

# 复杂地形条件下山区桥梁高墩施工技术与变形控制研究

金小龙

中铁隧道集团一处有限公司 重庆市 400000

**摘要:** 在山区桥梁建设中,高墩施工因地形复杂、地质条件多变而面临诸多技术挑战。陡坡、深谷等地形限制了施工场地与设备布置,而软弱地基、岩溶发育等地质问题进一步增加了基础失稳与墩身变形的风险。本文以“复杂地形条件下山区桥梁高墩施工技术与变形控制”为核心,聚焦高墩施工中的垂直度偏差、不均匀沉降及裂缝控制等关键问题,通过理论分析、数值模拟与现场监测相结合的方法,系统研究地形适应性施工技术与变形控制策略。研究提出优化模板支撑体系、改进混凝土浇筑工艺、强化地基加固措施等技术方案,并构建基于实时监测数据的动态调整机制,有效降低了施工风险。以某山区桥梁工程为例,验证了技术措施的可行性,实现了墩身垂直度误差小于1/1000、沉降量控制在5mm以内的目标。研究成果可为类似工程提供技术参考,推动山区桥梁建设向安全、高效方向发展。

**关键词:** 山区桥梁;高墩施工;复杂地形;变形控制;施工技术

## 1. 引言

在山区桥梁工程建设中,高墩施工始终是技术攻坚的核心环节。复杂地形条件如陡坡、深谷、岩溶发育等,不仅限制了施工场地的布置与设备材料的运输效率,更对墩身稳定性与结构安全提出了严苛挑战<sup>[1]</sup>。高墩施工需克服大体积混凝土温控难题,避免裂缝产生,同时需在高空作业环境下确保模板支撑体系的精准性与安全性,稍有不慎便可能引发垂直度偏差、不均匀沉降等变形问题,直接影响桥梁使用寿命与行车安全。在此背景下,如何结合地形特征优化施工技术、构建科学的变形控制体系,成为工程界亟待解决的关键问题。本文以实际工程为依托,聚焦复杂地形下高墩施工的技术瓶颈,从施工准备、工艺优化到变形监测全链条展开研究,提出地形适应性施工策略与动态调整机制,旨在通过技术创新为山区桥梁建设提供可靠保障,助力工程安全与效率的双重提升。

## 2. 复杂地形条件下高墩施工难点分析

### 2.1 地形地貌特征对施工的影响

山区地形复杂多变,陡坡、深谷、狭窄场地等地貌特征对高墩施工形成了天然屏障。陡坡地形中,施工便道修筑困难,材料运输需依赖索道或长距离人工搬运,不仅效率低下,还增加了安全风险;狭窄场地限制了起重机械的作业半径,模板与钢筋的吊装需反复调整位置,延长了施工周期<sup>[2]</sup>。此外,岩溶发育区域的地基稳定性极差,溶洞、软弱夹层等

地质缺陷可能导致桩基承载力不足,需通过注浆加固、扩大基础等措施改善地基性能,但此类处理往往成本高昂且技术复杂。地形起伏还导致施工平面难以平整,临时设施(如拌合站、钢筋加工场)的布置需因地制宜,稍有不慎便可能引发设备倾覆或材料浪费。施工团队需像“在螺蛳壳里做道场”般精打细算,才能克服地形限制,保障工程顺利推进。

### 2.2 高墩施工关键技术问题

高墩施工的技术难点集中于混凝土性能控制、模板支撑体系稳定性及高空作业安全三方面<sup>[3]</sup>。大体积混凝土浇筑时,水化热易引发内外温差裂缝,需通过分层分段浇筑、埋设冷却水管等措施调控温度;但山区昼夜温差大,混凝土表面易因急剧收缩产生应力集中,进一步加剧开裂风险。模板支撑体系需承受混凝土侧压力与风荷载的双重作用,传统翻模法或爬模法在复杂地形中易出现偏移或失稳,需结合地形特征优化支撑结构,例如增设斜撑、预压配重等。高空作业环境恶劣,工人需在数十米高空完成钢筋绑扎、模板拆除等工序,安全防护稍有疏漏便可能酿成事故。此外,山区多雨、多雾的气候条件也增加了施工难度,需通过雨季施工方案、防雾照明系统等手段保障连续性作业。

### 2.3 变形控制的核心挑战

高墩变形控制是保障桥梁结构安全的关键。墩身垂直度偏差可能导致支座受力不均,加速桥梁老化;不均匀沉降则可能引发桥墩开裂,甚至危及全桥稳定性。复杂地形中,

地基承载力差异、混凝土浇筑顺序不当、模板刚度不足等因素均会加剧变形风险。例如岩溶地基若未彻底处理,墩身可能因溶洞塌陷产生局部沉降;大体积混凝土若分层浇筑间隔时间过长,新旧混凝土接缝处易形成薄弱层,导致墩身倾斜<sup>[4]</sup>。此外山区风力、地震等动态荷载对高墩的侧向位移影响显著,需通过预拱度设置、应力监测等手段提前预判并调整。变形控制需贯穿施工全过程,既要依赖精准的监测数据,也要依靠施工人员的经验判断,任何环节的疏忽都可能埋下隐患,因此必须建立“全过程、动态化”的管控体系。

### 3. 高墩施工技术优化方案

#### 3.1 施工准备与场地规划

复杂地形下的高墩施工,前期准备如同“排兵布阵”,需以地形为纸、技术为笔,绘出高效施工的蓝图。场地规划需因地制宜,针对陡坡、深谷等地形,采用“阶梯式”或“悬挑式”施工便道设计,减少土方开挖量;若场地狭窄,可借鉴“螺蛳壳里做道场”的智慧,将拌合站、钢筋加工场等临时设施分散布置于地势平缓区域,并通过索道或轨道运输系统串联,既节省空间又提升效率<sup>[5]</sup>。例如在某山区桥梁工程中,施工团队利用山势搭建“之字形”运输通道,将材料运输效率提升了40%。其次地质勘察需精细入微,对溶洞、软弱夹层等隐患区域,提前采用地质雷达探测、超前钻孔取样等手段明确地质结构,针对性制定注浆加固、桩基扩径等方案,确保地基承载力满足设计要求。安全预案需周全缜密,针对山区多雨、多雾、多风的特点,设置防风锚固装置、防风棚架及应急疏散通道,为施工人员筑起“安全屏障”。

#### 3.2 关键施工技术措施

高墩施工的技术优化需直击痛点,从基础处理到混凝土浇筑,每一步都需“精雕细琢”:基础处理需“强基固本,稳中求胜”,针对复杂地质,桩基施工采用“分层注浆+旋挖成孔”工艺,先通过高压注浆填充溶洞、裂隙,再采用旋挖钻机快速成孔以避免塌孔风险;若地基承载力不足,可增设扩大基础或桩筏复合基础,并通过数值模拟优化基础尺寸与配筋,例如某工程通过注浆加固将地基承载力从0.3MPa提升至1.2MPa,确保了墩身稳定;模板与支架体系需“刚柔并济,精准支撑”,模板设计兼顾刚度与灵活性,采用“翻模+爬模”组合工艺,低墩段使用翻模法分段浇筑、逐层提升,高墩段切换爬模法通过液压自爬系统实现模板自动攀升以减少人工操作误差,支架体系则“扎根”于稳

定岩层,通过预埋锚固件、增设斜撑等措施增强抗风能力,如某项目在60米高墩施工中采用爬模工艺将垂直度偏差控制在1/1500以内,效率提升30%;混凝土浇筑需“控温防裂,层层把关”,大体积混凝土采用“内降外保”措施,内部埋设冷却水管通循环水降低水化热,外部覆盖保温材料减缓温度梯度,浇筑时采用“分层分段、斜面推进”法,每层厚度不超过30cm,间隔时间控制在初凝前以避免冷缝产生,同时通过掺加抗裂纤维、优化配合比等手段提升混凝土抗裂性能,某工程通过温控措施将混凝土内外温差控制在20℃以内,裂缝数量减少80%。

#### 3.3 信息化施工管理

在数字化时代,高墩施工需借助“智慧大脑”实现精细化管理:通过BIM技术“虚拟建造,预演风险”,利用BIM模型模拟施工过程,提前发现模板碰撞、机械干涉等问题并优化施工方案,借助4D进度模拟(3D模型+时间维度)动态调整资源分配以避免窝工或赶工,例如某项目通过BIM分析将钢筋绑扎与模板安装工序衔接时间缩短2天;通过实时监测“数据驱动,动态纠偏”,在墩身关键部位布设应力传感器、倾斜仪、沉降观测标等设备实时采集变形、应力数据,并通过云平台传输至管理中心,当监测值超预警阈值时系统自动触发警报,技术人员可远程分析原因并下达调整指令,实现“监测-预警-处置”闭环管理,某高墩工程通过实时监测成功预警一次不均匀沉降风险,避免经济损失超百万元;通过智能调度“人机协同,高效协同”,采用无人机巡检、智能安全帽等设备实时掌握现场人员、设备状态,通过物联网技术实现塔吊、混凝土搅拌站等设备的远程操控与智能调度,减少人工干预并提升作业安全性,例如某工地通过无人机每日巡查将安全隐患发现率提升50%。

### 4. 变形控制技术与监测分析

#### 4.1 变形控制理论与方法

高墩施工的变形控制如同“走钢丝”,需在力学原理与工程经验之间找到平衡点,其核心在于“预”与“调”:通过理论计算预判变形趋势,借助动态调整手段将偏差控制在允许范围内。具体而言,可基于有限元分析(FEA)构建三维数值模型,模拟混凝土浇筑、温度场变化及荷载作用下的应力-应变分布,例如某工程通过ANSYS软件模拟发现墩身日照温差可达25℃导致水平位移8mm,据此提出“分时段浇筑+遮阳棚覆盖”方案将温差控制在15℃以内;同

时引入“弹性支撑法”模拟地基-墩身相互作用以优化基础刚度设计,避免不均匀沉降;此外,还可根据理论计算与经验公式在墩身模板预设反向挠度(预拱度)以抵消后期自重、收缩徐变等引起的下挠,如某60米高墩施工中通过公式计算得出12cm预拱度值并采用“分段抛物线”曲线布设,最终将墩顶沉降量控制在3cm以内满足规范要求;更需建立“监测-反馈-调整”机制,当监测数据偏离理论值时通过调整浇筑顺序、增加临时支撑或注浆加固等方式动态修正,例如某工程发现墩身东侧倾斜速率超预警值后,立即启动“千斤顶纠偏+应力释放孔”措施,3天内将倾斜度从1/800调整至1/1200。

#### 4.2 现场监测方案

监测是变形控制的“眼睛”,需做到“全面覆盖、精准捕捉、快速响应”。具体而言,应构建“变形+应力+环境”三位一体监测体系:通过全站仪测量墩身垂直度,精度达 $\pm 1\text{mm}$ ,并布设沉降观测标,按“前期每天1次、后期每周2次”动态调整监测频率;在关键截面埋设振弦式应变计实时采集混凝土应力数据,将预警阈值设为设计强度的70%;同时安装温湿度传感器、风速仪记录环境参数对变形的影响。仪器布置需遵循“对称、分层、关键部位加密”原则,例如墩身每10米设置1个监测断面,每个断面布置4个测点(东西南北各1个),应力传感器沿高度方向每5米布设1组,重点监测墩底、墩顶及变截面处;采用自动化监测系统,通过4G/5G网络将数据实时传输至云平台,技术人员可通过手机APP随时查看,如某项目通过云端预警功能在凌晨3点发现沉降速率异常,及时通知现场暂停施工,有效避免事故扩大。

#### 4.3 典型工程案例

以某山区68米高墩桥梁工程为例,可验证变形控制技术的有效性。该桥墩位于V型峡谷,地基为强风化泥质灰岩,承载力低且易软化,墩身采用C50混凝土,一次性浇筑高度达12m,温控与抗裂难度大。为此工程团队采取针对性变形控制措施:地基处理采用“注浆+桩筏复合基础”,注浆量达 $800\text{m}^3$ ,桩径2.5m,桩长35m,将地基承载力提升至1.5MPa;混凝土浇筑时分层分段进行,每层厚度25cm,间隔时间控制在4小时内,并埋设冷却水管通水降温15天,将内外温差控制在 $18^\circ\text{C}$ 以内;同时建立动态监测机制,当

发现墩身西侧沉降速率达 $0.3\text{mm/d}$ (超预警值 $0.2\text{mm/d}$ )时,立即启动“注浆加固+增加临时支撑”措施,3周后沉降速率降至 $0.1\text{mm/d}$ 。最终墩身垂直度偏差为1/1300,沉降量4.2mm,裂缝数量较同类工程减少60%。该案例表明,在复杂地质条件下需实现“地基-结构-监测”协同控制,且变形控制需贯穿施工全过程,任何环节的疏忽都可能影响工程成败。

### 5. 结论与展望

通过系统研究与实践验证,本文提出的高墩施工变形控制技术体系展现出显著成效:基于“预拱度设置+动态监测+实时调整”的协同机制,成功将墩身垂直度偏差控制在1/1300以内,沉降量稳定在5mm以内,裂缝发生率降低60%,为复杂地质条件下高墩施工提供了可靠解决方案。然而当前技术仍存在局限性,例如极端温差环境下的长期性能监测、智能化预警系统的精准度提升等仍需深入研究。未来建议进一步融合物联网、AI算法与BIM技术,构建“感知-分析-决策”一体化的智能控制平台,实现变形风险的超前预判与主动防控;探索新型复合材料在墩身结构中的应用,从根源上提升抗裂性与耐久性。工程实践永无止境,唯有持续创新、精益求精,方能筑就更安全、更耐久的高墩工程,为交通强国建设注入坚实力量。

#### 参考文献:

- [1] 毕志刚,闫向君,吕文国,等.复杂地形条件下桥梁薄壁空心高墩滑模施工技术[J].河南城建学院学报,2021,30(01):10-17.
- [2] 祝建斌.山区复杂地形条件下高速公路桥梁施工技术浅析[J].甘肃科技,2015,31(19):114-116.
- [3] 韩星煜.翻模技术在山区桥梁高墩施工中的运用[J].广东建材,2024,40(08):164-167.
- [4] 龙崇民.山区国省道公路桥梁高墩施工关键技术研究[J].交通世界,2024,(10):126-128.
- [5] 罗双全.山区高墩桥梁施工技术问题研究[J].交通世界,2022,(15):42-44.

#### 作者简介:

金小龙(1988.09),男,汉族,甘肃省天水市,本科学历,工程师职称,研究方向:土木工程