

岩土工程

强度与稳定计算及工程应用

STRENGTH AND STABILITY ANALYSIS
AND ITS APPLICATION IN GEOTECHNICAL
ENGINEERING

张强勇 著

中国建筑工业出版社

岩土工程强度 与稳定计算及工程应用

STRENGTH AND STABILITY ANALYSIS AND
ITS APPLICATION IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

张强勇 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程强度与稳定计算及工程应用/张强勇著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07388-X

I. 岩... II. 张... III. ①岩土强度—稳定计算
②岩土工程—应用 IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 041790 号

岩土工程强度与稳定计算及工程应用

STRENGTH AND STABILITY ANALYSIS AND
ITS APPLICATION IN GEOTECHNICAL ENGINEERING

张强勇 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京富生印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 6 $\frac{3}{4}$ 字数: 180 千字

2005 年 6 月第一版 2005 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-112-07388-X
(13342)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书从理论与工程实践的角度出发，较为全面、系统地介绍了岩土工程强度与稳定计算的一些新理论、新方法及其在实际工程中的具体应用。内容主要包括岩土介质的基本物理力学特性、脆性岩体的断裂破坏强度计算理论及在边坡支护工程中的应用、岩土锚固计算理论及在地质灾害治理工程中的应用、地下洞室围岩稳定分析的计算方法及在隧道工程中的应用、岩土边坡与重力坝坝基的稳定性计算方法及工程应用、深基坑支护结构设计计算方法及在深大基坑工程中的应用。本书大部分内容为作者近几年科研项目的理论研究和工程实践的成果总结。

本书系统全面、内容新颖，特别注重理论与工程实践的紧密结合。

本书可供水利、水电、矿山、建筑、交通、国防等系统的广大科技和工程技术人员参考，也可作为这些专业领域高等院校师生和研究生的参考教材。

责任编辑：王 梅

责任设计：董建平

责任校对：刘 梅 关 健

前 言

进入新世纪,随着国民经济的持续发展和西部大开发战略的实施,我国迎来了大规模工程建设的高峰期,如三峡、龙滩、溪落渡、南水北调等大型水利水电工程;西气东输、西电东送等大型能源工程;青藏铁路、沪蓉高速公路等大型交通工程以及城市大型地下空间开发与地铁工程建设等,正以前所未有的速度在全国开展进行。与此同时,石油和天然气储存、核废料处置、CO₂ 储存、垃圾深埋以及石油、地热和矿产资源的超深开采等也已经纳入国家总的发展规划。这些大型工程建设项目一方面对加快我国国民经济发展,提高人民生活水平和保持社会可持续发展将起到重大的作用,同时开发这些大型工程将面对大量的岩土开挖,涉及许多有关岩土强度破坏、变形失稳以及加固处理的问题。

在地下洞室、边坡、深基坑等岩土工程的设计中,岩土强度和稳定性的计算、分析与评价十分重要,强度和稳定往往是控制工程设计的重要条件并成为工程师们倍加关注的焦点问题。同时也应看到,由于岩土介质的复杂性,岩土工程强度和稳定性的计算至今尚未达到成熟的程度,对岩土工程强度和稳定问题的研究仍是工程界需要长期研究的一个课题。

为了保证岩土工程的开挖稳定,需要采用锚杆、预应力锚索等岩土锚固技术对开挖工程进行加固治理。如何有效评价岩土锚固机理和加固效果,也是岩土工程界广泛研究但尚未得到很好解决的一个问题。

针对上述问题,本书从理论与工程实践的角度出发,就岩体断裂破坏强度、岩土锚固、地下洞室围岩稳定、边坡与坝基

稳定以及深基坑开挖稳定等有关岩土工程强度与稳定计算的一些新理论、新方法以及它们在实际工程中的具体应用做了较为全面、系统的介绍。其中第1章简要介绍了岩土介质的基本物理力学特性；第2章介绍了岩体结构面几何特征的分析方法、脆性岩体断裂破坏强度准则和强度计算理论及在工程加固中的应用。第3章介绍了岩土锚固机理、锚固计算理论及在地质灾害治理工程中的应用；第4章介绍了地下洞室围岩稳定分析的计算方法、支护机理及在隧道工程设计与施工中的应用；第5章介绍了岩土边坡与重力坝坝基的稳定性计算方法及在工程中的应用；第6章介绍了深基坑支护结构的设计计算方法及在深大基坑工程中的应用。

本书除第3章的3.1、3.2节由张乐文博士撰写外，其余章节皆由张强勇博士撰写。本书大部分内容为作者近几年科研项目的理论研究和工程实践的成果总结。

本书出版得到朱维申教授、李术才教授、陈卫忠教授、向文副教授和山东大学岩土与结构工程研究中心的大力支持和帮助，谨在此表示衷心感谢。

本书写作过程中参考了部分文献资料，作者虽在书中力求注明出处，但难免遗漏，在此谨向所有原作者表示感谢，并对遗漏姓名的原作者诚致歉意！

目 录

第 1 章 岩土介质的基本物理力学特性	1
1.1 概述	1
1.2 岩体的基本物理力学特性	2
1.2.1 岩体结构	2
1.2.2 岩石与岩体	5
1.2.3 影响岩体力学特性的主要因素	7
1.3 土体的基本物理力学特性	10
1.3.1 土的组成及基本物理特性指标	10
1.3.2 岩土分类	13
1.3.3 特殊土类	15
1.3.4 土体主要力学变形特性	16
第 2 章 脆性岩体断裂破坏强度计算及工程应用	21
2.1 岩体结构面几何特征的分析方法	21
2.1.1 概化优势节理面组的确定方法	21
2.1.2 节理面几何特征及其概率统计模型	24
2.1.3 裂隙张量 (Crack Tensor)	36
2.2 脆性岩体的起裂准则与初裂强度计算	38
2.2.1 引言	38
2.2.2 脆性岩体的起裂准则及初裂强度计算公式	39
2.3 脆性岩体断裂破坏强度计算理论	41
2.3.1 平面节理岩体的断裂破坏强度计算公式	41
2.3.2 三维节理岩体的断裂破坏强度计算公式	44
2.4 断裂破坏强度计算理论在边坡支护工程中的应用	46
2.4.1 工程概况	46

2.4.2	岩体力学参数、计算范围	47
2.4.3	计算模型选取	48
2.4.4	计算结果	48
2.4.5	计算结论	51
第3章	岩土锚固计算理论及工程应用	52
3.1	岩土锚固的现状与发展	52
3.1.1	岩土锚固理论研究之现状	52
3.1.2	岩土锚固应用研究之现状	61
3.1.3	岩土锚固理论研究与技术应用存在的问题及发展方向	65
3.1.4	新型锚杆及岩土锚固新技术简述	66
3.2	岩土锚固单锚传力的理论分析	72
3.2.1	概述	72
3.2.2	全长粘结式锚杆沿杆体剪力分布的理论解	72
3.2.3	粘结式锚杆灌浆与周围岩土体间剪力分布的理论解	74
3.2.4	全长粘结式锚杆的受力分析	75
3.2.5	全长粘结式锚杆所受剪应力与 E/E_s 值的关系	77
3.2.6	结论	77
3.3	岩土锚固计算分析模型	78
3.3.1	三维能量损伤岩锚柱单元计算模型	78
3.3.2	岩锚支护的抗剪作用	81
3.4	岩土锚固计算理论在地质灾害治理工程中的应用	82
3.4.1	深圳市大南山山体滑坡地质灾害治理	82
3.4.2	山东省 S103 线大型公路滑坡加固治理	86
第4章	地下洞室围岩稳定分析的计算方法及工程应用	97
4.1	地下洞室围岩的破坏机理	97
4.1.1	岩石的破坏机理	97
4.1.2	围岩的破坏方式与破坏机制	98
4.2	地下洞室围岩稳定分析的主要方法	99
4.2.1	围岩稳定分析的基本步骤	99

4.2.2	围岩稳定分析的基本途径	101
4.2.3	围岩稳定分析的主要方法	101
4.3	地下洞室围岩稳定分析的有限元计算方法	106
4.3.1	非线性弹性有限元计算方法	107
4.3.2	非线性弹塑性有限元计算方法	116
4.3.3	非线性弹塑性损伤有限元计算方法	119
4.3.4	地下洞室的开挖计算	125
4.4	地下洞室围岩稳定的支护措施	126
4.4.1	支护结构形式	126
4.4.2	新奥法	129
4.5	围岩稳定分析计算方法在隧道工程中的应用	130
4.5.1	工程概况	130
4.5.2	围岩工程地质条件	130
4.5.3	隧道开挖支护设计与稳定性计算	131
4.5.4	隧道施工技术与施工方法	134
4.5.5	结语	138
第5章 岩土边坡与重力坝坝基的稳定性计算及工程应用		
		139
5.1	岩土边坡稳定性计算分析方法	139
5.1.1	边坡变形破坏形式及影响边坡稳定的因素	139
5.1.2	边坡稳定性分析的主要方法	140
5.1.3	边坡稳定分析的基本途径	141
5.1.4	加锚岩体边坡稳定分析的滑体计算模型	141
5.2	岩土边坡稳定性计算方法的工程应用	146
5.2.1	工程概况	146
5.2.2	计算截面的选取	147
5.2.3	计算工况	149
5.2.4	计算参数	149
5.2.5	计算结果	150
5.2.6	计算结论	157

5.3	重力坝坝基深层抗滑稳定计算	157
5.3.1	概述	157
5.3.2	坝基深层抗滑稳定计算模型	158
5.4	坝基深层抗滑稳定计算方法的工程应用	161
5.4.1	工程概况	161
5.4.2	计算断面与坝基工程地质条件	162
5.4.3	基本计算资料	162
5.4.4	计算结果	164
第6章	深基坑支护结构设计计算及工程应用	165
6.1	基坑支护工程的特点与常见支护结构形式	165
6.1.1	基坑支护工程的特点	165
6.1.2	基坑主要支护结构形式	167
6.2	桩锚支护结构弹性杆系有限元计算方法	169
6.2.1	桩锚支护结构的计算方法	169
6.2.2	Winkler 弹性地基梁模型	170
6.2.3	弹性地基梁杆系有限元计算方法	171
6.3	复合土钉墙支护结构三维有限元计算方法	172
6.3.1	概述	172
6.3.2	钉-锚-土联合作用计算模型	173
6.3.3	有限元计算方法	174
6.4	深基坑支护结构设计计算方法的工程应用	175
6.4.1	深圳市民中心广场深大基坑支护设计与计算	175
6.4.2	深圳鸿翔花园深大基坑支护设计与计算	183
6.4.3	深圳香荔花园深基坑支护设计与计算	192
参考文献		198

第1章 岩土介质的基本物理力学特性

为了深入研究岩土工程的强度与稳定性，必须充分认识岩土介质的组成和物理力学特性。因此，本章首先对岩土介质的基本物理力学特性和岩土分类作简要的介绍。

1.1 概 述

岩土工程研究的主要对象是岩体和土体，岩体在其形成和存在的整个地质历史过程中，经受了各种复杂的地质作用，因而有着复杂的地质结构和地应力场环境。而不同地区、不同类型岩土，由于所经历的地质作用过程不同，其工程性质往往具有很大的差别。

岩体是复杂的地质介质，在天然状态下，经过多次构造运动，有着长期的复杂的变形历史，赋存地应力，而且被各种构造形迹（包括断层、节理、层理等）切割成断续体。因此，岩体在物理特性上表现为区域性、非连续性和非均质性，在力学特性上表现出强烈的非线性、各向异性、流变性及尺度效应性等。另一方面，岩体赋存于一种动态变化的自然环境中，其物理力学特性还受地应力、温度、化学腐蚀、水、气和施工等因素及其耦合作用的影响。

土体是岩体经风化、剥蚀、搬运和沉积后的产物，它是由固、液、气组成的三相分散系。土体与岩体的主要区别在于固体颗粒间的连接较弱，极易受外界环境的影响。岩石出露地表后，经过风化作用而形成土，它们或留存在原地，或经过风、水及冰川的剥蚀和搬运作用在异地沉积形成各种土层，如：残积土、黄土、砂土、坡积土、洪积土、冲积土、湖相沉积土、

海相沉积土、冰川沉积土等。在各地质时期，由于各地区的风化环境、搬运和沉积的动力学条件均存在差异，导致土体力学性质呈现非线性、各向异性、弹塑性、流变性、剪胀性及压硬性，并受应力状态、应力路径和应力历史的影响。

可见，岩土是自然、历史的产物，这决定了它们的工程性质与其他工程材料如钢材、塑料、混凝土等有很大的差异，下面根据相关文献资料^[1~8]就岩土基本物理力学特性作简要介绍。

1.2 岩体的基本物理力学特性

1.2.1 岩体结构

岩体是赋存于一定地质环境中，经受过不同时期、不同规模 and 不同性质构造运动改造的地质体。岩体是由不同规模、不同形态、不同成因、不同方向和不同序次的断层、层理、节理、片理等结构面以及被结构面切割而成的岩石结构体共同组成的地质体。

1. 结构面

(1) 结构面的分类

结构面是具有一定方向、延展较大、厚度较小的地质界面。由于结构面是岩体的重要组成单元之一，所以岩体的力学性质与结构面的特性有密切关系。结构面按其成因可分为：

1) 原生结构面。即在成岩过程中形成的结构面，包括沉积结构面、火成结构面和变质结构面。

2) 构造结构面。指在各种构造力作用下所产生的结构面，如节理、劈理、断层以及层间错动带等。

3) 次生结构面。指在各种次生力（如风化、卸荷、人工爆破和地下水等）作用下形成的结构面，如风化裂隙，冰冻裂隙、卸荷裂隙等。

(2) 结构面的几何特性

结构面的几何特性主要包括：结构面的产状、形态和延展尺度等。

1) 结构面的产状。包括走向和倾向，产状对岩体是否沿某一结构面滑动起着控制作用。

2) 结构面的形态。它决定着结构体沿结构面滑动时的抗滑力的大小，当结构面的起伏度大、粗糙度高时，其抗滑力就大。

3) 结构面的延展尺度。按结构面的延展情况，可将结构面分为非贯通性的、半贯通性的和贯通性的三种类型。

2. 结构体

结构体也是岩体的基本组成部分，其几何形状、大小及相互间的组合关系，由结构面的产状、分布和组合关系来确定。常见的单元结构体有块状、柱状、板状以及菱形、楔形、锥形体等。如果风化强烈或挤压破碎严重，也可形成碎屑状、颗粒状、鳞片状。

按照岩体被结构面分割的程度或结构的体态特征，可将岩体结构划分为整体状结构、块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构。

3. 岩体结构类型

不同类型、级别和自然特征的结构面及其切割而成的不同大小和形状的结构体，赋予了岩体各种不同的结构特征。岩体结构类型的划分是在研究岩体的地质特征、结构面、结构体自然特征及其组合状况的基础上的进一步概括。工程实践表明，根据岩体的地质特征和力学性质可以把自然的岩体进行工程分类，使归并的每类岩体只有某些共同的特点和性质，以便于工程应用。

中科院地质研究所谷德振教授将岩体结构划分为 4 种基本类型和 8 个亚类，其基本特性如表 1.2-1 所示^[7]。

岩体结构的基本类型

表 1.2-1

结构类型			地质背景	结构面特征	结构体特征	
代号	类	亚类			形态	强度 (MPa)
I	整体块状结构	整体结构 (I ₁)	岩性单一, 构造变形轻微的巨厚层沉积岩、变质岩和火成岩体	结构面少, 一般不超过 3 组, 延展性极差, 多呈闭合状态, 无充填或夹少量碎屑, $\tan\varphi > 0.6$	巨型块状	> 60
		块状结构 (I ₂)	岩性单一, 构造变形轻-中等的厚层沉积岩、变质岩和火成岩体	结构面一般 2 ~ 3 组, 面多呈闭合, 延续性差, 层面有一定结合力, $\tan\varphi = 0.40 \sim 0.60$	各种形状的块状	> 30、一般均在 60 以上
II	层状结构	层状结构 (II ₁)	构造变形轻-中等的中厚层状岩体 (单层厚 > 30cm)	以层面、片理、节理为主, 有时亦有软弱夹层或层间错动面, 延续性较好, 结构面 2 ~ 3 组, 层面结合力较差, $\tan\varphi = 0.30 \sim 0.50$	块状、柱状、厚板状	> 30
		薄层 (板) 状结构 (II ₂)	同 II ₁ , 但层厚小于 30cm, 在构造作用下发生强烈褶皱 (或褶曲) 和层间错动	层理、片理发育, 原生软弱夹层、层间错动和小断层不时出现, 结构面多为泥膜、碎屑和泥质物充填, 一般结合力差, $\tan\varphi = 0.30$	板状、薄板状	一般 30 ~ 10
III	碎裂结构	镶嵌结构 (III ₁)	一般发育于脆硬岩层中, 压碎岩带、节理、劈理组数多, 密度大	以节理、劈理为主, 组数多, 密度大, 但延续性差。结构面闭合无充填或夹少量碎屑 $\tan\varphi = 0.40 \sim 0.60$	形态大小不一, 棱角显著	> 60
		层状碎裂结构 (III ₂)	软硬相间的岩石组合, 并常有近于平行的软弱破碎带	软弱夹层和各种成因类型的软弱破碎带发育, 在岩体中大致成平行分布, $\tan\varphi = 0.20 \sim 0.40$, 骨架硬岩层 $\tan\varphi = 0.40$	以碎块状、板柱状为主	骨架硬岩层岩块 ≥ 30

续表

结构类型			地质背景	结构面特征	结构体特征	
代号	类	亚类			形态	强度 (MPa)
Ⅲ	碎裂结构	碎裂结构 (Ⅲ ₃)	岩性复杂, 构造破碎强烈, 弱风化带	各类结构面均发育, 彼此交切, 多被充填, 结构面光滑度不等, 形态不一 $\tan\varphi = 0.20 \sim 0.40$	碎屑和大小不等、形态不同的岩块	微裂隙多, 不堪一击 < 30
Ⅳ	散体结构		构造破碎带及全、强风化带	节理、劈理密集, 呈无序状, 破碎带呈块夹泥或泥包块的松软状态	泥、岩粉、碎屑、碎块、碎片等	

1.2.2 岩石与岩体

1. 岩石与岩体的区别

岩体与完整的岩石材料不同, 岩体中除存在相对完整、坚硬的岩石块体外, 还存在着节理、层理和断层等各种不连续的地质结构面。岩体在不连续地质界面的切割下, 形成一定的岩体结构并赋存于一定的地质环境(地应力、地下水、地温、地热等)之中。结构面在岩体不同部位的发育程度和分布规律的差异, 使岩体工程性质呈现显著的不连续性、非均质性和各向异性。由于岩体被各种地质界面切割, 具有不连续性或多裂隙性, 因此岩体常常被称为节理岩体、裂隙岩体或不连续岩体。岩体在外力作用下的变形强度特性要比岩石材料复杂得多。

2. 岩石力学特性

岩石虽然相对岩体来说, 其组成较单一、均质, 但相对金属材料来说, 其力学特性仍比较复杂, 岩石主要力学特性可归纳概括如下。

(1) 非线性的应力-应变关系

岩石典型力学特性是应力-应变呈现非线性关系, 如图 1.2-1

所示。

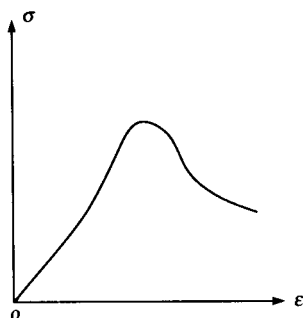


图 1.2-1 岩石非线性应力-应变关系曲线

(2) 循环荷载下的硬化、软化特性

当循环荷载小于岩石峰值强度时，岩石的刚度随着循环次数的增加，表现出应变硬化的特性，当循环荷载是在破坏之后进行，岩石的刚度即不断减少，表现出应变软化特征。

(3) 弹塑性耦合特性

岩石在加卸荷过程中，由于塑性变形的影响，岩石的弹性系数随塑性变形的发展而不断变化的现象，称为弹塑性耦合。

(4) 静水压力敏感性

岩石在周围同等压力作用下，被压密，呈现出非线性的体积应变与应力的关系。

(5) 岩石的围压效应

在低围压下，岩石表现出应变软化的特征，在高围压下，岩石呈现出应变硬化特征，由于围压的变化，使岩石由脆性破坏向延性破坏转移。

(6) 非线性剪胀

岩石在破坏之前，会出现非线性体积膨胀（有的发生剪缩），在此剪应力作用下，岩石体积产生膨胀的现象称为剪胀效应。

(7) 时效特性

岩石力学特性随时间变化的现象称为时效特性。如当荷载保持一定时，岩石变形随时间的延续而增加，称之为蠕变现象；或者，岩石变形保持一定，岩石的应力随时间延续而降低，称之为松弛现象。

(8) 应力路径效应

应力路径对岩石的强度及变形有较大影响，不同的应力（应变）历史，造成岩石内部的不同损伤，导致不同的变形效应。

(9) 低抗拉特性

岩石抗拉强度远低于岩石的抗压强度，它的受拉变形也远小于受压变形。

(10) 加载率的敏感性

无论是动力或静力试验，加载率越高，岩石所表现出的强度越大，加载率的大小，对变形有较大的影响。

(11) 试验方式对岩石力学特性的影响

岩石力学特性只有通过压力试验机的试验后才能获得，然而试验机的刚度及试验的控制方式对岩石力学特性有很大影响，例如在峰值强度附近，若不能控制试件的变形，试件将过早地发生脆性破坏，即得不到岩石的全应力-应变过程曲线，同时试验压力机的刚度亦会直接影响岩石的峰值强度。

1.2.3 影响岩体力学特性的主要因素

岩体的变形与强度，一方面取决于它的受力条件，另一方面则受结构面特征及岩体赋存条件的影响。其主要影响因素有：

1. 结构面对岩体力学性质的影响

岩体中除岩石结构体外，还包含各种各样的地质结构面。岩体的力学特性在很大程度上受地质结构面控制，具体表现在：结构面的强度决定岩体的强度，结构面的产状导致岩体具有各向异性，结构面的存在导致岩体具有不连续性和非均质性。

2. 地质环境对岩体力学特性的影响