

钢箱梁结构在S形曲线桥梁中的应用研究

马国纲, 张 博, 庞 伟

(中国市政工程西北设计研究院有限责任公司, 甘肃省 兰州市 730030)

摘 要: 相较于混凝土梁桥, 钢箱梁结构具有轻质高强、抗弯扭刚度大、施工便捷及对周边环境低影响等优势, 且更能满足曲线梁弯扭耦合效应显著的受力特性。以陇西渭河桥为工程背景, 从桥位线形选择、结构选型、设计施工难点控制对S形曲线钢箱梁开展设计研究, 重点分析了跨径、梁高、支座布置、板件稳定性、耐久性等关键设计因素。研究表明, 钢箱梁结构对小半径曲线大跨梁桥具有很好的适应性, 陇西渭河桥工程设计可为国内同类桥梁设计提供参考。

关键词: 钢箱梁; 弯扭耦合; S形曲线; 小半径曲线大跨

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0192-04

Application Research of Steel Box Girder Structure in S-shaped Curved Bridges

MA Guogang, ZHANG Bo, PANG Wei

(CSCEC AECOM Consultant Co., Ltd., Lanzhou, China)

Abstract: Compared to concrete beam bridges, steel box girder structures offer advantages such as lightweight and high strength, large bending-torsional stiffness, construction convenience, and minimal environmental impact. They are particularly well-suited for curved beams with significant bending-torsion coupling effects. Taking the Longxi Weih River Bridge as an engineering case study, this research focuses on the design of S-shaped curved steel box girders, analyzing key factors including bridge alignment selection, structural configuration, and construction challenges. The critical design aspects are studied such as span length, girder height, support arrangement, plate stability, and durability. The results demonstrate that steel box girders exhibit excellent adaptability for small-radius, large-span curved beam bridges, providing valuable reference for similar domestic bridge designs.

Keywords: steel box girder; bending-torsion coupling; S-shaped curve; small-radius curve with large span

0 引 言

路线线形和河道的平面关系与地形地势、周边构筑物密切相关, 早期桥位的选择以线形服从结构为主, 跨越河道时线形尽量为直线且与河道正交; 现阶段特大桥及大、中桥的桥位线形一般选择为直线, 小桥涵的位置和线形一般应服从路线的总体走向。近年来随着高等级道路的修建, 弯桥在跨越河道时普遍采用, 尤其是“S”形曲线线形优美、对复杂环境有良好的适应性、两侧衔接顺畅, 但设计施工难度较大, 细节要求高, 这也为桥梁设计带来一定程度的挑战。

钢箱梁结构具有结构轻盈、造型优美、承载能力

大、跨越能力强等特点, 且便于大节段制造、运输及现场吊装。在跨越城市交通主线或河流湖泊时, 钢箱梁在不影响桥下交通、通航及环境条件下能大幅缩短施工工期, 所以非常适合应用于城市桥梁。对于城市桥梁中存在的大跨曲线梁或异形结构, 由于其受力的特殊性、施工工期短、施工组织要求高, 混凝土曲梁很难满足要求, 钢箱梁往往成为最理想的选择形式。

本文以陇西渭河桥为例, 针对桥位线形选择、结构选型、设计施工难点控制等方面进行探讨研究。

1 工程概况

陇西渭河桥位于现有陇渭高速过境县城段北侧, 西河汇入渭河河口处, 该处河谷平坦、宽阔, 渭河两侧地势均略向河心倾斜, 现状过水河槽主要集中在河湾北侧田坎之下, 桥位处河口垂直宽度约

收稿日期: 2025-03-10

作者简介: 马国纲(1966—), 男, 工学学士, 教授级高级工程师, 甘肃省工程勘察设计大师, 从事城市道路与桥梁设计研究工作。

160 m。渭河南侧为堤路共建的药都大道西延段,该路段为城市次干道,设计车速为 40 km/h,双向 4 车道。此处因东北方向大山阻隔渭河向东约 200 m 后折向东南方向,距离桥位下游约 880 m 处已建陇渭高速上河蒲渭河大桥。

路线线形受线路走向、地形地势、周边构筑物及现状道路等因素限制,桥位线形呈双反弯“S”形曲线,曲线半径 $R=300\text{ m}$,最大纵坡 $\pm 4\%$,道路横断面宽 32.0 m,两幅中间布置两根 $\phi 1.2\text{ m}$ 过河供水管。综合考虑涉河建设项目相关要求和堤防安全等问题,主桥跨径布置为 $56\text{ m}+88\text{ m}+2\times 80\text{ m}+88\text{ m}+56\text{ m}=448\text{ m}$,桥位布置如图 1 所示。

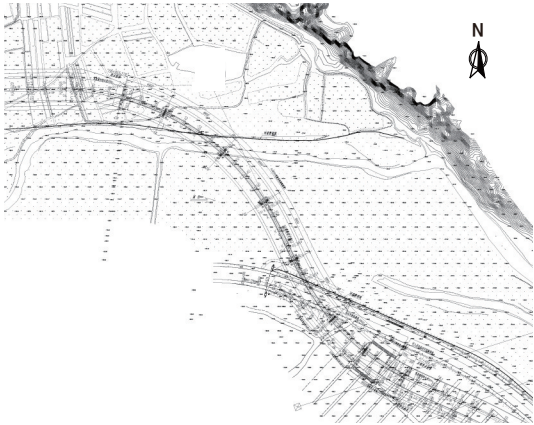


图 1 桥位平面图(单位:cm)

2 桥位线形选择

渭河北岸路线受北岸规划地块开发需要、避免道路对地块的不规则切割以及规划沿河景观带影响,沿河堤田坎由西向东平行于河道布置;路线南岸受西河渭河交汇带、陇渭高速跨渭河上蒲河大桥、西河大桥、陇渭高速公路陇西出入口收费站等因素制约,并考虑路线走向与现状药都大道的合理衔接,南侧线位具有唯一性。故路线只能经北岸由东南方向跨越渭河及药都大道西延段后迂回与现状药都大道西延段平行再下穿陇渭高速上蒲河大桥与已建药都大道平顺相接,路线在跨河及堤路段形成双反弯“S”形曲线。路线走向如图 2 所示。



图 2 路线线位图

3 钢箱梁在曲线桥中的适应性研究及结构选型

3.1 适应性研究

由于受曲率影响,曲线梁在受弯的同时产生扭转,而扭转进一步导致梁体的弯曲变形,即为常说的弯扭耦合作用,主要表现为主拉应力大的特点。相比直桥,曲线桥的变形更大,桥越宽曲线内外侧挠度差值越大;曲线梁即使在对称荷载作用下也会产生较大扭转,使得外侧梁超载而内侧梁卸载,导致内外侧梁应力相差较大,进而导致外侧支反力较大,内侧支反力较小甚至内侧出现负反力的情形。影响曲线桥受力特性的因素除与直桥相同的因素如跨长、抗弯刚度外,还有曲率半径、桥宽与曲率半径之比、弯扭刚度比等^[2]。桥越宽、曲率半径越小的曲线桥受力特性越明显,对于曲线梁在抗弯刚度满足要求的前提下,宜尽量增大截面的抗扭刚度,以减小扭转引起的变形,故在曲线桥梁中常采用抗扭惯矩较大的箱形面。

大跨小半径曲线梁若采用一般的混凝土结构时设计和施工会出现较大困难,如梁高较大,混凝土结构自重较大,曲线内外侧应力差较大,扭矩的作用进一步增大弯矩;配置预应力钢束时构造和配束困难,特别是施工条件受限采用悬浇施工时尤为困难等问题。钢箱梁桥是通过焊接形式将钢板加工成箱形结构的桥梁,与常规混凝土桥梁相比,此形式是减少桥梁自重、增加桥梁跨径最有效的结构形式。钢箱梁结构有以下几个主要特点^[3]:

(1)钢箱梁结构具有较高的抗拉强度和弹性模量,能充分发挥板件承载力,材料利用率比较高。

(2)钢箱梁结构自重小,每平方米用钢量大约为 $500\sim 600\text{ kg/m}^2$,上部结构自重的减轻使下部结构造价亦会相应减少。

(3)钢箱梁结构具有良好的延展性和韧性,抗震性能良好,适合应用于高烈度地区;无收缩徐变,应用于大跨径时相比混凝土结构病害较少。

(4)钢箱梁工厂加工运至现场进行组装,减少了现场施工作业量,尤其对于桥下空间有限的施工更为便利,保证了施工质量和进度要求,节约了施工成本。

(5)钢箱梁属于闭口薄壁结构与混凝土箱形梁结构对比,结构抗扭性能较差,薄板的稳定问题突出,合理的设置横隔板(刚度和间距)及相应板件的加劲肋能够很好的弥补这一不足,桥面板的疲劳和

铺装耐久性略差可以通过合理的措施予以改善。

由此可见对于大跨径及平曲线的适应性,是钢箱梁结构的一个重要优势。

3.2 结构选型

针对陇西渭河桥地形及周边地物情况,另据洪评要求河道中采用大跨结构跨越水系,减少下部结构的阻水面积并考虑南侧跨越既有河堤安全距离问题,该桥跨越河堤段跨径为88 m,河道中两跨均为

80 m。南侧跨越河堤时建筑高度受限,施工期间不能中断河堤路的交通,桥梁受两根供水管道的偏载作用问题亦是结构方案考虑的重点。在设计过程中上部梁体选取了预应力混凝土结构、钢混组合结构、钢结构3个方案从结构的适应性、施工难易程度、维修保养、造价等几个方面进行详细的比选,最终确定了上部结构采用分幅布置的变截面钢箱梁,下部采用整体结构形式。桥型布置如图3、图4所示。

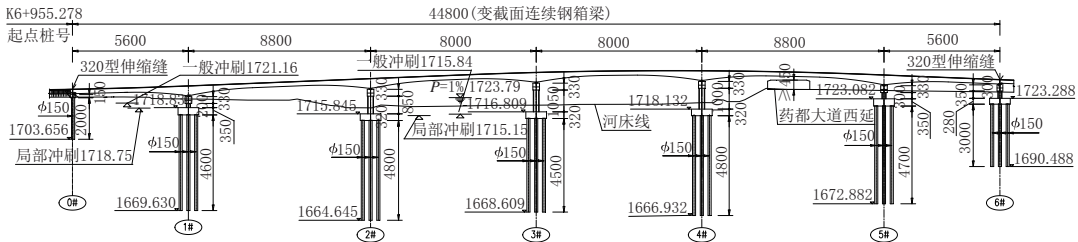


图3 主桥立面布置图(单位:cm)

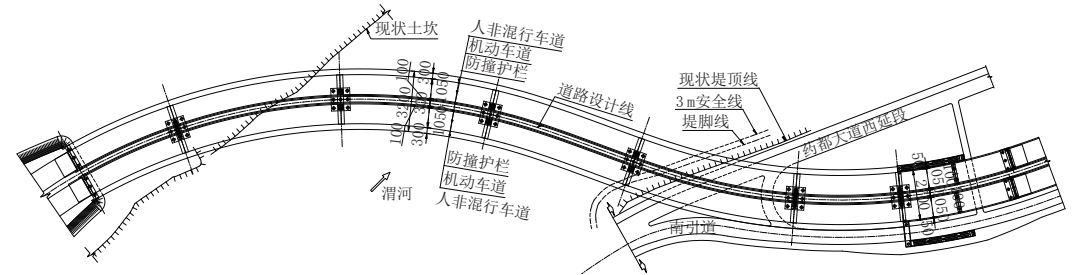


图4 平面布置图

上部主梁采用变截面单箱单室直腹板连续钢箱梁,中支点梁高4.5 m,跨中梁高2.0 m。钢箱梁顶板水平宽度为14.5 m,悬臂长3.25 m。底板宽度为8.1 m,箱室内腹板间距为8.0 m。钢箱梁通过腹板高差来调整桥面横坡,底板水平。标准横断面如图5所示。

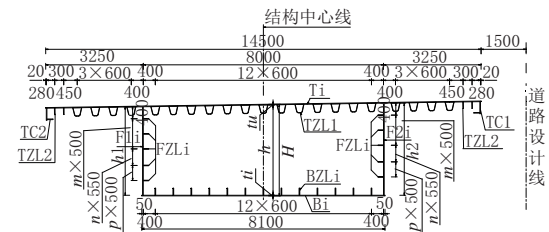


图5 钢箱梁标准横断面(单位:mm)

下部采用整体式结构,位于河道中的主墩采用双柱墩大悬臂预应力结构,盖梁采用矩形截面,盖梁宽3.2 m。双柱式墩截面为2.8 m×2.8 m;基础采用承台+群桩基础形式,承台尺寸为12.0 m×10.0 m×3.2 m,桩基采用9根φ1.5 m钻孔灌注桩。主墩结构尺寸如图6。

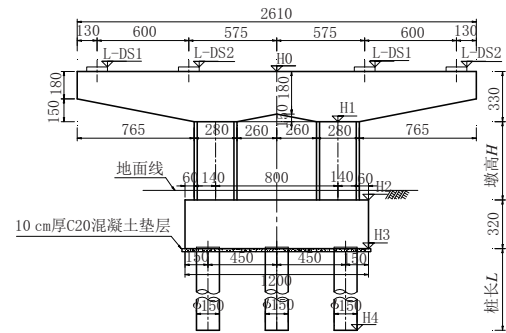


图6 主墩双柱式桥墩(单位:cm)

交通条件控制,跨径布置灵活度较大,弹性空间较混凝土连续梁大,钢箱梁的边中跨比可选择在0.5~1.0范围。本项目平面为“S”形反弯曲线,且跨越渭河及现状河堤路,既要考虑河道中尽量以大跨通过减少桥梁下部结构的阻水率影响河势,又要考虑小半径曲线采用大跨布置导致的结构受力不利情形,还需考虑桥墩布置与既有和未来的河堤关系,预留一定的安全距离。最终跨径布置采用56 m+88 m+2×80 m+88 m+56 m,边中跨比为0.64,布置也较为灵活。

4.2 梁高设计

钢箱梁主梁顶板应力由第一体系和第二体系应力叠加得到,第一体系由梁高确定,第二体系由已确

4 陇西渭河桥设计施工难点控制

4.1 跨径布置

曲线连续钢箱梁的跨径布置受地形、地物,桥下

定的横隔板、纵横向加劲肋间距和形式确定。为了更好的发挥钢材的性能,达到设计的安全、经济、合理目标,当梁高较小时保持梁高不变,调整板厚,当跨径较大时采用改变梁高的办法进行设计更有效。本项目跨径较大采用改变梁高的方式以适应受力的需求,即采用变截面箱梁形式,跨中和边支点梁高2.0 m,中支点梁高为4.5 m,变截面段长30.0 m。在梁高确定的前提下板厚根据应力情况选取不同值,满足一定的安全度。

4.3 支座布置

曲线钢箱梁支座布置时应尽量采用双支座,避免多支座布置时出现部分支座脱空而导致结构内力重分布,结构破坏。曲线钢箱梁由于弯扭耦合效应的作用,中墩恒载反力较大,活载作用时一般不会出现负反力的情况,而边支座恒载反力较小,活载作用下易出现负反力。为了提高边支座的抗倾覆力矩,可采用以下措施:(1)增大横向支座间距;(2)预偏心调整;(3)支座附近进行合理配重。针对本项目均采用双支座布置,且增大了支座的横向间距,并且在端支座位置进行了配重,确保结构在任何受力状态下的安全。

4.4 钢箱梁板件的稳定性

钢箱梁属于闭口薄壁结构,常为采用3、4类截面的局部稳定控制设计,并通过弹性理论分析来评估其不同工况下的性能表现的设计方法。横隔板的合理间距和刚度问题是钢箱梁桥设计合理的关键问题。其主要影响截面形状,减少畸变位移和应力,改善荷载横向分布;兼做顶、底板和腹板的加劲肋,其间距影响横肋、竖肋刚度选择和布置进而影响板件的局部屈曲;影响正交异性钢桥面板及铺装的耐久性。薄板是临界屈曲应力比较低的构件,提高它的抗屈曲能力有两种途径:一是增加板的厚度,此方法不经济;二是常借助加劲肋来提高板的抗屈曲稳定性,所以加劲肋的设计成为钢箱梁设计的重难点问题。

该项目中钢箱梁箱室顶板纵向加劲肋采用U肋和板肋组合。腹板纵向加劲肋采用板肋,底板纵向加劲肋根据受力选用T肋和板肋。实腹式横隔板纵向间距为6.0 m,横向加劲肋分为顶、底板和腹板加劲肋及单独腹板加劲肋,其纵向间距为1.5 m,间隔布置于实腹式横隔板之间。边支点及中支点均采用

实腹式横隔板。悬臂板横向采用T肋设计,间距为1.5 m,同时为保证悬臂稳定,端板采用L形纵肋加劲。

4.5 钢箱梁耐久性

正交异性桥面板的耐久性是设计关注的重点,采用合理的桥面板厚度、纵横肋刚度及间距布置是基础。还需进一步合理优化纵肋与桥面板的焊缝连接、纵肋与横肋交叉部位的构造细节(横隔板、横肋的挖空形式和焊接方式等)及纵肋现场连接方式等。另外还可采用组合式桥面铺装结构即通过剪力连接件和桥面板连接的刚性下面层+沥青混凝土上面层提高桥面板的疲劳性能。

本项目中为提高桥面板的刚度纵向加劲肋为8 mm厚U肋,采用部分熔透的坡口角焊缝连续施焊与顶板及横肋连接,并建议U肋现场加工时采用热煨弯一并外力配合方式制造。现场节段连接采用面板焊接,纵向加劲肋高强螺栓连接。在设计过程中对横肋的开孔形状进行了数值模拟优化,以降低应力集中和次应力的影响。另外桥面铺装层采用8 cm厚刚性下面层,进一步提升桥面板刚度改善疲劳性能。

为提高钢箱梁结构的耐久性,涂装采用耐腐蚀寿命长的涂装体系方案(冷喷烯锌方案),以降低后期维护成本。

5 结 语

近年来随着城市交通的快速发展,曲线钢箱梁由于兼具曲线梁和钢箱梁的受力特点而被广泛应用于城市桥梁中。本文分别对曲线梁和钢箱梁结构受力特性进行阐述,提出钢箱梁结构对于大跨径曲线梁主梁方案的独具优势条件。通过渭河桥梁实例进行佐证,总结曲线钢箱梁桥设计思路和工程设计要点。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2000.
- [3] 贾高炯.钢箱梁桥设计[M].北京:人民交通出版社,2016.
- [4] 王威.大跨曲线钢箱梁若干关键技术研究[D].西安:长安大学,2014.
- [5] 徐建清,陈尧三,蒋昊昆.城市立交中曲线钢箱梁桥的设计简介[J].城市道桥与防洪,2020(9):82-85.
- [6] 王强.曲线钢箱梁桥优化设计与工程实例分析[J].工程设计,2022,122(18):170-172.