

文章编号: 1000-5013(2012)03-0317-04

采用位移模式的柔性桩单桩荷载传递规律分析

蔡燕燕¹, 周亦涛², 郑春婷¹, 戚志博¹, 陈旭¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 河北工程技术高等专科学校 交通工程系, 河北 沧州 061001)

摘要: 根据桩土的位移协调条件、改进李海芳位移模式和有效桩长的定义,分析桩侧摩阻力在桩顶处最大时的柔性桩单桩荷载传递规律,得到柔性桩的桩身应力、桩侧摩阻力和有效桩长的计算表达式. 实例计算结果表明:桩身应力和桩侧摩阻力均是在桩顶处最大,沿桩长的分布形式与试验结果较一致;有效桩长与试验值非常接近,且比段继伟的建议取值稍大.

关键词: 位移模式; 柔性桩; 有效桩长; 摩阻力; 桩身应力

中图分类号: TU 43/10 **文献标志码:** A

柔性桩的荷载传递规律一直以来都是岩土工程师们关心的难点问题. 早在 90 年代,叶观宝等^[1]和段继伟^[2]就通过试验研究了柔性桩复合地基中桩的荷载传递规律,且证明了柔性桩存在有效桩长;段继伟^[2]还建议了柔性桩有效桩长的取值范围. 陈善雄^[3]利用荷载传递函数,对柔性桩的桩身应力、位移和有效桩长进行了理论分析. 吴雄志^[4]将克拉夫-邓肯模型作为传递函数,对水泥土桩荷载传递规律及临界桩长进行了研究. 郭忠贤等^[5]对夯实水泥土桩的荷载传递进行了试验研究,并分析了夯实水泥土桩的荷载传递规律及桩侧摩阻力分布特征. 李海芳^[6], COOKE^[7], 舒翔等^[8]也各自对桩身荷载传递及沉降作了讨论. 俞缙等^[9]利用有效桩长假设分析柔性桩复合地基的桩土应力比问题. 至今为止,关于柔性桩的桩身应力、桩侧摩阻力和有效桩长的计算方法仍然存在不少争议. 本文在前人研究的基础上,把李海芳^[6]提出的桩间土位移模式应用到柔性桩单桩荷载传递规律分析中,对柔性桩的桩侧摩阻力、桩身应力和有效桩长进行研究.

1 柔性桩的荷载传递

1.1 计算模型

把柔性桩复合地基中的桩及其桩周土看成一个轴对称的圆柱体作为分析单元,如图 1 所示. 段继伟^[2]通过试验发现:柔性桩在桩顶荷载作用下使得桩体向下移动,同时桩侧土有阻碍桩的下移,在桩顶以下一深度后桩体与桩侧土沉降几乎相等,这一深度就是有效桩长;在有效桩长深度内桩侧摩阻力在桩顶处最大,向下就减小直至为零.

根据段继伟^[2]的研究结果和有效桩长的定义,对柔性桩及桩侧土作如下 4 点假定:1) 桩土界面无滑移;2) 桩和土都是均匀的、各向同性的线弹性体;3) 桩土仅产生竖向位移,径向位移忽略不计;4) 桩端处,桩侧摩阻力、桩身应力为零. 根据上述假定和李海

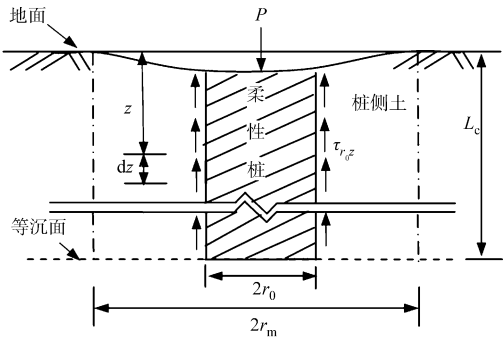


图 1 柔性桩单桩荷载传递模型
Fig. 1 Model of load transfer
for single deformable pile

芳^[6]的桩侧土位移模式,假设柔性桩影响范围内的桩侧土的位移模式为

$$w_{rz} = w_{pz} - \alpha_c w_{pz} \left(\frac{r}{r_0} - \exp(\beta(\frac{r}{r_0} - 1)) \right). \tag{1}$$

式(1)中: w_{rz} 为桩侧土位移(m); w_{pz} 为桩体位移(m); r_0 为桩径(m); r_m 为桩体影响半径(m); z 为地表以下的深度(m); r 为以桩体中心为圆心的圆的半径(m); α_c 和 β 为待定参数.

已知桩侧土的边界条件: $w_{r_0z}=0, w_{r_mz}=0, \tau_{r_mz}=0$. 由于式(1)已经满足边界条件 $w_{r_0z}=0$, 将 $w_{r_mz}=0$ 代入式(1), 可得 $1-\alpha_c(\frac{r_m}{r_0}-\exp(\beta(\frac{r_m}{r_0}-1)))=0$. 即

$$\frac{1}{\alpha_c} = \frac{r_m}{r_0} - \exp(\beta(\frac{r_m}{r_0} - 1)) = \frac{r_m}{r_0} - \frac{1}{\beta}. \tag{2}$$

由式(1)可得桩侧土的剪应变为

$$\gamma_{rz} = -\frac{\partial w_{rz}}{\partial r} \alpha_c \left(\frac{1}{r_0} - \frac{\beta}{r_0} \exp(\beta(\frac{r}{r_0} - 1)) \right) w_{pz}.$$

式中: γ_{rz} 为桩侧土的剪应变.

那么,桩侧土的剪应力为

$$\tau_{rz} = G_s \gamma_{rz} = \frac{E_s \gamma_{rz}}{2(1+\mu_s)} = \frac{E_s \alpha_c}{2r_0(1+\mu_s)} (1 - \beta \exp(\beta(\frac{r}{r_0} - 1))) w_{pz}. \tag{3}$$

式(3)中: τ_{rz} 为桩侧土的剪应力(kPa); G_s 为桩侧土的剪切模量(kPa); μ_s 为桩侧土的泊松比; E_s 为桩体的压缩模量(kPa). 把 $\tau_{r_mz}=0$ 带入式(3)可得

$$1 - \beta \exp(\beta(\frac{r}{r_0} - 1)) = 0. \tag{4}$$

根据式(4)可得唯一的 β , 则当 $r_m=20r_0$ 时, $\beta=0.114\ 200\ 143\ 45$; 当 $r_m=12r_0$ 时, $\beta=0.164\ 227\ 506\ 9$. 由式(3)可得桩侧摩阻力为

$$\tau_{r_0z} = \frac{E_s \alpha_c}{2r_0(1+\mu_s)} (1 - \beta) w_{pz}. \tag{5}$$

式(5)中: τ_{r_0z} 为桩侧摩阻力(kPa).

1.2 桩身应力及位移

取距桩顶 z 处的微元桩体进行受力分析, 如图 2 所示. 由竖向受力平衡可得

$$\pi r_0^2 (\sigma_{pz} + d\sigma_{pz}) = \pi r_0^2 \sigma_{pz} - 2\pi r_0 \tau_{r_0z} dz.$$

由上式可得桩身轴向应力(不计桩的自身值量)沿桩长的微分方程为

$$E_p w''_{pz} = \sigma'_{pz} = -2\tau_{r_0z}/r_0.$$

式中: E_p 为桩体的压缩模量(kPa); σ_{pz} 为桩体的轴向应力(kPa); τ_{r_0z} 为桩侧摩阻力(kPa).

把式(5)代入此微分方程可得

$$w''_{pz} = \frac{\sigma'_{pz}}{E_p} = -\frac{E_s \alpha_c (1 - \beta)}{E_p r_0^2 (1 + \mu_s)} w_{pz}. \tag{6}$$

当 $r_0 < r_m \leq 20r_0$ 时, 由式(3)和式(2)可知 $\beta < 1$ 和 $\alpha_c > 0$, 进而得到 $D > 0$, 那么式(6)的解为

$$w_{pz} = C_1 \cos(Dz) + C_2 \sin(Dz). \tag{7}$$

式(7)中: $D^2 = \frac{E_s \alpha_c (1 - \beta)}{E_p r_0^2 (1 + \mu_s)} = \frac{E_s (1 - \beta)}{r_0^2 E_p (1 + \mu_s) \frac{r_m}{r_0} - \frac{1}{\beta}}$. 对上式求导, 则有

$$w'_{pz} = -C_1 D \sin(Dz) + D C_2 \cos(Dz). \tag{8}$$

根据假定可知桩端处桩侧土沉降、桩侧摩阻力为零, 那么由式(1), (5)可得

$$w_{pz} = C_1 \cos(DL_c) + C_2 \sin(DL_c) = 0. \tag{9}$$

式(9)中: L_c 为桩体的有效桩长(m).

根据段继伟^[2]的研究, 可知桩侧摩阻力在桩顶处最大, 随后向下减小, 到有效桩长处基本为零. 在桩顶处有 $\tau'_{r_0z}=0$, 那么由式(5)和式(8)可得

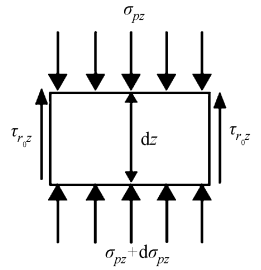


图 2 微元桩体受力图
Fig. 2 Stresses of differential element of pile

$$\tau_{pz}' = -DC_1 \sin(0) + DC_2 \cos(0) = 0.$$

(10)

联立式(9),(10)可解得

$$C_2 = 0, \quad DL_c = (n + 1/2)\pi.$$

(11)

式(11)中: n 为待定的非负整数(m).

1.3 有效桩长和荷载传递的解

根据段继伟^[2]的研究,可知桩侧摩阻力在有效桩长内只出现桩顶处一个峰值,那么式(11)中的 n 值能取 0,则有效桩长简化计算公式为

$$L_c = \frac{\pi}{2D} = \frac{\pi}{2}r_0\sqrt{\frac{E_p(1+\mu_s)}{E_s(1-\beta)}}(\frac{r_m}{r_0} - \frac{1}{\beta}).$$

(12)

桩体影响半径一般为 20 倍桩径左右^[7],文中取 $r_m=15r_0$;考虑桩侧土的体积变形,取 $\mu_s=0.3$,则式(12)改写为

$$L_c = 0.62r_0\sqrt{\frac{E_p}{E_s}}.$$

(13)

把式(11), $n=0$ 代入式(10),可得

$$\tau_{pz} = C_1 \cos(\frac{\pi z}{2L_c}).$$

(14)

根据桩顶荷载已知和桩端处桩身应力为零及式(6)和式(13),可得桩身应力简化计算公式和 C_1 为

$$\sigma_{pz} = \frac{P}{\pi r_0^2}[1 - \sin(\frac{\pi z}{2L_c})], \quad C_1 = \frac{2PL_c}{(\pi r_0)^2 E_p}.$$

(15)

根据式(5),(14)和(15),可得桩侧摩阻力简化计算公式为

$$\tau_{r_0 z} = \frac{P}{4L_c r_0} \cos(\frac{\pi z}{2L_c}).$$

(16)

2 实例与分析

把由式(16)计算得到的有效桩长与试验值^[2]和舒翔等计算公式^[2,8]得到的理论值进行对比,结果如表 1 所示.表 1 中:试验值中的取值由文献[2]按桩身轴力占桩顶荷载的比例约 10%来确定.

由表 1 可以发现:文中公式得到有效桩长理论值比试验值稍小,比段继伟、舒翔的理论值更接近试验值,但比段继伟的建议取值大,说明了该有效桩长理论计算式是更安全的.计算参数^[2]:桩径 $r_0=0.5$ m,桩长 $L=12.5$ m,桩体弹性模量 $E_p=78.1$ MPa,桩侧土压缩模量 $E_s=2.5$ MPa.

根据上面的计算参数和式(15),(17)作桩身应力和桩侧摩阻力沿桩长的分布图,如图 3~4 所示.从图 3~4 可知:桩身应力、桩侧摩阻力沿深度减小,桩身应力分布形式与文献[5]的试验结果比较一致.

表 1 柔性桩复合地基有效桩长实验值及理论值

Tab.1 Experimental and theoretical values of effective length of deformable pile in composite ground

pile in composite ground				m
试验值		理论值		
实测值	取值 ^[1]	文献[2]	文献[8]	本文
8.00	7.18	6.37	6.57~7.27	7.86

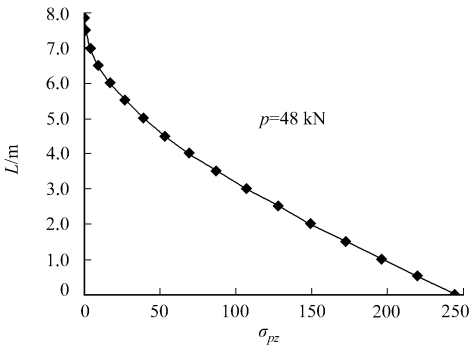


图 3 桩身应力分布图

Fig. 3 Distribution of axial stress of pile

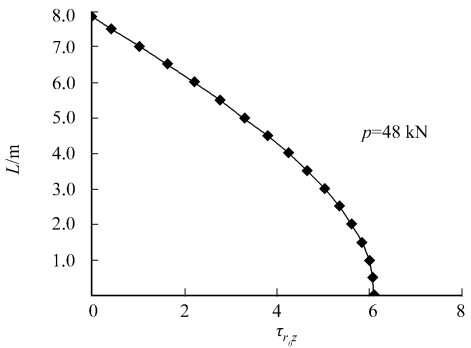


图 4 桩侧摩阻力分布图

Fig. 4 Distribution of skin friction on pile

3 结 论

根据假定的位移模式及有效桩长的定义出发分析了柔性桩单桩荷载传递规律,得到了桩身应力、桩侧摩阻力和有效桩长的计算表达式. 桩身应力分布形式与郭忠贤的试验结果比较一致;桩侧摩阻力分布形式与段继伟的试验结果一致;有效桩长跟更接近试验值,且比建议取值稍大,说明了利用文中推导的公式进行设计计算,对于工程更加安全.

参考文献:

[1] 叶观宝,叶书麟,章关福. 深层搅拌桩桩身荷载传递量测与分析[C]// 第三届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州:浙江大学出版社,1992:136-139.

[2] 段继伟. 柔性桩复合地基的数值分析[D]. 杭州:浙江大学,1993.

[3] 陈善雄. 柔性桩荷载传递特性与有效桩长分析[J]. 岩土工程师,1995,7(3):1-7.

[4] 吴雄志. 水泥土桩单桩荷载传递及临界桩长研究[J]. 岩土力学,2004,25(9):1491-1494.

[5] 郭忠贤,杨志红,王占雷. 夯实水泥土桩荷载传递规律的试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(11):2020-2024.

[6] 李海芳. 路堤荷载下复合地基沉降计算方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.

[7] COOKE R W, PRICE G, TARR K J. Jacked pile in London clay: A study of load transfer and settlement under working conditions[J]. Geotechnique,1979,29(2):113-147.

[8] 舒翔,王福忠. 确定柔性桩复合地基有效桩长的简化方法[J]. 工业建筑,2001,31(11):16-17.

[9] 俞缙,周亦涛,鲍胜,等. 柔性桩承式加筋路堤桩土应力比分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(5):705-713.

Analysis of Load Transfer Law of Single Deformable Piles
Based on Displacement Mode

CAI Yan-yan¹, ZHOU Yi-tao², ZHENG Chun-ting¹,
QI Zhi-bo¹, CHEN Xu¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China
2. Department of Transportation Engineering, Hebei Engineering and Technical College, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Based on the pile-soil displacement coordination, and the definition of effective length of single deformable pile, by improving the Alamgir displacement mode which was brought forward by LI Hai-fang, the load transfer law of deformable piles was analyzed when the maximum skin friction on piles is on the top of the pile. New formulas for axial stress, skin friction and effective pile length were proposed. The calculation result shows that the distribution of the axial stress and skin friction on pile is in accordance with the test result. The maximum values of axial stress and skin friction are located on the top of the pile. The theoretical value of effective length of pile agrees well with the test result, and is a bit greater than the value advised by DUAN Ji-wei.

Keywords: displacement mode; deformable pile; effective length; friction resistance; pile stress

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)