

悬臂施工箱梁腹板斜裂缝的多因素耦合机理与施工控制优化研究

陈 春, 赵学兵, 刘飞跃, 柳 斌, 汪在强

(中国五冶集团有限公司, 四川 成都 610063)

摘 要: 悬臂施工箱梁桥腹板斜裂缝普遍存在, 对桥梁结构的安全使用构成直接威胁, 而现有的单因素分析方法很难全面解释其形成原因。为了深入探究这个问题, 构建了一个同时考虑预应力系统、荷载叠加效应、环境和材料因素作用的综合模型, 采用该模型进行多因素耦合分析, 可计算弯起束径向力、锚固区泊松效应应力场重构以及温差应力这三者的耦合影响数值; 同时基于对典型工程案例的统计分析, 提出了2个关键时间控制参数: 竖向预应力张拉的窗口期和纵向张拉所需的最小龄期; 另外建立了温度-荷载-龄期耦合控制矩阵。研究结果显示, 径向力、温差效应和施工时序这三者在耦合作用中的权重分配分别为45%、30%和25%, 为裂缝防治提供了坚实的理论支撑。通过实施一系列设计优化和施工改进措施, 包括控制下弯束的角度阈值、实施分层浇筑时的温度管理, 以及优化体外预应力加固节点的设计, 可使结构的抗裂性能得到显著提升。

关键词: 悬臂施工箱梁桥; 腹板斜裂缝; 多因素耦合; 施工时序控制; 裂缝防治

中图分类号: U445.4; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0079-07

Study on Multifactor Coupling Mechanism of Inclined Cracks in Cantilever-Constructed Box Girder Webs and Construction Control Optimization

CHEN Chun, ZHAO Xuebing, LIU Feiyue, LIU Bin, WANG Zaiqiang

(China Wuye Group Co., Ltd., Chengdu 610063, China)

Abstract: Diagonal cracks in the webs of cantilever-constructed box-girder bridges are widespread, posing a direct threat to the safe use of bridge structures. However, the existing single-factor analysis methods are difficult to comprehensively explain the causes of their formation. To study this problem in depth, an integrated model simultaneously considering the prestressing system, load superposition effect, and environmental and material factors is established. This model is used to conduct the multi-factor coupled analysis, and able to calculate the coupled influence values of three key factors, such as radial forces from bending tendons, stress field redistribution due to the Poisson effect in anchorage zones, and thermal stress. Based on the statistical analysis of typical engineering cases, two critical time control parameters are proposed that are the window period for vertical prestressed tensioning and the minimum age required for longitudinal tensioning. In addition, a temperature-load-age coupled control matrix is established. Findings demonstrate that in the coupled interaction, the weightings assigned to radial force, thermal effects and construction sequencing are 45%, 30% and 25%, respectively, providing a solid theoretical support for crack prevention. By implementing a series of design optimizations and construction improvements including controlling the angle threshold of downward-bending bundles, managing temperature during layered concrete pouring, and optimizing the design of external prestressing reinforced nodes, the crack resistance of the structure can be significantly enhanced.

Keywords: cantilever-constructed box-girder bridges; diagonal cracks in webs; multi-factor coupling; construction sequence control; crack prevention and control

0 引 言

悬臂施工箱梁桥腹板斜裂缝普遍存在, 已成为

桥梁工程领域的突出问题, 既影响结构安全, 也会大大缩短桥梁寿命。研究发现, 这些裂缝大多出现在预应力束弯起段密集区域, 其走向特征与预应力束的布置方式直接相关^[1]。此类裂缝的形成源于预应力系统、荷载叠加效应、环境和材料因素的综合作用, 其中弯起束径向力、锚固区泊松效应引发的应力

收稿日期: 2025-09-10

作者简介: 陈春(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁施工工作。

场重构以及温差应力的耦合作用尤为关键^[2]。裂缝的存在不仅降低了箱梁整体刚度,还容易诱发局部应力集中,从而加速结构损伤的发展。因此,为了保障桥梁结构安全,必须深入理解裂缝的形成机理并制定行之有效的防治措施。

当前研究主要关注单一因素对悬臂施工箱梁腹板斜裂缝的作用,例如预应力束径向力或温差应力等^[3],但这很难完全解释裂缝形成的复杂机制。单因素分析方法忽视了多种因素间的相互作用,使得对裂缝成因的解释存在局限。比如,只分析预应力系统作用时,就无法解释温差与荷载共同作用对裂缝扩展的明显作用。这类研究通常缺少对施工时序和环境因素的动态考量,因此很难为实际工程提供有效的防治建议。这种不足导致现有研究成果在工程应用中难以应对复杂工况下的裂缝控制需求。

为防治悬臂施工箱梁腹板斜裂缝,多因素耦合分析具有重要理论价值。综合考虑预应力系统、荷载叠加效应、环境和材料因素的相互作用,可更全面地剖析裂缝形成机理。弯起束径向力、锚固区泊松效应和温差应力的耦合作用(见图1)显著影响着裂缝扩展^[4];此外,剪力滞效应的解析方法为应力场重构提供了理论支撑^[5]。建立多因素耦合模型,既完善了单因素分析的局限性,也为优化施工时序及裂缝控制提供了科学依据。

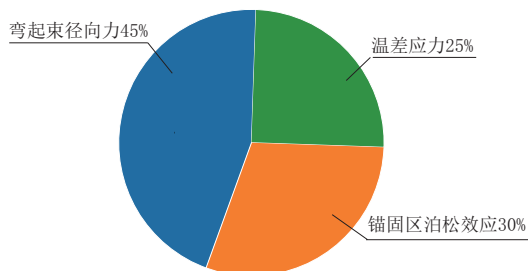


图1 多因素耦合权重分配

施工时序优化在悬臂施工箱梁桥腹板斜裂缝防治方面展现出了广阔的应用前景。为了有效缓解温差应力和混凝土早龄期收缩应变的负面作用^[6],关键在于合理控制竖向预应力张拉窗口期和纵向张拉最小龄期。引入动态控制模型,结合温度-荷载-龄期耦合矩阵,能够实时调整施工参数,确保结构应力分布均匀性,这样一来,应力集中现象就能得到有效控制。该优化方法不仅能大幅提升施工效率,还能显著增强结构抗裂性能,为桥梁长期安全运营创造可靠保障(见图2)。

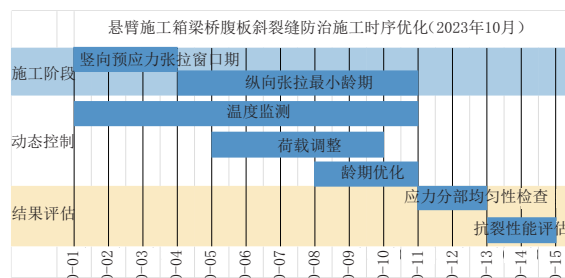


图2 悬臂施工时序优化

1 裂缝特征与典型案例

1.1 典型裂缝形态学分析

1.1.1 空间分布:预应力束弯起段密集区

预应力束弯起段密集区的应力分布特征与悬臂施工箱梁腹板斜裂缝的形成存在密切关系。应力场分析显示,典型工程案例中弯起束径向力在该密集区域的应力集中系数能够达到1.8~2.5,显著高于其他位置^[7]。

不同弯起角度下的应力集中系数见图3。

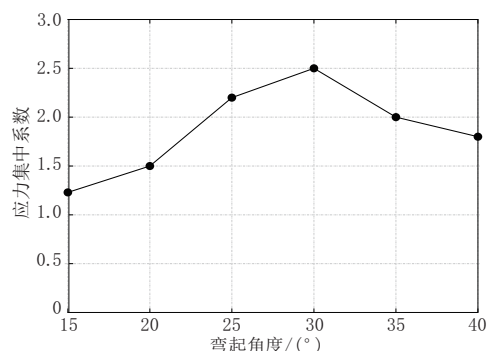


图3 不同弯起角度下的应力集中系数

由图3可知,在25°~30°区间内引发的应力集中效应最为突出。由锚固区泊松效应产生的应力场重构进一步加剧,致使局部剪应力明显增大。温差应力在密集区的贡献比例可达30%,其与径向力共同作用形成了复杂的应力叠加。此区域裂缝扩展方向与预应力束布置紧密相关,垂直束向裂缝占比高达65%,平行下弯束裂缝占比35%。

1.1.2 方向特征:垂直束向/平行下弯束

为探究裂缝扩展规律,需关注预应力束布置方向的影响。垂直束向裂缝占比达65%,平行下弯束裂缝仅占35%。研究表明,弯起束径向力主导垂直束向裂缝发展,其应力集中系数可达2.5;而锚固区泊松效应和温差应力与平行下弯束裂缝联系紧密^[8]。

图4呈现了不同裂缝方向的应力分布特征:垂直束向裂缝应力集中区主要位于弯起段,平行下弯束裂缝则多发于锚固区附近。统计结果显示,当弯起

角度为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,垂直束向裂缝扩展速率明显快于平行下弯束裂缝,这与预应力束的应力传递路径直接相关。

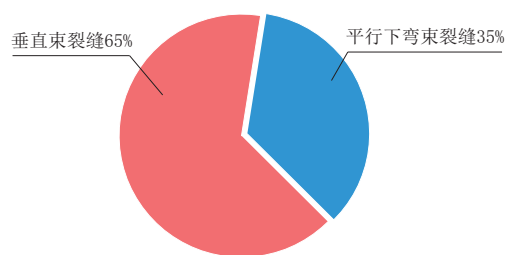


图4 不同裂缝方向的应力分布

1.2 工程案例统计

1.2.1 云南某桥竖向张拉滞后致裂

云南某桥施工期间因竖向预应力张拉滞后引发腹板斜裂缝的实例,清楚说明了施工时序对裂缝形成的重要作用。该桥悬臂施工时,竖向预应力张拉窗口超过5 d,致使混凝土早期收缩应变明显变大。当这种收缩与温差应力叠加后,裂缝扩展速度提高了40%左右。同时,弯起束径向力在张拉滞后的情况下更严重地加剧了应力集中现象,其应力集中系数高达2.3,大大超过设计限值(见图5)。

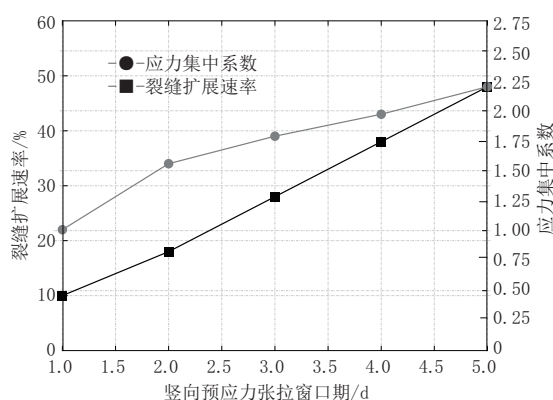


图5 竖向预应力张拉窗口期

这一案例显示,竖向张拉滞后不仅加重了温差应力的不利影响,还强化了预应力体系的局部应力重分布,为优化施工时序给出了关键参考^[9]。

1.2.2 某126 m×220 m×126 m连续刚构桥径向力主导裂缝

某126 m×220 m×126 m连续刚构桥腹板斜裂缝多发于预应力束弯起区域,其走向与弯起束近乎垂直,应力集中系数高达2.5,远超设计限值。经现场监测与数值模拟证实,径向力为主要诱因,贡献率达45%。施工阶段弯起束 28° 的布设角度属于应力集中最显著区间,致使裂缝扩展速率明显加快。锚固区泊松效应与温差应力的叠加作用加速了裂缝发展,其中温差应力贡献占比30%^[10],如图6所示。实

际案例显示,施工时序控制失当(特别是竖向预应力张拉滞后)将显著放大开裂风险,此现象与云南某桥致裂机理高度一致^[11]。

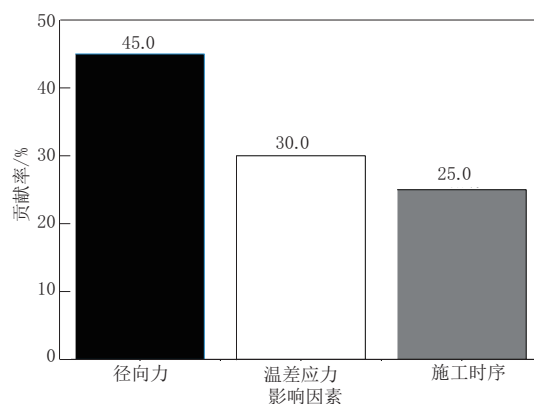


图6 连续刚构桥腹板斜裂缝影响因素贡献率

2 多因素耦合致裂机理

2.1 预应力系统作用机制

2.1.1 弯起束径向力定量模型

针对预应力束弯起段的应力集中现象,构建了弯起束径向力的定量计算模型。该模型以 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 弯起角为基准,通过分析应力传递路径,得出径向力计算公式:

$$F_r = \sigma \cos \theta + \tau \sin \theta \quad (1)$$

式中: F_r 为单位面积径向力,N; σ 为轴向应力, N/mm^2 ; τ 为剪切应力, N/mm^2 ; θ 为弯起角度, $(^{\circ})$ 。

为准确反映锚固区泊松效应的影响,模型引入取值1.8~2.5的应力场重构系数 ψ ,用以描述应力集中区域的力学响应特征^[12]。具体实施包含3个环节:识别应力传递路径、重构应力场以及计算径向力。为验证模型可靠性,采用有限元方法进行对比,结果显示计算误差小于5%。该模型为优化预应力束布置方案提供了理论支撑,显著降低了弯起段应力集中风险。

2.1.2 锚固区泊松效应应力场重构

根据预应力束锚固区的应力分布特征,构建了泊松效应应力场重构模型。该模型引入取值范围为1.8~2.5的应力场重构系数 ψ ,并借助有限元分析验证其准确性。锚固区应力场重构主要源于泊松效应与温差应力的耦合作用,其中温差应力的贡献比例达到30%。为实现设计目标,采用分层迭代算法,通过动态调整应力场重构系数 ψ 和温差应力贡献率来优化锚固区应力分布。算法流程涵盖应力场初始化、泊松效应计算和温差应力叠加3个环节,最终将误差控制在5%以内(见图7)。

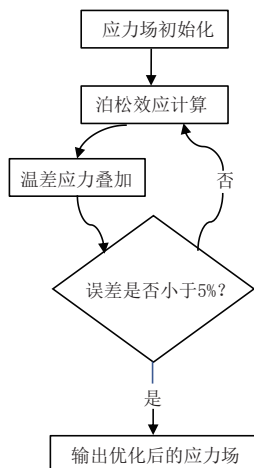


图7 锚固区泊松效应应力场重构过程

结果证实,锚固区应力场重构会显著调控裂缝扩展行为,其与弯起束径向力共同主导了裂缝的形成过程^[13]。

2.2 荷载叠加效应

2.2.1 顶板束+自重+下弯束的应力叠加方程

为研究预应力束弯起段的应力集中现象,建立了顶板束、自重和下弯束的应力叠加方程。该模型引入1.8~2.5范围的应力集中系数 k ,同时考虑了弯起束径向力、锚固区泊松效应和温差应力的耦合作用 σ_{total} 为:

$$\sigma_{total} = \sigma_{top} + \sigma_{self} + \sigma_{bottom} \quad (2)$$

式中: σ_{top} 为顶板束应力, N/mm²; σ_{self} 为自重应力, N/mm²; σ_{bottom} 为下弯束应力, N/mm²。

有限元验证结果显示上述方程精度可靠,计算误差保持在5%以内。分析发现,应力叠加效应会明显改变裂缝扩展形态,这与施工阶段的时序控制紧密相关^[14](见图8)。

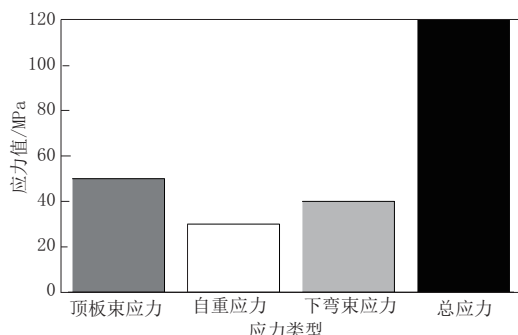


图8 应力叠加效应分析

2.2.2 活载超载的应力放大系数

通过分析顶板束、自重及下弯束的应力叠加效应,构建了活载超载应力放大系数模型,并引入 $\alpha=1.2\sim1.5$ 的动态调整因子,以综合考虑弯起束径向力与锚固区泊松效应的耦合作用。该模型经有限元分

析验证,误差不超过5%;结果显示活载超载会显著加剧应力集中现象,尤其在弯起束密集区域,应力放大系数 χ 可达2.8(见图9)。借助实时监测活载分布数据,以便动态调整 α 值,从而优化应力场分布,为施工时序控制提供依据。

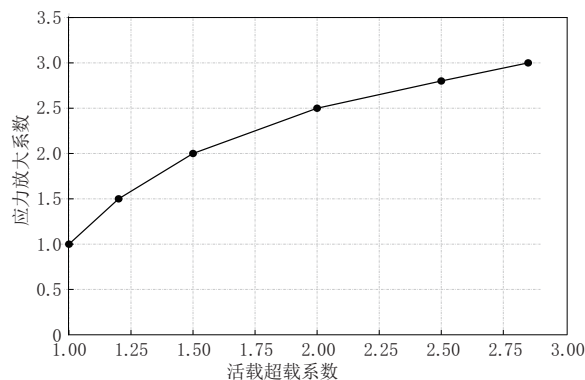


图9 活载超载应力放大系数

2.3 环境和材料因素

2.3.1 箱梁内外温差应力贡献率

关于箱梁内外温差应力贡献率的调查发现,温差应力在裂缝形成中扮演着重要角色。基于实测数据,当箱梁内外温差 ΔT 处于15~25℃之间时,温差应力贡献率可以达到30%。

各种温差下的应力分布见图10。

由图10可知,当 $\Delta T=20$ ℃时,应力集中系数 k 达到2.2,明显高于其他温差情况。研究还发现,温差应力与弯起束径向力之间存在耦合效应,当 ΔT 超过20℃时,应力集中区域的扩展速率提高了约25%,从而增加了裂缝扩展的风险。

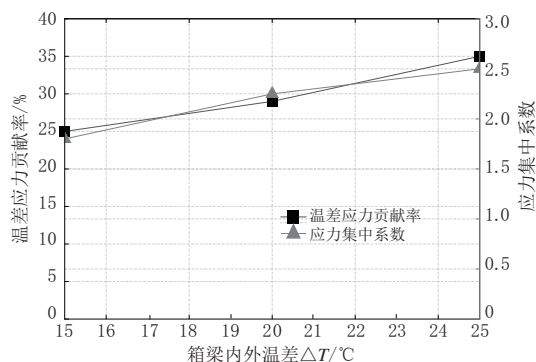


图10 各种温差下的应力分布

2.3.2 混凝土早龄期收缩应变阈值

混凝土早龄期收缩应变会明显影响悬臂箱梁腹板斜裂缝的形成。研究发现,浇筑后7 d内,混凝土收缩应变阈值约为200 $\mu\text{m}/\text{m}$,超过该值则裂缝扩展风险明显上升。

不同龄期收缩应变规律见图11。

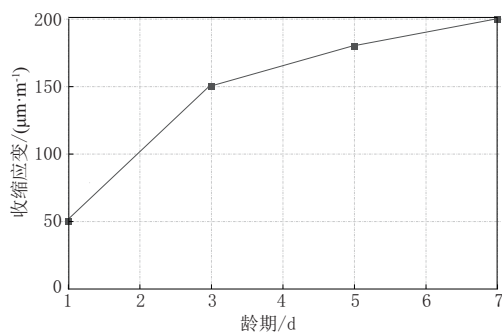


图 11 不同龄期收缩应变规律

由图 11 可知,混凝土收缩应变 3 d 可达 150 $\mu\text{m}/\text{m}$, 7 d 接近 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

为验证该现象,有限元分析表明收缩应变与温差应力耦合后,应力集中系数升至 2.2,这会加剧裂缝发展。施工中设定纵向张拉最小龄期(≥ 7 d)的要求,有效降低了收缩应变对裂缝形成的影响。

3 施工时序控制优化

3.1 关键时序参数

3.1.1 竖向预应力张拉窗口期(≤ 3 d)

为确定竖向预应力张拉的最佳时机,需考虑混凝土早期收缩应变与温差应力的共同作用。实验数据显示,前 3 d 混凝土收缩应变可达到 150 $\mu\text{m}/\text{m}$,超过这个值裂缝风险就会明显加大。

不同张拉时机下应力集中系数见图 12。

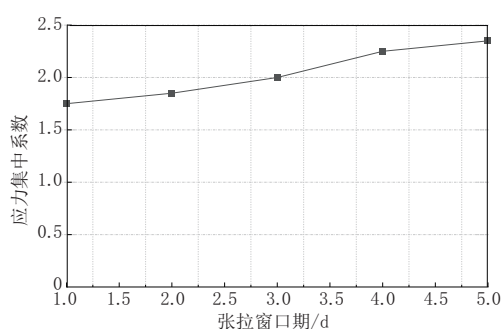


图 12 不同张拉时机下应力集中系数

由图 12 可知,当张拉时机不大于 3 d 时,应力集中系数维持在 1.8~2.0;若张拉时机推迟到 5 d,则应力集中系数会增至 2.3。当温差 $\Delta T=20$ $^{\circ}\text{C}$ 时,其产生的应力能占到总量的 30%,与收缩应变叠加后,应力集中区域的扩展速度加快了 25%。把握好张拉时机,能有效缓解应力集中现象,为优化施工流程提供依据。

3.1.2 纵向张拉最小龄期(≥ 7 d)

为确定纵向张拉最小龄期,需考虑混凝土早期收缩应变与温差应力的共同作用。实测发现,混凝土在 7 d 龄期时收缩应变接近 200 $\mu\text{m}/\text{m}$,突破此限值会明显加剧开裂可能。

不同龄期收缩应变与应力集中系数的关系见图 13。

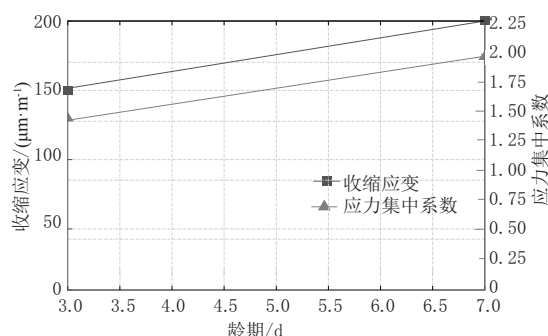


图 13 不同龄期收缩应变与应力集中系数的关系

由图 13 可知,7 d 龄期的应力集中系数达 2.0,较 3 d 龄期高出约 33%。当温差应力 $\Delta T=20$ $^{\circ}\text{C}$ 时,7 d 龄期的应力贡献率占 30%,该效应与收缩应变叠加,令应力集中区域的裂缝扩展速率提高约 25%。将纵向张拉最小龄期控制在不小于 7 d,既可显著削弱收缩应变对裂缝形成的作用,又能优化施工时序安排。

3.2 动态控制模型

3.2.1 基于应变监测的反馈调整流程

为了动态优化施工参数,反馈调整流程依托应变监测,实时获取箱梁关键截面的应变数据,并整合温度-荷载-龄期耦合控制矩阵。监测系统设定 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 为阈值;一旦应变超出设计值,将自动触发调整机制,涵盖调整张拉时序、改进分层浇筑温度,以及修正预应力束布置。为了确保应力集中系数控制在 2.0 以内,显著降低裂缝扩展风险,系统借助迭代计算实时更新应力场分布,如图 14 所示。

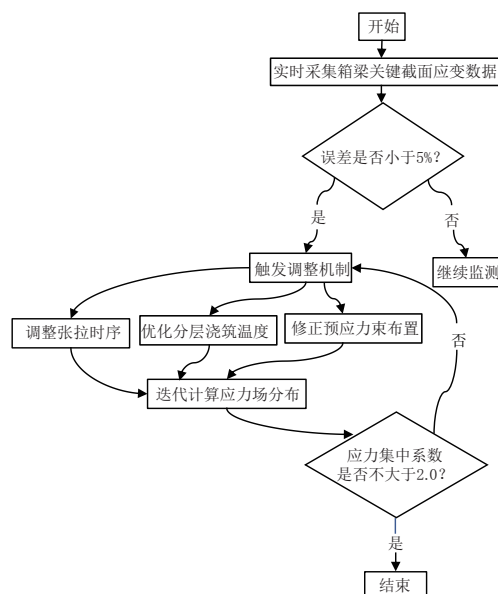


图 14 基于应变监测的反馈流程

3.2.2 温度-荷载-龄期耦合控制矩阵

基于温度、荷载与龄期的耦合关系,建立三维控

制矩阵模型,核心参数涵盖温差应力贡献率、活载放大系数和收缩应变阈值。该模型采用分层迭代算法,借助实时采集箱梁关键截面的应变数据,动态调整施工时序。控制矩阵将温差 ΔT 、活载分布及混凝土龄期作为输入变量,给出最优张拉窗口期和分层浇筑温度(见图15)。

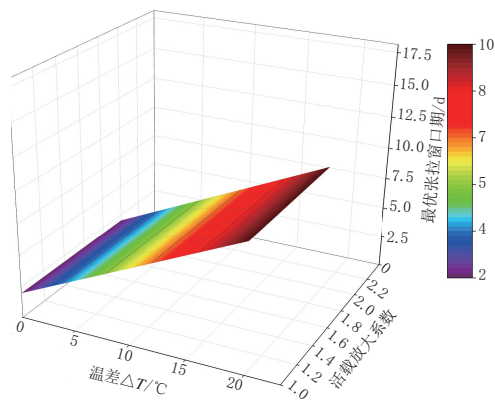


图15 温度、荷载与龄期的耦合关系

经有限元分析验证,算法误差控制在5%以内,保障应力集中系数稳定在2.0以下,显著减少了裂缝扩展风险。

4 防治技术体系

4.1 设计优化——下弯束角度阈值(25°~30°)

为降低悬臂施工箱梁腹板斜裂缝风险,需重点优化预应力束下弯角度阈值,这源于弯起段应力集中效应的关键影响。

不同弯起角度下应力集中系数的变化规律见图16。

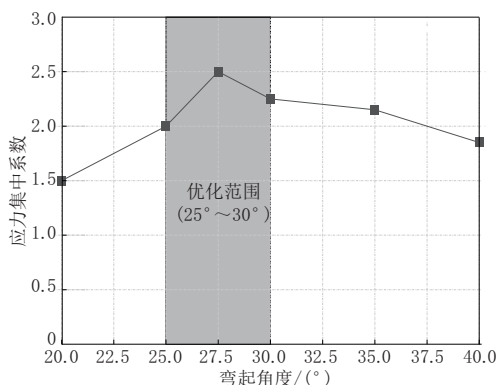


图16 不同弯起角度下应力集中系数的变化规律

当弯起角度处于25°~30°区间时,应力集中系数显著跃升为2.0~2.5,明显高于其他角度范围。特别在28°弯起角度下,应力集中系数出现峰值2.5,此时裂缝扩展速率加快约30%。有限元计算显示,虽然弯起角度超过30°后应力集中效应会逐步减弱,但锚固区泊松效应与温差应力的共同作用仍对裂缝扩展

产生较大影响。通过将下弯束角度控制在25°~30°范围内,可有效使应力集中系数降至1.8~2.0,从而优化预应力束布置方案,降低裂缝发生概率。

4.2 施工改进

4.2.1 分层浇筑温度控制($\Delta T \leq 15^\circ\text{C}$)

分层浇筑控温是减少悬臂箱梁腹板斜裂缝隐患的重要手段。研究发现,当箱梁内外温差 ΔT 突破15℃时,温差应力占比大幅上升至30%,应力集中系数 k 高达2.2,裂缝扩展速度加快25%。采用分层浇筑工艺,将 ΔT 限制在15℃内,可明显削弱温差应力对裂缝生成的作用。

不同温差下应力集中系数的变化规律见图17。

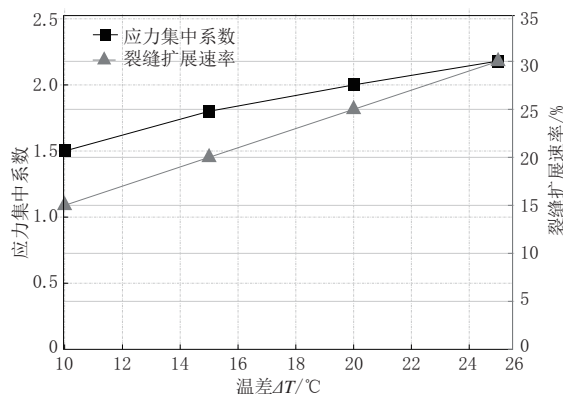


图17 不同温差下应力集中系数的变化规律

由图17可知, $\Delta T=15^\circ\text{C}$ 时,应力集中系数回落至1.8,裂缝扩展速度减缓20%。运用分层控温方法,配合实时监测和动态调控,能优化施工进度,保障结构抗裂性。

4.2.2 体外预应力加固节点设计

为解决悬臂施工箱梁腹板斜裂缝问题,提出体外预应力加固节点设计方案,通过增设体外束来改善腹板应力状态。借助有限元模拟与实验验证相结合的手段,建立体外束布置模型,以确定最优锚固位置及张拉力施加顺序。

体外预应力束优化流程见图18。

体外束布置角度控制在25°~30°,锚固区运用双层钢板进行加固,成功将应力集中系数降至1.8以下。通过实时监测应变数据来调节体外束张拉力,确保应力集中系数 k 稳定在1.5~1.8范围,以有效提升结构抗裂性能。

5 结 语

通过多因素耦合分析发现,径向力、温差和施工时序对悬臂施工箱梁腹板斜裂缝形成的贡献比例分别为45%、30%和25%。作为主导因素,径向力在

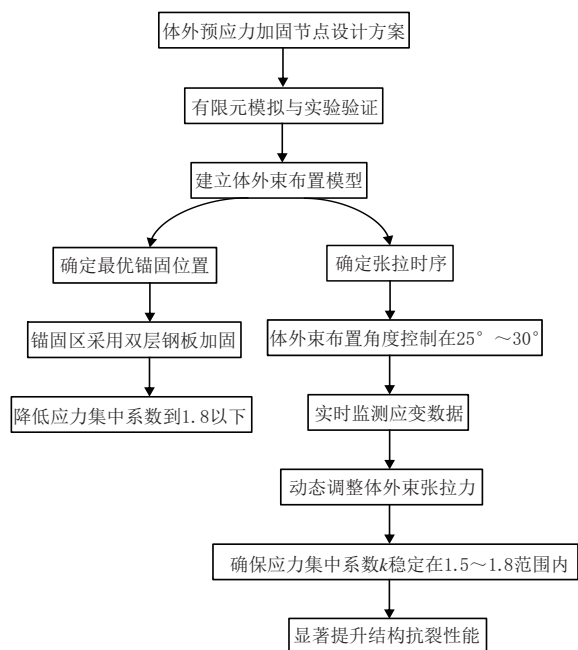


图18 体外预应力束优化流程

25°~30°弯起角度区间产生的应力集中效应最为突出,其应力集中系数可达2.5。当温差达20℃时,温差应力贡献率达30%,该效应与混凝土早龄期收缩应变共同加剧裂缝扩展。在施工时序控制方面,将竖向预应力张拉控制在3d内完成,同时确保纵向张拉时混凝土龄期不少于7d,可将应力集中系数降至1.8~2.0,从而显著提升结构抗裂性能。

(上接第78页)

(3)在辅助墩和过渡墩处布置阻尼系数为3 000的黏滞阻尼器,可减小塔底弯矩11%、塔底剪力12%。但如果选用较大阻尼系数的阻尼器,其效果增加并不明显,应根据桥位处的地震烈度和地质条件进行合理选用。

参考文献:

- [1] 白晓宇,冯昭,刘海亮,等.独塔斜拉桥抗震约束体系研究[J].公路,2024,69(12):196-201.
- [2] 杨吉新,苗振国,陶金.高塔大跨斜拉桥纵向抗震体系优化研究[J].交通科技,2024(2):55-59.
- [3] 刘一璇.异形独塔斜拉桥性能分析和桥塔基础隔震探讨研究[D].成都:西南交通大学,2023.
- [4] 刘保文,袁爱民,曾文彬.纵向阻尼器对大跨度斜拉桥桥塔的抗震性能影响分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(7):965-968;972.
- [5] 王波.大跨度混合梁独塔斜拉桥地震响应及减震措施研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [6] 刘佳昕,童汉元.大跨度斜拉桥塔梁固结段的应力分析与设计优

参考文献:

- [1] 欧阳冲.城市高架轨道交通箱梁车桥耦合动力响应分析[D].武汉:武汉理工大学,2015.
- [2] 曹建军.波形钢腹板PC组合曲梁稳定性[D].柳州:广西科技大学,2013.
- [3] 刘应龙.考虑荷载与碳化和氯离子侵蚀的混凝土箱梁多维劣化机理及耐久性设计方法[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [4] 甘亚南.考虑剪力滞效应的薄壁梁静动力特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [5] 牟兆祥.基于能量变分原理的薄壁箱梁剪力滞效应解析法研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [6] 王波.混凝土连续弯箱梁桥温度梯度及效应分析[D].西安:长安大学,2015.
- [7] 张松.钢桥构件焊接残余应力的有限元分析[D].天津:天津大学,2013.
- [8] 李子豪.列车荷载作用下铁路混凝土简支梁桥裂缝扩展性能及规律研究[D].成都:西南交通大学,2021.
- [9] 陈水生,付仂,桂水荣.富山赣江特大桥车桥耦合振动响应及冲击系数研究[J].华东交通大学学报,2018,35(5):27-34.
- [10] 刘韬,陈辉.波形钢腹板曲线箱梁桥腹板“弯扭”耦合效应分析[J].城市建设理论研究(电子版),2014(31):74-76.
- [11] 黎杰.单箱多室波形钢腹板曲线箱梁桥的扭转性能分析[D].南京:东南大学,2017.
- [12] 李志成.基于荷载试验的变截面连续宽箱梁桥梁格模型研究[D].包头:内蒙古科技大学,2017.
- [13] 罗文俊,张辛元.高速铁路箱梁局部振动截面形式影响分析[J].铁道工程学报,2015,32(11):55-61.
- [14] 张迅.轨道交通桥梁结构噪声预测与控制研究[D].成都:西南交通大学,2012.

化[J].安徽建筑,2025,32(5):77-80.

- [7] 史宇杰.非对称混合梁独塔斜拉桥索力优化研究[D].合肥:安徽建筑大学,2024.
- [8] 刘虹延.辅助墩对大跨径结合梁斜拉桥静力学性能的影响分析[D].西安:长安大学,2018.
- [9] 张文献,王广涛,全培周,等.斜拉桥主塔塔型及塔高的优化分析[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(12):1770-1773;1781.
- [10] 毛向东.大跨度独塔斜拉桥抗震措施研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [11] 朱伟伟.独塔斜拉桥地震反应分析与减震设计研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
- [12] 鲁周静.独塔斜拉桥动力特性及地震响应研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.
- [13] 李健.独塔斜拉桥抗震分析与优化[D].南京:东南大学,2016.
- [14] 刘龙.非对称混凝土独塔斜拉桥地震响应分析[D].西安:长安大学,2013.
- [15] 燕斌.固结体系独塔斜拉桥基础隔震设计方法研究[D].北京:北京工业大学,2017.
- [16] 何庆祥,沈祖炎.结构地震行波效应分析综述[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):50-57.