

I 形截面圆弧拱弹性弯扭屈曲研究

惠宽堂¹, 李 瑾¹, 樊军建², 周铁钢¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安有色冶金设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘 要:用 Beam 188 单元建立了可考虑荷载作用位置的有限元模型. 通过对三种荷载模式下 I 形截面固支和销支圆弧拱计算结果的比较, 研究了支座类型、荷载模式和矢跨比对钢拱平面外屈曲的影响. 对于理想支座约束, 发现径向荷载作用下销支拱平面外屈曲荷载与固支拱相同, 环向均布竖向荷载作用下和水平均布竖向荷载作用下销支拱平面外屈曲荷载在较大矢跨比时明显高于固支拱; 通过对荷载作用在 I 形截面上翼缘、形心、下翼缘固支钢拱平面外屈曲荷载的比较, 发现随矢跨比的减小、荷载作用高度的降低, 平面外屈曲荷载愈来愈大.

关键词:圆弧拱; I 形截面; 平面外失稳; 荷载作用位置

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)04-0520-06

拱是工程结构中比较常见的一种结构形式. 拱结构平面外稳定问题的研究相比直杆结构还不够系统和全面, 只有少数国家的规范中有此问题的论述. 德国 DIN18800- II^[1] 与我国 JGJ249-2011《拱形钢结构技术规程》^[2] 给出了稳定性设计的原则和方法. 国内外对纯压和纯弯拱的平面外稳定进行了大量相关研究, 给出了相应的理论解及计算方法^[3-8]; 近年来, Pi、窦超、郭彦林等也对拱平面外稳定性进行了广泛研究^[9-15].

在工程实践中, 两端嵌固的固支拱和销轴支座拱应用广泛, 铰支拱很少采用. 拱所受的重力荷载是沿环向分布的竖向荷载, 雪、灰荷载是沿水平线分布的竖向荷载. 现有文献大多对两铰拱和固支拱的情形进行分析研究^[6-8, 11, 15], 对销轴支座圆弧拱的研究还较少; 对圆弧拱稳定性的研究大多采用径向荷载^[3-7, 13-15], 而径向荷载并不能准确反映实际拱的受力, 加载位置大多位于截面形心处^[4, 6-8, 10, 11, 14], 少有对荷载作用位置的讨论. 本文将对三种荷载模式下, 不同矢跨比、不同支座类型、不同荷载作用位置的圆弧拱的平面外稳定性进行研究.

1 结构概况

本文研究的圆弧拱结构几何模型、荷载模式见图 1; 采用 10 种常见焊接工字形截面作为分析对象, 具体尺寸如表 1 所示^[14], 跨度为 30 m; 支座情况为固定和销轴支座两种; 矢跨比取 0.15~0.5 等 8 种情况. 研究钢拱的平面外弹性屈曲, 不考虑几何缺陷和残余应力的影响, 钢材弹性模量取 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比取 0.3.

表 1 钢拱截面尺寸(单位:mm)

Tab. 1 Sectional dimensions

截面编号	截面高度 H	截面宽度 B	翼缘厚度 t_f	腹板厚度 t_w	截面编号	截面高度 H	截面宽度 B	翼缘厚度 t_f	腹板厚度 t_w
S1	480	320	16	10	S6	650	280	24	18
S2	720	450	18	14	S7	450	180	10	8
S3	450	240	10	8	S8	360	120	8	6
S4	360	180	8	6	S9	450	150	14	10
S5	400	200	12	10	S10	640	160	12	10

收稿日期: 2013-03-20 修改稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB723302)

作者简介: 惠宽堂(1962-), 男, 陕西富平人, 副教授, 主要从事结构力学教学、钢结构稳定与抗震方面研究.

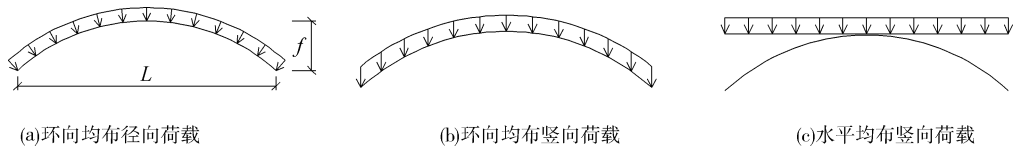


图 1 结构模型及荷载模式
Fig. 1 Geometry model and load types

2 有限元模型

采用 beam188 单元建立有限元模型. 由于 beam188 单元只能施加法向的压力荷载, 本文通过节点荷载以实现竖向荷载的施加. 一般来说, 梁单元只能考虑荷载作用在截面形心的情况, 不能模拟荷载作用位置的影响^[13]. 因弹性屈曲问题按小挠度理论考虑^[7], 故本文仍将荷载作用在节点上, 而通过偏移梁来实现施加不同作用位置的荷载. 固支拱约束拱脚处全部 7 个自由度(包括翘曲自由度), 销支拱在固支拱的基础上释放拱脚处平面内转动的自由度^[14].

为了验证 ANSYS 计算结果的正确性, 针对 S5 截面、跨度 30 m 的铰支圆弧拱, 求解出环向均布径向形心荷载下不同矢跨比的拱平面外屈曲荷载, 并与文献[7, 13-15]进行比较, 见表 2. 可见本文模型正确.

表 2 本文解与文献解的对比 (N/m)

Tab. 2 Result comparison of this paper with reference[7, 13-15](N/m)

f/L	本文	文献[7]	文献[13]	文献[14]	文献[15]
0.15	53.678 9	53.6	53.6	53.588 9	53.738 7
0.25	15.166 2	15.1	15.1	15.140 6	15.148 9
0.30	7.224 0	7.21	7.21	7.211 7	7.213 4
0.45	0.184 6	0.184	0.184	0.184 3	0.184 3

3 支座类型、荷载模式对钢拱平面外屈曲的影响

对实际应用广泛的固支拱和销支拱, 荷载作用在 I 形截面形心处的情形, 就三种荷载模式下的弹性稳定性进行比较研究, 发现三种不同荷载模式下 1~4 阶对应的屈曲形态基本相同. 平面外第一阶屈曲荷载计算结果(部分数据)见表 3~5. 考虑到第一阶屈曲模态是结构最有可能失稳的形态, 所以只列出了与之对应的第一阶屈曲荷载.

表 3 环向均布径向荷载平面外屈曲荷载 (kN/m)

Tab. 3 Out-plane buckling loads under radial loading uniformly distributed along the arch curve

截面	$f/L=0.15$		$f/L=0.25$		$f/L=0.4$		$f/L=0.5$	
	固支	销支	固支	销支	固支	销支	固支	销支
S1	11.352 68	11.197 39	7.626 14	7.589 73	2.987 86	2.983 51	1.560 94	1.559 74
S2	42.099 95	41.030 55	32.021 02	31.719 97	13.252 66	13.213 39	6.807 51	6.796 81
S3	2.860 03	2.827 47	1.864 67	1.857 36	0.713 7	0.712 85	0.369 93	0.369 7
S4	0.879 23	0.872 41	0.547 04	0.545 61	0.208 82	0.208 66	0.109 99	0.109 94
S5	2.256 39	2.236 57	1.577 85	1.572 95	0.665 32	0.664 68	0.365 35	0.365 17
S6	15.804 55	15.506 8	13.145 4	13.053 34	6.404 01	6.389 29	3.668 27	3.663 74
S7	1.388 33	1.373 83	0.979 65	0.976 01	0.409 4	0.408 93	0.222 22	0.222 09
S8	0.339 61	0.337 3	0.243 09	0.242 5	0.105 84	0.105 76	0.059 2	0.059 17
S9	1.397 13	1.383 77	1.132 72	1.128 73	0.551 68	0.551 05	0.321 28	0.321 09
S10	1.509 54	1.485 41	1.273 21	1.265 68	0.631 23	0.63	0.364 74	0.364 36

由表 3~5 可见, 环向均布径向荷载模式的屈曲荷载小于环向均布竖向荷载模式和水平均布竖向荷载模式的屈曲荷载, 随矢跨比增大屈曲荷载大幅降低.

由表 3 可见, 环向均布径向荷载下销支拱与固支拱平面外屈曲荷载基本相同. 这是因为环向均布

径向荷载下的合理拱轴线是圆弧,拱肋只承受轴力。

表 4 环向均布竖向荷载平面外屈曲荷载(kN/m)

Tab. 4 Out-plane buckling loads of circumferentially uniform distributed vertical loading

截面	$f / L = 0.15$		$f / L = 0.25$		$f / L = 0.4$		$f / L = 0.5$	
	固支	销支	固支	销支	固支	销支	固支	销支
S1	11.373 65	11.360 15	7.746 23	7.991 6	3.105 86	3.365 24	1.636 36	1.832 53
S2	42.066 33	41.454 88	32.339 31	33.102 46	13.716 05	14.761 77	7.129 68	7.923 55
S3	2.866 8	2.870 74	1.896 4	1.958 76	0.743 1	0.805 57	0.388 46	0.435 21
S4	0.882 26	0.887 4	0.557 18	0.577 14	0.217 37	0.236 44	0.115 23	0.129 63
S5	2.257 64	2.267 06	1.597 18	1.653 33	0.686 11	0.747 03	0.378 53	0.426 37
S6	15.754 91	15.629 94	13.169 7	13.511 81	6.514 38	7.030 97	3.752 35	4.187 28
S7	1.388 84	1.391 77	0.991 69	1.024 87	0.422 9	0.459 41	0.230 97	0.259 49
S8	0.339 56	0.341 71	0.245 56	0.254 55	0.108 65	0.118 54	0.060 95	0.068 8
S9	1.393 17	1.396 41	1.135 16	1.172 04	0.559 4	0.607 79	0.326 35	0.366 73
S10	1.504 17	1.496 51	1.273 83	1.308 03	0.640 53	0.691 35	0.371 99	0.415 04

表 5 水平均布竖向荷载平面外屈曲荷载(kN/m)

Tab. 5 Out-plane buckling loads of horizontally uniform distributed vertical loading

截面	$f / L = 0.15$		$f / L = 0.25$		$f / L = 0.4$		$f / L = 0.5$	
	固支	销支	固支	销支	固支	销支	固支	销支
S1	11.598 97	11.651 62	8.118 06	8.483 89	3.381 63	3.720 08	1.813 71	2.047 37
S2	42.886 77	42.480 94	33.876 74	35.089 36	14.930 85	16.300 48	7.899 66	8.846 03
S3	2.923 62	2.944 68	1.987 38	2.079 55	0.808 92	0.890 37	0.430 43	0.486 07
S4	0.899 91	0.910 7	0.584 08	0.613 23	0.236 72	0.261 58	0.127 76	0.144 92
S5	2.302 63	2.325 76	1.674 33	1.756 62	0.747 81	0.827 32	0.420 39	0.477 54
S6	16.066 08	16.018 91	13.801 27	14.326 1	7.105 4	7.782 42	4.174 08	4.695 97
S7	1.416 38	1.427 44	1.039 39	1.088 3	0.460 76	0.508 4	0.256 35	0.290 38
S8	0.346 35	0.350 59	0.257 45	0.270 55	0.118 48	0.131 39	0.067 75	0.077 15
S9	1.421	1.431 93	1.190 07	1.244 34	0.610 58	0.673 91	0.363 49	0.412 03
S10	1.533 92	1.533 73	1.334 91	1.386 68	0.698 75	0.765 3	0.413 95	0.465 64

由表 4、表 5 可见,随矢跨比的增加,环向均布竖向荷载下和水平均布竖向荷载下销支拱平面外屈曲荷载越来越大大于固支拱,图 2 是销支相比固支的屈曲荷载提高率.这一现象与通常认识不同. 屈曲荷载与结构刚度和支座约束有关,还与内力的大小和分布情况有关. 假定销支拱与固支拱平面外约束相同时,造成这一结果的原因,就只能是内力的大小和分布情况了. 图 3 是竖向荷载下,矢跨比 0.5、截面 S5 时,固支和销支拱的轴力图. 可见,销支拱的轴力明显小于固支拱. 对于理想支座约束条件,就平面外稳

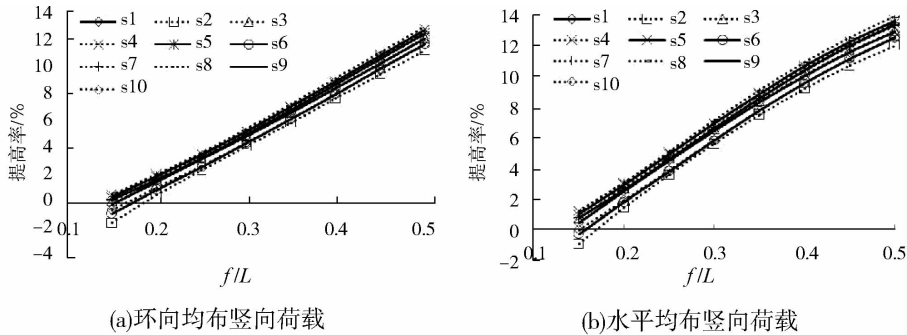


图 2 屈曲荷载提高率(%)

Fig. 2 Buckling load increase rate

定而言,当矢跨比较大时,销支反而较固支有利. 当然,销支拱与固支拱的支座节点具有完全不同的构造方式,简单假定两者在平面外的约束条件一样是否恰当,满足什么条件销支拱平面外约束可按固支对待,等都有待进一步研究,但无论如何,都应引起设计人员的注意.

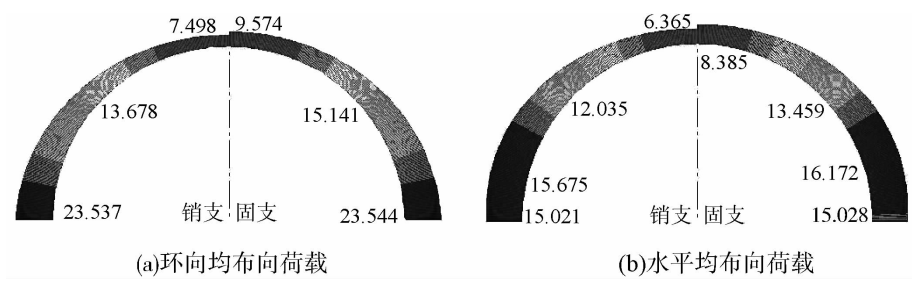


图 3 轴力图(S5, $f / L = 0.5$)

Fig. 3 Axial force diagrams (S5, $f / L = 0.5$)

4 荷载作用位置对钢拱平面外屈曲的影响

对三种荷载模式,作用在 I 形截面上翼缘、形心、下翼缘对固支钢拱平面外屈曲影响进行比较研究,屈曲荷载计算结果见表 6~8.

表 6 环向均布径向荷载平面外屈曲荷载(kN/m)

Tab. 6 Out-plane buckling loads under radial loading uniformly distributed along the arch curve

截面	$f / L = 0.15$		$f / L = 0.25$		$f / L = 0.4$		$f / L = 0.5$	
	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘
S1	8.144 75	15.287 52	5.736 27	10.026 51	2.424 93	3.685 73	1.317 9	1.853 01
S2	27.976 58	59.937 56	22.043 2	45.035 07	9.786 47	17.868 13	5.266 03	8.816 21
S3	2.062 78	3.839 57	1.414 44	2.436 46	0.584 6	0.872 69	0.314 94	0.435 53
S4	0.663 26	1.140 36	0.435 04	0.685 15	0.178 15	0.245 14	0.096 94	0.124 99
S5	1.748 89	2.843 74	1.266 55	1.950 39	0.566 92	0.780 95	0.321 09	0.416 14
S6	11.726 86	20.454 02	9.998 58	16.888 39	5.119 97	7.964 27	3.035 74	4.428 04
S7	1.045 06	1.791 41	0.764 83	1.241 61	0.340 97	0.491 62	0.191 58	0.258 11
S8	0.273 31	0.414 32	0.201 26	0.291 75	0.092 18	0.121 5	0.052 95	0.066 23
S9	1.133 01	1.685 88	0.935 56	1.357 06	0.474 4	0.640 21	0.283 34	0.364 21
S10	1.136 45	1.928 5	0.980 77	1.616 79	0.509 17	0.777 97	0.303 95	0.437 12

表 7 环向均布竖向荷载平面外屈曲荷载(kN/m)

Tab. 7 Out-plane buckling loads of circumferentially uniform distributed vertical loading

截面	$f / L = 0.15$		$f / L = 0.25$		$f / L = 0.4$		$f / L = 0.5$	
	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘
S1	8.285 6	15.035 56	5.998 53	9.795 57	2.626 84	3.634 76	1.443 81	1.841 45
S2	28.467 78	58.643 93	23.126 69	43.263 6	10.723 56	17.125 85	5.870 29	8.519 46
S3	2.098 76	3.779 03	1.479 26	2.386 56	0.633 06	0.864 46	0.344 83	0.434 87
S4	0.674 23	1.126 11	0.453 66	0.676 62	0.191 56	0.245 26	0.105 1	0.125 84
S5	1.771 85	2.805 58	1.313 44	1.915 77	0.604 95	0.772 75	0.344 95	0.413 33
S6	11.858 63	20.087 34	10.335 5	16.319 49	5.463 81	7.641 69	3.271 81	4.254 53
S7	1.059 88	1.764 51	0.795 21	1.215 08	0.365 87	0.484 51	0.207 36	0.255 67
S8	0.276 27	0.409 34	0.207 72	0.287 2	0.097 56	0.120 33	0.056 3	0.065 72
S9	1.141 92	1.662 7	0.959 14	1.325 47	0.497 71	0.623 97	0.298 58	0.354 77
S10	1.148	1.894 68	1.011 29	1.563 26	0.541 27	0.746 48	0.326 13	0.419 72

表8 水平均布竖向荷载平面外屈曲荷载(kN/m)

Tab.8 Out-plane buckling loads of horizontally uniform distributed vertical loading

截面	$f/L=0.15$		$f/L=0.25$		$f/L=0.4$		$f/L=0.5$	
	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘	上翼缘	下翼缘
S1	8.444 13	15.354 1	6.277 16	10.296 05	2.844 38	3.988 94	1.585 8	2.065 14
S2	28.984 11	59.919 36	24.154 61	45.576 31	11.576 14	18.889 71	6.418 91	9.616 27
S3	2.139 15	3.858 66	1.548 25	2.507 56	0.685 63	0.947 92	0.378 84	0.487 14
S4	0.687 49	1.149 55	0.475 16	0.710 46	0.207 75	0.268 57	0.115 72	0.140 71
S5	1.806 02	2.864 45	1.374 95	2.013 02	0.656 18	0.847 68	0.380 12	0.463 46
S6	12.076 64	20.519 14	10.795 63	17.183 28	5.909 91	8.430 6	3.594 5	4.808 95
S7	1.080 09	1.801 72	0.832 1	1.277 13	0.396 48	0.531 81	0.228 16	0.286 89
S8	0.281 63	0.417 9	0.217 49	0.301 74	0.105 92	0.131 97	0.062 14	0.073 68
S9	1.163 65	1.697 84	1.003 31	1.393 76	0.540 06	0.686 12	0.329 64	0.399 34
S10	1.169 14	1.935 35	1.056 26	1.645 81	0.585 56	0.823 46	0.358 48	0.474 41

由表6~8可见,三种荷载模式下,荷载作用在上翼缘时的平面外屈曲荷载最小,作用在形心次之,作用在下翼缘最大。这是因为在拱产生微小侧移和扭转的情况下,荷载作用在上翼缘,将产生绕剪切中心的附加扭矩,促进拱侧向弯曲和扭转,加速拱丧失整体稳定。而荷载作用在拱下翼缘时,将产生反方向的附加扭矩,有利于阻止拱的侧向弯曲扭转,延缓拱丧失整体稳定。荷载作用在上翼缘相比形心时的屈曲荷载降低率见图4,荷载作用在下翼缘相比形心时的屈曲荷载提高率见图5。

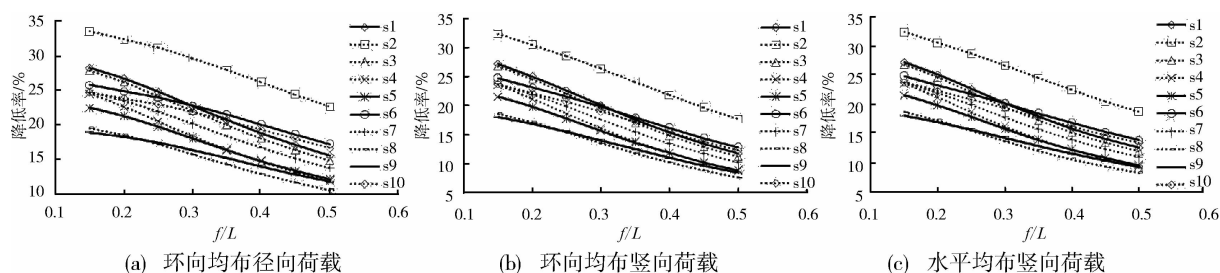


图4 上翼缘相比形心屈曲荷载降低率(%)

Fig.4 Buckling load decrease rate, compared with top flange with centre of figure

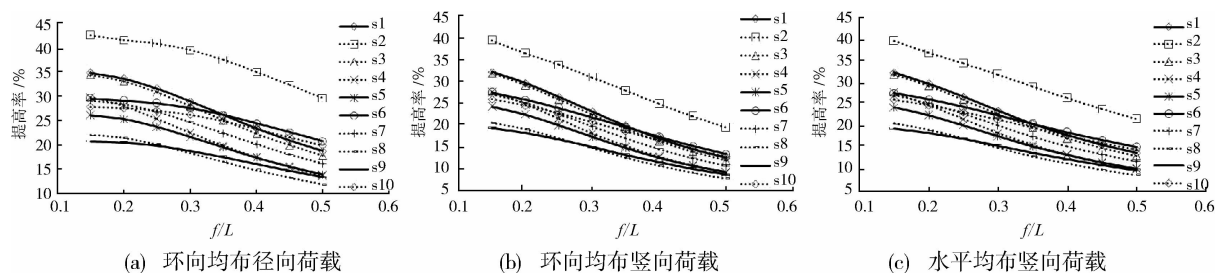


图5 下翼缘相比形心屈曲荷载提高率(%)

Fig.5 Buckling load increased rate, compared with bottom flange with centre of figure

由图4和图5可见,随着矢跨比的增加,荷载作用在上翼缘相比形心时的屈曲荷载降低率和荷载作用在下翼缘相比形心时的屈曲荷载提高率逐渐降低。因此,在跨度一定的情况下,矢跨比较小时,荷载作用位置对平面外屈曲荷载影响较大,不能忽略,有必要采用符合实际的荷载作用位置进行计算和设计。

5 结 论

(1)对于固支和销支拱,环向均布径向荷载模式的屈曲荷载小于环向均布竖向荷载模式和水平均布竖向荷载模式的屈曲荷载,说明按照径向荷载模式设计计算相对保守。

(2)由于环向均布径向荷载下的合理拱轴线是圆弧(拱肋只承受轴力),环向均布径向荷载模式销支拱平面外屈曲荷载与固支拱相同。

(3)对于理想支座约束条件,就平面外稳定而言,当矢跨比较大时,竖向荷载下销支拱反而较固支拱的屈曲荷载更大。由于销支拱与固支拱的支座节点具有不同的构造方式,简单假定两者在平面外的约束条件一样是否恰当,满足什么条件时销轴支座平面外约束可按固定支座对待等都有待进一步研究,也应引起设计人员的注意。

(4)对于固支拱,荷载作用在上翼缘时的平面外屈曲荷载最小,作用在形心次之,作用在下翼缘最大。进行拱的设计时必须考虑荷载作用位置的影响。

参考文献 References

- [1] DIN18800- II Structural steel work[S]. Berlin: Deutsches institut für Normung e. V. 1990
- [2] JGJ249-2011 拱形钢结构技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
Technical specification for steel arch structure[S]. Beijing: China Planning Press,2002.
- [3] 项海帆. 拱结构的稳定与振动[M]. 北京:人民交通出版社,1991.
XIANG Hai-fan. Stability and vibration of arch structure[M]. Beijing: China Communications Press,1991.
- [4] PAPANGELIS John P, TRAHAIK Nicholas S. Flexural-torsional buckling of Arch[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,1987,113(4):889-906.
- [5] TRAHAIK Nicholas S, PAPANGELIS John P. Flexural-torsional buckling of monosymmetric arches[J]. Journal of Structural Engineering,1987,113(10):2271- 2289.
- [6] 杨永华, 陈以一. 双轴对称固支圆弧拱弯扭屈曲荷载的理论解[J]. 工程力学,2008,25(4):1-4, 20.
YANG Yong-hua, CHEN Yi-yi. Theoretic solution for flexural-torsional buckling load of elastic fixed circular arches [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 1-4, 20.
- [7] 杨永华, 吴 杰. 单轴对称截面圆弧拱平面外稳定性研究[J]. 工程力学,2012,29(3):27-32.
YANG Yong-hua, WU Jie. Out of plane stability of mono-symmetric circular arches [J]. Engineering Mechanics, 2012,29(3):27-32.
- [8] 乔彩虹,郭彦林. 圆管截面两铰圆弧纯压拱的平面外稳定性及设计方法[J]. 工业建筑,2009, 39(12):90-94.
QIAO Cai-hong, GUO Yan-lin. Out-of plane stability design of pin-ended circular steel arch under pure compression [J]. Industrial Construction,2009,39(12):90-94.
- [9] SAKIMOTO Tatsuro, KOMATSU Sadao. Ultimate strength formula for steel arches [J]. Journal of Structural Engineering,1983,109(3):613-627.
- [10] PI Yong-Lin, TRAHAIK Nicholas S. Out-of-plane inelastic buckling and strength of steel arches [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(2): 174-183.
- [11] PI Yong-Lin, BRADFORD Mark Andrew. Out-of-plane strength design of fixed steel I-section arches [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE,2005,131(4): 560-568.
- [12] 窦 超,郭彦林. 受弯圆弧拱平面外稳定承载力分析[J]. 建筑结构学报,2012,33 (7):18-26.
DOU Chao, GUO Yan-lin. Out-of-plane inelastic stability of circular arches under bending moment [J]. Journal of Building Structures,2012,33(7): 18-26.
- [13] 窦 超,郭彦林. 圆弧拱平面外弹性弯扭屈曲临界荷载分析[J]. 工程力学,2012,29 (3):83-94.
DOU Chao, GUO Yan-lin. Study on flexural-torsional buckling load of circular arches [J]. Engineering Mechanics,2012,29(3): 83-94.
- [14] 窦 超,郭彦林. 均匀受压圆弧拱平面外弹塑性稳定设计方法[J]. 建筑结构学报,2012,33 (1):104-110.
DOU Chao, GUO Yan-lin. Out-of-plane inelastic stability of strength design of circular arches in uniform compression[J]. Journal of Building Structures,2012,33(1): 104-110.

(下转第 539 页)

stage, but there's no impeccable evaluation system for such projects. The study on this system is built upon the reasonable classification of evaluation stage. Referring to the classified methods of project management program and the project's life cycle, and using the extension discriminant method according to characteristics of the old industrial buildings' recycling project, the extension discriminant model as well as the correlation function is established to classify the evaluation stage of old industrial buildings' recycling in its entire life cycle. According to the key issue of each phase, each phase's evaluation system can be established, and is built a phased hierarchical and gradual evaluation system of the old industrial buildings' recycling.

Key words: *old industrial buildings; recycling; extension discrimination law; correlation function*

Biography: YAN Rui-qi, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel:18612255187, E-mail:yrq1982@163.com

(上接第 525 页)

- [15] 窦超, 郭彦林. 单轴对称截面圆弧拱弹性弯扭屈曲临界荷载[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 69-85.
DOU Chao, GUO Yan-lin. Elastic flexural-torsional buckling load of monosymmetric circular arches [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 69-85.

Elastic flexural-torsional buckling load of I-Section circular arches

XI Kuan-tang¹, LI Jin¹, FAN Jun-jian², ZHOU Tie-gang¹

- (1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Xi'an Engineering & Research Institute of Nonferrous Metals, Xi'an 710001, China)

Abstract: Finite element model was constructed with Beam 188, where loading positions into can be taken into consideration. Effects of different restraint conditions and load models on out-of-plane buckling were studied by comparing finite element analysis results of fixed arches with that of the pin-end arches under three kinds of loading model. Buckling loads of fixed and pin-end arches under the radial loading prove to be the same. The bigger rise-span ratio, the better out-of-plane stability of pin-end arches than that of fixed arches under circumferentially distributed vertical loadings and horizontally uniform distributed vertical loadings. Effects of different loading positions on out-of-plane buckling were also studied. Buckling loads of arches which are loaded on centre of figure are bigger than those on top flange, but smaller than those on the bottom flange.

Key words: *circular arch; I-section; out-of-plane instability; loading position*

Biography: XI Kuan-tang, Associate Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel:0086-13165790118, E-mail: xasxzg@163.com