

复杂环境基坑支护方案的综合设计

李光宏

(河北省地矿局第九地质大队,河北 邢台 054000)

摘要:城市建筑基坑附近工程地质环境大都比较复杂,施工空间狭小。采用一般支护方法如桩锚结构,由于受基坑附近建筑物地基中桩体的影响而无法施工;对于基坑边坡土层抗剪强度较低,支护桩嵌入长度较长的,施工难度就更大。本文结合邢台市东部某场地实际案例进行综合设计,采用双排桩+桩中间设置止水帷幕+地基加固,进行基坑支护。双排桩可以提高边坡刚度,桩中间设置止水帷幕可以节约施工空间,有利于解决施工空间的限制问题,可提高地基的抗剪强度,缩短支护桩长度。

关键词:基坑支护;双排桩;止水帷幕;地基加固

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)09-0080-04

Comprehensive Design of Foundation Pit Support Scheme in Complex Environment/LI Guang-hong (9th Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Xingtai Hebei 054000, China)

Abstract: Most of the engineering geological environments near the foundation pit of urban buildings are complex with narrow construction space. The general supporting methods, such as pile-anchor structure, can not be used because of the influence of the existed piles of the around buildings. It is more difficult for the construction when low shear strength of foundation pit slope soil layer and long embedded length of the supporting pile are encountered. Combined with a comprehensive design in Xingtai City, this paper presents a foundation pit support project with double-row piles + water-proof curtain between piles + foundation reinforcement. Double-row piles can increase the slope stiffness, water-proof curtain between piles can save the construction space and is helpful to solve construction space restriction, improve the shear strength of the foundation and shorten the length of supporting piles.

Key words: foundation pit support; double-row piles; water-proof curtain; foundation reinforcement

1 概述

邢台市东部某场地基坑附近建筑物距离该基坑较近,管道纵横交错,沉降敏感,施工空间有限;基坑附近建筑物多为砖混结构,条形基础,地基已经水泥搅拌桩处理,致护坡桩类型受限制;地层条件较差;地下水埋深较浅,基础施工需降水;施工场地位于居民区内,施工环境要求苛刻等。在基坑支护设计施工中必须考虑各种因素,在复杂环境下综合设计,才可制定出经济上合理,安全上有保证,环境上许可,技术符合规范科学可行的方案。

该案例基坑深度 6.9 m,基坑边缘四周相距 5~7 m 为 6~7 层住宅楼(砖混结构,条基,埋深 1.5 m),水泥土搅拌桩复合地基,桩长 8 m。住宅楼与基坑之间在平行基坑边缘方向分布有多条煤气、输水管道。基坑边缘距离用地红线 3 m。地层情况见表 1。地下水埋深 3.0 m,含水层性质为孔隙水,地

下水基本类型为潜水,对混凝土腐蚀性微。

表 1 场地地层情况

层号	岩土名称	厚度/ m	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
①	杂填土	0.5	18.0	10.0	15.0
②	粉土	5.1	19.1	15.0	31.5
③	粉质粘土	4.3	18.9	33.1	11.3
④	粉土	3.0	19.0	11.1	24.9

2 支护方案

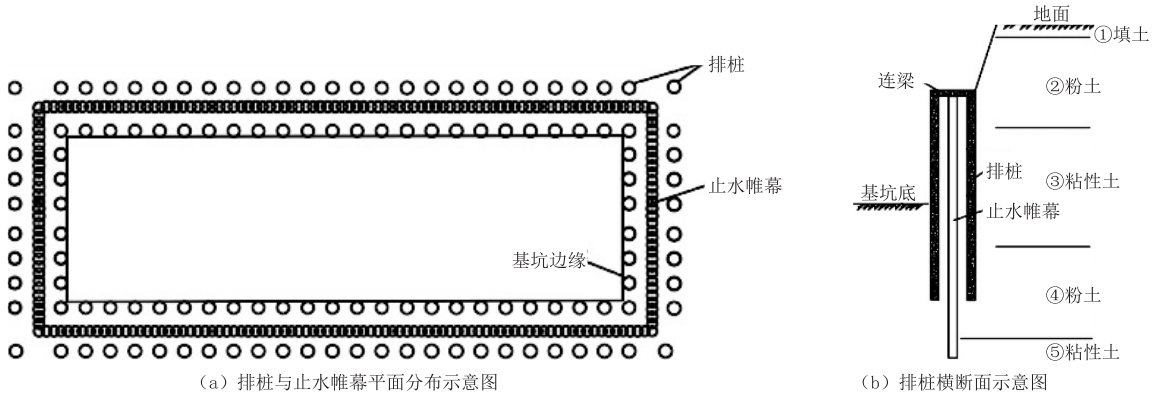
根据以往经验,水位至少需降深 5.0 m,但是这样做肯定对基坑附近已有建筑物产生不利影响,即引起附近建筑物地基变形严重超出规范要求。同时,拟建场地在雨季施工,地下水位变化较大,边坡稳定性差,可能威胁到附近地上建筑物及地下构筑物安全使用。因此,必须保证基坑边坡及附近建筑物地基变形要足够小,该基坑应为一类基坑。采用

收稿日期:2018-07-20;修回日期:2018-08-20

作者简介:李光宏,男,汉族,1969年生,副队长,高级工程师,探矿工程专业,从事地质工程技术与管理工,河北省邢台市钢铁北路 416 号,lg691001@126.com。

一般桩锚支护方法,可能要破坏基坑附近已建建筑物地基(破坏水泥土状)。综合场地环境、地基地质条件和水文条件,在基坑四周采用双排桩支护,双排桩之间设置水泥搅拌桩止水帷幕的方案(参见图

1)。考虑到基坑内土层抗剪强度指标较低,导致双排桩较长,因此,必须提高基坑底以下土层抗剪强度,需对基坑底地基土进行必要的加固。



(a) 排桩与止水帷幕平面分布示意图

(b) 排桩横断面示意图

图 1 双排桩支护加止水帷幕示意图

2.1 地基加固

为了提高排桩基坑底以下土层反力,桩前 10 m 范围,采用水泥土桩进行地基土加固处理。设地基土加固桩间距 1.0 m,加固深度 3.5 m,水泥土搅拌桩抗压强度取 2.5 MPa。根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)有关规定,搅拌桩最大剪力设计值取 0.352 MPa,按其置换率进行折算, $0.352 \times 0.2 = 0.074 \text{ MPa} = 74 \text{ kPa}$ 。由于③层粉质粘土粘聚力为 33.1 kPa,则加固后地基土抗剪强度保守取 90 kPa,加固后土的 c 、 φ 值综合取 $c = 30 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 5^\circ$ 。

2.2 排桩计算

周围建筑物附加荷载取 140 kPa,基础埋深 1.5 m,基坑边缘至建筑物之间附加荷载取 15 kPa。采用理正深基坑支护软件进行计算。

桩间距 1.2 m,桩直径 0.60 m,排间距 2.1 m,桩长均为 9 m,嵌固深度 4.5 m,冠梁和连梁横截面长 0.70 m、高 0.40 m。混凝土等级 C25,保护层厚度 50 mm。应业主要求,为了不影响将来地下各种管道等铺设施工,桩顶标高位于地面下 2.4 m,桩顶之上坡面(坡度系数 0.3)采用喷射混凝土(强度 C20)护面。桩及冠梁主筋及加强筋均采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB300 级钢筋。本工程此段采用的钻孔灌注桩的桩径为 600 mm,桩心距 1200 mm,砼强度 C30, $f_c = 14.3 \text{ MPa}$,主筋 8 Φ 18 钢筋,均匀布置, $f_y = 360 \text{ MPa}$,保护层厚度 50 mm, $\Phi 8 @ 200$ 螺旋筋, $\Phi 14 @ 2000$ 加强筋。

双排桩采用平面钢架结构模型进行计算,显然前排桩受水平荷载大于后排桩,保守计算并考虑便于施工,前后排桩均采用前排桩水平荷载计算配筋。

2.2.1 桩截面配筋计算

2.2.1.1 水平荷载及排桩上最大弯矩计算

依据朗肯公式进行计算:

$$P_{ak} = \sigma_{ak} K_{a,i} - 2c_i \sqrt{K_{a,i}}$$

$$P_{pk} = \sigma_{pk} K_{p,i} - 2c_i \sqrt{K_{p,i}}$$

式中: P_{ak} ——支护结构外侧,第 i 层土中计算中点的主动土压力强度标准值, kPa; P_{pk} ——支护结构内侧,第 i 层土中计算中点的被动土压力强度标准值, kPa; σ_{ak} 、 σ_{pk} ——分别为支护结构外侧、内侧计算点的土中竖向应力标准值, kPa; $K_{a,i}$ 、 $K_{p,i}$ ——分别为第 i 层土的主动土压力系数、被动土压力系数, $K_{a,i} = \tan^2(45^\circ - \varphi_i/2)$, $K_{p,i} = \tan^2(45^\circ + \varphi_i/2)$; c_i ——第 i 层土的粘聚力, kPa; φ_i ——第 i 层土的内摩擦角, ($^\circ$)。

经以上公式计算出支护结构深度方向上,单点单位面积上主动土与被动土土压力后,再计算单根桩所承担主动土合力(E_{ak})和被动土合力(E_{pk}):

$$E_{ak} = \frac{1}{2} (P_{ak}^i + P_{ak}^{i+1}) hl$$

$$E_{pk} = \frac{1}{2} (P_{pk}^i + P_{pk}^{i+1}) hl$$

式中: E_{ak} ——合力梯形主动土合力, kN; P_{ak}^i 、 P_{ak}^{i+1} 、 P_{pk}^i 、 P_{pk}^{i+1} ——分别为计算 i 层土合力梯形上下边长, m; h ——合力梯形高度, m; l ——合力

梯形计算宽度, m ; E_{pk} ——合力梯形被动土合力, kN 。

经计算: 基坑外侧主动土压力 $E_{ak} = 659.78 kN$, 基坑内侧被动土压力 $E_{pk} = 1562.94 kN$ 。

根据沿桩压力分布, 再采用截面法计算每根桩所承受的最大弯矩(M_{max}):

排桩上最大弯矩 $M_{max} = 89.18 kN \cdot m$ 。

将排桩上最大弯矩值 $M_{max} = 89.18 kN \cdot m$ 乘以支护重要性系数(取 1.1)及综合分项系数(取 1.25), 即得桩的弯矩设计值为 $M = 122.62 kN \cdot m$ 。

2.2.1.2 配筋计算

根据有关规范, 沿桩周边均匀配置纵向钢筋的圆形截面钢筋混凝土桩, 其正截面受弯承载力应符合下列规定:

$$M \leq \frac{2}{3} f_c A r \frac{\sin^3(\pi\alpha)}{\pi} + f_y A_s r_s \frac{\sin(\pi\alpha) + \sin(\pi\alpha_t)}{\pi} = [M]$$

$$\alpha f_c A \left(1 - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi\alpha}\right) + (\alpha - \alpha_t) f_y A_s = 0$$

$$\alpha_t = 1.25 - 2\alpha$$

式中: M ——桩的弯矩设计值, 取 $122.62 kN \cdot m$; f_c ——混凝土抗压强度设计值, 取 $14.3 MPa$ (砼强度 C30); A ——支护桩截面面积, 取 $0.28 m^2$; r ——支护桩的半径, 取 $0.3 m$; α ——对应于受压区混凝土截面面积的圆心角(rad)于 2π 的比值; f_y ——纵向钢筋的抗拉强度设计值, 取 $360 N/mm^2$; A_s ——全部纵向钢筋的截面面积, 预定主筋 8 根, 种类为 HRB400, 直径 $18 mm$, 则其全部截面积值为 $0.002036 m^2$; r_s ——纵向钢筋重心所在圆周的半径, 桩保护层取 $50 mm$, 则其半径为 $0.241 m$; α_t ——纵向受拉钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值。

计算得 $[M] = 133.77 kN \cdot m$ 。

$M = 122.62 kN \cdot m < [M] = 133.77 kN \cdot m$, 满足要求。

同时据规范要求, 配筋率 $\rho = A_s/A = 7.3\%$, 大于规范规定最小配筋率 $\rho_{min} = 4\%$, 满足设计要求。

所以本区段采用直径 $600 mm$ 的钻孔灌注桩, 主筋为 $8\phi 18$ 钢筋, 满足有关规范要求。

2.2.2 桩连梁配筋计算

连梁高度 $h = 0.4 m$, 宽度 $b = 0.7 m$, 保护层厚 $50 mm$, 按照平面钢架结构模型进行计算。

连梁内力计算结果见表 2。

表 2 连梁内力计算结果

内力类型	连梁上侧最大弯矩/($kN \cdot m$)	连梁下侧最大弯矩/($kN \cdot m$)	最大剪力/ kN
内力计算值	19.54	23.20	22.31
内力设计值	22.87	31.90	30.67
内力实用值	22.87	31.90	30.67

注: 按有关规范要求, 表中内力计算值乘以支护重要性系数(取 1.1)及综合分项系数(取 1.25)得内力设计值, 本设计内力实用值取内力设计值。

依据表 2 中弯矩值计算连梁配筋, 结果见表 3。

表 3 连梁配筋计算结果

选筋类型	级别	钢筋实配值	实配[计算]面积/(mm^2 或 $mm^2 \cdot m^{-1}$)
连梁上侧纵筋	HRB400	4E14	616[560]
连梁下侧纵筋	HRB400	4E14	616[560]
箍筋	HPB300	d12@200	1131[790]

注: 表中 E 表示 HRB400 钢筋, d 表示 HPB300 钢筋。

2.2.3 双排桩抗倾覆稳定性验算

抗倾覆安全系数 $K_Q < 1.25$ 。经计算, 基坑外侧主动土压力 $E_{ak} = 659.78 kN$, 其合力作用点至双排桩底端的距离 $Z_a = 2.90 m$; 基坑内侧被动土压力 $E_{pk} = 1562.94 kN$, 其合力作用点至双排桩底端的距离 $Z_p = 2.13 m$; 双排桩、钢架梁和桩间土的自重之和 $G = 321.74 kN$, 其重心至前排桩边缘的距离 $Z_G = 1.35 m$ 。将以上参数代入下式进行计算:

$$K_Q = \frac{E_{pk} Z_p + G Z_G}{E_{ak} Z_a}$$

经计算抗倾覆稳定性系数 $K_Q = 1.96 > 1.25$, 满足要求。

2.2.4 整体稳定验算

计算方法采用瑞典条分法, 即将图 2 圆弧滑动面上, 划分宽度为 $1 m$ 的土条, 进行近似计算; 应力状态为总应力法。

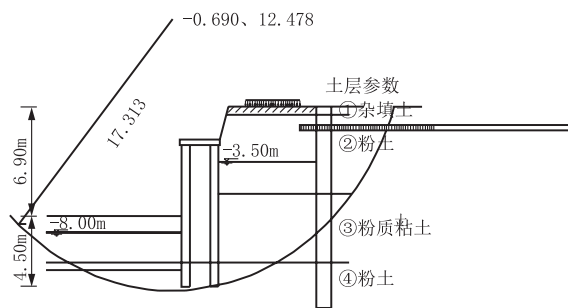


图 2 整体稳定性验算简图

滑动稳定性按下列公式计算, 依据《建筑基坑支

护技术规程》(JGJ 120—2012)第 4.2.4 条:

$$\min\{K_{s,1}, K_{s,2}, K_{s,i}, \dots\} \geq K_s$$

$$K_{s,i} = \frac{\sum \{c_j l_j + [(q_j b_j + \Delta G_j) \cos \theta_j - u_j l_j] \tan \varphi_j\}}{\sum (q_j b_j + \Delta G_j) \sin \theta_j}$$

式中: K_s ——圆弧滑动稳定安全系数,这里取 1.35; $K_{s,i}$ ——第 i 个圆弧滑动体的抗滑力矩与滑动力矩的比值(抗滑力矩与滑动力矩之比的最小值通过搜索不同圆心及半径的所有潜在滑动圆弧确定); c_j ——第 j 土条滑弧面处土的粘聚力, kPa; φ_j ——第 j 土条滑弧面处土的内摩擦角, ($^\circ$); b_j ——第 j 土条的宽度, m; θ_j ——第 j 土条滑弧面中点处的法线与垂直面的夹角, ($^\circ$); l_j ——第 j 土条的滑弧长度, m, $l_i = b_j / \cos \theta_j$; q_j ——第 j 土条上的附加荷载标准值, kPa; ΔG_j ——第 j 土条的自重(按天然重度计算), kN; u_j ——第 j 土条滑弧面上的水压力, kPa。

经计算,整体稳定安全系数 $K_s = 1.38 > 1.35$, 整体稳定性满足有关规范要求。

2.3 水泥土搅拌桩

单根搅拌桩止水帷幕桩径 500 mm, 桩与桩有效搭接不小于 150 mm, 进入基坑底部以下不透水层(⑤层粉质粘土)长度 < 1 m, 止水帷幕桩顶标高 -2.80 m, 桩底标高 -15.00 m, 位于双排桩之间, 采用 P. S32.5 水泥, 水灰比 0.5, 水泥掺入比不小于被加固土重的 15%, 采用湿法施工, 整桩复搅。

该工程 2014 年 3 月基坑支护施工完成, 2017 年 8 月基坑回填, 对基坑边坡及附近建筑物观测, 坡顶水平最大位移 8 mm, 垂直最大位移 3 mm, 附近建筑物地基局部倾斜最大值 7×10^{-4} , 变形均满足设计及规范要求, 取得了较好的支护效果。

3 结语

(1) 由于拟建基坑四周附近建筑物地基为水泥土搅拌桩复合地基, 无法采用桩锚组合进行支护, 采用双排桩, 可以明显增加排桩支护刚度, 避免影响邻近建筑物地基。

(2) 基坑底以下土层抗剪强度指标较小, 提供不到足够反力, 可通过对基坑底土层适当加固处理, 可明显提高土层抗剪强度, 缩短排桩嵌入深度, 以降低排桩施工难度, 提供经济收益率。

(3) 在排桩中间设置止水帷幕, 可减小地面占用空间, 对城市内有效施工空间狭小类似情况有借鉴意义。

参考文献:

- [1] 吴厚信, 陈国勇, 周宏益, 等. 大直径深层旋喷搅拌桩在吴胜大厦深基坑支护工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(4): 58—61.
- [2] 周宏益, 吴厚信. 止水—加型土钉墙在软弱土层基坑支护中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(8): 46—50.
- [3] 刘作昌. 深基坑支护技术在新泰盛世佳苑基坑工程中的应用[J]. 化工矿产地质, 2010, 32(4): 248—251.
- [4] 朱彦鹏, 董建华. 土钉支护边坡动力模型的建立及地震响应分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1013—1022.
- [5] 张凯, 谢弘师. SMW 工法在淤泥层深基坑支护中的应用[J]. 上海地质, 2009, (2): 30—33.
- [6] 梁成华, 王之军, 吕海滨. 桩间特定深度帷幕止水在深大基坑工程中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(5): 64—66.
- [7] 张怀文, 高全臣, 杨文莉. 某深基坑工程边坡变形失稳致因及处理对策[J]. 岩土工程技术, 2010, 24(3): 126—130.
- [8] 陈林靖, 戴自航. 基坑悬臂支护桩双参数弹性地基杆系有限元法[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 415—419.
- [9] 康和勇, 吴取渗, 刘建茂. 用双头深层搅拌桩施工止水帷幕的新工法研究[J]. 地质找矿论丛, 2009, 24(1): 87—90.
- [10] 王超, 隆威, 姚翠霞, 等. 长沙亚商国际大厦边坡垮塌事故分析及治理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(2): 46—49.
- [11] 编写组. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [12] JGJ 120—2010, 建筑基坑技术规范[S].
- [13] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- [14] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [15] 刘兴远, 雷用, 康景文. 边坡工程——设计·监测·鉴定与加固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [16] 赵树德. 土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [17] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.