

预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝成因调查与设计改进

吉伟涛

湖北交投建设集团有限公司道路分公司 湖北 武汉 430070

【摘要】：预应力混凝土箱梁因其跨越能力强、结构自重轻等优势，在桥梁工程中应用广泛。然而，腹板斜裂缝作为该类结构的常见病害，不仅影响结构的耐久性，还可能降低其承载能力。本文通过对多座桥梁预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝的现场调查，系统分析了裂缝的分布特征与成因，从设计角度提出了针对性的改进措施，为预防类似病害提供技术参考。

【关键词】：预应力混凝土箱梁；腹板；斜裂缝；成因调查；设计改进

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.053

1 引言

预应力混凝土箱梁具有良好的力学性能和经济性，在公路、铁路桥梁中占据重要地位。但近年来，随着服役时间的增长和交通荷载的日益繁重，不少桥梁的箱梁腹板出现了不同程度的斜裂缝。据不完全统计，我国建成通车5-10年的预应力混凝土箱梁桥中，约35%存在腹板斜裂缝病害，其中部分裂缝宽度超过0.2mm，已影响结构的正常使用。腹板斜裂缝的出现会导致水分、有害物质侵入梁体内部，引起钢筋锈蚀、预应力筋失效等连锁反应，严重时可能引发结构安全事故。因此，深入调查腹板斜裂缝的成因并从设计源头进行改进，对保障桥梁结构的安全耐久性具有重要意义。

2 预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝现场调查

2.1 裂缝分布特征

2.1.1 空间分布规律

本次调查选取了10座不同跨度（20m-50m）、不同荷载等级（公路-II级至公路-I级）的预应力混凝土箱梁桥，涵盖简支梁桥、连续梁桥等结构形式。通过无人机航拍与人工检测相结合的方式，对腹板裂缝进行全面排查，共统计裂缝237条，其中斜裂缝189条，占比79.7%。空间分布上，斜裂缝呈现显著的区域聚集性。在纵向位置上，72.5%的斜裂缝集中在梁端1/4-1/3跨径范围内，以30m跨径桥梁为例，85%的裂缝分布在距梁端6-10m区间；在竖向位置上，68.3%的裂缝分布于腹板高度的1/3-2/3区域（即距底板1.2-2.4m范围），该区域恰好是剪应力与弯曲应力叠加的高应力区。某25m简支箱梁桥的检测数据显示，梁端5m范围内每延米斜裂缝数量达3-5条，而跨中区域每延米仅0-1条，差异显著。

2.1.2 裂缝形态参数

斜裂缝的几何参数具有明显特征，裂缝倾角多在35°-55°之间，平均值为42.3°，与理论计算的主拉应力方向

（45°左右）基本吻合，验证了裂缝与受力状态的关联性。裂缝长度差异较大，短裂缝（<1m）占比41%，中长裂缝（1-3m）占比47%，长裂缝（>3m）占比12%，其中3条裂缝贯通腹板全厚（厚度35-50cm）。裂缝宽度采用裂缝宽度仪（精度0.01mm）测量，结果显示0.1-0.2mm的裂缝占比63%，0.2-0.3mm的占比25%，0.3-0.5mm的占比12%。值得注意的是，在重载车辆（轴载>10t）通过时，监测到裂缝宽度会瞬时增大15%-30%，如某0.2mm宽的裂缝在重载作用下扩展至0.26mm，卸载后恢复至0.21mm，呈现明显的动态变化特征。

2.2 典型工程案例

2.2.1 工程概况

某高速公路跨线桥为三跨预应力混凝土连续箱梁桥，跨径组合30m+40m+30m，桥面宽26m，双向四车道，设计荷载为公路-I级（汽车荷载效应系数1.0），于2015年10月建成通车。箱梁采用单箱双室截面，中跨梁高2.8m，腹板厚度40cm（梁端渐变至50cm），腹板配置HRB400级箍筋（ $\phi 12@15\text{cm}$ ）和纵向分布钢筋（ $\phi 12@20\text{cm}$ ），预应力体系采用15.2mm钢绞线（抗拉强度1860MPa）。

2.2.2 裂缝检测结果

2020年5月对该桥进行专项检测时发现，腹板斜裂缝主要集中在中跨梁端（0-10m）及边跨梁端（0-8m）区域，共检出斜裂缝87条，具体分布如下：中跨左侧腹板32条，最大宽度0.35mm，最长3.2m，倾角40°-45°；中跨右侧腹板35条，最大宽度0.32mm，最长2.8m，倾角38°-47°；边跨腹板20条，最大宽度0.25mm，最长2.1m，倾角42°-50°。通过钻芯取样（共取芯样12个）发现，50%的裂缝深度超过腹板厚度的2/3，其中3条已贯通腹板，存在钢筋锈蚀风险。结合荷载监测数据，该桥运营期间日均交通量15000辆，其中重载车辆（轴载>15t）占比20%，日均通行重载车约3000辆，远超设计预期的1500辆/日。

3 腹板斜裂缝成因分析

3.1 设计因素

3.1.1 预应力体系设计不合理

部分桥梁在设计时,腹板预应力筋布置不足或张拉控制应力偏低,导致腹板有效预压应力不足,无法抵消荷载作用产生的主拉应力。计算表明,当腹板有效预压应力低于 0.7MPa 时,在正常使用荷载作用下极易出现斜裂缝。

3.1.2 腹板厚度与配筋设计缺陷

腹板厚度设计过薄,会导致其抗剪能力不足。当腹板厚度与梁高之比小于 1/15 时,在剪力作用下易产生过大的剪切变形,引发斜裂缝。同时,普通钢筋配置不合理,如箍筋间距过大(超过 20cm)、纵向分布钢筋数量不足,也会降低腹板的抗裂性能。

3.2 施工因素

3.2.1 预应力施工质量偏差

预应力筋张拉时,若张拉顺序错误、张拉控制力不足或存在预应力损失过大等问题,会导致腹板实际预压应力低于设计值。现场检测发现,部分桥梁腹板预应力损失率超过 20%,远超规范允许的 10%限值,直接削弱了腹板的抗裂能力。

3.2.2 混凝土施工质量问题

混凝土配合比不当、坍落度控制不佳,会导致腹板混凝土密实度不足,存在蜂窝、麻面等缺陷,降低了混凝土的抗拉强度。同时,养护不及时或养护时间不足,会使混凝土早期强度增长缓慢,易产生收缩裂缝,为斜裂缝的扩展提供通道。某桥梁腹板混凝土养护仅持续 7 天,较规范要求的 14 天缩短一半,腹板裂缝出现时间明显提前。

3.3 运营环境因素

3.3.1 车辆荷载超限影响

车辆超载对腹板斜裂缝的发展影响显著。通过荷载试验发现,当车辆荷载为设计荷载的 1.2 倍时,腹板主拉应力增加 20%;达到 1.5 倍时,主拉应力增加 50%;达到 2.0 倍时,主拉应力增加 80%。某桥梁监测数据显示,在日均 300 辆超载 1.5 倍以上的车辆作用下,腹板斜裂缝宽度在 1 年内从 0.2mm 扩展至 0.35mm。除超载外,车辆冲击效应也会加剧裂缝发展。当车辆以 60km/h 速度通过桥面不平整路段时,冲击系数可达 1.4-1.6,远高于设计取用的 1.3,使腹板承受的瞬时剪力增大。长期反复的冲击作用,会导致裂缝尖端应力集中,加速裂缝扩展。

3.3.2 自然环境侵蚀

长期雨水浸泡会降低混凝土的强度和耐久性。雨水通过裂缝渗入腹板内部,使混凝土处于饱和状态,其抗拉强度会降低 10%-15%,同时还会引起钢筋锈蚀,锈蚀产物体积膨胀,进一步扩大裂缝宽度。冻融循环对寒冷地区桥梁影响尤为明显。当混凝土内部含水率超过 80%时,在 -10℃ 至 10℃ 的反复冻融作用下,会产生冻胀应力,导致混凝土表面剥落、内部开裂。

4 预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝的设计改进措施

4.1 优化预应力体系设计

4.1.1 合理布置预应力筋

根据腹板主拉应力沿高度方向的分布规律,采用分层分排的布置方式更能适应应力变化。对于 20-30m 中等跨径箱梁,可在腹板高度方向设置 3 层预应力筋,每层布置 1-2 束 15.2mm 钢绞线,形成立体受力体系。上层预应力筋距腹板顶部约 1/3 高度处,中层位于腹板中部,下层距腹板底部约 1/3 高度处,每米腹板总预应力筋数量不少于 3 束,以此确保腹板有效预压应力不低于 0.8MPa。

梁端 1/4 跨径范围内是剪力集中区域,需额外增加 1-2 束预应力筋。以 30m 跨径箱梁为例,梁端 8m 范围内每米腹板布置 4 束 15.2mm 钢绞线,通过调整预应力筋的水平间距(控制在 20-30cm),使预压应力分布更均匀。同时,预应力筋的锚固点应避开腹板与顶板、底板的交界部位,距离边角不小于 10cm,减少局部应力集中。

4.1.2 提高张拉控制应力

张拉控制应力的确定需综合考虑预应力筋的材质特性和结构安全储备。对于高强度低松弛钢绞线(抗拉强度标准值 1860MPa),在传统 0.7-0.75 倍抗拉强度标准值的基础上,可提高至 0.75-0.8 倍,即 1395-1488MPa。通过计算验证,该应力区间既能保证预应力筋在弹性范围内工作,又可使腹板有效预压应力提高 15%-20%。

施工阶段需进行分级张拉,初始张拉至控制应力的 10%进行持荷锚固,24 小时后再张拉至控制应力的 50%,最终在 72 小时内完成 100%张拉,减少预应力损失。某 30m 箱梁桥采用该方案后,腹板预压应力从 0.6MPa 提升至 0.9MPa,通车 3 年内未出现新的斜裂缝。

4.2 改进腹板截面与配筋设计

4.2.1 合理确定腹板厚度

腹板厚度设计需通过剪力验算和变形控制双重验证。对于 20m 跨径箱梁,梁高一般为 1.8-2.2m,腹板厚度取 30-35cm(厚

度与梁高比 1/15-1/14)；30m 跨径箱梁梁高 2.5-3.0m，腹板厚度 35-45cm (1/14-1/13)；40-50m 跨径箱梁梁高 3.5-4.5m，腹板厚度 50-60cm (1/12-1/11)。

大跨度箱梁 (40m 以上) 采用变厚度设计时，梁端腹板厚度比跨中增加 20%-30%。如 50m 跨径箱梁，跨中腹板厚度 50cm，梁端渐变至 65cm，通过折线过渡 (坡度不大于 1:5)，避免截面突变产生应力集中。施工图纸中需明确腹板厚度的渐变范围和具体尺寸，确保模板加工精度。

4.2.2 优化普通钢筋配置

箍筋采用 HRB400 级螺纹钢，直径根据跨径等级确定：20-30m 跨径用 10-12mm，30-40m 用 12-14mm，40-50m 用 14-16mm，间距统一加密至 10-15cm。箍筋形式采用封闭式，拐角处设置 135° 弯钩，弯钩直线段长度不小于 10 倍箍筋直径，确保与纵向钢筋的锚固可靠。

纵向分布钢筋沿腹板高度方向均匀布置，采用 12-16mmHRB400 级钢筋，间距 15-20cm，配筋率控制在 0.2%-0.3%。对于腹板高度超过 3m 的箱梁，在中部增设一道纵向加强钢筋 (直径 16-18mm)，形成“格栅式”配筋体系。某 40m 箱梁桥通过该方案，腹板抗剪承载力提高 25%，裂缝宽度控制在 0.15mm 以内。不同跨径箱梁腹板配筋建议值见表 1。

表 1 不同跨径箱梁腹板配筋建议值

箱梁跨径 (m)	20-30	30-40	40-50
腹板厚度 (cm)	30-40	40-50	50-60
箍筋直径 (mm)	10-12	12-14	14-16

参考文献：

[1] 洪华,金肃静,杨勇勇.悬臂施工箱梁腹板开裂成因研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(02):13-18.

[2] 彭卓.基于声发射理论的混凝土梁桥静力损伤试验研究[D].长沙理工大学,2017.

[3] 詹俊华,李选栋.纵、竖向预应力筋对预应力混凝土箱梁腹板主拉应力的影响分析[J].市政技术,2016,34(01):70-72+108.

[4] 郑开启,刘钊,秦顺全,等.预应力混凝土箱梁桥腹板斜裂缝成因及相关问题研究综述[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会,贵州省交通运输厅,贵州省公路学会.中国公路学会桥梁和结构工程分会 2015 年全国桥梁学术会议论文集.东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室;中铁大桥局集团有限公司,;2015:795-802.

箍筋间距 (cm)	12-15	10-12	10
纵向分布钢筋直径 (mm)	12	14	16
纵向分布钢筋间距 (cm)	20	15-20	15

4.3 考虑多因素耦合作用

采用 MidasCivil 建立精细化有限元模型，模拟车辆冲击系数 (取 1.3)、温度梯度 (顶板升温 25℃、腹板内外温差 15℃)、混凝土收缩 (按 600×10^{-6} 应变) 与徐变 (按 180 天龄期计算) 的耦合效应。计算结果显示，多因素叠加会使腹板主拉应力增加 30%-40%，设计中需将此部分附加应力纳入验算。在东北、西北等温差较大地区，腹板内侧设置 $\Phi 8@200 \times 200$ 的温度钢筋网，与纵向分布钢筋绑扎连接，抵抗温度应力产生的拉应变。同时，在箱梁外侧涂刷 2cm 厚聚氨酯保温层，降低昼夜温差对腹板的影响，某寒区桥梁采用该措施后，腹板温度应力降低 28%。

5 结论

综上所述，通过对预应力混凝土箱梁腹板斜裂缝的调查与分析，得出腹板斜裂缝主要分布在梁端 1/4-1/3 跨径、腹板高度 1/3-2/3 区域，其成因与设计不合理、施工质量差、运营荷载超限等因素密切相关。设计方面，预应力体系不完善、腹板厚度与配筋不足、荷载效应考虑不周是导致裂缝产生的主要原因。采取优化预应力体系、改进腹板截面与配筋设计、考虑多因素耦合作用等设计改进措施，可有效预防腹板斜裂缝的产生。建议在实际工程中，加强设计阶段的精细化计算，严格控制施工质量，同时加强运营期间的荷载管理和结构监测，确保预应力混凝土箱梁的安全耐久。