

管内土を考慮した一次元杭打ち差分解析プログラムの開発

管内土 差分法 一次元波動方程式

金沢大学 学生会員 ○脇坂 誉志  
 金沢大学 国際会員 松本 樹典  
 ㈱ジオトップ 正会員 小嶋 英治  
 ㈱ジオトップ 正会員 熊谷 裕道

**1. はじめに** 海洋構造物の基礎として鋼管杭が一般的によく用いられている。本報告では、管内土中の波動電波および管内土が引起す杭内周面摩擦を考慮できるように、既存の一次元杭打ち解析プログラム KWaveFD<sup>1)</sup>を拡張した。また、杭打ち中に管内土内部で発生する間隙水圧の計算も導入した。

**2. 解析手法** KWaveFD では、杭の周面摩擦を考慮した一次元波動方程式(1)を差分法で解いている。ここで  $w$  は杭の変位、 $t$  は時刻、 $c_p$  は杭中の波動伝播速度、 $x$  は距離、 $\tau_{out}$  は外周面摩擦、 $\tau_{in}$  は内周面摩擦、 $\rho$  は杭の密度、 $U_{out}$  は外周長、 $U_{in}$  は内周長、そして  $A$  は杭の断面積を表わす。 $x$  軸に関して、杭頭から杭先端に向かう方向を正の方向と定めている。式(1)を杭断面の変化を考慮した差分式で表わすと式(2)になる。ここで  $dt$  は時間増分、 $dx$  は要素長、 $E$  はヤング率である。 $i$  および  $j$  は節点番号と時間ステップを表わす。管内土中の波動伝播は式(1)と同様な手法で解いている。ただし、波速度、密度と断面積については管内土の波速度  $c_{sp}$ 、管内土密度  $\rho_{sp}$ 、管内土断面積  $A_{sp}$  に置き換える。また、外周面摩擦  $\tau_{out}$  は考慮しない。

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = c_p^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + H_{out} \tau_{out} + H_{in} \tau_{in}, \quad H_{out} = -\frac{1}{\rho} \frac{U_{out}}{A}, \quad H_{in} = -\frac{1}{\rho} \frac{U_{in}}{A} \quad (1)$$

$$w_{i,j+1} = 2w_{i,j} - w_{i,j-1} + \frac{2}{(A_i \rho_i + A_{i+1} \rho_{i+1})} \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 \times (A_{i+1} E_{i+1} w_{i+1,j} - A_i E_i w_{i,j} - A_{i+1} E_{i+1} w_{i,j} + A_i E_i w_{i-1,j}) - \frac{U_i + U_{i+1}}{A_i \rho_i + A_{i+1} \rho_{i+1}} (\Delta t)^2 \tau_{i,j} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma' + u = E_s^c \varepsilon + \frac{K_f}{n} \cdot \varepsilon = \left( E_s^c + \frac{K_f}{n} \right) \varepsilon = E_{eq}^c \varepsilon \quad (3)$$

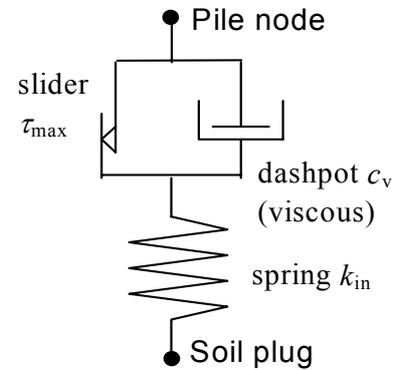


図 1 内周面摩擦モデル

図 1 は今回導入した内周面地盤モデルである。管内土中の間隙水圧を計算する際、杭打ち中の管内土の状態を完全非排水状態と仮定している。本プログラムでは、管内土を弾性土骨格と圧縮性の間隙流体の二相構造でモデル化した。また、管内土の半径方向のひずみは発生しないものとしている。以上の仮定および有効応力の原理より、式(3)が導かれる。ここで、 $\sigma$  は鉛直全応力、 $\sigma'$  は有効鉛直応力、 $u$  は過剰間隙水圧、 $\varepsilon$  は管内土のひずみ、 $E_s^c$  は土骨格の一次元変形係数、 $K_f$  は流体の体積弾性係数、 $n$  は間隙率、そして  $E_{eq}^c$  は非排水条件での等価一次元変形係数を示す。波動解析においては、等価一次元変形係数  $E_{eq}^c$  を用いて、鉛直ひずみ  $\varepsilon$  が各ステップで計算される。求められたひずみ  $\varepsilon$  を用いて、管内土の間隙水圧が式(3)によって求められる。外周面地盤モデルおよび先端地盤モデルに関しては、参考文献 1)を参照されたい。

**3. 数値計算例** 拡張した KWaveFD を用いて、ある典型的な杭打ちシミュレーションを行った。対象とする杭の諸条件を表 1 に、杭と地盤の構成は図 2 で示すように設定した。杭は軟弱地盤(層 1)を通り、比較的硬い地盤(層 2)まで貫入している。管内土高さは地表面と一致しているものとする。地盤は完全飽和状態とした。地盤パラメータを設定する際、層 2 のせん断剛性を層 1 の 15 倍とした。土密度およびポアソン比表 2 の用に仮定し、その他のパラメータを決定した。内周面バネを外周面バネの 2 倍に設定した。層 1 の中心深さでの有効土被り圧に 0.3 を乗じたものを非排水せん断強度  $c_u$  とし、これを最大内外周面摩擦応力とした。先端地盤最大応力  $q_b$  は  $q_b = 6 c_u$  とした。使用した地盤パラメータを表 2 にまとめた。

表 1 杭の諸条件

杭長 (m)	11
外径 (mm)	800
内径 (mm)	780
断面積 (m <sup>2</sup> )	0.0248
ヤング率 (kPa)	$2.4 \times 10^8$
密度 (ton/m <sup>3</sup> )	7.8
波速度 (m/s)	5547
質量 (ton)	2.13

杭打ち解析では、図 3 に示す載荷荷重を杭頭に 150 ms おきに 3 回連続して載荷させた。図 4 に、杭頭変位と管内土表面変位の時間変化を示す。打撃のたびに杭は地盤に貫入していくが、管内土はそれほど貫入していかないことがわかる。図 5 は、各打撃終了時の管内土中の過剰間隙水圧の分布である。2 打撃目と 3 打撃目での過剰間隙水圧分布は、ほぼ一致している。3 打撃目終了時 ( $t = 150$  ms) の残留内周面摩擦分布を図 6 に示す。

4. まとめ 管内土を考慮した一次元杭打ち解析プログラムを開発した。開発したプログラムでは、杭打ち中の管内土の挙動、内外周面摩擦分布、そして管内土内部に発生する間隙水圧分布を計算することが可能である。杭打ち終了時の管内土内部の間隙水圧分布を用いた、管内土の圧密解析を参考文献2)で報告する。

参考文献

- 1) Wakisaka, T., Matsumoto, T., Kojima, E. & Kuwayama, S. (2004). Development of a new computer program for dynamic and static pile load tests. *Proc. 7th Int. Conf. on the Appl. of Stress-Wave Theory to Piles*, Selangor, Malaysia: 341-350.
- 2) 沼田篤志, 脇坂誉志, 松本樹典 (2005). 杭打ち後の管内土の一次元圧密解析, 第40回地盤工学研究発表会 (投稿中).

表2 地盤定数

Parameter	Layer 1			Layer 2
	Outer shaft	Inner shaft	Soil Plug	Pile base
Shear modulus, $G$ (MPa)	2.49	2.49	2.49	37.3
Soil density, $\rho_s$ (ton/m <sup>3</sup> )	1.9	1.9	1.9	2.0
Poisson's ratio (as drained value), $\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3
Maximum shaft resistance, $\tau_{max}$ (kPa)	13.2	13.2	----	----
Spring stiffness, $k_{out}, k_{in}, k_b$ (MPa/m)	2.72	5.44	----	120
$\alpha$ value	0.2	0.2	----	----
$\beta$ value	0.2	0.2	----	----
Young's modulus (as drained value), $E'_s$ (MPa)	6.46	6.46	6.46	96.9
1-D modulus, $E'_s$ (MPa)	----	----	8.70	----
Porosity, $n$	----	----	0.44	0.44
Bulk modulus of fluid, $K_f$ (MPa)	----	----	2000	2000
Degree of saturation, $S_r$ (%)	----	----	100	100
Equivalent 1-D modulus, $E'_{ed}$ (MPa)	----	----	4554	----
Equivalent Poisson's ratio, $\nu_{eq}$	----	----	0.4997	0.4997
End bearing capacity, $q_b$ (MPa)	----	----	1.19	1.19

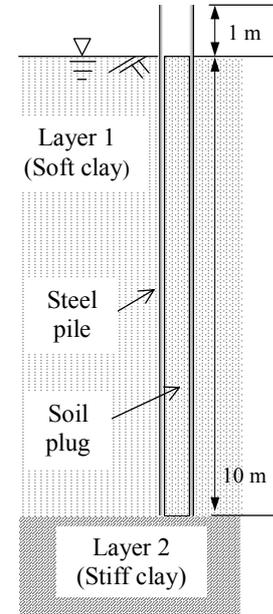


図2 杭と地盤構成

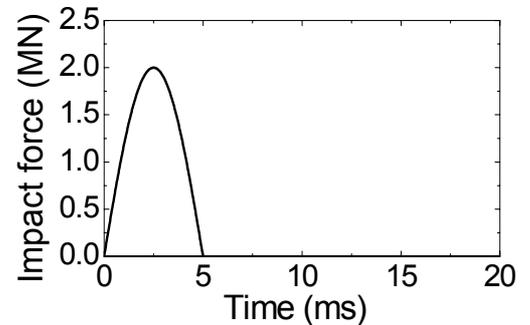


図3 載荷荷重

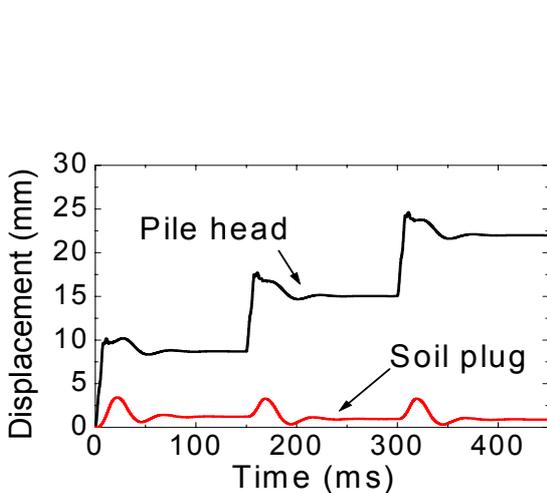


図4 変位

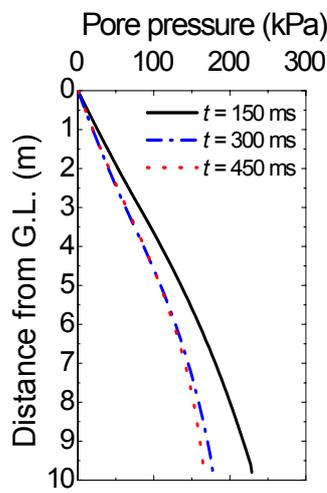


図5 間隙水圧分布

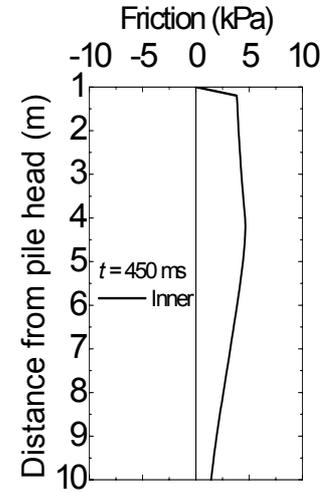


図6 内周面摩擦