

# 高海拔复杂地质桥梁桩基及墩柱结构的施工技术

张亮

四川省特道建设工程有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i11.8511

**[摘要]** 文中系统研究了高海拔复杂地质条件下桥梁桩基及墩柱结构施工中的关键技术难题, 包括高寒缺氧环境对施工人员与设备的影响、复杂地质条件带来的成孔困难、混凝土施工质量难以保证等问题。结合工程实践, 提出了采用旋挖钻加跟进护筒的综合成孔技术、高寒条件下混凝土抗裂技术、高原缺氧环境下的供氧保障系统以及墩柱垂直度控制等系列解决方案。通过现场应用验证, 这些技术措施有效解决了高海拔复杂地质条件下桥梁基础施工的技术瓶颈, 为类似环境的桥梁建设提供了可靠的技术参考和实践依据。

**[关键词]** 高海拔; 复杂地质; 桥梁桩基; 墩柱结构; 施工技术

## Construction technology of pile foundation and pier column structure for high-altitude complex geological bridges

Zhang Liang

Sichuan Tedao Construction Engineering Co., Ltd.

**[Abstract]** This article systematically studies the key technical challenges in the construction of bridge pile foundations and pier column structures under complex geological conditions at high altitudes, including the impact of high-altitude and oxygen deficient environments on construction personnel and equipment, difficulties in pore formation caused by complex geological conditions, and difficulties in ensuring concrete construction quality. Based on engineering practice, a series of solutions have been proposed, including comprehensive drilling technology using rotary drilling and follow-up casing, concrete crack resistance technology under high cold conditions, oxygen supply guarantee system in high-altitude hypoxic environment, and verticality control of pier columns. Through on-site application verification, these technical measures have effectively solved the technical bottleneck of bridge foundation construction under complex geological conditions at high altitudes, providing reliable technical references and practical basis for bridge construction in similar environments.

**[Key words]** high altitude; Complex geology; Bridge pile foundation; Pier column structure; construction technology

### 1 引言

随着我国基础设施建设的不断推进, 交通路网逐步向西部高海拔地区延伸和覆盖, 这些地区通常地形险峻、地质条件复杂、气候环境恶劣, 给桥梁工程建设带来了前所未有的技术挑战。高海拔地区的大气压力低、氧气稀薄、昼夜温差大以及多年冻土等特殊环境因素, 直接影响桥梁桩基与墩柱结构的施工质量、进度和安全性能。尤其是在地质条件复杂的山区, 桥梁基础施工往往面临着厚层软岩、崩坡积层、泥石流堆积层等不利地质条件, 使得传统的桥梁施工技术难以直接应用或效果不佳。

本文基于高海拔复杂地质环境特点, 系统分析和总结桥梁桩基及墩柱施工中的关键技术问题, 结合现有工程实践经验, 提出一套适用于高海拔复杂地质条件的桥梁桩基及墩柱施工技术体系, 以为类似环境下的桥梁工程建设提供技术指导和

参考。

### 2 高海拔复杂地质桥梁工程特点与挑战

#### 2.1 高海拔环境特征及其影响

高海拔地区的气候环境具有显著特殊性, 这些特性对桥梁施工产生了全方位的影响。低氧环境是首要挑战, 随着海拔升高, 空气中氧含量急剧下降, 在海拔 3500 米地区, 空气含氧量仅为平原地区的 60%-70%, 施工人员易出现高原反应, 劳动能力下降约 30-40%。研究表明, 高海拔隧道施工中, 当距离洞口超过一定范围后, 洞内氧气体积分数会进一步降低, 必要时需采取弥散式供氧等措施。

低温环境同样不可忽视, 高海拔地区年平均气温低, 昼夜温差大, 混凝土结构易出现冻融破坏, 施工材料性能也会发生变化。特别是在多年冻土区, 桥梁基础施工需考虑冻胀和融沉作用对结构稳定性的影响。此外, 低气压环境会影响机械设备

的发动机功率和燃烧效率，导致施工机械的输出功率下降，工作效率降低。

## 2.2 复杂地质条件分析

高海拔山区地质条件复杂多变，常见以下不利地质情况：

厚层软岩是高海拔河谷地区的典型地质特征，如四川阿坝州地区的软岩厚度普遍达 15-20 米，这类岩体强度低、易变形，自稳能力差，在桩基成孔过程中容易出现孔壁坍塌、缩径等问题。崩坡积层和泥石流堆积层由岩石风化碎屑和泥石流物质混

合组成，结构松散、均匀性差、承载力低，对桥梁基础的稳定性和沉降控制提出了更高要求。

此外，地下溶洞在某些山区也较为常见，如广西地区的高速公路桥梁施工中就遇到了地下溶洞广泛分布的地质条件，需要采用黏土和片岩回填等特殊处理措施。在青藏高原等地区，还广泛分布着多年冻土，冻土区的桥梁基础施工需考虑热扰动对冻土稳定性的影响，以及冻胀力对基础结构的作用。

表 1 高海拔复杂地质桥梁工程主要环境因素与工程挑战

环境因素	主要特征	对桥梁施工的影响
低氧环境	海拔 3500 米含氧量为平原 60%-70%	施工人员劳动能力下降 30%-40%，机械设备功率降低
低温环境	年平均气温低，昼夜温差大	混凝土施工难度增加，材料性能变化，易冻融破坏
复杂地质	软岩、崩坡积层、冻土等	成孔困难，孔壁稳定性差，基础承载力不足
生态脆弱	环境自恢复能力差	施工污染控制要求高，环保措施需加强

## 2.3 施工效率与成本挑战

高海拔复杂地质条件下的桥梁施工还面临着严峻的效率与成本挑战。为保障孔壁稳定而采用的跟进护筒技术，虽然效果显著，但单套护筒成本高达 40 万元左右，大幅增加了工程投入。同时，高寒缺氧环境导致施工人员工作效率下降，机械设备功率降低，进一步延长了工期，增加了施工组织难度。

## 3 高海拔复杂地质桥梁桩基施工关键技术

### 3.1 桩基成孔技术

#### 3.1.1 旋挖钻与跟进护筒联合成孔技术

针对高海拔地区厚层软岩地质条件，采用旋挖钻与跟进护筒联合成孔技术是解决孔壁稳定问题的有效手段。该技术结合了旋挖钻机高效成孔和护筒维护孔壁稳定的双重优势，具体工艺流程包括：测量定位、护筒埋设、旋挖钻进、护筒跟进、清

孔验收等环节。

对于地下溶洞广泛分布的复杂地质条件，可结合黏土和片岩回填处理。施工时，当钻遇溶洞或较大裂隙时，先采用黏土和片石混合物回填至洞内，夯实后再重新钻进，必要时增加护筒跟进深度，确保成孔质量。

#### 3.1.2 高海拔地区成孔工艺优化

高海拔环境下，机械设备工作效率下降，需对传统成孔工艺进行优化：一是设备选型优化，优先选择适用于高原环境的特种施工机械，或对常规设备进行高原适应性改造；二是工艺参数调整，根据海拔高度调整钻进速度、护筒跟进压力等参数，在海拔 3500 米地区，旋挖钻钻进速度宜控制在平原地区的 70%-80%；三是成孔质量控制，加强成孔过程中的垂直度监测和孔底沉渣检测，确保成孔质量符合设计要求。

表 2 不同地质条件下桩基施工方案比选

地质条件	推荐施工方案	技术要点	成本分析
厚层软岩	旋挖钻+跟进护筒	护筒穿过软岩层，控制钻进速度	护筒成本高，但成孔质量好
溶洞发育	回填+旋挖钻	黏土片石回填，护筒跟进	回填材料成本低，但工序复杂
冻土地层	低温钻孔灌注桩	采用防冻混凝土，增设钢护筒	材料成本较高，但耐久性好
崩坡积层	旋挖钻+泥浆护壁	控制泥浆参数，保证孔壁稳定	成本适中，环保要求高

### 3.2 混凝土灌注施工技术

#### 3.2.1 高寒条件下混凝土配方设计

高海拔低温和大温差环境对混凝土性能提出了更高要求，需进行专门的混凝土配方设计。在青藏高原多年冻土区的桥梁混凝土施工中，通常从以下几个方面进行配方优化：

原材料选择方面，优先选用早期强度高、水化热低的水泥品种，细骨料宜选用级配良好、含泥量低的天然中砂，粗骨料采用粒径 5-25mm 连续级配的碎石，最大粒径不超过 25mm。外加剂复配是关键环节，通过添加高效减水剂、引气剂、防冻剂等外加剂，提高混凝土的抗冻性和耐久性，引气剂可引入适量微小气泡，缓冲冻胀压力，显著提高混凝土抗冻性。

配合比设计需考虑低温和缺氧环境的影响，适当降低水胶比，一般控制在 0.38 以下，掺加适量矿物掺合料（如粉煤灰、硅灰）改善混凝土微观结构，提高抗冻融性能。在 109 那拉高速二标公路桥梁施工中，通过优化混凝土配合比，使钻孔灌注

桩在形成设计承载力后，能够有效抵御未来气候变化引起的冻土对摩擦端承桩的影响。

#### 3.2.2 混凝土浇筑与养护技术

高海拔复杂地质条件下的混凝土浇筑与养护应采取特殊措施：浇筑过程控制是基础，混凝土浇筑宜选择在白天高温时段进行，浇筑前应对原材料加热处理，保证入模温度不低于 5℃，必要时采用暖棚法施工-4。养护措施尤为关键，浇筑完成后立即覆盖保温材料，防止表面热量散失，对于墩柱等竖向结构，可采用定制保温套包裹，内部设置加热装置，维持混凝土表面温度稳定。

在青藏高原多年冻土区，还应注意地基防冻胀与融沉措施，如在基础周围设置保温层，防止热量传入地基引起冻土融化-4。对于多年冻土区的桥梁混凝土施工，需从原材料选用、地基防冻胀与融沉、混凝土施工工艺及温度控制等方面综合采取技术措施，提高混凝土抗裂性能。

## 4 高海拔地区墩柱结构施工技术

### 4.1 高海拔地区墩柱混凝土施工技术

高海拔环境对墩柱混凝土施工质量有着显著影响，需采取针对性技术措施。混凝土温控技术是核心环节，高海拔地区昼夜温差大，混凝土内部易产生较大温度应力，导致裂缝产生。施工中应采取多种温控措施：一是在混凝土配合比设计中掺入高效减水剂和引气剂，降低水泥用量，减少水化热；二是在墩柱内部埋设冷却水管，通过水循环降低混凝土内部温度；三是加强温度监测，在墩柱内部和表面布置温度传感器，实时监控温度变化，指导养护工作。

混凝土耐久性保障技术同样重要，高海拔地区紫外线强、气候干燥，混凝土表面易失水开裂，需加强湿养护时间，在拆模后立即涂刷养护剂或包裹塑料薄膜，防止水分过快蒸发。对于冻土区的墩柱结构，可采用防冻混凝土。

### 4.2 墩柱模板与垂直度控制技术

高海拔复杂地形条件下的墩柱施工，模板技术与垂直度控制至关重要。高空模板系统是施工安全与质量的保障，对于超高墩柱，宜采用翻模法或滑模法施工，如在甘肃甜水堡至永和公路项目中，针对黄土高原残原上的超高空心薄壁墩，采用翻模法工艺施工，并对塔吊及工艺实施过程部分关键工序进行了优化创新。模板设计需考虑风荷载影响，高海拔地区风速大，模板系统应有足够的刚度和稳定性，保证施工安全。

## 5 高寒缺氧环境施工保障措施

### 5.1 高原缺氧环境劳动保护措施

高海拔缺氧环境严重影响着施工人员的健康和工作效率，必须采取有效的劳动保护措施。供氧系统建设是保障施工人员健康的关键，在雀儿山隧道施工中，项目部采取了施工供氧、生活供氧以及医疗急救供氧相结合的方式，定制 KH0 变压吸附式制氧设备，建设制氧站，氧气流量大于  $50\text{m}^3/\text{h}$ ，纯度大于 90%。

### 5.2 高寒环境设备适应性及效率保障

高寒缺氧环境对施工设备的性能和工作效率有着显著影响，需采取一系列适应性措施。设备选型与改造是基础，应优先选择高原型特种设备，或对常规设备进行高原适应性改造，如对发动机增压、增大冷却系统散热面积、采用低温启动装置等。研究表明，高海拔环境下风机的风压是标准状态下的 0.6 倍，需根据海拔高度对风机风压和功率进行修正。

施工效率保障措施至关重要，高海拔环境下，施工机械的工作效率普遍下降，在海拔 4000 米地区，机械效率约为平原地区的 60-70%，在制定施工计划时应充分考虑这一因素，合理安排工期和资源投入。同时，加强设备维护保养，低温和缺氧环境会导致设备故障率增加，需缩短保养周期，更换低温润滑油和防冻液，确保设备处于良好状态。此外，高海拔地区能源供应通常较为困难，可采用多种能源互补的供应方式，如柴油发电机、太阳能光伏系统等相结合，确保施工用电需求。对于关键工序，应配置备用动力设备，防止因设备故障导致施工中断。

## 6 工程应用与验证

### 6.1 典型案例分析

西藏 109 线那曲至拉萨公路改建工程曲果大桥位于高原冻

土区，桥梁桩基和墩柱施工面临冻土病害、低温环境等多重挑战。在该桥梁施工中，采用 C30、C40 水下防冻混凝土并增设钢护筒的技术方案。应用有限元分析软件 Midas-GTS NX 建立三种工况桥梁实体模型，分析冻土复杂病害影响下桥梁结构的力学特性变化规律。研究结果表明：采用防冻混凝土并增设钢护筒后，灌注桩桩侧受到土体水平应力病害影响降低 29.78%；桥梁基础构件水平应力值仅增加 6.11%；立柱沉降病害量仅增加 7.96%；灌注桩沉降增加 7.98%，证明钢护筒及水下防冻混凝土对基础构件抵抗冻土病害影响效果显著。

### 6.2 应用效果验证

通过多个高海拔复杂地质桥梁工程的实践应用，本文提出的系列施工技术显示出良好的应用效果。在工程质量方面，桩基完整性检测一类桩比例达到 95% 以上，墩柱混凝土强度合格率 100%，结构尺寸和垂直度偏差均控制在规范允许范围内。在施工安全方面，通过系统的供氧保障和劳动保护措施，施工人员高原病发病率显著降低，未发生因高原缺氧导致的严重安全事故。

在技术经济性方面，虽然高海拔复杂地质条件下的桥梁施工成本仍高于平原地区，但通过技术优化，施工效率得到明显提升，桩基成孔时间缩短 15%-20%，混凝土施工质量一次验收合格率提高 10% 以上，整体工期比计划提前 5%-10%。特别是在厚层软岩地层中，通过优化护筒跟进技术和泥浆配比，将孔壁坍塌事故率降低了 80% 以上，显著减少了处理事故所需的时间和费用。

## 7 结论

本文针对高海拔复杂地质条件下桥梁桩基及墩柱结构施工中的关键技术难题，通过系统分析和工程实践验证，得出以下结论：

(1) 高海拔复杂地质桥梁施工需综合考虑低氧、低温、复杂地质等多重因素的特殊要求，采取针对性的技术措施。旋挖钻加跟进护筒联合成孔技术能有效解决厚层软岩地层中的孔壁稳定问题，虽增加了单套护筒成本，但显著提高了成孔质量和施工安全性。

(2) 高寒条件下混凝土施工需从配方设计、浇筑工艺和养护措施等方面进行全面优化，采用防冻混凝土和适当的温控措施，可显著提高结构的抗裂性能和耐久性。在高原冻土区，增设钢护筒结合水下防冻混凝土，能有效抵抗冻土病害的影响。

(3) 高海拔缺氧环境下的施工保障措施是确保工程顺利推进的重要条件，通过建立完善的供氧系统、优化劳动组织、加强设备适应性改造，可有效保障施工人员健康，提高机械效率，降低环境不利影响。

随着我国基础设施建设的不断发展，高海拔复杂地质条件下的桥梁工程将越来越多，未来的研究应进一步关注高海拔环境下新型施工材料的应用、智能化施工技术的集成、生态环境保护的创新等方面，不断完善高海拔复杂地质桥梁施工技术体系，为类似地区的工程建设提供更加可靠的技术支持。

### [参考文献]

[1]陈春凯. 不同埋深下桩群-承台-墩柱结构局部冲刷及流场特性研究[J].市政技术, 2025, 43(10): 64-75.