

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2021.12.010

跨海单索面钢混组合梁斜拉桥设计关键技术

杨成峰¹, 王少勋², 高恩全¹

(1.浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030; 2.舟山市交通工程试验检测中心有限公司, 浙江 舟山 316021)

摘 要: 富翅门大桥主桥采用 57 m+108 m+340 m+108 m+57 m 双塔单索面钢混组合梁斜拉桥。主梁采用单箱三室钢混组合梁, 标准段宽度 27.5 m, 主桥岑港侧边跨位于互通变宽段, 主梁变宽至 35.5 m, 主梁采用节段预制、悬臂拼装施工。采用 Midas/civil 分析软件建立有限元模型, 对桥梁施工中最大悬臂阶段、运营阶段进行抗风稳定性分析。为提高海洋环境下的结构耐久性, 对海工混凝土性能、钢筋保护层厚度、混凝土外加剂、钢梁除湿及防腐涂装等提出了明确要求, 并设置了完善的维护和检修设施。

关键词: 斜拉桥; 钢混组合梁; 单箱三室箱梁; 主梁变宽; 抗风稳定性; 耐久性设计

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)12-0031-03

0 引言

近几十年来, 城市化进程越来越快, 与之密切相关的现代交通也得到了飞速的发展。现代交通的发展离不开道路设施的建设, 而桥梁结构作为道路交通的咽喉, 起到了至关重要的作用。斜拉桥以其强大的跨越能力、良好的抗风性能、成熟的施工工艺以及优美的景观效果越来越多的应用于桥梁建设中, 斜拉桥修建数量急剧增加, 跨径也不断增大。

斜拉桥已成为跨越海峡一种重要的桥型结构, 钢混组合梁斜拉桥作为其中的一种类别, 也得到了快速的发展。钢混组合梁斜拉桥充分利用了钢结构良好的抗拉性能和混凝土结构良好的抗压性能, 基于混凝土桥面板良好的受压性能, 改善了主梁的抗压、抗弯性能以及主梁的整体刚度; 很好地解决了钢箱梁桥面铺装易损坏的问题; 自重较混凝土梁轻, 大大提升斜拉桥的跨越能力; 解决了混凝土梁易开裂、耐久性差的缺点。因此, 钢混组合梁斜拉桥在世界范围得到了广泛的应用^[1]。

本文依托舟山市富翅门大桥, 针对跨海单索面钢混组合梁斜拉桥结构体系及受力特点, 对主梁结构设计、施工技术、抗风稳定性以及结构耐久性设计等关键问题开展了探讨分析。

1 工程概况

舟山市富翅门大桥^[2]起点接甬舟高速富翅互通,

设富翅门大桥跨富翅门水道, 终点顺接舟山 329 国道, 并设岑港互通顺接宁波舟山港主通道工程。富翅门大桥按双向四车道高速公路等级设计, 标准段桥面全宽 27.5 m, 设计速度为 80 km/h, 设计荷载等级公路 - I 级, 设计基准风速 40.5 m/s, 地震基本烈度 VII 度。通航等级为 500 吨级, 通航净空宽度 180 m, 净高 21 m。

桥位区气候条件复杂, 灾害天气频繁, 台风登陆频繁, 风力大、风况复杂; 地形条件复杂, 水下地形呈“V”型, 最大水深达 56 m; 桥位与航道轴线存在一定夹角, 且位于航道弯道处。通过综合比选, 设计确定了跨越能力大、抗风性能好、造型美观的双塔单索面钢混组合梁斜拉桥方案, 跨径组合 57 m+108 m+340 m+108 m+57 m, 总体布置见图 1。

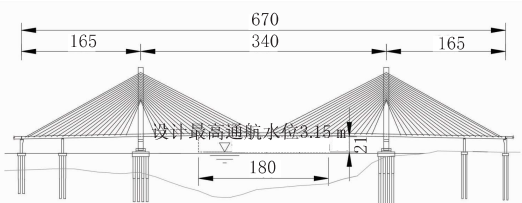


图 1 富翅门大桥主桥总体布置(单位:m)

2 钢混组合梁结构设计

2.1 主梁结构设计

组合梁斜拉桥主要断面形式^[3]有肋板式钢混组合梁、分离式双箱钢混组合梁、半封闭钢箱组合梁以及单箱三室钢混组合箱梁。由于肋板式钢混组合梁、分离式双箱钢混组合梁、半封闭钢箱组合梁均仅适用于双索面斜拉桥, 而本桥由于岑港侧边跨变宽的限制采用了单索面的形式, 故主梁采用了单箱三室钢混组合

收稿日期: 2021-08-26

作者简介: 杨成峰(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

箱梁结构。该断面受力特点为结构整体性好、抗扭性能佳,具有良好的抗风性能。组合箱梁结构为封闭截面,相对于开口截面,具有良好的抗腐蚀、耐久性能,能有效减少后期的养护费用,所以较多的应用于跨海桥梁中。

钢混组合梁采用单箱三室箱形截面,见图 2。标准节段主梁顶板宽 27.5 m,底板宽 16.24 m,中心线处梁高 3.5 m,顶面设置 2%双向横坡。主梁由钢主梁和混凝土桥面板两部分组成。

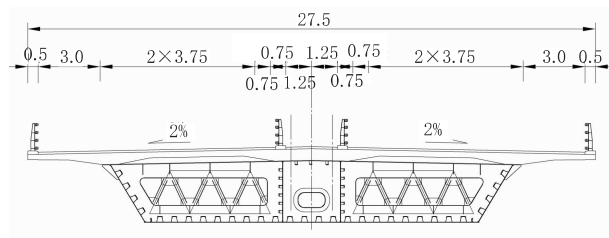


图 2 主梁标准横断面(单位:m)

钢主梁中心线处梁高 2.95 m,底板宽 16.24 m,顶板全宽 20.3 m,由斜腹板、纵隔板、底板组成开放式单箱三室结构。斜腹板厚度为 20 mm,纵隔板厚度为 24 mm,底板厚为 16 mm。斜腹板与底板上均设置开口宽 300 mm、高 280 mm,板厚 6 mm 的 U 型肋,标准间距为 700 mm。纵腹板上纵向设置 L 型肋,板厚 10 mm,间距为 400 mm。在斜腹板与纵隔板顶上分别设置宽度为 800 mm 和 3 600 mm 的主梁面板,板厚 24 mm。

混凝土桥面板两侧悬臂长度各为 4 m,悬臂板端部厚度为 20 cm,边腹板顶 80 cm 宽和中箱直腹板 360 cm 宽的厚度为 55 cm,边箱跨中顶板厚度为 28 cm,长度 455 cm,两边板厚变化段长度 150 cm。

2.2 主梁节段预制拼装设计

为减少海上施工作业、提高施工质量,主梁采用节段预制、悬臂拼装施工^[4],在预制梁场完成钢结构的制作加工、混凝土顶板的浇注,并预留混凝土板的现场浇注宽度。

钢主梁由专业公司加工制作,混凝土桥面板在钢主梁上现浇生产,船运到现场。为减少钢混组合梁混凝土收缩、徐变造成混凝土开裂,影响结构耐久性,结合梁整体节段施工完成后应至少存梁 6 个月后方可进行安装,同时主梁桥面板 C60 海工混凝土内添加纤维素纤维。

主梁节段湿接缝采用 UHPC 超高性能混凝土,相比传统混凝土湿接缝,每节段施工周期可由 13 d 缩短为 8 d,大幅提升悬臂拼装工效。

2.3 变宽段结构计算分析

富翅门大桥接岑港互通,受互通设置限制,富翅门大桥岑港侧边跨位于互通变宽段,主梁相应变宽至 35.5 m。变宽段构造新颖、受力复杂,有必要通过有限元软件进行受力状态分析。采用 ANSYS 空间有限元模型进行计算分析,等宽段采用梁单元模拟,变宽段采用壳、实体单元进行精细化空间模拟,见图 3。

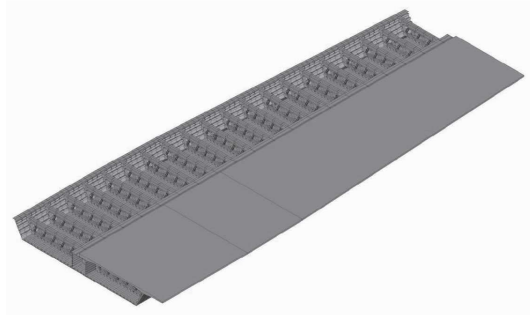


图 3 主梁变宽段模型

有限元分析结果表明,底板、底板 U 肋、腹板以及混凝土顶板全断面受压,底板最大压应力为 66 MPa,腹板最大压应力为 84 MPa,横隔板最大拉应力为 85 MPa,混凝土顶板最大压应力 7.4 MPa,结构受力良好。

3 抗风稳定性分析

主桥具有主跨跨径大、结构阻尼低、主梁为单索面布置等特点,桥位所在的舟山地区为亚热带海洋季风季候,夏秋多台风,全年多大风,气象条件十分复杂。因此,桥梁结构的风致响应及抗风稳定性,是影响本桥施工安全和运营安全的重要问题。

3.1 结构动力特性分析

采用 Midas/civil 分析软件建立有限元模型,主梁、桥塔采用空间梁单元模拟,其中主梁采用组合梁截面,斜拉索采用空间杆单元模拟。计算主要对桥梁施工中最大悬臂阶段、运营阶段进行抗风稳定性分析。结构动力特性是抗风稳定性分析的基础,故首先要进行桥梁结构动力特性分析^[5]。根据桥梁结构模型计算分析,动力特性计算结果见表 1、表 2。

表 1 成桥阶段结构自振模态表

No.	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.149 0	6.712 5	主梁纵飘
2	0.392 4	2.548 2	主梁一阶竖弯
3	0.483 3	2.068 9	主梁一阶侧弯
4	0.546 4	1.830 0	主梁二阶竖弯
5	0.645 5	1.549 2	主梁一阶扭转

表 2 最大悬臂状态结构自振模态表

No.	频率 /Hz	周期 /s	振型特征
1	0.386 7	2.586 1	主梁一阶侧弯
2	0.421 9	2.370 1	主梁一阶竖弯
3	0.739 0	1.353 2	主梁一阶扭转
4	0.811 0	1.233 1	主梁二阶竖弯
5	1.008 0	0.992 0	主塔横向侧弯

3.2 抗风稳定性分析

根据桥梁抗风设计规范,动力特性计算所得扭转频率和设计基准风速等计算颤振稳定性指数^[6] $I_t = \frac{K_s}{\sqrt{\mu}} \cdot \frac{U_d}{f_1 B}$ 。计算颤振稳定性指数成桥状态为 3.4,最大悬臂状态为 3.1。

当颤振稳定性指数 $I_t < 2$ 时,可按抗风设计规范 7.5.4 条规定计算桥梁颤振临界风速,当颤振稳定性指数处于 $2 \leq I_t < 4$ 时,可按规范 7.5.4 条规定计算桥梁颤振临界风速,也可通过节段模型风洞试验或虚拟风洞试验进行检验,当颤振稳定性指数 $4 \leq I_t < 10$ 时,应进行主梁气动选型,并通过节段模型试验或全桥气动模型试验进行检验。

本桥颤振稳定性指数处于 $2 \leq I_t < 4$ 范围,可按照抗风规范第 7.5.4 条、7.5.8 条规定计算颤振临界风速及颤振稳定性检验 $U_t > \gamma_f \gamma_l \gamma_a U_d$ 。成桥状态为 $U_t = 125 \text{ m/s} > 71 \text{ m/s}$,最大悬臂状态 $U_t = 129 \text{ m/s} > 71 \text{ m/s}$ 。计算表明成桥阶段和最大悬臂阶段颤振临界风速大于桥址处的颤振检验风速,桥梁抗风稳定性能满足规范要求。

4 海洋环境的结构耐久性设计

4.1 钢结构的耐久性设计

(1)防腐措施可以针对组合梁钢箱不同部位,选择不同的方法^[7]。对于钢箱外表面,采用金属喷涂重防腐,设计使用年限须达到 30 ~ 40 a。钢箱梁底设置养护行车,便于运营期间检查和维护以及施工期间梁底作业。

(2)钢箱内壁构造复杂,表面积大,箱体密闭,空气不流通。设计考虑采用除湿防腐,使箱内空气相对湿度保持在 50% 以下,钢结构表面长期处于干燥空气中,防止钢板表面锈蚀。

4.2 混凝土结构的耐久性设计

(1)结构混凝土均采用海工耐久性混凝土,对海工混凝土的材料选择、配置要求作详细规定,检测指标参见表 3。

表 3 海工耐久混凝土抗氯离子渗透性要求(12 W 龄期)

结构部位	混凝土氯离子扩散系数($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
钻孔灌注桩	≤ 3.0
海上承台	≤ 2.5
桥墩、桥塔	≤ 1.5
主梁	≤ 1.5

(2)浪溅区和水下混凝土掺加阻锈剂、海水耐蚀剂。严格控制钢筋保护层厚度,保留施工用钢护筒作为永久结构等措施,来增加钻孔灌注桩的防腐性能。

(3)上部梁板及桥墩墩身、盖梁、承台等表面进行防腐蚀涂装。

4.3 钢 - 混凝土结合部位的耐久性设计

为了提高钢 - 混凝土结合部位的密封性能,全桥所有结合面周边均填充硫化型橡胶密封胶。同时,覆盖混凝土的钢梁上翼缘上表面两侧部分涂装环氧玻璃鳞片漆,环氧玻璃鳞片漆具有优异的耐水和耐化学品渗透,高附着力和机械强度,能有效抵抗界面的错动,且具有良好的防腐性能。

4.4 维护和检修设施

在桥梁运营期间应对结构进行定期的维护和检修。检修和维护通道就是对该工作能够得以进行的基本保证,检修和维护通道在桥梁结构设计时统一考虑,主梁内设置检修通道,主梁外侧设置桥检车,主塔内设置爬梯、电梯等。

5 结 语

富翅门大桥是甬舟高速进入舟山本岛的主要门户,桥址区建设条件恶劣,对结构质量和耐久性要求高。受互通设置限制,主桥岑港侧边跨桥面宽度由 27.5 m 渐变为 35.5 m,提出适用于单索面的单箱三室钢混组合箱梁截面,该断面结构具有良好的抗风性能和耐久性能。大桥践行工厂化设计理念,为减少海上施工作业、提高施工质量,主梁采用节段工厂预制、现场悬臂拼装施工,并在国内首次将超高性能混凝土应用到跨海钢混组合梁斜拉桥湿接缝,每节段施工周期由传统混凝土的 13 d 缩短为 8 d,大幅提升悬臂拼装工效。建立有限元计算模型,对桥梁施工中最大悬臂阶段、运营阶段进行抗风稳定性分析,表明大桥具有良好的抗风性能。针对大桥所处的海洋环境,采取多项设计措施,全方位提升海洋环境下的桥梁结构耐久性。

(下转第 57 页)

表 1 初拉力及规格 (单位:kN)						
拉索	拉索规格	初张力 /kN	成桥索力 /kN	基本组合 /MPa	抗拉强度 设计值 /MPa	是否满足
B1	φ50	252	404.1	320.4	850	是
B2	φ50	150	254.7	299.2	850	是
B3	φ50	180	277.2	323.1	850	是
Z1	φ50	51	116.9	106.6	850	是
Z2	φ50	68	107.9	140.9	850	是
Z3	φ50	90	168.2	184.0	850	是
Z4	φ50	100	221.5	230.4	850	是
Z4	φ50	157.3	276.1	289.4	850	是

4 稳定验算

为了确保结构在施工过程以及成桥时的稳定安全,需要对施工阶段最不利工况和成桥工况进行稳定计算,本文共选择裸塔、最大悬臂、成桥三个工况验算结构的稳定安全,具体结果见下。

4.1 裸塔工况

裸塔施工模型如下,其临界失稳状态见图 8。

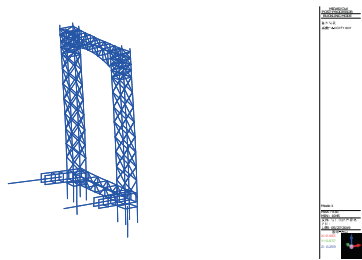


图 8 桐庐悬廊桥裸塔失稳图(纵向失稳)

由计算结果可知裸塔阶段临界失稳系数为 40.5,满足要求。

4.2 最大悬臂工况

最大悬臂的模型如下,其临界失稳状态见图 9。

由计算结果可知最大悬臂阶段的临界失稳系数为 20.7,满足要求。

4.3 成桥工况

成桥阶段的模型如下,其临界失稳状态见图 10。

由计算结果可知成桥阶段临界失稳系数为 29.6,满足要求。

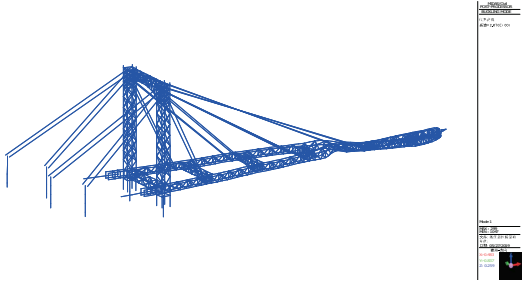


图 9 桐庐悬廊桥最大悬臂失稳图(横向失稳)



图 10 桐庐悬廊桥成桥失稳图(横向失稳)

由以上的计算结果可以知道,在最不利的施工阶段和成桥阶段,桥梁的稳定系数均大于 2.5,满足规范要求,结构的安全性可以得到保证。

5 结论

本文采用桥梁专业有限元软件 Midas civil 较为准确的分析了桐庐悬廊桥,得出以下结论:

(1)悬廊桥的主梁最大变形为 249.4 mm<L/300 = 260 mm,主塔最大变形为 52.3 mm<L/300 = 76.9 mm,满足规范要求。

(2)悬廊桥的主梁最大应力为 116.81 MPa,最大拉应力为 72.29 MPa;主塔最大压应力为 103.58 MPa,最大拉应力为 71.69 MPa,桥梁的主梁、主塔的应力满足规范要求。

(3)悬廊桥的拉索最大应力 320.4 MPa,受力性能满足规范要求。

(4)悬廊桥最小临界失稳系数为 29.6,主桥整体稳定系数较大,说明稳定性较好。

从结果看,桐庐悬廊桥的整体应力水平均满足我国现行的相关规范要求。通过对桐庐悬廊桥的受力性能分析,为大桥的施工提供理论数据,也为同类桥型的设计提供参考。

~~~~~

(上接第 33 页)

参考文献:

[1] 闫旭.组合梁斜拉桥的技术发展[J].城市道桥与防洪,2013(5):53-55.  
[2] 浙江省交通规划设计研究院有限公司.舟山市富翅门大桥工程设计文件[Z].2015.  
[3] 尹超,杨善红.大跨度组合梁斜拉桥主梁结构设计构思[J].桥隧工程,2012(11):298-301.  
[4] 易云焜,岳青,严和仲.叠合梁斜拉桥主梁施工工序方案比选[J].公路,2012(12):36-38.  
[5] 靳俊中.大跨度叠合梁斜拉桥动力特性分析[J].交通标准化,2011(18):124-128.  
[6] JTG/T 3360-01—2018,公路桥梁抗风设计规范[S].  
[7] 王军,付强,闫雪峰.我国跨海大桥钢结构防腐保护与涂装[J].全面腐蚀控制,2010(第六届全国会员代表大会特刊):25-30.