

嘉松公路越江大桥设计关键技术

牛长彦

[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: 嘉松公路越江大桥位于上海市松江区,主桥为(130+336+130)m半漂浮体系自锚式悬索桥。主梁采用钢箱梁,主梁尾端主缆锚固段为混凝土箱梁。桥塔为门形塔,采用窗花形横撑。主缆为平行双缆面布置,采用镀锌铝镁合金钢丝。单个桥塔下设置34根 $\phi 2.0$ m钻孔灌注桩。对该桥的抗风、抗震研究表明,大桥在采取气动改良措施后抗风性能良好,抗震性能均满足规范要求。

关键词: 嘉松公路;自锚式悬索桥;抗风性能;抗震性能;局部构造

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0062-04

Key Design Technologies for Jiasong Highway Cross-river Bridge

NIU Changyan

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

Abstract: Jiasong Highway Bridge is located in Songjiang District, Shanghai. Its main bridge is a (130+336+130)m-span semi-floating system self-anchored suspension bridge. Its girder is a steel box girder, and the main cable anchorage section at the end of the girder is a concrete box girder. The bridge pylon is a portal-frame pylon with the lateral braces in the shape of window grilles. The main cable is arranged in parallel double cable planes and the zinc aluminum magnesium alloy steel wire is used. 34 $\phi 2.0$ -m cast-in-place piles are installed under a single bridge pylon. The research on the wind and earthquake resistance of the bridge shows that after taking the aerodynamic modification measures, the wind resistance of the bridge is good, and the seismic performance of the bridge meets the requirements of the specifications.

Keywords: Jiasong Highway; self-anchored suspension bridge; wind resistance; seismic performance; local structure

0 引言

在大跨度桥梁的范畴中,悬索桥始终占据着最重要的地位。近年来,城市桥梁建设中,自锚式悬索桥的身影越发常见。自锚式悬索桥凭借出色的景观效果、强大的跨越能力,以及对地质条件较低的要求,成为城市桥梁建设的理想选择。

20世纪40年代由于塔科马大桥的坍塌,世界悬索桥的建设一度进入了低谷期。直至20世纪90年代,日本与韩国经济飞速发展,自锚式悬索桥也在这两国崭露头角。1990年,日本建成此花大桥,其跨径布置为120 m+300 m+120 m;1999年,韩国的永宗大桥竣工,跨径布置为125 m+300 m+125 m,这两座桥都是现代自锚式悬索桥的典型代表^[1-2]。2013年9月通车的奥克兰海湾大桥新桥采用独塔两跨自锚式悬索

桥,主跨跨径385 m。

进入21世纪,中国自锚式悬索桥建设也进入了快速发展阶段。2019年12月建成通车的鹅公岩轨道桥主跨跨径达到600 m,为目前世界跨径最大的自锚式悬索桥^[3]。2022年建成通车的济南黄河凤凰大桥采用70 m+168 m+428 m+428 m+168 m+70 m三塔自锚式悬索桥,桥面全宽达到61.7 m^[4]。

嘉松公路越江大桥作为黄浦江上第一座悬索桥,采用自锚式悬索桥结构,避免了在软土地基建造锚碇。由于黄浦江航道繁忙,同时桥位处为二级水源保护区,在满足结构安全的情况下桥梁的选型和设计还要充分考虑施工可行性和对环境的影响。

1 工程概况

嘉松公路越江大桥位于上海市松江区,为规划中的嘉松公路南延伸跨越黄浦江的松浦四桥。嘉松公路越江新建工程规划道路等级为二级公路,北起金平路,南至松金公路,路线全长1 825 m,红线宽度

收稿日期: 2025-01-24

作者简介: 牛长彦(1981—),男,工学硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

为 40 m/50 m。松浦四桥桥主线为双向 6 车道,两侧设慢行道,引桥纵坡为 2.49%^[5],非机动车随引桥骑行越江。大桥主桥长 596 m,两侧引桥长 857.8 m,桥下设辅道。嘉松公路越江大桥桥位平面图见图 1。

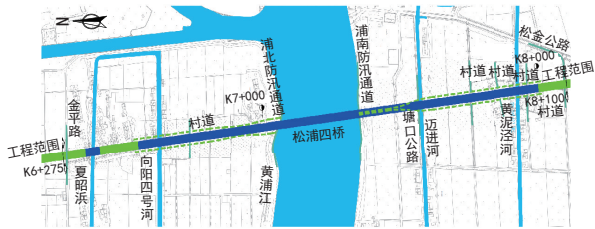


图 1 嘉松公路越江大桥桥位平面图

2 桥型方案确定

根据拟建桥梁的位置及功能特点,在方案比选时主要考虑以下原则:一是总体方案能够与上海市总体规划和骨干路网规划符合,与本工程的功能定位匹配;二是根据相关河道及航道标准要求,合理设置桥梁及涵洞等设施,力求满足航道和泄洪的要求;三是道路与桥梁结构的布局,应尽可能考虑景观及环保要求,减少桥梁施工、运营中对于二级水源保护区环境的影响和污染。

对于 336 m 的主跨跨径,可选择的桥型方案包括自锚式悬索桥、斜拉桥、拱桥。在 336 m 主跨的桥梁方案中,斜拉桥由于较高的经济性和技术成熟度使其成为最具竞争力的桥型,但黄浦江上类似的斜拉桥数量也最多;拱桥因其杆件多、施工繁杂、难度较高、经济性较差,且黄浦江上已有卢浦大桥采用拱桥形式,故不再考虑;自锚式悬索桥轻盈优美的曲线使其景观性较好,虽然前期费用较大,考虑到全寿命周期换索等维护费用,悬索桥的总体费用与斜拉桥相当,同时考虑到黄浦江上规划桥位资源稀缺,建成后可成为一座有特色的地标性的桥梁,最终选择采用双塔双索面自锚式悬索桥方案,主桥跨径布置为 (130+336+130) m^[6],桥型布置见图 2。

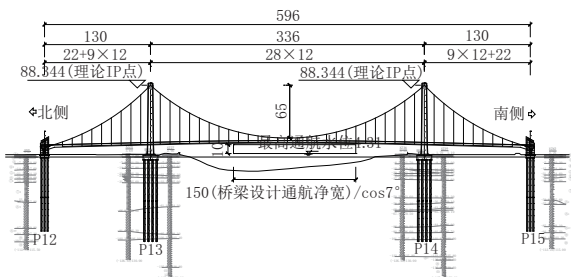


图 2 桥型布置图 (单位:m)

3 技术标准

(1)荷载等级:公路—I 级。

(2)设计使用年限:桥梁主体结构设计使用年限 100 a。

(3)抗震设防标准:本工程地区的地震动峰值加速度 0.1g,地震基本烈度 7 度;抗震设防类别为 A 类;抗震措施设防烈度为 8 度;设计采用的地震超越概率如表 1 所列。

表 1 采用的地震超越概率

E1 地震超越概率	E2 地震超越概率
50 a 10% (475 a)	100 a 4% (2 500 a)

(4)设计风速:设计基本风速 32.8 m/s,场地的地表类别为 B 类。

(5)通航标准:Ⅲ级航道;双向通航净宽不小于 150 m;最高通航水位 4.31 m;通航净空 10 m。

4 设计关键技术

4.1 结构体系

针对半漂浮体系和全漂浮体系,从桥梁结构刚度、静力受力性能、动力受力性能等方面进行比较,最终采用 3 跨结构的半漂浮体系,主梁在主塔及边墩位置各设置 2 个竖向支承支座,所有支座均为纵向活动,主塔各设置两个纵向阻尼装置,主梁在每个主塔处各设置 2 个横向抗风支座,约束系统见图 3。

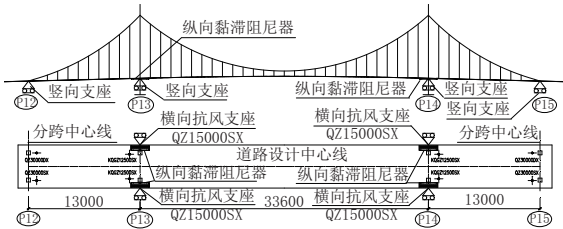


图 3 约束系统布置图

4.2 抗风抗震研究

4.2.1 抗风研究

采用有限元分析、常规比例节段模型风洞试验和大比例主梁节段模型涡激共振风洞试验,对嘉松越江工程主桥抗风性能及主梁断面气动改良措施进行了详细的研究,采取了气动改良措施后,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^[7]。主要的气动改良措施如下:

(1)附加风嘴,风嘴尖角度为 64°,风嘴的顶端与人行栏杆基座的顶部相平;

(2)检修桁车轨道向道路中心线侧移动 3.625 m;

(3)主梁槽内的下中央稳定板,板高 3.242 m,底部与检修桁车的轨道底部持平。

4.2.2 抗震研究

采用有限元分析,比选了半漂浮体系和全漂浮体系的抗震性能。全漂浮体系较半漂浮体系的影响主要体现于:在结构的竖向地震响应上,全漂浮体系竖向振型提前出现,并引起塔柱和桩基地震轴力增加,抗弯能力下降,对抗震不利,同时全漂浮体系对边墩处的支座纵向位移有轻微影响,增幅为7%。因此,结合静力分析结果建议该桥采用半漂浮体系。对于两种结构均存在的纵向位移较大问题,采用黏滞阻尼器进行减震设计,控制墩梁相对位移。

4.3 主要结构设计

4.3.1 主梁

主梁采用钢箱梁,结构中心点梁高3.2 m,主梁尾端主缆锚固区采用混凝土梁,并设置钢-混结合段连接钢梁节段。主梁总宽36.6 m,主缆横向间距26.6 m(见图4)。

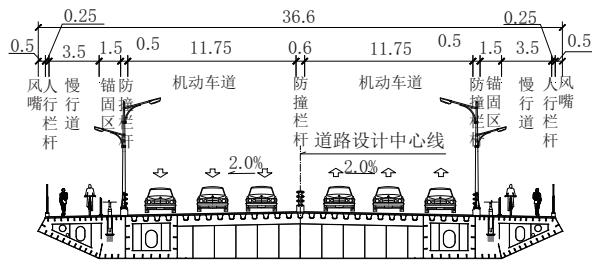


图4 主梁标准断面图纸图(单位:m)

主桥主梁采用钢箱梁+组合桥面板结构,钢梁截面型式为双边箱。主梁标准段主梁全宽36.6 m(含风嘴),顶板宽度35.6 m。道路中心线处梁高3.28 m,钢梁梁高3.2 m,材质为Q345qD。主梁标准节段为12 m,每间隔4 m设置一道横梁和挑梁,吊索用钢锚箱锚固于钢挑梁上。

桥面板采用钢板+6 cm厚UHPC。主梁采用正交异性钢桥面,设置U型加劲肋。混凝土桥面板采用现浇,钢板上设置剪力钉以增强与混凝土板的连接,混凝土桥面板设纵横向钢筋。

4.3.2 桥塔

主塔采用塔柱内倾的门形塔,根据景观总体方案采用窗花形钢横撑,索塔总高度约90.1 m。桥塔采用钢筋混凝土结构,塔柱采用带内凹槽口的箱型截面,在主梁牛腿处及窗花锚固节点处设置横隔板,塔顶段截面为实心截面,以承受索鞍传递的巨大压力,桥塔塔顶设置鞍罩,塔顶鞍室采用钢结构,内设除湿装置和塔顶检修设备。塔间横撑采用3组钢结构斜撑进行交叉组合,组成了独特的造型,契合了江南民居窗格艺术和中国结的样式,隐喻了吉祥平安

的美好祝福。桥塔结构布置见图5。

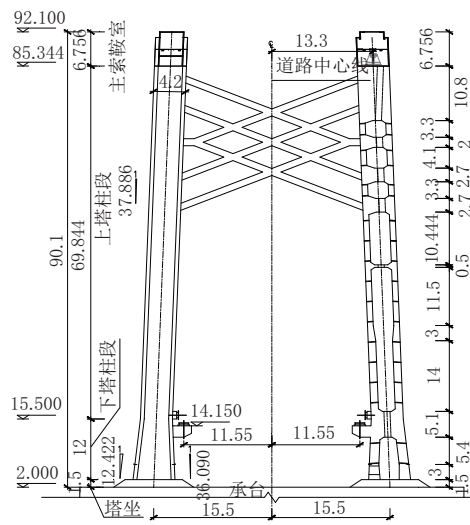


图5 主塔结构布置图(单位:m)

4.3.3 缆吊系统

主缆为悬索桥的主要承重构件。该桥共2根主缆,平行缆面布置,中跨矢跨比约为1/5.17。每根主缆由37股平行钢丝索股构成,每股内有127根直径为5.3 mm的镀锌铝镁合金钢丝,每根主缆总计包含4 699根钢丝,竖向排列成尖顶的正六边形,紧缆后主缆为圆形,索夹外直径为 $\phi 406$ mm(空隙率20%),索夹内直径为401 mm(空隙率18%)。主缆采用国内较为成熟的预制平行钢丝索股,现场在猫道上逐股安装架设。缆索钢丝标准抗拉强度1 860 MPa,弹性模量 E 为 2.0×10^5 MPa,材料强度分项系数 γ_R 为1.85。

全桥边、中跨均设吊索,吊索均为竖直,索股为平行钢丝束,高强钢丝直径 $\phi 7$ mm,外包PE防护,标准强度1 770 MPa。吊索顺桥向标准间距12 m,每个吊点设双根吊索,标准吊索型号为 $\phi 7-61$ 。吊索下端与主梁采用锚箱式连接,锚于横梁两侧,吊索上端与主缆采用销连接。

该桥索夹为铸钢结构,上下对合,采用高强螺杆连接。

主索鞍设置在塔顶,主缆由中跨通过索鞍转向后至边跨,再经过散索套散开后锚固在混凝土梁尾端大横梁上。该桥主索鞍采用传统型式。主索鞍采用全铸式结构,高约为2 450 mm,长约4 800 mm,宽2 000 mm,承缆槽底部的圆弧半径为3.39 m。

4.3.4 基础和下部结构

主塔承台采用哑铃形布置,承台厚度5.0 m;单个哑铃承台顺桥向宽为18.2 m,横桥向宽为18.2 m,横向采用系梁连接。

主塔基础采用 34 根 $\phi 200$ cm 钻孔灌注桩,每侧 16 根,按对称形布置,桩中心距 5.0 m,中间系梁处设 2 根桩。根据地质报告,桩基持力层为粉细砂层和粉质黏土层。为提高单桩承载力,并控制基础沉降,该工程所有桩基均进行桩底后压浆。

4.4 局部构造设计

4.4.1 主缆锚固区

主缆锚固区是自锚式悬索桥的关键部位,集主缆锚固、压重、限位和支撑引桥等多种功能于一体,构造复杂。该桥采用混凝土梁锚固方式,主缆力向主梁传力分为 2 个过程:第一个过程是主缆经散索套散开后锚固在锚管上,经锚管将缆力传向梁端大横梁;第二个过程是传递给横梁的缆力快速向前端顶板、底板、腹板扩散且均匀化^[8]。混凝土主缆锚固区总长 19.4 m,锚固段道路中心线处梁高由标准段 3.2 m 增加到 5.88 m。主缆与主梁尾端角度约为 14.9° ,主缆由散索套散开为单股索股进入到尾端混凝土锚固区,锚固在尾端大横梁上(横梁上设有钢套筒)。

4.4.2 钢-混结合段

主梁从钢梁标准段经钢梁加劲过渡段、钢-混结合段、混凝土梁过渡段转为混凝土梁段,钢-混结合段采用有格室后承压板构造(见图 6)。结合面钢箱梁侧过渡段顶面采用带变高度 T 形加劲的 U 肋进行刚度过渡,底板采用变高度 T 形加劲进行刚度过渡,结合面混凝土侧的过渡采用变化顶、底、腹板的厚度进行刚度过渡。钢-混结合段长 2.9 m,将加劲肋加高形成格室,然后在箱室隔板上开孔并穿过钢筋形成开孔板连接件,格室各板件及承压板上均设置剪力钉,以加强钢结构和混凝土结构之间的连接^[9-11]。结合面上设置预应力以使在运营阶段各工况下钢-混结合段处于全截面受压状态。

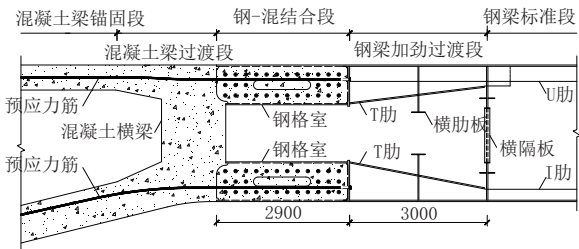


图 6 钢-混结合段立面布置图(单位:mm)

4.4.3 塔上临时锚固节点

由于航道繁忙,该桥中跨钢梁采用斜拉扣索的方式架设。经过比选,临时斜拉索以“永临结合的方式”锚固在窗花横撑节点处,并对节点构造根据计算

进行加强,既能满足近期施工临时所需,又为后续主缆更换预留可能。

临时斜拉索从横撑侧面腹板穿入,通过转向钢管从对面侧腹板穿出后锚固。转向钢管在横撑结构箱室内部设置加劲(见图 7)。整个节点通过钢板设置剪力钉和开孔板锚固在主塔混凝土内。

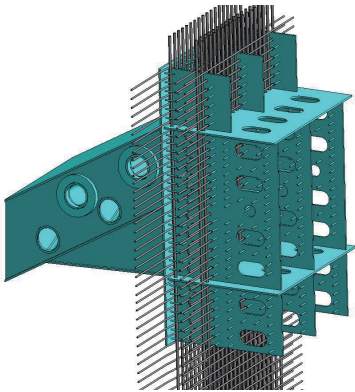


图 7 窗花节点三维图

5 结 语

结合建设条件、地形、水文等条件,对嘉松公路跨黄浦江大桥主梁、主塔、缆吊系统及其锚固方式、抗风抗震性能等进行了分析研究,并创新性地提出“永临结合”的方式,为今后更换主缆提供可能性,并为类似桥梁的设计提供技术参考。

参考文献:

[1] 蔡迎春,万超,郑元勋.中国自锚式悬索桥发展综述[J].中外公路,2013(8):143-147.
[2] 杜致融.独塔自锚式悬索桥极限跨度研究[D].西安:长安大学,2010.
[3] 臧瑜,戴建国,邵长宇.重庆鹅公岩轨道大桥设计关键技术[J].桥梁建设,2020,50(4):82-87.
[4] 常付平,许为民,李盘山,等.济南凤凰黄河大桥总体设计[J].城市道桥与防洪,2021(11):66-70.
[5] 符佳.上海市嘉松公路越江工程设计综述[J].城市道桥与防洪,2021(7):28-32;48.
[6] 杨荣青.嘉松公路跨黄浦江大桥方案比选及科研规划[J].价值工程,2022(19):4-6.
[7] 陈逸群.大跨度自锚式悬索桥半封闭箱型加劲梁抗风性能试验研究[J].工程技术研究,2024(6):1-4.
[8] 许骏.自锚式悬索桥锚固段合理总体布置研究[J].城市道桥与防洪,2023(5):73-75.
[9] 郭济.大跨度自锚式悬索桥混合梁结合段受力分析[J].上海公路,2018(3):28-33.
[10] 刘明虎,徐国平,刘峰.鄂东大桥混合梁钢-混凝土结合部研究与设计[J].公路交通科技,2010(12):78-85.
[11] 王博.自锚式悬索桥钢-混结合段受力性能研究[J].城市道桥与防洪,2023(8):67-70.