

嘉松公路越江大桥总体计算分析

孙东超

[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: 在建嘉松公路越江大桥位于上海市松江区, 主桥采用 $130\text{ m}+336\text{ m}+130\text{ m}=596\text{ m}$ 半漂浮体系自锚式悬索桥。桥塔为门形混凝土塔, 窗花形钢横撑。主梁采用混合梁, 主缆锚固段为混凝土箱梁, 其余梁段均采用钢箱梁+组合桥面板结构。主缆为平行双缆面, 边、中跨均设置吊索, 每个吊点设置双吊索。大桥采用了先斜拉后悬索的施工工艺, 跨中 185 m 范围未设置支架, 而是选择利用斜拉索对主梁进行临时支撑, 主跨合龙形成斜拉桥体系后再体系转换为悬索桥。经验算, 施工阶段和成桥运营阶段结构的强度、刚度和稳定性均满足设计要求。

关键词: 自锚式悬索桥; 结构体系; 计算分析; 施工方案; 先斜拉后悬索; 体系转换

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0107-04

General Calculation and Analysis of Jiasong Highway River-Crossing Bridge

SUN Dongchao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The under-construction Jiasong Highway River-Crossing Bridge is located in Songjiang District, Shanghai. The main bridge is a $(130+336+130)\text{ m}$ -span semi-floating system self-anchored suspension bridge. Its pylon is a portal-shaped concrete pylon with a window-lattice steel cross brace. Its main girder is a composite structure. The main cable anchorage section is a concrete box girder, and the rest girder sections are the steel box girder + composite bridge deck structures. The main cables are arranged in two parallel cable planes, and the slings are set up in both the side and main spans. Each hoisting point is equipped with double slings. The construction process of “first cable stayed and then suspending cable” is adopted for the bridge. The supports are not installed in the range of 185 m mid-span, instead, it is chosen to use the stayed cables to temporarily support the main girder. After the main span is closed to form a cable-stayed bridge system, the structural system is converted to a suspension bridge. Through verification, the structural strength, stiffness and stability all meet the design requirements during both the construction phase and the operational phase after completion.

Keywords: self-anchored suspension bridge; structural system; calculation and analysis; construction scheme; first cable stayed and then suspending cable; system conversion

0 引 言

自锚式悬索桥以简洁流畅的外形和突出的景观价值著称, 同时在复杂建设环境中展现出良好的适应性。随着城市桥梁文化“一桥一景”理念的兴起, 该桥型凭借独特的结构特性与视觉美感, 在城市中小跨径桥梁建设中得到越来越多的应用, 逐渐成为兼具功能性与艺术性的热门选择之一。2013年建成的美国旧金山奥克兰海湾大桥东段新桥, 采用独塔

自锚式悬索桥结构, 主跨跨径达 385 m , 展现了单塔体系在大跨设计中的创新应用; 而 2019 年通车的中国重庆鹅公岩轨道专用桥, 则以双塔自锚式悬索桥结构实现了 600 m 的超大跨径, 成为该桥型在轨道交通领域的标志性工程, 进一步印证了其技术成熟度与应用潜力^[1-2]。

自锚式悬索桥无须设置锚碇, 是一种自平衡体系, 主缆直接锚固在主梁上。主缆的竖向分力由锚固区主梁的自重或压重平衡; 主缆水平分力由主梁轴力平衡, 致使两个主缆锚固区之间的主梁区段承受显著压力。主梁与主缆需共同构成协同受力体系, 故在施工过程中, 通常需先行架设连续主梁, 随

收稿日期: 2025-04-09

作者简介: 孙东超(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

后进行主缆与吊索施工,再通过落梁操作或吊索反复张拉,将主梁自重逐步转移至吊索及主缆,最终完成体系转换。主梁及吊索需满足吊索张拉等工艺的实施条件^[2-3]。以上是该桥型在结构受力机制、构造设计及施工工艺方面的核心特征。

1 工程概况

嘉松公路越江大桥地处上海市松江区^[4],是嘉松公路南延伸工程跨越黄浦江的重要节点。主桥采用双塔双索面自锚式悬索桥方案,跨径布置为130 m+336 m+130 m的3跨连续体系。横向设置双向6车道及两侧慢行道,桥梁总宽度达36.6 m,采用整幅布置。主桥立面布置如图1所示。

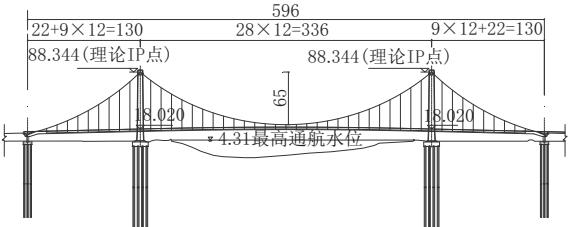


图1 主桥立面布置图(单位:m)

1.1 主塔及基础

主塔采用门形塔,总高度约90 m。塔柱稍稍内倾,采用钢筋混凝土结构,塔梁连接处设置牛腿。塔柱上部设置窗花形横撑,采用3组钢结构斜撑进行交叉组合,类似中国结的形式,造型独特优美,满足主塔受力的同时兼具景观功能。主塔立面布置如图2所示。

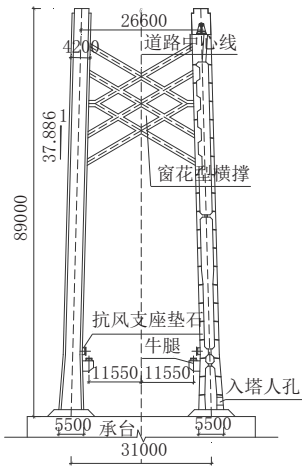


图2 主塔立面布置图(单位:mm)

每个塔柱下设置正方形承台,边长18.2 m,下设16根桩,2个塔柱的承台横向设置系梁连接,系梁下设置2根桩。单个主塔的承台呈哑铃形,厚度为5 m,共有34根 $\phi 2.0$ m钻孔灌注桩。

1.2 主梁

主梁为混合梁,除尾端主缆锚固区采用预应力混凝土箱梁以外,其余梁段均采用钢箱梁+组合桥面板结构。两种主梁通过钢混结合段连接。

主桥钢箱梁为正交异性钢桥面,梁高3.2 m,其上设60 mm UHPC桥面板,标准节段宽度36.6 m(含风嘴)(见图3)。

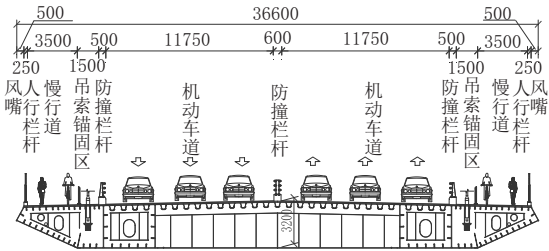


图3 主梁标准断面图(单位:mm)

钢梁材质主要为Q345qD, UHPC面层主要力学性能如下:轴心抗压强度设计值 $f_{cd} \geq 80$ MPa,轴心抗拉强度设计值 $f_{td} \geq 12$ MPa,弹性模量 $E=4.5 \times 10^4$ MPa,剪切模量 $G=1.44 \times 10^4$ MPa。钢梁标准节段为12 m,采用梁格体系,由两个主纵梁、横梁、挑梁组成。横梁纵向标准间距为4 m,挑梁位置与横梁对应,吊索钢锚箱设置在挑梁上。

主缆锚固区为预应力混凝土箱梁,为满足主缆分散锚固的构造要求,兼顾平衡主缆竖向分力的需求,锚固段梁高由标准段的3.2 m增加到6.0 m。

1.3 缆吊系统

该桥共两根主缆,平行缆面布置,横向间距26.6 m。主缆由3跨组成,主跨跨径336 m,垂度为65 m,矢跨比约为1/5.17。

主缆采用PPWS预制平行索股法施工,索夹外主缆直径为406 mm。每根主缆由37束索股组成,索股中的钢丝数量为127,钢丝为 $\phi 5.3$ mm的镀锌铝镁合金钢丝,标准抗拉强度1 860 MPa,弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa。

主跨及边跨均设置了吊索,顺桥向标准间距12 m,与加劲梁横梁及挑梁位置相对应,每个吊点设两根吊索。采用镀锌铝高强度平行钢丝束吊索,钢丝直径为7.0 mm,标准抗拉强度1 770 MPa,弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa。吊索上端与主缆采用销接式连接,索夹为上下对合型;吊索下端为张拉端,与加劲梁采用钢锚箱连接,两根吊索分别锚于横梁两侧。

在锚固横梁内布置了索导管,主缆由散索套散开为单股索股进入混凝土锚固段,穿过索导管后,锚固在锚固横梁后锚面上。为了约束散索套的竖向位

移,避免主缆索股与锚固索导管出口产生干扰,在散索套下部与主梁之间设置了滑动支座,沿主缆径向提供支撑,沿主缆轴向可滑动^[5]。

1.4 结构体系

主桥选用了半漂浮结构体系,于主塔牛腿及边墩墩顶位置设置了对主梁的竖向支承(顺桥向单向滑动支座),同时在桥塔位置设有纵向阻尼装置以及横向抗风支座,以此满足桥梁的结构性能需求。

1.5 施工方案

鉴于自锚式悬索桥的结构特性,主梁和主缆的施工顺序必须要求先梁后缆。

受建设条件限制,该桥不适合采用支架或者顶推等较常规的方法施工主梁,经多方案比选后,最终选定“先斜拉后悬索”的整体施工工艺。

大桥主梁总长 596 m,分为 2 个混凝土锚固段、2 个钢混结合段、47 个钢箱梁段。在边跨及中跨近塔部分设置临时支架,主跨跨中 185 m 范围不设置支架。

混凝土锚固段使用支架现浇工艺;钢混结合段与边跨合龙段构件借助汽车吊进行安装;其余位于支架范围内的钢箱梁段则通过顶推工艺实施架设:钢箱梁段水运至桥位,利用桥面吊机从拼装平台位置起吊、拼装,往边跨方向顶推一个梁段后再重复安装下一梁段,直至边跨合龙;针对跨中无支架区域的钢箱梁,利用临时斜拉索提供临时支承,运用斜拉桥施工工艺,借助桥面吊机以单悬臂分节段实施架设。待跨中合龙形成临时斜拉桥体系后,依次完成主缆安装、吊索张拉作业,随后拆除临时斜拉索,实现结构体系由斜拉桥向自锚式悬索桥的转换。

施工步骤示意图如图 4 所示。

2 总体计算

2.1 主要技术标准

桥梁结构的设计基准期为 100 a;结构重要性系数为 1.1;汽车荷载为公路—I 级,人群荷载取 2.5 kN/m²;设计基本风速为 32.8 m/s,场地的地表类别 B 类;地震基本烈度 7 度,地震动峰值加速度 0.1g。

2.2 静力分析

不同于地锚式悬索桥,自锚式悬索桥主缆的成桥线形及内力,不仅与吊索的张拉力大小密不可分,同时还受到主梁上主缆锚固点变位的影响。因此,若要精确计算主缆成桥线形与内力,需要在计入吊索和主梁影响的全结构中进行。通常情况下,自

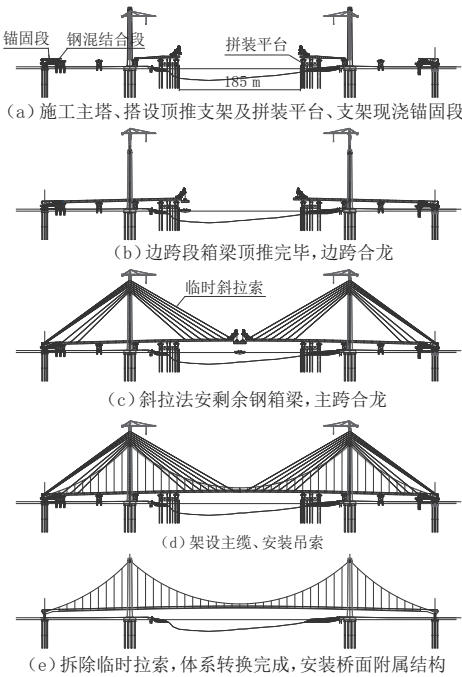


图 4 施工步骤示意图

锚式悬索桥达到理想成桥状态时,需满足多项受力要求:主梁在恒载作用下产生的弯矩应与刚性支撑连续梁的弯矩相近,主塔所承受的恒载弯矩要尽量维持在较低水平,呈现出“梁平塔直”的结构形态;此外,吊索受力也需保持均衡,避免出现索力不均的情况^[6]。

总体计算分析运用 MIDAS Civil 软件构建全桥空间模型,采用考虑几何非线性的空间有限元方法,通过同步迭代求解出主缆的成桥线形、内力及吊索张拉力参数。为改善局部主梁的内力,对部分吊索力进行了手动优化。计算模型如图 5 所示。

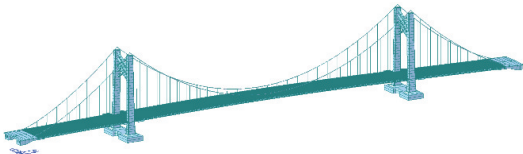


图 5 空间杆系计算模型

通过计算优化,主缆成桥线形如图 6 所示。

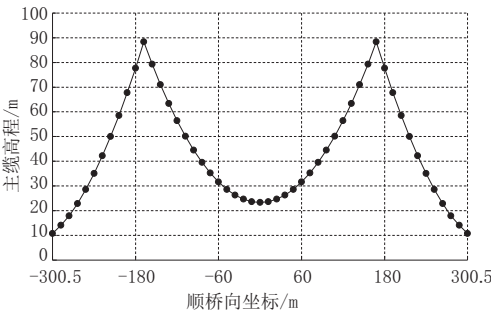


图 6 主缆成桥线形

优化后的成桥状态,主梁弯矩呈连续锯齿形态且分布较为均匀,主塔在顺桥向的恒载弯矩也被控

制在极小的范围内。恒载作用下主梁弯矩图如图7所示。受主缆锚固、边墩支座及锚固段形心高度变化等的影响,锚固段主梁的弯矩值较大,锚固段和钢混结合段均需单独建立局部模型进行精细计算分析。

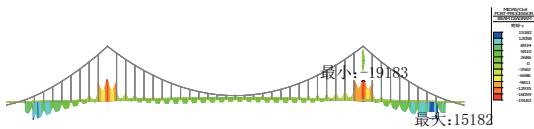


图7 主梁恒载弯矩图(单位:kN·m)

成桥运营阶段,考虑恒载(包括基础不均匀沉降和收缩徐变)、活载(汽车和人群)、温度荷载、静风荷载、船撞荷载等按照规范进行荷载组合后,对结构进行验算分析^[7]。主要结果如下:主缆最大应力为738.7 MPa,吊索最大应力为672.3 MPa,钢梁最大压应力为215 MPa,主塔为全截面受压构件,承载力满足现行规范要求。中跨主梁最大竖向位移为597 mm,相应挠跨比为1/562;边跨主梁最大竖向位移为289 mm,相应挠跨比为1/448,主梁竖向刚度满足规范要求。主塔和边墩处的竖向支撑均未出现负反力,散索套处的滑动支座在活载作用下会产生负反力,此处选择了具有抗拉能力的支座。

2.3 施工阶段分析

该工程施工方案的重点是体系转换,需结合现场的实际情况,综合考虑斜拉桥成桥线形、吊索张拉顺序及张拉次数、主索鞍顶推次数、支架拆除时机、斜拉索拆除时机、千斤顶等施工设备投入情况、接长杆数量及长度、施工工期等因素,通过比选、优化得到理想的实施方案。

主要控制因素包括吊索、斜拉索、主缆、索夹等满足强度要求;主梁、主塔、主塔窗花横撑满足强度及稳定性的要求;以及索夹抗滑安全度、鞍槽内主缆抗滑安全度满足规范要求;体系转换过程中还需控制吊索倾角及主缆锚固端转角,避免吊索与吊索锚固钢套管之间、主缆与索导管之间发生挤压摩擦^[8]。

现阶段,对体系转换进行了简化,施工阶段分析模拟的主要施工步骤见表1。实施过程中,应根据细化后的施工方案进行详细的计算分析。

表1 主要施工步骤

序号	主要施工阶段
1	中跨合龙前
2	中跨合龙后
3	主缆架设完成
4	吊索张拉完成
5	拆除临时斜拉索、临时支架
6	桥面板、附属结构施工完成

针对以上施工步骤,考虑恒载和施工临时荷载的组合,对结构进行验算分析。主要结果如下:主缆最大应力为517.6 MPa,吊索最大应力为448.9 MPa,钢梁最大压应力为128.6 MPa,临时斜拉索最大应力为652.3 MPa,主塔为全截面受压构件,承载力满足现行规范要求。

通过分析UHPC面层的浇筑时机与浇筑方案对主梁受力的影响,得出结论:在临时斜拉桥中跨合龙后浇筑UHPC面层,并先浇筑跨中斜拉索区域、后浇筑主塔附近区域时,在最终成桥后,中跨桥面板与钢梁的受力性能更佳^[9]。

2.4 静力稳定计算

采用第一类线弹性稳定计算方法,对施工和成桥阶段的结构整体稳定性进行计算。选取施工阶段最不利的最大单悬臂阶段进行屈曲稳定计算,考虑自重、桥面吊机和风荷载作为屈曲荷载。最小稳定安全系数为35.6,对应一阶失稳模态为主塔纵向弯曲。成桥阶段,选取恒载+对应塔底轴力最大的汽车活荷载作为屈曲荷载,最小稳定安全系数为16.1,对应一阶失稳模态为主塔纵向弯曲失稳(见图8)。

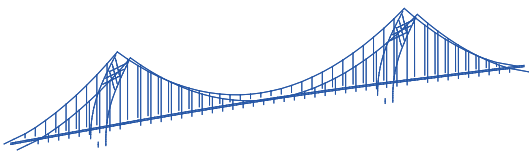


图8 成桥一阶屈曲失稳模态

施工和成桥阶段结构整体稳定性均满足规范要求。

2.5 抗风抗震研究

通过数值模拟以及风洞试验,对主桥抗风性能进行详细研究,确定了相应的气动改良措施,使得成桥状态和施工状态均满足颤振稳定性要求,±5°范围内的风攻角情况下不会发生明显的竖向和扭转涡激共振^[10]。

通过抗震专项分析,确定该桥结构体系采用半漂浮体系,加装黏滞阻尼器对地震响应进行控制,控制墩梁纵横向相对位移,满足规范要求的各项抗震性能。

3 结 语

嘉松公路跨黄浦江大桥是一座双塔双索面的自锚式悬索桥,采用3跨连续半漂浮结构体系,跨径布置为130 m+336 m+130 m=596 m。跨中部分主梁利用临时斜拉索提供支撑,待主梁合龙形成临时斜拉

(下转第153页)