

商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工探讨

张金福

(中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 针对商业综合体建筑自身层数少、建筑高度低、地下室埋深较大的特性, 易发生抗浮水位高, 导致基底隆起、底板变形、结构破坏渗漏等问题, 探析商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工新技术。以玉林市万花楼文旅综合城项目为研究对象, 主要通过严控放线定位、抗拔承载力试验、钻孔施工、锚杆制作及安装、注浆及养护、锚杆施加预应力及防水附加层等关键工序施工, 顺利完成了压力型预应力岩石抗浮锚杆施工任务。实例研究表明, 该项施工工艺可有效提升大型商业综合体建筑基础筏板的抗浮稳定能力, 为基础筏板施工抵抗地下水压力以及建筑物交付使用后的防渗漏隐患提供了良好的安全质量保障。

关键词: 商业综合体建筑; 压力型; 预应力; 岩石抗浮锚杆

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Discussion on Construction of Pressure-type Prestressed Rock Anti-floating Anchor for Commercial Complex Building

ZHANG Jinfu

(The Second Engineering Co., Ltd., of China Railway 18th Bureau Group, Tangshan 063000, Hebei, China)

Abstract: In view of the characteristics of commercial complex building, such as few floors, low building height and large buried basement depth, it is easy to have problems such as basement uplift, floor deformation, structural damage and leakage, which are caused by high anti-floating water level. This paper analyzes the new construction technology of pressure-type prestressed rock anti-floating anchor for commercial complex building. Taking Wanhualou Tourism Integrated City Project in Yulin as the research object, the construction task of pressure-type prestressed rock anti-floating anchor was successfully completed through strict control of key construction processes such as pay-off positioning, pull-out bearing capacity test, drilling construction, bolt fabrication and installation, grouting and maintenance, bolt prestressing and waterproof additional layer. The case study shows that the construction technology can effectively improve the anti-floating stability ability of the foundation raft of large commercial complex building, and provide a good safety quality guarantee for the foundation raft construction to resist groundwater pressure and prevent the hidden danger of leakage after the building is put into use.

Key words: commercial complex building; pressure type; prestress; rock anti-floating anchor

无扩体式螺纹钢筋型抗浮锚杆是建筑工程项目基础施工中常用的抗浮技术之一, 传统成孔方式须用到大量泥浆护壁, 会对周围环境造成一定程度的污染, 再加上钻进工艺的限制, 会影响最终成孔的质量和钻孔的速度。压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术的出现弥补了传统抗浮锚杆施

工工艺存在的不足, 可有效提升基础的稳定性和抗浮承载力^[1], 而且施工速率快, 对环境污染较小; 但在地质条件遇到溶岩裂隙复杂的情况下, 压力型预应力岩石抗浮锚杆施工过程中也易出现塌孔、锁孔、浆体流失等问题, 进而影响成孔效率及张拉锁定质量。为有效解决这些问题, 以广

收稿日期: 2024-08-28

作者简介: 张金福, 工程师, 本科, 研究方向为建筑工程

西玉林万花楼文旅综合城项目所在区域的水文地质条件为背景，研究商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术，以提升建筑工程施工质量，为后续同类型工程提供参考经验价值。

1 工程概述

万花楼文旅综合城项目位于广西壮族自治区玉林市民主中路与白石桥路交汇处南侧，项目总用地面积为37 006.67 m²（约55.51 亩），规划用地总面积（规划用地红线面积）为34 452.48 m²（约51.68 亩），外立面为岭南风格古建筑造型，使用功能为商业综合体，地势为北低南高，南北高差约12 m，总建筑面积约77 873.44 m²。本工程正负零绝对标高78.70 m（1985 国家高程基准），地下室底板面标高为69.80 m，场地整平标高约为78.40 m，基坑深度约为10 m，为超过一定规模的危险性较大分部分项工程。本工程地下室范围内采用独立基础/条形基础+防水筏板，独立基础及剪力墙底设置抗浮锚杆（压力型预应力岩石抗浮锚杆）；抗浮设计水位为76.70 m。地下室范围外柱采用钢筋混凝土独立基础。基础持力层均为石灰岩④层和破碎石灰岩④-1 层，持力层承载力特征值 $f_{ak}=500$ kPa；锚杆顶标高结合“抗浮锚杆设计说明”和“基础图”确定。基础抗浮采用永久性压力型预应力岩石抗浮锚杆，锚杆总长度8.5 m，锚杆孔径为160 mm。本工程抗浮锚杆施工分区图如图1 所示。

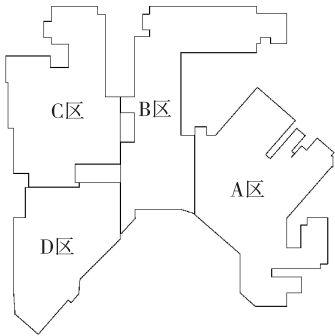


图1 抗浮锚杆施工分区图

2 施工难点和特点

（1）地质条件复杂。地质勘察报告结果显示，本工程所在区域内岩土层比较复杂，场地内岩土层主要由人工填土层、第四系冲积土层和残积土层、泥盆系东岗岭阶石灰岩组成，主层及其亚层共分为7 层，岩土层结构分布表从上至下如表1 所示。

表1 岩土层结构分布表

序号	岩土层类型	层厚/m	平均厚度/m	岩性
1	杂填土①	0.3~6.0	1.8	高压缩性土
2	素填土①-1	0.3~2.0	1.2	高压缩性土
3	粉质黏土②	2.0~9.6	4.4	中等压缩性土
4	红黏土③	0.3~10.0	3.9	中等压缩性土
5	石灰岩④	2.9~15.2	5.9	较硬岩
6	破碎石灰岩④-1	0.8~15.0	6.9	较软岩
7	溶洞④-2	1.0~7.0	2.8	—

（2）成孔及注浆难度大。本工程所在区域各地质层之间的界面情况，主要存在两种状态：一种是地质不平坦；另一种是层间突变。所以，在压力型预应力岩石抗浮锚杆钻孔穿越各地质层时，容易因夹层底面不平坦，或者是层间发生突变，引起卡钻、掉钻现象；其次是注浆施工遇到溶洞位置，会有浆体流失导致质量风险等一系列问题。

（3）施工干扰多。在压力型预应力岩石抗浮锚杆施工中环境影响因素较多，其中主要的因素体现在两个方面：多项工序交叉作业频繁，如基坑开挖、钻孔、锚杆安装及张拉须同时进行，交叉作业比较多；施工场地红线范围紧邻支护桩，作业面较少。

3 压力型预应力岩石抗浮锚杆施工

工程采用压力型预应力岩石抗浮锚杆，采用PSB1200 级预应力混凝土用螺纹钢筋， $f_{py}=1\,000$ MPa；钢筋直径为42 mm，预应力钢筋的极限应力总伸长率不小于3.5%，断后伸长率不小于6%。本工程在分区垫层浇筑完成后进行施工，按顺序对A 区→B 区、D 区→C 区进行压力型预应力岩石抗浮锚杆施工，其具体工艺流程为：①承台基槽开挖、放线定位；②锚杆基本试验；③施工钻孔（超钻沉渣段200 mm）；④锚杆加工制作及孔内安装[PSB1200-42 钢筋表面环氧涂层防腐→热缩套管（自由段）→锥形对中承载体→ $\varnothing 42$ mm 钢筋锚固板→下放锚筋]；⑤注浆及养护；⑥杆体预应力施加工工艺；⑦防水施工。

3.1 放线定位

在地下室底板垫层浇筑工作完成后，接下来的关键步骤是锚杆孔位的确定与标记。为了确保孔位的准确无误，须严格遵循施工图纸的指引，并使用红漆对每根锚杆孔位进行编号，使得每个孔位都清晰可见，为接下来的锚杆施工提供明确的标引，本工程抗浮锚杆编号定位图如图2 所示。

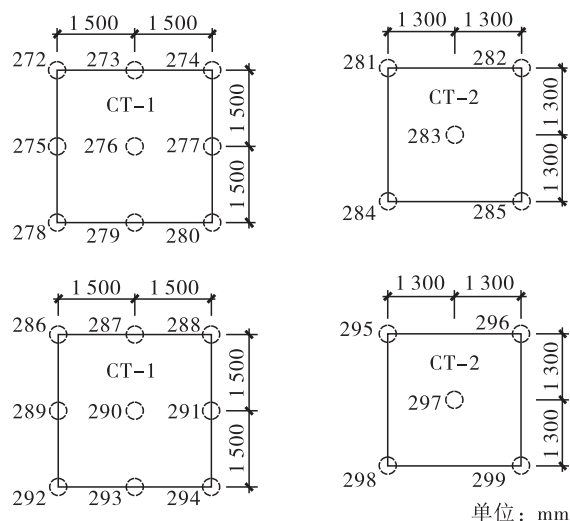


图2 抗浮锚杆编号定位图

在抗浮设计范围之外,还要精心设置固定点,固定点不仅能起到稳固的作用,还能作为测量、恢复和检查桩的基准点。为确保这些固定点醒目且易于识别,使用红油漆进行清晰标注,使得在施工过程中,即便是在光线不足或视线受阻

的情况下,也能迅速而准确地找到这些关键点位。此外,为了确保孔位在施工过程中的精确性,还须定期进行复测,及时发现并纠正可能存在的偏差,以确保每一个孔位都能达到预期的精度要求。

3.2 抗拔承载力试验

为获得准确的压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术参数,在正式施工前,须通过抗拔承载力试验来确定最佳的施工参数。本工程于基坑底部先行施工3根抗拔试验锚杆,做破坏性试验,最大试验加载量为750 kN,按照试验结果调整锚杆数量,具体锚杆抗拔试验结果如表2所示。在试验过程中,应保证构件检验部位随机布置,对于一些重要功能构件或者是与设计要求差异比较大的部位,要进行全部检测。抗浮锚杆常规试验检测的数量批次不能少于锚杆总数的5%,且最少不能少于6根。灌浆锚杆则不能少于总锚的10%,每批次最少应检验20根,全部都达到设计要求后方可应用到压力型预应力岩石抗浮锚杆施工中。

表2 锚杆抗拔试验结果汇总表

序号	试验锚杆 编号	锚杆设计荷载 /kN	锚杆最大 试验荷载/kN	S_1 / mm	80% S_1 / mm	最大位移/ mm	残留位移/ mm	弹性位移/ mm	抗拔承载力下 是否收敛
1	1949	500	750	10.44	8.35	7.00	3.20	3.98	收敛
2	1951	500	750	10.44	8.35	10.70	5.52	5.43	收敛
3	1957	500	750	10.44	8.35	11.00	4.52	5.48	收敛

备注:表2中 S_1 为锚杆自由杆体长度理论弹性伸长度。

3.3 钻孔施工

本工程压力型预应力岩石抗浮锚杆施工中,钻孔采用CM458钻机,泥浆护壁钻进。钻孔深度达到设计要求后,通过清水洗孔除浆。成孔后须及时下放锚杆注浆,以免长时间未注浆引起塌孔问题。若遇到砂砾层无法良好成孔时,可采用加钢套管逐步跟进的方法进行钻孔,进入锚杆底部后要立即开展下锚操作并及时注浆,遵循边注浆边拔出套管的原则^[2]。在钻孔施工中为最大限度提升成孔质量,须对钻机进行调平、稳定处理。锚孔孔径选择为160 mm,最大偏差不应超过20 mm,钻孔成孔后的深度要高于设计孔深200 mm左右。在钻孔全过程中应加强对钻头尺寸的检查,以保证钻孔孔径符合要求。锚杆钻孔成孔要求如下:锚杆钻孔不得扰动周围地层;控制锚杆水平、垂直方向的孔距误差不大于100 mm;钻头直径不小于设计钻孔直径3 mm;锚孔钻孔深度不应小于设计长度,也不宜大于设计长度500 mm;钻孔轴线偏斜率不应大于锚杆长度的

2%,锚杆孔中安放锚杆前,应将孔内岩粉和土屑清洗干净。

3.4 锚杆制作及孔内安装

在工程中锚杆作为重要的支撑结构,其选型与施工质量直接关系到整个工程的安全与稳定,工程结合地质条件及锚杆的承载能力,选用锚杆类型为 $\varnothing 42$ mm (PSB1200级)预应力混凝土用精轧螺纹钢,长度为8.5 m,锚杆普通锚固段孔径160 mm,底板内机械锚固长度0.5 m。在施工过程中,按照设计要求采用锥形对中承载体间距2000 mm旋入锚杆。以确保锚杆体的平行,同时使锚杆能够准确地锚入孔中心,从而充分发挥其支撑作用。

注浆管的选择同样重要,本次工程所选用的注浆管内径为20 mm,其长度设计充分考虑注浆的需要,确保从孔底开始,能够依次向上进行注浆,不留死角。在锚杆体的安装过程中,采取人工安放的方式,确保每根锚杆都能够准确地放置在预定位置。在下锚前,锚杆的制作质量及长度

均需经监理验收合格后，才可下入孔内，以此确保锚杆的施工质量^[3]。此外，压力型预应力锚杆的制作与组装也是施工中的一大重点。严格按照设计及规范进行制作，以确保锚杆的性能达到最佳状态。本工程压力型锚杆截面构造图见图3，锚杆与基础连接构造图见图4。

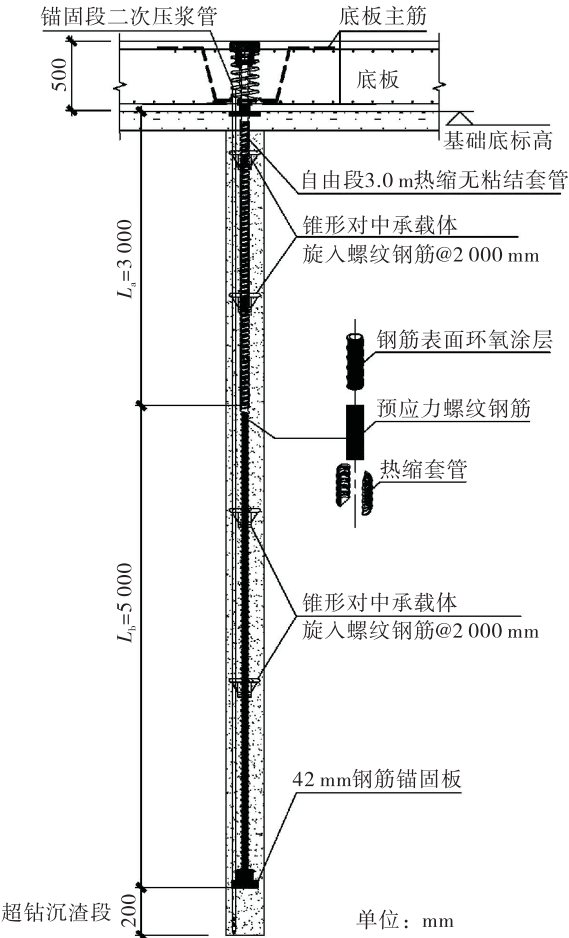


图3 压力型锚杆截面构造图

3.5 注浆及养护

在压力型预应力岩石抗浮锚杆施工中，注浆和养护是两个重要工序，不仅关乎锚杆的质量和稳定性，还直接关系到整个工程的安全性和耐久性。注浆作为锚杆施工中的关键步骤，其目的是通过向钻孔内部填充特定的浆液，使锚杆与岩石之间形成牢固的锚固关系。为了确保注浆的质量和效果，注浆泵在使用前必须进行严格的试运转，以确保其正常工作^[4]。此外，注浆管道的接头应连接牢固和密封，以防止浆液泄漏。将注浆管与螺纹钢筋绑扎为一体放入孔体，需确保注浆管能承受2.0 MPa的压力，从而使浆液能够顺利压灌至钻孔底部扩体锚固段。

在注浆过程中，注浆管应插入孔底再向上拔50~100 mm后开始注浆，且注浆应连续进行，以确保浆液能够充分填满钻孔。锚固段的注浆采用高压注浆工艺，这种工艺能够使浆液更好地渗透到岩石的微小孔隙中，提高锚杆与岩石之间的锚固力。注浆材料的选择也至关重要，本工程采用水泥净浆灌注，须确保水泥浆液搅拌均匀并过筛，随拌随用；且要在初凝前用完，注浆水灰比为0.5，注浆体设计强度不小于35 MPa。

随着地下室深度不断加大，部分地下岩层存在溶洞及溶蚀裂隙，由于岩溶地下水的承压性往往造成锚杆孔内涌水，在压力注浆下浆液随着岩溶中的溶洞和溶蚀裂隙向四周扩散，注浆效果无法保证，从而造成工程锚固力不够。为解决此问题，现场通过设置降水井，采取人工降水的措施，及时抽排岩溶地下水，降低其水位后，抗浮锚杆施工采用跳孔施工，由内向外顺序进行，采用水泥浆间隔（间隔时间4~8 h）灌注，等水泥

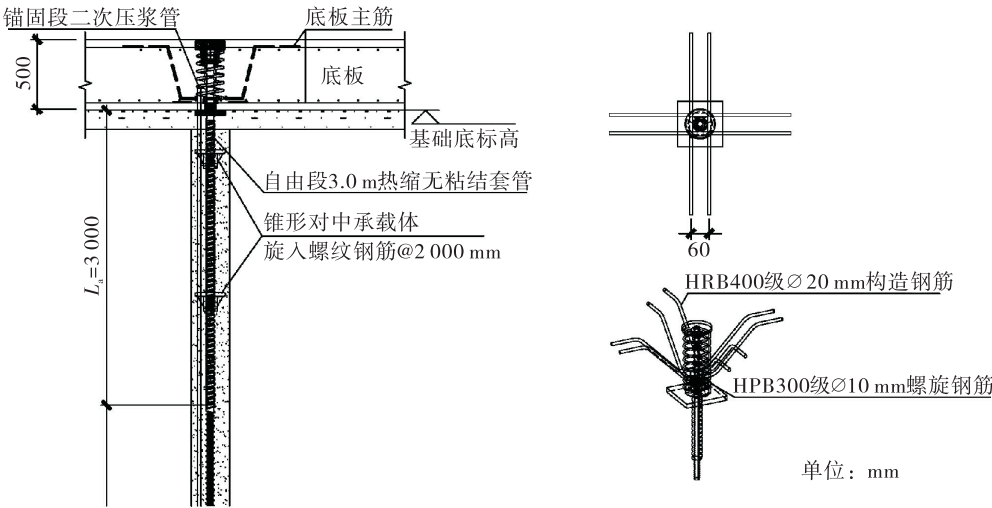


图4 锚杆与基础连接构造图

浆沉淀一定程度再进行二次灌注,把溶洞灌满,确保锚杆的锚固力及摩擦力,并标注有溶洞的锚杆编号,以备后期检测试验,确保满足设计抗拔力要求。

为了确保注浆质量,浆体强度的检验也必不可少。按照规范要求,浆体强度检验用的试块每30根锚杆不少于一组,每组6个试块。通过试块的抗压强度测试,可以评估注浆体的质量,从而判断锚杆的锚固效果。一次注浆以孔口溢出浆液,注浆压力参考值 $0.8 \sim 1.5 \text{ MPa}$;二次注浆应在一次注浆后 $4 \sim 8 \text{ h}$ 后进行,注浆量不少于一次注浆量的30%,注浆压力 $>1.5 \text{ MPa}$ 。注浆完成后,养护工作同样重要,养护的目的是使注浆体在适当的条件下逐渐硬化和增强,以达到设计要求的强度^[5]。养护期间,应注意保持注浆体的湿润状态,避免其受到外界不利因素的影响,如干燥、冻融等。一般情况下,养护期应不少于28 d,其间应定期对注浆体进行检查和维护,确保其质量和稳定性。

3.6 锚杆施加预应力

当基础开挖至基底时,首先要对基底进行细致的清理,确保无浮浆残留,然后进行整平处理,为后续的垫层浇筑奠定坚实基础。基础垫层浇筑是施工的关键步骤之一,不仅能起到保护基

底的作用,还能为预应力组件的安装提供稳定的支撑。因此,在浇筑垫层时,需要严格控制材料的质量和比例,确保垫层的强度和耐久性。

基坑垫层浇筑完成后,应及时开展预应力组件的安装。预应力组件是抗浮锚杆的核心部分。通过施加预应力,能够增强锚杆的承载能力和稳定性。在安装预应力组件时,需要按照设计要求进行精确的定位和固定,确保每个组件都能发挥最大的作用。在安装完预应力组件后,开始进行锚杆预应力的施加。通过施加预应力至设计规定值,可使锚杆在受到地下水浮力时具有更好的抵抗能力,从而确保工程的长期稳定性^[6]。之后是弯折钢筋的安装,弯折钢筋能够增加混凝土的黏结力和剪切力,提高结构连接整体性。在安装弯折钢筋时,要按照设计图纸进行精确布置,确保钢筋的位置和数量都符合设计要求。

杆体预应力施加完毕后,须及时浇筑筏板混凝土。混凝土是构成抗浮锚杆的主要材料之一,通过浇筑混凝土,可以将预应力组件、弯折钢筋等各个部分紧密结合在一起,形成坚固的整体。在浇筑混凝土时,要严格控制混凝土的配比和浇筑质量,确保混凝土能够充分填满各个空隙,达到预期的强度要求。本工程锚杆施加预应力图如图5所示。

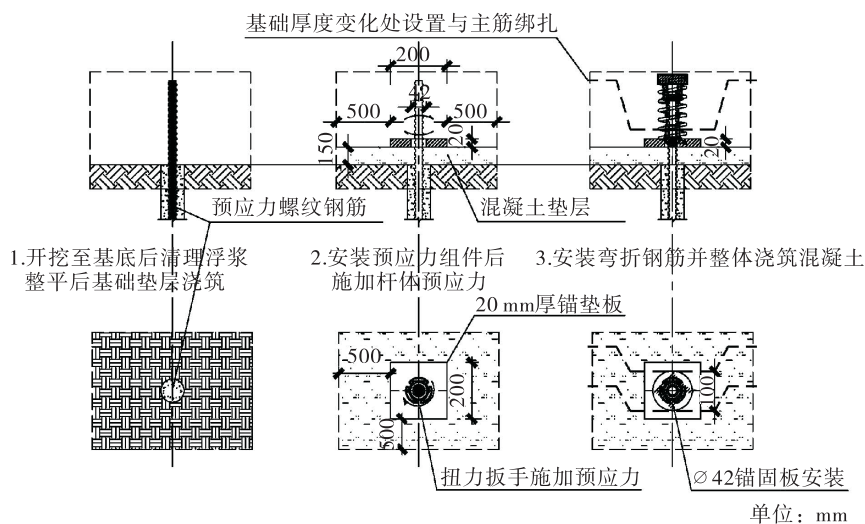


图5 锚杆施加预应力图

3.7 防水附加层

本工程场地地下水类型为岩溶裂隙承压水,赋存在石灰岩④层、破碎石灰岩④-1层的裂隙中和溶洞④-2层中,具承压性,无规律分布于部分场地,水量与季节气候、地表水渗入补给及岩溶发育程度有关。因此,在实际施工中为降低地下

水对压力型预应力岩石抗浮锚杆施工造成的影响,必须切实做好防水施工。

为提升防水效果,将锚垫板位置的混凝土垫层向外扩张500 mm,并加厚50 mm,预应力锚垫板可采用规格为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),须在预应力锚垫板表面之上内嵌自锁

螺母锚具，规格为聚四氟乙烯球形内胆+六角球形底座张紧螺母40Cr。防水位置的锚杆外部需要缠绕固定遇水膨胀止水条，止水条和钢筋之间的空隙需用专用的防水油膏进行填充^[7]。凡是高度超过垫层位置的锚杆钢筋，加装两道遇水膨胀止水橡胶环，并于防水处150 mm的范围内，均匀

涂刷一层水泥基渗透结晶防水层；300 mm 的范围内均匀涂刷一层聚合物水泥防水砂浆。防水层之上还需铺设一层宽300 mm、厚3 mm 的SBS 附加层，通过热熔满粘方法进行粘贴。工程锚杆防水处理做法如图6所示。

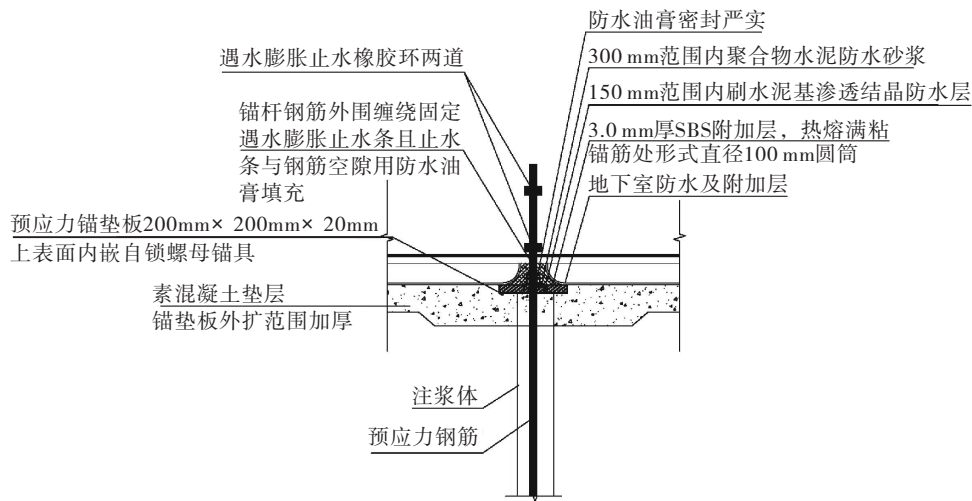


图6 锚杆防水处理做法示意图

3.8 成品保护

考虑到后续基础施工可能会对已完成的锚杆造成破坏，特制定了严格的区域管理措施。即在锚杆区域周围设置明显的警示标志，明确告知施工人员和机械设备不得进入该区域进行作业。此外，还安排了专门的监护人员，负责实时监控该区域的情况，确保锚杆不受任何外力的干扰^[8]。为了避免锚杆体在潮湿环境中发生锈蚀，采取了涂抹素水泥浆的措施。在锚杆体伸出工作面的部分，均匀涂抹一层素水泥浆，形成一层保护膜，有效隔离锚杆体与外部环境的接触，从而延长锚杆的使用寿命，增强其耐腐蚀性能。

4 施工效果分析

压力型预应力岩石抗浮锚杆施工完成后，为验证总体施工效果，对抗浮锚杆施工质量进行检测，本工程施工质量验收表如表3所示。由表3可以看出，采用商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术后，对抗浮锚杆施工质量进行检测，各指标均满足规定要求。压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术的应用有效弥补了传统抗浮锚杆施工工艺存在的不足，施工完成后，建筑基础筏板的抗浮稳定，直至完工后未发生渗漏现象，可有效提升基础的稳定性和抗浮承载力，而且施工速率快，对环境污染比较小。

表3 施工质量验收表

项目	序号	检查项目	允许偏差或允许值	检查方法	检查结果
主控项目	1	锚杆杆体长度/mm	-30 ~ +100	钢尺测量	50
	2	锚杆拉力设计值	设计要求	现场拉拔试验	满足要求
一般项目	1	锚杆位置/mm	±100	钢尺测量	-52
	2	钻孔倾斜度/°	±1	测斜仪等	满足要求
	3	浆体强度	设计要求	试样送检	满足要求
	4	注浆量	大于理论计算浆量	检查计量数据	满足要求
	5	杆体插入长度	全长黏结型锚杆 不小于设计长度的95% 预应力锚杆 不小于设计长度的98%	钢尺测量	满足要求 满足要求

5 结语

结合万花楼文旅综合城项目实践,探讨了商业综合体建筑压力型预应力岩石抗浮锚杆施工技术。为防止地下水位上升对结构造成不利影响,在实际施工中采用了压力型预应力岩石抗浮锚杆作为永久性的抗浮构件。将锚杆深埋于地下岩石层中,通过施加预应力来抵抗地下水对建筑物的浮力作用。抗浮锚杆采用PSB1200级的 $\varnothing 42$ mm预应力混凝土用精轧螺纹钢,其抗拉强度 f_{py} 达到了1 000 MPa,可承受巨大的拉力,从而确保锚杆在长期使用过程中保持稳定性和可靠性。同时严控预应力抗浮锚杆的放线定位、抗拔承载力试验及钻孔、锚杆制作、注浆、锚杆施加预应力等关键工序,最后做好预应力抗浮锚杆的防水及成品保护,按顺序完成施工任务。通过采用抗浮锚杆施工工艺,可以显著提升大型商业综合体建筑基础筏板的抗浮稳定能力,并且在建筑物交付使用后有效预防和减少因地下水压力引起的渗漏隐患,不仅确保了建筑结构的安全性,还为建筑物的长期稳定运行提供了良好的安全质量保障。

本项目施工成功的经验,可为类似工程施工提供参考。

参考文献:

- [1]周驰晴. 新型全长压力型预应力抗浮锚杆施工技术研究:以长沙机场改扩建工程综合交通枢纽工程项目为例[J]. 工程技术研究,2023,8(13):44-46,53.
- [2]杨家玺. 地下室施工中无粘结预应力抗浮锚杆的应用[J]. 中国建筑金属结构,2023,22(4):74-76.
- [3]刘毅. 抗浮锚杆于筏板后施工技术分析及研究[J]. 建筑技术,2024,55(15):1825-1828.
- [4]裴怀文. 预应力抗浮锚杆施工技术应用[J]. 建筑机械化,2024,45(7):87-90.
- [5]辛德平. 杭州某工程压力型预应力抗浮锚杆设计及施工研究[J]. 福建建筑,2024(4):106-109.
- [6]朱忠钱. 岩土工程中抗浮锚杆施工技术的研究与分析[J]. 居舍,2023(36):67-70.
- [7]闫志峰. 预应力抗浮锚杆施工技术探析[J]. 建设科技,2023(22):71-73.
- [8]沈锴,刘鑫. BIM+测量机器人在抗浮锚杆施工中的应用[J]. 建筑施工,2020,42(10):1974-1976.

(上接第51页)

(3) 根据对风险因子的分析,提出了预防和管控措施。包括施工前进行详尽的地质勘探,密切关注施工面以及结构面特征的变化;建立安全管理风险组织,对管理、施工人员进行安全培训;加强监控量测,控制爆破参数、缩短进尺距离等。

参考文献:

- [1]周鸣亮,李泽豫,黄宏伟,等. 考虑施工时序的隧道工作面坍塌风险分析方法与验证[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(3):579-595.
- [2]李泽荃,孙景来,陈磊. 基于事故树和贝叶斯网络的隧道塌陷风险概率估计方法研究[J]. 煤炭工程,2020,52(4):130-136.
- [3]陈舞,王浩,张国华,等. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. 上海交通大学学报,

2020,54(8):820-830.

- [4]陈舞,张国华,王浩,等. 基于T-S模糊故障树的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价[J]. 岩土力学,2019,40(S1):319-328.
- [5]胡法涛. 新奥法隧道施工塌方原因事故树分析[J]. 工程技术研究,2019,4(13):34,62.
- [6]郝银. 基于事故树分析的新奥法施工动态风险评估[J]. 交通世界,2018(Z2):198-199.
- [7]韩守信,张青松. 新奥法隧道施工塌方原因事故树分析[J]. 能源与环境,2009(5):104-105,108.
- [8]周建昆,吴坚. 岩石公路隧道塌方风险事故树分析[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(6):991-998.
- [9]柳献,孙齐昊. 盾构隧道连续性倒塌特征分析[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):913-922.
- [10]南宇宏,赵颂,羊正茂. 基于事故树的隧道塌方风险评估[J]. 筑路机械与施工机械化,2017,34(7):106-110.