

拱梁组合体系拱桥关键节点有限元分析

黄国凯

(福建船政交通职业学院 汽车运用工程系, 福建 福州 350007)

摘要:以某主跨85 m钢管混凝土拱桥为研究对象,采用ANSYS建立局部精细化模型,对拱座进行受力分析。研究表明:拱梁组合体系拱桥拱座的结构刚度比较大,在拱脚最大弯矩工况下,最大变形出现在哑铃型拱肋加载截面下缘,变形值仅为4.3 mm;拱座整体应力分析表明,结构受力以纵桥向受压为主,整体应力值不大,拱肋与拱座节点交界面因刚度突变出现了较大的应力变化,存在不大于1 MPa的主拉应力;除了端横梁预应力锚固处压应力在10 MPa左右,其他部位应力绝对值均在1 MPa以下,满足要求;为了进一步优化结构受力,避免局部应力集中,应在结构中增加加腋、倒角等。

关键词:拱桥;拱梁组合体系;有限元;位移;应力

中图分类号: U443.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)03-0242-05

Finite element analysis of key-joints of arch-girder combination bridge

HUANG Guokai

(Department of Automotive Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: A concrete filled steel tube arch bridge with the main span of 85 m was taken as the research object. The refined local model was established by using ANSYS to analyze the force on the arch abutment. Results show that the stiffness of the abutment of arch-girder combination bridge is relatively large. Under the condition of the maximum bending moment of arch foot, the maximum deformation occurs at the lower edge of dumbbell arch rib loading section, and the deformation value is only 4.3 mm. The overall stress analysis of arch abutment shows that the structural stress is mainly compressive in the longitudinal direction of the bridge, and the stress value is small. The interface between arch rib and arch abutment has a large stress change due to the abrupt stiffness change, and the principal tensile stress is no more than 1 MPa. Except that the compressive stress at the pre-stressed anchorage of the end beam is about 10 MPa, the absolute value of stress at other parts is less than 1 MPa, which meets the requirements. In order to optimize the stress of abutment and avoid local stress concentration, measures such as haunching and chamfering should be added to the structure.

Keywords: arch bridge; arch-girder combination; finite element analysis; displacement; stress

钢管混凝土拱梁组合体系拱桥,外部简支内部超静定,具有受力性能好,施工方便,后期维护工作量小,建筑高度小,结构轻盈美观,造价低等特点^[1-3]。

但是,拱座节点结构受力复杂,需承受拱肋轴力与弯矩、系梁预应力、端横梁扭矩的共同作用。

作为一种钢和混凝土组合结构,采用杆系模型很难模拟这些关键部位受力情况,需采用实体模型分析应力分布情况,为结构设计和优化提供参考。詹刚毅^[4]、张洪金^[5]、闫广鹏^[6]、魏俊锋^[7]分别对拱脚节点的受力性能进行了分析,提出了优化建议。周萌^[8]、Ren^[9]、Nie^[10]、Bai^[11]对拱脚节点建

模方法提出了参考意见。

本文以某主跨 85 m 钢管混凝土拱桥为研究对象,采用 ANSYS 建立局部精细化模型,对拱座进行受力分析。并验证了工程设计的合理性,为同类工程提供参考。

1 工程概述

某大桥主桥上部为下承式钢管混凝土系杆拱,计算跨径 85 m,矢高 17 m,拱肋轴线为二次抛物线。总体布置如图 1 所示。

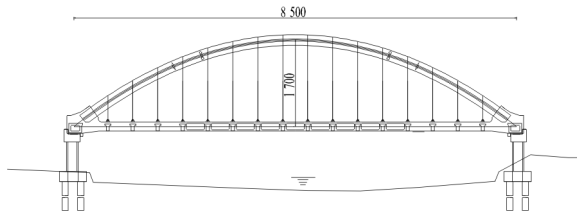


图 1 总体布置图(单位:cm)

Fig.1 General layout of the whole bridge (unit: cm)

主拱拱肋采用钢管混凝土哑铃型结构,截面宽 0.85 m,高 2.1 m。钢管直径 850 mm,壁厚 14 mm,上下钢管中心距 1.25 m;腹板厚 14 mm,间距 0.45 m。拱肋截面构造如图 2,其中拱脚段腹腔灌注 C50 微膨胀混凝土,其余腹腔采用 I45a 号工字钢对钢板加劲。两拱肋中心距为 11.7 m,共设置 5 道“一字型”风撑。

桥墩采用双柱式墩,桩基采用 10 根 $\phi 120$ cm 钻孔灌注嵌岩桩。

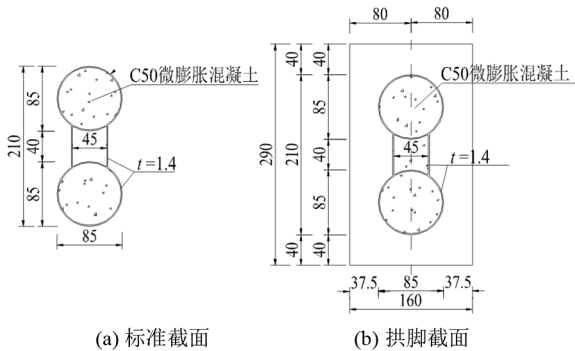


图 2 拱肋截面构造图(单位:cm)

Fig.2 Structure of arch rib section (unit: cm)

2 结构建模及整体分析

采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立空间杆系

模型。其中拱肋、横撑、斜撑、系梁、横梁和桥面板均采用梁单元模拟,桁架单元用来模拟吊杆和系杆。模型如图 3 所示。

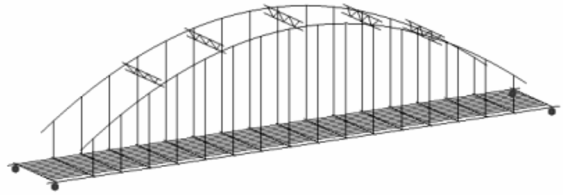


图 3 MIDAS/Civil 全桥模型

Fig.3 Finite element model by MIDAS/Civil

根据《公路桥梁设计通用规范》,取最不利荷载组合:1.0 自重+1.0 预应力+1.0 收缩徐变+1.0 汽车荷载(含冲击)+1.0 整体升降温+1.0 温度梯度,汽车荷载为公路 I 级。拱肋核心混凝土采用的徐变系数模式按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定,计算收缩、徐变系数。收缩、徐变的最终时间取成桥后 3 650 d。

据当地气象资料,极端最低温度为 -7.6 $^{\circ}\text{C}$,极端最高温度为 39.2 $^{\circ}\text{C}$,取两者中间温度 15.8 $^{\circ}\text{C}$ 为拱肋浇筑混凝土温度。根据《钢管混凝土拱桥技术规程》第 4.2.4 条规定合龙温度:

$$T = T_{28} + \frac{D - 0.85}{0.2} + T_0 = 15.8 + \frac{0.75 - 0.85}{0.2} + 5 = 20.3$$

升温温差为 $39.2 - 20.3 = 18.9$ $^{\circ}\text{C}$,降温温差为 $20.3 + 7.6 = 27.9$ $^{\circ}\text{C}$ 。混凝土温度梯度按《公路桥涵设计通用规范》第 4.3.10 条计算系梁和桥面板升温,日照负温差按正温差的 -0.5 计算。

3 拱座局部受力分析

3.1 荷载条件

拱座节点局部分分析根据设计图纸进行建模,有限元模型包括拱脚伸出 2.0 m 长的哑铃型拱肋、拱脚实体部分、半跨端横梁(长 5.05 m),如图 4。通过分析得到最不利荷载组合下拱脚段截面内力,具体如表 1 所示,正方向见图 4。在拱肋和纵梁各取一个断面用于加载,系杆索力为 24 901 kN。按固结方式约束拱脚底部,端横梁限制横桥向位移。

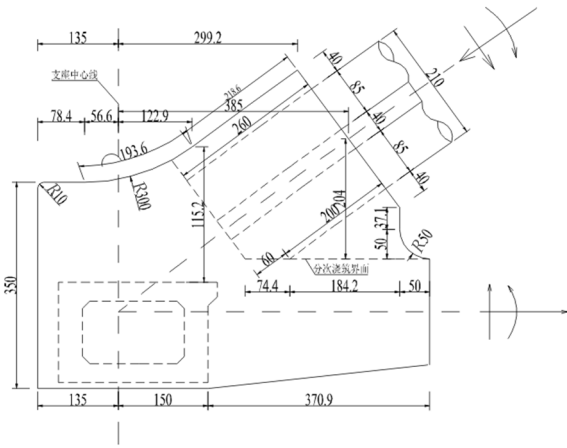


图 4 拱座模型的几何尺寸及计算荷载(单位:cm)
 Fig.4 Geometric dimensions and calculated loads of the arch abutment model(unit: cm)

表 1 拱座计算荷载

Tab.1 Calculated loads of arch abutment

截面	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
拱肋截面	15 416	416	22 422
系梁截面	11 622	701	11 622

3.2 有限元模型

采用大型专业程序 ANSYS 建立拱座节点有限元模型。由于钢管壁厚远小于构件尺寸,比较适合采用板壳单元,因此模型采用四节点壳单元 SHELL63 进行模拟,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$,钢材密度 $\rho = 7\ 850$ kg/m³。混凝土部分采用实体单元 solid95 进行分析,钢管内灌注混凝土和拱脚混凝土强度为 C50,弹性模量 $E = 3.45 \times 10^4$ MPa,泊松比 $\nu = 0.17$,混凝土密度 $\rho = 2\ 650$ kg/m³。模型按照实际结构尺寸进行建模,根据圣维南原理,主、副拱肋建模长度均为直径的 2 倍以上。整个有限元模型共 65 027 个节点,45 504 个单元,如图 5 所示。

拱肋与拱座绑定,即不允许有相对滑动或分离,可以将此区域看做被连接在一起,类似于共结点。拱脚底部为约束端,按固结考虑,端横梁固定横桥向位移。将集中力转化为均布压力,作用于锚垫板施加面荷载模拟系杆和端横梁预应力锚固处的预应力;在拱肋、纵梁加载面的质心位置建立节点,采用刚臂单元与加载面上其他各点连接,以施加轴力、剪力、弯矩等节点荷载。

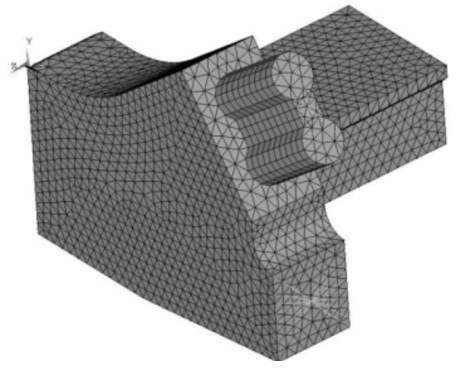


图 5 有限元计算模型

Fig.5 Finite element model

3.3 计算结果及分析

3.3.1 结构变形

图 6 给出了有限元模型计算的变形结果,从图中可看出,在拱脚最大利荷载组合工况下,拱座下挠,整体变形量很小,最大变形出现在哑铃型拱肋加载截面下缘,变形值仅为 4.3 mm,表明拱座的结构刚度较大。

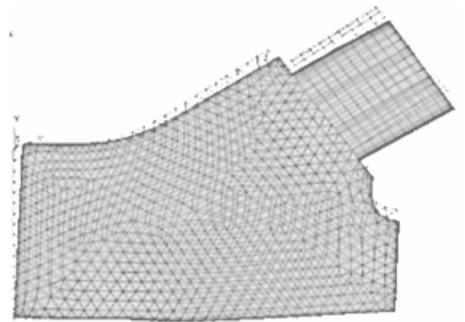


图 6 整体变形图

Fig.6 Whole deformation diagram

3.3.2 应力分析

图 7 给出了拱座节点模型的主应力迹线图,拱座节点受力以受压为主,设计合理;拱座主应力迹线分布较均匀,表明系杆预应力可均匀分布于受力结构中;矢量方向以纵桥向为主,表明结构以纵向受力为主;系杆预应力的主应力迹线形成从拱肋至系杆预应力锚固区主压应力迹线流,方向指向拱肋端部并与拱肋主应力迹线相接,说明水平方向以推力为主,并且由系杆预应力来平衡。

由于弯矩的影响,拱肋下缘主压应力大于上缘,表现为应力迹线更密集。见图 7 中的 A 区域;拱肋内力另一部分表现为竖直分力,传递至支座。从主应力迹线图上可见多个方向向下由拱肋

传至支座的应力迹线流。在系杆锚固处、端横梁与节点相交处(B、C 区域),应力集中现象明显,应力迹线密集,压应力较大,同时在压区周围出现拉应力区域,即图 7 中矩形图框内区域。

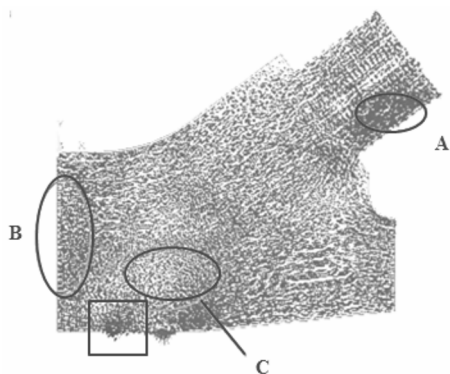


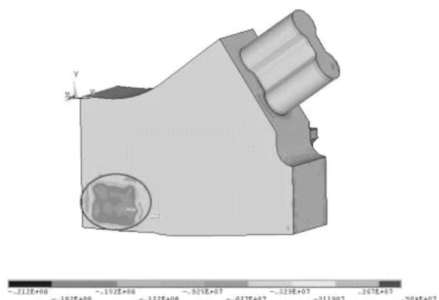
图 7 混凝土主应力迹线图

Fig.7 Principal stress trace of the concrete

图 8 给出了拱座节点纵、横桥向的应力云图。从图中可见,结构受力以纵桥向受压为主,整体应力值为 3~5 MPa,在刚度变化或集中力作用区域,拱肋与拱座节点交界面因刚度突变出现了较大的应力变化,存在不大于 1 MPa 的主拉应力,小于混凝土抗拉设计强度 1.83 MPa,满足要求;



(a) 纵桥向



(b) 横桥向

图 8 拱座节点应力云图(单位:MPa)

Fig.8 Stress nephogram of joints of the arch abutment (unit: MPa)

拱座节点区域横桥向应力值较小,除了端横梁预应力锚固处压应力在 10 MPa 左右,其他部位应力绝对值在 1 MPa 以下,均小于混凝土抗压设计强度 22.4 MPa,满足要求。

图 9 给出了拱座各部位混凝土的主拉应力云图。从图中可以看出,由于拱脚底面固定约束,最大主拉应力出现在约束位置(图 9 中圆圈处)。拱肋结合面部位、系梁与拱脚结合部位、系梁预应力锚固部位、端横梁预应力锚固部位、端横梁与拱座结合面部位混凝土的主拉应力比较小(基本都小于 1 MPa),小于混凝土抗拉设计强度 1.83 MPa,满足要求。

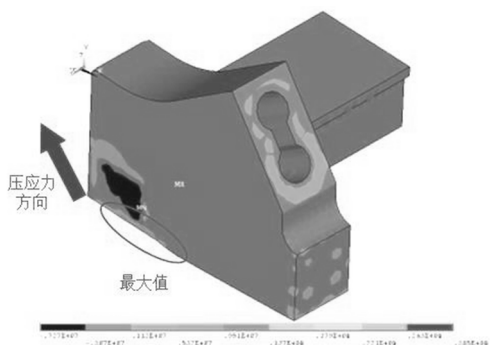


图 9 拱座混凝土整体主拉应力云图(单位:MPa)

Fig.9 Principal tensile stress nephogram of arch abutment concrete (unit: MPa)

图 10、11 给出拱座各部位混凝土的主压应力云图。从图中可以看出,除拱肋下弦管下缘应力(因加载端局部受力该截面为加载端局部受力)超过混凝土抗压设计强度 22.4 MPa 外,其余部分混凝土的主压应力均满足要求。

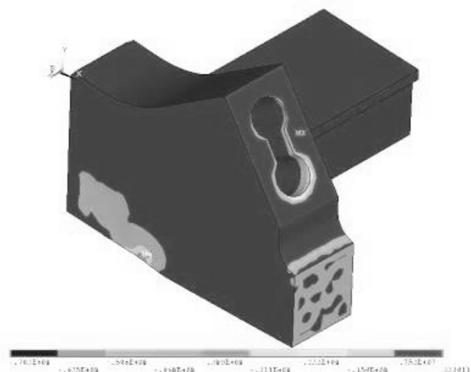


图 10 拱座混凝土整体主压应力云图(单位:MPa)

Fig.10 Principal compressive stress nephogram of arch abutment concrete (unit: MPa)

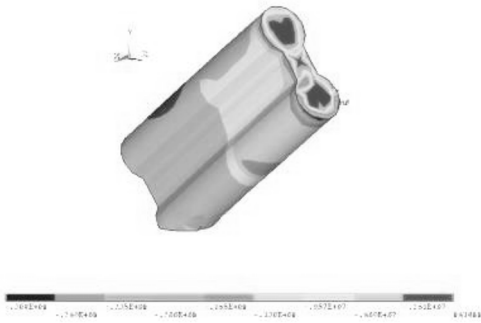


图 11 钢管内填混凝土主压应力云图(单位:MPa)
Fig. 11 Principal compressive stress nephogram of the concrete filled tube (unit: MPa)

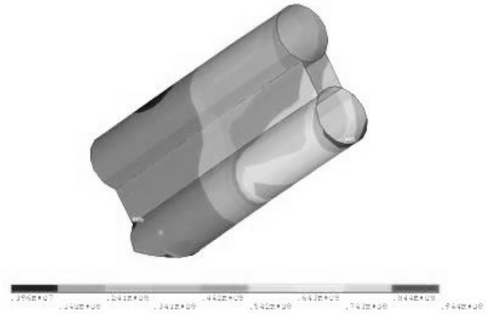


图 12 拱肋 von-mises 等效应力云图(单位:MPa)
Fig. 12 Von-mises equivalent stress nephogram of the arch rib (unit: MPa)

图 12 给出了拱肋弦管与腹板的 von-mises 应力等效云图,从图中可以看出,最大等效应力出现在拱肋下弦管的下边缘,为 94.4 MPa,小于钢材容许应力 200 MPa,满足要求。

4 结论

1) 拱梁组合体系拱桥拱座的结构刚度比较大,在拱脚最大弯矩工况下,最大变形出现在哑铃型拱肋加载截面下缘,变形值仅为 4.3 mm。

2) 拱座整体应力分析表明,结构受力以纵桥

向受压为主,整体应力值不大,拱肋与拱座节点交界面因刚度突变出现了较大的应力变化,存在不大于 1 MPa 的主拉应力,满足要求;除了端横梁预应力锚固处压应力在 10 MPa 左右,其他部位应力绝对值在 1 MPa 以下,均满足要求。

3) 复杂的空间构造和受力状态使拱座节点容易出现应力集中现象,虽然验算没有超标,但是局部应力高出周围,应在结构中增加加腋、倒角等措施,必要时增加钢筋用量,进一步优化局部受力。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [2] 陈朝慰. 拱梁组合体系桥梁施工过程受力分析[J]. 福建交通科技, 2011(4): 46-49.
- [3] 徐晓东, 汪俊. 拱梁组合体系桥梁的结构设计特点[J]. 交通标准化, 2009(21): 27-30.
- [4] 詹刚毅. 下承式钢管混凝土拱梁组合拱桥拱脚有限元应力分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2013, 35(4): 348-352.
- [5] 张洪金. 下承式钢管混凝土组合拱桥拱脚节点设计[J]. 公路, 2017, 62(12): 140-142.
- [6] 闫广鹏. 大跨径钢管混凝土拱桥拱脚应力分析[J]. 交通科技, 2017(3): 37-39, 43.
- [7] 魏俊锋. 下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥拱脚应力分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(6): 255-256.
- [8] 周萌, 宁晓旭, 聂建国. 系杆拱桥拱脚连接结构受力性能分析的多尺度有限元建模方法[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 150-159.
- [9] REN W X, ZHAO T, HARIK I E. Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7): 1022-1031.
- [10] NIE J, ZHOU M, WANG Y, et al. Research on cable anchorage system modeling methods for self-anchored suspension bridges with steel box girders[J]. ASCE Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2): 172-185.
- [11] BAI Y, WANG H, XIA M, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales [J]. Applied Mechanics Review, 2005, 157(11/12): 2165-2182.