

多含水层体系下基坑支护施工技术研究

Research on Construction Technology of Excavation Support in Multi-aquifer System

李金龙, 武伟, 汪太溢, 段霄鹏, 初欣雨

(山西冶金岩土工程勘察有限公司, 太原 030000)

摘要: 为解决多含水体系地下水分布不均, 在施工过程中因水位下降引发的临近灌注桩沉降和支护稳定性问题, 利用劲性水泥土搅拌连续墙 (Soil Mixing Wall, SMW 工法) 结合高压注浆防渗施工、排桩支护技术, 配合降水、锚杆、内支撑技术, 来确保基坑施工的整体安全与稳定, 完成多含水层体系下基坑支护施工技术研究。结果表明: SWM 工法中利用方形桩与圆形桩均能满足支护稳定性方面的要求, 两者桩身直径为 0.6 m 时能够满足支护稳定性方面的要求, 可对此类施工工作提供具体参考价值。

关键词: 多含水层体系; 锚杆; 基坑支护; 内支撑施工

中图分类号: TU44 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0060-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.012

LI Jinlong, WU Wei, WANG Taiyi, DUAN Xiaopeng, CHU Xinyu

(Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Exploration Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

Abstract: To solve the problem of uneven distribution of groundwater in multi aquifer systems and the settlement and support stability of adjacent cast-in-place piles caused by water level drop during construction, the Soil Mixing Wall (SMW) construction method combined with high-pressure grouting anti-seepage construction and pile support technology, combined with precipitation, anchor rods, and internal support technology, is used to ensure the overall safety and stability of foundation pit construction in multi aquifer systems. The research on foundation pit support construction technology in multi aquifer systems is completed. The results indicate that both square and circular piles in SWM construction method can meet the requirements of support stability. When the diameter of the pile body is 0.6 m, both can meet the requirements of support stability, which can provide specific reference value for such construction work.

Key words: multi aquifer system; anchor rod; excavation support; internal support construction

0 引言

基坑施工技术是一项涉及多学科的综合技术^[1], 受施工工艺、气候条件、地质水文等多种因

素的影响, 在基坑的设计、勘察和施工过程中, 支护结构的稳定性、强度和刚度至关重要^[2-3]。设计时, 要依据地质勘察报告和工程要求精确计算, 稳定性分析需考虑多种荷载下支护结构的平衡。强度方面, 像灌注桩支护要计算桩身抗弯、抗剪强度以确定配筋量和混凝土强度等级, 刚度设计则控制支护结构变形。同时, 必须评估支护形式对周围土体变形的影响, 不同支护形式影响不同。如果支护结构设计不当, 可能会导致周围建筑物出现开裂、倾斜等问题, 严重时可能导致地下管线错位、公路塌

作者简介: 李金龙 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程。

收稿日期: 2023-05-16

陷、开裂,甚至周围建筑物倒塌,对社会经济、人民生命财产安全造成严重影响。

许多学者致力于研究基坑施工对周边环境的影响,如宗军良^[4]针对基坑周边环境复杂、承压水层相互连通等特点,采用地下连续墙加高压旋喷桩加内支撑的支护设计,并对承压含水层采取止降结合的技术措施;贺中杰^[5]考虑基坑开挖的时空效应,并结合浅层承压含水层的影响,采用分设4区分层开挖,主基坑采用东西两端向中部开挖的方案,提升了基坑开挖的安全性;王绪余等^[6]采用CSM工法双轮铣水泥土搅拌墙作为隔水帷幕,阻隔断基坑内外承压水,保护基坑及周边安全;张玉奇^[7]在基底采用旋喷桩进行加固,在降水时明确承压水含水层深度,严格控制其水位,将承压水头降至相对隔水层,基坑开挖及支护按照“开槽支撑,先撑后挖,分层开挖,严禁超挖”的原则,分块分层对称进行施工;张晶等^[8]主基坑支护结构采用钻孔灌注桩排桩+两道钢筋混凝土支撑,坡道区域围护桩兼作主基坑的隔离桩,采用三轴水泥土搅拌墙隔断承压含水层,临近既有浅基础建筑区域设置高压旋喷桩裙边加固;栗晴瀚等^[9]采用三维有限元对含水层越流情况下基坑降水引发的变形机理、规律和影响区进行研究,对于含水层越流风险高的地层,疏干降水采用“深浅井”方案,实现按需降水和基坑变形控制;肖珑^[10]采用止水帷幕和护壁的施工技术进行深基坑支护的施工,护壁结构则采用倒挂井的形式施工;杜天朗等^[11]深入探讨了软土地质条件下的基坑支护施工技术,强调了PHC管桩和粉喷桩等工艺的应用;郑金伙等^[12]研究长短桩组合支护在深厚软土基坑中的应用,对全长桩支护与全短桩支护条件下的围护桩结构内力及变形进行计算,通过三维数值模拟技术,对不同桩长的长短桩组合支护方案进行对比研究,从而选定适宜的短桩长度;陈平等^[13]为研究深大基坑地层富水特性以及组合支护方案下基坑控制效果,以连云港—镇江高速铁路淮安东站站前广场基坑为工程背景,开展含水层抽水试验,明确地层富水特性以及水力联系,为基坑施工提供依据;设计地连墙、混合搅拌壁式地下连续墙(trench-cutting & re-mixing deep wall, TRD)两种支护以及分层开挖方案,并开展了基坑控制效果现场监测分

析;梁志荣等^[14]基于上海世博B06地块深大基坑工程,考虑场地临近黄浦江,场地分布有深厚承压水层,周边环境非常敏感等因素,采取了分坑施工,悬挂式止水帷幕和坑外设置回灌井等一系列技术措施。

对多含水层体系下基坑支护施工技术的研究较少,在上述研究的基础上,提出多含水层体系下基坑支护施工技术研究。通过SMW桩、高压注浆防渗施工、排桩施工等技术,旨在解决多含水层体系地下水分布不均,在施工过程中易出现水位下降引发的邻近灌注桩沉降和支护稳定性问题,为相似工程提供参考。

1 工程概况

拟建的新能源汽车研发中心位于山西太原经济开发区,周边均为公路,整体地形比较平坦。该工程所在区域土层分布及力学参数见表1。

表1 土层分布及力学参数

Table 1 Soil layer distribution and mechanical parameters

土层结构	天然重度/ (kN/m ³)	压力 系数	含水量 /%	初始 孔隙比	压缩模量 /MPa	剪切波速/ (m/s)	埋深 /m
粉质黏土	19.2	0.59	30.5	0.86	7.5	153	4.6
粉质黏土	19.4	0.62	28.8	0.82	6.9	171	7.7
粉土	20.3	0.45	21.8	0.63	17.5	265	13.2
粉质黏土	20.1	0.57	25.2	0.72	8.1	247	19.8
粉土	20.5	0.45	22.4	0.56	14.5	277	22.6
粉土	20.7	0.42	20.8	0.59	15.8	278	26.7
粉质黏土	20.4	0.57	23.7	0.67	8.7	254	31.7
粉砂	20.7	0.41	16.4	0.53	18.8	301	35.7
粉质黏土	20.4	0.57	20.8	0.61	9.6	275	39.2
粉土	20.6	0.45	18.3	0.55	9.6	329	43.5
粉质黏土	20.4	0.56	22.2	0.65	19.8	316	46.8
粉砂	20.7	0.39	17.6	0.54	10.4	361	48.9

通过地质勘查发现该区域存在5个含水层,分别标记为A1、A2、A3、A4、A5,5个含水层之间存在4个弱透水层,分别标记为B1、B2、B3、B4。水层分布如图1所示。

2 基坑支护施工

针对多含水层体系下基坑施工,主要包括SMW桩、高压注浆、排桩施工。通过SMW工法桩形成连续墙体,提供初步的支护和防渗效果。通过高压注浆形成防渗帷幕,进一步增强防渗效果。通过排桩完成基坑支护施工。基坑剖面图如图2所示。

岩土力学

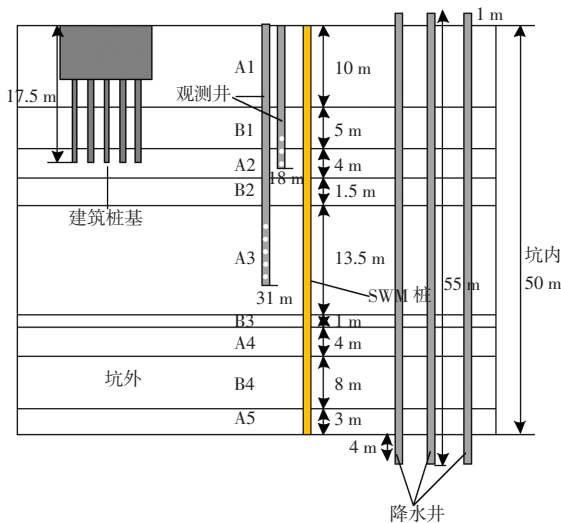


图1 水层分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water layer distribution

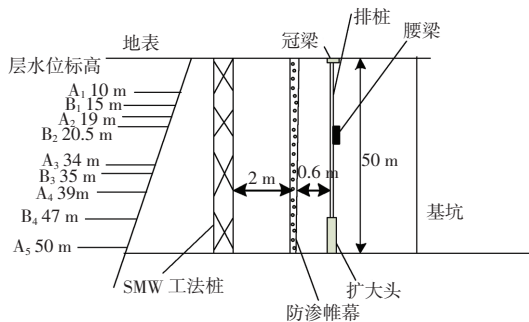


图2 基坑剖面图

Fig. 2 Sectional view of foundation pit

2.1 降水施工

由于施工条件为多含水层，在施工前需进行降水施工，采用深井降水技术，减少施工时的涌水风险^[15]。在基坑周边设置30个降水井，基坑内设置3个降水井，在基坑开挖后在其底部挖设一条排水渠，并安装深井泵，将地下水从较深的含水层中抽出，通过排水渠排出。这种方法可以有效降低深部含水层的水位，为施工创造干燥的作业环境，大大降低了施工过程中的涌水风险。降水井外漏地表面约1 m，至基坑底面以下4 m左右的距离，井深55 m，降水方式为潜水非完整井。降水（观测）井构造图如图3所示。

2.2 SMW 桩施工

待三轴搅拌桩机浇筑的桩体达到一定强度后，通过液压振动锤将钢桩压入桩体中，完成SMW工法桩的施工。其中，钢桩为圆形钢桩和方形钢桩，按

施工方向区分，在开始的前半段施工区域使用圆形钢桩，后半段施工区域使用方形钢桩。一侧的基坑支护结构平面布置图如图4所示。

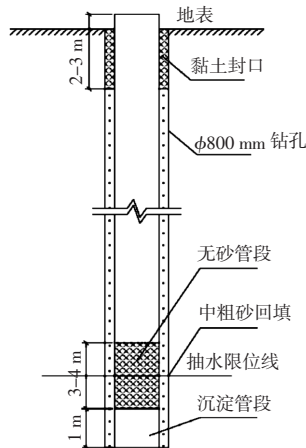


图3 降水井构造

Fig. 3 Structure of precipitation well

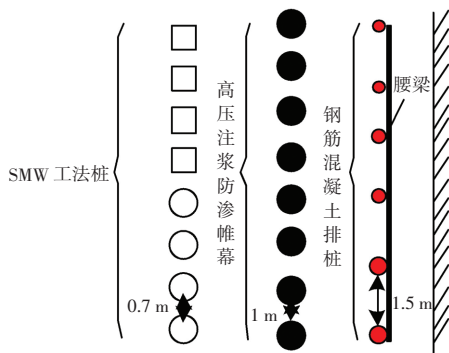


图4 基坑支护平面布置图

Fig. 4 Layout plan of foundation pit support

2.3 高压注浆防渗施工

由42.5级普通硅酸盐水泥和水按1:8比例混合制备水泥浆，然后进行注浆布置，根据地质报告和土层情况确定注浆点的间隔，形成一个注浆点网格，确保每个区域都被覆盖，即在基坑与水源之间布置一道防渗帷幕。注浆时的压力与浆液强度满足注浆压力 $p_1 \approx 2 \text{ MPa}$ ，注浆浆液强度 $q_1 \geq 25 \text{ MPa}$ 。

2.4 排桩施工

根据孔位的布置铺设钻机导轨，使用钻机进行成孔作业，在成孔过程中，采用泥浆护壁。成孔完成后，进行清孔作业。注入混凝土，形成排桩。将钢筋笼安装到孔内，并进行混凝土灌注作业。

完成灌注作业后，在排桩顶部设置冠梁，将排桩连接成一个整体，提高支护结构的稳定性。且在排桩

之间设置腰梁和支撑结构,形成复合支护体系。腰梁和支撑结构要能够承受基坑壁的侧压力和水平位移。

2.5 锚杆施工

使用激光测距仪测量锚杆孔位,确保孔位准确。利用钻机进行钻孔,在此过程中,锚孔的深度与直径均不小于设计位 +0.5 mm。搭建一个生产工艺作业台,进行锚杆压制,明确承载体的位置后进行锚杆准确安装,以增强基坑边坡的稳定性,防止土体滑移。在锚杆安装完成后,进行注浆加固,等待注浆材料固化后,进行锚固张拉锁定。对安装好的锚杆施加预应力,通过锁定装置确保预应力的持久性。

2.6 内支撑施工

在内支撑施工中,选择2道环形钢筋混凝土支撑,核心筒部位环形支撑梁的直径为67.5 m,采用C30商品混凝土进行浇筑。支撑结构梁的详细参数见表2。

表2 支撑结构梁详细参数 / (m × m)

Table 2 Detailed parameters of supporting structural beams

桩顶压顶梁	腰梁	支撑梁	环梁
1.2 × 1.0	1.0 × 1.2	0.8 × 1.0 0.6 × 0.8	2.4 × 1.3

当基坑开挖到-5 m时进行第一道混凝土支撑梁的施工;当开挖至-13 m时,进行第二道混凝土支撑梁的施工。环撑竖向采用四根直角钢结构立柱,钢结构立柱为Q235型700 mm × 700 mm钢材。

2.7 测试布设

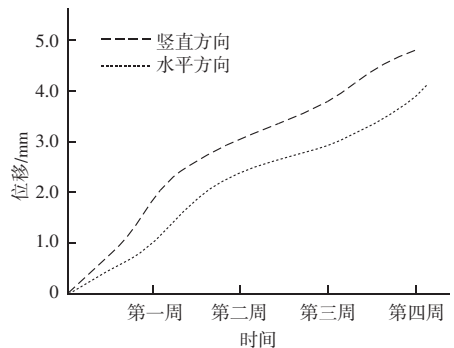
在多含水层体系下完成基坑支护施工技术应用后,为了全面且准确地验证该支护施工技术的有效性,需要通过合理的测试布设对基坑支护结构的位移情况进行监测。该过程采用全站仪、水准仪测量法,在基坑边缘外稳定区域设置三个基准点,在支护结构的四个角点及每边中心位置设置监测点。四个角点能够反映支护结构在边缘处的变形情况,而中心位置则可以体现支护结构整体的中间变形趋势,从而全面获取支护结构各部分的位移信息。由此,为验证多含水层体系下基坑支护施工技术的有效性提供可靠的数据支持。

3 施工效果测试

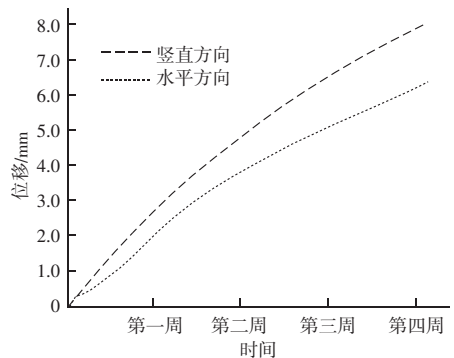
3.1 不同桩型下的支护效果测试

为验证不同桩型支护效果不同,试验以方形桩

和圆形桩为研究对象进行试验验证。每周观测一次,对于每个监测点,计算其在X、Y两个方向上的总位移量(即两个方向位移分量的矢量和),并取平均值作为最终结果,连续观测4周,结果如图5所示。



(a) 方形桩



(b) 圆形桩

图5 测试结果

Fig.5 Test results

当桩型为方形桩时,开挖到坑底一个月内支护结构在水平和垂直方向的位移为5 mm左右,整体位移量较小,说明方形桩的抗侧刚度较大,对于基坑变形有着良好的约束效果。

当桩型为圆形桩时,开挖到坑底一个月内支护结构在竖直和水平方向的位移为8 mm左右,整体位移量大于方形桩的位移量,说明圆形桩的抗侧刚度低于方形桩,对于基坑变形的约束效果也不如方形。但圆形管桩仍然能够满足支护稳定性方面的要求。因此在工程中可以根据实际需求进行选择。

3.2 不同桩身直径下的支护效果测试

测试桩身直径为0.6、0.8、1.0 m时开挖到坑底4周支护结构各方向的位移数据,结果如图6所示。

在桩身直径为0.6 m时,开挖到坑底支护结构各方向的位移最高仅为5 mm左右,整体位移量较小,能够满足支护稳定性方面的要求。在桩身直径增加

岩土力学

到 0.8 m 后, 支护结构各方向的位移不减反增, 也就是说随着桩身直径的增大, 支护结构各方向的位移也逐渐增大。在桩身直径为 1.0 m 时, 支护结构各方向的位移最高已经达到 8 mm 左右, 也就是说随着桩

身直径的增大, 支护结构各方向的位移增大。桩身直径越小, 挤土效应越轻, 因此桩身直径越小, 支护结构各方向的位移越小。在实际工程中, 可以选择 0.6 m 的桩身直径, 以减轻挤土效应。

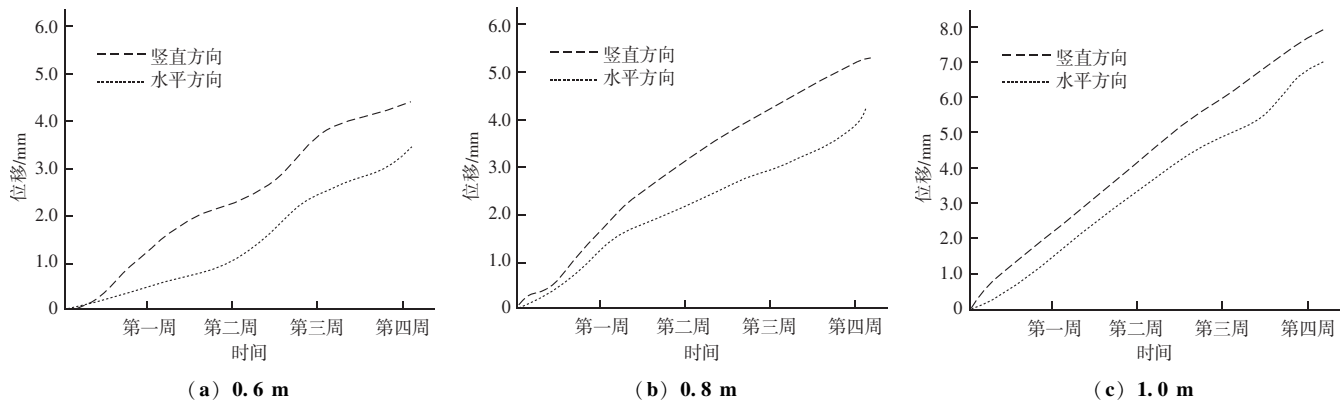


图 6 不同桩身直径的测试结果
Fig. 6 Test results of different pile diameters

4 结论

桩基支护施工技术凭借其施工周期短、环境友好性强以及施工效率高等显著优势, 逐渐获得了工程设计人员的重视。针对多含水层地质条件的基坑工程, 文中通过 SMW 工法、高压注浆防渗施工、排桩支护、降水、锚杆及内支撑等技术展开基坑支护施工研究。该技术不仅成功适应了复杂的多含水层土层结构, 而且具有良好的支护效果, 即无论是方形桩还是圆形桩, 桩身直径为 0.6 m 时的支护稳定性均可满足要求。以期通过该技术的研究能够对其他工程进行可靠的指导。

参考文献

- [1] 李博, 韦韬, 刘子捷. 西南地区煤层顶板岩溶含水层富水性评价指标体系构建及突水危险性评价 [J]. 煤炭学报, 2022, 47 (增刊 1): 152-159.
- [2] 孔德森, 侯迪, 赵新媛, 等. 地下空间向下增层既有-新增双层排桩支护结构鲁棒稳定性研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43 (4): 787-796.
- [3] 周勇, 赵元基, 王正振. 基于土体强度冗余法的桩锚支护结构动态稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (增刊 1): 641-649.
- [4] 宗军良. 某城市核心区软土超深基坑支护设计方法与实践 [J]. 城市道桥与防洪, 2023 (11): 245-249, 329.

- [5] 贺中杰. 时空效应下的浅承压含水层地铁站基坑开挖安全控制研究 [J]. 建筑安全, 2023, 38 (9): 39-42.
- [6] 王绪余, 陈良平. CSM 水泥土搅拌墙在临江某深基坑止水的应用效果分析 [J]. 山西建筑, 2024, 50 (12): 62-65.
- [7] 张玉奇. 河道软基含承压水地层深基坑开挖施工技术研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2023 (12): 138-140.
- [8] 张晶, 黄开勇, 陆丽君. 软土地区临近既有浅基础建筑的深基坑设计 [J]. 山西建筑, 2023, 49 (13): 94-96.
- [9] 栗晴瀚, 张静涛, 郑刚, 等. 含水层越流情况下基坑降水引发变形机理及控制措施 [J]. 土木工程学报, 2023, 56 (5): 89-101.
- [10] 肖珑. 高水位狭小空间内深基坑支护施工技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2022 (27): 90-92.
- [11] 杜天朗, 李保珠. 某软土地区深基坑支护施工方案设计 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (20): 2467-2469.
- [12] 郑金伙, 沈铭龙, 刘阳辉. 长短桩组合支护在深厚软土基坑中的应用研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (1): 102-110.
- [13] 陈平, 黄海涛, 安刚建, 等. 软弱地层深大基坑富水特性及组合支护控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (15): 6278-6290.
- [14] 梁志荣, 李成巍, 李伟, 等. 深厚承压水层下临江深大基坑工程支护结构设计与实践 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (1): 129-134.
- [15] 孙志浩, 徐长节, 房玲明, 等. 非对称荷载下内撑式基坑支护结构参数分析及设计优化探讨 [J]. 应用力学学报, 2024, 41 (1): 158-168.