

装配式单跨简支斜转正 T 梁结构受力分析

张秋石

浙江公路水运工程咨询集团有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ME.2026070018

摘 要 : 城市路网交叉口常受征地、管线限制, 常规正交桥梁占地大、施工周期长。单跨简支斜转正 T 梁依靠长短主梁可在一跨内完成斜交线形过渡, 工业化优势显著, 但不等跨主梁带来显著弯扭耦合, 易出现支座脱空、梁端扭转、湿接头开裂等病害, 正交梁简化算法难以适配。本文依托 30m 跨、45° 单跨斜转正 T 梁工程, 采用 MIDAS/Civil 建立 30°、45° 两组梁格有限元模型, 开展多工况耦合计算, 分析支座、主梁、湿接头受力规律。结果显示斜交角越大受力失衡越严重, 常规工程斜交角宜控制在 30° 以内; 钝角长梁与钝角湿接头为薄弱区域。据此提出主梁腹板差异化加厚、梁端加密抗扭配筋、湿接头配置横向预应力、锐角支座增设抗拔限位、预制梁对称拼装等设计与施工优化措施, 可为浙江同类单跨斜转正 T 梁设计与施工提供理论支撑。

关 键 词 : 斜转正桥梁; 装配式 T 梁; 梁格法; 弯扭耦合; 有限元受力分析

Stress Analysis of Prefabricated Single Span Simply Supported Inclined to Normal t-Beam Structure

Zhang Qiushi

Zhejiang Highway and Water Transport Engineering Consulting Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : Urban road network intersections are often limited by land acquisition and pipeline restrictions, and conventional orthogonal bridges occupy a large area and have a long construction period. A single span simply supported inclined to normal T-beam can complete a diagonal transition within one span by relying on long and short main beams, which has significant industrial advantages. However, unequal span main beams bring significant bending torsional coupling, which is prone to diseases such as support detachment, beam end torsion, and wet joint cracking. The orthogonal beam simplification algorithm is difficult to adapt to. This article relies on the 30m span and 45° single span inclined to normal T-beam project, and uses MIDAS/Civil to establish two sets of beam grid finite element models at 30° and 45°, to carry out multi condition coupling calculations and analyze the stress laws of supports, main beams, and wet joints. The results show that the greater the skew angle, the more severe the force imbalance. The skew angle of conventional engineering should be controlled within 30°; The obtuse angle long beam and the obtuse angle wet joint are weak areas. Based on this, design and construction optimization measures such as differentiated thickening of the main beam web, increased anti torsion reinforcement at the beam end, transverse prestressing of wet joints, addition of anti pull limit for acute angle supports, and symmetrical assembly of prefabricated beams are proposed, which can provide theoretical support for the design and construction of similar single span inclined to normal T-beams in Zhejiang.

Keywords : inclined to normal bridge; prefabricated T-beam; liangge method; bending torsional coupling; finite element force analysis

前言

城乡路网交叉口、下穿通道普遍存在平面斜交约束, 采用正交桥梁在跨路、跨河等节点需加大跨径跨越, 工程成本高、施工周期长。装配式斜转正桥梁分为两类布置形式: 一是本文研究的单跨独立斜转正简支 T 梁, 依靠一跨内长短主梁形成平行四边形平面; 二是多跨渐变斜交桥, 二者受力机理差别较大。相较于普通斜桥, 斜转正桥梁各片主梁跨径不一致, 弯扭耦合作用显著, 易出现钝角支座脱空、梁端扭转开裂、横向湿接缝破损等三类病害。当前行业对正交、常规等长斜交装配式梁桥研究较为成熟, 但针对不等梁长单跨简支斜转正异型装配式结构的弯扭耦合、接缝应力失衡系统性精细化研究较少。本文结合实体工程有限元模拟, 剖析结构内力分布规律, 针对性解决三类型病害设计控制难点, 提升装配式桥梁结构耐久性与安全储备。

一、装配式斜转正桥梁结构体系与受力机理

（一）斜转正桥梁结构构造形式

装配式斜转正桥梁上部结构多采用预制小箱梁、T梁两种主流形式，本文研究对象为浙江地区应用更广的单跨独立斜转正简支预制T梁。桥梁平面呈平行四边形，桥梁中心线与支承盖梁法线形成斜交角，沿斜交钝角至锐角方向，各片预制主梁长度线性递减，仅依靠本跨长短主梁即可独立适配斜交平面、完成斜转正线形过渡。主梁之间设置横向湿接缝、横向预应力钢束形成整体桥面，下部采用盖梁+双柱墩、板式支座支撑体系。

与常规斜桥最大区别在于，普通斜桥各主梁长度完全相同，仅整体斜置；斜转正桥梁依靠主梁长短差异匹配斜交轮廓，主梁跨径不等导致荷载横向传递路径紊乱，扭矩、剪力分布不均匀。

预制构件可实现工厂标准化生产，仅调整梁长即可适配不同斜交角度，模板复用利用率高，现场仅浇筑横向湿接头与墩顶现浇层，能大幅缩短现场现浇施工作业时长，具备工业化施工优势；但相较于主梁等长的传统普通斜桥，斜转正桥梁长短主梁存在刚度差异，加之横向连接整体刚度偏弱，会进一步加剧弯扭耦合效应，这也是该类单跨斜转正桥型区别于常规斜桥的核心受力控制难点^[1]。

（二）斜转正桥梁核心受力机理

单跨简支斜转正T梁为静定结构，竖向荷载下纵向弯曲与桥面扭转同步发生，形成强弯扭耦合受力体系，长短主梁产生的全部扭转、不平衡竖向反力均由本跨支座与横向连接独立承担，四大核心受力缺陷按控制优先级分述如下：

（1）钝角支座反力集中效应：竖向汽车偏载、恒载作用下，钝角区域支座承担绝大部分竖向反力，锐角支座反力偏小，极端车辆偏载工况易出现锐角支座脱空，引发梁体翻转风险；

（2）主梁附加扭矩作用：长短主梁跨径不同，桥面荷载横向分配不均，长梁扭矩显著大于短梁，梁端、跨中截面同时承受弯矩与扭矩，主拉应力增大，易产生斜向裂缝；

（3）横向湿接头受力薄弱：横向湿接头为现浇二次浇筑构件，刚度低于预制主梁，在扭转、剪切共同作用下，接缝位置出现应力集中，长期行车荷载易出现接缝渗水、开裂病害；

（4）温度次内力：日照温差、年温差作用下，长短主梁收缩变形不一致，横向约束产生附加温度扭矩，进一步恶化梁端受力状态^[2]。

二、工程实例与有限元模型建立

（一）工程概况

本文研究对象为某公路下穿装配式斜转正T梁桥，采用单跨简支布置，依靠长短差异化主梁实现斜交平面适配、独立完成斜转正线形过渡；单跨标准跨径30m，单跨平面最大斜交转换角45°。上部采用5片预制预应力T梁；主梁长度由钝角向锐角依次递减，最长主梁30.42m，最短主梁28.16m。全桥混凝土统一采用C50强度等级；预应力采用 ϕ s15.2钢绞线，张拉控制应力

1395MPa。下部结构采用钢筋混凝土盖梁，圆柱墩，板式橡胶支座，设计荷载为公路-I级。

桥梁平面斜交导致各主梁荷载分配差异大，设计阶段需重点验算支座反力、主梁扭矩、横向湿接头应力，故采用有限元梁格法开展精细化受力分析。

（二）MIDAS/Civil 梁格模型构建

（1）梁格划分与单元定义

采用梁格法模拟桥面整体受力，纵向梁格对应5片预制T梁，横向梁格模拟横向现浇湿接头与桥面现浇层，纵向、横向梁格采用弹性连接模拟接缝刚度，实现弯扭耦合效应精准计算。纵向梁单元考虑预应力钢束、截面变刚度；横向梁单元仅考虑现浇混凝土抗弯、抗剪刚度，忽略纵向预应力作用。

（2）材料与荷载参数

混凝土弹性模量C50取 3.45×10^4 MPa，C40取 3.25×10^4 MPa；钢绞线弹性模量 1.95×10^5 MPa。荷载工况按照《公路桥涵设计通用规范》划分：①恒载（自重、桥面铺装、护栏）；②公路-I级汽车荷载（居中、钝角侧偏载、锐角侧偏载三种工况）；③整体升降温 $\pm 25^\circ\text{C}$ ；④预应力张拉等效荷载。荷载组合采用承载能力极限状态基本组合、正常使用极限状态频遇组合^[3]。

（三）边界约束条件

墩顶支座采用竖向约束+水平弹性约束模拟板式橡胶支座，释放梁端转动自由度；桥台位置约束竖向、横向位移，纵向设置滑动约束，还原简支支承真实边界，避免约束失真造成内力计算偏差。

三、有限元计算结果与受力规律分析

（一）支座反力分布规律

三种汽车荷载工况下支座反力计算结果显示：恒载单独作用时，钝角侧1#主梁支座反力最大，数值为1620kN；锐角侧5#主梁支座反力仅945kN，支座反力差值达675kN。钝角侧汽车偏载工况下，1#主梁支座反力增至2186kN，5#主梁反力降至612kN，锐角支座反力大幅降低，存在脱空隐患；车辆居中布置时，各支座反力差值缩小，但钝角支座仍承担42%总竖向荷载。

规律总结：单跨斜转正简支T梁支座竖向反力分布极不平衡，车辆向钝角侧偏置会进一步放大受力差异；钝角支座需选用高承载力板式支座，锐角支座配套竖向抗拔限位装置，避免支座脱空风险。

（二）主梁弯矩与扭矩分布特征

（1）跨中弯矩

承载能力极限状态下，长主梁跨中最大正弯矩8620kN·m，短主梁跨中弯矩6310kN·m，长短主梁弯矩差值2310kN·m。同等跨径30m正交单跨简支T梁跨中弯矩7150kN·m，斜转正最长主梁弯矩较正交梁增大20.6%，主要由附加扭矩耦合作用导致截面等效弯矩提升。

（2）主梁扭矩

汽车偏载工况下，1#长主梁梁端最大扭矩、5#短主梁梁端扭矩差值明显，扭矩沿钝角至锐角呈递减分布规律，扭矩峰值集中

于主梁两端支点截面，跨中扭矩水平更低。在弯扭耦合共同作用下，梁端截面主拉应力达到较高水平，逼近 C50 混凝土抗拉控制限值，是主梁抗裂设计的关键控制截面。

受力结论：结合单跨斜转正 T 梁有限元多组斜交角参数对比计算结果，长短主梁扭转内力差异显著，钝角侧长梁受弯扭耦合作用影响更明显；针对梁端高应力区域，需通过加密箍筋、增设专用抗扭钢筋的方式提升截面整体抗扭承载力^[4]。

（三）横向湿接头应力分析

横向湿接头横向正应力、剪应力提取结果表明：车辆钝角偏载时，靠近钝角的 1#、2# 主梁间湿接头最大主拉应力 1.45MPa，超过 C40 混凝土正常使用抗拉限值；靠近锐角湿接头应力仅 0.53MPa。湿接头应力集中原因为长短梁竖向变形差产生错动，扭转作用进一步放大接缝剪切应力。

（四）斜交角度对结构受力的参数影响

前文仅针对 45° 单跨独立斜转正 T 梁实体工程完成单工况受力分析，为定量揭示斜交角度、横向预应力两大关键参数对单跨简支斜转正结构受力的调控规律，本节建立多组对比模型开展参数化分析。

横向湿接头横向正应力、剪应力提取结果表明：车辆钝角偏载工况下，钝角侧主梁间湿接头拉应力水平显著高于锐角区域，长短主梁竖向变形差引发接缝错动，叠加扭转效应后进一步加剧接缝剪切应力集中。结合不同横向预应力配置、不同斜交角度多组参数模型对比计算可知，未配置横向预应力的现浇接缝拉应力控制指标难以满足耐久使用要求。

优化方向：通过在横向湿接头布置通长横向预应力筋，可有效提升接缝整体协同刚度，显著削弱长短梁扭转错动带来的附加拉应力，从源头降低接缝开裂、渗水病害发生风险。

四、装配式斜转正桥梁结构优化设计与施工控制措施

（一）上部预制主梁结构优化

结合同一斜交角度下多组腹板厚度对比模型计算结果：腹板厚度提升可明显降低主梁梁端扭矩与截面主拉应力，钝角长梁扭转控制需求更高。据此提出优化方案：

（1）区分长短梁腹板厚度，钝角侧长主梁腹板加厚至 22cm，短主梁腹板统一采用 18cm；同时对全桥梁端 1/4 跨区段加密抗扭箍筋，箍筋间距由 15cm 缩小至 10cm，通过截面加厚 + 配筋加密双重措施抵抗附加扭矩；

（2）对比有无通长纵向预应力模型内力差异，增设主梁顶、底板通长纵向预应力筋可有效提升截面抗弯、抗扭综合刚度，显著削减弯扭耦合作用产生的主拉应力；

（3）建立长短梁端部构造差异化、标准化两组模型对比，统一预制梁端部现浇加厚段构造尺寸，能减少拼装后的竖向变形差，方便横向湿接头整体浇筑施工。

（二）横向连接体系优化

通过多组横向连接参数对比模型开展量化分析，分别对比无横向预应力、配置不同根数预应力筋、不同现浇层厚度工况的接

缝应力、主梁内力分布规律，得出以下优化措施：

（1）对比无横向预应力、单根 $\Phi 25$ 、两根 $\Phi 25$ 预应力筋三种方案，横向湿接头配置 2 根 $\Phi 25$ 通长横向预应力筋、张拉控制应力取 0.6fptk 时，约束长短梁相对扭转错动效果最优，接缝拉应力降幅明显；

（2）对比 8cm、12cm 两种墩顶现浇层厚度模型，现浇层加厚至 12cm 并布设双层钢筋网片后，桥面横向整体刚度提升，车辆荷载横向分配更均匀，各主梁内力差值明显缩小。

（三）下部支座与盖梁优化措施

（1）钝角支座选用加高型大承载力橡胶支座，锐角支座配套竖向限位抗拔装置，限制梁体抬升脱空；

（2）斜转正盖梁钝角区域加厚配筋，增大盖梁截面尺寸，抵抗支座集中反力产生的局部冲切应力；

（3）支座布设时向钝角侧适度偏移，平衡竖向荷载，小幅缩小支座反力差值。

（四）现场拼装施工受力控制

（1）预制梁吊装顺序优先架设锐角短梁，后吊装钝角长梁，避免单侧堆载造成盖梁偏心受力；

（2）横向湿接头同步整体浇筑，禁止分段分次浇筑，防止新旧混凝土收缩差产生附加次内力；

（3）湿接头养护周期不少于 14d，达到设计强度后方可进行桥面铺装施工，避免早期扭转荷载损伤接缝。

在常规优化措施基础上，还需结合斜转正桥梁弯扭耦合、受力不均的结构特性，强化精细化施工管控与全周期防护设计。在工厂预制阶段，需严格控制长短主梁整体线形与截面精度，对梁端斜面、拼接接触面进行精细打磨找平，严格把控构件尺寸偏差，有效消除现场拼装错位产生的附加扭转应力，保障装配式主梁整体拼接刚度与结构整体性。同时湿接头浇筑应选择温度平稳时段施工，避开高温暴晒与低温寒潮环境，有效降低混凝土收缩徐变产生的次生温度内力，减少接缝早期微裂缝的产生概率。

桥面附属施工过程中，必须遵循对称、均衡、同步的施工原则，桥面铺装、防撞护栏等附属工程需双侧同步推进，禁止单侧集中堆载施工，避免偏心荷载进一步加剧梁体扭转变形。针对桥梁长期服役病害特征，可在钝角高应力区域增设柔性缓冲构造，优化局部荷载传递路径，缓解车辆往复荷载造成的结构疲劳损伤。同时建立关键部位常态化监测体系，重点跟踪支座沉降、梁体扭转变形及湿接头应力变化，实现隐患早发现、早处置。

（四）单跨斜转正 T 梁线形控制与竣工验收管控

针对长短梁跨径与刚度差异问题，需采用差异化预拱度布设方案，根据各片主梁受力变形特征设置对应预拱值，改善桥面线形不均问题。预应力张拉采用分级对称张拉工艺，减缓瞬时应力带来的侧向扭转残余变形。在工程验收阶段增设斜转正桥梁专项验收标准，严控梁端高差、接缝密实度、支座偏移等关键指标。通过全方位精细化管控，可有效削弱弯扭耦合不利影响，规避脱空、开裂、不均匀变形等病害，显著提升桥梁整体受力性能与耐久服役水平^[6]。

五、结语

本文以30m跨单跨简支装配式斜转正T梁桥为依托,采用梁格有限元法开展多工况受力分析,明确该类桥型受力特征:钝角支座反力集中、长主梁扭矩显著偏大、横向湿接缝应力集中,且斜交角度增大将持续加剧受力不均。对比30°、45°两种工况可知,45°属于受限特殊方案,斜交角超过30°后弯扭失衡效应急剧放大,常规工程建议控制斜交角不超过30°;通过腹板厚度、抗扭配筋、横向预应力多参数分析,证实差异化主梁构造、配置

横向预应力、增设支座限位可有效削弱不利内力,提高结构安全储备。

单跨斜转正T梁存在跨径差,不能直接采用正交梁简化计算方法,设计需通过精细化梁格模型开展弯扭耦合验算。该类桥型能适配复杂路口征地约束,预制拼装优势明显。本文基于多参数对比计算总结的内力分布规律与优化控制措施,可为同类装配式斜转正T梁桥结构设计、现场施工提供受力理论支撑,对提升公路装配式桥梁整体耐久性具有工程实用价值。

参考文献

- [1] 刘浩,周凯.大角度装配式斜转正小箱梁桥受力特征及参数影响分析[J].公路交通科技,2025,42(02):98-105.
- [2] 陈明远.横向预应力对斜转正装配式梁桥扭转性能改善研究[J].工程技术研究,2025,10(11):76-79.
- [3] 王景龙.市政简支斜转正桥梁支座反力失衡与限位优化设计[J].城市道桥与防洪,2025(07):134-137+142.
- [4] 李泽宇.不同斜交角预制斜转正箱梁弯扭耦合效应有限元分析[J].公路与汽运,2025(04):89-93.
- [5] 张航.装配式斜转正桥梁横向湿接头受力病害及加固对策[J].交通世界,2025(18):102-104.