

文章编号: 1000-4750(2013)07-0075-09

层状地基中基于虚土桩模型的单桩沉降计算方法

王奎华¹, 吕述晖¹, 吴文兵^{1,2}, 罗永健¹

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 基于虚土桩模型及荷载传递法, 针对理想弹塑性荷载传递函数, 推导了均质地基中以桩侧土塑性发展深度为变量的桩顶荷载-沉降曲线计算方法, 且进一步利用递推方法将其推广到层状地基中并给出了桩身轴力及桩侧摩阻力的计算方法。在此基础上, 给出了荷载传递模型参数的选取方法并分析了虚土桩计算长度的影响因素及取值方法。然后, 利用该算法分析了桩及虚土桩压缩模量对荷载-沉降曲线的影响。最后, 结合工程实测数据, 对比了计算荷载-沉降曲线、实测曲线和由规范方法得到的荷载-沉降曲线, 结果表明: 在一定的荷载范围内, 采用基于虚土桩模型的单桩沉降计算方法计算得到的桩顶沉降值与实测值较为吻合, 实际工程应用优于规范法。

关键词: 单桩沉降; 层状地基; 虚土桩模型; 荷载-沉降曲线; 荷载传递法

中图分类号: TU473 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0171

A NEW CALCULATION METHOD FOR THE SETTLEMENT OF SINGLE PILE BASED ON VIRTUAL SOIL-PILE MODEL IN LAYERED SOILS

WANG Kui-hua¹, LÜ Shu-hui¹, WU Wen-bing^{1,2}, LUO Yong-jian¹

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on a virtual soil-pile model and by virtue of an elastic-perfectly plastic model, the settlement analysis of a single pile embedded in layered soil is conducted by using a load transfer method. Firstly, the interaction between pile side soil and a pile is modeled as an ideal elastoplastic transfer model, and assuming the developmental plastic depth to be an independent variable, a new calculation method for the settlement of a single pile in homogeneous soil is derived and extended to the single pile settlement analysis in layered soil by a recursive method. On this basis, the analysis of the parameter selection of a load transfer model and the factors as well as the selection method of virtual soil-pile length are conducted. Then, by means of the presented method, the influence of pile-soil system parameters on load-displacement curves is studied. Finally, comparing the calculation results of this method with that of the measured and normative method, it is shown that: within a certain range of load, the pile top settlement calculated by this presented method is approximate to the measured value, and also superior to the normative method.

Key words: single pile settlement; layered soils; virtual soil-pile model; load-displacement curve; load transfer method

桩的承载力及沉降特性是桩基工程设计中最重要的内容, 为了较准确预测桩基的沉降, 国内外学者提出了一系列计算单桩沉降的方法, 如: 荷载

传递法^[1-7]、剪切位移法^[8-11]、弹性理论法^[12]、数值分析法^[13]及规范法^[14]等。其中, 规范法是我国桩基工程设计中最常用的计算方法, 规范法将桩顶沉

收稿日期: 2012-03-14; 修改日期: 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50879077); 中国博士后科学基金项目(2012M521495); 中央高校青年教师科研启动基金项目(CUG120821)

通讯作者: 吕述晖(1988-), 男, 江西吉安人, 博士生, 从事桩基动力学理论、桩基工程研究(E-mail: zdlshh@163.com).

作者简介: 王奎华(1965-), 男, 江苏滨海人, 教授, 博士, 博导, 从事桩基动力学理论、工程测试技术研究(E-mail: zdwkh0618@zju.edu.cn);

吴文兵(1988-), 男, 江西鄱阳人, 讲师, 博士后, 从事桩基动力学理论研究(E-mail: zjuwwb1126@163.com);

罗永健(1987-), 男, 广东清远人, 硕士生, 从事桩基动力学理论、桩基工程研究(E-mail: yongjian0812@126.com).

降分为桩身压缩和按分层总和法计算得到的桩端土沉降两部分, 桩端土中附加应力由桩侧摩阻力和桩端反力根据一定比例按弹性半空间 Mindlin 解计算得出, 因此不能真实反映出桩的荷载传递机理及沉降特性, 其结果与实测值的差异存在不确定性。Seed 和 Reese^[1]根据试验结果提出荷载传递法, 之后许多学者在此基础上进行了改进和完善。荷载传递法是基于桩身荷载传递机理提出来的, 通过选取不同的荷载传递模型及参数, 荷载传递法能够适应不同土性条件下单桩的沉降分析。陈龙珠、朱金颖等^[2,3]基于荷载传递法提出桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法, 并应用到均质地基和层状地基两种工况。该方法将桩侧土、桩端土对桩的作用简化为弹簧, 分别采用不同的双折线模型以表示其作用机理, 然后以桩端反力(位移)为变量得到桩顶荷载-沉降曲线。通过对实测数据的拟合分析, 拟合结果与实测数据较为一致。邱钰等^[4]结合 35 根深长大直径嵌岩桩实测资料, 利用荷载传递法通过非线性优化导出了桩侧及桩端荷载传递函数参数值。赵明华等^[5]利用由荷载传递法及 Boussinesq 解求得的桩侧土、桩端土等效刚度系数, 推导了基于荷载传递法的群桩沉降计算方法。王旭东等^[7]推导了轴向荷载作用下考虑桩侧极限摩阻力和剪切刚度系数随深度线性变化的单桩荷载-沉降弹塑性解。

以上通过荷载传递法计算单桩(群桩)沉降量的研究中均将桩端土对桩的作用简化为弹簧, 弹簧参数根据实测桩端反力-位移曲线或桩端持力层土性参数确定, 这种方法存在以下不足: 1) 根据实测桩端反力-位移曲线获得的弹簧参数无法与桩端成层土的物理力学参数建立关系, 对于桩端土性不同的桩, 需通过对每根桩进行现场试验获得弹簧参数, 因此很难推广应用。2) 根据桩端持力层土性确定弹簧参数不能反映持力层内土性变化(如桩端沉渣)或持力层以下土性变化(如软弱下卧层)对单桩沉降的影响, 其应用受到限制。为此, 笔者研究团队提出了虚土桩模型, 并将其应用于单桩动静力问题研究: 彭吉五^[15]对虚土桩法用于分析饱和均质土层中及均质滞回材料阻尼土层中的单桩沉降问题进行了初步探索。陈嘉熹^[16]进一步将虚土桩法应用于桩侧土体采用三折线荷载传递模型的单桩沉降分析。以上研究成果表明, 采用虚土桩模型分析单桩动静力问题能较好地反映桩端土性对单桩动静力特性的影响。

为了进一步研究桩端土对单桩沉降的影响, 本文基于虚土桩模型, 针对桩侧土为理想弹塑性荷载

传递函数, 提出桩顶荷载-沉降曲线($P-S$ 曲线)的一种计算方法。本文方法能够一定程度上反映桩侧土及桩端土性对桩沉降特性的影响, 且模型参数直接与土层物理力学参数相关。利用本方法不仅能够计算得到单桩荷载-沉降曲线, 还可以得到各级荷载下桩身轴力、桩身位移、桩侧摩阻力以及桩端以下土层的应力及位移。通过对实测数据的计算分析, 验证了基于虚土桩模型单桩沉降计算方法的有效性和实用性。

1 均质地基中的桩

根据桩身荷载传递机理, 桩身截面轴力及位移随深度增加而减小, 且随着荷载的增加逐渐向桩端发展, 因此, 不同深度桩侧土所处的状态将随着荷载增加而变化。下面根据桩及虚土桩桩侧土所处状态的变化分三个阶段分别给出桩顶荷载和沉降的计算公式。

1.1 桩-土体系的力学模型及假设

所用桩(虚土桩)和桩侧土(包括桩及虚土桩桩侧土)的力学模型如图 1 所示。其中, 假设桩及虚土桩为均质等截面杆件, 桩侧土对桩及虚土桩的作用采用理想弹塑性模型近似表示。各符号表示的意义如下: u_b 为桩侧土的弹性极限位移; λ 为单位长度桩侧土的弹性抗剪切刚度系数/(kN/m); l_1 、 l_2 分别为桩长度和虚土桩长度; P 为桩顶荷载; $l = l_1 + l_2$ 。

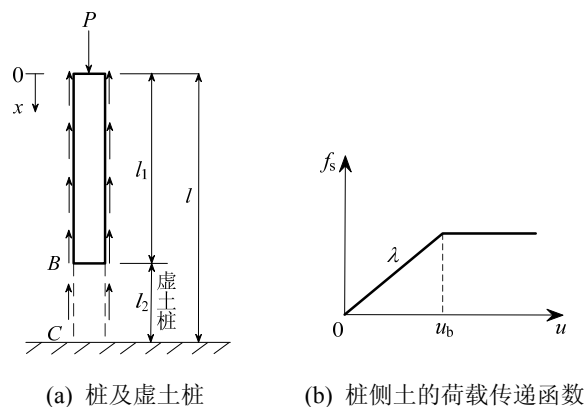


图 1 桩-土体系的力学模型

Fig.1 Mechanical model of pile-soil system

桩侧土荷载传递函数(理想弹塑性模型):

$$\begin{cases} f_s = \lambda u, & u \leq u_b \\ f_s = \lambda u_b, & u > u_b \end{cases} \quad (1)$$

式中, f_s 为单位长度桩侧摩阻力。

除对桩侧土传递函数所作的假设外, 为简化分析, 还需做如下假设: ① 桩和虚土桩呈线性压缩状态; ② 地基同一土层的物理力学参数沿深度方

向一致, 桩侧土由上至下逐渐进入塑性阶段; ③ 桩与桩侧土之间没有相对滑移, 位移连续; ④ 不考虑桩侧摩阻力对桩端沉降的影响; ⑤ 相同土性, 虚土桩对应的桩侧土荷载传递模型参数与桩对应的桩侧土荷载传递模型参数相同。

1.2 桩及虚土桩桩侧土全部处于弹性阶段

用 P 、 S 表示桩顶荷载和沉降, P_B 、 S_B 表示桩端反力和位移(即虚土桩顶的荷载和位移)。当桩顶荷载较小时, 桩侧土全部处于弹性阶段, 桩任意截面的位移 $u(x)$ 应满足如下方程:

$$\begin{cases} E_p A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u = 0 \\ E_p A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_1} = -P_B \\ u \Big|_{x=l_1} = S_B \end{cases} \quad (2)$$

虚土桩任意截面的位移 $u(x)$ 应满足如下方程:

$$\begin{cases} E_s A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u = 0 \\ E_s A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_1} = -P_B \\ u \Big|_{x=l_1} = S_B \\ u \Big|_{x=l_1+l_2} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_p 、 E_s 、 A 分别为桩的弹性模量、虚土桩的线性压缩模量和横截面积。令 $b_1 = \sqrt{\lambda / (E_p A)}$, $b_2 = \sqrt{\lambda / (E_s A)}$, 解式(2)、式(3)得:

$$\begin{cases} u(x) = \frac{b_1 S_B - \frac{P_B}{E_p A}}{2b_1 e^{b_1 l_1}} e^{b_1 x} + \frac{b_1 S_B + \frac{P_B}{E_p A}}{2b_1 e^{-b_1 l_1}} e^{-b_1 x}, & 0 \leq x < l_1 \\ u(x) = \frac{b_2 S_B - \frac{P_B}{E_s A}}{2b_2 e^{b_2 l_1}} e^{b_2 x} + \frac{b_2 S_B + \frac{P_B}{E_s A}}{2b_2 e^{-b_2 l_1}} e^{-b_2 x}, & l_1 \leq x < l \end{cases} \quad (4)$$

令 $\xi_1 = (e^{2b_2 l_2} + 1) / (e^{2b_2 l_2} - 1)$, $K_B = b_2 E_s A \xi_1$, 则:

$$P_B = K_B S_B \quad (5)$$

进一步可得到桩顶荷载及沉降:

$$\begin{cases} P = -E_p A \frac{du}{dx} \Big|_{x=0} = -E_p A \left(\frac{b_1 S_B - \frac{P_B}{E_p A}}{2e^{b_1 l_1}} - \frac{b_1 S_B + \frac{P_B}{E_p A}}{2e^{-b_1 l_1}} \right) \\ S = u \Big|_{x=0} = \frac{b_1 S_B - \frac{P_B}{E_p A}}{2b_1 e^{b_1 l_1}} + \frac{b_1 S_B + \frac{P_B}{E_p A}}{2b_1 e^{-b_1 l_1}} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得桩顶荷载与沉降比, 即桩的刚度为:

$$K = \frac{P}{S} = b_1 E_p A \frac{K_B + b_1 E_p A \tanh(b_1 l_1)}{b_1 E_p A + K_B \tanh(b_1 l_1)} \quad (7)$$

由此可知, 对于给定的桩-土体系, 当桩侧土全部处于弹性阶段时, P - S 曲线是斜率为 K 的直线段。

1.3 桩及虚土桩桩侧土部分进入塑性阶段

当桩顶沉降大于 u_b 时, 随着桩顶荷载的增加, 桩侧土由浅至深逐渐进入塑性阶段。如图 2 所示的力学模型, OD 段桩侧土处于塑性阶段, DC 段桩侧土处于弹性阶段, 分别列出两类桩段的微分方程, 再根据交界面上力-位移连续条件, 则可求解得到桩顶的荷载和位移。

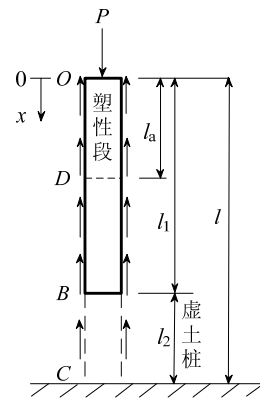


图 2 桩侧土部分进入塑性阶段

Fig.2 Model of pile-soil system with partial surrounding soil entering plastic stage

1) 虚土桩桩侧土未进入塑性阶段($0 \leq l_a < l_1$)

将图 2 中截面 D 以下桩段对桩顶荷载和位移的影响用截面轴力 P_D 和位移 S_D 来反映, 显然 $S_D = u_b$ 。 DC 段桩侧土处于弹性阶段, 因此以 $(l_1 - l_a)$ 代替式(7)中的 l_1 即可得到与 l_a 对应的 D 截面以下桩段的刚度 K_D 。 OD 段的微分方程和边界条件为:

$$\begin{cases} E_p A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u_b = 0 \\ E_p A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_a} = -P_D \\ u \Big|_{x=l_a} = S_D \end{cases} \quad (8)$$

解式(8)得:

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_p A} x^2 - \frac{P_D + \lambda u_b l_a}{E_p A} x + S_D + \frac{P_D l_a}{E_p A} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_p A} l_a^2, \quad 0 \leq x \leq l_a \end{aligned} \quad (9)$$

则桩顶荷载及沉降为:

$$\begin{cases} P = -E_p A \frac{du}{dx} \Big|_{x=0} = P_D + \lambda u_b l_a \\ S = u \Big|_{x=0} = S_D + \frac{P_D l_a}{E_p A} + \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_p A} l_a^2 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $P_D = K_D S_D$,

$$K_D = b_1 E_p A \frac{b_2 E_s A \xi_1 + b_1 E_p A \tanh[b_1(l_1 - l_a)]}{b_1 E_p A + b_2 E_s A \xi_1 \tanh[b_1(l_1 - l_a)]} \quad (11)$$

2) 虚土桩侧土部分进入塑性阶段($l_1 \leq l_a < l$)

图 2 中, 当桩端位移 $S_B \geq u_b$ 时, 截面 D 将位于桩端以下, 分别列出 OB 、 BD 、 DC 三个桩段的微分方程及边界条件并求解。

OB 段:

$$\begin{cases} E_p A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u_b = 0 \\ E_p A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_1} = -P_B \\ u \Big|_{x=l_1} = S_B \end{cases} \quad (12)$$

BD 段:

$$\begin{cases} E_s A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u_b = 0 \\ E_s A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_a} = -P_D \\ u \Big|_{x=l_a} = S_D \end{cases} \quad (13)$$

DC 段:

$$\begin{cases} E_s A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda u = 0 \\ E_s A \frac{du}{dx} \Big|_{x=l_a} = -P_D \\ u \Big|_{x=l_a} = S_D, u \Big|_{x=l} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

解式(12)~式(14)得:

$$P_D = b_2 E_s A \xi_2 S_D \quad (15)$$

其中, $\xi_2 = (e^{2b_2(l-l_a)} + 1) / (e^{2b_2(l-l_a)} - 1)$,

$$\begin{cases} P_B = P_D + \lambda u_b l_a - \lambda u_b l_1 \\ S_B = S_D + \frac{P_D l_a}{E_s A} + \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_s A} l_a^2 + \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_s A} l_1^2 - \frac{P_D + \lambda u_b l_a}{E_s A} l_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P = P_B + \lambda u_b l_1 \\ S = S_B + \frac{P_B l_1}{E_p A} + \frac{1}{2} \frac{\lambda u_b}{E_p A} l_1^2 \end{cases} \quad (17)$$

联立式(15)~式(17)可得用 l_a 表示的桩顶荷载 P 和沉降 S 。

2 成层地基中的桩

2.1 成层地基中桩的荷载-沉降曲线

计算模型如图 3 所示, 对桩侧土处于弹性阶段的连续桩(虚土桩)段, 可列出其中第 i 个桩段的微分方程及边界条件:

$$\begin{cases} E_i A \frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda_i u = 0 \\ E_i A \frac{du}{dx} \Big|_{x=z_i} = -P_{i+1} \\ u \Big|_{x=z_i} = S_{i+1} \end{cases} \quad (18)$$

解式(18)得:

$$u(x) = \frac{b_i S_{i+1} - \frac{P_{i+1}}{E_i A}}{2b_i e^{b_i z_i}} e^{b_i x} + \frac{b_i S_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{E_i A}}{2b_i e^{-b_i z_i}} e^{-b_i x}, \quad z_{i-1} \leq x \leq z_i \quad (19)$$

则第 i 桩段顶的轴力 P_i 及位移 S_i 可分别表示为:

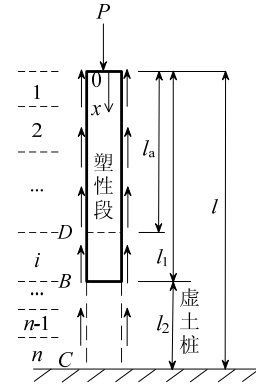


图 3 成层地基中的计算模型

Fig.3 Model of pile-soil system in layered soils

$$\begin{cases} P_i = \frac{1}{2} E_i A b_i \left(\left(S_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{E_i A b_i} \right) e^{b_i l_i} - \left(S_{i+1} - \frac{P_{i+1}}{E_i A b_i} \right) e^{-b_i l_i} \right) \\ S_i = \frac{1}{2} \left(\left(S_{i+1} - \frac{P_{i+1}}{E_i A b_i} \right) e^{-b_i l_i} + \left(S_{i+1} + \frac{P_{i+1}}{E_i A b_i} \right) e^{b_i l_i} \right) \end{cases} \quad (20)$$

进一步可得桩段顶的轴力及位移比, 即 z_{i-1} 深度以下桩体的刚度为:

$$K_i = \frac{P_i}{S_i} = b_i E_i A \frac{K_{i+1} + b_i E_i A \tanh(b_i l_i)}{b_i E_i A + K_{i+1} \tanh(b_i l_i)} \quad (21)$$

其中, $K_{i+1} = P_{i+1} / S_{i+1}$, 当 $i = n$ 时, $b_n = \sqrt{\lambda_n / (E_n A)}$, $K_n = b_n E_n A (e^{2b_n l_n} + 1) / (e^{2b_n l_n} - 1)$ 。

对桩侧土处于塑性阶段的连续桩(虚土桩)段, 亦可得桩段顶的轴力和位移如下:

$$\begin{cases} P_i = P_{i+1} + \lambda_i u_{bi} l_i \\ S_i = S_{i+1} + \frac{P_{i+1} l_i}{E_i A} + \frac{1}{2} \frac{\lambda_i u_{bi}}{E_i A} l_i^2 \end{cases} \quad (22)$$

式(18)~式(22)中: P_{i+1} 、 S_{i+1} 为第 $i+1$ 桩段顶的轴力及位移; λ_i 、 u_{bi} 、 E_i 、 l_i 分别表示第 i 桩(虚土桩)段桩侧土的单位长度弹性抗剪切刚度系数、弹性极限位移、桩身线性压缩模量及桩段长度; z_{i-1} 、 z_i 分别表示第 i 桩段顶、底的深度; $b_i = \sqrt{\lambda_i / (E_i A)}$ 。

因此,对于给定的桩-土体系,当桩侧土全部处于弹性阶段时,桩的刚度为一常数,即 $P-S$ 曲线为直线段。当桩侧土部分处于塑性阶段时,根据假设,可把桩(包括虚土桩)按桩侧土所处的状态划分成两部分,先按式(21)计算得到桩侧土处于弹性阶段连续桩段的刚度,再按式(22)计算可得到以塑性段深度 l_a 表示的桩顶荷载 P 和沉降 S 。

2.2 成层地基中桩身轴力及桩侧摩阻力

根据以上分析,当桩侧土全部处于弹性阶段时, $P-S$ 曲线是仅依赖于桩-土体系物理学参数的直线段,当桩侧土部分处于塑性阶段时, $P-S$ 曲线是以桩侧土塑性段深度 l_a 为参变量的函数,所以进一步可得到桩的截面轴力及桩侧摩阻力。仍将桩及虚土桩划分为桩侧土处于塑性阶段的连续桩段和桩侧土处于弹性阶段的连续桩段两部分(桩侧土全部处于弹性阶段的情况即桩侧土处于塑性阶段的深度 $l_a = 0$),则某一桩顶荷载下第 $i+1$ 桩段顶截面轴力和位移递推式如下:

桩侧土处于弹性阶段的桩段:

$$\begin{cases} P_{i+1} = \frac{b_i E_i A}{2} \left(\left(S_i + \frac{P_i}{E_i A b_i} \right) e^{-b_i l_i} - \left(S_i - \frac{P_i}{E_i A b_i} \right) e^{b_i l_i} \right) \\ S_{i+1} = \frac{1}{2} \left(\left(S_i + \frac{P_i}{E_i A b_i} \right) e^{-b_i l_i} + \left(S_i - \frac{P_i}{E_i A b_i} \right) e^{b_i l_i} \right) \end{cases} \quad (23)$$

桩侧土处于塑性阶段的桩段:

$$\begin{cases} P_{i+1} = P_i - \lambda_i u_{bi} l_i \\ S_{i+1} = S_i - \frac{P_i l_i}{E_i A} + \frac{1}{2} \frac{\lambda_i u_{bi}}{E_i A} l_i^2 \end{cases} \quad (24)$$

桩顶以下 z_i 深度处桩侧摩阻力 $f_{si} = \lambda_i S_{i+1}$ 。对应某一桩侧土塑性区发展深度 l_a ,将桩顶荷载及沉降值代入递推式(23)、式(24)即可得到该荷载下的桩身轴力及桩侧摩阻力值,计算不同深度的 P_{i+1} 、 f_{si} 即可得到某一桩顶荷载所对应的桩身轴力及桩侧

摩阻力沿深度方向的分布曲线。

3 参数选取及 $P-S$ 曲线计算分析

3.1 桩-土体系的物理力学参数选取

1) 桩侧土荷载传递函数。

荷载传递法是由 Seed 和 Reese^[1]根据试验结果提出的。此后,Coyle 和 Reese^[17]、Vijayvergiya^[18]等先后在此基础上提出了不同形式的荷载传递函数。Kraft 等^[19]建立了理论荷载传递函数(理论 $t-z$ 曲线),该理论使荷载传递法得到了进一步的发展。王旭东等^[20]引入形状参数 M_f 以改善理论 $t-z$ 曲线的局限性。刘齐建等^[21]基于扰动状态概念,提出桩基荷载传递函数扰动状态模型,得到了基于岩土 DSC 桩土荷载传递函数。王传文等^[22]总结已有的荷载传递函数提出了广义荷载传递函数:

$$\tau(z) = \tau_{\max} \left[(n+1) \left(\frac{S}{S_u} \right)^{\frac{n}{n+1}} - n \frac{S}{S_u} \right], n \geq 0 \quad (25)$$

式中: τ_{\max} 为桩侧最大摩阻力; n 为拟合参数,可根据实测数据拟合得到; S_u 为相应于 τ_{\max} 发挥时的桩临界位移。图 4 给出了 n 取不同值时对应的广义荷载传递函数归一化曲线。

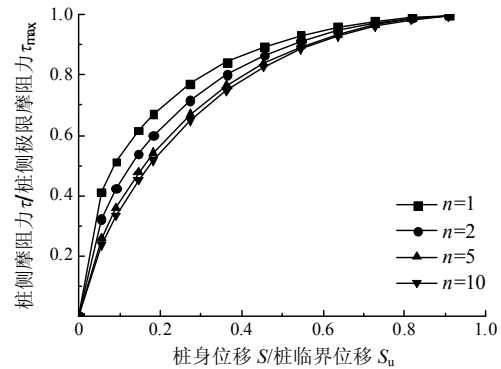


图 4 广义荷载传递函数归一化曲线

Fig.4 Normalized curves of generalized load transfer function 但对于上述较为复杂的模型,很难得到其解析解,且工程应用不便。朱金颖等^[3]提出将双曲线模型简化为理想弹塑性模型以方便工程应用,如图 5 所示,可根据 Randolph 和 Worth^[9]对均匀各向同性、弹性介质中的桩给出的原点剪切模量 λ_0 的计算公式:

$$\lambda_0 = 2\pi G / \ln(r_m / r_0) \quad (26)$$

确定理想弹塑性模型抗剪切刚度系数 λ 的取值上限,其中, G 是桩侧土的剪切模量; r_0 为桩身半径; r_m 为剪切影响半径,与桩的埋深及土层分布有关,

一般可近似取 $\ln(r_m / r_0) = 4$ 。取 $\lambda_u = f_{si} / u_b$ 作为 λ 的取值下限, 并建议近似取 λ_0 和 λ_u 的平均值作为理想弹塑性模型的抗剪切刚度系数。本文结合实例的分析中采用的抗剪切刚度系数直接从实测桩侧摩阻力与桩土相对位移曲线中获得, 考虑到实测曲线中弹性阶段曲线大多近似直线, 因此弹性抗剪切刚度系数取极限位移 u_b 对应的割线模量。

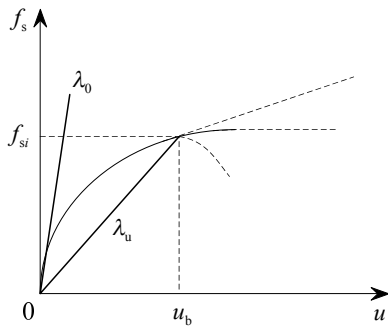


图5 荷载传递函数中参数 λ 的取值范围

Fig.5 Range of parameter λ in load transfer function

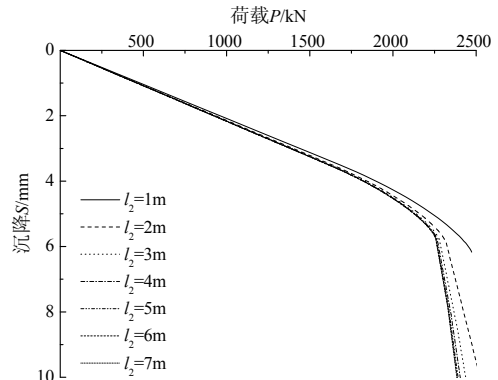
极限位移是荷载传递法的一个关键参数。研究表明, 桩侧摩阻力完全发挥所需的桩身位移, 即极限位移, 受土层性质、桩型、桩径、桩身刚度、桩侧粗糙度、埋深及施工工艺等因素的影响。洪毓康等^[23]通过钻孔灌注桩的原位试验指出, 桩侧摩阻力的发挥与桩端力大小有关, 粘土层摩阻力充分发挥时所需要的极限位移值与土层的埋深有关, 且极限位移值大致在 2mm~15mm。因此, 极限位移值应根据当地经验或室内外试验获得。

2) 虚土桩临界深度。

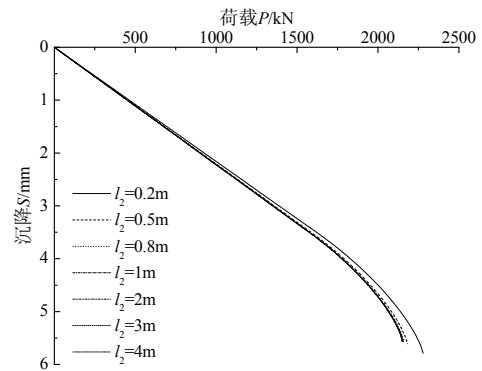
根据虚土桩桩端所采用的边界条件, 即虚土桩桩端位移为 0, 对于桩端以下土层较厚的情况, 考虑桩顶荷载有限(由桩身材料强度及桩顶容许沉降决定), 桩顶荷载引起的某一深度以下桩端土的位移近似为 0 或对桩顶沉降的贡献很小, 可将这一深度值作为虚土桩临界深度, 并以此作为虚土桩计算长度的取值依据。由此可见, 虚土桩计算长度与桩端土性及桩端应力等因素有关。考虑均质地基的情况, 下面对影响虚土桩计算长度的因素进行分析。假定桩-土体系参数: $E_p = 32\text{GPa}$, $\lambda = 20\text{MN/m}$, $u_b = 3.5\text{mm}$, $l_1 = 30\text{m}$, $A = 0.5\text{m}^2$, 分别取不同的虚土桩计算长度计算 P - S 曲线。

① 桩端土压缩模量的影响。 $E_s = 200\text{MPa}$ 、 20MPa 时, 对应的桩顶荷载-沉降曲线如图 6 所示, 图中曲线表示取不同虚土桩计算长度计算得到的 P 、 S 值。可见, 在一定的荷载范围内, P - S 曲线的

差异随着虚土桩长度的增加而减小, 且桩端土压缩模量越大, 计算需考虑的虚土桩长度越大。对于上述给定的桩-土体系参数, 考虑图 6 中横坐标所示的荷载范围, 图 6(a)工况虚土桩的计算长度可取为 6m, 图 6(b)工况虚土桩的计算长度可取为 0.8m。



(a) $E_s = 200\text{MPa}$ 时不同虚土桩计算长度对应的桩顶 P - S 曲线



(b) $E_s = 20\text{MPa}$ 时不同虚土桩计算长度对应的桩顶 P - S 曲线

图6 桩端土压缩模量对虚土桩计算长度的影响

Fig.6 Influence of compression modulus of underlying soil on virtual soil-pile length

工程中桩端土的压缩模量一般介于上述两种工况之间, 经反复试算表明, 虚土桩临界深度一般也介于两种工况之间。

② 桩端应力的影响。 $E_s = 200\text{MPa}$ 时, 分别计算当桩侧土塑性段长度 $l_a = 10\text{m}$ 、 20m 、 30m 时, 对应的 $l_2 - \Delta S$ 曲线如图 7, 其中, l_2 为虚土桩计算长度, ΔS 为相邻虚土桩计算长度对应的桩顶沉降 S 的差值。可见, 不同虚土桩计算长度所引起的桩顶沉降差异随着桩顶荷载的增加(等效于桩端应力增加或 l_a 增大)而增加; l_a 相同时, 沉降差随虚土桩计算长度增大而减小。因此, 对于给定的桩-土体系, 考虑桩承载力充分发挥时, 虚土桩计算长度可取为定值。后续 3.2 小节考虑的工况中桩端土压缩模量及桩顶荷载范围与本小节类似, 所以计算时取虚土桩计算长度为 6m。

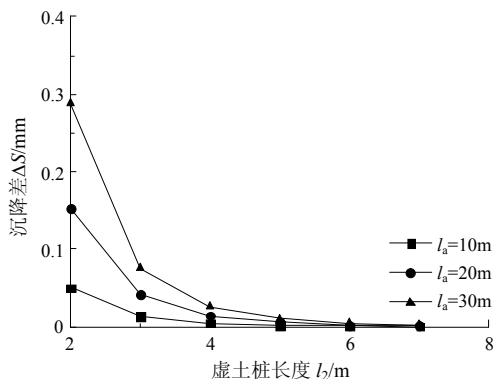


图 7 桩端应力对虚土桩计算长度的影响

Fig.7 Influence of stress of pile tip on virtual soil-pile length

3.2 P-S 曲线计算分析

由前文计算单桩沉降量的表达式可知，影响单桩沉降量的参数主要有桩身材料的弹性模量 E_p 、虚土桩的压缩模量 E_s 、桩侧土的单位长度抗剪切刚度系数 λ 、桩侧土的弹性极限位移 u_b 、虚土桩长度 l_2 、桩长 l_1 、桩身截面积 A 。下面分别分析 E_p 、 E_s 对 $P-S$ 曲线的影响。

1) E_p 的影响。参考实际工程中桩身材料的弹性模量，分别取 $E_p=20\text{GPa}$ 、 25GPa 、 30GPa 、 35GPa 、 40GPa ，其他参数： $l_1=30\text{m}$ ， $E_s=20\text{MPa}$ ， $\lambda=20\text{MN/m}$ ， $u_b=3.5\text{mm}$ ， $A=0.5\text{m}^2$ 。可以得到不同桩身弹性模量所对应的 $P-S$ 曲线，如图 8 所示。

由图 8 可知，桩顶荷载相同时，桩顶沉降随桩身弹性模量的增大而减小。

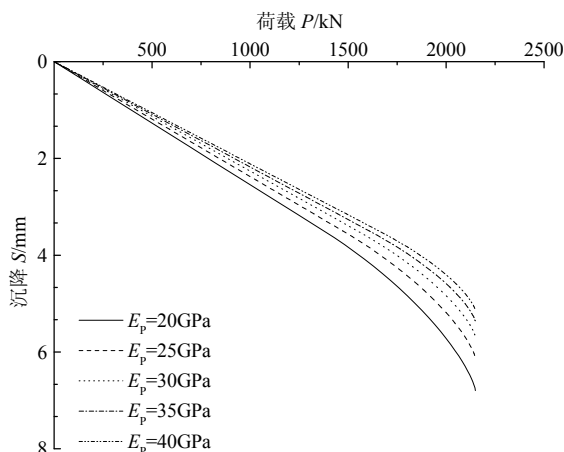


图 8 E_p 对 $P-S$ 曲线的影响

Fig.8 Influence of E_p on load-displacement curves

2) E_s 的影响。分别取 $E_s=20\text{MPa}$ 、 50MPa 、 100MPa 、 150MPa 、 200MPa ， $E_p=32\text{GPa}$ ，其他参数取值同 1)。可以得到不同虚土桩压缩模量所对应的 $P-S$ 曲线，如图 9 所示。由图看出，当桩顶荷载相同时，桩顶沉降随虚土桩压缩模量增大而减小，

若虚土桩压缩模量较小， $P-S$ 曲线将出现更为明显拐点。

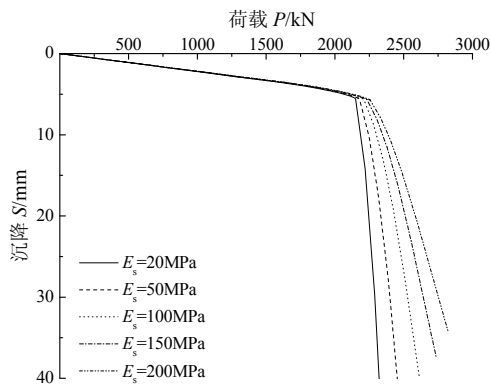


图 9 E_s 对 $P-S$ 曲线的影响

Fig.9 Influence of E_s on load-displacement curves

通过以上分析可知，采用虚土桩模型计算单桩沉降量能够在一定程度上反映桩-土体系实际物理力学参数对 $P-S$ 曲线的影响。

4 工程实例分析

文献[24]根据试桩资料，分析了 5 根大口径钻孔灌注桩的荷载传递机理和承载性状并提供了较为详细的试验数据及分析资料。为验证本文方法的合理性，下面利用原文中 M_2 桩的实测桩-土体系物理力学参数计算其 $P-S$ 曲线，并将计算结果与原文实测结果及采用路桥规范桩基沉降简化计算方法^[6]计算的结果进行对比分析。 M_2 桩地质资料及模型参数见表 1。桩身压缩模量 E_p 根据实测获得的桩钢筋应力-应变曲线取值，桩侧土抗剪切刚度系数 λ 及极限位移值 u_b 根据实测获得的桩侧摩阻力与桩土间相对位移关系曲线取值，其他文献中未给出的参数根据同一场地 M_1 桩实测资料和工程经验取值。

表 1 M_2 桩地质资料及模型参数

Table 1 Soil profile and model parameters for pile M_2

层序	土名	深度/m	$\lambda/(\text{kN/m})$	u_b/mm
1	杂填土	1.5	1.82×10^4	3.5
2	粘土	2.0	1.82×10^4	3.5
3~4	淤泥、中砂	10.1	1.82×10^4	3.5
5	页片状淤泥	20.3	5.94×10^4	3.5
6	中砂夹淤泥	26.0	5.94×10^4	3.5
7	粗砂	35.3	5.10×10^4	4.73
8	粉质粘土	36.4	1.98×10^4	14.03
9	含粘性土圆角砾	37.7	3.52×10^4	7.04
8	粉质粘土	40.4	1.98×10^4	14.03
9	含粘性土圆角砾	42.8	1.81×10^4	22.04
8	粉质粘土	45.6	1.81×10^4	22.03
11	含粘性土碎卵石	50.5	2.01×10^4	25.03
8	粉质粘土	—	1.81×10^5	15.04

图 10 比较了由本文方法计算得到的 $P-S$ 曲线(计算曲线)、实测曲线及由路桥规范桩基沉降简化计算方法计算得到的 $P-S$ 曲线(规范曲线), 由图可知: 1) 计算曲线和规范曲线的近似直线段($P < 8\text{MN}$)基本一致, 并与实测曲线吻合较好。当桩顶荷载较小时, 桩顶荷载引起的桩端土的位移较小, 桩顶沉降主要由桩身弹性压缩引起, 而规范法和本文方法所采用的桩身弹性压缩计算方法本质相同且与工程实际较为相符, 因此三条曲线的近似直线段基本一致; 2) 当桩顶荷载 $P > 8\text{MN}$ 时, 计算曲线与实测曲线均出现陡降段, 而规范曲线仍为直线段; 3) 当桩顶荷载 $P > 8\text{MN}$ 时, 对应某一桩顶荷载, 由规范计算得到的桩顶沉降小于实测值, 而由本文方法计算得到的桩顶沉降大于实测值。图 11 给出了计算得到的随荷载变化桩身轴力及桩侧摩阻力沿深度分布曲线, 通过与实测数据对比分析表明, 计算曲线与实测曲线较为吻合。

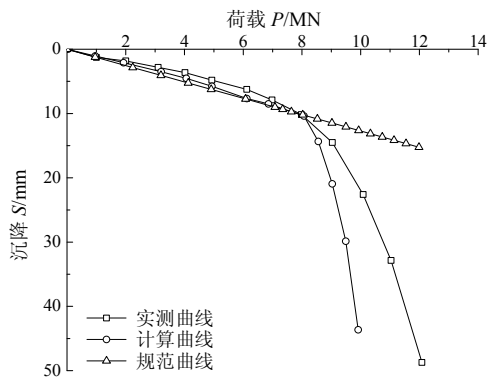


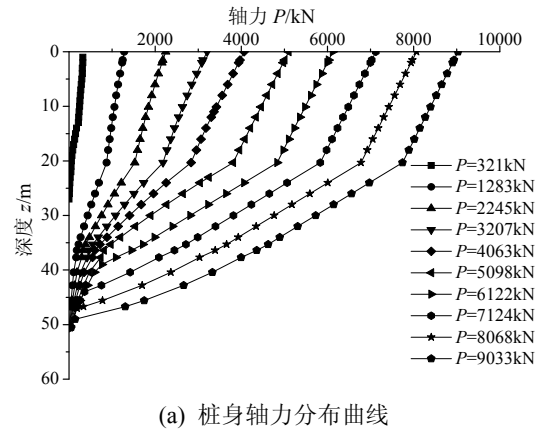
图 10 不同方法得到的桩顶荷载-沉降曲线比较

Fig.10 Comparison of the different $P-S$ curves obtained by different methods

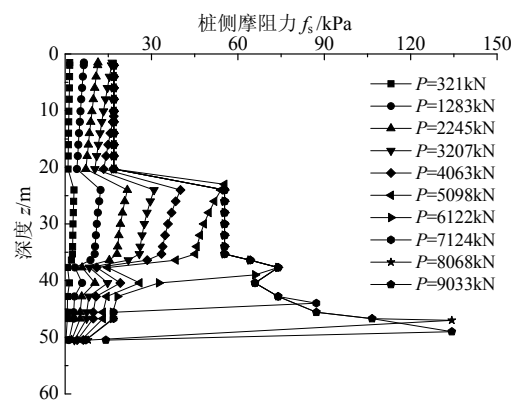
根据实测桩-土参数按 3.1 小节中分析虚土桩计算长度的方法分析表明, 取虚土桩计算长度 $l_2 = 5.3\text{m}$ 能够满足计算结果的精度要求。桩长 $l_1 = 46.7\text{m}$, 桩身截面积 $A = 1.1229\text{m}^2$, 桩弹性模量 $E_p = 35\text{GPa}$, 土层 11 压缩模量 $E_{s1} = 150\text{MPa}$, 其下土层 8 压缩模量 $E_{s2} = 20\text{MPa}$, 采用规范方法计算时扩散角 $\phi = 20^\circ$, 桩端处土的竖向地基系数 $C_u = 700.5\text{MN/m}^3$, 桩侧摩阻力分布系数 $\Delta = 0.5$ 。

由于前文对桩-土体系所做的假设和简化, 计算得到的荷载-沉降曲线不能反映出桩端土的非线性压缩及软化或硬化特征, 对比图 10 中计算曲线和实测曲线可知, 当荷载较大时, 两者之间的差异随荷载增加而增大, 但在一定的荷载范围内, 由本文方法计算得到的桩顶沉降与实测值较为接近, 且偏于保守(对应的规范值偏不安全), 计算曲线陡降点

与实测曲线陡降点较为吻合, 因此具有一定的工程应用价值。



(a) 桩身轴力分布曲线



(b) 桩侧摩阻力分布曲线

图 11 计算桩身轴力及桩侧摩阻力分布曲线

Fig.11 Distribution of axial force and skin friction resistance along pile

5 结论

(1) 针对桩侧土为理想弹塑性荷载传递函数, 本文基于虚土桩模型提出了层状地基中荷载-沉降曲线递推计算方法, 并编制了相应的计算程序。

(2) 通过对比由本文方法计算得到的桩顶 $P-S$ 曲线、实测曲线及由路桥规范桩基沉降简化计算方法计算得到的 $P-S$ 曲线可知, 在一定的荷载范围内, 由本文方法计算得到的桩顶沉降值与实测值较为接近, 实际应用中优于规范方法。利用本文方法, 对于具有相似土层的工程场地, 可根据某一试桩的实测数据计算得到其他桩的荷载-沉降曲线及桩身轴力、桩侧摩阻力分布曲线, 还可以通过对实测荷载-沉降曲线进行拟合反算出土层物理力学参数, 因此具有一定的工程实用价值。

(3) 虚土桩的计算长度反映了桩端土层性质对桩沉降特性的影响。虚土桩计算长度主要与桩端应力及桩端土性有关, 虚土桩计算长度不同所引起的

桩顶沉降差异随着桩顶荷载的增加而增加,且对于给定的桩-土体系和有限的桩顶荷载,虚土桩计算长度可取为定值。

参考文献:

- [1] Seed H B, Reese L C. The action of soft clay along friction piles [J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1955, (81): 112—118.
- [2] 陈龙珠, 梁国钱, 朱金颖, 葛炜. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析算法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(16): 30—37.
Chen Longzhu, Liang Guoqian, Zhu Jinying, Ge Wei. A parsing algorithm of axial load-settlement curve for pile [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(16): 30—37. (in Chinese)
- [3] 朱金颖, 陈龙珠, 葛炜. 层状地基中桩静载试验数据拟合分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 34—39.
Zhu Jinying, Chen Longzhu, Ge Wei. Test data analysis for axially loaded piles in layered soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 34—39. (in Chinese)
- [4] 邱钰, 胡雪辉, 刘松玉. 用荷载传递法计算深长大直径嵌岩桩单桩沉降[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 72—75.
Qiu Yu, Hu Xuehui, Liu Songyu. A formula for calculating the settlement of long rock-socketed single pile [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 72—75. (in Chinese)
- [5] 赵明华, 邹丹, 邹新军. 群桩沉降计算的荷载传递法[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 119—123.
Zhao Minghua, Zou Dan, Zou Xinjun. Settlement calculation of pile groups by load transfer method [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 119—123. (in Chinese)
- [6] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 165—180.
Zhang Zhongmiao. Pile foundation engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007: 165—180. (in Chinese)
- [7] 王旭东, 刘宇翼, 宰金珉, 诸宏博. 考虑剪切刚度系数变化的单桩弹塑性解[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1758—1762.
Wang Xudong, Liu Yuyi, Zai Jinmin, Zhu Hongbo. Elastic-plastic solution for axially loaded single pile considering variation of shear stiffness coefficient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1758—1762. (in Chinese)
- [8] Cooke R W, Price G, Tarr K. Jacked piles in London clay: A study of load transfer and settlement under working conditions [J]. Geotechnique, 1979, 29(2): 113—147.
- [9] Randolph M F, Worth C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1978, (12): 56—61.
- [10] 赵明华, 张玲, 杨明辉. 基于剪切位移法的刚性桩复合地基沉降计算[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 965—969.
Zhao Minghua, Zhang Ling, Yang Minghui. The settlement calculation of rigid-pile composite foundation by shear displacement method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(6): 965—969. (in Chinese)
- [11] 高盟, 高广运, 杨成斌, 冯世进, 季瑜君. 层状地基群桩沉降计算的剪切位移解析解[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1072—1077.
Gao Meng, Gao Guangyun, Yang Chengbin, Feng Shijin, Ji Yujun. Analytical solution for settlement of group piles in layered group based on shear displacement method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1072—1077. (in Chinese)
- [12] Poulos H G. Analysis of settlement of pile groups [J]. Geotechnique, 1968, 18(3): 449—471.
- [13] 周红波. 桩侧泥皮和桩底沉渣对钻孔桩承载力影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 956—960.
Zhou Hongbo. Numerical simulation of effects of mud cake and bottom sediment on bearing capacity of bored pile [J]. Rock and Soils Mechanics, 2007, 28(5): 956—960. (in Chinese)
- [14] JGJ94-2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
JGJ94-2008, Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 彭吉五. 考虑基岩埋置深度影响时单桩沉降特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Peng Jiwu. Research on the settlement of single pile considering the effect of embedded depth for bedrock [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [16] 陈嘉熹. 虚土桩法可行性初步研究及分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Chen Jiayi. Preliminary feasibility studies and analysis on method of virtual pile of soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [17] Coyle H M, Reese L C. Load transfer for axially loaded piles in clay [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1966, 92(Suppl 2): 1—26.
- [18] Vijayvergiya V N. Load-movement characteristics of piles [J]. Coastal and Ocean Division, 1977(2): 269—284.
- [19] Kraft L M, Ray P R, Kagawa T. Theoretical t-z curves [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, 107(11): 1543—1561.
- [20] 王旭东, 魏道堃, 宰金珉. 单桩荷载-沉降的非线性分析[J]. 南京建筑工程学院院报, 1994, 28(1): 15—23.
Wang Xudong, Wei Daoduo, Zai Jinmin. Nonlinear analysis of load-settlement for single pile [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994, 28(1): 15—23. (in Chinese)

(参考文献[21]—[24]转第99页)

- (Natural Science), 2006, 34(11): 1457—1463. (in Chinese)
- [4] GB 50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
GB 50009-2001, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Letchford C W, Mans C M, Chay M T. Thunderstorms—their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel) [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(12/13/14/15): 1415—1433.
- [6] 孙五一, 周晷毅, 顾明. 基于本征模态补偿的大跨屋盖脉动风等效静力风荷载[J]. *工程力学*, 2011, 28(4): 96—101.
Sun Wuyi, Zhou Xuanyi, Gu Ming. Equivalent static wind loads of fluctuating wind on large-span roofs based on eigen-mode compensation [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(4): 96—101. (in Chinese)
- [7] 李玉学, 杨庆山, 田玉基. 基于应变能等效的大跨屋盖结构背景响应等效静力风荷载[J]. *工程力学*, 2011, 28(5): 166—171.
Li Yuxue, Yang Qingshan, Tian Yuji. Equivalent static wind load of large-span roofs based on energy equation [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(5): 166—171. (in Chinese)
- [8] Chay M T, Letchford C W. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst, Part A: Stationary downburst observations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(7): 711—732.
- [9] Letchford C W, Chay M T. Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst, Part B: Moving downburst observations [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(7): 733—753.
- [10] Sengupta A, Haan F L, Sarkar P P, Balaramudu V. Transient loads on buildings in microburst and tornado winds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(10/11): 2173—2187.
- [11] 崔碧琪, 陈勇, 徐挺, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风对鞍形屋盖作用的数值模拟[C]// 工业空气动力学进展. 长沙: 中南大学出版社, 2009: 166—172.
Cui Biqu, Chen Yong, Xu Ting, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. The numerical simulations of wind-field characteristics about thunderstorm downbursts on saddle-shaped roof [C]// *Advances in Industrial Aerodynamics*. Changsha: Central South University Press, 2009, 166—172. (in Chinese)
- [12] Zhou X, Wang F, Liu C. Wind pressure on a solar updraft tower in a simulated stationary thunderstorm downburst [J]. *Wind and Structures*, 2012, 15(4): 331—343.
- [13] 陈勇, 崔碧琪, 余世策, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风作用下球壳型屋面模型风压特性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(8): 26—33.
Chen Yong, Cui Biqu, Yu Shice, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Experimental investigation of spherical roof subjected to thunderstorm downbursts [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(8): 26—33. (in Chinese)
- [14] 赵杨, 曹曙阳, Tamura Y, 段忠东, Ozono S. 雷暴冲击风模拟及其荷载的风洞试验研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4): 1—3.
Zhao Yang, Cao Shuyang, Tamura Y, Duan Zhongdong, Ozono S. Simulation of downburst and its loads with wind tunnel test [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(4): 1—3. (in Chinese)
- [15] Butler K, Cao S, Kareem A, Tamura Y, Ozono S. Surface pressure and wind load characteristics on prisms immersed in a simulated transient gust front flow field [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 299—316.
- [16] 徐挺, 陈勇, 彭志伟, 楼文娟, 孙炳楠. 雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J]. *实验力学*, 2009, 24(6): 1—8.
Xu Ting, Chen Yong, Peng Zhiwei, Lou Wenjuan, Sun Bingnan. Design of wind tunnel for thunderstorm downburst and steady wind field test [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(6): 1—8. (in Chinese)

(上接第 83 页)

- [21] 刘齐建, 杨林德. 桩基荷载传递函数扰动状态模型及应用[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(2): 165—169.
Liu Qijian, Yang Linde. New model of load transfer function for pile analysis based on disturbed state model [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34(2): 165—169. (in Chinese)
- [22] 王传文, 梅国雄, 宋林辉, 宰金珉. 广义荷载传递函数及其应用[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1217—1220.
Wang Chuanwen, Mei Guoxiong, Song Linhui, Zai Jinmin. Generalized load transfer function and its application [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1217—1220. (in Chinese)
- [23] 洪毓康, 陈强华. 钻孔灌注桩的荷载传递性能[J]. *岩土工程学报*, 1985, 7(5): 22—24.
Hong Yukang, Chen Qianghua. Load transfer performance of bored pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 7(5): 22—24. (in Chinese)
- [24] 董金荣, 林胜天, 戴一鸣. 大口径钻孔灌注桩荷载传递性状[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(6): 123—131.
Dong Jinrong, Lin Shengtian, Dai Yiming. Load transfer of cast-in-place pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(6): 123—131. (in Chinese)