

文章编号: 1000-7598-(2004) 07-1107-04

桩的轴向静载-沉降曲线的模拟分析

邵 江^{1,3}, 谢红强², 周德培¹, 胡德贵³

(1. 西南交通大学 岩土工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 地下工程系, 四川 成都 610031;
3. 四川交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 根据桩在竖向静载下的荷载分布与传递规律以及桩的沉降组成, 运用功能互等定律, 对桩-土的共同作用进行了分析, 提出了一种在对桩侧介质进行常规勘察和力学性能测试的基础上, 可对桩进行的沉降分析的数值模拟法, 该模拟法能较精确地确定桩的轴向静载-沉降曲线。并运用实例论证了方法的有效性和正确性。

关 键 词: 功能互等定律; 共同作用; 轴向静载; 沉降分析

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Simulating analysis of axial static loading-settlement curve for piles

SHAO Jiang^{1,3}, XIE Hong-qiang², ZHOU De-pei¹, HU De-gui³

(1. Geotechnical Department, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Department of Tunnel and Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Highway Planning Survey and Design Institute, Sichuan Provincial Department of Communications, Chengdu 610041, China)

Abstract: According to the load distributing and transferring rules and constituents of pile's settlement under static load, the interaction between piles and earth is analyzed; and a simulating method for analyzing pile's settlement is put forward on basis of routine surveys and mechanical tests. Therefore, the curve of axial static load and settlement of piles can be accurately determined and demonstrated by an example that shows the effectiveness and correctness of this method.

Key words: the equal law of work; interaction; axial static load; settlement analysis

1 引 言

公路、铁路和工业民用建筑等领域在解决大荷载条件下处理地基基础时, 最常用的形式为桩基。确定桩承载力是桩基设计的首要问题, 用静载试验来确定桩的承载力虽然最为可靠, 但需要花费大量的资金和时间。近年来, 数值分析方法(有限元、边界元)在对桩基础中桩-土共同作用分析方面取得了一定的进展, 但因其具有计算参数不易确定、计算结果及其影响因素间的关系不直接等缺点, 故在工程中尚不能广泛地应用。现有的桩土荷载-沉降曲线的分析方法共计三种, 即: 荷载传递法、剪切变形传递法和弹性理论法。许多工程技术和科研人员根据桩的不同工程情况对这三种方法进行了逐步的完善和更深入的研究^[1-5], 取得了很多的研究成果。但受这些方法固有的局限性, 如荷载传递法中桩侧

荷载函数, 必须通过试桩试验才能确定, 而不同地层的荷载传递函数各异, 桩侧、桩底传递函数的确定非常困难; 单纯的剪切变形传递法忽略了桩端的荷载传递作用, 对短桩、摩擦桩的误差极大, Randolph 按弹性力学方法计算桩端沉降量, 将桩端作为刚性墩加于弹性基础上, 以此降低桩的沉降误差, 但对桩-土间出现相对位移后的情况不能很好的求解; Poulos 的弹性理论法主要应用于均质半无限体, 即局限于桩与土均处于弹性范围内, 桩-土间无相对滑移的情况, 而多数情况下, 桩-土间是存在相对滑移的^[6]。因此, 如能有一种不须进行复杂的试桩测试, 只需通过简单的桩侧介质试验就可进行桩-土共同作用分析, 并可解决桩-土出现相对滑移的情况是一种发展方向。本文拟运用功的互等定律为基础, 在理论上探讨了一种确定桩的静载-沉降曲线以及桩身轴力和桩侧摩阻力的新方法, 为解决此

类问题提供了新的途径。

2 桩的工作性状

当桩的长径比 $l/d \geq 100$ 时桩端土的性质对荷载传递不再有任何影响, 可作为纯摩擦桩; 而对于短而粗的人工挖孔嵌岩桩 (尤其是 $l/d \leq 5$ 时), 端阻力先于覆盖土层的侧阻发挥出来, 桩-土相对位移和桩身整体位移都较小, 端阻对桩的承载力起主要作用, 可作为纯端承桩。其余的桩在轴向静载下, 端阻和侧阻在桩的承载中均发挥重要作用, 桩侧摩阻力先于桩端摩阻力发挥作用, 桩侧摩阻力到达极限值之前是随桩顶荷载的增加而成正比增长, 在桩顶处发挥得最充分, 桩侧摩阻力最大, 向桩尖处逐渐减小。亦即桩顶侧阻力先进入塑性状态, 向下逐渐延伸, 直至桩底。而桩的荷载分担与传递除了与桩的长径比 l/d 相关外, 还与桩侧与桩端土的刚度比 E_c/E_b 以及桩-土的刚度比 E_p/E_c 密切相关。当 $E_b/E_c=0$ 时, 荷载全由桩侧摩阻力所分担, 属纯摩擦桩, 当 $E_b/E_c=1$ 时, 属均匀土层摩擦桩; $E_b/E_c=\infty$ 时, 桩侧摩阻力由上端向下逐渐发挥, 桩端由于刚度大, 可分担主要的荷载。桩-土刚度比 E_p/E_c 愈大, 那么桩端阻力所分担的荷载比例愈大, 反之, 桩侧阻力愈大^[7]。

3 桩的沉降分析

所用桩体的力学模型见图 1, 根据功能互等定律, 整个桩体在忽略桩侧土体压力对桩产生的影响下, 可列出如下式子:

$$\frac{1}{2} \iiint E_p \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 dv = PS - P_b S_b - \iint \tau u da \quad (1)$$

式中 E_p 为桩体的弹性模量; u 为桩体任意深度的位移; S, S_b 分别为桩头和桩底的位移, P 为桩头的荷载, P_b 为桩底土对桩底的反作用力, τ 为桩侧剪切力, a 为桩侧表面积。

对式(1)进行变形可得出下式:

$$PS = \frac{1}{2} \iiint E_p \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 dv + \iint \tau u da + P_b S_b \quad (2)$$

根据文献[8]有: $u(z) = \zeta \frac{\tau r}{G}$, $\zeta = \ln \left(\frac{r_m}{r} \right)$, $r_m =$

$2.5l\rho_m(1-\mu)$, $\rho_m = \frac{1}{G_m l} \sum_{i=1}^n G_i l_i \sqrt{\frac{G_m}{G_b}} \left[1 - e^{\left(1 - \frac{h}{l} \right)} \right]$ 。对于均质土 $\rho_m=1$ 。以上各式中: l 为桩长; μ 为土的泊松比; G_m 为桩长范围内土的最大剪切模量; l_i 为单元 i 的长度; h 为桩底到刚性层的深度; r 为桩的

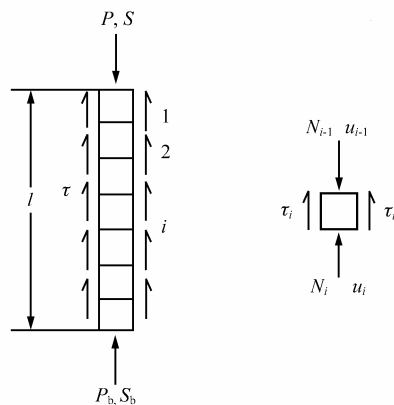


图 1 桩-土共同作用模型

Fig. 1 Model of interaction between pile and earth

半径。

将 $u(z) = \zeta \frac{\tau r}{G}$ 变形为 $\tau = \frac{Gu}{r\zeta}$ 后代入式(2), 可得

如下关系式:

$$PS = \int_0^l \left[\frac{E_p A}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \frac{LG}{r\zeta} u^2 \right] dz + P_b S_b \quad (3)$$

式中 L 为桩的周长; A 为桩的横截面积。

利用积分在相同积分函数下对于积分范围可进行叠加的原理, 以上等式可表示为桩截面所有微单元 i 的叠加。用 N_{i-1} 表示单元 i 的顶面轴力, u_{i-1} 表示单元 i 的顶面位移, N_i 表示单元 i 的底面轴力, u_i 表示单元 i 的底面位移, G_i 为桩侧第 i 层土的剪切模量。对其进行变形, 可得如下等式:

$$N_{i-1} u_{i-1} = \int_{\Delta_{i-1}}^{\Delta_i} \left[\frac{E_p A}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{LG_i}{r\zeta} u \right) u \right] dz + N_i u_i \quad (4)$$

对于所取桩截面微单元, 如下等式成立:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta_i - \Delta_{i-1}}; \quad l_i = \Delta_i - \Delta_{i-1}; \quad u = \frac{u_{i-1} + u_i}{2}$$

其中 Δ_{i-1} 与 Δ_i 为单元 i 的顶面与底面深度。将其代入式(4), 可得如下等式:

$$N_{i-1} u_{i-1} = \frac{E_p A}{2} \frac{u_i^2 - 2u_i u_{i-1} + u_{i-1}^2}{l_i^2} l_i + \frac{LG_i}{r\zeta} \frac{u_i^2 + 2u_i u_{i-1} + u_{i-1}^2}{4} l_i + N_i u_i \quad (5)$$

对上式变形可得如下等式:

$$N_{i-1} u_{i-1} - N_i u_i = \left[\left(\frac{E_p A}{2l_i} + \frac{LG_i l_i}{4r\zeta} \right) u_{i-1} + \left(\frac{LG_i l_i}{4r\zeta} - \frac{E_p A}{2l_i} \right) u_i \right] u_{i-1} + \left[\left(\frac{E_p A}{2l_i} + \frac{LG_i l_i}{4r\zeta} \right) u_i + \left(\frac{LG_i l_i}{4r\zeta} - \frac{E_p A}{2l_i} \right) u_{i-1} \right] u_i \quad (6)$$

要使上式成立, 则必须如下等式成立:

$$\left. \begin{aligned} N_{i-1} &= \left(\frac{E_p A}{2l_i} + \frac{LG_i l_i}{4r\zeta} \right) u_{i-1} + \left(\frac{LG_i l_i}{4r\zeta} - \frac{E_p A}{2l_i} \right) u_i; \\ N_i &= \left(\frac{E_p A}{2l_i} - \frac{LG_i l_i}{4r\zeta} \right) u_{i-1} - \left(\frac{LG_i l_i}{4r\zeta} + \frac{E_p A}{2l_i} \right) u_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

令 $N_i = P_b$, $u_i = S_b$, 则可通过式(7)中第2式确定 u_{i-1} , 将 u_i 和 u_{i-1} 代入第1式确定出 N_{i-1} , 如此迭代直至桩顶, 则可确定出桩顶的 P 和 S , 任意桩截面单元的轴力 N_i 和位移 u_i 。并由此可确定桩侧土体的剪切力 τ_i 。

$$\tau_i = \frac{N_i - N_{i-1}}{Ll_i} \quad (8)$$

据此, 可得到相应的桩侧剪切摩阻力 $\tau-l$ 曲线以及轴力 $N-l$ 曲线。依次增大 P_i , 可得出相应的桩顶 P, S , 做出 $P-S$ 曲线图。其余点的值可通过线性内插求得。

以上推导是在如下假定下进行的: 当竖向荷载不很大时, 桩与紧贴它们的桩侧土体紧密相连, 之间没有相对位移发生; 当桩有位移时, 桩侧土体会发生相同的位移并带动外围的土体位移, 桩侧摩阻力处于弹性范围内。当桩顶荷载达到一定值后, 此时通过式(8)计算所得的桩侧摩阻力 τ_i 将大于土体所提供的临界摩阻力, 亦即式(9)成立。

$$\tau_i \geq \tau \quad (\tau = c_i + \sigma_i \tan \varphi_i) \quad (9)$$

此时, 桩体各截面与土体之间会发生相对位移, 桩侧摩阻力进入塑性范围。在桩侧塑性区内, 这种相对位移是从桩顶开始发生, 逐渐向下, 直至桩底, 而使土体所提供的凝聚力 $c_i = 0$, 单位深度桩侧土体所提供的剪切力可按式(10)计算, 此与罗惟德(1990)的变深度弹簧约束相近^[5]。

$$\tau_i = \sigma_i \tan \varphi_i \quad (10)$$

将式(10)代入式(2), 然后, 进行同样的推导, 可得如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} N_{i-1} &= \frac{E_p A}{2l_i} (u_{i-1} - u_i) + \frac{\sigma_i Ll_i \tan \varphi_i}{2}; \\ N_i &= \frac{E_p A}{2l_i} (u_{i-1} - u_i) - \frac{\sigma_i Ll_i \tan \varphi_i}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

亦即当满足式(9)后, 迭代公式采用式(11)直至桩顶。式中 σ_i 为第 i 层桩侧土体侧向压力; c_i 为第 i 层桩侧土体凝聚力, φ_i 为第 i 层桩侧土体内摩擦角。

因桩侧最大剪应力发挥至极值时, 即出现塑性

滑移后, 滑移面往往不是出现在桩-土界面, 而是出现在紧靠桩表面的土体中, 因此, 可近似用桩侧土体极限剪应力作为桩侧弹塑性界限。

σ_i 可按下式进行计算:

$$\sigma_i = K \gamma z \quad (12)$$

式中 z 为桩侧土体埋深, 侧压力系数 K 是一个难于精确确定的参数, 它并不是通常的静止侧压力系数 K_0 , 它除与桩侧土体的有关外, 还与成桩、沉桩方式有关。这些影响因素可通过统一的经验参数 α 来表示:

$$K = \alpha K_0 \quad (\alpha = 0.7 \sim 0.95) \quad (13)$$

如果取桩侧土体产生相对位移的桩段为整个桩长 l , 则可确定出当桩顶荷载达到一定值后, 桩侧土体所能提供的为一定值。

4 桩底 P_b-S_b 的确定

以上迭代过程能够进行, 需要知道迭代起点, 及在建立一系列桩底土的 P_b-S_b 关系后, 迭代才能进行。根据文献[9]:

$$S_b = \frac{P_b(1-\mu_b)}{4G_b r} \eta \quad (14)$$

式中 G_b 为桩底土的剪切模量; μ_b 为桩端土的泊松比; 其中 η 为桩入土深度影响系数, 一般 $\eta = 0.85 \sim 1.0$, 也可用 $\eta = 1 - e^{-\frac{h}{2r}}$ 计算。

对于前面采用的式(14)确立的桩底土体 P_b-S_b 关系, 仅桩底土体位于弹性范围内才能成立。而桩底土体在超越弹性范围后步入塑性阶段, 至今仍无较完备的理论模型。对于较坚硬的土层或岩层, 在工程上是可满足要求的。

对于有软弱下卧层的情况和一般的土层, 会与实际情况相差较大。比较理想的方法是利用较为成熟的现场试验手段来获得桩底土体 P_b-S_b 关系。在对于层状地基较复杂, 难于对所要求层位进行现场荷载试验, 但对于均质地基可直接在地基土浅层进行, 获得相应的 $P-S$ 关系, 以此作为桩底土体的 P_b-S_b 关系。也可采用钻探手段对要求深度和要求层位进行取样, 进行室内压缩试验, 求得在不同荷载下的压缩模量 E_{si} , 然后, 采用分层总和法, 建立 P_b-S_b 关系, 不但简单实用, 亦可考虑桩自身重量对桩底沉降的影响和桩底土在塑性范围内的变化。

在知道 P_b-S_b 关系后, 即可进行整个桩体的迭代, 通常先假定 S_b , 再得出 P_b 。初始 S_b 可为 1 mm,

以后逐次递增。为保证计算精度,迭代步距(即桩截面厚度 l_i)以1~2 m为宜,桩侧介质的分层线是天然的迭代步距分界线。

5 算例

某高速公路半成岩常规冲孔灌注桩基础,桩径为0.8 m,桩长为20.0 m,采用C25混凝土,其弹性模量 E_p 为 10×10^9 Pa,最大加载量为10 000 kN,桩侧和桩底介质均为超压密状态的细砂,部分段细砂为泥质弱胶结,可按均质考虑,其剪切模量 G 为 3.5×10^7 Pa,桩端土的泊松比 μ_b 为0.35,压缩试验得到各级荷载下压缩模量 E_{si} 分别为:100 kPa时为 2.5×10^7 Pa,200 kPa时为 6.0×10^7 Pa,300 kPa时为 3.0×10^8 Pa,400 kPa时为 6.5×10^8 Pa。桩侧剪力试验所得凝聚力 C 为 4.5×10^5 Pa,内摩擦角 φ 为 30° ,迭代步距 l_i 为1.0 m,迭代起始 S_b 为1 mm。

通过计算与实测结果比较,可以看出,计算结果与实测曲线能较好吻合(见图2)。由图2看出,桩的轴力于桩底处最小,临近桩顶最大;桩侧摩阻力因受桩-土位移以及侧压力的影响于桩的5~12 m段发挥最大,而向桩底方向则平缓减少。轴力与侧壁摩阻力于部分点不能很好的吻合,这与桩侧土体介质并非完全均质,部分段泥质或砂质富集有关。

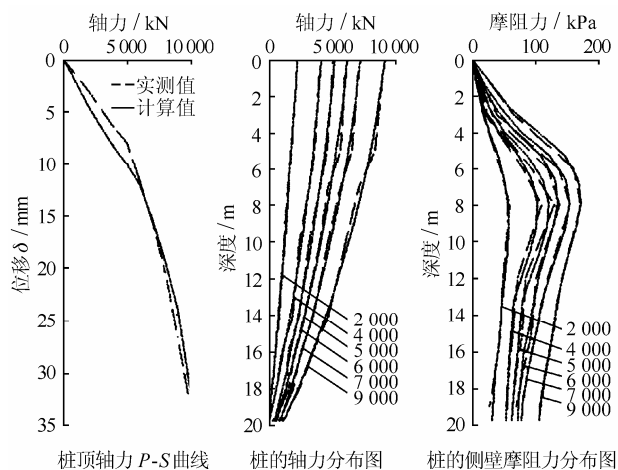


图2 桩的轴力及摩阻力分布图

Fig.2 The distribution of axial stresses and frictional resistances of piles

6 小结

本文对单桩在轴向静载下,运用功能互等定律推导出了一套能够反应桩的荷载传递规律的沉降分析公式,在参数选取符合场地地质条件的前提下,能很好的进行桩土静载试验数据的拟合分析。该公式能很方便地运用到成层地基中桩的沉降分析中,对设计中采用合理的桩长和桩径具有一定的指导意义。

桩端沉降采用分层总和法能够反应桩底土的沉降变形规律。

参考文献

- [1] 朱金颖, 陈龙珠, 葛炜. 层状地基中桩静载试验数据的拟合分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 35—39.
- [2] 李作勤. 摩擦桩的荷载传递及承载力的一些问题[J]. 岩土力学, 1990, 11(4): 1—12.
- [3] 陈龙珠, 梁国钱, 朱金颖等. 桩轴向荷载-沉降曲线的一种解析方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6): 30—38.
- [4] 胡德贵. 轴向荷载作用下群桩基础的沉降研究[博士学位论文D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
- [5] 罗惟德. 单桩承载力机理分析与荷载沉降曲线的理论推导[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 35—44.
- [6] 《桩基工程手册》编写委员会. 《桩基工程手册》[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995, 139—164.
- [7] 林天健, 熊厚金, 王利群. 桩基础设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999, 11—16.
- [8] Randolph M.F, Wroth C.P. Analysis of Vertically Loaded Piles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering*, 1978, (GT12): 1 465—1 488.
- [9] Randolph M F, Wroth C.P. Analysis of The Vertical Deformation of Pile Groups[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering*, 1979, 29(4): 423—439.