

体外预应力加固技术的设计与施工应用

窦勇芝 张枫林 韦福堂 孙长军

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005)

摘要:以南宁市邕江大桥加固工程为实例,经设计方案比选,采取体外预应力加固措施,并利用有限元分析程序midas进行体外预应力加固设计分析。计算结果和工程实践均表明:该体外预应力加固方法有效地改善了原结构的内力、应力分布,提高了结构各控制截面的承载力,尤其是梁体自由端(挂梁侧)的下挠变形得到改善。因此,其可作为同类体外预应力加固桥梁设计和施工的重要参考。

关键词:体外预应力加固 设计 施工 有限元法

1 引言

体外预应力加固是通过在梁体外增设预应力索,并与被加固的梁体锚固联结,对既有混凝土梁体主动施加预应力,强迫后加的预应力索受力。通过加固从而改变原结构的内力分布,并降低原结构应力水平,使结构承载力显著提高,且可减少结构的变形、使得裂缝宽度缩小甚至完全闭合^[1]。其特点是体外索只在锚块和转向块处与结构相连,体外索完全依靠锚固系统提供预加力^[2-4]。

本文结合邕江大桥的加固工程,根据大桥检测报告结论,对于主要承载力构件,需提高各控制截面的承载能力,以确保结构安全。经设计方案比选,采取体外预应力加固措施,并利用有限元分析程序midas进行体外预应力加固设计分析,通过张拉加固施工实践证明,该体外预应力加固方法有效地改善了原结构的内力、应力分布,提高了结构各控制截面的承载力,可为同类体外预应力加固桥梁的设计和施工提供借鉴。

2 工程概况

广西南宁市邕江大桥是南宁市沟通邕江两岸的一座重要桥梁,邕江大桥为国内最早采用闭口薄壁杆件理论设计的一座悬臂式钢筋混凝土薄壁箱型城市桥梁。桥梁全长394.6m,桥梁全宽24.6m,设计荷载等级为汽-18、拖-80,桥梁结构跨径组成为(45+16)m(单悬臂筒支梁)+23m(挂梁)+(16+55+16)m(双悬臂筒支

梁)+23m(挂梁)+(16+55+16)m(双悬臂筒支梁)+23m(挂梁)+(16+45)m(单悬臂筒支梁)。上部结构为两个独立的单箱三室截面,两个箱梁之间用筒支板支承于箱梁的悬臂上;在墩台处设置刚接的连续横隔梁,其余的横隔梁均为简支,用以支承煤气、水管管道。下部结构北岸为埋置式桥台,南岸为U型桥台。桥墩采用双柱式,支承于分离式沉井基础上。1号墩和4~6号墩为筑岛及就地预制沉井基础,2号墩、3号墩因施工水位深达11m,采用预制双层薄壁钢筋混凝土浮运沉井。

邕江大桥于1964年7月正式通车。经过近45年的正常运营后,2007年经检测确定该桥存在不同程度影响安全运营和正常使用的病害,其中该桥支点负弯矩区箱梁顶板出现大量横桥向裂缝,且大部分裂缝已贯通箱梁顶板,并向两侧腹板延伸,裂缝宽度大多在0.1~0.5mm间,个别裂缝宽度达到1.0mm,远超出《城市桥梁养护技术规范》CJJ99-2003第5.4.2条要求,裂缝宽度、数量较1998年的检测结果增加较多。故针对箱梁支点负弯矩区的承载力严重不足,考虑按照汽-15、挂-80、人群3.5kN/m²的设计标准进行加固。

根据检测报告结果,箱梁抗弯承载力加固初步设计有两个方案:

方案一为采用体外预应力主动加固措施。主要考虑到单悬臂筒支梁部分,其箱梁原截面经计算为超筋截面,且承载能力不能满足受力要求,

由此认为原结构截面尺寸偏小,不宜通过粘贴钢板和粘贴碳纤维布的办法进行加固处理,只能通过增加体外预应力钢束或增加受压截面尺寸的方法进行加固处理。考虑到增加顶、底板厚度非常困难且难于实施,故此处推荐通过施加体外预应力的方案进行加固处理。

方案二为采用粘贴钢板和粘贴碳纤维板的被动加固措施。对于双悬臂筒支梁部分,此处通过在支点粘贴钢板和跨中底板粘贴碳纤维板对原结构进行补强加固。

经过方案比选,认为体外预应力加固方案由于仅需在原结构上增加齿板与转向块,对原结构扰动较小,且整个施工过程均可在箱梁内部完成,施工操作起来相对简单;而粘贴钢板方案由于需清除原结构支点处桥面铺装,且需要在原结构顶板设置较多的锚栓孔,对原结构扰动相对较大,且整个施工过程均在箱外进行,尤其是跨中底板粘贴碳纤维板更是需要搭设支架或吊架方可完成,施工操作起来相对较为困难。另外,从经济费用比较,对于建安费方案一比方案二节省约39.3%。

故选用体外预应力进行箱梁抗弯承载力加固。箱梁内设置体外预应力钢束,两端分别锚固于箱梁的梁端。沿桥梁横断面方向共设置6根 $\phi 9@15.2\text{mm}$ 的体外预应力钢束,每个内腹板对应2束,外腹板对应1束(置于箱内)。其中,双悬臂筒支梁在箱梁L/4跨位置通过三个转向块分两批进行下弯,下弯角度分别为 13° 和 9° ,三个转向块一次设置于距中支点第一个横隔板至第三个横隔板位置,如图1所示;单悬臂筒支梁中支点方向在箱梁L/4跨位置通过三个转向块分两批进行下弯,下弯角度分别为 14° 和 11° ,三个转向块一次设置于距中支点第一个横隔板至第三个横隔板位置,在端支点方向的第一道横隔板和第二道横隔板处分两批下弯,下弯角度分别为 7° 和 8° ,如图2所示。

锚固结构采用C50自密实预拌混凝土,体外预应力索单孔采用柳州欧维姆机械股份有限公司生产的 $\phi 9@15.24\text{mm}$ 带PE护套的环氧涂层钢绞线,锚具采用OVMTS15-9型体外预应力专用锚具,千斤顶采用配套YDCS5500悬浮张拉千斤顶。锚垫板的尺寸为 $240\text{mm} \times 240\text{mm} \times 290\text{mm}$,体外

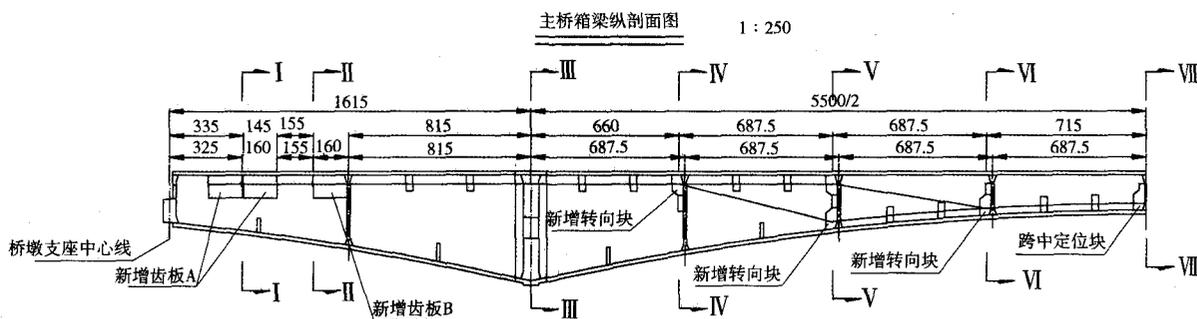


图1 双悬臂筒支箱梁体外束布置立面示意图

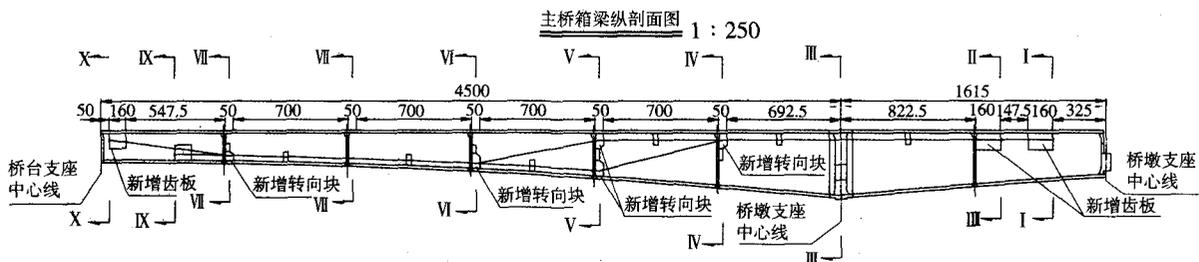


图2 单悬臂筒支箱梁体外束布置立面示意图

索锚下控制应力为 $0.6 \times 1860\text{MPa}$ ，弹性模量取 195GPa 。

3 体外预应力加固设计

3.1 计算分析原则

因本桥为运营多年的旧桥，且桥梁结构本身存在诸多缺陷。因此，为了确保计算结果合理，且具有足够的可靠度，计算分析按下述原则进行：

(1) 根据中华人民共和国交通部部颁标准《公路旧桥承载能力鉴定方法》(1998年)，并参照中华人民共和国行业标准《公路桥梁承载能力检测评定规程(报批稿)》，计算分析时考虑活载影响修正系数、钢筋截面折减系数、混凝土截面折减系数、承载能力恶化系数和承载能力检算系数等主要计算参数，具体如表1所示。

表1 计算分析主要调整系数一览表

项目	箱梁跨中	箱梁支点	箱梁腹板
活载影响修正系数 ξ_q	1	1	1
混凝土截面折减系数 ξ_c	1	1	0.9
钢筋截面折减系数 ξ_s	1	1	1
承载能力恶化系数 ξ_d	0.02	0.02	0.02
承载能力检算系数 Z_1	0.95	0.92	0.9

表2 邕江大桥加固计算主要参数

构件材料	构件材料对应的材料特性		
	弹性模量 (MPa)	材料容重 (kN/m^3)	线膨胀系数 ($\times 10^{-5}$)
50号混凝土	3.5×10^4	26.00	1.0
预应力钢束	1.9×10^5	76.98	1.2
钢材	2.06×10^5	76.98	1.2

3.3 计算程序及计算模型

采用有限元计算程序midas对邕江大桥进行计算分析，考虑到该桥分为双悬臂、单悬臂和挂梁三种结构，故分别对双悬臂简支梁和单悬臂简支梁按空间梁单元模拟(如图3和图4所示)。同时，为了保证加固设计的合理性，确保桥梁结构在体外预应力施加后齿板及转向块部位的局部受力安全，通过建立局部实体单元模型对锚固齿板及转向块进行了局部分析^[5]。

(2) 为了使设计荷载与相应的设计方法对应，此处均按桥规《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021-89)及《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023-85)对桥梁结构进行计算分析。

3.2 主要计算参数及荷载组合

计算分析中，根据各材料的不同，各主要计算参数如表2。

计算分析主要按如下两种荷载组合对箱梁支点、跨中、反弯点的内力、承载能力及加固后的结构应力情况进行了计算，具体荷载组合方式如下：

荷载组合 I：恒载+预应力荷载+汽车-15级+人群荷载

荷载组合 II：恒载+预应力荷载+挂车-80



图3 单悬臂箱梁计算模型



图4 双悬臂箱梁计算模型

3.4 主要计算结果

由于篇幅有限, 如下仅列出部分计算结果。

(1) 承载能力极限状态

此处对单悬臂梁、双悬臂梁的支点截面和跨中截面分别进行了抗弯极限承载能力验算, 同时对支点截面和L/4截面进行了抗剪极限承载能力验算, 具体计算结果如表3所示。

由表3计算结果可知, 加固后桥梁结构的内力有所改善, 桥梁结构的整体安全储备得到很大提高。

(2) 齿板及转向块局部分析结果

转向块在“径向力”的作用下, 转向块与原有结构连接位置剪应力在1.1MPa~2.6MPa之间, 转向块自身的最大剪应力分布0.7MPa~2.3MPa, 均小于规范限值, 说明体外索对转向块所作用的径向力, 对转向块与原有结构连接位置的影响较小, 通过种植钢筋等措施可以使之满足受力要求。

由计算分析可知, 新增齿板处新旧结构连接位置的最大剪切应力数值范围为1.6MPa~3.1MPa, 设计中通过设置种植钢筋和剪力槽等构造措施, 可以保证结构的局部受力安全。

表3 抗弯极限承载能力验算结果

项目	加固前弯矩Mj (kN.m)	加固前结构抗力Mu (kN.m)	加固前 Mu/Mj	加固后弯矩Mj (kN.m)	加固后结构抗力Mu (kN.m)	加固后 Mu/Mj		
双 悬 臂 部 分	支 组合 I	-100738.6	103429.7	1.03	-81014.2	103429.7	1.28	
	点 组合 II	-92268.8	103429.7	1.12	-73829.9	103429.7	1.40	
	跨 中	组合 I	38663.0	30429.2	0.79	35484.7	37158.6	1.05
		组合 II	-4398.4	9056.0	2.06	-8005.6	9056.0	1.13
		组合 I	30819.1	30429.2	0.99	27764.1	37158.6	1.34
		组合 II	5438.4	30429.2	/	2131.8	37158.6	/
单 悬 臂 部 分	支 组合 I	-94028.6	80421.6	0.86	-78844.7	80421.6	1.02	
	点 组合 II	-86843.7	80421.6	0.93	-73540.2	76911.4	1.05	
	跨 中	组合 I	39565.8	35086.7	0.89	33257.0	35086.7	1.06
		组合 II	36191.7	35086.7	0.97	29809.0	35086.7	1.18

4 体外预应力张拉施工方案与实施

4.1 体外预应力张拉施工方案

由于该体外预应力加固的锚固结构直接锚固在箱梁截面的顶板、腹板上, 原施工方案为: ①在箱梁顶板、腹板上钻孔植筋; ②锚垫板、预埋管定位安装; ③绑扎钢筋; ④安装模板; ⑤浇筑混凝土; ⑥混凝土养护, 拆模; ⑦穿体外索; ⑧张拉体外索。经过现场检测, 原结构混凝土表层均存在不同程度的碳化, 混凝土强度不足; 同时, 考虑到为改善锚固结构与箱梁顶板连接处的局部应力分布, 保证锚固结构与箱梁截面的可靠连接以及便于施工和安全操作, 对原施工方案进行了如下改进^[5]: ①对锚固结构相应于箱梁顶板范围混凝土进行开“天窗”处理, 即将原顶板混

凝土凿除, 露出所有钢筋骨架; ②腹板上钻孔植筋; ③安装槽钢、螺纹钢, 通过压力灌胶法, 保证槽钢与原结构混凝土可靠粘结, 同时螺纹钢分别与槽钢、钢筋骨架可靠焊接; ④锚垫板、预埋管定位安装; ⑤绑扎钢筋, 对于顶板上钢筋须与原结构受力主筋可靠焊接。其余工序⑥~⑩同原施工方案④~⑧。

体外预应力体系张拉质量控制要点如下:

(1) 体外束钢绞线及锚具进场后, 应分批严格检验和验收, 按有关规定对每批钢绞线抽检强度、弹性模量、截面积、伸长值和硬度, 不合格产品严禁使用。

(2) 所有预应力管道以及预埋管安装的位置必须按照图纸准确定位, 严禁人踩踏和挤压体

外束钢绞线,防止体外束PE保护套破裂。

(3) 所有预应力钢束的张拉要求采用张拉吨位与伸长值双控,以伸长值为主,实际伸长值与理论伸长值的差值应控制在6%以内,否则应停工检查,分析原因并处理完成后方可继续张拉。

(4) 钢束张拉时,应尽量避免滑丝、断丝现象,当出现滑丝、断丝时,其滑丝、断丝总数量不得大于该断面总数的1%,每一钢束的滑丝、断丝数量不得多于一根,否则应换束重新张拉。

(5) 在整个施工过程中必须严格按照纵向对称、同步、均衡的原则进行各项目的施工。

4.2 体外预应力张拉实施与监控

在体外预应力索张拉过程中,严格按7级分级张拉,并进行施工监控,对原结构的关键截面、

部位布置测点进行监测。对于4个单悬臂筒支箱梁部分和4个双悬臂筒支箱梁部分,张拉过程中各桥墩控制截面最大压应力和最大拉应力值如表4。

由表4可知,张拉过程中控制截面最大压应力和最大拉应力值均在应力正常范围之内,满足规范要求。另外,对于锚固结构进行了重点监测。测点主要布置在近锚固端顶板连接处和自由底面,经监测测点横向最大拉应力为0.306MPa^[6],在规范允许范围之内。在整个施工分级张拉过程中,严密观察锚固结构等各关键部位,经现场检查,在张拉过程中均未出现影响结构安全的混凝土裂缝,表明新增锚固结构与原有箱梁截面连接可靠,有效地通过锚固结构将体外预加力施加到原梁体构件上,各项应力值均满足规范限值要求^[7]。

表4 张拉过程中桥墩各控制截面应力值^[6](单位:MPa)

箱梁编号	最大压应力	最大拉应力
上游幅1#-8#箱室的单悬臂部分	-2.193	0.026
上游幅15#-26#箱室的双悬臂部分	-1.457	0.551
上游幅33#-44#箱室的双悬臂部分	-1.993	0.485
上游幅51#-58#箱室的单悬臂部分	-1.615	0.332
下游幅1#-8#箱室的单悬臂部分	-1.59	0.38
下游幅15#-26#箱室的双悬臂部分	-1.689	0.255
下游幅33#-44#箱室的双悬臂部分	-1.65	0.459
下游幅51#-58#箱室的单悬臂部分	-1.25	0.196

5 结语

通过对邕江大桥单悬臂筒支箱梁和双悬臂筒支箱梁分别施加体外预应力,经工程实践证明,有效地提高了支点负弯矩区的承载力,改善了原结构的应力分布,特别是梁体自由端(挂梁侧)的下挠变形得到改善。另外,对于体外预应力加固桥梁的锚固结构设置,应视旧桥构件部位、既有混凝土状况以及施工操作难易,合理选择锚固结构型式,并进行必要的锚固结构设计计算,采取有效地构造措施,从而保证锚固结构在整个体外预应力加固体系中安全、可靠地使用。

参考文献

- [1] 谌润水,胡钊芳,帅长斌.公路旧桥加固技术与实例[M].北京:人民交通出版社,2002.93-96.
- [2] 徐栋.节段施工体外预应力桥梁的极限强度分析[D].上海:同济大学,1999.
- [3] 王宗林.体外预应力混凝土桥梁极限分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001.
- [4] 杨美良,李传习,张建任,卢春玲.体外预应力桥梁锚固结构的受力性能与配筋研究[J].工程力学,2008,25(6):159-164.
- [5] 窦勇芝,汪孝龙.体外预应力加固桥梁锚固结构的细部分析[J].预应力技术,2010,(3):8-13.
- [6] 广西大学设计研究院.南宁市邕江大桥体外预应力张拉试验阶段报告[R].广西:2009.
- [7] JTJ D62-2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].2004.