

Research on construction quality and safety control technology of prestressed bent cap bracket in complex terrain

Zhiying Xu Luyao Chang

Zhejiang Jiaogong Jinzhu Traffic Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

under the background of transportation infrastructure construction extending to mountainous areas, river valleys and other complex terrain, the prestressed bent cap, as the core component of bridge load-bearing, faces multiple challenges in its support construction, such as terrain constraints, complex loads and changeable environment. Taking complex terrain as the Research scenario, this paper systematically constructs the construction technology system of prestressed bent cap bracket from four dimensions: bracket design optimization, construction process refinement, quality control and safety risk dynamic prevention and control. By introducing terrain adaptability design method, dynamic load simulation technology and intelligent monitoring system, the problems of support instability, excessive settlement and frequent safety accidents under complex terrain are solved. Combined with the actual engineering case verification, the technical system can control the support settlement within 5~10mm, reduce the incidence of safety accidents by more than 80%, and provide theoretical and practical reference for similar projects.

Keywords

complex terrain; Prestressed bent cap; Support construction; Quality control; Safety prevention and control; Dynamic monitoring

复杂地形预应力盖梁支架施工质量及安全防控技术研究

徐志颖 畅路遥

浙江交工金筑交通建设有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘 要

在交通基础设施建设向山区、河谷等复杂地形延伸的背景下, 预应力盖梁作为桥梁承重核心构件, 其支架施工面临地形限制、荷载复杂、环境多变等多重挑战。本文以复杂地形为研究场景, 从支架设计优化、施工工艺细化、质量全流程管控、安全风险动态防控四个维度, 系统构建预应力盖梁支架施工技术体系。通过引入地形适应性设计方法、动态荷载模拟技术及智能监测系统, 解决复杂地形下支架失稳、沉降超标、安全事故多发等问题。结合实际工程案例验证, 该技术体系可使支架沉降量控制在 5~10mm 内, 安全事故发生率降低 80% 以上, 为同类工程提供理论与实践参考。

关键词

复杂地形; 预应力盖梁; 支架施工; 质量控制; 安全防控; 动态监测

1 引言

随着我国“交通强国”战略推进, 桥梁工程逐渐向地形复杂区域拓展, 如山区峡谷、跨江河谷、岩溶地貌等。此类区域预应力盖梁施工中, 支架体系不仅需承担盖梁自重、施工荷载及预应力张拉反力, 还需抵御地形坡度、地质不均、强风暴雨等环境荷载, 施工难度与风险显著高于平原地区。预应力盖梁支架施工的质量与安全, 直接决定桥梁结构的长期稳定性。在复杂地形中, 传统支架设计方法(如基于均质地基假设的静态计算)易导致结构选型偏差, 施工中“重工艺、轻监测”的模式难以应对地形突变引发的风险。因此, 开展复杂地形下预应力盖梁支架施工技术研究, 对提升工程

安全性、降低成本损耗具有重要现实意义。

2 复杂地形对预应力盖梁支架施工的影响机制

2.1 地形特征分类与荷载特性

复杂地形按影响因素可分为三类, 其对支架施工的作用机制如下:

2.2 地形因素对支架受力的量化分析

坡度影响: 通过 MIDAS Civil 建立坡度-荷载模型, 当坡度由 0° 增至 30° 时, 支架立杆最大轴力增加 27%, 侧向位移增大 42% (如图 1 所示)。需通过增设抗滑移支座(摩擦系数 ≥ 0.3) 抵消坡度产生的水平分力。

地质不均影响: 在岩溶区, 若溶洞顶板厚度不足 5m, 支架沉降量可达 20~30mm (远超规范限值 10mm), 需采用地质雷达超前探测, 对溶洞区域进行注浆填充(注浆压力 $\geq 2\text{MPa}$)。

【作者简介】徐志颖(1980-), 男, 中国浙江金华人, 本科, 从事道路与桥梁管理研究。

表 1

地形类型	核心特征	对支架的主要影响
山区地形	坡度 15° ~45°，基岩裸露，局部有滑坡体	支架立杆受力不均，侧向滑坡推力导致倾覆风险；地基承载力差异大，易引发不均匀沉降
河谷地形	水位变幅 3~10m，流速 1~3m/s，存在冲刷作用	水中支架基础受水流冲击力；水位涨落导致支架受力动态变化；汛期洪水荷载威胁结构安全
岩溶地形	地下溶洞发育，土层厚度不均（0.5~5m）	地基不均匀沉降；溶洞顶板坍塌引发支架突然失稳；地下水渗透导致基础软化

气象荷载影响：河谷区 10 级阵风产生的风荷载可达 0.5kN/m²，导致支架顶端侧向变形增加 150mm，需在支架顶部增设风障（挡风率 ≥80%）及缆风绳（拉力 ≥10kN）。

2.3 复杂地形下支架施工典型风险案例

案例 1：山区桥梁支架坍塌（2020 年，云南某项目）：因未考虑 25° 坡度产生的侧向力，支架立杆与横杆连接节点松动，浇筑过程中突发失稳，导致盖梁断裂，直接损失 800 万元。

案例 2：河谷支架沉降超标（2021 年，湖北某项目）：汛期水位上涨导致水中支架基础冲刷深度达 1.2m，地基承载力下降 30%，盖梁轴线偏差达 25mm，被迫返工处理。

3 复杂地形预应力盖梁支架设计优化技术

3.1 地形适应性结构选型

山区地形：采用“型钢支架 + 斜撑加固”体系。主承重结构选用 Q355B 型钢（屈服强度 ≥355MPa），立杆间距加密至 0.8~1.0m，沿坡度方向每 3m 设置一道横向斜撑（与地面夹角 50°），通过有限元分析验证，该结构抗倾覆系数可达 2.0（规范要求 ≥1.5）。

河谷地形：水中支架采用“钻孔桩基础 + 钢围堰”组合方案。钻孔桩直径 1.2m，入土深度 ≥10m，围堰采用双壁钢套筒（壁厚 8mm），通过封底混凝土（强度 C30）隔绝水流冲刷，基础承载力提升至 250kPa 以上。

岩溶地形：采用“桩基托换 + 溶洞填充”方案。对顶板厚度 < 3m 的溶洞，先灌注 C25 微膨胀混凝土填充，再施工 Φ800mm 钻孔桩穿越溶洞，桩端嵌入完整基岩 ≥2m，确保地基沉降差 ≤3mm。

3.2 动态荷载计算方法

基于《公路桥涵施工技术规范》（JTG/T 3650-2020），结合复杂地形特点，建立荷载计算模型：

恒荷载：除传统自重荷载外，增加地形附加荷载，如山区坡度产生的侧向力（ $F=G \times \tan \theta$ ， θ 为坡度角）、河谷水流冲击力（ $F=1/2 \rho v^2 A$ ， ρ 为水密度， v 为流速， A 为迎水面面积）。

活荷载：考虑施工人员、机械的不均匀分布，按 3.0kN/m² 取值（较平原地区提高 20%），并计入强风荷载（基本风压按 50 年一遇标准取值）。

预应力张拉荷载：采用“分步加载法”计算，考虑张拉阶段支架与盖梁的协同变形，附加力系数取 1.1（常规地形

形为 1.0）。

3.3 节点构造与连接优化

立杆与地基连接：山区地形采用可调式斜撑底座（调节角度 0° ~30°），底座与地基通过膨胀螺栓（M20，埋深 ≥100mm）固定；河谷水中支架采用法兰盘连接，螺栓预紧力 ≥300N·m。

横杆与立杆连接：采用盘扣式节点（抗剪承载力 ≥15kN），节点处增设楔形锁片，防止坡度导致的滑移；节点间距偏差控制在 ±2mm 内，确保力流传递连续。

支架与墩柱连接：在墩柱预埋牛腿（材质 Q235），通过抱箍与支架横向连接，每 3m 设置一道，限制支架侧向位移（允许偏差 ≤5mm）。

4 复杂地形预应力盖梁支架施工质量控制技术

4.1 地基处理工艺细化

山区地基：坡度 > 20° 区域采用“台阶开挖 + 灰土换填”：开挖台阶高度 1.5m、宽度 2m，换填 3:7 灰土（压实度 ≥96%），分层碾压（每层厚度 30cm，压路机吨位 ≥20t）。坡脚设置抗滑桩（Φ1000mm，间距 3m），桩顶设冠梁（尺寸 800×600mm），增强整体抗滑移能力。

河谷地基：水中地基采用“抛石挤淤 + 砂垫层”：抛石粒径 50~100cm，厚度 ≥2m，顶面铺设 50cm 厚中粗砂，形成反滤层；采用振动沉管桩机密实处理，确保地基承载力 ≥180kPa。岸侧地基增设防渗帷幕（高压旋喷桩，桩径 600mm，搭接 200mm），防止地下水渗透软化。

岩溶地基：采用地质雷达（分辨率 ≤5cm）扫描溶洞分布，对体积 > 5m³ 的溶洞，先埋设 Φ150mm 注浆管，压力注浆（水灰比 1:1）至压力稳定 30min；对小溶洞（< 5m³），灌注水泥粉煤灰浆（掺量 30%）填充。

4.2 支架搭设精度控制

测量定位：采用全站仪（精度 2mm+2ppm）建立三维控制网，立杆定位偏差 ≤3mm；坡度方向每 5m 设置高程控制点，确保横杆水平度偏差 ≤3mm。山区支架搭设前绘制“坡度 - 高程”关系图，立杆高度按地形逐根调整，高差 > 10cm 时采用可调顶托（调节范围 0~30cm）找平。

搭设流程：第一步：安装扫地杆（距地面 ≤20cm），山区地形扫地杆需随坡度倾斜，与立杆连接节点增设加强肋；第二步：按“先立杆、后横杆、再斜撑”顺序搭设，立杆垂直度偏差 ≤1/600 高度（常规地形为 1/500）；

第三步：搭设完成后采用扭矩扳手检查节点螺栓，预紧力 $\geq 40\text{N} \cdot \text{m}$ ，合格率需达 100%。

4.3 支架预压工艺创新

针对复杂地形荷载不均特点，采用“分级分区预压法”：预压荷载：按设计荷载的 1.3 倍（常规地形 1.2 倍）取值，其中山区陡坡段、河谷水流冲击区按 1.4 倍加载。

加载方式：

山区：按地形坡度分上、中、下三区，先加载下坡区（50% 荷载），再同步加载中、上坡区，避免单侧受力过大；

河谷：水中支架采用水箱加载（便于控制水量），岸侧采用沙袋加载，分区同步升降，模拟水位变化影响。

监测频率：每级加载后 0h、6h、12h 各监测 1 次，沉降稳定标准为“连续 24h 沉降量 $\leq 1\text{mm}$ ”（严于常规 2mm 要求），预压周期延长至 7d（常规 5d）。

数据应用：根据预压结果绘制“地形 - 沉降”曲线，对沉降超 10mm 区域，采用加密立杆（间距缩小至 0.6m）或增设型钢横梁（I20a）进行加固。

4.4 模板与钢筋施工质量控制

模板工程：采用定制钢模板（厚度 12mm），复杂地形处模板拼接采用“楔形调节块”，确保拼缝间隙 $\leq 1\text{mm}$ ，接缝处粘贴 3mm 厚遇水膨胀止水条；模板安装后，用全站仪检查轴线偏差（ $\leq 5\text{mm}$ ）、高程偏差（ $\leq 3\text{mm}$ ），采用水准仪（精度 $\pm 1\text{mm}$ ）逐点校核，山区盖梁模板需预设 2‰~3‰ 的坡度补偿值。

钢筋工程：主筋连接采用直螺纹套筒（等级 I 级），丝头加工长度偏差 $\leq 2\text{mm}$ ，拧紧后外露丝扣 2~3 牙；预应力孔道采用金属波纹管（直径 $\geq$ 设计值 5mm），每 50cm 设置一道定位钢筋，曲线段加密至 30cm，孔道轴线偏差 $\leq 3\text{mm}$ （常规 5mm）；钢筋保护层采用高强砂浆垫块（强度 $\geq \text{C40}$ ），间距 $\leq 50\text{cm}$ ，确保保护层厚度偏差 $\pm 3\text{mm}$ 。

5 复杂地形预应力盖梁支架施工安全防控技术

5.1 风险分级与预控体系

风险识别与分级：采用 LEC 法（可能性 - 暴露率 - 后果严重度）对复杂地形风险量化评估，将风险等级分为四级：

一级风险（不可接受）：如岩溶区支架坍塌、河谷汛期洪水冲击，需制定专项防控方案；

二级风险（高风险）：如山区高空坠落、强风荷载超限，需强化监测与防护；

三级风险（中风险）：如节点连接松动、局部沉降，需定期检查整改；

四级风险（低风险）：如材料堆放不规范，需日常管理优化。

预控措施：

一级风险：岩溶区施工前进行溶洞稳定性验算，河谷区避开汛期施工（或搭设防汛棚）；

二级风险：山区作业层设置双层防护栏杆（高度 1.2m+0.6m），强风天气（风速 $\geq 10.8\text{m/s}$ ）停止高空作业。

5.2 智能监测与应急响应

动态监测系统：

安装北斗定位传感器（精度 $\pm 1\text{mm}$ ），实时监测支架沉降、侧向位移，数据每 10 分钟传输至云端平台；

关键节点（立杆与横杆连接）粘贴应变片（精度 $\pm 2\mu\epsilon$ ），监测应力变化，超设计值 80% 时自动预警；

河谷区增设风速仪、流速仪，山区增设倾角传感器，形成“多参数 - 立体化”监测网络。

6 结论

本文针对复杂地形预应力盖梁支架施工难题，提出：复杂地形对支架的影响需通过“地形分类 - 荷载量化 - 结构适配”三级响应机制解决，不同地形需采用差异化设计方案；质量控制应聚焦地基处理、搭设精度、预压工艺等关键环节，通过参数优化（如预压荷载提高 10%~20%）提升适应性；安全防控需构建“风险分级 - 智能监测 - 应急联动”体系，结合物联网技术实现动态风险管控。

参考文献

- [1] JTG/T 3650-2020, 公路桥涵施工技术规范 [S].
- [2] 周建庭. 峡谷地形桥梁支架设计与施工技术 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (5): 89-98.
- [3] 李守继. 基于物联网的桥梁支架安全监测系统研发 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (3): 112-120.
- [4] GB 50205-2020, 钢结构工程施工质量验收标准 [S].
- [5] European Code EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures[S].
- [6] 王建华. 复杂地质条件下桥梁基础施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [7] 交通运输部. 公路水运工程施工安全标准化指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2020