

三岔形单主缆人行悬索桥的设计探讨

陈朝阳¹, 宋守坛²

(1.中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730099; 2.东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要:针对鸡鸣三省大峡谷的三岔形河流地形,提出一种三岔形单主缆人行景观玻璃悬索桥的设计方案,三岔形单主缆悬挂在三个独柱桥塔之上,吊索体系悬挂带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁,三岔形单主缆和三岔形桥面加劲梁均为稳定的三角形结构形式,具有良好的空间刚度。结合实际工程,进行工程参数设计,建立 MIDAS 有限元分析模型,进行静力分析和动力模态分析研究,验证三岔形单主缆人行悬索桥的结构合理性。

关键词:鸡鸣三省大峡谷;三岔形单主缆人行悬索桥;三岔形桥面加劲梁;人行景观玻璃悬索桥

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0048-05

0 引言

鸡鸣三省大峡谷位于云贵川三省交界处,赤水河和渭河劈崖交汇^[1]。为促进鸡鸣三省大峡谷旅游业的发展,需要建造一座三岔形人行景观玻璃桥,一座桥分为三个岔口,一桥通三岸,一桥三个岔口通往三个省份。

鸡鸣三省大峡谷深沟险峡,三省大峡谷三岔桥是不可以设置中央桥墩的,因此,建造超大跨径三岔桥有一定的技术难度。

梁式结构的三岔桥跨越能力小,承载力低,施工技术落后。

拱式结构的三岔桥施工困难,三条拱肋在拱顶中央汇集处的结构构造复杂^[2]。

采用三岔形斜拉桥是必须有引桥,引桥将增加造价不经济,斜拉桥的引桥占地面积大,引桥也影响了峡谷景区的景观布局,斜拉索拽拉桥面中央圆环将会影响中央圆环处的桥面净空^[3]。

单主缆悬索桥外形美观,结构轻盈,是大跨度城市景观桥梁的重要桥型,备受设计者青睐^[4-6]。

峡谷景区人行景观悬索桥长宽比值较大,结构轻盈,其抗风稳定性差,需要采用空间缆索体系悬索桥,张家界大峡谷玻璃悬索桥采用大张开量空间索面^[7-8]。

针对鸡鸣三省大峡谷三岔形河流地形,本文提出一种三岔形单主缆的人行悬索桥,三岔形单主缆

悬挂在三个独柱桥塔之上,三个独柱桥塔后方设置八字形背拉索,在三岔形单主缆之上布置吊索体系,吊索体系悬挂带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁,三岔形桥面加劲梁搁置在三岔形峡谷悬崖边缘。

本文结合鸡鸣三省大峡谷人行玻璃景观悬索桥的设计,开展三岔形单主缆的人行悬索桥的几何构形研究,进行工程参数设计,建立 Midas 有限元分析模型,进行竖向荷载作用下结构分析计算,开展动力模态研究和抗风稳定性分析,以便验证三岔形单主缆的人行悬索桥的结构合理性。

1 构型研究

鸡鸣三省大峡谷人行景观玻璃悬索桥采用三岔形单主缆的人行悬索桥结构形式,独柱桥塔共计有三个,三个独柱桥塔的位置呈现三角形布置,三岔形单主缆悬挂在三个独柱桥塔之上,八字形背拉索一端汇聚锚固在独柱桥塔之上,八字形背拉索另外一端锚固于左右两个隧道式锚碇之中。

带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁是由外三岔形加劲梁、中央圆环形加劲梁和内三岔形加劲梁组成(见图1),吊索体系是由人字形吊索、三脚状吊索和中央竖吊索组成。人字形吊索悬吊外三岔形加劲梁和中央圆环形加劲梁,三脚状吊索的上部吊点汇聚在三岔形单主缆跨中位置,三脚状吊索的下部吊点分散在中央圆环形加劲梁与内三岔形加劲梁的三个交点处,中央竖吊索悬吊于内三岔形加劲梁的中央位置。

在内三岔形加劲梁内部交叉点处设置中央圆饼状钢结构连接件,中央圆饼状钢结构连接件采用工厂铸造加工制作。内三岔形加劲梁的三根梁中心线与外

收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 江苏省自然科学基金项目资助(BK2012755)

作者简介: 陈朝阳(1972—),男,学士,高级工程师,从事市政工程设计工作。

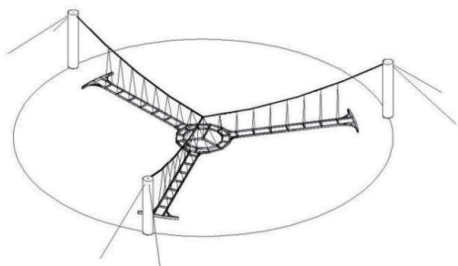


图 1 三岔形单主缆悬索桥设计方案

三岔形加劲梁的三幅桥面中心线均是直线对齐,相对于中央圆环形加劲梁的圆心,内三岔形加劲梁的三根梁方向与外三岔形加劲梁的三幅桥面方向均是相反布置的。

如图 2 所示,中央圆环形加劲梁的内环梁有 12 个吊点,其中三脚状吊索是 3 个吊点,人字形吊索 9 个吊点;中央圆环形加劲梁的外环梁有 9 个支撑点,其中人字形吊索 6 个吊点,内三岔形加劲梁伸臂外挑支撑中央圆环形加劲梁的外环梁 3 个点,本桥均匀分布的吊点可以保证中央圆环形加劲梁的结构安全性。

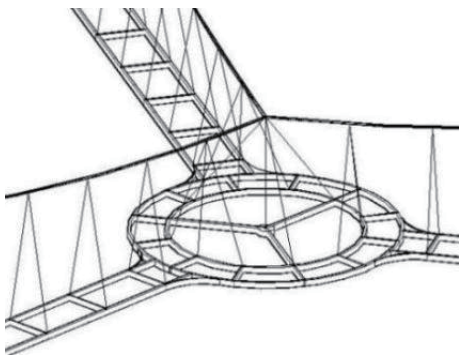


图 2 三岔形加劲梁与吊索体系

带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁的三个端部设置基础梁,基础梁设置在三岔河流峡谷地形的悬崖边缘,三岔形单主缆悬索桥是地锚式单跨悬索桥,不需要引桥,没有引桥就不会影响峡谷景区的景观布局。

三岔形单主缆的吊索体系悬吊带有中央圆环的桥面系加劲梁,造型漂亮,交通组织流畅,吊索竖向和三脚状吊索两者悬吊桥面中央圆环的内环,吊索不会影响中央圆环桥面处的桥面净空。

三岔形单主缆悬索桥是采用装配式结构,可以工业化生产,钢管混凝土独柱桥塔、三岔形单主缆悬索、吊索体系和带有中央圆环的三岔形桥面系加劲梁均可以工厂预制,装配式建造速度快捷。

三岔形单主缆和三岔形桥面加劲梁均为稳定的三角形结构形式,带有中央圆环的三岔形桥面系加劲梁的抗扭刚度大,三岔形单主缆提供水平分力,三岔形单主缆悬索桥的抗侧刚度大,三岔形单主缆悬索桥具有良好的空间刚度,抗风性能良好。

鸡鸣三省大峡谷人行景观玻璃桥的桥塔采用巨树形的桥塔造型,新颖独特,美丽漂亮,在带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁之上设置有玻璃桥面板,方便游客欣赏峡谷景区风光(见图 3)。



图 3 鸡鸣三省大峡谷三岔形人行悬索桥

鸡鸣三省大峡谷人行景观桥采用三岔形单主缆,每一根单主缆采用两股预制的成品缆索,在三岔形悬索桥缆索中央位置,设置三岔形缆索中央转向连接件(见图 4),三岔形缆索中央转向连接件采用工厂铸造加工制作。

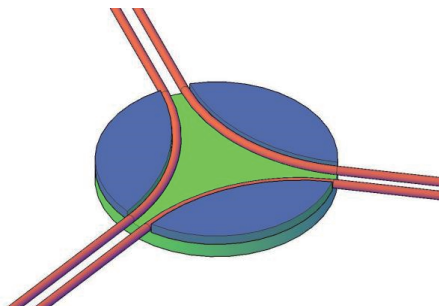


图 4 三岔形缆索中央转向连接件

鸡鸣三省大峡谷人行景观玻璃悬索桥,采用三岔形单主缆人行悬索桥的方案,其施工方法包括以下步骤:

第一步:进行三个独柱桥塔和隧道式锚碇施工,并进行桥塔基础梁的施工;

第二步:施工引导索,然后进行三岔形单主缆和背拉索的安装施工;

第三步:安装人字形吊索、三脚状吊索和中央竖吊索,形成吊索体系;

第四步:采用悬拼技术,进行外三岔形加劲梁的施工安装,进行中央圆环形加劲梁和内三岔形加劲梁的施工安装,形成带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁;中央圆环效果见图 5。

第六步:铺装玻璃桥面板,形成三岔形单主缆人行悬索桥,运营使用。

2 工程参数设计

鸡鸣三省大峡谷人行景观玻璃悬索桥三个独柱桥塔的位置呈现三角形布置,独柱桥塔三角形外接圆直径 220 m,三个基础梁设置在三岔河流峡谷地形

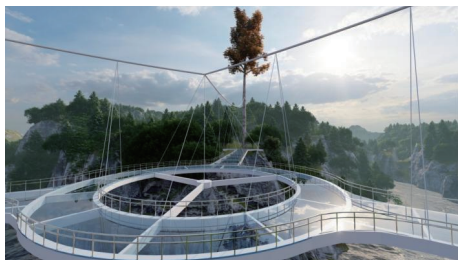


图5 中央圆环效果图

的悬崖边缘,基础梁三角形外接圆直径 180 m,三岔形单主缆悬索桥总体设计见图 6。

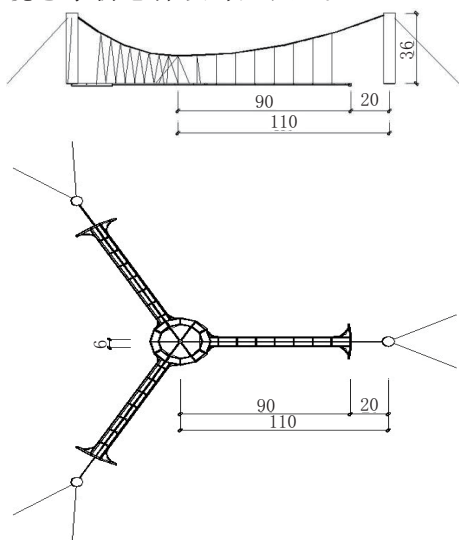


图6 总体设计图(单位:m)

独柱桥塔采用巨树形桥塔造型,独柱桥塔采用钢管混凝土结构结构,独柱桥塔高度 36 m,变截面钢管直径为 4~5 m,钢管壁厚为 16~20 mm,内灌注 C60 混凝土,独柱桥塔采用桩基础。

为了提高大直径钢管混凝土独柱桥塔的受力性能,钢管内部设置多腔分割钢板,形成大直径多腔钢管混凝土独柱,以便提高管内混凝土的三向约束受力性能。

在图 7 中,钢管混凝土独柱桥塔采用设置内外双钢管的大直径多腔钢管混凝土柱的结构形式,内部变截面钢管直径为 2~2.5 m,内部钢管壁厚为 12~14 mm,内外双钢管之间设置六道钢隔板,钢隔板壁厚为 8~10 mm。

三岔形单主缆采用 2 000 MPa 高强钢丝缆索,三岔形单主缆由两股直径为 0.15 m 预制品缆索组成,三岔形单主缆悬挂在三角形布局的独柱桥塔之上,三岔形单主缆的矢跨比为 1/10。

八字形背拉索一端锚固在独柱桥塔之上,八字形背拉索另外一端锚固于左右两个隧道式锚碇之中,背拉索采用 2 000 MPa 高强钢丝缆索,背拉索直径为 0.15 m。

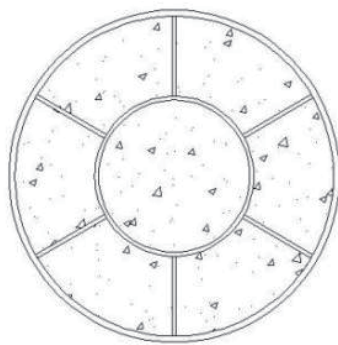


图7 多腔钢管混凝土塔柱

在三岔形单主缆之上,安装由人字形吊索、三脚状吊索和中央竖吊索组成的吊索体系,吊索采用 1 670 MPa 高强钢丝缆索,人字形吊索直径为 40 mm,人字形吊索间距 10 m;三脚状吊索一组三根,三脚状吊索直径为 60 mm;中央竖吊索一根,中央竖吊索直径为 50 mm。

带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁是由外三岔形加劲梁、中央圆环形加劲梁和内三岔形加劲梁组成,加劲梁采用主次梁梁格结构形式,桥面加劲梁均采用 Q345 钢材制作。

外三岔形加劲梁的桥面宽度 6 m,主梁采用 300 mm × 700 mm 矩形钢管,钢管壁厚 12 mm,次梁采用 200 mm × 500 mm 矩形钢管,钢管壁厚 6 mm。

中央圆环形加劲梁采用圆环形梁形式,桥面宽度 4 m,内外环形主梁均采用 300 mm × 700 mm 矩形钢管,钢管壁厚 12 mm,次梁采用 200 mm × 400 mm 矩形钢管,钢管壁厚 5 mm。

内三岔形加劲梁是由相位差 120 度的三根矩形钢管梁组成,三根矩形钢管梁采用 300 mm × 700 mm 矩形钢管,钢管壁厚 14 mm,内三岔形加劲梁伸臂悬挑支撑中央圆环形加劲梁的外环梁。

在三岔形桥面加劲梁的转弯处设置收口圆弧梁,收口圆弧梁采用 100 mm × 300 mm 的矩形钢管,钢管壁厚 4 mm。

带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁的三个端部设置基础梁,基础梁设置在三岔河流峡谷地形的悬崖边缘,基础梁采用钢筋混凝土梁形式,钢筋混凝土梁 700 mm × 1 500 mm,内部配置钢筋,钢筋混凝土基础梁采用桩基础。

3 分析计算

3.1 有限元模型

鸡鸣三省大峡谷三岔形单主缆人行悬索桥采用 Midas 软件建立计算模型(见图 8),三岔形单主缆、

八字形背拉索和吊索体系采用索单元,桥面加劲梁和独柱桥塔采用梁单元。

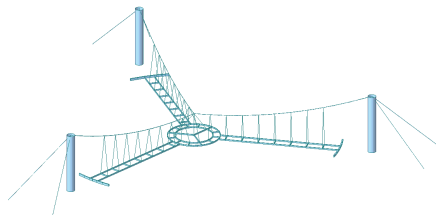


图8 三岔形单主缆悬索桥 Midas 模型

3.2 竖向荷载作用下的计算结果

三岔形单主缆人行悬索桥的主跨桥面做满布活荷载加载,桥面附加恒荷载采用均布荷载标准值 6 kN/m^2 ,桥面活荷载采用均布荷载标准值 5 kN/m^2 ,竖向荷载作用下的计算结果如下(见图9)。

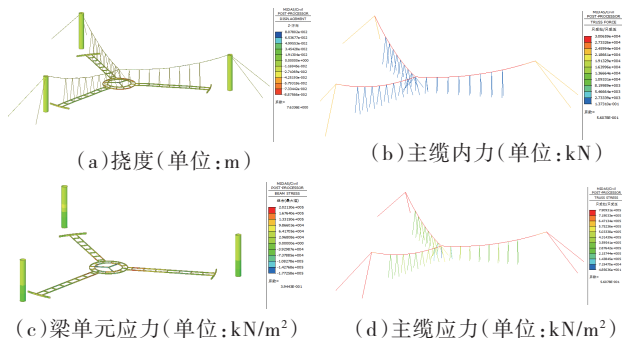


图9 竖向荷载作用下计算结果(恒+活)

在活荷载作用下,最大竖向位移出现在跨中位置,最大位移为 88.76 mm ,满足规范规定 $1/500$ 限值要求。主缆最大内力为 $30\,065.9 \text{ kN}$,主缆最大应力为 790.6 MPa ,满足承载能力要求。加劲梁最大应力为 202.1 MPa ,满足承载能力要求。桥塔最大应力为 52.9 MPa ,桥塔结构采用钢管混凝土,可以满足承载能力要求。

3.3 模态分析

主缆是悬索桥的主要承力结构,动力模态特性分析建模时以初拉力的形式计入主缆、吊索的成桥内力。为了不遗漏任何振型,分析过程中采用子分块法求解特征方程。

由图10中的计算结果可知,第1阶振型为正对称侧弯,频率为 0.617 Hz ,基频较大,表明斜向的人字形吊索是可有于提高抗侧刚度;第3阶振型为反对称竖弯,频率为 0.744 Hz ,频率较高,表明三岔形单主缆悬索桥的竖向刚度较大。

第13阶振型为正对称扭转,频率为 1.751 Hz ;第21阶振型为反对称扭转,频率为 1.971 Hz ,扭转振形出现比较晚,扭转频率较大,扭弯频率比值为 2.35 较高,本桥抗扭刚度大。

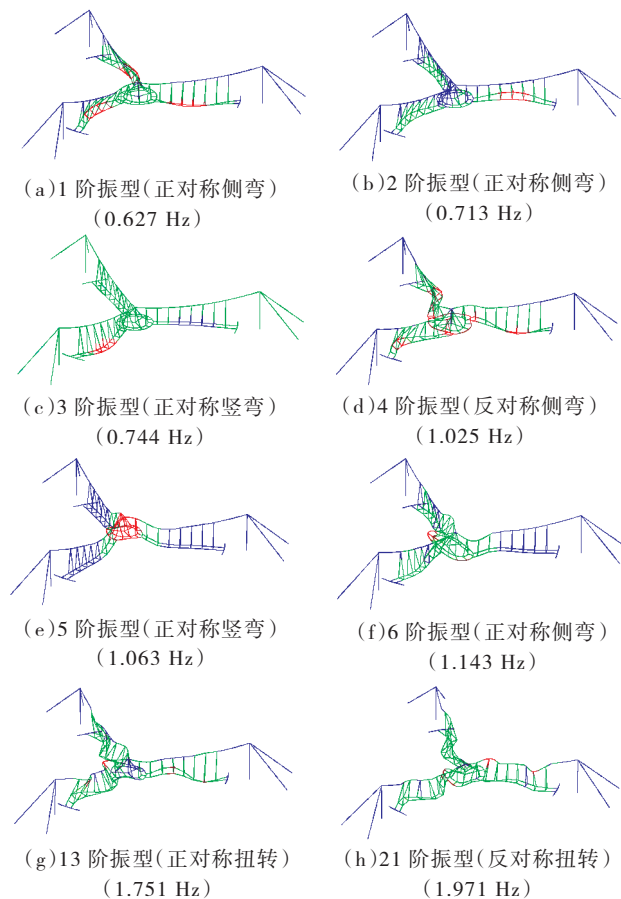


图10 典型模态

相比于直线形单主缆悬索桥,三岔形单主缆悬索桥是三维空间结构,三岔形单主缆和三岔形桥面加劲梁均为稳定的三角形结构形式,三个基础支座支承的三岔形桥面系加劲梁抗扭性能好,三岔形单主缆提供水平分力,抗侧刚度大幅度提高,两项结构技术措施可大幅度提高三岔形悬索桥结构空间刚度,具有良好的抗风稳定性。

3.4 颤振临界风速

悬索桥通常采用分离流扭转的颤振临界风速计算中的 Selberg 公式来估算颤振临界风速。

Selberg 公式:

$$V_{cr} = \eta_s \eta_a \omega_i b_1 \sqrt{\frac{r}{b_1} \mu \left[1 - \left(\frac{\omega_v}{\omega_i} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

式中: η_s 是主梁截面形状影响系数; η_a 是攻角效应系数,对于 0° 风攻角下的平板断面, η_s 、 η_a 均取 1.0 ; r 是桥梁断面(包括加劲梁和主缆)惯性半径; b_1 为加劲梁截面的半桥宽; μ 为桥梁与空气的密度比; m 为加劲梁及主缆的质量密度; ρ 为空气密度; ω_i 、 ω_v 分别为最低阶扭转圆频率和竖向圆频率。

$$\text{其中: } \mu = \frac{m}{\pi \rho b^2} \quad (2)$$

参数 b 为:加劲梁截面的桥宽 $b=2b_1$

本设计中, η_s 、 η_a 均取 1.0。经过计算, $r=3.63$ m, $\mu=2.51$, ω_1 、 ω_v 分别为 12.11 rad/s、4.47 rad/s。因此, 本设计桥的颤振临界风速为:

$$V_{cr}=1 \times 1 \times 12.11 \times 3 \times$$

$$\sqrt{\frac{3.63}{3} \times 2.51 \times \left[1 - \left(\frac{4.47}{12.11}\right)^2\right]} = 62.28 \text{ m/s}$$

分析表明, 该桥的颤振临界风速较高, 说明本设计具有良好的抗风稳定性。

4 结 语

针对鸡鸣三省大峡谷三岔形河流地形, 提出一种三岔形单主缆人行悬索桥的设计方案, 三岔形单主缆悬挂在三个独柱桥塔之上, 吊索体系悬挂带有中央圆环的三岔形桥面加劲梁, 三岔形单主缆人行悬索桥具有造型漂亮、结构简明、施工便捷、交通流畅和经济性好的优点。

三岔形单主缆和三岔形桥面加劲梁均为稳定的三角形结构形式, 三岔形单主缆提供水平分力, 大幅度提高了抗侧刚度, 三岔形桥面系加劲梁具有较大抗扭刚度, 三岔形单主缆人行悬索桥是三维空间结构, 具有良好的空间刚度。

鸡鸣三省三岔形单主缆人行悬索桥的前 10 阶

振型主要以侧弯、竖弯振动为主, 直到第 13 阶才出现正对称扭转振型, 扭转频率 1.751 Hz 较大, 扭弯频率比值为 2.35 较高, 颤振临界风速校验值高达 62.28 m/s, 抗风稳定性优良。

参考文献:

- [1] 宋路兵. 叙永县鸡鸣三省大桥主拱圈设计分析[J]. 四川建筑, 2021, 41(3):105-106.
- [2] 王继林. 三叶玫瑰形钢管混凝土飞燕式斜拉拱桥设计[J]. 现代交通技术, 2021, 18(4):42-46.
- [3] 徐金法. 鸭蛋拱形桥塔的三岔形人行景观斜拉桥设计[J]. 现代交通技术, 2021, 18(3):47-50, 57.
- [4] 李鸥. 大跨度单主缆悬索桥体系转换过程受力分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3):104-108.
- [5] 黄瑜, 罗天, 段佳宏, 等. 单主缆悬索桥抗倾覆稳定性研究[J]. 世界桥梁, 2020, 48(4):40-44.
- [6] 乔云强, 吴桂楠. 单主缆悬索桥人致振动研究及减振控制[J]. 世界桥梁, 2018, 46(2):68-73.
- [7] Astiz MA. Flutter Stability of Very Long Suspension Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(3):132-139.
- [8] 王忠彬. 张家界大峡谷玻璃桥缆索系统设计[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3):83-87.
- [9] Miao Feng. Theoretical Study on Space Coupling Free Vibration Analysis of Self-Anchored Cable-Stayed Suspension Bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(2974):1107-1111.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com