

水泥搅拌桩桩长的优化设计

赵东亮

(山东省中鲁建筑设计院, 济南 250014)

【摘要】 水泥搅拌桩桩长是复合地基设计中的一个主要参数。桩长应控制在有效桩长范围内。有效桩长不仅与桩土特性有关, 还与群桩及荷载分布有关。桩-桩相互作用降低了桩的刚度, 并使群桩的有效桩长加大了。采用以变形控制确定水泥搅拌桩桩长是优化设计的新方法。

【关键词】 有效桩长; 桩长设计; 沉降控制; 荷载分布; 群桩影响

【中图分类号】 TU 473.1

Optimum Design of Cement Mixing Pile Length

【Abstract】 Pile length is a key parameter in cement mixing pile composite foundation design. The pile length must be limited within the effective length of cement mixing piles. The effective length of piles not only depends on soil and pile characteristic, but also depends on grouped piles and loads distribution. The pile stiffness is reduced by the pile-pile interaction and the effective length of piles becomes longer. A new optimum design method of cement mixing pile length is to control the composite foundation settlement to get a desired numerical value.

【Key words】 effective length; length design; settlement control; loads distribution; grouped piles influence

0 引言

水泥搅拌桩作为复合地基的一种形式, 以其造价低, 环境污染少, 无排土隆起, 设计灵活, 施工速度较快等特点, 在软土地区一般民用建筑地基处理、深基坑支护等方面得到广泛应用。随着工程实践的不断发展, 水泥搅拌桩复合地基在高层建筑、坝和黄土地区也得到应用, 其应用范围在不断扩展。

桩长是水泥搅拌桩复合地基设计中的重要参数, 超过有效桩长部分则只能对软土起置换作用, 可提高软土的复合模量, 对减少沉降起一定作用。对于水泥搅拌桩复合地基, 当面积置换率一定情况下, 桩越长则沉降越小, 但其经济效益越差。在复合地基允许沉降内, 合理确定桩长是优化设计的重要内容。

1 单桩荷载下有效桩长的确定

水泥搅拌桩属半刚性桩, 在土性和桩径一

定前提下, 单桩承载力随桩长的增加而提高, 但当桩长增加至一定深度时, 单桩承载力将趋于某一定值, 此时的桩长称为有效桩长。一般利用桩的刚度达到无限长桩刚度的 90% 时的桩长, 或者取桩身轴力占总荷载的 10% 处的深度近似认为单桩的有效桩长。从对减少沉降角度考虑, 采用刚度定义推导有效桩长更合理些。

水泥搅拌桩与土体是共同工作的, 桩和土为一复合体, 在分析时可假定水泥搅拌桩与土体不产生相对滑移, 此假定比刚性桩与土体间不产生相对滑移的假定更为符合实际, 同时认为桩上荷载由桩侧摩阻力承担, 土体为均质各向同性体, 剪切模量 G_s 为常数。根据以上假定, 可按库克 (Cooke, 1974) 提出的摩擦桩荷载传递物理模型-剪切变形传递法推导出半刚性桩 (可压缩桩) 的有效桩长。

桩侧土沉降 s_s 为:

$$s_s = \frac{P}{2\pi L G_s} \ln\left(\frac{2r_m}{d}\right) \quad (1)$$

式中: P 为桩在工作荷载下发挥的桩侧摩阻力, kN; r_m 为土体中剪切变形可忽略的最大半径, m; d 为桩径, m; L 为桩长, m。

r_m 的影响半径远没有弹性理论确定的那么大, 一般实测为 $6 \sim 12 d$, 可取 $10 d$ 。土体对桩的作用可模拟为桩侧面作用有刚度系数为 K_s (单位桩长) 的一系列弹簧^[1], 则:

$$K_s = \frac{P}{s_s L} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{2r_m}{d}\right)} G_s = \delta G_s \quad (2)$$

$$\text{式中: } \delta = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{2r_m}{d}\right)} \quad (3)$$

伦道夫 (Randolph) 等提出桩端可作为刚性墩, 按弹性力学方法计算桩端沉降 s_b ,

$$s_b = \frac{P_b(1-\nu_b)}{2dG_b} \quad (4)$$

式中: P_b 为桩端阻力 kN; ν_b 为桩端土泊松比。

以 $G_b = \frac{E_b}{2(1+\nu_b)}$ 代入式(4), 可得

$$s_b = \frac{P_b(1-\nu_b^2)}{dE_b} \quad (5)$$

桩端刚度 K_b 为:

$$K_b = \frac{P_b}{s_b} = \frac{dE_b}{1-\nu_b^2} \quad (6)$$

桩顶荷载 P_0 与桩顶沉降 s_0 之间的关系为^[2]:

$$s_0 = P_0 \left[1 + \frac{K_b}{A_p E_p} \frac{\text{th}(\lambda L)}{\lambda} \right] \times \left[K_b + K_s \frac{\text{th}(\lambda L)}{\lambda} \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: A_p 为桩截面积, m^2 ; E_p 为桩体模量, MPa; L 为桩长, m; λ 为文克尔模型下荷载传递系数, 可视为常量。

$$\lambda = \left(\frac{\delta G_s}{E_p A_p} \right)^{1/2} \quad (8)$$

桩顶刚度 K_0 为:

$$K_0 = \frac{P_0}{s_0} = E_p A_p \lambda \frac{\Omega + \text{th}(\lambda L)}{1 + \Omega \text{th}(\lambda L)} \quad (9)$$

式中: Ω 为桩端相对刚度, 为量纲一的参数,

$$\Omega = \frac{K_b}{E_p A_p \lambda} \quad (10)$$

式(9)可变换为量纲一的形式:

$$\frac{K_0}{E_p A_p \lambda} = \frac{\Omega + \text{th}(\lambda L)}{1 + \Omega \text{th}(\lambda L)} \quad (11)$$

上式中等号左边表示桩长为 L 、桩底相对刚度为 Ω 时的桩顶相对刚度为量纲一的参数, 当 $\Omega=1$ 时表示无限长桩, 其桩顶刚度达最大, $K_0 = E_p A_p \lambda$ 。

水泥搅拌桩一般可视为纯摩擦桩 ($\Omega=0$), 或端承作用较小的桩, 如桩端刚度为无限长桩的 0.1 ($\Omega=0.1$); 但无论取 $\Omega=0, 0.1$ 或 0.2 , 当桩长 L 变化时, 对 $0 < \lambda L \leq 0.5$ 时, $K_0/E_p A_p \lambda$ 随 L 呈线性增长, 即桩顶刚度是线性增长; 当 $\lambda L > 0.50$ 时, 桩顶相对刚度随 L 的加长增长逐渐变缓。当 $\lambda L \approx 1.50$ 时, 桩顶相对刚度达到无限长桩刚度的 90% , 即 $K_0/E_p A_p \lambda = 0.9$; 当 $\lambda L > 1.50$ 时, 随着桩长 L 的加长, 桩顶相对刚度增加甚微, 其曲线变得非常平滑。可取 $\lambda L = 1.50$ 时的桩长作为有效桩长或临界桩长 L_c ^[1]。

取 $\lambda L_c = 1.50$ 并代入式(8), 得

$$\frac{1.5}{L_c} = \left(\frac{\delta G_s}{E_p A_p} \right)^{1/2} \quad (12)$$

取 $r_m = 10d$ 代入式(3), 得 $\delta = 2.096$, 以

$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$, $\nu_s = 0.5$, $A_p = \frac{1}{4}\pi d^2$ 代入式(12), 可推导出有效桩长关系如下:

$$\frac{L_c}{d} \approx 1.6 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{1/2} \quad (13)$$

式(13)与纯摩擦桩有效桩长表达式 (Hull, 1987) (式(14)) 具有相近的结果^[3]。

$$\frac{L_c}{d} = \left(\pi \frac{A_p E_p}{E_s d^2} \right)^{1/2} = 1.57 \left(\frac{E_p}{E_s} \right)^{1/2} \quad (14)$$

式(13)的大小主要依赖于 r_m 的取值。式(13)表达式中的模量是在弹性模量下导得的,当用压缩模量代入时会有一定的误差。

水泥搅拌桩 E_p/E_s 比值通常为 60~100,代入式(13)有: $L/d=12.4\sim 16d$,与实测值较为接近^[4]。

段继伟^[4]通过现场足尺寸试验,研究了单根水泥搅拌桩的荷载传递规律,得出传至桩端的荷载所占比例很小,桩的变形、轴力和侧摩阻力主要集中在有效桩长范围内;并测得水泥掺量为 15% 的水泥搅拌桩的有效桩长为 17d,单桩带台为 17.7d。在弹性范围内,采用有限元计算的桩身应力与实测值一致。

2 群桩荷载下的有效桩长

对于群桩,在桩顶荷载相同情况下,基底以下桩的附加应力场和位移场各自叠加,使得附加应力场和位移场加大并向深处传递,桩顶位移由于桩-桩相互作用加大了。桩顶位移的加大实际上等于降低了单桩的刚度,此时群桩荷载下的单桩刚度达不到单桩荷载下的刚度,也即达不到无限长桩刚度的 90%,要使群桩荷载下的单桩刚度达到无限长桩刚度的 90% 就需要增加桩长,由此可得出群桩荷载下的有效桩长加长了。

设 f_{ij} 为第 j 颗桩对第 i 棵桩的作用系数,由于桩-桩相互作用使得第 i 颗桩的位移加大为:

$$s_i = (1 + \sum_{j=1}^n f_{ij}) s_0 = (1 + \alpha_i) s_0 \quad (15)$$

式中:当桩间距 $r \geq r_m$ 时, $f_{ij} = 0$

桩的刚度降低至 $\frac{1}{1 + \alpha_i}$

从式(15)可以看出,位于群桩荷载下的中心桩,由于受四周桩的影响最多,在相同荷载情况下,其刚度最小,而边桩次之,角桩的刚度最大;这也能说明具有一定刚度承台下的群桩中,实测中心桩受荷最小,边桩次之,而角桩承担的荷载最大的原因。

水泥搅拌桩的桩距较小,桩-桩相互作用

结果导致群桩中的单桩刚度大幅度降低,其有效桩长将成倍增加,使得在常用经济桩长范围内桩的刚度可全长发挥作用。

何开胜等^[5]对一群桩荷载下的水泥搅拌桩工程进行了实测,该工程为一直径 60m 的 5万 m^3 的油罐,位于长江下游河漫滩,复合地基承载力设计值为 240 kPa,桩长为 16.2~26m,桩径 700mm, $L/d=23.1\sim 37.1$,总体置换率 > 0.31 ,由于桩-桩及桩-土共同作用,使得搅拌桩刚度大幅降低,从现场实测得到的中心桩和边桩的桩身轴力及桩侧摩阻力沿深度的分布曲线看,只要桩身中下部水泥石强度有保证,群桩中的桩身轴力有效深度可达 25m 以上,其有效桩长可全长有效。

张忠坤等^[6]基于沉降变形定义的概念,通过有限元数值分析研究了桩土模量比及荷载分布情况对柔性桩临界桩长的影响,得出在大面积荷载作用下的中心桩未表现出有效桩长;对路堤荷载作用下的复合地基可视为平面问题,对于置换率 4.5%, $B/d=28$ 的复合地基,其有效桩长有如下规律:

$$K_p/K_s=10 \text{ 时, } L_c=0.7B;$$

$$K_p/K_s=50 \text{ 时, } L_c=1.48B;$$

$$K_p/K_s=100 \text{ 时, } L_c=2.0B;$$

$$K_p/K_s=200 \text{ 时, } L_c=2.4B;$$

$$K_p/K_s=500 \text{ 时, } L_c=3.2B.$$

其中 K_p, K_s 分别表示围压为 1 个大气压时桩、土弹性模量与大气压强的比值。

从以上分析可见,在群桩荷载下的有效桩长已远超出单桩荷载下的有效桩长,对路堤置换率较低的情况,水泥搅拌桩 L_c 介于 1.4~2.4B,住宅工程的有效桩长均值也在 20m 左右。目前国内水泥搅拌桩最深为 26m 左右,一般工程多在 10m 左右,太长则不经济。如假定群桩荷载下单桩刚度折减为 0.5,近似认为桩长与刚度成线性关系(实际上 $\lambda L > 0.5$ 时,刚度的增加缓慢于桩长的增加),如单桩有效桩长 $L_c=12.4\sim 16d$,群桩荷载下有效桩

长应为 $L_c = 25 \sim 32$ d, 对于 $\phi 500$ 桩, $L_c = 12.5 \sim 16$ m, 如要充分发挥其强度, 增加水泥掺量已不经济。

3 采用变形控制优化桩长

选择桩径比较简单, 在优化置换率前提下, 应以沉降控制优化桩长。在沉降容许范围内、以及置换率、水泥掺量及土性等一定条件下, 桩长越短, 复合地基沉降也越大, 但其经济效益也更显著。

在设计中可采用如下方法优化水泥搅拌桩桩长:

1) 可采用式(13)确定单桩荷载下的有效桩长 L_c , 验算加固深度 L_c 是否满足软弱下卧层承载力要求, 否则应加长 L_c 至满足为止; 如计算出的 L_c 值与下卧层较好土层深度相差不大时, L_c 取至较好土层顶面深度;

2) 以 L_c 控制桩身强度, 使桩身强度略高于由土体提供的单桩承载力标准值, 如计算出的水泥掺量不在加固土重的 $7\% \sim 15\%$ 范围且出入太大, 则应调整置换率 m 及 L_c ;

3) 进行复合地基沉降计算, 软土地区多层住宅沉降实测值大多在 $70 \sim 100$ mm 范围, 可以以此为参照值进行沉降控制, 当计算出的沉降过大或过小时应相应加长或减短桩长, 并重复以上计算至达预定的沉降值止。

采用以变形控制为原则合理选择桩长会获得更多的经济效益, 但到目前为止, 无论采用哪种地基形式, 以及选用哪种沉降计算方法所计算出的沉降精度, 其统计结果远小于承载力的计算精度, 从而使计算出的优化桩长与实际情况会产生较大的误差。因此在确定桩长时, 还应综合考虑土性、桩身强度、下卧层及施工条件等因素的影响, 同时还应考虑适当的嵌

固深度。

4 结 论

1) 水泥搅拌桩的有效桩长不仅与桩土模量比、桩径、桩间距有关外, 还与群桩荷载作用有关。桩与桩的相互作用加大了桩顶的沉降, 降低了桩的刚度, 使群桩荷载下的有效桩长将成倍增加。从单桩到群桩, 水泥搅拌桩的有效桩长具有从短到长的变化规律。

2) 在实际工作中, 由于水泥搅拌桩面积置换率较高, 桩间距较小, 桩-桩相互作用过大, 水泥搅拌桩在现有加固深度范围内, 使得群桩荷载作用下的桩长几乎全长有效。

3) 水泥搅拌桩复合地基对天然地基承载力的提高幅度有限, 若采用群桩荷载下的有效桩长为桩长, 会使水泥搅拌桩桩长过长, 从经济角度考虑已不适宜。设计中可采用以变形控制为目标, 合理选择桩长, 使水泥搅拌桩复合地基沉降值控制在适当的范围内, 这是水泥搅拌桩复合地基优化设计的途径。

参 考 文 献

- 1 Mylanakis G, Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. *Geotechniques*, 1998, 48(1): 55~72
- 2 沈珠江. 理论土力学. 北京: 中国水力水电出版社, 2000; 114~116
- 3 H G Poulos. Pile behaviour-theory and application. *Geotechniques*, 1989, 39(3): 365~415
- 4 段继伟, 龚晓南, 曾国熙. 水泥搅拌桩荷载传递规律. *岩土工程学报*, 1994, 16(4): 1~7
- 5 何开胜, 徐立新. 超长水泥土搅拌桩的荷载传递特性. *建筑结构*, 2000, 30(5): 17~19
- 6 强忠坤, 殷宗泽, 曹正康. 复合地基临界桩长的研究. *岩土工程学报*, 1999, 21(2): 184~188

收稿日期: 2001-10-19