z K_p$ $p_e = f_{rc} (1 + z/2D) (\gamma_e \cdot z + 2c)$
条件1	1.0倍	1.0倍
条件2	2.0倍	1.0倍
条件3	1.0倍	2.0倍
条件4	2.0倍	2.0倍

記号の説明は式(4), (5)参照

の、条件3～条件4の結果が比較的良好に荷重～変位曲線を表現できている。ただし、設計という観点で見れば、安全側の評価としては十分適用性を持つと言える。

ケース2においては、L1地震動、L2地震動、いずれを想定した場合も、条件2～条件4の範囲内にローカル・サイト両非線形性を考慮した荷重～変位曲線が収まっており、バイリニア型モデルの適用性がある程度確認できた。

4. まとめ

杭基礎の地盤ばねの非線形性には、ローカル非線形とサイト非線形が複雑に絡み合っている。一方、現行の設計法で用いているバイリニア型の地盤ばねは、取扱いが容易であることから、今後の設計実務でも有用なモデルである。そこで、現行のバイリニア型の地盤ばねの適用性について検討を行った結果、現行の設計用値を1～2倍した初期勾配と上限値を用いることにより、バイリニア型の地盤ばねでも、安全側の評価としては十分適用性を持つことが確認できた。

参考文献

- 1) 田蔵隆, 佐藤正義, 清水勝美, 社本康広, 石川裕: 地盤の非線形応答に伴う群杭基礎構造物の動的応答特性に関する一考察, 土木学会第43回年次学術講演会, pp.1038-1039, 1988
- 2) 室野剛隆, 小長井一男: 群杭基礎の非線形動的相互作用問題の簡易な表現方法, 土木学会地震工学論文集, Vol.27 (CD-ROM), 2003
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善, 1997
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999
- 5) 青木一二三, 真田道夫: 杭の設計に用いる地盤反力係数, 構造物設計資料, 国鉄構造物設計事務所, No.83, 1985
- 6) (財) 国土技術研究センター: 建設技術審査証明事業報告書 NS エコパイル工法 (回転圧入鋼管杭工法), pp.123, 127, 153, 2004
- 7) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集CD-ROM, 論文番号97, pp.494-497, 2006
- 8) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回地震工学研究発表会報告集CD-ROM, 土木学会, 2009