

地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析

梁晓丹,刘 刚,赵 坚

(中国矿业大学建筑工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要 对压力拱拱体进行定义,通过应力分析确定拱体的边界,并用数值分析方法对拱进行分析.分析结果表明,岩性和围岩中水平应力对围岩中应力拱的位置和形状有很大影响,围岩强度越高,拱体越靠近硐室,形状陡峭;围岩强度较低者,拱体则远离硐室,形状平缓.足够的水平应力是压力拱成拱必不可少的条件.

关键词 地下工程;压力拱;岩性;水平应力;硐室稳定

中图分类号 :TU94+1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2005)03-0314-04

压力拱的产生是岩石地下工程中拱效应现象之一.拱结构是设计人员根据荷载确定几何形状为拱形的一种结构.拱效应是材料在受力后出现变形,为了抵抗变形而发生力传递的偏离,是材料在荷载作用下自发产生的自我调节以达到自稳的一种现象.研究岩石地下工程中的拱现象可以弄清岩体的自承载能力及硐室稳定的机理,为支护设计和隧道施工提供必要的指导.

岩石地下工程中的拱效应现象早已被人们所认识,最初提出隧道开挖中存在拱效应现象的是 Kovari^[1],他通过对隧道顶部下沉的研究作出了无黏结材料中存在拱效应的推测.随后 Fayol 在物理实验中总结出了岩石拱(rock arch)的基本概念,得出岩石拱的存在可以减小洞室顶部变形的结论^[2],但他的研究只针对矿井中成层分布的岩体,且研究结果仅应用于地面沉陷,没有对拱做更深一步的探讨,也没有对他所提出的拱进行定义.1907 年俄国学者普氏学说的创立^[3],加深了对松散介质中自然平衡拱的研究.1946 年,Terzaghi 也通过实验证实拱效应在砂体中的存在^[4],并对其进行了力学分析.Huang^[5]于 2001 年对自然拱的判别有了初步的研究.我国在拱效应研究方面也取得了相当的进展.20 世纪 90 年代中期,研究人员对压力拱进行了研究.自然拱或压力拱的研究均将岩体假设为松散破碎介质,这仅反映了特定岩石的特性,对坚硬岩石区的成拱是偏于保守的.在隧道选线时,通常会尽量选择地质条件较好的地方,避免破碎带,因此,本研究具有一定的实用价值.

1 压力拱拱体的定义

压力拱是岩体为抵抗不均匀变形而进行自我调节的一种现象,是荷载传递路线发生的偏离,这种现象无法用肉眼观测到,为一应力集中区域.它的主要特点是地下工程开挖后,主应力方向发生偏转,但无破裂发生.压力拱不仅存在于顶板上,也存在于两帮和底板.如果把围岩作为一种结构来看,处于压力拱中的岩体承担着自身和其上的岩体荷重,是确保其上方岩体不会塌落的一个具有拱的力学特性的结构.

根据压力拱的定义,用应力分析方法可以确定拱体上、下边界.(a)确定下边界的判别方法.如果围岩为无破坏的理想状态,由于拱体自身和其上的荷载向硐室两侧转移,在拱体内部最小主应力减小,最大主应力增大,因此最大主应力在边界处最大.当有破坏发生在围岩中时,由于变形导致应力释放,该处的最大主应力减小,如图 1 所示.因此,最大主应力的最大值在压力拱的下边界处.(b)确定上边界的判别方法.上边界根据最小主应力在拱体内被转移到最大主应力这种现象来确定.拱体内的岩体,最小主应力逐渐减小,最大主应力逐渐增大^[6],因此可以用围岩中最小主应力的减小量来判断该部分岩体是否属于拱体,如减小量大,则认为该部分岩体进入了拱体.最小主应力的减小用开挖前的最小主应力减去开挖后的最小主应力来表示,然后用数理统计中的 χ^2 检验来判别各点是否在拱体内.

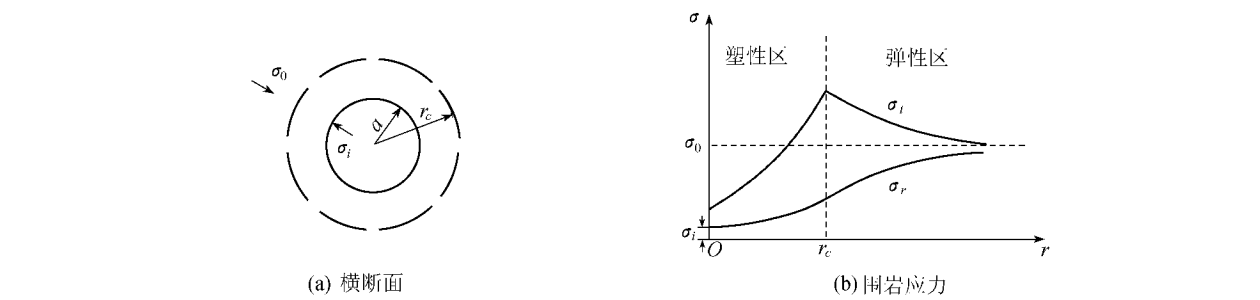


图 1 有破坏发生的围岩中应力的变化

Fig.1 Variation of stress in surrounding rock with failure occurrence

2 压力拱的数值分析

因进行大量的现场试验并获得充足的数据有很大的难度,因此本研究只进行数值分析.岩石的模型分别采用弹性材料和弹塑性材料,采用 Mohr-Culomb 准则,对砂岩、页岩、片麻岩和花岗岩进行分析,表 1 中数据为试验中取得的某一地区岩石的部分力学参数.

数值模拟的模型为一断面宽度为 10 m、高 11 m,顶板为拱形的隧道硐室,围岩的力学参数分别为表 1 中所列.图 2 为硐室周围的主应力分布,图 3 为围岩中沿某一路径的径向最大和最小主应力.由图 3 可以得知,在该路径中,A 点处的最大主应力的值为最大,因此,该点为拱体的下边界.Huang^[5]曾以硐室正中的上方应力方向发生转变的点作为上边界的确定点,根据此点画出与硐室顶板曲率一致的弧线,但一点不能确定一条直线,也就是说在不同岩性及节理的岩体中,即使硐室尺寸和形状不变,拱的上边界形状却是变化的.研究中考考虑当最小主应力减小量很小时,可以认为该部分岩体基本没有扰动,不属于拱体范围内,因此,可以用不同路径的最小主应力减小量来确定拱体的上边界,图 4 为某路径最小主应力减小量,图中 B 点为计算出的此路径的上边界.

表 1 岩石材料的典型力学参数

Table 1 Typical mechanical parameters of some rock materials

岩石类型	弹性模量 E/GPa	泊松比	摩擦角/ (°)	黏结力 c/MPa
石灰岩	28	0.29	35	24
页岩	11	0.29	22	4
片麻岩	50	0.26	28	20
花岗岩	64	0.22	35	55

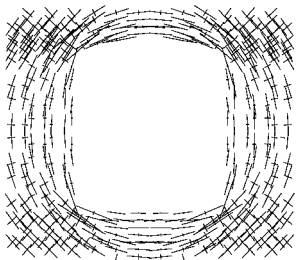


图 2 硐室周围的应力分布

Fig.2 Stress distribution in rocks around an opening

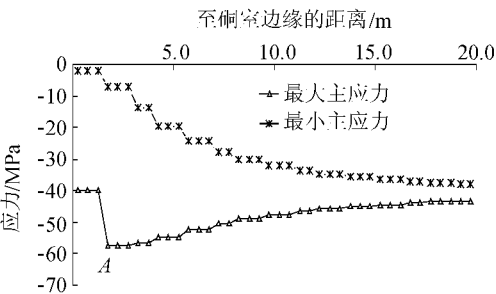


图 3 某路径围岩径向的应力分布

Fig.3 Radial stress distribution in surrounding rock along a certatin path

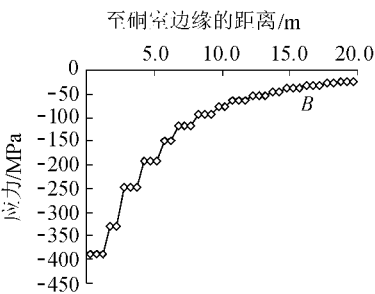


图 4 某路径围岩径向的最小应力的减小量

Fig.4 Decrease of minimum radial principal stress in surrounding rock along a certatin path

3 数值计算结果分析

3.1 压力拱在弹性材料中的形成

在将砂岩、页岩、片麻岩以及花岗岩作为理想弹性材料来分析时,发现主要力学参数如弹性模量和泊松比的变化对压力拱没有影响,这一点可以用弹性力学方法在理论上得到验证.采用 Kirch 的线弹性材料中圆

形硐室周围的应力计算方法进行分析,可知材料性质对应力不产生影响,也就是说对作为应力集中区的压力拱没有影响.洞室的几何尺寸及地应力对压力拱产生影响,不只是地应力数值大小对压力拱产生影响,而且围岩中水平应力与竖向应力的比值的影响更大.

3.2 压力拱在弹塑性材料中的形成

本研究采用 Mohr-Culomb 准则作为破坏准则.由于拱体内没有破坏发生,因此材料的力学性能与拱效应的形成关系密切.图 5 为页岩、石灰岩、麻岩以及花岗岩中的压力拱.图 5(a)所示为质地软的页岩压力拱,其形状类似方形,在顶板和两帮处平缓;图 5(b)中的石灰岩比页岩稍硬,顶板处的拱形平缓,洞底陡峭;而图 5(c)和(d)中质地硬的麻岩和花岗岩,形成的拱形状类似菱形,在硐室顶板及两帮处陡峭.进一步的研究发现,材料的黏结强度和摩擦角对拱体的厚度和下边界的位置影响比较大,尤其是黏结强度.虽然摩擦角的变化范围不大,但是材料的黏结强度比较低时,摩擦角的变化对材料的强度起着重大影响.当黏结强度和摩擦角小时,拱体的厚度增大,且下边界远离硐室,这是由于低抗剪强度的岩体不能承受更多的荷载,不得不有更多的岩体参与其中将竖向荷载向两侧传递,且硐室周围岩体发生破坏的范围增大,因此下边界远离硐室.弹性模量和泊松比主要影响拱体的厚度,岩石的弹性模量越大,压力拱的厚度越小.

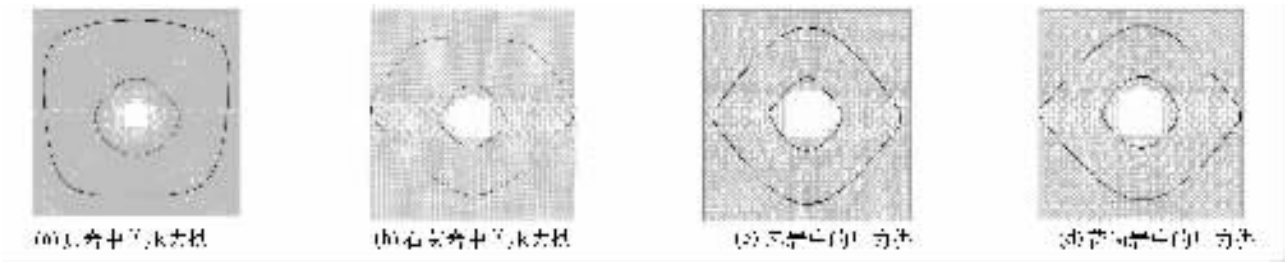


图 5 弹塑性材料中的压力拱

Fig.5 Pressure arches in elastic-plastic materials

3.3 水平应力对压力拱的影响

围岩中水平应力与垂直应力的比值(k)分别为 0.5、0.8、1 和 2.无论是在弹性材料中还是在弹塑性材料中,水平应力对压力拱的影响都是至关重要的. $k < 0.5$ 时,由于竖向应力大于水平应力,加之岩体的竖向荷重,使得顶板有受拉的趋势,而岩体的抗拉强度是比较低的,因此,顶板在此状态下易于破坏,破坏的岩体无法传递荷载.由计算结果看,低水平应力情况下的岩体不能在洞室顶部产生稳定有效的拱效应. k 值分别等于 0.8 和 1 时,硐室周围形成椭圆形且压应力均匀的受压区,此时压力拱的下边界位于距顶板洞室 1.5 m 左右处.因此,足够的水平应力是形成应力拱的条件之一. k 值大于 1 时,形成的压力拱与 k 值等于 1 的压力拱相比,拱的下边界距洞口顶板很近,即岩体的稳定区域与顶板很靠近,所以水平应力大对顶板稳定是有利的,但过大会对硐室两侧稳定造成不利影响.

水平应力作为荷载和水平向约束作用在压力拱上,但作为水平向约束对压力拱的影响最大.水平应力对岩石地下工程中拱的影响与支座水平力对拱结构的影响相似.由拱结构的分析可知,支座水平力的存在使得荷载能够沿着拱线传递,即没有水平向约束,拱结构将无法存在.

$$y = \frac{V}{H}x - \frac{W_x}{H}(x - x_0) \tag{1}$$

式中: y ——拱高; H ——支座处水平力; V ——支座处竖向力; W_x ——拱体的单位荷重; x, x_0 ——拱的横坐标.由式(1)可以看出,水平力的增加会导致拱高的降低,这一点和数值计算的结果一致.

4 结 语

自然界中不存在完全弹性的材料,压力拱在弹塑性材料中的分析更接近实际情况.强度高的岩体中,拱体的下边界靠近硐室,厚度不大,在强度低的岩体中则相反.水平应力是在硐室周围形成拱效应的重要因素,它不但影响拱体的形状,还决定压力拱存在与否.足够的水平应力可以在硐室两侧形成拱脚,承担沿着拱体传递来的荷载,使其上岩体保持稳定,不会塌落入硐室内.在 $k < 0.5$ 的地方,隧道设计中要注意加强顶板的支护.

参考文献：

[1] KOVARI K. Erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method[J]. Tunnels & Tunnelling ,1994 ,11 38—41.
[2] BRADY B H G ,BROWN E T. Rock mechanics for underground mining[M]. London :George Allen & Unwin ,1985. 212—213.
[3] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京 :科学出版社 ,2002. 330—333.
[4] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York :John Wiley & Sons ,1947. 66—76.
[5] HUANG Z. Stabilizing of rock cavern roofs by rockbolts[D]. Norway :Norwegian Univ of Science and Technology ,2001.
[6] 吴继敏 ,高正夏 ,侯玉宾. 岩体圆形洞室锚杆前后应力位移分析[J]. 河海大学学报(自然科学版) ,1999 ,27(4) :107—110.

Definition and analysis of arching action in underground rock engineering

LIANG Xiao-dan , LIU Gang , ZHAO Jian

(College of Architecture and Civil Engineering , China University of Mining and Technology , Xuzhou 221008 , China)

Abstract :The pressure arch was defined , and its boundary was determined based on stress analysis. The numerical analysis of the pressure arch shows that the rock properties and horizontal stress in surrounding rocks are of great influences on the location and shape of the pressure arch , and that in high-strength surrounding rock , the pressure arch with steep shape is close to the opening , while in low-strength surrounding rock , the pressure arch with gentle shape is far away from the opening. It is also concluded that stresses large enough in horizontal direction are necessary for the formation of a pressure arch.

Key words :underground engineering ; pressure arch ; rock properties ; horizontal stress ; stability of opening

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年 ,是我国中文核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并获得全国高校科技期刊优秀编辑出版质量奖 ,以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,邮发代号 :28-63 ,每本定价 :8.00 元 ,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址 :南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部 ,邮政编码 :210098。