

西南山区耐候钢箱组合梁桥设计要点

郭胜¹,文丽娜²,赵智²,柳松²,唐友明²

(1.四川省交通运输重点项目工作中心,四川 成都 610000;2.四川省公路规划勘察设计院有限公司,四川 成都 610000)

摘要:耐候钢桥具有疲劳性能和力学性能优越、抗腐蚀性能强、工厂加工制造速度快、现场施工干扰小且后期管养维护成本低等优点,在国外已采取了大批量建设,但国内关于耐候钢桥的建设项目和研究成果均较少。为探究西南山区中小跨径耐候钢箱组合梁的设计与运用,现以国道212线李家沟大桥为工程背景,吸收国内外耐候钢桥建造的发展经验,针对西南山区的特殊建设环境,对免涂装耐候钢箱组合梁桥的总体设计、钢材选择、结构布设、构造细节设计及后期管养的问题进行研究,为同类条件下的耐候钢桥建设提供参考借鉴。

关键词:耐候钢桥;钢箱组合梁;西南山区;构造细节设计;后期管养

中图分类号:U442.5+3

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)07-0109-06

0 引言

耐候钢桥在国外从20世纪开始建设,初级阶段的耐候钢桥建设采用了涂装体系,后期随着对材料性能的进一步研究发展,设计了大量的免涂装耐候钢桥。因为免涂装耐候钢桥的自重轻、吊装难度小、后期维护工作量小,从全寿命周期考虑,还可降低工程造价。该种桥型的结构特点鲜明,日本、韩国、德国、英国、加拿大等国家在50年前均已大批量建造了免涂装耐候钢桥。国外近30年来耐候钢桥梁的建设速度正在不断增长,可见耐候钢桥的优势已经被广泛认可。

国内的第一座耐候钢桥于20世纪90年代建成,但其后很长一段时间内,因为耐候钢桥设计体系和钢种材质等问题,并没有得到广泛的推广应用。耐候钢率先在我国铁路行业被运用,公路行业采用耐候钢桥梁的实例极少。直至2011年,中铁山桥集团有限公司中标美国阿拉斯加铁路桥,开启了中国企业制造耐候钢桥的新篇章,同时也为中国耐候钢的发展奠定了基础^[1]。

2015—2018年,拉林铁路雅鲁藏布江大桥、官厅水库公路大桥、中俄黑龙江公路大桥、福州洪塘公路大桥等大量耐候钢-混组合梁桥陆续建成,标志着国内耐候钢桥的建设已被同行认可,耐候钢桥建

设如今正处于蓬勃发展阶段。

通过对国内外耐候钢桥的发展情况作对比研究,可知国外已进行了大批量建设,但国内耐候钢桥的建设总量、相对比例均远远小于国外,免涂装耐候钢桥的建设实例相当有限,耐候钢桥梁技术还处于萌芽阶段。本文以国道212线上的李家沟大桥为工程背景,吸收国内外耐候钢桥建造的发展经验,针对西南山区的特殊建设环境,对免涂装耐候钢箱组合梁桥的总体设计、钢材选择、结构布设、构造细节设计及后期管养的问题进行研究。

1 总体设计

国道212线宝轮至卫子段(元坝过境段)公路改建工程(以下简称本项目)是四川省广元市区内城市组团联络的主要通道。李家沟大桥的建设是实现城东新城元柳工业园区与中国西部绿色家居产业园间快速连接的重要通道,也是本项目节点控制性工程。该桥采用公路-I级荷载设计,地震动峰值加速度按0.1g设计,抗震本烈度为Ⅶ度,所处环境为I类环境。桥位现状如图1所示。



图1 桥跨现场情况

收稿日期:2023-07-07

基金项目:四川省交通运输科技项目(2021-ZL-07)

作者简介:郭胜(1977—),男,工程学士,高级工程师,从事技术咨询及项目勘察设计全过程管理工作。

通信作者:赵智(1985—),男,工学学士,高级工程师,从事桥梁勘察设计及咨询研究工作。电子信箱:693661309@qq.com

本桥位于川北欠发达山区,且上跨已通车广巴高速,这一特点契合采用疲劳性能和力学性能优越、抗腐蚀性能强、加工制造速度快、现场施工干扰小且后期管养维护成本低的耐候钢结构桥梁。

根据相关要求,本桥的建设需考虑广巴高速公路远期拓宽的影响,桥梁孔跨设计按高速公路拓宽为路基宽度 42 m 的双向 8 车道作出预留。同时,既有高速公路中央分隔带不允许立墩,则需考虑桥台距离挖方坡脚的安全距离。经过综合比选,本桥采用一跨跨越既有高速,上部结构采用 1~58 m 简支钢箱组合梁,桥梁整幅宽度为 30.5 m,下部结构为 U 台身+承台+桩基础的组合式桥台,桥台均按径向布置,如图 2 所示。

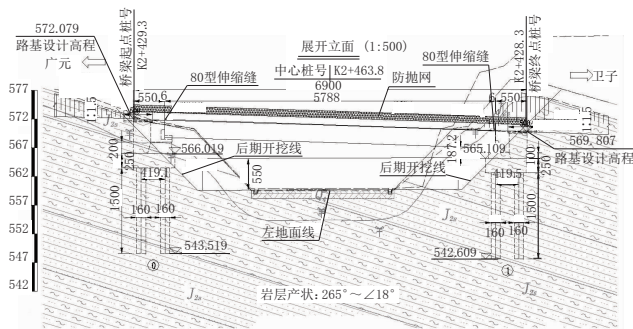


图 2 桥型布置图(单位:mm)

桥梁总体上采用左右分幅设计的方案,一幅钢-混组合梁横向分为3片独立的箱梁结构,采用横隔板连接,因川北山区的运输条件受限,为方便运输,主箱纵向在工厂分为5个节段加工制造,单节段纵向制造最大长度不超过12 m。钢-混凝土组合桥面板总厚度为18 cm,采用PBL(Perfobond Leiste)开孔板与现浇的钢纤维混凝土形成,不采用更复杂的现场张拉预应力工艺。钢箱梁主体结构材料:钢箱梁

主梁、加劲肋、横联钢板和横隔板均采用 Q345qNHC 钢材,其钢板耐大气腐蚀指数 $I \geq 6.2$ 。

2 钢材选择

本桥采用耐候钢作为上部重要承重构件，钢材的合理选用是本桥设计的关键点之一，我们从国内外对于免涂装耐候钢的规定进行对比分析，耐候钢对使用环境有一定的要求，空气中的 SO_2 气体、 Cl^- 离子以及桥址区环境的温度、湿度均会影响耐候钢表面红褐色防锈层的形成，决定免涂装耐候钢桥的使用性能。

国道 212 线李家沟大桥位于川北山区, 区域内无 SO_2 气体和 Cl^- 离子影响; 多年平均气温 18.6°C , 极端最低气温为 -4.5°C , 极端最高气温 42°C ; 相对湿度为 $61\%\sim 77\%$ 。按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[2]规定, 钢材的冲击韧性质量等级应按 C 级考虑。因而本桥钢箱梁主梁、加劲肋、横联钢板、横隔板等暴露于空气中的构件均采用 Q345qNHC 钢材; 再结合美国标准, 耐大气腐蚀性指数按 $I \geq 6.2$ 考虑。同时, 结合国外对腐蚀速率的研究, 本桥受力构件需考虑腐蚀厚度, 结构布设时相应加厚板件尺寸。

3 结构布设

一幅钢-混组合梁横向分为3片独立的箱梁结构,采用横隔板连接,采用高强螺栓的连接方式,横向制造的最大宽度为3.65 m。每片钢-混组合梁梁高为3.0 m,其中钢结构部分梁高2.82 m,混凝土桥面板高0.18 m,边梁悬臂长1.25 m。横断面具体布置如图3所示。

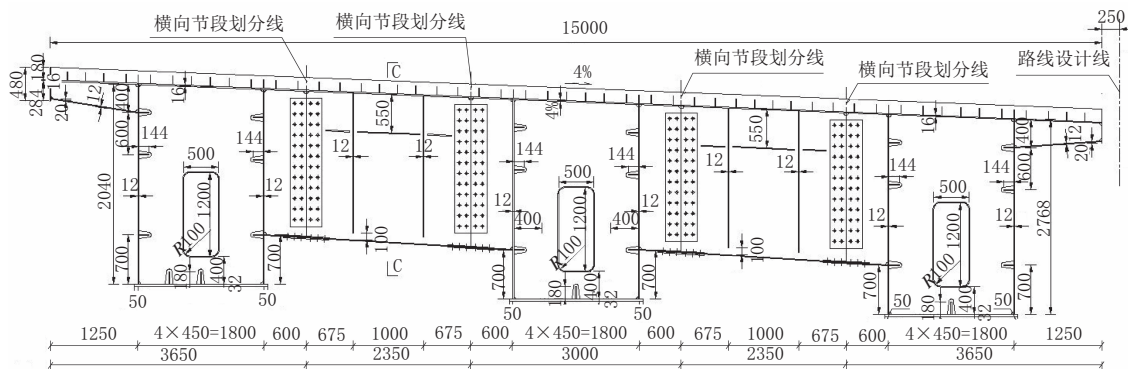


图 3 主梁横向布置图(单位:mm)

为方便运输,主箱纵向在工厂分为5个节段加工制造,单节段纵向制造最大长度不超过12 m,具体划分情况如表1所示。

钢-混组合梁顶板为 8 mm 的薄钢板,与 18 cm 厚混凝土形成钢-混组合桥面板。每片钢-混组合梁纵向每隔 4.8 m 设计一道横联,横联之间每隔

表 1 节段划分情况表

制造节段划分	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
距起点位置 /m	0~11.9	11.9~23.1	23.1~34.9	34.9~46.1	46.1~58
节段长度 /m	11.9	11.2	11.8	11.2	11.9

1.6 m 设置一道圈式加劲横隔板。钢 - 混组合梁在底板、腹板位置沿纵向设置加劲肋,加劲肋厚度分别采用 16、12 mm 厚钢板,其中腹板加劲肋厚度与腹板厚度保持一致。桥面板 PBL 剪力键厚度为 6 mm。桥梁的顶、底、腹板厚度根据不同位置的受力情况设置为不等板厚,该厚度除满足受力要求外,还需考虑腐蚀厚度再加厚 1 mm。具体厚度设置如表 2、表 3 所示。

表 2 顶板厚度设置表

分段	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
相对距离 /m	0~10.7	10.7~22.1	22.1~35.9	35.9~47.3	47.3~58
板长 /m	10.7	11.4	13.8	11.4	10.7
厚度 /mm	16	20	20	20	16

表 3 底、腹板厚度设置表

分段	第一段	第二段	第三段	第四段	第五段
相对距离 /m	0~10.9	10.9~22.1	22.1~35.9	35.9~47.1	47.1~58
板长 /m	10.9	11.2	13.8	11.2	10.9
底板厚度 /mm	34	38	42	38	34
腹板厚度 /mm	16	12	12	12	16

悬臂挑梁顶板与箱梁顶板厚度一致,腹板与底板厚均为 12 mm,悬臂挑梁位置与横联或圈式加劲横隔板一一对应。考虑质量控制要求并为尽量减小施工难度,钢主梁与各纵横向构件应采用高强螺栓连接、焊接两种方法组合的现场连接方式。

4 构造细节设计

4.1 免涂装钢箱组合梁横联构造设计

李家沟大桥横联构造分为普通横联与支点横联两种。普通横联顶板与对应位置钢梁顶板厚度一致,厚 12 mm,每 4.8 m 设置一道;支点横联腹板厚度 12 mm,底板加厚至 16 mm。横联与顶板形成工字型断面,腹板处顶板局部加厚,由 16 mm 变为 20 mm。

免涂装耐候钢箱梁在运输与现场拼装时应注意保护横联已经形成的红褐色锈层,与耐候钢进行高

强螺栓连接形成整体是最关键环节,应着重对连接位置摩擦面的处理工艺进行严格控制,如图 4 所示。

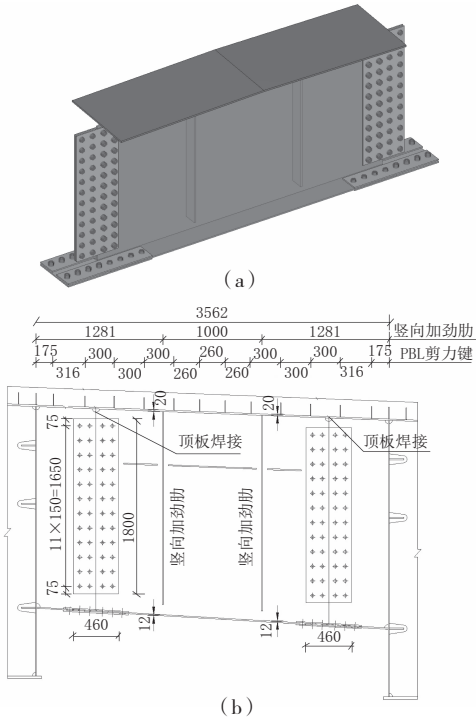


图 4 横联布置示意图(单位:mm)

4.2 钢 - 混凝土组合桥面板设计

钢 - 混凝土组合桥面板是将带孔钢板剪力键的带孔钢板作为加劲肋焊接在底钢板上,并埋设在混凝土中的剪力键上,再浇筑水泥混凝土后形成共同受力的桥面板,如图 5 所示。李家沟大桥钢 - 混凝土组合桥面板厚 18 cm,采用现浇钢纤维 C40 混凝土,钢纤维掺量为 50 kg/m³。



图 5 钢梁顶带孔钢板剪力键布置示意图

钢箱梁顶带孔钢板剪力键,板厚 6 mm,板高 120 mm,开孔直径为 60 mm,间距为 120 mm;纵向布置间距按 245~350 mm 控制,单幅桥宽 15 m,布置 56 道 PBL 开孔板。每个孔位内横向穿 N3 钢筋,直径为 16 mm;混凝土桥面板内纵横向穿主筋 N1、N2,直径为 16 mm,间距均按 100 mm 布置,其配筋率为 320 kg/m³,如图 6 所示。

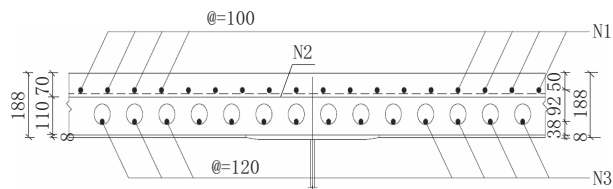


图6 带孔钢板与钢筋布置示意图(单位:mm)

由于8 mm底钢板和6 mm带孔钢板剪力键较薄,加工、制造和焊接时变形较大,需采取以下措施减少构件焊接时产生的变形:带孔钢板的焊接可采用间断错位双面焊缝,其构造应如图7所示。

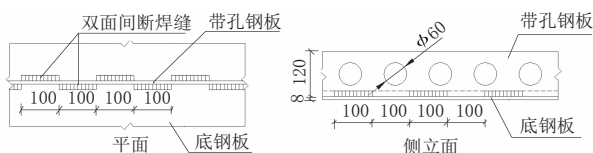


图7 带孔钢板与底钢板间断错位双面焊缝构造(单位:mm)

三个小箱梁之间采用8 mm的钢板对接使箱梁顶板形成整体,同时做混凝土浇筑的底模板,加工制造钢-混凝土组合桥面板的底钢板时,应在位置较低、应力较小的部位设置孔径不小于5 cm的施工排水孔,排水孔在钢结构加工厂制造时一并设置。从而让施工过程中钢顶板的雨水、施工用水等能够快速排出钢结构。钢梁与混凝土桥面边缘采用密封处理,为保证结构的耐久性,须采取高强防水层构造,做好桥面板顶层的防水施工,从桥面板的细节构造处理上避免水对免涂装耐候钢梁的危害。同时,避免桥面板混凝土浇筑时水泥浆液溢出,对钢结构造成不利影响。

4.3 免涂装钢箱组合梁的焊接设计

耐候钢相对于同强度的低合金高强度钢而言,其焊接性能会降低。耐候钢焊缝除满足一般焊缝的相关力学性能要求外,还应保证耐候钢焊缝的耐腐蚀性能与耐候钢相匹配。美国的《桥梁焊接规范》(Bridge Welding Code)(AWS D1.5M/D1.5)^[3]规定采用焊接材料与钢材相匹配的同时,焊接材料还应具有更高的Ni含量,以达到提高耐候性和力学性能的目的。目前我国关于耐候钢焊缝的腐蚀性能研究处于起步阶段,相关的试验研究数据相对匮乏,对耐候钢焊缝的耐腐蚀性能评价暂无相关参考依据,大多采用与耐候钢一样的耐腐蚀指数算法、周期浸润腐蚀试验法及电化学测试法等对耐候钢焊缝进行评价^[4]。

李家沟大桥的焊缝设计通过对国外和国内钢桥设计的经验总结,焊接材料采用试验性的提出耐大气腐蚀指数 $I \geq 6.2$ 并适当提高Ni含量的要求。对于

免涂装耐候钢,所有接头(包括角焊缝)都应采用连续焊接,以避免水分和腐蚀陷阱。耐候钢的焊接类似于传统高强结构钢的焊接,但耐候钢应具有较高的碳当量值(CEV, Carbon Equivalent Value)。

由于在本桥结构中的焊缝较多,所产生的焊接变形和残余应力较大,制造过程中,为保证焊缝质量,所有类型的焊缝在焊接前应进行焊接工艺评定试验,编制完善的焊接工艺评定试验报告。

4.4 免涂装钢箱组合梁的高强螺栓连接

李家沟大桥的横联、腹板、底板纵向均采用M30高强螺栓连接,高强螺栓连接的耐久性也是本桥设计的又一细节重点,如图8所示。



图8 腹板高强螺栓施工

目前高强螺栓连接头的涂装防腐一般采用两种表面处理方法:喷铝处理和无机富锌漆处理。表面处理的好坏将直接影响高强螺栓的抗滑移承载力,但这两种处理方法对免涂装耐候钢桥不适用。免涂装耐候钢桥主要受连接板件的强度、接触面粗糙度、接触面清洁度和接触面间隙大小影响。免涂装耐候钢高强螺栓的表面处理方法主要有喷砂处理、喷砂后赤锈处理、砂轮打磨和手工钢丝刷清理。陶晓燕等^[5]通过试验研究确定了采用喷砂、钢丝刷相结合的处理工艺能够满足免涂装耐候钢桥的连接要求,但喷砂以后的表面状态会随着在大气中的放置时间发生变化。室外放置时间在半年内,试样的抗滑移系数较为稳定。

根据上述研究,李家沟大桥在钢结构出厂时的高强螺栓栓孔部位表面抗滑移系数应不小于0.55,出厂以后,免涂装耐候钢高强螺栓的保质期按半年设计。

4.5 免涂装钢箱组合梁的通风及防排水设计

李家沟大桥上跨既有广巴高速公路,桥跨范围内通风条件良好,且桥下没有河流等可能飞溅的水体使钢材长期处于潮湿状态,容易形成稳定的防腐锈层。因此,对钢箱组合梁的通风干燥设计主要考虑

每1a目测检测1次。同时,应做到每5a1次重点测量钢板厚度、监测钢板的腐蚀速率,若超过允许值,应考虑相应的补救措施。

5 结 语

我国对免涂装耐候钢箱组合梁桥的建造研究起步晚,相关规范规定还不够成熟,尤其在针对钢板的温度湿度选型、免涂装耐候钢焊接材料、免涂装耐候钢高强螺栓、免涂装耐候钢桥通风防水、免涂装耐候钢箱组合桥面板设计、中小跨径免涂装耐候钢管养标准等方面都仍有待进一步研究。

李家沟大桥的设计中对上述问题在总结经验的情况下,对部分构造细节进行了创新性设计,对同类型的中小跨径免涂装耐候钢箱组合梁设计有一定的参考作用。免涂装耐候钢桥作为一种有鲜明特点的

桥型,需通过更多的试验和实例验证,在选材、设计、施工及维修养护等方面逐渐形成理论体系,从而推动中小跨径免涂装耐候钢箱组合梁建造的进一步发展和创新。

参考文献:

- [1] 翟晓亮,袁远.我国耐候钢桥发展及展望[J].钢结构,2019,34(11):69-74.
- [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] AWS D1.5M/D1.5, Bridge Welding Code[S].
- [4] 车平,李军平,于强,王青峰.耐候桥梁钢及其焊缝耐腐蚀性评价研究[J].世界桥梁,2022,50(2):71-77.
- [5] 陶晓燕,史志强,韩继跃,戴润达,巩晓辉.耐候钢桥的高强度螺栓连接试验研究[J].钢结构,2018,33(1):105-108.
- [6] 贺君,刘玉擎,陈艾荣.耐候钢在桥梁工程中的运用[J].北京交通大学学报,2006(11):310-315.

~~~~~  
(上接第108页)

总的建安费中占比不大,因此总的建安费增加并不太大,约为1.59%。采用钢盖梁方案在节约工期、减少征地拆迁、减少对地面交通的影响、文明施工等方面具有较大优势,可以取得较好的社会效益。该工程钢与混凝土复合结构桥墩从结构材料方面入手,改进下部结构预制方法,实现了桥梁结构的全预制,可以作为预制结构一个新的解决思路。

## 5 结 语

本文介绍了桥梁预制中大体积盖梁预制存在的

问题,结合通城大道快速路提出了钢与混凝土复合结构钢盖梁方案,并进行了经济性和社会效益分析,可为类似工程参考。

### 参考文献:

- [1] 郭川.杭州市通城快速路总体方案设计[J].城市道桥与防洪,2020(7):10-12.
- [2] 卢永成,黄虹,吴东升.桥梁预制拼装技术[M].北京:中国交通出版社股份有限公司,2021.
- [3] 胡方健.UHPC薄壁盖梁设计、结构试验及施工技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(6):163-166.