

YANTU GONGCHENG

岩土工程

Yantu Gongcheng

主 编 翟聚云
副主编 黄 伟 雷颖占

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

岩土工程

主 编 翟聚云

副主编 黄 伟 雷颖占

参 编 白 哲 郝延周 宋锦虎

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了岩土工程的基本知识,岩土工程勘察、设计和施工的基本理论和方法。主要包括:岩土体的工程设计参数及工程分类;岩土工程勘察的基本任务、程序和主要工作;地下水的影响及工程降水设计与施工;特殊土地基及软弱地基处理理论和方法;锚杆和抗滑桩的设计理论、深基坑支护及岩土体边坡工程;滑坡的稳定和防治;地下硐室工程围岩压力的计算及硐室支护措施;岩土工程防护技术;岩土工程爆破设计、计算与施工;岩土工程原位测试和监测方法;土工聚合物的设计与施工等。本书为普通高等学校土木工程、地下工程、交通工程等专业本科生的专业教学用书,也可供相关专业教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程 / 翟聚云主编. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014. 8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2463 - 7

I. ①岩… II. ①翟… III. ①岩土工程—高等学校—教材 IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 198207 号

书 名 岩土工程
主 编 翟聚云
责任编辑 杨 洋 潘俊成
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 18.5 字数 460 千字
版次印次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

岩土工程是多门学科交叉的边缘学科,在公路、铁路、桥梁、隧道、堤坝、机场、工业与民用建筑等领域广泛应用。在土力学、基础工程和工程地质等先修课程基础上,学生通过本课程的学习,对岩土工程的基本知识、理论和方法有全面、系统和深入的了解,使之具有解决岩土工程实际问题的能力,能从事岩土工程的勘察、设计和施工,并具有一定的研究和开发能力。

本书共分为 11 章,主要内容包括:岩土体的特性、岩土工程勘察、工程降水等理论知识;特殊土地基处理、深基坑支护、岩土体边坡工程、滑坡、地下硐室工程、岩土工程防护技术、岩土工程爆破、岩土工程原位测试和监测、土工聚合物等工程应用。

本书由河南城建学院教师编写,由翟聚云任主编,黄伟、雷颖占任副主编,白哲、郝延周、宋锦虎参编。第 1、5 章由翟聚云编写;第 4 章由雷颖占编写;第 6、9 章由黄伟编写;第 3、7 章由白哲编写;第 8、10 章由郝延周编写;第 2、11 章由宋锦虎编写。

限于作者水平,书中如有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2013 年 12 月

目 录

第 1 章 岩土体的工程特性	1
1.1 工程土体主要设计参数	1
1.2 工程岩体主要设计参数	5
1.3 岩体的原始地应力测定	12
1.4 土的工程分类	19
1.5 岩体工程分类	24
章后小结	29
复习思考题	30
第 2 章 岩土工程勘察	31
2.1 岩土工程勘察的基本任务	31
2.2 岩土工程勘察的程序	31
2.3 岩土工程勘察分级	32
2.4 岩土工程勘察的主要工作	34
章后小结	37
复习思考题	37
第 3 章 工程降水	39
3.1 地下水的不良作用及防止措施	39
3.2 降低地下水的方法	44
3.3 工程降水设计计算	54
3.4 工程降水施工	60
3.5 工程降水对环境影响及其防范措施	67
章后小结	70
复习思考题	71
第 4 章 特殊土地基及软弱地基处理	72
4.1 特殊土地基	72
4.2 软弱地基处理	88
章后小结	102
复习思考题	102

第 5 章 岩土边坡工程	103
5.1 锚杆	103
5.2 抗滑桩	109
5.3 深基坑工程	113
5.4 挡土结构	138
5.5 岩石边坡工程	145
章后小结.....	148
复习思考题.....	149
第 6 章 滑坡	150
6.1 滑坡及其危害	150
6.2 滑坡的勘测	153
6.3 滑坡类型和稳定性分析	158
6.4 滑坡的治理	163
6.5 滑坡的监测与预报	167
章后小结.....	170
复习思考题.....	170
第 7 章 地下硐室工程	172
7.1 硐室的类型和位置选择	172
7.2 围岩压力	174
7.3 地下结构的计算模型	185
7.4 地下硐室支护措施	188
7.5 地下硐室岩爆特征及成因	193
章后小结.....	195
复习思考题.....	196
第 8 章 岩土工程防护技术	197
8.1 岩石边坡的防护	197
8.2 土质边坡防护	210
章后小结.....	213
复习思考题.....	213
第 9 章 岩土工程爆破	214
9.1 爆破作用原理	214
9.2 岩土爆破工程的分类	220
9.3 岩土爆破工程的参数设计与计算	226
9.4 爆破器材与起爆方法	231
9.5 岩土爆破工程施工与安全	240

章后小结·····	250
复习思考题·····	250
第 10 章 岩土工程原位测试与监测 ·····	251
10.1 载荷试验·····	251
10.2 静力触探试验·····	257
10.3 动力触探试验·····	263
10.4 十字板剪切试验·····	269
10.5 岩土工程监测内容与监测方法·····	272
章后小结·····	275
复习思考题·····	275
第 11 章 土工聚合物 ·····	276
11.1 土工聚合物的特点和类型·····	276
11.2 土工聚合物在岩土工程中的应用·····	278
11.3 土工聚合物在岩土工程应用的设计·····	279
11.4 岩土工程中土工聚合物的施工·····	280
章后小结·····	281
复习思考题·····	282
参考文献 ·····	283

第1章 岩土体的工程特性

教学提示:岩土体的工程研究,首先必须从正确认识其工程参数开始。本章分别对土体和岩体的工程参数和原始地应力讲述其特性,并分别对土体和岩体的分类进行阐述,为正确处理岩土体工程问题打下基础。

学习要求:掌握岩土体的工程参数;熟悉地应力的测定方法;了解岩土体的工程分类。

1.1 工程土体主要设计参数

1.1.1 土体的强度参数

土体的强度是指土的抗剪强度,土的抗剪强度参数包括黏聚力 C 和内摩擦角 φ ,则土的抗剪强度可用库仑定律表示:

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad (1-1)$$

式中 σ ——某截面上的正应力, kPa;

τ_f ——该截面上的抗剪强度, kPa。

在相同压应力作用下,土体沿正负剪应力方向的抗剪强度是相等的,所以在 $\tau_f - \sigma$ 坐标系里,土的抗剪强度线有两条,对称的分布在横坐标的上下两边,方程分别为: $\tau_f = \pm (C + \sigma \tan \varphi)$ 。为了方便,在不影响分析结果的情况下,常常用一条线去分析。

土的抗剪强度参数是进行地基承载力计算、边坡稳定分析、挡土结构上土压力的计算、基坑支护设计、地基稳定评价中的重要因素。此参数可用直剪实验和三轴剪切实验等得到,在三轴实验中可分为不固结不排水(UU)、固结不排水(CU)、固结排水(CD)3种情况。

土的抗剪强度参数有总应力(孔隙水压力 and 有效应力之和)状态和有效应力状态两种情况,孔隙水压力对抗剪强度没有贡献,土的抗剪强度是指有效应力状态下的抗剪强度。工程中常对孔隙水压力的大小难以把握,常根据实际情况和土体的排水条件确定采用 (C_{uu}, φ_{uu}) 、 (C_{cu}, φ_{cu}) 或 (C_{cd}, φ_{cd}) 。例如,在验算地下水以下黏性土挖方边坡施工时,采用 (C_{uu}, φ_{uu}) 实验结果;验算建筑物地基长期稳定,采用 (C_{cd}, φ_{cd}) 实验结果;验算大坝坝身长期运行条件下水位骤降时的稳定性,采用 (C_{cd}, φ_{cu}) 实验结果。

判断某点指定倾斜方向截面是否达到抗剪破坏,将该截面的剪应力与该截面的抗剪强度对比,如果剪应力比抗剪强度大就稳定,如果抗剪强度比剪应力大就破坏。也可以用几何法判断,在坐标系 $\tau - \sigma$ 中,看某截面的应力的坐标 (τ, σ) 在坐标系中的位置,如果该点在抗剪强度曲线 $\tau_f = C + \sigma \tan \varphi$ 上方则已达破坏;如果该点在直线上,则处于临界状态;如果该点在直线下方,则没有达到破坏。

判断土体中的指定某位置的稳定状态,需要将该位置的各个方向截面的剪应力与该方

向的抗剪强度进行比较,该位置各个方向截面的应力状态可用莫尔圆圆周上的点的坐标表示,则将莫尔圆与抗剪强度曲线 $\tau_f = C + \sigma \tan \varphi$ 放在一个坐标系,看位置关系,如果莫尔圆与直线相切,莫尔圆切点方向的截面达到了临界状态,虽然其他方向没有达到极限抗剪强度,但指定某位置是处于临界状态;如果莫尔圆与直线相割,莫尔圆割线以上方向的截面处于已破坏状态,虽然割线以下方向没有达到极限抗剪强度,但指定位置已处于破坏状态;如果莫尔圆与直线相离,莫尔圆上所有点都在抗剪强度下方,莫尔圆上各个方向的截面都处于稳定状态,则指定位置处于稳定状态。

【例 1-1】 地基中某单元土体上的大主应力 $\sigma_1 = 420 \text{ kPa}$,小主应力 $\sigma_3 = 180 \text{ kPa}$ 。通过实验测得土的抗剪强度参数 $C = 18 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$ 。问:① 该单元土体处于何种状态? ② 是否沿剪应力最大的方向破坏?

【解】 ① 抗剪强度直线方程为: $\tau_f = \sigma \sin 20^\circ + 18 = 0.36\sigma + 18$ 将摩尔圆与抗剪强度线画在一个坐标系内,如图 1-1 所示圆心坐标为 $(300, 0)$,圆心到直线的距离为:

$$d = \frac{0.36 \times 300 + 18}{\sqrt{0.36^2 + 1^2}} = \frac{126}{1.06} = 118.87$$

小于莫尔圆的半径 150,所以圆与直线相割,该单元土体处于已破坏状态。

② 剪应力最大的截面上应力大小为: $\sigma = 300 \text{ kPa}$ 时,

$$\tau_{\max} = \frac{420 - 180}{2} = 120 \text{ kPa}。$$

抗剪强度大小为:

$$\tau_f = \sigma \tan 20^\circ + 18 = 300 \times 0.36 + 18 = 126 \text{ kPa}$$

所以不会沿该截面方向破坏。

土的抗剪强度参数不仅随剪切条件的不同而不同,而且还受土的各向异性、应力历史、蠕变、温度等因素的影响,实际工程问题的情况千差万别。即使同一种土样,其强度指标大小与实验方法和实验条件也有关系。

1.1.2 土体的压缩性参数

在荷载作用下,建筑物的总沉降由 3 部分组成:瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降。对于一般工程,常用室内侧限压缩实验得到的指标来计算。

1.1.2.1 压缩曲线和压缩性指标

压缩实验得到的结果绘制的曲线有关于孔隙比 e 和压力 p 曲线的 $e-p$ 曲线和 $e-\lg p$ 曲线,都称为压缩曲线,如图 1-2 所示。

对于 $e-p$ 曲线上两点 (p_1, e_1) 和 (p_2, e_2) ,压缩系数为:

$$a = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \quad (1-2)$$

对于不同区段, a 的取值不是相等的。工程实际中, p_1 取上覆土层自重; p_2 取上覆土层自重 p_1 和建筑物产生的附加压力之和 Δp 。作为评价土的压缩性指标,规定 $p_1 = 100 \text{ kPa}$, $p_2 = 200 \text{ kPa}$ 时的压缩系数 a_{1-2} 作为评价土体压缩性高低的指标。

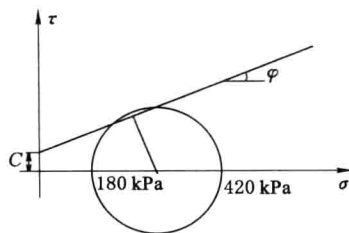


图 1-1 例 1-1 图

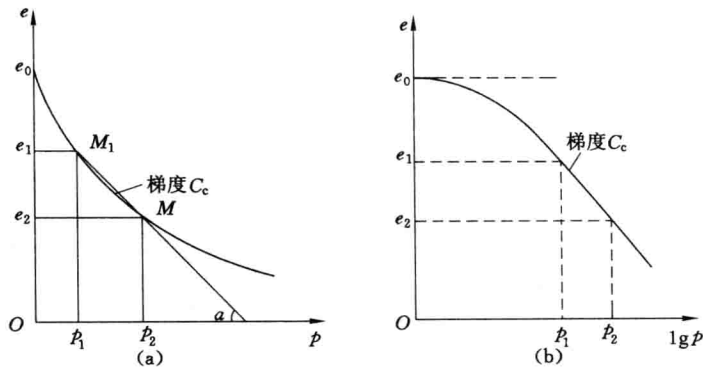


图 1-2 压缩曲线

(a) $e-p$ 曲线确定压缩系数 a ; (b) $e-\lg p$ 曲线确定压缩指数 C_c

$a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$, 为低压缩性土; $0.1 \text{ MPa}^{-1} \leq a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 为中等压缩性土; $a_{1-2} \geq 0.5 \text{ MPa}^{-1}$, 为高压缩性土。

对于正常固结土, $e-\lg p$ 曲线为一直线, 压缩指数为:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\lg p_2 - \lg p_1} \quad (1-3)$$

在沉降计算中, 常用指标压缩模量 E_s , 压缩模量 E_s 为完全侧限条件下土的竖向压缩应力 σ_z 与竖向应变 ϵ_z 之比。

$$E_s = \frac{\sigma_z}{\epsilon_z} \quad (1-4)$$

根据压缩系数的定义, 可得压缩模量的换算式: $E_s = \frac{1+e_1}{a}$ 。

1.1.2.2 回弹指数 C_s

压缩实验中, 在某压力下 p_i 下卸荷, 回弹至 p_{i+1} , 然后再加载压缩, 可得土的回弹再压缩曲线, 如图 1-3 所示, 试验表明, 不同压力下卸载回弹再压缩曲线的平均梯度基本一致, 回弹指数 C_s 为:

$$C_s = \frac{e_i - e_{i+1}}{\lg p_{i+1} - \lg p_i} \quad (1-5)$$

该指标在预测土体的回弹量时使用。

1.1.2.3 固结系数 C_v

固结系数 C_v 是表征土体固结速率的一个特征系数, 其表达式为:

$$C_v = \frac{k(1+e)}{\alpha \gamma_w} \quad (1-6)$$

式中 k ——土的渗透系数, cm/s ;

γ_w ——水的重度, kN/m^3 ;

α ——土的压缩系数, kPa^{-1} 。

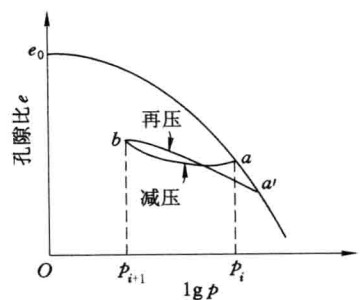


图 1-3 回弹再压缩曲线

C_v 的单位一般为 cm^2/s ,土的渗透系数越小, C_v 值越小。该指标可根据压缩实验结果推算,常用的方法有时间对数法和时间平方根法。

1.1.2.4 次固结系数 C_a

实验表明,次固结变形与时间在半对数坐标坐标上接近一条直线,该直线的斜率称为次固结系数,用 C_a 来表示,如图 1-4 所示。

$$C_a = \frac{e_1 - e_2}{\lg t_2 - \lg t_1} \tag{1-7}$$

对于可塑性较大的软弱土以及淤泥及有机土,次固结在总沉降中占的比例较大。

次固结系数也可用经验公式进行估算:

$$C_a = 0.018\omega_0$$

式中 ω_0 ——土的天然含水量,以小数计。

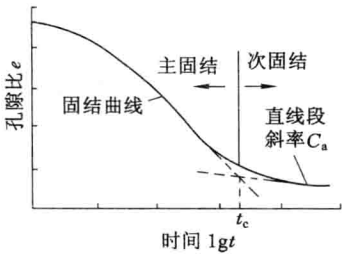


图 1-4 固结曲线

1.1.3 土体的渗透性参数

土的渗透性是指土体的透水性能,是决定地基沉降与时间关系的关键因素。常用的参数是渗透系数 k 。可通过室内渗透实验、现场抽水或注水实验来测试。

表 1-1 列出了各类土的渗透系数的大致范围。

表 1-1 土的渗透系数范围

土的类型	渗透系数 $k/(\text{cm/s})$
砾石、粗砂	$a \times 10^{-1} \sim a \times 10^{-2}$
中砂	$a \times 10^{-2} \sim a \times 10^{-3}$
细砂、粉砂	$a \times 10^{-3} \sim a \times 10^{-4}$
粉土	$a \times 10^{-4} \sim a \times 10^{-6}$
粉质黏土	$a \times 10^{-6} \sim a \times 10^{-7}$
黏土	$a \times 10^{-7} \sim a \times 10^{-10}$

1.1.4 影响土的工程性质的主要因素

土体可作为建筑物(构筑物)的地基、边坡和隧道的组成材料、结构和赋存环境。土体是与工程建筑的稳定、变形有关的土层的组合体。影响土的工程性质的因素主要有:

(1) 土的矿物成分

土的矿物成分是组成土的材料,尤其对于细粒土体,对其工程地质性质起控制作用的是黏土矿物和可溶盐、有机质等的类型和含量以及微结构特征。可溶盐对土的工程性质影响的实质是:溶解后使土的粒间连接减弱,增大土的孔隙性,降低土的强度和稳定性,增大其压缩性。

(2) 土的粒度组成和密实度

土中固体颗粒的大小和级配情况直接影响土的强度、压缩性和渗透性。特别对于无黏

性土,固体颗粒的形状、颗粒级配直接影响土体的强度。土体越密实,其抗剪强度越高、渗透性越低、压缩性越低。

(3) 黏性土的稠度

稠度是指黏性土的软硬程度。用液性指数来表示,稠度状态可分为流体状、塑体状和固体状。土的液性指数越大,土体越软,越接近于流动状态;液性指数越小,土体越硬。直接影响土的抗剪强度和压缩性能。

(4) 黏性土的结构性

天然状态下的黏性土,由于地质历史作用常具有一定的结构性。当土体受到外力扰动作用,其结构遭受破坏时,土的强度降低,压缩性增高。工程上常用灵敏度来衡量黏性土结构性对强度的影响。土的灵敏度越高,其结构性越强,受扰动后土的强度降低就越明显。

(5) 应力历史

土体在历史上曾受过的应力状态,指土层在地质历史发展过程中所形成的先期应力状态以及这个状态对土层强度与变形的影响。这个曾经承受过的最大固结压力,称为先期固结压力。超固结土和正常固结土的工程性质相比,孔隙性、密实度和抗剪强度以及所受应力状态等有差异。

1.2 工程岩体主要设计参数

岩石是由矿物或碎屑按照一定规律聚集而成的自然体,是不包含显著弱面的岩石块体,通常把它作为连续介质及均质体来看待。岩体是工程作用范围内具有一定的岩石成分、结构特征及赋存于某种地质环境中的地质体。岩石与天然岩体有显著不同,主要表现在:① 岩体赋存于一定地质环境之中,地应力、地温、地下水等因素对其物理力学性质有很大影响,而岩石试件只是为实验室实验而加工的岩块,已完全脱离了原有的地质环境。② 岩体在自然状态下经历了漫长的地质作用过程,其中存在着各种地质构造和弱面,如不整合、褶皱、断层、节理、裂隙等。岩体是在内部的黏结力较弱的地质构造和弱面切割下,具有明显的不连续性,使岩体强度远远低于岩石强度,岩体变形远远大于岩石本身,岩体的渗透性远远大于岩石的渗透性。

岩石常用均匀、连续、各向同性模型来研究。岩体因为结构面的存在,力学特征表现为:① 不连续;② 各向异性;③ 不均匀性;④ 岩块单元的可移动性;⑤ 地质因子特性(水、气、热、初应力)。

岩土体绝大多数是承受压应力,对岩土体进行力学分析时常对其应力的符号作如下规定:正应力以压应力为正,拉应力为负;剪应力以使单元体逆时针转为正,顺时针为负;夹角从起始截面法线起转到终止截面的法线,逆时针方向转动角度为正,反之则为负。

岩体的强度分析,要同时考虑岩石和结构面的特性,结构面的方位及该方向的应力大小非常关键,本书从一点的应力状态、岩石的强度、岩体的强度来讨论。

1.2.1 一点的应力状态

一点的应力状态是过该点随截面方位改变而变化的应力总体。讨论一点截面方位改变引起的应力变化趋势叫应力状态分析。

忽略中间主应力 σ_2 的影响,作为平面应力来讨论。如果用主应力来表示过某点的单元体,大小主应力分别为 σ_1, σ_3 。

如图 1-5,根据力的平衡条件,得到与大主应力作用面夹角为 α 的截面上的正应力 σ_α 、 τ_α 表达式为:

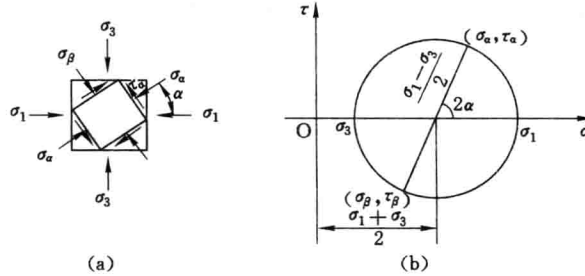


图 1-5 一点应力状态

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

得到点 $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ 的轨迹是一个圆,叫做莫尔圆,方程为 $(\sigma_\alpha - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2})^2 + \tau_\alpha^2 = (\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2})^2$, 该圆圆心坐标为 $(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, 0)$, 半径为 $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 。

与大主应力作用面夹角为 α 的截面上的应力 $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ 可从莫尔圆圆周上点坐标大小得到,该点为以莫尔圆圆心为圆心,以横坐标轴的正方向为始点,逆时针转 2α 的射线与圆周的交点。

1.2.2 岩石的抗剪强度参数

岩石的强度参数包括岩石的抗剪强度、抗拉强度、抗压强度参数。岩石的破坏机理有:
① 断裂破坏:单轴拉断、劈裂(由拉应力、拉应变引起);② 剪切破坏:塑性流动、剪断(由剪应力引起)。

最大正应变理论认为物体发生破坏的原因是最大延伸应变达到了一定的极限应变,如脆性岩石的单轴压缩破坏;最大拉应力理论认为岩石破坏的原因是危险点的最大拉应力达到了共同的极限值,如脆性岩石的单轴拉伸破坏;应变能理论适用于以延性为主的岩石;莫尔强度理论认为岩石材料属压剪破坏,破坏面上的剪应力超过了该面上的抗剪强度;格里菲斯理论适用于脆性岩石,认为岩石内部的应力状态使其产生裂纹的扩展、连接、贯通等,最终引起破坏。各种强度理论都有一定的适用范围,破坏判据的建立与采用,要反映岩石的破坏机制。

莫尔强度理论是岩体破坏常用的理论,该强度曲线为一系列极限莫尔圆的包络线,莫尔圆与强度曲线相切,由试验拟合获得。剪切强度与剪切面上正应力的函数形式有多种型式,如直线型、二次抛物线型、双曲线型等。当应力范围较小时,可近似用直线表示,抗剪强度用库仑定律表示:

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi \quad (1-8)$$

式中 σ ——岩石某截面上的正应力, kPa;

τ_f ——岩石该截面上的抗剪强度, kPa;

C ——岩石的黏聚力, kPa;

φ ——岩石的内摩擦角, ($^{\circ}$)。

在 τ_f — σ 坐标系里, 土的抗剪强度线有两条, 对称的分布在横坐标的上下两边, 方程分别为: $\tau_f = \pm(C + \sigma \tan \varphi)$ 。

岩石的黏聚力 C 和内摩擦角 φ 为岩石的抗剪强度参数。根据岩石应力状态的莫尔圆与抗剪强度曲线的关系, 可以判断岩石的稳定状态。如果莫尔圆与直线相切, 岩石处于临界状态; 如果莫尔圆与直线相割, 岩石处于已破坏状态; 如果莫尔圆与直线相离, 岩石处于稳定状态。

莫尔圆与直线相切的位置非常关键, 如图 1-6 所示。

由式(1-8)可知, 剪切强度取决于剪切面上的正应力和岩石的性质, 是剪切面上正应力的函数。由图 1-6 可知, 剪切强度是关于正应力轴对称的两条曲线, 破裂面有两簇, 节理破坏面呈 X 形成对成簇出现。破裂面方向与大主应力作用面成 $\pm(45^{\circ} + \frac{\varphi}{2})$ 。

由图 1-6 的直角三角形可得:

$$\sin \varphi = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{C \cdot \cot \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}} \quad (1-9)$$

将式(1-9)转换得到:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2C \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1-10)$$

由此可知, 三轴实验中极限状态下的轴压与围压成直线关系, 如图 1-7 所示。

直线与横坐标的交点坐标为岩石的抗拉强度 σ_t , 直线与纵坐标的交点坐标为岩石的单轴抗压强度 σ_c 。

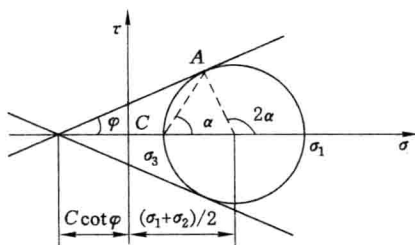


图 1-6 极限状态下莫尔圆与抗剪强度曲线

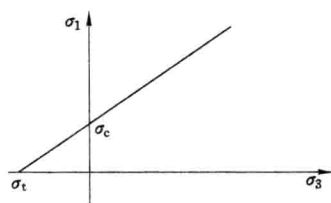


图 1-7 极限状态下围压与轴压的关系

1.2.3 结构面的抗剪强度参数

岩体是在内部被联结力较弱的地质构造和弱面切割, 具有明显的不连续性, 因此岩体强度远远低于岩石强度, 岩体变形远远大于岩石本身。

岩体内所有不连续面称为结构面。结构面的抗剪强度用库仑定律表示：

$$\tau_f = C_j + \sigma \tan \varphi_j \quad (1-11)$$

式中 σ ——结构面上的正应力, kPa;

τ_f ——结构面上的抗剪强度, kPa;

C_j ——结构面的黏聚力, kPa;

φ_j ——结构面的内摩擦角, ($^\circ$)。

在 τ_f — σ 坐标系里, 土的抗剪强度线有两条, 对称的分布在横坐标的上下两边, 方程分别为: $\tau_f = \pm (C_j + \sigma \tan \varphi_j)$ 。以第一象限为例, 进行讨论, 第四象限情况时, 方法类似。

结构面的黏聚力 C_j 和内摩擦角 φ_j 为结构面的抗剪强度参数。影响结构面的抗剪强度参数主要有作用在结构面上的应力大小、结构面内充水程度、无充填接触面的粗糙程度、有充填结构面充填物的物质成分、结构及充填程度和厚度等。结构面的抗剪强度参数比岩石的抗剪强度参数低得多。

判断结构面稳定性, 要比较结构面上的剪应力与结构面的抗剪强度的大小, 当结构面稳定或处于极限平衡时 $\tau \leq \tau_f$ 。结构面是一个确定方向, 在莫尔圆圆周上是一个点, 所以稳定问题是该点与直线的位置关系问题。

如图 1-8 所示, 结构面 m — m 的倾角为 β , 结构面上的应力大小为:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\beta = \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_3 \sin^2 \beta \quad (1-12)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (1-13)$$

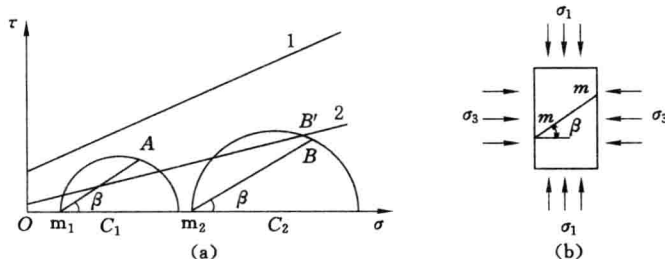


图 1-8 结构面的抗剪强度与应力状态

图 1-8 中线 1 为岩石固体的抗剪强度曲线, 线 2 为结构面的抗剪强度曲线。 m_1, m_2 为不同应力状态的莫尔圆。莫尔圆 m_2 时, 代表结构面上应力大小的点 B 在曲线 2 下方, $\tau < \tau_f$, 结构面稳定; 莫尔圆 m_1 时, 代表结构面上应力大小的点 A 在曲线 2 上方, $\tau > \tau_f$, 岩体沿结构面滑动, 一般情况下直线与莫尔圆是相割的关系, 但即使相割也不一定破坏, 如莫尔圆 m_2 。

将式(1-11)、式(1-12)和式(1-13)代入结构面稳定的条件 $\tau < \tau_f = C_j + \sigma \tan \varphi_j$, 得:

$$\sigma_1 \cos \beta \sin(\varphi_j - \beta) + \sigma_3 \sin \beta \cos(\varphi_j - \beta) + c_j \cos \varphi_j > 0 \quad (1-14)$$

当处于极限状态时, 满足结构面抗剪强度曲线与莫尔圆交点为其结构面方向, 该点的剪应力刚好与结构面的抗剪强度相等, 如图 1-9 中的 A 和 B 。

当代表结构面应力大小的点落在 AB 弧线以外, 如 D 点, 则结构面稳定; 代表结构面应力大小的点落在 AB 弧线以内, 如 E 点, 则结构面滑动, 当代表结构面应力大小的点与 A 或 B 重合, 则结构面处于极限状态。

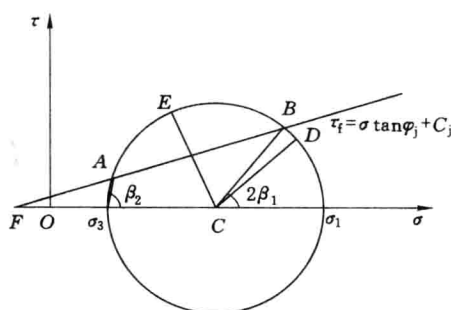


图 1-9 结构面抗剪强度

根据三角形 FBC 的正弦定理得到处于极限状态的结构面方向 β_1 、 β_2 与应力大小的关系式:

$$2\beta_1 = \varphi_j + \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + C_j \cos \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_2} \right] \quad (1-15)$$

$$2\beta_2 = \pi + \varphi_j - \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + C_j \cos \varphi_j) \sin \varphi_j}{\sigma_1 - \sigma_2} \right] \quad (1-16)$$

1.2.4 岩体的强度

岩体的强度要考虑结构面和岩石的强度,结构面产状的是主要影响因素,随着结构面产状的变化,岩体的破坏方式如图 1-10 所示。

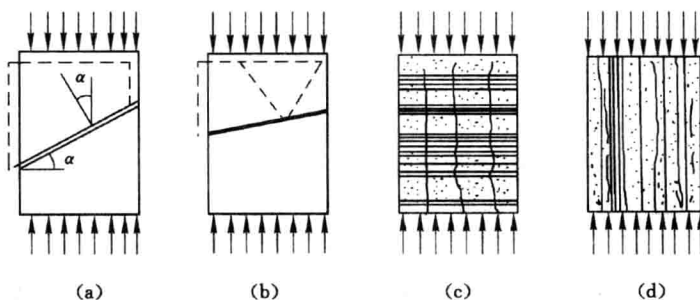


图 1-10 结构面方向对破坏方式的影响

试件(a)为沿结构面的滑动;试件(b)为部分穿切岩石材料,部分沿结构面滑动;试件(c)为产生新的张裂隙面而破坏;试件(d)为结构面张开。因此,对于同一岩体,如果不分析结构面的产状、受力方向以及破坏机制等因素,而采用同一破坏准则来处理问题,必然会导致错误的结论。

分析岩体是否发生剪切破坏,有三种情况:

- ① 结构面抗剪强度与莫尔圆相离,如图 1-11 所示,无论 β 多大,岩体都不破坏。
- ② 岩石抗剪强度与莫尔圆相离,结构面抗剪强度与莫尔圆相交,如图 1-12 所示。当 $\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ 时,沿结构面破坏;当 $\beta < \beta_1$ 或 $\beta > \beta_2$ 时,既不沿结构面破坏,也不沿岩石破坏。

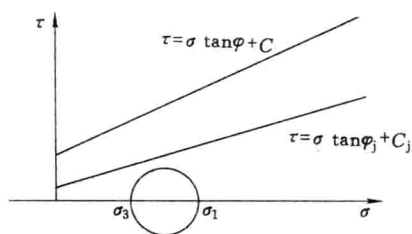


图 1-11 结构面抗剪强度与莫尔圆相离

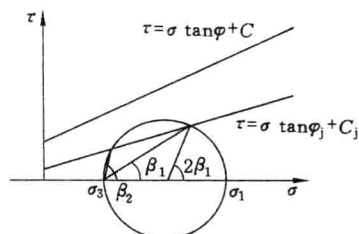


图 1-12 岩石抗剪强度与莫尔圆相离

③ 莫尔圆与岩石、结构面抗剪强度都相交,如图 1-13 所示。当 $\beta < \beta_1$ 或 $\beta > \beta_2$ 时,岩石剪切破坏。当 $\beta = \beta_1$ 或 $\beta = \beta_2$ 时,沿结构面与岩石同时破坏。

1.2.5 岩体其他设计参数

1.2.5.1 岩石与岩体单轴抗压强度

岩石试件在单轴压力作用下所能承受的最大压力叫岩石单轴抗压强度,可利用标准试件在室内测定。

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1-17)$$

式中 P ——达到破坏时的最大轴向压力,kPa;

A ——试件的横截面积, m^2 。

岩体单轴抗压强度可通过现场测定,也可采用经验估算法得到。岩石试件的强度 σ_c 大于岩体的强度 R_c ,经验估算法是用简单的试验指标来修正岩块强度的估算值。

$$R_c = \beta \sigma_c \quad (1-18)$$

式中 β ——岩体完整性系数。

$$\beta = \left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}} \right)^2 \quad (1-19)$$

式中 v_{pm} ——岩体中弹性纵波传播速度,m/s;

v_{pr} ——岩石弹性纵波传播速度,m/s。

1.2.5.2 岩石三轴抗压强度

岩石试件在围压作用下所能承受的最大轴向压力叫岩石三轴抗压强度。室内一般采用常规三轴压缩试验,其在低围压下,受围压和轴压关系是线性的,如图 1-14。岩石三轴压缩试验常用来测定岩石抗剪强度参数,所以又叫三轴剪切试验。

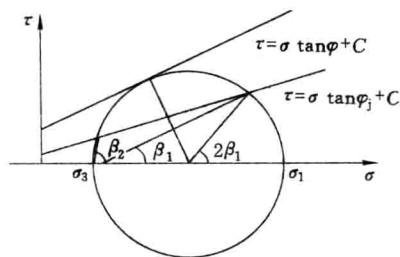


图 1-13 莫尔圆与岩石、
结构面抗剪强度都相交

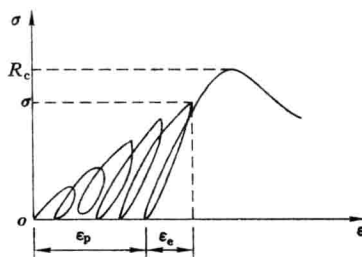


图 1-14 岩体的变形