

Winkler バネを用いた深い基礎の非線形動的解析モデル

白戸真大¹・野々村佳哲²・中谷昌一³・福井次郎⁴

¹(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 主任研究員(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム

³(独)土木研究所 構造物研究グループ基礎チーム 上席研究員

⁴(独)土木研究所構造物研究グループ長

1. はじめに

基礎の耐震設計にかかる費用を考えれば、一般には、設計基準に示される標準的な設計法を用いることになる。しかし、既設構造物の耐震補強の場合等であれば、追加費用をかけてでも非線形動的解析を行い、現存する基礎の耐震性を出来るだけ正確に評価したい場合が生じ得る。さらに、新設基礎の設計についても、地盤が軟弱な場合は非線形動的解析により基礎の耐震性を評価することで、より合理的に橋としての耐震性能を付与することができる場合も想定される。たとえば、現在の道路橋・高架構造の耐震設計基準である道路橋示方書 V 耐震設計編における標準的な耐震性能照査法では、構造物の加速度応答スペクトルは地盤種別ごとに与えられている。地盤の固有周期が0.6秒を超える地盤は全て同じ地盤種別とされているが、固有周期が長い軟弱な地盤などでは大地震時に地盤が塑性化するため、加速度はその地盤種別について想定しているほど大きくならないことが期待される。その一方で変位が大きくなることが予測され、構造物は加速度入力に対する構造物自身の応答に加えて地盤の振動変位の影響も大きく受けることになる。したがって、両者を同時に考慮できる動的解析を行うことにより、より合理的な設計結果が得られることが期待される。

そこで、本報告では深い基礎の非線形動的解析モデルに関して研究を行った結果を述べる。ここで述べる研究の特徴は、繰返し载荷を受ける土要素の要素試験結果、単杭の繰返し水平载荷実験、および群杭の地震時挙動に関する大型三次元振動台実験を通じて、モデル化、検証が行われていることである。提案するモデルは p - y 曲線を用いたものである。ここに、 p は地盤反力度、 y は基礎・地盤間相対変位である。そして、杭ははり要素やファイバー要素でモデル化されることを想定している。提案モデルは過剰間隙水圧の上昇の影響が無視できる問題、すなわち全応力解析の範疇で適用可能なものである。

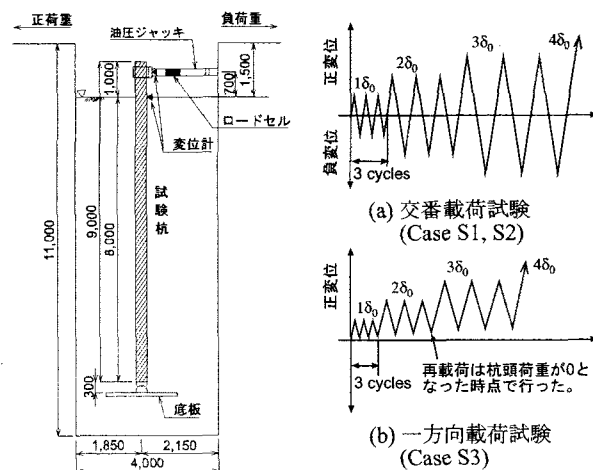


図-1 単杭の水平载荷実験

図-2 载荷パターン

2. 単杭の静的繰返し水平载荷実験結果

始めに、交番、および一方方向の繰返し水平载荷を受ける砂地盤中の鋼管杭の载荷実験結果について考察する。実験は文献¹⁾に示されるものであるが、より厳密な条件を与えて実験データ解析を再度行った。実験の概要図を図-1に示す。実験は非常に緩い砂地盤において行われている。これは意図的に緩い砂地盤を作成したものではなく、結果として想定通りの密度の地盤が作成されなかったものと推察される。平均相対密度は17%、乾燥単位体積重量は15.1 kN/m³である。杭は直径318.5 mmで根入れは8 mである。载荷点は地盤面から0.7 mの位置で、载荷速度は約60 mm/minである。Case S1は他のケースよりも圧肉の鋼管が用いられており、交番繰返し载荷が与えられた。Case S2, S3では同じ諸元の薄肉の鋼管杭が用いられており、それぞれ、Case S2には交番繰返し载荷が、Case S3には一方方向繰返し载荷が与えられている。各载荷パターンの概要を図-2に示す。ここで考慮された2つの载荷パターンは、地震時のようなランダムな载荷状態に含まれる载荷パターンの両極と考えられるものである。

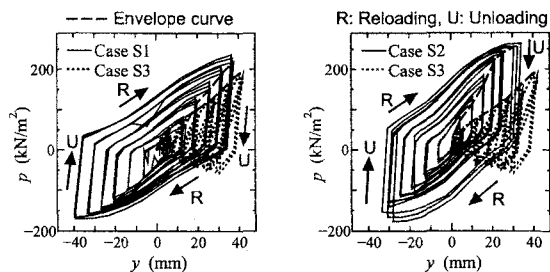


図-3 実験で得られた p - y ループ (GL-0.96 m)

図-3 に GL-0.96 m にて得られた p - y 曲線を示す。データ処理の精度を確保するため、図-3 は杭体材料が弾性と見なせる範囲における p - y 曲線を示した。実際には杭体は塑性化し、その後も繰返し荷重を受けた。実験により得られた p - y ループの特徴は次の通りである。

- 変位反転後の経路は履歴中の変位最大点を旨する傾向がある。
- ループの骨格曲線 (図-3 中の破線) の勾配とピーク点からの除荷勾配は異なり後者の方が大きく、また、除荷勾配は変位レベルによらずほぼ一定である。
- 一方向繰返し荷重の結果 (Case S3) と交番荷重の結果 (Case S2) を比較すると、同一変位レベルにおける地盤抵抗は一方向繰返し荷重の場合の方が小さい。

荷重パターンに応じて地盤の水平抵抗が変化するという実験結果は他にも見られる。たとえば、Agaiby ら²⁾ や Mayne ら³⁾ は、様々な密度、圧密条件の砂質土、粘性土中の模型場所打ち杭の繰返し水平荷重実験を行っている。それらの実験では単調荷重と一方向繰返し荷重が与えられている。そして、一方向繰返し荷重を受ける杭の水平抵抗は単調荷重時よりも小さくなることを示している。したがって、地盤の水平抵抗が繰返し荷重パターンにより変化するという性質は土質や密度の違いにかかわらず見られる現象であると考えられる。

3. 繰返し水平力を受ける地盤の力学特性

杭周辺地盤内で生じている挙動を可能な限り単純化したモデルで調べるために、図-4 に示すようなモデルを考える。実験において杭周辺地盤は主に繰返し圧縮・伸張変形を受けていたと考えられる。また、地震中に杭基礎周辺の土が受ける典型的な変形モードは、図-5 の破線内に見られるように、基礎・地盤間の相対変位に起因する繰返し圧縮・伸張変形モードが卓越すると考えられる。したがって、基礎のシステムとしての応答を精度良く評価するためには、繰返し圧縮・伸張荷重を受けるときの地盤の変形特性が考慮された数値解析モデルを用いる必要がある。

図-6 に Masuda et al.⁴⁾ が行った砂の平面ひずみ繰返し圧縮・伸張荷重試験結果を示す。図-6(a) の σ_{11} - ε_{11} 関係

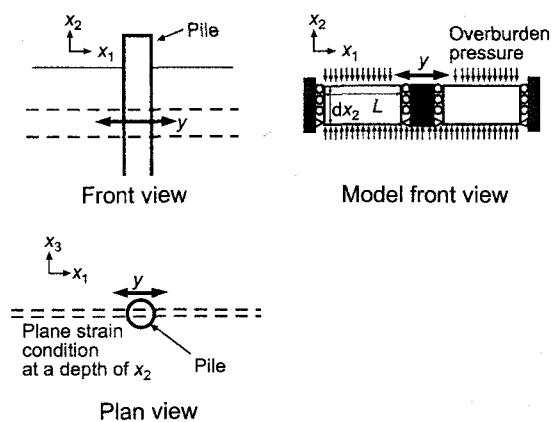


図-4 杭周辺地盤のモデル図

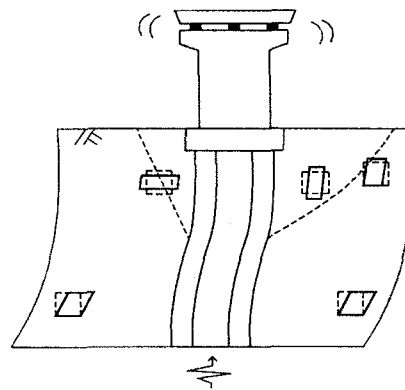


図-5 地盤の変形モード

を見ると、砂ブロックのひずみが圧縮から伸張に変化するとき、急激に抵抗力が落ちた後、主働状態となり、一定の小さな抵抗を保持している。一方、伸張から圧縮に変化するときには、徐々に抵抗力が回復し、前回ピーク点を旨しているのがわかる。そのため σ_{11} - ε_{11} 関係は三角形状のループの形状となる。そこで、このような平面ひずみ砂ブロックを荷重方向の両側につけた図-4 のようなモデルを考えれば、中央の荷重板が両側の平面ひずみ砂ブロックから受ける地盤反力度のループ形状は図-3 の杭の交番荷重試験で得られた p - y ループのような平行四辺形に近い形となると考えられる。すなわち、土要素の挙動が杭の p - y に強く反映されることがわかる。

また、図-6(b) に示す ε_{vol} - γ 関係をみる。砂ブロックが圧縮・伸張を繰り返すたびに負の dilatancy ($\varepsilon_{vol} > 0$) が累積していくのがわかる。交番荷重試験であれば、圧縮変形 (受働状態) 時に生じた負の dilatancy が伸張変形 (主働状態) 時に逸散される傾向にあるが、もし、圧縮 (受働) のみの一方向の繰返し変形を受ければ負の dilatancy はより大きく累積する。その結果、大きな残留ひずみが生じる場合には地盤抵抗が発揮されにくくなる。このように、地盤の dilatancy 挙動に起因して残留するひずみが荷重パターンに応じて変化することが、杭の p - y

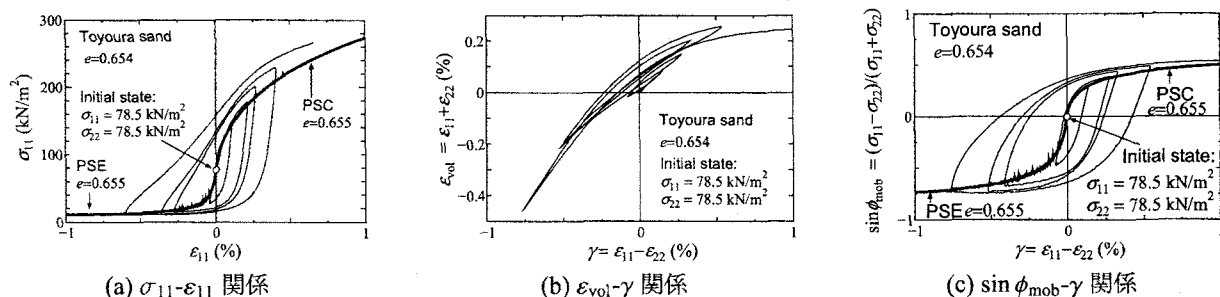


図-6 豊浦砂の圧縮・伸張繰返し載荷試験結果

ループにおける載荷パターン依存性の原因であると考えられる。

そこで、図-4 のモデルを用いて中央の剛体に様々な強制変位 $y(t)$ を与え、剛体を受ける地盤抵抗の履歴を求めた。両側の平面ひずみブロックはそれぞれ一要素でモデル化し、構成則は Masuda et al. の要素試験の結果に基づき、 $\sin \phi_{\text{mob}}-\gamma$ 関係と stress-dilatancy 関係で与えた。 $\sin \phi_{\text{mob}}-\gamma$ 関係は図-6(c) に示す要素試験結果を参考に、骨格曲線を双曲線関数で、履歴則を Masing 則で与えた。stress-dilatancy 関係は Rowe の stress-dilatancy 式で与えた。ここでは圧縮・伸張変形を受ける地盤の挙動を忠実に再現し、地盤中で土が受けている応力・変形状態を再現するように $\sigma_{22}, \varepsilon_{22}$ 成分まで含めた平面ひずみ問題とし、せん断変形成分と体積変形成分のそれぞれに応力・ひずみ関係を考慮していることが特徴である。さらに、体積変形成分を従来行われていたように単一のポアソン比のみを用いて記述するのではなく、より厳密に地盤の性質を表す Rowe の stress-dilatancy 式で与えたことが特筆すべき点である。

解析結果は実験で観察された $p-y$ ループの特徴を再現するものであった。また、解析結果を同一変位レベルの荷重低下現象という観点から分析すると、図-7 のようにまとめられた。ある $p-y$ のサイクルにおいて、

- (a) p の正負の振幅が等しい場合にはサイクルの開始点と終点はほぼ一致する。
- (b), (c) p の正負の振幅の差が大きいほどサイクルの開始点と終点の p の差は大きくなる。
- (d) サイクルの開始点の近傍で変位方向が逆転した場合にはサイクルの開始点と終点はほぼ一致する。

なお、Rowe の stress-dilatancy 式の代わりにポアソン比を用いて土要素の体積変形を考慮した場合には、このような載荷パターン依存性はみられない。

また、図-7 のような性質は以下のような現象としても捉えられる。杭が正負交番載荷を受ける場合には、杭の両側面の地盤は共に圧縮・伸張の一サイクルの変形を受けるため、dilatancy に起因する残留ひずみが同程度生じる。一方、杭が一方向繰返し載荷を受ける場合には、杭の両側面の地盤において dilatancy に起因する残

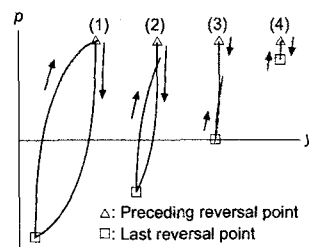


図-7 載荷パターンの違いによる荷重低下 (その 1)

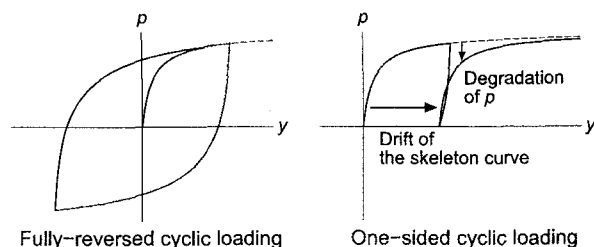


図-8 載荷パターンの違いによる荷重の低下 (その 2)

留ひずみには大きな差が生じる。したがって、図-8 に示すように、載荷パターンに依存した地盤中の残留ひずみの差に応じてあたかも骨格曲線は平行移動し、再載荷時の $p-y$ は移動後の骨格曲線を目指すような経路をたどるという現象として見ることもできる。

4. 提案履歴モデル

載荷パターンに応じて地盤抵抗 (すなわち p の値) が異なるという性質は、 $p-y$ 関係にバイリニアモデルや最大点指向モデル、Masing 則などを適用するという従来考えられた方法では考慮できないものである。そこで、地盤抵抗の載荷パターン依存性を再現できる $p-y$ 曲線の履歴則を提案した^{5),6)}。この履歴則を数値解析プログラムに組込む際の詳細は既報⁷⁾を参照されたい。

提案履歴則の概要を図-9 に示す。骨格曲線の選択は任意であるが、本論文では Bi-linear モデルを用いた。ここに、 p_u が地盤反力度の上限値である。骨格曲線の初期剛性 k_H は除荷剛性 k_0 を α_k 倍する。

$$k_H = \alpha_k k_0 \quad (1)$$

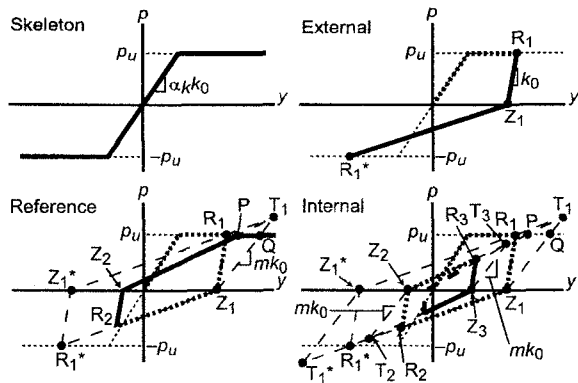


図-9 Winkler ばねの復元力モデル模式図

実際の p - y 曲線の非線形挙動をここでは Bi-linear カーブにて近似しているの、近似するための補正係数 α_k が導入されている ($\alpha_k < 1$)。 α_k の値は想定する変位レベル、および地盤の変形係数を求めたときのひずみレベルに依存するものである。 α_k は実験結果の数値解析を行うなどしながら、試行錯誤的に同定することを想定している。 p_u, k_0, α_k の設定については、後述の数値解析例を参照されたい。

正負交番载荷に対しては、提案履歴則は最大点指向型になる。 骨格曲線上の点 R_1 にて変位が反転した後、除荷経路は $p = 0$ へと除荷勾配 k_0 で向かい、 $p = 0$ 上の点 Z_1 に達する。 続いて点 R_1^* に向かう。 ここに、 R_1^* は原点に関して点 R_1 の対称な点である。 曲線 R_1 - Z_1 - R_1^* を外部曲線 (external curve) と呼ぶ。

外部曲線 R_1 - Z_1 - R_1^* 上の点 R_2 で変位が反転し、その後骨格曲線まで単調に向かう経路 R_2 - Z_2 - P を参照曲線 (reference curve) と呼ぶ。 参照曲線は常にターゲット点 T_1 を目指す。 ここにターゲット点 T_1 は直線 Z_1^* - R_1 と Z_1 - T_1 の交点である。 点 Z_1^* は点 Z_1 の原点に関する対称点である。 直線 Z_1 - T_1 は基準再载荷勾配 k_{Hr} を有し、

$$k_{Hr} = mk_0 \quad (2)$$

と定義される。 ここに m は定数 (≤ 0) である。 $m \neq 1$ のときは外部曲線 (external curve) 上で変位が反転した後の単調载荷経路は、骨格曲線上の元々の変位反転点 R_1 へは向かわない。 したがって、図-7 に示したような挙動が再現される。 さらに、基準最载荷勾配 k_{Hr} が骨格曲線の初期勾配と同じオーダーであり、かつ、一方向繰返し载荷を受け点 Z_1 で変位が反転したと仮定する。 p - y の経路は Z_1 - Q になり、点 Q にて骨格曲線に達した後は $p = p_u$ に沿って進む。 $k_{Hr} \approx k_H$ であるので、その経路はあたかも骨格曲線が右に水平移動したようになる。 したがって、式 (1) と式 (2) の α_k と m をほぼ等しく設定することで、図-8 に示したような挙動が再現される。 また、提案履歴則は、定常もしくは変位が漸増する交番载荷に対しては m の値によらず最大点指向型

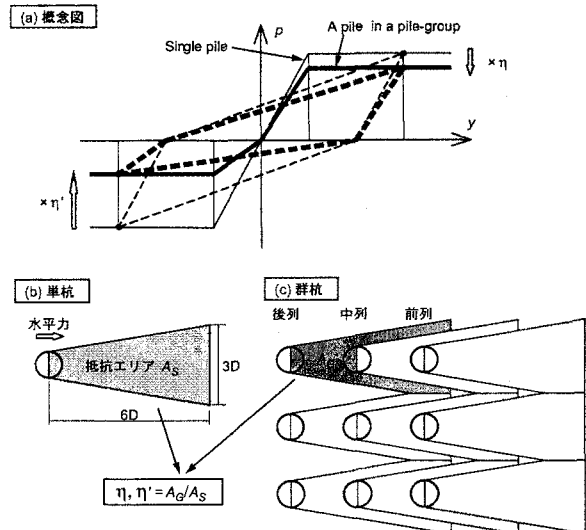


図-10 群杭効果に関する補正

に一致し、 $m=1.0$ とすると载荷パターンによらず最大点指向型になる。

このようなルールは内部曲線 (internal curve) にも適用する。 内部曲線は、载荷方向に応じて、常に外部曲線、もしくはその延長上の点 T_2 、あるいは参照曲線、もしくはその延長上の点 T_3 のいずれかを目指す。 ここに点 Z_2, T_2, Z_3, T_3 は点 Z_1, T_1 を設定するのと同じ手順で設定する。

群杭に適用するためには群杭効果に関しての補正を行う必要がある。 そこで、Brown et al.⁸⁾ の p -multiplier 法の考えを用い、履歴ループへ適用できるように以下のように拡張した。

$$\begin{aligned} p_G(y)_{z=z} &= \eta \times p_S(y)_{z=z}, & \text{if } p > 0 \\ p_G(y)_{z=z} &= \eta' \times p_S(y)_{z=z}, & \text{if } p < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $p_S(y)_{z=z}$ は深さ z における単杭の p - y 関係、 $p_G(y)_{z=z}$ はそれに対応する深さ z における群杭の p - y 関係である。 η, η' は p に関する補正係数 (p -multiplier) で、群杭中の杭位置、杭中心間隔などから決定されるところとされる値である。 図-10(a) に概念図を示す。 動的解析は正負両方向への载荷が生じ得る。 たとえば群杭中の端部の杭を想定すると、杭と地盤の相対変位に応じて前列杭にも後列杭にもなり得る。 そこで、 p の正負に応じて2つの補正係数値 η, η' を用いることにした⁶⁾。

群杭効率 η の値の評価法については、様々な研究が行われているが⁹⁾、ここでは、幸左ら¹⁰⁾の方法を用いて求めた。 この方法は、水平面内における単杭に対する地盤抵抗領域 A_S を図-10(b) のように仮定し、図-10(c) のような群杭中の杭の抵抗領域 A_G を抵抗領域の重なり合いを考慮して、 $\eta = A_G/A_S$ として求める。 η' についても同様に求める。

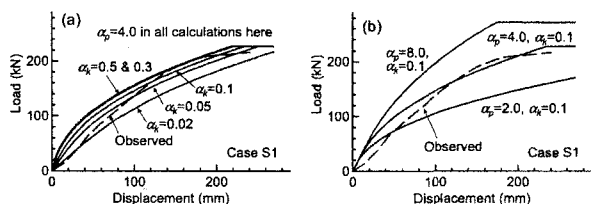


図-11 p - y の骨格曲線の設定をパラメトリックに変動させたときの数値解析結果と実験結果の比較

5. 単杭の静的繰返し載荷実験の数値解析⁵⁾

提案モデルを用いて2.節にて観察した単杭の交番、および一方方向繰返し水平載荷実験の数値解析を行う。杭ははり要素でモデル化し、曲げモーメント・曲率関係にバイリニア型の履歴則を与えた。曲げモーメント・曲率関係の骨格曲線は、道路橋示方書¹¹⁾に基づき与えた。杭は地盤抵抗を模した分布バネで支持され、個々のバネの挙動は提案履歴則により記述される。

まず、 p - y の骨格曲線について検討する。交番載荷実験 (Case S1) の結果は地盤のダイレクシー挙動に起因する地盤強度の載荷パターン依存性の影響を受けにくいと考えられる。そこで、Case S1 実験結果に対して単調載荷解析をパラメトリックに行った結果と実験結果の両者の荷重変位ループの骨格曲線を比較する。

骨格曲線の設定に必要な除荷剛性 k_0 は次式で与える。

$$k_0 = \frac{E_0}{B_0} \times \left(\frac{B}{B_0} \right)^n \quad (4)$$

ここに、 E_0 は微小ひずみ域における土の変形係数、 B は杭径、 B_0 は基準載荷幅であり、 B/B_0 は無次元量である。 n ($n \leq -1$) は地盤反力係数の載荷幅依存性を考慮するための係数である。式 (4) は道路橋示方書の地盤反力係数の式と同様の形で与えている。さらに、Gazetas and Dobly¹²⁾ は動的相互作用バネを地盤の剛性の定数倍で一次近似することを提案しているが、式 (4) も k_0 を地盤剛性の定数倍として与えている。 B_0 や n の値は、道路橋示方書¹¹⁾ や Yoshida and Yoshinaka¹³⁾ に従い、 $B_0 = 0.3$ m, $n = -3/4$ とした。また変形係数 E_0 は繰返し三軸圧縮試験結果から得られた値を用いた。骨格曲線を設定するためのもう一つのパラメータ、 p の上限値 p_u は、道路橋示方書の地震時保有水平耐力法における杭の耐震設計計算モデルと同様に、受働土圧強度を α_p 倍することにより与えてみる。ここに地盤の内部摩擦角は三軸圧縮試験から得られた値を用いた。

結果を図-11 に示す。解析結果は α_k の値に関してはさほど敏感ではない一方、 α_p の変動に対しては非常に敏感で、計算された荷重は α_p の変化に比例するように変化する。これらの結果からは α_k は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ オーダー程度、 α_p は 4.0 程度とするのが良いと考えられた。

さらに興味深いことに、 $\alpha_p = 4.0$ のときに得られる地盤反力度の上限値 p_u は、岸田・中井¹⁴⁾ が提案してい

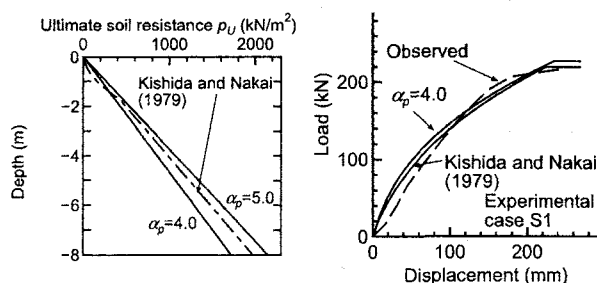


図-12 理論解により求めた地盤反力度の上限値 (左図) とそれを用いた数値解析結果と実験結果の比較 (右図)

る地盤の塑性流動メカニズムを仮定して得る理論解に非常に近い。岸田・中井の理論解を用いて実験結果の単調載荷解析を行った結果を図-12 に示す。理論解を用いた場合でも、実験結果に合うように設定された上限値を用いた場合であっても、地盤反力度の上限値の設定はほぼ等しくなり、また杭の挙動に関してもほぼ同様の結果が得られる。

次に、繰返し載荷時の杭の挙動の数値解析を行う。 p - y の骨格曲線を規定するパラメータは $\alpha_k = 0.1$, $\alpha_p = 4.0$ とした。一方、載荷パターン依存性を表すパラメータ m として2つの値を考慮した。一つは、載荷パターン依存性を無視し、最大点指向型になるように $m = 1.0$ を与えた場合、もう一つは $k_H = k_{Hr}$ となるように $m = \alpha_k = 0.1$ とした場合である。

載荷点における荷重変位関係を図-13、図-14 に示す。参考までに、Case S1 の解析結果図には、実験結果のループの骨格曲線を破線で示している。図-13 に示すように、正負交番載荷では、 $m=1.0$ と $m=0.1$ とした場合の解析結果はほとんど変わらず、 $m=0.1$ の場合でも履歴則の設定において想定した通りの結果が得られている。またいずれも実験結果を精度良く再現している。

一方、Case S3 (一方方向繰返し実験) の解析結果を見ると $m=1.0$ として低下則を考慮しない場合には、解析結果は実験結果よりも大きな荷重を与え、その骨格曲線は図中に破線で示した Case S2 (交番載荷実験) 実験結果の包絡線に近い。しかし、 $m = \alpha_k = 0.1$ とした場合には、実験結果を良く再現した。このように、提案履歴則は載荷パターンに依存した杭の挙動の違いを再現できた。

前述のように、ここで扱われた2つの載荷パターンは、地震時のようなランダムな載荷状態に含まれる載荷パターンの両極とえられるものである。したがって、ここでの解析結果から、提案した履歴則は様々な載荷パターンに対して有効に機能すると考えられる。

6. 群杭基礎の振動台実験の数値解析⁶⁾

実験は土木研究所が所有している三次元大型振動台およびせん断土槽を用いて行った。実験の概要図を図

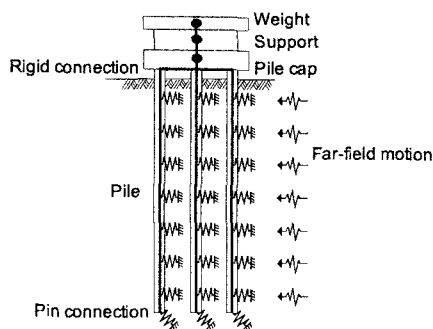


図-16 杭基礎の動的解析に用いたモデル

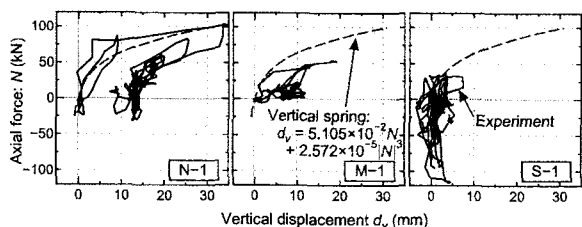


図-17 杭の鉛直抵抗特性

変形係数や地盤強度は繰返し三軸圧縮試験および三軸圧縮試験結果に基づき与えた。また、極限地盤反力度 p_u は、塑性流動メカニズムを仮定したときの岸田・中井¹⁴⁾の理論解を用いて与えた。繰返し载荷を受ける土要素の挙動から推測されたように、また杭の繰返し载荷実験の数値解析を通じて検証されたように、载荷パターン依存性に関するパラメータ m (式(2)) については、骨格曲線の初期勾配を規定するパラメータ α_k (式(1)) と同じ値を与えることにする。また、前列杭に関する群杭効率 η は3つの杭の平均で0.98, 中間列, 後列杭に関する η はいずれもそれぞれの列の3つの杭の平均で0.52であった。

前述のように p - y 関係の骨格曲線の初期勾配を規定するパラメータ α_k (式(1)) は経験的に設定しなければならないものである。上記の杭の繰返し载荷実験を解析した結果では α_k の値の違いに対して数値解析結果は大きく変化せず、 α_k のオーダーは $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 程度あると考えられた。そこで、まず $\alpha_k = 0.01, 0.1$ の両者を用いて振動台実験結果を解析してみた。その結果、 $\alpha_k = 0.01$ のとき実験結果に近い解析結果が得られたので、本論文では $\alpha_k = 0.01$ として解析を行った結果のみを報告する。また、以上の結果から、現在のところ、 α_k のオーダーは 10^{-2} 程度と考えられ、当面は $\alpha_k = 0.01$ を推奨値としてよいものと考えられる。なお、本論文の数値解析例においては、地盤に対する杭の変位レベルは杭径の50~100%程度であり、また地盤の変形係数は繰返し三軸圧縮試験結果から与えられたものである。

図-18に $\alpha_k = m = 0.01$ としたときに求まった上部構造の水平加速度-水平変位関係を示す。実験結果を良く再現できている。

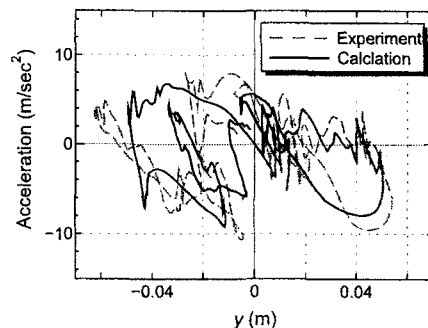


図-18 上部構造の水平加速度-水平変位関係

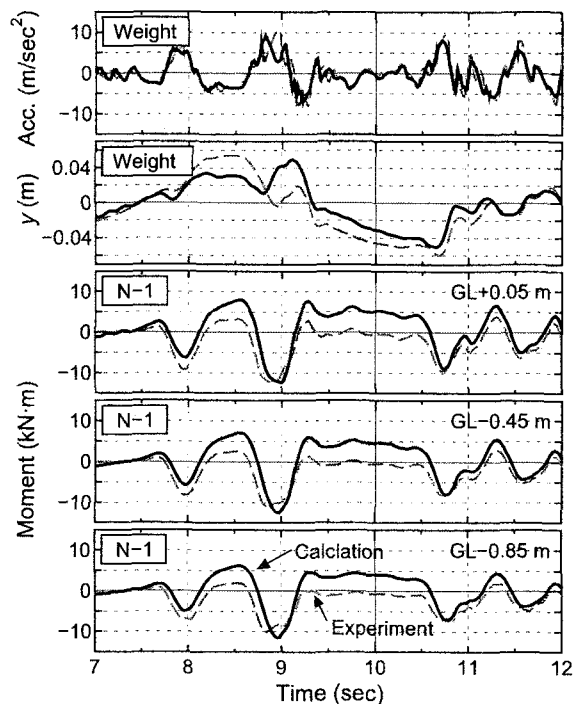


図-19 時刻歴応答

応答時刻歴を図-19に示す。それぞれ、上から順に上部構造の加速度時刻歴、上部構造の地表面に対する相対変位時刻歴、杭 N-1 における曲げモーメントの深度別時刻歴で、加振波の主要動が生じる時刻 $t = 7 \sim 12$ sec の拡大図である。杭番号は図-15に示す通りである。上部構造の加速度を見ると、時刻歴に含まれる各波が横軸を横切る時刻やピークに達する時刻は実験と解析で概ね一致している。これは p - y の履歴特性が妥当であることを示している。杭体曲げモーメントの実験値と計算値は深度にかかわらずよく一致している。図-20に杭体曲げモーメントの最大・最小値分布を示す。絶対値が最大となった負側において、実験結果と計算結果はよく一致している。

図-21には実験と計算で得られた GL -0.45 m における p - y 履歴を示す。図-21は北側 (N), 中間 (M), 南側 (S) と加振方向に並んだ杭に関する p - y 履歴を比較している。数値解析においても実験結果で見られるのと同様の群杭効果が再現されていることがわかる。

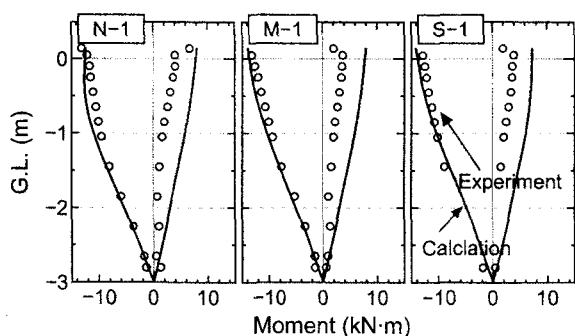


図-20 曲げモーメントの最大・最小値分布

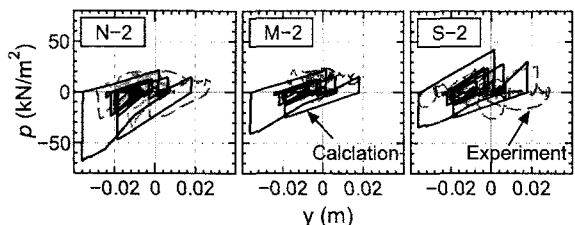


図-21 地盤反力度-変位関係 (G.L.-0.45 m)

7. 粘性土への適用に関するコメント

2. にて述べたように、既往の実験結果から、粘性土中の杭が受ける水平地盤抵抗も繰返し载荷パターンに応じて異なると考えられる。粘性土においても stress-dilatancy 特性が p - y 曲線の履歴に影響を与えていると考えられるが、今後、この点については詳細な検討が必要である。

したがって、提案モデルを粘性土層が支配的な地盤に対して用いる場合には、計算結果の評価をより慎重に行う必要があるものの、粘性土中の杭の動的挙動に関する遠心力振動台実験結果を提案履歴則を用いてシミュレートした結果¹⁵⁾は、比較的良好であった。今後、提案履歴則を用いた解析事例が積み重ねられ、提案履歴則の粘性土に対する適用性が更に解明されることが望まれる。

8. まとめ

本研究では、大地震時の深い基礎の応答解析を行うためのモデルとして、 p - y 曲線の新しい履歴則を提案、検証した。提案した p - y 履歴則を組込んだ Winkler 相互作用バネを用いた動的解析は、単杭、群杭、また、様々な繰返し载荷パターンが与えられたいずれの実験に対しても、対象とした実験に関しては精度良くシミュレートした。提案履歴則におけるパラメータの値は、骨格曲線の初期勾配を規定するパラメータ α_k (式 (1)) を除けばいずれも土質試験結果などから与えることができる。 α_k の値は解析事例を積み重ねることにより最適値が求められると考えられる。この点については更なる検討が必要であるが、現時点では、土の変形係数 E_0 を繰返し三軸試験から求める場合、もしくはそれに相当する

ひずみレベルの E_0 が求められた場合には $\alpha_k = 10^{-2}$ が最も適切と考えられる。

提案したモデルは全応力問題に適用可能であり、これまでの検証解析例によって、砂、粘性土のいずれにも適用可能であると考えられるが、粘性土に関しては更なる検証が望まれる。また、今後、杭が2方向から载荷を受ける場合のモデルについても検証を行ってきたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所: 砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平载荷試験, 土木研究所資料第 3552 号, 1998.
- 2) Agaiby, S., Kulhawy, F. and Trautmann, C.: Experimental study of drained lateral and moment behavior of drilled shafts during static and cyclic loading. TR-10223, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 1992.
- 3) Mayne, P., Kulhawy, F. and Trautmann, C.: Experimental study of undrained lateral and moment behavior of drilled shafts during static and cyclic loading. TR-10221, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 1992.
- 4) Masuda, T., Tatsuoka, F., Yamada, S. and Sato, T.: Stress-strain behaviour of sand in plane strain compression, extension and cyclic loading tests, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 5, pp. 31-45, 1999.
- 5) Shirato, M., Koseki, J. and Fukui, J.: A new nonlinear hysteretic mechanism for Winkler type soil-pile interaction springs considering loading pattern dependency, *Soils and Foundations*, (投稿中).
- 6) 白戸真大, 野々村佳哲, 福井次郎: 動的解析における群杭のモデル化に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, 論文番号 84 (CD-ROM), 2005.
- 7) 白戸真大, 福井次郎, 古関潤一: 基礎・地盤間相互作用バネの新しい履歴モデルについて, 地震時保有水平体力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 7, pp. 315-322, 2004.
- 8) Brown, D.A., Morrison, C. and Reese, L.C.: Lateral load behavior of pile group in sand, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 114, No. 11, pp. 1261-1271, 1988.
- 9) 野々村佳哲, 白戸真大, 福井次郎: 動的解析に用いるための群杭効率 η の評価について, 地震時保有耐力法に基づく橋梁構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, Vol. 7, 2004.
- 10) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀雄: 終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平载荷試験, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 249-260, 1998.
- 11) (社) 日本道路協会 (編): 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編. (社) 日本道路協会, 2002.
- 12) Gazetas, G. and Dobry, R.: Horizontal response of piles in layered soil, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 110, No. 1, pp. 20-40, 1984.
- 13) Yoshida, I. and Yoshinaka, R.: A method to estimate modulus of horizontal subgrade reaction for a pile, *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 3, pp. 1-17, 1979.
- 14) 岸田英明, 中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 日本建築学会論文報告集, Vol. 281, pp. 41-53, 1979.
- 15) 白戸真大, 吉田望, 福井次郎, 野々村佳哲: 軟弱粘性土上の高架構造物・基礎・地盤系の地震時挙動予測への Winkler 型非線形相互作用バネの適用, 構造工学論文集, Vol. 51A, 2005.