

寒区温差作用下钢筋混凝土梁温度效应与耐久性研究

周炳锐

呼伦贝尔市海拉尔区交通运输事业发展中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021008

[摘要]寒区大温差、冻融循环环境都会给钢筋混凝土梁桥的长期服役带来很大的影响。通过对寒区环境温差作用特征的分析, 找出温度梯度下梁体应力分布及变形规律, 探究冻融循环和温度耦合作用下结构响应的机理。从研究中得知, 寒区钢筋混凝土梁耐久性劣化为温度裂缝萌生、冻融损伤累积、钢筋锈蚀加快的链式发展过程, 冻融造成孔隙连通度变大、微裂纹延伸, 这是耐久性变坏的主要缘由。据此提出包含材料优化、构造设计、健康监测和全寿命维护在内的综合提高措施, 给寒区混凝土结构的设计和维修提供理论依据。

[关键词]寒区工程; 钢筋混凝土梁; 温度效应; 温差作用; 耐久性

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20139

中图分类号: TU528.01

文献标识码: A

Research on Temperature Effect and Durability of Reinforced Concrete Beams under Cold Region Temperature Difference

ZHOU Bingrui

Hulun Buir City Hailar District Transportation Development Center, Hulun Buir, Inner Mongolia, 021008, China

Abstract: The large temperature difference and freeze-thaw cycle environment in cold regions will have a significant impact on the long-term service of reinforced concrete beam bridges. By analyzing the characteristics of temperature differences in cold regions, the stress distribution and deformation laws of beams under temperature gradients are identified, and the mechanism of structural response under freeze-thaw cycles and temperature coupling is explored. It is known from research that the durability deterioration of reinforced concrete beams in cold regions is a chain like development process of temperature crack initiation, freeze-thaw damage accumulation, and accelerated steel corrosion. Freeze thaw causes an increase in pore connectivity and microcrack extension, which is the main reason for the deterioration of durability. Based on this, comprehensive improvement measures including material optimization, structural design, health monitoring, and full life maintenance are proposed to provide theoretical basis for the design and maintenance of concrete structures in cold regions.

Keywords: cold region engineering; reinforced concrete beams; temperature effect; temperature difference effect; durability

引言

寒区一般是指冬季气温低于 -5°C , 年温差大于 60°C 的广大地区, 我国东北、西北、华北和青藏高原等地区都属于寒区。随着寒区交通基础设施建设不断推进, 钢筋混凝土梁是桥梁结构主要承重构件, 它所具有的安全性、耐久性好坏直接影响到交通生命线的正常运行。寒区最显著的气候特征就是年温差大、日温差变化剧烈、冻融循环频繁。以东北地区为例, 冬季极端低温可达 -40°C 以下, 夏季最高气温超过 30°C , 年温差超过 70°C , 日均温差可达 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 。混凝土在冻融循环过程中, 外部比内部温度变化幅度大, 受到的温度应力也大, 最先破坏。大量的工程实践表明, 在寒区混凝土桥梁服役 $10\sim 15$ 年左右就会出

现不同程度的劣化, 远远达不到设计使用年限。因此, 系统研究寒区温差对钢筋混凝土梁温度效应和耐久性演变的影响, 有重要的理论价值和工程意义。

1 寒区温差作用下钢筋混凝土梁温度效应及耐久性研究基础

1.1 寒区环境温差特征及作用规律

寒区环境温差作用分为季节性年温差、昼夜日温差和短时极端温差三个层次。年温差一般大于 60°C , 部分地方大于 80°C , 日温差可达 20°C 左右, 高频次温度变化使结构长时间处在交变温度应力场中。高寒地区由于海拔高、气温低、昼夜温差大, 混凝土结构常常会出现冻融现象, 从而对结构造成损害, 缩短使用寿命。短时极端温差指的

是寒潮引起的急剧降温,可以在数小时内造成 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的温降,对结构产生冲击性的温度荷载。上述温差作用的时间尺度从数小时到数月不等,共同特点就是周期性和反复性,决定了温度效应的分析要考虑到时间累积效应。

1.2 钢筋混凝土梁温度响应与耐久性影响机理

钢筋混凝土梁的温度响应本质就是温度荷载引起材料热胀冷缩变形,受到内部约束或者外部边界约束时产生的力学效应。低温环境下混凝土的抗压强度、弹性模量、峰值应变都会随着温度的降低而增大,增大程度与混凝土毛细孔和凝胶孔中水结冰的过程有关^[1]。强度提高的同时材料脆性增大,峰值应变降低,延性系数减小。温度梯度作用下,梁截面不同高度处温度差可达 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$,温度自应力和外部约束应力叠加会造成混凝土开裂。从耐久性角度来讲,寒区环境给结构劣化带来的驱动力有两个方面,一是冻融循环造成的冻胀应力不断作用于孔隙结构,促使微裂缝产生并持续发展;二是温度裂缝成了腐蚀介质(氯离子、水分等)的入侵门户,加快了钢筋锈蚀的速度。超低温冻融循环对混凝土的影响比常规冻融循环要大得多,在 -80°C 时会增加 1 倍以上,而且随着温度的降低,损伤的程度越来越严重。温度效应和耐久性存在时间尺度上的耦合关系,温度应力造成初始损伤,损伤积累又减小了结构抵抗以后温度荷载的能力。

2 寒区温差作用下钢筋混凝土梁温度效应分析

2.1 温度梯度作用下梁体应力与变形特征

温度梯度是造成混凝土梁温度效应的主要因素。寒区日照时梁顶和底面温差较大,产生竖向非线性温度梯度。采用顺序耦合的热应力分析可以模拟混凝土在冻融循环中受到的温度场、温度应力分布和力学性能的变化。温度梯度造成的自应力沿梁高是非线性的,梁顶受拉、梁底受压,当拉应力超过极限时就会产生温度裂缝。连续梁中温度梯度还会造成次内力重新分布,改变支座反力和跨中弯矩。低温下混凝土峰值应变降低、脆性增大,增加体积配箍率可以提高峰值应变和延性系数。温度梯度还会引起梁体发生挠曲变形,非线性温度梯度所引起的自平衡应力是造成梁体翘曲变形的主要原因。

2.2 冻融循环与温差耦合作用的结构响应分析

冻融循环和温度效应存在耦合关系。冻融损伤应该被看作是随机疲劳损伤,考虑到高寒地区特殊的环境对混凝土的影响,可以使用三参数 Weibull 分布模型来计算混凝土的冻融损伤程度以及寿命预测。冻融循环时,孔隙水反复经历结冰、融化的过程,产生冻胀应力不断积累,造成

混凝土内部微结构慢慢变坏。温差作用又加重了这个过程,大温差表示每次冻融循环时温度的波动幅度越大,冻胀应力就越集中。周期变温荷载下,混凝土由于孔隙水结冰所引起的冻胀应力,就是造成混凝土耐久性下降的主要原因。从结构响应角度而言,冻融循环造成混凝土弹性模量下降、抗拉强度降低,从而引起梁体温度应力分布发生变化,形成损伤-应力相互加强的正反馈过程。从试验结果可知,冻融循环次数越多,梁体挠度增长速度越快,温度裂缝宽度也越大。

3 寒区温差作用下钢筋混凝土梁耐久性影响因素分析

3.1 温度裂缝形成及扩展规律

温度裂缝属于寒区钢筋混凝土梁最常出现的早期损伤。其形成机理可以归纳为,温度梯度引起的拉应力大于混凝土即时抗拉强度的时候,裂缝会在拉应力集中区产生。温度裂缝和荷载裂缝的发展规律以及两者之间的关系表明,温度裂缝一般先于荷载裂缝出现,而且两者的扩展途径也不同。冻融循环以及温度交替的时候,裂缝尖端就会出现应力集中状况,冻胀水压力促使裂缝持续延伸。裂缝扩展方式分为表面裂缝和贯穿裂缝两种,表面裂缝对保护层耐久性有影响,贯穿裂缝会对截面承载力造成破坏。寒区大温差环境下,温度裂缝的扩展速度有季节性特点,冬季冻胀期扩展加快,夏季恢复期部分闭合,形成冻胀开裂-融化愈合的反复过程,但是愈合一般不完全,造成裂缝宽度逐渐增大。

3.2 钢筋锈蚀与混凝土劣化机制分析

钢筋锈蚀属于寒区钢筋混凝土梁耐久性的重要因素。温度裂缝给氯离子、水分、氧气的侵入创造了快速通道,使锈蚀的引发期变短。低温暴露时间越长,混凝土抗压强度就越低,低温下混凝土的吸水率、氯离子渗透性比标准养护高得多。冻融循环使混凝土保护层出现微裂缝网络,又加快了侵蚀介质向钢筋表面迁移的速度。当钢筋表面氯离子浓度达到临界值的时候,钝化膜就被破坏了,锈蚀反应就开始了。锈蚀产物体积膨胀(约为原体积的 $2\sim 6$ 倍),产生锈胀力,造成保护层开裂甚至剥落。混凝土劣化就是冻融损伤和化学侵蚀的共同作用,冻融循环会使孔隙率增大、微裂纹密度增加,冻融作用会使孔隙连通度增大、微裂纹扩展,是耐久性劣化的主要因素。劣化后的混凝土弹性模量变小,抗渗性降低,使外部侵蚀介质更容易侵入。

3.3 材料性能变化对梁体耐久性的影响

寒区环境对于钢筋混凝土梁所用材料性能的影响是

全方位的。混凝土方面,掺入引气剂会降低其力学性能,掺入减水剂和同时掺入引气剂和减水剂会提高其力学性能,其中同时掺入引气剂和减水剂的高寒混凝土抗冻耐久性最好。冻融循环造成混凝土动弹性模量降低,抗折强度下降,损伤程度随着循环次数的增加呈非线性增长。钢筋方面,在低温下钢筋的屈服强度、极限抗拉强度均有提高,但是塑性下降,超低温环境下钢筋、钢绞线的屈服强度、极限抗拉强度均有不同程度的提高,钢筋的塑性降低,但是钢筋的弹性模量变化不大。钢筋和混凝土的粘结性能在低温下会发生变化,极限粘结强度随着温度的降低而增大,但是冻融循环之后粘结强度明显下降。材料性能的变化都会对梁体的抗弯承载力、抗剪承载力、裂缝控制性能产生影响。

3.4 环境荷载耦合作用下耐久性演化特征

寒区钢筋混凝土梁在服役期会受到温度、冻融、荷载、侵蚀介质等各方面的影响,耐久性的发展具有比较复杂的非线性特点。持续荷载和冻融循环一起对钢筋混凝土结构耐久性造成更大的影响,持荷-冻融耦合作用后损伤机理以及剩余承载力是研究重点。应力水平低的时候,冻融损伤是耐久性退化的主要因素,应力水平高时,荷载引起的拉应力和冻胀应力叠加,加快裂缝扩展和刚度退化。耦合作用的耐久性演化模型要考虑到力学损伤(荷载造成的裂缝和徐变)和环境损伤(冻融、锈蚀)的相互作用。从研究结果可知,冻融循环和荷载的共同作用使得梁体剩余承载力衰减速率比单一因素作用之和大多得多,表现出明显的协同劣化效应。图1中寒区钢筋混凝土梁温度效应、耐久性演化呈现由温度裂缝萌生、冻融损伤累积、钢筋锈蚀加

速、承载力退化链条式演化的特点,各个阶段之间存在互相加剧的正反馈机制。

4 寒区钢筋混凝土梁温度效应控制与耐久性提升措施

4.1 优化混凝土材料组成与抗冻性能

提高混凝土本体抗冻性,是控制温度效应、保证耐久性的基本措施。配合比优化时水胶比不能大于0.45,保证水泥用量及矿物掺合料的合理搭配。引气剂是提高抗冻性能的外加剂,可以提高混凝土含气量到4%~6%,引入的气泡可以容纳冻胀产生的膨胀压力,混凝土平均气泡间距控制在250~300 μm 以下就可以抵抗内部结晶引起的膨胀。减水剂的使用可以降低水胶比、减少孔隙率,和引气剂复掺时效果最好^[2]。掺入引气剂和减水剂的混凝土在抗压、抗折性能方面均能满足设计要求,抗冻耐久性最好。另外使用高性能混凝土或者超高性能混凝土可以明显提高密实度和抗渗性,从根本上提高耐久性。

4.2 加强温度裂缝控制与结构构造设计

温度裂缝控制要从材料、构造、施工这三个方面综合考虑。构造上合理设置温度伸缩缝,加强梁体纵横向构造钢筋配置,箍筋约束可以适当提高混凝土的峰值应变和延性系数,适当增大梁顶保护层厚度。施工过程中要严格控制入模温度,冬季采用覆盖保温措施,通过配合比优化、材料改性和冬季施工养护改善,混凝土抗压强度保持率可达93%,冻融损伤明显减小,大体积混凝土浇筑时内外温差不大于25 $^{\circ}\text{C}$ 。另外,梁体表面涂覆抗裂材料或者铺设保温层,可以从源头上减小温度梯度幅值、降低温度应力。

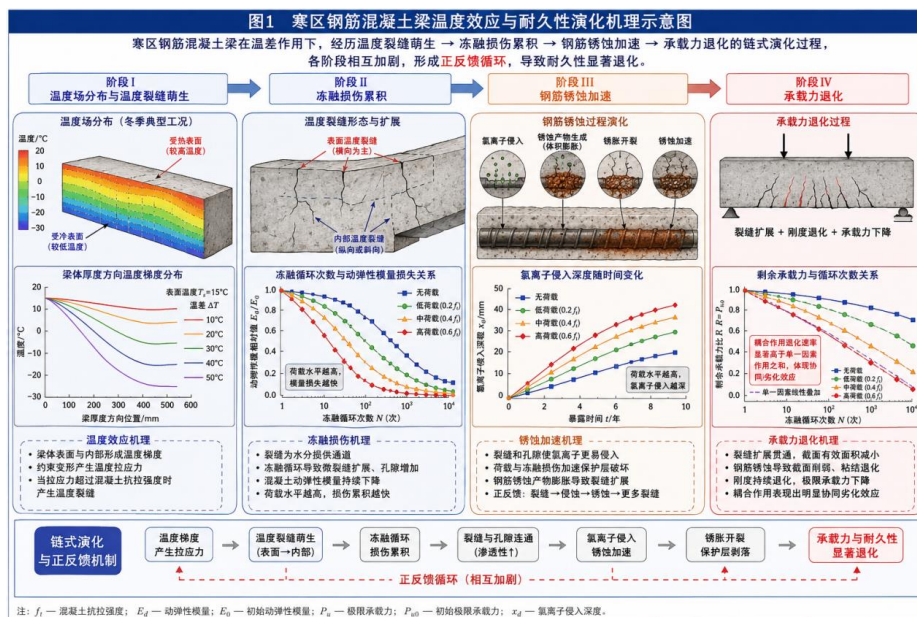


图1 寒区钢筋混凝土梁温度效应和耐久性演化机理示意图

表 1 寒区钢筋混凝土梁耐久性影响因素及作用机制

影响因素	作用机制	主要后果
温度梯度	产生温度自应力, 超过抗拉强度时引发开裂	温度裂缝萌生与扩展
冻融循环	孔隙水结冰产生冻胀应力, 微结构疲劳损伤	动弹性模量损失, 抗拉强度降低
钢筋锈蚀	氯离子侵入破坏钝化膜, 锈胀力致保护层开裂	截面削弱, 粘结退化, 承载力下降
荷载耦合	荷载应力与温度应力叠加, 加速裂缝扩展	刚度退化加速, 剩余寿命缩短

4.3 建立寒区结构健康监测与耐久性评价体系

健康监测是了解结构服役状况, 预测耐久性风险的手段。寒区钢筋混凝土梁监测系统要重点布置温度传感器(观测梁体温度场分布)、应变传感器(观测温度应变和荷载应变)、裂缝计(观测裂缝宽度发展)、锈蚀传感器(观测钢筋锈蚀电位)。利用 ABAQUS 软件可以模拟冻融循环过程中温度场分布、温度应力变化和力学性能退化, 给监测数据提供数值参考。耐久性评价体系要包含材料层次(混凝土强度, 冻融损伤度), 构件层次(裂缝宽度, 钢筋锈蚀率)以及结构层次(承载力, 挠度)这三层内容, 创建多指标融合的综合评价办法。评价模型中要加入温度历程、冻融循环次数等重要参数来反映寒区环境的特殊性。

4.4 完善寒区钢筋混凝土梁全寿命维护管理机制

全寿命维护管理属于保证寒区钢筋混凝土梁长久安全服役的制度保障。设计阶段要实行全寿命成本的耐久性设计, 把后期的维护费用当作设计方案比较的重要考量因素。施工阶段要创建质量追溯档案, 把混凝土配合比、浇筑温度、养护状况这些重要信息全都记载下来。运营阶段要制订定期检测计划, 除了改善混凝土本体抗冻性之外, 还要采取表面防渗措施来控制混凝土内部的含水量和冻胀应力, 从而提高抗冻融能力。当检测出裂缝宽度超标或者钢筋锈蚀启动的时候, 要及时进行修补, 修补方式有裂缝注浆、表面涂层保护、电化学修复等^[3]。维护决策要依靠结构健康监测数据以及耐久性评价成果, 创建预防性维护同事后维修相融合为维护策略, 保证结构在设计使用年限内安全服役。从表 1 可以看出, 寒区钢筋混凝土梁耐久性受温度梯度、冻融循环、钢筋锈蚀和荷载耦合这四个因

素的影响, 各个因素之间相互作用共同决定了结构的使用寿命。根据以上因素, 应从材料改性、构造优化、监测预警和维护管理四个方面采取系统的应对措施。

5 结语

寒区温差作用对钢筋混凝土梁服役性能影响很大, 其本质就是温度应力引起力学响应和冻融环境造成的耐久性劣化相互耦合的过程。温度梯度引起的自平衡应力是造成梁体开裂的主要原因, 冻融循环则是通过冻胀破坏的积累以及材料性能的退化来加快承载力的下降。温度裂缝萌生、冻融损伤累积、钢筋锈蚀加快形成耐久性退化的链式发展过程, 三者之间存在着互相加强的正反馈现象。控制策略要从材料抗冻性提高、温度裂缝控制、健康监测体系建立、全寿命维护管理四个方面一起推进, 从而形成系统的保障方案。未来的研究应该继续探究多因素耦合作用下耐久性退化模型的定量表述以及依靠监测数据开展剩余寿命预估的方法, 从而更好地引领寒区混凝土结构的设计和运维工作。

[参考文献]

- [1]王海朋.新疆寒区水工混凝土冻融损伤机理与抗冻性提升研究[J].水泥,2026(4):115-117.
- [2]李珍,熊泽斌.高寒地区水工混凝土防护修复技术与应用[J].长江科学院院报,2022,39(6):1-8.
- [3]曹琛,郑山锁,胡卫兵.冻融环境下混凝土结构力学性能研究综述[J].河南科学,2025,43(10):1466-1476.

作者简介: 周炳锐(1996—), 男, 汉族, 内蒙古呼伦贝尔人, 学士, 助理工程师, 就职于呼伦贝尔市海拉尔区交通运输事业发展中心。