

SHUIGONG YALI SUIDONG
BAXIA HANGUAN JIEGOU YINGLI JISUAN

水工压力隧洞



坝下涵管结构应力计算

蔡晓鸿 蔡勇斌 蔡勇平 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水工压力隧洞与 坝下涵管结构应力计算

蔡晓鸿 蔡勇斌 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设计思想及坝下涵管结构应力计算为主线,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及钢衬钢筋混凝土衬砌荷载条件。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。本书解决了具工程实际意义的坝下涵管纵向内力计算与纵向抗裂验算问题,给出了坝下涵管伸缩缝间距设计与坝下涵管横向抗裂验算解析计算式。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、公路、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

水工压力隧洞与坝下涵管结构应力计算 / 蔡晓鸿,
蔡勇斌,蔡勇平著. — 北京:中国水利水电出版社,
2013.4

ISBN 978-7-5170-0814-9

I. ①水… II. ①蔡… ②蔡… ③蔡… III. ①水工隧
洞—压力隧洞—水工结构—应力—计算②坝基—泄水涵管
—水工结构—应力—计算 IV. ①TV672

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第081814号

书 名	水工压力隧洞与坝下涵管结构应力计算
作 者	蔡晓鸿 蔡勇斌 蔡勇平 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.5印张 462千字
版 次	2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	62.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

蔡晓鸿教授级高级工程师在其已出版专著《水工压力隧洞结构应力计算》的基础上,对近十年来所获有关水工压力隧洞和坝下涵管结构应力计算方面的研究成果又作了系统梳理、总结和补充,并将书名更改为《水工压力隧洞与坝下涵管结构应力计算》。书稿已粗读一过,深感颇有新意与技术进取,是当今工程技术领域一本很具特色的学术专著。

蔡晓鸿教授级高级工程师从20世纪80年代开始,结合水工工程的实际问题孜孜不倦地长期致力于水工隧洞与坝下涵管结构应力解析计算方法的研究,作者凭借深厚的数学、力学功底,创新性地建立了水工压力隧洞结构应力有限环变位协调算法,进而将该方法应用于水工压力隧洞衬砌结构应力计算、压力隧洞围岩抗力系数计算、含水围岩衬砌隧洞流固耦合应力计算、压力隧洞温度应力计算、压力隧洞衬砌伸缩缝间距与裂缝开展宽度计算、灌浆式预应力衬砌应力计算、衬砌隧洞徐变应力计算、压力隧洞混凝土衬砌限裂设计计算等,取得了一系列非常可喜的成果;书中还深入剖析了以往莫尔—库仑屈服条件和双剪统一强度理论应用于水工压力隧洞弹塑性应力计算中的误区,列述了隧道工程外水压力折减系数取值应遵循的原则,指出了设集中排水隧洞的含水围岩与衬砌设计原则为外堵内导、限量排放,减小渗透压力与渗漏量;改正了B. Л. 伏尔可夫水工压力隧洞温度应力算法中的误漏;建立了隧洞衬砌伸缩缝间距设计与隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计计算的新方法。在国内外首次给出了受二向不等围岩压力和均匀内压力联合作用下的椭圆形洞室围岩任意点应力与位移的计算公式,以上成果也都十分难能可贵。

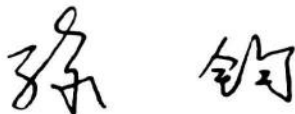
在研究解决水工压力隧洞结构应力计算诸多复杂课题与技术关键问题方面,本书已取得了上述极具特色的丰硕成果,而且还从理论与工程实践相结合的高度研究解决了坝下圆管、坝下箱涵纵向轴力计算与伸缩缝间距及轴向抗裂验算问题,在坝下圆管结构应力解析计算与环向抗裂验算以及坝下箱涵承受非均匀内水压力作用下的内力与变位解析计算等方面,也作出了很具工程实用价值的卓越贡献。

本书理论严谨,内容丰富,解析深入,应用广泛,富具工程特色与数学

力学上的妙美！本书的部分研究成果已成功地应用于我国第一条海底隧道“厦门市东通道海底隧道结构若干技术关键问题研究”与“龙源口水电站发电引水隧洞结构安全复核算”等大型项目和高压隧洞的工程实践，取得了重大的技术、经济效益。

本书系统地总结了作者在水工压力隧洞与坝下涵管结构应力解析计算方面所作的贡献。所取得的研究成果解决了水工压力隧洞、隧道工程与坝下涵管结构分析中若干长期困扰结构工程师们的诸多复杂技术问题，推进了水工压力隧洞、隧道工程与坝下涵管结构应力计算诸多理论难题的学术创新与技术进步，对地下工程与坝下涵管的设计施工以及今后进一步的深化探究具有指导意义。

我乐于写述了以上的一点文字，并喜见本书的付梓问世，是为序。



2012 年仲秋于沪滨同济园

孙钧：同济大学地下建筑与工程系资深名誉教授、名誉系主任，中国科学院技术科学部资深院士，前国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席，中国岩石力学与工程学会名誉理事长，中国土木工程学会副理事长、学会顾问。

前言

现代水工压力隧洞结构设计的理论基石是“岩承理论”，其核心内容是隧洞衬砌与围岩联合工作，共同承载，而工程应用的关键则是正确采用结构计算模型与应力分析计算参数与计算方法。

本书依据地下工程现代支护理论，视水工压力隧洞衬砌与围岩为整体结构，按照隧洞结构不同工况特性，采用与之相匹配的结构计算模型进行应力计算分析，在已出版并获江西省科技进步奖三等奖的专著《水工压力隧洞结构应力计算》基础上，将近10年所获理论与工程应用成果补充于内。增加的主要内容有：薄壁圆筒与厚壁圆筒分类、二向不等围岩压力和均匀内压力作用下椭圆形洞室应力与变位计算、考虑中间主应力影响的压力隧洞围岩抗力系数计算、考虑中间主应力影响隧洞含水围岩与衬砌流固耦合应力计算、隧洞采用钢衬钢筋混凝土衬砌荷载条件、隧洞衬砌纵向裂缝与抗裂设计、隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计断裂力学法的工程应用、坝下涵管内力计算与抗裂验算及伸缩缝间距设计等，上述内容丰富了水工压力隧洞结构应力计算这一复杂课题的学术创新与工程应用，解决了长期困扰水工结构工程师的坝下涵管纵向内力计算与抗裂验算及伸缩缝间距设计问题，建立并给出了圆形坝下涵管横向结构内力与变位计算及抗裂验算解析法，导出了非均匀内水压力作用下的坝下箱涵内力与变位解析计算式。

在笔者长期学术研究活动中，受益于中国科学院资深院士、教授孙钧先生，河海大学徐志英教授、沈家荫教授、卓家寿教授、殷宗泽教授、沈振中教授，同济大学侯学渊教授、杨林德教授，江西省水利厅总工程师张文捷教授级高级工程师、江凌教授级高级工程师，吉安市水利局原总工程师吕有年等专家学者；得到了涂忠仁博士、孙富学博士、荣耀博士、齐明山博士的热心相助；受到了江西省水利厅、吉安市水利局、吉安市水利水电规划设计院、吉安市农业综合开发办公室、吉荣实业工程公司领导的大力支持。在此一并

表示衷心的感谢!

专著《水工压力隧洞结构应力计算》承蒙孙钧先生作序,本书出版之际,先生又欣然应允题序,对学术著作的撰写出版极尽关爱与扶持,特此谨表诚挚的谢忱!

书中不足失当之处,恳请读者指正。

作 者

2012 年 10 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	26
第六节 厚壁圆筒弯矩计算及薄壁圆筒与厚壁圆筒分类	27
第二章 不衬砌水工压力隧洞围岩应力计算	32
第一节 承受均布压力厚壁圆筒问题	32
第二节 压力隧洞围岩孔口应力重分布	35
第三节 不衬砌压力隧洞围岩附加应力	38
第四节 围岩稳定性极限平衡分析	39
第五节 压力隧洞围岩最小覆盖厚度	45
第六节 二向不等围岩压力和均匀内压力作用下椭圆形洞室应力与位移计算	54
第三章 衬砌水工压力隧洞结构应力计算	69
第一节 概述	69
第二节 隧洞衬砌混凝土未开裂结构应力计算	69
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	75
第四节 混凝土破坏强度的 Kupfer 准则	81
第五节 衬砌混凝土开裂后隧洞结构应力计算	83
第六节 钢衬钢筋混凝土压力隧洞结构应力计算	88
第七节 二向不等压初始应力场内压力隧洞结构应力计算	95
第四章 压力隧洞围岩抗力系数计算	105
第一节 概述	105
第二节 围岩弹性抗力系数的计算式	105
第三节 有裂缝区围岩抗力系数的计算式	106

第四节	理想弹塑性围岩抗力系数的计算式	107
第五节	弹塑性强化围岩抗力系数的计算式	111
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	123
第七节	圆形压力隧洞围岩抗力系数的普遍计算式	130
第八节	抗力系数的应用	140
第九节	考虑中间主应力影响的压力隧洞围岩抗力系数通用计算式	143
第五章	含水围岩衬砌应力计算	148
第一节	渗流基本微分方程与单值性条件	148
第二节	隧洞衬砌与围岩渗透水压力分布规律	151
第三节	施工期隧洞含水围岩与衬砌应力计算	153
第四节	运行期隧洞含水围岩与衬砌应力计算	160
第五节	设集中排水隧洞含水围岩与衬砌应力计算	172
第六节	考虑中间主应力影响隧洞含水围岩与衬砌流固耦合应力计算	183
第六章	压力隧洞温度应力计算	193
第一节	热传导基本微分方程	193
第二节	温度场的边值条件	194
第三节	温度应力的基本关系式	195
第四节	压力隧洞弹性温度应力	199
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	212
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	218
第七节	关于压力隧洞自生温度应力的若干注记	223
第七章	灌浆式预应力衬砌计算	226
第一节	基本原理	226
第二节	灌浆式预应力衬砌的类型与技术特点	227
第三节	灌浆式预应力衬砌隧洞施工期应力计算	228
第四节	灌浆式预应力衬砌隧洞运行期应力计算	231
第五节	水泥压浆环干缩应力计算	236
第六节	混凝土衬砌的徐变应力计算	244
第八章	压力隧洞混凝土衬砌限裂设计	250
第一节	概述	250
第二节	钢筋混凝土衬砌的限裂设计	251
第三节	裂缝参数计算	262
第四节	开裂衬砌渗漏量计算	271
第五节	隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计断裂力学法的工程应用	272

第九章 坝下涵管内力计算与抗裂验算及伸缩缝间距设计.....	276
第一节 概述	276
第二节 圆形坝下涵管横向结构内力与变位计算及抗裂验算	276
第三节 非均匀内水压力作用下的坝下箱涵结构计算	283
第四节 圆形坝下涵管纵向拉力计算与抗裂验算及伸缩缝间距设计	293
第五节 坝下箱涵纵向拉力计算与抗裂验算及伸缩缝间距设计	296
参考文献	301

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力学基础知识去分析实际问题，深

刻认知结构特征,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。

第二节 岩体的力学特性

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 个条件中的任一个成立时，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

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

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 $\sigma-\tau$ 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。

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

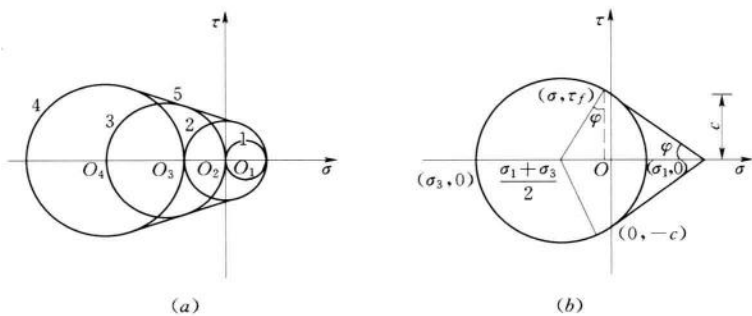


图 1-1 莫尔—库仑破坏强度条件

1—抗拉试验；2—纯剪试验；3—抗压试验；4—三轴试验；5—包络线

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

(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

$$v = -k J$$

(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

岩体是经受变形、遭受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组，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组，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。