

动静荷载综合作用下桩土共同作用的机理研究*

周翠英¹, 谭祥韶¹, 李德福¹, 黎志中², 王 谨²

(1. 中山大学地球科学系, 广东 广州 510275; 2. 永基建筑基础有限公司, 广东 顺德 528300)

摘 要: 轴向荷载作用下桩与土体的相互作用理论日趋成熟, 但是, 迭加水平荷载作用后, 桩土相互作用机理更复杂, 研究面临新的课题. 工程上断桩、裂桩的现象时有发生. 针对这一问题, 主要分析了静压桩施工过程中, 由于压桩机运行荷载与轴向荷载的共同作用而产生桩体受损的原因, 在轴向荷载作用下桩与土体相互作用模型的基础上, 考虑了压桩机水平振动荷载的作用, 建立了轴向静荷载与水平向动荷载共同作用下桩土相互作用模型, 并初步进行了工程实例验证, 结果尚令人满意.

关键词: 动静荷载; 桩土相互作用; 机理研究

中图分类号: TU753.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 04-0097-05

静压桩由于其施工噪音低, 承载能力好, 目前在基础工程中广泛采用. 但是, 由于工程场地的变异性及桩土作用过程的复杂性, 施工中断桩、裂桩现象时有发生, 已有的研究表明^[1,2], 桩在横向荷载作用下, 地下 1~3 m 处桩身的弯矩是最大的, 因此这段桩身最容易出现裂桩问题, 设计人员只能以较大的安全系数来保证桩基的安全工作状态^[3]. 因而, 研究轴向静荷载与水平向动荷载共同作用下成层地基中桩土相互作用机理, 以保证桩基的安全工作状态显得十分必要. 本文在轴向荷载作用下桩土相互作用模型的基础上, 考虑了水平振动荷载的作用, 得出了在动静荷载共同作用下桩土相互作用的数学模型, 并应用该模型对广州越秀区某工程场地桩基础受力状态进行了初步分析.

1 桩土相互作用研究现状与存在问题

桩土相互作用问题的研究, 迄今已有 100 余年的历史, 取得不少进展. 目前, 桩土相互作用理论分析方法主要有: 荷载传递法、弹性理论法、剪切位移法、有限单元法、边界单元法以及混合法等. 荷载传递法^[4]认为任何一点的位移只与该点的剪应力有关, 忽略了桩周土的应力场效应, 也无法反映软弱下卧层的影响. 潘时声(1991)提出了用分层位移叠代法求解单桩, 并推广到群桩分析中, 有效改善了该法不同的传递

函数对应的临界位移值相差大的问题. 陈如桂^[5]建立了单桩荷载传递的弹塑性桩土体系的理论并开发出可供工程应用的实用方法. 弹性理论法^[6]利用半无限弹性体中集中力下的 Mindlin 解给出桩身竖向变形, 这与实际地基土的成层性差别较大. 为此, Ta 等^[7]将层状弹性体的分析理论引入到桩基础的分析中; 费勤发^[8]等将弹性理论解与分层总和法相结合, 以考虑成层土的情况. 剪切位移法^[9]假设桩产生竖向位移时, 桩侧摩阻力通过环形单元向四周传递, 桩侧周围土体的变形可视为同心的圆柱体, 适用性较强. 杨嵘昌等^[10]进一步将剪切位移法推广到塑性阶段, 并且用于桩-土-承台结构的非线性共同作用分析. 有人在剪切位移法的基础上, 给出了层状土中轴向受荷桩土相互作用的问题分析方法^[11], 对于解决一般地基土的桩土相互作用问题较为有效. 杨敏等^[12]提出按沉降控制设计桩基础的方法, 是桩土相互作用的进一步发展. 董建国等^[13]则对桩土共同作用机理的计算方法进行了较系统的研究. 有限单元法是目前应用较普遍的一种数值方法, 但是由于在计算时, 所取用的参数多、计算量大、较复杂等原因, 目前, 用于研究目的分析的居多. 此外还有边界单元法、混合法等不再赘述.

综上所述, 桩土相互作用的研究主要集中在轴向荷载作用下的分析, 考虑水平动荷载与轴向荷载共同作用的研究基本空白. 静压桩施工过程中

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008); 广东省自然科学基金资助项目 (980274)

收稿日期: 2000-11-06; 作者简介: 周翠英 (1963-), 女, 教授, 博士生导师.

正好体现了这一特点,因而成为本文的研究焦点.

2 动静荷载共同作用下桩土相互作用机理

目前,在层状土中轴向荷载作用下桩土相互作用的机理比较成熟^[11].本文在此基础上,考虑到水平动荷载的作用,进行水平动荷载与轴向静荷载综合作用桩土相互作用机理的定量分析.

2.1 理论基础

采用剪切位移法^[9,14].该法主要是针对土的位移场进行分析,以桩端水平面为界,将土体的位移分为上下两部分.利用位移的协调条件对桩土相互作用的机理进行定量分析.

2.1.1 基本假设

(1) 桩在轴向荷载作用下发生变形,上、下两部分土体的位移场互不耦合,桩端水平面以上的土体的位移仅由桩侧摩阻力引起,下半部分的土体位移仅桩端应力引起;

(2) 在工作荷载作用下,桩-土界面不发生滑移;

(3) 由压桩机在地表产生的水平力 F 沿深度 z 对桩的水平推力逐渐减小,并且 F 与 z 存在一函数关系;

(4) 压桩机垂直投影下的土体为均质弹性体.

2.1.2 水平力 F 的处理 F 是由压桩机在完成一次压桩后,向下一个桩位运行过程中由于桩机自身的重量和运行速度而产生的桩机对已压入土体中桩的作用力.可由压桩机的运行速度 V ,依公式 $f = ma$, $V = at$ 求得单位水平推力 f .

水平力是作用于压桩机垂直投影下的土体的,考虑到现场桩机的运行特点,这部分土体只有一半对桩有水平推力的作用,根据基本假设4,这部分土体为均质弹性体,则

$$F = \frac{1}{2} f \frac{D}{d_{\text{桩机}}} \quad (1)$$

其中, D 是桩的直径, $d_{\text{桩机}}$ 是压桩机的宽度.

根据基本假设(3),模拟地基附加应力分布的曲线,假设水平推力 F 沿深度 z 作用于桩的水平应力 Q_z 分布如图1,并由曲线得出一函数关系:

$$Q_z = \frac{1}{3} \left(1.5 + \frac{6}{z} \right) F = \frac{f}{6} \left(1.5 + \frac{6}{z} \right) \frac{D}{d_{\text{桩机}}}$$

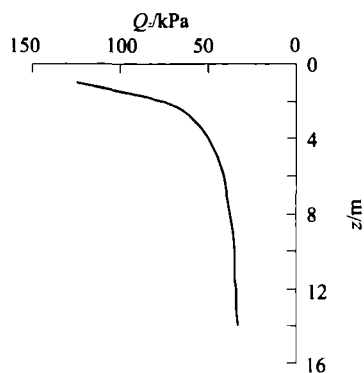


图1 $Q_z - z$ 曲线图

Fig.1 $Q_z - z$ curve

普遍地,该式可改写为:

$$Q_z = \frac{1}{3} \left(1.5 + \frac{6}{z} \right) F = \frac{fD}{6d_{\text{桩机}}} h_z' \quad (2)$$

2.2 数学模型的建立

根据 Randolph 和 Wroth 等人的研究,上半部分土体的垂直位移可表达为^[5]:

$$\omega(r) = \frac{\tau_0 r_0}{G} \ln \left(\frac{r_m}{r} \right), \quad r_0 \leq r \leq r_m \quad (3)$$

$$\omega(r) = 0, \quad r > r_m$$

其中, τ_0 为桩周剪应力, r_0 为桩的半径, G 为土的剪切模量, r 为到桩中的距离, r_m 为桩-土相互作用的影响半径, r_m 可由下式求得:

$$r_m = 2.5 \rho l (1 - \nu)$$

式中, $\rho = G'/G_l$, (l 为桩长, G 为上半部分土剪切模量的加权平均值, G_l 为桩端处土的剪切模量, ν 为上半部分土泊松比的加权平均值).

实际上,土的垂直位移不仅与 r 有关,而且与离地表的垂直距离 z 有关.剪应力 τ_0 是 z 的函数,土的剪切模量 G 也是 z 的函数,因此式(3)中的 $\tau_0 r_0 / G$ 为 z 的函数,设 $h(z) = \tau_0 r_0 / G$, 则土的垂直位移可表达为:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\omega}(r, z) &= h(z) \ln \left(\frac{r_m}{r} \right), & r_0 \leq r \leq r_m \\ \bar{\omega}(r, z) &= 0, & r_0 > r_m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于下半部分土,土的垂直位移 W_b 可以被看成是由于桩端的刚性冲切引起,桩端处土的位移可由 Boussinesq 解求得:

$$W_b = \frac{P_b(1 - \nu_b)}{4r_0 G_b} \quad (5)$$

对(4)式求导数,可得轴向荷载作用下上半部分土的剪切变形 γ_{xz} ($r_0 \leq r \leq r_m$)

$$\gamma_{xr} = \frac{\partial \bar{\omega}(r, z)}{\partial r} = -\frac{1}{r}h(z) \quad (6)$$

令 $r = r_0$, 并根据弹性理论: $\tau_{xr} = G(z)\gamma_{xr}$, 求得轴向荷载作用下桩侧处土的剪应力为:

$$\tau_{x_0} = -\frac{G(z)}{r_0}h(z) \quad (7)$$

考虑到由 F 而产生的沿桩埋深方向水平应力 Q_z 的作用, 则桩侧处土的剪应力为

$$\tau_{x_0} = -\frac{G(z)}{r_0}h(z) + Q_z \quad (8)$$

根据假设 2, 桩土界面不会发生滑移, 利用位移协调条件, 桩身的压缩变形 $S(z)$ 可表达为:

$$S(z) = \bar{\omega}(r_0, z) = h(z)\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (9)$$

在桩的任意深度 z 处取一微分桩段, 由平衡条件可得桩身轴向力 $Q(z)$ 和桩侧摩阻力 $f(z)$ 与桩身压缩变形之间的关系:

$$Q(z) = -A_p E_p \frac{dS(z)}{dz} \quad (10)$$

$$f(z) = \frac{A_p E_p}{2\pi r_0} \frac{d^2 S(z)}{dz^2} \quad (11)$$

式中, A_p 、 E_p 分别为桩的有效截面积和弹性模量。将 (9) 代入 (11) 式得

$$f(z) = \frac{A_p E_p}{2\pi r_0} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \frac{d^2 h(z)}{dz^2} \quad (12)$$

根据平衡条件, 桩侧处土的剪应力与桩侧摩阻力相等, 即

$$f(z) = -\tau_{xr} \quad (13)$$

将式 (8)、(11) 代入 (13), 并将式 (2) 代入, 经整理后得到在轴向荷载和静压桩机行走时产生的水平震动荷载作用下桩土相互作用的微分方程为

$$\frac{A_p E_p}{2\pi r_0} \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \frac{d^2 h(z)}{dz^2} - G(z)h(z) - \left(\frac{fD}{6d_{\text{桩机}}} h'(z)\right) = 0 \quad (15)$$

方程可由差分法求解。与轴向荷载作用下方程的求解一样。在求解时, 还要补充 2 个边界条件、1 个位移协调方程, 即: $Q(0) = P_b$ 、 $Q(l) = P$ 、 $S(l) = W_b$ 。将求得的 $h(z)$ 及 $h'(z)$ 代入有关各式, 可得桩侧摩阻力、轴向力、桩的位移及桩周土位移。

3 动静荷载共同作用下桩土相互作用模型的工程应用

3.1 工程场地概况与概化模型

工程场地位于广州市挹翠路 33 号, 拟建一幢 6 层的矩形住宅楼, 框架结构。长 22.8 m, 宽 11.3 m。预制桩单桩设计承载力为 600 kN, 桩距为 1.1 m。拟建场地的地貌单元为河流漫滩, 原始地形低平。地势平坦, 相对高差为 0.21 m。场地内无深大断裂穿过。地震基本烈度为 7°。其岩土分层及其物理力学性质 (见图 2), 桩压入土体中的工作状态及其裂缝易发位置也已在图 2 中标出。其中强风化泥岩承载力较高, 埋深较浅, 比较稳定, 是桩基持力层。根据这一地质模型和桩体压入土体过程中的工作状态, 得到其力学分析模型 (图 3)。

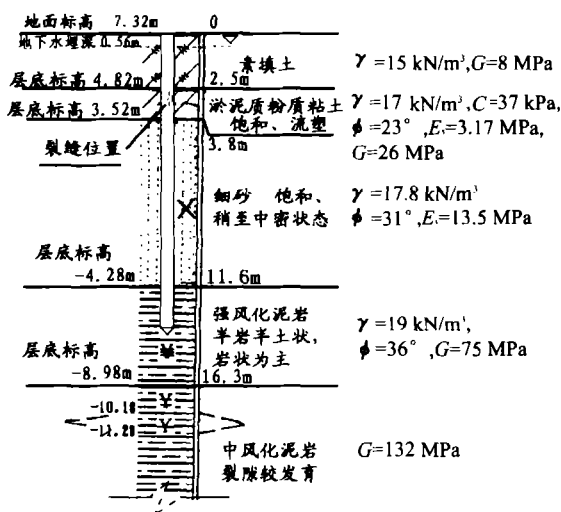


图2 桩土相互作用的地质剖面

Fig.2 Geological section for the interaction between pile and soil layers

3.2 动静荷载共同作用下桩土相互作用模型的工程应用

根据桩机运行的速度以及桩身的重量, 得到桩基运行加速度, 计算得到桩基运行时水平振动荷载, 依照式 (15) 对广州市越秀区某工程场地桩体受力进行计算。图 4 是计算得到的轴向力和桩侧摩阻力的分布图。

由计算结果可看出, 虽然地表的桩身轴力最大, 桩周摩阻力也比较大, 但由于桩顶有足够的空间来产生弹性变形以抵抗外力的作用, 因此桩顶不易产生裂缝。而地表以下 1~3 m 内的桩身

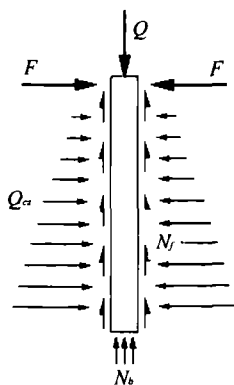


图3 桩土相互作用的力学模型

Fig.3 Mechanical model of the interaction between pile and soil layers

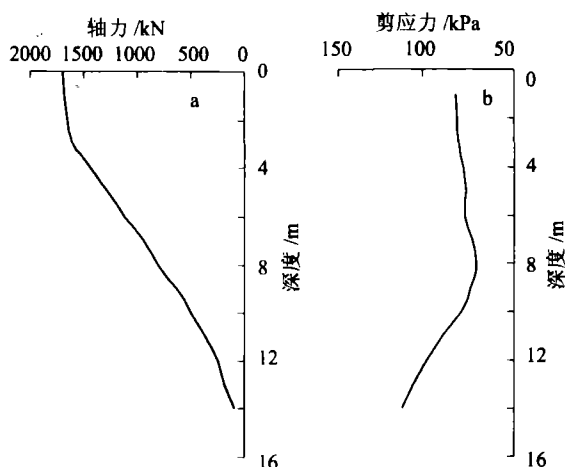


图4 轴向力(a)和桩侧剪应力(b)

Fig.4 Axial stress(a) and steering stress(b) along the pile

轴力迭加桩周摩阻力后的作用力值都是相当大的，所以这段桩身容易出现断或裂的问题。这与工种实践中所出现的断桩、裂桩位置较为符合。

4 结论

(1) 通过现场观测、试验和数学分析，在前人研究的基础上，探讨了动静荷载共同作用下桩土相互作用的机理，建立了桩土相互作用的数学模型。该模型可求解成层土中动静荷载共同作用下桩侧摩阻力、轴向力、桩位移及土的位移，分析桩的工作性状。

(2) 对所建立的数学模型在广州越秀区某桩基工程中进行了初步应用，结果表明：计算得出的桩体应力集中最大部位与通常断桩、裂桩产生的位置比较接近。所建立的模型可以较好的解释静压桩工程实践中的断桩裂桩现象，表明其具有一定的工程实用性。

(3) 动静荷载共同作用下桩土相互作用的数学模型是在剪切位移法的基础上推导出来的，该法假设桩产生竖向位移时，桩侧摩阻力通过环形单元向四周传递，桩侧周围土体的变形可视为同心的圆柱体。因此，这个数学模型计算得出结果的精确性便由其中的四个基本假设和选择参数的合理性来决定。事实上，桩端水平面以上的土体的位移不仅是只与桩侧摩阻力有关的；桩在重荷载作用下，桩土界面会有一定的滑移量，因此当有滑移时，用该法计算的结果的误差较大。

参考文献:

- [1] 徐和,徐敏若,郑春生.单桩横向承载力试验研究[J].岩土工程学报,1982,8:27-41.
- [2] 刘利民.桩基承载性状研究的新进展[J].中国岩土,2000:19-21.
- [3] 邓杰明,曾繁军.锤击沉管灌注桩在同德围石灰岩地区的施工问题浅析,岩土力学数值分析与解析方法[A].陆陪炎,史永胜.第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C].广州:广东科技出版社,1998.178-184.
- [4] COYLE H M, REESE L C. Load transfer for axially load piles in clay[J]. J Soil Mech Found Div Proc ASCE, 1992(2):1-12.
- [5] 陈如桂.桩土弹塑性体系的理论与应用研究[D].长沙:中南工业大学,1997.
- [6] POULUS H G. An approximate numerical analysis of pile-raft foundation[J]. J Num Anal Mechs In Geomechs, 1994,18:73-92.
- [7] TA L D, SMALL J C. Analysis of pole raft systems in layered soils[J]. Int Jnl Num Anal Mechs In Geomechs, 1996,20.
- [8] 费勤发,马海龙.分层总和法在桩非线性分析中的应用——变形总和法[J].上海力学,1997.
- [9] COOKE R W. The settlement of friction pile foundations[J]. Proc Conf on Tall Buildings Kuala Lumpur, 1974.
- [10] 杨嵘昌,辛金珉.广义剪切值移分析桩—土—承台非线性共同作用原理[J].岩石工程学报,1996,16(6).
- [11] 徐明定,徐锐.层状土中轴向受荷桩—土相互作用分析,岩土力学数值分析与解析方法, [A].陆陪炎,史永胜.第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集[C].广州:广东科技出版社,1998.296-301.
- [12] 杨敏,艾智勇.桩土相互作用理论研究与按沉降控制设计桩基础的工程实践,岩土力学数值分析与解析方法[A].陆陪炎,史永胜.第六届全国岩土力学

- 数值分析与解析方法讨论论文集[C]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 43 - 57.
- [13] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑地基基础—共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. 279 - 286.
- [14] RANDOLPH M, WROTH C P. An analysis of the vertical deformation of pile groups[J]. *Geotechnique*, 1979, 29 (4): 423 - 439.

Research on the Mechanism of Interaction between Piles and Soil Layers Under the Dynamic and Static Loads

ZHOU Cui-ying¹, TAN Xiang-shao¹, LI De-fu¹, LI Zhi-zhong², WANG Jin²

(1. Department of Geosciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

2. Yongji Construction and Foundation Co. Ltd., Shunde 528300, Guangdong, China)

Abstract: The fracture mechanism of engineering piles is one of the important issues in foundation engineering. Many quantitative studies have been carried out on the interaction of piles and soil layers. In the paper, based on the research of mathematical model of the interaction between piles and soil layers under axial loads, considerations are focused on the horizontal vibration force representing pile-pushing machine while it moves. Then, the mathematical model of interaction between piles and soil layers under the synthetic action of horizontal vibration load from pile - pushing machine and axial loads is established. The application of the model to a certain construction case in Guangzhou city shows that the position of stress concentration in prefabricates pile body is closed to the fractured location of the piles.

Keywords: prefabricate pile; dynamic and static loads synthetic action; interaction between piles and soil layers

(上接第 96 页)

Study on Heavy Metal Concentrations and the Impact of Human Activity on Them in Urban and Suburb Soils of Guangzhou

GUAN Dong-sheng, CHEN Yu-juan, YUAN Guo-biao

(Department of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Heavy metal concentrations in urban and suburb soils of Guangzhou were studied in this paper. The results show that averages of total Cu, Ni, Zn, Pb, Cr concentrations in surface soils were 10.3, 23.1, 112.8, 58.3 and 42.0 mg/kg. It is found that road side soil has the maximum average concentrations of heavy metals except for Ni, followed by agricultural soil and urban park soil. The minimum ones were found in forest soil. Automobile tail gas and repeated applications of agrochemicals were the major sources of Pb pollution in the soils. The industrial activities were also an important impact that could not be neglected.

Keywords: soils; heavy metal; human activity; Guangzhou