

水工压力隧洞 结构应力计算

蔡晓鸿 蔡勇平 著

Structural Stress Calculation
for Hydraulic
Pressure Tunnel



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工压力隧洞 结构应力计算

Structural Stress Calculation for Hydraulic Pressure Tunnel

© 蔡晓鸿 蔡勇平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以水工压力隧洞衬砌与围岩联合承载的设计思想为主线,在全面阐述水工压力隧洞结构设计原则的基础上,分别介绍了不衬砌水工压力隧洞围岩应力计算、衬砌水工压力隧洞结构应力计算、压力隧洞围岩抗力系数计算、含水围岩衬砌应力计算、压力隧洞温度应力计算、灌浆式预应力衬砌计算、压力隧洞混凝土衬砌限裂设计的有限环变位协调解析方法,并推导出了相应的解析计算公式。本书给出了水工压力隧洞围岩抗力系数的普遍计算式,依据所建立的水工压力隧洞在温度荷载和均匀内水压力联合作用下的计算模型,给出了衬砌伸缩缝间距设计与裂缝开展宽度的计算方法和解析计算式。本书还采用断裂力学理论,推导出了隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计公式。为便于读者加深对各章内容的理解,书中每章均列举了算例。

本书可供水利水电、铁路、矿山等工程设计人员和科学研究人员使用,也可供相关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工压力隧洞结构应力计算/蔡晓鸿,蔡勇平著.

北京:中国水利水电出版社,2004.6

ISBN 7-5084-2101-9

I. 水... II. ①蔡... ②蔡... III. 压力隧洞—水工
结构—应力—计算 IV. TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第041200号

书 名	水工压力隧洞结构应力计算
作 者	蔡晓鸿 蔡勇平 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 15.25印张 362千字
版 次	2004年6月第1版 2004年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

隧道与地下工程是一门既富理论内涵、又实践性很强的应用学科。现代隧洞工程的规模日益宏大，其设计计算方面的技术课题也愈趋复杂，如何将源于工程和生产的问题上升到理论高度，运用科学实验与测试，以及数学、力学和计算机科学等现代手段，从其本质与机理上来认识、理解与探讨，进而得以深刻论述、剖析与鉴别问题的实质；再将分析结果返回到实践中去检验，经过多次反馈、修正与进一步升华，最终得到问题的优化方案。这种研究问题的方法与手段，构成了现代隧道力学学科的主要内容。

我有幸拜读了蔡晓鸿教授级高级工程师所著的《水工压力隧洞结构应力计算》一书的打印稿，深感颇有新意与创见，非常可喜。

众所周知，水工压力隧洞是水利水电工程中最常见的引水建筑物之一，通常采用圆形断面，并大多设置衬砌。衬砌与围岩联合工作，共同承受各种内外压力。为了对这类有压隧洞进行正确的设计与施工，必须对衬砌和围岩作详尽细致的应力分析。据国内外水工隧洞失事原因分析可见，大多是由于施工或运行工况下应力计算有误，以及围岩变形过大、衬砌裂损破坏所造成的。因此，在水工压力隧洞结构设计中正确地进行应力分析，对于保证工程的安全与经济具有十分重要的意义。

大多数水工压力隧洞都建造在岩体之内，隧洞应力除了与围岩特征、岩体物理力学性质、覆盖层厚度、隧洞外形与尺寸，以及所承受的外载等因素有关外，在许多场合还取决于施工方案和施工方法。在多种不利的荷载组合和计算因素确定以后，应力计算的正确与否则主要与其计算模型以及应力分析方法的合理性密切相关。

本书作者长期以来在设计与技术管理岗位上辛勤工作，数十年如一日，孜孜不倦地致力于水工隧洞结构设计应力解析计算方法的研究。在广泛搜集文献资料和调查研究的基础上，他结合自己多年来的设计经验和研究成果，在书中创意地采用了隧洞结构有限环的力学、数学模型，首次提出并建立了隧洞结构应力分析的有限环变位协调法则，进而具体给出了衬砌水工压力隧洞结构有关应力计算、压力隧洞围岩抗力系数计算、含水围岩衬砌应力计算、压力隧洞温

度应力计算、灌浆式预应力衬砌应力计算、压力隧洞混凝土衬砌限裂设计等一系列的解析计算方法及其相应的计算公式。对水工压力隧洞衬砌伸缩缝间距设计与衬砌裂缝开展宽度计算等也提出了很具特色的计算分析方法。更值得一提的是，他在 20 世纪 80 年代就对莫尔—库仑屈服条件在水工压力隧洞弹塑性应力计算中的适用表述进行了研究，深刻地指出了以往具体应用中的误区。

本书涉及水工压力隧洞结构设计应力计算方面的诸多复杂课题，并针对水工压力隧洞应力解析计算进行了系统总结。全书理论严谨，内容丰富，既有学术创新，又具工程实用性。事实上，已如上述，本书的多数研究成果，已在生产实践中取得了重大的技术、经济效益，这是很难能可贵的。

我深信本书的付梓问世，将对水利水电工程和广大的岩土工程工作者有所教益，这是可以预期的。

为此，我乐于推荐本书的出版，并高兴地写了上面的一点文字，请各位读者指教。是为序。

孙 钧

2003 年仲秋于同济园

孙钧 同济大学隧道与地下工程系教授、中国科学院院士、中国岩石力学与工程学会名誉理事长。

前言

工程实践表明, 水工压力隧洞衬砌与围岩是一整体结构, 衬砌与围岩联合承载。现代支护理论视围岩为压力隧洞承载主体, 衬砌是对围岩加固的工程措施。本书依据这一基本设计思想进行隧洞结构的应力分析与计算。

笔者在众多专家学者研究成果的基础上, 建立了衬砌混凝土未开裂隧洞、衬砌混凝土开裂隧洞、钢衬钢筋混凝土衬砌隧洞、含水围岩隧洞、温度荷载和均匀内水压力联合作用隧洞结构的有限环力学、数学模型, 介绍了与模型相匹配的隧洞结构应力有限环变位协调算法, 分别给出了相应的解析计算式。本书指出了具体应用莫尔—库仑破坏条件表达式计算水工压力隧洞弹塑性应力的荷载条件, 并分别推导出了含水围岩、设集中排水隧洞含水围岩与衬砌应力计算式; 指出了B·Л·伏尔可夫水工有压隧洞温度应力计算法的错误; 介绍了温度应力变位协调算法; 给出了压力隧洞衬砌伸缩缝间距设计与裂缝开展宽度计算解析式。本书还介绍了灌浆式预应力衬砌隧洞应力计算式; 采用断裂力学理论, 推导出了隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计公式。书中各章既有内在联系, 又可独立成篇。对每章介绍的计算方法与计算公式, 均列举了算例, 以帮助读者掌握计算步骤, 加深对计算方法的理解。可以说, 本书是笔者历时20年在这一课题上研究成果的总结。

在笔者长期的研究过程中, 受益于中国科学院院士孙钧, 河海大学徐志英教授、沈家荫教授、卓家寿教授、殷宗泽教授, 同济大学侯学渊教授、杨林德教授, 吉安市水务局原总工程师吕有年等专家学者; 在成书过程中, 得到了吉安市水务局、吉安市水利水电规划设计院、吉安市农业综合开发办公室、吉荣实业公司领导的支持。对此, 一并表示诚挚的谢忱!

书中有错误失当之处, 敬请读者指正。

作 者

2004年5月于吉安市

目 录

序

前言

第一章 水工压力隧洞结构设计原则	1
第一节 概述	1
第二节 岩体的力学特性	2
第三节 隧洞衬砌的作用	16
第四节 压力隧洞的主要荷载	16
第五节 压力隧洞结构设计原则	25
第二章 不衬砌水工压力隧洞围岩应力计算	27
第一节 承受均布压力厚壁圆筒问题	27
第二节 压力隧洞围岩孔口应力重分布.....	30
第三节 不衬砌压力隧洞围岩附加应力.....	33
第四节 围岩稳定性极限平衡分析	34
第五节 压力隧洞围岩最小覆盖厚度	40
第三章 衬砌水工压力隧洞结构应力计算	49
第一节 概述	49
第二节 隧洞衬砌混凝土未开裂结构应力计算	49
第三节 莫尔-库仑破坏条件下压力隧洞加载与卸载应力计算	55
第四节 混凝土破坏强度的 Kupfer 准则	61
第五节 衬砌混凝土开裂后隧洞结构应力计算	62
第六节 钢衬钢筋混凝土压力隧洞结构应力计算	67
第七节 二向不等压初始应力场内压力隧洞结构应力计算	74
第四章 压力隧洞围岩抗力系数	84
第一节 概述	84
第二节 围岩弹性抗力系数的计算式	84
第三节 有裂缝区围岩抗力系数的计算式	85
第四节 理想弹塑性围岩抗力系数的计算式	86
第五节 弹塑性强化围岩抗力系数的计算式	90
第六节 莫尔-库仑破坏条件下圆形压力隧洞围岩抗力系数的计算式	102

第七节	圆形压力隧洞围岩抗力系数的普遍计算式	109
第八节	抗力系数的应用	119
第五章	含水围岩衬砌应力计算	123
第一节	渗流基本微分方程与单值性条件	123
第二节	隧洞衬砌与围岩渗透水压力分布规律	126
第三节	施工期隧洞含水围岩与衬砌应力计算	128
第四节	运行期隧洞含水围岩与衬砌应力计算	135
第五节	设集中排水隧洞的含水围岩与衬砌应力计算	148
第六章	压力隧洞温度应力计算	159
第一节	热传导基本微分方程	159
第二节	温度场的边值条件	160
第三节	温度应力的基本关系式	161
第四节	压力隧洞弹性温度应力	165
第五节	温度荷载和均匀内水压力联合作用下的压力隧洞应力计算	178
第六节	压力隧洞衬砌伸缩缝间距设计与裂缝开展宽度计算	181
第七节	关于压力隧洞自生温度应力的若干注记	187
第七章	灌浆式预应力衬砌	189
第一节	基本原理	189
第二节	灌浆式预应力衬砌的类型与技术特点	190
第三节	灌浆式预应力衬砌隧洞施工期应力计算	191
第四节	灌浆式预应力衬砌隧洞运行期应力计算	194
第五节	水泥压浆环干缩应力计算	199
第六节	混凝土衬砌的徐变应力计算	207
第八章	压力隧洞混凝土衬砌限裂设计	212
第一节	概述	212
第二节	钢筋混凝土衬砌的限裂设计	213
第三节	裂缝参数计算	224
第四节	开裂衬砌渗漏量计算	233
参考文献		235

第一章 水工压力隧洞结构设计原则

第一节 概 述

水工隧洞是水利水电枢纽工程重要建筑物之一，在岩体或土层中开挖而成，长度远较其横断面为大，水工压力隧洞宜采用圆形断面。原型观测和结构模型试验资料表明，在内水压力作用下，隧洞衬砌与围岩联合工作，共同承载。这一事实的确认，直接引发了隧洞设计理论的进步，使水工工程师从单一的围岩松弛荷载理论中摆脱出来，深刻地认识到围岩既是产生围岩压力的主体，又是承受这一压力的承载结构主体，且是构成自承结构的天然主体材料。因此，水工压力隧洞结构设计的原则是，考虑隧洞衬砌与围岩联合承受内水压力荷载，按整体结构进行设计与应力分析^[1]，而应力计算则是结构设计的出发点和归宿。

围岩是水工压力隧洞的承载主体，衬砌便可认为是对围岩的加固。因此在水工压力隧洞设计中，设计人员必须掌握隧洞沿线的岩层性质和地质构造、水文地质条件、围岩稳定性评价，并在此基础上，合理地选择洞线，合理地选用设计参数，合理地选取概化计算模型，合理地对隧洞衬砌与围岩进行应力分析。

隧洞围岩为复杂的地质体，当洞身覆盖围岩厚度满足最小覆盖厚度条件，且通过固结灌浆等人工改造使结构面闭合，岩体完整性有保障后，围岩一般可概化为均质、连续、各向同性体。这种概化的实际依据，就是通过实验和调查观测所掌握的水工隧洞围岩的受载规律和应力特性。客观地说，这一建立在试验与原型观测基础上的抽象模型，反映了工程条件下水工隧洞的主要性状。物理力学模型的合理确立，为建立水工圆形压力隧洞数学计算模型奠定了基础，并能使问题的解与实际结果相一致。理论分析与众多工程实例表明，水工压力隧洞可视作弹塑性力学的轴对称问题，从而可采用解析方法对水工压力隧洞进行应力分析与结构计算。总之，模型化处理，不仅能使问题的求解方便，而且往往能起到突出问题基本矛盾的作用。

解析计算方法是水工结构工程中的一项重要研究课题，不仅可以给出工程上实用的计算方法，而且可以揭示各种因素、相关参数（如边界条件、物性条件、时间条件、岩土物理力学参数）对结构应力分布的影响，对认识各影响因素在工程结构中的应用范围具有重要意义。经验表明，即使运用于不连续岩体，连续介质力学的解析解往往也可给出接近于正确结果的预测。解析分析的另一个优点是，可作为其他各种方法，尤其是数值计算方法精确性的一种检验或误差评估。再则，本书介绍的有限环变位协调法采用多层厚壁圆筒接触问题弹塑性解，可视为有限元方法的高度简化，其主要区别在于计算单元的划分方式（有限层圆环，简称有限环）以及对围岩体应力应变关系的模拟分析方法。问题的轴对称性，使有限环变位协调法在理论上具有解析法的优点，在实用上较有限元数值法简便直观。此

外,掌握结构的物理数学建模和解析求解方法,也是提高应用已有的数学基础知识去分析实际问题,进一步创新发展的一条途径。因此,作为一位训练有素的工程师,应尽量学习和掌握用解析分析方法去观察、研究问题,并尽可能寻求工程问题的解析解。

本书应力正负号规定:正应力以拉应力为正、压应力为负。剪应力的正负号规定分为两种情况:当其所在面的外法线与坐标轴的正方向一致时,则以沿坐标轴正方向的剪应力为正,反之为负;当所在面的外法线与坐标轴的负方向一致时,则以沿坐标轴负方向的剪应力为正,反之为负(即正面的正方向为正,负面的负方向为正)。

第二节 岩体的力学特性

一、岩块的力学特性

岩体是在漫长的地质历史发展过程中形成的,是经受过变形、遭受过破坏、有一定的结构、赋存于一定地质环境中的刚性地质体。它的成因和构造复杂,岩性多样。岩体的单元是被结构面切割成的岩块,岩体的强度由所组成岩块的强度和结构面的强度所决定^[2]。因此,要了解岩体的工程力学特性,就必须了解岩块的物理力学特性,把握结构面对岩体工程力学特性的影响。

各种岩块因所组成的矿物成分与内部晶体结构不同,其物理力学性质也各不相同。

(一) 岩石的容重

岩石的容重是指单位体积岩石的重量,随岩石所处的状态和环境不同而有不同的数值。越致密的岩石,容重越大,岩石的质量也越好。隧洞设计中最关心的是岩石处于天然状态时的天然容重(湿容重)。岩石孔隙中完全没有水,即干燥时的容重称为干容重,干容重比湿容重小。岩石中孔隙完全充满水时的容重称为饱和容重,饱和容重比湿容重大。当岩石处于地下水面线以下时,受到水的浮力作用时的容重称为浮容重,对同一种岩石而言,浮容重是岩石的各种容重值中的最小者。

同一种岩石,因矿物成分比例、埋深、孔隙率、风化程度等的不同,其容重有一定的差异,常见岩石容重指标变化范围见表 1-1。

(二) 岩石的孔隙率

岩石的孔隙率是指岩石中孔隙(含微裂隙)体积与岩石体积之比,以百分比表示。孔隙率大小与岩石的水理性质(吸水性、抗冻性、软化性与透水性)、岩石的力学性质(变形、强度)有内在关系。常见岩石孔隙率见表 1-1。

(三) 岩石的软化系数

岩石的软化系数是指饱水状态下岩石试件抗压强度与干燥状态下岩石试件抗压强度的比值。软化系数小于 0.75 的岩石属易软化岩石,其工程性质较差。

(四) 岩石的变形指标

岩石的变形指标常用弹性模量 E 和泊松比(侧膨胀系数) μ 来表示,其值由室内岩石试验或野外静力测试确定,各类岩石差别较大。 E 值越大, μ 值越小的岩石抵抗变形的能力越强。常见岩石弹性模量变化范围见表 1-1,各类岩石泊松比差值不很明显,一般变化范围在 0.2~0.4 之间,对体积变形可忽略的岩石,泊松比取 0.5。

表 1-1 岩石的物理力学性质指标变化范围

岩石名称	容重 γ_R (kN/m ³)	比重 ΔS	孔隙率 n (%)	吸水率 ω (%)	抗压强度 R_c		抗拉强度 R_t (MPa)	软化系数 k_d	弹性模量 E (GPa)	抗剪强度	
					干抗压 (MPa)	湿抗压 (MPa)				凝聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ (°)
岩浆岩	花岗岩	25.3~ 26.1	2.60~ 2.67	0.5~ 2.0	<0.5	130~ 210	100~ 190	7~ 25	0.72~ 0.95	33~ 65	14~ 50 45~ 60
	闪长玢岩	24.9~ 27.8	2.66~ 2.84	2.1~ 5.1	0.4~ 1.0	130~ 200	100~ 160	15~ 30	0.78~ 0.81	35~ 40	
	流纹斑岩	25.8~ 26.1	2.62~ 2.65	0.9~ 2.3	<0.5	60~ 290			0.75~ 0.95	4~ 23	
	玄武岩	27.2~ 29.2	2.75~ 2.96	0.5~ 2.2	0.4~ 0.8	100~ 290	100~ 190	10~ 30	0.85~ 0.95	34~ 38	20~ 60 50~ 55
变质岩	片麻岩	26.5~ 27.9	2.69~ 2.82	0.7~ 2.2	0.1~ 0.7	80~ 180	70~ 180	5~ 20	0.75~ 0.97	22~ 35	
	石英片岩 角闪石片岩	26.8~ 29.2	2.72~ 3.02	0.7~ 3.0	0.1~ 0.3	75~ 220	70~ 160		0.70~ 0.93	45~ 89	
	云母片岩 绿泥石片岩	26.9~ 27.6	2.75~ 2.83	0.8~ 2.1	0.1~ 0.6	60~ 130	30~ 70		0.53~ 0.69		
	千枚岩	27.1~ 28.6	2.81~ 2.96		0.5~ 0.8	30~ 60	16~ 40		0.67~ 0.93		
	硅质板岩	27.1~ 27.5	2.74~ 2.81	0.3~ 3.8		80~ 200	60~ 150	7~ 20	0.75~ 0.79	4~ 23	
	泥质板岩	23.1~ 27.5	2.68~ 2.77	2.5~ 13.5		60~ 140	20~ 70		0.39~ 0.52	5~ 5.5	
	石英岩	26.5~ 27.5	2.70~ 2.75	0.5~ 0.80	0.1~ 0.4	150~ 240	140~ 230	10~ 25	0.94~ 0.96	17~ 23	20~ 60 50~ 60
沉积岩	火山集块岩	25.2~ 26.6	2.64~ 2.78	2.2~ 7.0	0.5~ 1.7	50~ 270	40~ 220		0.6~ 0.8		
	火山角砾岩	24.6~ 28.7	2.58~ 2.90	0.4~ 11.2	0.2~ 5.0	80~ 220	60~ 210		0.57~ 0.95		
	凝灰岩	22.9~ 26.4	2.61~ 2.78	2.0~ 7.4	0.5~ 3.5	10~ 200	10~ 150		0.52~ 0.86		
	石英砂岩	24.0~ 27.0	2.64~ 2.77	1.0~ 9.3	0.2~ 4.1	90~ 200	70~ 150		0.65~ 0.97	13~ 44	8~ 40 35~ 50
	泥质砂岩 粉砂岩	24.0~ 26.0	2.60~ 2.70	5.0~ 20.0	1.0~ 9.0	30~ 80	4~ 45		0.21~ 0.75		
	泥岩	24.0~ 26.0	2.70~ 2.75	3.0~ 7.0	0.7~ 3.0	20~ 45	10~ 30		0.40~ 0.60	1~ 37	
	页岩	24.7~ 26.0	2.63~ 2.75	2.0~ 7.0	1.8~ 3.2	50~ 60	13~ 40	2~ 10	0.24~ 0.55	1~ 15	3~ 30 15~ 30
	石灰岩	26.0~ 27.7	2.70~ 2.80	1.0~ 3.5	0.2~ 3.0	70~ 160	60~ 120	5~ 25	0.70~ 0.90	26~ 55	10~ 50 36~ 50
	泥质灰岩 泥灰岩	24.5~ 26.5	2.70~ 2.75	1.0~ 10.0	1.0~ 3.0	13~ 100	8~ 50		0.44~ 0.54	29~ 53	

(五) 岩石的破坏强度

岩石在受力超过其强度时碎成数块称为破坏。强度是岩石保持稳定所允许的应力或应变条件,这时的应力或应变并未达到岩石遭受破坏的水平。工程中习惯将岩石破坏条件(或破坏判据)称为岩石强度是不恰当的,确切地说应称为岩石的破坏(屈服)强度(条件)。本书采用这一概念。

岩石的破坏强度是评价岩石性质的重要指标,通常由试验得到。描述岩石强度特性的理论甚多,如正应力理论[朗肯(Rankine)理论]、最大正应变理论、最大剪应力理论[特雷斯卡(Tresca)理论]、八面体剪应力理论[米赛斯(Mises)理论]、莫尔—库仑(Mohr-Coulomb)理论、格里菲斯(Griffith)理论、伦特堡(Lundborg)理论等^[3]。下面仅概要介绍为工程界广泛采用的特雷斯卡理论、米赛斯理论、莫尔—库仑理论。

1. 特雷斯卡理论

特雷斯卡根据试验结果,认为最大剪应力达到某一数值时,材料就遭受破坏。所以这个理论的强度条件是

$$\tau_{\max} = \tau_s \quad (1-1)$$

式中: τ_s 为材料的剪切破坏强度。

最大剪应力条件要求预先知道最大与最小主应力。但一般情况下,主应力大小次序是未知的,这时可设 3 个主应力分别为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ,则下列表示最大剪应力的 6 个条件中的一个成立时,岩石即破坏。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm 2\tau_s \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm 2\tau_s \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm 2\tau_s \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

单向压缩或拉伸时,设其抗压强度(或抗拉强度)为 R ,则最大剪应力为

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}R \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-2),便得到特雷斯卡强度理论的破坏条件,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= \pm R \\ \sigma_2 - \sigma_3 &= \pm R \\ \sigma_3 - \sigma_1 &= \pm R \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

或写成如下形式

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - R^2][(\sigma_2 - \sigma_3)^2 - R^2][(\sigma_3 - \sigma_1)^2 - R^2] = 0 \quad (1-5)$$

R 可视单向受力情况,分别代表材料的单轴抗压强度 R_c 或单轴抗拉强度 R_t 。

特雷斯卡强度理论对于塑性岩石给出了满意的结果,但对于脆性岩石不适用。

2. 米赛斯理论

特雷斯卡强度理论没有考虑中间主应力的影响,米赛斯指出,当八面体剪应力 τ_8 达到某一值时,材料开始破坏,即应力满足关系式

$$\tau_8 = \frac{1}{3}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (1-6)$$

或以主应力表示,即

$$\tau_8 = \frac{1}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (1-7)$$

特别在纯剪切破坏条件, 有

$$\tau_8 = \frac{\sqrt{\sigma}}{3} \tau_{xy} = \frac{\sqrt{\sigma}}{3} \tau, \quad (1-8)$$

在单向拉压受力破坏条件下, 有

$$\tau_8 = \frac{\sqrt{2}}{3} R \quad (1-9)$$

于是按米赛斯强度理论, 材料的剪切破坏强度 τ_s 与拉压破坏强度 R 之间应有如下关系

$$\frac{\sqrt{6}}{3} \tau_s = \frac{\sqrt{2}}{3} R$$

即

$$\tau_s = \frac{\sqrt{3}}{3} R \quad (1-10)$$

3. 莫尔—库仑理论

莫尔—库仑理论最早由莫尔于 1900 年提出, 是目前岩土工程界应用最广泛的一种理论。该理论认为, 岩石试样内某一点的破坏主要决定于它的大主应力和小主应力, 中间主应力的影响可以忽略, 这样就可将问题简化为平面问题。又注意到, 当岩石试样内一点处某一截面上的剪应力达到极限值 τ_f 时, 材料就沿该截面发生滑动破坏。由于 τ_f 的大小与滑动破坏面上的正应力有关, 因此, 滑动破坏面上的极限剪应力 τ_f 可以表示为该截面上正应力 σ 的函数, 即

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1-11)$$

由实验求得试样在各种应力状态 (如设定不同大、小主应力比例) 下的极限值后, 就可在 σ — τ 平面上作出相应的极限应力圆, 即莫尔应力圆, 如图 1-1 (a) 所示, 然后作出这一系列极限应力圆的包络线, 这条包络线便代表了岩石的破坏条件或破坏强度条件。

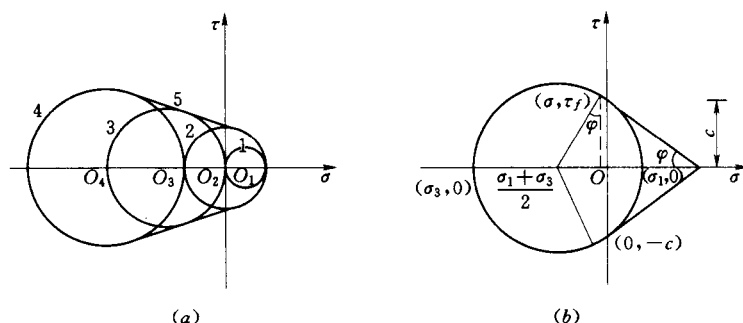


图 1-1 莫尔—库仑破坏强度条件

1—抗拉试验; 2—纯剪试验; 3—抗压试验; 4—三轴试验; 5—包络线

要通过试验来确定包络线线型及其数学表达式, 不是那么直观简单的。为了简化计算, 将莫尔应力圆包络线简化为直线 [图 1-1 (b)]。也就是说, 岩石材料的破坏条件与土力学

中所采用的相同,也可用库仑方程式表示^[4],即

$$\tau_f = c - \sigma \tan \varphi \quad (1-12)$$

式中: c 为岩石凝聚力; φ 为岩石内摩擦角。

从图 1-1 (b) 可得

$$\left. \begin{aligned} \tau_f &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos \varphi \\ \sigma &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

将式 (1-13) 代入式 (1-12), 化简后

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = c \cos \varphi - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \quad (1-14)$$

式 (1-12) 由库仑首先提出, 后为莫尔用应力圆理论重新加以解释。因此, 这一方程式也常称为莫尔—库仑破坏强度方程式或莫尔—库仑破坏强度条件。

常见岩石的抗压强度、抗拉强度与抗剪强度值变化范围见表 1-1。

(六) 岩石的渗透性

岩石为孔隙介质而具有渗透性。岩石孔隙分布通常是随机的, 可近似视作各向同性的多孔介质, 其渗流形态符合达西定律^[5], 即

$$v = -kJ \quad (1-15)$$

式中: v 为孔隙岩石中的渗透流速; k 为岩石渗透系数, 常见岩石的渗透系数变化范围见表 1-2; J 为水力坡降。

岩石的渗透系数均很小, 一般在 $10^{-6} \sim 10^{-11} \text{cm/s}$ 之间。工程应用中关注的是岩体渗透系数, 将在后面介绍。

表 1-2 岩石渗透系数变化范围

岩石名称	k (cm/s)	岩石名称	k (cm/s)
砂岩 (白垩系)	$10^{-8} \sim 10^{-10}$	石灰岩	$7 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-7}$
粉砂岩 (白垩系)	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	白云岩	$4.6 \times 10^{-9} \sim 1.2 \times 10^{-8}$
花岗岩	$5 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-10}$	砂岩	$1.6 \times 10^{-7} \sim 1.2 \times 10^{-6}$
蚀变花岗岩	$1.5 \times 10^{-5} \sim 0.6 \times 10^{-5}$	硬泥岩	$6 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$
板岩	$7 \times 10^{-11} \sim 1.6 \times 10^{-11}$	黑色片岩 (有裂缝)	$1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$
角砾岩	4.6×10^{-10}	细砂岩	$2 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$
方解石	$7 \times 10^{-10} \sim 9.3 \times 10^{-9}$	细粒砂岩	2×10^{-7}

二、岩体的力学特性

岩体是经受过变形、遭受过破坏的地质体的一部分, 岩体中节理、层面、断层等不连续结构面的存在, 是岩体与其他固体间的显著差异, 并形成岩体的构造特征。

岩体的力学特性主要表现在岩性、结构及其赋存环境条件 3 个方面, 其中起决定作用的是岩体内开裂的和易开裂的结构面, 被结构面切割成的岩块体称为结构体。结构面与结构体即为岩体结构二要素, 二要素间是相互匹配、相互依存的关系。结构面依其充填状况

及力学属性,一般可分为坚硬结构面(多为干净结构面,少数夹有坚硬碎屑物)、软弱结构面(夹有一定厚度的软弱物质)。结构面的力学属性不是孤立的,而是与其成因及其形成过程密切相关的^[2,6]。

(一) 结构面的类型及其综合影响

结构面按其成因可分为成岩结构面、接触结构面、构造结构面及次生结构面。

1. 成岩结构面

顾名思义,这类结构面是在成岩过程中形成的。如岩浆岩体冷却收缩时形成的节理面、沉积岩体内的层理面、变质岩体内的片理面。其特点是产状变化基本有规律,结构面出现的频率高且大体分布均匀。

2. 接触结构面

这类结构面分布在两类地层或岩层的交界面。如沉积岩与沉积岩(或与变质岩)之间的不整合面、沉积岩与岩浆岩之间的沉积接触面、第四纪松散沉积物与下伏基岩的接触面等。由于接触结构面往往代表地质上的一个沉积间断,由侵蚀、风化作用形成,是岩体的软弱带。

3. 构造结构面

这类结构面是在岩体形成后地壳运动过程中受构造应力作用所产生的破裂面或破碎带。如断层、层间错动、节理及劈理面等。节理一般出现频率较高,可视作“均布”于岩体中,断层只分布于见有断层通过的位置处,属“局部”现象。由于某些断层的规模较大或充填物软弱,其对岩体稳定性和透水性的影响往往是控制因素之一。

4. 次生结构面

这类结构面是在外营力(如地下水、风、卸荷)作用下产生的,其中卸荷裂隙(地表面厚岩层被剥蚀掉,新暴露于地表的岩层,因卸荷而产生平行于地面的裂隙)、斜坡裂隙(斜坡岩体受剪应力和张应力作用而产生的平行斜坡的裂隙)、风化裂隙、施工中的爆破松动裂隙均为常见次生结构面。次生结构面多为张性裂隙。

5. 结构面的综合影响^[7]

各种不同成因类型的结构面,最后总是综合地对岩体工程地质性质产生作用。结构面的综合影响主要决定于同级序结构面的发育程度和主要结构面的结合程度。当结构面组数为2~3组,平均间距不小于0.4m,结构面以节理、裂隙、层面为主,结构面间为钙质、铁质或泥质充填,岩体可归类为完整或较完整岩体;当结构面组数不小于3,主要结构面平均间距为0.4~0.2m,结构面以节理、裂隙、层面、小断层为主,结构面间为泥质或泥钙质充填,岩体可定性归类为较破碎岩体;当结构面组数不小于3,平均间距不大于0.2m,结构面间为泥质或岩屑充填,岩体呈裂隙块状或碎裂状结构,可归类为破碎岩体;当结构面呈无序分布,结构面间为泥质或泥夹岩屑充填,充填物厚度大于起伏差,岩体为散体状结构,可归类为极破碎岩体。

当软弱结构面形成不利于岩体稳定的组合时(有临空面,且有指向临空面的力),虽然岩体比较完整,但仍可能发生洞室围岩坍塌现象。

(二) 岩体的力学特性

1. 岩体的变形

岩体在受荷或开挖时由于受力条件或边界条件的改变,将产生变形。由于岩块的弹性模量很大,从而变形甚微,而岩体的结构面在同一压力作用下变形将是显著的。由于结构面对岩体变形的影响是主要的,且荷载卸除后变形不能完全恢复,存有永久变形(残余变形),因此,对于岩体不能只考虑其弹性性质,也就是说,只用弹性模量和泊松比等来表示岩体的变形性质是不够的。为了表征岩体的总变形(包括弹性变形与不可恢复的永久变形),常引入岩体变形模量,其值可由现场变形试验确定。试验方法有刻槽狭缝扁千斤顶法、环形水压加荷法、环形径向千斤顶法、钻孔膨胀计法以及声波或地震波物探测试法等。也可采用反演分析法确定变形模量等岩体力学参数。

在工程中,往往会遇到岩体内存在一组有规律的节理分布,这时,顺节理面与垂直节理面的变形模量明显不同,在力学上称为横观各向同性介质。选取空间右手直角坐标系 $oxyz$, x 轴垂直于节理面, y 轴和 z 轴在节理面内。由于平行节理面的各个方向具有相同的弹性,于是,可得物理方程

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_1} - \frac{\mu_2}{E_2}(\sigma_y + \sigma_z) \\ \epsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E_2} - \frac{\mu_2}{E_2}\sigma_z - \frac{\mu_1}{E_1}\sigma_x \\ \epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E_2} - \frac{\mu_1}{E_1}\sigma_x - \frac{\mu_2}{E_2}\sigma_y \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G_1} \\ \gamma_{yz} &= \frac{2(1 + \mu_2)}{E_2}\tau_{yz} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\tau_{xz}}{G_1} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

式(1-16)中含有5个独立的弹性常数。 E_1 、 μ_1 、 G_1 分别为垂直于节理面方向的岩体弹性模量、泊松比、剪切模量; E_2 、 μ_2 分别为平行于节理面的岩体弹性模量、泊松比。第一个脚标代表节理面法线方向,第二个脚标代表应力方向沿着哪一个坐标轴。正应力只有一个脚标,表明节理面法线方向与正应力方向相一致。

2. 岩体的破坏强度

(1) 岩体连续性条件。岩体与岩石不同。岩体是具有一定结构、赋存于一定的地质环境中的地质体。没有哪部分岩体是不受结构面切割的,但是,仍有相当一部分岩体由于成岩原因或人工改造而具有连续介质力学的基本属性,进而可采用数学力学分析工具进行研究。结合工程实践,连续介质岩体可包括^[2,8]:

1) 结构面不连续延展,无分离的结构体。

2) 结构面闭合,在摩擦作用下,在应力、变形传递、岩体破坏过程中结构面不起主导作用。

3) 在人工改造作用下(如固结灌浆、硅化固结),结构面被人工愈合,成为完整的结构岩体。

4) 采用价值工程理论, 合理选取岩体力学参数指标, 使之满足连续介质条件。如软弱夹层是岩体中的弱面, 其抗剪破坏强度远比岩体结构体抗剪破坏强度低, 这时可在满足使用功能的条件下, 综合确定岩体力学参数, 使之按连续介质理论进行计算分析, 能可靠保证工程安全。

为保证岩体在变形过程中连续, 不产生裂隙和不出现相对位置错动, 有如下连续性条件^[2]

$$\frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = 0 \quad (1-17)$$

$$\theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

式中: θ 为体积应变率。

对不可压缩的弹性岩体, 有 $\mu = \frac{1}{2}$ 。

对碎裂结构岩体转化为连续介质岩体的连续性条件为

$$\Delta w = w_1 - w_2 = \frac{\partial w}{\partial x} b \leq \frac{1}{K_s} (-\sigma_x \tan \varphi + c) \quad (1-18)$$

式中: w 为垂直方向 z 的变形; b 为直接压缩区岩体受力范围; K_s 为碎裂岩体剪切刚度; 其余符号见图 1-2。

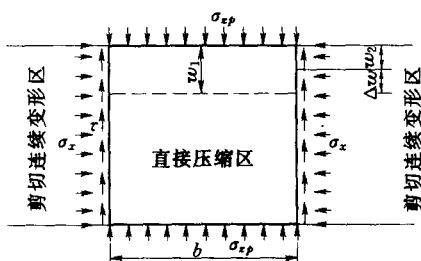


图 1-2 连续变形区破裂面处相邻结构体间变形图

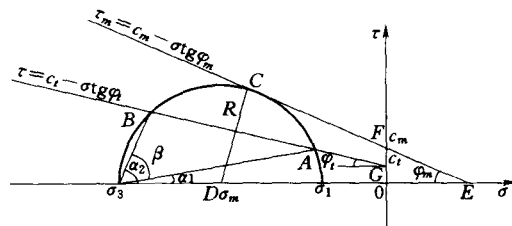


图 1-3 新破裂面形成条件

(2) 剪切破裂结构面形成条件。岩体结构面的抗剪强度远比岩体结构体的抗剪强度低, 那么, 在什么条件下岩体将产生新的破裂结构面呢?

如图 1-3 所示, 设岩块体抗剪强度为 τ_m , 结构面抗剪强度为 τ , 有

$$\tau_m = c_m - \sigma \tan \varphi_m \quad (1-19)$$

$$\tau = c_t - \sigma \tan \varphi_t \quad (1-20)$$

设 σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, 于是有

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (1-21)$$

$$R = |\overline{DC}| = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_1 - \sigma_m = c_m \cos \varphi_m - \sigma_m \sin \varphi_m \quad (1-22)$$

所以