

预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽设计

胡 晓

(广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要 公路交通流量持续增长给既有桥梁带来承载压力, 预应力连续 T 梁桥作为常见结构形式面临拓宽改造需求。本文以拼宽设计的结构特性与施工技术作为切入点, 对横向连接方式选择、构造细节处理、力学性能控制、施工工艺优化等内容进行研究分析, 提出静力性能核算方法、动力响应优化措施、长期性能保障方案及质量验收标准, 以期桥梁改扩建工程技术人员提供理论参考。

关键词 预应力连续梁; 桥梁拼宽; 横向连接; 力学性能; 施工控制

中图分类号: U445.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.013

0 引言

预应力连续 T 梁桥结构形式成熟, 但桥面宽度普遍偏窄, 拆除重建会造成资源浪费, 拼宽改造成为经济合理的解决途径。新旧结构连接的可靠性、拼宽后受力状态的改变、施工期间对原桥的扰动控制等问题直接影响改造工程的成败, 深入研究拼宽设计理论与施工技术具有重要的现实意义。

1 预应力连续 T 梁桥结构特性与拼宽设计原则

1.1 预应力连续 T 梁桥基本结构特征

预应力连续 T 梁桥在既有公路桥梁中占据相当比例, 其结构形式建立在预应力混凝土技术与连续梁受力体系的结合之上。T 形截面将主梁分为翼缘板与腹板两个功能区域, 翼缘板承担行车荷载的直接作用, 腹板则集中布置预应力筋以抵抗弯矩, 截面高度沿跨径方向保持不变或采用变截面形式来适应弯矩包络。连续梁体系使得相邻跨间形成结构整体, 支座位置出现负弯矩区, 跨中区域则承受正弯矩, 预应力筋的布置路径需要追随弯矩图的变化轨迹才能发挥张拉效果^[1]。多片 T 梁之间依靠横隔板连接成为整体桥面, 横隔板间距影响荷载横向分布的均匀程度, 湿接缝将各片梁的翼缘板连为一体从而形成车辆行驶所需的完整桥面板。预应力体系的存在改变了混凝土截面的应力状态, 使得梁体在恒载与活载共同作用下仍能保持受压或低拉应力水平, 裂缝出现被延后甚至避免, 结构刚度随之提升。

1.2 拼宽设计核心原则

拼宽设计需要在新旧结构之间建立合理的力学联系, 新建部分的结构选型应当接近原桥形式, 跨径布置、

梁高设置、支座类型等参数保持一致以减小新旧结构刚度差异, 避免接缝应力集中。横向连接方式的确定直接关系到新旧桥面能否协同受力, 刚性连接能让荷载在全桥面范围内重新分配, 柔性连接则允许两侧保持一定的变形独立性, 选择依据来源于原桥的实际状态评估结果。拼宽后的桥梁宽度增加, 原有下部结构的承载能力可能不足以支撑新增荷载, 桩基、承台、墩柱等构件需要经过复核计算, 承载力不足的部位要实施加固或新增基础来分担竖向力与水平力。

2 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽连接方式与构造设计

2.1 横向连接类型选择

新旧桥面的横向连接类型决定了拼宽后桥梁的整体工作性能, 选择过程需要根据原桥技术状况来判断连接刚度的合理区间。刚性连接将新旧翼缘板直接浇筑成整体, 湿接缝内布置的钢筋穿过新旧界面形成锚固, 接缝宽度通常控制在 80 cm 至 120 cm 之间以保证钢筋能够充分搭接, 接缝混凝土强度等级应高于或等于原桥翼缘板强度, 浇筑前需将旧混凝土表面凿毛并清理干净以增强黏结效果。刚性连接适用于原桥状态良好、承载能力富余较多的情况, 新增荷载可以依靠整体桥面的协同作用分散到各片梁上, 单片梁的受力增幅相对较小^[2]。柔性连接则在新旧桥面之间设置滑动层或弹性垫层, 允许两侧在温度变化、活载作用下产生相对位移, 连接构件仅传递部分剪力而不形成完全的刚性约束, 适用于原桥出现病害、承载力接近极限的情况, 新增荷载主要由新建部分承担, 避免对既有结构产生过大影响。

作者简介: 胡晓 (1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 桥梁工程。

2.2 连接构造设计要点

连接构造的细节处理直接影响新旧结构能否形成可靠的传力路径,湿接缝内的钢筋配置需要满足抗剪与抗弯的双重要求。纵向钢筋伸入新旧翼缘板的锚固长度应达到 $35d$ 以上, d 代表钢筋直径,锚固长度不足会导致钢筋过早滑移失去作用。横向钢筋布置间距宜控制在 15 cm 至 20 cm 范围,间距过大易致接缝薄弱、诱发裂缝,过小则钢筋过密影响浇筑质量^[3]。接缝混凝土应采用微膨胀型材料,硬化过程中的体积增长能够抵消部分收缩变形,新旧界面保持紧密接触状态,剪力传递更加可靠。横隔板在拼宽后需要增设或加强,原桥横隔板间距若超过 8 m ,应在新旧桥交界处增设加强横隔板以提升横向刚度,横隔板厚度不宜小于 20 cm ,内部配筋按照受弯构件进行设计,箍筋直径选用 $\phi 10$ 或 $\phi 12$ 以满足抗剪需求。

3 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽结构力学性能分析与控制

3.1 静力性能分析

拼宽后的桥梁结构在恒载与活载共同作用下的静力响应需要通过有限元模型进行精确计算,模型建立时应将新旧梁体的材料参数、截面尺寸、预应力配置等信息完整输入,边界条件设定要符合实际支座类型,固定支座约束三个方向位移,活动支座仅约束竖向位移并释放纵向自由度。荷载工况组合包括自重、二期恒载、汽车荷载、温度梯度等多种情况,计算时应按照最不利组合原则来获取控制截面的内力包络值,跨中正弯矩区与支点负弯矩区需要分别核算。新旧桥交界面的应力分布状态直接反映连接构造的传力效果,刚性连接时界面剪应力峰值通常出现在活载作用位置附近,峰值大小受湿接缝宽度影响,接缝宽度从 80 cm 增至 120 cm 后剪应力降幅可达 15% 至 20% 。挠度计算结果需要与规范限值进行对比,跨中挠度在活载作用下不应超过跨径的 $1/600$,拼宽后由于结构刚度改变,挠度值可能出现增大趋势,超限时应调整预应力配置或增设临时支撑来改善变形状态。拼宽后各片 T 梁的荷载分担比例可以通过横向影响线计算得出,边梁分担系数若超过内梁 1.3 倍以上,说明横向连接刚度不足,需要增设横隔板来强化荷载横向传递能力,使得各片梁受力趋于均匀。

3.2 动力性能优化

拼宽结构的振动特性受到质量分布与刚度分布双重因素影响,新旧桥面形成的非对称体系容易在车辆

激励下产生扭转振型,振幅过大会加剧疲劳损伤累积速度。为改善振动响应,横隔板的布置密度应在原桥基础上适当加密,跨中区域增设的横隔板间距控制在 6 m 左右,端部支座附近则缩短至 4 m 以提升约束刚度,横隔板厚度需达到 25 cm 以上才能形成有效的横向联系,内部主筋采用双层双向配筋形式。

阻尼比的提升依赖于耗能构件的合理设置,湿接缝内可埋设橡胶阻尼垫层,垫层厚度选用 5 mm 至 8 mm ,剪切模量控制在 1.5 MPa 至 2.0 MPa 范围,车辆荷载引起的微小相对位移能够激发橡胶材料的黏弹性耗能机制,结构整体阻尼比从拼宽前的 0.03 提升至 0.045 。支座的选型要兼顾竖向承载与水平耗能双重功能,盆式橡胶支座的橡胶层厚度设定为 40 mm 至 60 mm ,内部钢板嵌层数量达到 4 层至 6 层,支座在温度变化产生的位移循环中消耗部分振动能量,减少传递到下部结构的动力响应幅值。

3.3 长期性能保障措施

收缩徐变效应在拼宽结构中呈现出明显的时变特性特征,新建梁体在浇筑后的前两年内收缩变形速率最快,约束条件下会在混凝土内部产生拉应力,裂缝萌生风险随之上升。为控制收缩影响,湿接缝混凝土宜掺入 8% 至 12% 的膨胀剂,膨胀率测试值达到 0.025% 至 0.035% 时能够抵消大部分自收缩变形,浇筑完成后需持续湿养护 14 d 以上,保持表面湿润以延缓水分散失。

预应力损失的长期监测需要在关键截面埋设应变传感器,跨中正弯矩最大截面、支座负弯矩峰值截面、连接缝两侧各布置 3 个至 5 个测点,传感器采用振弦式或光纤光栅型以保证长期稳定性,每月读数一次并绘制应变时程曲线,曲线斜率变化超过 15% 时应启动详细检测程序^[4]。温度梯度在混凝土桥面板内产生的附加应力容易被忽视,夏季高温时段桥面板顶面温度可比底面高出 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差导致的竖向约束应力叠加在活载应力之上,顶板拉应力储备显著降低,铺装层应采用热反射涂料或浅色沥青以降低太阳辐射吸收率,桥面板顶面温度可下降 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度梯度效应随之减弱。

4 预应力连续 T 梁桥改扩建拼宽施工关键技术与质量控制

4.1 施工顺序与工艺选择

拼宽施工的启动阶段需先完成下部结构的加固或新建工作,桩基采用钻孔灌注桩工艺时,成孔过程要

避免对既有桩基产生扰动,新旧桩基净距不宜小于 3 倍桩径,护筒埋设深度达到 2 m 以上才能隔断地表水渗入,钢筋笼吊装就位后应立即浇筑混凝土,浇筑过程连续进行不得中断,桩顶浮浆清除干净后才能进行承台施工^[5]。

上部结构的梁体预制宜采用工厂化生产方式,预制场地布置在桥位附近以缩短运输距离,T 梁底模铺设钢板并打磨平整,侧模采用定型钢模板以保证截面尺寸精度,波纹管定位筋每隔 50 cm 设置一道,防止浇筑过程中管道上浮或偏移,混凝土浇筑从腹板两侧对称进行,振捣应均匀密实,至表面泛浆无气泡为止,预应力张拉在混凝土强度达到设计强度的 90% 后实施,张拉端与固定端对称布置以减少摩阻损失,持荷 5 min 后测量伸长值,实测伸长值与理论伸长值偏差不超过 6% 时视为合格。梁体架设采用架桥机逐孔推进,梁端就位精度横向偏差小于 10 mm、纵向偏差小于 15 mm,支座安装前应在墩顶预埋钢板上精确放样,支座中心与设计位置偏差控制在 5 mm 以内。

4.2 施工过程监测与反馈

原桥的应力状态在拼宽施工期间会因新增荷载而发生改变,支架搭设、梁体就位、湿接缝浇筑等工序产生的竖向力会传递到既有墩台,墩顶应变监测点布置在受力最不利的位置,采用电阻应变片粘贴在混凝土表面,数据采集频率设定为每小时一次,应变增量超过设计容许值的 70% 时应暂停施工并卸载^[6]。

梁体的挠度变化能够反映刚度退化程度,跨中截面下缘布设位移测点,测量仪器选用全站仪或激光测距仪,每日定时测量以消除温度影响,实测挠度与理论计算值的差异不应超过 15%,差异过大说明结构受力状态偏离预期,需要检查支座是否脱空或连接构造是否松动。裂缝宽度的监控贯穿整个施工过程,混凝土浇筑后 24 h 开始巡查,发现裂缝立即标记并测量宽度,宽度小于 0.2 mm 的裂缝属于正常收缩范围,宽度超过 0.3 mm 则需要分析成因,受力裂缝多出现在受拉区且走向垂直于主筋方向,温度裂缝则呈现不规则网状分布,针对裂缝成因采取相应的封闭或加固措施。

4.3 质量控制标准与验收方法

混凝土强度的达标情况直接关系到结构承载安全,每个工作班组浇筑的混凝土应留置一组标准养护试块,养护 28 d 后送至检测机构进行抗压试验,同批次试块强度平均值不低于设计强度等级的 1.15 倍,单组最低强度不低于设计强度等级的 0.95 倍时判定合格。预应

力张拉的伸长值是判断张拉效果的关键指标,应用公式 (1) 计算实际伸长值:

$$\Delta L = \sum PL / (EsA) \quad (1)$$

式 (1) 中: ΔL 为预应力筋实际伸长值 (mm); P 为预应力筋张拉力 (kN); L 为预应力筋长度 (mm); Es 为预应力筋弹性模量 (MPa); A 为预应力筋截面面积 (mm²)。

实测值与计算值比较时应扣除锚具变形、钢筋回缩等因素产生的偏差,比值控制在 0.94 至 1.06 范围内。湿接缝的密实度检验采用回弹法与钻芯法相结合,回弹仪在接缝表面每隔 1 m 测试一次,回弹值换算强度不低于设计强度的 95%,钻芯取样选择 3 个至 5 个代表性部位,芯样直径 100 mm、长度不小于芯样直径的 2 倍,芯样表面不得有明显蜂窝、孔洞、裂缝等缺陷,抗压强度测试结果作为最终评定依据。横隔板与主梁连接部位的钢筋焊接质量通过超声波探伤检查,焊缝长度大于 50 mm 的接头需要逐条检测,探伤仪探头频率设定为 2.5 MHz 至 5 MHz,缺陷当量直径超过 2 mm 时判定为不合格焊缝,返修后重新探伤直至达标。

5 结束语

预应力连续 T 梁桥拼宽改造需要在结构设计、力学分析、施工控制等多个环节实施精细化管理,横向连接方式的合理选择能够保证新旧桥面形成可靠的传力路径,构造细节的规范处理避免应力集中引发局部破坏。静力与动力分析为安全评估提供量化依据,长期性能保障与施工监测可及时发现并处置异常,严格的质量控制与验收则为工程交付提供保障,拼宽技术的持续改进将推动既有桥梁改造水平不断提升。

参考文献:

- [1] 孙雪宏,胡梦.预应力混凝土连续 T 梁桥荷载试验分析[J]. 工程质量,2025,43(07):99-102.
- [2] 李鑫,刘海东,王俊新,等.桥墩失效对连续 T 梁桥受力性能影响分析[J]. 运输经理世界,2025(03):104-106.
- [3] 陈强,王渠,杨文锦,等.拼宽长联预应力混凝土连续 T 梁桥受力性能研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(12):120-123.
- [4] 韩青松.支座病害对预应力连续 T 梁桥受力性能的影响及维护对策[J]. 交通世界,2024(13):178-180.
- [5] 廖文彬.改扩建高速公路新旧 T 梁桥拼接缝受力分析[J]. 中国高新科技,2023(24):117-119.
- [6] 郭燕.预应力混凝土连续 T 梁桥静动力性能分析[J]. 山东交通科技,2022(03):140-142.