

文章编号: 1674—8247(2023)06—0089—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.017

# 高速铁路大跨度钢盖梁栓接门式墩设计研究

曾宁烨<sup>1</sup> 丁嘉杰<sup>1</sup> 强 斌<sup>2</sup>

(1. 中铁二院集团工程有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘 要:** 高速铁路与既有工程小角度交叉时, 如何减小对既有工程, 尤其是运营铁路的影响, 避免超大跨度梁式结构建造是亟需解决的问题, 钢盖梁门式墩上架标准简支梁不失为一种经济合理的解决方案。本文以某新建高速铁路大跨度钢盖梁栓接门式墩为背景, 归纳了钢盖梁门式墩的结构形式、计算要点、设计时需考虑的关键因素, 基于 MIDAS 计算结果验证了墩梁栓接大跨度钢盖梁门式墩的设计参数的取值合理性。研究表明: (1) 钢盖梁门式墩为高速铁路小角度跨越既有工程提供了经济合理的选择; (2) 门式墩钢盖梁、钢柱脚及整体结构的计算结果, 均符合规范要求, 设计参数合理。

**关键词:** 高速铁路; 大跨度钢盖梁; 门式墩; 栓接; 结构尺寸设计

中图分类号: U441

文献标志码: A

## A Study on the Design of Portal Pier Bolted with Large-span Steel Capping Beam for High-speed Railway

ZENG Ningye<sup>1</sup> DING Jiajie<sup>1</sup> QIANG Bin<sup>2</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** When a high-speed railway crosses an existing project at a small angle, one pressing issue is how to minimize the impact on the existing project, especially the operating railway, and avoid the construction of large-span beam-type structures. It is an economical and reasonable solution to erect standard simply supported beams on portal piers bolted with steel capping beams. This study, based on a new high-speed railway with large-span steel capping beams bolted to portal piers, summarized the structural form, calculation key points, and crucial factors to consider during the design of steel capping beams bolted to portal piers. It validated the rationality of design parameters for portal piers bolted with large-span steel capping beams based on results from MIDAS. The study results show: (1) portal piers bolted with steel capping beams provide an economical and rational solution for high-speed railways crossing over existing projects at small angles. (2) the calculation results of steel capping beam bolted to portal pier, the steel column base, and the overall structure all meet the specifications, proving the rationality of the design parameters.

**Key words:** high-speed railway; long-span steel capping beam; portal pier; bolting; structural size design

随着经济水平的持续发展, 我国城市化率和路网(公路网及铁路网)密度已达到相当高的水平<sup>[1-2]</sup>。新

建铁路与既有设施(尤其是与既有公路、铁路)的交叉频率急剧上升。当新建铁路以桥梁工程上跨既有设

收稿日期: 2023-02-26

作者简介: 曾宁烨(1986-), 男, 高级工程师。

引文格式: 曾宁烨, 丁嘉杰, 强斌. 高速铁路大跨度钢盖梁栓接门式墩设计研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 89-93.

ZENG Ningye, DING Jiajie, QIANG Bin. A Study on the Design of Portal Pier Bolted with Large-span Steel Capping Beam for High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 89-93.

施且交叉角度较小时,门式墩上架简支梁往往是较经济合理的选择<sup>[3-4]</sup>。

当需要跨越的障碍是运营中的公路或铁路时,考虑尽量降低对运营线路的影响、快速完成新建桥梁工程的施工。同时,由于空间受限或无法取得施工许可,现场往往不具备搭设施工支架的条件,因此无法采用现浇混凝土盖梁的工法。钢盖梁自重轻,可采用工厂制造、现场整体吊装的施工工法,无需施工支架,且工期短。因而,在新建设施跨越的运营中的公路或铁路时,钢盖梁比普通混凝土盖梁更具优势<sup>[5]</sup>。国内已有不少铁路钢盖梁门式墩的工程实例,但针对高速铁路大跨度墩梁栓接钢盖梁门式墩计算和设计要点的研究相对较少。本文结合某新建高速单线铁路上跨既有线工程,对大跨度梁柱栓接钢盖梁门式墩设计要点进行归纳总结,结合现有规范全面验证设计参数取值的合理性,旨在为后续相似高速铁路工程设计提供参考。

## 1 工程概况

某新建高速铁路行车速度 350 km/h,为无砟轨道单线铁路,上跨行车速度 250 km/h 的既有单线铁路。既有铁路此处为桥梁工程,其上部结构为跨度 31.5 m 的单线简支箱梁,桥面宽 7.6 m,轨面到地面距离约 13.5 m。新建高速铁路与既有铁路斜交角度约 18°。工点处地震动峰值加速度为 0.05 g。

若采用大跨度连续梁桥跨越既有铁路,主跨至少需要 128 m,为了满足限界要求,新建高速铁路的轨面标高须进一步增加;既有铁路已通车运营,为保证其运营安全,连续梁还须采用转体施工,进一步增加了工程投资和施工难度。综上所述,大跨度连续梁桥方案技术复杂、工程投资大;与之相比,采用门式墩上架跨度 31.5 m 标准简支梁方案更加经济合理。

## 2 结构设计

影响门式墩的设计因素有很多,比如净空、平面上可供桥墩布置的范围、墩柱之间的相对高差、各部分尺寸对美观的影响和施工误差等。在设计门式墩时,首先要确定盖梁的结构形式,随后拟定具体的盖梁和墩柱尺寸。

### 2.1 盖梁结构形式选择

门式墩盖梁大体可分为混凝土盖梁和钢盖梁。混凝土盖梁的跨度一般较小,在施加了预应力后,混凝土门式墩盖梁跨度也一般不超过 25 m,且需工点现场具备搭设支架现浇施工的条件。由于设计线路与

既有铁路交角较小,受既有铁路桥梁桥面宽度控制,墩柱在平面上的布置决定了本门式墩盖梁跨度需大于 30 m。同时,为减小对既有铁路运营的影响,本工点不适合采用支架现浇施工。故本工点采用适用更大跨度、可现场整体吊装的钢盖梁门式墩。

钢盖梁门式墩在设计实践中出现了两种结构形式:整体钢立柱方案和混凝土立柱加钢盖梁方案。根据笔者统计发现,后者占已实施的钢盖梁门式墩的绝大多数,主要原因为:在跨越了障碍物后,墩柱的尺寸仅受所承受的上部荷载影响,而该荷载的上限往往由盖梁的承载能力决定,盖梁主要承受弯矩作用,而墩柱主要承受轴向压力,因此墩柱不必采用比强度高的钢材,廉价且承压性能良好的混凝土是更优的选择。其次,混凝土立柱的管养维护也较钢立柱更加容易。

针对混凝土立柱加钢盖梁方案,立柱与盖梁的连接又有多种形式<sup>[6-7]</sup>。铁路钢盖梁门式墩墩梁连接一般采用插入式连接或锚栓式连接。与插入式连接相比,锚栓式连接不需设置钢混结合段,构造简洁,受力明确,施工简单,用钢量较省,且出现病害时更易于发现。因此,本次设计拟采用锚栓式连接。

### 2.2 结构尺寸拟定

在确定了盖梁结构形式后,进一步拟定门式墩的具体结构尺寸、构造和材料。门式墩由钢盖梁、钢柱脚和混凝土柱 3 部分组成,钢盖梁和钢柱脚采用熔透焊连接,钢柱脚与混凝土柱之间通过锚栓连接,如图 1 所示。

钢盖梁为钢箱结构,材质为 Q345qD,长度 33 m,计算跨度 30 m,截面高 3 200 mm,宽 3 300 mm,顶板、底板和腹板厚 24 mm,顶底板和每个腹板各设置四道口 200 mm × 20 mm 纵向加劲肋。

钢柱截面为箱形,外轮廓尺寸 3.3 m × 3.0 m (顺桥向 × 横桥向),板厚均为 28 mm,各板件均设置四道口 300 mm × 30 mm 加劲肋,钢结构柱柱脚与混凝土柱采用锚栓连接,柱底设 50 mm 厚承压板,并通过环氧砂浆与混凝土墩柱连接以传递轴向力作用。

混凝土柱部分为矩形实体墩,采用 C40 混凝土,截面尺寸 4.6 m × 4.3 m (顺桥向 × 横桥向)。

## 3 计算分析

### 3.1 设计荷载

#### 3.1.1 恒载

结构自重:按照 TB 10002 - 2017《铁路桥涵设计规范》(以下简称《桥规》)选用。

二期恒载:按 150 kN/m 计。

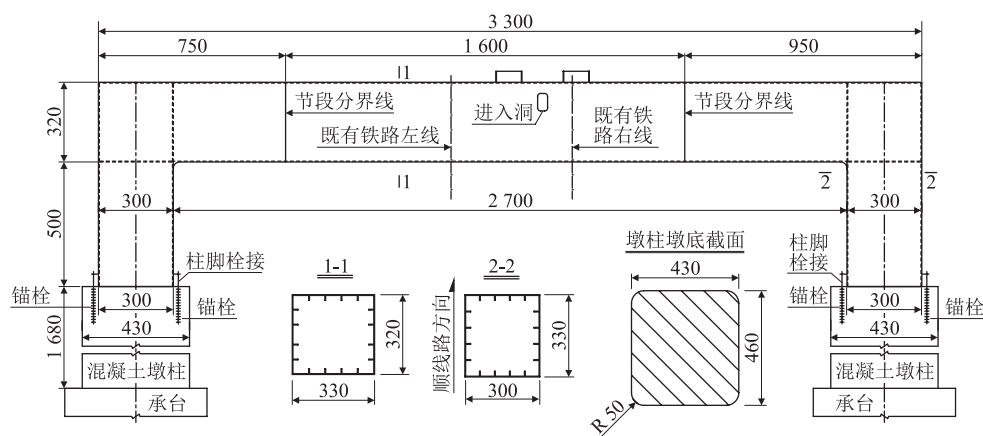


图1 门式墩立面及结构尺寸图(mm)

左右基础不均匀沉降:按5 mm考虑。

### 3.1.2 活载

列车竖向活载采用单线 ZK 活载。

横向摇摆力:取 100 kN,作用于支座中心。

### 3.1.3 附加力

制动力:根据《桥规》采用单线制动力,以列车竖向静活载的 10%计。

风力:根据《桥规》采用。

温度荷载:结合淮安地区气候,钢结构部分按升温 30℃,降温 30℃考虑;混凝土部分按升降温 15℃考虑。

### 3.1.4 地震力

桥址处地震动峰值加速度为 0.1 g,场地特征周期为 0.35 s。

### 3.2 结构模型

新建高速铁路采用 3 个盖梁跨度 30 m 的钢盖梁门式墩,上架跨度 31.5 m 单线简支箱梁。采用等效刚度矩阵模拟桩基础,在同一模型中模拟简支梁、门式墩及其基础,如图 2 所示。采用有限元分析软件 MIDAS 建立结构的整体空间模型,共 127 个单元、158 个节点,简支梁与盖梁采用弹性连接(实际简支梁置于钢盖梁顶部的支座之上),盖梁与墩柱固结。

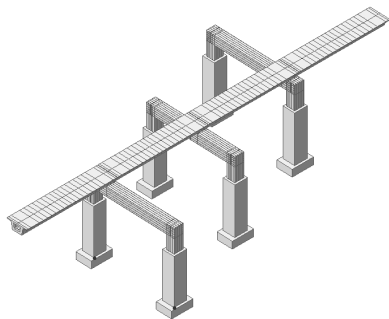


图2 空间模型图

### 3.3 钢盖梁计算

#### 3.3.1 盖梁加劲肋计算

针对顶底板纵向加劲肋,参考 JTG D64-2015《公路钢结构桥梁设计规范》(以下简称《公路钢桥规范》)中相关规定:当腹板间距大于翼缘板厚度的 80 倍时须设置纵向加劲肋,受压翼缘加劲肋间距宜小于翼缘板厚度的 40 倍。本设计中上、下翼缘设置四道纵肋,纵向加劲肋间距  $s = 650 \text{ mm} \leq 40t = 40 \times 28 = 1120 \text{ mm}$ ,满足规范要求。

针对顶底板横向加劲肋,参考《公路钢桥规范》,开口横向加劲肋间距不宜大于 3 m,本设计中横向采用横隔板加劲,间距等于 2.5 m,满足规范要求。

针对腹板水平加劲肋,根据 TB 10091-2017《铁路桥梁钢结构设计规范》(以下简称《铁桥钢规》),水平加劲肋宽厚比  $200/20 = 10 < 15$ ,满足要求。参考《公路钢桥规范》5.1.5 条,受压板件加劲肋的宽厚比  $\left(\frac{h_s}{t_s}\right) \leq 12 \sqrt{\frac{345}{f_y}} = 12$ ,亦满足要求。根据《铁桥钢规》,水平加劲肋的截面惯性矩应不小于  $[I|\delta|2.4\left(\frac{\alpha}{h}\right)^2 - 0.13|28|2.4 \times \left(\frac{2500}{3500}\right)^2 - 0.13] \text{ mm}^4$  中的较小值。本设计中腹板水平加劲肋截面惯性矩  $I_s = n(1/12bh^3 + Ay^2) = 4 \times (1/12 \times 20 \times 200^3 + 200 \times 20 \times 114^2) = 2.61E + 08$ ,满足要求。

#### 3.3.2 钢盖梁应力验算

根据《铁桥钢规》,Q345qD 钢材主力下允许弯曲应力 210 MPa,主力+附加力下允许弯曲应力 273 MPa。Q345qD 钢材主力下允许剪应力 120 MPa,主力+附加力下允许剪应力 156 MPa。根据有限元软件计算结果,钢盖梁应力强度验算结果如表 1 所示。由表 1 可知,在不同位置处,正应力和剪应力计算值皆满足规范限值。



表1 钢盖梁弯矩正应力表(MPa)

参数	主力		主力+附加力		是否满足
	横梁	钢柱	横梁	钢柱	
正应力	109.8	86.5	115.3	94.8	满足
剪应力	38.5	7.6	38.6	9.3	

3.3.3 钢盖梁疲劳验算

根据《桥规》4.3节,由于受力特性和连接构造的不同,应分别对钢盖梁梁体和钢柱进行疲劳验算。

对门式墩而言,多线系数  $\gamma_d = 1$ , 损伤修正系数  $\gamma_n = 1$ 。钢盖梁板厚  $t = 24\text{ mm}$ , 故板厚修正系数  $\gamma_t = 1$ 。对钢梁纵横向焊缝及肋板焊缝,  $[\sigma_0] = 110.3\text{ MPa}$ ; 对高强螺栓,  $[\sigma_0] = 109.6\text{ MPa}$ 。

根据有限元软件计算结果,考虑动力系数后,钢盖梁最大应力幅  $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = 24\text{ MPa}$ , 钢柱及高强螺栓最大应力幅  $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = 18\text{ MPa}$ , 均满足  $\gamma_d \gamma_n (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \leq \gamma_t [\sigma_0]$  的要求。

3.4 柱脚栓接验算

柱脚与混凝土柱采用锚栓连接,柱底设 50 mm 厚承压板,并通过环氧砂浆与混凝土墩柱连接以传递轴向力作用。锚栓直径 60 mm,长 4 100 mm,锚栓预埋在混凝土墩柱内 3 480 mm,锚固于钢柱脚靴梁上,每个锚栓设置预拉力 850 kN。锚栓采用 40Cr 调制钢材。

假定承压板与钢柱脚为刚体,承压板与混凝土间的应力按线性分布<sup>[8-9]</sup>。取承压板为分析对象,得到受力如图 3 所示。

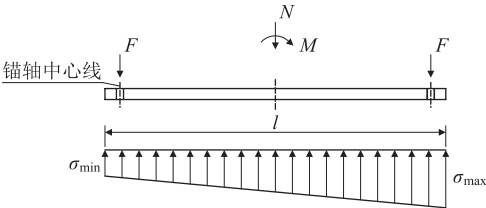


图3 钢柱脚受力图

建立关于轴力与弯矩的平衡方程,得到:

$$\sigma_{\min} \times A + \frac{1}{2} A (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = F + N \quad (1)$$

$$\frac{1}{6} l \times \frac{1}{2} A (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) = M \quad (2)$$

式中:  $M$ ——柱脚处横向弯矩(10 749 kN · m);  
 $N$ ——柱脚处竖向轴力(6 796 kN);  
 $F$ ——锚栓对承压板施加的竖向轴力之和,  
 $F = 34 \times 850 = 28\,900\text{ kN}$ ;  
 $A$ ——承压板面积(14.137 m<sup>2</sup>);  
 $L$ ——承压板横向边长(3.64 m)。

由式(1)、式(2),得  $\sigma_{\max} = 3.779\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{\min} = 1.271\text{ MPa}$ 。柱脚全截面受压,且混凝土应力小于其容许应力,满足要求。

锚栓拉应力  $\sigma = 850 \times 1\,000 \div (1/4 \pi \times 60^2) = 300.8\text{ MPa} < [\sigma] = 980\text{ MPa}$ ,满足规范要求。

可见,柱脚栓接处的受力远低于规范限值,较为保守。此设计的合理性表现在:(1)柱脚是钢混连接的关键节点,其破坏难以修复且会造成灾难性后果;(2)锚栓与混凝土的粘结存在许多细小的缺陷,这些缺陷难以模拟;(3)栓接的投资较省,偏保守的设计对投资的增加有限。

3.5 结构刚度验算

根据《桥规》对门式墩上架简支梁包含门式墩竖向挠度的梁体竖向挠度、梁端转角、墩顶位移、门式墩墩身刚度、轨面不平顺、盖梁预拱度进行验算。由于建立的是包含简支梁的空间有限元模型,故梁体竖向挠度、梁端转角、墩顶位移、桥墩刚度都可直接从 MIDAS 模型中获得,这里不再赘述,仅讨论轨面不平顺的验算。

根据 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》,ZK 静活载作用下梁体扭转引起的轨面不平顺限值,以一段 3 m 长的线路为基准,一线两根钢轨的竖向相对变形量不应大于 1.5 mm,如图 4 所示。根据 MIDAS 模型计算结果,ZK 静活载作用下梁体横向最大扭转角(通常为绕  $x$  轴的转角)为 0.17‰,一线两根钢轨的横向间距为 1 435 m,则一线两根钢轨的竖向相对变形量  $\Delta = 0.17\text{‰} \times 1\,435 = 0.244\text{ mm} < 1.5\text{ mm}$ ,满足规范要求。

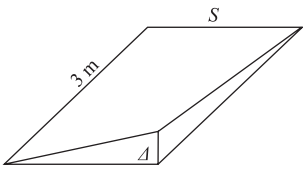


图4 轨面扭转不平顺示意图

3.6 计算小结

钢盖梁门式墩的计算项目较为繁杂,在设计钢盖梁时应注意满足相关规范,尤其是钢结构设计相关规范对钢构件构造的要求。当盖梁的高度和板材的厚度取值恰当时,其应力验算通常较为容易通过。当采用锚栓连接钢盖梁和墩柱时,设计宜偏保守。

本文未介绍柱身的计算过程,这是因为文中工点的地震动峰值加速度仅为 0.05 g,柱身的设计较为简单。但当工点位于高烈度地震区时,地震力下柱身的

延性设计往往成为难点,这时由于钢盖梁自重较混凝土盖梁轻,而将更具优势。

## 4 其他设计注意事项

钢盖梁一般由工厂制造,然后运至现场。设计时应充分调研运输路径,根据载具和沿线道路(或水路)情况确定钢结构的分节。本设计中钢盖梁分为3个重量相当的节段,由挂车运至现场后,采用熔透焊连接。连接后,整个钢盖梁重量为169.5 t,采用履带吊机整体吊装。

设计时应结合材料、结构、连接形式,对钢结构的涂装体系、防腐措施、盖梁排水、检查设施等进行统筹考虑,注重细节设计,力求从源头上减少病害和事故的发生。

## 5 结束语

随着我国城市化水平的不断提高和高速铁路建设的不断推进,高速铁路小角度跨越既有公路或铁路的出现将不可避免,此时门式墩方案比大跨梁桥方案更加经济。门式墩盖梁可采用混凝土盖梁或钢盖梁。当高速铁路小角度跨越既有公路或铁路时,由于空间受限或无法取得施工许可,现场往往不具备搭设施工支架的条件,混凝土盖梁的使用受到很大限制。尤其当盖梁跨度超过25 m时,受预应力混凝土结构跨越能力的限制,钢盖梁门式墩往往成为唯一可行的选择。

钢盖梁与混凝土柱身采用锚栓连接,无需设置钢混结合段,构造简洁,受力明确,施工简单,用钢量较省,且出现病害时更易于发现。

本文介绍了跨度30 m、采用墩梁栓接钢盖梁门式墩的设计过程,给出了各设计要点的参数取值,采用MIDAS软件分析计算了大跨度钢盖梁门式墩的强度、变形等设计参数,验证了设计的合理性。研究的应用背景、设计过程、要点参数取值可为后续类似工程设计提供有益参考。

## 参考文献:

[1] 孙根年. 国家区域公路网密度与人口密度、人均GNP关系的统

计分析[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(2): 220-223.

SUN Gennian. Statistics Analysis on the Relationship of Highway Net Density with Population Density and Per Capita GNP in National Region [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000, 35(2): 220-223.

[2] 杨忠民. 中国高速铁路路网规划研究[J]. 铁道经济研究, 2010(6): 4-7.

YANG Zhongmin. Research of China High-speed Railway Network Planning [J]. Railway Economics Research, 2010(6): 4-7.

[3] 孙智峰. 高速铁路大跨度钢箱门式墩的设计研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(4): 43-47, 59.

SUN Zhifeng. Design and Research of Large Span Steel Box Portal Pier for High Speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 43-47, 59.

[4] 陶然,陈晓辉. 铁路桥梁钢门式墩设计研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(S1): 163-167.

TAO Ran, CHEN Xiaohui. Design and Research on Steel Portal Pier of Railway Bridge [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(S1): 163-167.

[5] 余浪,罗艳. 铁路钢盖梁混凝土柱组合门式墩设计研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 80-84.

YU Lang, LUO Yan. Research on Design of Composite Portal Pier with Steel Capping Beam and Concrete Column of Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 80-84.

[6] 苏庆田,雷东阳,沈翀,等. 一种钢盖梁与混凝土桥墩连接结构: CN111719409 A [P]. 2020-09-29.

SU Qingtian, LEI Dongyang, SHEN Chong, et al. Steel Bent Cap and Concrete Pier Connecting Structure: CN111719409 A [P]. 2020-09-29.

[7] 王云龙,张涛,闫兴非,等. 混凝土立柱与钢盖梁的连接结构: CN212925744U [P]. 2021-04-09.

WANG Yunlong, ZHANG Tao, YAN Xingfei, et al. Connecting Structure of Concrete Stand Column and Steel Bent Cap: CN212925744U [P]. 2021-04-09.

[8] 历付. 高速铁路高立柱大跨度钢横梁框架墩设计研究[J]. 中国铁路, 2020(6): 94-102.

LI Fu. Design of and Research on Frame Pier of High Post Long Span Steel Beam of High Speed Railway [J]. China Railway, 2020(6): 94-102.

[9] 童根树,吴光美. 钢柱脚锚栓设计内力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2004, 34(6): 55-57.

TONG Genshu, WU Guangmei. Review of Calculation for the Tensile Forces of Anchor Bolts in Steel Column Bases [J]. Building Structure, 2004, 34(6): 55-57.