

公路桥梁基础设计与施工技术问题的分析

吕佳泽

河北省交通规划设计研究院有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文围绕公路桥梁基础的设计与施工两大核心环节,系统梳理了当前在工程实践中普遍存在的技术问题。在设计方面,重点剖析了地质勘察精度不足、荷载模型简化失真、桩-土相互作用机理认知不清以及抗震设防标准执行偏差等问题;在施工方面,则深入探讨了成孔质量控制困难、混凝土浇筑缺陷、钢筋笼定位偏差及施工对周边环境扰动等典型难题。针对上述问题,本文结合国内外最新研究成果与工程实践经验,提出了强化前期地质勘察、推广BIM与数值模拟技术、优化桩基设计参数、加强施工过程监控与信息化管理等一系列对策建议。旨在为提升我国公路桥梁基础工程的整体技术水平、保障桥梁结构全寿命周期的安全可靠提供理论参考与实践指导。

关键词: 公路桥梁; 基础工程; 设计问题; 施工技术; 桩基础; 质量控制

引言

我国经济高速发展、城镇化推进,交通基建规模扩大,公路桥梁建设数量与技术难度显著增长。桥梁服役寿命长,其安全性等关乎经济投入、人民生命财产安全与社会稳定。桥梁基础是“基石”,负责传递扩散荷载、抵抗水平力以维持桥梁稳定,其质量决定桥梁结构性能,诸多桥梁事故根源在于基础设计或施工缺陷。但实际工程中,桥梁基础设计与施工挑战复杂。地质条件不确定、空间变异大,准确把握地基特性难;隐蔽施工,质量控制不易,还受多种因素干扰。且桥梁向大跨等方向发展,对基础要求更严苛,技术问题更突出。本文将系统分析我国公路桥梁基础工程在设计与施工方面的主要技术问题,探究成因,提出解决策略,为工程技术人员和研究人员提供借鉴。

1 公路桥梁基础设计中的主要问题分析

1.1 地质勘察工作的深度与精度不足

地质勘察是基础设计的根本依据,其成果的准确性直接决定了设计方案的合理性。但在部分工程项目中,地质勘察工作存在明显短板。为控制前期成本,一些项目在勘探点布设上过于稀疏,导致无法有效揭示场地内局部软弱夹层、溶洞、断层等不良地质体的空间分布特征,从而使得设计阶段对地基承载力和沉降变形的预估出现重大偏差^[1]。此外,对于饱和软黏土、松散砂层等敏感性土体,常规钻探取样方法极易造成土样扰动,使其天然结构遭到破坏,进而导致室内试验所得的抗剪强度、压缩模量等关键参数严重失真。更为关键的是,在地震设防区域,地基土的动力特性参数(如剪切波速、动剪切模量、阻尼比)对桥梁地震响应分析至关重要,但常规勘察流程往往忽视这些动态参数的获取,致使抗震设

计缺乏精准可靠的地质依据,埋下潜在安全隐患。

1.2 荷载模型与边界条件的过度简化

桥梁基础设计需综合考虑多种复杂荷载的耦合作用,但在传统设计方法中,这些荷载及其与地基的相互作用常被过度简化,难以真实反映实际工况。现行规范多将车辆荷载简化为静态集中力或均布荷载,忽略了高速行驶车辆引起的动力放大效应,尤其对于大跨径柔性桥梁或长桩基础,这种简化可能导致承载力验算结果偏于不安全。同时,传统桩基设计普遍采用Winkler地基梁模型,该模型假设土体反力仅与该点位移成正比,忽略了土体的三维连续性和群桩之间的相互影响,无法准确模拟桩-土-承台共同工作的复杂机理,从而在预测桩基内力分布、沉降特性及整体稳定性方面存在较大误差。此外,在沿海、河口等特殊环境中,桥梁基础长期处于水流冲刷、波浪冲击、船舶撞击及氯盐腐蚀等多重环境荷载的耦合作用之下,而现有设计规范对此类多场耦合问题的处理尚显薄弱,缺乏系统性的设计方法和成熟的验算准则,使得结构在服役期内面临更高的劣化风险。

1.3 抗震设计理念与细节构造的脱节

地震是桥梁基础面临的最严峻考验之一。尽管我国抗震设计规范体系已日趋完善,但在具体应用层面仍存在理念与实践脱节的问题。部分设计人员对“小震不坏、中震可修、大震不倒”的多层次设防目标理解不够深入,在具体构件设计中未能充分体现延性设计理念,导致基础在罕遇地震下过早发生脆性破坏,丧失承载能力。对于位于地震液化区的桥梁,若液化判别不准确,或处理措施不到位——例如桩端未有效穿透液化土层、未设置足够的抗拔桩或未采取有效的地基加固措施——一旦遭遇强震引发土体液化,基础将迅速丧失侧向约束和竖向承

载力, 极易引发桥梁整体倾覆或沉陷。此外, 在构造细节方面, 桩基主筋的锚固长度、箍筋的加密区间及间距等关键参数, 是保证桩身在地震作用下具备足够延性和耗能能力的核心要素。然而, 在实际工程中, 有时会因施工便利性或成本控制而牺牲这些关键的抗震构造措施, 使得设计意图无法在实体结构中得到忠实体现, 削弱了结构的整体抗震性能。

2 公路桥梁基础施工中的关键技术难题

2.1 成孔(槽)过程中的质量与安全风险

对于钻孔灌注桩、地下连续墙等主流基础形式, 成孔是首要也是最关键的工序, 其质量直接决定了后续结构的可靠性。在砂层、卵石层或高水头差地层中钻进时, 孔壁稳定性控制尤为困难, 极易发生塌孔、缩颈或扩径等现象。这通常源于泥浆性能(如比重、粘度、含砂率)控制不当, 无法在孔壁形成有效泥皮以平衡地层压力。超长桩或嵌岩桩对垂直度要求极高, 但钻机就位不平、钻杆刚度不足或操作人员经验欠缺, 都可能导致桩身倾斜, 不仅影响单桩承载力, 还会改变上部结构的受力路径。此外, 清孔不彻底导致孔底沉渣过厚, 会在桩端形成一层软弱夹层, 极大地削弱端承力, 显著增加桩基沉降, 这是造成单桩承载力检测不合格的常见原因, 严重威胁桥梁长期使用的安全性。

2.2 水下混凝土浇筑的质量通病

钻孔灌注桩的混凝土浇筑多在水下进行, 工艺复杂, 极易产生难以修复的质量缺陷。导管理深控制是浇筑成败的关键, 若埋深过浅, 泥浆易涌入导管形成夹泥层; 若埋深过大, 则易造成堵管, 导致混凝土供应中断。首批混凝土储量不足或浇筑过程中断, 同样会引发泥浆混入, 轻则形成局部夹泥, 重则造成完全断桩, 使桩身失去结构完整性。此外, 混凝土配合比设计不合理(如坍落度过大导致离析, 或过小影响流动性)、运输过程中振捣不足或水下浇筑时被泥浆稀释, 都会导致桩身混凝土强度达不到设计要求, 耐久性严重受损^[2]。桩头处理阶段也常被忽视, 破除桩头时若操作粗暴, 容易损伤桩顶以下的有效混凝土, 形成环向裂缝, 削弱桩顶与承台的连接强度, 影响荷载的有效传递。

2.3 钢筋笼制作与安装的精度问题

钢筋笼作为桩基的骨架, 其制作与安装质量直接影响结构的整体性能和耐久性。在加工和吊装过程中, 钢筋笼易因自重或外力作用发生变形, 导致主筋间距、箍筋间距及整体直径偏离设计要求, 进而影响混凝土保护层厚度的均匀性。保护层垫块设置不足或在下放过程中脱落, 会使钢筋笼紧贴孔壁, 造成局部保护层厚度严重

不足, 加速钢筋在服役期内的锈蚀进程。在深孔或斜孔中, 钢筋笼下放时易受水流、孔壁摩擦等因素影响而发生偏位甚至上浮, 难以精确就位。这不仅会改变桩身的受力状态, 也可能导致声测管、压浆管等预埋件位置错误, 给后续的桩身完整性检测和后压浆施工带来极大困难, 甚至影响对桩基质量的准确判断。

2.4 施工活动对周边环境的扰动

现代桥梁建设常位于城市密集区或生态敏感地带, 基础施工对周边环境的扰动已成为不可忽视的社会与技术问题。基坑开挖和大规模降水作业会引起周围土体应力释放和地下水位骤降, 导致邻近既有建筑物、地下管线发生不均匀沉降, 轻则墙体开裂, 重则结构失稳, 引发民事纠纷甚至安全事故。冲击钻、振动锤等传统施工设备在作业过程中产生的强噪声和低频振动, 对周边居民的正常生活构成严重干扰, 也可能影响精密仪器或历史建筑的结构安全。此外, 钻孔灌注桩施工会产生大量废弃泥浆, 若未经妥善处理而直接排入市政管网或自然水体, 不仅会造成管道堵塞, 更会引发严重的水土污染, 破坏生态环境, 不符合绿色建造的发展理念。

3 应对策略与技术展望

针对上述设计与施工中的问题, 必须采取系统性的措施, 并积极拥抱新技术, 以全面提升公路桥梁基础工程的技术水平。

3.1 强化前期地质勘察与数字化建模

提升基础工程质量的源头在于精准的地质信息。应摒弃单一钻探的局限, 综合运用地质调绘、高密度电法、地震映像、地质雷达等多种物探手段, 构建高精度的三维地质模型, 全面刻画不良地质体的空间形态与分布规律。同时, 大力推广静力触探(CPT)、旁压试验(PMT)等原位测试技术, 并辅以能模拟复杂应力路径的先进室内试验, 获取更接近真实状态的土体力学参数, 特别是动力参数^[3]。在此基础上, 将地质勘察数据、结构设计模型与地理信息系统(GIS)深度集成于建筑信息模型(BIM)平台, 实现从勘察、设计到施工、运维的全生命周期信息共享与协同管理, 为精细化设计和虚拟施工模拟提供坚实的数据基础。

3.2 深化理论研究数值仿真分析

设计方法的进步依赖于理论研究的深化。应逐步摒弃过于简化的传统计算模型, 转而采用有限元法(FEM)、离散元法(DEM)或二者耦合的先进数值模拟手段, 对桩-土-结构相互作用、群桩效应、地震液化等复杂物理过程进行精细化仿真, 从而为设计提供更可靠、更贴近实际的力学依据。同时, 应积极引入基于性能的设计

(Performance-Based Design, PBD) 理念, 从单纯满足承载力极限状态, 转向设定不同地震水准下的具体性能目标 (如最大位移、损伤指数), 并据此反推所需的基础刚度、强度和延性构造, 使设计更具科学性、针对性和经济性。未来, 还可利用积累的海量工程数据库, 结合机器学习算法, 建立地质条件、施工参数与基础性能之间的智能预测模型, 辅助设计决策和施工风险预警。

3.3 优化施工工艺与全过程智能监控

施工技术的革新是保障设计意图落地的关键。在复杂地层中, 应优先选用旋挖钻机、全套管钻机等成孔质量高、环保性好的先进设备; 对于超深、超大直径桩, 可采用气举反循环等高效清孔工艺, 确保孔底沉渣厚度达标。更重要的是, 应实施覆盖施工全过程的智能监控体系, 在关键工序部署传感器网络, 对泥浆性能、孔斜、孔径、沉渣厚度、混凝土浇筑面高度、钢筋笼姿态等核心参数进行实时、连续监测, 并将数据自动上传至云端管理平台, 实现“透明工地”和动态纠偏, 将质量问题消灭在萌芽状态^[4]。此外, 必须大力发展绿色施工技术, 如研发泥浆循环再生系统以减少废弃物排放, 采用静压植桩等低噪声、低振动工法, 并通过科学的降水回灌方案, 有效控制因施工引起的地面沉降, 最大限度降低对周边环境的影响。

3.4 完善标准规范与加强人才培养

制度保障与人才支撑是行业进步的双翼。一方面, 国家及行业主管部门应及时将成熟的科研成果和先进的工程经验纳入技术标准规范体系, 特别是在复杂环境下的基础设计方法、新型基础形式 (如复合地基、混合基础) 的施工验收标准等方面, 提供更明确、更前沿的技

术指引。另一方面, 必须强化跨学科复合型人才的培养。桥梁基础工程本质上是岩土工程、结构工程、材料科学、信息技术等多学科深度交叉的领域。高校和职业培训机构应优化课程体系, 加强实践教学, 着力培养既精通理论又熟悉现代施工技术与信息化管理工具的高素质专业人才, 为行业的可持续发展注入源源不断的智力支持。

4 结语

公路桥梁基础工程是保障桥梁百年大计的根基。本文系统剖析了当前在设计与施工环节中存在的地质勘察精度不足、荷载模型简化失真、成孔质量控制难、混凝土浇筑缺陷等一系列关键技术问题。这些问题的根源在于对复杂岩土介质认知的局限性、传统设计施工方法的滞后性以及精细化管理水平的不足。面向未来, 解决这些问题的根本出路在于科技创新与管理升级的双轮驱动。一方面, 要大力推动地质勘察的精准化、结构分析的精细化和施工过程的智能化, 充分利用BIM、物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术赋能传统基建。另一方面, 要不断完善技术标准体系, 强化全寿命周期的质量责任意识, 培养高素质的专业人才队伍。

参考文献

- [1]李燕华, 范见荣. 公路桥梁基础设计与施工技术分析[J]. 运输经理世界, 2022, (10): 97-99.
- [2]林浦. 公路桥梁基础设计与施工技术问题分析[J]. 运输经理世界, 2021, (20): 141-143.
- [3]张辛未. 公路桥梁基础设计与施工技术问题分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(23): 208-209.
- [4]岳超. 公路桥梁基础设计与施工技术问题研究[J]. 河南科技, 2020, (22): 87-89.