

桥梁设计中高边坡桥梁支护与地质适应性研究

赵庆缘

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430070

[摘要] 高边坡与桥梁工程相互作用的复杂性是山区交通建设所遇到的主要的技术难点之一。对高边坡地质类别特征及其工程特点、稳定性的影响因素进行了阐述; 介绍了地质适应性设计理念; 详细论述了各种地质类型的设计思路、桥梁结构形式的选择及其与地质的关系、排水及防护设施的设计等; 对施工工艺、技术要求、质量控制、安全隐患和监测管理等方面支护施工关键技术进行了深入研究; 以期能够为高边坡桥梁支护设计和施工提供技术依据。

[关键词] 高边坡; 桥梁支护; 地质适应性; 锚固技术; 施工监测; 适应性

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19537

中图分类号: U448.5

文献标识码: A

Research on the Support and Geological Adaptability of High Slope Bridges in Bridge Design

ZHAO Qingyuan

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430070, China

Abstract: The complexity of the interaction between high slopes and bridge engineering is one of the main technical difficulties encountered in mountainous transportation construction. Elaborated on the geological classification characteristics, engineering features, and influencing factors of stability of high slopes; Introduced the concept of geological adaptability design; Detailed discussions were given on the design ideas of various geological types, the selection of bridge structure forms and their relationship with geology, as well as the design of drainage and protective facilities; We have conducted in-depth research on key technologies for supporting construction in terms of construction technology, technical requirements, quality control, safety hazards, and monitoring management; In order to provide technical basis for the design and construction of high slope bridge support.

Keywords: high slope; bridge support; geological adaptability; anchoring technology; construction monitoring; adaptability

引言

随着我国交通基础设施向山区不断延伸, 高边坡桥梁工程日益增多。桥位边坡稳定性对桥梁工程安全具有决定性影响, 地形地貌、地层岩性、地质构造及水文条件等多种因素的耦合作用, 使得高边坡桥梁支护设计面临巨大挑战。高边坡是对天然岩土体进行人工改造形成的工程构筑物, 其稳定程度由天然边坡的稳定性状态、地层岩性、地质构造、坡体结构、岩体结构和水文地质条件等诸多因素共同决定, 因此, 将地质适应性理念融入高边坡桥梁支护设计中, 实现边坡与桥梁协同工作, 具有重要的理论意义以及实际应用价值。

1 高边坡地质条件及其工程特性分析

高边坡地质条件较为复杂, 按岩性可划分为岩质边坡与土质边坡两类。岩质边坡主要由硬质岩石构成, 其破坏方式主要受结构面发育状况控制, 多表现为沿软弱结构面的滑动破坏, 或沿层面与节理面形成的贯通面发生折线式滑动破坏; 土质边坡多由松散堆积物构成, 整体稳定性较

差, 在强降雨、地震或施工扰动等不利工况下容易发生变形破坏。在某大桥项目施工中, 两岸岸坡高度达 105~116m, 地质结构为第三系巨厚层状钙质角砾岩, 结构强度很高, 但是岸坡存在大量的卸载裂缝, 影响了岸坡的承载能力和稳定性。经综合分析边坡岩体形态特征、降雨、地震及工程投资等因素后, 推荐采用排水措施结合边坡预应力锚索支护方案。高边坡桥梁自身受力特性极为复杂, 位于边坡上的桥墩桩基因受到边坡土体水平抗力作用, 其受力状态远较平原地区桩基复杂。岩质边坡中的基桩兼具竖向承压与横向抗滑作用。而在高陡斜坡段, 桩柱式桥墩基础则表现出明显的陡坡效应与嵌岩深度效应。边坡失稳的破坏形式主要包括沿滑面滑移、折线式滑动、表层剥落及掉落等, 同时地表水侵蚀也易诱发楔形体破坏。

2 高边坡桥梁地质适应性设计研究

2.1 地质适应性设计理念

地质适应性设计强调将桥梁结构与周边边坡地质环

境视为一个整体进行协调设计,遵循“地质优先、结构对应、安全适用”的原则。在设计过程中,需采用多种手段探明场地的工程地质条件,综合考虑边坡岩层结构类型、水文地质条件及地震烈度等因素进行稳定性分析。针对峡谷地区特大桥边坡地质灾害防治,提出了与桥梁结构“多遇地震、罕遇地震”两级设防标准相适应的边坡工程两水准抗震减灾理念。桥位选择应充分考虑地形地质特点,例如某工程在大渡河两岸布置了多个不同高程的桥位方案进行比选,最终选定了综合防灾减灾效果最优的桥址。地质适应性设计理念的核心在于“结构适应地质,而非地质迁就结构”,即通过合理的工程布局与适宜的基础形式来适应不同的地质条件。地质适应性设计即把桥梁结构同其周围的边坡岩体环境作为一个统一的整体来进行协调设计,坚持“地质优先、结构对应、安全适用”的设计思想,方案设计时,采取多种方式探明场地工程地质情况,综合考虑边坡岩层结构类型、水文因素以及地震烈度等条件进行稳定分析,峡谷地区特大桥边坡地质灾害防治措施选择方法,提出了与桥梁结构“多遇地震、罕遇地震”设防标准相应的边坡工程两水准抗震减灾理念。桥位方案的选择考虑地形地质特点,在大渡河两岸布置了多个不同高程的桥位方案,最后选用了综合防灾减灾效果最佳的桥址。地质适应性设计的核心在于“让建筑去适应地形,而不是让地形来迁就建筑”。通过优化建筑布局、选择合适的基础形式,使结构能够灵活应对不同的地质条件。

2.2 不同地质条件下的设计策略

针对不同的地质环境,高边坡桥梁设计策略存在显著差异。表1列举了不同地质条件下的设计要点及防护措施。

表1 不同地质条件下高边坡桥梁设计策略

地质条件类型	主要工程特征	关键设计要点	推荐支护形式	注意事项
坚硬岩质边坡	整体强度高,结构面控制稳定性	查明结构面产状,验算楔形体稳定	系统锚杆、预应力锚索	重点防范结构面滑移
破碎岩质边坡	节理裂隙发育,卸荷带明显	加强施工地质核查,分区支护	长短锚杆组合、挂网喷砼	避免爆破扰动
堆积体/土质边坡	结构松散,稳定性差,易失稳	计算下滑力,设置深层抗滑结构	抗滑桩+锚杆、格构梁	重点加强排水设计
滑坡体边坡	已滑动或潜在滑动	查明滑面位置,根治性加固	抗滑桩+预应力锚索、排水隧洞	严禁大开挖扰动
复杂风化边坡	风化层厚度不均	分层支护,差异设计	长短锚杆组合、框架梁	控制坡率,逐级加固

在某大桥工程中,根据现场地形地质条件,采用了预应力锚索墩结合锚索格梁的加固方式。验收试验结果表明设计方案合理,后续变形监测数据也满足设计要求。对于

某大桥堆积体滑坡治理工程,通过地质测绘与勘探工作,查明了地层岩性、地质构造及水文地质条件,并运用传递系数法和刚体极限平衡法进行稳定性评价,最终采取了抗滑桩加锚杆的支挡防护措施。

2.3 桥梁结构选型与地质匹配分析

桥梁结构形式应与边坡地质条件相适应。高切坡段桩柱式桥墩基桩受力特殊,除承受竖向荷载外,还需承受边坡岩土体侧向压力,设计时需充分考虑陡坡效应。适当加大桩距可减小边坡岩体应力叠加影响范围,有利于提高边坡整体稳定性。高切坡处的双桩柱基础兼具普通桩基的承重功能与抗滑桩的抗滑功能,且高墩加大了桩顶水平荷载,桩间横系梁的设置会引起前后排桩的变形差异,从而导致荷载在前后桩之间重新分配。对于大跨度桥梁锚碇基础,可采用拱形咬合桩基坑支护结构,利用咬合桩间形成的拱效应,将坑外土压力转化为拱轴向推力,以改善受力条件。在地形条件恶劣地段,应优先采用大跨径桥梁方案,减少桥墩数量,从而最大限度地降低对边坡的扰动。

2.4 排水与防护系统设计

排水系统是高边坡桥梁工程维持长期稳定的关键环节。在某大桥千米级高陡岸坡综合勘察与防护设计中,根据计算成果采用了锚索、锚杆联合防护方案,锚索设计锚固力达1050kN。S35景泰至礼县高速公路天水段排水系统设计中,摒弃了传统工艺的不足,采用了钢波纹管与抗滑镇墩等多种结构组合的方式,加强高陡岸坡的水流引排,有效预防地质灾害。边坡防护主骨架可选用菱形排水框格结合空心六棱块的组合形式,以增强坡面排水能力。桥面应设置纵横坡(横坡一般取1.5%~3.0%)及泄水孔,以减少桥面积水,实现排防结合。在侵蚀低中山地貌区,面对近50°的陡峻山体边坡及高温高湿气候条件,应着重加强排水系统的耐久性设计。地面截水沟宜布置在边坡坡顶外5~10m范围,以拦截坡面径流;坡面排水沟可按30~50m间距设置,形成完整的闭合排水系统。

3 高边坡支护施工技术与质量控制

3.1 支护工程施工工艺

高边坡支护施工集成了多种工艺技术。预应力锚索施工作为锚固支护的核心工序,包括钻孔、清孔、锚索安放、注浆、张拉锁定等步骤。在某高铁全线最高墩、最大跨度T型刚构DK887大桥工程中,通过对高陡边坡稳定性进行验算,采用了预应力锚索桩结合锚索格梁的加固措施,实践表明现场施工质量与安全可控。抗滑桩施工可采用人工挖孔或机械成孔工艺,桩身钢筋笼应现场绑扎,混凝土需连续浇筑,以确保桩身完整性与嵌固深度。锚杆框架梁

施工流程包括脚手架搭设、锚孔钻进、锚杆安放、注浆、框架梁钢筋绑扎及混凝土浇筑等。在基于锚杆框架梁的高边坡防护施工中,通过计算调整竖梁尺寸并确定抗滑桩位置后,开展钻进与桩孔开挖,最终以框架梁挂网喷锚方式完成锚杆注浆。边坡工程中常采用上部锚杆格构梁与下部抗滑桩加锚索的复合加固支护形式,形成立体化综合防护结构。

3.2 关键施工技术要点

高边坡支护施工的技术要点主要集中于钻孔精度、注浆质量及预应力张拉控制三方面。钻孔作业需确保孔位、孔深及倾角符合设计要求,在破碎岩层中应采用跟管钻进工艺以防塌孔。注浆过程应严格控制浆液配比与注浆压力,确保注浆饱满度与锚固体强度,注浆压力一般根据地层情况设置为 $0.5\sim 3.0\text{MPa}$ 。预应力张拉应采用分级加载、逐步锁定的方式进行,张拉完成后应立即锁定并采取有效防松措施。在某大桥左岸连接线高边坡开挖工程中,采用简化 Bishop 法计算得出的边坡稳定安全系数低于规范允许值,故需采取削坡等加固措施。在高边坡区域桩柱式桥梁墩台基础施工中,应充分注意桩位布置对边坡整体稳定性的影响,桩基荷载引起的岩体应力影响范围由桩距及嵌固深度共同决定。对于地质条件复杂的大桥工程,应根据实际揭示的地质情况动态调整开挖及支护方案。

3.3 施工质量控制措施

高边坡支护施工质量控制应贯穿全过程。材料质量控制方面,需严格检验锚杆钢筋、钢绞线、水泥等原材料的规格与性能指标,并对锚具进行外观、硬度及静载锚固性能试验。工序质量控制方面,应重点把控钻孔深度、锚固段长度、注浆饱满度及张拉力等关键参数,各道工序均须经监理验收合格后方可进入下一环节。高边坡开挖必须遵循自上而下、分层开挖、分层支护的原则,严禁一挖到底后再进行支护。对于百米级以上高边坡的卸荷松弛问题,易导致岩土体抗剪强度降低及岸坡稳定性下降,因此必须加强施工期的地质勘察工作。某大桥高挡墙边坡防护设计采用了锚索与锚杆联合防护形式,其成功经验对类似工程具有借鉴意义。施工完成后,须进行锚杆抗拔试验及锚索张拉检测,以验证支护效果是否满足设计标准。

3.4 安全风险分析与控制

高边坡桥梁工程施工面临的主要安全风险包括边坡失稳坍塌、高处坠落及地质灾害等。边坡失稳是最严重的隐患之一,尤其在降雨或降雨叠加地震工况下,边坡极易失稳,必须采取排水、预应力锚索加固等综合防治措施。某大桥堆积体滑坡事故表明,长时间高强度降水导致地下

水入渗,加之工程建设开挖形成的临空面,共同诱发了坡体失稳。经综合治理后,稳定性系数达到 1.2,滑坡监测数据显示治理后坡体位移迅速收敛并趋于稳定。因此,安全管理应坚持“预防为主、防治结合”的方针,施工前充分开展地质灾害风险评估,施工中实施动态监测预警。为防止地震引发的坡面碎屑流对桥梁结构造成损害,设计中应设置拦挡与疏导设施。施工现场须制定应急预案,储备必要的救灾物资与装备,确保紧急情况下的快速响应与处置。

3.5 施工监测与信息化管理

施工监测是实现高边坡支护工程信息化施工的关键技术手段。通过在施工过程中布设边坡位移测点、锚杆应力计、地下水位观测井及沉降观测点,可实时获取边坡变形、锚固力变化及地下水位动态等关键信息。国检集团湖南分公司研发的边坡安全监测信息化平台,利用立体感知传感器与数据分析技术,可实时掌握边坡安全状态,及时预警潜在风险,构建了信息化、智能化的高速公路边坡管理系统。该系统应用毫米级精度的北斗卫星位移监测技术,全天候监测边坡位移变化,并结合多要素边坡立体感知监测预警仪器,实现了对位移、变形、沉降、裂缝、倾角等关键指标的 24 小时连续监测。河北省建成了全省统一的道路基础设施技防监测预警平台,通过在结构关键部位布设高精度传感器,实现了对边坡位移、倾斜、应力等数据的实时监测与风险报警,推动了道路安全监管由被动响应向主动预警的转变。在某大桥滑坡整治工程中,监测数据表明治理后坡体位移快速收敛并保持稳定,验证了治理方案的有效性。信息化管理系统的应用,实现了监测数据的统一汇集、自动分析与预警提示,为高边坡桥梁的安全施工与后期运营维护提供了可靠的技术支撑。

4 结语

高边坡桥梁支护与地质适应性设计是一项系统工程,需贯穿规划、设计、施工及运营全过程。在岩质边坡中,应重点关注结构面发育特征,采用预应力锚索、系统锚杆进行主动加固;在堆积体或滑坡体边坡中,宜采用抗滑桩与锚杆(索)联合支护,以有效控制深层滑动问题;在复杂风化边坡中,则可通过长短锚杆组合与分级支护实现差异化加固。高边坡斜坡段桩柱式桥梁墩基础兼具承重与阻滑双重功能,设计时需充分考虑陡坡效应与嵌固深度效应。排水系统的合理布设对边坡长期稳定性至关重要,应构建地表与地下排水相结合的综合排水体系。施工质量管理须覆盖所有关键工序,特别是钻孔精度、注浆效果及张拉力的控制。施工监测与信息化管理通过多源传感技术与大数

据分析手段,实现了边坡状态的实时感知与预警。未来,随着智能检测技术与人工智能的深度融合,高边坡桥梁防护将迈向更加科学、精准与智能化的新阶段。

[参考文献]

- [1]陈军刚,陈孔令.西南山区常规桥梁设计典型问题分析[J].交通科技,2020(6):56-59.
- [2]叶维强,马海涛,李佳.高陡边坡桥梁桩基受力特征研究[J].城市道桥与防洪,2025(6):165-168.

- [3]杨莉婕,欧剑聪,朱珊莹,等.边坡下推力对边坡桥梁桩基土压力分布规律的影响研究[J].粘接,2025,52(6):155-159.

- [4]李舵.桥梁施工安全高边坡防护技术探究[J].黑龙江交通科技,2020,43(9):99-100.

作者简介:赵庆缘(1995.01—),男,达斡尔族,内蒙古呼伦贝尔人,桥梁工程师,2020年6月毕业于重庆交通大学建筑与土木工程专业,硕士研究生,主要从事桥梁设计、桥梁无损检测工作。