

波形钢腹板与砼腹板箱形拱圈稳定性对比分析

赵磊¹, 王芳²

(1. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 以某跨径 210 m 特大桥箱形拱圈为例, 利用 MIDAS/Civil 建立稳定性分析模型, 对波形钢腹板箱形拱圈与砼腹板箱形拱圈的屈曲稳定性进行对比分析。结果表明, 砼腹板箱形拱圈和波形钢腹板箱形拱圈主要发生的失稳特征为拱顶屈曲和 $1/8L$ 、 $1/4L$ 、 $3/8L$ 截面屈曲, 波形钢腹板箱形拱圈在第 10 阶模态下呈现拱脚屈曲的特征, 砼腹板箱形拱圈优于波形钢腹板箱形拱圈。

关键词: 桥梁; 波形钢腹板; 砼腹板; 箱形拱圈; 屈曲稳定性

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0092-03

2006 年, 陈宝春教授提出把波形钢腹板应用于拱桥的设计构想, 将占箱形拱圈自重约 $1/3$ 的砼腹板替换为波形钢腹板, 创新性地形成波形钢腹板砼箱形拱桥。波形钢腹板砼箱形拱桥具有拱圈自重轻、受力小、腹板不开裂、施工方便、跨越潜力大等优点, 与钢管砼拱桥和钢拱桥相比更具竞争力。但波形钢腹板砼拱桥作为一种新桥型, 在拱圈稳定性能方面研究较少。该文选取某单箱单室、跨径 210 m 的特大桥箱形拱圈, 利用 MIDAS/Civil 软件分别建立波形钢腹板箱形拱圈与砼腹板箱形拱圈稳定性分析模型, 研究两种拱圈的屈曲稳定性能。

1 工程概况

某特大桥位于黔西高原与黔中高原过渡带, 拱圈采用悬链线钢筋砼箱形截面, 净跨径为 210 m, 净矢高为 42 m, 净矢跨比为 $1/5$, 计算跨径为 212.311 m, 计算矢高为 42.436 m, 计算矢跨比为 $1/5$, 拱轴系数为 1.67。全桥总体布置见图 1。

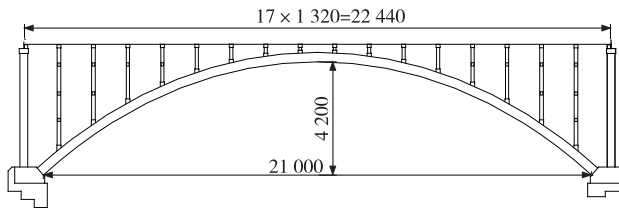


图 1 桥型布置(单位: cm)

拱圈为单箱单室截面, 半幅箱宽 7.0 m、高 3.5 m。拱脚支架现浇段顶底板厚度由 80 cm 渐变至 40 cm, 腹板厚度由 80 cm 渐变至 50 cm; 拱圈其他节段顶底板厚 40 cm, 腹板厚 50 cm; 拱圈截面构造见图 2。主要技术标准: 桥梁设计荷载为公路—I

级; 单向两车道; 拱圈主要材料为 C50 砼, 计算弹性模量为 3.45×10^4 MPa, 重力密度为 26 kN/m^3 。

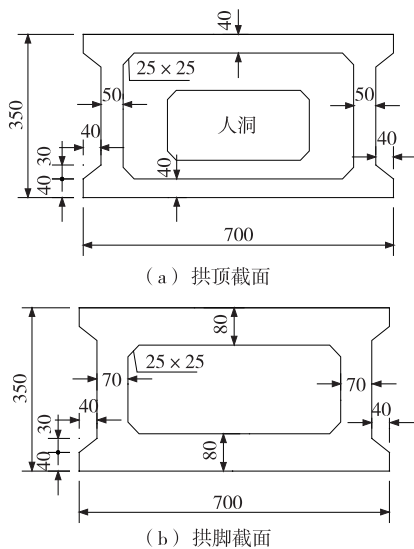


图 2 拱圈截面构造示意图(单位: cm)

2 稳定性分析理论

根据线性稳定分析理论, 结构的稳定安全系数特征方程为:

$$([K_D] + [K_G]) \{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中: $[K_D]$ 为结构弹性刚度矩阵, 对于杆系结构, 其反映单元截面刚度 EA 、 EI 的影响; $[K_G]$ 为几何刚度矩阵, 即初始应力矩阵; δ 为 $\{F\}$ 作用下的位移。

按式(1)可求得荷载 $\{F\}$ 作用时的位移 δ 。如果荷载不断增加, 则结构位移不断增大, 由于 $[K_G]$ 与荷载大小有关, 这时结构的力与位移不再是线性关系, 若 $\{F\}$ 达到 $\lambda_{cr} \{F\}$ 时, 结构呈现随遇平衡状态, 则 $\lambda_{cr} \{F\}$ 即为所要求的临界荷载。设 $\{F\}$ 增大 λ

倍,则内力和几何刚度矩阵也增大 λ 倍,有:

$$([K_D] + \lambda [K_G]) \{\delta\} = \lambda \{F\} \quad (2)$$

如果 λ 足够大,使得结构达到随遇平衡状态,即当 $\{\delta\}$ 变为 $\{\delta\} + \Delta\{\delta\}$ 时,式(2)平衡方程也能满足,则有:

$$([K_D] + \lambda [K_G]) (\{\delta\} + \Delta\{\delta\}) = \lambda \{F\} \quad (3)$$

同时满足以上两式的条件方程为:

$$([K_D] + [K_G]) \{\Delta\delta\} = 0 \quad (4)$$

式(4)即为计算稳定安全系数的特征方程。若有 n 阶,则理论上存在 n 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 和对应的 n 个特征向量(失稳模态)。但工程上只有最小的特征值或最小的稳定安全系数才有实际意义,这时特征值为 λ_{cr} ,临界荷载为 $\lambda_{cr} \{F\}$ 。

3 有限元模型建立

采用MIDAS/Civil软件建模,把该桥砼拱圈模型划分为186个节点、212个梁单元,波形钢腹板拱圈模型划分为207个节点、220个梁单元。波形钢腹板拱圈采用对应的单箱单室截面,波形钢腹板拱圈采用JT/T 784—2010《组合结构桥梁用波形钢腹板规范》中的1600型,采用Q345低合金高强结构钢,计算弹性模量为 2.06×10^5 MPa。依据国内外已建波形钢腹板梁桥统计结果,波形钢板的最小厚度主要为8~10 mm,为满足拱桥的构造需要并节约钢材,取波形钢板厚度为10 mm。拱圈钢腹板几何尺寸见图3。

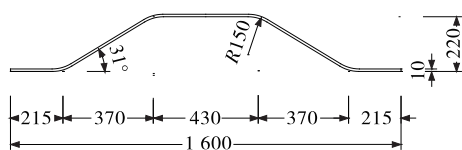


图3 波形钢腹板几何尺寸(单位:mm)

屈曲分析的荷载稳定安全系数(临界荷载系数)对应于某种工况或荷载组合,该文主要分析车道荷载全桥满布的拱圈轴力最大荷载工况。建立该桥稳定性屈曲分析模型,将上部桥面铺装荷载、排架和盖梁重量作为恒载加载于对应的拱圈位置,并将全桥作用下的车道荷载作为活载进行有限元模型加载,对比分析波形钢腹板箱形拱圈、砼腹板箱形拱圈的屈曲模态和稳定安全系数。

4 拱圈的稳定性分析

4.1 屈曲模态及稳定安全系数

(1) 1阶屈曲模态。在车道荷载全桥满布的荷

载工况下,波形钢腹板箱形拱圈1阶屈曲模态的稳定安全系数(临界荷载系数)为5.193,砼腹板箱形拱圈为23.94(见图4)。

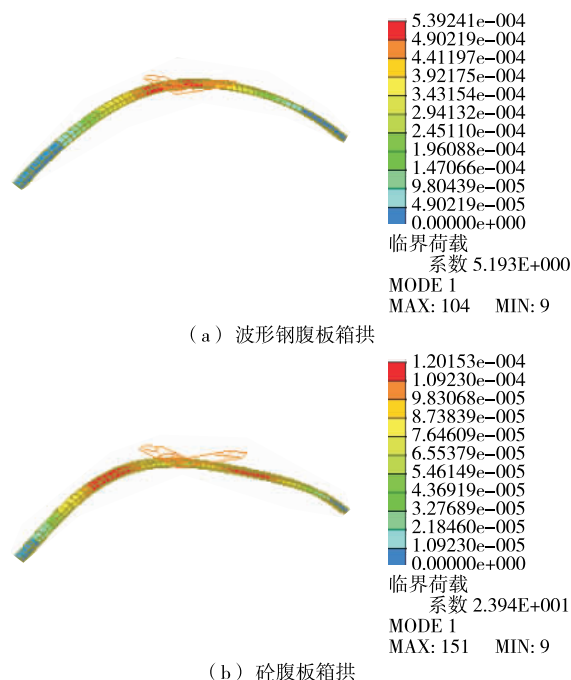


图4 拱圈1阶屈曲模态(单位:m)

(2) 2阶屈曲模态。在车道荷载全桥满布的荷载工况下,波形钢腹板箱形拱圈2阶屈曲模态的稳定安全系数(临界荷载系数)为13.34,砼腹板箱形拱圈为26.1(见图5)。

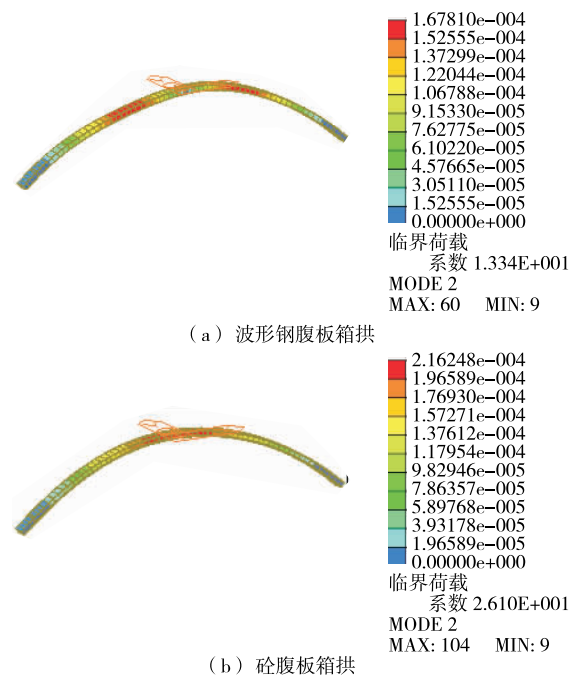


图5 拱圈2阶屈曲模态(单位:m)

(3) 3阶屈曲模态。在车道荷载全桥满布的荷载工况下,波形钢腹板箱形拱圈3阶屈曲模态的稳

定安全系数(临界荷载系数)为24.98,砼腹板箱形拱圈为38.56(见图6)。

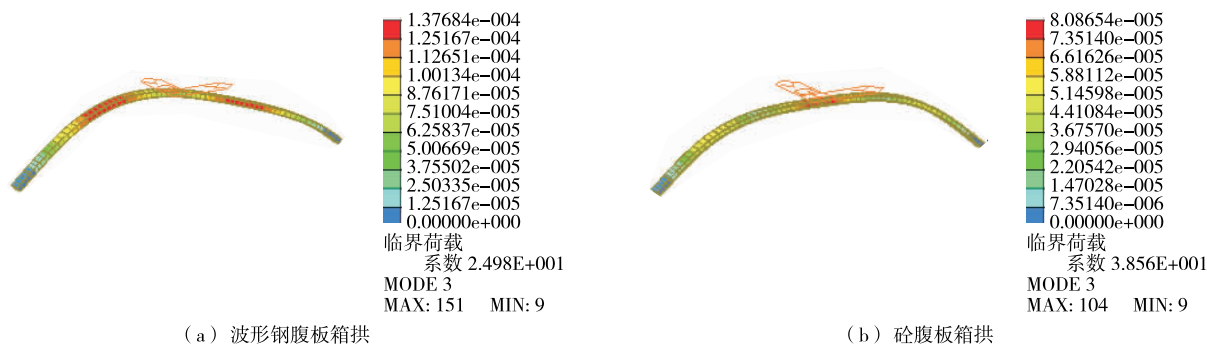


图6 拱圈3阶屈曲模态(单位:m)

4.2 稳定安全系数及屈曲特征分析

在车道荷载全桥满布的荷载工况下,波形钢腹

板箱形拱圈、砼箱形拱圈前10阶屈曲模态的稳定安全系数(临界荷载系数)和屈曲特征见表1。

表1 拱圈稳定安全系数和屈曲特征

阶次	稳定安全系数		屈曲特征	
	波形钢腹板箱拱	砼腹板箱拱	波形钢腹板箱拱	砼腹板箱拱
1	5.19	23.94	拱顶屈曲	3/8L 截面屈曲
2	13.34	26.10	3/8L 截面屈曲	拱顶屈曲
3	24.98	38.56	3/8L 截面屈曲	拱顶屈曲
4	35.47	58.95	1/4L 截面屈曲	1/4L 截面屈曲
5	36.13	64.84	拱顶屈曲	1/8L 截面屈曲
6	54.34	87.23	1/8L 截面屈曲	3/8L 截面屈曲
7	59.87	116.90	1/4L 截面屈曲	1/4L 截面屈曲
8	61.75	120.10	1/8L、3/8L 截面屈曲	1/8L 截面屈曲
9	70.98	147.40	1/8L 截面屈曲	拱顶屈曲
10	71.66	175.00	拱脚与拱顶屈曲	1/8L 截面屈曲

注:各屈曲截面均为拱圈对称截面,表示对称屈曲; L 为跨径。

由表1可知:在车道荷载全桥满布的荷载工况下,砼腹板箱形拱圈和波形钢腹板箱形拱圈主要发生的失稳特征为拱顶屈曲、1/8L 截面屈曲、1/4L 截面屈曲和3/8L 截面屈曲;波形钢腹板箱形拱圈由于拱脚顶底板厚度设计较薄,在第10阶模态下呈现拱脚屈曲的特征;由于整体刚度的差异,波形钢腹板箱形拱圈各阶屈曲模态的稳定安全系数(临界荷载系数)均小于砼腹板拱圈,在抗稳定屈曲性能方面,砼腹板箱形拱圈优于波形钢腹板箱形拱圈。

5 结论

(1) 在车道荷载全桥满布的荷载工况下,砼腹板箱形拱圈和波形钢腹板箱形拱圈主要发生的失稳特征为拱顶屈曲、1/8L 截面屈曲、1/4L 截面屈曲和3/8L 截面屈曲。

(2) 波形钢腹板箱形拱圈由于拱脚顶底板厚度

设计较薄,在第10阶模态下呈现拱脚屈曲的特征。

(3) 波形钢腹板箱形拱圈各阶屈曲模态的稳定安全系数(临界荷载系数)均小于砼腹板拱圈,波形钢腹板箱形拱圈的抗屈曲稳定性能较差。

参考文献:

- [1] 陈宝春,王远洋,黄卿维.波形钢腹板混凝土拱桥新桥型构思[J].世界桥梁,2006(4).
- [2] 姜燕.波形钢腹板混凝土拱桥试设计研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [3] 邢雯芳.大跨度钢管混凝土拱桥的稳定性分析[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [4] JT/T 784—2010,组合结构桥梁用波形钢腹板[S].
- [5] GB 50017—2003,钢结构设计规范[S].

收稿日期:2018—04—17