

压力拱理论及 隧道埋深划分方法研究

喻波 王呼佳 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

压力拱理论及隧道埋深 划分方法研究

喻 波 王呼佳 编著



中 国 铁 道 出 版 社

2008 年 · 北 京

图书在版编目(CIP)数据

压力拱理论及隧道埋深划分方法研究/喻波,王呼佳编著. —北京:
中国铁道出版社,2008.2

ISBN 978-7-113-08627-5

I. 压… II. ①喻…②王… III. 围岩塌落拱—隧道工程—理论研究
IV. U452.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 012374 号

书 名:压力拱理论及隧道埋深划分方法研究

作 者:喻 波 王呼佳 编著

责任编辑:时 博 电话:(010)51873141 电子信箱:crph@163.com

封面设计:马 利

责任校对:张玉华

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(北京宣武区右安门西街8号,邮政编码:100054)

印 刷:北京佳信达艺术印刷有限公司

版 次:2008年2月第1版 2008年2月第1次印刷

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:6 字数:82千

书 号:ISBN 978-7-113-08627-5/TU·925

定 价:40.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73172(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

序

隧道围岩的拱作用是学习和从事隧道工程专业的同行的共识，但是在隧道周边的围岩中，起拱作用的范围如何划分，用什么标准界定，则有各种观点、假设，众说纷纭。因此，在隧道设计和工程实践中，对于隧道的支护结构，其安全储备往往高于实际的需要，或许多时候从工程类比法进行设计，但由于不同的隧道所处的围岩性能千差万别，难以完全类比，工程事故时有发生。

喻波、王呼佳两位作者以多年的隧道设计工作和对隧道工程施工的观察经验，应用有限单元法对隧道围岩的受力状态进行系统的计算分析，通过隧道围岩的主应力流对隧道周边围岩压力拱作出描述、归纳，得到“对于拱顶正上方的压力拱拱体内边界为最大主应力最大值处，外边界为最大主应力发生偏转处”、“隧道埋深对拱体外边界影响较小，主要影响因素为隧道的跨度以及围岩物理力学性能”、“以隧道顶部上方围岩能否形成安全有效的压力拱为原则，可判定是否为深埋、浅埋隧道”等主要结论。作者的这些分析和探讨，对于隧道工程的设计与工程实践，无疑是极为有价值的。

诚然，由于岩土并非线弹性材料，其实际的物理力学性能极为复杂，用弹性（或弹塑性）方法所得到的结果，对于非线性、非均质、非连续、各向异性的隧道围岩的力学行为而言，应当理解为是一种近似的描述。在隧道暗挖法掘进施工过程中，掘进面附

近的围岩受力实际上是三维问题，只是在隧道支护衬砌完成后，围岩的受力才接近平面问题，因此，用平面问题方法分析的结果，对隧道掘进过程中围岩的受力状态也是一种近似，其近似的程度需要得到试验，尤其是工程实践的印证。

希望作者在后续的研究中结合模型试验、现场监测等手段，对压力拱理论进行更深一步的探索，并使研究结果能在工程实践中广泛应用开来，造福于社会。

广州地下铁道总公司副总工程师

2007年11月

前言

近十几年来,随着铁路、公路、地铁、市政工程等各行各业突飞猛进的发展,出现了很多隧道工程,包括交通部门的暗挖马蹄形隧道、盾构隧道,市政部门的过街通道、共同沟等,根据各工程功能要求及方案综合比选,隧道埋深深浅不一,隧道的受力状态也就相应地有所区别。

岩土地下工程中的拱效应现象早已被人们所意识到,但岩土层中的压力拱效应不同于日常生活中肉眼能够看到的拱形结构物(如拱桥、拱坝等),目前尚无可靠的手段可以直接探测到压力拱。因此,研究岩土地下工程中的拱效应有助于理解围岩的自承载能力及洞室稳定的机理,为隧道支护设计和施工提供必要的指导,并可从隧道深埋和浅埋的划分方法来实现其指导意义。

本书在编写过程中,先后得到中铁二院工程集团有限责任公司副总工程师张海波、西南交通大学关宝树教授的精心指导并审稿,得到中铁二院地下铁道设计研究院院长牟锐、总工程师罗世培、副院长刘启峰、胡晓伟的大力支持,在此表示衷心感谢!

隧道施工压力拱的形成与否,影响因素众多,有些问题还待进一步深入研究。书中疏漏甚至错误之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2007年9月

目 录

1	概 论	1
1.1	拱结构效应	1
1.2	压力拱效应	3
1.3	隧道埋深划分	3
2	压力拱原理	5
2.1	围岩稳定性	5
2.2	经典理论	7
2.2.1	普氏平衡拱	7
2.2.2	芬纳 (Fenner) 公式	8
2.2.3	压 力 拱	9
2.3	压力拱形成原理	10
2.4	压力拱定义	11
2.4.1	理论简述	11
2.4.2	算例说明	11
2.5	本章小结	20
3	基于数值模拟的压力拱研究	22
3.1	采用数值方法进行研究的可行性	22
3.1.1	有限元法的优点	22
3.1.2	材料本构模型	23
3.1.3	隧道开挖的模拟	24
3.2	基本假设	25
3.3	压力拱边界的确定	26
3.3.1	应力路径分析方法	26

● 压力拱理论及隧道埋深划分方法研究

3.3.2	拱顶正上方压力拱边界的确定	27
3.3.3	算 例	28
3.4	本章小结	32
4	压力拱形成规律研究	33
4.1	压力拱的影响要素研究	33
4.2	单一围岩中压力拱规律研究	34
4.2.1	埋深的影响	34
4.2.2	围岩力学参数的影响	37
4.2.3	隧道跨度的影响	42
4.2.4	单一围岩条件下压力拱变化规律	49
4.2.5	规律验证	50
4.3	分层围岩中压力拱规律研究	52
4.3.1	分层围岩的影响	52
4.3.2	分层围岩中压力拱变化规律	58
4.3.3	规律验证	59
4.4	施工方法对压力拱的影响	66
4.4.1	计算模型	66
4.4.2	台阶法开挖时压力拱的变化	66
4.4.3	台阶法开挖与全断面开挖的比较	75
4.5	本章小结	76
4.5.1	单一围岩中压力拱规律	76
4.5.2	分层围岩中压力拱规律	77
4.5.3	台阶法开挖对压力拱的影响	77
5	深埋与浅埋的判别	78
5.1	判别方法	78
5.2	支护措施设计的参考	80
5.3	工程实例	80
6	结论与展望	84
6.1	结 论	85
6.2	展 望	86
	参考文献	87

1

概 论

1.1 拱结构效应

早在隋代,先人李春就利用拱受力的原理建造了著名的赵州桥(又名安济桥,建于公元605~618年间),如图1-1所示。其原理就是充分发挥拱的承载能力,将上部荷载转化为拱的切向压力,并将其传递到基础。由于存在水平推力,拱各截面以受压为主,与同跨度的梁相比,拱内的弯矩和剪力要小得多,因而可以节省材料,提高刚度,增大跨度,并能有效地利用砖、石、砌块、混凝土等抗压性能好而抗拉性能差的廉价材料。钢拱和钢筋混凝土拱可跨越很大的空间。拱结构可以是单跨或多跨的,它们早已在桥梁、屋盖、隧洞衬砌中得到应用。从图1-1中可以想象出,拱桥跟隧道有很多相通的地方,如果不考虑赵州桥的泄洪洞,在桥上堆载一定厚度的土层,然后将水抽干,拱桥即演变为隧道。

在自然界中,也存在许多类似于拱的现象,如图1-2中的岩拱。比较著名的是美国阿切斯岩拱国家公园中的“纤拱”。“纤拱”是世界最大的岩拱之一,飞跨100m,高三四十米,顶部只有几米厚,能保持如此大的跨度而不坍塌,这是由拱结构承载特点所决定的。

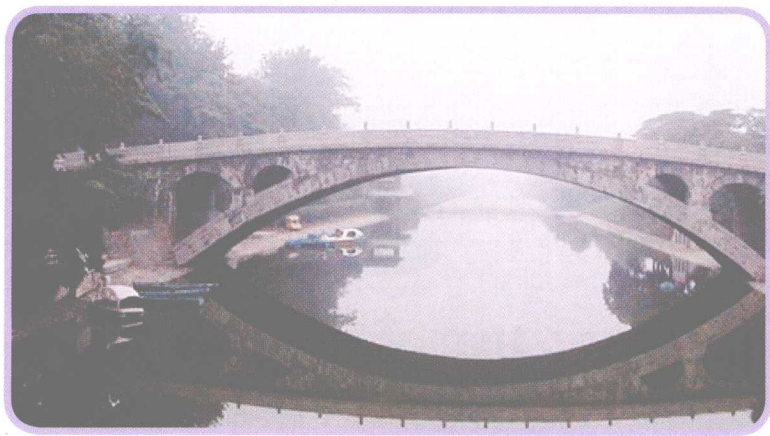


图 1-1 赵州桥

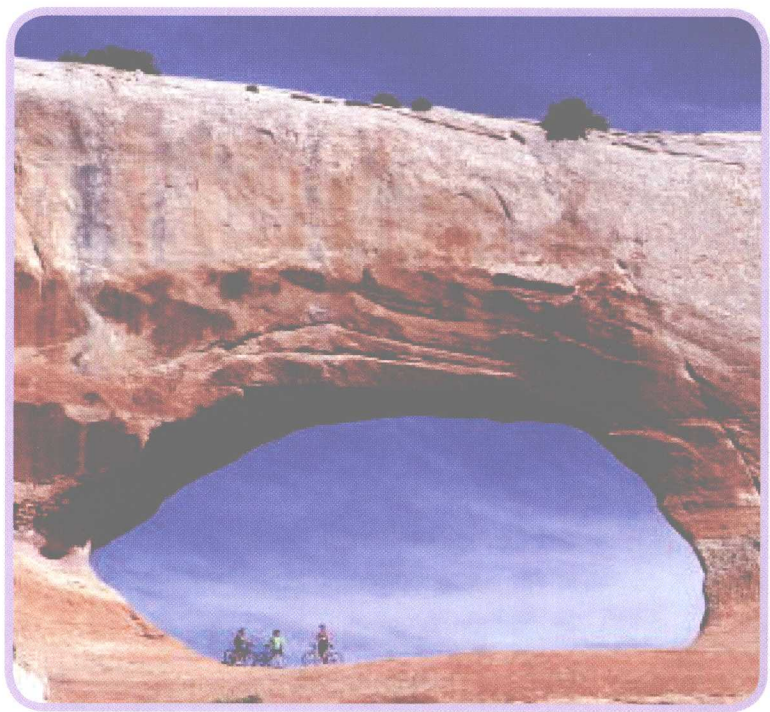


图 1-2 岩拱

1.2 压力拱效应

岩土地下工程中也存在拱效应现象,但难以进行直观地观察。一个多世纪以来,多位学者先后对隧道在开挖中存在的拱效应现象进行了研究。

围岩中,拱效应的产生与拱结构不同。拱结构是拱形结构在荷载作用下发挥其承受压力的作用,而压力拱效应是由介质的不均匀位移引起的。在荷载或初始应力场的作用下,当隧道开挖时,将产生不均匀位移。由于位移的不均匀性,致使围岩中产生互相“楔紧”作用,于是在一定范围内的围岩中产生拱效应,从而达到自稳的效果。

压力拱中的岩体承担着自身荷重和周围的岩体压力,另外还有变形产生的抗力,作为一种具有拱的力学特性的结构,其作用是确保其上方岩体不会塌落。如果把围岩作为一种结构来看,处于压力拱内的围岩承担着自身和其上的岩土荷重,是确保其隧道围岩不会塌落的一个具有拱的力学特性的结构。

充分利用和发挥围岩拱效应的自承载能力,可建造出经济、安全、质优的隧道工程,为民造福。

1.3 隧道埋深划分

研究岩土地下工程中的拱效应可以弄清围岩的自承载能力及洞室稳定的机理,为隧道支护设计和施工提供必要的指导,具体来说可从隧道深埋和浅埋的划分方法来实现其指导意义。

隧道的深埋、浅埋仅是一种表面的称谓,其内在意义在于可以确定隧道支护体系的设计思路。对于判断为深埋的隧道,可以充分利用围岩的自承载能力,采用较弱的支护体系,从而产生明显的经济效应;对于判断为浅埋的隧道,则应采用较强的支护体系,从而保证安全。

在我国经典的隧道工程著作、现行的铁路和公路隧道设计规范中,隧道深、浅埋的划分是以松弛荷载概念作为基础的,并具有统计上的意义,但这种划分方法线条较粗,并没有充分考虑围岩的自承载能力。

要确定能否充分利用围岩的自承载能力, 首先应确定在施工中隧道周边能否形成有自承载能力的压力拱。因此, 隧道深、浅埋的划分应该以隧道周边围岩能否形成安全有效的压力拱作为基本原则。如能形成安全有效的压力拱, 即可按深埋隧道指导设计与施工, 反之, 则按浅埋隧道处理。

综上所述, 关于隧道压力拱以及深、浅埋划分的研究, 对设计、施工的指导及降低工程造价均有重要意义。

2

压力拱原理

Yaligong lilun ji suidao maishen huafen fangfa yanjiu

岩土层中的压力拱效应不同于日常生活中肉眼能够看到的拱形结构物（如拱桥、拱坝等），目前尚无可靠的手段可以直接探测到压力拱，但它却是客观存在的一种力学现象。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。众所周知，拱桥、拱坝等的设计方法首先是确定荷载，然后进行拱的结构设计。其原则是根据拱的受力特点进行最合理的设计，以达到安全、经济的效果。简而言之，就是先有拱，后有力。

压力拱是岩土地下工程中的拱效应现象。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。

压力拱效应是由于介质的不均匀位移引起的。在荷载或自身重力的作用下，围岩产生压缩或沉降，当隧道开挖时，将产生不均匀位移，由于位移的不均匀性，致使围岩中产生互相“楔紧”作用，于是在一定范围内的围岩中产生拱效应。简而言之，是先有力，后有拱。

2.1 围岩稳定性

隧道的施工过程，严格地说就是开挖和支护两个过程。开挖后的隧道周边围岩的应力状态称之为二次应力状态，即毛洞的应力状态。支护

后的隧道周边应力状态称为三次应力状态。

隧道开挖前,围岩中每个质点均受到天然应力(一次应力状态)作用而处于相对平衡状态。隧道开挖后,洞壁岩体因失去了原有岩体的支撑,破坏了原来的受力平衡状态,而向洞内空间胀松变形,其结果又改变了相邻质点的相对平衡关系,引起应力、应变和能量的调整,以达到新的平衡,形成新的应力状态。我们把地下开挖后围岩中应力应变调整而引起围岩中原有应力大小、方向和性质改变的作用,称为围岩应力重分布作用,经重分布作用后的围岩应力状态称为重分布应力状态(二次应力状态),并将重分布应力影响范围内的岩体称为围岩。有关研究表明,围岩内重分布应力状态与岩体的力学性能、天然应力及洞室断面形状等因素密切相关。

在没有采取支护措施且地下洞室不能自稳的情况下,其力学动态过程可分为四个阶段:

(1) 开挖后引起的围岩应力重分布。

(2) 在重分布的应力作用下,一定范围内的围岩产生位移,形成松弛,与此同时也会使围岩的物理力学性质恶化。

(3) 在上述的围岩位移情况下,围岩将在薄弱处产生局部破坏。

(4) 在局部破坏的基础上造成整个洞室的崩塌。

如果在第二或者第三阶段施加支护措施促使其稳定,将形成三次应力状态。三次应力状态在满足稳定要求后就形成了一个稳定的洞室结构。

围岩稳定性分析,实质上是研究地下空间开挖后二次和三次应力状态的形成机理和计算方法,以判断围岩是否会发生局部破坏,是否会造成整个洞室的崩塌。围岩稳定性是一个相对概念,它主要研究围岩的应力状态与围岩强度间的相对关系。一般来说,当围岩内某处的应力达到并超过了相应围岩的强度时,就认为该处围岩已破坏,反之则未破坏,也就是说该处围岩是稳定的。因此,地下洞室围岩稳定性分析,首先应根据工程所在的围岩天然应力状态确定洞室开挖后围岩中重分布应力状态(二次应力状态),以及采取支护措施后的三次应力状态的大小和特点,进而研究围岩应力与围岩变形及强度之间的对比关系,进行稳定性评价,

以此作为地下洞室设计和施工的依据。

总而言之,判断围岩稳定性的基础是确定洞室开挖后围岩中的二次应力状态,以及采取支护措施后的三次应力状态。

围岩在应力重分布时将产生压力拱效应,这有利于地下洞室围岩的稳定性和衬砌结构的受力,也是本书研究的重点。

2.2 经典理论

围岩的应力状态和稳定情况以及围岩压力是岩土工程领域的研究重点,下面简述一些比较常用的理论。

2.2.1 普氏平衡拱

1907年俄国学者普洛托季雅克诺夫(简称普氏)创立了普氏理论。该理论认为洞室开挖以后,如不及时支护,洞顶岩土将不断垮落而形成一个拱形,又称塌落拱。最初这个拱形是不稳定的,如果洞侧壁稳定,则拱高随塌落不断增高;如果侧壁不稳定,则拱跨和拱高同时增大。当洞的埋深较大(埋深 $h>5b$, b 为拱跨)时,塌落拱不会无限发展,最终将在围岩中形成一个自然平衡拱。这时,作用于支护衬砌上的围岩压力就是平衡拱与衬砌间破碎岩体的重量,与拱外岩体无关。因此,利用该理论计算围岩压力时,首先要找出平衡拱的形状和拱高。

这一理论以松散理论为基础,认为在松散介质中开挖隧道后,隧道上方平衡拱的形状为抛物线,如图2-1所示。高度 h 为

$$h = b / f_m$$

式中 b ——平衡拱的半跨度(m);

f_m ——岩石坚固性系数,对于土层 $f_m = \tan \phi$,对于岩石 $f_m = R/10$;

ϕ ——土的计算摩擦角;

R ——岩石的抗压极限强度(MPa),取值应考虑岩石天然层理、裂隙及节理的影响。

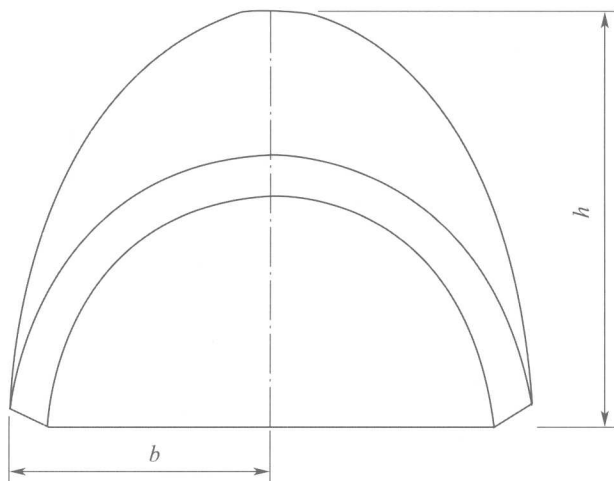


图 2-1 平衡拱示意图

普氏理论未考虑水平应力的影响。一些研究结果表明,当考虑水平方向原始应力时,自然平衡拱的形状是椭圆曲线的一部分。

2.2.2 芬纳 (Fenner) 公式

多年来,许多岩石力学工作者以弹塑性理论为基础,对围岩的应力和稳定情况以及围岩压力进行了研究。狭义的围岩压力是指开挖后洞室周围岩土作用于衬砌结构上的荷载。随着人们对围岩认识的提高,认为围岩与支护结构是一个共同作用的体系,这时,围岩压力应为洞室开挖后围岩二次应力的全部作用,即广义的围岩压力。

从理论上讲,弹塑性理论比较严密,但数学运算复杂。为了简化计算和分析,一般总是对圆形洞室进行分析,因为圆形洞室在特定的条件下,应力轴是对称的,数学上容易解决。当遇到矩形和直墙拱形、马蹄形等洞室时,可将它们看作相当的圆形进行近似计算。在这当中比较著名的有芬纳 (Fenner) 公式、卡柯 (Caquot) 公式和勃莱 (Bray) 公式。

芬纳公式、修正的芬纳公式和卡斯特纳公式 (H.Kastner 于 1951 年提出) 给出了无限大匀质体中轴对称圆形隧洞塑性圈范围与材料抗剪强度、初始地应力和洞内周边匀布荷载的关系。这一公式在隧道工程中得

到相当广泛的应用,被用于估计地下隧道的塑性区,确定隧道内部需要支护的压力,分析洞壁产生的位移等。但是在以往的文献中,公式的推导与洞内周边的匀布荷载大小、塑性区产生的原因无关。对于不同的洞内压力,第一主应力可能是径向应力,也可能是环向应力,因此,当使用主应力来表示塑性屈服条件莫尔—库仑 (Mohr-Coulomb) 准则时,对不同荷载,隧道分析所采用的芬纳公式应有不同的表达形式。

芬纳公式和修正的芬纳公式由于塑性区半径的不确定性而限制了其在实际工程中的应用。一些学者以弹塑性理论为基础,考虑到衬砌与围岩的共同工作,在修正的芬纳公式基础上作进一步推导,得到塑性区半径的理论计算方法,从而可以直接应用修正的芬纳公式计算围岩压力,为隧道衬砌设计提供指导。

2.2.3 压力拱

岩土地下工程中的拱效应现象早已被人们所认识。一个多世纪以来,多位学者先后对隧道在开挖中存在的拱效应现象进行了研究。早在 1884 年,英国科学家罗伯茨 (Roberts) 首次发现了“粮仓效应”,即粮仓底面所承受的力在粮食堆积到一定高度后达到最大值并保持不变,这就是通常所说的压力拱效应。最初提出隧道开挖中存在拱效应现象的是瑞士技术学院的 K. Kovari,他通过对隧道顶部下沉的研究作出了无粘结材料中存在拱效应的推测。随后法约尔 (Fayol, 法国) 在物理实验中总结出了岩石拱 (Rockarch) 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,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,没有对拱作更深一步的探讨,也没有对他所提出的拱进行定义。

1895 年,德国工程师詹森 (H.A.Janssen) 用连续介质模型对拱效应进行了定量解释。1907 年俄国学者普氏理论的创立,加深了自然平衡拱的研究。1943 年,太沙基 (Terzaghi) 通过著名的活动门试验证实了土力学领域压力拱效应的存在,并在对压力的应力分布进行描述的基础上,得出了压力拱效应存在的条件。1985 年, Richard L. Handy 首次描绘出