

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^{*}

王达^{1,2}, 任灿¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 拱脚作为拱桥的关键部位,其受力性能对全桥至关重要。文中以广东茂名清福港大桥为研究背景,运用 ABAQUS 软件对拱脚局部进行分析,对拱脚处预应力钢束布置进行优化。计算结果表明,拱脚大部分区域以受压为主,应力分布均匀,总体受力合理,但在混凝土拱肋顶表面及混凝土拱肋与跨中方向箱梁表面连接处附近存在明显的应力集中现象;采取优化预应力钢束布置措施可改善混凝土拱肋顶表面局部应力集中现象。

关键词: 桥梁; V 形刚构组合拱桥; 拱脚; 局部受力; 钢束布置

中图分类号: U443.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0125-04

V 形刚构组合拱桥是一种造型美观、受力合理的结构形式^[1],被大量运用于公路和城市桥梁。拱脚作为拱桥的关键部位,其受力复杂,为确保桥梁的安全,有必要对拱脚应力分布特征进行研究。周云岗等对大跨径钢箱系杆拱桥拱梁结合段局部受力进行分析,指出拱梁结合段处拱梁腹板是核心受力构件^[2]。崔凤坤等建立钢管混凝土系杆拱桥拱脚一致多尺度模型分析拱脚的受力形式,提出了防止应力集中的建议^[3]。王振华等对拱脚受力和破坏机理进行分析,得出了混凝土容易破坏的位置,并提出了预防措施^[4]。广东茂名清福港大桥拱脚采用钢箱拱,通过栓钉连接件和剪力钉埋于实心箱梁中与 V 腿

固结成一体,并在内部填充混凝土,有别于现有分析中混凝土拱座与钢管混合连接构成的拱脚结构^[5-8]。本文通过对该桥拱脚应力的计算,分析其空间应力分布特征,并针对拱肋顶表面应力集中严重的情况研究预应力钢束布置优化措施。

1 工程概况

清福港大桥主桥长 220 m,跨径布置为 50 m+120 m+50 m(见图 1)。为三角刚架(拱脚、V 腿与主梁固结形成的三角形结构,类似连续刚构)+中承式系杆拱桥组合结构,基础为桩基承台,上边跨主梁与主墩斜腿刚接,形成三角刚架,主拱圈为钢箱拱。

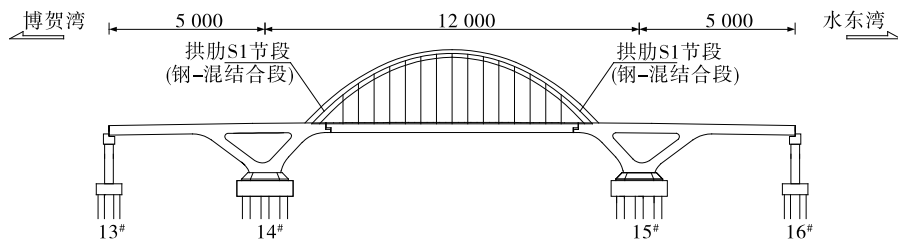


图 1 清福港大桥主桥的总体布置(单位:cm)

主桥为中承式系杆拱桥,2 片拱肋平行布置。主梁与前、后斜腿刚接,形成三角刚架,并在前腿横梁处设置牛腿(伸缩缝),使边、中跨主梁断开。中跨主梁为带吊杆支承的简支挂孔,一部分荷载通过吊杆传递至拱肋,另一部分荷载通过支座传递至三角

刚架,拱肋的水平推力通过水平系杆平衡。边跨主梁长 80.7 m,每隔 5 m 设 1 对吊杆,全桥共设 30 对吊杆。混凝土主梁为双边箱结构,每个边箱均为单箱单室箱梁。边箱底板为平坡,顶板设 2% 双向横坡。中跨主梁长 80 m,梁面宽 43.0~45.0 m,为预

^{*} 基金项目: 湖南省科技创新计划资助(2020RC4049)

应力混凝土结构,采用 C50 海工高性能混凝土。主拱结构为钢箱拱,拱轴线跨度 90 m,矢高 22.5 m,主拱矢跨比为 1/4,拱轴线采用拱轴系数为 1.5 的悬链线。钢箱拱肋顶板、底板、腹板厚度分为 36 mm、42 mm 两种,拱脚 S1~S2 节段采用 42 mm 厚度,S3~S5 节段采用 36 mm 厚度,拱脚 S1 节段内填充混凝土。

2 有限元分析

2.1 全桥整体分析

(1) 全桥整体模型。使用 MIDAS/Civil 建立全桥有限元模型,主拱肋、前后斜腿及混凝土主梁采用梁单元模拟^[9],系杆与吊杆采用桁架单元模拟,钢—混段拱肋采用联合截面模拟。墩底固结,两侧梁端与辅助墩处进行竖向约束;三角刚架前后斜腿与主梁刚性连接;系杆与主梁刚性连接;吊杆与主梁刚性连接。全桥计算模型共划分为 1 412 个单元,其中梁单元 1 374 个,只受拉桁架单元 38 个(见图 3)。

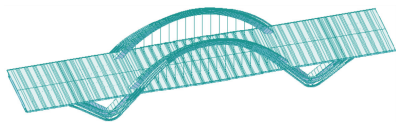


图 2 清福港大桥有限元模型

(2) 最不利工况。首先建立全桥有限元模型,模拟结构的受力状态,提取拱脚最大弯矩和最大轴力两种工况下拱肋截面的荷载结果。然后建立精细化拱脚局部分析模型,将主梁、拱肋截面的荷载视作外力作用,分析拱脚局部应力的分布特征。根据拱桥的受力特性,拱脚结构为压弯构件,拱脚结构处必然存在最大轴力和最大弯矩两种最不利工况。考虑到活载的存在,通过 MIDAS/Civil 软件的移动荷载追踪器功能确定特定单元(截面)最不利受力时活载布置位置,并提取拱脚弯矩最大(工况一)和轴力最大(工况二)时的内力值,结果见表 1。

表 1 主梁、拱肋截面作用荷载

工况编号	位置	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN
工况一	拱肋	-19 868	-31 672	-910.7
	主梁	-53 716	-165 495	-11 113.0
工况二	拱肋	-17 237	-33 564	-804.3
	主梁	-53 357	-172 888	-8 362.0

2.2 拱脚局部分析

2.2.1 拱脚局部模型建立

采用有限元软件 ABAQUS 建立拱脚节点实体

有限元模型,主要包括混凝土箱梁、钢箱拱肋、钢箱拱肋内部混凝土等主要构件,钢箱拱肋内填充混凝土^[10]。建立模型时,为避免边界效应及荷载的影响,拱肋沿拱轴线方向取 7.5 m,箱梁段长取 11 m,拱脚节点取实际尺寸。拱脚局部模型共划分为 824 606 个实体单元、32 444 个壳单元和 906 个桁架单元(见图 3)。

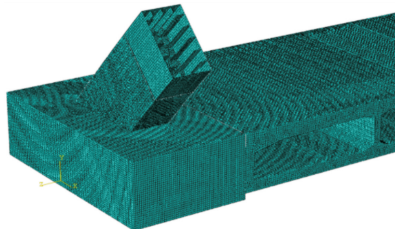


图 3 拱脚局部实体模型

(1) 材料的本构关系。混凝土的本构采用 C50 混凝土的本构。钢材为 Q345 钢,本构采用双线性模型,弹性模量为 206 GPa,屈服强度为 345 MPa,泊松比为 0.3。

(2) 单元选取。主梁及混凝土拱肋采用实体单元 C3D8R 模拟。钢拱肋段与承压板选择四边形壳单元 S4R 模拟,混凝土拱肋内的预应力钢束采用线性三维桁架单元 T3D2 模拟。

(3) 边界条件。由于拱脚实心箱梁与斜腿连接,在实心箱梁底部采用固结,约束全部自由度。

(4) 相互作用及荷载施加。使用内置区域将预应力钢束嵌入混凝土拱肋中,以避免网格划分时出现构件间节点不一致的问题。钢箱拱与填充的混凝土之间使用 Tie 绑定进行约束,使两者接触面法向变形协调一致。施加的荷载主要有弯矩、轴力、剪力,分别施加在拱肋与主梁上。预应力钢束采用降温法,对钢束施加降温温度场。

2.2.2 计算结果与分析

工况一下计算结果见图 4、图 5。由图 4、图 5 可知:在拱脚最大弯矩作用下,拱脚第一主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-0.20 \sim 0.97$ MPa,拱脚最大拉应力出现在混凝土拱肋与跨中方向实心箱梁表面连接处附近(达 3.02 MPa),最小压应力出现在混凝土拱肋拱背与实心箱梁连接处(为 -0.49 MPa),最大、最小应力影响区域非常小,且扩散快,混凝土拱肋大部分区域处于受压状态;拱脚第三主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-9.51 \sim -5.59$ MPa,拉应力主要出现在混凝土拱肋顶表面颜色较

深的区域(最大应力为 0.28 MPa),最小应力出现在混凝土拱肋顶表面锚固预应力钢束处(为 -23.2 MPa)。混凝土拱肋以受压为主,除拱肋顶表面小部分区域存在较小拉应力外,其他部分压应力分布均匀,混凝土拱肋顶面及其边缘表现为较明显的局部承压受力形式,拱肋边缘局部承压部位与钢箱拱肋顶板、底板及腹板应力集中位置吻合。

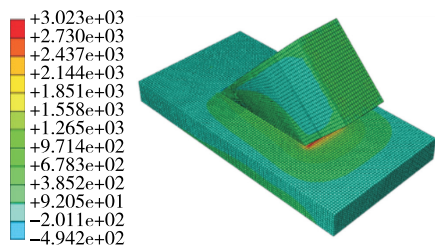


图4 工况一下第一主应力云图(单位:kPa)

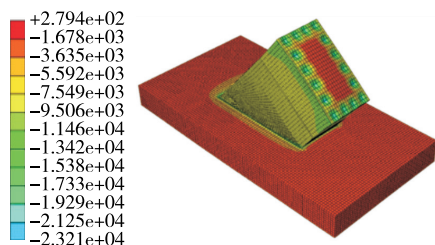


图5 工况一下第三主应力云图(单位:kPa)

工况二下计算结果见图6、图7。由图6、图7可知:在拱脚最大轴力作用下,拱脚第一主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-0.21 \sim 1.01$ MPa,最大、最小应力分布区域与工况一类似,分别为 3.16 MPa、 -0.52 MPa,且应力影响区域非常小,混凝土拱肋大部分区域处于受压状态;第三主应力中,拱肋

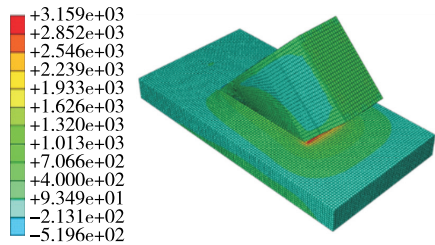


图6 工况二下第一主应力云图(单位:kPa)

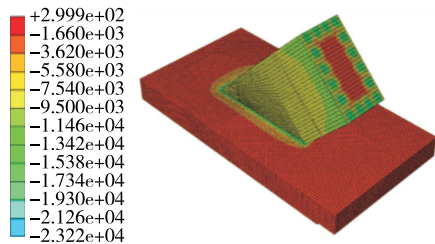


图7 工况二下第三主应力云图(单位:kPa)

大部分区域的应力为 $-9.50 \sim -5.58$ MPa,拉应力主要出现在拱肋表面颜色较深的区域(最大应力为 0.30 MPa),最小应力出现在混凝土拱肋顶表面锚固预应力钢束处(为 -23.2 MPa)。应力集中位置为混凝土拱肋顶表面及与钢箱拱肋接触边缘。

在最大弯矩和最大轴力两种工况下,拱脚主要以受压为主,且受力均匀,最大拉应力主要出现在混凝土拱肋与跨中方向箱梁表面连接处附近;应力集中区域小,扩散快,且计算中未考虑应力重分布,对拱脚总体受力影响不大。可通过加密普通钢筋来承担部分拉应力。

3 预应力钢束布置优化

拱脚压应力储备足够,考虑到预应力钢束的作用,钢箱拱肋内填充混凝土顶面边缘应力集中区域较大,且混凝土拱肋与实心箱梁表面连接处的拉应力与预应力钢束的作用有关系,对钢束布置进行优化,将矩形钢箱长边方向由原方案的6束预应力钢束调整至5束(见图8)。对工况二作用下预应力钢束优化后的受力进行分析,计算结果见图9、图10。

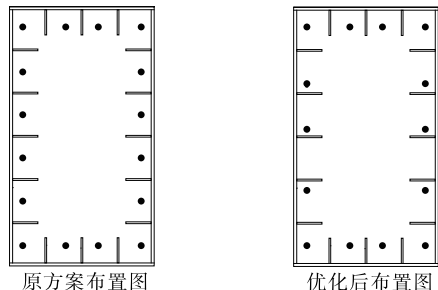


图8 预应力钢束布置

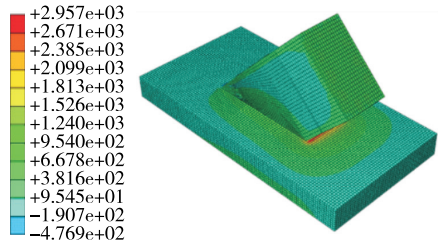


图9 预应力钢束布置优化后第一主应力云图(单位:kPa)

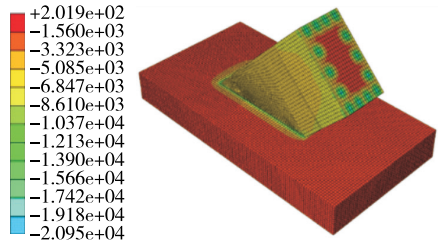


图10 预应力钢束布置优化后第三主应力云图(单位:kPa)

由图9、图10可知:1) 优化钢束布置后,在最大轴力作用下,拱脚第一主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-0.19 \sim 0.95$ MPa,最大应力(达2.96 MPa)出现在混凝土拱肋与跨中方向实心箱梁表面连接处附近,最小应力(为 -0.48 MPa)出现在混凝土拱肋拱背与实心箱梁连接处,最大、最小应力影响区域非常小,且扩散快,混凝土拱肋大部分区域处于受压状态;在第三主应力中,拱肋大部分区域的应力为 $-8.61 \sim -5.09$ MPa,拉应力主要出现在混凝土拱肋顶表面颜色较深的区域(最大应力为0.20 MPa),最小应力(为 -20.95 MPa)出现在混凝土拱肋顶表面锚固预应力钢束处。2) 与优化前工况二下受力对比,优化预应力钢束布置后,第一主应力分布中,混凝土拱肋绝大部分区域仍处于受压状态,与原方案对比压应力仅减小0.02 MPa;第三主应力分布中,混凝土拱肋顶表面应力集中区域减少,最大压应力由原方案的23.2 MPa减小到20.95 MPa。在混凝土拱肋与跨中方向实心箱梁接触位置附近出现的拉应力由3.16 MPa减小到2.96 MPa。混凝土拱肋绝大部分区域仍处于受压状态,压应力最大减小0.5 MPa。改变钢束布置后对混凝土拱肋的储备压应力影响非常小,但混凝土拱肋顶表面局部应力集中区域明显减小。可见,改变预应力钢束布置能改善局部应力集中现象,提高混凝土的耐久性能,且不会影响混凝土拱肋的受力状态及与实心箱梁段的结合能力。全桥少张拉4对预应力钢束,不仅能节省材料,降低桥梁建设成本,还能减少一部分张拉钢束施工时间,加快施工进度。

4 结论

(1) 在拱脚最大弯矩和最大轴力工况下,拱脚大部分区域以受压为主,应力分布均匀;最大拉应力

主要出现在混凝土拱肋与跨中方向箱梁表面连接处附近,对拱脚结构影响不大,该区域可通过加密钢筋来分散应力。

(2) 优化预应力钢束后对拱脚结构受力影响很小,但能改善混凝土拱肋顶表面局部应力集中状况,不仅能节省材料,降低桥梁建设成本,还能减少一部分张拉钢束施工时间,加快施工进度。

参考文献:

- [1] 马坤全,李国胜,吴定俊.V形刚构组合拱桥拱脚空间应力分析[J].世界桥梁,2003,31(1):48-51.
- [2] 周云岗,洪慧卿,鄢余文.大跨径钢箱系杆拱桥拱梁结合段局部受力分析[J].中国市政工程,2021(1):8-11+83.
- [3] 崔凤坤,朱谊彪,杜朋,等.钢管混凝土系杆拱桥拱脚一致多尺度建模及分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(2):211-217.
- [4] 王振华,刘信.拱脚受力分析和破坏机理探讨[J].工程与建设,2017,31(1):67-70.
- [5] 肖光清,李传习,李斌.梁拱组合体系桥拱脚局部受力分析[J].公路与汽运,2014(1):189-192.
- [6] 王志刚,王志海.三连拱主拱拱脚的局部受力分析[J].武汉工程大学学报,2011,33(10):28-31.
- [7] 闫广鹏.重载铁路简支钢管混凝土系杆拱桥拱脚应力分析[J].交通科技,2020(4):23-27.
- [8] 李金凯.钢管混凝土梁拱组合桥拱脚局部应力分析[J].铁道勘察,2017,43(6):107-109+114.
- [9] 谢肖礼,彭文立,秦荣.圣维南原理在钢管混凝土拱桥分析中的应用[J].中国公路学报,2001,14(2):33-35.
- [10] 杨高平,张霆浩.下承式钢管混凝土系杆拱桥拱脚局部应力分析[J].南阳理工学院学报,2014,6(3):72-75.

收稿日期:2021-12-22

(上接第124页)

参考文献:

- [1] 岳丽娜,陈思甜.钢桁梁桥施工架设方法研究综述[J].公路交通技术,2006,22(3):86-89+111.
- [2] 李忠三,雷俊卿,林道锦.嘉绍大桥钢箱梁悬臂拼装截面变形分析[J].桥梁建设,2014,44(1):31-36.
- [3] 张忠文.大跨度超宽桥面钢混组合梁悬臂拼装施工工艺研究[J].工程建设与设计,2020(8):103-106.
- [4] 何旭辉,刘立亚,邹云峰,等.铁路钢桁梁斜拉桥单悬臂

施工方法研究[J].桥梁建设,2016,46(1):100-105.

- [5] 陈平,方伏浪,丁仕洪.玉磨铁路元江特大桥钢桁梁悬臂架设关键技术[J].桥梁建设,2021,51(5):123-129.
- [6] 韩冰.大跨度公路悬索桥钢箱梁正交异性桥面板的静力行为与疲劳性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 王凌波,刘鹏,李源,等.宽幅钢箱梁斜拉桥悬臂匹配技术研究[J].中国公路学报,2016,29(12):102-108.

收稿日期:2021-12-27