

文章编号: 1006 - 2106(2012) 04 - 0058 - 08

1 - 80 m 混凝土系杆拱有限元分析研究^{*}

艾宗良^{**} 赵长明 鄢 勇 袁 蔚

(中铁二院工程集团有限责任公司 , 成都 610031)

摘要: 研究目的: 贵广铁路黄沙河桥采用 1 - 80 m 预应力混凝土系杆拱桥, 系国内最大跨度的预应力混凝土系杆拱桥(混凝土拱肋), 其箱宽较宽, 采用单向多室结构。有效宽度、边中腹板厚度比例等均没有规范依据可查, 横向环框简化计算模型没有相关的依据。本文利用 midas FEA 软件对 80m 系杆拱桥进行实体计算分析, 确保结构安全, 并对结构尺寸、钢束布置等进行一些探讨。

研究结论: 梁部的混凝土应力处于合理的水平, 结构安全可靠; 拱脚位置梁体正应力横向分布不均匀, 远离拱脚的梁体截面正应力分布较为均匀; 多腹板以及密横隔板形成的纵横向隔板体系增强了梁部结构整体性, 箱梁横向位移差最大值仅仅为 0.51 mm; 设置拱脚竖向预应力能够有效减少拱脚与梁体交界面混凝土的主拉应力, 增强交接面的抗剪能力, 是必须的。

关键词: 系杆拱; 有限元; 应力; 环框

中图分类号: U448.36 **文献标识码:** A

Finite Element Analysis and Research of 1 - 80 m Prestressed Concrete Tied Arch Bridge

AI Zong - liang , ZHAO Chang - ming , YAN Yong , YUAN Wei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd , Chengdu , Sichuan 610031 , China)

Abstract: Research purposes: 1 - 80 m prestressed concrete tied arch was used in yellow sand river bridge of guiyang - guangzhou railway , which is the largest prestressed concrete tied arch span(concrete arch) in china , with wide single box and three grid. There is no Clearly defined of The Effective width and thickness ratio of side and middle web , the same as Simplified model for horizontal ring box. According to 80m tied arch bridge's 3D finite element analysis by the midas FEA software was done for structural safty , and also for the disscusion of the structure's size and prestressing layout.

Research conclusions: The concrete stress of the bridge is at a reasonable level , the structure is safe and reliable; The distribution of the beam normal stress is non - uniform , beam stress distribution in section away from the arch foot is more uniform; The vertical and horizontal diaphragm separator system , which was made by the multiple webs and multi - diaphragm plates , can make a strong overall performance of the bridge structure of the Department , the maximum Transverse displacement difference is only 0.51mm; It is necessary to set vertical prestressed tendons for the foot of the arch which can reduce the interface with the concrete beam principal tensile stress effectively , and enhance the interface shear strength.

Key words: tied arch; FEM; steess; ring box

^{*} 收稿日期: 2011 - 12 - 25

^{**} 作者简介: 艾宗良, 1980 年出生, 工程师, 一级注册结构工程师。

1 工程概况

贵广铁路黄沙河中桥采用 1-80 m 双线系杆拱, 跨越黄沙河, 采满堂支架法施工。本桥上部结构设计为 1-80 m 预应力混凝土梁系杆拱, 全长 84 m, 拱肋理论矢高 16 m, 矢跨比为 1/5, 拱轴线为二次抛物线 ($y = x^2/100$), 系杆与两片拱肋的抗弯刚度比为 6.7:1。

梁部横向为单箱三室, 跨中梁高 2.8 m, 梁端部加高至 3.3 m, 跨中梁宽 14.4 m, 梁端加宽至 15.4 m。

箱梁顶板厚 35 cm, 底板厚为 35 cm, 中腹板厚度为 35 cm, 边腹板厚度为 65 cm, 在梁端部加厚。吊杆间距 6.0 m, 在吊杆处设 50 cm 厚横隔板, 在箱梁端部设 7.0 m 厚度的端横梁。

拱肋为钢筋混凝土构件, 工字形截面, 高 2.3 m, 拱肋翼板宽 1.2 m。

两拱肋之间设三根钢筋混凝土横撑与拱肋连接。横撑为工字形截面, 高 1.9 m, 翼板宽 0.8 m。

桥梁结构概况如图 1 所示。

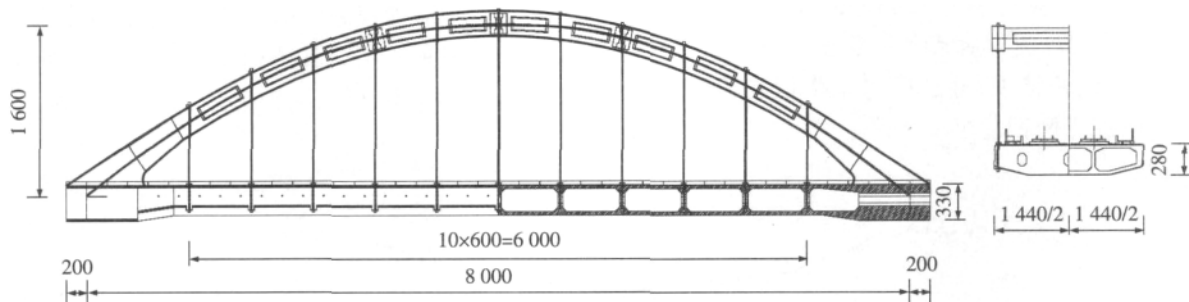


图1 桥梁结构示意图(单位: cm)

吊杆采用柔性钢绞线吊杆, 采用 GJ 15—22 新型环氧喷涂整体挤压成束钢绞线, 由 22 根 7—15.2 环氧喷涂钢绞线组成。

梁部纵向预应力束采用 12—15.2 钢绞线, 塑料波纹管成孔, 内径为 85 mm, 外径为 98 mm。预应力束布置在顶、底板内, 其中顶板通长束 22 束, 顶板支点位置短束 20 束, 底板通长束 46 束, 腹板通长束 16 束。

梁部横向预应力束采用 4—15.2 钢绞线, 在横隔板底板处以及梁端顶、底板位置布置。

拱趾处设竖向预应力筋, 采用预应力混凝土结构用 PSB830 级 $\phi 32$ 高强精轧螺纹粗钢筋。

梁体、拱肋以及横撑均采用 C55 高性能混凝土。

由于地形地貌的控制以及运输条件的限制, 黄沙河双线中桥采用了混凝土拱肋(便于施工)。该桥系国内最大跨度的预应力混凝土系杆拱桥(混凝土拱肋), 其箱宽较宽, 采用单向多室结构。有效宽度、边中腹板厚度比例等均没有规范依据可查, 横向环框简化计算模型没有相关的依据。采用 midas FEA 软件对 80 m 系杆拱桥进行实体计算分析, 得到全桥空间有限元分析结果, 以此确保结构安全。同时根据有限元分析结果对相关问题进行探讨。

2 模型以及荷载

采用 midas/FEA 土木工程分析专用软件进行建模分析; 根据 midas/FEA 特点, 结构除吊杆及横隔板外均采用四节点四面体单元, 横隔板采用四节点板单

元, 吊杆采用杆单元。预应力采用 midas/FEA 特有的植入式钢筋单元, 程序自动考虑钢筋与结构耦合问题。全桥共 840 148 个单元、355 937 个节点, 单元尺寸控制在 0.25 m 范围内。图 2 为整体有限元模型, 图 3 为纵、横、竖向预应力钢束的布置情况。

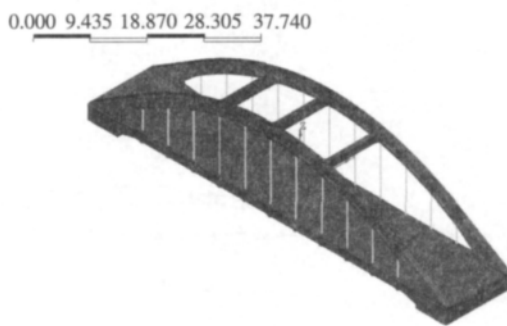


图2 整体有限元模型

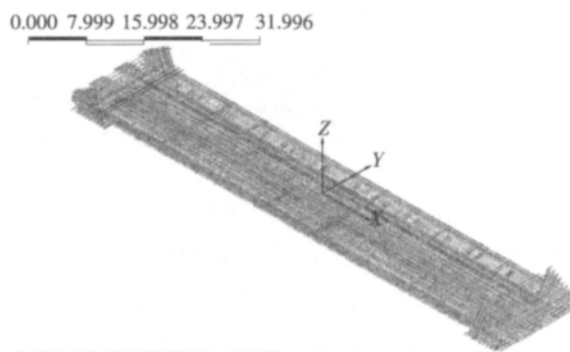


图3 纵、横、竖向预应力钢束的布置情况

计算荷载包括自重、二期恒载、预应力作用、整体升温以及沿梁高方向的温度梯度等,活载为 ZK 活载。

混凝土容重: 26.5 kN/m^3 。

桥上二期恒载: 125 kN/m (按照面荷载施加)。

系统升温降温按照 20°C 考虑。

沿梁高方向的温度梯度为 10°C 。

拱肋与箱梁温差 10°C 。

吊杆与箱梁温差 10°C 。

为了简便,对于对比分析,选择恒载(不计预应力)、恒载(计预应力)两种荷载组合考虑。

对于最终的计算结果,分别按照铁路相关规范的主力、主力加附加力两种情况来考虑。

同时定义图 4 位置的截面编号分别为 $1^\# \sim 10^\#$ 截面。

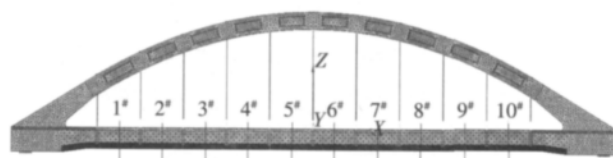


图 4 截面编号

3 正应力横向分布

将不同的截面顶底面横向位置点正应力提取形成图如图 5 ~ 图 8 所示。其中横轴为横向位置控制点,横轴 0 点为梁体中心线,纵轴为正应力(以拉为正)。

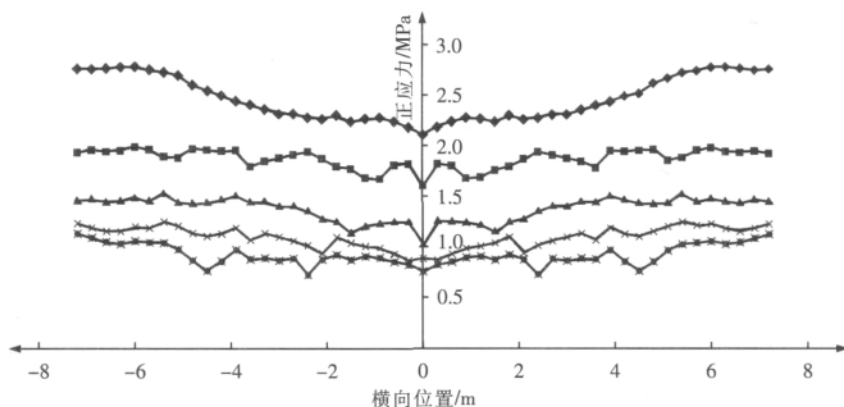


图 5 恒载(不包含预应力)作用下主梁顶板顶缘正截面应力分布图

注: \blacklozenge $1^\#$ 截面; \blacksquare $2^\#$ 截面; \blacktriangle $3^\#$ 截面; \times $4^\#$ 截面; \blacksquare $5^\#$ 截面

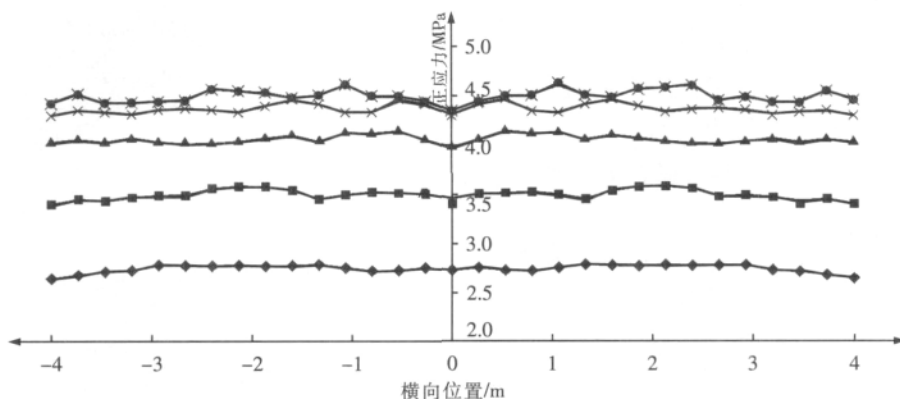


图 6 恒载(不包含预应力)作用下主梁底板底缘正截面应力分布图

注: \blacklozenge $1^\#$ 截面; \blacksquare $2^\#$ 截面; \blacktriangle $3^\#$ 截面; \times $4^\#$ 截面; \blacksquare $5^\#$ 截面

在恒载(不施加预应力)作用时,主梁除了受到一定程度的弯曲作用(绝大部分荷载被吊杆平衡传递至拱肋),系梁处于拉弯状态,且以拉为主。主梁的正截面应力(拉应力)在 $1.0 \sim 5.0 \text{ MPa}$ 之间,其中跨中截面顶板拉应力较小(正弯矩),靠近支点截面顶板拉应力较大(负弯矩)。

受拱肋推力传递的影响,越靠近拱肋截面主梁外侧拉应力越大;越靠近跨中,差异越小。底板相对于顶板来说,拱脚推力对其影响较小,应力横向分布相差不大。施加预应力后,主力除了弯曲作用外,预应力克服了拱脚的推力,并进一步施加在系梁截面上。系梁处于压弯状态。主梁正截面应力(正应力)在 $-9.5 \sim$

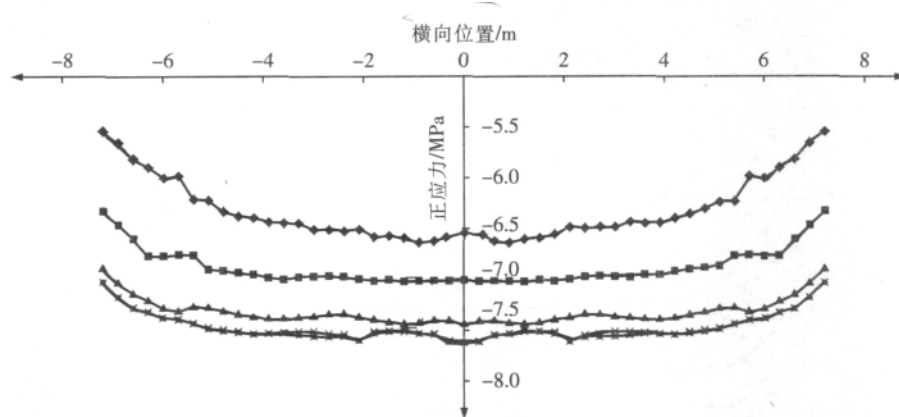


图7 恒载(包含预应力)作用下主梁顶板顶缘正截面应力分布图

注: ◆1#截面; ■2#截面; ▲3#截面; ×4#截面; *5#截面

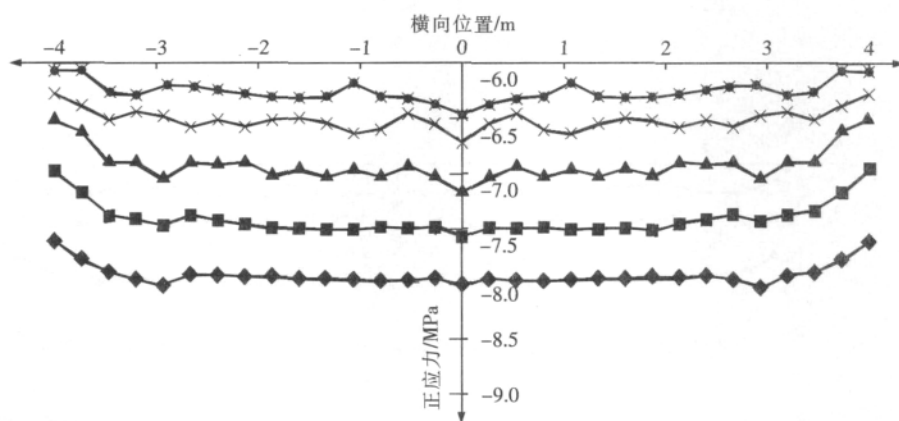


图8 恒载(包含预应力)作用下主梁底板底缘正截面应力分布图

注: ◆1#截面; ■2#截面; ▲3#截面; ×4#截面; *5#截面

-3 MPa之间。由于跨中受正弯、支点受负弯,跨中顶板截面压应力较大,支点附近顶板截面压应力相对较小,跨中底板截面压应力较小,支点位置底板截面压应力较大。主梁正截面应力(正应力)在-9.5~-3 MPa之间。

预应力的布置空间使得中腹板附近预应力钢束数量较多,同时拱脚推力直接传递至边腹板位置后方逐步传递至整个系梁截面。在恒载(计预应力)作用下主梁外侧压应力明显小于中间位置,应力幅值差在1.0~0.5 MPa之间,越靠近拱脚,差值越大。

在主力加附加力作用下,主梁顶板顶缘和底板底缘正应力分布如图9、图10所示,主梁正截面应力在-13.8~-1.23 MPa范围内;越靠近跨中,顶面压应力值越大,底面压应力值越小;主梁顶面外侧压应力值小于内侧压应力值,越靠近支点边中正应力差距越大;箱梁中腹板之间的区域,曲线接近于水平直线。底板底面正应力分布较为均匀。

4 主拉应力横向分布

为了简便,列出1#截面和5#截面的主应力主力作用(恒载+双线列车活载)下的应力分布,如图11、图12所示。

在恒载+双线列车活载作用下,1#截面主梁边腹板外侧主拉应力为0.79 MPa,边腹板内侧及中腹板处在0.15 MPa左右;5#截面主梁边腹板外侧主拉应力为0.71 MPa,边腹板内侧及中腹板处在0.09 MPa左右。由此可以看出,在主力组合(恒载+双线列车活载)作用下,主梁边、中腹板主拉应力差别不大,且都满足规范要求;腹板主拉应力随着远离拱脚的方向有减小趋势,但是总体差别不大。

5 竖向位移横向分布

将有限元计算模型当中的1#、3#、5#截面提取出来进行横向位移比较,分别列出恒载状态以及主力组合

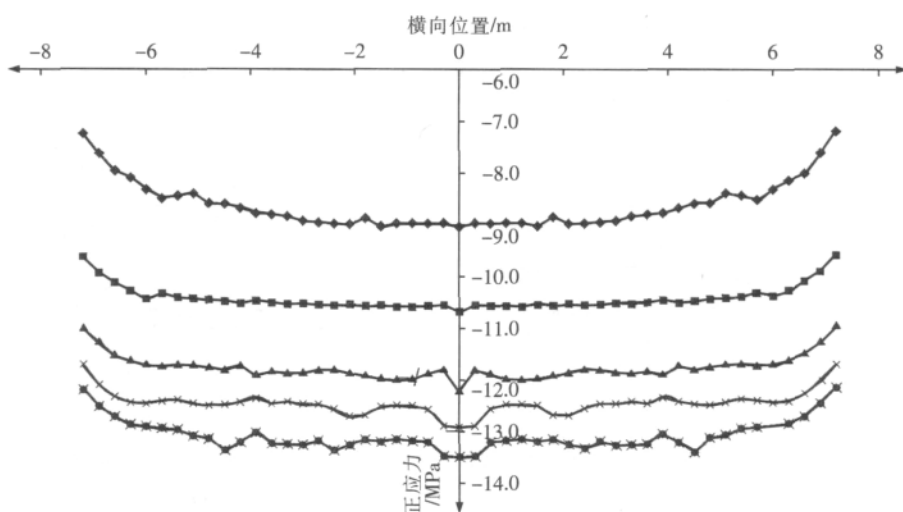


图9 主力加附加力作用下主梁顶板顶缘正应力分布曲线

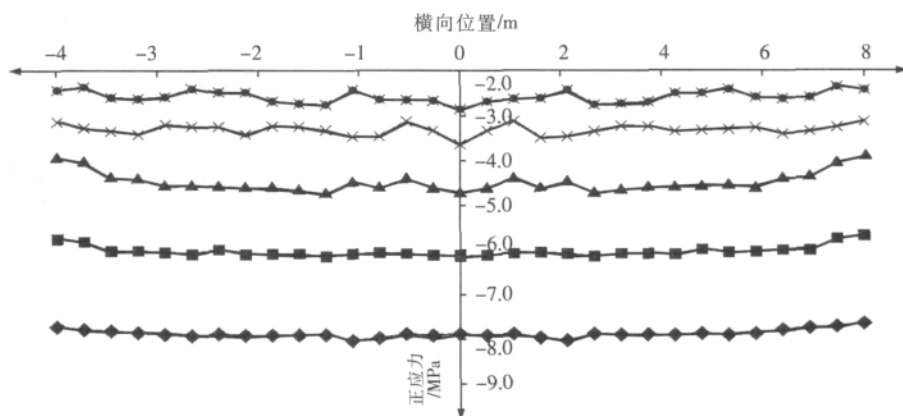
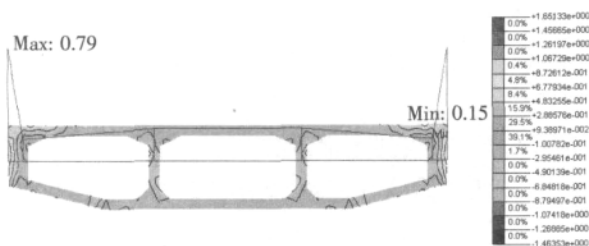
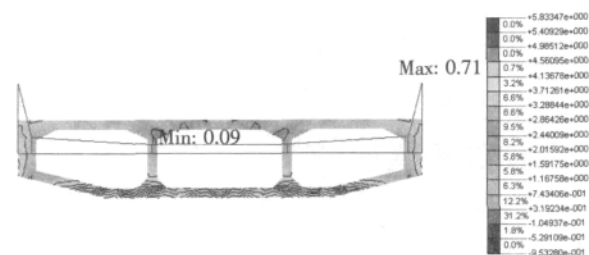
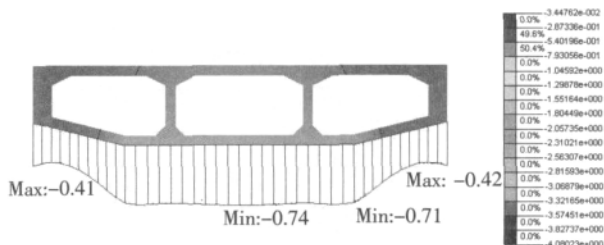
注: ◆1[#]截面; ■2[#]截面; ▲3[#]截面; ×4[#]截面; ✱5[#]截面

图10 主力加附加力作用下主梁底板底缘沿正应力分布曲线

注: ◆1[#]截面; ■2[#]截面; ▲3[#]截面; ×4[#]截面; ✱5[#]截面图11 1[#]截面主梁第一主应力云图(主拉)图12 5[#]截面主梁第一主应力云图(主拉)

工况下横向位移进行相应的比较,如图13~图18所示。

图13 恒载作用下1[#]截面主梁底板竖向位移

由上分析可知,在恒载以及主力组合(恒载+双线列车活载)作用下,梁体竖向位移沿纵向逐渐增大,跨中竖向位移最大,其数值与平面计算结果相差在3%以内;沿梁体横截面方向,中腹板处竖向位移大于边腹板处,其差值最大发生在1[#]截面,为0.51 mm。

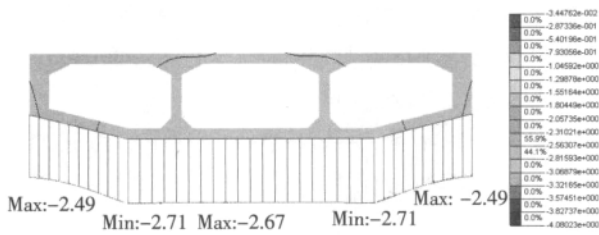


图 14 恒载作用下 3#截面主梁底板竖向位移

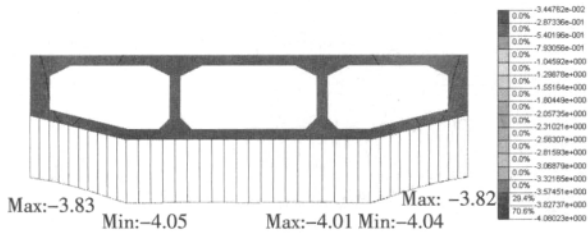


图 15 恒载作用下 5#截面主梁底板竖向位移

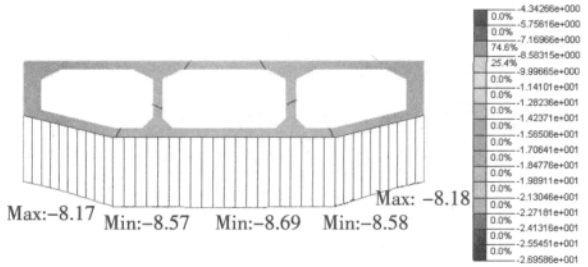


图 16 主力组合作用下 1#截面主梁底板竖向位移

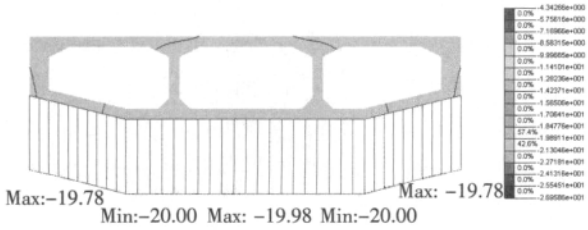


图 17 主力组合作用下 3#截面主梁底板竖向位移

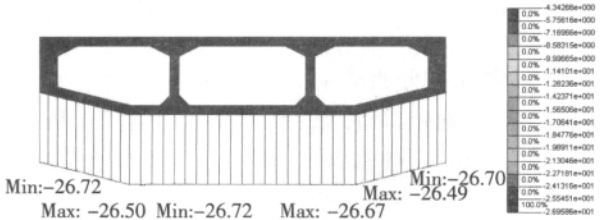


图 18 主力组合作用下 5#截面主梁底板竖向位移

6 整体分析结果

整体计算应力分析结果按照主力加附加力的工况

考虑。分别提取第一、第二、第三主应力,如图 19~图 21 所示。

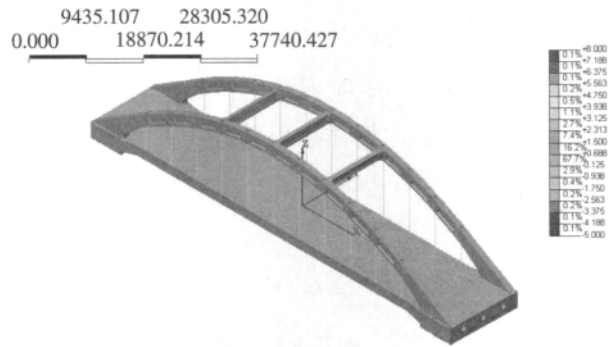


图 19 主 + 附组合第一主应力云图

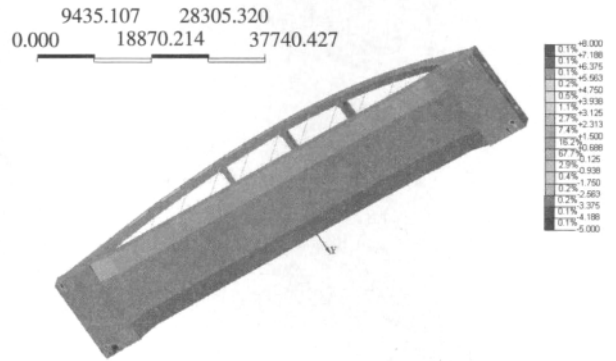


图 20 主 + 附组合第二主应力云图

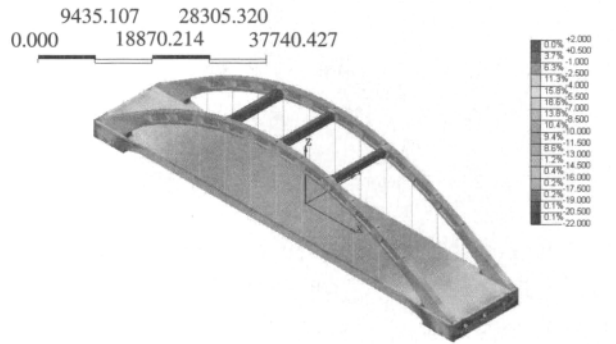


图 21 主 + 附组合第三主应力云图

结果表明,在主 + 附组合作用下,全桥主拉应力主要集中在 0~3.30 MPa 范围内,主压应力主要集中在 -14.5~-0.5 MPa 范围内。

支座处、吊杆端部、拱脚及拱脚与梁结合部位均有一定程度的应力集中,但是应力集中的范围均较小,可适当加强相应区域的配筋。

在主梁端部,由于预应力钢筋均锚固于箱梁外圈,主拉应力较大,在端部非预应力锚固区应加强配筋。全桥总体应力情况良好。

梁体绝大部分主拉应力在 1.0 MPa 以内,主压应力在 13 MPa 以内。整个结构应力情况良好。

7 拱脚分析结果

箱梁与拱肋通过拱脚与梁体向连接,拱脚属于传力复杂的区域,拱脚与梁体交界面的应力分布一般来说较为不均匀,故提取拱脚计算结果,以便设计参考,如图 22、图 23 所示。

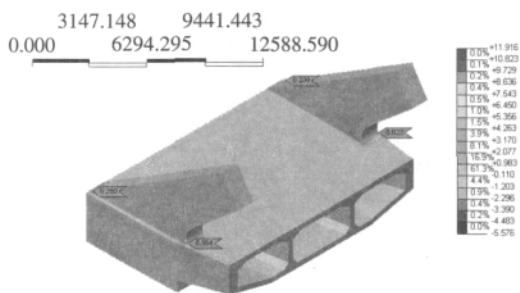


图 22 主 + 附组合拱脚第一主应力云图

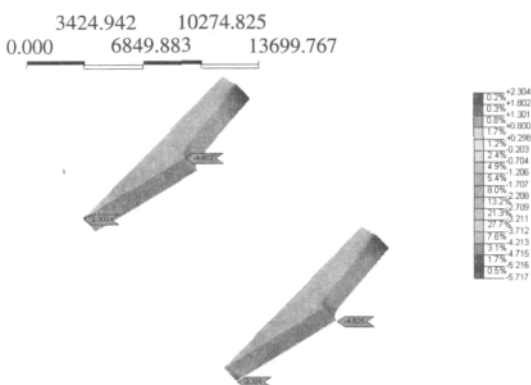


图 23 主 + 附组合拱脚 τ_{xx} 应力云图

在恒载(不计预应力)作用下,拱脚第一主应力除支座处出现应力集中外,拱肋于主梁连接圆脚处主拉应力较大,在 9.0 MPa 左右;整个拱脚主拉应力主要分布在 6.79 ~ -0.35 MPa 之间,应力分布范围较广;在主拉应力较大处 τ_{xx} 较大,最大值为 -7.019 MPa,附近区域的剪应力也都在 3.0 MPa 以上。计入预应力后,整个拱脚主拉应力控制在 3.3 MPa 以内,预应力锚固区内由于外圈预应力的作用,造成主拉应力较大;拱肋于主梁结合面附近的剪应力也控制在 -3.0 ~ 0.5 MPa 范围内;预应力(竖向预应力)布置合理。

在主 + 附组合下,拱脚内侧圆弧端面与梁体交界处主拉应力为 8.5 MPa,与梁端交界处主拉应力为 8.2 MPa,大于 3.17 MPa 的应力(含支座以及钢束锚固端面的应力集中)仅仅占拱脚的 3.9%。一方面限于计算机资源,交界部位单元划分不够细,单元的形状一般

较差,计算结果往往会出现一些失真,另一方面该处的确也是结构刚度突变的部位。综合考虑,相应位置应加强配筋,结构是足够安全的。

在主 + 附组合下,拱脚与梁体交界面的剪应力为 4.6 MPa(端部),相应应增加抗剪钢筋的配置。

8 结论

(1) 由正应力分析结果可知顶板正应力分布越靠近跨中,正应力分布越均匀,越靠近支点,拱脚分布越不均匀,底板正应力也有相同的趋势,但是不均匀程度较顶板要小一些。在平面分析中,可以忽略跨中截面的有效宽度对结构正应力的影响;在支点位置,不均匀性较大,越是靠近边腹板的部位受力越大。必须加强支点部位的纵向配筋。同时顶板短束应尽量靠近边腹板,边腹板设置一定数量的腹板通长束,对于抵抗拱脚推力以及适应支点位置箱梁外侧受力较大的特点有着较为显著的改善作用。

(2) 由主拉应力分析结果可知,边腹板与中腹板整体主拉应力差别很小,但是边腹板外侧主拉应力较其它部位有较大提高,这与本桥边腹板外侧没有悬臂板的构造有关(桥面板受力有腹板位置为负弯矩区,相应没有悬臂板与之平衡,边腹板的弯矩较大)。由于系杆拱桥部分荷载通过吊杆传递至拱肋,故腹板主拉应力较小,边中腹板系构造(吊杆预埋管大小以及预应力布束的需求)和环框计算控制,若吊杆下端采用拉板式梁上锚固构造,可进一步减小边腹板厚度。

(3) 由横向、竖向位移分析结果可知,箱梁横向位移差最大值分别为:1[#]截面 0.51 mm、3[#]截面 0.22 mm、5[#]截面为 0.18 mm。说明本桥采用的单箱多室以及 6.0 m 一道的横隔板的结构体系具有较大的整体变形性能。

(4) 整体分析结果表明,除拱脚与梁体交界面、支座以及预应力锚固区域局部发生一定程度的应力集中外,整体上系杆拱混凝土应力处于合理的水平,结构安全可靠。

(5) 拱脚细部分析表明,设置拱脚竖向预应力是合理必要的,相对已经建成的铁路预应力混凝土桥梁,本桥有着跨度最大、体量最大的特点,故将最初拟定的 $\phi 25$ 竖向预应力调整为 $\phi 32$ 。

单箱多室结构的横向计算分析,一直以来没有一个明确的规定,在有限元法没有广泛被工程技术人员掌握之前,一些解析简化计算方法被采用,有限条法也作为一种解决手段。有限元法快速发展,特别是计算手段以及计算硬件的更新,有限元法成为工程计算的一个重要手段,但是有限元法的关键在于对模型和边界条件的正

确模拟,针对单箱多室结构,横向环框计算时,对在中间腹板支点是否加设支撑存在不同的认识,对于本桥存在吊杆的情况,更是不明确的。通过比较实体有限元分析结果,笔者认为,根据变形(应变)决定内力(应力)的基本原理,在环框分析时,此类型结构可按照每个腹板下均设置竖向支撑,并考虑中腹板支点处发生与有限元分析结果相同的相对变形差值和不发生相对变形的状态进行包络计算,如此处理较为合理,且是安全可靠的。同时在其它类似的单箱多室结构也可通过简化的实体分析或者板单元模型计算出横断面的相对竖向位移,以此来确定环框分析的支撑状态,该法合理可行,便于设计掌握。

参考文献:

- [1] 朱敏,王玉珏,杨咏漪,等. 铁路系杆拱设计研究[J]. 铁道工程学报, 2009(10): 32-35.
Zhu Min, Wang Yujue, Yang Yongyi, etc. Research on the Design of Railway Tied Arch Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(10): 32-35.
- [2] 魏建,李岩. 成都枢纽三环立交双线铁路系杆拱桥设计研究[J]. 铁道标准设计, 2006(2): 36-38.
Wei Jian, Li Yan. Research on the Design of Tied Arch Bridge of Chengdu Railway Third Ring Road Railway Interchange[J]. Railway Standard Design, 2006(2):

36-38.

- [3] 程翔云. 双室箱梁顶板的横向计算研究[J]. 中国公路学报, 1996(4): 65-69.
Cheng Xiangyun. Research on Lateral Calculation of Top Flanges for Twin-cell Box Girder[J]. China Journal of Highway and Transport, 1996(4): 65-69.
- [4] 吴海林,冯广维. 箱梁横向内力分析及有效宽度[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001(12): 35-38.
Wu Hailin, Feng Guangwei. Transverse Internal Force Analysis of Box Girder and Effective Width[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2001(12): 35-38.
- [5] 游励晖. 钢筋混凝土系杆拱桥拱梁结合部受力分析的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
You Lihui. Experience Research of Stress Analysis about the Connection Area of the Beam and Arch of Reinforced Concrete Tied-arch Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [6] 裴若娟,宗金东,李朝锋. 高速铁路提篮拱桥拱脚应力分析[J]. 铁道工程学报, 2002(1): 23-28.
Pei Ruojuan, Zong Jindong, Li Chaofeng. Stress Analysis of end Joint for Long-span Oblique Arch Bridge on High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2002(1): 23-28.

(编辑 赵立兰)

(上接第50页)

参考文献:

- [1] 刘成龙,杨友涛,徐小左. 高速铁路 CPⅢ 交会网的必要测量精度仿真计算[J]. 西南交通大学学报, 2008(6): 718-723.
Liu Chenglong, Yang Youtao, Xu Xiaozuo. Simulated Determination of Accuracy Requirement for Control Point III Intersection Networks in High-speed Railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008(6): 718-723.
- [2] 杨雪峰,刘成龙,罗雁文. 基于自由测站的基坑水平位移监测方法探讨[J]. 测绘科学, 2011(5): 153-154.
Yang Xuefeng, Liu Chenglong, Luo Yanwen. A Discussion Based on Free-station about the Method of Foundation Pit Horizontal Displacement Monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011(5): 153-154.
- [3] 郑健,刘成龙,杨雪峰,等. 轨道基准网高程测量及其数据处理方法的探讨[J]. 铁道建筑, 2011(8): 121-124.

Zheng Jian, Liu Chenglong, Yang Xuefeng, etc. Study On Method of Elevation Measurement and Data Processing in Track Reference Network[J]. Railway Engineering, 2011(8): 121-124.

- [4] 张忠良,杨友涛,刘成龙. 轨道精调中后方交会点三维严密平差方法研究[J]. 铁道工程学报, 2008(5): 33-36.
Zhang Zhongliang, Yang Youtao, Liu Chenglong. Study on Three-dimensional Strict Adjustment Method of Space Resection for Precise Positioning Track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(5): 33-36.
- [5] 於宗俦,鲁林成. 测量平差基础(增订本)[M]. 北京: 测绘出版社, 1978.
Yu Zongchou, Lu Lincheng. Basis of Surveying Adjustment (Enlarged Revision) [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1978.

(编辑 赵立兰)