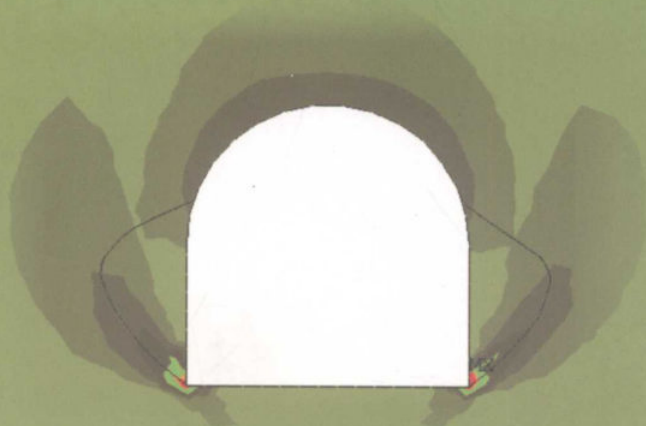


郑颖人 孔 亮 阿比尔的 / 著

强度理论与 数值极限分析



科学出版社

强度理论与数值极限分析

郑颖人 孔 亮 阿比尔的 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了工程材料强度理论与数值极限分析方法及其在土木工程中的应用,并初次提出了破坏条件。全书内容包括各种工程材料的试验与应力应变关系、力学基础知识、屈服条件、破坏条件、极限分析方法,以及数值极限分析方法在边坡与基坑工程、地基工程、隧洞工程与结构工程中的应用。

本书可供力学与土木工程相关领域科研与工程人员阅读,也可供高等院校相关专业师生阅读或作为研究生参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

强度理论与数值极限分析 / 郑颖人,孔亮,阿比尔的著. —北京:科学出版社, 2020.3

ISBN 978-7-03-064464-0

I. ①强… II. ①郑… ②孔… ③阿… III. ①工程材料-强度理论
②工程材料-数值分析 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 031454 号

责任编辑:李小锐 / 责任校对:彭 映

责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2020年3月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:450 000

定价:195.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书目的是编著一本较为系统和实用的有关强度理论与数值极限分析方法的学术著作,可作为建筑学科与力学学科的研究生参考资料,并望今后进一步完善成熟后成为教材。本书重点阐述强度理论中的屈服条件、破坏条件和两种数值极限分析方法(强度折减法与荷载增量法和极限应变法),及其在岩土工程与建筑工程中的应用。

本书内容除继承传统塑性力学理论和介绍国内外相关研究成果外,主要取材于作者及其学生多年来的一些创新性研究成果,所以本书也是团队的集体著作。书中第2章和第3章部分内容,取材于作者撰写的《岩土塑性力学》一书。

工程材料塑性理论已在工程上获得广泛的应用。依据工程中应用目的不同,工程塑性力学逐渐形成两方面的研究与应用体系:一方面是研究塑性材料的本构关系,以获得准确的应力、应变和位移计算值;另一方面是研究材料的强度与极限应变、破坏与稳定,以及通过极限分析方法获得工程设计所需的工程稳定安全系数和极限承载力。工程塑性力学需要知道材料的屈服准则与破坏准则,前者需要应用材料复杂的本构关系;而后者较为简单,只要应用平衡方程、屈服条件与破坏条件就可求解。本书研究强度理论与数值极限分析方法及其工程应用,这种方法不仅简单,而且克服了传统极限分析法应用面很窄和无法知道破坏全过程的两个缺陷,可以获得各类工程所需的稳定安全系数与起裂安全系数,妥善解决破坏控制工程的问题,但这种方法无法得到准确的位移解,来解决位移控制的工程问题。

本书在继承传统塑性力学强度理论与极限分析基础上,探索创新,与时俱进,提炼与推广新理论、新方法,强调系统性和实用性,也力求便于读者自学和研究生教学。书中主要创新内容如下:

(1)基于力学理论导出了三维能量屈服条件,包括工程材料常规三轴三维屈服条件与岩土真三轴三维屈服条件,它可作为工程材料一般屈服条件。对岩土可直接退化为莫尔-库仑条件、德鲁克-普拉格条件;对金属退化为米赛斯条件、屈瑞斯卡条件,从而形成了工程材料的屈服准则体系。

(2)指出塑性力学中依据理想弹塑性模型确定了屈服准则,但没有按此确定破坏准则,误把破坏准则与屈服准则混为一谈。本书基于力学理论,提出以弹塑性极限应变作为点破坏的条件,并给出了与各种经典屈服条件相应的破坏条件,包括破坏函数与破坏曲面,从而形成了完整的强度理论。

(3)考虑到岩土材料具有压硬性,随着应力提高岩土压实,岩土强度随之增强,导致岩土在三维受力情况下,岩土三维莫尔应力圆增大,而大于当前教科书中传统三维莫尔应力圆。并求出了强度提高后岩土的力学强度指标,形成了岩土三维莫尔应力圆新理论。

(4)提出了基于材料强度与变形参数求解材料极限应变的计算方法,以及基于极限应变的数值极限分析新方法(即极限应变法),该法可以揭示工程破坏过程并求得工程起裂安全系数与稳定安全系数,丰富了塑性力学极限分析方法。

(5)提出了工程材料任意点达到屈服时的屈服系数与从屈服达到破坏时的破坏系数的计算公式。已知任意点的应力或弹性极限应变,即能预测达到屈服时的安全系数;如果又已知任意点的极限应变,即能预测达到破坏时的安全系数。

(6)拓宽了数值极限分析方法的应用,不仅可用于岩土,也可用于混凝土、钢材。本书工程应用内容大都是解决传统极限分析法无法求解的工程技术问题。如采用数值极限分析可以求得隧道与各种岩石边坡的稳定安全系数,埋入式抗滑桩的桩长设计,流固耦合基坑设计,隧洞破坏机理与初衬设计,浅埋条形地基的有重计算,桩基承载机理,并尝试用于建筑工程结构等。

本书引用了俞茂宏、姚仰平、顾金才、李广信、李爱群等学者的研究成果,在此深表感谢。

丛宇提供了书中第1、2章混凝土与大理岩抗剪强度试验内容;高红提供了第3章三维能量屈服条件的推导过程及其算例;向钰周提供了岩土真三轴三维屈服条件的推导及其算例;赵尚毅提供了第5章屈服条件转换公式与第6章锚拉抗滑桩的设计算例;辛建平提供了第6章极限应变法在土坡与岩坡中的应用;雷文杰、梁斌提供了第6章抗滑桩的桩长设计;赵尚毅、王永甫提供第6章埋入式抗滑桩的推力计算与设计方法;董诚提供了第6章基坑工程的算例;王乐、向钰周提供了第7章极限应法求解地基承载力系数;邓楚键提供了第7章地基载荷试验数值模拟与碎石桩复合地基极限承载力求解;孔位学提供了第7章求解含软弱结构面的岩石地基极限承载力计算;董天文、刘祥沛提供了第7章竖向承压桩基础强度折减法与荷载增量法求解方法与桩的室内与现场试验的素材;王永甫提供了第8章极限应变法在圆形隧洞稳定性分析中的应用;邱成瑜提供了第8章有限元强度折减法有衬砌隧洞设计及其编程;王乐提供了第9章极限应变法在钢结构中的应用;辛建平提供了第9章极限应变法在钢筋混凝土结构和沉管隧道中的应用,这里一并致谢。

本书获得重庆市院士专项(cstc2016jcyjys0002)、国家自然科学基金项目(11572165, 51778311)的资助,深表感谢。

希望本书能对我国工程力学与土木工程的教学、科研与设计工作有所帮助,这是我们最大的愿望。鉴于本书引入的新内容较多,有些内容尚在认知和认同阶段,有些尚是一个研究报告,书中难免有疏漏之处,恳请国内外专家和读者批评指正。

目 录

第1章 概论	1
1.1 材料强度理论和极限分析方法的概念与发展过程	1
1.2 钢材的强度试验与应力-应变关系	3
1.2.1 钢材拉伸试验及其应力-应变关系	3
1.2.2 静水压力(各向均匀受压)试验结果	4
1.3 混凝土的抗剪强度试验与应力-应变关系	4
1.3.1 混凝土抗剪强度试验	4
1.3.2 混凝土单轴受压的应力-应变曲线	10
1.4 岩石的强度试验与应力-应变关系	11
1.4.1 岩石抗剪强度试验	11
1.4.2 岩石承压试验的应力-应变曲线	12
1.5 土的压缩试验与三轴剪切试验	13
1.5.1 土的压缩试验	13
1.5.2 土的三轴剪切试验	14
1.6 工程塑性材料的基本力学特性	16
1.6.1 金属材料的基本材料特征与力学特点	16
1.6.2 岩土类材料的基本材料特征与力学特点	16
1.6.3 广义塑性力学与传统塑性力学	17
第2章 力学基础知识	19
2.1 一点的应力状态	19
2.2 应力张量分解及其不变量	21
2.3 八面体应力、广义剪应力与纯剪应力	23
2.4 应力空间与 π 平面上的应力分量	25
2.5 传统三维莫尔应力圆与岩土三维莫尔应力圆	28
2.5.1 传统三维莫尔应力圆	28
2.5.2 岩土三维莫尔应力圆	28
2.6 洛德参数与洛德角	30
2.7 一点的应变状态	34
2.8 应变空间与应变 π 平面上的应变分量	36
2.9 各种剪应变间的关系	38
2.10 弹塑性力学基本方程	39
2.10.1 运动方程与平衡方程	39

2.10.2 几何方程与连续方程40

2.10.3 本构方程(物理方程)41

2.10.4 边界条件和初始条件41

2.11 岩土材料的弹性剪切应变能42

第3章 屈服条件44

3.1 屈服条件与屈服面44

3.1.1 屈服条件的概念及其性质44

3.1.2 屈服条件应遵循的力学原则及其检验标准47

3.2 基于传统三维莫尔应力圆的三维能量屈服条件——岩土常规三轴三维能量屈服条件48

3.2.1 岩土材料应变比能计算48

3.2.2 岩土材料平面(单剪)能量与三维能量屈服条件49

3.2.3 岩土材料常规三轴屈服条件的几种表达式53

3.3 经典屈服条件55

3.3.1 莫尔-库仑屈服条件55

3.3.2 德鲁克-普拉格屈服条件与三维德鲁克-普拉格屈服条件57

3.3.3 金属材料的屈服条件(屈瑞斯卡与米赛斯屈服条件)60

3.4 基于岩土三维莫尔应力圆的三维能量屈服条件——压硬岩土常规三轴与真三轴三维能量屈服条件65

3.4.1 压硬岩土常规三轴三维能量屈服条件65

3.4.2 压硬岩土真三轴三维能量屈服条件65

3.5 工程材料屈服条件体系70

3.5.1 屈服条件体系的表述与推导70

3.5.2 工程算例70

3.6 国内外采用的一些其他屈服条件76

3.6.1 拉德-邓肯(Lade-Duncan)屈服条件、松冈元-中井(Matsuoka-Nakai)和郑颖人-陈瑜瑶屈服条件76

3.6.2 基于双剪应力条件的统一强度理论与统一屈服条件78

3.6.3 基于空间滑动面强度准则的广义非线性强度条件79

3.6.4 霍克-勃朗(Hoek-Brown)条件81

3.7 辛克维兹-潘德屈服条件(二次式屈服条件)82

3.7.1 辛克维兹-潘德屈服条件82

3.7.2 包含二次式在内的工程材料统一屈服条件86

3.8 屈服系数的计算89

3.8.1 屈服系数概念89

3.8.2 强度折减法求解强度储备屈服系数89

3.8.3 荷载增量法求解超载屈服系数90

3.9 应变表述的屈服条件92

第4章 破坏条件	98
4.1 概述	98
4.2 破坏函数与破坏曲面	100
4.2.1 破坏函数与破坏面的概念	100
4.2.2 金属材料的破坏条件	102
4.2.3 岩土类材料的破坏条件	103
4.3 极限应变计算	106
4.3.1 弹性极限应变的解析计算	106
4.3.2 弹塑性极限应变计算	107
4.3.3 混凝土与钢材极限应变计算	108
4.4 岩土类材料极限拉应变计算	113
4.5 应变表述的屈服系数和破坏系数	115
4.5.1 屈服系数	115
4.5.2 破坏系数	118
第5章 极限分析方法	122
5.1 极限分析方法的发展	122
5.1.1 传统极限分析法	122
5.1.2 基于整体破坏的数值极限分析方法	122
5.1.3 基于点破坏的数值极限分析方法	123
5.2 传统极限分析方法简介	124
5.2.1 传统极限分析的基本假设	124
5.2.2 传统极限分析法的整体破坏条件	125
5.2.3 传统极限分析计算方法	126
5.3 基于整体破坏的数值极限分析法——有限元强度折减法与荷载增量法	126
5.3.1 概述	126
5.3.2 基于整体破坏的有限元极限分析法	127
5.4 基于点破坏条件的数值极限分析法——极限应变法	133
5.4.1 极限应变法原理	133
5.4.2 极限应变法的基本理论	134
第6章 数值极限方法在边坡与基坑工程的应用	136
6.1 有限元强度折减法与极限应变法在二维土坡中的应用	136
6.1.1 D-P 准则安全系数计算分析	136
6.1.2 边坡临界滑动面的确定	137
6.1.3 边坡的极限高度	138
6.1.4 朗肯主动土压力	142
6.2 在岩质边坡中的应用	145
6.2.1 结构面的有限元模拟	146
6.2.2 岩质边坡算例	147
6.3 在三维边坡中的应用	154

6.3.1	在三维土坡中的应用	154
6.3.2	在三维岩坡中的应用	156
6.4	边(滑)坡抗滑桩的计算与设计	158
6.4.1	抗滑桩推力计算分析	158
6.4.2	有限元强度折减法的锚拉抗滑桩设计	161
6.4.3	有限元强度折减法的埋入式抗滑桩设计	165
6.5	有限元极限分析法在基坑工程中的应用	172
6.5.1	有限元强度折减法进行渗流条件下基坑稳定性分析	172
6.5.2	有限元强度折减法进行非完整潜水井降水条件下基坑稳定性分析	175
第7章	数值极限分析法在地基工程中的应用	177
7.1	3种极限分析方法求解土体无重条形地基承载力	177
7.1.1	无重条形地基 Prandtl 解	177
7.1.2	有限元荷载增量法求解	177
7.1.3	极限应变法求解	178
7.1.4	不同内摩擦角时3种方法计算结果对比	179
7.2	极限应变法求解土体条形地基承载力系数	179
7.2.1	N_c 求解	180
7.2.2	N_q 求解	181
7.2.3	N_γ 求解	181
7.2.4	应用承载力系数求条形地基极限荷载	183
7.3	Prandtl 法、极限应变法和荷载增量法的条形地基破坏面位置比较	184
7.4	荷载增量法求解含软弱结构面的岩石地基极限承载力	185
7.4.1	软弱结构面倾角的影响	185
7.4.2	节理强度的影响	186
7.4.3	节理位置的影响	186
7.5	荷载增量法与极限应变法对地基现场载荷试验的数值模拟	187
7.5.1	荷载增量法求地基承载力特征值	187
7.5.2	极限应变法求地基承载力特征值	189
7.6	强度折减法求解碎石桩复合地基极限承载力	190
7.6.1	有限元模型及其计算参数	191
7.6.2	有限元荷载增量法计算碎石桩复合地基结果分析	191
7.7	强度折减法与荷载增量法求解竖向承压桩基础的极限荷载	193
7.7.1	工程桩工况与有限元建模	193
7.7.2	强度折减法判定桩基础极限荷载	194
7.7.3	荷载增量法判定桩基础极限荷载	196
7.7.4	荷载增量法与强度折减法各种判据的计算结果	198
7.8	竖向承压桩基础的破坏特征和承载机理研究	198
7.8.1	概述	198
7.8.2	桩基础室内模型试验	199

7.8.3	工程桩基础现场试验	202
7.8.4	桩基础破坏特征	203
7.8.5	桩基础有限元极限分析	210
7.8.6	桩基础极限承载力与承载机理分析	211
7.8.7	研究结论	212
第8章	数值极限分析在隧洞工程中的应用	214
8.1	有限元强度折减法计算均质隧洞稳定安全系数	214
8.2	极限应变法在圆形隧洞稳定性分析中的应用	216
8.2.1	隧洞围岩破裂面的演化过程	216
8.2.2	圆形隧洞滑移线理论	216
8.2.3	基于极限应变法的圆形隧洞数值极限分析	217
8.3	有限元强度折减法研究矩形和拱形隧洞的破坏机理	220
8.3.1	矩形隧洞破坏机理	220
8.3.2	拱形隧洞破坏机理	222
8.4	深、浅埋隧洞的破坏与稳定性分析	223
8.4.1	深埋隧洞破坏与稳定性分析	223
8.4.2	浅埋隧洞破坏与稳定性分析	226
8.5	有限元强度折减法进行有衬砌隧洞的稳定性分析	227
8.5.1	计算模型	227
8.5.2	应力释放的计算方法	229
8.5.3	毛洞稳定性分析	229
8.5.4	初衬后隧洞稳定性分析	230
8.5.5	二衬后隧洞稳定性分析	231
8.5.6	二次衬砌安全系数计算	234
8.5.7	黄土隧洞设计计算的 ANSYS 软件命令流	235
第9章	有限元极限分析在结构工程中的应用	244
9.1	极限应变法在钢梁中的应用	244
9.1.1	概述	244
9.1.2	Q235 钢梁的试验与计算	245
9.1.3	45#中碳钢梁的试验与计算	252
9.2	极限应变法在钢筋混凝土梁中的应用	257
9.2.1	材料强度试验	257
9.2.2	混凝土及钢筋极限应变计算	259
9.2.3	钢筋混凝土简支梁试验设计	261
9.2.4	钢筋混凝土简支梁数值模拟	262
9.2.5	钢筋混凝土简支梁试验	263
9.2.6	模型试验与极限应变法计算的主控项目结果对比	266
9.3	极限应变法在沉管隧道中的应用研究	266
9.3.1	引言	266

9.3.2 沉管结构试验设计266

9.3.3 求解材料极限应变268

9.3.4 沉管结构数值模拟271

9.3.5 沉管结构静载试验278

9.3.6 模型试验与极限应变法计算的主控项目结果对比287

参考文献288

专业名词296

第1章 概 论

1.1 材料强度理论和极限分析方法的概念与发展过程

任何固体材料从受力到破坏,对于脆性破坏材料一般要经历弹性与破坏两个阶段;而对于塑性破坏材料则要经历弹性、塑性与破坏 3 个阶段。强度理论是研究材料在复杂应力作用下发生屈服和破坏的规律,也就是判断材料在复杂应力状态下是否屈服与破坏。

强度理论主要研究应力和应变的极限状态,也就是研究材料任一点的初始屈服条件与破坏条件。初始屈服条件判断材料中某点是否从弹性进入到塑性,而破坏条件判断材料中某点是否从塑性进入到破坏。初始屈服条件与破坏条件两者不同,以往教科书中把屈服条件也称作破坏条件是不合适的。强度理论中,屈服条件与破坏条件共同的地方,一是它们均与应力历史和路径无关,所以通常所说的屈服条件就是指理想弹塑性情况下的初始屈服条件,破坏条件就是指理想弹塑性情况下的极限屈服条件;二是它们都是对材料中任一点来说的,也就是点屈服与点破坏,而不是指材料整体屈服与整体破坏。

依据强度理论建立了材料的极限分析方法。极限分析方法是弹塑性力学中的一个重要分支,主要研究材料的强度、极限应变、破坏(点破坏与整体破坏)与稳定(局部与整体稳定)的力学行为。极限分析方法的优点是不需要引入复杂的本构关系,它只与平衡方程、屈服条件和破坏条件有关,从而使问题求解大大简化。它可以求得准确的起裂安全系数与整体稳定安全系数,或者相应的极限承载力,但无法求得准确的位移,因为位移与应力路径有关需要准确的本构关系。极限分析法与本构关系无关,在传统极限分析中不需要引入力学变形参数,在数值极限分析法中虽然需要引入变形参数,但变形参数的正确与否不影响计算结果。

18 世纪库仑(Coulomb)提出了土体库仑定律,实际上就是土体的强度准则(屈服准则)。19 世纪屈瑞斯卡(Tresca)对金属材料提出了屈瑞斯卡屈服条件;20 世纪初又提出了考虑三维应力状态的米赛斯(Mises)屈服条件;20 世纪初对岩土材料提出了莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服条件;20 世纪中期提出了德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)屈服条件。材料力学中概括了拉破坏和剪破坏的 4 种强度理论,即第一强度理论(最大拉应力理论)、第二强度理论(最大伸长应变理论)、第三强度理论(最大剪应力理论或屈瑞斯卡屈服条件)和第四强度理论(最大形状改变比能理论或米赛斯屈服条件)。上述这些屈服条件都可由弹性理论导出,已经获得学术界与工程界的共识,并在工程中广泛应用。近年来,岩土材料的三维应力状态的屈服条件也已蓬勃发展。20 世纪七八十年代,美国学者拉德(Lade)和日本学者松冈元(Matsuoka)分别提出土体的三维屈服条件;我国俞茂宏

(1994)提出了基于双剪应力条件的统一屈服条件;姚仰平(2000)提出基于空间滑动面强度准则的广义非线性强度条件;高红等(2007)基于传统三维空间莫尔圆提出了常规三轴三维能量屈服条件,此后又考虑了岩土의压硬性,由此发展为基于岩土三维空间莫尔应力圆的三维能量屈服条件。虽然已经取得了可喜成果,但尚需凝聚共识,并广泛付诸实用。

材料点破坏条件的研究一直进展缓慢,拉德在砂土本构关系的研究中认为,破坏条件与屈服条件形式一致,只是常数项不同,因而可通过试验得到破坏条件,但没有从理论上形成破坏准则。最近,混凝土结构教材中依据测试明确指出,应力达到强度不是材料破坏条件,应变达到极限应变才是材料破坏条件。郑颖人等(2018)从力学分析上提出了基于极限应变的点破坏条件,二者不谋而合,明确指出破坏条件是屈服条件的延续,给出了岩土与金属材料的破坏函数与破坏曲面。以往虽然没有材料点破坏的条件,但塑性力学中很早就有了材料的整体破坏条件,由此建立了基于整体破坏条件的极限分析法,按此可求出工程材料整体稳定安全系数或极限承载力。

极限分析方法关注材料的点破坏条件和整体破坏条件,由此可得到工程设计所需的相应安全系数或极限承载力。在提出屈瑞斯卡和米赛斯屈服准则后,金属材料中广泛发展了基于整体破坏的极限分析方法并被广泛应用。土体的极限分析法起始于 1773 年的库仑定律,20 世纪 20 年代建立了极限平衡法(Fellenius),之后又相继出现了滑移线法(特征线法)(Scokolvskii)和上、下限法(W.F.Chen),岩土极限分析法经过百年的发展已逐渐成熟。从工程实践上看,极限分析法具有很好的应用效果,能求出岩土工程的稳定安全系数和极限承载力,是当前岩土工程设计的重要手段,本书将上述方法统称为传统极限分析法,以区别新发展起来的数值极限分析法。

传统极限分析中只有材料的整体破坏判据,而没有材料点破坏的判据。正因为如此,传统极限分析方法存在如下两个不足:一是必须事先知道材料的潜在破坏面位置,这严重制约了方法的应用范围;二是只能求解材料的整体破坏,而不知道材料破坏的全过程和发生局部破坏时的材料起裂位置与起裂安全系数。针对上述两个不足,极限分析方法不断发展完善,数值极限分析方法应运而生。

随着数值分析方法的发展,逐渐兴起了数值极限分析方法。数值方法有很好的适用性与实用性,其缺点是不能求得工程设计所需的稳定安全系数和极限承载力。1975 年,辛克维兹(Zienkiewicz)等提出了有限元强度折减法与荷载增量法,以非线性计算是否收敛作为整体破坏的判据,求得材料的稳定安全系数与极限荷载。20 世纪后期,这一方法在国际上得到广泛认可,许多国际通用软件都纳入了这一方法。国内学者认识到,有限元强度折减法与荷载增量法本质上是应用数值方法求解极限分析问题,它是传统极限方法的发展,因而将其称为数值极限分析方法或有限元(包括有限元、有限差分、离散元等)极限分析法。近年来,我国数值极限分析方法及其工程应用方面快速发展,理论上和方法上做了许多深化与改进的工作。在岩土工程的应用中突破了许多设计难题,基于数值极限分析方法,首次提出了抗滑桩桩长计算并应用于多排桩与埋入式桩设计;求得了隧洞的稳定安全系数,以及岩质边坡、超高加筋土挡墙、桩基础等稳定分析方法;提出的动力数值极限分析法,印证了汶川地震中显示出的地震作用下边坡拉剪组合的破坏机理。有限元强度折减法与荷载增量法克服了传统极限分析需要预先知道破坏面位置的缺

点,扩大了极限分析法的应用范围。但它同样是基于材料整体破坏条件,仍无法求出材料破坏的全过程和材料局部破坏的起裂安全系数。

依据极限应变的点破坏准则,只要数值计算中某个单元的应变达到极限应变,该单元就发生破坏,因而它可作为点破坏的判据。由此可知道材料中最先破坏点的位置,并求得局部破坏的起裂安全系数。对于整体结构来说,虽然材料已局部破坏而出现裂缝,但不会立即发生整体破坏。只有当材料中破坏点增多,逐渐贯通成破坏面时材料才发生整体破坏,由此可将破坏面贯通判定为整体破坏的依据。最近,阿比尔的等(2015)据此提出了基于点破坏的极限分析方法,国内学者还做了一些工程算例,证明基于点破坏的极限应变法的计算结果与基于整体破坏的强度折减法和传统极限分析方法的计算结果十分吻合。3种不同的极限分析计算方法虽然判据不同,但假设条件、力学原理相同,必然会得到一致的整体稳定安全系数,计算误差很小。由此可见,基于点破坏的极限应变法已经克服了传统极限分析方法的两个缺点。极限应变法刚提出不久,当前还没有形成学术界的共识,尚在认知阶段,但从初期研究成果来看,不仅适用于岩土工程,也适用于钢筋混凝土、钢结构等建筑工程,有良好的发展前景。

1.2 钢材的强度试验与应力-应变关系

1.2.1 钢材拉伸试验及其应力-应变关系

在塑性力学中,对金属材料有两个基本试验,一个是单向拉伸试验,另一个是材料在静水压力作用下物体体积变形的试验,这两个试验是建立金属材料塑性理论的基础。在钢材的拉伸试验中,其应力应变曲线,有的有明显的流幅,例如热轧低碳钢和普通热轧低合金钢;有的则没有明显的流幅,例如高碳钢和合金钢。

图 1.1 是有明显流幅的钢材的应力-应变曲线,图中在 A 点以前应力-应变成直线,过 A 点后应变增长较快,到达 B' 点后钢筋开始塑流, B' 点称为屈服上限,通常 B' 点是不稳定的。 B' 点降至屈服下限 B 点,此时应力基本不变而应变急剧增长,曲线接近水平线。直至延伸到 C 点, B 点到 C 点水平距离的大小称为流幅或屈服台阶。由于屈服下限较稳定,因而通常按屈服下限作为有明显流幅的钢材屈服极限。屈服点是线弹性斜线与屈服极限水平线的交点,力学上以此作为理想弹塑性材料屈服强度,如图 1.1 所示。过 C 点以后,应力又上升,钢筋抗拉强度提高,直至到达最高点 D , CD 段称为钢材的强化阶段,该段后期试件会出现滑移线。过了 D 点,试件薄弱处的截面将会突然显著缩小,发生局部颈缩,应力下降,变形迅速增加,达到 E 点时试件被拉断。

无屈服台阶的情况(如合金钢),取残余应变为 2%的点的水平线与线弹性斜线的交点作为理想弹塑性材料屈服极限,如图 1.2 所示。屈服极限点之前的应变为弹性应变,之后的应变为塑性应变。

钢材的破坏主要取决于弹塑性极限应变,当应变达到极限应变时工程就会因变形过大而不能正常使用。正如本书后文所述,极限应变可由强度参数求得,因而无论是在弹

性阶段还是在塑性阶段，强度都是一个重要参数。钢材的抗拉与抗压强度相同，一般通过单向拉伸试验求得，抗剪强度可通过抗拉强度求得。

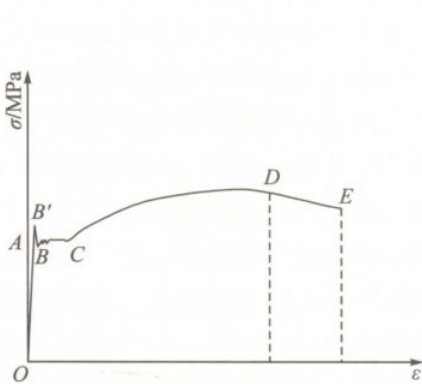


图 1.1 有明显流幅的钢材应力-应变曲线

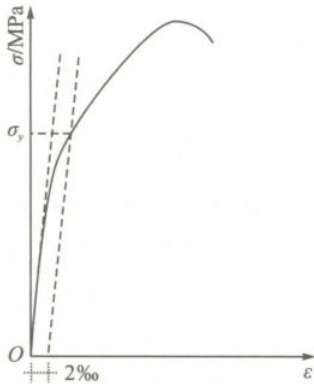


图 1.2 无明显流幅的钢材应力-应变曲线

1.2.2 静水压力(各向均匀受压)试验结果

勃里奇曼(Bridgman)通过试验曾对静水压力对变形过程的影响作了比较全面的研究。试验表明，在压力不太大的情况下，体积应变实际上与静水压力呈线性关系。对于一般金属材料，可以认为体积变化基本上是弹性的，除去静水压力后体积变形可以完全恢复，没有残余的体积变形。因此，在传统塑性理论中假定不产生塑性体积变形，并忽略静水压力对金属材料屈服极限的影响。

1.3 混凝土的抗剪强度试验与应力-应变关系

1.3.1 混凝土抗剪强度试验

混凝土作为使用量最大、使用范围最广的工程材料，在建筑、水利、交通和国防等领域中广泛应用。在建筑力学与工程中，混凝土按受力形式分为拉、压、弯曲等破坏形式，《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中相应提供了混凝土的抗压、抗拉等强度，其试验方法已在相关混凝土书籍中介绍。但在弹塑性力学中还需要提供混凝土的抗剪强度。混凝土属于岩土类摩擦材料，不仅具有黏聚力还具有摩擦力，其抗剪强度需要按黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值来表示。混凝土抗压强度的试验通常都是在无围压下求得的，所以其抗剪强度也可在无围压情况下求出。而现有混凝土相关规范与标准，并没有给出剪切强度 c 、 φ 值指标。至今尚无测定混凝土抗剪强度统一的标准试验方法，混凝土与岩土材料类似，两者都是摩擦材料，因此效仿岩土材料强度试验，依据现有试验条件提出在无法向荷载下混凝土试件直剪试验与单轴抗压试验相结合的测试方法，得出不同强度等级混凝土的 c 、 φ 值。

在围压不大情况下，混凝土可依据莫尔-库仑强度准则推导出抗压强度与抗剪强度之间存在的理论关系，按此通过理论计算方法和数值分析方法分别验证不同混凝土抗剪强度试验结果的准确性，并通过混凝土抗压强度的标准值和设计值换算出抗剪强度的标准值和设计值。

1.混凝土剪切试验及结果分析

1)混凝土取样

岩土材料，尤其是岩石(岩块)材料与混凝土材料有一定的相似性，但岩块比较均匀，而混凝土材料骨料分散，试验离散性较大，因而要求混凝土试件尺寸大于岩石试件尺寸。综合《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)、《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107—2010)、《砌体工程施工质量验收规范》(GB 50203—2002)等规范，并考虑试验条件的限制，试件采用边长 100mm 的立方体。

试件内骨料粒径一般在 25mm 左右，取样完成后试件在 (20±2)℃，相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护 28 天后，95%以上试样应能满足设计强度要求。对同一种强度等级混凝土多次重复试验，试验结果采用统计结果。统计的试验实测值与试验名义值会稍有差异，因此对试验值稍做微调，以更接近试验名义值。

2)混凝土抗剪强度试验方法

试验的基本思路：首先对无法向荷载下混凝土试件进行直剪试验，通过 5 次试验取其抗剪强度平均值为 c 值，然后依据已知的混凝土单轴抗压强度名义值 σ_c 和测得的 c 值，由式(1.3.1)确定 φ 值；也可由单轴下的莫尔应力圆，做通过 c 值的莫尔圆的切线，由此求得 φ 值。

$$\tan \varphi = \frac{\sigma_c^2 - 4c^2}{4c \cdot \sigma_c}$$

(1.3.1)

由于试件直剪试验中没有施加荷载，混凝土抗压强度采用名义值，荷载与混凝土接触面不会受到摩擦力的影响，因而测得的抗剪强度 c 、 φ 对应于混凝土棱柱体轴心受压时抗压强度的试验值 f_c^0 。

3)试验方法实例

对 C25 强度等级混凝土试件进行 5 组重复试验。混凝土试样由于自身结构原因，离散性大，剔除试验结果中非常明显的离散值，对可靠的试验结果进行平均，并对平均值进行分析，获得 C25 混凝土的 c 值。通过式(1.3.1)计算得到 φ 值。由此得到 C25 混凝土抗剪强度 c 与 φ 分别为 3.2MPa 与 61.3°。图 1.3 为 C25 混凝土抗剪强度。

采用同样方法对不同强度等级混凝土进行试验。表 1.1 列出了不同强度等级混凝土抗剪强度 c 、 φ 的试验值。

表 1.1 中，混凝土强度等级增大，混凝土的抗剪指标 c 、 φ 也相应增大。强度等级增大，指标 c 增加的差值比较均匀，但同时指标 φ 的差值逐渐减少。应当指出，本方法以无荷载下试件直剪试验测得的 c 值为依据，考虑不同材料配比情况下是否会影响 c 值大小，为此进行了第二种配比试验。试验结果表明两者相差无几，进一步说明本方法的可行性。

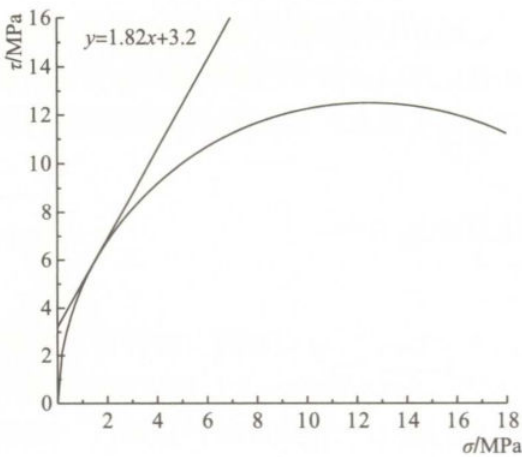


图 1.3 C25 混凝土抗剪强度的确定

表 1.1 不同强度等级混凝土抗剪强度试验值

混凝土等级		C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
试验值	c/MPa	2.6	3.2	3.9	4.5	5.1	5.6	6.1	6.6	7.2
	$\varphi/(^{\circ})$	60.1	61.3	61.8	62.2	62.5	62.7	62.9	63.1	63.3

2.混凝土抗剪强度的理论与数值计算验证

1)混凝土抗剪强度的理论验证

由于力学发展前后不一，在适用于杆件与构件的建筑力学中通常以构件的受荷形式来确定材料强度，如抗压强度、抗拉强度、抗折强度等。而在弹塑性力学中，通常以材料破坏的方式来确定材料强度，力学机理上材料剪切破坏是由材料受压引起的，因而材料只有抗拉强度和抗剪强度，没有抗压强度。其实两者只是定义不同，实质是相同的。抗压强度与抗剪强度必然存在相应的力学关系。对于摩擦类材料，依据莫尔-库仑准则，各种应力与 c 、 φ 值之间必然存在如下关系，对不考虑围压的混凝土同样适用，只是 $\sigma_3=0$ 。

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} 2c \tag{1.3.2}$$

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \varphi \tag{1.3.3}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi \tag{1.3.4}$$

$$c = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi \right) \frac{1}{\cos \varphi} \tag{1.3.5}$$

混凝土抗压试验为单轴压缩试验，即 $\sigma_3=0$ ，因此可以对式(1.3.2)～式(1.3.5)进行简化，并用来验证混凝土抗剪强度的准确性。

2)混凝土抗剪强度的数值验证

为验证上述方法测得的混凝土剪切强度指标，采用数值极限分析法中的荷载增量