

地下水条件对基坑支护稳定性影响研究

王中宝 高建军 葛晓斐

北京航天地基工程有限责任公司, 北京 102600

[摘要]地下水是影响基坑支护稳定性的核心环境因素,其压力分布、水位变动及渗流作用直接关系到基坑工程的安全与成败。文中系统分析了地下水的基本特征,从地下水压力对支护结构的影响、地下水位变化对基坑稳定性的影响、渗流作用对土体强度的影响、降水施工对周边环境的影响以及地下水条件下基坑风险分析五个方面探讨了地下水对基坑支护稳定性的作用机制,并从支护结构优化设计、基坑降水与止水措施、基坑变形控制措施、地下水监测与风险预警及信息化施工管理五个维度提出了优化对策。研究表明,科学认识地下水作用机理并采取针对性技术措施,可显著提升基坑支护的安全性与经济性。

[关键词]地下水; 基坑支护; 渗流; 支护结构稳定性; 降水施工; 风险预警

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19804

中图分类号: TU432

文献标识码: A

Study on the Influence of Groundwater Conditions on the Stability of Foundation Pit Support

WANG Zhongbao, GAO Jianjun, GE Xiaofei

Beijing Aerospace Foundation Engineering Co., Ltd., Beijing, 102600, China

Abstract: Groundwater is the core environmental factor affecting the stability of foundation pit support, and its pressure distribution, water level changes, and seepage effects directly affect the safety and success of foundation pit engineering. The article systematically analyzes the basic characteristics of groundwater, and explores the mechanism of groundwater on the stability of foundation pit support from five aspects: the impact of groundwater pressure on support structures, the impact of groundwater level changes on foundation pit stability, the impact of seepage on soil strength, the impact of dewatering construction on the surrounding environment, and the analysis of foundation pit risks under groundwater conditions. Optimization strategies are proposed from five dimensions: optimization design of support structures, foundation pit dewatering and waterproofing measures, foundation pit deformation control measures, groundwater monitoring and risk warning, and information-based construction management measures. Research has shown that a scientific understanding of the mechanism of groundwater action and the adoption of targeted technical measures can significantly improve the safety and economy of foundation pit support.

Keywords: groundwater; excavation support; seepage; stability of support structure; precipitation construction; risk warning

引言

基坑工程中地下水是最重要的一個环境影响因素,也是最活跃、最复杂的环境影响因素之一。基坑开挖破坏了原有的地下水力平衡,造成坑内外水头差,进而引起渗流、超静孔压变化和土体有效应力调整等一系列连锁反应,对支护结构的受力状态以及基坑整体稳定性都会产生较大的影响。深基坑工程在复杂的环境下会遇到由于地下水动态变化而引起的土体孔压响应、支护结构侧压力变化以及工程渗流稳定性等各方面的問題,这些问题的研究有重大的工程价值。潜水位较高或者有承压水层的地方,基坑降水开挖会引发周围土体沉降,对支护结构安全和周边环境稳定造成影响。本文主要从地下水影响机制和优化措施两

个方面进行系统的研究,从而给富水地层基坑工程的设计和施工提供一定的借鉴。

1 地下水基本特征分析

地下水根据赋存条件可以分为上层滞水、潜水和承压水三种基本类型,运动规律符合达西定律。潜水位较高时,基坑开挖一般要进行大量的降水工作;承压水层如果被揭開,就会引起突涌事故,危及基坑的安全。基坑附近单位体积土体稳定性由四个力决定,即向上渗流的渗透力、土体浮重、土粒间摩擦力、土体凝聚力。细砂、砂土或者粉土最容易出现渗透破坏,在地下水渗流产生的动水压力大于土体有效重度的时候,就会引发流砂、管涌等渗透破坏。含水层厚度大、透水性强的地方进行深基坑开挖容易造成

突涌、流砂、沉降变形等。因此,正确了解工程场地的地下水情况,是进行基坑支护设计及风险控制的前提。

2 地下水条件对基坑支护稳定性的影响分析

2.1 地下水压力对支护结构的影响

地下水压力属于支护结构所承受的重要荷载之一。正常情况下静水压力呈三角形分布;当基坑开挖降水造成坑内外水头差时,渗流场变化会引起水土压力分布形态的明显改变。坑外地下水位的变动对主动侧总孔压、土体竖向有效应力、总侧压力影响较大,而对被动侧的影响较小;当地下水位上升即超静孔压为正值时,对基坑支护结构受力、基坑稳定性不利。由于水位上升造成超静孔压增大,有效应力减小,土体抗剪强度降低,支护结构承载能力下降。除此之外,在考虑渗流作用的时候,渗流作用会使被动区和主动区在围护结构上的侧压力都变小,在地下水位较高的地区开挖基坑时应该考虑渗流作用的影响。

2.2 地下水位变化对基坑稳定性的影响

地下水位的变化属于影响基坑稳定的敏感因素之一。降水引起的地下水位下降使土体的有效应力增大,是产生周围地表沉降和侧向位移的主要因素。通过现场监测和数值模拟分析可知,降水引起地下水位下降造成土体有效应力增大,是造成周边地表沉降和侧向位移的主要原因;动态回灌比传统降水减小沉降 51%,分区分层降水可以缩小降水影响半径 20%。在富水砂性地层中,深基坑土方开挖及坑内降水都会引起明显的墙体侧移和坑外地表沉降,在各个施工阶段,仅由降水引起的墙体最大侧移增量和坑外地表最大沉降增量分别占其对应阶段总增量的 20%到 40%和 20%到 60%。地下水位突然下降会引起土体固结沉降,造成坑外地面下沉、建筑物倾斜甚至开裂^[1]。相反,如果止水帷幕渗漏造成坑外水位突然下降不够,坑内水位难以下降,则会增大坑底隆起和管涌的风险。

2.3 渗流作用对土体强度的影响

渗流对土体强度的削弱效应,就是地下水影响基坑稳定性的一种机制。在渗流力的作用下,土体有效应力发生变化,抗剪强度随之降低。渗流作用下,渗流力使土的有效应力大小发生变化,进而影响土的抗剪强度。当渗流方向向上时,渗透力和土体重力方向相反,有效应力减小,抗剪强度降低;当渗透力足够大时,土体会失去承载能力,发生流砂或者管涌破坏。基坑工程中,在细砂、砂土或者粉土中,由于渗透力的作用,土体一旦松动,土粒之间的摩擦力就没有了。在富水圆砾层等强透水地层里,渗流的影响也很大。研究表明,土层渗透性越大,渗流所引起的渗透力就越强,对基坑变形的影响也越明显。

2.4 降水施工对周边环境的影响

基坑降水施工在保证坑内干燥作业条件的同时,必然会对周边环境造成影响。降水造成地下水位下降,使土体有效应力增大,在坑外形成沉降槽。周边地表和管廊沉降主要是由于降水造成的,既有管廊的存在限制了周边土体的运动,有效减小了地表沉降;基坑分步降水开挖可以有效地控制周边地表和既有管廊的沉降。经过研究得知,在距离基坑边缘 3 倍开挖深度范围内地面沉降最明显。在长江漫滩地区,基坑内施工降水会使得坑外各个含水层水位明显下降,如果不加以处理,就会引起附近建筑物不均匀沉降。富水砂性特殊地层的止水帷幕一般不能完全隔断坑内外水力联系,深部第I承压含水层降水影响范围为 0~90m,第II承压含水层降水影响范围可达 180m 以上。

2.5 地下水条件下基坑风险分析

在复杂的地下水环境中,基坑工程会遇到很多渗透破坏的危险。管涌是由于渗透水流的作用,在土中细粒在形成的孔隙通道中被移动、流失,最后造成土体内形成贯通渗流通道的现象;流土则是指在向上渗流的作用下,土体局部隆起或者成块浮动。流砂、管涌及突涌极易导致基坑失稳坍塌及周边建筑损坏。在承压水层发育的地方,坑底突涌风险就很大。以 6 个承压水风险工程案例为基础,用故障树分析法识别深基坑工程坑底突涌和隔水帷幕渗漏、流砂等承压水风险事件及风险因素^[2]。止水帷幕渗漏属于常见风险源,地连墙渗漏会造成明显的基坑变形,渗漏发生在转角时影响最大。

3 地下水条件下基坑支护优化措施

3.1 支护结构优化设计

地下水丰富复杂的地层中,支护结构优化设计的关键就是根据水文地质条件合理选择和科学配置止水措施。地下水位高或者存在承压水层时,应优先采用具有自身止水作用的支护形式。地下连续墙整体性好、刚度大、可以兼做止水墙,适合于富水深厚地层;SMW 工法施工速度快、兼有支护和止水功能,适合于软土和砂层,排桩体系要配合止水帷幕使用,适应性强,止水效果取决于帷幕质量。在特殊地层条件下,深厚富水砂卵石地层可以采用新型基坑注浆全封闭止水和加固技术,把注浆技术与地基加固、基坑支护、防渗止水融为一体,解决基坑支护、止水、降水问题,提高地基承载力。对于紧邻敏感环境的基坑,可以采用人字形排桩新型支护结构,由直立桩、斜桩、冠梁、腰梁和止水帷幕组成,解决受环境影响不能设置外锚、宽大基坑内撑成本高的支护技术难题。表 1 对常用支护结构在富水地层中是否适用做了综合比较。

表 1 常用基坑支护结构在地下水条件下的适用性对比

支护形式	适用地下水条件	优点	局限	止水效果	相对造价
地下连续墙	高水位、深厚含水层、承压水层	整体刚度大、自身可兼作止水墙	设备要求高、施工周期长	优	高
排桩+止水帷幕	一般地下水条件	适应性强、刚度较大	需配合旋喷桩或搅拌桩帷幕	良	中高
SMW 工法	软土、砂层、水位较高	施工速度快、兼作止水	型钢回收受限制	良	中等
土钉墙	地下水位较低、黏性土	经济性好、施工简便	不适用于高水位或富水砂层	差	低
注浆全封闭止水支护	深厚富水砂卵石地层	止水与加固一体化、适用性强	技术要求高	优	中等偏高

3.2 基坑降水与止水措施

地下水控制采取“疏堵结合”的方法。在透水性较强的土层中，止水帷幕要形成闭合体系。富水卵石地层基坑可以采用落底式地下连续墙做为支护和止水结构，在基坑内设疏干井、外侧设回灌井，与传统的桩锚结构和管井降水相比，排水量减少 85.5%，工程造价降低 24.7%。高承压水软土地区可采用超深三轴搅拌桩加固基底土层和 RJP 旋喷桩接缝补强技术，控制基底地下水压力，减小基坑横向支撑内力。在富水圆砾地层中，排桩-旋喷桩局部止水帷幕可以延长地下水渗流路径、减小渗流速度，分担一部分土压力，对控制地表沉降、桩身水平位移起着积极作用。降水方案设计要根据水文地质条件选择管井降水、井点降水等不同的方式。井管降水联合双排搅拌桩止水帷幕属于复杂地质环境下地下水处理的一种综合技术手段。在富水厚砂层地区，采用悬挂式止水帷幕时要认真考虑渗透稳定性，恰当选定帷幕深度。

3.3 基坑变形控制措施

地下水引起的基坑变形控制要从源头阻断和过程调控两方面着手。源头阻断时要采取可靠的止水措施，减小坑内外的水力联系，降低降水对周围环境的影响。在过程调控上，分区分层降水是控制变形的一种有效方法。分区分层降水可以减小降水的影响半径 20%，明显减小降水引起的沉降范围。软土地区分步降水开挖可以有效地控制周边地表和既有结构的沉降，对地下水位进行监测，控制地下水位达到预警值的要求。对紧靠敏感建筑物的基坑，必须严格控制降水速度和水位降深，必要时设置回灌系统。在长江漫滩地区，采用回灌来补偿坑外各个含水层的水头，这是控制周边环境的重要影响的重要手段^[3]。靠近有桩基础或者地下设施的基坑要考虑阻隔作用。当基坑外有桩基结构时，由于桩基结构对地下水运动的阻隔作用，较小的基坑涌水量会引起坑内水位下降较大，可以适当减少坑内降水井的数量。在强透水地层中增大旋喷桩嵌入深度可以提高止水效果，但是超过一定深度之后效果增长很小。

3.4 地下水监测与风险预警

地下水监测属于保证基坑安全的重要方式。监测内容

应有坑内外水位、孔隙水压力、支护结构受力变形和周围环境沉降等主要指标。建立黄、橙、红三级预警处置机制，对基坑支护变形、地表及建筑物沉降、地下水位变化实行全过程无死角监控，任何微小的异常都会被这套系统的眼睛发现。基坑智能降水管控系统的应用，把深基坑降水技术由“人工经验”变为“自动控制”。该系统按照设定好的安全水位上下限自动启停水泵，具有很强的预警、报警功能，水位一直保持在安全水位线以下。根据饱和-非饱和和渗流理论进行地下水数值模拟，可以预测降水对地下水位及周边环境的影响。风险预警上要设置分级预警阈值，当监测值达到预警限值的时候就立即启动应急预案，综合采取增加回灌量、改变降水方案、增设支撑等措施。

3.5 信息化施工管理措施

信息化施工管理属于地下水条件下基坑支护动态优化的技术支撑。用 BIM 技术建立施工期整体模型，再和自动化监控技术相结合就形成了全天候自动化智慧监控系统，可以达到安全监测数据同图形展示室内外同步的效果。基坑智能监测技术把北斗定位、智能传感等先进的手段结合起来，用实时的采集基坑沉降、位移、水位等数据来实现智能预警。深基坑自动化动态实时监测技术解决了传统基坑监测模式数据采集慢的问题，用物联网实现多个平台实时访问查询的目的^[4]。使用 LSTM 预测模型和模糊综合评价，对桩顶位移、地下水位、地表沉降等指标进行动态预测，并用振弦式应变计和云平台实现 24h 远程实时采集和智能预警。在降水管理上，可视化大屏终端可以实时显示所有的水位、水泵、观测井等状态数据，所有的采集和报警数据都可以导出进行分析，从而达到管理平台的集中控制。采用信息化施工可以依据监测数据及时调整降水方案和支护参数，做到“边施工、边监测、边优化”，保证基坑工程安全高效地进行。

4 结语

地下水属于影响基坑支护稳定的环境要素，其作用机理包含渗流场、应力场以及位移场的多场相互联系。本文对地下水压力、水位变化、渗流作用等影响基坑支护稳定性的因素进行了系统的分析，从支护结构优化设计、降水

止水措施、变形控制措施、地下水监测预警、信息化施工管理五个方面提出了相应的优化对策。在富水地层中科学合理设计、严格控制施工质量,可以有效地控制地下水对基坑的不利影响,达到工程安全和环境保护的目的。随着智能化监测技术、流固耦合数值分析方法的发展,地下水条件下基坑支护设计会越来越精细、动态化、智能化,给城市地下空间安全高效开发提供更可靠的科技支撑。

[参考文献]

[1]茅利华.复杂地质条件下基坑支护设计及地下水综合治理[J].建筑施工,2022,44(7):1502-1504.

[2]李伟,冯红超,廖俊展.复杂水文条件下深基坑支护及地下水控制技术分析[J].粘接,2021,48(10):166-171.

[3]张尚伟.深基坑支护在建筑工程中的技术探讨[J].全面腐蚀控制,2026,40(4):434-436.

[4]黄炬.深基坑支护技术在建筑施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2026(7):46-48.

作者简介:王中宝(1986—),男,吉林长春人,工程师,中国地质大学(北京)土木工程专业毕业,现就职于北京航天地基工程有限责任公司,从事基坑支护、地基处理设计、施工工作。