DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260422

钢-混凝土混合结构立柱T构桥在匝道中的应用

杨庆卫
[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要： 匝道中的钢弯桥是工程中常见结构,是立交设计的关键节点。设置结构高度较低且无盖梁的钢T构桥,可实现更大的桥下通行空间,降低立交枢纽中控制节点的结构高度,减少桥梁长度,从而减小工程造价。相对钢连续梁,钢T构桥还具备减小活载下支座负反力、有效避免弯梁倾覆等优点。钢T构桥的设计难点在于钢上部结构与混凝土下部结构的结合段设计及梁柱钢节点设计。为此,设置钢-混凝土结合面布置在立柱中部的混合结构立柱,以避免钢结构在土体中检修维护困难的问题;且因接触面远离应力扰动区,可按照平截面假定计算截面受力,通过设置竖向预应力实现接触面无拉应力;同时通过板单元分析模型论证了梁柱钢节点的构造合理性与传力有效性。

关键词： 匝道钢梁;T构桥;板单元;钢-混凝土混合结构立柱;梁柱钢节点;弯梁倾覆
中图分类号： U448.17　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1009-7716(2026)11-0193-05

Application of Steel-Concrete Composite Structural Column T-Frame Bridge in Ramps

YANG Qingwei
[Tongji Architectural Design(Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Steel curved girders in ramps are common structures in engineering and serve as key nodes in interchange design. The adoption of steel T-frame bridges with lower structural height and no bent caps can create larger under-bridge clearance, reduce the structural height of control nodes in interchange hubs, and shorten the bridge length, thereby lowering the engineering cost. Compared with steel continuous girders, steel T-frame bridges also have advantages such as reducing negative bearing reactions under live loads and effectively preventing the overturning of curved girders. The design challenges of steel T-frame bridges lie in the design of the joint section between the steel superstructure and the concrete substructure, as well as the design of beam-column steel joints. For this purpose, the use of composite structural columns with the steel-concrete interface arranged in the middle of the columns avoids the difficulty of inspecting and maintaining steel structures in soil. And the interface is far away from the stress disturbance zone, so the sectional stress can be calculated in accordance with the plane section assumption, and zero tensile stress on the interface can be achieved by setting vertical prestress. At the same time, the rationality of the structure and the effectiveness of force transmission of beam-column steel joints are verified through the plate element analysis model.

Keywords: ramp steel girder; T-frame bridge; plate element; steel-concrete composite structural column; beam-column steel joint; overturning of curved girder

0　引　言

T构桥在铁路桥[1]、高墩[2]等条件下应用广泛;其具有结构稳定性与承载能力突出、施工效率高且经济性显著、适用跨径范围广等优点。钢桥在立交匝道桥中应用广泛;其具备轻质高强、抗弯扭能力强、施工速度快、适应复杂跨径需求、抗震性能优越等优点。匝道中的弯梁易发生支座脱空、梁体位移等病害,甚至出现倾覆事故[3-9]。

有关墩梁连接方面的研究,一部分聚焦于抗震和动力分析[10-14],另一部分则聚焦于抗倾覆分析及常规构造难以满足抗倾覆要求时采用的固结体系设计[15-18]。文献[19-23]针对固结于承台上的钢立柱进行了静力和动力分析,且没有考虑钢立柱的后期防锈蚀等问题。上述研究也没有从工程总体经济性等多角度发掘钢T构桥的适用性和优越性。

钢T构桥综合了T构和钢梁的优点,还具备桥下净空相对大、总体造价低、可减小活载下支座负反力、有效避免弯梁倾覆和梁体滑移等优点。本文以

收稿日期：2026-04-18
作者简介：杨庆卫(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

一实际工程为例，介绍其设计要点、关键节点设计及优势。

1　工程背景和方案比选

1.1　工程背景

某立交工程中，A匝道斜向跨越地面快速道路B，道路中心线半径为240 m，桥宽9.8 m，工程所在地区基本地震动加速度峰值为0.05g。桥梁平面布置见图1。

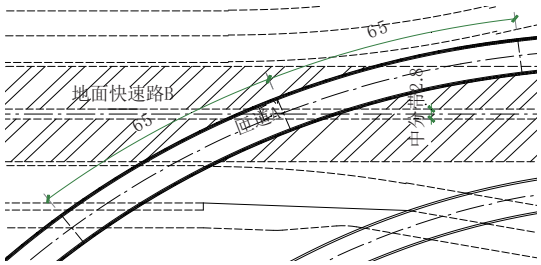


图1　桥梁平面布置（单位：m）

由于用地紧张，匝道平面线形难以优化，需布置2孔65 m+65 m的桥梁。考虑到施工周期及对地面道路通行的影响，此等规模的匝道弯梁采用钢桥是合理的方案。

为减少造价，A匝道跨越地面快速路后应尽快落地，因此中墩桥面高程是一个控制工程造价的关键因素。受到场地附近高压铁塔、厂房等限制，道路B中分带宽度总宽不大于2.8 m，而常规盖梁横向宽度远大于此宽度；由于中墩盖梁投影面下方为地面快速路，因此应尽量降低相关结构高度。

1.2　方案比选

按照常规设计，中墩采用盖梁柱式墩，上部结构采用支点梁高3.2 m的钢箱梁，则结构总高度为3.2 m+2.4 m=5.6 m。若采用无盖梁或立柱无扩大头的下部结构，则结构总高度为3.2 m。

桥梁连续梁横断面、墩梁固结断面见图2、图3。

设计中对以下3种结构方案进行比选：

（1）下部结构为花瓶墩，上部结构为钢连续梁，中墩设置双支座。

（2）下部结构为等截面圆墩，上部结构为钢连续梁，中墩设置单支座。

（3）下部结构上半截立柱为钢立柱与钢梁固结，立柱下半截为混凝土结构。

对以上3个方案从受力、造价等进行比选，如表1所示。

从增加弯桥抗倾覆能力角度分析，方案三优于

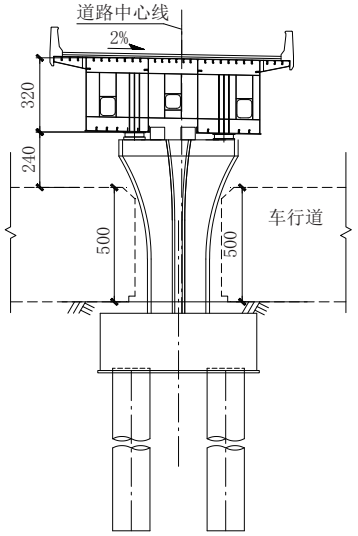


图2　桥梁连续梁横断面（单位：cm）

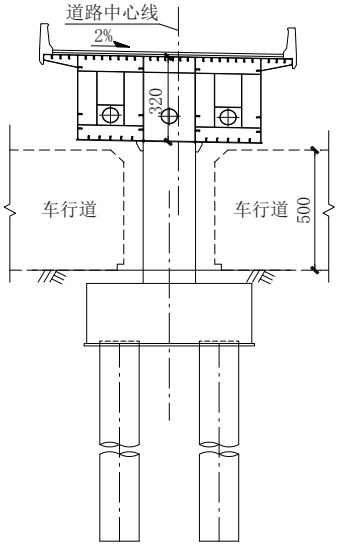


图3　墩梁固结断面（单位：cm）

表1　结构方案比选表

比选内容	方案一：中墩双支座的连续梁	方案二：中墩单支座的连续梁	方案三：钢T构
优势	施工工艺成熟，对精度相对较低	结构总高度较低	结构总高度较低；抗倾覆能力强
劣势	支座易脱空，需要在边墩和中墩进行压重	抗倾覆能力全部由边墩支座提供，内侧支座易脱空；通过设置支座偏心和拉大间距等措施，边支点还需要长度为20 m的压重；边墩支座抗水平剪力能力需加强	在中高烈度地区应用时，固结墩基础费用较大
经济性	较差。对比无盖梁方案，引桥长度增加约50 m	较好	较好
比选结论	不推荐	不推荐	推荐

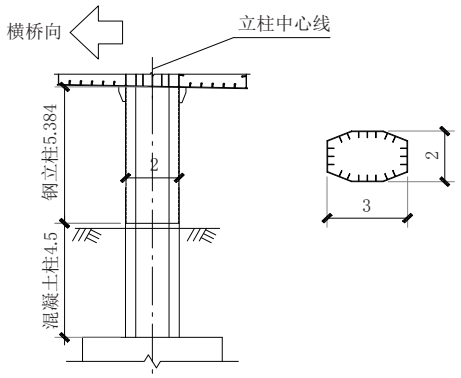
方案二，且两者造价接近；从整个工程造价的角度进行分析，方案三比方案一节省305万元。因此，推荐

采用方案三。

2　墩梁刚接节点设计和计算

2.1　墩梁节点设计

立柱总体布置和钢立柱标准横断面如图4所示。而钢结构与混凝土结构的分界面设置在立柱中部、土层上方约0.5 m处，原因有以下4点：



（a）钢立柱布置图　　（b）钢立柱横断面

图4　中墩钢立柱总体布置图（单位：m）

（1）墩梁节点处受力复杂。填充混凝土+抗剪连接件、钢筋焊接在钢结构上的连接方式传力途径不清晰且存在后期混凝土开裂难以检修的问题。而钢结构直接相连的方式具有传力途径清晰、施工质量可控、后期可检修的优点。因此在墩梁节点处，采用钢立柱与钢梁连接的设计。

（2）分界面避开墩梁节点的应力扰动区。

（3）立柱中部相对于立柱根部内力值更小。

（4）钢-混交接面设置在土层上方，方便后期重新涂装、检修并有利于耐久性。

主梁与立柱主要通过2道内腹板和2道横隔板（横梁Ha）传力。主梁采用双箱双室横断面；2道内侧腹板A与立柱外壁板对应；支点处设置3道横隔板，除分孔线处横隔板Hb外，其余2道横隔板Ha与立柱外壁板对应。再通过局部加劲板等设置，使得梁柱传力明晰且均匀。

节点处箱梁底面板件、板单元模型中主要传力板件和立柱、Ha横隔板及附近板件示意图见图5至图7。

2.2　墩梁节点计算

节点计算通过总体纵向模型和墩梁节点板单元局部模型结合进行。提取总体模型的计算结果，以纵梁单元的墩顶最大剪力、墩顶最大弯矩为计算工况，将相关内力作为荷载施加在局部模型的两端，如图8所示。

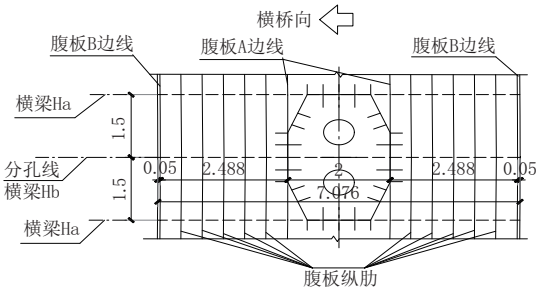


图5　节点处箱梁底面板件示意图（单位：m）

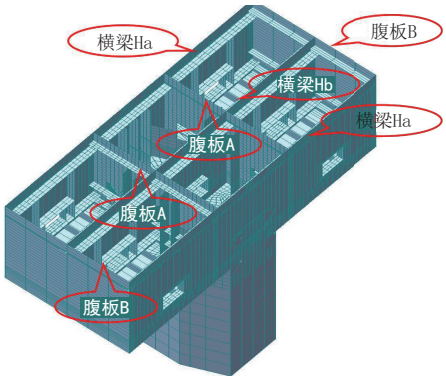


图6　板单元模型中主要传力板件和立柱示意图

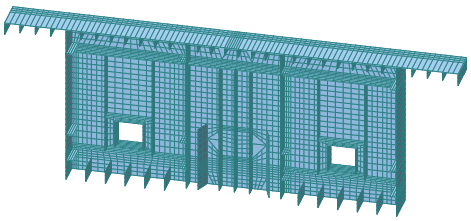


图7　Ha横隔板及附近板件示意图

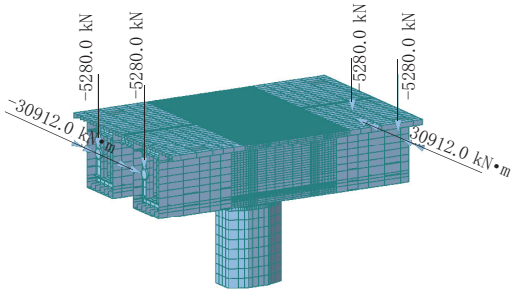


图8　板单元模型

板单元模型的主要计算结果（不考虑极小范围的局部应力集中）见图9至图12。

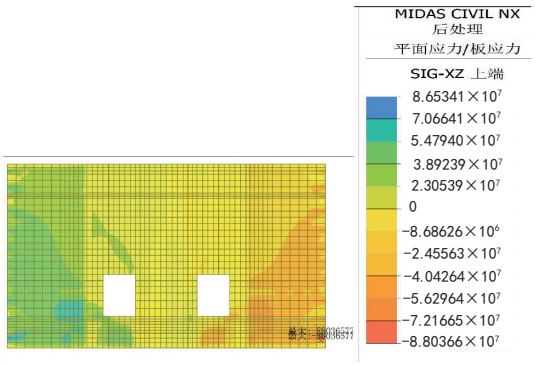


图9　内侧腹板剪应力（单位：Pa）

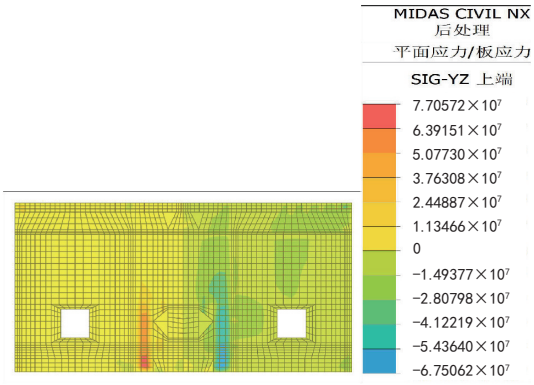


图10　横梁Ha腹板剪应力(单位：Pa)

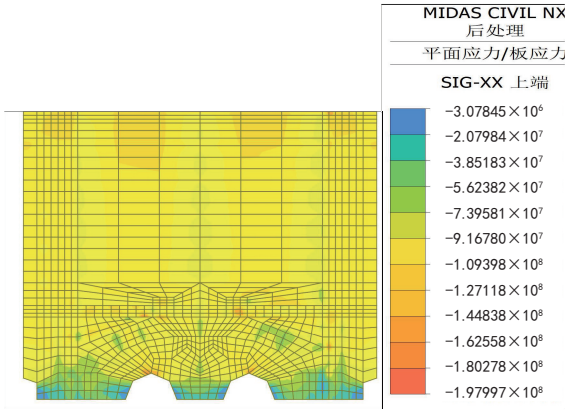


图11　1/2底板纵向正应力(单位：Pa)

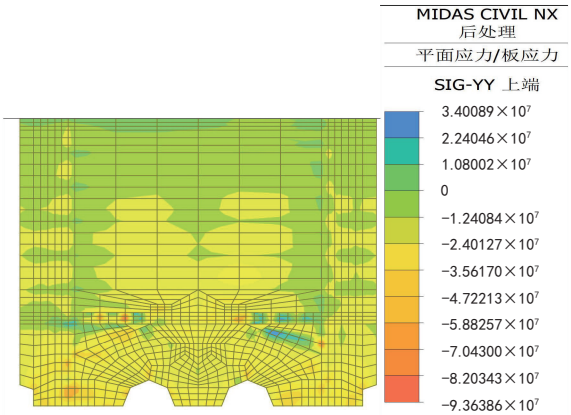


图12　底板下缘横向正应力(单位：Pa)

由图9可知，基本组合纵梁内腹板最大剪应力为88 MPa，满足要求。

由图10可知，基本组合横梁Ha腹板最大剪应力为77 MPa，发生在立柱、纵梁腹板三者交点附近，满足要求。

由图11可知，除了面积约占3%的应力集中区域，底板纵向正应力绝对值小于144 MPa。考虑到钢结构屈服后可应力重分布，因此正应力满足要求。

由图12可知，底板横向正应力绝对值小于94 MPa。考虑到钢结构屈服后可应力重分布，因此正应力满足要求。

3　立柱钢混结合段设计

钢混结合段的构造见图13、图14；预应力锚固断面见图15。

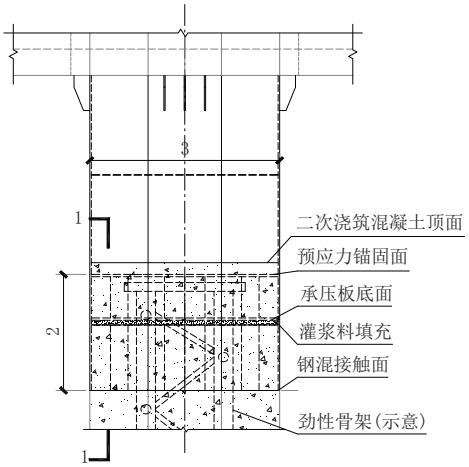


图13　结合段立面(单位：m)

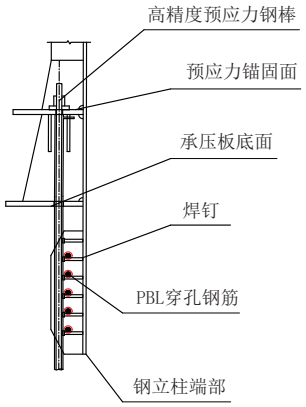


图14　1-1剖面

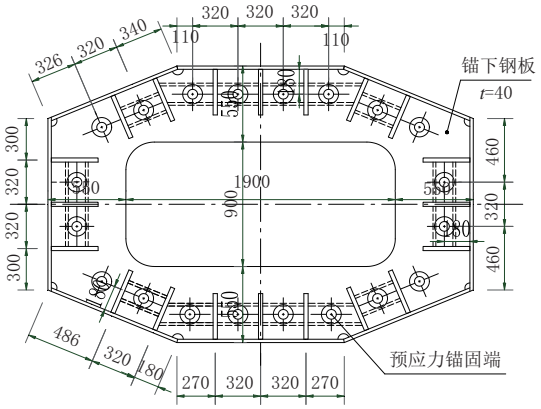


图15　预应力锚固断面(单位：mm)

设计要点如下：

(1)如图15所示，共设置20根D40 mm竖向预应力钢筋，长约8 m，其材料为1080级全螺纹预应力高强钢筋，张拉应力为0.80f_{pk}，确保在基本组合工况下锚下钢板与混凝土接触面处于受压状态。

(2)钢立柱内浇筑一段混凝土，通过PB抗剪连

接剪和焊钉加强立柱剪力传递性能。

（3）设置钢骨架和调整螺母来保证安装精度；设置高 8 cm 灌浆料层来保证承压板下方无空洞。

（4）混凝土段立柱主筋伸入钢立柱段长度大于锚固长度。

钢混结合段的计算要点如下：

分界面避开墩梁节点的应力扰动区，因此可以按照平截面假定计算。在整体模型中计算得到结合面的内力，验算在基本组合工况下承压板下接触面应力。通过合理设置竖向预应力，可以确保混凝土与钢板不脱离，因此平截面应力分布假定是合理的。

4　结　语

（1）钢T构桥可实现更大的桥下通行空间，从而降低立交匝道桥桥面标高，进而降低总体造价，间接上减少用地、节约资源。

（2）钢T构桥可减小活载下支座负反力、有效避免弯梁倾覆。

（3）钢T构桥桥梁结构构件更少，景观性更好。

（4）工程所在地为6度区，无需进行抗震设计。当钢T构桥应用于中高烈度区时，由于钢混结合面处于立柱X型分布弯矩零点附近，因此结构也具有较好的适应性。但由于桥梁整体刚度较大，固定墩基础用量较大。

（5）考虑到此类型构造在经济上（从整个工程角度）具有一定的优势，此思路和构造设计可为类似工程提供参考。

参考文献：

[1] 寇延春. 福厦高铁预应力混凝土 T 构桥设计研究[J]. 世界桥梁，2020（增刊 1）：80-84.

[2] 欧丽，叶梅新，周德. 高墩大跨T构桥结构参数分析 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2011（8）：2499-2506.

[3] 金晶，熊文，鲁圣弟，等. 独柱支承平面曲线梁桥倾覆病害分析与加固[J]. 特种结构，2014（12）：82-87.

[4] 曾国梁，冯威，李琦. 多孔连续曲线梁桥偏位成因分析及同步纠偏技术[J]. 公路交通科技，2015（3）：173-176.

[5] 徐建武，邬谷丰，项贻强，等. 钢筋混凝土连续弯梁桥设计应用存在问题及反思[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会. 第十九届全国桥梁学术会议论文集. 北京：人民交通出版社，2010：1069-1077.

[6] 戚中洋，滕宇. 钢箱梁桥抗倾覆稳定性及参数影响分析[J]. 公路交通科技，2020，16（2）：216-218.

[7] 王硕. 匝道钢梁的抗倾覆研究[J]. 中国勘察设计，2016（8）：95-97.

[8] 史方华，刘苗苗，余茂峰，等. 曲线梁桥爬移模式和典型案例研究[J]. 世界桥梁，2021，49（6）：96-102.

[9] 魏永建. 小半径曲线钢箱梁桥抗倾覆稳定性分析[J]. 中国市政工程，2019（2）：31-34；137.

[10] 王克海，张盼盼，吴刚，等. 不同约束方式对匝道桥动力特性的影响研究[J]. 震灾防御技术，2018，13（4）：756-763.

[11] 张卫恒. 匝道弯桥不同抗震体系地震反应特征及性能分析[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2024.

[12] 成志辉，吴刚，王克海，等. 不同支座布置形式对曲线匝道桥抗震性能的影响分析[J]. 公路交通科技（应用技术版），2018，14（1）：203-204.

[13] 张菊辉，管仲国. 立交匝道桥地震响应及合理抗震体系研究[J]. 振动与冲击，2015，34（13）：189-194.

[14] 朱梦琦. 不同墩梁连接形式整体桥静力特性及横向抗震性能研究[D]. 绍兴：绍兴文理学院，2021.

[15] 丘能. 匝道钢箱梁与混凝土花瓶墩墩梁固结构造研究[J]. 福建建筑，2022（3）：63-67.

[16] 杨明清. 尤溪洲南互通立交改造工程匝道桥设计研究[J]. 福建建筑，2026，44（2）：80-86.

[17] 白鹏宇，丁少凌，彭元诚，等. 小半径曲线刚构-连续梁桥单箱双室主梁合理构造设计研究[J]. 世界桥梁，2018，46（3）：7-11.

[18] 卢二侠，王解军. 小半径曲线钢箱梁桥固结体系及戴帽施工法 [J]. 公路工程，2020，45（3）：143-148.

[19] 李海锋，罗永峰，李德章，等. 合肥新桥机场航站楼大型箱形钢柱的拟静力试验[J]. 工程力学，2013，30（8）：163-171.

[20] 蒲忠维. 既有铁路电气化改造中接触网桥钢柱生根组立方案的探讨[J]. 科技资讯，2012（10）：117-119.

[21] 刘汉夫. 秦沈线桥上接触网钢柱横向振动试验研究[J]. 振动与冲击，2005（1）：189-194.

[22] 李琪群. 基于增设PBL锚固件的新型外露式钢柱脚设计研究 [J]. 城市道桥与防洪，2024（8）：98-100；110.

[23] 付林伟，付宏伟，郑俊，吴珂，姚伟贺. 新型钢柱脚预制拼装墩柱关键施工技术研究与应用[J]. 建筑施工，2025，47（4）：605-608；613.

（上接第 159 页）

报，2012（14）：121.

[9] 田辉，文祥云，郑益攀，等. 浅谈高填方路基施工技术及质量控制[J]. 公路，2018，63（10）：85-88.

[10] JTG/T 3331-03—2024 采空区公路设计与施工技术规范 [S].

[11] 牛伟. 采空区公路建设应对策略与技术研究[D]. 济南：山东大学，2009.

[12] 孙文博，卢焱. 采空区公路建设技术策略浅析[J]. 交通世界（建养. 机械），2010（增刊 1）：189-190.

[13] 岳鹏举. 公路下伏采空区稳定性分析及治理技术研究[D]. 西安：西安科技大学，2019.

[14] 张议荣. 采空区上方路堤结构及稳定性研究[D]. 重庆:重庆交通大学，2021.