

高水头超大型地下构筑物抗浮关键技术

杜爽¹, 张力华¹, 王志慧², 陈雷³

(1. 中交一航局第五工程有限公司; 2. 河北雄安佑雄建设科技有限公司; 3. 唐山建标工程项目管理咨询有限公司)

摘要: 目前常用的抗浮方法主要为降水减压、重力压载、抗浮工程桩等, 为避免建筑施工过程或交工后受地下水浮力影响而产生的破坏, 并带来一系列安全问题, 文章围绕高水头超大型地下构筑物抗浮关键技术展开研究。以翻车机房深基坑为例, 通过应用抗浮关键技术, 解决施工技术难题, 对临江临海等水头高度不断变化的区域总结了一套系统性抗浮方法, 可应用于类似深基坑项目。

关键词: 高水头; 深基坑; 抗浮; 基坑支护

0 引言

随着社会的不断发展, 建设用地越来越少, 大部分建筑开始利用地下空间作为便民生活场所, 如大型超市、停车场等, 地下基坑深度也在不断刷新纪录, 所带来的地下构筑物隆起、上浮问题成为了深基坑项目成败的关键因素, 尤其在沿海临江地区更显得尤为重要。在临江临海等地下水深度不断变化的区域, 建筑工程主要承担沿程水头损失, 且不断波动。外围水延径至施工建筑物时会产生一定的水头差(根据当地水文特点及土层情况可试验得出), 此时建筑物受到竖向浮力 $F_{浮} = \gamma h$ (γ 为液体重度, h 为水头高度), 基坑入地下水深度越深所受到的浮力越大。当外围地下水达到历史水位峰值或超过历史水位时, 设计施工还能否满足当前阶段建筑抗浮要求尤为重要^[1]。

1 高水头超大型地下构筑物抗浮基本原理

高等级深层建筑最主要的破坏来源于地下水作用, 尤其是沿海临江和特殊地层结构等地下水位不断变化地区, 存在封底施工前管涌和施工过程中整体上浮或沉降的风险, 进而造成主体结构产生深层裂缝或难以达到设备安装精度要求。

由于建筑结构在使用功能和工程设计上难以保持各区域自重平衡, 因此在抗浮设计计算及如何防止建筑物上浮问题研究上, 应按照整体和局部的方法来进行验算。高水头超大型深基坑受到外围水压力主要包括: 静水压力、承压水压力和渗流产生的压力差^[2]。消除或减弱这种水压力的基本原理主要包括:

1) 在施工阶段通过基坑降水的方式将基坑外

围及底部地下水降低至底板以下, 减少地下水与基坑内构筑物的接触, 从而减小基坑的整体被动浮力。对于台阶状深浅基坑或重力分布差异较大的应进行分区设计、分区降水, 在主体构筑物施工完毕经计算和复核自重达到可以抵抗地下水浮力时, 分批、分阶段、对称封闭降水井, 从而达到抗浮目的。

2) 通过增加结构物自重来抵抗坑底水压力, 一方面可以在设计阶段通过增加局部区域或整体自重, 进一步提高基坑安全系数; 另一方面可以在构筑物空腔内、顶板上、与支护结构之间回填毛石或素土, 从而达到抗浮目的。

3) 在基坑底板下施工抗拔桩, 达到防止沉降和抗浮的目的; 在围护结构与主体结构之间施作锚杆等进行连接, 使支护结构与主体结构同时作用, 从而达到抗浮目的。

4) 将 2) 和 3) 相结合的方案适用于超大型深基坑和地下水环境复杂, 且降水困难的地区。

2 常用的抗浮施工方法

2.1 降水减压法

由于各建筑物所处位置地层、水文、周边环境不一, 本文主要讨论临江地区高水头悬挂式止水帷幕。进场施工前仔细复核图纸, 必要时对地勘资料也进行复核, 对基坑内外土层变化位置及渗透系数作出准确判定。超大型深基坑受到降水深度的限制, 一般采用管井法施工。在施工前应探明地下是否有不透水层及不透水层下的承压水, 如管井下距离较近位置含有承压水层, 施工时要尤其注意切勿破坏承压水稳定状态。

2.1.1 降水井施工

降水井施工前应搭建好作业平台,根据地质条件及管径和孔深选择合理的施工机械,宜采用泥浆护壁成孔,成孔过程中不断保持内外水头差,防止出现缩径或塌孔。成孔完毕后按照如下顺序施工:捞渣→吊放井管→回填滤料→回填黏土球封顶→洗井→下放抽水泵及连接抽水泵管→抽水管接入抽水主管线外排^[3]。

降水井施工注意事项:降水施工开始前,应先抽取不同水层的地下水进行水质检测,符合排放要求后方可接入主管线排放;管井中花管的位置应根据降水井点位地层确定,不应同符合契,应将花管置于渗透系数较高的砂层或卵石层等;抽水过程中对水质的含砂量进行检测,保证不大于设计允许值;根据单井涌水量调换不同规格水泵,保证水泵不负载不空转,主排水管网满足最大排水需求;施工现场设置400 kW以上发电机组,并连接自动切换启停装置,防止施工现场停电而引发的降水井失效。

2.1.2 降水井试抽水试验

降水井施工完毕后应进行单井、群井试抽水试验,通过观察周边观测井确定降水井在不同深度和地层下的影响半径,以动水位结合静水位的方式判断降水深度是否满足开挖及施工要求。

2.1.3 基坑监测及回灌

项目降水井施工至项目完工前应做好基坑监测工作,对周边管线及建筑物均应设置观测点,当基坑顶部或周围受到降水影响而发生沉降时,应立即启动回灌井,保持地下水位稳定。

2.1.4 减压及封井

当地下水位已降低至基坑垫层500 mm以下可实现干作业时,及时施工底板及主体结构,在施作主体结构过程中,根据地下水位变化分阶段均匀、对称封井,当主体结构自重可以满足抗浮稳定要求时将降水井、回灌井和观测井等全部封闭严密。

2.2 重力压载抗浮法

2.2.1 抗浮稳定安全系数

根据JGJ 476—2019《建筑工程抗浮技术标准》^[4]的规定,当抗浮设计等级为甲级时,施工期抗浮稳定安全系数 K_w 应不低于1.05,使用期抗浮稳定安全系数 K_w 应不低于1.10。即:

$$G/N_{w,k} \geq K_w$$

式中: G 为建筑结构自重、附加物自重、抗浮结构及构件抗力设计值总和,kN; $N_{w,k}$ 为浮力设计值,kN; K_w 为抗浮稳定安全系数。

2.2.2 土方回填压载

当基坑支护结构充当非永久性结构时,地下室外墙与围护结构之间(以下统称肥槽)防水工程施工作完毕后,一般采用土方回填空隙,并采用振冲法使其密实,抵消一部分坑底浮力,达到恒载压重的作用,实现抗浮目的。肥槽内土方回填压载只有在建筑结构为筏板式扩大基础时作业才能取得效果,当筏板基础外沿与地下室外墙空间上处于同一直立面时,此方法不再适用,只能通过设计阶段在建筑结构的内增加“配重仓格”进行仓格内回填方可达到压载目的。在土方回填及振冲作业过程中,根据施工进度分层、对称进行,防止建筑物出现不均匀沉降或开裂。

2.2.3 毛石与土方结合方式压载

根据肥槽宽度,可采用适当规格的毛石(或混凝土块)掺拌在素土中进行回填。

2.2.4 毛石混凝土压载

在设计结构计算中,确认建(构)筑物抗浮重度缺失量,通过在肥槽之间填充C15素混凝土,并在浇筑过程中投入毛石的方式来增大整体自重,实现抗浮。

2.2.5 流态固化土压载

流态固化土是一种具有良好流动性、呈流体状态的固化土,以普通土壤为基本原料,按照一定比例添加固化剂、水及其他外加剂(如纤维、缓凝剂)等,经充分搅拌混合后,形成具有自密实特性的混合材料。凭借自身流动性,流态固化土无需外力振捣,就能在自重作用下均匀分布并充满整个回填空间^[5],与周围结构紧密贴合,形成连续、密实的整体,有效保证了回填部位的稳定性和压载能力。

2.3 抗拔工程桩及抗浮锚杆压浆抗浮法

2.3.1 抗拔工程桩

在设计阶段,根据建筑物整体结构特点及重力分布,通过在基坑底板以下设置抗拔桩,并加强底板与工程桩连接的方式进行抗浮,工作机理为通过抗拔桩与地层间的摩擦力(摩擦桩)来抵消地下水浮力。除了能够达到抗浮目的外,当抗拔桩与地下结构主体较好的形成整体后,其他原因导致上部荷载突然增大时,可以有效避免建筑物

可能发生的沉降^[6]。

抗拔桩的施工程序主要为：测量定位→埋设护筒→同期泥浆制备→成孔→清孔→下放钢筋笼及注浆管→二次清孔→下放导管→混凝土浇筑→成型→后压浆。

抗拔桩成孔方式与降水井基本相同，由于抗拔桩桩顶高程位于基坑底板部位，因此在施工时通常采用钢筋笼上增加吊筋的悬挂法施工，基坑

开挖后将吊筋切割。

为了防止在临江临海等区域历史水位达到几十年一遇峰值，或因强降雨或极端天气影响下导致水头压力增大，整体抗浮稳定性减弱的情况发生，通常在抗拔桩钢筋笼对称两侧埋设注浆管，通过后侧注浆，增大抗拔桩底部断面的形式来加强抗拔、减缓沉降的作用。抗拔桩后压浆示意图见图 1。

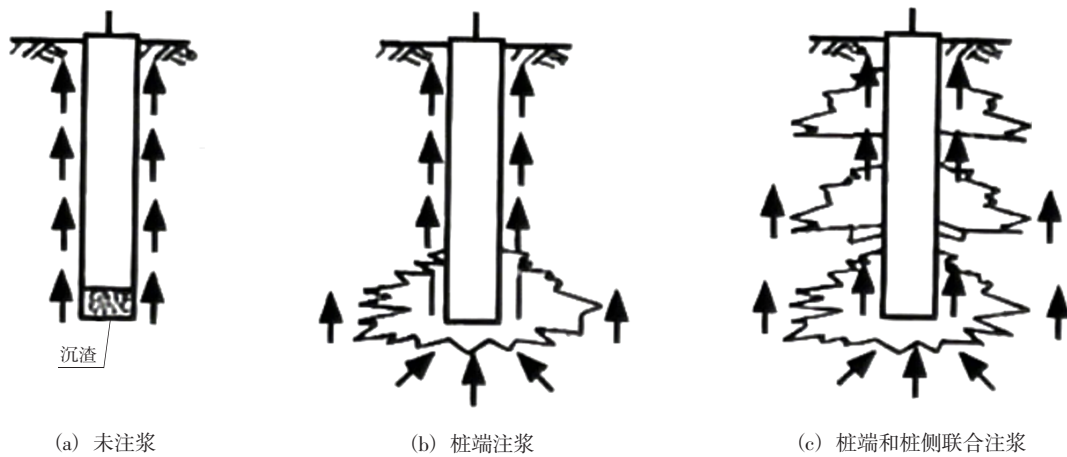


图 1 抗拔桩后压浆示意图

2.3.2 抗浮锚杆压浆法

抗浮锚杆压浆法作为另一种有效的抗浮措施，在地下室结构设计中得到了广泛应用。该方法通过在地下室底板或侧墙中植入锚杆，并利用锚杆与周围岩土体之间的黏结力来抵抗地下水浮力，从而确保建筑物的稳定性^[7]。

根据地质勘察报告及地下水浮力大小，合理确定锚杆的长度和直径，以确保其提供的抗拔力满足设计要求。锚杆均匀布置在地下室底板或侧墙的关键受力部位，形成有效的抗浮网络。同时，考虑施工便利性和经济性，优化锚杆间距和排布方式。

首先根据设计图纸进行锚杆定位，并采用专用钻机进行钻孔。钻孔过程中严格控制孔径、孔深和垂直度，避免对周围岩土体造成过大扰动。将加工好的锚杆(包括锚头、杆体和锚筋等)放入孔内，并在锚杆上安装注浆管。注浆管伸至孔底并固定牢固，以便后续注浆。注浆孔宜留置 2 个，一个作为一次常压注浆，另一个作为二次高压注浆。注浆完成待浆液达到设计强度后，对锚杆进行张拉试验以检验其抗拔性能。张拉合格后，采

用锚具将锚杆锁定在底板或侧墙上，确保锚杆与结构形成整体受力体系，从而达到抗浮目的。

2.4 多措并举结合抗浮法

根据建筑工程的地下水文特性及工程复杂程度，可以利用上述抗浮方法相结合的方式，做好深基坑抗浮工作。如采用基坑降水与荷载压重法、基坑降水与抗拔工程桩结合法等。

当基坑以落底式止水帷幕作为基坑支护时，一般基坑外布置降水井，基坑内布置疏干井，从而达到干作业的目的。此类结构在底板以下通常具有不透水层，因此来自地下水的压力较小，在停止降水后浮力水源多来自四周，为了保证停止降水后基坑内抗浮稳定性依旧满足标准，可以将基坑支护结构与地下室外墙刚性连接，形成相互制约的整体，从而较好地实现抗浮目的。

3 工程应用

湖北荆州煤炭储配基地一期工程翻车机房项目南距荆江大堤 1 km，开挖面积 5 637 m²，最大开挖深度达 28.3 m，采用咬合式排桩悬挂式止水帷幕+三轴水泥搅拌墙+钢筋混凝土内支撑的基坑支护形式，基坑内外共布置 96 口降水井(含观测

井),底板厚度 2.5 m。地下土层结构分别为粉质黏土、黏土、粉细砂、粉质黏土、卵石,是长江沿线开挖最深、距长江最近的超大型深基坑工程。

基坑抗浮原设计采用深基坑管井降水+底板抗拔桩+底板与支护结构刚性连接+肥槽振冲回填土的方式,其中降水阶段通过单井、群井试验,不断优化降水设计,增大单井涌水量等方式实现了降水作用最大化。此地长江汛期为每年 6—10 月,设计汛期水位+36.2 m(施工区域地表+32 m,冠梁顶标高+28.024 m),施工期间受上游洪涝灾害影响,突破历史水位,达+39.4 m,根据不断测得长江区域水位和基坑外观测井降水位可知,自长江至基坑施工范围内水头损失约为 5 m 左右,故施工水头仍高于冠梁顶 6.4 m 左右。依据当时现场情况,计算结果为:总浮力 $F_{浮}=913\ 963\ \text{kN}$,施工建筑自重 $\sum G_i=617\ 051\ \text{kN}$,抗拔桩+支护桩可承受抗拔力 $\sum N_i=241\ 500\ \text{kN}$ 。

安全系数 $F_s=(\sum G_i+\sum N_i)/F_{浮}=0.94$,按规范最低要求 $F_s>1.10$,设计时需考虑长江水位突破历史峰值情况,故在设计阶段进行优化,增添肥槽回填毛石混凝土,经计算可得此时安全系数 $F_s=1.32$,满足抗浮设计要求,降水井在施工各阶段根据地下水浮力变化逐次封闭。

该项目已投产使用超过 3 a,各观测点数值均处于稳定状态,未产生不均匀沉降引起的有害裂

缝,是“排水减压,静载压重”的抗浮成功经典案例。

4 结语

在高水头超大型地下构筑物的抗浮设计与施工中,需综合考量地质条件、水文环境及工程特点等多方面因素。通过合理选择抗浮施工方法,如降水减压法、重力压载抗浮法、抗拔工程桩及抗浮锚杆压浆抗浮法以及多措并举结合抗浮法等,并依据具体工程情况进行优化组合,能够有效解决地下构筑物的抗浮问题。同时,在设计与施工过程中,必须严格遵循相关规范标准,加强基坑监测,确保施工质量与安全。通过实际工程应用案例分析可知,科学合理的抗浮设计与施工方案能够显著提高地下构筑物的稳定性与安全性,可为类似工程提供有益的参考与借鉴。

参考文献:

- [1] 吴海.某住宅工程地下室抗浮设计技术研究[J].居舍,2024(7):100-103.
- [2] 邓渊,王帅军,胡敏,等.复杂条件下河道软基超大深基坑潜水与地下承压水降水技术[J].施工技术,2021,50(2):27-30.
- [3] 周敦云.对地下水在建筑工程设计施工中的影响分析[J].青岛远洋船员学院学报,2003(3):71-77.
- [4] JGJ 476—2019,建筑工程抗浮技术标准[S].
- [5] 陈绪坤,尹明,陶津.自密实混凝土配合比优化研究[J].山东建筑大学学报,2006(5):410-414.
- [6] 张武,高文生.抗拔桩后注浆技术及其应用[J].岩土工程技术,2008(1):31-35.
- [7] 王国鹏,祁振东,张东方.某地下室中抗浮锚杆的应用及分析[J].价值工程,2019,38(17):108-110.