

内河重力式码头深基坑开挖的变形特性及控制措施

金学锋

宇航交通建设集团有限公司, 浙江杭州, 311100;

摘要: 内河重力式码头深基坑开挖面临复杂水土环境, 其变形特性受地质构成、水文条件及施工扰动等多因素影响, 主要表现为坑底隆起、围护结构侧向位移、周边地表沉降及三者的耦合效应。本文分析了变形模式与机理, 探讨了开挖方案、围护体系、降水控制等关键影响因素, 并提出基于精细化设计、信息化施工、协同作业及技术创新的综合控制策略, 为保障工程安全、控制造价及促进内河基础设施可持续发展提供理论与实践参考。

关键词: 内河重力式码头; 深基坑开挖; 变形特性; 控制措施; 水土环境

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 03. 056

引言

随着我国内河水运事业朝着战略性方向不断发展, 内河港口作为水陆交通枢纽的地位变得日益较大起来, 重力式码头凭借其结构耐久性较强、对超载有较好适应性等诸多优点, 在内河航道平原地区获得了广泛应用, 不过内河码头建设大多时候会遭遇复杂的水土环境状况, 像是地基大多是承载力相对较低的软弱土层, 地下水位较高且与河道水力联系十分紧密等。在这样的背景情形之下, 深基坑的开挖成为工程建设的关键要点与难点所在, 开挖过程打破了岩土体原本的应力平衡状态, 极易容易引发过大的变形情况, 会对基坑自身的稳定造成威胁, 还可能给邻近的堤防、桥梁等设施带来安全隐患问题, 深入剖析内河重力式码头深基坑开挖的变形特性, 并提出科学且有效的控制措施, 对于保障工程安全、控制工程造价以及促进内河基础设施建设的可持续发展有着关键的理论价值与现实意义。

1 内河重力式码头深基坑工程的水土环境特征

1.1 复杂的地质构成与土体力学特性

内河沿岸的地层通常由第四系全新世及晚更新世的冲洪积物构成, 呈现出显著的层状结构。上部常为素填土或杂填土, 其下广泛分布着淤泥质黏土、粉土、粉质黏土及粉细砂等。这些土层普遍具有含水量高、孔隙比大、压缩性高、抗剪强度低等特点。特别是淤泥质黏土层, 作为典型软弱土层, 其工程性质极差, 是基坑变形与失稳的主要潜在源头。土层的非均质性, 如黏土与粉土的互层、砂质粉土透镜体的随机出现, 使得土体的力学响应变得异常复杂, 增加了变形预测的难度。在这样的地基上修建自重巨大的重力式码头, 对地基承载力与变形控制提出了极为严苛的要求。

1.2 严峻的水文条件与渗透问题

内河码头基坑有的紧邻河道, 有的部分处于河道之内, 基坑内外有着十分突出的水位差, 这样的情况形成了严峻的水文环境, 地下水和河道水体之间有着紧密的水力联系, 使得地下水位埋藏较浅, 并且容易受到河道水位波动的影响, 基坑开挖的时候需要进行大规模降水作业, 以此来保证干式施工的条件。降水过程会改变区域地下水渗流场, 在围护结构内外形成水力坡降, 产生渗透力, 一方面, 渗透水流可能会携带土体颗粒, 致使土体流失以及围护结构渗漏, 对围堰的稳定性造成威胁, 另一方面, 大规模降水造成地下水位下降, 会加大周边土体的有效应力, 引发区域性地面沉降, 对邻近构筑物的安全构成威胁。

1.3 施工扰动与环境相互作用

深基坑工程本身就是一项对环境产生剧烈扰动的活动。土方开挖是一种快速卸荷过程, 打破了土体原有的三向应力状态。围护结构(如钢板桩)的施打、基坑内支撑的架设、建筑材料与弃土的堆放、施工机械的运行等, 都会对基坑及周边土体施加额外的静、动荷载。这些荷载与基坑开挖的卸荷效应、降水引起的渗流效应交织在一起, 形成了一个复杂的力学作用体系。基坑的变形并非单一因素作用的结果, 而是多场耦合、相互作用下的综合体现, 这要求在分析与控制中必须具备系统性的思维。

2 深基坑开挖的主要变形模式与机理分析

2.1 基坑底隆起与回弹变形

基坑开挖时移走了数量众多的上覆土体, 使得坑底土体承受的竖向应力明显减小, 也就是出现了卸荷情况, 在这种应力释放的作用之下, 坑底土体将会产生向上的

回弹变形,具体表现为基坑底部出现隆起现象,这种隆起囊括两个部分,一部分是土体骨架的弹性回弹,此回弹在卸荷瞬间就会发生,另一部分则和土中超孔隙水压力的变化存在关联。对于饱和软黏土而言,快速开挖会致使其内部产生负的超孔隙水压力,随着时间不断推进,水分逐渐渗入,负超孔隙水压力慢慢消散,土体发生膨胀,产生附加的隆起变形,隆起的量值和开挖深度、土质条件以及卸荷速率紧密相关,过大的隆起会对持力层造成扰动,影响码头基础的承载性能。

2.2 围护结构与土体的侧向位移

基坑开挖造成了坑内外土压力的巨大差异。坑外土体和水压力共同作用,推动围护结构向坑内移动。这种侧向位移是深基坑工程最主要、最危险的变形模式。其变形形态通常并非简单的刚体平移或转动,而是在坑底上下呈现出复杂的曲线形态。对于有支撑的基坑,位移形态常表现为“鼓肚形”,最大位移点通常出现在开挖面以下一定深度。对于悬臂式围护结构,则表现为绕某一点转动的形态。侧向位移的大小直接反映了基坑的稳定状态,其发展速率是判断基坑安全性的关键指标。过大的侧向位移不仅会导致围护结构本身破坏,还会引发其后方土体的连带位移。

2.3 周边地表的沉降与差异沉降

基坑周边的地表沉降乃是侧向位移以及降水效应所引发的直接结果,一方面,围护结构朝着坑内产生移动,其后方的土体随之出现“跟进”运动,土体损失使得地表向下塌陷,形成沉降槽,沉降槽的范围以及形态同开挖深度、土质、围护结构刚度等诸多因素存在关联,一般,在紧邻基坑的位置沉降量最为较大,并且向外逐步减小。另一方面,基坑降水致使周边地下水位下降,依据有效应力原理,土体有效应力增大,发生固结沉降,这两种沉降效应相互叠加,说不定致使邻近道路、管线、建筑物等出现不均匀沉降,最终造成开裂、倾斜甚至破坏。

2.4 变形的耦合效应与时空演变

上述三种变形模式并非孤立存在,而是相互耦合、互为因果的。坑底隆起会减小围护结构的嵌固约束,可能加剧其侧向位移;而侧向位移的发生,又是地表沉降的主要诱因。这些变形都具有显著的时间效应。在开挖期间,随着开挖深度的增加,各项变形值迅速增长。开挖至坑底后,即使停止开挖,土体的蠕变和固结效应仍会使变形继续发展一段时间,最终趋于稳定或持续发展

至破坏。因此,对变形的控制必须贯穿施工全过程,并充分考虑其随时间演变的特性。

3 影响深基坑变形的关键因素探讨

3.1 开挖方案与卸荷速率

土方开挖所采用的方式、顺序以及速度,会直接决定土体应力释放的路径与速率,这对于变形控制而言起着关键作用,控制变形的核心在于采用“分层、分段、均衡、限时”的原则,分层开挖可有效减小单次卸荷量,为土体应力调整以及支撑体系发挥作用留出时间,分段开挖则可借助空间效应,让未开挖部分对已开挖部分形成约束。与之相反,大规模、不均衡且快速的开挖会瞬间打破应力平衡,致使变形急剧增大,很容易引发失稳情况,基槽底宽的设计也十分关键,传统的宽基槽开挖尽管能完全覆盖应力扩散区,然而工程量巨大,研究和实践显示,对于深基槽,采用窄底宽的开挖方案,在契合结构沉降控制的条件下,可有效控制应力集中范围,达成经济与安全的统一。

3.2 围护体系的刚度与嵌固深度

围护体系是抵抗侧向土压力的主要屏障,其自身的刚度和插入土中的嵌固深度是控制侧向变形的两个关键参数。围护体系的刚度取决于其材料、截面形式和支撑系统的设置。例如,双排拉森钢板桩围堰的整体刚度远大于单排钢板桩。增加支撑或锚杆,可以显著提高体系的约束能力。嵌固深度则决定了围护墙的抗倾覆和抗滑移能力。足够的嵌固深度能为围护墙提供可靠的被动土压力,是保证其稳定的根本。设计时,必须根据地质条件和水土压力,通过计算精确确定围护体系的刚度和嵌固深度,以确保其变形在允许范围内。

3.3 降水方案与水位控制精度

降水对于深基坑工程而言犹如一把“双刃剑”,一方面,切实有效地降低坑内水位乃是保证干作业以及边坡稳定的必要前提条件,另一方面,降水致使的坑外水位下降是造成周边地面沉降的主要原因之一,降水方案的选择以及控制精度会直接对工程的成败产生影响,理想的降水方案应当达成“坑内实现有效降水,坑外产生的影响最小”这一目标。达成此目标一般需要运用多种降水方式进行组合,比如运用管井开展大范围的深层降水,借助轻型井点实施局部的浅层降水,借助设置回灌井、止水帷幕等相关措施,可有效地阻隔降水对坑外环境所造成的影响,在整个施工进程当中,对坑内外水位

进行实时监测以及精确控制是非常关键的。

3.4 基床与地基处理措施

重力式码头基础下方的基床及更深层的地基土体,其性质直接影响结构的最终沉降与稳定。基床的应力扩散效应是工程设计的核心问题之一。对于深基槽,传统的线性应力扩散角假设可能高估基床的应力扩散能力,导致对下卧层应力计算偏于不安全。采用更精确的数值分析方法,考虑荷载偏心、基槽深度等因素,可以更真实地反映应力分布规律。当原地基承载力不足时,必须进行地基加固。采用小木桩复合地基、换填砂垫层后振冲密实等技术,可以有效提高地基承载力,减小码头运营期的沉降,从而从根本上提升了工程的长期稳定性。

4 内河重力式码头深基坑变形的综合控制策略

4.1 基于变形预测的精细化设计

在设计环节,要跳出传统基于极限平衡理论以及经验公式的简化计算模式,主动引入借助有限元、有限差分等数值方法的精细化分析手段,借助构建可体现真实水土环境以及施工过程的二维或者三维数值模型,可针对基坑在不同工况时的变形展开全过程预测,此种预测不单单可给出最终的变形量,还可呈现出变形发展的时空分布规律。依据预测结果,可针对围护结构形式、支撑布置、开挖方案、降水影响等进行多方案比较和优化,在设计源头达成对变形的主动控制,制定出更具针对性且更具经济性的工程方案。

4.2 动态反馈与信息化施工

信息化施工是实现变形动态控制的核心手段。其本质是建立一个“实时监测—数据分析—风险预警—动态调整”的闭环管理系统。在基坑的关键部位布设自动化、高精度的监测仪器,如测斜管、沉降观测点、水位计、应力计等,对基坑的各项变形指标进行不间断的实时监测。将监测数据与设计预测值和预设的报警阈值进行实时比对分析,一旦发现变形速率过快或累计变形量接近警戒线,系统立即发出预警。施工管理人员依据预警信息和数据分析结果,迅速采取调整措施,如减缓开挖速度、增加临时支撑、调整降水速率等,从而将安全隐患消除在萌芽状态。

4.3 “支护—开挖—降水”协同作业

深基坑施工属于多工序紧密衔接的系统工程,需要着重关注“支护、开挖、降水”三者的协同作业,改变以往工序间相互脱节的状况,达成时间与空间上的高度

匹配,支护结构施工要紧跟土方开挖面,严格把控边坡无支护暴露时间,做到“随挖随撑”,土方开挖需与降水进程相协调,保证开挖面始终处于有效降水水位之上,防止因水位控制滞后引发流土、管涌等险情。制定周密协同作业计划,借助BIM等技术进行可视化模拟与交底,可保证各工序无缝衔接,最大程度减小施工过程中的不确定性风险。

4.4 创新的基槽开挖与地基加固技术

技术的创新是提升变形控制水平的根本动力。针对内河码头工程的特点,应积极探索和应用新材料、新工艺。例如,采用窄底宽基槽开挖技术,可以在保证结构受力安全的前提下,大幅减少土方开挖量和对周边环境的扰动,降低工程成本。在软弱地基处理方面,推广应用换填砂垫层结合振冲密实、水泥改性土、小木桩复合地基等技术,不仅能有效解决地基承载力问题,控制码头长期沉降,而且能充分利用开挖土方,符合绿色、循环的工程理念。这些创新技术的应用,为从根本上解决深基坑变形问题提供了更优的解决方案。

5 结语

内河重力式码头深基坑开挖时的变形控制属于一项涉及诸多因素以及多个过程相互耦合的系统工程,此篇文章借助剖析该工程的水土环境特点、变形模式以及影响因素,构建了包含设计、施工以及技术创新的综合控制体系,实践显示,将基于精细化预测的设计优化和动态信息化施工相结合,可有效应对复杂条件下的变形挑战。未来需要深入开展多场耦合理论研究,推动新型支护与降水技术的应用,为内河码头工程的安全高效建设以及生态保护提供更为完善的技术支持。

参考文献

- [1] 马磊磊. 扶壁式码头深基坑开挖、围堰及降水技术解析[J]. 珠江水运, 2025(8): 81-84
- [2] 马传奇. 内河港口码头深基坑及围堰施工技术[J]. 珠江水运, 2025(10): 84-86
- [3] 赵军, 廖世强, 唐明刚. 软弱地基沉箱重力式码头基槽开挖优化及地基加固技术[J]. 建筑机械, 2024(7): 122-129
- [4] 张晖. 重力嵌岩式锚碇深基坑开挖施工技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(3): 27-31
- [5] 仝仝, 刘慧芳, 禹化强, 丁永和, 宋振宇. 内河重力式码头结构设计优化[J]. 水运工程, 2021(10): 173-178