

2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化

液状化, 杭, 平面ひずみ

日本科学技術研修所 正会員 ○小堤 治
 東電設計 国際会員 溜 幸生
 川崎製鉄 正会員 岡 由剛
 港湾空港技術研究所 国際会員 一井 康二
 京都大学 国際会員 井合 進
 沿岸開発技術研究センター 正会員 梅木 康之

1. はじめに

液状化する可能性のある地盤上に建設される杭基礎を有する構造物の地震時挙動を正しく評価するためには、杭と周辺地盤との相互作用を的確にモデル化して解析を行う必要がある。2次元解析において杭と地盤の間を非線形ばねで結ぶ方法は時松ら¹⁾の結果を見ると有効であると思われるが、ばね特性をどのように設定したらよいかという問題が残る。そこで、2次元有効応力解析において杭と地盤を結ぶ非線形ばね（以下、杭－地盤相互作用ばね）に必要な特性を検討した。直杭式栈橋のように加振直交方向に杭が繰り返し現れるような構造を対象とし（図－1 a)), 杭1本分の断面と隣接杭との中間地点（循環境界条件を課す）までの地盤からなる厚さ1mの水平断面モデルを考える（図－1 b))。杭と地盤の一体解析における2次元地盤モデルは中間地点の地盤の動きを表すと仮定すると、土の上下動を考慮する必要のない深部でのばね特性は、水平断面モデルにて杭に加振方向に加えた荷重と杭変位（直近の中間地点に対する相対変位）の関係として定めることが出来る。種々の条件下で荷重～相対変位関係を求め²⁾、それらを総合して杭－地盤相互作用ばねに必要とされる特性とした。なお、水平断面での杭載荷解析は、2次元有効応力解析プログラム FLIP³⁾を用いて実施した。解析は、静的と動的の両方を実施したが、ここでは静的解析結果に基づいたばね特性を示す。

2. 水平断面での杭の載荷解析結果のまとめ

ダイレタンシーの影響を考慮しない場合は、杭に作用する力を増加させて行くと、それ以上の荷重を負担出来ないという荷重レベルの上限値、すなわち破綻荷重が存在することが分かる²⁾。破綻荷重(kN)を土の初期せん断強度 τ_{m0} (kPa)で正規化した値は特徴的な傾向を示す（図－2）。すなわち、正規化した破綻荷重は、杭間隔が2.5Dでは11.5に、5Dと10Dでは12.6に集中する。そこで、形式的に杭に対する荷重と後述するせん断応力を次式により対応付ける。

$$\text{荷重} = \alpha_p (11.5 \sim 12.6) \times \text{せん断応力} \quad (1)$$

図－3の上段の二図は、水平断面モデルによる繰り返し載荷解析結果である荷重～相対変位曲線の例である。同図の下段二図は、それぞれ上段と同じ条件の土の1要素を取り出して、FLIPにより非排水繰り返しせん断を行って得たせん断応力－せん断歪関係である。要素解析のせん断応力片振幅は(1)式を用いて水平断面モデルの荷重片振幅から算定した。これらの図やその他の条件下で得た同様の図によれば、荷重～相対変位関係とせん断応力～せん断歪関係は相似である。次に、このように相似となる両関係から、杭の相対変位片振幅と対応するせん断歪片振幅の関係を求めた。その結果の一部を図－4に示す。図の縦軸は（相対変位片振幅(m)/歪片振幅）であり、この値は N_{65} （有効上載圧65kPa換算のN値）や初期平均有効拘束圧 σ_{m0}' に依存しない。図の縦軸の値を β_p として、相対変位とせん断歪を次式で対応付ける。

$$\text{相対変位} = \beta_p \times \text{せん断歪} \quad (2)$$

3. 杭－地盤相互作用ばね

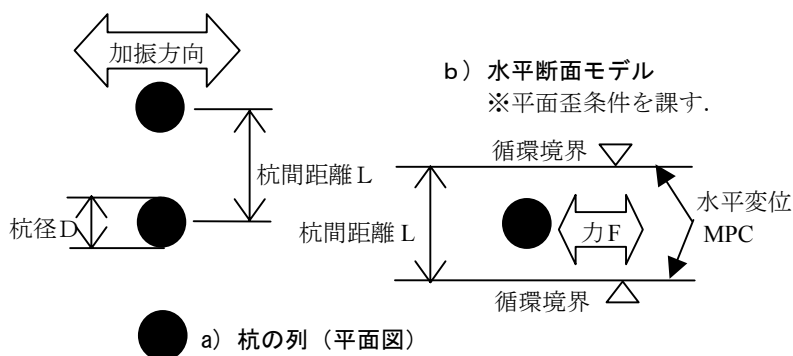
(1)式と(2)式の対応関係により、杭径Dが1mの場合の杭－地盤相互作用ばねの特性は、土の構成則によるせん断応力－せん断歪関係を基に与えることが出来る。また、同じ杭間隔比(L/D)であれば、杭径が半分になると破綻荷重は半分になり、繰り返し載荷時の荷重～相対変位関係は荷重片振幅を半分にすると元の関係と相似になる。この場合、相対変位振幅も半分になる。従って、杭径Dが1m以外の場合の杭－地盤相互作用ばねの特性を求めるには、 α_p をD倍し、また β_p もD倍して上述の方法を適用する。結局、杭－地盤相互作用ばね要素は次の手順で相対変位からばね力を返す。

- ① 杭の相対変位uに対応する2次元地盤モデル節点の変位を基準に算定する。
- ② 相対変位uから $\gamma = u / (D \times \beta_p)$ によりせん断歪 γ を評価する。なお、 β_p は例えば図－4の実線により定める。
- ③ 杭近傍の土要素と同様のせん断応力～せん断歪関係を設定し、せん断歪 γ からせん断応力 τ を算定する。
- ④ せん断応力 τ から $F = (H \times D \times \alpha_p) \times \tau$ によりばね力Fを評価する。Hはばねの鉛直方向支配長(m)。なお α_p は、杭間隔比に応じて、図－2の実線から求める。

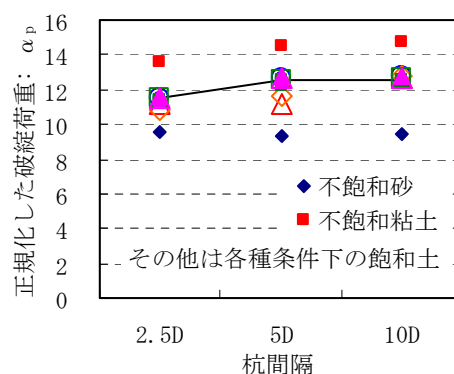
謝辞：本研究は沿岸開発技術研究センターに設けられたFLIP研究会杭基礎WGにおける研究成果をもとに取りまとめたものである。研究会に参加された各機関の方々に感謝の意を表します。

Modeling of Soil-Pile Interaction Subjected to Soil Liquefaction in Plane Strain Analysis

OZUTSUMI Osamu (Institute of Japanese Union of Scientists & Engineers), TAMARI Yukio (Tokyo Electric Power Services), OKA Yoshitake (Kawasaki Steel Corporation), ICHII Koji (Port and Airport Research Institute), IAI Susumu (Kyoto University), UMEKI Yasuyuki (Coastal Development Institute of Technology)

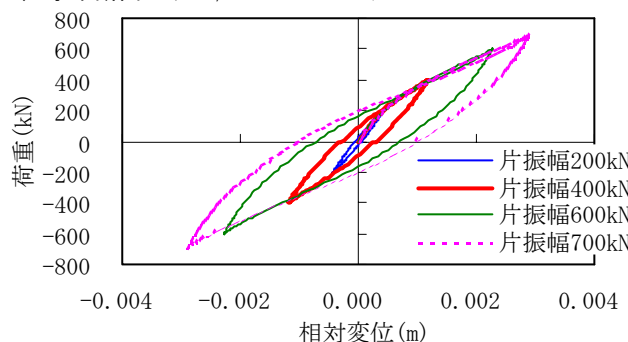


図一 加振直交方向に杭が繰り返し現れる構造と杭1本分を取り出した水平断面モデル²⁾

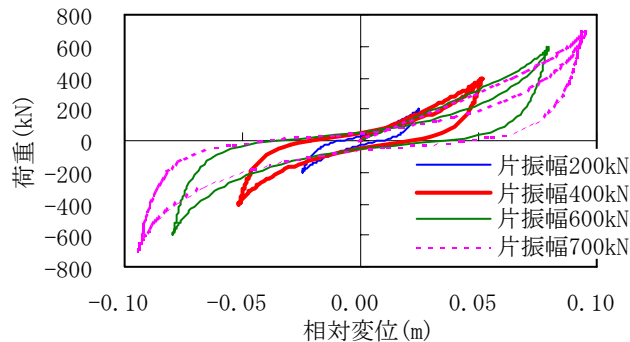


図二 (破綻荷重/初期せん断強度 τ_{m0}) の分布: ダイレクシーの影響を考慮しない場合

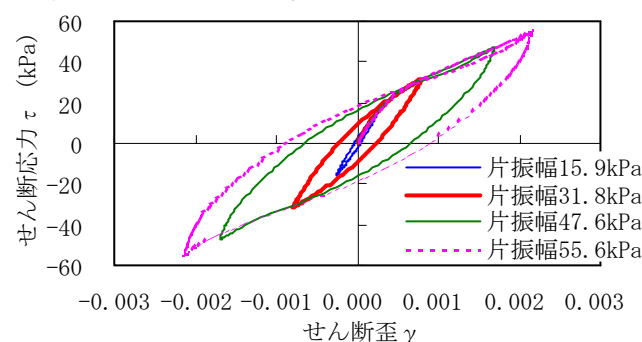
a) 水平断面モデル, E. P. W. P. R=0%



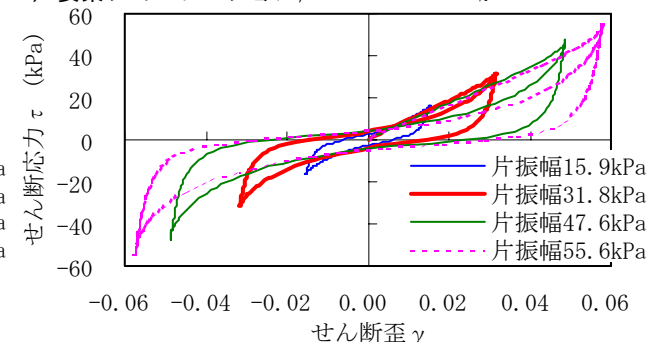
b) 水平断面モデル, E. P. W. P. R=95%



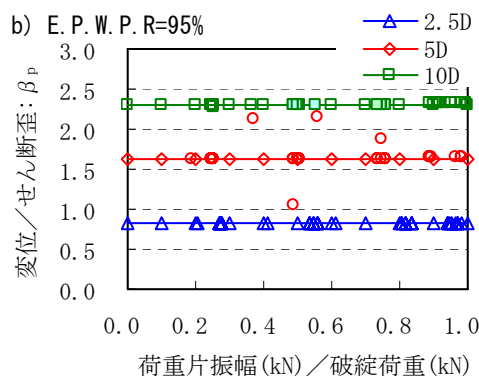
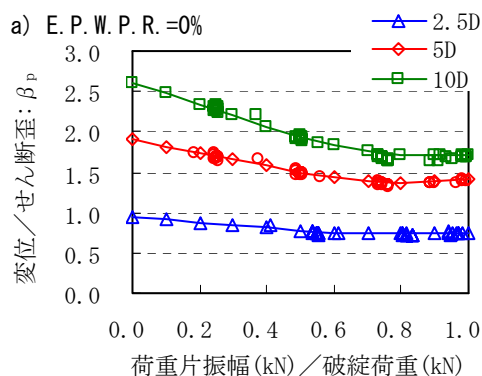
c) 要素シミュレーション, E. P. W. P. R.=0%



d) 要素シミュレーション, E. P. W. P. R.=95%



図三 飽和砂 ($N_{65}=10$, $\sigma_{m0}'=98\text{kPa}$, ダイレクシーの影響考慮) を対象とした杭間隔 5D の場合の水平断面モデルによる荷重～相対変位曲線 (上段二図) と対応する要素シミュレーションによるせん断応力～せん断歪関係 (下段二図): 左列は過剰間隙水圧比が 0%, 右列は 95% の場合.



図四 飽和砂 (ダイレクシーの影響考慮) を対象とした相対変位振幅(m)/せん断歪振幅の分布: 左図は過剰間隙水圧比が 0%, 右図は 95% の場合, 破綻荷重 ($\equiv \alpha_p \times \tau_{m0}$) で正規化した荷重片振幅の関数として表示.

参考文献

- 1) 時松ほか: 液状化地盤において異なる被害を受けた 3 例の杭基礎建物の有効応力解析, 第 34 回地盤工学研究発表会, 1999.7.
- 2) 三輪ほか: 2 次元水平断面モデルを用いた液状化地盤における杭一地盤系の相互作用の検討, 第 38 回地盤工学研究発表会, 2003.7 (投稿中).
- 3) Iai, S. et al.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.6.