

技术著作出版基金资助出版

隧道管棚预支护技术的作用机理与工程应用

王海涛 著 ■

SUIDAO GUANPENG YUZHihu JISHU DE
ZUOYONG JILI YU GONGCHENG YINGYONG

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

大连交通大学学术著作出版基金资助出版

隧道管棚预支护技术的作用机理与工程应用

王海涛 著

中国铁道出版社

2017年·北京

内 容 简 介

本书由大连交通大学学术著作出版基金资助出版。本书对管棚预支护的作用机理进行了详细的介绍。首先,采用解析方法和数值计算方法对隧道施工过程中管棚的力学行为进行了研究,分析了隧道开挖过程中管棚、隧道围岩及支护结构的受力与变形特征,并对管棚预支护条件下隧道开挖面的稳定性进行了评价;其次,将塑性极限分析上限定理与强度折减技术相结合,建立了管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析模型,讨论了隧道埋深、地下水、隧道洞径及围岩条件等因素对开挖面稳定性的影响;然后,基于三维弹塑性有限元方法对隧道开挖面正面预支护及管棚预支护进行了参数分析,并对管棚预支护条件下隧道开挖面稳定的可靠度进行了研究;最后,通过几个典型的管棚预支护工程实例帮助读者应用该项技术。

本书可供高等院校土木工程、铁道工程、隧道工程研究生使用,亦可供科研单位有关专业人员以及设计单位、施工企业工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道管棚预支护技术的作用机理与工程应用/王海涛著. —北京:
中国铁道出版社,2017.10
ISBN 978-7-113-23836-0

I. ①隧… II. ①王… III. ①隧道工程-支护工程-研究
IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 236608 号

书 名:隧道管棚预支护技术的作用机理与工程应用
作 者:王海涛 著

责任编辑:刘红梅 编辑部电话:010-51873133 电子信箱:mm2005td@126.com
封面设计:王镜夷
责任校对:王 杰
责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:虎彩印艺股份有限公司

版 次:2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:13 字数:326 千

书 号:ISBN 978-7-113-23836-0

定 价:42.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

序

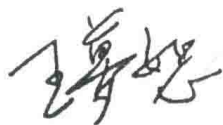
王海涛博士所著的《隧道管棚预支护技术的作用机理与工程应用》一书即将出版发行,本人作为作者的博士后导师,很荣幸受邀为该书做序以表祝贺。

辅助施工方法是针对软弱不良地层而提出的,其选择的正确与否直接关系到工程的成败和造价的高低,它是衡量施工应变能力的重要标志。辅助施工方法已作为地下工程,尤其是浅埋地下工程暗挖法施工的一个重要分支进行研究和应用。管棚预支护技术具有预支护距离长、施工快、安全性高、工期短等优点,被认为是隧道和地下工程防塌防沉最有效的辅助施工方法之一,在隧道、地铁和地下通道等工程中得到广泛应用。

十余年来,作者潜心于隧道预支护设计理论和施工技术研究,进行了大量的理论研究与工程实践,积累了丰富的成果与经验。本书从管棚预支护技术的基本原理、设计计算方法、力学行为和隧道开挖面稳定性评价及工程实践等几个方面对该项技术进行了较为详细的讨论。本书反映了作者深厚的学术造诣和丰富的工程经验,是一本具有很高参考价值的技术专著。

我相信本书的出版将会丰富隧道预支护技术的理论、方法和工程实践,并将会对隧道与地下结构工程教学、科研、设计及施工人员有所助益。

中国工程院院士



2017年8月于北京

前言

隧道及地下工程施工往往需要穿越复杂的地质地段。在浅埋地段、软弱破碎地层以及大面积淋水或涌水等不良地段施工时,常会发生开挖面围岩失稳,或由于初期支护强度不能满足围岩稳定要求或支护不及时而导致洞体围岩坍塌、冒顶等现象。在上述情况下,为增强洞室围岩的稳定性,将隧道开挖的影响控制在最小限度内,需要采用特殊的加固围岩的方法,即通常所谓的“超前预支护”。管棚预支护是一种常用的隧道超前预支护措施,它具有预支护距离长、施工快、安全性高、工期短等优点,被认为是隧道和地下工程防塌防沉最有效的辅助工法之一,在隧道、地铁和地下通道等工程中得到广泛应用。

本书详细地介绍了管棚预支护技术的基本理论、设计原理和施工技术等内容。首先,采用解析方法和数值计算方法对隧道施工过程中管棚的力学行为进行了研究,并将理论和数值计算结果与现场实测数据进行了对比验证,分析了隧道开挖过程中管棚、隧道围岩及支护结构的受力与变形特征,并对管棚预支护条件下隧道开挖面的稳定性进行了评价;其次,将塑性极限分析上限定理与强度折减技术相结合,建立了管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析模型,讨论了隧道埋深、地下水、隧道洞径及围岩条件等因素对开挖面稳定性的影响;然后,基于数值方法对隧道开挖面正面预支护及管棚预支护进行了设计参数优化分析,研究了有无管棚预支护条件下不同核心土长度、不同台阶长度、不同开挖步距、不同管棚布置方式以及在有无地下水情况下,不同管棚预支护长度、不同地下水位时,隧道开挖对管棚力学行为、地层沉降及开挖面稳定性的影响;最后,对管棚预支护条件下隧道开挖面稳定的可靠度进行了研究,并通过典型管棚预支护工程实例帮助读者应用该项技术。

本书结合作者多年的工程实践经验,通过典型的管棚预支护工程实例,全面阐述了管棚预支护技术,对该项技术的理论分析、经验设计提供了较详细的解释,旨在为广大读者奉献一本体系完整、内容翔实、资料丰富、图文并茂、实用性强并具有一定理论深度的隧道管棚预支护技术专著,以推动其在隧道工程的应用和发展。

本书可供高等院校研究生、科研单位有关专业人员、设计单位及施工企业工程技术人员参阅。

著者

2017.7

目 录

1 隧道工程概述	1
1.1 隧道工程的概念	1
1.2 隧道工程的分类	1
1.3 隧道工程建设的特点	3
1.4 隧道围岩压力	6
1.5 隧道工程的设计理论与方法	13
1.6 隧道工程施工方法	21
1.7 本章小结	26
2 隧道工程辅助工法	27
2.1 超前锚杆	27
2.2 水平旋喷注浆	28
2.3 机械预切槽法	29
2.4 冻结法	30
2.5 预衬砌法	31
2.6 超前注浆小导管	31
2.7 插板法	33
2.8 管幕法	33
2.9 管棚预支护法	35
2.10 本章小结	36
3 管棚预支护技术	37
3.1 管棚预支护概述	37
3.2 管棚预支护的构造形式	40
3.3 管棚预支护的布置形式	41
3.4 管棚预支护参数的选择	44
3.5 管棚预支护技术的研究现状	47
3.6 本章小结	53
4 隧道开挖过程中管棚的力学行为分析	54
4.1 管棚力学模型建立的基本观点	54

4.2	管棚受力荷载的确定	55
4.3	管棚 Pasternak 弹性地基梁力学模型	62
4.4	管棚的力学行为分析	67
4.5	管棚设计参数分析及优化设计	69
4.6	本章小结	73
5	管棚预支护条件下隧道施工过程的数值模拟及现场测试	74
5.1	依托工程简介	74
5.2	管棚及隧道施工过程的数值模拟	77
5.3	数值模拟结果分析	79
5.4	隧道现场量测试验	90
5.5	本章小结	100
6	管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性塑性极限分析	101
6.1	塑性极限分析的基本理论	101
6.2	基于强度折减技术的隧道开挖面三维稳定性分析上限解法	102
6.3	管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性分析上限解法	107
6.4	考虑渗流力的管棚预支护条件下隧道开挖面三维稳定性极限分析	113
6.5	本章小结	118
7	管棚预支护条件下隧道开挖面稳定的可靠度研究	119
7.1	管棚预支护条件下隧道开挖面稳定的极限状态方程	119
7.2	管棚预支护条件下隧道开挖面稳定的可靠度计算方法	124
7.3	算 例	127
7.4	本章小结	132
8	管棚预支护设计参数优化	133
8.1	管棚预支护条件下隧道开挖面正面预支护参数分析	133
8.2	管棚预支护体系的参数分析	139
8.3	考虑渗流压力的管棚预支护参数分析	142
8.4	本章小结	147
9	管棚预支护的施工技术	148
9.1	施工方法概述	148
9.2	钻 孔 法	150
9.3	夯 管 法	157
9.4	顶 管 法	164

9.5 施工方法的选择	165
9.6 施工中易出现的问题及处理措施	165
9.7 本章小结	168
10 管棚预支护工程应用实例	169
10.1 工程实例 1——管棚在隧道洞口浅埋段的应用	169
10.2 工程实例 2——管棚在下穿既有地铁车站工程中的应用	173
10.3 工程实例 3——管棚在双连拱隧道下穿公路中的应用	178
10.4 工程实例 4——管棚在隧道塌方地段的应用	189
10.5 本章小结	192
参考文献	193

隧道工程概述

1.1 隧道工程的概念

隧道是埋深于地层中的工程建筑物,是人类利用地下空间的一种形式。1970 年国际经济合作与发展组织召开的隧道会议综合了各种因素,对隧道所下的定义为:“以某种用途,在地面下用任何方法按规定形状和尺寸修筑的断面积大于 2 m^2 的洞室。”

1.2 隧道工程的分类

隧道的种类繁多,从不同的角度来区分,就有不同的分类方法。从隧道所处的地质条件来分,可以分为土质隧道和石质隧道;从埋深的深度来分,就可以分为浅埋隧道和深埋隧道;从隧道所在的位置来分,可以分为山岭隧道、水底隧道和城市隧道。但分类比较明确的还是按照隧道的用途来划分,可以有以下几种:交通隧道、水工隧道、市政隧道和矿山隧道。

1.2.1 交通隧道

这是隧道中为数最多的一种,它们的作用是提供运输的地下通道。

(1) 铁路隧道

我国是个多山国家,山地、丘陵、高原等山区面积约占全国面积的 $2/3$ 。铁路穿越这些地区时,往往会遇到山岭障碍。而铁路限坡平缓,常难上升到越岭所需要的高度,需要修建隧道以克服高程或平面障碍。在沿着河谷修建铁路时,遇到河道弯曲、两岸横坡陡峻、地质不良等现象,常修建隧道使线路从山里通过。隧道既可使线路顺直,线路缩短,又可以减小坡度,还可躲开各种不良地质条件,从而提高牵引定数,多拉快跑,使运营得以改善。所以,在山区铁路线上修建隧道的范例是很多的。

(2) 公路隧道

公路的限制坡度和限制最小曲线半径都没有铁路那样严格,过去在山区修建公路时为节省工程造价,常常是宁愿绕行,也不愿修建费用昂贵的隧道。因此,过去公路隧道为数不多。但是,随着社会生产的发展,高速公路逐渐出现,它要求线路顺直、平缓、路面宽敞,于是在穿越山区时,也常采用隧道方案。此外,在城市附近,为避免平面交叉,利于高速行驶,也常采用隧道方式通过。目前,公路隧道逐渐多起来。

(3) 水底隧道

当交通线需要横跨河道时,一般可以架桥或轮渡通过。但是,如果在城市区域以内,河道通航需要较高的净空,而桥梁两端引道常需要占用宝贵的城市用地或修建结构复杂的很长的

引桥,此时采用水底隧道,既不影响河道通航,也避免了风暴天气轮渡中断的情况,而且在战时不致暴露交通设施的目标,防护层厚,是国防上的较好选择。为横跨黄浦江,上海已修建了多座水底隧道,广州地铁穿越珠江、武汉地铁穿越长江都修建了水底隧道。

(4) 地铁

地铁是解决城市交通拥挤、车辆堵塞等问题,且能大量快速运送乘客的一种交通设施。它可以使很大一部分地面客流转入地下,可以高速行驶,且可缩短车次间隔时间,节省了乘车时间,便利了乘客的活动。在战时,还可以起到人防的功能。

(5) 航运隧道

当运河需要越过分水岭时,克服高程障碍成为十分困难的问题,一般需要绕行很远的距离。如果层层设立船闸则建设投资很大,运转和维修的费用也很高,而且过往船只延误时间很多。如果修建航运隧道,把分水岭两边的河道沟通起来,则既可以缩短航程,又可以省掉船闸的费用,船只可迅速而顺直地驶过,航运条件大为改善。

(6) 人行地道

城市闹市区行人众多,而且与车辆混行,偶尔不慎便会发生交通事故。在横跨十字路口处,即使有指示灯和人行横道线,但快速的机动车也不得不频频减速,甚至要停车避让。为了提高交通运送能力及减少交通事故,除架设过街高架桥以外,也可以修建人行地道和地下立交车道。这样可以缓解地面交通的压力,也大大减少了交通事故。

1.2.2 水工隧道

水工隧道是水利枢纽的一个重要组成部分,根据其用途又可分为如下几种。

(1) 引水隧道

它把水引入水电站的发电机组,产生动力资源。引水隧洞有的全部冲水因而内壁承压,有的只是部分过水因而内部承受大气压力和部分水压,分别称之为有压隧洞和无压隧洞。

(2) 尾水隧道

它是发电机组的排水通道。

(3) 导流隧洞或泄洪隧洞

它是水利工程中的一个重要组成部分,可起疏导水流或水库容量超限后的泄洪通道。

(4) 排沙隧洞

它可用来冲刷水库中淤积的泥沙,把泥沙裹带送出水库。有时也用来放空水库里的水,以便进行库身检查或修理建筑物。

1.2.3 市政隧道

市政隧道是城市中为安置各种不同市政设施而修建的地下孔道。由于城市不断发展,工商业日趋繁荣,人民生活水平逐步提高,对公共事业的要求也越来越高。许多城市不得不利用地下城市空间,把市政设施安置在地下,既可 not 占用地面面积,又不至扰乱高空位置和影响市容。按市政隧道的用途,可有如下几种分类。

(1) 给水隧道

城市自来水管网遍布市区,必须有地下孔道来容纳安置这些管道,它既不占用地面,也可

避免遭受人为的损坏。

(2) 污水隧道

城市污水需要引入到污水处理厂以净化返用,条件不充分时仍有部分污水还要排放到城市以外。这都需要有地下的排水隧道。这种隧道可能是本身导流排送,此时隧道的形状多采用卵形;也可能是在孔道中安放排污管,由管道排污。一般排污隧道的进口处,多设有栏栅格栅,把漂浮的杂物拦在隧道之外,不至涌入造成堵塞。

(3) 管道隧道

城市所供煤气、暖气、热水等,一般都是把管路放置在地下的孔道中。经过防漏及保温措施,把这些能源送到居民家中。

(4) 线路隧道

城市中,输送电力的电缆以及通讯的电缆,都安置在地下孔道中。既可以保证不为人们的活动所损伤或破坏,又免得悬挂高空,有碍市容观瞻。这些地下孔道多半是沿着街道两侧设置的。

(5) 人防隧道

为了战时的防空目的,城市中需要建造人防隧道。在受到空袭威胁时,市民可以进入安全的庇护所。人防工程除应设有排水、通风、照明和通信设备以外,在洞口处还需设置各种防爆装置,以阻止冲击波的侵入。同时,要做到多口联通、互相贯穿,在紧急时刻,可以随时找到出口。

1.2.4 矿山隧道

在矿山开采中,常设一些隧道(也称为巷道),从山体以外通向矿床。

(1) 运输巷道

向山体开凿隧道通向矿床,并逐步开辟巷道,通往各个开采面。前者称为主巷道,是地下矿区的主要出入口和主要的运输干道。后者分布如树枝状,分向各个采掘面。此种巷道多采用临时支撑,仅供作业人员进行开采工作的需要。

(2) 给水巷道

送入清洁水为采掘机械使用,并将废水及积水通过泵抽,排出洞外。

(3) 通风巷道

矿山地下巷道穿越过许多地层,将会有多种地下气体涌入巷道中来,再加上采掘机械不断排出废气,还有工作人员呼出气体,使得巷道内空气变得浑浊。如果地下气体含有瓦斯,在含量达到一定浓度后,将会发生危险,轻则致人窒息,重则引起爆炸。必须及时把有害气体排除出,因此需要设置通风巷道,用通风机把浑浊空气抽出去,并把新鲜空气补进来。

1.3 隧道工程建设的特点

隧道及地下工程与地面建筑工程均属土木工程的范畴,但隧道及地下工程建设从基础理论、勘察设计到工程施工、维护,与地面工程都有很大差别,是土木工程中一类特殊的建设领域。

隧道及地下工程的建设特点主要表现为建设工程构筑物处于地质体中,设计施工基础理论研究尚不成熟,处于以经验设计和工程类比法为主的建设现状,具有建设过程复杂,影响因素及不确定因素多,涉及学科范围广,建设过程需与建设环境相协调等特点。

1.3.1 隧道工程处于地质体中

工程岩体(土体)是地下工程结构的一部分。这些地下工程埋设在不同的地层中,可能遇到各种各样的复杂地质问题。因此,地下工程的设计、施工均与建设地区的地质条件有着密切的关系。例如,在坚硬完整的岩层中修建隧道时,由于围岩稳定,开挖时坑道不易变形,暴露时间较长也不易失稳,结构设计较弱甚至不需设计二次衬砌,采用全断面的施工方法;当隧道或洞室通过断层破碎带、溶洞、流沙、涌水、岩爆、瓦斯等复杂或不良地质地段时,则需要特殊的设计方法与施工措施相配合。因此,地质环境与地下工程关系密切。地质环境对地下工程设计、施工的影响主要表现在以下6个方面:

(1)地貌与气候对地下工程的影响

地形地貌对隧道建设的影响主要表现在地应力特征上,隧道处于沟谷地带时隧道结构将承受较大的水平应力或偏压应力,在隧道设计时需要特殊考虑;气候的影响以温度和降雨量两因素最为显著,在特定的地质条件下可引起围岩工程特性的变化,产生新的工程地质问题。

(2)地质构造对于地下工程的影响

地质构造是指在造山运动等大规模的地壳变动中,岩体产生变形、断裂、破碎后留下的痕迹,如褶皱、断层、挤压破碎带、节理裂隙带等。褶皱和断层对隧道建设的影响,前者主要表现在成为瓦斯和水的汇集场所,后者则主要表现在围岩力学性质发生巨大劣化,围岩破碎,易引起隧道坍塌等。

(3)岩(土)体结构对地下工程的影响

岩(土)体结构是指岩(土)体中结构面和结构体的总称,它表达了结构面的发育程度及组合关系,反映了结构体的规模、形态及排列情况。岩体结构对地下工程的影响主要表现在以下几个方面:

- ①降低围岩力学指标,增大力学性质的各向异性。
- ②结构面改变了围岩应力传导途径。
- ③成为地下水的通道和储存场所。
- ④成为剪切滑移面。
- ⑤岩体结构是进行围岩质量评定与围岩分级的依据。
- ⑥岩体结构是进行岩(土)体力学分析时建立力学模型的基本依据。

(4)岩(土)体性质对地下工程的影响

按照地壳岩石的成因,岩石分为沉积岩、岩浆岩和变质岩三类。不同成因的岩体,其物质组成结构不同。岩体对隧道建设的影响最终表现在工程力学性质上。岩性反映了岩石的基本力学性质及物理化学性质的各向异性、不连续性。其对地下工程的影响主要表现在三个方面:

- ①力学性质的影响。岩性与抗压强度呈现很好的对应关系,从而在隧道围岩分级中将岩石的抗压强度作为表征围岩在开挖后承载能力的度量指标之一。
- ②化学组分的影响。如膨胀岩遇水产生膨胀压力等情况。

③物理性质的影响。位于地下水中的各种岩体,其物理力学性质差别很大。给工程带来的风险和难度差别也很大。

(5)地质体赋存环境对地下工程的影响

地质体赋存环境因素主要有三种:地应力、地下水、地温。它们对岩(土)体的变形、破坏和力学性质具有重要的控制作用。

①初始地应力对地下工程的影响。岩体中的初始地应力是指在工程开挖前岩体中存在的天然应力,主要是由自重应力和构造应力组成。

②地下水对地下工程的影响。地下水对隧道建设的影响主要表现在两个方面:第一,形成流体能量,产生隧道涌泥、涌石、涌水;第二,弱化岩体的强度,降低围岩承载能力。

③地温对地下工程的影响。在深埋地层中,地温常常是地下工程施工的一个重要控制因素,温度升高,预示着地质环境中能量活动的增大,能量转化的概率大,处理不当,可引起相应的工程问题。

(6)特殊地质与地下工程

所谓特殊地质,可定义为承载特性及施工安全上需进行特殊设计和施工地质条件。按其对于隧道修建的影响特性,可分为结构突变型、应力实效型及有害物质型三类。

①结构突变型,如隧道穿越岩溶洞穴、断层带、岩堆体等。

②应力时效型,如高地应力、膨胀岩、黄土、冻土等。

③有害物质型,如瓦斯、放射线等。

因此,了解在不良地层中施工可能遇到的工程地质问题,以及这些问题的性质、特点及危害性,采取与其相适应的施工技术与方法加以控制,以保证在不良地层中隧道建设的顺利进行。

1.3.2 隧道建设过程具有复杂性

隧道力学在开挖技术中的应用,还停留在经典力学研究和地质体结构和强度的研究范畴,真正从物理、化学能量微观的研究却没有新的进展。岩石这种特殊的材料,其组成和结构的复杂性,人们对它的认识还远远不够,它远不像金属等均质材料那样简单。这种状况导致开挖技术的理论研究,至今只能停留在简单的结构分析和孤立的固体力学和数值分析等领域。

通常,岩体工程,特别是大型地下工程,其建设周期都较长,少则几个月,多则十多年,而采矿工程时间就更长。这些工程的施工通常都要破坏岩体原有的力学平衡,最终达到新的平衡和稳定状态。在这期间,岩体中的物理、力学诸因素都要经过一个调整、转化的过程,而这些内部因素往往是互为联系、互为因果的。施工过程是一个时间和空间不断变化的过程。施工及运营期的稳定安全及与此有关的经济性等,都不仅和工程的最终状态有关,还与达到此状态所经历的途径和采用的方法有关。

理论研究和工程实践表明,要想解决岩石力学在隧道工程设计与施工中的普及问题,单纯应用力学、数学的理论分析是行不通的,必须从隧道工程实际出发,以系统概念为指导,依靠原型观测的验证修改,走理论分析、经验分析、工程类比相结合的道路。

地下工程的开挖不仅是一道工序,而应视为一个系统。开挖系统具有整体性、目的性、有序性、反馈性、动态性等特性。

1.3.3 隧道建设具有人文、自然和谐性

隧道及地下工程建设应能顺应自然与人文环境,与自然和谐共存,而不是对自然的掠夺;应能为子孙后代留下一片绿荫,而不是一片灰色和荒漠。城市建设不能失掉风貌,欧洲一些城市就采用地下立交形式突出其城市特色。采用摩天大楼、大型高架立交桥、穿河跨海大桥等地面建筑的做法,在使用中已出现了污染城市环境,增加安全隐患等负面影响。美国城市基本放弃了高架高速路;波士顿从1999年开始拆除高架路,恢复地面,发展地下铁道和地下公交交通,让步行者拥有城市。高密度的跨江大桥对环境、生态扰动大,受地震、战争、台风、雨雾影响大,而采用隧道穿越优势则很大,美国如纽约州跨哈德逊河有41座隧道,只有10座桥梁。

1.4 隧道围岩压力

1.4.1 围岩压力的概念

围岩压力是指引起地下开挖空间周围岩体和支护变形或破坏的作用力。它包括由地应力引起的围岩应力以及围岩变形受阻而作用在支护结构上的作用力。因此,从广义来理解,围岩压力既包括围岩有支护的情况,也包括围岩无支护的情况;既包括作用在普通的传统支护,如架设的支撑或施作的衬砌上所显示的力学形态,也包括在锚喷和压力灌浆等现代支护的方法中所显示的力学形态。从狭义来理解,围岩压力是指围岩作用在支护结构上的压力。在工程中一般研究狭义的围岩压力。

1.4.2 围岩压力分类

围岩压力按作用力发生的形态,一般可分为如下几种类型。

(1) 松动压力

由于开挖面松动或坍塌的岩体以重力形式直接作用在支护结构上的压力称为松动压力,松动压力按作用在支护上的力的位置不同,分为竖向压力和侧向压力。松动压力常通过下列三种情况发生:

- ①在整体稳定的岩体中,可能出现个别松动掉块的岩石。
- ②在松散软弱的岩体中,坑道顶部和两侧边帮冒落。
- ③在节理发育的裂隙岩体中,围岩某些部位沿软弱面发生剪切破坏或拉坏等局部塌落。

(2) 形变压力

形变压力是由于围岩变形受到与之密贴的支护如锚喷支护等的抑制,而使围岩与支护结构在共同变形过程中,围岩对支护结构施加的接触压力。所以形变压力除以围岩应力状态有关外,还与支护时间和支护刚度有关。

(3) 膨胀压力

当岩体具有吸水、应力解除等膨胀性特征时,由于围岩膨胀所引起的压力称为膨胀压力。它与形变压力的基本区别在于它是由吸水、应力解除等膨胀引起的。

(4) 冲击压力

冲击压力是在围岩中积累了大量的弹性变形能以后,由于隧道的开挖,围岩的约束被解

除,能量突然释放所产生的压力。

由于冲击压力是岩体能量的积累与释放问题,所以它与高地应力和完整硬岩直接相关。弹性模量较大的岩体,在高地应力作用下,易于积累大量的弹性变形能,一旦破坏原始平衡条件,它就会突然猛烈地大量释放。

1.4.3 影响围岩压力的因素

影响围岩压力的因素很多,通常可分为两大类:一类是地质因素,它包括初始应力状态、岩石力学性质、岩体结构面等;另一类是工程因素,它包括施工方法、支护设置时间、支护刚度、坑道形状等。

例如在隧道开挖过程中,由于受到开挖面的约束,使其附近的围岩不能立即释放全部瞬时弹性位移,这种现象称为开挖面的“空间效应”。如在“空间效应”范围(一般为1~1.5倍洞径)内,设置支护,就可减少支护前的围岩位移值。所以当采用紧跟开挖面支护的施工方法时,支护时间的迟早必然大大地影响围岩的稳定和围岩压力的数值。因此,一般宜尽快地施作支护,封闭岩层,待围岩变形基本稳定后再施作二次衬砌,减少二次衬砌的围岩压力。

1.4.4 围岩松动压力的形成

开挖隧道所引起的围岩松动和破坏的范围有大有小,有的可达地表,有的则影响较小。对于一般裂隙岩体中的深埋隧道,其影响范围仅局限在隧道周围一定深度。所以作用在支护结构上的围岩松动压力远远小于其上覆岩层自重所造成的压力。这可以用围岩的“成拱作用”来解释。下面以水平岩层中开挖一个矩形坑道,来说明坑道开挖后围岩由形变到坍塌成拱的整个形变过程,如图1.1所示。

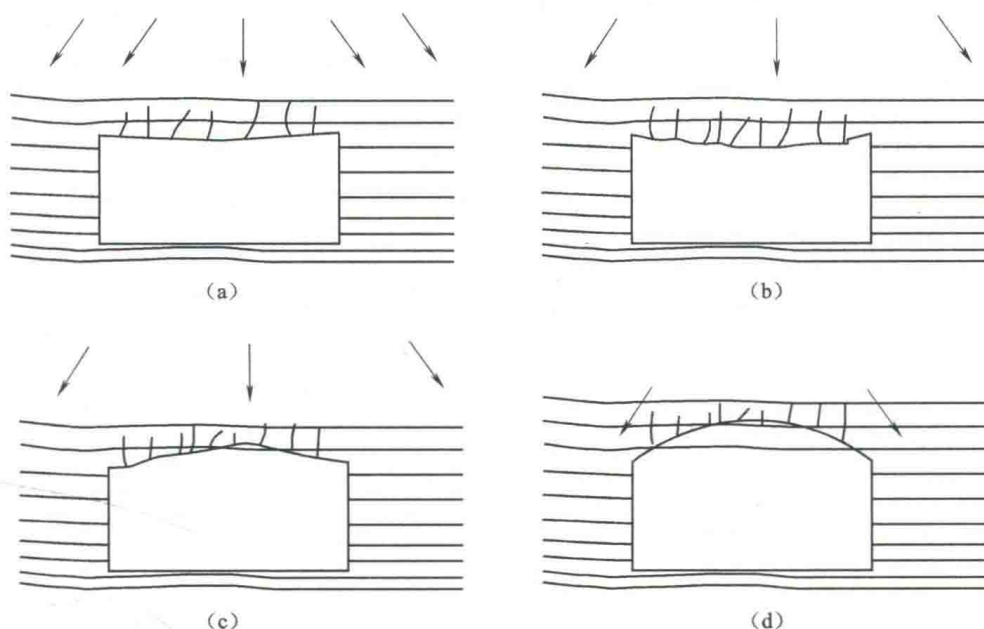


图 1.1 松动压力的形成

隧道开挖后,在围岩应力重分布过程中,顶板开始沉陷,并出现拉断裂纹,如图1.1(a)所示,可视为变形阶段。

顶板的裂纹继续发展并且张开,由于结构面切割等原因,逐渐转变为松动,如图 1.1(b)所示,可视为松动阶段。

顶板岩体视其强度的不同而逐步塌落,如图 1.1(c)所示,可视为塌落阶段。

顶板塌落停止,达到新的平衡,此时其界面形成一近似的拱形,如图 1.1(d)所示,可视为成拱阶段。

实践证明,自然拱范围的大小除了上述的围岩地质条件、支护结构架设时间、刚度以及它与围岩的接触状态等因素影响外,还取决于以下诸因素:

①隧道的形状和尺寸。隧道拱圈越平坦,跨度越大,则自然拱越高,围岩的松动压力也越大。

②隧道的埋深。人们从实践中得知,只有当隧道埋深超过某一临界值时,才有可能形成自然拱。习惯上,将这种隧道称为深埋隧道,否则称为浅埋隧道。由于浅埋隧道不能形成自然拱,所以,它的围岩压力的大小与埋置深度直接相关。

③施工因素。如爆破的影响,爆破所产生的震动常常是引起塌方的重要原因之一,造成围岩压力过大。又如分部开挖多次扰动围岩,也会引起围岩失稳,加大自然拱范围。

1.4.5 围岩松动压力的确定方法

确定围岩松动压力的方法有:现场实地测量;按理论公式计算确定;根据大量的实际资料,采用统计的方法分析确定。目前,采用几种方法相互验证参照取值是确定围岩压力较通用的方法。

(1)深埋隧道围岩松动压力的确定方法

当隧道的埋置深度超过一定限值后,由于围岩有“成拱作用”,其松动压力仅是隧道周边某一破坏范围(自然拱)内岩体的重量,而与隧道埋置深度无关。故解决这一破坏范围的大小就成为问题的关键。

①我国《铁路隧道设计规范》所推荐的方法

确定围岩松动压力的关键是找出其破坏范围的规律性,而这种规律性只有通过大量的实际破坏形态的统计分析才能发现。

围岩破坏的直接表现形式是施工中产生的坍方。因此,根据大量隧道坍方资料的统计分析,可找出隧道围岩破坏范围形状和大小的规律性,从而得出计算围岩松动压力的统计公式。由于所统计的坍方资料有限,加上资料的相对可靠性,所以这种统计公式也只能在一定程度上反映围岩松动压力的真实情况。我国现行《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)中推荐的计算围岩垂直均布松动压力 q 的公式,就是根据 1 000 多个坍方点的资料进行统计分析而拟定的。

单线铁路隧道按概率极限状态设计时的垂直压力公式为

$$q = \gamma \times h_q = 0.41 \times 1.79^s \times \gamma \quad (1.1)$$

单线、双线及多线铁路隧道按破坏阶段设计时垂直压力公式为

$$q = \gamma \times h_q = 0.45 \times 2^{s-1} \times \gamma \omega \quad (1.2)$$

式中, q 为围岩压力,kPa; γ 为围岩重度,kN/m³; h_q 为围岩压力计算高度,m; s 为围岩级别; ω 为宽度影响系数。

式(1.1)及式(1.2)的适用条件为:

a. $H/B < 1.7$ (H 为坑道的高度);

- b. 深埋隧道；
- c. 不产生显著的偏压力及膨胀压力的一般围岩；
- d. 采用钻爆法施工的隧道。

随着现代隧道施工技术的发展,可将隧道开挖引起的破坏范围控制在最小限度内,所以围岩松动压力的发展也将受到控制。

在上述产生垂直压力的同时,隧道也会有侧向压力出现,即围岩水平平均布松动压力 e , e 可按表 1.1 中的经验公式计算(一般取平均值),其适用条件同式(1.1)及式(1.2)。

表 1.1 水平平均布松动压力

围岩级别	I ~ II	III	IV	V	VI
水平平均布压力	0	$<0.15q$	$(0.15\sim0.3)q$	$(0.3\sim0.5)q$	$(0.5\sim1.0)q$

除了确定压力的数值外,还要考虑压力的分布状态。根据我国隧道垂直围岩压力的一些量测资料表明,作用在支护结构上的荷载一般是不均匀的。这是因为岩体破坏范围的大小和形状,受岩体结构、施工方法等因素的影响极不规则。根据统计资料,围岩垂直松动压力的分布图大概可概括为如图 1.2 所示的四种图示。用等效荷载,即非均布压力的总和应与均布压力的总和相等的方法来确定各荷载图形的高度值。

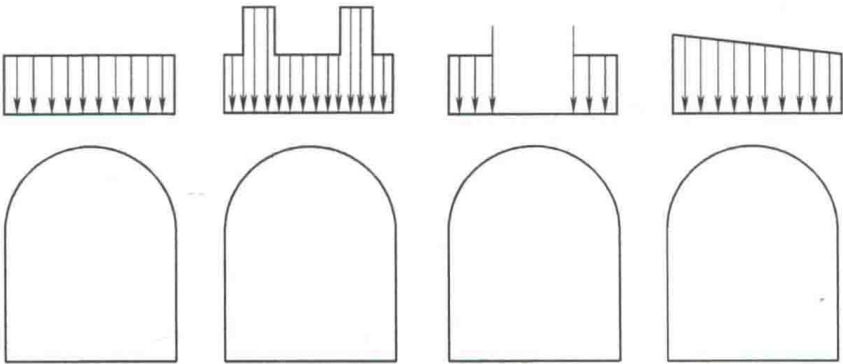


图 1.2 垂直松动压力的分布图

另外还应考虑围岩水平松动压力非均匀分布的情况。

但上述压力分布图形只概括了一般情况,当地质、地形或其他原因可能产生特殊荷载时,围岩松动压力的大小和分布应根据实际情况分析确定。

②普氏理论

普氏认为,所有的岩体都不同程度被节理、裂隙所切割,因此可视为散粒体。但岩体又不同于一般的散粒体,其结构面上存在着不同程度的黏结力。基于这种认识,普氏提出了岩体的“坚固性系数” f (又称侧摩擦系数)的概念。

$$f = \tau/\sigma = \sigma \tan\varphi = \tan\varphi + c/\sigma = \tan\varphi_0 \tag{1.3}$$

- 式中 φ, φ_0 ——岩体的摩擦角和似摩擦角；
 τ, σ ——岩体的抗剪强度和剪切破坏时的正应力；
 c ——岩体的黏结力。

由此可以看出,岩体的坚固性系数 f 是一个说明岩体特性(如强度、抗钻性、抗爆性、构造、