

长挑臂闭口钢箱组合梁桥设计及其关键技术

季建东^{1,2},王彬^{1*}

(1.山西交科公路勘察设计院有限公司,山西太原 030032;2.山西省交通规划勘察设计院有限公司,山西太原 030032)

摘要:为满足黄河桥梁跨度需求和减少临时施工设施对黄河泄洪的干扰,该文以临猗黄河大桥为依托,其主桥采用(112+28×128+120)m连续长挑臂闭口钢箱组合梁,共分两联,最大联长1912m。钢箱组合梁采用无临时墩顶推法施工,闭口钢箱梁顶推到位后再安装桥面板,桥面板安装顺序为先跨中正弯矩区后支点负弯矩区。重点对组合梁负弯矩区力学性能优化措施、斜撑抗疲劳设计和2.5m高声屏障抗风优化设计3个关键技术问题开展研究,结果表明:负弯矩区采用双结合构造可降低钢箱梁底板压应力和桥面板裂缝宽度,张拉体外预应力钢束的优化效果随着混凝土收缩徐变作用逐渐降低;相同截面积的方钢管斜撑抗疲劳性能优于圆钢管;折线形声屏障可有效抑制主梁涡振响应。

关键词:长挑臂闭口钢箱组合梁;顶推施工;负弯矩区;疲劳性能;声屏障;风洞试验

中图分类号:U448.216

文献标志码:A

Design and Key Technologies of Bridges with Long-Cantilever Closed Steel Box Composite Girder

Ji Jiandong^{1,2}, Wang Bin^{1*}

(1.Shanxi Transportation Science Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032, China;

2.Shanxi Transportation Survey & Design Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032, China)

Abstract: In order to meet the span requirements of bridges over the Yellow River and reduce the interference of temporary construction facilities on flood discharge from the Yellow River, the Linyi Yellow River Bridge was studied. The main bridge adopted a continuous long-cantilever closed steel box composite girder of (112 + 28 × 128 + 120) m and was divided into two parts, with the maximum length of the parts being 1 912 m. The steel box composite girder was constructed by incremental launching method without temporary piers, and the bridge deck was installed after the closed steel box girder was in place. The installation sequence of the bridge deck was from the positive bending moment area in the middle of the span to the negative bending moment area at the fulcrum. The research focused on three key technical issues: optimization measures of mechanical properties in the negative bending moment area of the composite girder, fatigue resistance design of diagonal braces, and optimization design of wind resistance of a 2.5 m-high acoustic barrier. The results show that the compression stress on the bottom plate of the steel box girder and the crack width of the bridge deck can be reduced by using the composite structure in the negative bending moment area. The optimization effect of externally tensioned prestressed steel bundles decreases gradually with the shrinkage and creep of concrete. The fatigue resistance of diagonal braces of square steel pipes with the same cross-sectional area is better than that of round steel pipes. The polygonal acoustic barrier can effectively suppress the vortex response of the main girder.

Keywords: long-cantilever closed steel box composite girder; incremental launching construction; negative bending moment area; fatigue performance; acoustic barrier; wind tunnel tests

收稿日期:2024-02-26(修改稿)

基金项目:山西交科集团创新发展计划项目(编号:21-JKCF-05);山西交通控股集团有限公司科技项目(编号:2021-JKKJ-06)

作者简介:季建东,男,大学本科,高级工程师.E-mail:397647813@qq.com

*通信作者:王彬,男,硕士,高级工程师.E-mail:wbinbridge@163.com

0 引言

长挑臂钢箱组合梁具有结构自重小、受力明确、施工进度快等优点,在国内外大跨径桥梁设计中得到广泛应用,如法国的 Verriers 高架桥、杭州九堡大桥和长沙福元路湘江大桥引桥均采用该种断面形式^[1-3]。但目前相关研究大多数是针对开口钢箱组合梁的,对长挑臂闭口钢箱组合梁桥的设计关键技术鲜见报道。鉴于此,本文以挑臂长度 7.5 m 的闭口钢箱组合连续梁桥——临猗黄河大桥为背景,基于有限元计算和风洞试验对组合梁负弯矩区力学性能优化措施、斜撑抗疲劳设计和高声屏障抗风优化设计 3 个关键技术问题开展研究,研究结果可指导类似桥梁施工图设计。

1 工程概况

临猗黄河大桥是菏泽至宝鸡高速公路的控制性工程,是连通晋陕两省,跨越黄河小北干流禹门口至潼关河段的特大型桥梁,桥梁全长 5 427 m,其中主桥长 3 816 m。为满足黄河桥梁跨度需求,主桥采用跨径 128 m 的长挑臂闭口钢箱组合梁截面形式,共分两联,山西侧一联桥跨布置为(112+14×128) m,陕西侧

一联桥跨布置为(14×128+120) m,采用顶推法施工,钢箱梁顶推到位后再安装桥面板。引桥采用 40×40 m 预应力混凝土连续 T 梁。本桥采用高速公路双向四车道设计标准,整幅桥布置,桥面宽度 26 m,设计速度 100 km/h,设计荷载等级为公路-I 级,基本地震动峰值加速度为 0.15g,桥面设计风速 44.8 m/s,环保部门要求主桥两侧设置 2.5 m 高不透光材质的声屏障。

2 结构设计

2.1 桥跨布置

临猗黄河大桥主桥采用整幅式断面布置,连续梁体系,主桥跨径组合为(112+14×128) m+(14×128+120) m,总长 3 816 m,共分两联,最大联长 1 912 m,如图 1 所示。

上部结构采用横向长挑臂闭口钢箱组合梁,采用等高度单箱单室截面布置,由长挑臂闭口钢箱梁通过栓钉与混凝土桥面板组合而成。桥面宽 26.00 m,组合梁高 6.28 m,底板宽 11.00 m,单侧挑臂长 7.50 m,典型断面如图 2 所示。中支点负弯矩区组合梁采用双结合构造,即在中支点两侧 24.00 m 范围内浇筑厚度 60~50 cm 混凝土板,并通过 PBL 剪力键与钢箱梁底板结合。

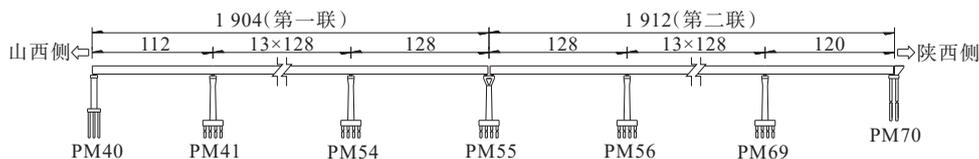


图 1 临猗黄河大桥主桥总体布置图(单位:m)

Figure 1 Layout of main Linyi Yellow River bridge(unit:m)

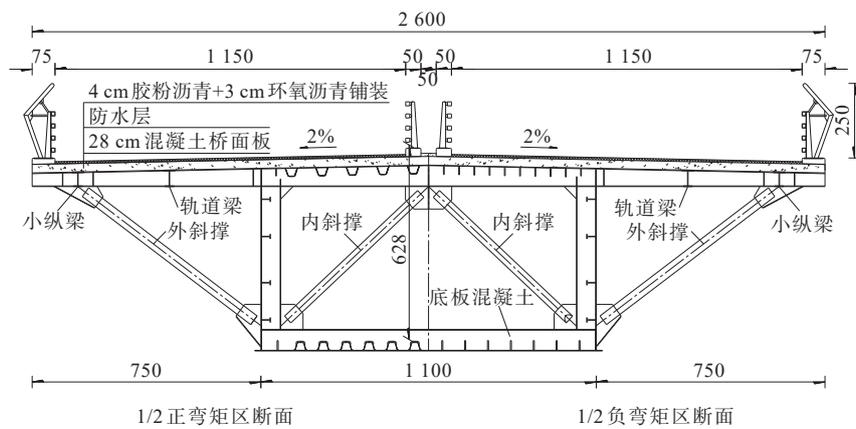


图 2 主梁典型横断面(单位:cm)

Figure 2 Typical cross-section of main girder (unit:cm)

2.2 钢箱梁设计

钢箱梁采用闭口断面形式,由顶板、腹板和底板以及通长布置的纵向加劲肋组成。顶板宽 11.6 m,底板宽 11.2 m,双向坡设计,中心处梁高 6.0 m。钢箱梁横隔系包括实腹式横隔系和空腹式横隔系,除支点处采用实腹式横隔系外,其余位置均采用空腹式横隔系。空腹式横隔系由钢箱梁横向加劲肋、长挑臂横梁、箱内钢管斜撑和箱外钢管斜撑组成,纵向标准间距 4.0 m,如图 3 所示。钢箱梁材质为 Q420qD 耐候钢,顶板厚 16~60 mm,腹板厚 24~48 mm,底板厚 20~60 mm,边中跨比为 1:1,最大板厚位于边跨,板厚变化如图 4 所示。顶、底板纵肋根据受力性能选择

不同的形式,跨中正弯矩区采用 U 肋,支点负弯矩区采用板肋,纵向连续布置。腹板纵肋采用 T 肋,由于顶推过程中的正负弯矩交替作用,竖向布置 4 道。

钢箱梁横隔系材质为 Q345qD 耐候钢,横向加劲肋均采用 T 肋。长挑臂横梁采用工字形断面,梁高 440~590 mm,上翼缘宽 600 mm,厚 24 mm,下翼缘宽 300 mm,厚 20 mm,腹板厚 16 mm。箱内钢管斜撑采用方钢管,尺寸为 270 mm×270 mm,壁厚 14 mm;箱外钢管斜撑亦采用方钢管,尺寸为 340 mm×340 mm,与节点板焊接面的壁厚 20 mm,其余壁厚 14 mm^[4]。

钢箱梁与混凝土桥面板通过栓钉剪力连接件形成组合梁,栓钉规格为 $\varnothing 22 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。

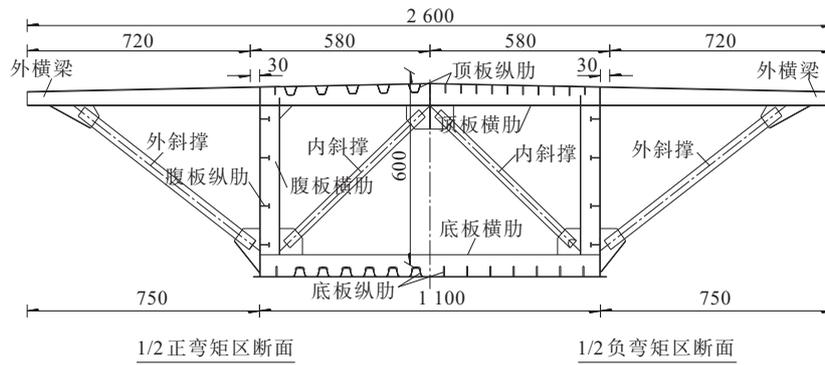


图 3 钢梁典型断面(单位:cm)

Figure 3 Typical section of steel girder (unit:cm)

顶板板厚	60	56	44	28	28	32	28	24	
腹板板厚	48	44	36	32	32	32	32	32	
底板板厚	60	52	36	36	36	36	36	28	
	4	500	8 000	8 000	8 000	24 000	48 000	8 000	18 700

(a) 边跨钢箱梁板厚变化示意

顶板板厚	56	48	32	24	16	24	32	48	56	
腹板板厚	48	36	32	28	24	28	32	36	40	
底板板厚	48	40	32	24	20	24	32	40	48	
	4	500	8 000	8 000	8 000	71 000	8 000	8 000	8 000	4 500

(b) 中跨钢箱梁板厚变化示意

图 4 钢箱梁板厚变化示意图(单位:mm)

Figure 4 Plate thickness change of steel box girder (unit:mm)

2.3 桥面板设计

主桥中支点两侧各 40 m 范围的桥面板采用 C50 钢纤维混凝土,其余采用 C50 混凝土,板厚 28 cm。

桥面板分为预制板和现浇板,两侧挑臂采用预制桥面板,中间闭口钢箱采用现浇桥面板,预制板横向宽度 678 cm,纵向长度 350 cm,通过湿接缝连接。运营

阶段桥面板允许开裂,按限值裂缝宽度控制设计。

桥面板纵向配筋率随着弯矩分布而变化:支点负弯矩区配筋率平均为 2.49%,钢筋直径为 25 mm,纵向钢筋置于横向箍筋外侧,上下各布置 1 层,预制桥面板部分下层增设 1 层钢筋,直径为 20 mm;跨中正弯矩区配筋率平均为 1.93%,钢筋直径为 22 mm,纵向钢筋置于横向箍筋外侧,上、下各布置 1 层。桥面板横向配有预应力束,钢绞线型号为 15-4,间距 50 cm,待混凝土桥面板与钢箱梁完全结合后再张拉^[5]。

2.4 施工方法

钢箱梁以板件形式运输至现场,通过现场布置拼装厂组拼成钢箱梁。采用顶推法施工,钢箱梁先顶推就位后,再安装混凝土桥面板^[6-7]。山西岸侧与陕西岸侧分别布置顶推施工平台,如图 5 所示,两联钢箱梁对向顶推,最大连续顶推长度 1 912 m。考虑到临时墩对黄河汛期泄洪的影响,采用无临时墩的顶推方案,每联钢箱梁仅顶推前端布设钢导梁。

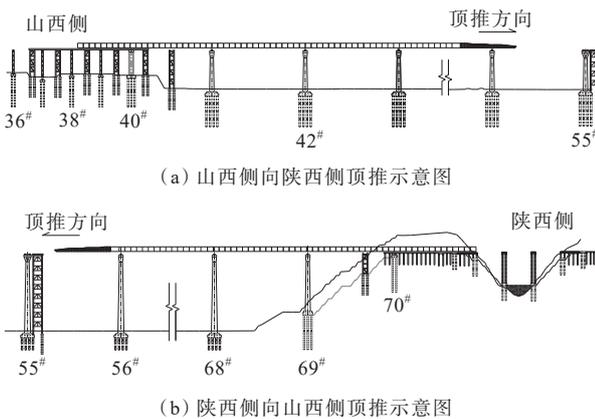


图 5 钢箱梁顶推施工示意图

Figure 5 Incremental launching construction of steel box girder

钢箱梁顶推到位后,先安装与浇筑跨中正弯矩区桥面板,待混凝土硬化后再施工支点负弯矩区桥面板,该方法可减小中支点处负弯矩区桥面板拉应力。采用先钢箱梁后桥面板的施工方法,施工阶段钢箱梁承担自重和桥面板的重量,为后期桥面板的更换创造了条件,同时也是实现无临时墩顶推施工的关键所在。

3 设计关键技术问题

3.1 负弯矩区力学性能优化设计

对于连续闭口钢箱组合梁,中支点区域组合梁受负弯矩作用,一方面混凝土桥面板受较大的拉应

力,需配置直径较大、根数较多的钢筋以满足裂缝宽度要求,导致钢筋焊接工作量大,钢筋用量大;另一方面,钢箱梁底板承受较大的压力,为满足受力和构造要求增加底板厚度,增大了全桥用钢量^[6-7]。为改善中支点负弯矩区组合梁受力性能,结合当前国内外研究结论和实际工程应用,通常中支点负弯矩区采用双结合构造、张拉体外预应力钢束、预制桥面板分批安装和支点升降 4 种优化措施。根据参考文献^[8]的研究结论,桥面板分批安装,对正弯矩区钢梁上缘影响较大,对负弯矩区组合梁影响较小,再结合本桥具有大跨、长联特点,采用支点顶升法导致施工工序复杂,施工设备投入大,故本桥重点研究双结合构造和张拉体外预应力钢束两种优化措施。

3.1.1 中支点组合梁的双结合构造

组合梁在中支点两侧各 24 m 范围内,钢箱梁底板浇筑 60~50 cm 混凝土,通过底板纵向加劲肋开孔连接形成双结合构造,底板混凝土的主要作用:作为结构构件直接参与受力,能有效降低钢箱梁底板压应力,减小钢板厚度;钢箱梁底板进行局部约束,提高了钢箱梁局部抗屈曲能力;增加了组合梁截面抗弯刚度,减小了负弯矩区桥面板裂缝^[9-11]。

为验证双结合构造对负弯矩区组合梁的力学性能优化作用,对负弯矩区采用双结合构造和未采用双结合构造的连续钢箱组合梁进行计算分析。采用 Midas Civil 桥梁通用计算软件建立第一联主桥上部连续钢箱组合梁有限元模型,其中闭口钢箱梁、混凝土桥面板和混凝土底板均采用梁单元模拟,闭口钢箱梁与桥面板和混凝土底板采用刚臂连接,46#~49# 桥墩设置固定支座,其余桥墩设置纵向滑动支座,忽略桥墩和支座刚度的影响,模型如图 6 所示。

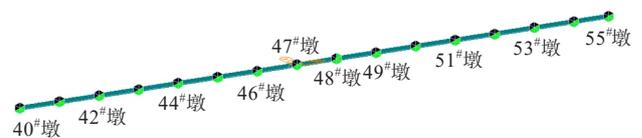


图 6 主桥第一联上部结构有限元模型

Figure 6 Finite element model of first superstructure of main bridge

计算结果表明:基本组合作用下,成桥运营阶段未采用双结合构造的组合梁下翼缘钢板最大压应力为 304.7 MPa,采用双结合构造后相同板厚条件下压应力降为 212.6 MPa,降幅约 30.2%;同时未采用双结

合构造的组合梁桥面板裂缝宽度计算值为0.20 mm,采用双结合构造后相同配筋率条件下的裂缝宽度计算值为0.17 mm,降幅约15%。可见中支点采用双结合构造后能够显著改善负弯矩区组合梁力学性能。

3.1.2 张拉体外预应力钢束

对于连续钢箱组合梁,张拉体外预应力钢束是优化其负弯矩区力学性能的有效措施,不仅可以减小混凝土桥面板拉应力,降低钢筋用量,还可以改善钢箱梁内力分布,减少支点位置钢梁顶板板厚。体外预应力是待全桥混凝土桥面板与钢箱梁形成组合梁后,再张拉预应力钢束,以对负弯矩区桥面板施加预应力。拟定每束体外预应力钢束长56 m,型号为15-21,每个中支点负弯矩区横向布置12根,钢绞线张拉控制应力为1395 MPa,两端张拉,计算模型如图6所示。分别计算张拉与不张拉体外预应力组合梁在成桥阶段和10年收缩徐变后的应力,以第一联中间跨(47[#]墩至48[#]墩)为研究对象,计算结果如图7所示(负号受压)。

由图7可知:张拉体外预应力后,成桥阶段负弯矩区桥面板压应力明显增大,压应力由-0.11 MPa增大到-0.83 MPa,增加约为87%,同时也增大了跨中正弯矩区桥面板的拉应力,减小了桥面板受压区长度,加大了桥面板开裂风险,且负弯矩区桥面板拉应力随着混凝土的收缩徐变逐渐增大,降低了体外预应力对桥面板的改善作用。张拉体外预应力使成桥阶段负弯矩区钢箱梁顶板拉应力由107 MPa减小到78 MPa,降幅约为27%,对钢箱梁受力改善较大,但10年收缩徐变后,钢箱梁顶板拉应力基本与不张拉体外预应力结构相当。可见张拉体外预应力钢束对负弯矩区组合梁受力性能影响随着混凝土收缩徐变逐渐减小^[12]。

基于上述分析,中支点组合梁的双结合构造能够显著改善负弯矩区组合梁受力性能,张拉体外预应力钢束成桥阶段改善效果明显,但随着混凝土收缩徐变作用优化效果逐渐降低,故本桥不采用张拉体外预应力钢束的优化措施。

3.2 斜撑抗疲劳优化设计

横向长挑臂闭口钢箱组合梁桥由于桥面宽度大,悬臂长,一般采用长挑臂横梁+圆钢管斜撑进行加劲,斜撑与横梁采用管-板连接,即钢管端部开口与节点板焊接,研究表明^[13-16]:在桥面荷载作用下,圆钢管与横梁连接处极易发生疲劳破坏,疲劳寿命较低。为提高斜撑的抗疲劳性能,临猗黄河大桥

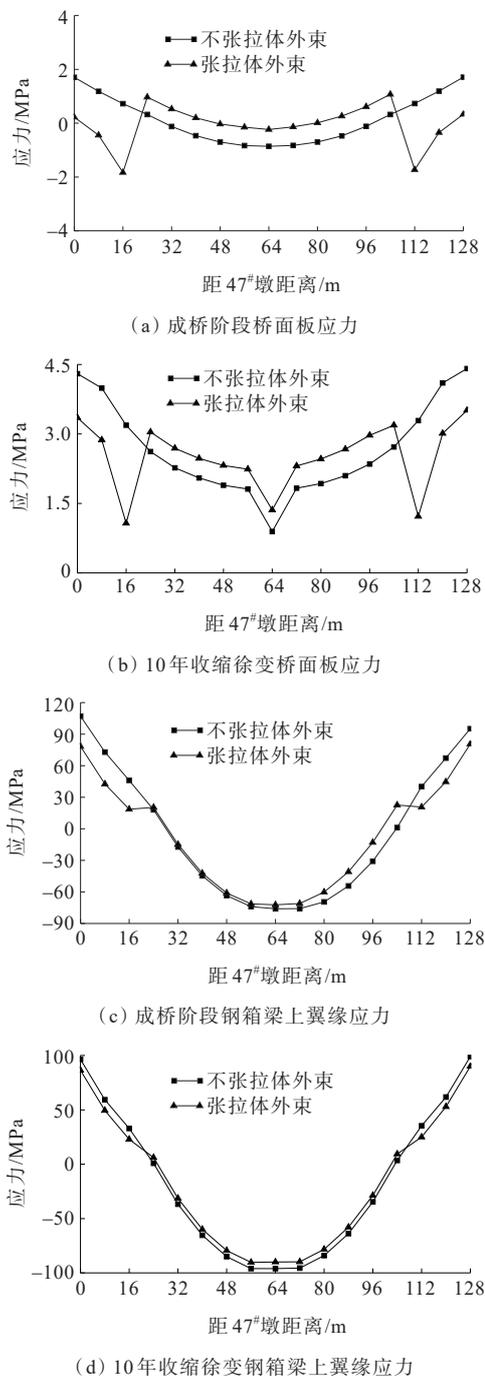


图7 张拉与不张拉体外预应力组合梁应力分布图

Figure 7 Stress distribution of externally prestressed composite girder with and without tension

斜撑采用方钢管,尺寸为340 mm×340 mm,与节点板连接面壁厚20 mm,其余壁厚14 mm。钢管与节点板焊接采用熔透焊,为避免箱外环境对斜撑耐久性的影响,钢管端部设置密封板,构造如图8所示。

为验证方钢管斜撑疲劳优化措施的有效性,基于面积相等原则,对方钢管和直径为340 mm的圆钢管进行疲劳计算对比分析,建立有限元疲劳分析模

型。以跨中外斜撑为分析对象,首先分析单位荷载下斜撑轴力影响面,如图9所示(纵桥向0表示计算斜撑位置,横桥向0表示组合梁中心线)。



图8 管板连接示意图

Figure 8 Pipe-plate connection

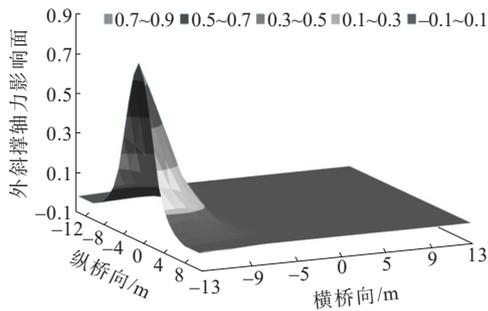


图9 组合梁横隔板斜撑轴力影响面

Figure 9 Influence surface of axial force for diagonal braces of diaphragm of composite girder

从图9可知:斜撑轴力受压影响线最大值为0.799,受拉影响线最小为-0.012,表明斜撑为受压构件,受拉可忽略不计,为直接将斜撑最大压应力作为疲劳应力幅提供了依据;斜撑轴力值有明显的集中现象,主要集中在纵向对称于斜撑前后8 m,横向由悬臂外侧向内5 m矩形区域。若超出此区域,其影响基本可忽略不计。

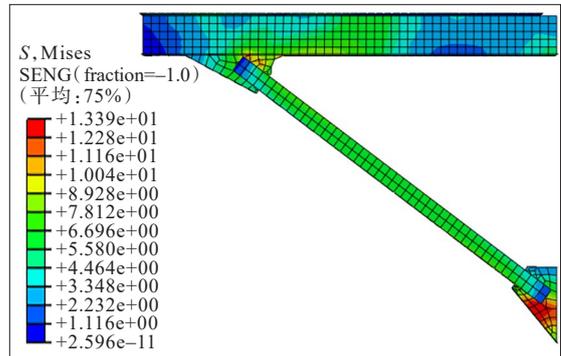
分别建立方钢管和圆钢管有限元疲劳分析模型,荷载采用文献[14]提供的疲劳荷载模型Ⅲ进行加载,加载位置根据图9所示影响面加载,计算结果如图10所示。

计算结果表明:圆钢管的疲劳应力幅为15.1 MPa,而方钢管的疲劳应力幅为10.5 MPa,降幅约为30.5%,方钢管截面斜撑的抗疲劳性能优于圆钢管的。

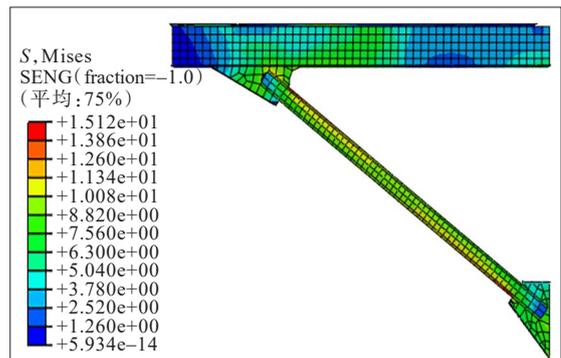
3.3 声屏障抗风优化设计

长挑臂钢箱组合梁断面具有低阻尼比、低扭转刚度和低结构频率等特征,虽然此类截面与钢箱梁断面相比抗风性能较好,但随着跨径的增大组合梁抗风性能逐渐变差,容易出现涡激振动现象^[17-19]。通过现场安装风观测塔采集到4年风观测数据表明,桥面高度处的设计风速为44.8 m/s,且根据国家生态环

境部要求,桥梁两侧需设置2.5 m高的不透光材质声屏障,主梁实际迎风高度达8.5 m,声屏障设置形式对主桥抗风稳定性有较大的影响。设计阶段分别对2.5 m高的直线形和折线形声屏障进行了风洞试验研究,如图11所示。



(a) 方钢管斜撑疲劳应力幅



(b) 圆钢管斜撑疲劳应力幅

图10 疲劳荷载作用下不同截面斜撑疲劳应力幅(单位:MPa)

Figure 10 Fatigue stress amplitude of diagonal braces with different sections under fatigue load(unit:MPa)



图11 节段模型风洞试验

Figure 11 Wind tunnel test of segmental model

首先对2.5 m高的直线形声屏障开展试验研究,结果如图12所示。试验结果表明:成桥运营阶段2.5 m直线形声屏障组合梁发生了明显的竖向涡激共振现象,振动竖向位移最大为0.072 m,已超过规范允许值0.051 m。

为解决组合梁抗风稳定问题,对声屏障进行设

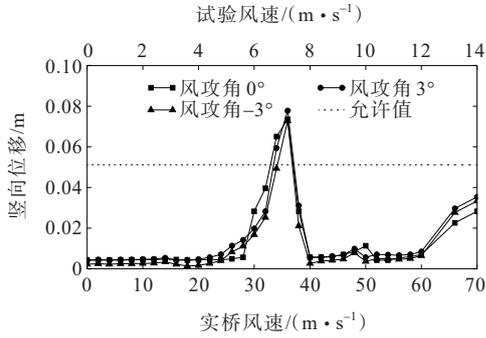


图12 直线形声屏障风洞试验结果

Figure 12 Results of wind tunnel test with linear acoustic barriers

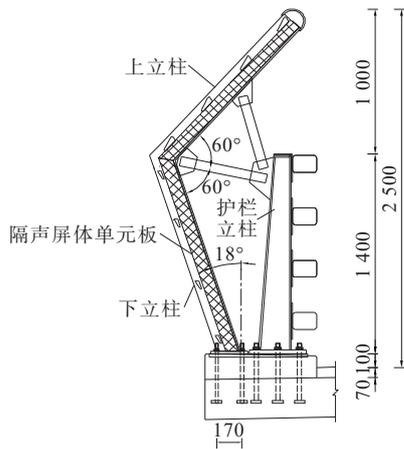


图13 折线形声屏障示意图(单位:mm)

Figure 13 Polyline acoustic barrier (unit:mm)

计优化,采用折线形声屏障代替直线形声屏障,折线形声屏障由外侧立柱、内侧防撞护栏和隔音板组成,外侧立柱分上、下两部分,下立柱高1.5 m向外倾斜18°,上立柱高1 m与下立柱成120°向内倾斜,与防撞护栏共同固定隔音板,折线形声屏障布置如图13所示。风洞试验数据(图14)表明:折线形声屏障风致振动竖向位移最大为0.031 m,均小于规范允许值

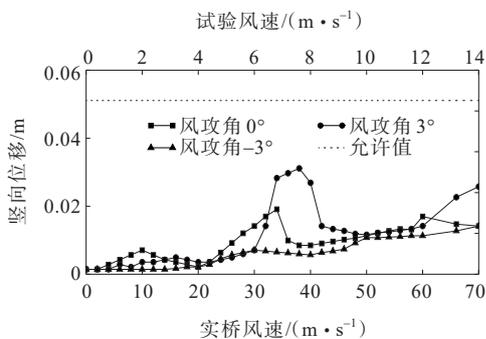


图14 折线形声屏障风洞试验结果

Figure 14 Results of wind tunnel test with polyline acoustic barriers

0.051 m。可见对于大跨径钢箱组合梁,采用折线形声屏障的抗风稳定性优于直线形声屏障的。

4 结论

本文以菏泽至宝鸡高速公路临猗黄河大桥主桥为例,针对其复杂的建设条件,提出了上部结构采用主跨128 m长挑臂闭口钢箱组合梁,无临时墩顶推法施工,闭口钢箱梁顶推到位后再安装桥面板的设计方案,开展了长挑臂闭口钢箱组合梁设计关键技术相关研究,得到以下结论:

(1) 中支点负弯矩区设置双结合构造可显著降低钢箱梁底板压应力,提高底板抗屈曲能力,同时亦可降低桥面板裂缝宽度,提高桥面板的耐久性;张拉体外预应力钢束的优化效果随着混凝土收缩徐变作用逐渐降低,故主桥设计不采用该措施。

(2) 疲劳计算结果表明长挑臂钢箱组合梁斜撑为受压构件,受力具有明显的轴力集中现象;相同截面积的方钢管斜撑的抗疲劳性能优于圆钢管的。

(3) 桥面设计风速44.8 m/s工况下,设置2.5 m高直线形声屏的组合梁发生了明显的竖向涡激共振现象,竖向振动位移超过规范允许值,相同高度折线形声屏障组合梁竖向振动位移满足规范设计要求。

参考文献:

References:

[1] 邵长宇.九堡大桥组合结构桥梁的技术构思与特色[J].桥梁建设,2009,39(6):42-45.
SHAO Changyu. Technical consideration and features of composite structure bridges of Jiubao bridge in Hangzhou [J]. Bridge Construction, 2009, 39(6): 42-45.

[2] 龚臻,李翠平,雷洛.复杂艰险条件下钢混组合桥梁设计应用[J].中外公路,2022,42(2):131-137.
GONG Zhen, LI Cuiping, LEI Luo. Design and application of steel-concrete composited bridge under complex and difficult conditions [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 131-137.

[3] 朱朝银,张贵明,徐自然.南益高速公路南洞庭(胜天)大桥设计构思与创新技术[J].中外公路,2020,40(6):162-165.
ZHU Chaoyin, ZHANG Guiming, XU Ziran. Design concept and innovative technology of the South Dongting (Shengtian) bridge on Nanyi expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 162-165.

[4] 刘钊,邢渊,贺志启,等.槽形钢梁-预制混凝土桥面板组

- 合箱梁设计研究[J].桥梁建设,2016,46(6):35-39.
LIU Zhao, XING Yuan, HE Zhiqi, et al. Design and development of a composite girder with steel tub girders and precast concrete deck slabs[J]. Bridge Construction, 2016,46(6):35-39.
- [5] 李聪,聂建国,周心怡,等.钢-混凝土连续组合梁桥负弯矩区抗裂设计[J].建筑结构学报,2022,43(3):172-178.
LI Cong, NIE Jianguo, ZHOU Xinyi, et al. Anti-cracking design for hogging moment regions of steel-concrete continuous composite beam bridges[J]. Journal of Building Structures, 2022,43(3):172-178.
- [6] 陈军刚,王学勇,周洲,等.大跨钢-混凝土组合箱梁无支架顶推技术与控制计算[J].中外公路,2020,40(4):137-141.
CHEN Jungang, WANG Xueyong, ZHOU Zhou, et al. Support-free jacking technique and control calculation for long-span steel-concrete composited box girder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020,40(4):137-141.
- [7] 夏学军.宽幅钢箱梁大跨高位顶推施工关键技术[J].世界桥梁,2019,47(3):15-19.
XIA Xuejun. Key construction techniques for long-span and high-position incremental launching of wide steel box girder[J]. World Bridges, 2019,47(3):15-19.
- [8] 刘佳.大跨度钢-混凝土连续组合梁桥施工过程有限元分析[D].武汉:华中科技大学,2012.
LIU Jia. Finite element simulation analysis of long span continuous composite beam bridge in construction process [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [9] 杨凯,刘婉玥,周小伍.基于美国规范的钢-混组合梁桥设计方法分析与应用[J].中外公路,2023,43(5):168-171.
YANG Kai, LIU Wanyue, ZHOU Xiaowu. Analysis and application of design method of steel-concrete composited beam bridge based on American code[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023,43(5):168-171.
- [10] 李杨,邢万里,丁井臻,等.钢-混凝土双面组合作用连续梁有限元分析与试验设计[J].建筑结构,2020,50(17):84-90.
LI Yang, XING Wanli, DING Jingzhen, et al. Finite element analysis and experimental design of steel-concrete double-sided composite continuous beams[J]. Building Structure, 2020,50(17):84-90.
- [11] 弓正,苏秀丽,许凯峰,等.底板混凝土对连续组合梁桥性能影响研究[J].公路交通科技,2021,38(增刊1):48-52.
GONG Zheng, SU Xiuli, XU Kaifeng, et al. Study on the influence of floor concrete on the performance of continuous composite beam bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38 (sup 1):48-52.
- [12] 王宇琪,贾艳敏,魏皓天,等.预应力连续钢梁负弯矩区受力性能分析[J].中外公路,2019,39(4):71-76.
WANG Yuqi, JIA Yanmei, WEI Haotian, et al. Analysis of behavior of prestressed continuous steel beams under negative bending moment[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019,39(4):71-76.
- [13] 卜建清,张吉仁.钢-混凝土组合梁疲劳性能试验研究进展[J].中外公路,2022,42(5):78-82.
PU Jianqing, ZHANG Jiren. Research progress on fatigue behavior of steel-concrete composite beams[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(5):78-82.
- [14] 马帅,杨力.轮载模型对钢桥疲劳损伤评估的影响分析[J].中外公路,2022,42(4):126-131.
MA Shuai, YANG Li. Effect of wheel load model on fatigue damage assessment of steel bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(4):126-131.
- [15] 姜磊,刘永健,龙辛,等.基于热点应力法的矩形钢管混凝土组合桁梁桥节点疲劳评估[J].交通运输工程学报,2020,20(6):104-116.
JIANG Lei, LIU Yongjian, LONG Xin, et al. Fatigue assessment of joints in concrete-filled rectangular hollow section composite truss bridges based on hot spot stress method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020,20(6):104-116.
- [16] 黄鹤,秦攀.正交异性板钢桁结合梁焊接细节疲劳性能分析[J].中外公路,2022,42(3):109-114.
HUANG He, QIN Pan. Fatigue analysis of welded details of orthotropic deck steel truss composited beams[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(3):109-114.
- [17] 敬大德,苏益.桥梁气动外形改变对大跨桁梁桥抗风性能影响研究[J].中外公路,2024,44(1):119-125.
JING Dade, SU Yi. Influence of aerodynamic shape change on wind resistance performance of large span truss bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024,44(1):119-125.
- [18] 曾广平.大跨径悬索桥风场特征监测及其与振动加速度关联分析[J].中外公路,2022,42(2):142-147.
ZENG Guangping. Wind field characteristic monitoring of long-span suspension bridge and analysis on its correlation with vibration acceleration[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(2):142-147.
- [19] 方国强,杨鸥.钢-混组合梁抗风性能及抑振措施研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(9):2303-2310.
FANG Guoqiang, YANG Ou. Vortex-induced vibration performance of steel-concrete composite girder and aerodynamic optimization measures[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(9):2303-2310.