

U 型拱梁失稳有限元分析

桂晓明, *徐永君, 赵斌

(中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190)

摘要: U 型拱梁在隧道支护和矿山巷道支护中应用广泛, 实际工程中的地压作用以及注浆加固过程中产生的集中力都可能引起支架的失稳破坏。本文利用有限元数值分析软件 ANSYS 采用我们提出的瞬态分析计算失稳临界载荷方法对不同对称位置受径向集中力作用的 U 型钢拱梁的稳定性进行了研究, 并分别采用特征值屈曲分析和几何非线性分析方法进行了分析, 将得到的失稳临界荷载值进行了对比分析。研究结果为工程应用提供了可行方法和理论依据。

关键词: U 型钢; 支架; 稳定性分析; 有限元; 临界荷载

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON STABILITY OF U-TYPE ARCH

GUI Xiao-ming, *XU Yong-jun, ZHAO Bin

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: U-type arch is widely used in tunnel support and mine roadway support. This paper is concerned with the in-plane elastic stability of U-type arch with a Y type symmetric cross section which subjected to a pair of symmetric radial concentrated loads. By using the finite element analysis software ANSYS, the critical forces are obtained for different loading locations. Based on the traditional instability analysis methods offered by ANSYS, transient analysis method is first presented and used in this present paper to obtain the critical loads. The results show that the transient analysis method could guarantee that the corresponding critical load is the lower. The research results provide a feasible method and theory basis for engineering applications.

Key words: U-type arch; buckling/stability analysis; finite element; critical load

1 引言

U 型钢拱梁结构在道路、桥梁、巷道等工程中应用广泛, 在集中压力作用下容易失去稳定, 因此对它的稳定性研究结果对于工程实际是很有意义的。但由于圆弧拱结构相对 U 型拱的应用范围更广泛一些, 而且容易进行理论研究, 因此对拱的理论研究主要集中在形状比较规则的圆弧拱和抛物线拱, 对圆弧拱研究较多的是均匀受压和拱顶受集中压力作用两种情况。

许多学者对拱的面内线性和非线性弹性屈曲问题进行了广泛的研究。Timoshenko、Gere(1961)对各种形式浅拱的屈曲问题做了比较系统的描述^[1]。Gjelsvik、Bodner(1962)用能量法对拱顶集中载荷作用下的具有矩形实体截面的固支浅圆弧拱的稳定性进行了研究, 并得到了近似解^[2]。Schreyer、Masur(1966)对浅圆弧拱进行了精确的分析并得到了解析解, 但是他们的分析仅局限于具有实体矩形截面的固支拱, 对称屈曲模态解的形式非常复杂^[3]。Dickie、Broughton(1971)使用级数法研究了铰支和固支浅圆弧拱的屈曲问题^[4]。Komatsu、Shinke(1977)研究了受均布荷载作用的铰支抛物线拱的非弹性极限荷载^[5]。Mirmiran、Amde(1993)对预应力夹层板和均匀圆弧拱的非弹性屈曲进行了研究^[6]。Pi、Trahair(1996)研究了不同荷载工况下各种因素诸如柔度, 圆心角, 初始弯曲和残余应力对铰支钢圆弧拱的面内非弹性极限荷载的影响^[7]。这些学者的

作者简介: *徐永君(1964—), 男, 河北人, 副研究员, 博士, 主要从事工程力学研究(E-mail: yjxu@imech.ac.cn);

桂晓明(1986—), 女, 陕西人, 硕士研究生, 主要从事结构强度及稳定性研究;

赵斌(1965—), 男, 安徽人, 副教授, 博士后, 主要从事工程力学研究。

理论研究是在小变形或小变形附近进行的，主要致力于得到更精确的求解临界荷载公式，所采用的方法多为近似解析法。由于数学上的困难，对于一些结构不规则，载荷或者边界条件较为复杂的问题，采用解析法或半解析法求解会遇到数学上的困难，对于这类问题，数值计算是一种非常有效的方法。

近年来许多学者开始采用数值分析的方法对圆弧拱屈曲进行研究。Noor、Peter(1981)用数值结果对其采用的混合模型进行曲梁非线性分析的准确性进行了验证^[8]。Stolarski、Belytschko(1982)也用数值结果验证其提出的曲梁膜闭锁和降阶积分的理论分析结果^[9]。Calhoun、DaDepp(1983)对集中力和均布载荷以及它们的组合作用下的固支深拱进行了非线性有限元分析^[10]。Elias、Chen(1988)对浅拱的跳跃屈曲和深拱的屈曲问题进行了非线性有限元分析^[11]。Wen、Suhendro(1991)对各种剖面的深浅拱特别是薄拱结构进行了非线性有限元分析，对动载荷和循环载荷下作用下的拱结构也进行了研究^[12]。Pi、Trahair应用势能原理推导了圆弧拱结构的反对称屈曲和对称屈曲的临界荷载求解公式^[13-14]，并用有限元方法对结果的有效性进行了验证。

巷道的实际支撑结构常采用的U型支护拱的稳定性问题只能采用数值分析。本文利用有限元分析软件ANSYS^[15-18]对U型钢拱梁的稳定性进行特征值屈曲分析、几何非线性分析和瞬态动力学分析，对比了不同对称位置受径向集中荷载作用下的失稳临界荷载，发现对U型拱来说几何非线性分析和瞬态动力学分析的结果基本相同，特征值屈曲分析的结果过高地估计了失稳荷载。

2 工程背景与问题提出

巷道的矿压控制与巷道支护，特别是软岩巷道支护是矿业开采和岩石力学中的世界性难题之一，我国的许多矿区，目前都存在着巷道支护困难的问题，并成为影响矿区发展和矿井经济技术效益的主要因素之一。在软岩支理论指导下，软岩支护技术发展较快，以能够根本改善围岩性状，提高围岩强度，由过去的单一被动支护形式逐步发展形成各种系列支护技术以及联合支护形式。U型钢拱梁和锚网喷护的联合支护是一种比较合理有效的支护方式，再联合注浆进行加固则支护效果更为理想，被广泛采用。在实际工程中由于地压使拱梁产生失稳破坏，注浆过程产生的集中压力也可能使拱梁失稳破坏。本文针对淮南某煤矿实际巷道直墙拱形断面作为研究对象，上半部分为半圆弧拱结构，该巷道已经投入使用很多年，现需要进行二次支护，拟在原有U型钢拱梁和锚喷的联合支护形式下，再联合注浆支护进行加固。本文研究了不同对称位置注浆过程中引起的U型钢拱梁稳定问题，为进一步研究二次注浆加固支护的注浆孔优化布置和合理注浆压力的选取提供理论依据。

3 模型建立

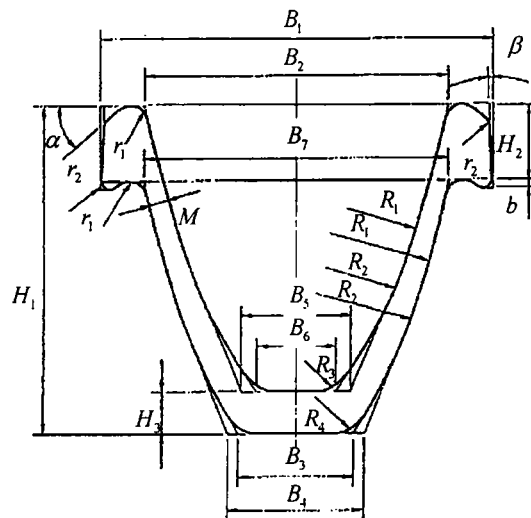


图1 29#Y型钢梁截面

实际支护采用规范中的29#Y型钢拱梁，断面形状及部分尺寸如图1所示，详细尺寸及相关参数见表1。由于考虑支架面内失稳时，失稳特性仅与抗弯截面刚度 EI_z 有关，如果材料不发生改变也即弹性模量 E 不发生变化，那么失稳特性也就仅与截面惯性矩 I_z 和形心轴 y_c, z_c 的位置有关，因此计算时可将Y型钢截面等效为矩形钢截面，保持形心轴位置不变，惯性矩相等，等效的矩形截面尺寸如表2所示。

表1 29#Y型钢梁截面特性参数

截面尺寸/ $10^{-3}m$										
H_1	H_2	H_3	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	M
124	28.5	16	150.5	116	44	53	42	30	116.6	7.2
b	-	d	R_1	R_2	R_3	R_4	r_1	r_2	α	β
3	-	0	450	185	15	16	7	4	40°	3°
截面参数										
截面面积 $/10^{-4}m^2$	惯性矩/ $10^{-8}m^4$		静矩/ $10^{-6}m^3$		形心/ $10^{-2}m$					
	I_y	I_z	S_y	S_z	y_c	z_c				
37	771	612	0	212.91	5.75	0				

表2 等效矩形截面参数

宽度/ $10^{-2}m$	高度/ $10^{-2}m$	截面面积/ $10^{-4}m^2$	惯性矩/ $10^{-8}m^4$
4.83	11.5	55.53	612

巷道支护中所使用的U型钢拱梁结构不对称，如图2所示为简化后的U型钢梁模型，上半部分为半圆弧拱，圆心为 O ，半径为 R ， A 、 B 为铰支点， C 为拱的顶点， P 为作用在夹角 θ 处的径向集中力。

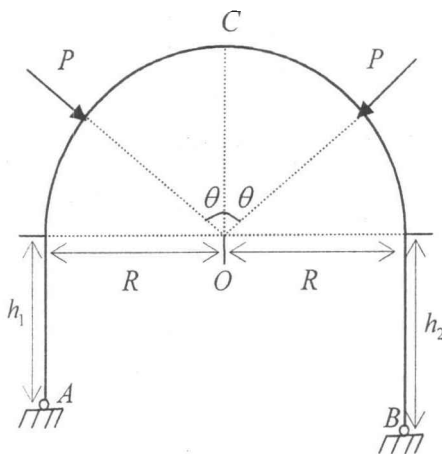


图2 U型钢拱梁简化模型及加载

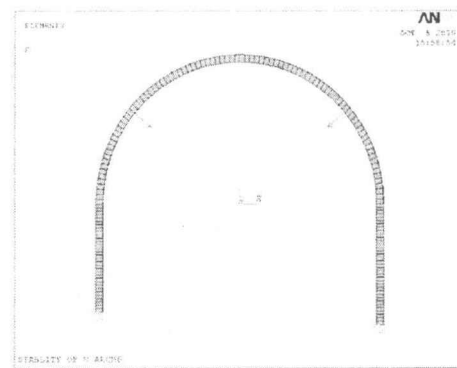


图3 U型钢拱梁有限元加载模型

分别考虑载荷作用角度分别为 $\theta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 处承受对称径向集中荷载和作用在 $y=-0.5m$ 和 $y=-1m$ 位置的对称水平荷载（坐标说明可参考有限元模型加载示意图），计算采用圆弧半径 $R=2.2m$ ， $h_1=1.6m$ ， $h_2=1.8m$ ，等效矩形钢截面为 $b=0.048m$ ， $h=0.115m$ ， $I_z=612 \times 10^{-8}m^4$ ，选用二维梁单元BEAM3，拱脚节点约束 x, y 方向位移模拟铰支端，钢弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}Pa$ ，泊松比 $\mu=0.3$ 。用直接生成有限元模型的方法建立了U型钢拱梁有限元模型，如图3所示。

4 结果分析

用ANSYS进行结构稳定性分析，预测结构失稳临界荷载和屈曲后形状的主要方法有：特征值屈曲分析和非线性屈曲分析。通常情况下都希望得到结构的保守荷载，即下限荷载，本文除了采用传统的这两种分析外，还应用圆弧拱有限元分析时提出的瞬态分析方法对U型钢拱梁结构进行了稳定性分析。

不同分析方法得到的U型钢拱梁的失稳临界荷载值如表3所示。为了和其他对称加载形式相对应，拱

顶临界荷载值取为一半，图 4 所示为特征值屈曲分析得到的 U 型钢拱梁的失稳模态图，图 5 所示为相应的失稳临界荷载值随载荷作用角度的变化关系曲线。

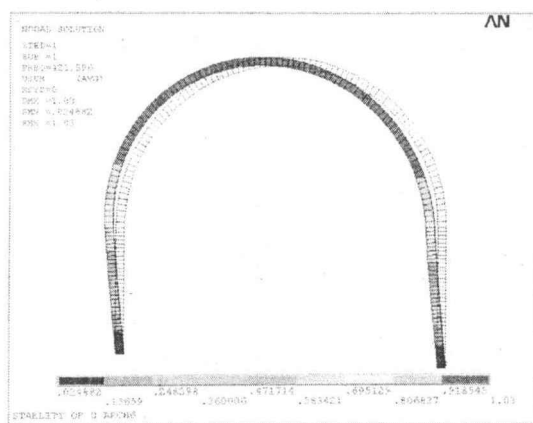


图 4 U 型钢拱梁失稳模态图

表 3 U 型钢拱梁失稳临界荷载值

载荷作用位置	特征值/kN	几何非线性/kN	瞬态分析/kN
$\theta=0^{\circ}$	271.92	214.222	208.5
$\theta=10^{\circ}$	276.003	219.322	212
$\theta=20^{\circ}$	288.951	232.361	224.187
$\theta=30^{\circ}$	313.149	256.679	247.38
$\theta=40^{\circ}$	353.757	290.358	270.2
$\theta=50^{\circ}$	421.596	432.588	432.3
$\theta=60^{\circ}$	541.618	607.938	608.4
$\theta=70^{\circ}$	783.903	970.288	971.04
$\theta=80^{\circ}$	1432.4	970.8	971.04
$\theta=90^{\circ}$	4017	1040.01	1038.24
$y=-0.5m$	5465.7	1164.25	1163.68
$y=-1m$	8586.4	1752.64	1755.6

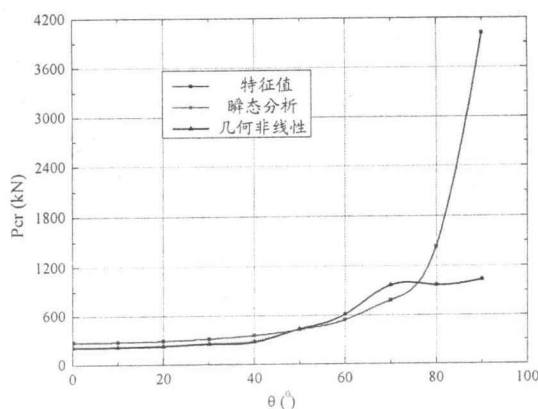


图 5 U 型钢拱梁临界荷载值随作用角度变化关系曲线

由图 5 可以看出，随着对称径向集中荷载作用位置从拱顶到拱脚变化，临界失稳荷载值随作用角度的增大逐步增大，瞬态分析和几何非线性分析得到的临界失稳荷载值一样。在载荷作用角度为 50° - 60° 的位置，特征值屈曲分析的结果最小，在其余位置瞬态分析的结果相对最小。

为保证工程应用的安全性，对 U 型钢支架来说可以使用几何非线性或者瞬态分析的方法获取临界荷载值。

5 结论

本文在传统 ANSYS 有限元稳定性分析方法的基础上, 并利用瞬态分析方法对 U 型钢拱梁结构进行稳定性分析, 并将计算结果和传统的特征值屈曲分析和几何非线性分析结果进行了对比分析。对本文所采用的 U 型钢拱梁结构来说, 瞬态分析和几何非线性分析方法得到的结果基本相同, 除载荷作用角度为 50° - 60° 的位置处特征值分析的结果较小外, 在其余位置瞬态分析得到的临界荷载值在三种方法中最小。本文研究结果具有一定的工程应用背景, 为实际工程应用提供了相关依据。

参考文献:

- [1] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of elastic stability (2nd Edition) [M]. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [2] Gjelsvik A, Bodner S R. The energy criterion and snap buckling of arches[J]. Journal of the Engineering Mechanics. ASCE, 1962, 88(5): 87-134.
- [3] Schreyer H L, Masur E F. Buckling of shallow arches[J]. Journal of the Engineering Mechanics. ASCE, 1966, 92(4): 1-20.
- [4] Dickie J F, Broughton P. Stability criteria for shallow arches[J]. Journal of the Engineering Mechanics, 1971, 97(3): 951-965.
- [5] Komatsu, S, Shinke T. Practical formulation for in-plane load carrying capacity of arches. Proc., JSCE, 1977, 267: 39-52.
- [6] Mirmiran A, Amde A M. Inelastic buckling of prestressed sandwich or homogeneous arches[J]. Journal of the Structural Division. ASCE, 1993, 119(9): 2733-2743.
- [7] Pi Y L, Trahair N S. In-plane inelastic buckling and strengths of steel arches[J]. Journal of the Structural Engineering, ASCE, 1996a, 122(7): 734-747.
- [8] Noor A K, Peters J M. Mixed model and reduced/selective integration displacement model for nonlinear analysis of curved beams[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1981, 17(4): 615-631.
- [9] Stolarski H, Belytschko T. Membrane locking and reduced integration for curved elements[J]. Journal of Applied Mechanics, 1982, 49(1): 172-176.
- [10] Calhoun P R, DaDeppo D A. Nonlinear finite element analysis of clamped arches[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(3): 599-612.
- [11] Elias Z M, Chen K L. Nonlinear shallow curved-beam finite element[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1988, 114(6): 1076-1087.
- [12] Wen K R, Suhendro B. Nonlinear curved-beam element for arch structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(11): 3496-3515.
- [13] Pi Y L, Trahair N S. Non-linear buckling and postbuckling of elastic arches[J]. Engineering Structures, 1998c, 20(7): 571-579.
- [14] Bradford M A, Uy B, Pi Y L. In-plane stability of arches under a central concentrated load[M]. Sydney: University of New South Wales, School of Civil Engineering, 2000.
- [15] 丁美. 结构稳定性分析中 ANSYS 的应用[J]. 低温建筑技术, 2003, 96(6): 42-44.
- [16] 李双蓓, 刘立国, 倪晓慧. 结构稳定性研究的现状和新方法的探索[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2004, 29: 107-111.
- [17] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [18] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.