

引用本文:王海山,谢伟烈,李竞远,等.拱脚带水平约束弹簧的车辐拱平面内稳定性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(2):100-108.

WANG Hai-shan, CHEA Pumsakheyana, LI Jing-yuan, et al. In-plane Stability of Cable-arches with Horizontal Restraining Spring at Foot of Arch[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 100-108.

DOI:10.19815/j.jace.2019.08057

拱脚带水平约束弹簧的车辐拱平面内稳定性能

王海山¹, 谢伟烈², 李竞远², 郭彦林²

(1. 浙江中南建设集团钢结构有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:针对非落地拱承受竖向荷载作用时拱脚水平约束刚度不足会产生水平位移,导致拱脚的受力性能和承载能力发生较大变化的问题,采用 ANSYS 有限元软件建立拱脚带水平约束弹簧的模无索拱和车辐拱有限元模型。采用数值分析方法分别对无索拱和车辐拱在全跨竖向均布荷载和半跨竖向均布荷载进行一阶弹性和弹塑性分析,研究其拱脚水平弹簧刚度幅值变化对车辐拱受力性能的影响,包括拱脚水平推力和位移的变化、沿拱轴线内力变化和分布以及平面内稳定承载性能等。结果表明:车辐拱中的拉索可以有效约束拱脚的水平位移和减小水平推力,显著提高拱整体刚度和稳定承载力;车辐拱中的拉索可以有效限制拱脚弹簧刚度幅值的下降对车辐拱内力分布及稳定承载性能的影响;研究成果为非落地车辐拱及拱脚支承构件的设计提供了依据。

关键词:拱脚水平约束弹簧;弹性柔度系数;车辐拱;平面内稳定性能;极限承载力

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)02-0100-09

In-plane Stability of Cable-arches with Horizontal Restraining Spring at Foot of Arch

WANG Hai-shan¹, CHEA Pumsakheyana², LI Jing-yuan², GUO Yan-lin²

(1. Zhejiang Zhongnan Construction Group Steel Structure Co., Ltd., Hangzhou 310052, Zhejiang, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In practical engineering, the horizontal displacement would occur due to the insufficient rigidity of the horizontal restraint at the feet of the non-grounded arch subjected to the vertical load. In the view of the problem that horizontal displacement at the arch feet would significantly change the mechanical performance and load-carrying capacity of the arch, the finite element model of the conventional arch and the spoke arch with the horizontal restraining spring at the arch foot was established by using ANSYS finite element software. The full span distributed vertical load and half span distributed vertical load were discussed in the numerical analyzing. The first-order and the inelastic analysis were carried out to investigate the influence of the spring stiffness amplitude on the mechanical properties of the conventional arch and the spoke arch, including the changes of the horizontal thrust and displacement of the arch foot, the changes of the internal force along the axis of the arch and the in-plane stability performance. The results show that cables in the spoke arch can significantly reduce the horizontal displacement and the

收稿日期: 2019-08-31

基金项目: 国家重点研发计划重点项目(2016YFC0701201)

作者简介: 王海山(1976-),男,湖北郧西人,高级工程师, E-mail: whsh@foxmail.com。

horizontal thrust of the arch feet, significantly improve the overall stiffness and the load-carrying efficiency over the conventional arch. Moreover, cables in the spoke arch can significantly limit the influence of the decrease in the spring stiffness amplitude on the internal forces and the stability performance of the spoke arch. These conclusions provide fundamentals for the strength design of the spoke arches and the supporting components of the arch feet.

Key words: horizontal restraining spring of arch foot; elastic flexibility coefficient; spoke arch; in-plane stability performance; ultimate bearing capacity

0 引言

拱结构历史悠久,拱凭借本身的曲线形状产生水平推力,可以将外荷载产生的一部分弯矩转换为轴压力,使构件截面均匀承压的效率提高。相比相同跨度的梁,拱结构沿轴线分布的弯矩幅值显著降低,整体刚度和承载力均有明显的提高^[1]。针对两铰和固支钢拱,国内外对拱平面内的稳定性能及设计方法,已经有了很成熟的研究成果^[2-11]。

由于钢拱以压弯为主,往往会存在稳定问题,因此在实际工程中常引进拉索来改善钢拱的受力性能,索拱结构便应运而生。车辐拱(图 1)是索拱的一种典型形式,其不仅受力合理,承载效率高,而且造型优美,同时拉索还可以减小拱脚的水平推力。车辐拱非常受到建筑师的青睐,已广泛应用于空间结构工程,如图 2 所示。王高宁等^[12-13]深入研究了铰支车辐拱平面内弹性屈曲和弹塑性稳定性能。计算结果表明,在全跨和偏跨竖向均布荷载作用下,车辐拱布索方案可以降低钢拱对几何初始缺陷的敏感性,显著提高钢拱的平面内整体刚度和稳定承载力。此外,对拉索施加预应力,其对承载力几乎没有影响,反而过大的预应力会降低车辐拱的承载力。由于车辐拱中的拉索占用了建筑室内净空,往往被应用在非落地的钢拱建筑中。此时,拱脚产生的水平推力会对支承结构增加负担,支承结构的水平侧移也会改变车辐拱的受力性能。

考虑车辐拱拱脚支承柱或墙的侧向水平刚度影响,车辐拱拱脚可简化为竖向刚性连杆和水平弹簧连接的计算模型(图 3,其中, θ 为角度坐标, S 为拱的全弧长, H 为矢高, L 为车辐拱跨度, h 为索盘高度, k_h 为两侧水平弹簧刚度, R 为拱的半径, ϕ 为钢拱的半开角。)。对于无索拱来说,拱脚水平约束弹簧刚度的不足会削弱拱脚推力,进而增大沿拱轴线的弯矩,使得拱在竖向荷载作用下的力学行为发生变化。本文重点研究拱脚水平约束弹簧对车辐拱受力性能的影响,并依据计算结果提出设计建议。

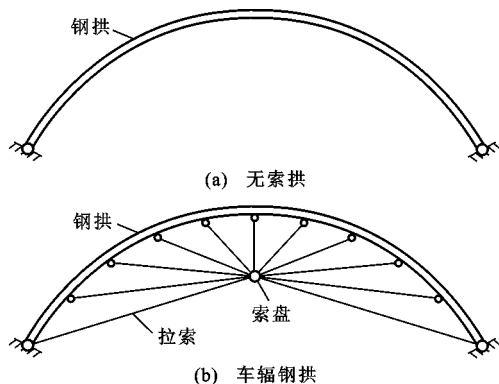


图 1 无索拱和车辐拱的结构示意图

Fig. 1 Structural Diagram of Cable Free Arch and Spoke Arch

Bradford 等^[14-17]对拱脚带约束弹簧的拱结构进行了深入研究。文献[14]假设两侧拱脚水平约束弹簧的刚度相等,采用虚功原理建立拱脚水平约束弹簧抛物线拱在跨中集中力作用下的非线性平衡方程,给出了相应弹性屈曲荷载的闭合解,并与有限元分析结果进行了对比验证。

文献[15]进一步考虑拱的材料非线性,采用理论推导、数值计算以及试验方法研究了拱脚带水平约束弹簧拱的弹塑性稳定性能。另一方面,文献[16],[17]在文献[15]的基础上,考虑不同方向的拱脚约束弹簧(包括径向、切向和转动方向等约束弹簧)刚度变化对拱结构稳定性能的影响。此外,杨洋等^[18-19]推导了拱脚带水平约束弹簧圆弧钢拱的跨中轴力和拱脚位移,采用有限元法进行弹性屈曲分析和弹塑性承载力分析,基于数值计算结果拟合得到弹性屈曲荷载和极限承载力。分析中将拱脚水平弹簧刚度量纲一化得到如式(1)所示的弹性柔度系数 ζ ,简化了计算和分析过程。显然,当 $\zeta=0$ 时,拱脚水平弹簧的刚度为无穷大,钢拱为理想两铰拱。相反,当 ζ 为正无穷大时,其弹簧刚度为 0,在竖向荷载作用下,拱脚无水平约束,可以沿水平方向自由移动,故钢拱变为弧形梁。

$$\zeta = \frac{2E_1 I_1}{k_h \phi^5 R^3} = \frac{2E_1 A_1}{k_h \phi^3 \lambda_g^2 R} \quad (1)$$



(a) 德国汉堡博物馆庭院



(b) 瑞士库尔汽车终点站



(c) 美国底特律通用汽车总部温室

图 2 车辐拱在工程的应用

Fig. 2 Application of Spoke Arch in Engineering

式中： I_1 为钢拱截面的惯性矩； A_1 为钢拱的截面面积； λ_g 为拱的几何长细比； E_1 为钢拱的弹性模量。

目前，非落地车辐拱的工程应用逐渐增多，但考虑拱脚支承结构水平刚度影响的研究成果却很少。本文以车辐拱作为研究对象，研究拱脚的水平弹簧刚度变化对车辐拱平面内稳定性能的影响。采用有限元法对车辐拱在全跨竖向均布荷载（全跨荷载）和半跨竖向均布荷载（半跨荷载）作用下的一阶弹性性能和弹塑性稳定承载力进行研究，揭示拱脚带水平约束弹簧的车辐拱内力变化以及平面内失稳机理，为车辐拱结构设计提供依据。

本文取典型尺寸的车辐拱（图 3）进行研究，其跨度取 $L=50\text{ mm}$ ，矢跨比 $H/L=0.3, 0.4$ ，索盘高度按照 $h=0.5H$ 计算，拉索沿钢拱轴线均匀布置，并依据实际情况，数量取 11 根。钢拱截面采用圆钢管，尺寸为 $700\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ，拉索直径为 60

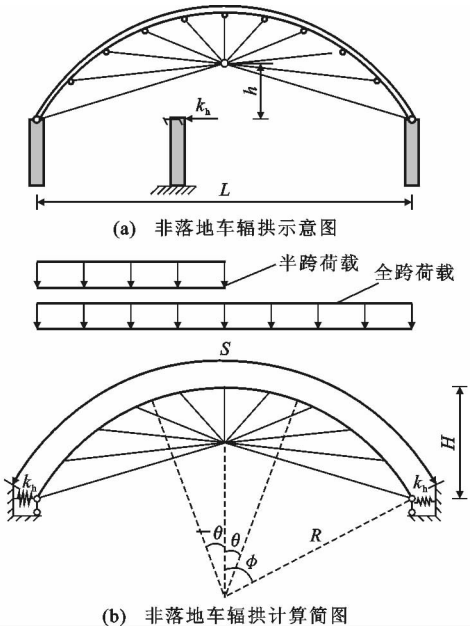


图 3 拱脚带水平约束弹簧的车辐拱计算模型及荷载工况示意图

Fig. 3 Calculation Model and Load Case Diagram of Spoke Arch with Horizontal Restraint Spring at Arch Foot

mm。计算和分析过程中，采用弹性柔度系 ζ 作为反映拱脚水平约束弹簧刚度的参数。计算结果可为这一跨度范围内的车辐拱提供设计指导。

1 一阶弹性分析

车辐拱在荷载作用下的内力和变形大小及其分布是结构设计的重要依据。本文采用有限元软件 ANSYS 建立无索拱和车辐拱的计算模型并进行一阶弹性分析，研究拱脚水平弹簧约束刚度变化对无索拱和车辐拱在全跨荷载和半跨荷载作用下的拱脚水平推力、变形以及沿拱轴线内力分布的影响。其中，钢拱由 Beam188 单元模拟，其弹性模量 $E_1=206\text{ GPa}$ ，泊松比为 0.3；拉索采用只拉不压的 Link10 单元，其拉伸弹性模量 $E_2=190\text{ GPa}$ ；拱脚水平弹簧采用 Link8 单元，两侧弹簧等刚度设计。仅考虑无索拱和车辐拱的平面内稳定问题，考虑到拉索初始预应力对车辐拱的稳定性能影响不显著^[12]，故本文不考虑给拉索施加预应力。

1.1 全跨荷载作用

研究在全跨荷载作用下弹性柔度系数 ζ 变化对无索拱和车辐拱拱脚水平推力的影响，计算结果如图 4 所示，其中， F_x 为不同 ζ 值对应的拱脚推力， $F_{x,0}$ 为 $\zeta=0$ （拱脚为固定铰）对应的拱脚推力。以矢跨比 0.3 为例，图 5~7 分别给出了单位全跨荷载作用下的变形、弯矩和轴力图，其中， M 和 N 分别为弯

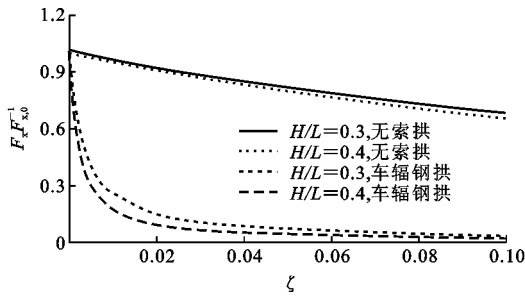


图 4 弹性柔度系数 ζ 对无索拱和车辐拱的拱脚推力影响 (全跨荷载)

Fig. 4 Influence of Elastic Flexibility Coefficient ζ on Thrust of Arch Foot of Cable-free Arch and Spoke Arch (Full Span Load)

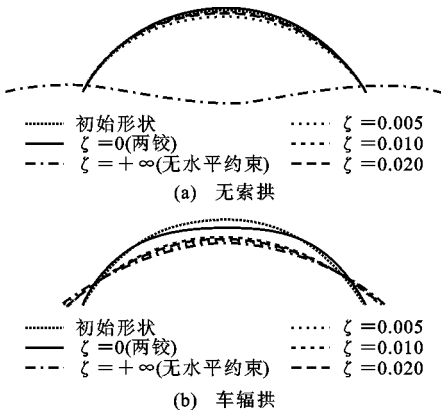


图 5 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的变形 (全跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 5 Deformation of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Full Span Load and $H/L=0.3$)

矩和轴力, M_{\max} 和 $N_{\max,0}$ 分别为最大弯矩和轴力。图 5~7 反映了不同 ζ 值对无索拱和车辐拱变形和内力的相对影响。内力分布图中横坐标均为量纲一的角度坐标 θ/ϕ ; 纵坐标为相应内力幅值与拱脚为固定铰对应的最大内力幅值的比值。另外, 在车辐拱的变形图中, 将拉索单元去掉, 仅保留钢拱的轮廓线, 且将变形适当放大。

计算结果表明, 无索拱的水平推力下降比较平缓, 导致各 ζ 值对应的变形和内力分布区别十分明显。随着 ζ 的增大, 无索拱的变形和内力分布逐渐接近于拱脚无水平约束的弧形梁, 即跨中轴力逐渐归零, 最后拱沿轴线完全向下挠曲, 其中跨中弯矩和变形最大。当拱脚无水平约束时, 弧形梁对应的弯矩幅值约为两铰拱的 16 倍。

对于车辐拱, 当 ζ 从 0 增加到 0.02 时, 水平推力迅速下降, 导致在这范围之内两铰车辐拱与拱脚带水平约束弹簧车辐拱的受力机理差异较大。当 ζ

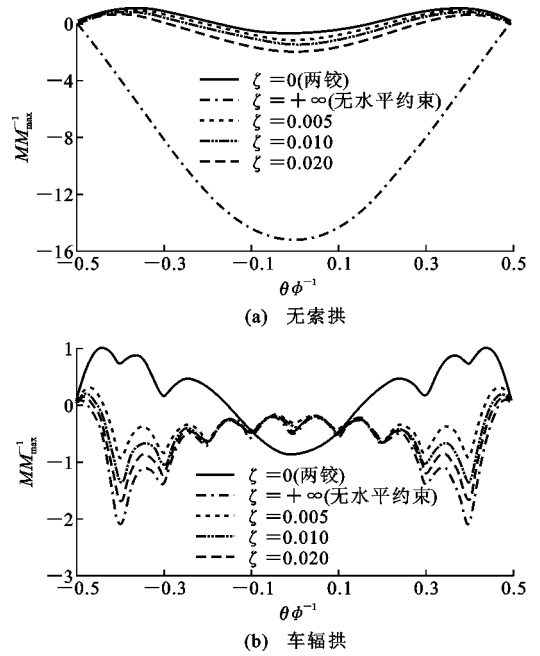


图 6 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的弯矩图 (全跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 6 Bending Moment Diagram of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Full Span Load and $H/L=0.3$)

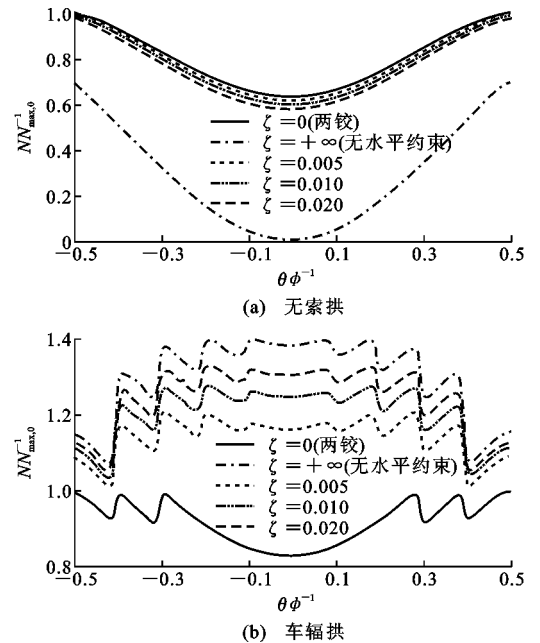


图 7 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的轴力图 (全跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 7 Axial Force Diagram of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Full Span Load and $H/L=0.3$)

达到 0.02 后, 拱脚推力曲线接近平台阶段并趋近于 0, 表明其受力机理与车辐弧形梁基本相同。当拱脚为固定铰 ($\zeta=0$) 时, 两铰车辐拱两侧向外凸曲, 而顶部向下挠曲, 其中两侧各 $1/20$ 跨到 $3/20$ 跨位置和

拱顶部位的弯矩较大。当拱脚受到水平弹簧约束或拱脚无水平约束时,车辐拱沿拱轴线基本都是负弯矩,其中跨中弯矩较小。与无索拱不同的是,车辐拱随着拱脚推力被削弱,轴力逐渐增大,故降低了弯矩幅值,受力更加合理。当拱脚无水平约束时,车辐弧形梁的最大轴力相比两铰车辐拱增大了 2/3,而最大弯矩幅值仅增加了 1 倍左右。

综上可知,在全跨荷载作用下,拱脚水平弹簧刚度变化对无索拱的受力性能影响非常显著。相反,虽然车辐拱的力学行为对拱脚水平约束条件变化也十分敏感,但拱脚水平弹簧刚度变化对车辐拱内力幅值的影响较小。

1.2 半跨荷载作用

与全跨荷载作用类似,研究了在单位半跨荷载作用下弹性柔度系数变化对无索拱的拱脚推力、变形以及内力的影响,计算结果见图 8~11。在半跨荷载作用下,无索拱和车辐拱的水平推力与弹性柔度系数的变化趋势与全跨荷载工况相似。

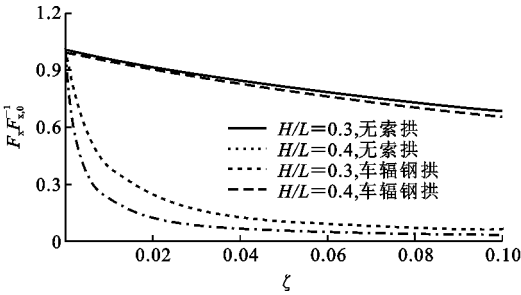


图 8 弹性柔度系数 ζ 对无索拱和车辐拱的拱脚推力影响 (半跨荷载)

Fig. 8 Influence of Elastic Flexibility Coefficient ζ on Thrust of Arch Foot of Cable-free Arch and Spoke Arch (Half Span Load)

对于无索拱,计算结果表明,随着 ζ 增大,轴力逐渐减小,加载半跨内的最大弯矩幅值不断增大,非加载半跨内的挠曲方向逐渐转向。当拱脚无水平约束时,拱轴线完全向下挠曲,其最大弯矩幅值约为两铰拱的 4 倍。

对于车辐拱,计算结果表明,半跨荷载作用下拱脚固定和拱脚非固定(带水平约束弹簧或无水平约束)对应的变形和轴力分布都比较相似,但是弯矩分布区别十分明显。随着弹簧刚度减小,轴力逐渐增大,拱两侧 1/5 跨的弯矩也逐渐增大且转向,但在拱顶相邻两侧的弯矩反而逐渐减小。当拱脚无水平约束时,最大弯矩幅值仅约为两铰车辐拱的 1/2。这表明拱脚的水平弹簧约束可以改善车辐拱在半跨荷载作用下的受力性能。

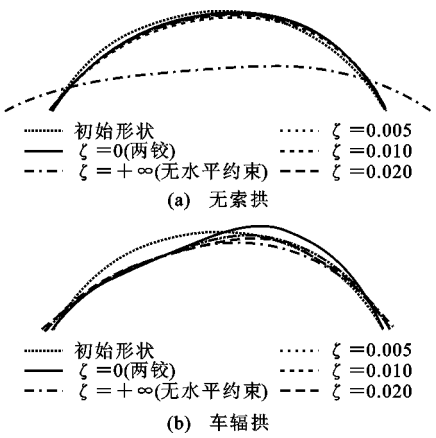


图 9 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的变形 (半跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 9 Deformation of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Half Span Load and $H/L=0.3$)

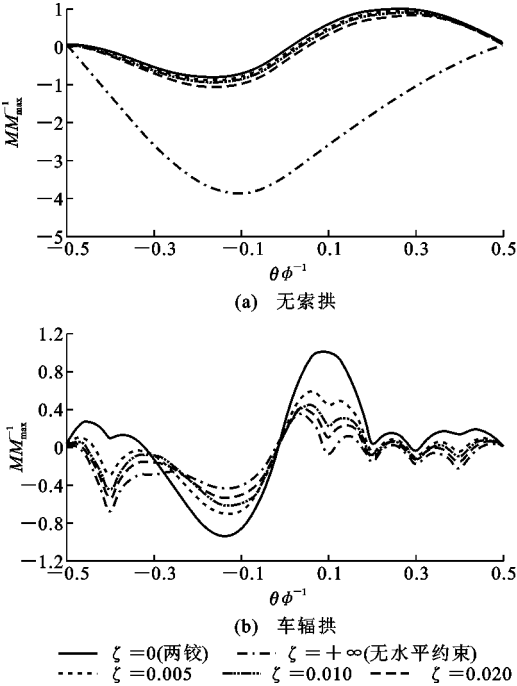


图 10 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的弯矩图 (半跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 10 Bending Moment Diagram of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Half Span Load and $H/L=0.3$)

总之,在半跨荷载作用下,减小拱脚水平弹簧刚度会显著降低无索拱的承载力,但可以提升车辐拱的承载力。

2 弹塑性稳定承载力分析

除了对拱轴线内力变化进行分析外,本文研究拱脚水平弹簧刚度变化对无索拱和车辐拱在全跨荷载和半跨荷载作用下弹塑性稳定性能的影响。分析

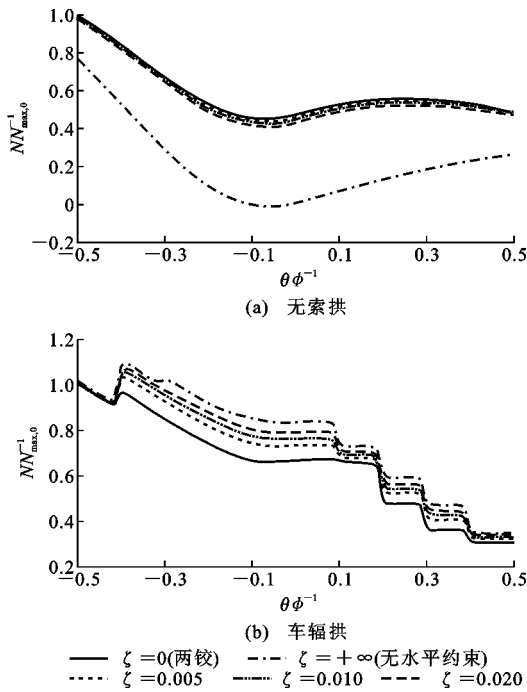


图 11 不同 ζ 的无索拱和车辐拱对应的轴力图
(半跨荷载且 $H/L=0.3$)

Fig. 11 Axial Force Diagram of Cable-free Arch and Spoke Arch with Different ζ (Half Span Load and $H/L=0.3$)

中考虑几何初始缺陷的影响,给出车辐拱相应的荷载-位移曲线以及极限状态下的应力分布。最后,研究了拱脚柔度系数对其极限稳定承载力的影响,并比较了无索拱与车辐拱二者之间的差异。在计算分析中,钢拱材料单向拉伸试验对应的材料应力-应变曲线采用双线性强化模型,其屈服强度 $f_y = 345$ MPa,初始屈服后的切线模量为 $0.02E_1$;由于拉索的破断力较高,故索采用理想弹性材料,其他保持与上文相同。此外,取拱轴线正弦双波反对称屈曲模式^[12,20]作为钢拱的几何初始缺陷分布模式(图 12),并且考虑到制作、施工中的误差以及残余应力等因素,取其缺陷幅值 δ 为全弧长的 $1/1\,000$ 。

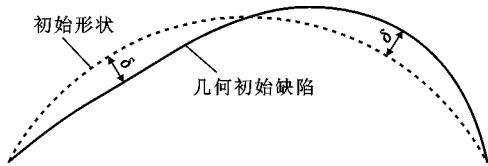


图 12 无索拱和车辐拱的几何初始缺陷
Fig. 12 Geometric Initial Defects of Cable-free Arch and Spoke Arch

2.1 全跨荷载作用

采用本文有限元模型计算车辐拱在全跨荷载作用下的荷载-位移曲线,计算结果见图 13,14。两图分别反映了不同弹性柔度系数 ζ 值对应的荷载-拱

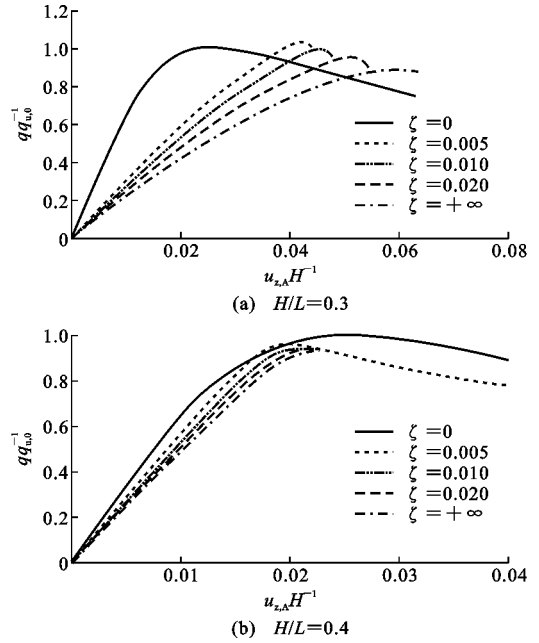


图 13 不同 ζ 的车辐拱对应的荷载-拱顶竖向位移曲线
(全跨荷载)

Fig. 13 Curves of Load-vertical Displacement of Arch Top of Spoke Arches with Different ζ (Full Span Load)

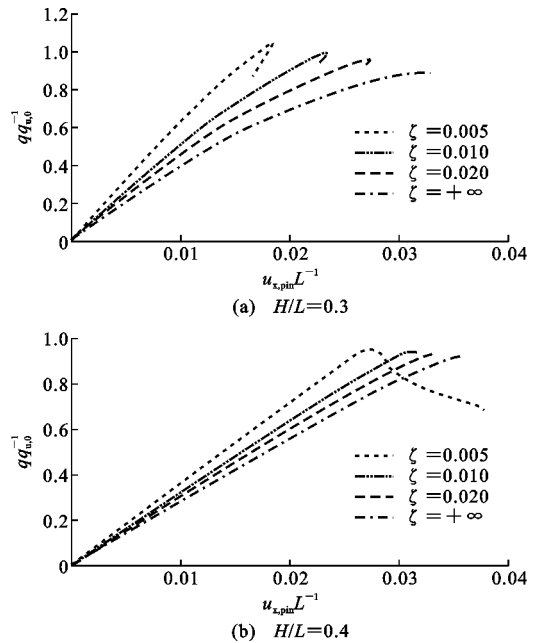


图 14 不同 ζ 的车辐拱对应的荷载-拱脚水平位移曲线
(全跨荷载)

Fig. 14 Curves of Load-horizontal Displacement of Arch Foot of Spoke Arches with Different ζ (Full Span Load)

顶竖向位移和荷载-拱脚相对位移之间的变化关系,其中纵坐标均为荷载集度 q 与两铰车辐拱的极限承载力 $q_{u,0}$ 的比值,图 13 的横坐标为拱顶竖向位移 $u_{x,A}$ 与矢高 H 的比值,图 14 的横坐标为拱脚相对水平位移 $u_{x,pm}$ 与跨度 L 的比值。图 15 给出了 $\zeta =$

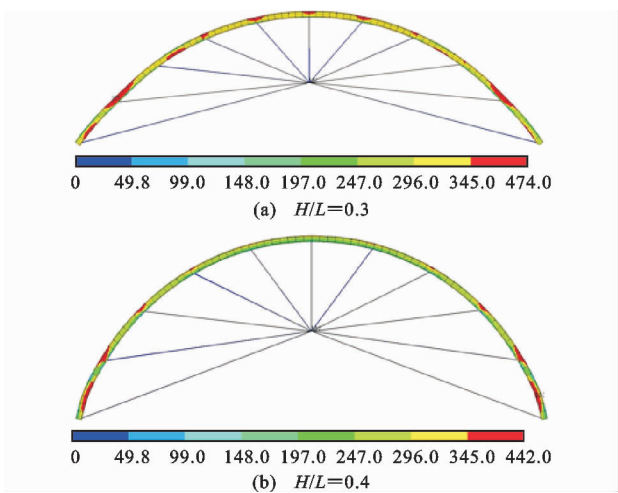


图 15 车辐拱在极限状态对应的钢拱应力
(全跨荷载且 $\zeta=0.02$) (单位:MPa)

Fig. 15 Stress of Steel Arch Corresponding to Limit
State of Spoke Arch (Full Span Load and
 $\zeta=0.02$) (Unit:MPa)

0.02 的车辐拱对应的钢拱 Von Mises 应力图。

图 13 和图 14 计算结果表明,在加载阶段初期,荷载和位移几乎线性变化。对比矢跨比 0.3 和 0.4 的车辐拱,前者柔度系数的增大对车辐拱刚度的削减比后者大,说明车辐拱更适合应用于大矢跨比的情况。另一方面,由于拱脚相连的拉索可以有效地约束拱脚向外移动,达到极限状态时,车辐拱的拱脚水平位移很小,仅为跨度的 1.2%~3.3%(图 14)。此外,计算结果也表明,拱脚柔度系数对其承载力的影响有限。

图 15 的应力云图表明,在极限状态下, $\zeta=0.02$ 的车辐拱两侧沿轴线的应力分布基本对称,由于在拉索位置存在局部集中力,有明显的屈服区域扩展。此外,在车辐拱两侧 1/10 跨位置附近,塑性区的扩展和弯曲变形较大。

图 16 总结了在全跨荷载作用下,拱脚水平弹簧刚度变化对弹塑性承载力的影响,其中纵坐标为极限承载力 q_u 与拱脚为固定铰时对应的极限承载力 $q_{u,0}$ 的比值。可以发现,无索拱和车辐拱的承载力曲线都存在峰值。对于无索拱,当弹性柔度系数 $\zeta=0.005$ 时,对应的承载力最大。当弹性柔度系数超过 0.005 后,无索拱的承载力开始明显下降。 $\zeta=0.1$ 对应的极限承载力仅为两铰无索拱的 35%~50%。

对于车辐拱,存在极限承载力峰值对应的最优柔度系数,其值为 $\zeta=0.0004$ 。与无索拱不同的是当 ζ 达到 0.02 后,承载力基本没有变化, ζ 增加到 0.10 时仅有约 10% 的折减。

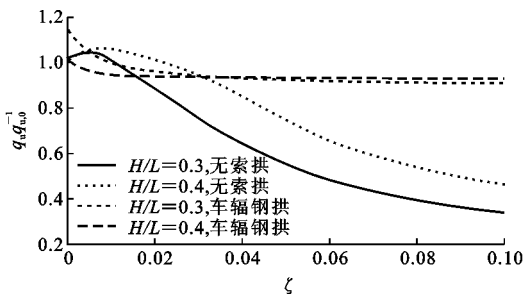


图 16 弹性柔度系数 ζ 对无索拱和车辐拱极限承载力的影响(全跨荷载)

Fig. 16 Influence of Elastic Flexibility Coefficient ζ on
Ultimate Bearing Capacity of Cable-free Arch and
Spoke Arch (Full Span Load)

2.2 半跨荷载作用

本文研究了半跨荷载作用下弹性柔度系数变化对无索拱和车辐拱稳定承载性能的影响,计算结果如图 17~20 所示。图 17 横坐标为 3/8 跨点竖向位移 $u_{z,B}$ 与矢高 H 的比值。

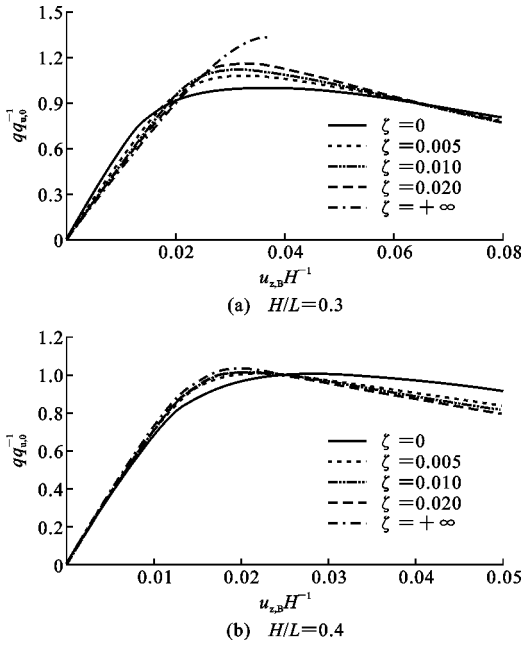


图 17 不同 ζ 车辐拱对应的荷载-3/8 跨点竖向位移曲线
(半跨荷载)

Fig. 17 Curves of Load-vertical Displacement at 3/8 Span
Point of Spoke Arches with Different ζ (Half Span Load)

从图 17 可以看出,对于矢跨比为 0.3 的车辐拱,如一阶分析结果所述,当拱脚由固定铰变为无水平约束时,极限承载力提升了 30% 左右,但竖向刚度略有下降。对于矢跨比为 0.4 的车辐拱,随着 ζ 的增大,承载力和竖向刚度的变化不明显,仅略有提升。

从图 18 可以看出,与全跨荷载工况相同,拉索的存在对约束拱脚位移十分有效。当拱脚无水平约

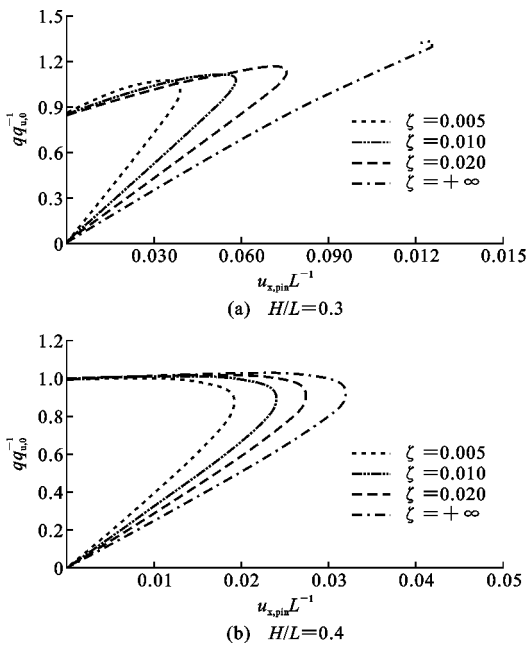


图 18 不同 ζ 车辐拱对应的荷载-拱脚水平位移曲线 (半跨荷载)

Fig. 18 Curves of Load-horizontal Displacement of Arch Foot of Spoke Arches with Different ζ (Half Span Load)

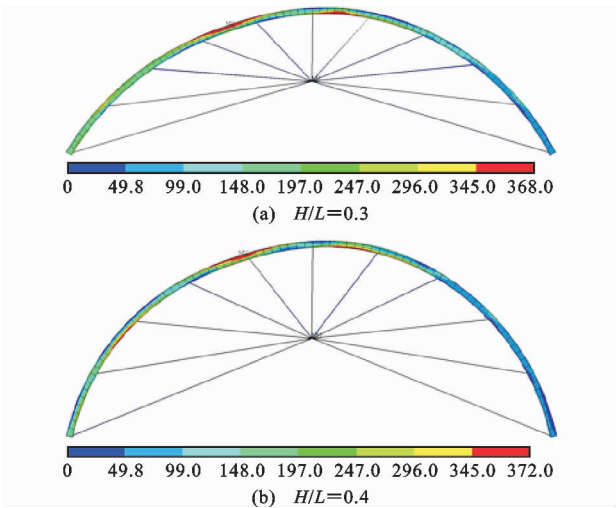


图 19 车辐拱在极限状态对应的钢拱应力图 (半跨荷载且 $\zeta=0.02$) (单位:MPa)

Fig. 19 Stress Diagram of Steel Arch Corresponding to Limit State of Spoke Arch (Half Span Load and $\zeta=0.02$) (Unit:MPa)

束时,拱脚位移仍然很小,其最大位移仅为跨度的 1.3%。与全跨荷载工况不同的是,当外荷载接近极限荷载时,拱脚位移逐渐减小。这是因为在加载初期,车辐拱在加载半跨内向下挠曲,使得拱脚向外移动。当加载半跨挠度较大时,在变形最大的位置附近,拱轴线出现向下凹曲,此时拉索的作用使得拱脚滑动方向发生了改变。

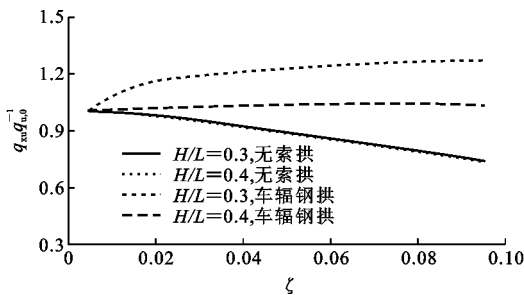


图 20 弹性柔度系数 ζ 对无索拱和车辐拱极限承载力的影响 (半跨荷载)

Fig. 20 Influence of Elastic Flexibility Coefficient ζ on Ultimate Bearing Capacity of Cable-free Arch and Spoke Arch (Half Span Load)

从图 19 的 Von Mises 应力云图可以看出,当拱脚柔度系数 $\zeta=0.02$ 时,在极限状态下,非加载半跨内的应力比较小,而加载半跨内的应力比较大,其中在 3/8 跨位置附近应力是最大的。

对比弹性柔度系数对无索拱和车辐拱弹塑性承载力的影响(图 20),发现无索拱的承载力随着 ζ 的增大显著下降,而车辐拱的承载力反而有所提升。当 ζ 大于 0.02 之后,承载力几乎没有变化。这说明,在半跨荷载作用下拱脚水平刚度不足对车辐拱的稳定承载力反而有提高作用。

3 结 语

(1)车辐拱可以显著限制拱脚的水平位移,减小钢拱截面的弯矩幅值,提高钢拱的稳定性能。随着车辐拱拱脚水平刚度减弱,拱脚水平推力迅速降低,但全跨均布荷载作用下的承载力降低不多,半跨均布荷载作用下的承载力略有提升。

(2)在全跨荷载作用且拱脚无任何水平约束的情况下,车辐拱对应的极限承载力相比两铰车辐拱仅有 10%左右的折减,并且其塑性发展较大区域或破坏位置发生在拱两侧 1/10 跨位置而非拱顶部。

(3)在半跨荷载作用且当拱脚从固定铰变为无水平约束时,车辐拱的稳定性能有所改善。对于矢跨比为 0.3 的车辐拱,承载力可以提高约 30%,但整体刚度有所下降,而对于矢跨比为 0.4 的车辐拱,其承载力和整体刚度均有所提升,但其变化不十分明显。

参考文献:

References:

[1] 郭彦林,窦超.我国拱形钢结构设计理论研究现状与展望[J].建筑结构学报,2012,33(7):1-17.

- GUO Yan-lin, DOU Chao. Research Status and Expectation of Design Theory of Steel Arch Structure in China[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7):1-17.
- [2] TIMOSHENKO S P, GERE J M. Theory of Elastic Stability[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [3] PI Y L, TRAHAI R N S. In-plane Inelastic Buckling and Strengths of Steel Arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(7):734-747.
- [4] PI Y L, BRADFORD M A, UY B. In-plane Stability of Arches [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39(1):105-125.
- [5] PI Y L, TRAHAI R N S. In-plane Buckling and Design of Steel Arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(11):1291-1298.
- [6] 剧锦三, 郭彦林, 刘玉擎. 拱结构的弹性二次屈曲性能[J]. 工程力学, 2002, 19(4):109-112, 170.
- JU Jin-san, GUO Yan-lin, LIU Yu-qing. The Secondary Buckling Behavior of Elastic Arch[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(4):109-112, 170.
- [7] 林 冰, 郭彦林. 实腹式等截面纯压钢拱的平面内弹性屈曲系数[J]. 建筑结构, 2008, 38(2):83-86, 82.
- LIN Bing, GUO Yan-lin. In-plane Elastic Buckling Coefficients of Compression Steel Arch with Uniform Section[J]. Building Structure, 2008, 38(2):83-86, 82.
- [8] 林 冰, 郭彦林, 黄李骥. 均匀受压两铰圆弧钢拱的平面内稳定设计曲线[J]. 工程力学, 2008, 25(9):100-105.
- LIN Bing, GUO Yan-lin, HUANG Li-ji. In-plane Stability Design Curves of Two-hinged Steel Circular Arches in Uniform Compression[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9):100-105.
- [9] 郭彦林, 林 冰, 郭宇飞. 压弯圆弧拱平面内稳定承载力设计方法的理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3):8-15.
- GUO Yan-lin, LIN Bing, GUO Yu-fei. Theoretical and Experimental Studies of In-plane Stability Design of Circular Arches Subjected to Axial Force and Moment [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(3):8-15.
- [10] 郭彦林, 窦 超. 现代拱形钢结构设计原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- GUO Yan-lin, DOU Chao. Design Fundamentals and Application of Contemporary Steel Arch Structures [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [11] JGJ/T 249—2011, 拱形钢结构技术规程[S].
- JGJ/T 249—2011, Technical Specification for Steel Arch Structure[S].
- [12] 王高宁. 车辐拱的稳定性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- WANG Gao-ning. The Study on Stability Behavior of Spoke Arch Structure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [13] 郭彦林, 王高宁. 车辐结构平面内弹性稳定承载力及设计建议[J]. 空间结构, 2006, 12(1):18-23.
- GUO Yan-lin, WANG Gao-ning. In-plane Elastic Stability of Spoke Structures [J]. Spatial Structures, 2006, 12(1):18-23.
- [14] BRADFORD M A, WANG T, PI Y L, et al. In-plane Stability of Parabolic Arches with Horizontal Spring Supports. I: Theory[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(8):1130-1137.
- [15] PI Y L, BRADFORD M A, TIN-LOI F, et al. Geometric and Material Nonlinear Analyses of Elastically Restrained Arches[J]. Engineering Structures, 2007, 29(3):283-295.
- [16] PI Y L, BRADFORD M A, TIN-LOI F. Non-linear In-plane Buckling of Rotationally Restrained Shallow Arches Under a Ventral Concentrated Load[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2008, 43(1):1-17.
- [17] PI Y L, BRADFORD M A, TIN-LOI F. Nonlinear Analysis and Buckling of Elastically Supported Circular Shallow Arches[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(7/8):2401-2425.
- [18] 杨 洋, 童根树. 水平弹性支承圆弧钢拱的弹性屈曲分析[J]. 工程力学, 2011, 28(3):9-16.
- YANG Yang, TONG Gen-shu. In-plane Elastic Buckling of Steel Circular Arches with Horizontal Spring Support[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):9-16.
- [19] 杨 洋, 童根树. 水平弹性支承圆弧钢拱的平面内极限承载力研究[J]. 工程力学, 2012, 29(3):45-54.
- YANG Yang, TONG Gen-shu. Study for In-plane Ultimate Strength of Steel Circular Arches with Horizontal Spring Supports [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3):45-54.
- [20] PI Y L, TRAHAI R N S. In-plane Buckling and Design of Steel Arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(11):1291-1298.