

围岩自调节成拱特性的实验与数值分析^{*}

梁晓丹^① 赵 坚^② 宋宏伟^③

(^①浙江建设职业技术学院建筑工程系 杭州 311231)

(^②Rock Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Lausanne, Switzerland)

(^③中国矿业大学力学与建筑工程学院 徐州 221008)

摘 要 本文在围岩应力分析的基础上,通过物理实验模拟和数值计算,分析了由于隧道开挖后应力变化引起的围岩自调节成拱的特性及相关影响因素作用下的压力拱成拱规律。在本文中,将压力拱内边界距洞口的距离和拱体厚度作为判定压力拱成拱和评价围岩稳定的参数。当内边界靠近隧道洞口,围岩基本稳定;压力拱的厚度小意味着需要较少的岩体来承担拱体自身和其上岩体的荷载。在此基础上,运用平面应变相似模拟实验模拟隧道开挖过程,对开挖过程中洞口周围应力升高区进行了观察和分析,明确了压力拱的成拱,以及随着距离洞口越近变形增加的幅度越大等现象。运用数值分析发现,随着节理的间距的减小,压力拱内边界靠近洞口,压力拱厚度增大;在2组节理围岩中,节理倾角分别为30°和60°时,成拱最不利;而节理的黏结强度对压力拱成拱的影响程度与节理摩擦角的大小相关联,摩擦角大于20°时,节理黏结强度对压力拱成拱影响甚微。

关键词 成拱特性 实验及数值分析 内边界 厚度 节理

中图分类号:U451⁺.2 **文献标识码:**A

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE ARCHING ACTION FROM STRESS ADJUSTING IN SURROUNDING ROCKS

LIANG Xiaodan^① ZHAO Jian^② SONG Hongwei^③

(^①Zhejiang Construction College, Hangzhou 311231)

(^②Rock Mechanics Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Lausanne, Switzerland)

(^③College of Mechanics and Civil Engineering, Chinese University of Mining and Technology, Xuzhou 221008)

Abstract In this paper, after the stress analysis of surrounding rocks, excavation simulated experiments and numerical calculation are applied to study the characteristics of arching action under conditions of different rock properties. Firstly, inner boundary and thickness are used to define an arch in surrounding rocks and to evaluate the stability of underground openings. When the inner boundary is near openings, the surrounding rocks are stable. The thickness of arching action indicates the extent to which the surrounding rocks are influenced by excavation. Less thickness means fewer rocks are used to sustain their own weight and that of rocks above. Then, the arching action is defined in the excavation simulated experiment. In this experiment, it is observed and analyzed that the increase of tangential stresses occurs and an arch is formed around an opening. Data from the experiment show that the increase of displacements is greater near the opening. In numerical analysis, it is found that joints have great influence on the formation of an arch. The position of inner boundary of pressure arch is far away from an opening and thickness is

^{*} 收稿日期: 2011-03-06; 收到修改稿日期: 2011-08-18.

第一作者简介: 梁晓丹, 从事岩石地下工程稳定性方面的研究. Email: lxd618@163.com

greater with the decrease of joint space. And, in rock mass containing two sets of joint, when a joint incline angle is 30 degree or 60 degree respectively, it is disadvantageous for an arch formation. In addition, the influence degree of joint cohesion on arching action is related to joint friction angle. When the joint friction angle is more than 20 degree, the joint cohesion influence is negligible.

Key words Arching action, Experimental and numerical analysis, Inner boundary, Thickness, Joint

1 引言

地下工程的开挖会后,围岩会自行调节、组织稳定,这就是围岩的应力重分布现象^[1,2]。实现岩石地下工程稳定的最经济、可靠的方法是充分发挥围岩的自稳能力,而围岩自调节成拱现象是其自稳能力的体现,因此,深入研究围岩应力自调节成拱特性对指导围岩稳定评价和支护具有重要意义。

最初提出隧道开挖中存在拱效应现象的是 Kovari^[3],他通过对隧道顶部下沉的观察研究做出了松散、无黏结材料中存在拱效应的推测。岩石拱(rock arch)的概念首次由 Fayol 提出,他认为岩石拱的存在可以减小洞室顶部变形,但没有对拱做出具体的力学定义^[4],而且他的研究只局限于矿井中成层分布的岩体。1907 年俄国学者普氏学说的创立^[5],是对松散介质中自然平衡拱的进一步研究。1946 年 Terzaghi 通过该实验发现砂体中拱效应的存在^[6],在他的研究中假设岩体沿洞室上方的滑动面破坏,并假定滑动体中任意水平面上的垂直压力为均布,得到的研究成果适于浅埋于破碎体中的隧道稳定分析。以后的研究均是普氏或 Terzaghi 的延续,只是进一步与工程实践结合起来。

1962 年 Rabcewicz 在新奥法中提到地拱(ground arch)的概念来描述围岩可以在一定时间内自稳^[3,4],环绕洞室周围的岩体作为结构能够自承载。Bergman & Bjurstrom (1983) 在研究岩石锚杆时,尝试用岩体内的拱效应现象说明洞室的稳定,并指出压力拱靠近顶板,且在支护设计的理论和实践中应将压力拱现象进行考虑^[7]。Lang (1984) 和 Stillborg (1994) 则认为压力拱在远离洞室的上方,且是不可用肉眼观测到的存在于围岩内部的现象^[8]。矛盾的出现是由于没有明确、统一的判别压力拱拱体方法,直到 2001 年, Huang 在他的博士论文里对压力拱的判别有了初步的研究^[9,10],拱体下边界为地下洞室的拱形顶板,上边界根据洞室顶板上方中心处应力方向发生偏转的那一点来确定,根据此点画出与洞室顶板曲率一致的弧线。

经过多年的工程实践,岩石地下工程中的拱效应现象渐渐为人们所重视,人们在设计施工时开始考虑由拱效应所产生的岩体的自稳能力,这方面的研究至今仍在进行,但可以确定的是,压力拱是地下工程开挖后,应力重分布的结果,是岩体自我调节、自承载能力的体现。压力拱的形成有助于围岩稳定,并可阻止持续破坏的发生。

20 世纪 90 年代中期,我国科研人员对压力拱进行了研究,取得了相当的进展。2003 年宋宏伟对完整岩体中压力拱的成拱进行了初步研究,并提出岩石压力拱的厚度与洞室的埋深、跨度和围岩力学性质有着重要关系^[11]。随着研究的深入,对压力拱的定义及压力拱拱体的判定方法进一步明确,并发现洞口与压力拱之间的围岩变形量增幅较大^[12,13]。2007 年汪成兵在对软弱破碎围岩渐进性破坏的研究中,将压力拱的形成与围岩破坏的发展结合在一起,讨论二者之间的动态联系^[14]。以上对压力拱成拱特性的研究大部分局限于松散破碎介质中,这仅反映了特定岩石的特性,且松散破碎介质可以看作是均质体,而工程实际中的岩体大部分表现出非均质、非连续的特性,因此目前的研究还具有局限性。本文通过对模型试验和数值计算结果的分析,根据隧道开挖后的围岩应力变化讨论其成拱特性,重点讨论围岩中节理的存在对压力拱成拱的影响。

2 围岩应力自调节特性分析

隧道开挖后围岩内会出现应力重分布,是荷载传递路径发生改变,并渐次达到自我稳定的一种现象,是围岩为抵抗开挖引起的变形而进行的自我调节直至成拱现象。通过上述分析可知,压力拱是一个应力集中且稳定的区域,其存在于洞口四周。处于压力拱区域内的岩体担负着自身及其上岩体荷载,并使其不落入洞内。根据压力拱承载及内部应力特点,可以将其看作为具有拱的力学特性的结构,这意味着压力拱在隧道稳定中起着举足轻重的作用。

在本研究中发现,当压力拱内边界靠近隧道,围

岩较为稳定；反之,处于不稳定状态。压力拱拱体的厚度能够表明围岩受扰动的程度及范围,厚度小说明用于承担拱体自身及其上荷载的岩体较少；厚度大意味着需要较多的岩体参与工作、承担荷载,岩体强度比较低。因此,可以将压力拱内边界距隧道洞口的距离及拱体厚度作为评价围岩稳定的指标。

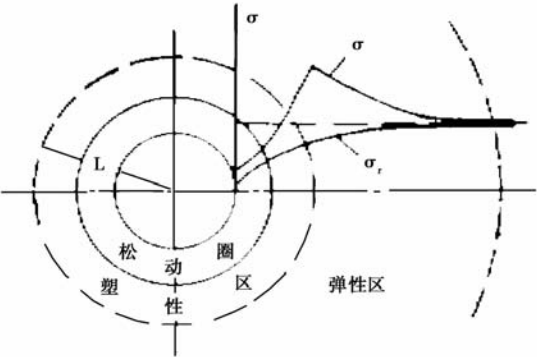


图1 圆形洞室围岩的应力分析

Fig. 1 Stress analysis of rock around round openings

压力拱内边界距隧道的距离和拱体厚度可以在围岩应力分析的基础上通过确定压力拱内外边界来获得。由图1中可以看到,地下工程开挖后,围岩中切向应力在弹性区域和部分塑性区域内增加,而径向应力减小,即应力出现转移,由径向转移至切向。因此,切向应力的升高区即为压力拱区域^[12, 13]。

3 围岩应力自调节特性的实验分析

3.1 实验简介

实验目的是通过测试围岩的位移,考察应力的自调节特性,确定压力拱内边界,同时分析压力拱拱体内的岩体位移。本实验为平面应变相似模拟实验,模型底端及前后固定,两侧及上部加荷载。考虑实验条件的因素,隧道的开挖为先开挖后加载。选用石腊和砂的混合物作为砂岩的模型材料,二者配比为100:4,模型材料的主要力学参数见表1^[15]。模型尺寸为1×1×0.2m,几何相似比例 $\alpha_L=40$,模型内开一个直径为10cm的圆形洞室。模型的加载在三维双向加载实验台中进行,在加载实验台的顶面和2个侧面进行竖向和水平加载。模型开挖好后,开始以0.1MPa为起始荷载,以0.1MPa为增量荷载逐级进行加载,直至加到2.8MPa。

在“开挖→加压→围岩变形→平衡→破坏”的实验过程中,利用数字照相量测技术进行实验模型

表1 实验材料力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of experimental materials			
类别	抗压 σ_c /MPa	弹模 E /GPa	泊松比 μ
实验模型	0.7	0.5	0.28
岩石原型	34.5	29.58	0.28

的图像采集,将图像输入李元海博士开发的数字照相变形量测 GeoDPDM2D 软件系统,分析模型表面位移场及围岩应力。

3.2 实验结果分析

通过数字图像处理软件对拍摄的图片进行分析,得到荷载为2.8MPa时的模型变形等值线图(图2),从图中可以看到,靠近洞口处,变形变化梯度大,呈加速发展趋势。距离洞口较远处,变形发展趋势变缓。

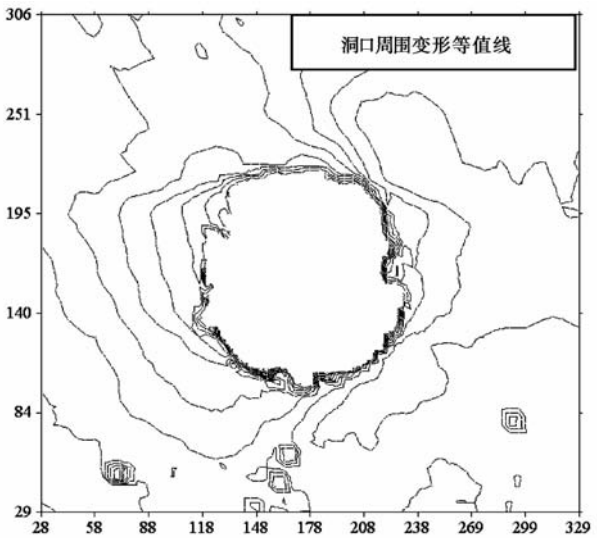


图2 隧道围岩位移场

Fig. 2 Displacement of surrounding rock

取模型的四分之一区域进一步进行位移变形分析,分析前对实验中所得到的位移值进行处理,去除初始应力场所产生的变形的影响,得到洞口顶部处一条路径荷载为2.8MPa时的变形值(图3)。由图中可看到,随着距离洞口的距离越近,变形增加的幅度在渐渐加大。A点位置为压力拱内边界。

运用反分析演算出顶板处载荷为2.8MPa时该条路径的切向应力值,应力曲线见图4。可以在图4中看到,距离洞口为22.5mm处切向应力为2.8MPa,该点为压力拱内边界,在图3和图4中表示为A点,由此应力开始升高,并达到峰值

31.85MPa 左右。图 4 中的纵轴为应力值,单位为 Pa; 横轴为距离洞口的距离,单位为 m。

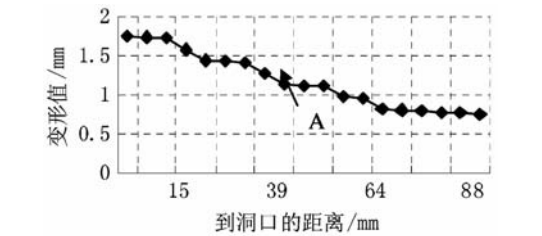


图3 顶板处荷载为 2.8MPa 时的变形曲线
Fig. 3 Displacement curve of opening roof when 2.8MPa loading

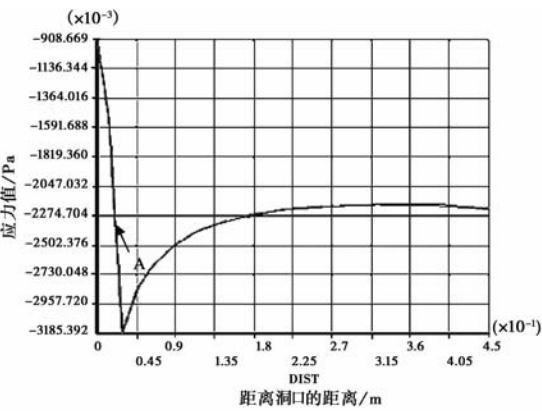


图4 顶板处荷载为 2.8MPa 时切向应力曲线
Fig. 4 Tangential stress curve of opening roof when 2.8MPa loading

4 节理对围岩应力自调节特性影响的分析

自然界中的岩体内存在着非连续面,将岩体看作连续体是对其的理想化,或只代表非连续面很少的较完整岩体,不能说明节理围岩的实际情况,因此,应考虑节理对压力拱的影响。Hoek & Brown (1980)的研究表明:存在 2 组以上节理的岩体可以被看作均质体,因此,对数值计算中的围岩分别考虑存在 1 组和 2 组节理。

本研究中的数值分析采用离散元软件 UDEC,数值计算中采用 Mohr-Culomb 准则对岩体中节理对围岩应力自调节特性进行分析。表 2 为岩石材料和节理的主要力学参数。数值模型为岩体中开挖一宽 10m、高 11m、顶板为拱形的隧道,边界应力均为 20MPa^[11]。

表 2 数值模拟中岩石材料和节理力学参数				
Table 2 Mechanical parameters of rock materials and joints				
岩石类别	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏结强度/MPa
岩石	74	0.22	47	55
节理	74	0.22	10	0

4.1 单组节理围岩中压力拱的形成

单组节理的存在不仅削弱了岩体强度,也增加了岩体的各向异性,使开挖后的围岩产生不均匀、不对称的应力和变形,图 5 为单组节理围岩模型。

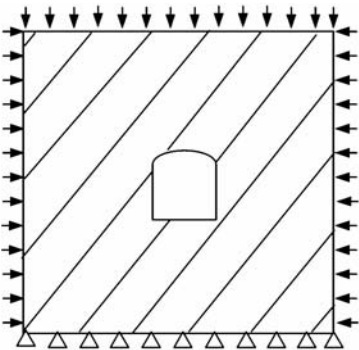


图5 单组节理围岩数值计算模型
Fig. 5 Numerical model of surrounding rock with one set of joint

4.1.1 节理间距对压力拱的影响

通过对单组节理围岩中不同节理间距的压力拱计算,可以得到单组节理密度的影响。由图 6 和图 7 中可以看到,隧道顶板和底板处压力拱内边界的位置随着节理间距的加大而靠近隧道边缘,而左帮和右帮由于节理倾角的存在而呈现了不同的特性可以看出,右帮处的压力拱内边界距隧道比左帮处的稍远。

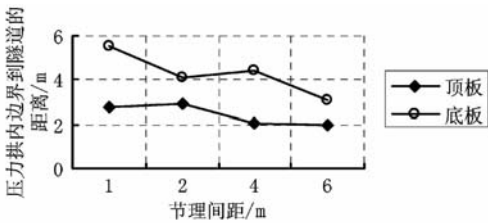


图6 节理间距影响下的压力拱内边界
Fig. 6 Effect of joint spacing on inner boundary in opening roof and floor

由图 8 和图 9 可以看到,压力拱厚度是随着节理间距的增大而减小的,可以认为,节理间距的增大

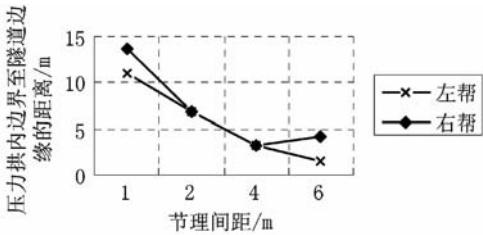


图 7 单组节理围岩中隧道帮部压力拱内边界
Fig. 7 Effect of joint spacing on arch inner boundary in opening side wall in rock mass with one set of joint

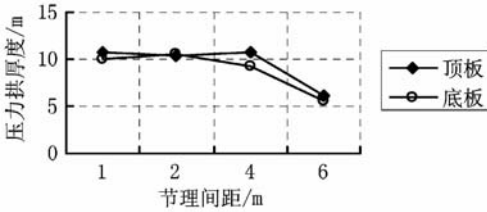


图 8 单组隧道顶板和底板处压力拱厚度
Fig. 8 Effect of joint spacing on arch thickness in opening roof and floor

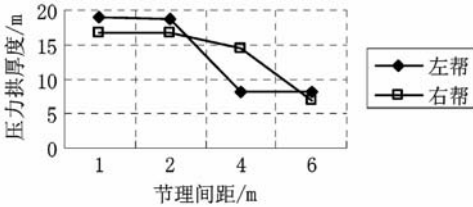


图 9 单组节理围岩中隧道两帮处压力拱厚度
Fig. 9 Effect of joint spacing on arch thickness in opening side wall

是岩体内节理密度变小,使岩体的强度提高和非均匀性有所改善。

4.1.2 节理倾角对压力拱的影响

由图 10 和图 11 可以看到,单组节理围岩中压力拱内边界随节理倾角的增大而远离隧道,厚度虽变化不是很显著,但仍随节理倾角的增大而增大。研究中发现,当倾角大于 60° ,压力拱成拱困难,即无支护的围岩中,当节理倾角大于 60° 时,围岩处于不稳定状态。

4.2 2 组节理对压力拱成拱机理的影响

与单组节理围岩比较,2 组节理的存在进一步削弱了岩体强度,但岩体不均匀性减小。图 12 为模型采用的节理分布, α 分别为 0° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° ; β 分别为 90° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 。

4.2.1 节理间距对压力拱的影响

对 α 为 0° , β 为 90° 的 2 组节理围岩进行数值计

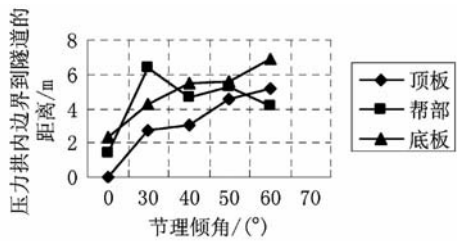


图 10 单组节理围岩中节理倾角对压力拱内边界的影响
Fig. 10 Effect of joint incline angle on arch inner boundary in rock mass with one set of joint

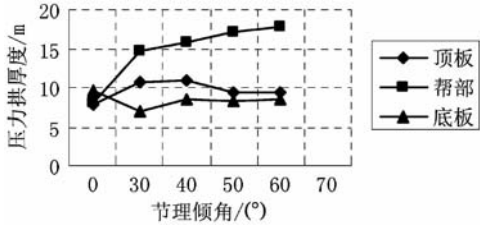


图 11 单组节理围岩中节理倾角对压力拱厚度的影响
Fig. 11 Effect of joint incline angle on arch thickness in rock mass with one set of joint

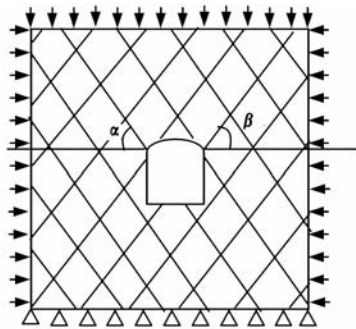


图 12 两组节理围岩数值模型
Fig. 12 Numerical model of surrounding rock with two sets of joint

算,得到隧道顶板、两帮及底板在不同节理间距影响下的变化趋势(图 13 和图 14)。顶板处的压力拱内边界及厚度几乎没有变化,两帮和底板处的压力拱内边界随间距的增大而靠近隧道,两帮处的压力拱厚度随间距的增大而减小,底板处压力拱厚度没有变化。总体上说,间距对压力拱内边界的影响大于对厚度的影响。

4.2.2 节理倾角对压力拱的影响

由图 15 和图 16 中可以看到,在倾角分别为 30° 和 60° 时,成拱最不利,压力拱内边界距离隧道比较远,厚度大,破坏范围大,最大主应力的方向变化大,且混乱,使荷载不能有效的传递。岩体结构面与水平方向成 60° 左右时,强度和模量开始降低;成 30° 左右时再次降低,这是压力拱在节理倾角为 30°

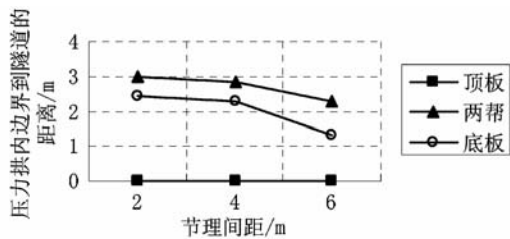


图 13 不同节理间距下 2 组节理围岩压力拱内边界
Fig. 13 Effect of joint spacing on arch inner boundary
in rock mass with two sets of joint

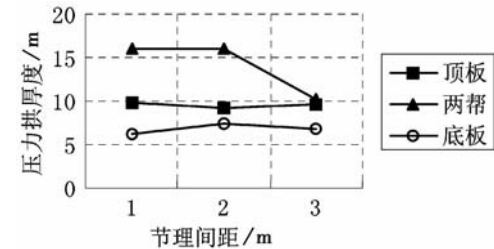


图 14 不同节理间距下 2 组节理围岩压力拱厚度
Fig. 14 Effect of joint spacing on arch thickness
in rock mass with two sets of joint

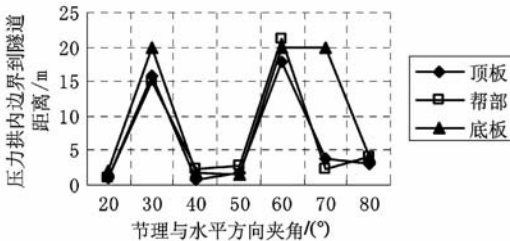


图 15 节理倾角对 2 组节理围岩压力拱内边界的影响
Fig. 15 Effect of joint incline angle on arch inner boundary
in rock mass with two sets of joint

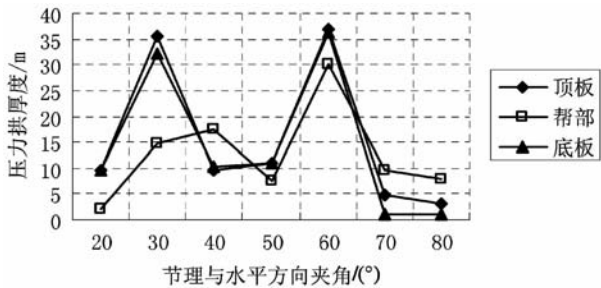


图 16 节理倾角对两组节理围岩压力拱厚度的影响
Fig. 16 Effect of joint incline angle on arch thickness
in rock mass with two sets of joint

和 60°时成拱不利的原因。

4.2.3 节理参数对压力拱的影响

分别改变节理摩擦角及黏结强度值,研究节理的力学参数对压力拱形态和位置的影响。通过数值

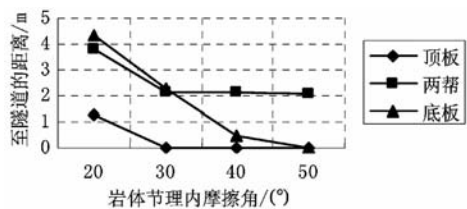


图 17 压力拱内边界随节理摩擦角的变化
Fig. 17 Effect of joint friction angle on arch inner boundary

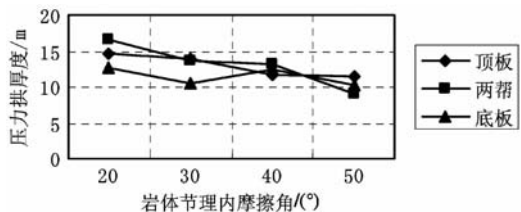


图 18 压力拱厚度随节理摩擦角的变化
Fig. 18 Effect of joint friction angle on arch thickness

计算可以发现,节理的力学参数对压力拱的形成有着不可忽视的影响,但影响程度不同。图 17 为压力拱内边界随节理摩擦角的变化,节理的摩擦角对内边界影响比较大,随着摩擦角的增大,内边界越靠近隧道。图 18 所示的压力拱厚度也是随摩擦角的增大而减小的,但与内边界位置相比变化幅度不大。

与节理摩擦角相比,节理黏结强度对压力拱的形成有影响,但摩擦角大于 20°时,节理黏结强度对压力拱内边界和厚度影响甚微。图 19 和图 20 所示为摩擦角为 20°时压力拱内边界和厚度的变化,内边界随着黏结强度的增加,趋势是靠近隧道的,而厚度变化趋势不显著。由此可见,黏结强度对压力拱

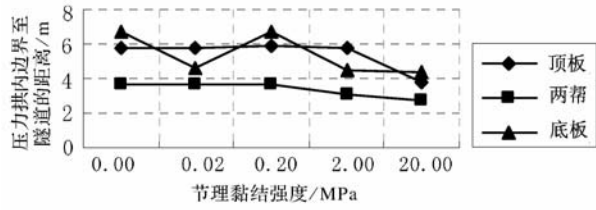


图 19 不同节理黏结强度下的压力拱内边界
Fig. 19 Effect of joint cohesion on arch inner boundary

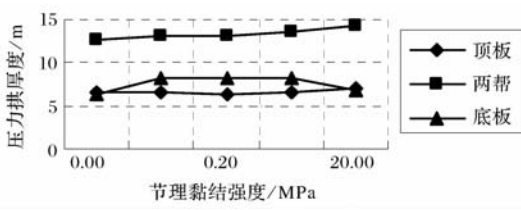


图 20 不同节理黏结强度下的压力拱厚度
Fig. 20 Effect of joint cohesion on arch thickness

的影响是在摩擦角小的条件下,摩擦角小,节理的错动是受黏结强度影响的;摩擦角大,节理处咬合,即使黏结强度小,节理处也不易破坏。

5 结 语

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偏离,为一应力集中区域。压力拱不仅存在于顶板上,也存在于两帮和底板,能够承担着自身和其上的岩体荷重。压力拱拱体的确定是用切向和径向应力的升高与降低来判定的,内边界位置和拱体厚度作为判别指标。

通过隧道开挖模拟实验对围岩变形和压力拱的成拱进行分析,验证了压力拱的形成,并发现隧道变形小时,压力拱更靠近洞口。

单组节理的围岩中,压力拱的内边界随节理密度的加大而远离隧道,厚度随节理密度的加大而加大。压力拱内边界随节理倾角的增大而远离隧道,厚度虽变化不是很显著,但仍随节理倾角的增大而增大。当倾角大于 60° ,压力拱成拱困难,即围岩处于不稳定状态。

2组节理的围岩中,节理间距不仅影响压力拱的位置,随着间距的加大,压力拱靠近隧道;节理间距还影响压力拱的形状,节理密度大时,隧道顶板及两帮处受节理的影响大,并随着节理密度的降低靠近隧道,底板处的压力拱反应不敏感。在节理倾角分别为 30° 和 60° 时,成拱最不利,压力拱内边界距离隧道比较远,厚度大。节理的力学参数对压力拱的形成有着不可忽视的影响,但影响程度不同。节理的摩擦角对内边界影响比较大,随着摩擦角的增大,内边界越靠近隧道。压力拱厚度也是随摩擦角的增大而减小的,但与内边界相比幅度不大。与节理摩擦角相比,节理黏结强度对压力拱的形成有影响,但摩擦角大于 20° 时,节理黏结强度对压力拱内边界和厚度无影响。当摩擦角小于 20° 时,内边界随着黏结强度的增加,趋势是靠近隧道的,而厚度变化趋势不显著。

参 考 文 献

- [1] 孙元春, 尚彦军. 岩石隧道围岩变形时空效应分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(2): 211~215.
Sun Yuanchun, Shang Yanjun. Intergrated analysis of the temporal-spatial effect of surrounding rock deformation in tunneling. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(2): 211~215.
- [2] 晏长根, 刘彤, 伍法权. 复杂条件下大型地下洞室群的变形稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(1): 84~88.
Yan Changgen, Liu Tong, Wu Faquan. Deformation and stability analysis of large-scale underground cavity group under complicated geological conditions. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(1): 84~88.
- [3] Muller L, Fecker F. The elementary thought and primary principle of new austrian tunnelling method[J]. Underground Space, 1980, **6**: 26~32.
- [4] Kovari, K. Erroneous concepts behind the New Austrian tunnelling method[J]. Tunnels & Tunnelling, 1994, **11**: 38~41.
- [5] Bandis SC. Mechanical properties of rock joints. In: Proc. Int. Soc. Rock Mech. Symp. on Rock Joints [C]. Norway, 1990, 125~140.
- [6] Hoek E and Brown ET. Underground Excavations in Rock [M]. London, 1980.
- [7] Bergman SG and Bjurström S. Swedish experience of rock bolting: A keynote lecture. In: Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting [C]. Abiko, 1983, 243~255.
- [8] Lang T A. Underground experience in the snowy mountains, in: Proc. of the 2nd Protective Constr. Symp. (Deep Underground Congstr.) [C]. Australia, 1959, 767~834.
- [9] Huang Z P. Stabilizing of Rock Cavern Roofs by Rockbolts [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology. 2001.
- [10] Huang Z P, Broch E, Lu M. Cavern roof stability-mechanism of arching and stabilization by rockbolting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**(3): 249~261.
- [11] Song HW, Zhao J and Wang C. Study on concept and characteristics of stress rock arch around a cavern underground. In: Proceedings of Underground Singapore 2003 and Workshop 'Updating the engineering geology of Singapore' [C]. Singapore, 2003, **11**: 44~51.
- [12] 梁晓丹, 刘刚, 赵坚. 地下工程压力拱拱体的确定与成拱分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, **33**(3): 314~317.
Liang Xiaodan, Liu Gang, Zhao Jian. Definition and analysis of arching action in underground rock engineering. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, **33**(3): 314~317.
- [13] 梁晓丹. 节理围岩应力自调节成拱特性及稳定性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学博士论文, 2006.
Liang Xiaodan. Study on the Arching Action by Stress Adjusting and Stability of Jointed Surrounding Rock. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.
- [14] 汪成兵. 软弱破碎隧道围岩渐进性破坏机理研究[D]. 上海: 同济大学博士论文, 2007.
Wang Chengbing. Study on the Progressive Failure Mechanism of the Surrounding Rock of Tunnel Constructed in Soft Rock. Shanghai: Tongji University. 2007.
- [15] 姜耀东, 刘文岗, 赵毅鑫. 一种新型真三轴巷道模型试验台的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(21): 3727~3731.
Jiang Yaodong, Liu Wengang, Zhao Yixin. Design and development of a new type triaxial system for roadway model test. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(21): 3727~3731.