

洪塘大桥自锚式悬索桥设计要点

蔡亮

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要: 洪塘大桥位于福州西郊,跨越乌龙江,需原桥位拓宽改建,新建主桥采用自锚式悬索桥。基于施工期间保通车的民生要求,提出了三阶段横向拼接施工的设计方案,建成了国内第一座在改建工程中实现保通车目标的自锚式悬索桥。首次提出了主缆平弯锚固方案,改善了主缆锚固区的管养条件。采用有限元程序对桥梁运营及施工过程中的关键工序进行仿真分析,根据分析结果指导施工和施工控制,现场监测数据表明计算值与实测值相符。

关键词: 自锚式悬索桥;保通车;三阶段横向拼接;主缆平弯锚固;钢—混组合桥面板

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)01-0089-05

1 概述

城市桥梁拓宽改建中不可避免地遇到交通组织问题。对于中小跨径的桥梁改建,由于建设速度较快,一般采取拆除后重建的改造方式,不会对交通造成很大问题。然而对于大跨径桥梁而言,拆除并重建需要较长的工期,势必会长期阻断交通,给人们的出行带来很大的不便。为此,设计师提出了多种可以快速施工的设计方案以及交通组织方案。但是,施工期间仍会对现状交通流产生影响,或是降低了桥位处通行能力,或是加重了周边交通负担。随着城市的发展,改建工程与交通组织的矛盾亟待解决。

福州洪塘大桥拓宽改建工程东起妙峰路,对既有洪塘立交进行改造连接三环快速后,跨越乌龙江,随后进入闽侯上街,与国宾大道衔接,路线总长2.2 km。拟建主桥桥位现状主桥为60 m+120 m+60 m预应力混凝土下承式桁架T构,以及西侧江中引桥40 m无黏结预应力混凝土连续箱梁,双箱双室;老桥宽14.8 m,需拆除新建,如图1所示。新建主桥为独塔自锚式悬索桥,跨径50 m+150 m+150 m+50 m,桥宽46 m~52 m。

由于是原位改建,如果先拆除老桥再新建桥梁,将严重影响周边交通,因此市政府对该桥提出“保通车”的民生要求。新建主桥采用三阶段横向拼接^[1]的设计理念,在拆除老桥、新建桥梁的整个施工周期

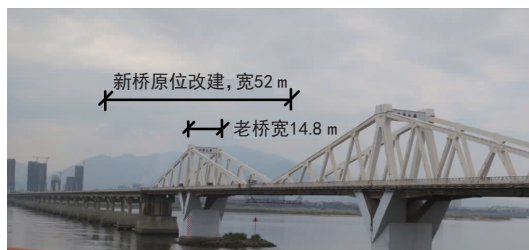


图1 洪塘大桥老桥之实景

内,维持了现状交通不断交,有力支援了福州城市建设。现结合洪塘大桥改建工程,基于TDV、Midas、Ansys等有限元程序对保通车需求下的自锚式悬索桥施工过程、成桥及运营状态进行仿真分析,可为同类工程的设计与施工提供参考。

2 设计要点

2.1 总体设计

乌龙江航道要求通航净空为120 m×10 m,最高通航水位+10.43 m(罗零高程)。根据航迹线,并结合水深图及上、下游大桥的通航孔跨布置确定主桥悬索桥跨径采用50 m+150 m+150 m+50 m,如图2所示。为便于与引桥的平面衔接,悬索桥索区完全置于外侧,主桥主跨全宽为52 m,边跨平衡桥跨全宽为46 m。

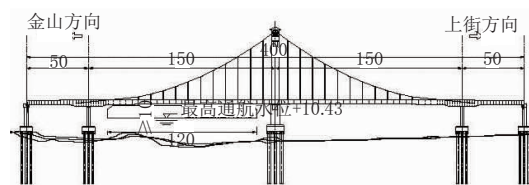


图2 新建洪塘大桥主桥立面图(单位:m)

2.2 主要技术标准

(1)道路等级:主线为城市主干路。

收稿日期:2023-04-19

作者简介:蔡亮(1975—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

(2)设计速度:主线为 60 km/h。

(3)设计使用年限为 100 a。

(4)汽车荷载采用城—A 级。人群荷载:按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)规定取值,边跨按 3.281 kN/m^2 计,中跨按 1.094 kN/m^2 计。

(5)抗震设防烈度 7 度,设计基本地震动峰值加速度 $0.1g$;抗震设防类别甲类;抗震措施按 8 度设防。

(6)通航标准:

乌龙江为国家内河Ⅳ级航道,同时预留改造为Ⅲ级航道的可能。通航净高 $\geq 10 \text{ m}$,侧高 7 m,单孔双向通航净宽 $\geq 120 \text{ m}$ 。

设计最高通航水位 10.43 m,设计最低通航水位 1.52 m,航道设计底高程 -2.38 m(罗零高程)。

为保证施工期间的通航,既有航道维持临时性通航标准,通航净宽 45 m,净空 $\geq 8 \text{ m}$ 。

2.3 上部及索缆结构

主桥采用独塔双索面自锚式悬索桥,半漂浮结构体系。主跨与平衡跨均采用分离式扁平钢箱梁,工厂预制现场安装,实现快速化施工。主梁高 3.5 m,在辅助墩主缆锚固区加高至 4.2 m。钢箱梁为全焊接箱型结构,两钢箱梁之间在支点处采用工字型横梁、在跨中处采用桁架式横梁焊接联结,如图 3、图 4 所示。第一阶段先施工两侧钢箱梁(18.0 m 宽)形成连续钢箱梁;后续阶段再施工中间横梁(16.0 m 宽),进行体系转换形成悬索桥。

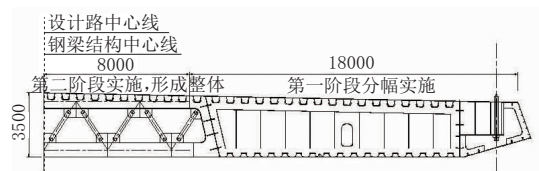


图3 钢梁跨中 1/2 断面图(单位:mm)

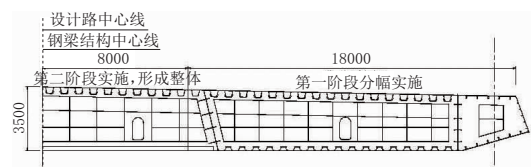


图4 钢梁中支点 1/2 断面图(单位:mm)

桥面采用正交异性钢桥面 +55 mm 超高性能混凝土,形成钢—混组合桥面板。钢桥面布置栓钉与钢筋网片,以保证钢桥面与混凝土连接可靠。钢桥面采用大 U 加劲,U 肋高为 330 mm。横隔板间距 5.0 m,在支座附近局部加密。

主缆采用平行竖直布置,跨度为 150 m,垂度为 15.0 m,垂跨比 1:10。两缆横向间距 49.6 m。主缆

两端经散索鞍平弯 15° 后散索锚于钢主梁内,两缆锚固点中心横向间距 44.424 m。

吊索纵向间距 10 m,横向间距为 49.6 m,吊索锚固于钢箱梁外腹板外侧的锚箱上。

抗震采用减隔震体系,在主塔、东西岸辅助墩和边墩分别设置抗拉减隔震支座及纵、横向阻尼器。

2.4 下部结构

主桥采用 H 型直立柱门式桥塔,桥塔结构总高 71.307 m。其中上塔柱高 55 m,采用五边形箱型截面;下塔柱高 16.307 m,采用六边形箱型截面。上塔柱顶部设置钢结构上横梁,下塔柱顶板设置钢—混凝土混合式下横梁。

辅助墩及边墩均采用双柱式桥墩,立柱截面采用六边形,边墩设盖梁以便于与邻跨预制小箱梁衔接。

主桥桥塔、辅助墩和边墩承台均采用圆端头导流矩形承台以减小阻水影响。

桥塔基础采用直径 2.2 m 冲孔灌注桩,辅助墩和边墩基础采用直径 1.8 m 冲孔灌注桩。

2.5 主桥施工顺序

该工程自锚式悬索桥采用先塔、梁,后缆、索的施工工艺。

(1)施工步骤一:如图 5 所示,桩基承台施工,安装塔吊,立模分段浇筑塔柱混凝土,现浇辅助墩、边墩立柱;老桥暂不拆除,以保证施工期间的公共交通。

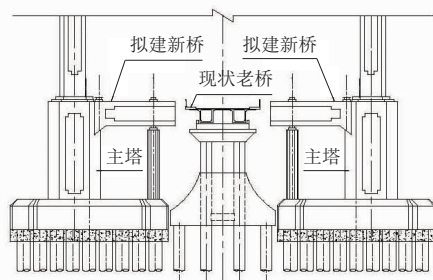


图5 施工步骤一(第一阶段)图示

(2)施工步骤二:如图 6 所示,在主桥中跨 150 m+150 m 范围内、现状老桥左右两侧搭设临时墩,主桥共布置 8 个临时支墩;纵主梁的两幅钢箱梁(桥面各宽 18.0 m)在工厂预制,现场焊接成整体。体系转换,形成左右两幅 $8 \times 50 \text{ m}$ 连续钢箱梁。

(3)施工步骤三:如图 7 所示,封闭老桥交通,将过河交通转换到新建 $8 \times 50 \text{ m}$ 钢桥上(维持老桥限高限载双向 2 车道通行标准),拆除老桥。

(4)施工步骤四:如图 8 所示,选择交通量较低时段或临时封闭交通进行两幅钢箱梁之间横梁(单

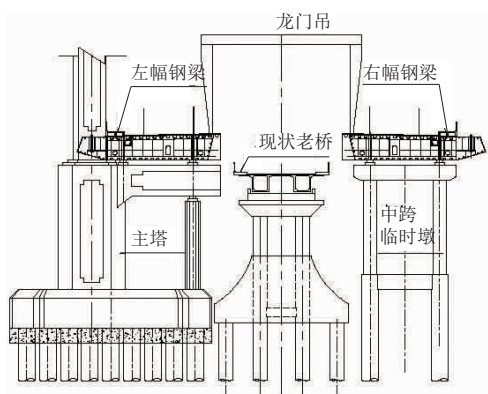


图6 施工步骤二(第一阶段)图示

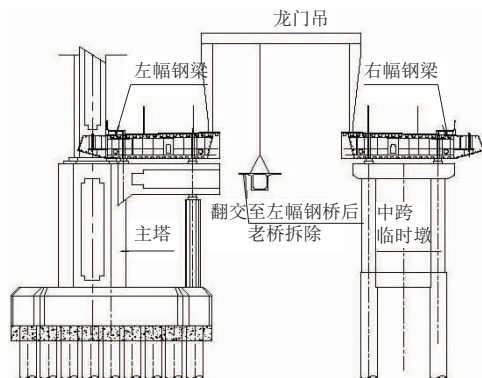


图7 施工步骤三(第二阶段)图示

幅桥面宽 16.0 m)的连接,将两幅钢箱梁连接成整体(整幅桥面宽 52.0 m);张拉吊杆,调整支座限位,拆除临时桥墩,完成主梁体系转换,形成悬索桥。施工桥面系,进行最终吊索索力调整;成桥开放交通。

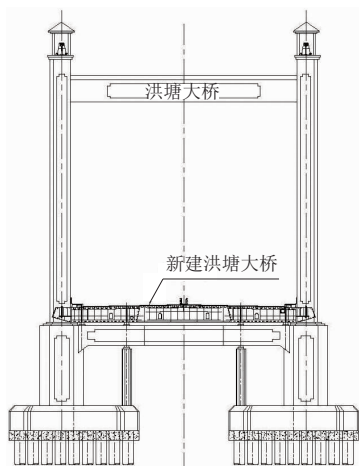


图8 施工步骤四(第三阶段)图示

2.6 钢梁及桩基耐久性设计

此次钢梁防腐方案按箱内不设置除湿系统考虑,防腐年限不少于 25 年,采用冷喷锌防腐。

为便于桩基础的施工,同时考虑水流、砂石及漂流物对桩基的冲刷和磨蚀影响,桩基外侧设置一定长度的钢护筒。

2.7 主缆平弯锚固

主缆经散索鞍后平弯,锚固在钢梁内部。由于是

空间曲线,采用空间三维放样,主缆锚固区平面及三维图如图 9、图 10 所示。

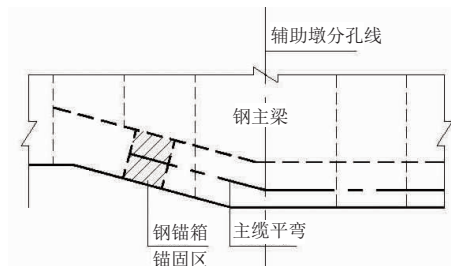


图9 主缆平弯锚固区平面图

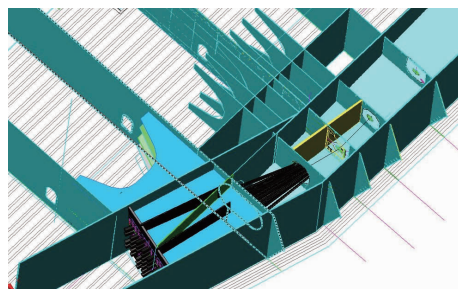


图10 主缆平弯锚固区三维图

3 特点与难点分析

3.1 设计特点

(1) 横向分阶段施工。

该桥主要的设计特点是主桥横向分阶段施工。常规桥梁的横向分段是指主梁的横向拼装分段,其目的还是先形成主梁。该工程的分阶段施工是先形成左右幅的钢结构连续梁桥→再连接分离式钢梁之间的中横梁→形成整幅主梁→体系转换→形成悬索桥,在整个施工周期内维持了原位改建桥梁交通。除施工过程不同外,新桥成桥后与常规的自锚式悬索桥无异。

(2) 主缆平弯。

自锚式悬索桥的锚固区一般布置在主梁外部,管养时需要临时搭设支架,操作不方便。为了改善锚固区的管养条件,提出了主缆平弯锚固方案,将主缆锚固在箱梁内部,主缆经散索鞍后平弯到箱梁内部。

为了降低设计与施工难度,主缆在散索鞍处不设置竖弯,这要求散索鞍处的主缆水平夹角不能太大,该工程按 5.966° 控制,这也成为主缆成桥线型的控制因素。

每根主缆由 37 股索股组成,经散索鞍后平弯锚固,需对索股合理排列,使之满足主缆安装需求。

主缆平弯锚固区的竖向、侧向加劲交错排列,构造复杂。

(3) 横隔板布置。

横隔板采用了 5.0 m 间距,大于国内常见的 3.0~3.5 m 的横隔板间距,使得钢箱梁抗扭和桥面板抗弯的要求随之提高。与之相应,将超高性能混凝土铺装层用于桥面板,形成钢—混组合桥面板共同受力,增加了桥面板的抗弯刚度,也提高了钢箱梁抗扭刚度。

3.2 施工难点

(1)该桥经过两次体系转换后才形成悬索桥,在国内尚属首次应用,国内也没有成熟的施工经验,增大了该桥的施工难度。

(2)主缆平弯散开锚固的桥梁国内并无先例。主缆经过散索鞍一般采用竖弯散开锚固,受散索鞍竖向隔板的约束,使得散开的索股自然形成矩形排列。但主缆平弯的散索鞍不能设置竖向隔板,散开的索股向无约束一侧散开成梯形,不能自然形成矩形,增加了主缆安装难度。

(3)由于分阶段实施,第一阶段先形成左右两幅钢结构连续梁,第三阶段再横向拼装中幅中横梁形成整体,时间跨度大。第一阶段的安装精度及第二阶段的运营通车状态直接影响第三阶段的吊装,对钢梁安装精度要求较高,控制难度较大。

4 计算分析

4.1 双主梁模型

设计采用 TDV 有限元程序,对主桥横向分段施工全过程模拟,建立双主梁模型,主缆、吊杆采用索单元,其它采用梁单元,桩土作用关系采用弹性约束模拟,建立模型如图 11 所示。

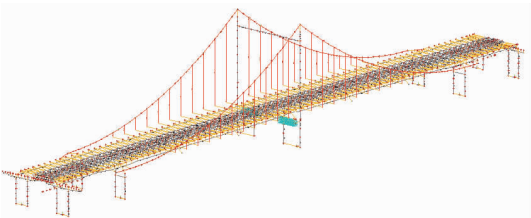


图 11 TDV 空间整体双主梁模型图

4.2 运营阶段主要计算结果

主要计算结果见图 12~图 15 所示。

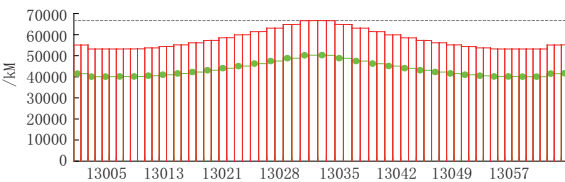


图 12 基本组合主缆轴力包络图(单位:kN)

- (1)主缆轴力
- (2)主梁弯矩

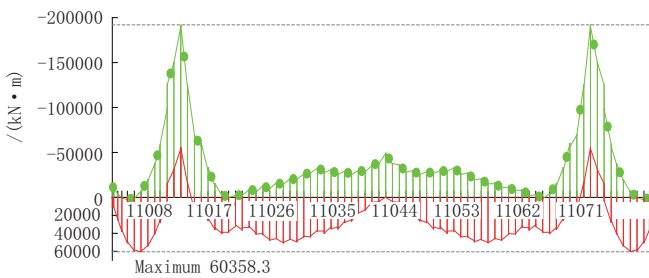


图 13 基本组合主梁弯矩包络图(单位:kN·m)

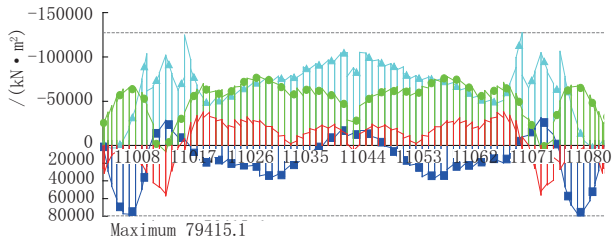


图 14 基本组合主梁上下缘应力包络图(单位:kN/m²)

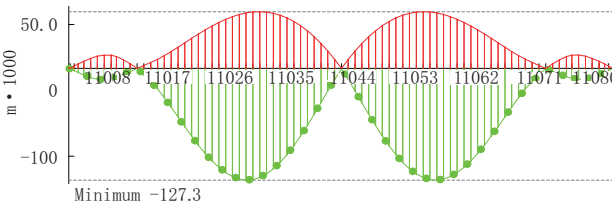


图 15 活载位移包络图(单位:mm)

- (3)主梁应力
- (4)主梁位移
- (5)主要结论

主梁应力在合理范围内,满足规范要求;
主缆、吊杆的承载能力满足规范要求;
主塔、桥墩等承载能力及抗裂均满足规范要求。

4.3 第二阶段 8×50 m 连续梁工况验算

主桥先形成左右两幅 8×50 m 钢结构连续梁,第二阶段翻交后需承担老桥原交通荷载。验算结果表明,该工况上、下部均可满足要求。模型如图 16 所示。

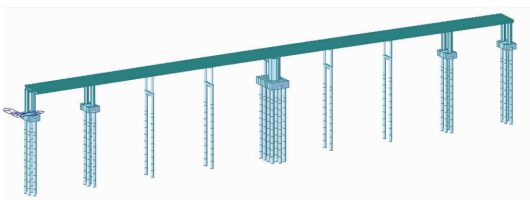


图 16 右幅 8×50 m 连续梁模型图

4.4 钢—混组合桥面板验算

横隔板标准间距 5.0 m,顶板厚 14 mm,在中支点处加厚至 20 mm。取单根 U 肋宽度范围内的钢—混组合桥面板建立连续梁模型,分析第二体系汽车荷载作用下的顶板及 U 肋下缘应力,其中横向分布系数为 0.268。将第二体系计算结果与第一体系考虑剪力滞影响的结果组合后,钢桥面板应力见表 1 所列。

若采用钢桥面板,超高性能混凝土仅按荷载考

表 1 钢—混组合桥面板钢结构应力计算表

工况	支点顶板 拉应力 / MPa	支点顶板 U 肋 下缘拉应力 / MPa	主跨跨中顶板 压应力 /MPa	主跨跨中顶板 U 肋下缘 压应力 /MPa
标准组合	84.69	98.73	65.97	53.71
基本组合	131.58	195.81	97.42	92.38

虑,钢桥面板应力验算结果见表 2 所列。

表 2 钢桥面板钢结构应力计算表

工况	支点顶板 拉应力 / MPa	支点顶板 U 肋 下缘拉应力 / MPa	主跨跨中顶板 压应力 /MPa	主跨跨中顶板 U 肋下缘 压应力 /MPa
标准组合	93.89	109.73	68.77	56.61
基本组合	157.08	226.30	105.19	100.42

与钢桥面板比较,采用钢—混组合桥面板后,基本组合下支点处的顶板及 U 肋拉应力减小了约 20 MPa,主跨跨中处的顶板及 U 肋压应力减小约 10 MPa。

4.5 锚箱局部应力验算

钢锚箱应力如图 17、18 所示。

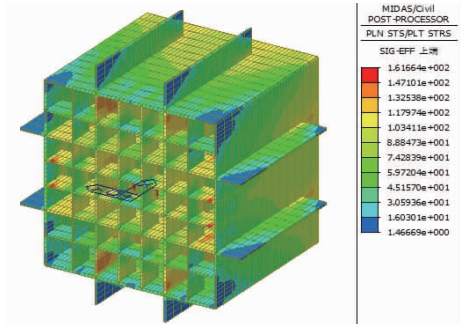


图 17 基本组合下锚箱顶底板、侧板及加劲应力图(单位:MPa)

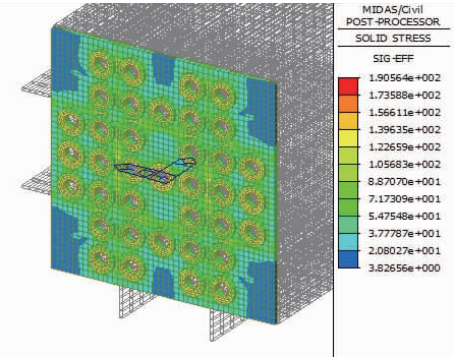


图 18 基本组合下锚箱后锚板应力图(单位:MPa)

锚箱应力控制在 200 MPa 以内,满足要求。

5 结 语

洪塘大桥拓宽改建工程,在预制拼装快速化施工的基础上,通过横向分阶段施工,实现了施工期间维持现状交通不断交的需求,也是国内第一座实现改建期间不断交的自锚式悬索桥如图 19 所示,为城市大型越江桥梁的拓宽改建提供了新的解决方案。



图 19 建设中的洪塘大桥(第二阶段)之实景

主缆经散索鞍后平弯,锚固在钢箱梁内部,为主缆锚固区的管养提供了便利条件,但也增加了设计与施工的复杂程度。其锚固区设计采用空间三维放样,其成果直接用于钢厂进行深化设计,为 BIM 设计积累了经验。

该工程横隔板间距采用了 5.0 m 布置,同时采用了钢—混组合桥面板共同受力,提高了桥面板刚度,也提高了钢箱梁抗扭刚度,提高了结构可靠度。

该工程采用 TDV 进行正向设计,根据分析结果指导施工,确保了桥梁施工顺利进行。现场采用无应力状态法^[2]进行施工控制,根据标高实测值调整模型,并修正了吊杆无应力长度,监测结果表明计算值与实测值相符。

该工程设计在横向分阶段施工、主缆平弯散开锚固布置、横隔板较大间距布置、钢—混组合桥面板构造方面进行了探索,将在后续工程中将进一步研究。

参考文献:

[1] 邓玮琳.福州洪塘大桥总体设计和技术创新[J].中国市政工程,2018(1):8-12.
[2] 秦顺全.桥梁施工控制—无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.