

文章编号:1671-6833(2011)03-0052-03

# 刚性桩复合地基褥垫层厚度取值方法研究

张四化, 毕苏萍, 郭院成

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了研究刚性桩复合地基褥垫层厚度合理的设置范围, 从褥垫层作用及可能的破坏模式出发, 采用理论推导的方法, 以太沙基理论为基础, 推导了褥垫层设置的最小及最大厚度. 同时根据理论推导结果, 提出了褥垫层最佳厚度的设置原则: 以刚性桩体对褥垫层的上刺入量作为褥垫层设置的最小厚度; 以褥垫层滑动面顶点与承台顶面刚接触时的褥垫层厚度为褥垫层的最大厚度. 并用工程经验公式验证了该取值方法的合理性, 可为今后类似工程中褥垫层设计提供理论支持.

**关键词:** 复合地基; 刚性桩; 褥垫层; 取值方法

**中图分类号:** TU470 **文献标志码:** A

## 0 引言

褥垫层的设置是刚性桩复合地基应用中的核心技术. 李宁等<sup>[1]</sup>采用数值试验方法对刚度不同的复合地基在褥垫层作用下的承载性状进行了研究, 发现褥垫层可以显著地降低桩上荷载的集中程度, 尤其对于桩体刚度较大桩体复合地基而言, 上述作用越显著. 董道洋<sup>[2]</sup>对 CFG 桩复合地基中褥垫层作用进行探讨, 说明了褥垫层设置的重要性. 周龙翔等<sup>[3]</sup>基于褥垫层顶面为均匀沉降面原则, 导出高速公路路基结构层下褥垫层设置的最小厚度公式. 郑俊杰等<sup>[4]</sup>以刚性桩复合地基桩顶所铺设的褥垫层为研究对象, 研究了褥垫层 3 种理论破坏模式的可能性; 并结合工程经验中的褥垫层厚度的取值, 给出了褥垫层厚度的经验公式. 当前, 复合地基褥垫层技术的应用大都仍依据工程经验, 系统的理论研究还较少. 为此, 笔者从褥垫层的设置作用出发, 以太沙基原理为基础, 用理论分析的方法, 提出了褥垫层厚度最佳设置原则.

## 1 计算模型

闫明礼等<sup>[5]</sup>将垫层的作用归纳为: (1) 保证桩土共同承担荷载; (2) 调整桩土荷载分担比; (3) 缓解基础底面的应力集中; (4) 调整桩土水平荷载的分配. 为了使褥垫层的设置达到上述作用,

褥垫层的设置厚度起到关键性作用. 对于桩体刚度较大的桩, 桩体向褥垫层的刺入现象非常显著, 试验表明, 上刺入量有时可达 20 mm 以上. 若褥垫层设置厚度过薄, 桩体穿透垫层与基础底面接触, 这时褥垫层的设置就起不到应起的作用; 相反, 若褥垫层厚度过厚, 刚性桩分担的荷载太小, 使复合地基的总承载力下降, 或者造成沉降过大, 而且不经济. 计算模型如图 1 所示.

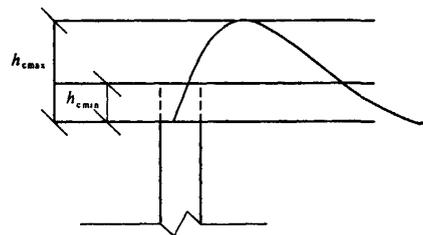


图1 褥垫层厚度确定方法计算模型

Fig.1 The model of selected method of cushion

## 2 理论计算分析

### 2.1 褥垫层最小厚度的确定

褥垫层的最小厚度以刚性桩的上刺入量<sup>[6]</sup>为原则. 为了使复杂问题简单化, 以便推导出工程实用的计算公式, 需要对加载中的真实模型引入如下简化假定:

(1) 桩横截面为圆形, 直径为  $d$ ;

收稿日期: 2010-12-10; 修订日期: 2011-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978325)

作者简介: 张四化(1979-), 男, 河南漯河人, 博士研究生, 主要从事复合地基理论与工程应用研究, Email: zsh19801113@126.com.

(2)以桩顶面圆心为对称轴将桩顶面以上的褥垫层视为轴对称的各向同性的弹性空间半平面;忽略刚性基础对半无限空间的受力影响;

(3)将桩顶处反作用在褥垫层上的应力  $p_p - p_s$ , 视为作用在弹性半平面表面上的局部均匀荷载;

(4)桩顶沉降变形和基础底面沉降变形一致。

根据 Boussinesq-Flamant 问题的相关理论,在轴对称弹性半平面内,在表面集中荷载作用下任意一点法向和切向位移的极坐标表达式为:

$$\begin{cases} u_\rho = -\frac{2F}{\pi E} \cos\varphi \ln\rho - \frac{(1-\nu)F}{\pi E} \varphi \sin\varphi - S \cos\varphi \\ u_\varphi = \frac{2F}{\pi E} \sin\varphi \ln\rho - \frac{(1-\nu)F}{\pi E} \varphi \cos\varphi + \frac{F(1+\nu)}{\pi E} \cdot \sin\varphi - S \sin\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F$ 为作用在弹性半平面上的集中荷载; $\rho, \varphi$ 为极坐标; $E$ 为弹性模量,这里用褥垫层的压缩模量  $E_c$  来代替; $\nu$ 为泊松比; $S$ 为竖向的刚性位移,即褥垫层相对压缩量.受力分析见图2.

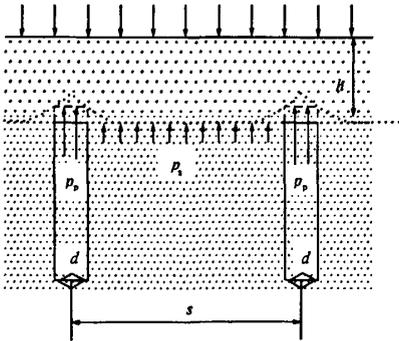


图2 桩的上刺入变形计算简图

Fig.2 Pierce deformation calculation fig of the pile

当  $\varphi = \pm \pi/2$  时,对于不同的  $\rho$  (除了  $\rho = 0$ ), 半平面表面任两点  $M, B$  的沉陷为:

$$\begin{cases} -(u_\varphi)_M^{\varphi=\pi/2} = -\frac{2F}{\pi E} \ln\rho - \frac{(1+\nu)F}{\pi E} + S \\ -(u_\varphi)_B^{\varphi=-\pi/2} = -\frac{2F}{\pi E} \ln s - \frac{(1+\nu)F}{\pi E} + S \end{cases} \quad (2)$$

式中:位移  $u_\varphi$  是以沿  $\varphi$  正方向为正.

由式(2)可得  $M, B$  两点的相对沉陷为

$$\Delta = \frac{2F}{\pi E} \ln \frac{S}{\rho} \quad (3)$$

依据上述理论可得刚性桩的向上刺入变形为:

$$\Delta = \eta \frac{p_0 + \gamma h}{\pi E'} \left[ s \ln \frac{s+d}{s-d} + d \ln \frac{s^2 - d^2}{4d^2} \right] \quad (4)$$

进一步整理可得:

$$\Delta = \eta \frac{(p_0 + \gamma h)(n-1)s}{(1-m-mn)\pi E'} \times \left[ \ln \frac{1+2\sqrt{m/\pi}}{1-2\sqrt{m/\pi}} + 2\sqrt{m/\pi} (\ln \frac{\pi-4m}{m} - 4 \ln 2) \right] \quad (5)$$

式中: $\eta$ 为基于 Boussinesq-Flamant 理论假定的群桩修正系数; $h$ 为褥垫厚度; $p_0$ 为基础底部均布荷载; $n$ 为桩土应力比; $m$ 为桩土置换率; $s$ 为桩间距; $d$ 为桩径; $\gamma$ 为褥垫层材料重量; $E$ 为褥垫层压缩模量.

2.2 褥垫层最大厚度的确定

褥垫层最大厚度的计算根据桩体对褥垫层刺入过程的影响范围来确定.桩体对褥垫层的刺入引起褥垫层颗粒进行塑性流动,以桩体刺入褥垫层引起对数螺旋线的最高点为褥垫层的最大厚度,如图3所示.

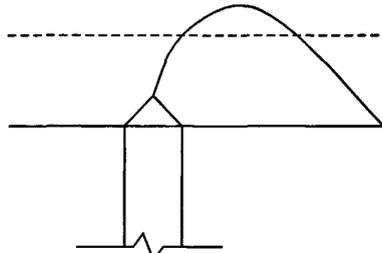


图3 褥垫层最大厚度确定示意图

Fig.3 Schematic of the maximum thickness of cushion

桩刺入垫层中的条件就是桩顶端面反作用于褥垫层的应力 ( $p_p - p_s$ ) 大于垫层的极限承载力,类似于太沙基理论分析,如图4所示.

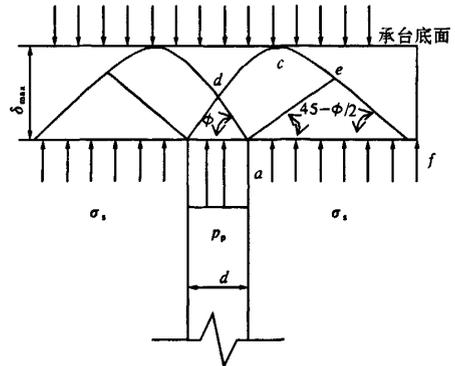


图4 褥垫层最大厚度确定计算简图

Fig.4 Calculation of the maximum thickness of cushions

桩刺入时,在桩顶形成三角形压实体,三角形底角为 $\varphi$ ,在压实体的四周形成滑动面 $a-d-c-e-f$ ,分析中近似按平面问题.三角形压实体上作用有被动土压力 $p$ ,内聚力 $C_c$ ,桩顶反力 $(p_p-p_s)$  $d$ ,压实体自重可忽略不计.垫层中常采用无粘性材料,则:

$$C_c = \frac{1}{2} \sigma_c d \tan \varphi / \cos \varphi \quad (6)$$

式中: $\sigma_c$ 为被动土压力强度,根据文献[7],取 $\sigma_c = \xi_q N_q \sigma_s$ .相应压实体上作用被动土压力为:

$$P_\sigma = \frac{1}{2} \xi_q N_q \sigma_s d / \cos \varphi \quad (7)$$

式中: $\xi_q$ 为桩体截面形状系数, $\xi_q = 1 + \tan \varphi$ ;  $N_q$ 为承载力系数.

取三角形压实体为脱离体,由竖向平衡可解出 $\sigma'_p = (1 + \tan^2 \varphi) \xi_q N_q \sigma_s$ .而在上部荷载作用下,要保证桩刺入,则应有:

$$\sigma'_p > (1 + \tan^2 \varphi) \xi_q N_q \sigma_s \quad (8)$$

按太沙基理论中平面问题进行求解.滑动面的曲线部分 $d-c-e-f$ 段为对数螺旋线,在 $d$ 点的切线为铅垂线,在 $e$ 点与直线 $e-f$ 相切,切角为 $45^\circ - \varphi/2$ .设对数螺旋线方程为 $\rho = ae^{m\theta}$ ,其中, $a$ 及 $m$ 为常数.根据对数螺旋线的性质,则有 $\beta = 2(45^\circ - \varphi/2)$ ,而 $m = \text{ctg} \beta$ ,则有 $m = \tan \varphi$

又根据太沙基理论以及几何关系,说明极点位于 $c$ 点,由此可得:

$$a = (d/2) \cdot e^{-\varphi \tan \varphi / \cos \varphi} \quad (9)$$

曲线最高点 $c$ 的高度 $\delta_{\max}$ 可根据几何关系得:

$$\delta_{\max} = ae^{m(\pi/2 + \varphi)} \sin(\pi/2 - \varphi) \cdot \tan \varphi \quad (10)$$

整理后得:

$$\delta_{\max} = (d/2) \cdot e^{(\pi/2) \cdot \tan \varphi} \cdot \tan \varphi \quad (11)$$

从上式可求出褥垫层的最大厚度.该公式形式简洁,且进行复合地基褥垫层厚度设计只需桩径 $d$ 和垫层材料内摩擦角 $\varphi$ 这2个参数,因此具有广泛的实用性.

### 3 验证

基于刚性桩复合地基的工程实践,郑俊杰等<sup>[8]</sup>建议采用如下褥垫层厚度设计的经验公式:

$$d = \frac{2}{5} r_p \exp\left(\frac{\pi}{2} \tan \varphi\right) \tan \varphi \quad (12)$$

与经验公式对比分析可以看出,上述经验公式所建议的褥垫层厚度在笔者所确定的褥垫层设置厚度范围之内,说明了笔者所建议的褥垫层最佳厚度的合理性.

### 4 结论

结合褥垫层对桩体与地基土调节作用的基本特征,理论推导了褥垫层设置厚度的范围,提出了褥垫层设置的原则,为褥垫层设置厚度提供参考,进一步指导刚性桩复合地基设计的合理性.笔者仅考虑了单桩复合地基情况,并未考虑多桩及群桩复合地基中群桩效应的情况,而且褥垫层材料的特殊多变性、桩土共同作用的复杂性,要求在不断完善刚性桩复合地基褥垫层设置理论的同时,应从实际工程出发不断积累经验,验证理论在实际应用中的可行性,以更好地服务于工程建设.

### 参考文献:

- [1] 李宁, 韩焯. 褥垫层对复合地基承载机理的影响[J]. 岩土力学, 2001, 34(2): 68-73.
- [2] 董道洋. CFG桩复合地基褥垫层设计的重要性[J]. 岩土工程界, 2003, 7(1): 65-67.
- [3] 周龙翔, 童华炜, 王梦恕, 等. 复合地基褥垫层的作用及其最小厚度的确定[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 841-843.
- [4] 郑俊杰, 陈健, 骆汉宾, 等. 刚性桩复合地基垫层破坏模式及厚度分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 121-123.
- [5] 闫明礼, 杨军, 吴春林, 等. CFG桩复合地基的褥垫层技术[J]. 地基处理, 1996, 7(3): 1-7.
- [6] 李明宇. 静压刚性长短桩复合地基承载性状研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2007.
- [7] 机械电子工业部勘察研究院. JGJ72-90 高层建筑岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [8] 郑俊杰, 陈健, 骆汉宾, 等. 刚性桩复合地基褥垫层破坏模式及厚度分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 120-123.

(下转第59页)

- [5] TAN Jian-ping, XU Yan, LI Tan-xi, et al. The scheme design and application of large gap magnetic drive system which is driven by traveling wave magnetic field[C]//2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (IC-MTMA). United States; Randall Bilof, 2009: 160 - 163, 200.
- [6] 王玉琳,王强. 步进电机的速度调节方法[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(1): 53 - 55, 64.
- [7] 蔡锦达,石恩琪,储茂兵. 基于单片机的步进电机S形曲线调速控制[J]. 包装工程, 2007, 28(7): 77 - 78, 91.
- [8] 刘志坚,谭建平,许焰,等. 大间隙磁力驱动血泵动力学特性研究[J]. 机械设计, 2010, 27(9): 56 - 59.
- [9] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design. Part I; jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. Int. J. Maeh. Tools Manufact, 2001, 41(9): 1323 - 1345.
- [10] 李晓辉,邹义杰,冷洪滨. S曲线加减速控制新方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007, (10): 50 - 53.
- [11] 石川,赵彤,叶佩青,等. 数控系统S曲线加减速规划研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1421 - 1425.

### S-Curve Control Research on the Acceleration Process of Axial Blood Pump

TAN Jian-ping, LIU Heng-tuo, XU Yan, LIU Yun-long, ZHU Zhong-yan, TAN Wei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Based on the traditional S-curve control algorithm, a three-section S-curve speed-rising-control method which can promote drive performance of the blood pump was proposed. An S-curve acceleration model was established, and then time constant and steps were obtained by discrete solution. The parameters were passed to the microcontroller in real time by using PC communication, and eventually the S-curve control method was realized in the acceleration process. The results show that the blood pump can reach the fastest and the best drive performance through about 1.2s, while the start-up speed of blood pump is 300 r/min and its maximum stable speed is 6 000 r/min. It has shorter drive time, less vibration noise and better acceleration performance than before.

**Key words:** axial blood pump; S-curve; speed control; PC

(上接第54页)

### Research on Calculation Method of the Cushion Thickness in the Rigid Pile Composite Foundation

ZHANG Si-hua, BI Su-ping, GUO Yuan-cheng

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The paper analyzed the calculating method of the cushion thickness in rigid pile composite foundation. Based on Terzaghi theory, the minimum thickness and the maximum thickness are derived considering the function of the cushion and its possible failure modes. Moreover, the determination principle of the best cushion thickness is brought forward. The minimum thickness of the cushion takes the value of pile's upper penetration into the cushion, while the cushion thickness is taken as the maximum thickness when the vertexes of sliding surface contact the bottom of pile cap. Finally, the calculation method of the cushion thickness is verified by using an empirical formula, which can provide a theoretical support for design of the cushion.

**Key words:** composite foundation; the rigid pile; cushions; methods of value selection