

悬索桥锚碇与基础施工技术

朱玉飞 谢睦森

保利长大工程有限公司 广东 广州 511400

摘要: 悬索桥锚碇与基础是承载主缆拉力、保障结构整体稳定的核心受力构件,其施工质量直接关系到桥梁的长期安全运营。本文系统阐述了悬索桥锚碇的基本类型与受力特征,深入分析了基坑开挖、大体积混凝土浇筑、预应力锚固系统安装等关键施工环节的技术要点与控制措施,着重探讨了地连墙围护结构施工、温控防裂技术及锚固系统精确定位等核心技术难题的解决方案。研究表明,锚碇基础施工的关键在于围护结构止水效果、大体积混凝土温度裂缝防控及锚固系统定位精度三项核心要素的综合管控。本文旨在为悬索桥锚碇与基础施工提供技术参考。

关键词: 悬索桥; 锚碇; 基础施工; 大体积混凝土; 预应力锚固系统

引言: 悬索桥因跨越能力大、结构形式优美,是现代大跨度桥梁工程中的主导桥型之一。锚碇作为悬索桥的关键受力构件,承担着将主缆拉力传递给地基的重要功能,其结构安全性和稳定性是整座桥梁的生命线。随着悬索桥跨径不断增大,锚碇与基础的规模相应增加,施工难度与日俱增,对施工技术提出了更高要求。锚碇基础通常位于复杂地质条件下,基坑深大、地下水丰富、混凝土浇筑方量巨大,施工过程中面临围护结构止水、大体积混凝土温度裂缝控制、预应力锚固系统高精度定位等一系列技术难题。本文围绕锚碇与基础施工的工艺流程,对各关键环节的技术要点进行系统梳理与分析,以期同类工程施工提供参考。

1 悬索桥锚碇的受力特征与结构类型

1.1 锚碇的受力机理

锚碇的基本功能是将主缆的拉力安全有效地传递到地基,其受力状态极为复杂。主缆经散索鞍后分散为若干股锚固于锚碇后锚面,单根主缆拉力可达数万吨,通过索股与锚固系统的连接传递至锚体混凝土,再经由锚体与地基的接触面分散至周围岩土体。在整个传力路径中,锚碇承受着巨大的竖向压力和水平推力,同时还承担着抵抗主缆上拔分力的作用。因此,锚碇既要具备足够的自重以提供抗滑稳定性和抗倾覆稳定性,又要保证自身结构具有足够的强度与刚度以承受复杂的应力状态。

1.2 锚碇的结构类型

按照受力特点和结构形式的不同,悬索桥锚碇主要分为重力式锚碇和隧道式锚碇两大类型。重力式锚碇依靠自身巨大的重力来平衡主缆拉力,通常由混凝土锚体和基础两部分构成,适用于覆盖层较厚、基岩埋深较大

的地质条件。其结构形式又可分为三角框架式、实体重力式和扶壁式等。隧道式锚碇则利用围岩的承载能力,将锚体嵌入稳定基岩中,利用锚-岩联合受力来抵抗主缆拉力,适用于基岩出露较高、岩体完整坚硬的地质条件^[1]。两类锚碇在受力机制、施工方法和造价方面存在显著差异,工程选型需综合考虑地质条件、跨径大小和经济性等因素。

1.3 锚碇基础的承载形式

锚碇基础根据地基条件和受力需求可选用扩展基础、桩基础或沉井基础等形式。扩展基础适用于地基承载力较高且均匀的情况,通过扩大基底面积降低地基应力,依靠基底摩擦力和被动土压力抵抗水平推力。桩基础则适用于覆盖层深厚、基岩埋深大的地质条件,通过桩侧摩阻力和桩端阻力将荷载传递至深层稳定地层,可有效提高锚碇的抗滑和抗倾覆能力。沉井基础兼具基础与围护结构的双重功能,适用于水深较大或地质条件复杂的情况,施工过程中作为基坑支护结构,竣工后成为基础组成部分。不同类型基础的受力特征和施工工艺各有不同,设计时需根据地层条件和施工环境综合比选。

2 锚碇基础施工关键技术

2.1 基坑开挖与支护

锚碇基坑深度通常达数十米,周边环境条件复杂,开挖与支护是基础施工的首道工序。基坑开挖方案的选择需综合考虑地质条件、地下水状况、基坑规模及周边环境约束等因素。对于覆盖层较浅、基岩完整的场地,可采用放坡开挖方案,边坡坡率根据岩体稳定性确定并设置必要的防护措施。对于城市或近邻既有建筑物区域的深基坑工程,通常需要设置围护结构,常用的支护形

式包括地下连续墙、钻孔灌注桩排桩加内支撑体系等。地下连续墙具有刚度大、止水效果好、施工深度大等优势,在大型锚碇基坑中得到广泛应用。基坑开挖应遵循分层、分段、对称、均衡的原则,严格控制开挖高程,防止超挖扰动基底持力层,开挖至设计标高后应及时进行验槽并浇筑垫层混凝土。

2.2 地下水控制与防排水

锚碇基坑多位于地下水位以下,地下水控制是保证干地作业条件的关键。常用的地下水控制方法包括降水井抽排降水和止水帷幕截水两种基本形式,必要时采用二者联合方案。降水井系统应在基坑四周按一定间距布设,并根据抽水试验结果确定合理的井深、井距和抽水量,确保基坑内地下水位降至开挖面以下至少 0.5 至 1.0 米。止水帷幕通常采用高压旋喷桩、深层搅拌桩或地下连续墙等形式,其功能在于切断基坑内外地下水的水力联系,减小降水对周边环境的影响。对于岩溶发育或裂隙发育的基岩地区,裂隙渗漏是地下水控制的难点,需在开挖过程中对渗漏点进行及时封堵,必要时采用化学灌浆等辅助手段处理。

2.3 大体积混凝土基础浇筑

锚碇基础混凝土浇筑方量巨大,单次浇筑方量可达数千乃至数万立方米,属于典型的大体积混凝土工程。大体积混凝土浇筑面临的核心技术问题是水化热引起的温度裂缝控制。水泥水化过程中释放的大量热量使混凝土内部温度迅速升高,而表面散热较快,内外温差产生的温度应力一旦超过混凝土抗拉强度即产生裂缝。为控制温度裂缝,应从材料选用、配合比设计和施工工艺三个层面采取综合措施。材料层面应选用低热矿渣水泥或粉煤灰水泥,掺加优质粉煤灰和缓凝型减水剂以降低水化热峰值并延缓放热过程。配合比设计方面应在满足强度和耐久性前提下尽可能降低水泥用量,控制混凝土入模温度不超过设计限值^[2]。施工工艺方面应采取分层分块浇筑,合理设置施工缝和后浇带,在混凝土内部布设冷却水管通水降温,加强表面保温保湿养护,并实施全过程温度监测指导温控措施调整。

2.4 基底处理与连接构造

锚碇基础与基底岩土体的接触面是传力的关键界面,基底处理的优劣直接关系到基础与地基的共同工作性能。对于岩石地基,基底应清除风化层和不稳定岩块,对软弱夹层和破碎带进行置换或加固处理,凿毛处理后的基岩面应清洁无杂物。对于土质地基,应严格控制基底标高,防止扰动原状土,必要时铺设碎石垫层或

浇筑素混凝土找平层。基础与地基之间的抗剪连接是抵抗水平推力的重要保障,应在基底设置键槽或齿坎等抗剪构造,增加基础与地基之间的嵌固效应和摩擦传力能力。基底隐蔽工程须经联合验收合格后方可进行后续工序施工。

3 锚体结构施工技术

3.1 锚体混凝土分层浇筑与温控

锚体混凝土与大体积基础混凝土同属大体积浇筑范畴,但锚体结构几何形态更为复杂,包含后锚面、前锚面、散索鞍支墩等异形部位,施工难度显著增加。锚体混凝土应严格按照分段分层方案浇筑,分层厚度一般控制在 1.5 至 2.0 米,上下层之间应设置水平施工缝并按规范进行凿毛处理。锚体内部预应力管道密集,钢筋和预应力管道密集区域应选用小直径振捣棒并适当延长振捣时间,确保混凝土密实。锚体大体积混凝土的温控措施与基础工程基本一致,需特别注意的是锚体表面多为暴露面,养护期内应加强防风、防晒和保温措施,防止表面干缩裂缝的产生。

3.2 预应力锚固系统安装

预应力锚固系统是将主缆索股拉力传递给锚体的核心构造,通常由锚板、锚垫板、预应力筋及配套锚具组成。锚固系统的安装精度直接决定主缆线形的准确性和索力分布的均匀性,因而对定位精度有极为严格的要求。安装前应在锚体钢筋骨架上精确放出各锚固点的空间坐标,设置稳固的定位支架或定位钢架,将锚垫板和锚板按设计角度和位置精确定位并牢靠固定,防止混凝土浇筑过程中的移位和变形。预应力筋的编束、穿束和张拉应严格按设计张拉顺序进行,张拉施工应采用张拉力与伸长值双控,确保有效预应力达到设计要求。预应力管道压浆应在张拉完成后及时进行,压浆材料应具备良好的流动性和体积稳定性,压浆工艺应保证管道内浆体饱满密实^[3]。

3.3 散索鞍支墩与连接构造施工

散索鞍支墩是锚碇结构中连接主缆与锚体的重要过渡构件,承受着来自散索鞍的巨大集中荷载。支墩施工的关键在于确保其空间位置准确和结构整体性。支墩模板应具备足够的强度和刚度,支撑体系应经计算复核,防止混凝土浇筑过程中的变形和跑模。支墩内部钢筋和预应力管道密集,振捣难度大,应适当提高混凝土的流动性和和易性。支墩顶面预埋件的安装精度直接关系到散索鞍的安装质量,预埋件平面位置和高程偏差应控制在设计允许范围内,预埋件固定应牢靠,混凝土浇筑过

程中应进行跟踪测量,发现偏差及时校正。

4 特殊地质条件下的施工技术

4.1 岩溶发育地区基础处理

岩溶地区基岩中溶洞、溶槽和裂隙发育,对锚碇基础的稳定性和止水效果构成严重威胁。基础施工前应采用地质雷达、跨孔 CT 等物探手段配合钻探查明溶洞的空间分布和充填情况。对于规模较小的溶洞和裂隙,可采用开挖换填或高压注浆方式处理,将松动块石清除后用混凝土或水泥砂浆回填密实。对于规模较大的溶洞,需结合结构设计进行专项处理方案设计,可采取桩基穿透溶洞将荷载传递至下部完整岩层,或在溶洞内设置钢筋混凝土支撑结构。施工过程中应加强监测,密切关注基坑变形和渗漏变化,确保施工安全。

4.2 软弱地层中基础施工

在深厚软土层或松散砂层中修建锚碇基础,面临着地基承载力不足、基坑变形控制和降水影响范围大等突出问题。除采用桩基础穿越软弱层外,施工中还应注意以下要点:基坑支护结构应具有足够的刚度和嵌固深度,内支撑体系应按设计要求及时安装并施加预应力,防止基坑位移超标;降水井的布置应考虑降水影响范围内建筑物和地下管线的保护,必要时设置回灌井维持地下水位平衡;基底若存在软土薄弱层,应采用换填或加固处理后方可浇筑垫层^[4]。基础施工期间应对支护结构位移、地下水位和周边地面沉降实施全过程监测,实行信息化施工管理。

4.3 近水或水下基础施工

位于江河或滨海地区的悬索桥锚碇,其基础施工需在水域环境下进行,常采用围堰或沉井方案创造干地施工条件。钢板桩围堰适用于水深较小、地质条件较好的情况,围堰的插打和合龙应严格控制垂直度和锁口止水质量。双壁钢围堰适用于水深流急的大型锚碇基础,围堰的加工制作精度要求高,下沉过程需严格控制平面位置和垂直度,着床后应及时进行封底混凝土浇筑。沉井基础兼具基础与围护功能,沉井制作应分层浇筑、对称下沉,下沉过程中应随时监测倾斜和扭转并及时纠偏,终沉到位后应及时进行封底和填芯混凝土施工。

5 施工质量检验与安全保障

5.1 锚碇施工质量检验

锚碇施工质量检验涵盖材料检验、过程检验和成品检验三个层面。原材料检验是质量管控的起点,包括水泥、骨料、钢筋、预应力筋及锚具等所有进场材料的进场复验,各项性能指标须满足设计及规范要求,其中

预应力筋用锚具还应进行外观检查、硬度检验和静载锚固性能试验。过程检验是核心环节,重点控制混凝土强度、预应力张拉应力及管道压浆密实度等关键参数,混凝土应按规范制作标准养护和同条件养护试件检测抗压强度,预应力张拉应留存完整的张拉记录,管道压浆须检测浆体流动度和膨胀率等指标。成品检验是最终关口,主要包括锚体混凝土外观质量检查、锚固系统定位偏差复核以及锚碇整体几何尺寸测量,锚体表面的蜂窝麻面须按专项方案修补并验收,确保各项偏差在设计允许范围内。

5.2 施工安全风险防控

锚碇基础施工属于高风险作业范畴,涉及深基坑、大模板、高空作业和大型起重吊装等多个危险源交叉叠加。基坑施工阶段应建立完善的变形监测体系,对支护结构位移、支撑轴力、地下水位及周边地表沉降实施动态监测,设定预警值与报警值并制定应急预案,一旦数据接近阈值立即启动响应。大体积混凝土施工应重视模板支撑体系的稳定性验算和抗浮验算,泵送管路布设应合理规划,布料应均匀对称,防止局部荷载集中引发事故。预应力张拉施工应在张拉区设置安全防护屏障,张拉端后方严禁站人。起重吊装作业须编制专项方案并经审批。施工全过程应严格执行安全技术交底和班前教育制度,关键工序实行专项方案审批和条件验收,落实带班和旁站监督,确保施工安全始终受控。

结束语

悬索桥锚碇与基础施工是桥梁建设中的关键环节,其技术难度大、质量要求高、风险因素多。本文从锚碇的受力特征与结构类型出发,系统分析了基础施工中的基坑开挖与支护、地下水控制、大体积混凝土浇筑、基底处理等关键技术,以及锚体结构施工中的分层浇筑、预应力锚固系统安装和散索鞍支墩施工等核心内容,并针对岩溶地区、软弱地层和近水环境等特殊地质条件提出了相应施工对策。随着悬索桥向更大跨径发展,锚碇与基础施工技术将朝着信息化、智能化方向持续进步。

参考文献

- [1] 韩会生. 悬索桥重力式锚碇沉井基础下沉施工监控技术 [J]. 西部交通科技, 2023(10): 130-132,154.
- [2] 朱冠华, 吴启樨. 山区悬索桥重力式锚碇设计与施工技术 [J]. 世界桥梁, 2025, 53(4):28-34.
- [3] 任志伟. 悬索桥锚碇施工技术特点及应用研究 [J]. 商品与质量, 2021(25): 131-132.
- [4] 周波. 悬索桥锚碇地下连续墙基坑支护与开挖技术 [J]. 交通世界, 2025(31): 155-158.