

复杂地质条件下土建工程基础施工技术优化研究

孙孟东 刘腾飞

西咸新区创新文旅发展有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i10.5116

[摘要] 本文主要研究了复杂地质条件给基础工程施工及安全稳定方面造成的主要问题及其原因,在此基础上分析了桩基础、地下连续墙以及复合地基等常用的基础方案对于解决不同类型地质问题所具有的优缺点。其中着重介绍了提高施工工艺的技术措施,包括加强施工前的勘探工作与设计配合、采用新技术新工艺、实施智能化监控预警以及精细化施工组织等方法进行整体优化。研究结果表明,“精确勘探—灵活设计—智能施工—及时反馈”的一体化管理模式可以较好地克服由不良地质造成的不利因素的影响,提高基础工程的质量、安全性以及经济效益,在类似项目中起到良好的示范作用。

[关键词] 复杂地质; 土建工程; 基础施工; 技术改进; 智能化监控

中图分类号: TU753 文献标识码: A

Research on Optimization of Foundation Construction Technology for Civil Engineering under Complex Geological Conditions

Mengdong Sun Tengfei Liu

Xixian New Area Innovation Culture and Tourism Development Co., Ltd.

[Abstract] This paper investigates the main problems and causes affecting foundation construction and structural stability under complex geological conditions. On this basis, it analyzes the advantages and disadvantages of commonly used foundation solutions such as pile foundations, diaphragm walls, and composite foundations in addressing different types of geological issues. The study emphasizes technical measures for improving construction processes, including strengthening pre-construction investigation and design coordination, adopting new technologies and methods, implementing intelligent monitoring and early-warning systems, and optimizing construction organization through refined management. The results show that an integrated management model of “accurate investigation—flexible design—intelligent construction—timely feedback” can effectively mitigate adverse impacts caused by unfavorable geological conditions, improve the quality, safety, and economic performance of foundation engineering, and serve as a useful reference for similar projects.

[Key words] Complex Geological Conditions; Civil Engineering; Foundation Construction; Technical Improvement; Intelligent Monitoring.

引言

基础工程是建筑物安全及寿命的基础,在软土地基、岩溶地区、活动断裂带、高承压水位、湿陷性黄土、膨胀土等地质条件复杂情况下,“勘察—设计—施工”的线性工作流程无法解决地下环境高度的非均质性、隐蔽性和不确定性所带来的问题,从而容易造成塌孔、突水、基坑坍塌、不均匀沉降或建筑物倒塌等问题。有限数量的勘探孔不能准确反映实际情况,而一成不变的设计方案又不能根据施工过程中出现的问题进行及时调整,因而增加了工程的风险。因此需要打破传统思维定势,建立能够灵活应对、及时反应并且有效控制地质不确定性的基础工程施工技术。本文围绕该问题展开研究,总结复杂地质

条件下所面临的技术难题,分析目前所采用的方法所能达到的程度,并给出全方位、系统的解决措施,以期提高基础工程的安全性和灵活性。

1 复杂地质条件对基础施工的核心影响与挑战

1.1 地层稳定性与承载力的不确定性

软土、淤泥质土等高压缩性土层,其天然承载力很低(一般小于80kPa),而且含水量很高、孔隙比很大、透水性很差,在外荷载作用下会发生长时间较大主固结和次固结沉降。如果处理不当会造成上部建筑物开裂甚至倒塌。而在岩溶地区由于存在各种溶洞、土洞等地质缺陷,造成地基承载力在某些地方突然消失而形成所谓的“空洞陷阱”。断层破碎带中的岩石受到强烈挤

压、剪切,成为松散、破碎的角砾岩或者断层泥,它的单轴抗压强度可能只有完好基岩的1/10到1/5,对于钻孔及嵌岩深度都带来很大麻烦。这些不同类型的土体以及它们之间的差异性对确定基础形式以及计算其承载力带来很大不确定因素。

1.2 地下水活动的干扰与风险

高地下水位,特别是承压含水层的情况下,也是基础施工的一大“天敌”。在基坑开挖或者钻孔桩施工中,如果隔水帷幕失效或者不能及时降低地下水位,在基坑底部或者钻孔桩孔壁处有可能会产生承压水向基坑内或孔内突涌而出的情况,出现突涌、管涌、流砂等现象。而突涌发生临界水头可以用太沙基(Terzaghi)有效应力理论来计算,即当基坑底下承压含水层测压水头大于基坑开挖面到此含水层顶部距离,则可能发生突涌^[1]。这样就会使施工场地被淹并掏空地基土体导致周围地面沉降,给临近建筑物和管线带来安全隐患。而且地下水中有毒物质(例如具有侵蚀性的CO₂、SO₄等)还会对混凝土基础造成腐蚀影响其使用寿命。

1.3 施工过程中的动态扰动与连锁反应

基础施工本身即是扰动的过程。深基坑开挖卸载土体,破坏原有的地应力平衡,使坑壁土体向内移动,从而导致地面向下沉。在饱和软土中进行挤土桩(如预制桩)施工,强大的挤压力将压密周围的土体,在此过程中产生超孔隙水压力,有可能造成桩体上浮或者桩体破坏,同时也会给临近已有的建筑物带来“挤土效应”,使其发生位移甚至上浮。由于施工引起的这种二次地质灾害的影响范围及大小均难以估计,因此具有很大的安全隐患。

2 适应复杂地质的主流基础施工技术及其局限性

2.1 桩基础技术的演进与挑战

桩基础通过将荷载传至较深稳定持力层上,可以穿过软弱土层、溶洞等。而在复杂的地质条件下,灌注桩由于其适用范围广、噪声低等特点得到广泛应用。但是在岩溶地区钻孔容易产生偏孔、卡钻等情况,而且在灌注混凝土过程中容易因为溶洞相通而造成大量漏浆,导致断桩。所以就出现了全套管护壁工艺,在使用液压力头带动钢套管随钻孔一起下沉,能有效避免孔壁坍塌以及混凝土漏失。而在高含水量的砂层中则会出现坍孔、缩径等现象,一般会采用气举反循环清孔工艺,用高压空气从钻杆内部产生负压,把孔底的淤泥吸出,保证孔底淤泥厚度不超过100mm(端承桩)、150mm(摩擦型桩)。后压浆法是提高桩基承载力的一种方法。就是在桩底和桩侧预埋注浆管,在成桩之后一段时间内(一般为3-7d)向其中注入水泥浆液。浆液一方面劈裂、渗透、填充桩周及桩端土体中的孔隙,形成扩底和石状体;另一方面,浆液劈裂可以起到破坏桩身表面的泥皮,增强桩-土接触面之间的摩擦力的作用。有研究表明,经过后压浆处理的钻孔灌注桩,其极限承载力可以增加40%-100%。而在对挤土敏感的地方,则更愿意选择非挤土的钻孔灌注桩或者部分挤土的预先钻孔打入桩。但是不管怎样,桩基础施工在很复杂的地层中保证质量和预防风险仍然是很大的问题。

2.2 地下连续墙与深基坑支护技术

对于深大基坑特别是软土地质或者地下水位较高情况下,由于地下连续墙具有强度高、止水性好的特点,所以一般采用地下连续墙作为支护兼止水结构。地下连续墙施工主要包括导墙施工、泥浆配制及循环、成槽、清底、钢筋笼加工及吊装、水下混凝土灌注等内容。而其中成槽是最重要环节,需要对泥浆质量进行严格把控(比重为1.15~1.25g/cm³,黏度在20~30s之间,含砂量小于4%)以防槽壁坍塌。但是当存在孤石、硬夹层或者岩溶时,成槽机械(如液压抓斗、铣槽机)工作效率大大降低甚至不能成槽,在这种情况下往往需要用冲击钻、炸药或旋挖钻等方法先行处理后再进行成槽作业,增加了施工复杂性和费用支出。地下连续墙接头部位止水性较差^[2]。传统的锁口管(Pull-out Pipe)接头由于拔管时间掌握不好易发生绕流而造成漏水。为解决这一问题,在施工中越来越多使用工字钢接头、十字钢板接头或者铣接头(Mill-to-Mill Joint)。铣接头利用双轮铣槽机对已经施工好的墙体进行铣削,使新鲜粗糙表面与老混凝土紧密结合,止水性最佳。另外对于较深地下连续墙(>60m),需要使用高性能泥浆(如PHP泥浆)以及分段吊装钢筋笼的方法保证成槽垂直度(<1/300)和混凝土连续灌注。

2.3 复合地基与地基处理技术

当天然地基承载力不足但又不需要采用深基础时,复合地基是一个较为经济的方法。在地基中布置一定数量的增强体(如CFG桩、碎石桩、水泥土搅拌桩等),与原状土共同承担上部荷载。CFG桩是采用长螺旋钻孔、管内泵压混合料成桩方法,适合用于粘性土、粉土、砂土以及自重不大素填土等地基加固处理。其特点是设置褥垫层(一般为150~300mm厚碎石或砂石),使桩与土共同承担荷载,防止桩承受较大应力集中。但是对于含有较多有机质软土地基中,由于有机物会影响水泥凝结硬化作用,所以此时应采用高压旋喷桩(Jet Grouting),利用高压(20~40MPa)喷射流切割、搅拌土体并掺入水泥浆液,从而形成强度较高的桩身。而在岩溶地区,碎石桩可能会掉入溶洞而导致失败。因此,复合地基设计需要结合当地实际情况,合理选用增强体种类、布置方式、长度以及置换率等参数并通过现场单桩或多桩复合地基静载荷试验来检验其可靠性。地基处理效果很大程度上取决于对地质情况了解程度。

3 复杂地质条件下基础施工技术的系统性优化路径

3.1 强化勘察-设计-施工一体化协同

要摒弃传统的“一锤子买卖式”地质勘察理念,实行“初步勘察—详细勘察—施工勘察”的地质勘察方式,在施工中采用超前地质预报方法及时掌握掌子面前方或者基坑底部等地质情况,如TSP(Tunnel Seismic Prediction)地震波法通过对人工激发地震波在不同介质界面反射信号进行分析可以较好地预测出掌子面前方100~150m处是否存在断层、破碎带及富水区;而地质雷达(GPR)则是用高频电磁波来寻找浅部(小于30m)空洞、管线等物体质点^[3]。当发现异常时应及时向设计师提供信息,设计师根据最新地质资料作出相应设计变更,改变基础形式、桩长、支

护参数等以达到地质条件要求。如此紧密合作可将隐患消除于未然之中。

3.2 推动新工艺、新材料与新装备的融合创新

在富水砂卵石地层中可以采用冻结法或者MJS工法施工有效的隔水帷幕:冻结法是利用低温冷媒使地下水结冰从而形成强度为5~10MPa、渗透率为小于 10^{-7} cm/s的冻土墙;而MJS工法则是借助360°高压喷射方式,桩径可达到4m以上、强度大于5MPa,造孔少、对周围环境影响较小。而在岩溶地区,则可以使用智能注浆技术配合分布式光纤传感技术(DTS/DAS),可以实时检测浆液流动时温度或声波的变化情况,准确绘制出其三维轨迹并将其与BIM进行连接,做到可视化、量化的管理,防止注浆不足或者过多。另外还应积极研发高强、环保型的新材料,例如自密实混凝土(坍落扩展度大于等于650mm)、抗硫酸盐水泥等,以大大增强建筑物的使用寿命。而且大尺寸的智能化设备(如带有自动调垂功能的旋挖钻机、无人驾驶双轮铣槽机等)都是装有各种各样的传感器来监测自身的钻压、扭矩以及倾斜角度等信息来进行自动纠偏工作,保证成孔/槽的质量,从而加快速度并且更加精确。新技术、新产品、新设备的应用正在让基坑工程向着更加安全、高效、智能化的方向发展。

3.3 构建智能化监测预警与风险管理体系

要建设天上、空中、地下、内部全方位、智能化监控体系。用地面北斗/GNSS监测地面沉降情况,可达到毫米级精度;用自动化全站仪及静力水准仪对基坑及其周围房屋进行变形检测,在土体内布置振弦式或者光纤光栅(FBG)测点来获取孔隙水压力、土压力、钢筋应力等重要参数。所有的信息都通过互联网传送到云端,然后运用大数据以及机器学习的方法对这些信息进行处理^[4]。例如,可以建立以长短时记忆网络(LSTM)为基础的时间序列预测模型,利用过往观测值对将来一段时间内变形情况进行预测,在实际观测值与预测值之差大于一定门限或者观测值接近用极限平衡法或者数值模拟得出警戒线的情况下,系统可自动发出黄色、橙色或者红色三层级报警,并在手机上提供相应应急措施(比如增加巡视频次、停止施工、启动应急预案等),从而达到由“亡羊补牢”向“未雨绸缪”。

3.4 实施全过程精细化与标准化施工管理

要重视现场管理精细化。认真做好技术交底工作,使每个作业工人明白哪些是地质风险点以及相应施工要点。实行首件制、样板引路,在重要部位(如钢筋笼吊装、水下混凝土灌注、连接部位)上派专人盯控。建立质量可追溯机制,把所有进场物资(如钢筋的炉批号、水泥的出厂编号)、隐蔽工程验收记录、施工日志等全部电子化保存,做到有迹可循、有责可追。还要经常组织应急演练,以防万一有事故发生时可以及时、有效、有序应对,把损害降到最低。

4 结语

在复杂地质条件下进行土建工程的基础施工要充分考虑各种地质难题以及目前所采用的技术手段并提出一套包括合作机制、新技术研发、智能化监控及精细化管理在内的整体解决方案来指明今后的发展方向。而未来一定是越来越趋向于集成化、智能化的发展方向,在数字孪生(Digital Twin)技术日趋完善的情况下可以实现对整个施工现场进行数字化复制从而得到一个在现实中一模一样的“数字地基”,然后对不同的施工方案在复杂地质环境中做出反应提前确定最佳选择并且在施工时不断对比实际与虚拟之间的差距做到近乎实时调整。这样就能让我们更好地了解、认识、掌握地下空间使我们能够更加安全、快速、优质地完成各种规模巨大的地下建筑工程打下良好的基础。

[参考文献]

- [1]宋金明,吴飞.复杂地质条件下土建工程基础施工技术优化研究[C]//河南省豫商经济文化交流协会.2026中国建筑经济研讨会论文集(上册).[出版者不详],2026:237-239.
- [2]常胜.复杂地质条件下土建工程基础施工技术优化研究[J].散装水泥,2026,(1):23-25.
- [3]罗考勇.土建工程地基基础工程施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(27):97-99.
- [4]张世锋.土建工程中地基基础施工技术应用研究[J].房地产世界,2024,(3):149-151.