

桥梁预应力混凝土箱梁裂缝成因与防治

郭皓哲

新疆北新土木建设工程有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：桥梁预应力混凝土箱梁在薄壁截面、施工阶段和运营环境共同作用下，裂缝常出现在顶板、腹板、底板及锚固区，既改变结构受力，也削弱耐久性。本文分析混凝土收缩、浇筑振捣、张拉压浆、温度荷载、钢束锈蚀和疲劳损伤之间的作用关系，提出材料配制养护、张拉压浆工序、温度荷载分区和防腐排水维护措施。裂缝防治应把早期施工质量、运营环境和长期疲劳损伤放在同一受力链中处理，使处置重点由表面封闭转向受力恢复与耐久性保护。

【关键词】：桥梁工程；预应力混凝土箱梁；裂缝成因；裂缝防治；孔道压浆

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.003

引言

预应力混凝土箱梁抗扭刚度大、跨越能力强，常用于连续梁、连续刚构及城市高架桥。箱梁由顶板、腹板、底板和预应力孔道共同承担受力，薄壁闭口结构对收缩徐变、温度梯度、张拉偏差和车辆荷载较为敏感。裂缝连通水路或靠近钢束后，外观病害会转化为预应力损失、钢束锈蚀和疲劳扩展问题。裂缝成因识别应追溯材料、施工、环境和运营荷载的叠加关系，并把防治措施落实到配制养护、张拉压浆、温度荷载控制和耐久性维护。

1 桥梁预应力混凝土箱梁裂缝成因分析

(1) 箱梁混凝土材料收缩与浇筑振捣缺陷：桥梁预应力混凝土箱梁顶板、腹板和底板厚度差异明显，水化热、骨料级配和早期失水会让截面各部位产生不同体积变化。底板约束强，顶板暴露面大，收缩徐变被钢筋、波纹管 and 已硬化层限制后，拉应力集中在倒角、齿块根部和腹板交接区^[1]。浇筑振捣不足时，粗骨料在管道下方架空，浆体包裹不连续，孔隙和夹浆带削弱抗拉储备，早期裂纹沿施工冷缝、保护层薄弱区和底板纵向约束线扩展。(2) 预应力张拉偏差与孔道压浆缺陷：预应力张拉偏差表现为张拉顺序紊乱、摩阻损失偏大、锚具回缩异常和两端伸长量差异持续扩大，箱梁纵向压应力不能均匀传入顶板、腹板和底板^[2]。曲线孔道半径较小处接触压力增加，有效预应力不足会让跨中底板和支点腹板从受压储备薄弱处开裂；孔道压浆泌水、排气不畅和高点空腔又使水汽沿钢束迁移，锈蚀膨胀把裂缝持续推向锚垫板、齿块和保护层边缘。(3) 温度梯度与车辆荷载耦合作用：箱梁闭口薄壁截面对温度梯度敏感，日照使顶板升温快于腹板和底板，夜间降温又让表层收缩先发生，顶板横向裂缝和腹板斜裂缝在循环温差中反复张开。车辆荷载先经桥面传至顶板，再由腹板传入底板和支座区，

既有裂缝尖端随轮载开合而扩展。桥面不平整、伸缩缝跳车、支座偏位和超限车辆会放大局部冲击，使温度拉应力、剪应力和预应力损失在同一弱面叠加。(4) 钢束锈蚀与循环疲劳损伤累积：裂缝连通桥面铺装、泄水口或伸缩缝附近水路后，钢筋和预应力钢束周围的碱性保护环境逐步破坏。氯盐、水汽和氧气进入保护层，普通钢筋点蚀会形成锈胀压力，预应力孔道空腔、锚头封端不严和箱室积水又会加剧钢束局部腐蚀。车辆荷载、温度涨落和结构徐变长期作用时，裂缝尖端微区损伤持续累积，腹板斜裂缝向顶板倒角推进，底板纵向裂缝沿钢束方向延伸。

2 桥梁预应力混凝土箱梁裂缝防治措施

(1) 箱梁混凝土配制养护全过程管控：箱梁混凝土防裂应先控制收缩源和温升源，试配时同步校核胶凝材料用量、矿物掺合料、骨料含泥量和外加剂适应性，使工作性满足钢筋密集区浇筑，又避免高水胶比造成泌水干缩。顶板、腹板和底板分层下料时，入模温度、下料高度和振捣半径要围绕波纹管、倒角和锚固区布置，振捣棒不碰撞管道^[3]。收面后及时覆盖保湿，拆模时间结合内外温差和表面失水状态确定，早期温湿度稳定后，收缩裂缝起裂面会被压缩到局部缺陷范围内。

(2) 张拉压浆施工工序精细化处置：张拉压浆工序应把控制应力、有效应力、锚具回缩量、孔道长度、真空度、出浆压力、稳压时间和压浆密实度评分作为同一质量链管理。设计情景中，孔道长度覆盖 42~96m，出浆压力为 0.55~0.70MPa，稳压时间为 4~8min，锚具回缩量为 3~5mm^[4]。穿束前清理孔道，张拉前校核千斤顶、压力表和油泵匹配状态，分级加载时记录两端伸长差和异常响动；压浆时保持连续进浆、稳定排气和及时封孔，曲线束、长束、高差束及锚后孔道按工况调整真空辅助和稳压时间，使钢束与

梁体传力连续。张拉压浆控制情景见表1。

表1 张拉压浆工况与孔道质量控制情景

压浆工况	短直孔道	曲线孔道	长束孔道	高差孔道	锚后孔道	低温孔道
孔道长度(m)	42	68	96	74	55	63
真空度(kPa)	-82	-86	-88	-84	-80	-83
出浆压力(MPa)	0.55	0.62	0.70	0.66	0.58	0.60
稳压时间(min)	4	6	8	7	5	7
密实度评分(分)	92	89	86	88	90	87
锚具回缩量(mm)	3	4	5	4	3	4
控制应力(MPa)	1395	1395	1395	1395	1395	1395
有效应力(MPa)	1328	1306	1284	1301	1320	1296
损失系数	0.05	0.06	0.08	0.07	0.05	0.07

表1中,孔道长度由短直孔道到长束孔道增加时,出浆压力和稳压时间同步提高,反映长束与曲线孔道需要更强排气和持压条件;密实度评分较低的长束孔道对应较高损失系数,说明压浆连续性会直接影响有效应力保持。施工判读中,表内工况只能说明压浆质量的配置差异,张拉偏差还要转换为有效应力损失关系后才能进入裂缝风险判断。同一控制应力下,孔道摩阻、压浆空腔和锚具回缩会共同降低钢束传入箱梁截面的有效压应力,损失系数可把这些偏差压缩为可比较的无量纲结果。有效应力偏差可用式(1)核算。

$$\lambda = \frac{\sigma_{con} - \sigma_{eff}}{\sigma_{con}} \quad (1)$$

式(1)中, λ 为损失系数,单位为无量纲; σ_{con} 为控制应力,单位为MPa; σ_{eff} 为有效应力,单位为MPa。损失系数越大,钢束传入箱梁截面的有效压应力越低,跨中底板和支点腹板的抗裂储备越容易被温度荷载消耗;该关系只用于张拉压浆工况比较。

(3) 温度荷载裂缝分区限值防控:温度荷载裂缝防控应按箱梁部位分区设置处置重点。顶板承受日照和桥面铺装约束,施工期控制浇筑时段、覆盖保温和拆模顺序,运营期维护铺装层与防水层连续性;腹板和底板受箱室通风、支座约束和预应力孔道影响,巡查时把裂缝走向与支点、横隔板、齿块位置对应^[5]。

参考文献:

- [1] 燕保彬,刘旺兴.预应力混凝土箱梁早期裂缝成因及防治研究[J].施工技术(中英文),2023,52(18):62-66.
- [2] 孙高洋.预应力混凝土连续刚构桥箱梁裂缝成因及防治对策[J].交通世界,2023,(11):160-162.
- [3] 吴华.预应力混凝土箱梁施工技术在道路桥梁工程中的应用[J].城市建设,2026,(18):109-111.
- [4] 蔡亚玲,张颖,郭玉兰,等.预应力混凝土桥梁张拉施工质量影响因素与控制措施[J].工程技术研究,2026,11(11):155-157.
- [5] 李建霞.预应力混凝土桥梁施工中裂缝防治技术探讨[J].城市建设,2026,(10):84-86.

桥面坑槽、伸缩缝跳车和支座偏位应同步修复,荷载源与温度源同时受控后,既有裂缝开合幅度减小,新裂缝不易沿原弱面扩展。

(4) 防腐排水与疲劳损伤预防处置:防腐排水处置应先切断裂缝与水路的连通关系,保持桥面防水层、泄水孔、伸缩缝止水带和箱室排水孔畅通,锚头、齿块和底板低洼处不得积水。裂缝修补按宽度、深度和渗水状态选择封闭、灌浆或表面防护,贯通或活动裂缝先查明受力原因,再组合结构补强和防腐封护。处置后持续跟踪腹板斜裂缝端部、底板纵向裂缝和锚固区环向裂纹,必要时采用体外预应力、粘贴钢板或纤维复合材料补强。防腐排水与疲劳维护关系见图1。

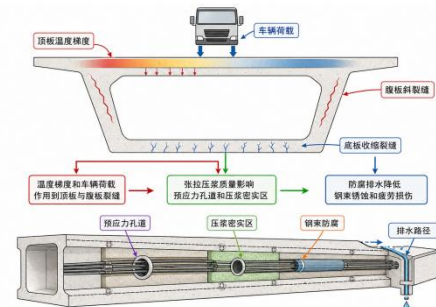


图1 桥梁预应力混凝土箱梁裂缝成因与防治关系示意

图1中,底板收缩裂缝、预应力孔道和排水路径共同显示水分进入箱梁后的迁移位置;钢束防腐和压浆密实区位于同一纵向通道,说明防腐排水与疲劳损伤预防必须同时处理裂缝封闭、孔道密实和锚固区排水。

3 结语

桥梁预应力混凝土箱梁裂缝成因与防治要同时识别材料收缩、施工偏差、温度荷载和耐久性损伤的叠加关系。混凝土收缩与浇筑振捣缺陷决定早期起裂面,张拉压浆偏差削弱预应力传递,温度梯度与车辆荷载促使裂缝反复开合,钢束锈蚀和疲劳累积放大长期风险。防治措施应从箱梁混凝土配制养护开始,延伸到张拉压浆工序、温度荷载分区管理和防腐排水维护。裂缝位置、孔道密实度、桥面排水和荷载状态共同纳入处置判断后,箱梁才能保持稳定受力和耐久储备。