

单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥性能分析

黄润

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 为美化桥型,提高连续梁桥的跨越能力,有效解决关键部位应力集中产生裂缝等工程问题,以福州市湾边特大桥为例,提出了单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥结构。分析结果表明:该结构通过调整拱肋刚度、优化结构设计,研发相应的施工工艺,有效控制了裂缝发生及发展;整体受力方面,拱肋分担了二期恒载 34.4%和活载 23.5%弯矩,确实起到良好的加劲作用;吊点处拱肋加劲构造出现局部应力集中区,通过加强钢板厚度有效解决;横梁与箱梁翼缘板刚度差异大,拉应力较为集中,采取横梁与箱梁翼缘板间增设倒角满足力学指标。经过多年的运营监测证明了单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥结构合理性和可实施性,可为同类桥梁设计与施工提供技术指导。

关键词: 单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁;梁拱组合结构;全桥空间网格三维仿真;实用精细化分析

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0520-07

Performance analysis of V-shaped rigid structure continuous beam bridge with single-rib arch strengthening

HUANG Run

(Fujian Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: This research aims to beautify the bridge type, improve the spanning capacity of the continuous beam bridge, and effectively solve the engineering problems such as cracks caused by stress concentration in key parts. Taking Fuzhou Bay Bridge as an example, the single-rib arch reinforced V-shaped rigid structure continuous beam bridge structure is put forward. Analysis results show that the structure effectively controls the occurrence and development of cracks by adjusting the stiffness of the arch rib, optimizing the structure design and developing the corresponding construction technology; in terms of overall force, the arch rib shares 34.4% of Phase II constant load and 23.5% of bending moment in live load, which has a good strengthening effect; the local stress concentration area appears at the lifting point, which is effectively solved by strengthening the thickness of the steel plate; the stiffness difference between the flange plate of the cross beam and the box girder is large, and the tensile stress is relatively concentrated, so the chamfer between the beam and the box girder is adopted to meet the mechanical index. Years of operation monitoring has proved the rationality and feasibility of the single-rib arch reinforced V-shaped rigid structure continuous beam bridge, which can provide technical guidance for the design and construction of similar bridges.

Keywords: V-shaped rigid structure continuous beam with single-rib arch strengthening; beam-arch combined structure; 3D simulation of full bridge space grid; practical fine analysis

V 形刚构拱组合桥作为一种新的桥梁结构体系,受到越来越多研究人员的关注。该体系可分为刚性拱刚性梁、刚性拱柔性梁、柔性拱刚性梁 3

种。刘宇闻等^[1]对比分析该体系中刚性拱刚性梁关键部位和构件的变形及受力状态,认为拱脚处受力复杂,应采取措施防止局部破坏;勾红叶

等^[2]研究了该体系中拱与梁的竖向静力刚度问题,提出拱肋抗弯刚度、主梁抗弯刚度、吊杆轴向刚度之和作为名义刚度概念;张耀万^[3]研究了该体系的隔震,认为在 V 形刚构底部采用 TFPS 隔震系统可以有效提高其抗震性能;李文文^[4]研究了该体系中 V 形墩张角对桥梁力学性能的影响;王达等^[5]对该体系中刚性拱柔性梁的拱脚局部进行分析,优化了拱脚处预应力钢束布置。

综上,国内外研究主要集中于刚性拱刚性梁、刚性拱柔性梁体系,而对柔性拱刚性梁体系的研究较少。本文以福州市湾边特大桥为例,提出了单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥结构,该结构属于柔性拱刚性梁体系,以连续梁为主体,配以单肋拱进行加劲,V 型撑减少跨径,有效减小连续梁高,通过改变梁拱组合体系中梁拱之间的受力分配,从而改变结构的力学性能,有效解决梁拱组合结构中拱为主受力时产生的工程问题,可为我国同类桥梁设计及施工提供指导^[6]。

1 项目概况

福州市湾边特大桥及接线公路工程起点位于福州建新镇湾边,终点位于闽侯南屿镇接福州(南)收费站,路线总长 3.90 km,汽车荷载采用公路-I 级。桥梁全长 1 940 m,主桥采用单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥,跨径布置(45+90+106+90+45) m。总体布置图见图 1、图 2,主桥宽 34 m,双向六车道,两侧各设 2.5 m 宽非机动车道。



图 1 湾边大桥竣工图

Fig.1 Completion drawing of Bay Bridge

主梁采用双箱斜腹板箱梁,跨中梁高 2.4 m,主墩根部梁高 4 m,离墩中心 9~52 m 范围内采用二次抛物线变截面梁高;边墩根部梁高 3.6 m,离墩中心 9~36 m 范围内采用二次抛物线变截面梁高。次边跨与主跨两箱之间对应拱肋吊杆位置设置横梁,每 8 m 一道。在中央分隔带位置,顺桥向

设置 3 个单肋钢管拱,大拱跨径 87.7 m,矢跨比 1/5,小拱跨径 71.7 m,矢跨比 1/6,拱肋均采用二次抛物线线型,截面为双哑铃型。采用平行钢丝束双吊杆,吊杆索体采用双层 PE 保护的 OVMPEs(FD)7-55 低应力防腐新型索体。主墩及次边墩采用 V 型撑配桩基础,边墩采用与引桥相同的薄壁花瓶墩配桩基础。

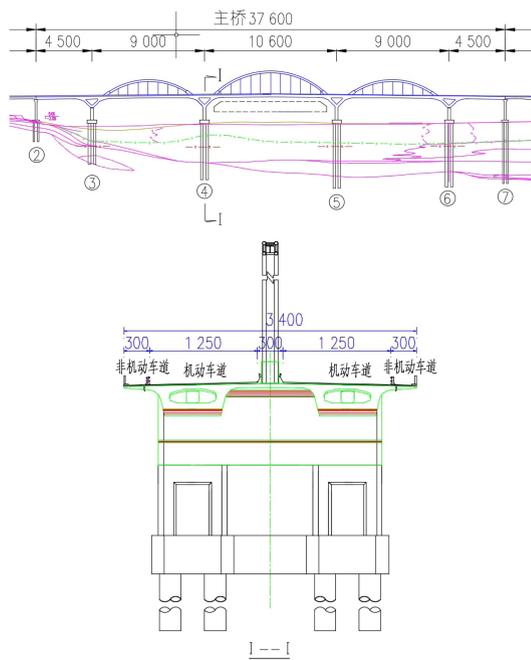


图 2 湾边大桥主桥总体布置图(单位:cm)

Fig.2 Overall layout of main bridge of Bay Bridge (unit: cm)

2 结构受力性能与特点

该结构属于多次超静定柔性拱刚性梁体系,具有如下特点:1)结构以刚构-连续梁为承重主体,加劲拱肋与主梁共同承担二期恒载、活载,并通过调整拱肋的抗弯刚度,保证了桥梁受力的合理性和经济性;2)中央分隔带位置设置单片拱肋,避免多拱肋引起压抑感和杂乱感,并简化施工;3)纵桥向桥墩处设置 V 型撑,减小了主梁和拱肋的有效跨径;4)在拱肋和 V 型撑对主梁受力的协作下,有效降低了主梁梁高,使桥梁外形轻盈流畅美观。

刚性拱刚性梁和刚性拱柔性梁体系桥梁工程应用较广,但存在以下问题:

(1)在拱与梁的结点、拱与拱座的结点容易出现裂缝,主要是梁与拱针对混凝土徐变、温度作

用等效应的荷载响应不协调,这种裂缝不采取配筋加强措施难以避免^[7];

(2)在拱座上缘处容易出现裂缝^[8],主要是因为拱座与主梁连接处承担负弯矩的作用,主梁的负弯矩钢束穿过拱座内部和下缘,预应力无法作用于拱座上缘,当拱座截面弯矩较大时容易产生裂缝;

(3)为减少拱肋自重产生的弯矩,在施工期间拱脚处需设置临时铰,施工完成后再将临时铰固结,导致桥梁施工步骤多,工序复杂。

单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥结构属于柔性拱刚性梁体系,其结构特点可有效改善上述不利影响:1)拱肋受力相对较小,能够大幅减少拱与梁结点处的弯矩,避免结点开裂;采用柔性拱,拱肋截面尺寸小,可以利用两幅桥梁之间的中央分隔带设置单拱肋,不增加总桥宽,从而有效控制桥梁规模;2)为降低梁拱组合体系中拱梁节点受力复杂性,本结构将拱肋与 V 撑的固结点、主梁与 V 撑的固结点错开,设置在不同平面上,如图 2 所示,拱座受力通过 V 撑传到桥墩,主梁支点负弯矩由预应力钢束消除,两个结点分开受力,传力途径相比拱梁墩共结点明确,有效改善拱座上缘及梁顶受力;3)结构施工采用主梁合拢后在桥面架设空心钢管拱肋,再利用其作为模板泵送管内混凝土形成钢管混凝土拱肋,施工吊装重量轻,进度快,同时避免了主梁恒载对拱脚的不利影响。

3 关键部位结构分析

3.1 结构计算模型

结构采用 MIDAS 空间有限元程序建立全桥空间梁单元模型进行计算,并依据分析优化结构的施工方案与步骤。根据有限元程序的计算分析原则,合理离散全桥结构,共分为 1 548 个单元,模型见图 3。主梁和桥墩采用 6 自由度空间梁单元;拱肋截面采用包含钢材和混凝土的组合材料,以施工联合截面的形式模拟;吊杆采用只受拉桁架单元即索单元来模拟,计算时考虑在 8 个零号块节点下支撑临时支墩,以利于悬臂施工时桥梁体系受力;同时采用梁格法分解 V 撑块体结构,即按照传力方向横向分成 5 个纵梁单元,纵梁之间采用横虚梁连接;另外用等代刚度土弹簧代替桩基周围土的约束作用,较好地模拟了全桥结构

的受力。

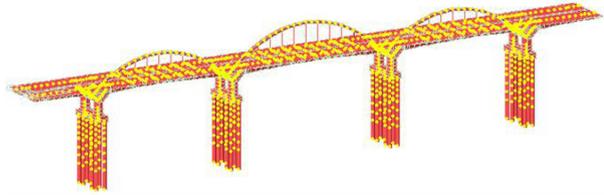


图 3 全桥计算模型

Fig.3 Whole bridge calculation model

本桥结构复杂,施工顺序对结构受力产生关键影响,经计算调整,施工流程见图 4。

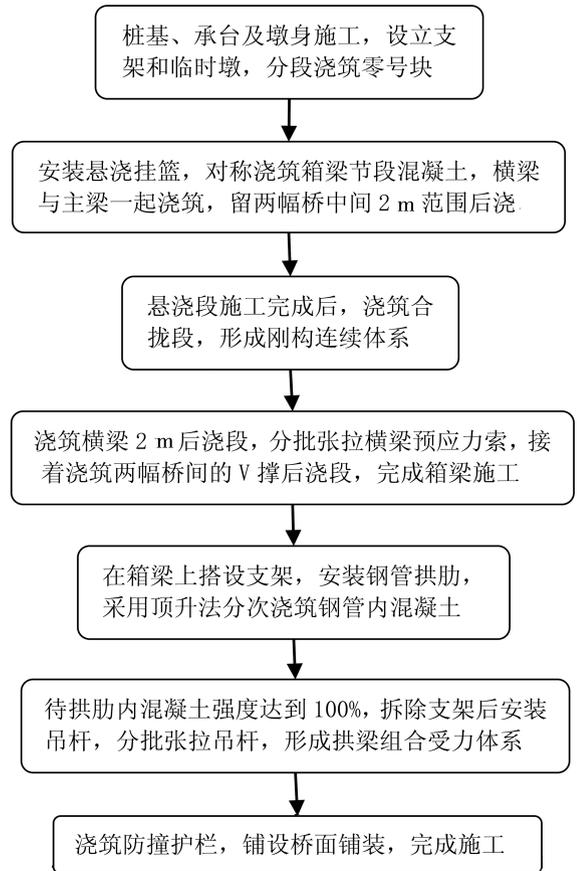


图 4 全桥施工主要流程图

Fig.4 Main flowchart of whole bridge construction

3.2 结构受力分析计算

(1) V 撑顶部和底部节点受力分析

拱、梁、墩结合部三角块由于相互固结,承受了巨大的荷载,预应力二次矩效应显著。为此,优化调整了该部位的施工工艺和步骤:在支架和临时墩上分段浇筑 V 型撑,在零号块顶部预留 1 m 现浇缝,然后在临时墩支撑下脱支架张拉预应力索储备 V 撑压应力,最后浇筑现浇缝,合龙零号

块。这种方法能充分发挥预应力效应,但对临时支墩的刚度要求较高,通过计算确定采用直径为 1.5 m 的钢管混凝土桩柱为临时支墩。计算结果表明,通过处理,可控制在距离节点 1.5 m 的位置主拉、主压应力满足规范^[9]要求。具体位置见图 5;最不利工况下,桥墩 V 撑受力结果见表 1。

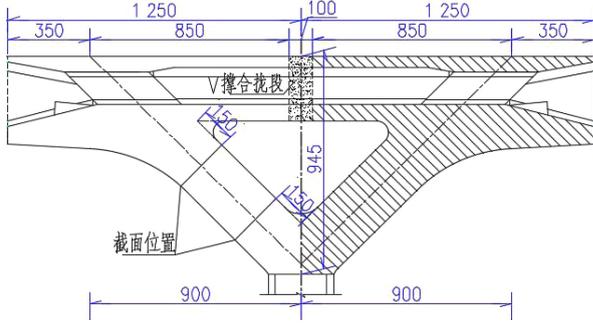


图 5 V 撑计算截面位置(单位:cm)

Fig.5 V-support section position calculated (unit: cm)

表 1 V 撑节点单元验算成果表

Tab.1 Table of checking results of V-support node units

名称	V 撑底部			V 撑顶部		
	单元号	主拉应力/MPa	主压应力/MPa	单元号	主拉应力/MPa	主压应力/MPa
支墩	2 772	0.25	6.99	2 775	0.4	7.15
	2 766	0.44	6.85	2 769	0.44	7.81
	2 778	0.15	6.36	2 781	0.24	5.78
	2 784	0.16	6.34	2 787	0.18	5.23
固墩	2 808	0.54	11.8	2 811	1.02	12.68
	2 802	0.53	11.35	2 805	1.19	13.61
	2 814	0.73	11.1	2 817	0.82	12.38
	2 820	0.92	11.65	2 823	0.88	9.93

(2) 拱肋受力分析

拱圈单元中,除拱脚区起拱线处最大拉应力达 2.78 MPa 外,其余单元混凝土主拉应力控制在 1 MPa 以内,主压应力控制在 7 MPa 以内。拱脚处的不利受力可通过正常配置钢筋解决。

(3) 单肋拱的稳定性验算

根据规范^[10],在施工和使用阶段应对拱肋进行弹性稳定分析。利用图 3 全桥空间梁单元模型,在拱肋与 V 撑固结的边界条件下,求解特征值得到临界荷载,其稳定性按公式(1)计算。

$$K = N_L / N_j \tag{1}$$

式中, K 为稳定安全系数; N_L 为拱丧失稳定性的临界轴向力, kN; N_j 为按承载能力极限状态组合计算的平均轴向力, kN。

规范^[10]要求拱圈弹性稳定安全系数应不小于 4。采用静力平衡法计算,得到控制设计工况下主拱圈运营阶段的一阶稳定安全系数为 9.02 > 4, 相应的失稳模态是主跨主拱圈横向侧倾的面外失稳;其二阶稳定安全系数为 10.6 > 4, 相应的失稳模态是主跨主拱圈扭转面外失稳;均满足规范要求,分别如图 6、7 所示。可见主拱圈主要是面外失稳。

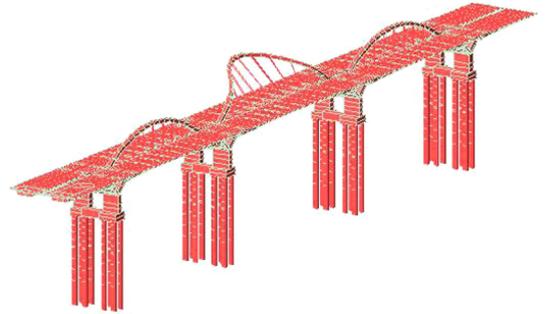


图 6 整体一阶失稳模型

Fig.6 Overall first-order instability model



图 7 整体二阶失稳模型

Fig.7 Overall second-order instability model

(4) 荷载作用下拱、梁受力比值分析

该结构中拱肋对桥跨结构起加劲作用,在箱梁施工完成后,才开始施作拱肋及吊杆,参与承受二期恒载、使用阶段活载作用及徐变产生的二次内力作用,因此相对箱梁,拱肋受力较小。为合理确定加劲拱对结构的作用和贡献,采用吊杆全部失效与吊杆正常使用时的主梁受力大小进行比较,取中跨主梁及拱肋跨中截面位置,如图 8 所示,计算结果如表 2、表 3 所示。

如果定义吊杆失效时主梁跨中弯矩与吊杆正常时跨中弯矩的差值为吊杆承担的等效弯矩,则该弯矩与吊杆失效时主梁跨中弯矩的比值为跨中截面弯矩吊杆承担比例。从单项计算结果可看出,在主梁跨中截面位置吊杆承担了相当比例的

等效弯矩,二期恒载为 34.4%,成桥后徐变影响为 59.3%,汽车活载为 23.5%,起到明显的加劲作用。从承载能力极限状态结果看,吊杆作用下,箱梁的轴力从梁体大幅转移到拱肋上,同时弯矩在跨中截面减少了 16.8%,有效增加了结构的安全储备。该结构主跨支点截面高跨比为 1/26.5,明显小于变截面连续刚构桥 1/17 的平均指标,跨中截面高跨比为 1/44.1,略小于变截面连续刚构桥 1/40 的平均指标。可以看出,加劲拱的存在,有效减少了该结构主梁的断面尺寸。

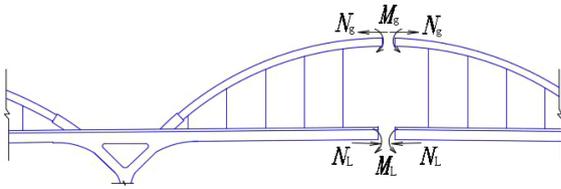


图 8 计算截面位置示意

Fig.8 Schematic diagram of cross-section position calculated

表 2 单项受力对比表 (单幅箱梁中跨跨中截面弯矩)
Tab.2 Single-item force comparison table (Bending moment of mid-span section of single box girder)

受力工况	弯矩/(kN·m)		
	二期恒载	成桥后徐变	汽车活载
吊杆正常	12 333	5 096	9 671
吊杆失效	18 795	12 533	12 647
吊杆承担比例/%	34.4	59.3	23.5

表 3 承载能力极限状态对比表

Tab.3 Comparison table of ultimate limit state of bearing capacity

对比工况	中跨拱肋跨中截面		中跨箱梁跨中截面 (双幅合计)	
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)
吊杆正常	-15 258	1 603	21 482	251 718
吊杆失效	-4 057	1 085	11 383	302 551

(5) 主梁横梁模拟与刚度影响

考虑到横梁顶箱梁翼缘板参与横梁受力,横梁计算采用有效宽度为 3 m 的 T 型梁单元。按照

梁格法将横梁单元与纵梁单元刚接,能较精确地模拟全桥模型中的横梁整体实际受力。通过计算分析横梁的刚度对拱肋加劲作用的影响,拟定横梁厚度为 60 cm,以此为基准,考虑 1.5 倍和 2 倍横梁刚度对吊杆力的影响,见表 4,吊杆编号按桥梁纵向桩号从小到大排列。

表 4 横梁刚度比较表

Tab.4 Comparison table of cross beam stiffness

名称	基准横梁	1.5 倍刚度	2 倍刚度
	吊杆力	吊杆力	吊杆力
边孔 1 号吊杆	1 143	1 163	1 175
边孔 2 号吊杆	989	1 008	1 016
边孔 3 号吊杆	1 007	1 028	1 033
边孔 4 号吊杆	995	1 014	1 021
边孔 5 号吊杆	954	972	979
边孔 6 号吊杆	976	993	1 004
边孔 7 号吊杆	1 287	1 310	1 324
主孔 1 号吊杆	1 320	1 368	1 379
主孔 2 号吊杆	1 169	1 211	1 218
主孔 3 号吊杆	1 176	1 217	1 223
主孔 4 号吊杆	1 191	1 230	1 234
主孔 5 号吊杆	1 200	1 241	1 247
主孔 6 号吊杆	1 195	1 235	1 239
主孔 7 号吊杆	1 175	1 216	1 223
主孔 8 号吊杆	1 168	1 209	1 217
主孔 9 号吊杆	1 323	1 371	1 382
边孔 1 号吊杆	1 279	1 303	1 317
边孔 2 号吊杆	972	988	999
边孔 3 号吊杆	948	966	973
边孔 4 号吊杆	983	1 002	1 009
边孔 5 号吊杆	1 005	1 025	1 030
边孔 6 号吊杆	992	1 010	1 017
边孔 7 号吊杆	1 140	1 160	1 171

注:本结果设定吊杆初张拉力为 250 kN,在升温最不利工况下计算得出。

从表 4 可看出,基于 60 cm 横梁宽基础上的横梁刚度变化对吊杆力影响不超过 4%,对拱肋

加劲作用影响不大,对结构整体受力影响基本相同,故横梁结构宽度采用 60 cm,满足设计要求。

4 结构实用精细化分析

该桥结构复杂,空间效应显著,需进行实用精细化分析,弥补梁单元空间效应分析的不足。采用有限元计算程序 ANSYS 建立全桥空间网格模型进行精细化分析,利用“实体筋法”将混凝土实体分割,形成大量小尺寸实体和力筋线,接着划分单元,施加预应力、荷载和边界条件后求解。划分网格后的模型如图 9 所示,总节点数为 245 376,总单元数 150 472 个。

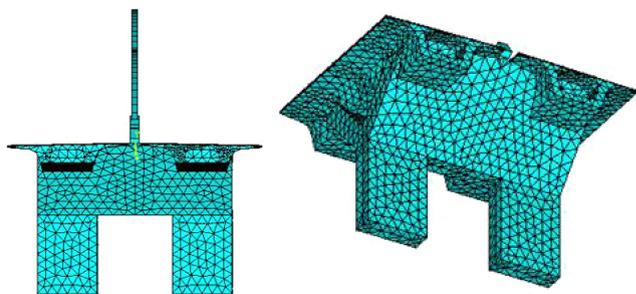


图 9 全桥空间网格模型

Fig.9 Whole-bridge space grid model

4.1 成桥状态下上部结构荷载工况分析

(1) 正常使用极限状态下,结构跨中挠度最大变形为 0.075 m,小于规范规定的跨径 $1/600 = 0.177$ m,满足设计要求。

(2) 结构模型采用 SOLID95 实体单元模拟计算,不能直接得到内力值,本文采用自编程序对各控制截面应力进行积分,得到各控制截面内力值,验算承载能力极限状态组合工况,均满足规范要求。

(3) 整个上部结构的主拉应力在 $0 \sim 1.29$ MPa 之间,主压应力在 $0 \sim -18.9$ MPa 之间,满足规范要求。

4.2 拱肋节段与吊点局部受力分析

根据拱肋整体承载能力计算结果,取拱脚至 $1/8$ 跨的拱肋节段(包含一个吊点)进行局部实体有限元分析。其中拱脚固结, $1/8$ 跨截面承受轴力 9 100 kN、弯矩 540 kN·m,每个吊点承受 1 000 kN 压力,三维有限元模型见图 10,吊点处拱肋构造图如图 11 所示。

从分析结果看,拱段的拉、压应力均小于设计强度,满足规范要求^[10];吊点以承受压力为主,大

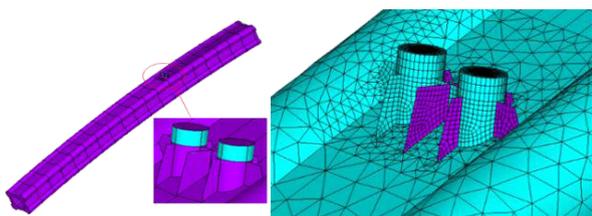


图 10 拱肋节段与吊点有限元计算模型

Fig.10 Finite element calculation model of arch rib segment and lifting points

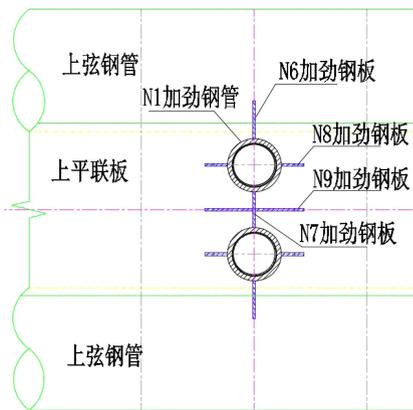


图 11 吊点处拱肋构造图

Fig.11 Structure diagram of arch rib at lifting point

部分应力处于 $-180 \sim 180$ MPa 之间,小于 Q235C 钢材设计强度 190 MPa,满足规范要求^[11]。应力较大的区域主要有:

(1) 在加劲钢管 N1 与加劲钢板 N8 结合处,最大主拉应力为 241 MPa,大于设计强度 190 MPa^[11];

(2) 在加劲钢管 N1、加劲钢板 N8、N9 与拱肋结合处,最大主压应力为 257 MPa,大于设计强度 190 MPa^[11];

依据上述分析,将加劲钢构件的壁厚由原设计 10 mm 增加到 14 mm 以满足规范要求,并在图纸上标注施工中应注意加劲板和拱肋的结合精度和焊缝质量,以避免局部破坏。

4.3 横梁整体及局部受力分析

该结构分左、右两幅浇筑,两幅之间通过横梁及 V 型撑连接,吊杆通过横梁将单肋拱与箱梁组合起来受力,横梁是传力的关键部位,与箱梁腹板和翼缘板连接,受力复杂,因此需进一步对横梁的整体及局部受力做深入分析,三维实体有限元模型见图 12。

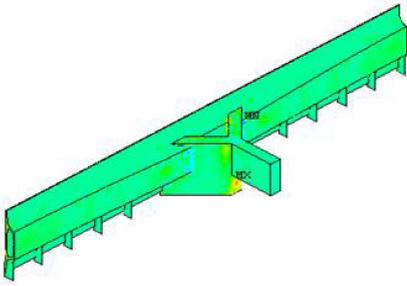
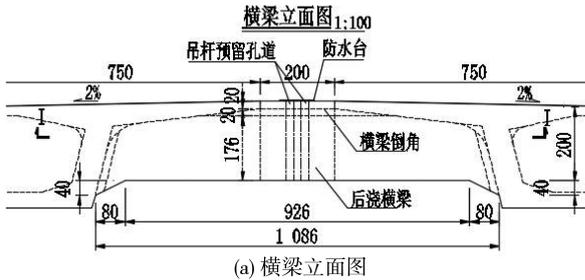


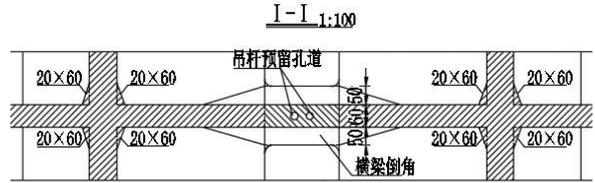
图 12 横梁实体有限元计算模型

Fig.12 Finite element calculation model of the beam

从计算结果看,大部分横梁的主拉应力在



(a) 横梁立面图



(b) I-I 剖面图

图 13 横梁应力集中位置构造优化示意(单位:cm)

Fig.13 Optimization of beam stress concentration position (unit: cm)

5 结束语

单肋拱加劲 V 型撑刚构连续梁桥结构造型独特,拱肋与 V 型撑顺接线型协调,采用柔性拱刚性梁体系,优化结构设计,研发相应的施工工艺,有效解决拱与梁的结点、拱座上缘处易发生裂缝,以及

拱肋节段与吊点结合处、箱梁翼缘板和横梁交接处应力集中的问题。具有良好的经济、社会效益,是 V 形刚构拱组合桥体系一种新的设计思路。采用该结构的福州湾边大桥通车多年,运行良好,桥梁结构完整,在正常运营状态下具有良好的安全性能,无质量问题,充分证明该结构的合理性和可实施性。

参考文献:

- [1] 刘宇闻,傅少君,瞿国钊. V 形刚构-拱组合桥静力有限元分析[J]. 公路交通科技,2010,27(10):66-71.
- [2] 勾红叶,蒲黔辉,陈志伟,等.大跨度 V 形刚构拱组合桥拱与梁的刚度研究[J]. 公路交通科技,2013,30(7):97-102.
- [3] 张耀万. 某 V 形刚构连续梁拱组合桥隔震性能有限元分析[J]. 兰州工业学院学报,2021,28(3):25-30.
- [4] 李文文. V 形桥墩张角对连续刚构—系杆拱组合桥受力性能影响研究[J]. 公路,2021,66(12):143-148.
- [5] 王达,任灿. V 形刚构组合拱桥拱脚局部受力分析与钢束布置优化研究[J]. 公路与汽运,2023(1):125-128.
- [6] 刘海青,张杰,黄润,等. 一种单肋拱加劲 V 型撑刚构—连续梁桥及其施工方法[P]. 中国:ZL 2015 1 0067304.4,2015.
- [7] 李国平. 连续拱梁组合桥的性能与特点[J]. 桥梁建设,1999,29(1):10-13.
- [8] 金成棣. 预应力混凝土梁拱组合桥梁:设计研究与实践:现代桥梁技术丛书[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG D 62—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢管混凝土拱桥设计规范:JTG/T D65-06—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

(责任编辑:陈雯)