

复杂地质条件下深基坑岩土边坡稳定性研究

尉海江

浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司 浙江 杭州 310012

摘要：本文聚焦复杂地质条件下深基坑岩土边坡稳定性研究。先阐述软弱土层、岩溶地貌、高地下水位等复杂地质条件类型及其对边坡稳定性的影响，接着介绍传统分析技术、现代数值模拟技术和综合分析方法等稳定性分析手段，然后提出优化支护结构设计、地基处理与加固、施工过程监测与控制等提高稳定性的措施，为复杂地质条件下深基坑工程提供理论与实践参考。

关键词：复杂地质条件；深基坑；岩土边坡；稳定性研究

1 复杂地质条件的类型

1.1 软弱土层

软弱土层通常具有高压缩性、低强度和低渗透性等特点，常见的软弱土包括淤泥、淤泥质土、软黏土等。在软弱土层中进行深基坑开挖时，由于土体的强度较低，边坡容易发生滑移和坍塌。软弱土层的压缩性较大，在基坑开挖过程中，土体会产生较大的沉降，可能导致周边建筑物和地下管线的损坏。软弱土层的渗透性低，排水困难，在降水过程中可能会引起土体的固结沉降，进一步影响边坡的稳定性。例如，在沿海地区的一些城市，地下广泛分布着淤泥质软土。在进行深基坑工程时，如果不采取有效的支护措施，基坑边坡很容易出现滑动破坏，给工程带来严重的安全隐患。

1.2 岩溶地貌

岩溶地貌是由地下水对可溶性岩石（如石灰岩、白云岩等）进行长期溶蚀作用而形成的地貌形态，常见的岩溶地貌有溶洞、溶沟、石芽等。在岩溶地区进行深基坑开挖时，岩溶的存在会对边坡的稳定性产生重大影响^[1]。溶洞的存在会破坏岩体的完整性，降低岩体的强度，当基坑开挖至溶洞附近时，边坡容易发生坍塌。岩溶地区的地下水位变化较大，在降水过程中，可能会导致地下水位下降，引起溶洞顶板的失稳，从而影响边坡的稳定性。比如，我国西南地区的部分城市，地下岩溶发育较为普遍。在深基坑工程中，经常会遇到溶洞等岩溶地质问题，给施工带来了很大的困难和挑战。

1.3 高地下水位

高地下水位是指地下水位接近或高于基坑开挖底面的情况。在高地下水位地区进行深基坑开挖时，地下水会对边坡产生较大的水压力，增加边坡的滑动力，降低边坡的稳定性。同时，地下水的渗流作用会导致土体的颗粒流失，引起土体的软化，进一步削弱边坡的强度。

另外，高地下水位还会增加基坑降水的难度和成本，如果降水措施不当，可能会导致基坑周围地面沉降，影响周边建筑物的安全。

2 复杂地质条件对深基坑岩土边坡稳定性的影响

2.1 地质结构因素

地质结构作为影响深基坑岩土边坡稳定性的关键要素，起着举足轻重的作用。不同的地质结构形态，像断层、褶皱、节理等，对边坡稳定性的影响各有差异。断层犹如岩体中的一道“伤疤”，它的出现无情地破坏了岩体的连续性和完整性，让原本紧密相连的岩体变得支离破碎，进而大幅降低岩体的强度。在这种情况下，边坡就如同失去了坚固支撑的斜坡，极易发生滑移和坍塌事故。褶皱则会使岩层发生弯曲变形，在褶皱轴部，应力会高度集中，就像一个压力聚集点，导致岩体破碎不堪。这种破碎的岩体难以承受边坡的重量和外力，严重影响边坡的稳定性。节理是岩体中常见的裂隙，其发育程度和方向对岩体的力学性能影响重大。当节理的方向与边坡的倾向一致时，就如同为边坡的滑移开辟了“通道”，会显著降低边坡的稳定性。例如在山区进行深基坑工程时，若遇到断层破碎带，在基坑开挖过程中，断层破碎带中的岩体极易发生滑移，进而导致边坡失稳，给工程带来巨大隐患。

2.2 水文地质因素

水文地质条件对深基坑岩土边坡稳定性的影响不容小觑。地下水的存在就像一个“隐形杀手”，会悄然改变土体的物理力学性质。它会增加土体的重量，让土体变得更加沉重，同时降低土体的抗剪强度，使土体更容易被破坏。地下水的渗流作用会产生动水压力，这种压力如同无形的力量，对边坡产生冲刷和侵蚀作用，不断削弱边坡的稳定性^[2]。地下水位的变化还会引起土体的有效应力变化，导致土体发生固结沉降。就像建筑物失

去稳定的地基一样,土体的沉降会直接影响边坡的稳定性。比如,在雨季进行深基坑工程时,地下水位迅速上升,土体的含水量大幅增加,抗剪强度急剧降低,边坡的稳定性会受到严重影响。若此时没有及时采取有效的排水措施,基坑边坡就如同坐在“定时炸弹”上,很容易发生滑坡事故,给工程造成严重损失。

2.3 地震作用因素

地震作为一种强烈的自然灾害,对深基坑岩土边坡稳定性的破坏力极大。地震发生时,产生的地震波如同汹涌的波涛,会使土体产生剧烈振动。这种振动会导致土体的抗剪强度大幅降低,同时增加边坡的滑动力,让边坡处于更加危险的状态。而且,地震还可能引发地下水位的变化,进一步加剧对边坡稳定性的影响。在地震烈度较高的地区,深基坑岩土边坡在地震的强大作用下,就像脆弱的小船在狂风巨浪中,容易发生大规模的滑坡和坍塌。这些灾害不仅会直接破坏深基坑工程的结构,还会给周边环境和人员安全带来严重威胁。例如,在汶川地震中,许多深基坑工程遭受了不同程度的破坏,基坑边坡出现了严重的滑移和坍塌现象,大量土石方堆积,堵塞了交通要道,给救援工作和后续的重建带来了极大的困难,凸显了地震作用对深基坑岩土边坡稳定性的巨大挑战。

3 复杂地质条件下深基坑岩土边坡稳定性分析方法

3.1 传统分析技术

在边坡稳定性分析领域,传统分析技术凭借深厚的历史积淀和广泛的实践应用,成为工程领域的重要基石,主要包括极限平衡法和经验类比法。极限平衡法是基于静力平衡原理构建的分析体系,以严谨的力学逻辑为支撑。该方法将边坡岩土体细致划分为若干条块,对每个条块所受的重力、土压力、水压力等进行精准剖析,并据此建立平衡方程,通过求解方程得到边坡稳定性系数,从而判断边坡的稳定状态。其中,瑞典条分法作为经典方法,假定条块间无侧向力,计算相对简便,适用于初步分析;毕肖普法则考虑了条块间的侧向力,计算结果更为精确,常用于精度要求较高的工程。两种方法虽计算逻辑和适用场景存在差异,但都为边坡稳定性分析提供了可靠的量化依据。经验类比法则是工程实践智慧的结晶,它以大量工程案例为参照,将当前工程的地质条件、边坡形态、水文特征等关键要素,与历史上类似工程进行系统对比。例如,在某山区公路边坡建设中,工程师参考以往相同岩性、坡度和降雨条件下的边坡工程案例,成功预判并规避了潜在的滑坡风险。通过借鉴类似工程的成败经验,经验类比法能快速对边坡

稳定性做出评估。传统分析技术以计算流程简明、知识体系易于掌握的优势,在各类土木工程中得到广泛应用。但不可忽视的是,该技术存在明显局限性。由于其未充分考量土体应力应变的动态关系,无法准确模拟边坡从变形到失稳的全过程,在处理断层交错、岩性复杂多变的地质环境时,计算精度难以满足现代工程的高标准要求。

3.2 现代数值模拟技术

现代数值模拟技术在边坡稳定性分析中发挥着越来越重要的作用,主要包括有限元法、有限差分法、离散元法等。有限元法是一种先进且实用的分析方法,它将连续的边坡岩土体离散化为有限个单元,每个单元都具有特定的力学性质。通过对每个单元进行细致的力学分析,综合考虑各种力的作用和边界条件,建立整体平衡方程。然后运用数值计算方法求解这些方程,从而得到边坡的应力应变分布和稳定性系数。有限差分法则是将求解域划分为差分网格,用差分方程近似代替微分方程,将连续的问题离散化。通过求解差分方程,能够得到边坡在不同位置的应力应变和稳定性情况^[3]。离散元法把边坡岩土体看作是由许多离散的颗粒组成,着重研究颗粒之间的相互作用,如接触力、摩擦力等,以此分析边坡的变形和稳定性。现代数值模拟技术能够充分考虑土体的非线性、各向异性等复杂特性,可以逼真地模拟边坡的变形和破坏过程,对于复杂地质条件下的边坡稳定性分析具有较高的精度和可靠性。不过,数值模拟技术需要建立合理的计算模型,对计算参数的选取要求极为严格,计算过程也相对复杂,需要专业的技术人员和先进的计算设备支持。

3.3 综合分析方法

综合分析方法是一种创新且高效的边坡稳定性分析手段,它将传统分析技术和现代数值模拟技术有机结合,充分发挥各自的优势,以达到提高边坡稳定性分析准确性和可靠性的目的。在实际应用中,可以先采用经验类比法对边坡的稳定性进行初步评估。凭借丰富的工程经验和类似工程的对比,快速对边坡的稳定状况有一个大致的了解,为后续的分析提供方向和参考。然后利用极限平衡法进行定量分析,通过精确的计算得出边坡的稳定性系数,从数值上明确边坡的稳定程度。最后通过数值模拟技术对边坡的变形和破坏过程进行模拟,直观地展示边坡在不同条件下的变化情况,进一步验证前面分析结果的合理性。综合分析方法能够综合考虑地质结构、水文地质、地震作用等多种因素的影响,避免了单一分析方法的局限性,更全面、准确地评估复杂地质

条件下深基坑岩土边坡的稳定性。因此在实际工程中,综合分析方法具有广阔的应用前景,能够为工程的安全建设提供有力的技术支持和保障。

4 提高深基坑岩土边坡稳定性的措施与建议

4.1 优化支护结构设计

支护结构作为保障深基坑岩土边坡稳定性的关键防线,其设计的合理性与有效性至关重要。在面对复杂地质条件时,设计人员需深入调研现场地质情况,精准把握地质特点,以此为依据谨慎选择合适的支护形式。排桩支护凭借其施工便捷、适应性强的优势,在多种地质条件下均有应用;地下连续墙支护则以整体性好、刚度大的特点,适用于对变形控制要求严格的工程;土钉墙支护具有经济、施工速度快等优点,常用于土质较好且开挖深度不大的基坑。确定支护形式后,合理确定支护结构参数是核心环节。桩径、桩间距、墙厚等参数直接影响支护结构的强度和刚度。若参数设计不合理,可能导致支护结构无法承受边坡的土压力和水压力,引发安全事故。另外,采用组合支护形式能充分发挥不同支护方式的优势,实现优势互补。例如在软弱土层地区,排桩与锚索相结合的支护形式,排桩提供侧向支撑,锚索通过施加预应力增强支护结构的稳定性,二者协同作用,有效提高边坡的稳定性,为深基坑工程的安全施工提供坚实保障。

4.2 地基处理与加固措施

在复杂地质条件下,地基常面临承载力不足、稳定性差等严峻挑战,严重威胁工程安全与质量,因此采取有效的处理与加固措施刻不容缓。目前,常见的地基处理方法因各自独特的技术特点,在不同地质场景中发挥着关键作用。换填法凭借操作简便的优势,成为浅层软弱地基处理的常用手段。施工时,工程人员将软弱土层彻底挖除,随后换填级配良好的砂石、灰土等高强度材料。这些材料具有良好的透水性和较高的压缩模量,换填后能快速提升地基强度,增强其承载能力。强夯法借助重锤从数米甚至数十米高度自由落体产生的巨大冲击力,对地基进行强力夯实。通过调整重锤重量、落距等施工参数,可使地基土颗粒重新排列,显著增加密实度,有效提高承载能力,尤其适用于碎石土、砂土等地基。水泥搅拌桩法在软黏土地区应用广泛,其利用水泥作为固化剂,通过特制搅拌机械将水泥与软土强制搅

拌。在一系列物理化学反应作用下,软土硬结形成具有一定强度和整体性的桩体,与周围土体共同作用,大幅提高地基承载力。在岩溶地区,溶洞破坏岩体完整性,导致地基稳定性骤降。注浆加固法此时发挥关键作用,工程人员将水泥浆、化学浆液等注入溶洞,填充空间并胶结松散岩体。

4.3 施工过程中的监测与控制

深基坑施工过程中,边坡的稳定性受多种因素影响,实时监测和控制边坡稳定性是确保工程安全的重要举措。通过安装测斜仪、水位计、应力计等先进的监测设备,能够精准获取边坡的位移、地下水位、支护结构的应力等关键数据。测斜仪可实时监测边坡的倾斜变化,及时察觉边坡的微小位移;水位计能准确掌握地下水位的高低和变化情况;应力计则可测量支护结构所承受的应力大小^[4]。依据监测结果,施工人员能够及时了解边坡的变形动态,迅速调整施工方案和支护参数。例如,当监测发现边坡位移过大时,立即分析原因,采取增加支护结构的强度、加强降水等针对性措施,有效控制边坡的变形,防止边坡失稳事故的发生。通过实时监测与精准控制,为深基坑工程的安全施工提供动态保障,确保工程质量和人员安全。

结束语

复杂地质条件给深基坑岩土边坡稳定性带来诸多挑战,影响工程安全与质量。通过深入研究其类型、影响,运用多种分析方法,并采取优化支护、地基加固、实时监测等措施,可有效提升边坡稳定性。未来,随着技术发展,需不断探索创新,完善相关理论与技术,以更好地应对复杂地质条件,保障深基坑工程安全顺利推进,推动建筑行业稳健发展。

参考文献

- [1]黄琳,舒睿.地铁荷载作用下基坑边坡稳定性综合分析实例研究[J].科学技术创新,2023,(09):192-195.
- [2]乔晓延.地铁隧道明挖施工基坑支护稳定性分析[J].建筑机械,2023,(03):55-59.
- [3]胡建伟.某基坑加深开挖支护体系加固结构数值模拟分析[J].土工基础,2024,38(06):931-937.
- [4]刘捷,刘小军,王新,等.复杂地质条件对隧道施工的影响及数值模拟[J].交通节能与环保,2024,20(S2):127-133.