

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.03.17

# 考虑成层土分布和试桩结果的桩土相互作用 细观特征研究

朱洪昌, 徐金明, 黄大勇  
(上海大学土木工程系, 上海 200072)

**摘要:** 结合上海软土地区的某一实际桩基工程, 根据土层实际分布和基桩试验结果, 使用颗粒流方法研究了成层土中的桩-土相互作用。对于单根桩, 采用平行黏结模型来表征不同土层与单桩的相互作用, 使用现场静载试验所得荷载位移关系曲线来标定平行黏结模型中的细观力学性质参数, 建立了考虑土层成层分布和试桩结果的桩土相互作用颗粒流模型, 得到了该桩对应不同土层的桩-土相互作用细观力学性质参数; 对于全部试桩亦同法处理, 得到了不同试桩对应土层的细观力学性质参数; 结果表明, 使用颗粒流方法可以较好模拟桩与成层土的相互作用; 由宏观参数确定细观参数的多元线性回归方程时, 个别相关系数小于 0.5、大多数大于 0.5、部分达到了 0.9 以上; 由细观参数确定宏观参数的多元线性回归方程时, 个别相关系数小于 0.6、大多数大于 0.8, 拟合效果较好。

**关键词:** 颗粒流; 桩; 成层土; 多元线性回归

中图分类号: TU470<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)03-0106-07

## Mesoscopic characteristics of pile-soil interaction considering layered distribution of soils and real pile test results

ZHU Hongchang, XU Jinming, HUANG Dayong  
(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Based on a real pile foundation project in the soft soil ground in Shanghai, the interaction between pile and layered soils was investigated using the particle flow method considering the layered soils and pile test results. For a single pile, after considering the real distributions of soil layers and the load-displacement curves obtained in field, the parallel bonded models were established, with the calibration of the mechanical parameters in a meso-scale based on in-situ load-displacement curves. The parallel bonded models of other in-situ test piles were then established using the same method, and the corresponding meso-parameters were thereafter obtained. The results show that the particle flow code method can effectively simulate the interaction between the piles and layered soils. In determining the mesoscopic parameters from the macroscopic ones, few of the correlation coefficients in the equations were less than 0.5, most of the coefficients were greater than 0.5, and a part of the coefficients reached 0.9 or more. In the equations obtained from the mesoscopic parameters to the macroscopic ones, a few of the correlation coefficients in the equations were less than 0.6, the rest of the coefficients were greater than 0.8, indicating that the regression result is relatively reasonable.

**Keywords:** particle flow code, pile, layered soils, multiple linear regression

收稿日期: 2015-10-08; 修订日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41472254)

第一作者: 朱洪昌(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: zhuhch1@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: xjming@163.com

预估单桩承载力对桩基工程具有非常重要的实际意义。在软土地区,单桩承载力主要取决于桩-土的相互作用,这种相互作用与土层实际分布和不同土层宏观物理力学性质密切相关。由于土的宏观性质取决于土的细观力学性质,可以根据土层实际分布和已有试桩结果、通过建立细观颗粒流模型来获得不同土层的细观力学性质参数。

目前,桩-土相互作用研究已取得了许多成果。岳著文等<sup>[1]</sup>使用有限元方法对静压沉桩过程中桩体的受力情况进行了分析;申永江等<sup>[2]</sup>使用有限元方法分析了双排桩桩排间的土拱效应;叶建忠等<sup>[3]</sup>通过模拟单桩的静压沉桩过程,对桩土相互作用的机制进行了研究;周健等<sup>[4]</sup>模拟了静压开口管桩的沉桩过程,研究了土塞的形成机制;邓益兵等<sup>[5]</sup>模拟了螺旋挤土桩与土体的相互作用过程;刘文白等<sup>[6]</sup>对扩底桩的上拔试验进行了模拟;苏栋等<sup>[7]</sup>对水平荷载作用下的桩土相互作用过程进行了模拟;Reddy 等<sup>[8]</sup>通过室内试验,研究了上拔荷载和侧向荷载共同作用下的单桩力学响应;王浩<sup>[9]</sup>对扩底抗拔桩的群桩效应进行了模拟研究;Shelke 等<sup>[10]</sup>分析了土拱效应对群桩上拔承载力的影响;Kenneth 等<sup>[11]</sup>通过现场试验研究了摩擦疲劳效应对桩基承载力的影响;杨宏宇等<sup>[12]</sup>对桩侧负摩阻力的工作性状进行了模拟;饶平平等<sup>[13]</sup>模拟了邻近斜坡的沉桩过程,分析了斜坡土体的位移在沉桩过程中的变化情况;许朝阳等<sup>[14]</sup>对桩承式路堤中的土拱效应进行了研究;Liu 等<sup>[15]</sup>对岩石宏细观参数的定量关系做了相关研究;周健等<sup>[16]</sup>对砂土的室内双轴试验进行了模拟;周博等<sup>[17]</sup>通过模拟黏性材料的平面双轴应变试验,分析了黏性材料宏细观参数间的定量关系。

但是,现有研究成果大多建立在纯砂土的基础之上,没有很好考虑土的成层性。本次研究拟以实际桩基工程为背景,充分考虑土层成层性,根据不同桩位处土层宏观参数来确定土层细观力学性质参数的初始值,以试桩所得荷载位移曲线来标定桩-土相互作用的细观力学性质参数,使用多元线性回归分析方法来获得考虑成层土特征和桩土相互作用的宏细观性质参数定量关系。

## 1 颗粒流模型的建立

### 1.1 工程概况

工程所在场地属于滨海平原地貌类型,在深度 60.43 m 范围内的地基土属第四纪晚更新世及全新世沉积物,主要由黏性土、粉性土和砂土组成,具有明显的成层性。土层分为 6 个主要层次,缺失上海统编地层第⑥

层暗绿色粉质黏土,第③层土中有第③<sub>夹</sub>层砂质粉土分布,第⑤层土分为若干个亚层及次亚层。土层自上而下分别为:第①层杂色填土、第②层褐黄色黏土、第③层灰色淤泥质粉质黏土、第③<sub>夹</sub>层灰色砂质粉土、第④层灰色淤泥质黏土、第⑤<sub>1</sub>层灰色黏土、第⑤<sub>3-1</sub>层灰色粉质黏土夹黏质粉土、第⑤<sub>3-2</sub>层灰色粉质黏土、第⑤<sub>4</sub>层暗绿-灰绿色粉质黏土、第⑦层灰黄色粉砂。

工程桩为预应力钢筋混凝土闭口圆形管桩,施工方法为静压法。试桩采用慢速维持荷载法进行静载试验,以设计最大加载值的十分之一作为每级荷载的增量,第一级加载大小为这一增量的两倍。试桩主要参数如表 1 所示。

表 1 试桩参数

桩长/m	桩径/m	桩端持力层	最大加载值/kN	静载试桩数量/根
25	0.5	⑤ <sub>3-1</sub>	1200	2
37	0.5	⑤ <sub>3-2</sub>	2500	3
44	0.5	⑦	4200	3
46	0.5	⑦	4200	3

### 1.2 建立单桩静载试验的颗粒流模型

本次研究使用了 11 根试桩结果,以第 46 号试桩为例,说明单根桩与成层土相互作用平行黏结模型的建立过程。

首先,对二维颗粒流代码(PFC<sup>2D</sup>)中的 Fishtank 代码包进行二次开发,建立“虚拟”的地基土平行黏结模型(此时尚未考虑土层的成层性分布)。其中,土颗粒用单位厚度的圆盘模拟,土的边界条件使用 wall 命令建立的墙体模拟。为了减小土颗粒总数、提高运算效率,离桩较近的土颗粒采用较小的粒径,离桩较远的土颗粒采用较大的粒径,粒径比为 4.0,最小粒径的分布情况如图 1 所示。

以成层土的宏观物理力学性质参数(表 2)为基础,初定不同土层的细观力学性质参数。

表 2 第 46 号试桩对应的土层宏观参数

Table 2 Macroscopic parameters of the layered soils in pile 46

土层编号	层底深度 /m	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ / (°)	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
①	1.40	1800	1.11	23.00	16.00	3.74
②	2.60	1800	1.11	23.00	16.00	3.74
③	3.90	1940	0.81	7.00	28.50	12.18
③ <sub>夹</sub>	8.00	1915	0.79	3.00	31.00	11.57
④	11.30	1765	1.16	13.00	17.00	3.52
④	18.60	1670	1.51	13.50	12.25	2.27
⑤ <sub>1</sub>	24.20	1740	1.27	16.00	11.00	2.93
⑤ <sub>3-1</sub>	35.50	1855	0.98	17.50	21.75	3.84
⑤ <sub>3-2</sub>	41.40	1805	1.06	22.00	15.50	6.05
⑤ <sub>4</sub>	44.10	1980	0.71	44.00	14.50	7.61
⑦	钻孔未揭穿	1904	0.83	0.00	34.00	12.77

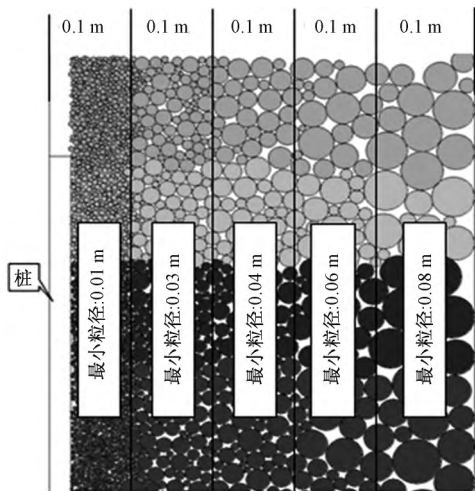


图1 粒径分布图

Fig. 1 Size distributions of the particles in simulation

对不同土层,按土层底标高分别赋予不同颜色;根据颜色不同赋予相应的细观力学性质参数;以平均不平衡力/平均接触力的比值 0.00001 作为平衡状态的判定标准,施加重力加速度,使土体在重力作用下达达到平衡。为了避免模拟过程中出现颗粒溢出现象、减小墙体产生的边界效应,墙体刚度值取土颗粒平均刚度值的 1.1 倍。考虑到对称性,研究时采用半模模型,假定墙体之间没有摩擦(即墙体摩擦系数假设为 0)。

在建立单根桩模型时,考虑到对称性与颗粒流模拟时的二维情况,假定桩为刚体,先删除试桩所在区域的颗粒,再用四面刚性墙体来模拟,不考虑试桩本身的自重和压缩变形。桩长为 44 m,桩径为 0.5 m,桩顶标高和桩底标高分别为 -2.0 m 和 -46.0 m,桩底以下考虑土层厚度为 4 m,四面墙体的法向刚度和切向刚度设为  $1 \times 10^9 \text{ N/m}$ 。模拟时不考虑土塞效应的影响。

为了模拟桩体表面的粗糙性,将墙体-土层颗粒的摩擦系数设为 5.0。模拟开始前,使试桩与土体在重力作用下达达到初始平衡状态。

### 1.3 细观参数的反演

现场静载试验采用分级加载的方式。颗粒流模拟时给墙体施加外力不采用直接方式,而是通过施加加速度的方式实现。通过控制沉降值,反算不同沉降值对应的端阻力和侧摩阻力,从而得到不同桩顶沉降值对应的承载力值,赋予桩体加载速度为  $5 \times 10^{-6} \text{ m/时步}$ ,每沉降 0.5 mm 记录 1 次端阻力和侧摩阻力,得到模拟的荷载位移曲线。模拟时,以现场静载试验所得荷载位移曲线为细观参数的取值标准,反复调试细观力学性质参数,直至模拟所得荷载位移曲线与实际荷载

位移曲线基本相符(图 2)。将此时所得细观力学性质参数作为该桩对应土层的细观力学性质参数(表 3)。

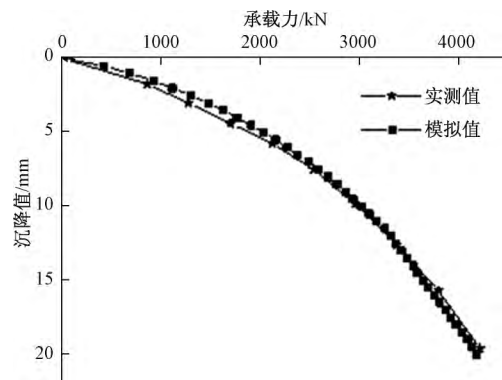


图2 荷载-位移曲线

Fig. 2 Load-displacement curves

表3 第46号试桩对应土层的细观力学性质参数

Table 3 Mesoscopic mechanics parameters of the layered soils in pile 46

土层编号	颗粒力学性质参数			平行黏结力学性质参数			
	颗粒接触模量 $E_p/\text{MPa}$	刚度比 $k_{nP}/k_{sP}$	摩擦系数 $\mu_p$	平行黏结模量 $/\text{MPa}$	刚度比 $k_n/k_s$	法向强度均值 $\sigma/\text{kPa}$	切向强度均值 $\tau/\text{kPa}$
①	12.90	2.00	1.15	0.10	2.00	2.30	1.15
②	12.90	2.00	1.15	0.10	2.00	2.30	1.15
③	42.00	2.00	2.17	0.10	2.00	0.70	0.35
③ <sub>夹</sub>	39.90	2.00	2.40	0.10	2.00	0.30	0.15
③	12.14	2.00	1.22	0.10	2.00	1.30	0.65
④	7.83	2.00	0.87	0.10	2.00	1.35	0.68
⑤ <sub>1</sub>	10.10	2.00	0.78	0.10	2.00	1.60	0.80
⑤ <sub>3-1</sub>	13.24	2.00	1.60	0.10	2.00	1.75	0.88
⑤ <sub>3-2</sub>	20.86	2.00	1.11	0.10	2.00	2.20	1.10
⑤ <sub>4</sub>	26.24	2.00	1.03	0.10	2.00	4.40	2.20
⑦	44.03	2.00	2.70	0.10	2.00	0.00	0.00

研究时用类似方法建立了其它试桩与成层土的平行黏结模型,模拟了桩-土相互作用过程,获得了所有试桩对应土层的细观力学性质参数。

## 2 宏细观力学性质参数关系的估计

### 2.1 根据宏观力学性质参数估计细观力学性质参数

宏观性质参数选为孔隙比、内摩擦角、黏聚力、压缩模量,细观力学性质参数选为颗粒接触模量、颗粒刚度比、颗粒摩擦系数、平行黏结模量、平行黏结刚度比、平行黏结法向强度均值、平行黏结切向强度均值。

将宏观性质参数  $\{x_{ij}\}$  作为自变量,细观力学性质参数  $\{y_i\}$  作为因变量,可以得到由宏细观力学性质参数之间的多元线性回归方程:

$$\{y_i\} = \beta_0 + \{\beta_j x_{ij}\} + \varepsilon_i$$

式中:  $\beta_0$   $\beta_j$ ——常系数、回归系数;

$\varepsilon_i$ ——随机误差;

$j$ ——因变量个数  $j=1, 2, \dots, n$  为试验组数。

由于不同桩位处土层①的层底标高约为  $-2.0\text{ m}$  , 而桩顶标高均小于  $-1.7\text{ m}$ 、只有桩顶很小部分位于土

层①中, 土层①对桩的承载力几乎不起作用, 所以本次研究中土层①的宏观性质参数取值同土层②。表 4 为各土层由宏观性质参数确定细观力学性质参数的多元线性回归方程计算结果。

表 4 基于宏观性质参数的细观力学性质参数估计

Table 4 Estimation of mesoscopic mechanics parameters based on macroscopic ones

土层编号	细观性质参数估计	相关系数 $R^2$	土层编号	细观性质参数估计	相关系数 $R^2$
②	$E_p = -1.842 - 0.280e - 1.208\varphi + 0.432c + 6.398E_s$	0.830	⑤ <sub>3-1</sub>	$E_p = -68.194 + 35.574e + 1.185\varphi - 0.179c + 6.263E_s$	0.957
	$k_{np}/k_{sp} = 0.783 + 0.180e - 0.141\varphi + 0.100c + 0.317E_s$	0.096		$k_{np}/k_{sp} = 62.522 - 27.060e - 0.848\varphi - 0.429c - 2.102E_s$	0.357
	$\mu_p = -0.472 - 0.152e + 0.098\varphi - 0.010c + 0.086E_s$	0.340		$\mu_p = -33.911 + 15.475e + 0.559\varphi + 0.204c + 1.211E_s$	0.919
	$\bar{E}_c = 0.790 - 0.025e - 0.015\varphi - 0.015c - 0.028E_s$	0.505		$\bar{E}_c = -6.666 + 3.153e + 0.095\varphi + 0.043c + 0.222E_s$	0.823
	$k_n/k_s = 3.044 + 0.316e - 0.300\varphi + 0.113c + 0.308E_s$	0.235		$k_n/k_s = 98.977 - 43.382e - 1.357\varphi - 0.666c - 3.459E_s$	0.637
	$\bar{\sigma} = 28.601 + 0.226e - 0.767\varphi - 1.023c + 2.103E_s$	0.477		$\bar{\sigma} = -372.391 + 188.682e + 4.890\varphi + 1.807c + 13.005E_s$	0.551
	$\bar{\tau} = 14.553 + 0.200e - 0.409\varphi - 0.499c + 1.014E_s$	0.461		$\bar{\tau} = -186.344 + 94.410e + 2.447\varphi + 0.904c + 6.508E_s$	0.551
③	$E_p = 7.298 + 3.378e + 0.926\varphi - 1.540c + 1.338E_s$	0.818	⑤ <sub>3-2</sub>	$E_p = 91.504 - 52.154e - 1.290\varphi - 0.806c + 3.700E_s$	0.892
	$k_{np}/k_{sp} = 1.655 + 0.582e + 0.008\varphi - 0.028c + 0.001E_s$	0.031		$k_{np}/k_{sp} = 0.362 - 11.392e + 0.225\varphi + 0.195c + 0.982E_s$	0.402
	$\mu_p = -2.347 + 0.727e + 0.099\varphi + 0.075c + 0.033E_s$	0.143		$\mu_p = -0.023 - 2.316e + 0.108\varphi + 0.032c + 0.209E_s$	0.892
	$\bar{E}_c = 0.134 - 0.019e - 0.002\varphi - 0.001c + 0.002E_s$	0.489		$\bar{E}_c = 0.358 + 1.019e - 0.026\varphi - 0.030c - 0.048E_s$	0.829
	$k_n/k_s = 3.850 - 0.051e - 0.008\varphi - 0.111c - 0.041E_s$	0.270		$k_n/k_s = 0.501 - 13.155e + 0.240\varphi + 0.182c + 1.277E_s$	0.463
	$\bar{\sigma} = -9.338 + 6.310e + 0.173\varphi + 0.046c - 0.062E_s$	0.603		$\bar{\sigma} = -57.313 + 19.427e + 1.108\varphi + 0.055c + 3.179E_s$	0.556
	$\bar{\tau} = -4.661 + 3.153e + 0.086\varphi + 0.023c - 0.031E_s$	0.604		$\bar{\tau} = -28.656 + 9.717e + 0.554\varphi + 0.027c + 1.589E_s$	0.556
③ <sub>英</sub>	$E_p = 915.911 - 50.570e - 22.527\varphi - 9.249c - 9.634E_s$	0.839	⑤ <sub>4</sub>	$E_p = -0.167c + 4.419E_s$	0.957
	$k_{np}/k_{sp} = 29.519 - 69.624e + 0.313\varphi + 0.885c + 1.324E_s$	0.150		$k_{np}/k_{sp} = 0.064c - 0.105E_s$	0.375
	$\mu_p = 55.417 - 55.421e - 0.530\varphi + 0.224c + 0.546E_s$	0.143		$\mu_p = 0.016c + 0.052E_s$	0.296
	$\bar{E}_c = -7.235 + 9.724e + 0.039\varphi - 0.068c - 0.118E_s$	0.489		$\bar{E}_c = -0.006c + 0.049E_s$	0.967
	$k_n/k_s = -8.993 - 47.215e + 0.946\varphi + 1.041c + 1.395E_s$	0.270		$k_n/k_s = 0.039c + 0.039E_s$	0.375
	$\bar{\sigma} = 147.434 - 212.109e - 0.697\varphi + 1.913c + 3.122E_s$	0.603		$\bar{\sigma} = -0.021c + 0.355E_s$	0.044
	$\bar{\tau} = 73.762 - 106.091e - 0.349\varphi + 0.956c + 1.561E_s$	0.604		$\bar{\tau} = -0.010c + 0.177E_s$	0.044
④	$E_p = 33.486 - 23.901e + 0.059\varphi + 0.966c - 1.418E_s$	0.722	⑦	$E_p = -0.052\varphi - 1.706c + 3.589E_s$	0.925
	$k_{np}/k_{sp} = 8.701 - 0.297e - 0.119\varphi - 0.285c - 0.422E_s$	0.344		$k_{np}/k_{sp} = 0.059\varphi + 0.104c - 0.001E_s$	0.400
	$\mu_p = 2.047 - 2.304e + 0.115\varphi + 0.138c - 0.407E_s$	0.935		$\mu_p = 0.080\varphi - 0.115c + 0.011E_s$	0.516
	$\bar{E}_c = -0.146 - 0.335e + 0.009\varphi + 0.054c - 0.040E_s$	0.824		$\bar{E}_c = -0.007\varphi - 0.024c + 0.026E_s$	0.970
	$k_n/k_s = 7.917 + 1.777e - 0.196\varphi - 0.419c - 0.246E_s$	0.629		$k_n/k_s = 0.033\varphi + 0.025c + 0.068E_s$	0.400
	$\bar{\sigma} = 72.345 - 47.926e - 0.413\varphi + 1.574c - 6.945E_s$	0.525		$\bar{\sigma} = 0.007\varphi + 0.271c - 0.019E_s$	0.979
	$\bar{\tau} = 36.166 - 23.962e - 0.207\varphi + 0.787c - 3.472E_s$	0.525		$\bar{\tau} = 0.004\varphi + 0.136c - 0.010E_s$	0.979
⑤ <sub>1</sub>	$E_p = -12.642 - 0.236e + 0.431\varphi + 0.335c + 4.471E_s$	0.842			
	$k_{np}/k_{sp} = -3.753 + 2.945e + 0.042\varphi - 0.012c + 0.592E_s$	0.313			
	$\mu_p = -3.921 + 1.965e - 0.213\varphi + 0.315c - 0.151E_s$	0.862			
	$\bar{E}_c = 1.025 - 0.351e - 0.059\varphi + 0.026c - 0.079E_s$	0.472			
	$k_n/k_s = 3.200 - 0.078e + 0.191\varphi - 0.334c + 0.728E_s$	0.613			
	$\bar{\sigma} = -171.329 + 97.061e - 7.874\varphi + 8.029c + 2.388E_s$	0.509			
	$\bar{\tau} = -85.704 + 48.550e - 3.938\varphi + 4.016c + 1.194E_s$	0.509			

对于土层⑤<sub>4</sub> 和土层⑦, 部分回归系数出现了 0。这是因为, 模拟时试桩处土层宏观性质参数取自于距该桩最近控制孔中的对应土层, 研究时出现不同试桩对应土层参数取自于同一控制孔的情况, 此时不同桩位处土层⑤<sub>4</sub> 和土层⑦宏观参数存在完全相等。确定多元线性回归方程时, 存在线性相关的行向量, 矩阵的秩数等于 2, 小于因变量矩阵秩数 5。可通过布置较多的钻孔避免出现这一情况。

对于具体工程来说, 若已知土层宏观物理力学性质参数, 可根据表 4 建立相应的桩-土相互作用颗粒流模型, 进而可以通过数值模拟来估计成层土情况下单桩荷载位移关系曲线与单桩承载力大小。

### 2.2 根据细观力学性质参数估计宏观力学性质参数

将细观力学性质参数  $\{y_i\}$  作为自变量, 宏观性质参数  $\{x_{ij}\}$  作为因变量, 可以得到由细观力学性质参数确定宏观性质参数的多元线性回归方程。由各土层细

观力学性质参数确定宏观性质参数的多元线性回归方程计算结果见表5。

表5 基于细观力学性质参数的宏观性质参数估计

Table 5 Estimation of macroscopic mechanics parameters based on mesoscopic ones

土层编号	宏观性质参数估计	相关系数 $R^2$
②	$e = 1.110 - 0.000E_p + 0.332\mu_p - 0.098k_{np}/k_{sp} - 1.588 - 0.351k_n/k_s - 0.771 + 1.556$	0.163
	$\varphi = 19.442 - 0.012E_p - 0.892\mu_p + 1.830k_{np}/k_{sp} - 25.308 - 0.555k_n/k_s - 0.154 + 0.336$	0.957
	$c = 26.828 - 0.136E_p + 0.717\mu_p + 0.088k_{np}/k_{sp} - 5.961 - 1.688k_n/k_s - 2.724 + 5.149$	0.647
	$E_s = 1.599 + 0.124E_p - 0.412\mu_p + 0.703k_{np}/k_{sp} - 6.567 + 0.605k_n/k_s + 0.764 - 1.466$	0.952
③	$e = 1.607 - 0.007E_p + 0.008\mu_p - 0.112k_{np}/k_{sp} - 0.784 - 0.085k_n/k_s + 1.410 - 2.774$	0.703
	$\varphi = 1.389 + 0.195E_p + 0.112\mu_p + 6.330k_{np}/k_{sp} - 12.122 + 2.724k_n/k_s + 296.930 - 593.325$	0.931
	$c = 19.700 - 0.155E_p - 0.818\mu_p + 0.286k_{np}/k_{sp} - 16.265 - 1.466k_n/k_s - 101.434 + 202.708$	0.827
	$E_s = -10.135 + 0.223E_p + 2.120\mu_p + 1.528k_{np}/k_{sp} + 30.869 + 1.089k_n/k_s - 53.871 + 107.260$	0.803
③夹	$e = 0.593 + 0.002E_p + 0.021\mu_p - 0.006k_{np}/k_{sp} + 0.374 + 0.021k_n/k_s + 0.787 - 1.571$	0.981
	$\varphi = 40.407 - 0.114E_p - 0.913\mu_p + 0.201k_{np}/k_{sp} + 13.147 - 1.028k_n/k_s - 148.453 + 296.633$	0.977
	$c = -4.614 - 0.015E_p + 1.833\mu_p - 0.806k_{np}/k_{sp} + 29.773 + 1.294k_n/k_s + 859.907 - 1717.413$	0.724
	$E_s = 3.473 + 0.145E_p + 0.242\mu_p + 0.301k_{np}/k_{sp} + 3.874 + 0.618k_n/k_s - 505.002 + 1008.889$	0.640
④	$E = 1.877 - 0.043E_p - 0.001\mu_p - 0.154k_{np}/k_{sp} + 1.583 - 0.019k_n/k_s + 14.474 - 28.966$	0.933
	$\varphi = 13.712 - 0.133E_p - 0.868\mu_p + 7.163k_{np}/k_{sp} - 28.726 - 1.234k_n/k_s - 363.396 + 726.525$	0.998
	$c = 11.162 - 0.093E_p + 0.933\mu_p - 1.819k_{np}/k_{sp} + 30.342 - 0.062k_n/k_s - 55.356 + 110.515$	0.992
	$E_s = 1.972 + 0.161E_p - 0.081\mu_p + 0.065k_{np}/k_{sp} - 6.117 - 0.120k_n/k_s - 67.915 + 135.826$	0.781
⑤ <sub>1</sub>	$e = 2.038 - 0.018E_p + 0.034\mu_p - 0.578k_{np}/k_{sp} + 0.577 - 0.082k_n/k_s - 65.202 + 130.400$	0.971
	$\varphi = 13.613 + 0.110E_p - 0.670\mu_p + 0.976k_{np}/k_{sp} - 9.747 - 0.890k_n/k_s - 321.289 + 642.229$	0.974
	$c = 8.409 + 0.247E_p - 0.851\mu_p + 8.819k_{np}/k_{sp} - 16.335 + 0.348k_n/k_s + 466.904 - 933.924$	0.941
	$E_s = -1.062 + 0.144E_p + 0.049\mu_p + 1.540k_{np}/k_{sp} - 3.473 + 0.617k_n/k_s + 246.91 - 493.715$	0.994
⑤ <sub>3-1</sub>	$e = 0.940 - 0.008E_p + 0.096\mu_p - 0.136k_{np}/k_{sp} + 1.113 + 0.031k_n/k_s - 9.615 + 19.258$	0.994
	$\varphi = 2.577 + 0.157E_p - 1.663\mu_p + 7.352k_{np}/k_{sp} + 35.156 + 2.230k_n/k_s + 1048.9 - 2098.393$	0.980
	$c = 44.960 - 0.468E_p - 1.657\mu_p - 3.958k_{np}/k_{sp} + 36.573 - 3.732k_n/k_s - 429.269 + 858.018$	0.898
	$E_s = 6.759 + 0.125E_p - 0.186\mu_p - 0.438k_{np}/k_{sp} - 19.708 - 0.703k_n/k_s - 250.304 + 500.554$	0.996
⑤ <sub>3-2</sub>	$e = 1.229 - 0.008E_p + 0.223\mu_p - 0.257k_{np}/k_{sp} + 0.900 - 0.124k_n/k_s - 1.724 + 3.471$	0.955
	$\varphi = 12.158 - 0.259E_p - 10.133\mu_p + 12.450k_{np}/k_{sp} - 8.370 + 7.649k_n/k_s + 419.922 - 839.996$	0.976
	$c = 34.952 + 0.041E_p + 13.847\mu_p - 15.062k_{np}/k_{sp} - 15.800 - 11.304k_n/k_s - 309.352 + 619.398$	0.964
	$E_s = 4.797 + 0.009E_p + 2.186\mu_p - 2.589k_{np}/k_{sp} + 10.696 - 0.740k_n/k_s + 8.201 - 16.157$	0.955
⑤ <sub>4</sub>	$e = -0.001E_p + 0.195\mu_p - 0.009k_{np}/k_{sp} + 0.179k_n/k_s$	1.000
	$\varphi = 0.057E_p + 2.734\mu_p + 0.464k_{np}/k_{sp} + 3.526k_n/k_s - 0.016$	1.000
	$c = 0.114E_p + 9.218\mu_p + 0.928k_{np}/k_{sp} + 10.803k_n/k_s - 0.033$	1.000
	$E_s = 0.178E_p - 0.878\mu_p + 1.447k_{np}/k_{sp} + 1.595k_n/k_s - 0.051$	1.000
⑦	$e = 0.205\mu_p + 0.250 + 0.197k_n/k_s - 0.060$	1.000
	$\varphi = 11.982\mu_p - 20.762 + 6.056k_n/k_s - 7.000$	1.000
	$c = -1.099\mu_p - 0.012 + 1.100k_n/k_s + 4.000$	1.000
	$E_s = 0.495\mu_p + 28.784 + 4.451k_n/k_s + 1.960$	1.000

### 3 结论

(1) 以实际桩基工程为背景,建立了单根桩与成层土相互作用的平行黏结模型,使用现场静载试验所得荷载位移曲线标定了平行黏结模型的细观力学性质参数,建立了所有试桩与成层土相互作用的颗粒流模型,得到了成层土的细观力学性质参数以及考虑试桩与土层相互作用的荷载位移曲线模拟结果。

(2) 使用多元线性回归分析方法,得到了成层土宏观性质参数与细观力学性质参数之间的多元线性回归关系以及相应的多元线性回归方程。

#### 参考文献:

[1] 岳著文,李镜培,邓文艳,等. 静压沉桩桩体受力全过程数值分析[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 53-57. [YUE Z W, LI J P, DENG W Y, et al. Finite element analysis of pile stress in static

- pressure pile installation [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(1): 53 – 57. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 申永江, 杨明, 项正良, 等. 双排桩桩排间土拱效应的发育规律研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(1): 70 – 74. [SHEN Y J, YANG M, XIANG Z L, *et al.* Development of soil arching between the double-row anti-sliding piles [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(1): 70 – 74. (in Chinese) ]
- [ 3 ] 叶建忠, 周健, 寒冰. 基于离散元理论的静压沉桩过程颗粒流数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊1): 3058 – 3064. [YE J Z, ZHOU J, HAN B. Numerical simulation of punching processes by particle flow code based on discrete element method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup1): 3058 – 3064. (in Chinese) ]
- [ 4 ] 周健, 陈小亮, 周凯敏, 等. 静压开口管桩沉桩过程模型试验及数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊2): 3839 – 3846. [ZHOU J, CHEN X L, ZHOU K M, *et al.* Model test and numerical simulation of driving process of open-ended jacked pipe piles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(Sup2): 3839 – 3846. (in Chinese) ]
- [ 5 ] 邓益兵, 周健, 刘文白, 等. 螺旋挤土桩下旋成孔过程的颗粒流数值模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1391 – 1398. [DENG Y B, ZHOU J, LIU W B, *et al.* PFC numerical simulation of augered piling of soil displacement screw piles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1391 – 1398. (in Chinese) ]
- [ 6 ] 刘文白, 周健. 扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2004, 25(增刊): 201 – 206. [LIU W B, ZHOU J. Prototype tests and particle flow numerical simulation of under-reamed piles on uplift loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Sup): 201 – 206. (in Chinese) ]
- [ 7 ] 苏栋, 李相崧. 水平多向荷载下桩 – 土相互作用初探 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 603 – 608. [SU D, LI X S. Preliminary study on soil-pile interaction under multidirectional horizontal loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 603 – 608. (in Chinese) ]
- [ 8 ] Reddy K M, Ayothiraman R. Experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141: 1 – 10.
- [ 9 ] 王浩. 扩底抗拔桩桩端阻力的群桩效应研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2203 – 2208. [WANG H. Group effects of pile tip resistance of under-reamed piles on uplift loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2203 – 2208. (in Chinese) ]
- [ 10 ] Shelke A, Patra N R. Effect of arching on uplift capacity of pile groups in sand [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2008, 8: 347 – 354.
- [ 11 ] Kenneth G. Gavin, Brendan C. O' Kelly. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand [J]. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133: 63 – 71.
- [ 12 ] 杨宏宇, 胡刚, 白伟明, 等. 单桩负摩阻力特性的离散元与有限元模拟分析 [J]. *公路交通技术*, 2014(5): 53 – 57. [YANG H Y, HU G, BAI W M, *et al.* Discrete element and finite element simulation analysis of single-pile negative frictional resistance [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2014(5): 53 – 57. (in Chinese) ]
- [ 13 ] 饶平平, 李镜培, 詹乐. 邻近斜坡沉桩挤土效应颗粒流数值模拟 [J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(4): 1 – 5. [RAO P P, LI J P, ZHAN L. Numerical simulation of particle flow code (PFC) of soil squeezing effect by pile sinking adjacent to slope [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(4): 1 – 5. (in Chinese) ]
- [ 14 ] 许朝阳, 周健, 完绍金. 桩承式路堤承载特性的颗粒流模拟 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(增刊1): 501 – 507. [XU C Y, ZHOU J, WAN S J. Simulation of bearing characteristics of pile-supported embankments by particle flow code [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 34(Sup1): 501 – 507. (in Chinese) ]
- [ 15 ] Chun Liu, David D Pollard, Bin Shi. Analytical solutions and numerical tests of elastic and failure behaviors of closed-packed lattice for brittle rocks and crystals [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118: 71 – 82.
- [ 16 ] 周健, 池毓蔚, 池永. 沙土双轴试验的颗粒流模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(6): 701 – 704. [ZHOU J, CHI Y W, CHI Y. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(6): 701 – 704. (in Chinese) ]
- [ 17 ] 周博, 汪华斌, 赵文锋, 等. 黏性材料细观与宏观力学参数相关性研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33

(10): 3171-3178. [ZHOU B, WANG H B, ZHAO W F, et al. Analysis of relationship between particle mesoscopic and macroscopic mechanical parameters of cohesive materials [J]. Rock and Soil Mechanics,

2012, 33(10): 3171-3178. (in Chinese) ]

责任编辑: 张明霞

## “第十届全国工程地质大会”第2号通知

第十届全国工程地质大会将于2016年10月13日-10月21日在四川省成都市召开。全国各地及国际特邀工程地质专家学者将欢聚一堂,围绕国家提出的“一带一路”建设涉及的交通、能源、海洋、城市等重大工程地质问题、工程地质新理论、新技术以及工程地质教育及学科发展进行研讨,共同为建设强盛和美好的国家献计献策。

中国地质学会工程地质专业委员会热忱邀请各位代表莅临美丽的蓉城参加本次学术盛会!

主办: 中国地质学会工程地质专业委员会

承办: 西南交通大学

大会网站: <http://engeo2016.swjtu.edu.cn>

主题: 工程地质与一带一路建设  
议题:

- 交通与生命线工程地质
- 能源与资源开发工程地质
- 海洋和近海工程地质
- 城市工程地质
- 地震工程地质
- 地质灾害风险评估与防控
- 自然与文化遗产工程地质
- 复杂环境下的地质工程问题
- 工程地质新理论与新技术
- 国外工程的特殊工程地质问题及勘察实践
- 工程地质教育与学科发展
- 其他

大会秘书处:

彭永良(13568961566) 赵晓彦(13808224764)

王世明(13880778691) 廖昕(13880074412)

地址: 四川省成都市犀安路999号,西南交通大学地球科学与环境工程学院地质工程系(工程地质大会会务组),邮编: 611756,电子邮箱: 59114851@qq.com

会议时间安排

2016年10月13日-10月21日,其中10月13日工程地质专业委员会暨IAEG会员报到;10月14日大会代表报到;专委会会议及IAEG联席会议;10月15日-10月21日学术会议及交流。

大会主要时间节点

2016年4月30日,大会论文摘要提交截止,可同时投全文。

2016年5月30日,论文全文截止。

2016年6月30日,发布论文录用通知。

2016年8月15日,大会提前注册、展览与交流预定截止。确定大会特邀学术报告、大会邀请报告、大会专题分组学术报告、大会展板报告。

2016年9月15日,大会住宿酒店提前预定截止。

2016年10月13日,工程地质专业委员会委员、IAEG会员报到。

2016年10月14日,工程地质专业委员会与IAEG会员联合会;大会代表报到。

2016年10月15-17日,学术会议。

2016年10月18日,会后地质调查。

会议论文

投稿电子邮箱: [engeo2016@sina.cn](mailto:engeo2016@sina.cn)

邮件主题请注明“2016年第十届全国工程地质大会投稿”。投稿应为未正式发表过的最新成果。经评审录用的论文,择优在《西南交通大学学报》(EI检索)、《工程地质学报》正刊发表,其余在《工程地质学报》增刊发表。

大会注册与费用

1、2016年8月15日前办理注册费转账,收取注册费标准:正式代表1200元;学生代表及陪同人员600元;

2、会议报到时现场支持银行卡支付注册缴费,收取注册费标准:正式代表1500元;学生代表及陪同人员800元。

会议账号信息

账户名称: 四川省人民政府金牛宾馆

银行账号: 4402221009008950823

开户银行: 工行四川省分行茶店子支行

办理转账时请注明“第十届全国工程地质大会”、姓名及发票抬头。请保留转账凭证,会议期间凭转账凭证开具发票,开具发票时,学生代表需提供学生证或其它证明。

由于会议期间正值旅游旺季,请大家提前注册并预订房间。

大会住宿预定

大会主会场设在金牛宾馆,金牛宾馆可提供客房400余间(400-600元/房间天)。方圆2km内宾馆10余个,能提供客房2000余间(240-400元/房间天)。详情请登录大会网站(<http://engeo2016.swjtu.edu.cn>)。

野外地质调查路线

路线一: 地震灾区地质灾害考察;

路线二: 岷江及金沙江流域地质灾害考察。

会议地点

成都市金牛宾馆(成都市金牛区金泉路2号)

金牛宾馆总机: 028-87306000, 传真: 028-87305555。

金牛宾馆网址: <http://www.jinniuhotel.cn/>