

某特大桥工程钢栈桥结构形式的应用

秦志学

(中交一航局第五工程有限公司)

摘要:为了解决某特大桥跨越关键水道施工材料的运输以及水上作业向陆上作业转换的关键问题,需要搭建一座与该项目施工特性相匹配并能够满足现场施工特定条件的钢栈桥,以该特大桥横跨水道部分的工程项目为实例,深入研究了型钢栈桥与贝雷架栈桥的结构形式与施工技术。贝雷架栈桥在贝雷梁与分配梁、分配梁与装配式桥面板之间,采用了专门设计的连接件进行连接。该工艺极大地降低了现场焊接和防腐作业的工作量,进而提高了施工效率,增强了施工安全性及抗自然干扰的能力,不仅提升了工程质量和施工进度,也为其他类似工程的施工提供了参考。

关键词:跨越水道;钢栈桥;结构体系;贝雷架

0 引言

钢栈桥作为水上桥梁施工的核心技术,承担着运输通道与施工平台等多项功能。目前,国内在跨水道的钢结构栈桥建设中,桩基部分主要采用钢管桩^[1],栈桥面层则多采用贝雷架或型钢的结合形式。钢管桩之间通过剪刀撑焊接连接,钢管桩与栈桥面层通过钢横梁焊接固定,贝雷架面层结构主要以模块化为主,通过螺栓和连接件实现稳固连接,将多个贝雷片组合成一个整体结构,施工过程变得更加简便且高效。型钢通过焊接工艺进行连接,焊接质量要求较高,施工周期相对较长。贝雷架栈桥跨度较大,对起重机的要求较高;而型钢栈桥由于跨度相对较小,普通起重设备就能够满足施工要求。

本文针对某水道桥梁的结构特点、栈桥的技术可行性、施工效率以及经济效益等多个角度进行全面的比较和分析,结合每种栈桥的优缺点,选择最佳施工方案。

1 工程概述

某特大桥设计为双向八车道,主线全长 2.652 km。采用钢混结构桥梁为上部结构,双柱墩为下部桥墩,桩基以群桩为主。涉及跨水道部分长 430 m,为确保水道部分施工的顺利进行,需在水道内架设钢栈桥作为施工通道和作业平台,从而完成水道内灌注桩、承台、墩柱、盖梁等多项复杂工程的施工。

2 施工条件

该地区地层自上而下依次为第四系海陆交互

相淤泥质粉质黏土、砂土、圆砾土及花岗岩残坡积砂质黏性土。淤泥质粉质黏土呈灰褐色、软塑,强度及韧性中等~低,无摇震反应,厚度 0.8~18.4 m,平均厚度 7.6 m,埋深 3.6~35.8 m,平均埋深 15.9 m,压缩性高,力学性质差。

水道下游有小型闸门,打桩船无法通行。同时,水道属红树林保护区,严禁筑岛施工。河道平缓,水位稳定,河床底标高平均约-3.4 m,正常最高水位 0.2 m,施工常水位-0.22 m 左右。

3 钢栈桥方案设计

施工通道与作业平台均采用栈桥结构形式,由岸边架设钢栈桥至河道。施工通道总长约 430 m,宽度 7.5 m,作业平台位于灌注桩上方,平面尺寸为 15 m×15 m。根据施工时施工通道及作业平台所承受的荷载,进行钢栈桥构造设计,按照钢栈桥主梁构造形式不同,拟定 2 种钢栈桥方案:贝雷架栈桥和型钢栈桥。施工通道及平台平面布置示意图见图 1。

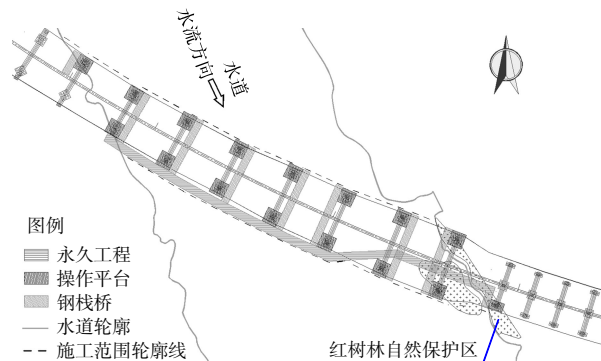


图 1 施工通道及平台平面布置示意图

3.1 荷载要求

栈桥安装与拆除施工中,最不利工况为拔除钢管桩,此时桥面最大荷载约 926.1 kN,包括履带吊自重、拔除的钢管桩、振动锤和吊钩索具。施工过程中,钢栈桥通行车辆与设备主要为履带式旋挖钻(重约 980 kN)和轮式混凝土罐车(重约 441 kN)。

3.2 栈桥结构形式

3.2.1 贝雷架栈桥

栈桥为上承式结构形式,每跨 12 m,跨下部结构为单排桩,每排 3 根 $\phi 630 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 钢管桩;每排钢管桩的横向间距为 2.8 m,钢管桩横向平联采用 $\phi 426 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管焊接。栈桥下部结构横梁采用双拼 H 型钢 H450 \times 200,单根长 7.5 m,布设间距与钢管桩一致。栈桥上部结构主桁架采用 321 型装配式公路钢桥桁架,栈桥设置单层双排共 10 道不加强型桁架片,设置 450 型支撑架,横向 5 组,组间距 0.75 m。

桥面系为钢结构桥面,桥面系横向分配梁采用 I22b 工字钢,间距 500 mm 铺设,I22b 工字钢与贝雷片用 U 形螺栓连接,I22b 工字钢上纵向间距 250 mm 铺设 I12.6 工字钢,面板采用 8 mm 厚花纹钢板满铺供车辆通行。贝雷架栈桥断面示意图见图 2。

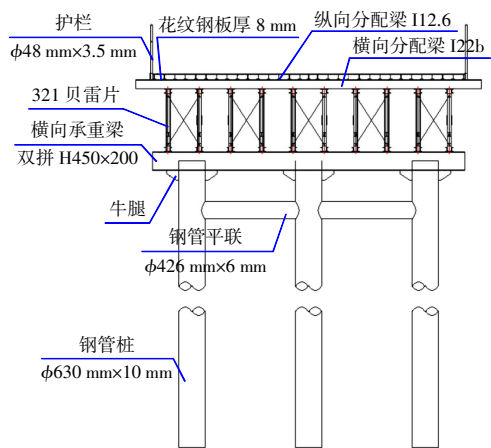


图 2 贝雷架栈桥断面示意图

为确保栈桥在使用过程中的稳定性及防止型钢受热变形,在 12 m 跨段中每 9 跨设置 1 组制动墩并设置 20 cm 宽伸缩缝。

3.2.2 型钢栈桥

型钢栈桥每跨 6 m,跨下部结构为单排桩,每排 3 根 $\phi 630 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 钢管桩;栈桥每排钢管

桩的横向间距为 2.8 m,钢管桩横向平联采用 $\phi 426 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管焊接。栈桥下部结构横梁采用双拼 H 型钢 H450 \times 200,单根长 7.5 m,布设间距与钢管桩一致。栈桥主梁 H 型钢 H500 \times 200,纵向布设 9 根,间距 900 mm。

桥面系为钢结构桥面,桥面系横向分配梁采用 I12.6 工字钢,间距 400 mm 铺设,面板采用 8 mm 厚花纹钢板满铺供车辆通行。型钢栈桥断面示意图见图 3。

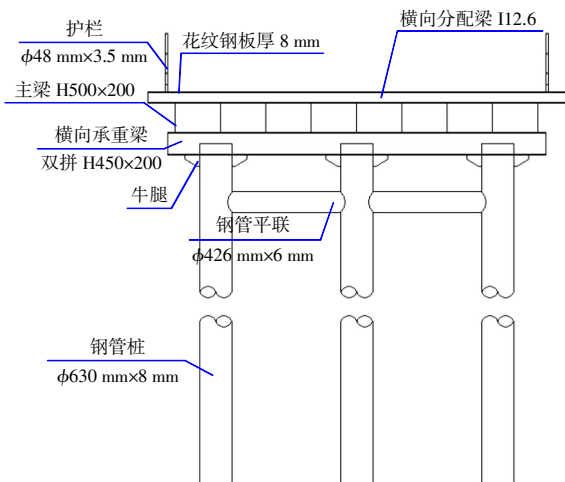


图 3 型钢栈桥断面示意图

为确保栈桥在使用过程中的稳定性及防止型钢受热变形,在 6 m 跨段中每 5 跨设置 1 组制动墩并设置 20 cm 宽伸缩缝。

3.3 栈桥结构计算分析

根据现场施工工序安排,计算荷载组合工况可分为 3 种。荷载的选取及对应的分项系数如表 1 所示。

表 1 荷载的选取及对应的分项系数

工程荷载	分项系数
结构自重	1.2
轮式混凝土罐车	1.4
旋挖钻与履带吊	1.2
风荷载	1.4
水流荷载	1.4

1) 旋挖钻行走工况:荷载组合为 1.2 \times 结构自重+1.2 \times 旋挖钻荷载+1.4 \times 风荷载+1.4 \times 水流荷载;

2) 混凝土搅拌运输车满载工况:荷载组合为 1.2 \times 结构自重+1.4 \times 混凝土搅拌运输车荷载+1.4 \times 风荷载+1.4 \times 水流荷载;

3) 履带吊拔除钢管桩工况:荷载组合为 1.2 \times 结构自重+1.2 \times 履带吊荷载+1.4 \times 风荷载+1.4 \times 水流

荷载。

根据钢栈桥 Midas/Civi 模型计算结果，在 3 个工况中选取荷载最大值(即旋挖钻行走工况)进行计算与分析。

3.3.1 贝雷架栈桥

贝雷架栈桥计算结果见表 2。

表 2 贝雷架栈桥计算结果

部位	规格	组合应力/ MPa	剪应力/ MPa	变形/ mm	轴力/ kN
面板	δ8 mm	108.4	54.6		
纵向分配梁	I12.6	130.4	41.9		
横向分配梁	I22b	128.5	37.8		
贝雷片	321 型	253.6	48.5	21.3	
横、纵向 承重梁	双拼 H450×200	89.4	66.1		
钢管平联	φ426 mm×6 mm	36.8	4.9		
钢管桩	φ630 mm×10 mm	173.8	12.5		687.9

依据表 2 中计算结果，针对各部位的组合应力、剪应力、变形及轴力进行分析，选取最大值，并与规范所规定的允许值进行对比，以判断是否符合规范要求。

1) 贝雷片应力及挠度

321 型贝雷片材质为 Q345，根据 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》，其允许组合应力 $f_d=275$ MPa，允许剪应力 $f_{dv}=160$ MPa^[2]，竖向挠度限值为 $l/500=12\ 000/500=24$ mm。根据表 2 可知，贝雷片最大组合应力 $f=253.6<f_d=275$ MPa，最大剪应力 $f_v=48.5<f_{dv}=160$ MPa，最大竖向挠度为 $21.3<24$ mm，结构满足要求。

2) 其余构件应力

除 321 型贝雷片外其余构件材质均为 Q235，根据《公路钢结构桥梁设计规范》，其允许组合应力 $f_d=190$ MPa，允许剪应力 $f_{dv}=110$ MPa^[2]。根据表 2 可知，其余构件的最大组合应力 $f=173.8<f_d=190$ MPa，最大剪应力 $f_v=66.1<f_{dv}=110$ MPa，均满足要求。

3) 钢管桩轴力

钢管桩最大承载力为 687.9 kN，钢管桩采用 φ630 mm×10 mm 钢管，根据 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》与该工程的工程地质勘察报告计算可得钢管桩入土深度为 23.7 m。

3.3.2 型钢栈桥

型钢栈桥计算结果见表 3。

表 3 型钢栈桥计算结果

部位	规格	组合应力/ MPa	剪应力/ MPa	变形/ mm	轴力/ kN
面板	δ8 mm	102.4	53.7		
横向分配梁	I12.6	124.5	35.8		
主梁	H500×200	150.0	44.6	10.2	
横、纵向 承重梁	双拼 H450×200	86.3	62.3		
钢管平联	φ426 mm×6 mm	33.4	3.6		
钢管桩	φ630 mm×8 mm	76.6	11.8		653.2

依据表 3 中计算结果，针对各部位的组合应力、剪应力、变形及轴力进行分析，选取最大值，并与规范所规定的允许值对比，以判断是否符合规范要求。

1) 各构件应力及主梁挠度

型钢栈桥各构件材质均为 Q235，根据《公路钢结构桥梁设计规范》，其允许组合应力 $f_d=190$ MPa，允许剪应力 $f_{dv}=110$ MPa^[2]，主梁竖向挠度限值为 $l/500=6\ 000/500=12$ mm。根据表 3 可知，各构件最大组合应力 $f=150.0<f_d=190$ MPa，最大剪应力 $f_v=62.3<f_{dv}=110$ MPa，主梁最大竖向挠度为 $10.2<12$ mm，满足要求。

2) 钢管桩承载力

钢管桩最大承载力为 653.2 kN，钢管桩采用 φ630 mm×8 mm 钢管，根据《公路桥涵地基与基础设计规范》与该工程的工程地质勘察报告计算可得钢管桩入土深度为 23.5 m。

4 施工工艺

4.1 贝雷架栈桥

4.1.1 下部结构施工

施工钢管基础采用“履带吊+振桩锤”组合的工艺，以振打下沉的方式进行栈桥钢管桩基础的施工，确保基础的稳固性^[3]。

钢管桩基础施工完成后，采取人工与机械设备协同作业的方式，进行钢管桩立柱的平联和斜撑以及桩顶承重梁的安装，以确保结构的稳定性和整体性。

4.1.2 上部结构施工

贝雷梁安装采用螺栓连接的方式，将每 2 片贝雷片组合成 1 组。利用汽车吊机在专门的贝雷片拼装场区将其预先组拼完整。随后，采用四点起吊方式将单组贝雷梁整体吊起，并精确吊装至预定安装位置。调整新安装的贝雷梁与已安装的

贝雷梁端部对接成一条直线,然后将下弦销孔精确对准,并将销栓插入其中。最后抬起贝雷梁的后端插入上弦销体,并设置保险插销。

I22b 分配梁+装配式钢桥面板的组合结构用于栈桥桥面系建设。当贝雷梁安装完毕后,分配梁和桥面系的施工采用人工和履带吊装相结合的方式。为确保结构稳固,贝雷梁与分配梁、分配梁与装配式桥面板之间均采用特制的连接件进行连接,仅需按照规范要求拧紧螺栓,即可完成整体连接。

4.2 型钢栈桥

4.2.1 下部结构施工

型钢栈桥下部结构的施工方法,与贝雷架栈桥的施工方法一致。

4.2.2 上部结构施工

在完成承重梁的安装后,立即转入主梁的安装阶段。依照既定顺序,逐步推进分配梁和桥面板的安装。在此过程中,所有构件之间的连接,包括承重梁与主梁、主梁与分配梁以及分配梁与桥面板,都通过焊接方式实现,以确保结构的稳定性和安全性。上部结构采用人工与履带吊协同作业的方式,严格按照施工规范进行现场操作。

5 栈桥方案分析

5.1 结构形式

贝雷架栈桥以贝雷梁作为关键承重构件,通过螺栓和连接件实现稳固连接,将多个贝雷片组合成整体结构。这种结构可使施工过程变得相对简单且快速,同时单跨跨度较大,有效减少了河道中钢管桩的数量。然而,贝雷梁的高度较高,在满足栈桥梁底与水面的安全距离的前提下,提高了桥面的标高,进而增加了灌注桩护筒的长度,使得护筒的拔出难度加大。在安装和拆卸贝雷梁栈桥时,由于较大的跨度,对起重机的车体尺寸、起重臂长度以及最大起重量均有较高的要求,需要选用性能良好的起重机设备。

型钢栈桥的主要承重构件采用工字钢、H型钢以及槽钢等型钢材料,并通过焊接工艺连接,从而构成整体结构。鉴于梁体采用H型钢,高度相对较小,在确保栈桥梁底与水面的安全距离的同时,栈桥桥面的标高也相应较低,这有助于缩短灌注桩护筒的长度,降低护筒拔出的难度。然而,焊接作业对施工人员的技能和经验要求较高。至于安装与拆卸方面,由于型钢栈桥的跨度相对

较小,使用普通的起重设备即可满足施工要求。

5.2 施工效率

作为一种组装钢栈桥,贝雷架栈桥的结构主要以模块化为主,呈现出简洁明了的特点。构件部分采用标准化构件的承重梁、贝雷梁、桥面以及护栏,均可在工厂环境下实现大批量预制。这些预制构件可以按照预先设定好的顺序,在简单试装后运到工地。由于部分构件连接方式为栓接,可在拼接场地内组拼,在保证施工质量的同时,施工效率也有了明显的提高。

型钢栈桥在安装前是单独存在的单体构件,吊装到预定位置后,再按一定顺序安装,最后搭建成框架结构的完整体系。在水面上进行安装作业,作业空间比较有限,在一定程度上制约施工进度。另外,型钢栈桥的连接方式主要采用焊接,由于焊接对质量的要求较高,因此施工周期相对较长。

5.3 施工环保

在栈桥施工过程中,污染源主要来自于现场焊接及补充防腐作业。焊接过程中会产生包括有毒气体、弧光辐射、有害粉尘、噪音污染、高频电磁场辐射和射线等在内的大量有害物质和污染,不仅对施工人员的身体健康造成了一定的威胁,还对周围的大气环境、水域水质造成了不良的影响。而在防腐过程中,则会产生大量粉尘、废气、废水和废弃物,对自然生态环境造成严重危害。

型钢栈桥在施工过程中,由于现场焊接及防腐工程量较大,对施工人员和现场生态环境的损害较为明显。相对而言,贝雷架栈桥则更多地采用螺栓连接方式,从而降低了对施工人员及现场自然环境的潜在损害。

5.4 施工成本

贝雷架栈桥的上部结构由标准化构件通过螺栓紧密连接而成,这种结构设计具有出色的灵活性和可调性。在施工过程中,贝雷梁及桥面板的安装无需焊接,普通工人即可胜任施工任务。同时,因其快速搭建和拆卸的特点,在降低施工难度的同时,施工费用明显降低。另外,贝雷梁和桥面板因省去了焊接的步骤,在拆除时可以保持较好的状态,经过简单的修理和严格的检验后,可以多次重复利用,从而使材料利用率提高,工程项目节约成本明显。

经过施工焊接连接的型钢栈桥上部结构,在

拆除后普遍呈现出较为严重的破损情况,材料的再利用率受到了较大影响,降低了循环使用的可能性,导致了工程成本的增加。

5.5 方案比选

该特大桥工程在水道上修建钢栈桥,主要特点包括:

1) 鉴于水道无法通航,水上施工设备如打桩船、浮吊等不能使用,因此,栈桥的搭、拆必须严格遵循栈桥走向,充分利用已完成的栈桥部分进行施工作业。

2) 水道区域淤泥深厚,持力层埋藏较深,桩基施工主要在中粗砂层及强风化岩层进行,因此需打设的钢管桩长度较大,施工难度较高。

3) 水道涉及红树林自然保护区,对施工过程中的生态保护要求极高,因此,对施工污染的控制需采取更为严格的措施。

4) 水道为规划航道,工程完成后,需按照相关规定清除水道内除主体结构以外的所有结构设施,以确保航道的顺畅和安全。

在深入分析比较2种栈桥方案后,得出结论:贝雷架栈桥方案以贝雷片作为主要承重构件,通过螺栓连接实现整体结构的组装和固定,从而显著减少了焊接工程量,并降低了对周边环境的潜在影响。同时,该方案具有较大的单跨跨度,在水中搭建的钢管桩数量可以相应减少。鉴于工程所在地的水道地质条件为第四纪海陆混合沉积层,

力学性质较差,钢管桩的打设深度需达到至少20 m,部分钢管桩可能面临拔出困难的问题。贝雷架栈桥方案通过减少钢管桩数量,有效降低了施工作业的危险性。在施工周期方面,贝雷架栈桥方案采用拼装式整体结构,简化了吊装、安装和拆卸的过程,缩短了安装时间,并减少了受潮位影响的程度。因此,有效工作时长得以增加,施工效率得到显著提高。相较于型钢栈桥方案,贝雷架栈桥方案的建设周期缩短了约1/2,为确保大桥主体结构的建设进度提供了有力保障。综上,该工程本着优化施工工艺、提高施工效率、降低施工风险的原则,选用了贝雷架栈桥施工方案。

6 结语

本文选取了某特大桥横跨水道部分的工程作为研究案例,全面评估了现场可实施性、施工周期和经济成本等关键指标。对栈桥架设方案的结构设计、验算、施工工艺及关键施工环节进行了分析和对比,得出贝雷架栈桥方案可在确保结构安全性和可靠性的前提下,简化施工流程,缩短施工周期。此外,该施工工艺对环境的影响较小,有利于保护当地的生态环境,可为同类工程的便桥结构形式选择提供经验和参考。

参考文献:

- [1] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S].