

钢混互为强约束下板梁拓宽设计建造方法

董 萌¹, 颜 海², 崔 冰¹, 李陆蔚¹

[1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京市 100010; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 为兼顾桥梁拓宽工程的安全、美观和经济性,以某沿海桥梁为工程背景,提出一种采用钢混组合结构为旧桥横桥向结构外延进行桥面拓宽的改造方法。重点介绍了桥梁拓宽方法的具体结构设计和施工方法,通过理论计算验算了结构的承载能力和抗裂性能,并通过荷载试验进一步验证了拓宽后的桥梁工作性能。研究表明,基于桥梁拓宽方法,钢混可互相形成强约束,在确保了结构性能安全可靠的同时具有很好的景观效果和优良的经济性。

关键词: 组合梁;板梁;拓宽设计;承载能力

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0109-05

Steel-Concrete Mutually Rigidly Restrained Slab-Girder Widening Design and Construction Method

DONG Meng¹, YAN Hai², CUI Bing¹, LI Luwei¹

[1. CCCC Highway Consultants. Co., Ltd., Beijing 100010, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To balance safety, aesthetics, and economy in bridge widening projects, using a coastal bridge as an engineering case study, a widening method involving the transverse extension of the existing bridge deck using a steel-concrete composite structure is proposed. Detailing the structural design and construction methodology of this widening approach is focused on. The structural bearing capacity and crack resistance were verified through theoretical calculations, and the performance of the widened bridge was further validated via load testing. The proposed widening method facilitates strong mutual constraint between the steel and concrete components is demonstrated which ensures the structural performance is safe and reliable while simultaneously achieving excellent aesthetic integration and superior cost-effectiveness.

Keywords: composite girder; slab-girder; widening design; load-carrying capacity

0 引 言

随着经济持续快速发展,近年来我国交通事业发展迅速。严重的交通拥堵成为许多大中城市的“痛点”,畅通道路瓶颈成为提高群众出行满意度的第一要务。作为道路关键要素之一的桥梁,提高其通行能力可采取拆除重建或者旁位新建的方法,但往往受到位置、线形、周边环境等众多因素的影响,难度高、代价大;而采取直接拓宽改造既有桥梁的方法不仅可以提高资源利用效率,还具有良好的经济效益。

直接改造拓宽既有桥梁上部结构有很多实现方式,钢混组合构造外延法是其中之一。如上海松浦大桥改造时,采用了钢结构支撑横向外延,并结合钢混组合桥面板对旧桥进行了拓宽,取得了较好的效果。钢混组合桥面板的核心受力特点是利用混凝土层与钢板的高效组合,显著提升桥面板的刚度、局部承压能力、抗裂性、耐久性,并最关键的是有效抑制钢板局部弯曲变形,大幅改善其疲劳性能^[1],同时实现轻量化。在桥梁上部结构拓宽中采用钢混组合构造外延法,可以在有效发挥材料特性的同时降低结构自重,达到不增加下部结构额外改造工作的效果。

某沿海大桥采用钢混组合构造外延法直接增加旧桥悬臂长度进行上部结构拓宽改造,形成了钢混互为强约束下板梁的拓宽。合理的利用了钢和混凝土结构各自的优势,对桥下空间影响最小,经济性十

收稿日期: 2025-06-01

作者简介: 董萌(1980—),男,博士,正高级工程师,从事桥梁设计工作。

通信作者: 李陆蔚(1991—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计研究工作。电子信箱: 1428859175@qq.com

分明显,且景观效果良好。本文以该工程为背景,介绍钢混互为强约束下板梁拓宽设计建造方法,并简要介绍了拓宽后桥梁的结构验算和荷载试验结果,供业内同行参考。

1 工程概况

某大桥建设于20世纪80年代末期,位于我国东南沿海,连接海岛与大陆,横跨海峡,是进出岛的重要通道。海峡近年来虽又建设多条跨海通道,但一方面进出岛交通需求旺盛,另一方面该桥运营期又增设多条匝道,导致通行能力与接线道路不匹配,使其成为高峰期十分严重的拥堵路段。为改善大桥交通状况、提升区段通行能力,启动了该桥拓宽改造工程。

该桥全长909.36 m,单向桥面净宽为10.5 m,单向38跨,包括第一至第六联。其中第一、第二联桥桥跨组合均为 $(24.8+5\times 25.5)$ m;第三、四、五、六联桥组合为 6×25.5 m、 4×25.5 m、 5×25.5 m、 $(5\times 25.5+21.88)$ m。主梁采用混凝土空心板梁结构。原桥桥型布置图如图1所示。

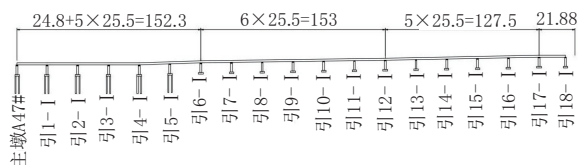


图1 原桥桥型布置图(单位:m)

大桥主桥桥面总宽23.5 m,上下分幅,双向4车道通行,单幅桥面设有应急车道和人行道,主桥桥面布置经调整后可以满足双向6车道通行的目标需求。引桥亦上下分幅双向4车道通行,上部为现浇空心板构造,桥面总宽21.0 m,横断面布置如图2所示。与主桥相比取消了两侧人行道,引桥既有桥面宽度无法实现4车道改6车道的提升目标,需进行拓宽改造。

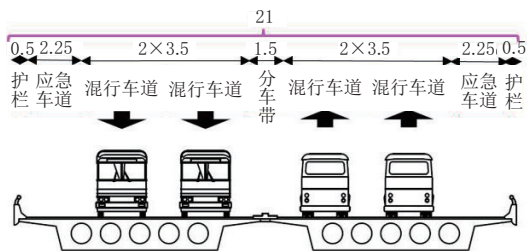


图2 空心板梁横断面(单位:m)

2 拓宽设计

2.1 设计思路

采用在原结构翼缘悬臂板基础上延长挑臂方法进行拓宽,需要对上部结构纵横双向、下部结构等进行详细验算。为保证老桥结构安全储备不降,通常采用增重配合减重、结构加固补强等综合提升方法。通常主梁横向受力起控制作用,需要在结构体系上思考解决方案,如将原钢筋混凝土结构体系转换为组合梁、混合梁、桁架梁等。这种拓宽设计方法应用广泛经济性优越,如各方面结构受力均满足规范要求,不需要改造下部结构,拓宽后结构双边展翅,景观效果较佳,适合在重要性高且使用环境复杂的市政桥梁中使用。

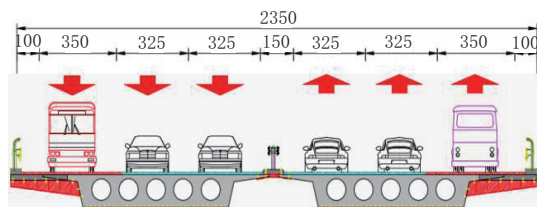


图3 改造悬臂长度主梁拓宽示意图(单位:cm)

因此,基于上述判断,首先对这种设计思路构思了两种最初步的设计方案。

(1) 横向组合结构拓宽

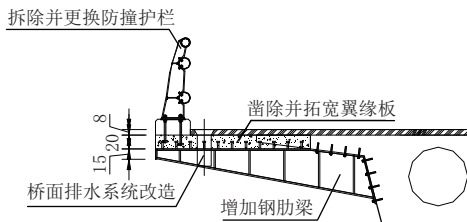


图4 横向组合结构拓宽示意图(单位:cm)

该方案采用等间距横向钢结构横肋保证横向受力,主要的问题在于为了控制混凝土悬臂根部的受力状况^[2-3],需要将钢横肋设置的比较密,造价较高,并不经济。

(2) 横向混凝土结构拓宽

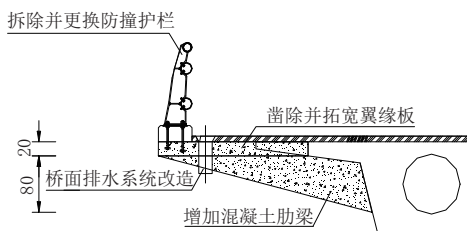


图5 横向混凝土结构拓宽示意图(单位:cm)

该方案采用混凝土横肋对桥面实现拓宽,可以将混凝土横肋间距控制在3 m,间距比较合适。但混

凝土横肋的宽度需要做到 40~50 cm,断面较厚,对结构增重较大。采用混凝土拓宽后对下部结构、桥梁抗倾覆以及后增加的混凝土肋受力可靠性均存在挑战。

通过上述初步的分析研究,新增大悬臂采用混凝土横肋对原结构的增重较为明显,存在诸多方面的问题。为了保证结构的强度的同时减小结构增重,最终采用了钢混结构外延拓宽的方案。

2.2 构造设计

遵循“装配化模块化施工安装、降低桥面正常通行影响”的设计理念,构思了引桥边中翼缘拓宽方案,其标准断面图如图 6 所示。

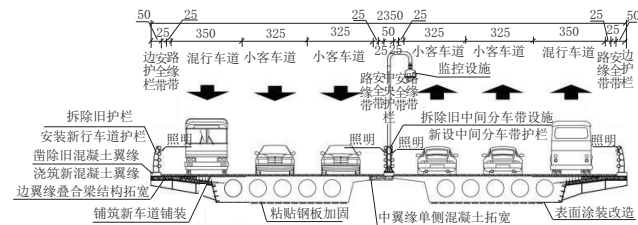


图6 横向钢混组合梁拓宽方案标准断面图(单位:cm)

对于引桥边翼缘的改造,在拆除原箱梁悬挑式护栏后,采用下承钢结构拓宽段,其标准断面图与纵向布置图如图 7 和图 8 所示。由于引桥梁高较低,且组合结构拓宽受力敏感截面位于混凝土悬臂肋根上缘拉应力受控,截面裂缝宽度容易超限^[4],组合结构属于负弯矩区受力特点,钢与混凝土结构刚度存在一定的不匹配。而在对肋根处的刚度提升最有效的方式在于将混凝土肋根截面高度做整体的提升。采用横向工字钢叠合梁拓宽,作为主要受力构件,混凝土采用粗骨料 UHPC^[5]。

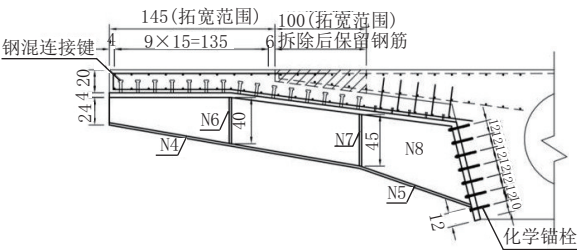


图7 边翼缘横向工字钢组合结构拓宽标准断面布置(单位:cm)

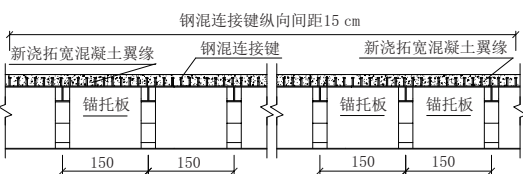


图8 边翼板拓宽纵向布置(单位:cm)

工字钢梁纵桥向间距为 1.5 m,锚栓采用 M16 化学锚栓,间距 12 cm 呈梅花形布置,钢板的牌号为 Q355。工字钢梁顶面设置剪力栓钉呈梅花型

布置^[6]。

此外,对于边翼缘的拓宽存在混凝土负角度浇筑区,其中钢筋植入与混凝土浇筑的施工难度较高。在叠合梁横向拓宽的大思路下,采用“大肋”配“小肋”的方式(每 2 m 一个大肋中间每 0.5 m 一个小肋),对悬臂根部薄弱截面进行钢结构加密支撑,经初步计算表明,此方案不需要对混凝土悬臂根部进行增高也可以将应力控制在与原结构应力水平一致。对主梁局部^[7]计算结果如图 9 所示。

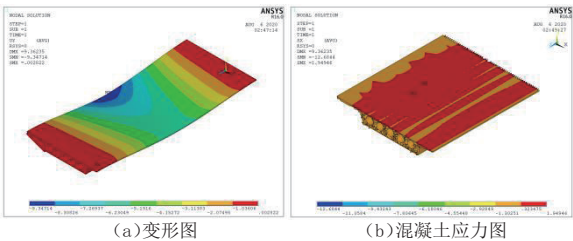


图9 “大肋”配“小肋”子方案变形图与混凝土应力图

引桥中翼板在拆除原中央分隔带附属设施后,对单侧进行凿除并保留原有钢筋,在不改变原有横向两幅桥受力体系前提下,在两幅桥横向连接预留一道变形缝,采用柔性材料填充。与主桥相比,引桥中央悬臂之间净宽为 40 cm,因此当中央防撞护栏完全安装一侧时,还需与另一幅搭接 10 cm。

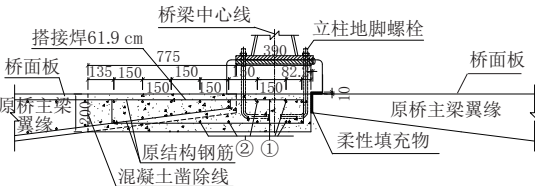


图10 中翼缘混凝土刚接拓宽标准断面布置(单位:cm)

2.3 建造方法

横向工字钢组合梁作为后浇筑混凝土的模板,先通过节段预制后分块吊装至桥上,通过与腹板有效的后锚固措施连接。在混凝土肋根处预留 20 cm 高度的后浇筑带,与原结构植筋连接,最终实现 1.45 m 的大悬臂拓宽。

具体的,首先对原结构翼缘边缘 1 m 范围内的混凝土进行凿除,凿除时注意不应破坏原结构钢筋。然后采用粘贴钢板的方式将工字钢锚固在原结构腹板上,用化学锚栓与原结构固定。工字钢梁安装完毕后,对翼板底部进行植筋并绑扎新结构钢筋,植筋采用梅花形布置^[8],间距为 15 cm,钢筋采用直径为 12 mm 的 HRB400 热轧带肋钢筋,新结构横向钢筋与原结构横向钢筋焊接在一起,焊接长度不小于 60 cm,钢筋的横桥向和纵桥向间距均为 15 cm。钢筋绑扎完毕后浇筑新结构混凝土。

2.4 钢混互为强约束下板梁拓宽设计的特点

钢混互为强约束下板梁拓宽设计有以下特点。

(1)采用钢混组合结构拓宽使得拓宽部分钢结构和混凝土互相支撑互相约束,在显著增加结构刚度的同时降低结构自重。

(2)中翼缘带左右幅桥面采用不连接的方式,避免了左右幅在施工过程中荷载不均对桥梁的影响,简化了拓宽施工过程。

(3)钢混组合构造外延法不增加桥墩、不侵占桥下空间、对桥下交通影响小、施工简单工期短、经济效益显著,十分适合城市立交、高架等路况复杂的桥梁拓宽工程。

(4)拓宽改造后主梁整体形态优美,宛如张开翅膀的海鸥倩影,掠过水面,飞向远处的大海。

3 内力分析及荷载试验

3.1 计算荷载

(1)一期恒载:钢筋混凝土容重 26 kN/m³,按实际断面计算重量。

(2)二期恒载:考虑桥面防撞护栏、泄水管及桥面铺装、调平层等,二期恒载取值 2.604 t/m。

(3)加固荷载:考虑底板粘贴钢板、翼缘板加固钢板等,取值 16 kN/m。

(4)汽车活载:汽一超 20,按 3 车道考虑横向折减,横向折减系数取 0.78,横向偏载系数取 1.15。

(5)挂车荷载:挂车—120,不考虑横向折减,横向偏载系数取 1.15。

(6)温度:体系升温取 25 ℃,体系降温取-15 ℃;温度梯度按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)取值。

3.2 承载力验算

改造后主梁持久状况下正截面抗弯验算结果如下图所示图 11 至图 12 所示。

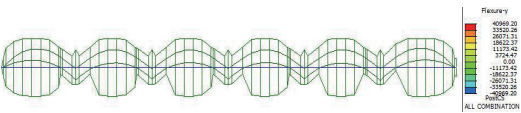


图 11 持久状况正截面抗弯验算包络图(单位:kN·m)

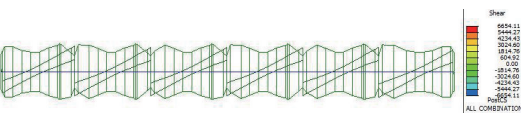


图 12 持久状况斜截面抗剪验算包络图(单位:kN·m)

作用效应的组合设计最大值≤构件承载力设计值,满足规范要求。

主梁主拉应力如图 13 所示。满足规范 A 类预应力构件的要求。

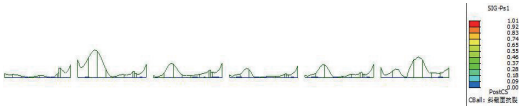


图 13 主梁主拉应力包络图(单位:MPa)

3.3 荷载试验

对完成改造后的某一联桥梁进行荷载试验,测点布置如图 14 和图 15 所示。

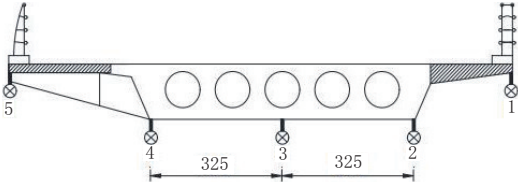


图 14 截面挠度测点布置示意图(单位:cm)

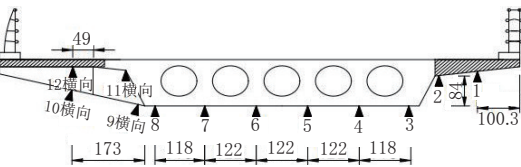


图 15 截面应变测点布置示意图(单位:cm)

各试验工况作用下相应控制截面未见新裂缝产生。实测挠度和应变结果与理论值对比如表 1 和表 2 所列。

表 1 挠度试验结果

测点	实测值/ mm	理论值/ mm	校验 系数	相对残余 变位/%	备注
1#	5.52	6.35	0.87	5.7	中翼板
2#	5.35	6.85	0.78	4.1	原主梁
3#	6.62	8.05	0.82	6.6	
4#	7.38	9.10	0.81	2.8	
5#	7.72	10.08	0.77	1.3	边翼板

注:1. 挠度向下为正。
2. 校验系数 η =实测/理论。
3. 表中数值已消除支座变形的影响。

各测点处,挠度实测值均小于理论计算值。边翼板端部在最大偏载工况作用下实测挠度为 7.72 mm 小于理论值 10.08 mm。中翼板端部在最大偏载工况作用下实测挠度为 5.35 mm,小于理论值 6.35 mm,测试截面实测的挠度校验系数为 0.78~0.87,相对残余挠度最大值为 6.6%。测试截面挠度校验系数小于或处于《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)规定的常值范围 0.70~1.00,相对残余挠度最大值小于该规程规定的 20%。

各测点处,应变实测值均小于理论计算值。测试截面混凝土结构实测的应变校验系数为 0.76~0.82,边翼板钢筋梁悬臂应变校验系数 0.57~0.65,小

表2 应变试验结果汇总表

测点	弹性 应变 $\mu\epsilon$	理论值 $\mu\epsilon$	校验 系数	相对残余 变位/%	备注
1#	-22.1	-26.9	0.82	8.6	新增翼缘
2#	-5.2	-6.6	0.79	4.0	
3#	78.3	100.6	0.78	0.1	原主梁
4#	75.0	99.0	0.76	1.7	
5#	76.7	99.5	0.77	3.2	
6#	78.4	100.2	0.78	3.4	
7#	93.1	114.6	0.81	0.8	
8#	106.7	134.8	0.79	0.1	
9#	-10.9	-18.2	0.60	1.2	钢筋梁
10#	-6.2	-10.9	0.57	1.6	
11#	5.4	9.3	0.58	1.8	
12#	3.3	5.1	0.65	2.7	

注:1. 应变以受拉为正。
2. 校验系数 η =实测/理论。
于处于规范规定的范围(0.75~1.00),中翼缘板延伸段,混凝土纵向应变校验系数为0.79~0.82,处于规范规定的范围(0.60~0.90),相对残余应变最大值为8.6%。测试截面应变校验系数基本处于《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)规定的常值范围0.60~0.90,相对残余应变最大值小于该规程规定的20%。

通过以上测试结果可知:钢筋梁与主梁满足结构计算刚接假设,新增翼缘板与原有主梁共同受力,连接刚性大于理论计算值,且连接效果满足设计要求,结构的整体工作性能良好。新增延伸翼缘板与主梁满足结构计算刚接假设,且连接效果满足设计要求。新增混凝土翼缘板应变测点与腹板、梁底应变测点实测数值与理论值沿高度线形分布,新增翼缘板与主梁协同受力,符合平截面假定。该桥试验桥跨结构在静载试验的荷载作用下处于弹性工作状态,无异常变形情况及新裂缝的产生,加固后新增翼缘板钢筋梁及延伸段混凝土翼缘板与主梁连接效果

满足设计要求,能够满足设计荷载等级的承载能力要求。

4 结 语

本文依托某沿海大桥改造升级工程,详细介绍了钢混互为强约束下板梁拓宽设计建造方法。采用理论计算的方法对拓宽后的桥梁承载力及抗裂性进行了验算,同时采用荷载试验对拓宽改造的桥梁结构进行了测试。工程实践和验算测试结果表明,本文提出的桥面拓宽方法,具有很好的结构性能,实现了拓宽部分轻量高强的目标,大大减少了改造工程量。

参考文献:

[1] 苏庆田,刘凤瑶,史占崇,等.钢-UHPC组合桥面板焊钉-钢板连接处钢板疲劳行为:失效机理与寿命预测[J/OL].中国公路学报,2025: 1-13 (2025-04-14) [2025-05-21]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=En0qcdJbrGLfPIU7Fa4VABrCubSPt9b1VULdcNfq79r9DA3tgJ9s3StJ_7AM9nui296Drp29BfsyxKyVs7habZQ6yLsWiPBAGOxw9GZ-pPfpjJVnS5wNyDTctfWMGz454CEay-l9GZ3KFUAIKAsZ5sU9ja590dwIyAXbn3l7qjdAv_KUjUVLw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
[2] 曾明根,武或,苏庆田.钢纤维混凝土组合桥面板负弯矩区开裂性能试验[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(11):3176-3185.
[3] 史占崇,曾明辉,邱文东,等.正交异性钢-混凝土组合桥面板纵向的压弯性能[J].中国公路学报,2021,34(6):80-89.
[4] 戴昌源;苏庆田.钢筋混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(6):806-813.
[5] 史占崇,苏庆田,邵长宇,等.粗骨料UHPC的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J].土木工程学报,2020,53(12):86-97.
[6] 史占崇,苏庆田,陈亮.钢-UHPC组合桥面板中焊接栓钉的疲劳性能及设计布置方法[J].中国公路学报,2023,36(6):107-122.
[7] 苏庆田,薛智波,李晨翔,等.组合梁钢与混凝土界面连接效应的精细化计算[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(12):1803-1809.
[8] 陈德宝,曾明根,苏庆田,等.钢-UHPC组合桥面板湿接缝界面处理方式[J].中国公路学报,2018,31(12):154-162.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

