

复杂地质条件下深基坑支护施工技术及变形监测分析

张蒙召

河北建设集团股份有限公司 河北 保定 071000

摘要:随着我国城市化进程的不断推进,地下空间开发日益频繁,深基坑工程在高层建筑、地铁车站、地下商业综合体等项目中广泛应用。然而,在复杂地质条件下(如软土、砂层、岩溶、高地下水位、断层破碎带等),深基坑的稳定性控制面临严峻挑战,极易引发支护结构失效、周边地表沉降过大甚至坍塌等安全事故。本文系统梳理了复杂地质条件下常用的深基坑支护技术,重点分析了排桩+内支撑、地下连续墙、TRD工法墙、SMW工法桩等支护体系的适用性与关键技术要点;同时,深入探讨了基于自动化监测与数值模拟相结合的变形监测体系,提出了多源数据融合的预警机制。通过典型工程案例分析,验证了所提技术路线的有效性。研究表明,针对不同地质特征采取差异化支护方案,并辅以全过程、高精度的变形监测与动态反馈,是保障复杂地质条件下深基坑工程安全的核心策略。

关键词:复杂地质;深基坑;支护技术;变形监测;数值模拟;安全控制

引言

近年来,随着城市土地资源日益紧张,向地下要空间已成为城市发展的必然趋势。深基坑工程作为地下空间开发的前置环节,其深度和规模不断增大,施工环境日趋复杂。尤其在沿海软土地区、西南岩溶区、西北湿陷性黄土区以及城市密集建成区,地质条件往往呈现出多层性、非均质性、高含水性及不良地质体(如孤石、溶洞、断层)共存等特点,给深基坑的设计与施工带来了极大不确定性。

深基坑工程的核心目标是在确保基坑自身稳定的同时,最大限度地控制对周边环境(包括既有建筑物、地下管线、道路等)的影响。在复杂地质条件下,土体强度低、渗透性强、自稳能力差,导致支护结构受力复杂,变形难以预测^[1]。若支护方案选择不当或监测预警滞后,极易引发工程事故,造成重大经济损失和人员伤亡。因此,深入研究复杂地质条件下深基坑支护技术与变形监测方法,具有重要的理论价值和工程实践意义。

本文旨在系统总结适用于复杂地质条件的深基坑支护技术体系,构建基于多源信息融合的变形监测与预警模型,并通过工程实例验证其有效性,为类似工程提供技术参考。

1 复杂地质条件的分类与工程特性

复杂地质条件通常指对基坑稳定性构成显著不利影响的地质环境,主要包括以下几类:

1.1 软土地区

主要分布于长江三角洲、珠江三角洲等沿海区域。其典型特征为:含水量高($w > 40\%$)、孔隙比大($e > 1.0$)、压缩性高、抗剪强度低($c \approx 0$, $\varphi < 10^\circ$)、渗透

系数小。软土在开挖卸荷后易产生显著的流变变形和侧向挤出,导致支护结构位移大、坑底隆起严重。

1.2 砂性土与高地下水位地区

砂层渗透性强($k > 10^{-4} \text{cm/s}$),在高水位条件下易发生管涌、流砂等渗透破坏。若降水措施不当,可能引起周边地面沉降,危及邻近建筑安全。

1.3 岩溶与破碎带地区

常见于西南喀斯特地貌区。地下存在溶洞、土洞、断层破碎带等,地质结构极不连续。开挖过程中易发生突水、突泥,支护结构局部受力集中,稳定性难以保证。

1.4 湿陷性黄土地区

主要分布于西北地区。黄土在天然状态下具有较高强度,但遇水后迅速湿陷,体积收缩,导致地基承载力骤降,对基坑侧壁稳定构成威胁。

1.5 城市密集建成区

虽非天然地质复杂,但因邻近既有建筑、地铁隧道、重要管线等,对变形控制要求极高(通常要求地表沉降 $\leq 30\text{mm}$),施工扰动敏感,属于“环境复杂型”地质条件。

上述地质条件往往相互叠加,如“软土+高水位”、“岩溶+断层”等,进一步增加了基坑工程的风险等级。

2 复杂地质条件下深基坑支护技术体系

面对多样化的复杂地质环境,单一的支护形式往往难以满足安全与变形控制的双重需求,必须依据具体地质特征与周边环境条件,选择或组合适宜的支护技术体系。

2.1 排桩+内支撑体系

排桩加内支撑体系因其结构受力明确、变形可控,在软土、砂层及一般黏性土地层中被广泛应用,尤其适

用于对变形控制要求较高的城市核心区深大基坑。该体系通常采用钻孔灌注桩或咬合桩作为挡土结构,桩径在800至1200毫米之间,桩间距控制在1.2至2.0米,以保证整体刚度。内支撑则多采用钢筋混凝土或钢结构,前者刚度大、变形小,但施工周期较长;后者安装便捷,可施加预应力以主动控制变形,但整体刚度相对较低^[2]。在软土地层中,为增强坑底抗隆起能力,常辅以坑内被动区水泥土搅拌桩加固。同时,必须配套有效的止水帷幕(如高压旋喷桩)与降水系统,以控制地下水对支护结构的不利影响。

2.2 地下连续墙(Diaphragm Wall)

对于超深基坑(深度超过20米)或邻近重要保护对象的工程,地下连续墙因其兼具优异的挡土与止水性能,成为首选方案。墙体厚度通常为0.8至1.2米,深度可达50米以上,能够有效隔断高承压水层。其施工关键在于成槽工艺的选择与接头处理。在含孤石或硬岩地层中,需采用铣槽机或冲击钻配合预爆破技术;而墙体接头形式(如工字钢接头、铰接头)则直接关系到止水效果的可靠性。地下连续墙常与多道内支撑或逆作法结合,形成刚度大、整体性好的支护体系,能有效控制深层土体位移。

2.3 TRD工法墙(Trench-Cutting Re-mixing Deep Wall)

近年来,TRD工法墙在超深(>50m)、超长且空间受限的基坑工程中展现出独特优势。该技术通过链锯式切割箱在地下形成连续等厚度的水泥土墙,厚度通常为550至850毫米,深度可超过50米。其最大特点是墙体连续无缝隙,止水效果极佳,特别适用于高承压水层下的隔水帷幕施工^[3]。TRD墙还可插入H型钢形成复合挡土结构,兼具经济性与功能性。由于施工扰动小,TRD工法尤其适用于紧邻既有建筑或运营地铁的敏感区域。

2.4 SMW工法桩(Soil Mixing Wall)

相比之下,SMW工法桩则更适用于中等深度(一般小于20米)的软土或砂层基坑。该技术通过多轴搅拌机将水泥浆与原状土强制搅拌形成水泥土墙,并插入H型钢提供抗弯能力。H型钢在基坑回填后可拔出回收,具有良好的经济性。然而,其施工效果高度依赖于地层的均匀性,在含大粒径孤石或硬夹层的地层中难以实施,且墙体深度受限,止水性能也受搅拌均匀性影响,在高渗透性砂层中需严格控制施工参数。

2.5 复合支护体系

在极端复杂的地质条件下,单一技术往往难以奏效,复合支护体系应运而生。例如,在软土深基坑中,可采用“地下连续墙+坑内加固+多道混凝土支撑”的组

合,实现挡、止、撑、固一体化;在高水位砂层区域,则可结合“排桩+TRD止水帷幕+降水井”,有效控制渗流与变形;而在岩溶发育区,针对局部不稳定体,常采用“预注浆加固+微型桩+喷锚”的局部强化措施。这种多技术协同的思路,体现了深基坑工程从“单一结构”向“系统防护”的理念转变。

3 深基坑变形监测体系构建

3.1 监测内容与布点原则

变形监测是深基坑信息化施工的核心环节,其本质是通过实时获取支护结构与周边环境的变形响应,为风险预警与动态调控提供数据支撑。监测内容的设置需全面覆盖基坑系统的各个关键部位,包括支护结构的桩(墙)顶水平位移、深层水平位移(通过测斜管获取)、支撑轴力及立柱沉降,同时必须关注周边地表沉降、邻近建筑的倾斜与裂缝发展、地下管线的位移变化,以及地下水位与孔隙水压力的动态。测点布置应遵循“重点区域加密、关键断面覆盖、数据可比性强”的原则,在基坑长边中部、阳角转折处、邻近敏感建筑或管线侧等高风险区域进行加密布设,确保监测数据能真实反映最不利工况下的变形特征。

3.2 监测技术手段

传统的人工监测方法,如全站仪测水平位移、水准仪测沉降,虽成本较低且直观可靠,但受限于人工操作频率(通常1-2次/天),难以捕捉变形的瞬时突变过程,预警滞后性明显。随着传感技术与物联网的发展,自动化监测系统逐渐成为高风险基坑的标配。该系统集成静力水准仪、伺服测斜仪、光纤光栅传感器、GNSS接收机等多种高精度传感设备,通过数据采集器与无线传输模块,实现数据的分钟级甚至秒级采集与远程传输。系统可依据规范或工程经验设定三级预警阈值(黄色、橙色、红色),一旦监测值超限,自动向管理人员推送报警信息,显著提升了风险响应的时效性^[4]。此外,InSAR(合成孔径雷达干涉测量)与无人机倾斜摄影等遥感技术,为大范围、非接触式地表形变监测提供了新手段,尤其适用于基坑群或难以布设物理测点的区域。

3.3 数值模拟与监测数据融合

更为重要的是,监测数据的价值不仅在于“记录”,更在于“预测”与“决策”。将实测数据与数值模拟(如MIDASGTS、PLAXIS等软件)深度融合,可实现从被动监测向主动防控的跨越。通过反演分析,利用实测位移数据修正土体本构参数(如弹性模量 E 、黏聚力 c 、内摩擦角 ϕ),可显著提高数值模型的预测精度;在此基础上,结合当前施工工况,可动态预测后续开挖

阶段的变形趋势；当监测数据出现异常时，可通过模拟不同应急措施（如增设临时支撑、调整开挖顺序）的效果，为现场决策提供科学依据。这种“监测—分析—决策—调整”的闭环管理机制，是保障复杂地质条件下深基坑安全施工的关键。

4 工程案例分析

4.1 工程概况

某工程位于长三角典型软土区，基坑长度达180米，宽度28米，开挖深度23.5米，属于超深基坑。场地地质自上而下依次为2米厚杂填土、12米厚淤泥质黏土（含水量48%，黏聚力仅12kPa，内摩擦角 8° ）、8米粉质黏土及下伏粉砂层，其中粉砂层存在8米高的承压水头。基坑东侧3米处为10层居民楼，西侧紧邻正在运营的地铁隧道，变形控制标准极为严格，要求地表沉降不得超过20毫米。

4.2 支护方案

针对上述高风险条件，工程采用了“1.0米厚地下连续墙（深度45米）+五道钢筋混凝土内支撑”的支护体系。地下连续墙底部深入粉砂层以下8米，有效隔断了承压水的上涌通道。为增强坑底稳定性，在被动区设置了宽度6米、深度15米的三轴水泥土搅拌桩加固体。同时，布设32口降水井，将坑内水位严格控制在坑底以下1米，防止管涌发生。

4.3 监测体系

监测体系方面，项目部署了包含20个测斜孔、30个地表沉降点和15个支撑轴力计的自动化监测网络，数据每2小时自动采集并上传至智慧工地平台。预警阈值设定为墙体最大位移45毫米（即0.2%基坑深度）和日变量3毫米。在开挖至第四道支撑阶段，东侧测斜数据显示墙体最大位移已达38毫米，日变量接近2.8毫米，逼近预警红线。项目技术团队立即启动应急响应机制，通过数值反演发现，实际淤泥质土层的力学参数低于勘察报告值，导致模型预测的最终位移将超出控制标准。基于此，现场迅速采取三项措施：一是在该区域增设一道临时钢支

撑以增强局部刚度；二是将后续开挖分层厚度由3米减至1.5米，减缓卸荷速率；三是加强降水强度，进一步降低孔隙水压力。调整措施实施后，墙体位移速率显著下降，最终最大位移控制在42毫米，周边居民楼沉降为16毫米，完全满足安全控制要求。

该案例充分表明，在软土深基坑工程中，地下连续墙配合多道内支撑仍是可靠的技术路径，但其成功实施高度依赖于高精度的自动化监测与快速响应的动态调控机制。数值模拟与实测数据的联动，使得工程管理从经验驱动转向数据驱动，实现了风险的前置识别与主动干预。

5 结语

本文聚焦复杂地质下深基坑工程安全控制，探讨了支护技术选型与变形监测体系构建。研究指出，复杂地质环境多样，支护方案需因地制宜，如软土地区宜用地下连续墙等，高水位砂层要强化止水降水，岩溶区注重预加固。新型工法有良好适应性，复合支护体系成应对极端条件主流。监测方面，单纯人工观测难满足需求，构建以自动化传感为基础、数值模拟为支撑、智能预警为目标的全过程监测体系是核心。通过监测数据与数值模型融合，能提升参数反演精度，实现动态预测与方案实时优化，形成闭环管理。展望未来，深基坑工程安全控制将更依赖数字化与智能化融合。BIM、GIS及物联网、机器学习算法等将发挥作用。唯有持续推进技术创新与管理升级，才能筑牢城市地下空间开发安全防线。

参考文献

- [1]李瑞军.复杂地质高层建筑工程深基坑开挖支护技术探究[J].建筑技术开发,2025,52(09):162-164.
- [2]祁正平.复杂地质条件下深基坑支护技术及安全管理措施研究[J].交通科技与管理,2025,6(17):127-129.
- [3]梁焱华,李位伟,梁焱飞.复杂地质条件下的深基坑支护技术应用研究[J].工程技术研究,2025,10(13):65-67.
- [4]潘长治.复杂地质深基坑支护施工关键技术研究[J].建筑机械化,2025,46(05):177-180.