

高寒地区公路桥梁耐久性设计与施工关键技术

张高兴

(四川顺恒勘察设计有限公司, 四川 成都 611100)

摘 要 高寒地区具有海拔高、纬度偏北的地理特征, 气候上呈现冬季漫长严寒、昼夜温差和年际温差显著、冻融循环频发的特点, 同时面临盐冻侵蚀、强紫外线辐射等恶劣环境。公路桥梁长期处在这种极端条件下, 极易出现混凝土剥落、钢筋生锈、基础冻胀融沉等耐久性病害, 不仅大幅度缩短桥梁的使用年限, 还会增加养护维修的成本, 影响区域交通的畅通和安全。基于此, 亟需构建一套针对性的耐久性设计与施工技术方案, 从根源上解决高寒地区公路桥梁建设及长期运维中的难题。

关键词 高寒地区; 公路桥梁; 耐久性设计; 引气混凝土专项施工技术; 结构裂缝防控施工技术

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.018

0 引言

公路桥梁是高寒地区交通基础设施的核心, 其耐久性直接关系到交通网络的稳定运行, 也关系到公众出行的安全。当前, 我国交通建设的重点正在向西部高寒地区转移, 但现有的技术大多还是沿用通用规范, 没有充分考虑高寒地区的特殊环境, 导致桥梁耐久性不足的问题特别突出。因此, 明确设计原则、掌握关键技术、强化质量控制, 建立一套完善的耐久性技术体系, 对于提高桥梁的抗劣化能力、降低运维成本、保障工程长期安全有着非常重要的现实意义。

1 高寒地区公路桥梁耐久性设计原则

1.1 环境适配原则

开展高寒地区桥梁设计前, 必须精准摸排区域内极端环境参数, 重点掌握最低气温阈值、冻融循环频次、冻土厚度、盐冻侵蚀等级以及昼夜温差幅度等核心指标。唯有熟练掌握各类环境制约条件, 才能精准规避高寒环境引发的结构损坏风险; 结合当地冻土特性、气象分布差异, 优化桥梁结构选型与材料配比方案, 让设计思路贴合地域自然禀赋, 从源头降低冻融破损、盐蚀侵害等问题的发生概率^[1]。与此同时, 兼顾工程与生态的协调性, 杜绝桥梁建设对周边环境造成不可逆破坏, 平衡结构耐用性与生态保护需求, 保障桥梁在极端高寒环境下实现长期稳定服役。

1.2 全生命周期耐用原则

高寒桥梁设计需立足于全生命周期视角, 统筹兼顾施工建设、运维管理、后期养护三大阶段的实际需求。

设计既要保障现场施工的便捷性, 更要考量后期养护的可操作性与经济性; 结构选型与材料选用优先聚焦抗冻性强、耐腐蚀性优、易养护维护的品类, 以此缩减后期维修频次、控制运维成本。此外, 需提前预留养护检修作业空间, 为后续结构耐用性监测、病害整治修复提供便利条件, 最大限度延长桥梁设计使用年限。全程把控全周期成本与耐用性平衡, 避免因前期设计疏漏, 导致后期运维成本激增、结构寿命折损。

1.3 安全冗余原则

高寒地区极端天气频发, 桥梁结构长期承受冻胀力、温差应力、盐冻侵蚀等多重荷载作用, 设计阶段必须预留充足的安全冗余。针对结构强度、抗冻性能、抗腐蚀能力等关键指标, 严格遵循行业规范要求, 适度提升设计标准, 确保桥梁在极端低温、反复冻融等恶劣工况下, 依旧满足承载安全与正常使用标准。针对桥面、墩柱、基础等易损关键部位, 强化专项结构防护, 增设针对性防护举措, 防范突发病害引发安全隐患, 筑牢桥梁全天候运行的安全防线。

2 高寒地区公路桥梁耐久性设计关键技术

2.1 高性能抗冻材料优化技术

材料是桥梁耐用性的根本, 要重点做好混凝土和钢筋的性能优化, 适配高寒地区的恶劣环境。混凝土配合比设计时, 要采用低水胶比, 再掺进粉煤灰、矿渣粉、硅灰这类高活性矿物掺合料, 这样能减少混凝土内部的孔隙, 让孔隙结构更细密, 从而降低水分渗透的能力。同时, 还要加入适量的引气剂, 让混凝土

作者简介: 张高兴 (1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

内部形成均匀分布的微小气泡,这些气泡能缓冲水分结冰膨胀时产生的压力,把混凝土的抗冻等级提高到 F300 以上^[2]。在钢筋方面,要选用不锈钢钢筋、环氧涂层钢筋或者耐候钢,这样能抵御氯离子的侵蚀,延缓钢筋生锈。对于桥梁关键的受力部位,采用阴极保护法,通过外加电流或者牺牲阳极的方式,防止钢筋氧化锈蚀,从根源上提升材料的抗老化、抗劣化能力。

2.2 抗冻胀结构优化设计技术

结合高寒地区土壤冻胀、融沉的特点,优化桥梁基础和上部结构的设计,减少冻胀力对桥梁结构的影响。基础设计要根据场地的冻土类型、冻层厚度,合理选择基础形式:季节性冻土地区,采用深基础,把基础底面放在冻层下限以下;多年冻土地区,采用保温基础或者主动降温基础,设置保温层或者热管装置,维持冻层的稳定,防止基础出现融沉问题。同时,回填非冻胀性土壤,降低土体的冻胀性。上部结构优先选用连续梁桥、刚构桥这类整体性好、抗变形能力强的桥梁形式,合理设置伸缩缝和支座,选用耐寒、耐老化的材料,确保在低温环境下,结构能自由伸缩、受力均匀,减少因为温差和冻胀变形带来的结构损伤。

2.3 复合防护体系构建技术

构建“外防内排”的立体复合防护体系,全方位抵御高寒环境对桥梁结构的破坏。在表面防护上,混凝土表面会涂刷聚脲、氟碳这类高性能防护涂层,形成一层致密的防护膜,把水分、氯离子等有害物都挡在外面。桥面铺装则选用耐候又耐磨的材料,还会设置防水层,防止桥面的水渗到主梁结构里。渗透防护采用硅烷/硅氧烷浸渍技术,能在混凝土的毛细孔壁上形成一层憎水层,降低混凝土的吸水性和氯离子渗透性,而且不会影响它的透气性。在排水防护方面,要完善桥面和桥体的排水系统,及时把雨水、融雪水排走,减少水分在结构内部堆积,避免冻融循环和盐蚀作用进一步加剧,这样就能形成多层次、全方位的防护效果^[3]。

2.4 温差应力控制设计技术

高寒地区昼夜、年际温差大,针对这个特点,采用专门的温差应力控制技术,防止桥梁结构开裂。在结构设计时,会合理设置施工缝和后浇带,采用分段分层的设计方式,减少结构约束,让温差产生的应力能及时释放。对于大体积混凝土构件,会优化截面设计,增加散热面积,缩小构件内部和表面的温差。同时,选用热膨胀系数小、抗裂性能好的材料,减少温度变化带来的结构变形。在转角、倒角这些容易产生应力集中的部位,会采用圆弧过渡的设计,降低应力集中

的程度,防止冻融循环和温差应力共同作用下,结构出现裂缝并不断扩大,保障桥梁结构的完整性。

3 高寒地区公路桥梁耐久性施工关键技术

3.1 低温环境混凝土浇筑与养护技术

低温环境下,混凝土浇筑和养护的质量一定要严格把控,这样才能避免早期冻融对其造成损伤。浇筑之前,要把拌合水和骨料加热,控制好混凝土的出机温度,确保入模时温度不低于 5℃。尽量不要在零下 10℃ 以下的极端低温天,或者寒潮来袭的时候,浇筑薄壁结构和大体积混凝土。运输过程中要用保温罐车,减少热量流失;浇筑作业需选用高频插入式振捣器,操作时务必遵循快插慢拔的要领;把控好振捣时长与范围,既要杜绝过振导致骨料离析,也要避免漏振留下隐患,防止内部气泡无法排出,或是出现蜂窝、孔洞等质量问题。

养护环节可选用蓄热法或暖棚法,依托水泥水化反应释放的自身热量,搭配保温材料进行全覆盖包裹,以此延缓热量流失,维持构件内部温度稳定。

3.2 引气混凝土专项施工技术

引气混凝土是提高桥梁抗冻性的关键,施工的全过程都要严格把控质量。搅拌时要用强制式搅拌机,按照配合比准确投放引气剂,控制好搅拌时间和投料顺序,不能过度搅拌,否则会导致气泡合并、流失。运输过程中要保持平稳,减少颠簸,避免气泡跑掉;浇筑时要合理控制浇筑速度和厚度,防止气泡堆积在一起。施工过程中要多检测几次含气量,确保出机、入泵、入模这几个环节的含气量都符合设计要求,入模时的含气量至少要达到设计下限的最低标准。振捣完成后,要及时把表面抹平、压光,避免表面起砂、起皮,这样才能保证引气混凝土的抗冻性能和结构密实度,让那些微小气泡充分发挥缓冲作用。

3.3 结构裂缝防控施工技术

针对高寒地区特殊的施工环境,结构裂缝防控必须贯穿全流程落实到位,这是保障工程长期耐久性能的核心前提。混凝土浇筑前期,要先细化优化施工方案,科学规划施工缝与后浇带的布设位置,采取分段分层浇筑的作业模式,严控单次浇筑体量与分层厚度,以此保障混凝土内部热量顺利散出、结构应力平稳释放,从源头降低裂缝产生风险。浇筑作业期间,要依托信息化手段开展全程温度监测,在结构内部、表层及周边环境合理布设测温点位,实时追踪温度场动态变化^[4]。一旦监测数据出现异常,立即调整养护管控手段,缩小混凝土内外温差差幅,规避温度裂缝的产生。进入

养护环节后,持续做好保湿养护是关键,可选用湿土工布全覆盖包裹,或是喷洒专用养护剂,抑制混凝土因干燥收缩引发开裂。针对结构易开裂的薄弱部位,可更换纤维增强混凝土材料,或是增设加强筋加固,进一步提升结构整体抗裂能力。

3.4 防护层施工关键技术

防护层施工需严格遵循设计标准执行,全程把控施工质量,确保防护效果达标。开展混凝土表面防护施工前,要先彻底清理表层浮尘、油污及松动骨料,对细微裂缝做专项修补处理,保证基面平整干燥,为防护涂层牢固附着筑牢基础。涂刷防护涂层时,精准把控涂层厚度与涂刷均匀度,杜绝漏涂、流挂等问题,确保形成致密连续的防护膜;开展硅烷、硅氧烷浸渍作业时,严控浸渍深度与材料用量,保证渗透效果均匀一致,充分发挥材料的憎水防护功效。桥面防水层施工前,保证基层平整干燥,防水层铺设要平整无破损,搭接宽度严格遵照规范要求执行。防水层铺设完毕后,及时开展闭水试验,试验合格后方可推进桥面铺装施工,通过全流程管控,全面提升结构抗侵蚀、耐老化性能。

4 高寒地区公路桥梁耐久性施工质量控制与检测

4.1 原材料质量控制与检测

建立原材料全流程的质量管控体系,从源头筑牢质量防线,保障桥梁的耐久性。原材料进场的时候,严格检查水泥、砂石、钢筋、外加剂、防护材料这些核心材料的性能,重点看混凝土原材料的抗冻、抗腐蚀能力,钢筋的耐腐蚀效果,还有外加剂的相容性和引气效果。只要是不符合要求的原材料,一律不准进场使用。在施工过程中,还要定期对原材料进行抽检,跟踪检查水泥和外加剂能不能很好兼容、骨料级配是否合理、矿物掺合料的活性这些关键指标,发现问题就及时调整配合比。同时,要做好原材料台账,把进场批次、检测结果这些信息都详细记下来,做到质量可追溯,确保原材料性能一直符合高寒地区桥梁耐久性的设计标准。

4.2 施工过程质量控制与检测

要强化施工全过程的质量管控,重点关注关键工序和容易出问题的薄弱环节。混凝土施工时,要实时检测坍落度、含气量、入模温度这些指标,确保施工参数和设计要求一致;振捣环节要全程监控,不能出现过振或者漏振的情况,保证混凝土密实。钢筋加工和安装的时候,要检查钢筋的规格、间距、保护层厚度以及连接质量,关键部位要用无损检测技术,排查

钢筋锈蚀、连接不牢固等隐患。防护层施工完成后,要检测涂层厚度、附着力,浸渍类防护要检查渗透深度,桥面防水层要检测密封性^[5]。发现不合格的部位,要及时整改到位,确保每一道施工工序都符合质量要求,为桥梁耐久性筑牢基础。

4.3 成品质量检测与隐患排查

桥梁整体施工完毕后,必须全面推进成品质量核验与安全隐患排查,全力保障桥梁满足长期耐久使用的标准。采用无损检测技术开展核验,重点把控混凝土核心性能,细致检测强度、密实度与碳化深度,精准排查内部裂缝、空洞等隐蔽缺陷;同步核查钢筋锈蚀状况,判定钢筋保护层的防护效能是否达标。针对桥面、墩柱、基础等核心受力部位,要加大排查力度,重点核查防护层完整性、排水系统通畅度,及时预判并消除冻胀、盐蚀等各类潜在风险隐患。与此同时,建立健全成品检测台账,对核验发现的各类问题,专项制定整改处置方案,清晰划定整改时限,整改完毕后必须组织复检复核,确保所有问题闭环整改、不留死角。除此之外,还要构建长期动态监测体系,在桥梁结构内预埋温湿度、应变计、氯离子传感器等监测设备,实时跟踪桥梁耐久性能状态,一旦捕捉到早期病害信号,第一时间启动处置流程,严防小隐患演变成大问题。

5 结束语

高寒地区公路桥梁的耐久性设计与施工,必须紧密结合当地极端环境的特点,严格遵循适配性、全生命周期和安全冗余这三项原则,熟练运用材料优化、结构防护、温差控制等关键技术,同时强化施工全过程的质量管控与检测工作。只有把设计、施工、质量控制这三个环节有机结合起来,有效解决冻融、盐蚀、温差应力等核心难题,才能显著提高桥梁的抗劣化能力,延长其服役寿命,保障高寒地区交通网络持续稳定畅通,为区域基础设施建设的高质量发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 范桂英.高原高寒地区公路病害成因与养护技术探究[J].价值工程,2025,44(27):39-41.
- [2] 冉从翔.高海拔高寒地区公路桥梁预制梁施工工艺分析[J].交通科技与管理,2024,05(17):140-142.
- [3] 潘昌辉.高原高寒地区公路沥青混凝土的耐久性与性能优化分析[J].江西建材,2024(07):338-340.
- [4] 孟宪达.高海拔高寒地区公路桥梁预制梁施工工艺[J].设备管理与维修,2023(14):156-157.
- [5] 李露业.高寒地区公路桥梁健康监测技术应用探讨[J].青海交通科技,2022,34(01):114-118.