

道路桥梁在极端气候条件下的耐久性研究

沙 建

(安徽昌达路桥工程集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要 本文探究了道路桥梁在极端气候条件下的耐久性, 以揭示极端气候对道路桥梁的影响及损伤机制, 并提出了相应的防护措施; 对温度波动、极端降水与洪水、强风等极端气候条件下道路桥梁所受的影响进行了分析, 涵盖桥梁材料、结构稳定性、冻胀等方面; 同时深入剖析了道路桥梁耐久性损伤机制, 包括材料疲劳老化、结构裂缝、环境腐蚀、承载能力衰减等。研究结果表明, 极端气候会对道路桥梁的耐久性产生显著影响, 应通过合理选择建设材料、采取温度调节与防冻措施、使用防腐涂层保护钢筋、加强加固设计等方式, 提升道路桥梁在极端气候条件下的耐久性。

关键词 道路桥梁; 极端气候; 耐久性

中图分类号: U447

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.13.039

0 引言

公路桥梁是现代交通运输网络中的重要基础设施, 是经济发展和社会交往的重要支撑。然而, 在气候变化背景下, 气温异常波动、暴雨洪涝、强风频发、冻融交替加剧等极端气候事件频发。这些极端天气对桥梁结构的耐久性和安全性提出了严峻的挑战。温度波动会引起桥梁材料的热胀冷缩, 加速其疲劳老化; 强降雨、强洪水对桥梁结构的侵蚀, 降低了桥梁的承载力; 在强风作用下, 桥梁容易发生振动, 影响桥梁的稳定; 冻融作用会引起桥梁的冻胀损伤。因此, 迫切需要对极端气候环境下桥梁结构的耐久性进行深入研究, 以保证交通安全稳定运行。

1 极端气候条件对道路桥梁耐久性的影响

1.1 温度波动对桥梁材料的影响

温度的频繁剧烈波动会对桥梁材料造成多方面的损害。桥梁常用的钢材, 在高温时, 其屈服强度与弹性模量降低, 致使承载能力下降; 低温环境下, 钢材又会变脆, 韧性降低, 易出现脆性断裂。混凝土材料同样深受其害, 当温度升高, 混凝土内部水分迅速蒸发, 产生孔隙与裂缝, 降低了材料的密实度与强度。且温度变化引发的热胀冷缩, 会在混凝土内部形成温度应力, 长期作用下, 混凝土材料易出现疲劳损伤。例如在一些跨江大桥, 夏季高温时段, 桥体钢材温度可达 60 °C 以上, 而冬季低温能至零下十几摄氏度, 一年间巨大的温差变化, 加速了钢材与混凝土的老化, 使得桥梁维护周期缩短, 维护成本增加。

1.2 极端降水与洪水对桥梁结构的影响

极端降水使桥梁长期暴露于高湿度环境中, 极大地加速了混凝土碳化与钢筋锈蚀进程。雨水持续冲刷混凝土表面, 对水泥浆体产生侵蚀作用, 致使混凝土表层逐渐剥落, 内部钢筋随之失去防护层, 在湿度和氧气的共同作用下发生锈蚀, 且铁锈的膨胀特性进一步胀裂混凝土结构, 严重削弱结构强度。洪水的冲击力堪称桥梁的“致命杀手”, 其裹挟的大量杂物, 如树木、巨石等, 以巨大的动能撞击桥梁墩台, 极易破坏墩台结构的完整性, 导致局部损伤甚至整体破坏。同时, 洪水长时间浸泡地基, 会使地基土中的有效应力发生改变, 强度显著降低, 压缩性大幅增大, 最终引发桥梁基础不均匀沉降。在频发的洪涝灾害中, 众多中小桥梁因洪水冲击, 墩台出现不同程度的倾斜、开裂, 部分桥梁甚至整体垮塌, 不仅严重阻碍交通通行, 还造成了巨大的经济损失与安全隐患, 凸显了极端降水与洪水对桥梁结构破坏的严重性。

1.3 强风与极端天气对桥梁稳定性的作用

强风作用于桥梁时会引发一系列复杂气动力效应, 当风速达到特定程度, 桥梁会出现涡激振动与颤振现象; 涡激振动虽通常不会直接导致桥梁结构毁损, 但长期反复振动会使桥梁构件因疲劳产生损伤, 如某城市斜拉桥在特定风速下因涡激振动致使桥身持续微小晃动, 经长期监测部分关键构件出现细微裂纹, 而颤振一旦发生则可能在极短时间内引发桥梁剧烈振动, 严重威胁桥梁结构安全, 在台风多发地区, 台风所携

强风时刻考验桥梁稳定性,例如我国东南沿海某跨海大桥在强台风袭击时桥面晃动明显,监测数据显示振动幅度远超正常范围且部分连接构件松动,此外,龙卷风、沙尘暴等极端天气可能裹挟异物撞击桥梁、破坏附属设施,进而间接影响桥梁整体稳定性,给桥梁日常维护与安全运营带来极大挑战。

1.4 冻融循环与桥梁冻胀问题

在寒冷地区,桥梁长期处于冻融循环的恶劣环境中。当温度降至冰点以下,混凝土孔隙中的水会结冰膨胀,如同在孔隙内放置了一个个微型炸弹,对孔隙壁施加巨大压力。当温度回升,冰融化成水,体积缩小,孔隙壁恢复原状。如此周而复始,混凝土内部的微裂缝在这种反复作用下逐渐扩展、连通,导致混凝土强度降低,耐久性大打折扣。与此同时,地基土中的水分在低温下结冰,体积膨胀,引发桥梁冻胀。冻胀力如同一只无形的大手,会使桥梁基础上抬、变形,破坏桥梁结构的整体性^[1]。在我国东北等北方地区,不少公路桥梁在经历漫长冬季后,桥面板出现大量剥落、坑洼,桥墩基础也出现不均匀上抬。例如哈尔滨的某座跨江大桥,冬季过后,桥面板多处混凝土剥落,钢筋外露,桥墩基础的不均匀上抬致使桥梁出现明显的倾斜,严重影响了桥梁的正常使用与寿命,后续维修工作耗费大量人力、物力与财力。

2 道路桥梁耐久性损伤机制

2.1 材料疲劳与老化

公路桥梁在长期服役过程中,由于车辆荷载和环境因素引起的交变应力等因素的影响,导致材料发生疲劳。就桥梁钢结构来说,由于车辆的频繁使用,其内部的晶格结构会发生微小的滑移,从而产生位错。随着时间的流逝,这些位错在钢中不断积累,并在钢中形成微裂纹。同时,环境温度的变化,湿度的波动等都会加速材料的老化过程。随着温度的升高,钢中分子的活性增加,原子间的结合力降低,使材料的力学性能下降;同时,湿热环境也会导致钢结构发生电化学腐蚀,导致材料损耗进一步加剧。混凝土材料也面临着同样的问题,长时间受外界环境的影响,水泥水化产物逐渐分解,骨料和水泥石间的结合强度降低。我国部分大跨径桥梁每天有数万辆汽车通过,其表面已出现明显的疲劳损伤,混凝土表面粗糙、抗压强度下降,直接影响桥梁的耐久性。

2.2 结构裂缝的形成与扩展

结构裂缝的产生源于多种因素。首先,在桥梁建造过程中,混凝土浇筑时振捣不密实、模板变形等施

工缺陷可能导致初始裂缝的出现。在桥梁服役期间,车辆荷载的反复作用是裂缝形成与扩展的关键因素。车轮对桥面的局部压力,在桥面板内部产生拉应力,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,就会引发裂缝^[2]。此外,温度变化产生的温度应力也不容忽视。桥梁结构不同部位因温度差异,变形不一致,从而产生应力集中,促使裂缝生成。一旦裂缝形成,水分、空气以及腐蚀性介质便会顺着裂缝渗入结构内部。在干湿循环、冻融循环等环境作用下,裂缝不断扩展。例如:某高速公路桥梁在使用几年后,桥面板出现多条横向裂缝,经检测,是由于车辆超载以及冬季低温下混凝土内部水分结冰膨胀,致使裂缝从桥面板表面向内部延伸,严重威胁桥梁结构安全。

2.3 环境腐蚀与桥梁结构的化学反应

桥梁长期暴露于自然环境中,极易遭受环境腐蚀。在潮湿的空气中,桥梁结构中的钢筋与氧气、水发生电化学腐蚀反应。钢筋表面的铁原子失去电子,变成亚铁离子进入溶液,与空气中的氧气和水进一步反应,生成铁锈。铁锈的体积比铁大,会对周围混凝土产生膨胀压力,导致混凝土开裂、剥落。此外,工业废气中的酸性气体,如二氧化硫、氮氧化物等,溶解于雨水中形成酸雨,对桥梁混凝土和钢材具有强烈的腐蚀作用。酸雨会与混凝土中的氢氧化钙等碱性物质发生中和反应,破坏混凝土的内部结构^[3]。对于沿海地区的桥梁,海水中的氯离子会侵蚀混凝土内部的钢筋,加速钢筋锈蚀进程。某沿海城市的一座桥梁,由于长期受海风与海水侵蚀,桥体表面混凝土大面积脱落,钢筋锈迹斑斑,大大缩短了桥梁的使用寿命。

2.4 桥梁承载能力衰减

桥梁承载能力衰减是多种损伤机制共同作用的结果。材料疲劳与老化使得桥梁材料的强度和刚度降低,无法有效承受设计荷载。结构裂缝的形成与扩展削弱了桥梁结构的整体性和传力性能,导致局部应力集中,降低了结构的承载能力。环境腐蚀造成的钢筋锈蚀、混凝土损伤,进一步恶化了桥梁的受力状况。当桥梁长期承受超载车辆通行时,结构内部应力超出设计允许范围,加速了上述损伤机制的发展^[4]。例如:一些早期建造的桥梁,设计荷载标准较低,随着交通量增长以及大型重载车辆增多,桥梁频繁出现病害,承载能力逐渐衰减。检测数据显示,部分桥梁的实际承载能力已远低于设计值,不得不采取限载、加固等措施,以保障桥梁的安全使用,这充分说明了桥梁承载能力衰减问题的严重性。

3 极端气候条件下的桥梁设计与防护措施

3.1 合理选择桥梁建设材料

在极端天气条件下,对桥梁施工材料的合理选择非常重要。对于温度变化较大的区域,钢材应选择具有较好热稳定性和较高低温韧性的镍基合金钢,这样才能在较低温度下保持较好的力学性能,有效降低因温度变化引起的脆断风险。在混凝土材料方面,可以使用具有较密实结构、提高抗渗性和抗冻性的高性能混凝土。在易受洪水冲刷的地区,桥梁地基材料要求具有较高的抗冲耐磨性能,如选用质地较硬的花岗岩作为基底石,可以明显提高地基的稳固性。此外,在沿海地区,为了防止海水氯盐侵蚀,可以采用耐腐蚀的不锈钢材料或经过特殊处理的钢材。在实际工程中,某跨江大桥位于气候多变且酸雨频发地区,通过选用抗腐蚀的高性能钢材与耐久性强的混凝土,有效提升了桥梁在复杂气候条件下的使用寿命。

3.2 温度调节与防冻措施

为应对温度波动与寒冷气候,需采取有效的温度调节与防冻措施。在桥梁结构设计中,可设置温度伸缩缝,合理预留结构因温度变化产生伸缩的空间,避免因温度应力导致结构破坏。同时,采用隔热材料对桥梁关键部位进行包裹,如在桥面板底部铺设隔热层,减少热量传递,降低温度变化对结构的影响。对于防冻措施,在混凝土配合比设计时,可添加适量的引气剂,使混凝土内部形成微小封闭气孔,这些气孔在混凝土受冻时能容纳冰晶膨胀,缓解内部压力,提高混凝土的抗冻性能^[5]。在冬季来临前,可对桥梁进行保温处理,如在桥体表面覆盖保温棉被,减少热量散失。对于可能积水结冰的部位,可设置排水系统,及时排除雨水与融雪水,防止冻胀破坏。在北方某城市的桥梁建设中,通过完善的温度调节与防冻措施,该桥梁在严寒冬季依然能保持良好的结构性能,保障了交通的正常通行。

3.3 采用防腐涂层保护钢筋

钢筋锈蚀是影响桥梁耐久性的重要因素,采用防腐涂层是保护钢筋的有效手段。防腐涂层能在钢筋表面形成一层隔离屏障,阻止氧气、水分及腐蚀性介质与钢筋接触,从而减缓钢筋锈蚀进程。目前常用的防腐涂层有环氧涂层、锌基涂层等。环氧涂层具有良好的附着力与耐化学腐蚀性,可有效抵御酸雨、工业废气等侵蚀。施工时,需对钢筋表面进行严格的预处理,去除油污、铁锈等杂质,确保涂层与钢筋紧密结合。锌基涂层则利用锌的电化学保护作用,即使涂层局部受损,锌也能优先腐蚀,保护钢筋不受侵害。在实际

应用中,沿海地区的许多桥梁在钢筋表面涂覆防腐涂层后,钢筋锈蚀情况得到显著改善。同时,定期对涂层进行检测与维护,及时修复受损部位,能进一步延长涂层的防护寿命,保障桥梁结构安全。

3.4 加强桥梁加固设计

对于既有桥梁或处于极端气候条件下的新建桥梁,加强加固设计必不可少。在加固设计前,需对桥梁进行全面检测评估,明确结构损伤状况与承载能力。针对材料疲劳与老化问题,可采用粘贴碳纤维布、钢板等方式对结构进行加固,提高结构的强度与刚度。对于存在裂缝的部位,先对裂缝进行封闭处理,如采用灌缝胶填充裂缝,再进行加固,防止裂缝进一步扩展。在抗震设计方面,可增设阻尼器、加强桥墩与基础的连接等,提高桥梁在极端天气下的稳定性。对于因环境腐蚀导致结构受损的桥梁,在修复腐蚀部位后,通过增大结构截面尺寸、增设支撑体系等方法,提升桥梁的承载能力。某老旧桥梁在经过加固设计与施工后,成功抵御了后续多次强风暴雨等极端气候的考验,保障了桥梁的安全使用与交通畅通。

4 结束语

极端气候给道路桥梁耐久性带来了严峻的挑战。温度波动致使桥梁材料疲劳老化,极端降水与洪水侵蚀结构,强风影响稳定性,冻融循环引发冻胀问题,进而导致材料性能劣化、结构裂缝产生、环境腐蚀加剧以及承载能力不断衰减。为提升桥梁在极端气候下的耐久性,应合理选用适配材料,运用温度调节、防冻等手段,以防腐涂层保护钢筋,加强加固设计。未来,需要持续聚焦极端气候与桥梁耐久性的关联性研究,结合新型材料、智能监测技术,优化防护策略,全力保障道路桥梁在复杂气候中稳固安全,推动交通基础设施的长久、可持续发展。

参考文献:

- [1] 王文龙,王宝峰.市政道路桥梁中安全性与耐久性设计的研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(07):20-22.
- [2] 王友成.使用混凝土自修复技术提高道路和桥梁耐久性的研究[J].建材发展导向,2024,22(08):16-18.
- [3] 杨小彪.市政道路桥梁安全与耐久性分析[J].江西建材,2022(09):165-166,170.
- [4] 魏晓强.桥梁结构耐久性的影响因素及优化设计研究[J].工程技术研究,2022,07(13):200-202.
- [5] 帅一师.市政道路桥梁安全性与耐久性设计[J].智慧城市,2021,07(12):41-42.