



21世纪交通版高等学校教材

隧道结构力学计算

Mechanical Calculations of the Tunnel Structure

(第二版)

夏永旭 王永东 主 编
杨林德 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

21 世纪交通版高等学校教材

Mechanical Calculations of the Tunnel Structure

隧道结构力学计算

(第二版)

夏永旭 王永东 主编
杨林德 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是为道路桥梁与渡河工程专业、土木工程专业隧道及地下工程方向本科生“隧道结构计算与分析”课程编写的教材,书中着重介绍了用于隧道结构计算的结构力学法、弹性力学解析法、有限单元数值法,并对隧道结构求解的弹塑性方法、反分析方法以及边界单元方法做了简要的介绍,书末还附有一些典型算例。

本书可作为高等院校道路桥梁与渡河工程专业、土木工程专业隧道及地下工程方向的教学用书,也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道结构力学计算/夏永旭,王永东主编. —2版

—北京:人民交通出版社,2012.8

21世纪交通版高等学校教材

ISBN 978-7-114-09978-6

I. ①隧… II. ①夏…②王… III. ①隧道工程—结构力学—计算—高等学校—教材 IV. ①U451

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第175487号

21世纪交通版高等学校教材

书 名:隧道结构力学计算(第二版)

著 作 者:夏永旭 王永东

责任编辑:曲 乐 王文华

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.75

字 数:424千

版 次:2004年9月 第1版 2012年8月 第2版

印 次:2012年8月 第1次印刷 总第2次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09978-6

定 价:34.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

第二版前言

本书原是为道路桥梁与渡河工程专业隧道工程方向本科生“隧道结构计算与分析”课程编写的教材,出版发行已逾8年。在8年来的教学实践中,发现不少存在的问题,先后也曾收到国内不少同仁对书稿的批评和建议,对此,我们表示衷心的感谢。

此次再版,修正了第一版中发现的错误,在正文和附录中增加了一些复杂隧道结构的数值模拟计算实例,以供读者参考。

在本书再版发排之际,编者特别感谢人民交通出版社编辑王文华女士,正是她的辛勤工作和细心校对,使得本书避免了更多的错误和遗漏。

由于编者水平有限,错误在所难免,恳切希望广大读者继续不吝指教。

编 者

2012.6.12

第一版前言

本书是为道路、桥梁与渡河工程学科公路隧道工程专业本科生的“隧道结构设计与分析”课程编写的教材,经面向 21 世纪交通版高等学校教材编审委员会研究,决定正式出版。它和业已或即将出版的《公路隧道勘察与设计》、《隧道施工技术》、《公路隧道运营设施》构成公路隧道工程专业本科生的专业课程教材体系。

公路隧道属于地下工程的范畴,结构荷载和围岩介质参数不像地面工程那样明确。所以,目前国内外关于隧道的结构设计,大都采用工程类比经验方法。但是,作为公路隧道工程专业的学生,必须掌握隧道结构计算的基础理论、解题方法和计算技术,借助于计算分析技术,可以对公路隧道的结构设计给出定性或者半定量的评价,甚至于结合现场施工量测控制技术,给出定量的分析。

本书共分为九章,其中第一、二、三、四、六、九章为基本教学内容,第五、七、八章为提高内容,可根据教学课时的多少以及学生的情况选讲。

我国公路隧道建设的历史不长,资料的积累和经验相对较少。本书的编写,在参考其他行业同类教材的基础上,力求突出公路隧道自身的特点,但是由于编者水平所限,错误和遗漏在所难免,恳请读者批评指正。

本书由长安大学夏永旭和王永东主编,全书插图绘制由王永东和邓念兵完成。承蒙同济大学杨林德教授对全书做了详细的审阅,并提出许多宝贵的修改意见,对此我们表示衷心的感谢。

编 者
2004. 08

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 公路隧道的主要特点及结构形式	1
§ 1-2 初始地应力场	4
§ 1-3 隧道结构荷载形式	6
§ 1-4 隧道结构计算的理论与方法	11
思考题	16
第二章 隧道结构计算的结构力学法	17
§ 2-1 拱形半衬砌隧道的结构计算	17
§ 2-2 拱形曲墙隧道的假定抗力法	24
§ 2-3 拱形直墙隧道的局部变形法	28
§ 2-4 隧道衬砌结构计算的矩阵力法	34
§ 2-5 隧道衬砌结构计算的矩阵位移法	46
§ 2-6 圆形隧道衬砌的自由变形法	55
§ 2-7 圆形隧道衬砌的假定抗力法	60
§ 2-8 矩形框架结构计算	62
思考题	66
习 题	66
第三章 隧道结构计算的弹性力学法	67
§ 3-1 岩土材料的线弹性理论	67
§ 3-2 圆形隧道的弹性力学分析	68
§ 3-3 圆形隧道围岩的应力场	71
§ 3-4 圆形隧道衬砌的结构计算	76
思考题	80
习 题	80
第四章 隧道结构计算的有限单元法	81
§ 4-1 位移有限单元法的基本公式	82
§ 4-2 等参数单元及夹层单元	89
§ 4-3 隧道结构的有限单元法计算	97
§ 4-4 隧道交叉口结构计算	104
思考题	108
习 题	108
第五章 隧道结构计算的边界单元法	109
§ 5-1 线弹性问题的基本解	109
§ 5-2 直接解法	114

§ 5-3 间接解法	123
§ 5-4 含体积力的计算	129
§ 5-5 隧道结构的边界单元法计算	131
思考题	133
第六章 隧道结构计算的空间问题	134
§ 6-1 矩形隧道的空间计算	135
§ 6-2 圆形隧道的空间计算	141
§ 6-3 平接岔洞的空间框架算法	146
思考题	151
第七章 隧道结构计算的位移反分析法	152
§ 7-1 岩土工程反分析法的基本原理	152
§ 7-2 位移反分析有限单元法	153
§ 7-3 位移反分析边界单元法	160
思考题	165
第八章 隧道结构计算的黏、弹、塑性问题	166
§ 8-1 岩土材料的本构关系	167
§ 8-2 岩土材料的屈服准则	170
§ 8-3 隧道围岩的弹、塑性分析	171
§ 8-4 圆形隧道的黏、弹性分析	179
§ 8-5 圆形隧道的黏、弹、塑性分析	181
思考题	185
第九章 明洞与洞门的结构计算	186
§ 9-1 明洞的结构计算	186
§ 9-2 洞门的结构计算	189
思考题	192
附录 1 弹性地基梁的计算	193
§ 1 概述	193
§ 2 弹性地基计算模型	193
§ 3 弹性地基梁的挠度曲线微分方程及初参数法求解	194
§ 4 弹性地基短梁、长梁及刚性梁	205
附录 2 隧道结构计算例题	211
§ 1 拱形半衬砌结构算例	211
§ 2 拱形曲墙式衬砌结构算例	218
§ 3 拱形直墙式衬砌结构算例	232
§ 4 圆形隧道的弹性力学解	247
§ 5 公路隧道结构力学二维有限元解	251
§ 6 公路隧道结构力学三维有限元解	255
参考文献	261

第一章 绪 论

构筑在离地面一定深度的岩层或土层中用作通道的建筑物叫做隧道。根据隧道周围的介质不同,隧道可分为岩石隧道和土层隧道。岩石隧道通常修建在山体中间,因而也将其称作山岭隧道;而土层隧道常常修筑在距地面较浅的软土层中,如城市中的交通隧道和穿越河流或库区的水底隧道。按照用途不同,隧道又可分为交通隧道和市政工程隧道。交通隧道包括铁路隧道、公路隧道、城市地铁、人行通道、水底隧道和航运隧道;市政工程隧道包括城市供水隧道,排水隧道,煤气、暖气干线隧道,电缆通信隧道以及城市地下综合管道。公路隧道是交通隧道的一个重要分支,常见的连接山体两侧公路的山岭隧道或连接水体两侧公路的水底隧道以及城市中的人行通道都属于公路隧道。这样我们就可以给公路隧道一个粗略的定义,即用于穿越公路路线障碍物(山体,河流等)的交通隧道,称为公路隧道。

§ 1-1 公路隧道的主要特点及结构形式

一、公路隧道的主要特点

公路隧道与铁路隧道、水工隧洞相比,有其自己的特点,主要表现为:

1. 断面形状复杂

公路隧道和铁路隧道、水工隧洞相比,断面宽而扁,这主要是公路车辆的行驶所要求。另外公路隧道中还常有岔洞、紧急停车带、回转区以及连拱隧道、小间距隧道、双层隧道等,这些在铁路隧道和水工隧洞中是很少见的。

2. 荷载形式单一

公路隧道所承受的主要荷载来自于隧道周围的围岩压力,汽车的行车荷载对隧道的影响比起围岩压力,完全可以忽略。通常这里的围岩压力一般方向不会改变,更不存在水工隧洞中那种双向受压状况。另外,由于汽车的行驶速度一般不大于 120km/h,所以,这里也不会有高速铁路中在洞口及洞中所具有的那种复杂的空气压力变化的影响。

3. 附属设施多

和铁路隧道、水工隧洞不同,为了满足行车安全的要求,公路隧道中有许多附属设施,主要的有通风设施、照明设施、交通信号设施、通信设施、消防设施以及监控设施。

二、断面几何形状

公路隧道的结构形式,必须从满足功能和经济两个方面去考虑。功能方面的要求,除作为行车道之外,人行道、通风、照明、防灾、通信、信控等附属设施的需求空间也必须保证。经济方面的要求,是指根据地质构造和围岩压力的特点,在保证安全条件下,求得一个最经济的断面结构形状和最佳的支护方式。事实上,关于经济方面的考虑,除了在具体设计时要研究地质构造特点外,在进行宏观方案论证时也要充分予以注意。

常见的公路隧道的断面形状多为马蹄形,如图 1-1a)、b)、c),或者圆形,如图 1-2 所示。除此而外,根据道路通行能力的要求或者受地形条件的限制,有时隧道的断面形式也设计成图 1-3 所示的拱形隧道,或图 1-4 所示的连拱形式。

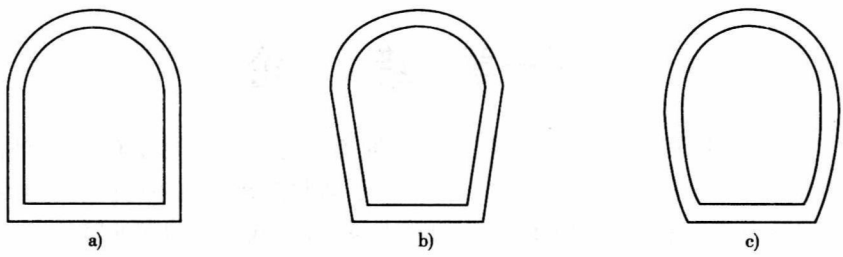


图 1-1 马蹄形隧道

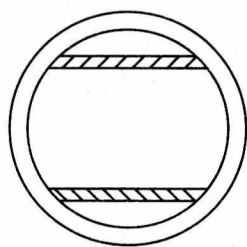


图 1-2 圆形隧道

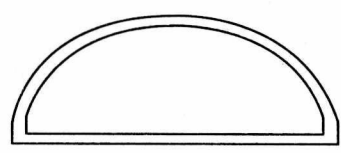


图 1-3 拱形隧道

在浅埋土层中设置的交通隧道以及城市的通道,常常又设计成矩形断面或单跨双层、单层多跨拱形截面,如图 1-5、图 1-6、图 1-7 所示。

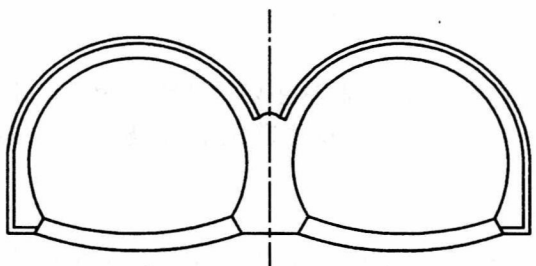


图 1-4 连拱隧道

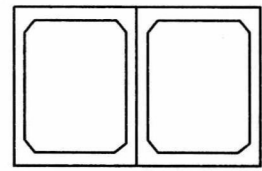


图 1-5 矩形通道

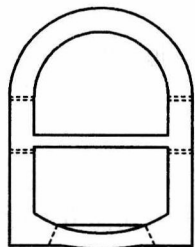


图 1-6 单跨双层隧道

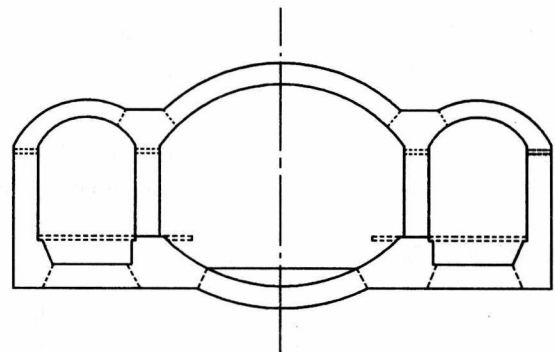


图 1-7 单层多跨通道

另外,在较长的公路隧道中,洞内还要设置加宽带、U 形回车道、通风竖(斜)井以及洞内交叉通道。

三、衬砌结构类型

衬砌的结构类型,大致可分为四类,即整体式混凝土衬砌、装配式衬砌、锚喷支护衬砌和复合式衬砌。

整体式混凝土衬砌,又可根据隧道围岩地质的特点,分为半衬砌、厚拱薄墙衬砌、直墙拱形衬砌和曲墙拱形衬砌。

所谓半衬砌,就是根据围岩的压力情况,有时只对拱顶部分进行衬砌,而对边墙不进行衬砌。有时也正好反过来,即只对边墙进行衬砌,而对拱顶只做喷浆处理。这种衬砌形式适用于岩层较坚硬并且整体稳定或基本稳定的围岩(图 1-8)。而对于一些侧压力很大的较软的岩层或土层,为了避免直墙承受较大的压应力,可采用图 1-9 所示的落地拱形式。

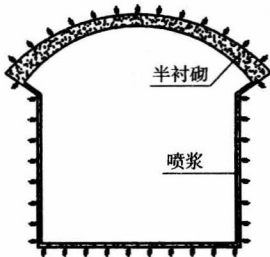


图 1-8 半衬砌结构

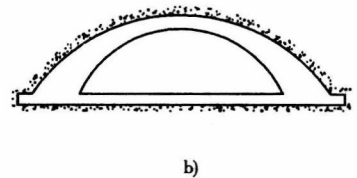
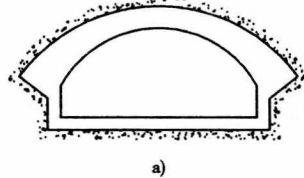


图 1-9 落地拱形结构

厚拱薄墙衬砌适用于水平压力很小的状况。顾名思义,这种结构形式,拱脚较厚,而边墙较薄(图 1-10)。

在竖向压力较大,而水平侧压力不大时,常常采用直墙拱形衬砌。这种结构形式在我国铁路隧道中常常见到(图 1-11)。

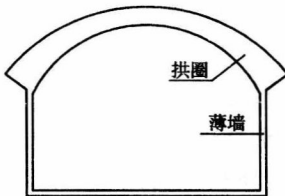


图 1-10 厚拱薄墙衬砌

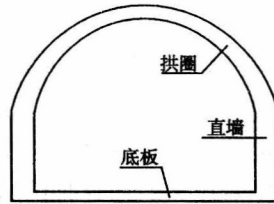


图 1-11 直墙拱形衬砌

曲墙拱形衬砌适用于地质条件差,岩石破碎、松散和易于坍塌的地段。特别是对于洞底板较弱、具有膨胀特性或有较大围岩压力的情况,这种结构形式不失为一种很好的设计形式(图 1-12)。

装配式衬砌是由事先预制好的“元件”在洞内现场拼装而成。这种衬砌形式可提高施工进度,通常用于盾构法施工、沉埋法施工和 TBM 法施工,如图 1-13 所示。

锚喷支护是喷混凝土和加锚杆两种支护方式的统称。常用的工艺有:喷混凝土、钢筋网喷混凝土、锚杆喷混凝土、钢筋网锚杆喷混凝土、钢纤维喷混凝土。这种衬砌形式有很强的时效性,一般在毛洞开挖后就要立即进行,初次喷射混凝土,如图 1-14 所示。这种方法多应用于挪威法和新奥法的衬砌支护中。

复合式衬砌结构,主要应用于含水量较多的地段。这种衬砌的主要特征是:除了锚杆、拱

架、挂网外,衬砌一般分两次进行。外层常为锚喷支护,中间有一层防水层,而内层多为整体式衬砌(图 1-15)。目前,国内公路隧道普遍采用的新奥地利施工法都是复合式衬砌结构。

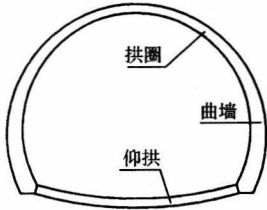


图 1-12 曲墙拱形衬砌

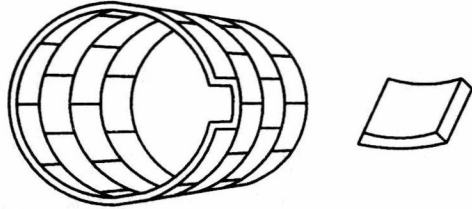


图 1-13 装配式衬砌

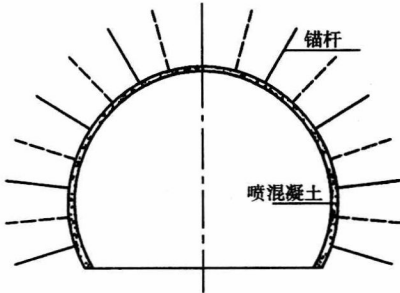


图 1-14 锚喷支护

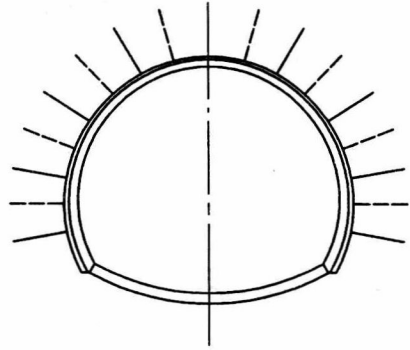


图 1-15 复合式衬砌

衬砌是一种永久性的支护结构,作用是维护隧道的稳定,上述所列举的为一些目前工程中常用的衬砌形式。随着科学技术的不断发展,相信会有许多新的隧道衬砌材料和新的衬砌技术工艺不断出现。

§ 1-2 初始地应力场

在地层中修筑隧道时,隧道周围岩体的原有平衡状态被打破,并产生应力重新分布。当隧道周围岩体的强度不能适应这种应力变化时,岩体可能破坏,发生失稳,进而转化为需要隧道衬砌结构承担的围岩压力。而这种围岩压力正是由于岩体初应力改变所产生。所以,地层中的岩体初始地应力场是产生围岩压力的根本原因。

这里所说的岩体初应力场,是指隧道未开挖前岩体的初始静应力场。岩体的初始静应力场一般受到两类因素的影响:一类是和岩体的物理力学性质、构造特点、地形地貌、温度、重力等紧密相关;另一类是与地壳的运动、地下水的变化以及人类活动等因素有关。在上述两种因素中,自重应力场是主要因素。

因此,初应力场由两种力系组成,即:

$$\sigma = \sigma_y + \sigma_T \quad (1-1)$$

式中: σ_y ——自重应力分量;

σ_T ——构造应力分量。

一、重力应力场

首先我们研究一种简单的理想化的地层结构,即假设岩体具有水平成层,地面平坦。同时

还假设岩体的所有物性参数在 x, y 平面内均质, 沿 z 方向非均质。这样距地表面任一深度 h 处的应力状态定义为:

$$\sigma_z = \int_0^h \gamma(z) dz = \sigma_z(z) \quad (1-2)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x(z) \\ \sigma_y &= \sigma_y(z) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (1-4)$$

式中: $\gamma(z)$ —— 单位体积上的岩体重力, kN/m^3 。

研究认为, 处于静力平衡状态下的岩体, 水平方向无应变, 由弹性空间体的虎克(Hook)定理

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

中的前两式可以推得水平应力分量为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z \\ \sigma_y &= \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_z \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中: μ —— 岩体的泊松(Poisson)系数;

$\frac{\mu}{1 - \mu}$ —— 侧压力系数。

对于图 1-16b) 中的多层不同岩石, 式(1-2) 可改写为:

$$\sigma_z = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1-7)$$

式中: γ_i, h_i —— 分别为第 i 层岩体的重度和岩厚, 并且有:

$$h = \sum_{i=1}^n h_i \quad (1-8)$$

从上述各式中可以看到, 岩体自重应力场随岩层的深度呈线性变化, 且水平应力总是小于垂直应力, 最大不超过垂直应力。

事实上, 地层的构造并非图 1-16 所描述的那么简单。由于地壳的运动, 岩层会产生各种各样的变化, 如变成各种倾斜状、弯曲状等, 因此围岩的初应力状态也将发生变化。

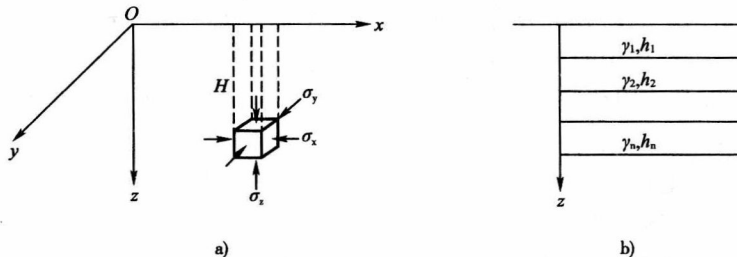


图 1-16 重力应力场

二、构造应力场

构造应力场是由地质体系在变化造形过程中所产生的应力,它与许多因素相关,所以一般很难用解析函数表示出来。同时,由于构造应力场和地质的变化、造山运动等有关,因而它具有明显的区域性,且随着时间的推移会发生变化。通常对构造应力场的研究都是通过测量的办法去实现。根据已发表的研究资料表明:

(1) 地质构造过程不仅改变了地质的重力应力场,而且还有一部分残余在岩体内,这些残余应力必将对隧道工程产生一定的影响。

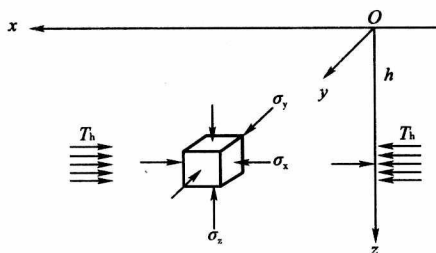


图 1-17 构造应力之间的关系

(2) 构造应力场在岩层一定深度内普遍存在。而且由于地壳运动所产生的拉、压、扭剪作用,局部的最大构造应力多为水平方向,其值往往大于重力应力场中的水平应力分量,有时甚至大于垂直应力分量。

(3) 构造应力场具有明显的区域性和时间性,即它受所在区域地壳运动和时间的影响很大。

一个水平方向构造应力和其余两个应力之间具有一定的比例关系。如图 1-17 所示,如果近似地确定了距地表 h 深处的一个水平方向构造应力 T_h ,则微单元上的应力状态可以近似地写成:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= T_h \\ \sigma_y &= \alpha T_h \\ \sigma_z &= \beta T_h \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中: α, β —— 分别为构造应力场中水平和垂直方向的侧压力系数。

确定初始地应力场,可用解析反演法和原位测试法。而用解析的方法来分析地层的初应力场,仅是一个大概的结果,有时由于受多种因素的影响,误差很大。因此,在一般的理论分析中,常把初始应力场按静水应力场来处理,而在一些较为重大的工程中多采取实地测量的方法来确定。

§ 1-3 隧道结构荷载形式

进行隧道结构计算,首先必须确定隧道结构所承受的荷载。这里所讲的隧道结构,是所开挖的洞室周围介质和各种支护结构的统称。由于公路隧道处于岩体或者土体介质之中,因此和所有地下结构一样,其周围的岩体介质具有荷载的两重性,即一方面它们会对支护结构表现出“荷载作用”,另外一方面又与支护结构共同承担着这个“作用荷载”。

作用在隧道结构上的荷载可分为三类,即主要荷载、附加荷载、特殊荷载。

主要荷载就是长期作用的荷载,它包括地层压力、围岩弹性抗力、结构自重力、回填岩土重力、地下静水压力以及使用荷载。其中,地层压力是隧道衬砌结构所承受的主要静荷载,一般它和隧道的埋深以及岩土的相对密度成正比。弹性抗力是衬砌结构因变形受到的地层约束力,它的大小和衬砌结构的变形成正比关系。使用荷载是指隧道中附属设施的自重以及行驶汽车的负重等,但此类荷载在隧道结构计算中所占的比重很小。

附加荷载是指非经常作用的荷载,它包括施工荷载、灌浆压力、局部落石以及由温度变化或混凝土收缩所引起的温度应力和收缩应力。

特殊荷载包括一些偶然发生的荷载,如炮弹的冲击力和爆炸时所产生的激波压力、地震产生的地震力、发生车祸时汽车对隧道结构的冲撞力等。

在上述各荷载项中,地层压力是隧道结构所承受的固有荷载,但地层压力又有围岩压力和土压力之分。

一、围岩压力

由于隧道开挖影响到地层周围的岩体部分,故人们称之为隧道围岩。而随着隧道的开挖,将引起隧道周围岩体产生变形或发生破坏。为了防止变形过大或者破坏产生,需要对围岩进行支护。这时,支护结构将受到变形岩体的挤压作用,同时还可能受到松散围岩中岩体的坠落、滑移、坍塌等所产生的岩体重力作用。通常把由岩体变形所产生的挤压力叫做形变压力;而把岩块坠落、滑移、坍塌等所产生的重力叫做松散压力,形变压力和松散压力统称为围岩压力。按作用方向不同,围岩压力又分为围岩垂直压力和围岩水平压力。在坚硬岩层中,围岩水平压力很小,在计算时可忽略不计;但在松软岩层中,围岩水平压力较大,计算时必须计及。通常围岩垂直压力是自上而下,然而对于隧道底部,围岩垂直压力是自下而上,并且在松软岩层和膨胀性岩层中,这种压力较大,应特别引起注意。

影响围岩压力的因素有岩土的重力、岩体的结构、地下水的分布、隧道洞室的形状和尺寸以及初始地应力。在具体确定围岩压力时,常用的方法有三种:第一种方法是现场量测,这种方法虽然比较接近实际,但由于受量测设备、量测技术和经费等原因的限制,应用尚不广泛;第二种方法是理论估算,然而,由于影响围岩压力的因素太多,所以理论估算方法只有在少数简单情况下较为适用;第三种方法是工程类比法,这种方法以大量已建工程的统计资料为基础,通过数学回归等方法,按照围岩分类规则,分别提出适合不同具体情况的经验公式估计围岩压力。目前,岩土工程中应用最多的就是工程类比法,即围岩分类法。常用的围岩分类法有以下几种。

1. 岩石坚固系数分类法

此方法由前苏联学者普罗托吉雅柯诺夫创立,他所给的围岩垂直压力为:

$$\sigma_z = \gamma h_1 \quad (1-10)$$

水平压力为:

$$\sigma_H^{①} = \gamma h_1 \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1-11)$$

$$\sigma_H^{②} = \gamma (h_1 + h) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1-12)$$

式中: $\sigma_H^{①}$ 、 $\sigma_H^{②}$ ——分别为洞室拱顶和拱底处围岩水平压力;

γ ——围岩重度;

h_1 ——普氏压力拱的矢高;

h ——隧道毛洞的高度;

φ ——土的内摩擦角,如图 1-18 所示,且有:

$$h_1 = a_1 / f \quad (1-13)$$

其中: a_1 ——普氏压力拱半跨宽度,即:

$$a_1 = a + h \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1-14)$$

其中: f ——岩石坚固性系数,有时也称其为岩石似摩擦系数;

a ——隧道半宽;

h ——隧道高度。

普氏理论适用于较松散、破碎地层。

2. 太沙基(K. Terzaghi) 理论

此理论于1946年提出,其所定义的衬砌上的垂直应力计算公式为:

$$\sigma_z = \frac{a_1 \gamma - c}{K \tan \varphi} (1 - e^{-k n \tan \varphi}) + P e^{-k n \tan \varphi} \quad (1-15)$$

式中: c ——岩石内聚力;

φ ——岩石内摩擦角;

γ ——岩石重度;

P ——地面荷载;

n ——相对埋深系数,即 $n = H/a_1$;

H ——隧道埋深。

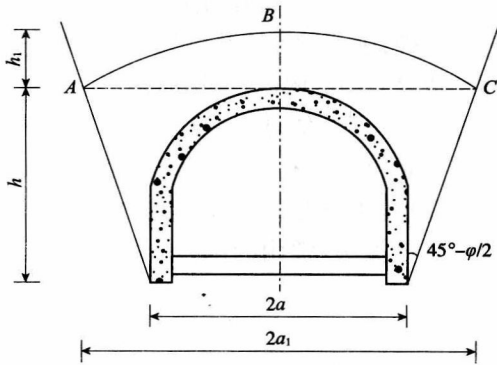


图 1-18 普氏拱

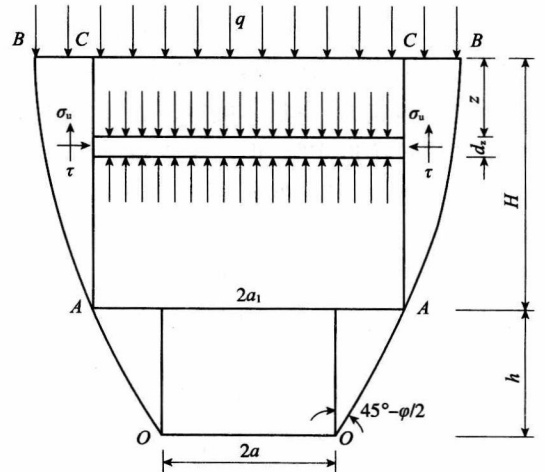


图 1-19 太沙基计算图示

如果围岩为完全松散体,则有 $c = 0$, 式(1-15)蜕化为:

$$\sigma_z = \frac{\gamma a_1}{K \tan \varphi} (1 - e^{-k n \tan \varphi}) + P e^{-k n \tan \varphi} \quad (1-16)$$

当无地面附加荷载时,则:

$$\sigma_z = \frac{\gamma a_1}{K \tan \varphi} (1 - e^{-k n \tan \varphi}) \quad (1-17)$$

如果洞室埋得很深,可近似地认为 $n \rightarrow \infty$, 则:

$$\sigma_z = \frac{\gamma a_1}{K \tan \varphi} \quad (1-18)$$

式中: K ——围岩水平应力和垂直应力之比,即:

$$K = \sigma_H / \sigma_z \quad (1-19)$$

其中: σ_H ——围岩水平应力。

太沙基根据实验结果得出, $K = 1.0 \sim 1.5$ 。如果取 $K = 1.0$, 并以 f 代 $\tan \varphi$, 由式(1-18)得:

$$\sigma_z = \frac{\gamma a_1}{f} = \gamma h_1 \quad (h_1 = a_1/f) \quad (1-20)$$

这和普氏理论中的垂直应力公式(1-10) 完全一致。

3. 公路隧道围岩分级法

我国《公路隧道设计规范》将围岩分为6级,它以大量的铁路隧道坍方调查资料为依据,通过统计回归分析方法,提出了围岩压力计算公式:

$$\sigma_z = 0.45 \times 2^{S-1} \gamma w \quad (1-21)$$

式中: S ——围岩级别;

γ ——围岩重度;

w ——跨度影响系数,且

$$w = 1 + i(B - 5) \quad (1-22)$$

式中: B ——隧道宽度;

i —— B 每增减 1m 时的围岩压力增减率,以 $B = 5\text{m}$ 的围岩垂直均布压力为准,当 $B < 5\text{m}$ 时,取 $i = 0.2$; $B > 5\text{m}$ 时,取 $i = 0.1$ 。

水平压力公式可归纳为:

$$\sigma_H = \begin{cases} (0.5 \sim 1.0) \sigma_z & \text{VI 级围岩} \\ (0.3 \sim 0.5) \sigma_z & \text{V 级围岩} \\ (0.15 \sim 0.3) \sigma_z & \text{IV 级围岩} \\ (0 \sim 0.15) \sigma_z & \text{III 级围岩} \\ 0 & \text{I、II 级围岩} \end{cases} \quad (1-23)$$

式(1-21) ~ 式(1-23) 有一定的适用条件,如采用矿山法施工的深埋隧道,围岩不产生显著的偏压力和膨胀压力,并且 $H_m/B < 1.7$,其中 H_m 为毛洞的高度。

4. 人工岩石洞室围岩分类法

$$\sigma_z = N_0 \alpha \gamma \quad (1-24)$$

式中: α ——跨度修正参数, $\alpha = l_m/6$;

γ ——围岩重度;

N_0 ——围岩压力基本值,可根据岩体的完整性、施工爆破影响程度、支护情况及结构重要性等因素选定。

水平压力:

$$\sigma_H = \begin{cases} (0.00 \sim 0.15) \sigma_z & \text{丙 I 类围岩} \\ (0.10 \sim 0.40) \sigma_z & \text{丙 II 类围岩} \\ (0.40 \sim 0.70) \sigma_z & \text{丁类围岩} \end{cases} \quad (1-25)$$

式(1-24)、式(1-25) 适用于稳定性较差或不稳定围岩中建造小于 15m 的中小洞室。

5. 水工隧洞围岩分类法

$$\sigma_z = 2 \times (0.135 \times 2^{n-2}) \gamma a \quad (1-26)$$

式中: n ——围岩类别;

γ ——围岩重度;

a ——隧道一半宽度。

水平压力:

$$\sigma_H = \begin{cases} (0.1 \sim 0.2) \sigma_z & \text{IV 类围岩} \\ (\geq) 0.3 \sigma_z & \text{V 类围岩} \end{cases} \quad (1-27)$$

关于岩石压力的计算还有不少方法,在具体应用时必须仔细慎重研究。

围岩压力中另外一个很重要的内容就是弹性抗力。如何确定围岩弹性抗力的大小及其作用范围,历来就有局部变形理论和共同变形理论之分。在局部变形理论中,弹性抗力表达式为:

$$\sigma = K\delta \quad (1-28)$$

式中: K ——围岩的弹性抗力系数, kg/cm^3 ;

δ ——衬砌的位移, cm 。

在后边的章节中我们将会看到,许多学者根据局部变形理论,提出不同的弹性抗力分布图式,而这些弹性抗力的假设通常和隧道结构的形态有关。例如,在计算整体式衬砌时,假设弹性抗力为梯形分布形式。而比较接近实际的假定,是根据拱形结构的变形曲线所提出的镰刀形分布图式,此种假设对曲墙或直墙式拱形结构均适用。

按共同变形理论来确定地层的弹性抗力较为复杂,一般可以通过反演的方法来实现。

二、土压力

修筑在土层中的隧道,一般埋深较浅,施工方法常见的有明挖法和盾构法。在明挖法中,衬砌结构所承受的土压力可以用静止土压力计算公式、朗金(Rankine)土压力计算公式、库仑(Couloun)土压力计算公式进行计算。

静止土压力计算公式的基本依据是假设隧道结构周围的填土处于弹性平衡状态,并且衬砌结构不移动,则此时静止土压力为:

$$\sigma_z = \gamma z \quad (1-29)$$

$$\sigma_H = k_0 \sigma_z \quad (1-30)$$

式中: k_0 ——静止土压力系数。

采用朗金土压力计算公式,如果衬砌结构产生变形,则对于水平主动压应力,有:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \gamma z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) && \text{砂性土} \\ \sigma_H &= \gamma z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) && \text{黏性土} \end{aligned} \right\} \quad (1-31a)$$

式中: c ——土的黏聚力;

φ ——土的内摩擦角;

γ ——土的重度;

z ——隧道埋深。

水平被动压应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_H &= \gamma z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) && \text{砂性土} \\ \sigma_H &= \gamma z \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) && \text{黏性土} \end{aligned} \right\} \quad (1-31b)$$

库仑土压力计算公式为:

$$\sigma_H = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad (1-32)$$

式中: H ——衬砌结构高度;