

清明上河园地下停车场基坑稳定性分析

王利宾，孔德志

(河南大学土木建筑学院，河南 开封 475004)

摘要：开封市清明上河园地下停车场处于地下水位比较发达的软弱土层地区，通过对备选的可行性方案的比较，选择复合土钉墙加灌注桩支护方案。通过对其稳定性进行分析，证明了复合土钉墙加灌注桩支护结构是一种较好的、较安全的支护体系，具有较强的可行性。通过与监测报告进行比较，进一步证明了该方案的可行性和有效性。

关键词：桩锚体系；土压力；抗倾覆稳定性；抗滑移稳定性

中图分类号：TU354 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)S2-0433-04

作者简介：王利宾(1987-)，硕士。从事地下结构与基础工程方面的研究。E-mail: wanglibin912@163.com。

Stability analysis of foundation pit of underground parking lot of Qingmingshangheyuan

WANG Li-bin, KONG De-zhi

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The underground parking lot of Qingmingshangheyuan in Kaifeng is located in weak soil layer with flourishing underground water table. After comparison of feasibility schemes, the composite soil nailing wall and cast-in-place piles are selected. Through stability analysis, the composite soil nailing wall and cast-in-place piles are satisfactory and feasible support system. Based on the examination report, the feasibility and effectiveness of the proposed scheme are validated.

Key words: pile-anchor system; soil pressure; stability against overturning; stability against sliding

0 引言

近年来，随着城市现代化建设的不断推进，经济水平的高速发展，人们生活水平的不断提高，城市中的中小型车辆也越来越多，随之带来的问题就是车位紧张，停车难的问题。因而城市三维空间的拓展，在地下兴建停车场，在现代城市建设中具有重要的现实意义。由于停车场多建于城市的繁华地段，在施工中不仅要保证工程本身的安全，同时还要对工程周围建筑物和城市管线以及已有设备进行有效的保护。因此，进行必要的基坑支护是地下停车场建设中的一项重要内容。本文结合清明上河园地下停车场的工程实践，对透水性较强的软弱土层中的有效的基坑支护方式进行了探讨，并对基坑的稳定性进行了分析。

1 工程概况

清明上河园地下停车场位于河南开封城西北隅，西边为清明上河园，北边为公路，西南边为办公楼，东边为公路，平面图如图1所示。基坑长96.3 m，宽64.0 m，最大开挖深度10.5 m。根据工程地质报告，该工程的主要土层从上到下依次为：

(1) 回填土，重度为 20 kN/m^3 ，深度2.1 m，内摩擦角为 20° ，黏聚力为15 kPa；

(2) 粉土，重度为 19.4 kN/m^3 ，深度2.3 m，内摩擦角为 20.5° ，黏聚力为15.3 kPa；

(3) 粉质黏土夹粉土，重度为 18.9 kN/m^3 ，深度为2.7 m，内摩擦角为 20.1° ，黏聚力为15.8 kPa；

(4) 早期垃圾杂填土，重度为 19.5 kN/m^3 ，深度为4.5 m，内摩擦角为 23.5° ，黏聚力为18.8 kPa；

(5) 粉土夹粉砂，重度为 19.8 kN/m^3 ，深度为7.5 m，内摩擦角为 24° ，黏聚力为21 kPa。

该地区地下水位在地表下2.0 m。本工程所在地区的土层较软弱，渗透系数在 $6\times 10^{-4}\sim 1\times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 之间，地下水系比较发达，基坑支护的过程中会有一定的难度。

2 方案选择

2.1 支护方案所要解决的问题

基坑施工过程中由于地质条件，周边环境，施工

质量等原因，往往会出现各种问题，但主要有以下几个方面：

(1) 基坑稳定性问题

主要包括施工过程中可能产生的倾覆、滑移等稳定性问题。

(2) 基坑止水问题

主要包括在地下水作用下，基坑可能会产生的滑移、渗流、管涌等问题。

(3) 周围建筑物的安全性问题

基坑开挖过程中会对邻近建筑物产生影响，特别是会使土体产生侧向位移进而对桩基产生影响甚至是破坏。

因此，在基坑开挖之前，一定要根据工程地质条件，对周边环境的影响以及经济性选择合理的开挖方案、支护方式以及止水方案。

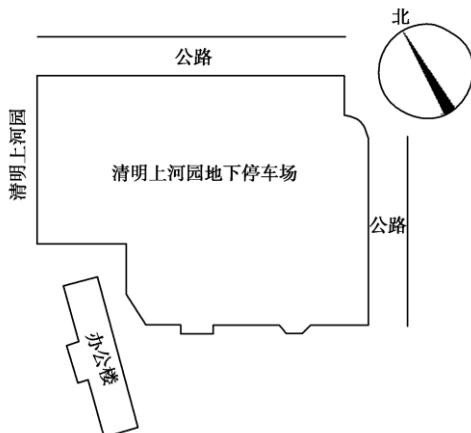


图 1 清明上河园地下车库平面图

Fig. 1 Plan of underground parking lot of Qingmingshangheyuan

2.2 方案的比较

根据软弱土地区已实施的大量基坑工程的成功实践经验以及该工程的特点，可供选择的围护体系主要有以下几类^[1-2]。

(1) 土钉墙支护

土钉墙是用于土体开挖时保持基坑侧壁或边坡稳定的一种挡土结构，是具有自稳能力的原位挡土墙。其施工设备及工艺简单，对基坑形状适应性强，经济性较好；坑内无支撑体系，可实现敞开式开挖；墙面密封性较好，完全将土坡表面覆盖，阻止或限制了地下水从边坡表面渗出，防止了水土流失及雨水、地下水对坑壁的侵蚀；施工所需场地较小，移动灵活，支护结构基本不单独占用场地内的空间。但是土钉墙支护也有其不足之处，在施工过程中，基坑的变形控制难度较大，对较深基坑的开挖，其稳定性难以保证。

(2) 水泥土重力式挡墙

水泥重力式围护墙是以水泥系材料为固化剂，通

过搅拌机械采用喷浆施工将固化剂和地基土强行搅拌，形成具有一定厚度的连续搭接的水泥土柱状加固体挡墙。它可结合重力式挡墙的水泥土桩形成封闭止水帷幕，止水性能可靠；但是它的围护结构占用空间较大，墙身较厚，对周边环境影响也较大；围护结构位移控制能力较弱，变形较大。对于深基坑土层较软弱地区，难以保证其稳定性要求。

(3) 灌注桩排桩围护墙

灌注桩排桩围护墙是采用连续的柱列式排列的灌注桩形成的围护结构。其施工工艺简单、工艺成熟、质量易控制、造价经济；对周边环境影响较小；但是自身不能隔水，工程中需另外设置隔水帷幕，造价会提高。

(4) 型钢水泥土搅拌墙

型钢水泥土搅拌墙是一种在连续搭接的水泥土搅拌桩内插入型钢形成的复合挡土隔水结构，是近几年新发展起来的支护形式。其受力结构与隔水帷幕合一，围护体占用空间小；围护体施工对周围环境影响小；工艺简单、成桩速度快，围护体施工工期短；而且施工过程无需回收处理泥浆，且型钢可回收，环保节能，在较深基坑中经济性好。但是，开挖深度在 10 m 以内的基坑与其他支护形式相比，造价稍高，而且该支护方式多采用内支撑，施工过程中会影响基坑的开挖，且该技术并不成熟，在当地施工经验不足，尚无工程实例可以参考。

经过地质条件、经济性、环保性等的综合比较，决定本工程采用钻孔灌注桩加土锚的支护形式，并采用水泥土灌注桩作为止水帷幕，这样既能保证支护的安全性要求，也能够满足施工过程中的止水要求，并且根据工程的技术条件来看，此方案具有较强的可行性，具体剖面图如图 2 所示。

3 基坑稳定性分析

3.1 土压力的选择

朗肯土压力理论的假设条件为表面水平的半无限土体，处于极限平衡状态。库仑土压力理论则假定挡土墙向前移动；墙后填土沿墙背和填土中某一平面同时下滑，形成滑动楔体；楔体处于平衡极限状态，不计本身压缩变形；楔体对墙背的推力即主动土压力。由于挡土墙会在土压力作用下向前移动，墙后填土可能会沿着某一曲面产生滑动^[4]。经过分析得出该工程土压力与库仑土压力理论假设相似，故采用库仑土压力理论。目前常用的计算方法有水土分算和水土合算两种，在这里选用水土分算。基坑内部采用被动土压力计算，基坑外部采用主动土压力计算。并考虑地面

分布有超载现象, 基坑顶部表面有均布荷载 $q=20 \text{ kN/m}^2$ 作用, 可将荷载 q 视为虚构的填土产生的自重。

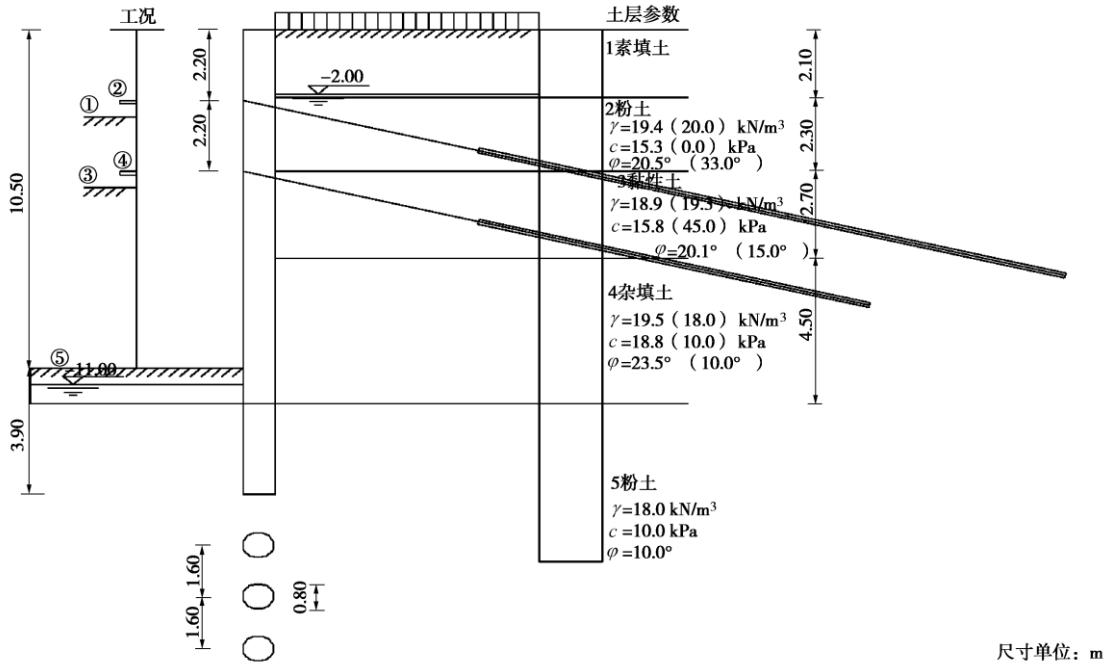


图 2 桩锚结构剖面图

Fig. 2 Section of pile-anchor structure

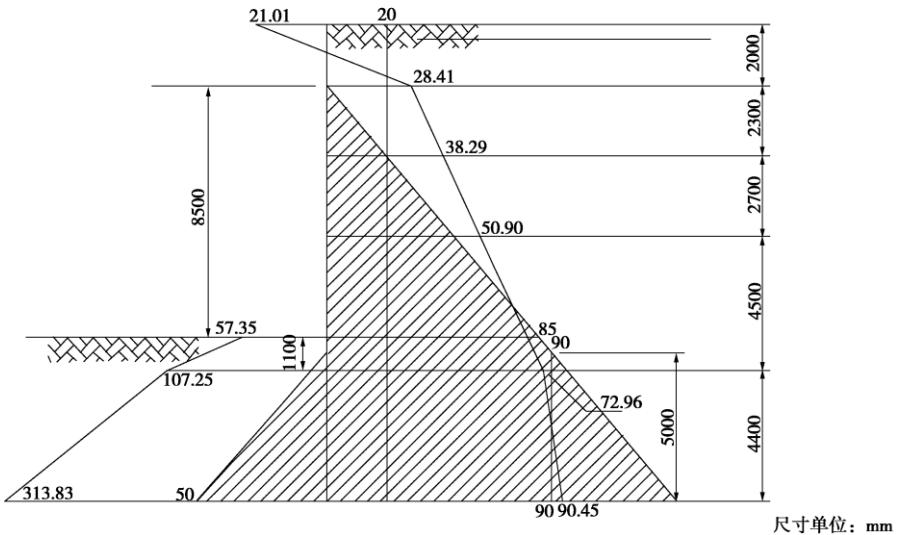


图 3 土压力和水压力分布图 (单位: kPa)

Fig. 3 Computed water pressure and soil pressure

其具体的土压力计算如下:

$$\text{主动土压力} \quad p_a = \gamma H K_a - 2c\sqrt{K_a}; \quad (1)$$

$$\text{被动土压力} \quad p_p = \gamma H K_p + 2c\sqrt{K_p}. \quad (2)$$

式中 γ 为土层重度; H 为计算点到填土表面的距离; K_a 为主动土压力系数,

$$K_a = \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})^2; \quad (3)$$

c 为土体的黏聚力。

水压力

$$p_w = \gamma_w h, \quad (4)$$

式中, γ_w 为水的重度, h 为水的高度。具体的土压力计算结果如图 3 所示 (图 3 中阴影部分为水压力)。

3.2 抗倾覆稳定性验算

桩锚支护体系可以按照重力式挡土墙的形式进行抗倾覆和抗滑移稳定性验算, 其结构简图如图 2 所示^[3]。验算灌注桩排桩围护结构的抗倾覆稳定性时, 通常假定围护结构绕基坑底部与桩交接处转动, 相应的计算公式可表示为^[4]:

$$K_q = \frac{M_{RK}}{M_{SK}}, \quad (5)$$

式中, M_{SK} 为坑外侧土压力与水压力以及桩后地面荷载所产生的侧压力对基坑底部与桩交接处的倾覆力矩 (kN m/m), M_{RK} 为灌注桩排桩围护结构自重以及坑内墙前被动侧压力对基坑底部与桩交接处的稳定性力

矩 (kN·m/m)。

抗倾覆稳定性分别按以下三种工况进行计算：①开挖至第一道土锚，设置第一道土锚；②开挖至第二道土锚，设置第二道土锚；③开挖至基坑底部。经验算：抗倾覆稳定性满足要求。

3.3 抗滑移稳定性验算

抗滑移稳定性验算主要考察围护结构水平方向上作用力系的平衡问题，安全系数可以按以下公式进行：

$$K_H = \frac{E_{RK}}{E_{SK}}, \quad (6)$$

式中， E_{SK} 为沿桩底面的滑动力标准值 (kN)，包括坑外侧土压力、水压力以及墙后地面荷载所产生的侧压力； E_{RK} 为沿墙底面的抗滑动动力标准值 (kN)。经计算得

$$\begin{aligned} E_{SK} &= F_a + F_w = 160.45(\text{kN}), \\ E_{RK} &= G_K \tan \varphi_{0K} + c_{0K} B + F_p = 481.32(\text{kN}), \\ K_H &= \frac{E_{RK}}{E_{SK}} = 3 > 1.5, \text{ 故满足要求。} \end{aligned}$$

3.4 锚杆稳定性验算

第一道锚杆支护距离基坑顶面 3.2 m，抗拉设计值为 240 kN；第二道锚杆支护距离基坑顶面为 5.4 m，抗拉设计值为 280 kN。锚杆水平间距为 1.6 m。

由水压力分布图和库仑土压力分布图可知：第一道锚杆所承受的拉力为 87.2808 kN，第二道实际所承受的拉力为 151.4044 kN，均小于设计值，故满足要求。

4 支护效果

整个基坑施工经过 5 个多月，基坑围护工程顺利完成，为保证工程顺利进行，对基坑开挖过程进行了监测^[5]。监测工程中取得了有效的监测数据，及时掌握了清明上河园地下停车场开挖过程中的变形情况，各观测项目变化范围如下：

(1) 水平位移情况：土体深部位移（测斜）最大累计变化量为 13.72 mm；围护桩顶水平位移最大累计变化量为 2 mm。

(2) 坚向位移情况：围护桩竖顶向位移最大累计变化量为 7.47 mm；周边道路沉降监测最大累计变化量为 24.3 mm；周边地表沉降监测最大累计变化量为 16.41 mm；周边建筑物沉降最大累计变化量为 10.75 mm。

(3) 锚杆拉力变化情况：锚杆拉力最大累计变化量为 75.98 kN。

从该工程的监测数据来看，基坑支护效果良好。

目前该工程已经顺利完工并已投入使用，施工过程中没有发生倾覆和滑移破坏，整体稳定性良好，使用效果良好。

5 结语

通过基坑的抗倾覆和抗滑移稳定性的验算以及分析，说明桩锚结构是满足该地区工程地质条件的有效加固方法。经过分析可知，在地下水位较高的软弱土层中进行基坑开挖作业时采用桩锚支护体系比较合理。根据施工过程中遇到的各种问题，提出以下建议：

- (1) 对于地下水较高的软弱土层地区，采用钻孔灌注桩加上锚的支护形式是一种有效的支护形式；
- (2) 对于深度 10 m 以上的基坑，支撑体系采取桩锚支护，既能满足支护方面的要求，又能减小对主体结构的影响；
- (3) 由于基坑施工过程中影响因素较多，施工风险较大，所以必须在施工过程中进行监测，及时掌握基坑变形的各项指标。

参考文献：

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 26 – 33. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 26 – 33. (in Chinese))
- [2] 黄根生, 张希浩, 曹辉. 地基处理与基坑工程支护[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 212 – 215. (HUANG Gen-sheng, ZHANG Xi-hao, CAO Hui. The foundation handles and the protect with the excavation engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 212 – 215. (in Chinese))
- [3] 马琳琳. 浅谈基坑稳定性分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(8): 63 – 64. (MA Lin-lin. The shallow stability for talking radicle pits analyzes[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(8): 63 – 64. (in Chinese))
- [4] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 195 – 206. (CHEN Xi-zhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 195 – 206. (in Chinese))
- [5] 蒋国盛, 李红民, 管典志, 等. 基坑工程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000: 63 – 69. (JIANG Guo-sheng, LI Hong-min, GUAN Dian-zhi, et al. Excavation engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000: 63 – 69. (in Chinese))

(本文责编 明经平)