

预应力混凝土连续桁梁刚构桥裂缝分析及加固

毛建平^{1,2}, 唐庚^{1,2}, 蒙方成^{1,2}, 覃乐勤^{1,2}, 潘观赐^{1,2}

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530011; 2. 广西交通工程检测有限公司)

摘要:某大型双层桥面预应力混凝土连续桁梁刚构桥运营多年,经检测,主桥下弦杆与弦下斜杆交接处存在较为典型的裂缝,且宽度较大,对结构安全及耐久性具有较大影响。该文针对具体病害,进行专项检测及分析,探讨了病害成因,有针对性地进行了加固,结合有限元分析结果和加固后荷载试验结果,验证了加固效果的有效性。

关键词: 预应力混凝土连续刚桁桥; 裂缝; 维修加固

1 桥梁概况

某预应力混凝土连续桁梁刚构桥于1995年7月通车,全长785.5 m,跨径组成为 $19 \times 16 \text{ m} + (60 \text{ m} + 3 \times 100 \text{ m} + 60 \text{ m}) + 3 \times 16 \text{ m}$ 。主桥为双层桥面预应力混凝土连续桁梁刚构桥,中跨跨中设摆柱铰;桥面横向全宽采用两纵向桁片支承联结,高度6.35 m,两纵向桁片通过横向安装行车道、人行道板、横向桥面钢筋网和施加横向预应力钢筋联成整体;上弦杆为U形断面,下弦杆为带缺口矩形断面;靠近桥墩处设弦下斜杆和弦下竖杆与下弦杆固结。主墩为四桩式高桩桥墩。桥梁设计荷载等级:汽车—超20级、挂车—120,人群荷载 3.5 kN/m^2 。

2 病害概况

桥梁维修加固前最近一次检测结果表明:弦下斜

杆、弦下竖杆与下弦杆的相交处(下文简称“三角区”,见图1中“裂缝开展部位1~8”),出现较为典型的裂缝。裂缝主要分为两类:①弦下斜杆与下弦杆结合面处开裂,该类裂缝宽度大,伴随渗水和局部剥落露筋等情况;②沿弦下斜杆向下发展的斜向裂缝。两类裂缝宽度均超过了规范规定的限值,裂缝分布示意图1,部分严重裂缝开裂部位及描述见表1,裂缝数量汇总统计见表2,典型裂缝照片见图2。

3 病害专项检测及分析

3.1 专项检测

根据外观检测结果,主桥右侧桁片下弦杆与弦下斜杆交接面开裂贯通,裂缝宽度达5 cm;部分拱上竖杆出现全截面开裂,最大裂缝宽度达15 mm,已发生结构性破坏,存在杆件失稳倾向。桥梁管理部门及时封闭了该桥交通,并组织了桥梁专项检测工作。

为进一步确定桥梁实际受力及实际承载能力状

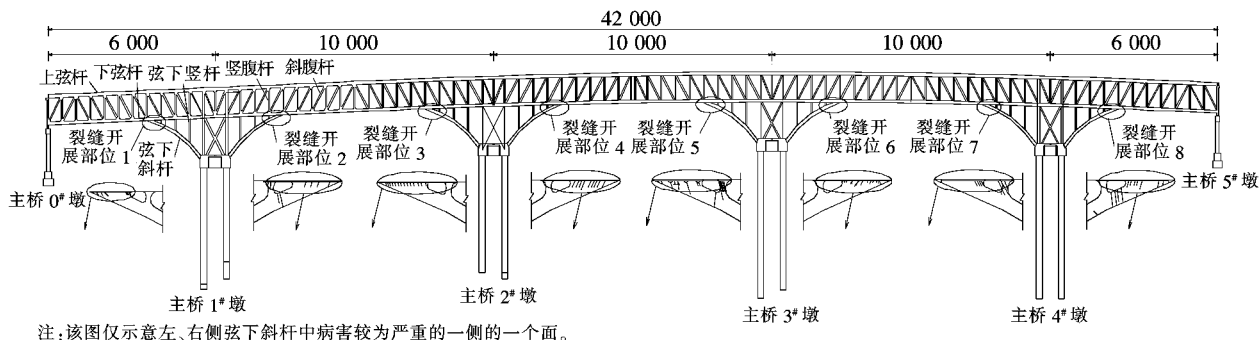


图1 桥梁立面图(单位:cm)

收稿日期:2019-11-08

作者简介:毛建平,男,硕士,高级工程师。E-mail:409452662@qq.com

表 1 部分严重裂缝开裂部位及描述

开裂部位	交界面 开裂渗水长/m	裂缝 宽度/ mm	沿交界面向下发展斜向裂缝		
			数量/ 道	最大宽 度/m	最大长 度/m
1	3.0	0.20	6	0.15	0.3
2	5.3	5.0	9	0.10	0.7
3	5.3	1.0	14	1.0	0.15
4	5.3	1.0	9	1.5	0.40
5	5.3	5.0	16	15.0	0.80
6	3.8	5.0	15	0.20	0.30
7	4.2	3.0	8	2.00	1.00
8	5.3	1.0	12	3.00	0.60

况,对桥梁进行静动载试验,在测试结构整体变形及关键构件应变的同时,针对下弦杆与弦下斜杆交接面开裂等病害,在裂缝区布置了大量的传感器,监测试验过程裂缝的开展状况。

荷载试验结果表明:① 各静载试验工况下,三角区裂缝开展明显,实测裂缝开展最大值为 0.10 mm,表明裂缝受荷载影响较大,影响结构整体受力性能;② 各静载试验工况下,主桥三角区下弦杆与弦下斜杆交接面处存在明显相对纵向位移,最大值 0.13 mm,表明该处结构损伤严重,连接刚度出现较大削弱,承载力明显下降;③ 卸载后,主桥三角区典型裂缝缝宽未能恢复至加载前状态,相对残余存在大于20%的情况,

表 2 主桥三角区裂缝病害汇总

桥墩号	裂缝类型	左侧三角区				右侧三角区			
		裂缝总数 量/道	最大裂缝 长度/m	裂缝最大 宽度/mm	超限数 量/道	裂缝总数 量/道	最大裂缝 长度/m	裂缝最大 宽度/mm	超限数 量/道
1#	开裂渗水	4	5.3	50.0	2	4	5.3	20.0	3
	斜向裂缝	16	0.8	5.0	4	9	1.0	3.0	7
2#	开裂渗水	4	5.3	10.0	2	4	5.3	3.0	2
	斜向裂缝	19	0.8	1.5	3	24	0.2	3.0	6
3#	开裂渗水	4	5.3	30.0	2	4	5.3	50.0	3
	斜向裂缝	18	1.0	5.0	15	32	0.7	8.0	11
4#	开裂渗水	2	4.2	0.3	1	3	4.2	30.0	1
	斜向裂缝	—	—	—	—	13	0.6	3.0	7

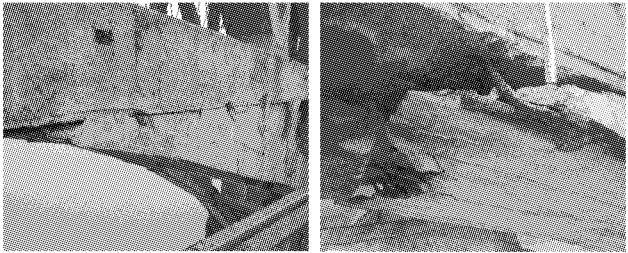


图 2 典型裂缝照片

最大达 50.0%,说明部分裂缝测点处结构已不处于弹性工作状态。

3.2 病害成因分析

综合此次专项检测 results 和历年定期检测报告,结合几年来桥梁的运营状况,分析其病因如下:

(1) 桥上交通日益繁忙,过桥重车明显增多。

根据收集到的该桥周边观测站 1、2、3 的交通量状况,观测站 1 在 2015 年交通量观测量为 10 241 pcu/d,交通量构成中,客货车的比例为 3.31:1(自然数),货车低于客车;观测站 2 在 2015 年交通量观测量为 12 927 pcu/d,交通量构成中,客货车的比例为 1.98

:1(自然数),货车低于客车;观测站 3 在 2015 年交通量观测量为 14 400 pcu/d,交通量构成中,客货车的比例为 0.89:1(自然数),货车高于客车。随着各大工业园区的崛起,货物、商品、人员流通不断增长,该桥上交通日益繁忙,过桥重车明显增多,是导致桥梁病害发展的直接原因。

(2) 混凝土桁架桥结构轻盈,存在整体刚度小的缺陷,随着经济的飞速发展,交通量的逐年增加,该类桥梁易出现病害。

混凝土桁架桥是继双曲拱桥结构之后发展起来的一种新的轻型桥梁,它具有施工简便、质量轻、造价低、外形美观等特点,深受桥梁设计者的青睐,20 世纪 80 年代起,在中国范围内得到推广和应用。随着经济的飞速发展,交通量的逐年增加,该类桥梁整体刚度小的缺陷也渐渐表现出来,桥梁易出现裂缝等病害,影响桥梁的正常运营。

(3) 三角区为弦下斜杆、下弦杆及竖杆的相交点,结构受力较集中,应力分布复杂,在超载情况下容易发生开裂。

根据 2012 年检测报告,三角区已存在裂缝,弦下竖杆、弦下斜杆未见明显的受力裂缝。经过几年的运营,2017 年检测发现 22 号跨 22 号墩处右侧三角区病害较严重,三角区短竖杆出现斜裂缝,结构出现相对错动;其余三角区病害均表现为混凝土开裂,结构并未出现错动迹象,疑为施工时三角区先后浇筑混凝土因龄期差异、收缩徐变等引起的新旧混凝土结合面开裂,在超载作用下,容易造成裂缝进一步扩大。弦下斜杆与下弦杆交接处节点刚度受到严重削弱后,桥梁结构发生内力重分布,导致弦下竖杆出现受力裂缝,弦下竖杆发生破坏性损伤,危及桥梁整体结构安全。

4 加固设计及效果验证

根据检测报告,主桥弦下斜杆与下弦杆交接面普遍存在裂缝,最大缝宽达 5.0 cm。经综合比选,最终确定采用外包混凝土结合外包钢板进行增大截面加固,恢复三角区节点刚度,通过植筋、对拉精轧螺纹钢来增强新旧混凝土结合的方法进行加固。加固示意图见图 3。

选择主桥 3 号跨 3 号墩右桁片弦下斜杆与下弦杆交接处三角区,采用大型通用有限元软件 Ansys 建立实体有限元子模型,用 Solid45 模拟原结构混凝土,用 Link10 模拟原结构预应力钢束和加固精轧螺纹钢,用 Solid65 模拟外包混凝土,用 Shell63 模拟竖杆、斜杆的加固钢板和三角区加固混凝土的侧面外包钢板。在每一分析工况下节点区受力平衡,节点区子结构分析模型总计截断 7 根杆件,从全桥模型中提取竖杆、斜杆、水平弦杆截断处(6 处)的内力(弯矩、剪力、轴力)并施加于子模型,在弦下斜杆截断处施加固定约束。此次计算总计 16 728 个 Solid45 实体单元,830 个 Link10 杆单元,4 056 个 Shell63 壳单元,8 716 个 Solid65 实体单元,总计 29 729 个节点。弦下斜杆与下弦杆交接面存在裂缝,最大缝宽达 5.0 cm,在实施三角区外包混凝土加固前,先用裂缝补强材料进行灌缝补强,结构分析时偏保守地把交接面 5 cm 厚的单元材料弹性模量乘以折减系数 0.01。三角区结构离散见图 4。

4.1 恒载作用下三角区结构分析

恒载作用下外包混凝土应力计算结果见图 5、6。

由图 5、6 可见:

(1) 恒载作用下外包混凝土主拉应力最大值为 4.51 MPa,发生在三角区尾部弦下斜杆与下弦杆交接处倒角处。

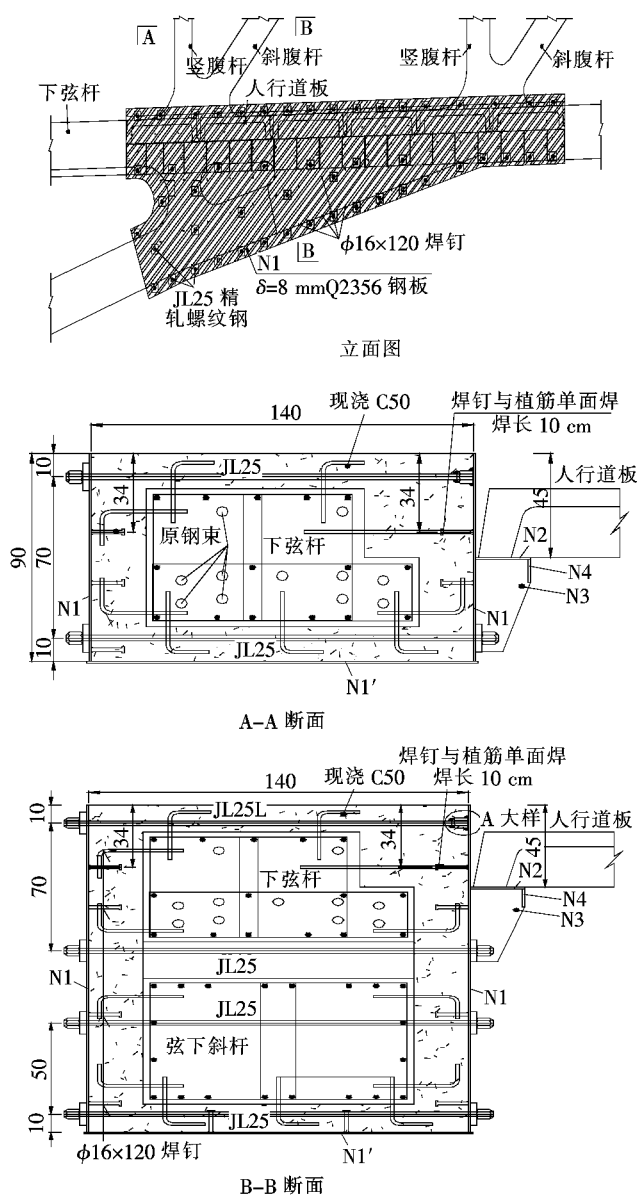


图 3 三角区加固示意图(单位:cm)

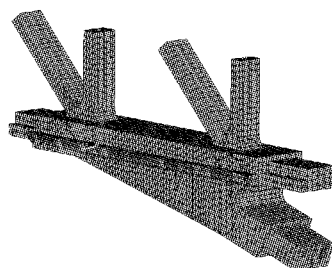


图 4 三角区结构离散图

(2) 恒载作用下外包混凝土主压应力最大值为 -8.48 MPa,发生在三角区后端外包混凝土与弦下斜杆相接处,主压应力最大值小于 C50 轴心抗压强度标准值(-32.4 MPa)。

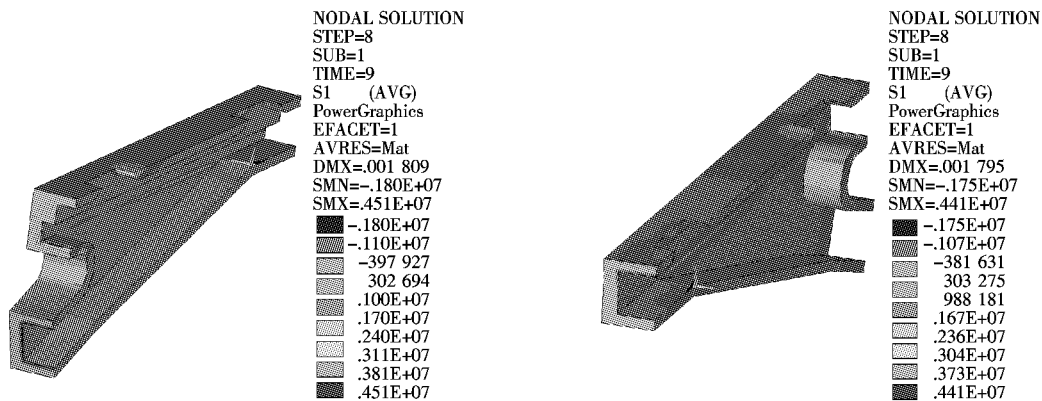


图5 外包混凝土主拉应力(单位:Pa)

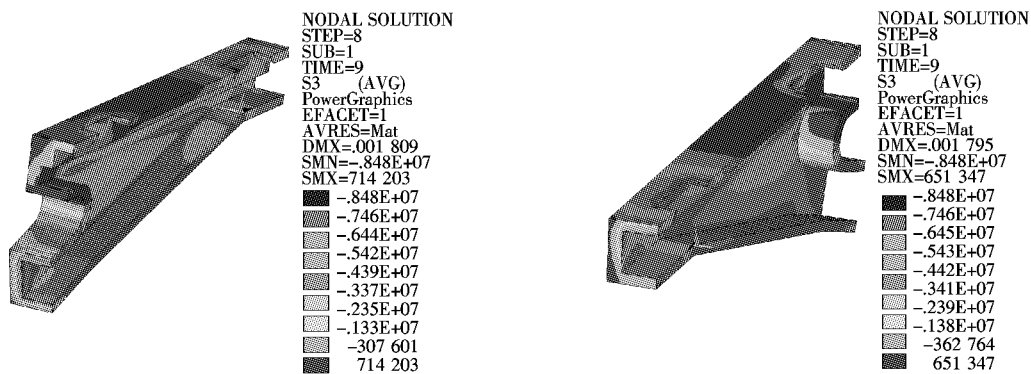


图6 外包混凝土主压应力(单位:Pa)

4.2 恒载与活载标准组合作用下三角区结构分析

当弦下斜杆轴力最大时,弦下斜杆与下弦杆交接面的水平方向分力最大,对外包混凝土受力最不利。对弦下斜杆轴力最大工况进行计算,外包混凝土应力分布见图7、8,加固钢板 Von Mises 应力分布见图9。

由图7~9可见:

(1) 恒载与活载标准组合作用下外包混凝土主拉应力最大值为4.10 MPa,发生在三角区尾部外包混凝土与竖杆相接处。

(2) 恒载与活载标准组合作用下外包混凝土主压应力最大值为-12.6 MPa,发生在三角区后端外包混凝土与弦下斜杆相接处,主压应力最大值小于C50轴心抗压强度标准值(-32.4 MPa)。

(3) 加固钢板 Von Mises 应力最大值为111 MPa,小于Q345B设计强度310 MPa。

下弦杆与弦下斜杆交接处的外包混凝土主拉应力见图10。由图10可见:该处最大主拉应力为3.79 MPa。

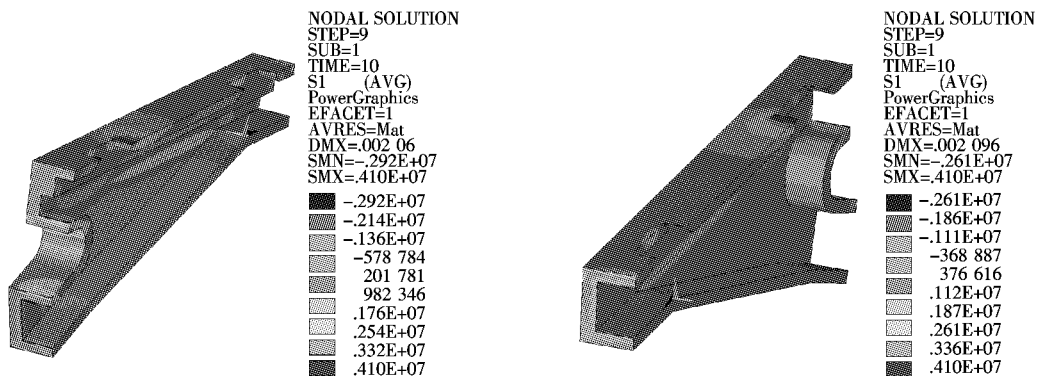


图7 混凝土主拉应力(单位:Pa)

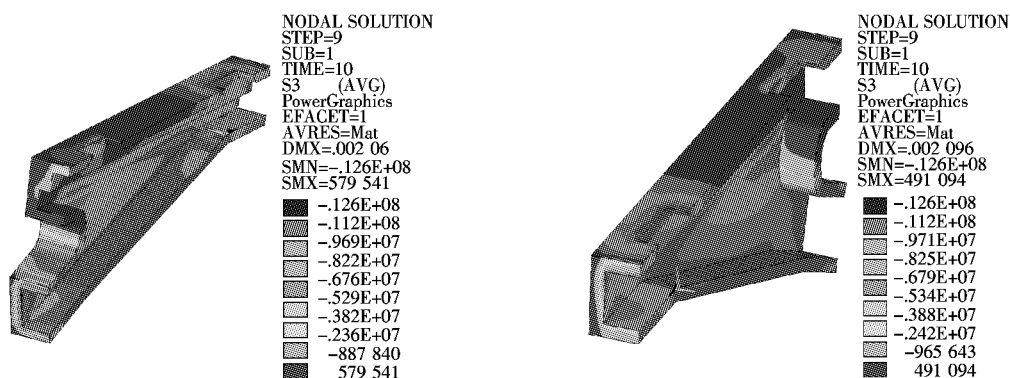


图 8 混凝土主压应力(单位:Pa)

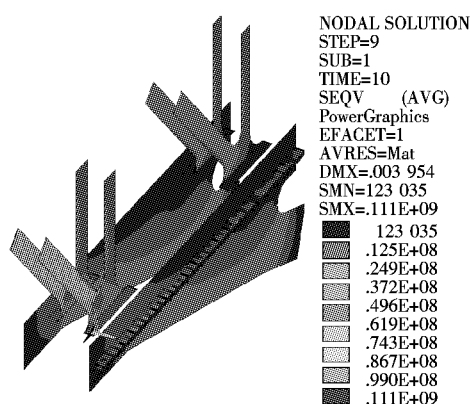


图 9 加固钢板 Von Mises 应力(单位:Pa)

该桥维修加固工作完成后又开展了一次交工验收荷载试验,结合三角区施工时预埋应变传感器数据和外包钢板上粘贴应变传感器数据,与理论计算应变进行比较,可知:三角区内外应变基本协调,各级加载应变值线性变化,实测应变与理论应变的比值为 0.54~0.85 之间,小于 1.0。说明维修加固后外包混凝土和钢板与原结构共同参与受力,三角区强度满足设计要求。

5 结论

(1) 混凝土桁架桥具有施工简便、质量轻、造价

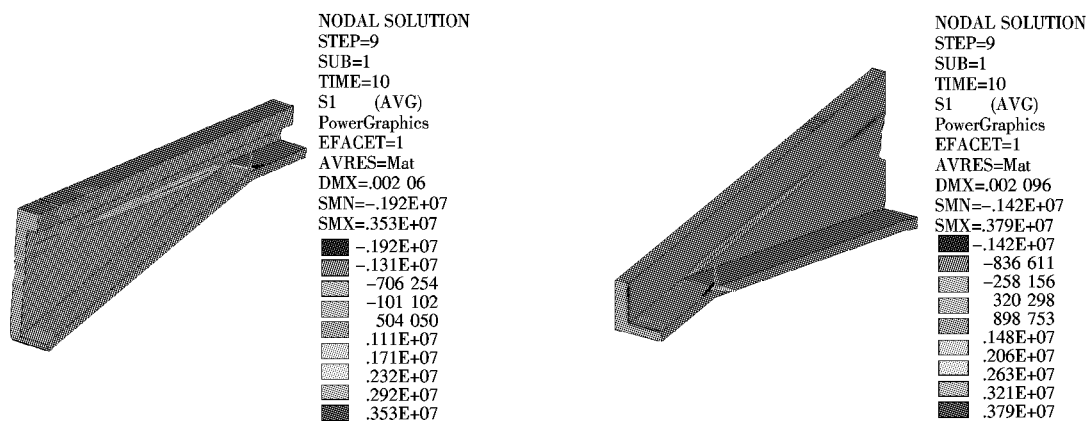


图 10 外包混凝土主拉应力(单位:Pa)

低、外形美观等特点。但随着经济的飞速发展,交通量的逐年增加,该类桥梁整体刚度小的缺陷也渐渐表现出来,桥梁易出现裂缝等病害,影响桥梁的正常运营。该类结构桥梁的养护应更加注重定期检测,重点关注结构受力较集中、应力分布复杂部位的工作状况,做到防微杜渐,以保安全。

(2) 根据裂缝特点及结构分析结果,经综合比选,最终确定采用外包混凝土结合粘贴钢板法对主桥弦下斜杆与下弦杆交接处三角区进行加固。有限元分析结

果表明:加固后三角区应力满足设计要求,成桥荷载试验验证维修加固后外包混凝土和钢板与原结构共同参与受力,三角区强度满足设计要求。

参考文献:

- [1] JTJ 023—85 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] JTJ 021—89 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] JTG/T J22—2008 公路桥梁加固设计规范[S].

钢箱梁斜拉桥索梁锚固区钢锚箱受力性能及结构局部优化研究

吕文舒, 陈星烨, 张祖军

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 大跨径斜拉桥钢箱梁索梁锚固区为空间受力构件, 板件受力相对复杂。该文选取主梁锚固区为分析对象, 建立局部有限元模型, 研究了成桥恒载+最不利活载工况的最大索力作用下主梁锚固区钢锚箱的应力分布规律, 并通过优化钢锚箱抗剪板尺寸, 改善了结构应力分布, 同时降低了应力集中效应, 可为同类型工程提供借鉴。

关键词: 斜拉桥索梁锚固区; 应力分布; 尺寸优化

斜拉桥索梁锚固结构是斜拉桥的重要传力构件之一, 其结构和受力复杂, 承受的集中荷载大, 局部应力集中效应明显, 是斜拉桥设计、施工及现场监控的重点关注对象。因此有必要对索梁锚固区钢锚箱进行局部有限元计算分析, 掌握其受力规律, 对应力较大部位进行局部构件优化, 保证结构受力安全。

1 工程概况

某三跨双塔斜拉桥, 主梁采用钢箱梁与混凝土箱梁相结合的混合梁, 为半漂浮体系, 塔梁固结, 墩梁分离。两桥塔为预应力钢筋混凝土结构, 沿跨中轴线对称布置, 桥面以上主塔全高 75 m。主塔中心轴线顺桥向两侧共 22 m 范围采用预应力混凝土箱梁, 其余部分为闭口钢箱梁, 钢箱梁与混凝土梁段采用钢-混结合段连接。采用扇形单索面布置于桥面中心, 拉索锚固于钢箱梁上, 主梁上索距 12 m, 塔上索距 4 m。

根据该斜拉桥整体有限元计算结果, 其跨中位置梁段斜拉索倾角最小、索力值最大。故取主梁跨中位置索梁锚固区域为分析研究对象, 即 Z12 拉索锚固梁

段 8 m 区域段。锚固区按照实际位置布置, 锚固区板件尺寸按照桥梁实际情况设置, 具体结构见图 1~3。

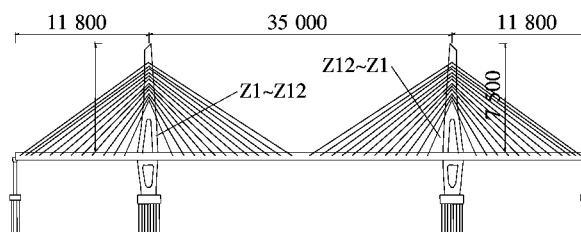


图 1 桥型布置图(单位:cm)

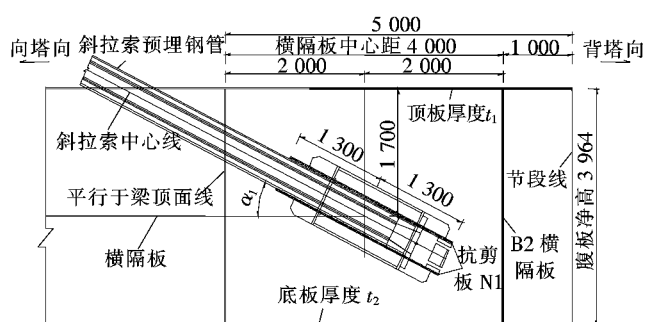


图 2 钢锚箱构造图(单位:mm)

[4] JTG/T J23—2008 公路桥梁加固施工技术规范[S].
[5] 刘龙飞. 双层桥面连续刚桁桥的设计与施工[J]. 公路, 1996(5).
[6] 王新敏. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.

[7] 毛建平, 蒙方成, 覃乐勤, 等. 大跨径 SRC 拱桥拱肋裂缝分析及维修加固方案[J]. 中外公路, 2018(6).
[8] GB/T 714—2000 桥梁用结构钢[S].
[9] JGJ 145—2013 混凝土结构后锚固技术规程[S].

收稿日期:2019—07—10(修改稿)

作者简介:吕文舒,男,博士研究生。