

地下水位变化对基坑边坡稳定性的影响分析

丁亚军

中冶武勘工程技术有限公司 湖北 武汉 430080

【摘要】：基坑边坡稳定性是岩土工程施工安全管控的核心内容，地下水位动态变化是诱发边坡失稳、滑移、坍塌的关键诱因。为精准把控地下水对基坑施工的影响，本文以城区商住项目深基坑工程为研究案例，结合现场监测数据，系统分析地下水位上升、下降及骤变工况下，基坑边坡土体力学特性、渗流规律及变形特征的变化机制，量化不同水位工况下边坡安全系数的变化规律，总结水位变化引发边坡失稳的核心原因。同时结合工程实际，提出针对性的地下水管控与边坡防护措施，可为同类基坑工程的安全施工、风险防控提供参考。

【关键词】：地下水位变化；基坑边坡；稳定性；渗流作用；安全防护

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.015

1 地下水位影响基坑边坡的作用机理

1.1 改变土体有效应力

土体抗剪强度是保证边坡稳定的决定因素，有效应力直接影响土体抗剪强度的大小。地下水位上升时，边坡土体孔隙被水体填充，孔隙水压力增大，土体有效应力减小，颗粒间咬合力减弱，整体抗剪强度急剧降低。地下水位下降时，孔隙水压力消散，土体有效应力增大，土体逐渐固结密实，但是过快的水位下降会引起土体不均匀固结，产生附加沉降和拉应力，造成边坡表层开裂。

1.2 产生渗流破坏作用

地下水位存在高差的时候，边坡内部就会出现定向渗流通道，从而产生渗流力。水位越高，渗流速度就越快，渗流力的作用就越大。当渗流力沿着边坡临空面向外方向推拉土体颗粒的时候，就会不断掏空边坡内部的土体结构，降低边坡的整体性。长期的渗流作用下，边坡土体孔隙不断增大，结构变疏松，最后发生局部坍塌或者整体失稳。

1.3 软化土体降低强度

粉质黏土、粉土、砂土等常见的基坑土体会在受水影响时发生软化、膨胀、崩解。地下水位上升会使边坡土体长期处在饱和含水状态，土体的黏聚力、内摩擦角等主要力学参数不断衰减，土体整体刚度降低，变形模量减小。相比干燥土体而言，饱和土体的抗变形能力急剧降低，微小的外力作用就会引起边坡变形，大大减小了边坡的安全储备。

2 工程案例概况

2.1 项目基本情况

本文以某城区商住综合体项目深基坑工程为研究对象，项目总建筑面积 8.6 万 m²，有 3 栋高层住宅和配套商业、地下车

库。基坑整体为矩形，开挖周长 386m，开挖深度 8.2m，局部集水井区开挖深度 9.5m。基坑周围紧挨着城市道路、既有居民楼，施工环境十分复杂，对于边坡变形及稳定控制的要求极高。本基坑采用放坡结合土钉墙支护方式，边坡放坡比例为 1:1.2，坡面喷射混凝土面层防护，土钉采用 $\phi 25$ 螺纹钢，间距 1.5m $\times$ 1.5m，梅花形布置。基坑施工期为 4~9 月，处于当地雨季，降雨集中，地下水位变化较大，属于典型的水位敏感性基坑工程。

2.2 工程地质与水文条件

根据场地勘察报告可知，基坑开挖范围内的土层由上到下依次为素填土、粉质黏土、粉砂层。素填土厚度 1.2~2.0m，结构松散、渗透性好；粉质黏土厚度 3.0~4.5m，可塑性好，遇水易软化；粉砂层厚度 2.0~3.5m，透水性强，易发生渗流变形。场地地下水主要是上层滞水和浅层潜水，主要补给来源为大气降雨和周边地表水入渗。勘察时静态地下水位埋深为 3.5~4.2m，雨季水位可上升到 2.0~2.5m，暴雨时水位单日上升量可达 1.0m 以上，旱季水位可降至 5.0m 以下，水位变化幅度大，对基坑边坡稳定有较大影响。

3 不同地下水位工况下边坡稳定性分析

3.1 工况设置与监测方案

本次研究设置了三个对比工况，工况一为旱季低水位，水位埋深 5.0m；工况二为静态正常水位，水位埋深 3.8m；工况三为雨季高水位，水位埋深 2.2m。在基坑四周边坡上布置变形观测点和水位观测井，每天测一次边坡水平位移、竖向沉降、地下水位，计算各个工况下边坡的整体安全系数。

3.2 不同工况下监测结果与分析

经过 4 个月的现场持续监测，得到了不同的地下水位工况

下基坑边坡稳定性主要参数，具体数据如表1所示。

表1 不同的地下水位工况下基坑边坡稳定性主要参数

工况类型	水位埋深/m	边坡最大水平位移/mm	边坡最大竖向沉降/mm	边坡安全系数	边坡稳定状态
低水位工况	5.0	8.6	5.2	1.48	稳定
正常水位工况	3.8	12.3	7.8	1.32	基本稳定
高水位工况	2.2	21.5	14.6	1.05	临界稳定

从表1的数据可以看出，地下水位和边坡变形量呈正相关，安全系数和边坡变形量呈负相关，水位变化对边坡稳定性影响很大。

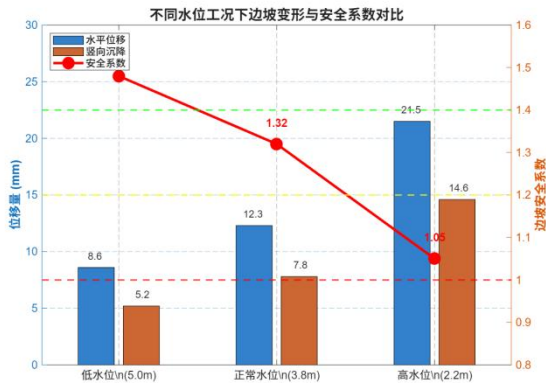


图1 不同的地下水位工况下基坑边坡稳定性对比

3.3 水位骤变的特殊影响

除静态高低水位的影响外，施工期暴雨造成的水位突然上

升、快速降水作业引起的水位突然下降，对边坡稳定性造成的扰动更加剧烈。雨季短时强降雨会使地下水位快速上升，边坡土体来不及排水固结，孔隙水压力突然增大，有效应力急剧下降，短时间内就会造成边坡局部滑移。施工过程中快速降水会使水位急剧下降，边坡外部土体失水收缩、内部土体固结滞后，造成不均匀变形，引起坡面开裂、支护结构受力突变，破坏边坡整体平衡。本工程施工期间一次暴雨过后，水位单日上升0.9m，边坡单日水平位移增量为4.2mm，是平时变形增量的3倍，风险隐患明显。

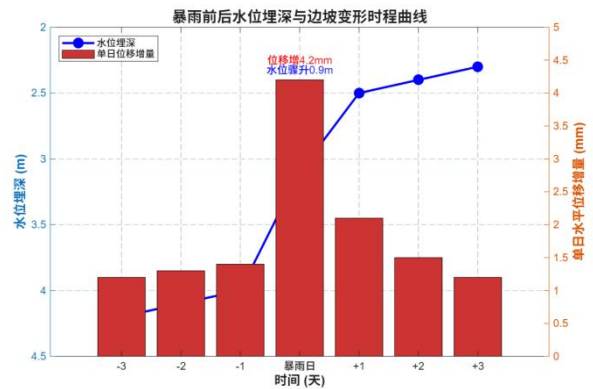


图2 水位埋深与边坡变形曲线

4 基于地下水位变化的边坡失稳风险分级及诱因分析

4.1 边坡失稳风险分级标准

本次分级以行业规范和本工程实际情况为依据，根据地下水位埋深、边坡安全系数、水平位移变形量、现场病害情况等四个主要因素来建立分级体系，具体的分级标准以及对应工况如表所示。

表2 具体的分级标准以及对应工况

风险等级	水位埋深/m	边坡安全系数	边坡最大水平位移/mm	边坡状态特征
一级（安全稳定）	≥5.0	≥1.40	≤10	土体密实，无裂缝、无渗水，变形均匀可控
二级（一般风险）	3.0~5.0	1.20~1.40	10~15	坡面出现细微浅表裂缝，无明显渗水，变形小幅增长
三级（较大风险）	2.5~3.0	1.10~1.20	15~20	裂缝持续扩展，坡面局部渗水，变形增速加快，安全储备不足
四级（重大风险）	≤2.5	<1.10	>20	大面积渗水、局部土体溜塌，边坡临界失稳，极易发生坍塌事故

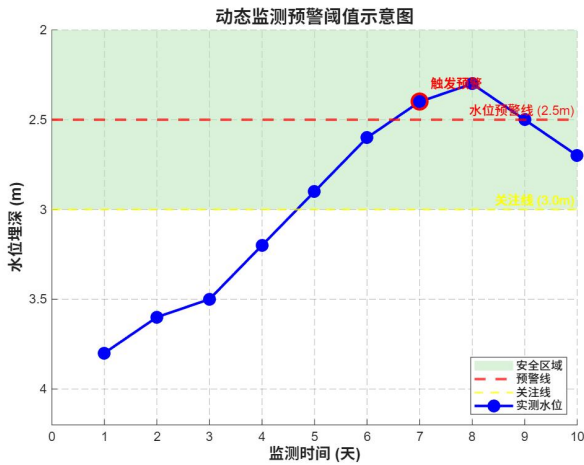


图3 动态监测预警阈值

4.2 各级风险对应的失稳诱因分析

(1) 一级安全稳定状态诱因：该等级属于旱季低水位工况，地下水位埋深大，远远小于基坑开挖底面，边坡整体土体处于天然干燥固结状态。此时地下水对边坡土体的干扰作用很小，土体孔隙水压力低，有效应力大，黏聚力、内摩擦角等力学参数稳定，土体抗剪强度可以抵抗边坡自重产生的下滑力。边坡内部没有明显的渗流通道，没有渗流冲刷、土体颗粒流失等现象，只存在轻微的自然固结变形，没有失稳隐患，结构稳定可控。

(2) 二级一般风险状态诱因：该等级属于常规静态水位工况，地下水位处在正常波动范围之内，边坡浅层土体受到地表水轻微入渗以及地下水毛细作用的影响，处在干湿交替的状态。核心诱因就是浅层土体轻微软化，土体局部强度小幅降低，边坡整体安全储备有所下降，但是整体受力平衡没有被打破。该阶段没有集中渗流作用，不会出现土体掏空、滑移等严重问题，只是由于土体干湿收缩而产生浅表细微裂缝，变形量小幅增大，风险影响范围小，只需常规监测和简单的防护措施就可以保持稳定。

(3) 三级较大风险状态诱因：该等级对应雨季水位小幅抬升工况，地下水位慢慢靠近基坑开挖面，边坡中层土体慢慢变为饱和状态。主要的成因有土体强度衰减、初期渗流两个方面。一是大面积土体饱和和软化，力学参数明显下降，边坡抗滑力不断降低；二是边坡内部出现微弱渗流通道，细小土体颗粒慢慢流失，边坡整体性受到损害。同时水位的波动也会引起土体的应力略有变化，边坡变形速度加快，裂缝不断延伸扩大，虽然没有达到失稳临界点，但是安全余量不够，如果不及时进行控水防护，风险就会迅速上升。

(4) 四级重大风险状态诱因：该等级对应暴雨后高水位

和水位突然变化的工况，是基坑施工中风险等级最高的一个，多重不利因素同时出现造成边坡接近失稳。高水位产生的静水压力和浮托力大大抵消了土体自重应力，边坡抗滑平衡体系完全失效，侧向变形急剧增大；水位突然上升、下降引起土体不均匀固结、应力突变，坡面裂缝贯通、渗水严重，很容易发生局部溜塌或者整体坍塌，属于必须立即采取措施的严重安全隐患。

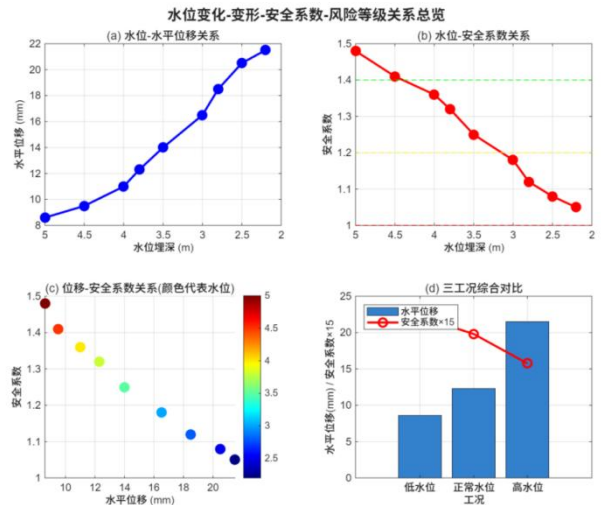


图4 风险等级关系

5 基于水位管控的边坡稳定性防护措施

5.1 完善降水排水体系

根据场地水文条件对降水方案进行优化，在基坑周围布置环形降水井，井距为8~10m，配设集水井和抽排水设备，实现常态降水，使施工期地下水位稳定在开挖面以下1.5m。在坡顶设截水沟，在坡脚设排水沟，拦截地表径流，排出坡面渗水，减少雨水对地下水的补给，减小水位变化幅度。暴雨天气增大抽水频率，迅速降低地下水位，避免高水位造成的失稳。

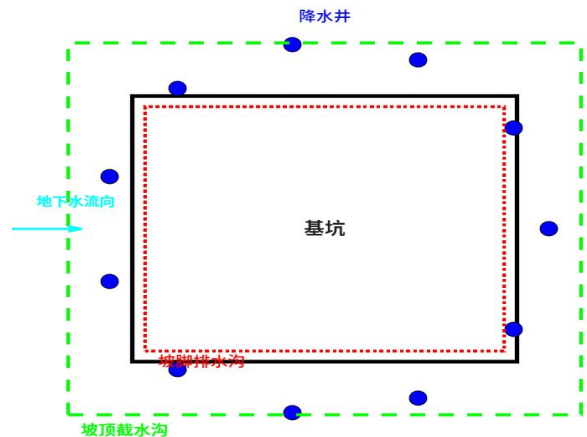


图5 降水排水体系

5.2 强化坡面防渗防护

在土钉墙混凝土面层上增设一道防水砂浆抹面,封堵坡面细微裂缝,阻止雨水入渗。基坑周围所有裸土均用土工膜等材料覆盖以防水、防冲刷。根据边坡渗水点位设置泄水孔,使地下水有条理地排走,减少边坡内部孔隙水压力,减小渗流作用力。

5.3 优化支护结构受力

根据高水位工况下边坡受力增大的特点,适当加密边坡土钉间距、增大土钉锚固深度,提高支护结构的整体承载力。在基坑转角、边坡薄弱处增加加强筋、喷射混凝土加厚层,提高局部防护能力,减小水位变化引起的受力扰动,提高边坡安全储备。

5.4 建立动态监测预警机制

建立地下水位和边坡变形一体化的动态监测体系,增加雨季监测频率,及时了解水位变化及边坡变形情况。设置安全预警阈值,水位埋深小于2.5m、边坡单日变形量大于3mm时,

立即启动预警程序,停止土方开挖工作,进行降水加固处理,做到风险早发现、早处理,防止发生边坡失稳事故。

6 结论

本文以具体的基坑工程为例,系统地研究了地下水位的变化对基坑边坡稳定的影响规律,确定了水位升降引起边坡失稳的作用机理。地下水位变化会通过改变土体有效应力、产生渗流作用、软化土体结构这三种途径影响边坡稳定性,水位越高,边坡土体强度越低、变形量越大、安全系数越小,边坡失稳风险越高。

完善降水排水系统、加强坡面防渗、改进支护结构、创建动态监测预警体系,可以较好地控制地下水位变动引发的风险,大幅改善基坑边坡整体稳固情况。基坑工程施工时不能采用静态水位的设计理念,应充分考虑施工期水位的变化特点,把地下水的控制贯穿于整个施工过程中,根据场地的水文条件来制定不同的防护措施,尽可能地减少水位变化给边坡稳定性带来的不利影响,保证基坑工程施工的安全。

参考文献:

- [1] 刘叶伟,沈志强.地下水位变化影响下基坑边坡变形特征模拟研究[J].建筑科技,2026,10(1):81-85.
- [2] 王金伦,刘慧敏,樊晨光.考虑地下水影响的基坑边坡土钉墙支护效果研究[J].河南科技,2024,51(19):54-58.
- [3] 孙铁军,孟灵鑫,沈立中,等.临江公路隧道基坑边坡变形特性及控制措施分析[J].公路,2022,67(7):451-456.
- [4] 徐挺,梁晓荣,姜雪岐.高地下水位堆积土层深基坑边坡支护设计[J].建筑,2018,(1):77-78.
- [5] 龚学斌.高地下水位、砂土地质条件深基坑施工技术[J].中外建筑,2014,(7):189-191.