

六四军用常备式梁钢拱架稳定性分析

姜旭

济南华鲁中交公路设计有限公司, 山东 济南 250000

摘要:为提高钢拱架的稳定性,以六四军用常备式梁钢拱架为研究对象,采用MIDAS/Civil软件建立有限元结构模型,分析钢拱架结构单元的连接条件、钢拱架榫数、结构设计强度极限承载力与结构稳定性的关系。计算结果表明:三角形单元构件的连接条件对结构的稳定性影响不大;随榫数的增多,钢拱架的屈曲临界荷载系数增大,但增大幅度逐渐减小,当榫数达到一定数量时,屈曲临界荷载系数基本不再增大;当榫数较少时,结构的破坏形式为稳定极限承载破坏,当榫数增加到一定数量时,结构的破坏形式为结构设计强度极限承载破坏。为准确表述钢拱架榫数对其稳定性的影响,在3种荷载工况下,拟合不同结构榫数对钢拱架屈曲临界荷载系数、设计强度极限承载力和稳定极限承载力之比的函数式。结果表明拟合函数精度较高,可满足施工设计要求。因此,可通过调整钢拱架榫数改善结构的稳定性。

关键词:钢拱架;有限元分析;稳定性;榫数

中图分类号:U441+.2;TU375.5

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)04-0070-07

引用格式:姜旭.六四军用常备式梁钢拱架稳定性分析[J].山东交通学院学报,2022,30(4):70-76.

JIANG Xu. Stability analysis of the June Fourth military beam steel arch frame [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(4): 70-76.

0 引言

钢拱架材料轻、强度高、刚度小,通过组装可适应不同跨径矢高的拱桥施工,工程施工过程中运输方便、安装快速、安全可靠,可重复利用,在拱桥施工中应用广泛^[1]。拱桥用钢拱架跨径不断增大,结构刚度越来越小,须研究钢拱架结构的稳定性,保障施工质量及使用安全^[2-3]。

研究人员采用多种方法研究钢拱架结构的稳定性。刘学杰等^[4]研究新型双箱型空腹圆弧钢拱平面内的稳定特性,采用理论推导与有限元数值模拟相结合的方法研究钢拱平面内的弹性屈曲及弹塑性稳定承载力,分析剪力对拱截面破坏模式的影响,提出平面内稳定承载力的设计方法及弹性屈曲荷载公式。Dou等^[5]采用有限元数值分析方法,研究箱形截面抛物线钢拱在全跨均布竖向荷载作用下的弯扭屈曲和极限抗力,引入并考虑面内弯矩影响的分布竖向荷载钢拱的修正长细比,得到可采用文献[6-7]等规范的柱曲线预测深拱和浅拱的弯扭屈曲荷载。黄李骥^[8]分析了钢拱腹板开洞对钢拱弹性屈曲模态的影响,结果表明钢拱腹板开孔优化半径和间距对弹性屈曲模式有较大影响。郭彦林等^[9]通过试验研究焊接工字形截面双铰抛物线钢拱的面内稳定承载力,分析抛物线钢拱平面内的失稳破坏机理,认为全跨竖向均布荷载作用下抛物线钢拱发生不完全反对称的平面内失稳破坏,半跨竖向均布荷载作用下抛物线钢拱发生反对称的平面内失稳破坏。李一笑^[10]系统研究考虑局部屈曲的腹板开洞钢拱,基于理论推导与有限元数值法,提出了考虑局部屈曲时腹板开洞拱的平面外稳定承载力的设计方法。赵思远等^[11]研究压弯作用下闭合截面圆弧拱的平面外弹性屈曲性能及稳定设计方法,在弹塑性范围内讨论弯矩对钢拱平面外稳定的削弱作用,推导得到考虑弯矩作用的压弯钢拱正则化长细比,将压弯钢拱的平面外稳定问题简化

收稿日期:2021-11-13

作者简介:姜旭(1985—),男,山东东平人,工程师,工学硕士,主要研究方向为桥梁与隧道工程,E-mail:460447425@qq.com。

为纯压钢拱的稳定问题。

目前的研究中较少涉及六四军用常备式梁钢拱架的稳定性。本文采用 MIDAS/Civil 软件建立钢拱架有限元模型,分析六四军用常备式梁钢拱架单元构件连接条件、钢拱架榀数对钢拱架稳定性的影响,及钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力的关系,为六四军用常备式梁钢拱架的设计和施工提供技术指导。

1 工程概况

黔江区正舟大桥位于重庆黔江县城郊外,横跨黔江,属于山谷地貌。正舟大桥上部结构为 1×100 m 的单箱 7 室钢筋混凝土箱形拱桥,矢高 16.667 m,矢跨比为 $1/6$,拱轴系数为 2.514,拱轴线为悬链线。拱桥施工采用常备式梁钢拱架,桥梁跨径较大,采用分环浇筑施工。

正舟大桥采用西南地区常用的六四军用常备式梁钢拱架结构,主要构件如图 1 所示。钢拱架的净跨与净高可通过不同构件拼装进行调整,以适应不同跨径、净高的拱桥施工^[12-13]。



图1 钢拱架组装构件

三角形构件分为基本三角形的主要构件和端部三角形的拱脚构件,单件质量分别为 506.30、456.69 kg;弦杆有端弦杆、短弦杆、长弦杆 3 种形式,单件质量分别为 285.00、354.60、372.60 kg,用做下弦杆;节点销和拱脚销连接节点和拱脚,单件质量分别为 2.00、5.50 kg;横连构件用做横向连接,单件质量为 59.40 kg;拱座用做拱脚铰接;单件质量为 124.76 kg;砂桶单件质量为 46.00 kg。

2 仿真模型分析

采用 MIDAS/Civil 软件建立钢拱架模型,分析三角形单元构件的连接条件、钢拱架榀数对结构稳定性的影响,并分析钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力的关系,为工程设计施工提供数据参考。

2.1 三角形单元构件的连接条件对钢拱架稳定性的影响

为简化模型,只建立一榀钢拱架,钢拱架两端拱脚部位和三角形间的连接部位均采用铰连接。考虑到钢拱架在跨度小的情况下可能一次性全跨布载,当跨径较大时需分段加载,采用跨中集中荷载、全跨均布荷载、 $1/4$ 跨对称荷载 3 种荷载类型分析钢拱架荷载情况,如图 2~4 所示。

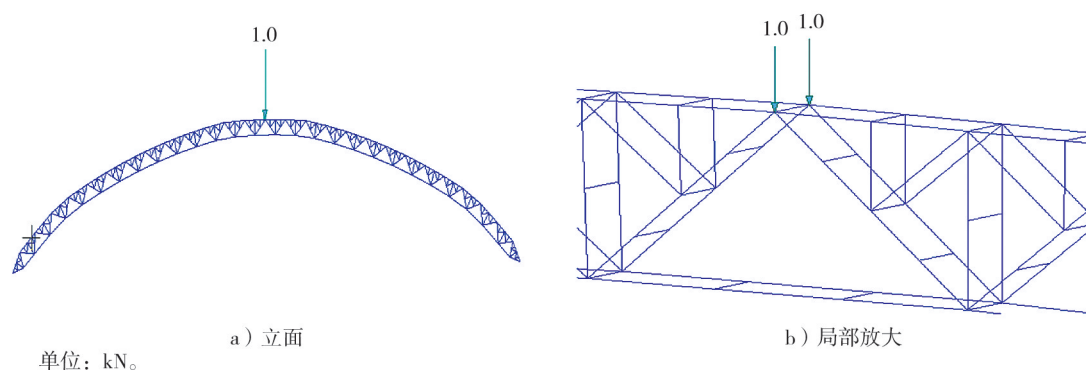


图2 跨中集中荷载下钢拱架的荷载情况

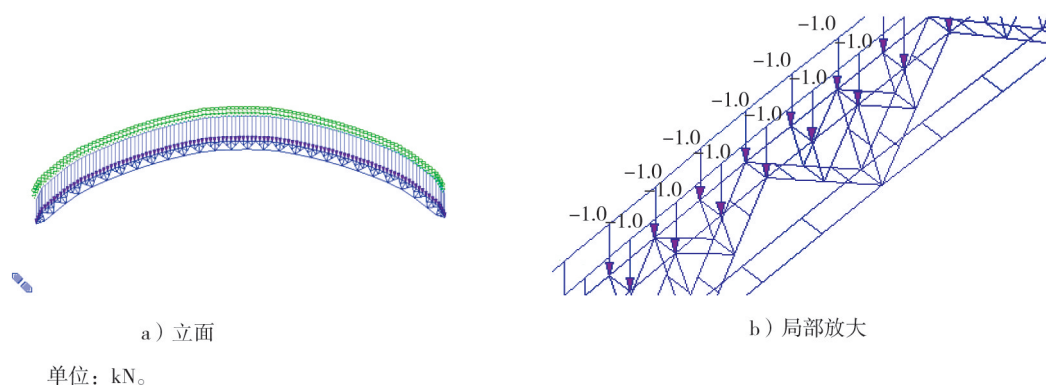


图3 全跨均布荷载下钢拱架的荷载情况

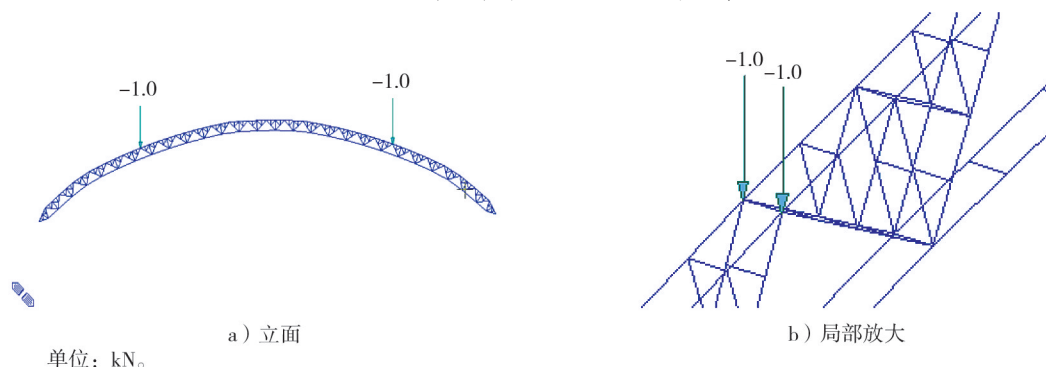


图4 1/4跨对称荷载下钢拱架的荷载情况

选取 5 种不同的钢拱架跨径结构,三角形单元构件的基本构件数量、净跨、净高如表 1 所示。为便于装配钢拱架,加快施工进度,钢拱架常采用销杆组合三角形构件结构。为验证钢拱架结构铰接形式的合理性,采用三角形构件铰接和固结 2 种结构建模形式。 $\lambda_{cr,1}$ 为钢拱架三角形构件铰接情况下的弹性屈曲临界荷载系数, $\lambda_{cr,2}$ 为钢拱架三角形构件固结情况下的弹性屈曲临界荷载系数, $Y_1 = \lambda_{cr,2} / \lambda_{cr,1}$, Y_1 反映构件连接形式对钢拱架弹性屈曲荷载的影响。

表 1 三角形组合的基本特征及 Y_1 结果

三角形组合 类型	端部三角 形个数	基本三角 形个数	弦杆个数			净跨/m	净高/m	Y_1		
			端弦杆	短弦杆	长弦杆			跨中集中荷载	1/4 跨对称荷载	全跨均布荷载
1	2	26	2	2	21	100.000	16.667	1.010	1.011	1.011
2	2	22	2	2	17	87.461	12.661	1.010	1.010	1.010
3	2	18	2	2	13	73.980	8.588	1.010	1.012	1.013
4	2	14	2	2	9	59.315	5.476	1.010	1.014	1.010
5	2	10	2	2	5	44.269	2.877	1.010	1.011	1.033

由表 1 可知:随净跨增大,边界条件对钢拱架结构弹性屈曲荷载影响越来越小;当钢拱架净跨小于 87.461 m 时,三角形单元构件固结连接的 Y_1 比较接连接最大增大 3.3%;当钢拱架净跨大于 87.461 m 时,三角形单元构件固结连接与三角形单元构件铰接连接下的钢拱架弹性屈曲荷载基本相同。

2.2 钢拱架榫数对钢拱架稳定性的影响

拱桥施工过程中根据桥梁宽度选用一定榫数的钢拱架,横向通过榫与榫间的横联构件连接。横联构件使结构整体受力变形,可提高结构设计强度的承载力和平面外稳定能力。当榫数较少时,钢拱架侧向刚度较小,结构发生平面外失稳;当榫数达到一定数量时,钢拱架横向刚度较大,结构只在平面内发生

失稳^[14-15]。

结构建模采用的钢拱架跨径为 100 m、矢高 16.667 m, 榀与榀间的距离为 1 m, 结构榀数为 1~14 榀, 所采用荷载类型为跨中集中荷载、全跨均布荷载、1/4 跨对称荷载, 计算得到的结构屈曲临界荷载系数如表 2 所示。

表 2 不同钢拱架榀数下的结构屈曲临界荷载系数

钢拱架榀数	跨中集中荷载	1/4 跨对称荷载	全跨均布荷载	钢拱架榀数	跨中集中荷载	1/4 跨对称荷载	全跨均布荷载
1	101.3	113.6	19.80	8	263.7	223.6	43.22
2	155.8	160.4	28.87	9	269.3	226.3	43.87
3	190.4	184.3	33.95	10	273.8	228.4	44.39
4	215.5	199.1	37.32	11	277.4	230.1	44.81
5	233.7	208.8	39.62	12	280.4	231.5	45.16
6	246.8	215.5	41.22	13	283.0	232.7	45.45
7	256.4	220.2	42.37	14	285.2	233.7	45.70

由表 2 可知:当榀数较少时,钢拱架结构侧向刚度较小,结构主要发生平面外失稳,结构屈曲临界荷载较小;随榀数的增多,钢拱架结构的侧向刚度增大,屈曲临界荷载也增大,当榀数增大到钢拱架结构侧向刚度足够大时,钢拱架结构发生平面内失稳,屈曲临界荷载系数基本不再增大。

为准确表述榀数对钢拱架稳定性的影响,在 3 种荷载工况下,拟合榀数与结构屈曲临界荷载系数的函数关系公式。在跨中集中荷载工况下

$$y_1 = -164.96x^3 + 473.75x^2 - 529.22x + 321.77, \quad (1)$$

在 1/4 跨对称荷载工况下

$$y_2 = 3.024x^3 + 81.885x^2 - 220.83x + 249.54, \quad (2)$$

在全跨均布荷载工况下

$$y_3 = -6.9659x^3 + 34.571x^2 - 57.572x + 49.773, \quad (3)$$

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 分别为 3 种荷载工况下的钢拱架结构屈曲临界荷载系数, x 为榀数的倒数。

3 种荷载工况下,不同钢拱架榀数的临界荷载系数曲线如图 5 所示。

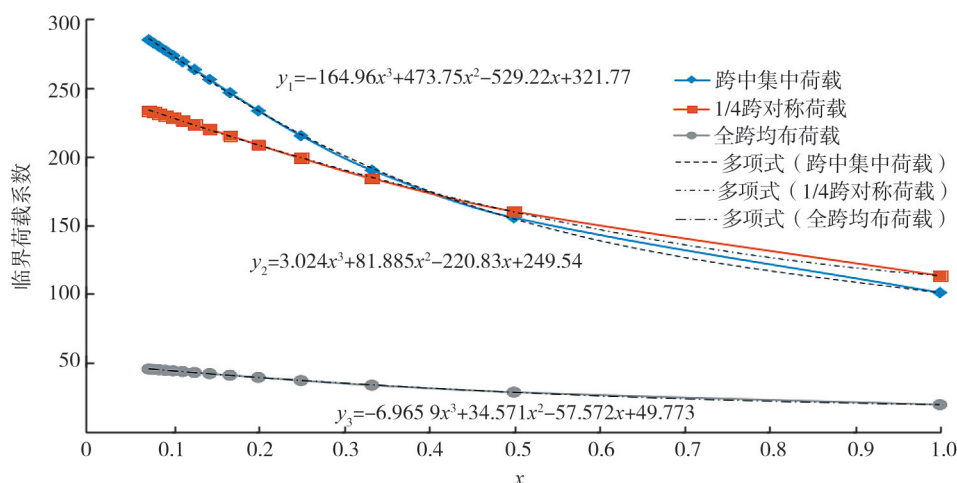


图 5 3 种荷载工况下不同钢拱架榀数的临界荷载系数拟合曲线

由图 5 可知,式(1)~(3)拟合程度较高。经计算可得在 3 种荷载工况下临界荷载系数函数拟合的最大误差为 0.78%,说明式(1)~(3)能满足工程使用精度需求。

2.3 钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力的关系

结构的稳定性和强度均须满足要求,钢拱架结构才不会有重大安全隐患。强度破坏是指构件的某一截面或连接件因应力超过强度极限而破坏。结构失稳是指在外力作用下结构的平衡状态开始丧失稳定

性,稍有挠动(实际不可避免)则变形迅速增大,直至结构遭到破坏^[16-17]。

钢拱架结构模拟计算条件与 2.2 节相同。 λ_1 为结构的稳定极限承载力, λ_2 为结构的设计强度极限承载力, $Y_2 = \lambda_2 / \lambda_1$, Y_2 反映钢拱架稳定极限承载破坏与结构设计强度极限承载破坏的先后关系。 $Y_2 > 1$ 时,说明结构稳定极限承载破坏早于结构设计强度极限承载破坏; $Y_2 < 1$ 时,说明稳定极限承载破坏晚于结构设计强度极限承载破坏。钢拱架结构的 Y_2 计算结果如表 3 所示。

表 3 钢拱架结构的 Y_2

钢拱架榀数	跨中集中荷载	1/4 跨对称荷载	全跨均布荷载	钢拱架榀数	跨中集中荷载	1/4 跨对称荷载	全跨均布荷载
1	1.290	1.334	2.195	8	0.496	0.677	1.006
2	0.839	0.945	1.506	9	0.485	0.670	0.991
3	0.687	0.822	1.280	10	0.477	0.663	0.979
4	0.607	0.761	1.164	11	0.471	0.658	0.970
5	0.559	0.726	1.097	12	0.466	0.654	0.963
6	0.530	0.703	1.055	13	0.462	0.651	0.956
7	0.510	0.688	1.026	14	0.458	0.648	0.951

由表 3 可知: Y_2 随榀数的增多逐渐减小,且减小幅度趋缓,当榀数达到一定数量时 Y_2 变化较小。

在竖向荷载作用下,钢拱架截面主要承受轴向压应力和一部分弯矩,结构中的弦杆分别受压应力和拉应力,且受拉杆件的最大应力大于受压杆件的应力,受拉杆件的表现决定结构的强度破坏程度。当榀数较少时,钢拱架侧向刚度较小,结构应力没达到强度极限,但结构变形过大导致结构失稳,结构稳定极限承载破坏早于结构设计强度极限承载破坏;当榀数达到一定数量时,钢拱架侧向刚度较大,结构应力达到强度极限,但结构变形没有导致结构失稳,稳定极限承载破坏晚于结构设计强度极限承载破坏。

为准确表述钢拱架结构设计强度极限承载力和稳定极限承载力的相互关系,拟合 3 种荷载工况下,不同榀数对钢拱架稳定性影响的计算公式。在跨中集中荷载工况下

$$Y_{21} = -0.347 2x^3 + 0.541 4x^2 + 0.692 1x + 0.403 6, \quad (4)$$

在 1/4 跨对称荷载工况下

$$Y_{22} = -0.232 1x^3 + 0.447 1x^2 + 0.510 9x + 0.608 0, \quad (5)$$

在全跨均布荷载工况下

$$Y_{23} = -0.492 6x^3 + 0.842 5x^2 + 0.970 1x + 0.874 8, \quad (6)$$

式中: Y_{21} 、 Y_{22} 、 Y_{23} 分别为 3 种荷载工况下,不同榀数的钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力之比。

3 种荷载工况下,不同榀数的钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力之比的拟合曲线如图 6 所示。

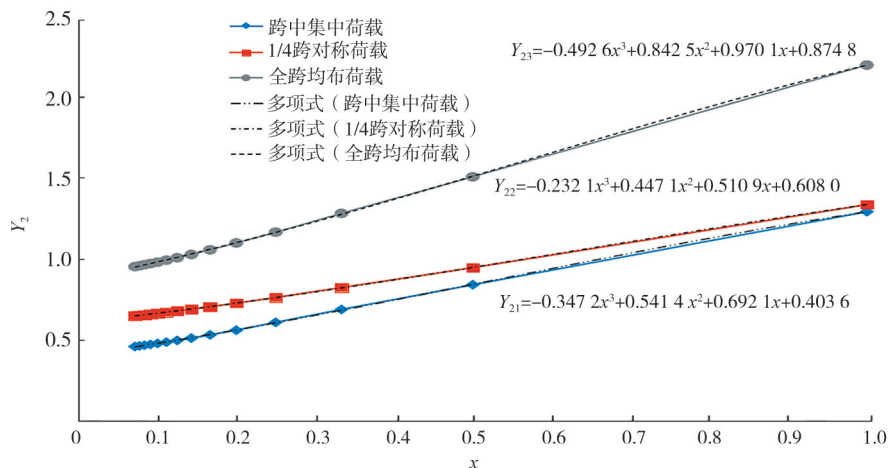


图 6 3 种荷载工况下不同榀数的钢拱架 Y_2 拟合曲线

由图6可知式(4)~(6)拟合程度较高。经计算可得3种荷载工况下钢拱架结构设计强度极限承载力与稳定极限承载力之比函数拟合的最大误差为0.79%,证明式(4)~(6)满足工程使用精度需求。

3 结论

1) 在3种荷载工况、5种钢拱架净跨和净高条件下,三角形单元构件连接条件对结构的稳定性基本无影响。

2) 钢拱架跨径为100 m、矢高16.667 m、榫距为1 m、结构榫数为1~14条件下,屈曲临界荷载系数随榫数的增多而增大,增大幅度逐渐减小,当榫数达到一定数量时基本不再增大;为准确表述榫数对钢拱架稳定性的影响,在3种荷载工况下,拟合榫数与钢拱架结构临界荷载系数的函数关系,结果表明:拟合函数最大误差较小,可满足施工精度要求。

3) 分析榫数与同一钢拱架结构的设计强度极限承载力、稳定极限承载力的关系。当榫数较少时,钢拱架结构的破坏形式为稳定极限承载破坏;当榫数达到一定数量时,结构的破坏形式为结构设计强度极限承载破坏。在3种荷载工况,拟合同一钢拱架结构榫数和设计强度极限承载力与稳定极限承载力之比的函数关系,结果表明:拟合函数最大误差较小,可满足施工精度要求。

参考文献:

- [1] 刘泗平,安竹石,牟洪仲. 拱桥施工中三种常用钢拱架行为对比[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2010, 27(4): 123-126.
- LIU Siping, AN Zhushi, MOU Hongzhong. The structural comparative analysis of three types of steel arch centering[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2010, 27(4): 123-126.
- [2] 项海帆,刘光栋. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京:人民交通出版社,1991:1-30.
- [3] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2006:55-60.
- [4] 刘学杰,袁波,卢超杰,等. 双箱型空腹圆钢拱平面内稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(5):131-139.
- LIU Xuejie, YUAN Bo, LU Chaojie, et al. In-plane stability analysis of double-box open-spandrel circular steel arches[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(5): 131-139.
- [5] DOU Chao, GUO Yanlin, PI Yonglin, et al. Flexural-torsional buckling and ultimate resistance of parabolic steel arches subjected to uniformly distributed vertical load[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(10): 04014075.
- [6] 钢结构设计规范:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [7] The AISC Committee on Specifications. Specification for structural steel buildings:ANSI/AISC 360-10[S]. Chicago:American Institute of Steel Construction,2010.
- [8] 黄李骥. 腹板开洞工形截面拱的稳定性能及设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2005.
- [9] 郭彦林,林冰,郭宇飞. 焊接工字形截面抛物线拱平面内稳定性试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,6(3):95-102.
- GUO Yanlin, LIN Bing, GUO Yufei. Experimental study on in-plane stability of welded I-section steel parabolic arches[J]. Journal of Building Structures, 2009, 6(3): 95-102.
- [10] 李一笑. 考虑局部屈曲的腹板开洞拱平面外稳定性能及设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2021.
- LI Yixiao. Studies on out-of-plane stability and design method of arches with web openings accounting for local buckling[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [11] 赵思远,郭彦林,王宏. 闭合截面压弯钢拱的平面外稳定性能研究[J]. 工程力学,2016,33(10):62-67.
- ZHAO Siyuan, GUO Yanlin, WANG Hong. Out-of-plane stability of close-section steel arches under compression and bending[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10): 62-67.
- [12] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001:237-261.
- [13] 童根树. 钢结构的平面内稳定[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:13-22.
- [14] 汪胜辉,王俊平,曾涛. 钢拱稳定理论的概述[J]. 山西建筑,2008,34(3):99-100.
- WANG Shenghui, WANG Junping, ZENG Tao. General introduction of the stability theory of steel arch[J]. Shanxi Architecture, 2008, 34(3): 99-100.

- [15] 赵阳, 陈贤川, 董石麟. 大跨椭球面圆形钢拱结构的强度及稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 15-23.
ZHAO Yang, CHEN Xianchuan, DONG Shilin. Strength and stability analysis of circular steel arches in a long-span ellipsoidal shell structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 15-23.
- [16] 曹欣. 大跨度多弧形钢拱结构的受力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
CAO Xin. Research on the structural behavior of long-span steel multi-arches[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [17] 黄卓驹, 项圣懿, 王松林, 等. 关于杆系钢结构稳定设计的若干问题讨论[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 1): 1474-1478.
HUANG Zhuoju, XIANG Shengyi, WANG Songlin, et al. Discussion on several issues about stability design of rod-system steel structure[J]. Building Structure, 2021, 51(Suppl. 1): 1474-1478.

Stability analysis of the June Fourth military beam steel arch frame

JIANG Xu

Jinan Hualu China Communications Highway Design Co., Ltd., Jinan 250000, China

Abstract: In order to improve the stability of the steel arch, a finite element model is established to analyze the relationship between the connection conditions of structural elements, the number of steel arches, and the structural design strength ultimate bearing capacity with structural stability by taking the June Fourth military beam steel arch frame. The calculation results show that, the connection conditions of the triangular element members have little effect on the stability of the structure. The buckling critical load factor of the steel arch increases with the increase of the number of trusses, but the increase range gradually decreases. When the number of trusses reaches a certain number, the critical load coefficient of buckling does not increase basically. As the number of trusses is small, the failure mode of the structure is the failure of the stable ultimate bearing capacity, and when the number of trusses increases to a certain number, the failure mode of the structure is the ultimate bearing failure of the structural design strength. The function formula of different structural numbers to the buckling critical load coefficient of steel arches, and the ratio of the design strength ultimate bearing capacity and the stable ultimate bearing capacity was fitted under three load conditions to describe precisely the effect of the number of steel arches on stability. The results show that, the fitting function has high accuracy and meets the requirements of construction design. Therefore, the structural stability can be improved via adjusting the number of steel arches.

Keywords: steel arch frame; finite element analysis; stability; the number of steel arches

(责任编辑: 王惠)