

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.013

隧道围岩压力拱研究进展

吴海科,刘远明,李汝嘉,唐苗,罗伯成,曹凯

(贵州大学 土木工程学院,贵阳 550025)

摘要:从压力拱定义来看压力拱是能保证岩体的稳定性的,那么充分发挥压力拱的拱效应,就可以提高隧道工程经济性和安全性。因此,压力拱的研究一直是个热点和难点。通过收集整理、归纳总结及综合分析已有的相关研究“成果”得出:随着试验手段的多样化和现代技术的发展,压力拱及相关概念的研究取得了一定的成果,但对其判断标准、形成条件依然未陈述清楚,并且缺少统一的标准;压力拱的自稳性和动态压力拱是否具有一般性的规律,是否在一定条件才成立?仍有待证实;压力拱研究中的数值分析和物理模型试验各有优缺点,因此,二者需要相互“合作”,彼此补充和验证。从当前情况看,试验设备、试验材料及加载方法仍达不到清洁高效、简洁适应、智能环保的要求,仍需深入研究。

关键词:隧道工程;压力拱;数值模拟;模型试验;相似材料

中图分类号:U451.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)S2-0064-06

Advances in developments of tunnel pressure arch tests

Wu Haike, Liu Yuanming, Li Rujia, Tang Miao, Cao Kai

(Civil Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, P. R. China)

Abstract: Based on pressure arch definition, pressure arch can guarantee the stability of rock mass. While give full play to arch effect of pressure arch, can improve the economics and safety of tunnel project, Therefore, the pressure arch has been a hot and difficult study. This paper has finished existing study results collection, summary and comprehensive analysis, gets results that: with the development of the diversity of the test methods and modern technology, pressure arch and related concept study get a certain achievements, but the judgment standard, forming condition is not stated clearly, and the lack of unified standard; Self-stability of pressure arch and dynamic pressure arch has a general rule or not, under certain conditions to set up? Yet to be confirmed. Numerical analysis of pressure arch study methods and physical model tests have its advantages and disadvantages. So, both need each other "cooperation", complement and validation; Currently, test equipments, materials and loading methods are still short of clean and efficient, concise adaptive, intelligence environmental protection, still need further study.

Key words: tunnel engineering; pressure arch; numerical simulation; model test; similar material

中国是一个多山的国家(山地、高原、盆地占国土面积 78%左右),并且地形复杂多变,受到这样的地形、地貌影响,交通事业(陆地交通)的发展难免穿越崇山峻岭。因此,在发展交通事业中隧道工程的

发展占有举足轻重的地位。

隧道在开挖过程中,原岩受到破坏,开挖部分围岩被移走,失去支撑作用,周围围岩有向洞内“膨胀”变形趋势或者掉落现象。洞壁围岩的初始应力状态

收稿日期:2016-10-14

基金项目:国家自然科学基金(11562005)

作者简介:吴海科(1990-),男,硕士生,主要从事隧道工程研究,(E-mail)2355654826@qq.com。

被打破,应力将发生重分布,相邻质点相互制约、相互作用,引起应力、应变、位移和能量的变化,围岩为了抵抗开挖引起的不均匀变形而引起应力重新调整,荷载传递路线发生偏移,主应力方向发生偏转,形成了应力重分布场,这就是隧道围岩压力拱^[1-3]。

1 压力拱定义及特点

近年来,压力拱相关研究及相关应用得到大力发展,这将促进隧道工程设计合理性、隧道施工方法及施工理念的发展,对指导工程实践具有重要理论意义和应用价值。自从压力拱相关概念、理论被引进以来,中国学者对此研究就没有终止过,相关的研究成果层出不穷。因此,压力拱的概念、定义可以说是“名目繁多”。

1.1 压力拱定义

压力拱^[1-4]是指因隧道开挖引起围岩应力重分布和围岩不均匀变形,致使最初的应力状态受到破坏和荷载传递路线发生偏移,并且主应力大小和方向都发生改变,在一定条件下,通过自我调节在隧道周边形成具有类似拱结构的围岩保护圈。隧道围岩压力拱将荷载传递到“拱脚”及“拱座”等周围稳定岩体中,并充分发挥岩土材料良好的受压性能。如果把围岩作为一种结构来看,处于压力拱的岩体承担自身和其上部的岩体荷重,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。但是该结论有待证实。

1.2 压力拱特性

压力拱是岩体(岩石)地下工程的一种现象并且是从应力场的角度出发推导出来的。因此,具有特殊性,以下几点就是压力拱的特点^[3-4]:1)客观存在,且肉眼无法观测得到;2)必须以围岩作为载体;3)上下边界主应力方向发生转变,并且无破裂现象;4)拱结构不但在拱顶,还可以存在于两侧和拱底;5)不需要人为施加外界因素,通过自我调节达到自稳。

2 隧道围岩压力拱试验研究现状

2.1 压力拱数值模拟研究现状

计算机技术及软件的快速发展,推动了数值模拟方法在地下工程的应用。并且,数值模拟方法不受边界效应、模型尺寸、试验周期等因素影响。目前常用的数值方法可以分为^[5]:

1)基于连续介质力学的方法:有限元法、边界法、有限差分法;

2)基于非连续介质力学:离散单元法、不连续变

形分析法;

3)流形方法是介于连续和非连续之间的一种方法。

所应用到的主要软件有 ANSYS、ABAQUS、FLAC、MIDAS、PFC、AGLOR 等。

很多学者利用数值方法对压力拱及其内、外边界进行定义,并给出自己的判断方法:

梁晓丹等^[3]提出,1)最大主应力的最大值在压力拱的下边界上(既内边界),外边界是由最小主应力被转移成最大主应力这种现象来确定。但是该判断存在以下问题:其一,该判断没有考虑隧道开挖后松动圈的围岩对拱效应的影响,及侧压力系数的影响;其二,最大主应力和最小主应力的增减和转化关系并未得到证实;其三,并未找到压力拱外边界的形成和最小主应力的减小有关的依据。2)压力拱的形成是条件之一是要有足够的水平应力,以切向应力的升高区作为压力拱的区域。原因是拱结构的受力特点需要一个竖直支撑力和水平支撑力;3)以距隧道洞口距离、拱体厚度作为评价围岩稳定的指标有所欠缺。指出压力拱内边界靠近隧道开挖部分,围岩则相对稳定,反之则稳定性较差;压力拱拱体厚度的大小除了表明围岩受扰动程度和范围,还决定着围岩稳定性程度,还说明开挖后围岩自稳性好、不稳定范围小即松动圈范围小,需要来承担荷载的岩体也较少。但是该研究并未有考虑开挖方式及开挖方法对其扰动的影响。

李奎等^[6]认为压力拱内边界在水平应力增大区,如隧洞洞壁存在水平应力减少区,则压力拱内边界就在水平应力未发生改变区,否则压力拱内边界在洞壁;对于垂直应力增大区和上述梁晓丹的结论一致;压力拱的外边界和侧压力系数大小有关,侧压力系数大小不一样,压力拱是否成型及压力拱形状也不尽相同;压力拱的形成必须达到一个临界埋深 H_c 。

郑颖人等^[7]通过强度折减法有限元数值模拟试验研究了埋深对压力拱影响,研究结果表明:受到埋深的影响矩形隧道逐渐形成明显的浅埋压力拱、深埋压力拱及当埋深很大时,拱顶不再形成劈裂面,而是侧壁出现明显的破裂,分别如图 1 所示。相比矩形隧道,拱形隧道没有形成深埋压力拱;当埋深在 18 m 范围内,不论是出现深埋还是浅埋压力拱,破坏的部位都在拱顶;当埋深在 18 m 范围外,破坏最先在侧壁;由此得出,18 m 是隧道深浅埋的分界线。虽然该研究说明了埋深对隧道围岩压力拱的影响和

深浅埋的分界线。但是,该研究所定义的压力拱明显与普遍意义上的压力不同,还需进一步研究和比较。原因有 3:其一、该模型在建立之初就是一个稳定的隧道模型(物理模型);其二、从变形来看,一个是失去支撑作用发生变形,另一个是因为上部加载而发生变形(类似于预应力结构);其三、从受力角度看,力的方向和路径不一样,普通模拟开挖的力是从最初的竖直方向慢慢转变成竖直和水平,郑颖人院士的模型受力的方向本来就是竖直和水平。尽管该研究发现了不仅存在深浅埋压力拱,且存在深浅埋隧道,但是,该研究未提出划分深、浅埋隧道的条件和标准。

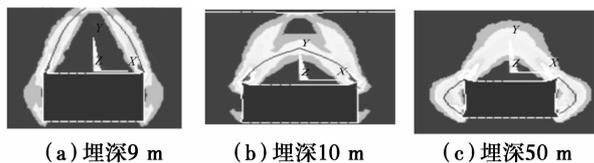


图 1 不同埋深隧道压力拱演变图

刘灼^[8]认为隧洞开挖后,根据弹塑性理论知识,将围岩划分为:松动区、承载区(即压力拱)、原岩区(见图 2)。从图看到,压力拱成环状并有严格的分界线,但是未给出这一结论的划分依据和标准。同时提出了压力拱内、外边界的判别方法。内边界:原岩应力与小于原岩应力的切向应力的相交线作为内边界。外边界:受到开挖的扰动,切向应力很难恢复到最初的原岩应力。因此,将两者做差值,如曲线的驻点前后斜率变化率不超过 10%,并且曲线平滑和稳定,这样将形成有效的压力拱(只在拱顶以上部位),压力拱的外边界即是驻点处。台启民等^[9]认为为了便于比较分析,可以将切向应力恢复到原岩应力的 90%时的点作为压力拱外边界。

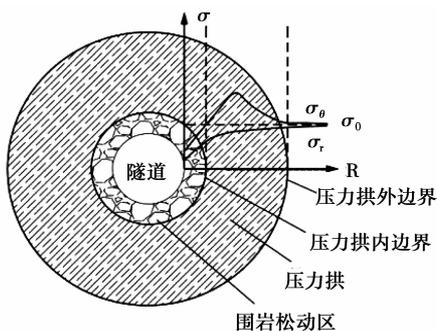


图 2 围岩压力拱的范围

朱正国等^[10]研究连拱隧道围岩压力计算方法,提出隧道围岩压力是由松动圈的松动压力和压力拱自身土体压缩变形而作用在支护结构上的应

力组成,这并没有考虑压力拱是否形成,及压力拱外边界之外的压力的作用;压力拱内边界是切向应力和原岩应力曲线的点,外边界是恢复到原岩应力的点。

台启民等^[9]研究了软弱破碎围岩压力拱演化规律,得出了压力拱演化的 3 个阶段:外边界形成阶段;内边界连通阶段;内、外边界发展阶段。但是 3 个阶段的形成标准和形成条件未说明清楚。并且,为了保证施工安全:第 1 阶段为最佳控制阶段;第 2 阶段为可控阶段;第 3 阶段为最不利阶段,因此,要在第 3 阶段发展前对围岩进行及时处理。

2.2 压力拱物理模型研究现状

朱合华等^[11]、汪成兵等^[5]研究了隧道围岩渐进性破坏及机理,提出动态压力拱-随着隧洞变形和塌方的发展,压力拱逐渐向四周发展,直到变形或塌方结束,显现“动态现象”见图 3。并且这种“动态现象”将可能出现两种情况:1)埋深足够深时,尽管压力拱逐渐向四周发,但最终会形成一个稳定的“塌落拱”;2)受埋深影响时,围岩破坏就会继续发展直至到达隧道表面形成塌穿型塌方,同时隧道围岩压力拱也会彻底消失。但是动态压力拱是否具有一般规律性有待进一步研究。

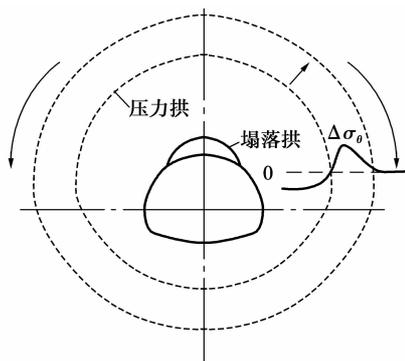


图 3 围岩动态压力拱示意图

邢心魁等^[12]在加固条件下,研究隧道压力拱分布规律。他们认为压力拱内、外边界的划分是环向应力到达初始环向应力的点,并把环向应力大于初始环向应力的区域(即承载区),作为压力拱的范围;受到支护压力减小的影响压力拱不断向上移;加固作用可以增加围岩的影响范围,同时也提高围岩的承载能力,原因:一是加固可以提高围岩的整体性;二是加固作用有更多围岩“参与”承载;提高围岩黏聚力和内摩擦角,可以达到加固的作用,但是内摩擦角和黏聚力是围岩自身固有的,无法改变.因此,可以通过改变外部条件(如加锚杆支护)来提高“整体”

围岩的内摩擦角和黏聚力。

扈世民^[13]以黄土大断面隧道兰渝铁路段为背景,对围岩压力拱效应进行了分析,研究表明:受到隧道开挖的影响,原始荷载传递荷载路线受到破坏,最初承载岩体被移走,因此,拱部的压力拱切向应力荷载增加,因承担径向传来的荷载而增加。并且离隧洞越近影响越大,同时压力拱向原岩区扩展,相对粘性土黄土隧道的压力拱范围更大。虽然得出一些成果,但是并未能证明压力拱切向应力的增加跟径向应力有直接关系。

叶飞等^[14]对软弱破碎隧道围岩动态压力拱进行了研究,研究结果认为:隧道开挖完成后,受到隧道围岩产生塑性破坏压力拱的范围逐渐向围岩内部发展,并且压力拱半径有不断增大趋势;压力拱动态分析建立在拱顶水平应力和拱腰竖直应力明显增大区,并以隧道拱顶围岩水平应力升高区作为压力拱拱体范围,图 4 为压力拱不同阶段发展状态。

郑康成等^[15]研究了隧道分步施工特大断面隧道压力拱的动态过程,研究表明:以拱顶最大应力方向偏转点作为拱顶压力拱的外边界基准点,内边界是开挖前后拱顶正上方水平应力曾与减的转换点;受到开挖的影响,洞周应力是分区、分阶段扩展的及压力拱的形成也受到开挖步骤的影响;有效

的支护可以降低压力拱的包络线,限制开挖时压力拱高度的扩大。

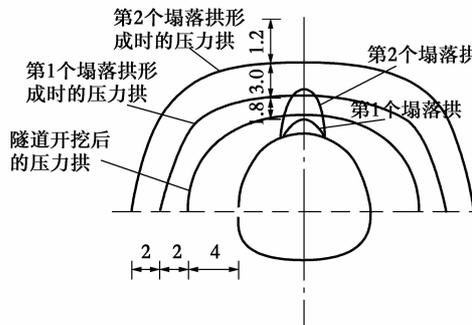


图 4 不同阶段压力拱位置(单位:m)

2.2.1 试验相似材料 受到材料的非线性、几何形状的非线性、变形的非连续性和破坏的非线性影响,数值模拟试验的研究存在较大的局限性,所以数值模拟不能有效模拟隧道围岩的受力变形过程和破坏过程。因此,研究隧道围岩的变形及破坏的研究离不开物理模型试验。并且物理试验和数值模拟二者是相互补充、相互验证及相互比较。在决定模型试验成败的相似材料、尺寸效应、边界效应、配比及制作等几个关键因素中,第一重要的是相似材料,它直接决定试验的可行性和成败,相似材料必须具备以下特点^[5]:

表 1 中国相似材料发展历程

编号	年份	主要研究人员	单位	主要材料	
				骨料	辅助材料
1	2010年、2013年	郑颖人 ^[7]	中国人民解放军后勤工程学院	砂:石膏:水泥:滑石粉:水=1:0.6:0.2:0.2:0.35	
2	2011年	Zhu Weishen、Li Yong ^[16]	Shandong University	铁、重晶石、石英粉	酒精、松香
3	2011年	HE Ben-guo、ZHU Yong-quan ^[17]	Southwest Jiaotong University	黄土、滑石粉	石膏
5	2013年	Feng Huang、Hehua Zhu ^[18]	Tongji University	重晶石:石膏:砂:水:洗涤剂=12:4:2:0.92:0.35	
6	2014年	扈世民 ^[13]	北京城建设计研究总院	重晶石、石英砂	凡士林
7	2015年	Huan Juan、Yuan Tiesing ^[21]	Central South University	混凝土、重晶石	石膏
8	2007年、2010年、2015年、2016年	汪成兵 ^[5] 、朱合华 ^[11] 、叶飞 ^[14] 、徐前卫 ^[20]	同济大学	重晶石、砂	石膏、洗衣液、洗洁精

注:从上可以看出骨料主要有重晶石、铁粉、石英砂、水泥及粘土,辅助剂除了以上提到的还有酒精、聚酰胺、硅橡胶、硅橡胶固化剂、汽油、粉煤灰等。

- 1)均匀、各向同性;
- 2)材料力学性能不受或者少受外界条件(阳光、温度、湿度)影响;
- 3)材料之间的配比及材料相互作用后,其力学

性能依然稳定;

- 4) 材料来源广、价格低廉;
- 5) 模型加工、制作周期短;
- 6) 易于数据的测量、收集和观察;
- 7) 无毒无害、安全环保;
- 8) 废弃材料处理简洁、方便。

从 20 世纪 60 年代开始,国外一些学者(以意大利为首的 E. Fumagalli 专家对工程地质力学相似材料进行了研究,其研究范围经历 3 个阶段:弹性阶段;塑性阶段;直到最终破坏阶段。随后西方其他国家及日本也相继进行这方面的研究,并取得一些研究成果。国外主要的相似材料有两种^[5]:一种是铅氧化物、石膏作为主要材料,砂子、小圆石作为辅助材料;还有一种是重晶石粉、环氧树脂及甘油作为主材。这两种相似材料各有其优缺点,在使用中结合各自的条件择优选择。

中国从 20 世纪 70 年代开始对隧道相似材料进行科学研究,得到了很多研究成果,其中具有一定代表性的可参见表 1。

3.2.2 试验设备 地质力学模型试验有两种,二维模型和三维模型,三维模型由于更接近真实情况和利于观察实验现象,因此有更好的发展前景和更大的适用范围。主要用的试验设备有:

- 1) 模型装置:模型试验台、模型箱;
- 2) 加载系统:气囊加载系统(空气压缩机)或液压泵加载系统(液压千斤顶);
- 3) 监测与计量系统:1) 监测系统有数码相、数码摄像机;2) 计量系统有数据采集系统(静态应变仪)、应力传感器、应变传感器、位移传感器及电脑等;
- 4) 开挖及支护设备:大、小洛阳铲、切土刀、电钻(模拟掘进机)、锚杆(铁丝或橡胶棒)。

5) 其他设备及仪器:称(天平或电子称)、搅拌机、钢尺、压力盒、应变片、称量纸、量筒、手套、口罩。

3 结论

1) 之前的学者对压力拱、压力拱边界、拱体范围及深浅埋压力拱进行了研究,取得诸多结论和成果,并给出各自的定义。但对其判形成条件、划分标准及判断标准未陈诉清楚。因此,相关结论的判断标准有待证实。

2) 压力拱的形成及形状是否受开挖断面形状、断面尺寸和围岩级别等因素影响,有待证实和指定统一的判断标准。因此,压力拱很难得出一般规律。

3) 如果压力拱真的具有拱的力学特性,压力拱

就能保证隧洞的稳定性,那么上述提到的“动态压力拱”就不成立。原因:在隧洞开挖形成“第一个”压力拱,就能确保上方岩体稳定性,在压力拱没有受到破坏的情况下,上部岩体依然是处于稳定状态,而不是向四周延伸和发展。而事实证明,在工程实例及模拟隧道开挖时,隧洞的稳定性是不确定的(有时一次成型后就能稳定,有时存在短暂的稳定)。因此,压力拱的自稳性和动态压力拱的观点是不全面的,是有待证实的,或者说他们的成立是有条件的。

4) 研究手段中:数值分析手段,不仅无法观察到隧道受力变形及破坏的全过程,而且对压力拱的变化规律、形态特征也不能进行细化分析和观察;物理模型手段,受到边界效应、模型尺寸、试验周期及人为因素等原因影响,但物理模型能较全面、真实、客观的反映地质构造和岩体工程结构的空问关系。因此,二者的研究手段是相互补充,相互验证的。

5) 从上述试验设备、相似材料及加载方法来看,还未达到简洁高效、智能方便及经济环保等。因此,在试验设备、相似材料方面依然需要进一步研究。

参考文献:

- [1] HUANG Z P, BROCH E, LU M. Cavern Roof stability-Mechanism of arching and stabilization by Rockbolting [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2002, 17(03): 249-261.
- [2] SONG H W, ZHAO J, WANG C. Study on the concept and characteristics of stress rock arch around caverns [J]. Proceeding of Underground Singapore, 2003, 10.
- [3] 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.
- [4] 李奎. 水平层状隧道围压压力拱理论研究[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- [5] 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, 2007.
- [6] 李奎,李斌,高波. 深埋与浅埋隧道分界理论分析方法的研究[J]. 铁道建筑, 2013, 12: 27-31.
- [7] 郑颖人,王永善. 隧道围岩压力理论进展与破坏机制研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(6): 423-430.
- [8] 刘灼. 连拱隧道围岩压力机理研究[D]. 河北:石家庄铁道大学, 2014.
- [9] 台启民,张顶立,王剑晨,等. 软弱破碎围岩高铁隧道压力拱演化规律分析[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(6): 62-68.
- [10] 朱正国,刘灼,隋传毅,等. 连拱隧道围岩压力计算方法

- 初探[J]. 铁道建筑,2015,6:45-49.
- [11] 朱合华,黄峰,徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩土力学与工程学报, 2010, 29(6):1113-1122.
- [12] 邢心魁,张家文,滕德涛,等. 不同支护应力下土质隧道压力共分布规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014,10(4):789-793.
- [13] 扈世民. 黄土隧道围岩压力拱效应分析[J]. 铁道学报, 2014,36(3):94-99.
- [14] 叶飞,毛家骅,刘燕鹏,等. 软弱破碎隧道围岩动态压力拱效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 76-82.
- [15] 郑康成,丁文其,金威,等. 特大断面隧道分步施工动态压力拱分析研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(Sup 1): 72-77.
- [16] ZHU W S ,LI Y ,LI S C , et al. Physical physical model tests on a cavern complex under high in-situ stresses[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2011, (48):199-209.
- [17] HE B G, ZHU Y Q, YE C L, et al. Model Test for dynamic construction mechanical effect of large-span loess tunnel [J]. Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, 16(1): 112-117.
- [18] FENG H, HE H Z , QIAN W X, et al. The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around Tunnel-Scaled model tests and numerical analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013,35: 207-218.
- [19] HUANG J, YUAN T Y, PENG L M, et al. Model test on dynamic characteristics of invert and foundation soils of high-speed railway tunnel [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(3): 549-559
- [20] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 跨断层隧道围岩渐进性破坏模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016,35:1-13.

(编辑 郭飞)