

T U L I X U E

土力学

● 王常明 编



吉林大学
出版社

土力学

王常明 编

吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土力学/王常明编. —长春: 吉林大学出版社,
2004. 12
ISBN 7-5601-3152-2

I. 土... I. 王... II. 土力学—高等学校—教材
N. TU43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 136270 号

土 力 学

王常明 编

责任编辑、责任校对: 赵洪波

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市明德路 421 号)

吉林大学出版社发行
长春市永昌福利印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16

2004 年 12 月第 1 版

印张: 13

2004 年 12 月第 1 次印刷

字数: 240 千字

印数: 1 - 600 册

ISBN 7 - 5601 - 3152 - 2/TU · 7

定价: 20.00 元

前 言

《土力学》作为高等院校土木建筑有关专业的一门重要基础课程，是有关专业的大学生和工程技术人员必须掌握的一门现代科学。作者根据我校土木工程专业和勘查技术与工程（水文地质与工程地质方向）的土力学课程教学的基本要求，结合《建筑地基基础设计规范》（GB50007-2002）等新规范编写了这本教材。书中较系统全面地阐述了土力学的基本原理和方法，内容包括土体中的应力计算、地基沉降计算、饱和土的固结理论、土的抗剪强度、土压力、土坡稳定性分析和地基承载力等七个部分。编写过程中参考了国内外著名院校的土力学教材，融入了作者多年从事土力学教学的经验。全书力求内容丰富、全面，文字简洁。

在本书的编写过程中得到了吉林大学教务处和建设工程学院的大力支持，也得到了岩土工程系肖树芳教授、王清教授关心，在此一并表示感谢。

书中疏漏之处和错误在所难免，敬请读者批评指正！

编者

2002 年 12 月于长春

目 录

第 0 章 绪言	1
0.1 土力学的研究对象及研究内容	1
0.2 土力学的发展简史	2
0.3 课程的特点及学习方法	4
第 1 章 土体中的应力	5
1.1 概述	5
1.1.1 应力-应变关系的假定	5
1.1.2 地基中的几种应力状态	6
1.1.3 土力学中应力符号的规定	7
1.2 土的有效应力原理	7
1.3 自重应力	9
1.3.1 竖向自重应力	9
1.3.2 水平向自重应力	10
1.4 基底压力	11
1.4.1 轴心荷载作用下的基底压力	12
1.4.2 偏心荷载作用下的基底压力	12
1.4.3 基底附加压力	13
1.5 地基附加应力	14
1.5.1 竖向集中荷载作用下的地基附加应力	14
1.5.2 矩形荷载作用下的地基附加应力	17
1.5.3 竖向均布圆形荷载作用下的地基附加应力	22
1.5.4 条形荷载作用的地基附加应力	23
1.6 非均质地基中的附加应力	28
1.6.1 双层地基中应力的集中和扩散	28
1.6.2 变形模量随深度增大的地基	29
1.6.3 各向异性地基	30
习题	30
第 2 章 地基沉降计算	32
2.1 土的压缩性及其参数	32
2.1.1 压缩试验及其参数	32
2.1.2 载荷试验与土的变形模量	34
2.1.3 变形模量与压缩模量的关系	34

2.2 单向分层总和法	35
2.2.1 计算原理	35
2.2.2 地基沉降计算步骤	37
2.3 《规范》推荐的沉降计算方法	39
2.3.1 计算原理	39
2.3.2 公式	40
2.3.3 地基变形计算深度	43
2.4 相邻荷载对地基沉降的影响	44
2.5 应力历史对地基沉降的影响	44
2.5.1 土的固结状态	44
2.5.2 先期固结压力的确定	45
2.5.3 现场压缩曲线的推求	46
2.5.4 考虑应力历史的沉降计算	47
2.6 地基沉降弹性力学计算方法	50
2.6.1 柔性荷载下的地基沉降	50
2.6.2 刚性基础的沉降	52
2.7 考虑三维应力的沉降计算	54
2.8 建筑地基变形允许值	54
习题	56
第3章 饱和土的固结理论	58
3.1 土的渗透性及渗透作用下的应力状态	58
3.1.1 描述土渗透性的达西定律	58
3.1.2 土的渗透系数的测定	59
3.1.3 渗流作用下的应力状态	63
3.2 饱和黏性土的一维固结理论	65
3.2.1 渗透固结模型	65
3.2.2 渗透固结微分方程的建立及其求解	67
3.2.3 固结度计算	69
3.2.4 固结系数的测定	71
3.3 地基沉降与时间关系	74
3.3.1 渗透固结沉降与时间关系	74
3.3.2 沉降与时间关系的经验估算法	76
3.4 三维应力状态下的变形与地基沉降发展	76
3.4.1 三维应力状态下的变形	76
3.4.2 瞬时沉降计算	78
3.4.3 固结沉降计算	79
3.4.4 次固结沉降计算	80
3.5 多维渗透固结模型	81

3.5.1 太沙基-伦杜立克固结方程	81
3.5.2 多维轴对称固结问题	83
3.5.3 比奥固结模型	84
3.6 黏弹性固结模型	87
习题	88
第4章 土的抗剪强度	90
4.1 莫尔-库伦强度理论	90
4.2 土中一点极限平衡条件	91
4.3 土的抗剪强度试验	94
4.3.1 直接剪切试验	94
4.3.2 三轴剪切试验	95
4.3.3 单轴压缩试验	97
4.3.4 原位十字板试验	97
4.4 应力路径	98
4.5 孔隙压力系数	101
4.5.1 等向应力作用下的孔隙水压力	102
4.5.2 偏应力作用下的孔隙水压力	102
4.6 黏性土的剪切特性	103
4.6.1 不固结不排水抗剪强度	104
4.6.2 固结不排水抗剪强度	105
4.6.3 固结排水抗剪强度	106
4.6.4 抗剪强度指标的取值	110
4.7 无黏性土的剪切特性	111
习题	114
第5章 土压力	115
5.1 挡土结构物类型及其土压力	115
5.1.1 挡土墙类型	115
5.1.2 土压力	116
5.2 静止土压力计算	117
5.3 朗肯土压力理论	118
5.3.1 主动土压力	118
5.3.2 被动土压力	120
5.3.3 几种情况下的土压力计算	122
5.4 库伦土压力理论	128
5.4.1 主动土压力	128
5.4.2 被动土压力	132
5.4.3 黏性土土压力计算	133
5.4.4 库尔曼图解法	135

5.4.5 朗肯与库伦理论的比较	136
5.5 墙背形状变化时土压力计算	139
5.5.1 折线形墙背	139
5.5.2 设置卸荷平台的挡土墙	140
5.6 支撑结构物上的土压力计算	140
5.6.1 悬臂式板桩墙的土压力计算	140
5.6.2 锚碇式板桩墙的土压力计算	141
5.6.3 多支撑板桩墙的土压力计算	142
习题	143
第 6 章 土坡稳定性分析	144
6.1 概述	144
6.1.1 土坡稳定性分析的意义	144
6.1.2 影响土坡稳定性的因素	144
6.1.3 土坡稳定性分析方法	145
6.2 无黏性土坡的稳定性分析	145
6.2.1 干土坡	145
6.2.2 有渗流作用的土坡	146
6.3 黏性土土坡稳定性分析	147
6.3.1 土坡圆弧滑动体的整体稳定分析	147
6.3.2 瑞典条分法	153
6.3.3 毕肖普法	155
6.3.4 简布法	158
6.4 不平衡推力传递法	160
6.5 复合滑动面土坡稳定分析法	162
6.6 土坡稳定性分析的几个问题	163
6.6.1 土的抗剪强度指标的选用	163
6.6.2 坡顶开裂	164
6.6.3 成层土及超载	164
6.6.4 渗流对土坡的影响	164
6.6.5 地震作用对土坡稳定性的影响	165
习题	166
第 7 章 地基承载力	168
7.1 地基破坏模式	168
7.1.1 竖向荷载作用下地基破坏模式	168
7.1.2 倾斜荷载作用下地基破坏模式	169
7.2 按地基塑性区确定承载力	170
7.2.1 塑性变形区的范围	170
7.2.2 临塑荷载	171

7.2.3 临界荷载·····	172
7.3 按极限荷载确定地基承载力·····	174
7.3.1 普朗特-赖斯纳公式·····	174
7.3.2 太沙基公式·····	176
7.3.3 普遍极限荷载公式·····	178
7.3.4 斯开普顿公式·····	182
7.3.5 安全系数的选用·····	183
7.3.6 影响极限荷载的因素·····	184
7.4 按原位试验确定地基承载力·····	185
7.4.1 现场载荷试验·····	185
7.4.2 动力触探试验·····	186
7.4.3 静力触探试验·····	187
7.5 按地区经验确定地基承载力·····	187
7.6 地基整体稳定性验算·····	191
7.6.1 表层滑动稳定验算·····	191
7.6.2 深层滑动稳定验算·····	192
7.6.3 斜坡上的结构物地基稳定验算·····	193
习题·····	193
附录·····	195
参考文献·····	197

第0章 绪论

0.1 土力学的研究对象及研究内容

建筑物一般由上部结构和基础两部分组成。基础是连接上部结构和地基的桥梁。由于建筑物的修建而在基础以下一定范围内的原有应力状态发生了改变的地层，称为地基。如图 0-1 所示，上部结构、基础和地基三者之间相互联系、相互影响，共同构成一个整体。组成地基的介质可以是土，也可以是岩石。土力学所研究的对象是前者的“土”，而后者岩石将属于“岩石力学”所研究的内容。

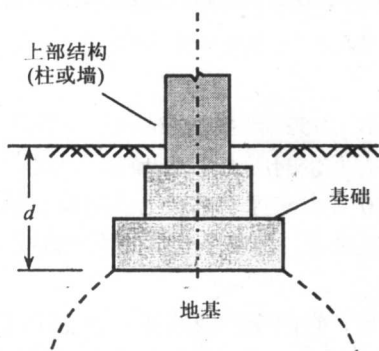


图 0-1 地基与基础

在工程建设中，土往往是作为各种建筑物的地基，用来支撑由建筑物通过基础传来的荷载，例如在土层上修建房屋、桥梁等；而像路堤、土坝等土工构筑物，土是作为建筑材料被使用的；此外，如隧道、涵洞及地下建筑等，土是作为建筑物周围的介质或环境。

土是由地壳表层的岩石经受风化、搬运、沉积等综合作用的自然历史产物，是由固体颗粒和孔隙组成的松散集合体，颗粒之间存在孔隙，土颗粒之间没有或只有很弱的联结，故土的强度低，易变形。由于土成因不同，使土的性质也各有差异，其分布和性质复杂。另外土的性质极易受到外界环境如温度、湿度等因素的影响。

正是由于土具有这些特征，加上人们对其调查不清或研究不深，导致一些工程事故也屡见不鲜。例如著名的意大利比萨斜塔就是一个因地基不均匀沉降过大而导致塔身严重倾斜的典型例子（图 0-2）。比萨斜塔是一座 8 层圆柱形的建筑，全部用白色大理石砌成，塔高 55 米，重达 1.42 万吨。地基持力层为粉砂，其下为粉土和黏土层。于 1173 年动工兴建，建造中因塔身南倾而停工，以后时停时建，直至 1350 年才完工。此后塔身继续倾斜，至今南侧下沉近 3m，北侧下沉 1m 多，

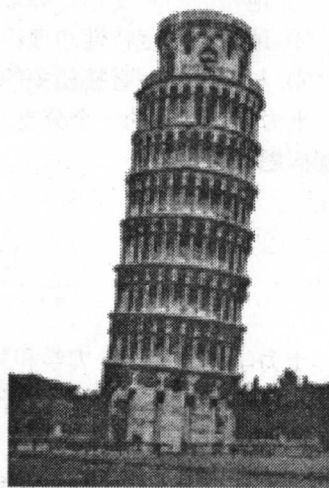


图 0-2 意大利比萨斜塔

南北两端沉降差达 1.8m, 塔顶离中心线已达斜度 5.2m, 倾斜 5.5°, 成为危险建筑物。尽管从 19 世纪开始, 意大利政府对斜塔采取了一系列的挽救措施, 曾花费近千万美元, 加固塔身, 采取纠偏和地基加固措施, 但效果并不明显。

加拿大特朗斯康谷仓是一个地基失稳的典型实例 (图 0-3)。该谷仓平面呈矩形, 南北向长 59.44m, 东西向宽 23.47m, 高 31.00m, 容积 36368m^3 。谷仓为圆筒仓, 每排 13 个圆仓, 5 排共计 65 个圆筒仓。谷仓基础为钢筋混凝土筏板基础, 厚度 61cm, 埋深 3.66m。谷仓于 1911 年动工, 1913 年完工, 空仓自重 20000T, 相当于装满谷物后满载总重量的 42.5%。1913 年 9 月装谷物, 10 月 17 日当谷仓装了 31822m^3 谷物时, 发现 1h 内竖向沉降达 30.5cm, 结构物向西倾斜, 并在 24h 内谷仓倾斜, 倾斜度离垂线达 $26^\circ 53'$, 谷仓西端下沉 7.32m, 东端上抬 1.52m。1952 年经勘察试验与计算, 谷仓地基实际承载力为 193.8~276.6kPa, 远小于谷仓破坏时发生的压力 329.4kPa, 因此, 谷仓地基因超载发生强度破坏而滑动。事后在下面做了 70 多个支撑于基岩上的混凝土墩, 使用 388 个 50T 千斤顶以及支撑系统, 才把仓体逐渐纠正过来, 但整个仓体的位置比原来降低了 4 米。

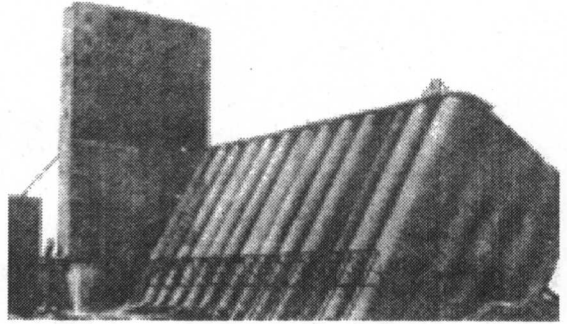


图 0-3 加拿大特朗斯康谷仓

由上述实例可见, 地基在整个建筑中起着关键作用, 它的变形或破坏都直接影响到整个结构的安全和使用。所以在建筑地基基础的设计和计算中, 首要的任务必须研究土的力学性状及其与建筑物相互作用的力学过程。或者具体地说, 土力学的研究的主要内容是:

- (1) 土的力学性质;
- (2) 地基应力和变形计算理论, 研究地基在受到荷载作用后的变形规律;
- (3) 地基的强度特性和理论;
- (4) 与工程实践直接相关的地基稳定性、土坡稳定性和土压力等问题。

土力学是力学的一个分支, 是为解决建筑物的地基基础、土工建筑物和地下结构物的工程问题服务的。

0.2 土力学的发展简史

土力学的萌芽 土力学和其它学科一样是人们长期生产实践的产物。人类自古以来就广泛利用土作为建筑物地基和建筑材料。如劳动人民很早就利用土来防治洪水, 古代的大型建筑如埃及的金字塔、著世闻名的万里长城、南北大运河、黄河大堤、隋朝修建的河北省赵州桥以及宏伟的宫殿、寺庙、宝塔等的成功建造, 这些都为土力学的形成积累了丰富的经验; 具有重要的科学价值。这一时期, 人们对土力学的认识也只是萌芽状态。

古典土力学 直到 18 世纪中叶,随着大量建筑物的兴建,促使人们对土作进一步的研究,开始对积累的经验作理论上的解释。1773 年,法国科学家库伦(Coulomb C A)发表了著名的滑动楔体理论,假定挡土墙后的土体出现一楔体,研究楔体上力的平衡而求取主动土压力和被动土压力。接着,库伦于 1776 年又发表了土的抗剪强度理论。

进入 19 世纪 50 年代,很多学者致力于土压力和渗流方面的研究。1856 年法国工程师达西(Darcy H)在研究砂土透水性的基础上,提出了著名的达西定律。1857 年英国朗肯(Rankine W J M)假定挡土墙后土体为均匀的半无限空间体,应用塑性理论来解土压力问题。这一土压力理论与库伦土压力理论统称古典土压力理论。在土体的应力分布与计算方面,1885 年布辛奈斯克(Boussinesq J)在研究半无限空间体表面作用有集中力的情况下,提出了土中应力的解析解,称为布辛奈斯克课题,它是各种竖直分布荷载下地基应力计算的基础。以后,很多学者对土力学的专门课题进行了研究,如 1916 年,由瑞典彼得森(Petterson K E)首先提出,继而由美国泰勒(Taylor D W)和瑞典费伦纽斯(Fellenius W)等进一步发展了的圆弧滑动法,该方法被广泛用于土坡稳定问题的分析。

1920 年法国普朗特(Prandtl L)发表了地基滑动面计算的数学公式,至今仍是计算地基承载力的基本原理。此后,太沙基(Terzaghi K, 1943, 1967)、汉森(Hansen J B, 1961)、魏锡克(Vesic A S, 1970)、斯开普顿(Skempton, 1951)等相应提出了地基极限承载力的计算公式。

1925 年太沙基编著的《土力学》,在总结实践经验和大量试验的基础上系统论述了土力学中若干重要问题,提出了著名的土的有效应力原理和固结理论,对土力学做出了突出贡献,也标志了土力学真正成为一门独立学科。

现代土力学 20 世纪 50、60 年代,基本上处于对土力学理论和技术完善和发展阶段。1955 年毕肖普(Bishop A W)提出土坡稳定性计算中考虑竖向条间力的方法,应用有效强度指标计算土坡稳定性。20 世纪 50 年代后期,简布(Janbu N)与摩根斯坦(Morgenstern N R)等人相继提出了考虑条间力,滑动面取任意形状的土坡稳定计算方法,在强度理论、强度计算等方面进一步发展了莫尔-库伦准则。在土压力和承载力方面,索科洛夫斯基将古典塑性理论引进了土力学,在散体极限平衡方面,有关地基、土坡和挡土墙的稳定分析方面,都获得了严格的理论和数值解。

电子计算机的问世和应用,使土力学进入了全新的发展阶段。新的非线性应力、应变关系和应力应变模型(如邓肯-张模型、剑桥模型)的建立,土的微观结构的研究;费莱德伦德(Fredlund D G)以及我国众多学者,对于非饱和土的研究,将土的基本特性、有效应力原理、固结理论、土的动力特性以及流变学的研究推向了新的阶段。

我国在土力学方面研究成果卓著,陈宗基关于土的微观结构的研究、黄文熙教授关于土的硬化模型、南科院建立的土的本构关系模型等都是对岩土工程的贡献。我国无论是关于土的基本性质的研究,还是原位测试技术,无论是土力学的理论,还是地基基础工程实践,都取得了宝贵的经验。特别是近年来,大型工程的兴建,为土力学的应用提供了广阔的天地。

然而,越来越多的人认识到,土力学的实际应用离不开经验;许多实际问题不但不能用经典土力学理论无法解释,就连现有的非线性和弹塑性本构理论也无能为力;室内土样

试验的结果又常常不能反映现场的实际情况，这就迫使人们寻求解决实际土力学问题的新思路、新的测试技术，而计算机技术的迅速发展，将为未来土力学的发展提供强大的支持。

0.3 课程的特点及学习方法

土是自然历史的产物，其物理力学性质复杂而多变。在研究土的力学性质时，必须注意土的成因、微观结构和宏观的特征、边界条件及自然环境的变化等。根据不同地区土的特点，合理地选用符合实际的测试手段和试验方法，正确选用有关指标和参数，不断完善理论公式，既重视所运用的基础理论，更要重视工程实践，做到理论和实践相结合。

土力学是基于土的基本性质，利用力学、数学知识和土工试验、现场原位测试手段来研究土的应力-应变关系和强度机制，是一门偏于计算的理论课程。数学、力学是建立土力学计算理论和方法的重要手段，而测试技术的不断改进和计算机技术的发展，对发展土力学理论尤为重要。因此，在学习工程岩土学的基础上，需要结合工程力学、弹性力学等知识，掌握土的应力、变形、边坡稳定性、地基承载力等土力学基本原理和计算方法，并重视新技术、新方法，为工程实践中解决地基基础及岩土工程问题打下坚实的基础。

第1章 土体中的应力

1.1 概 述

建筑物建造之前,地基中存在来自土体本身重量的自重应力;而修建后,建筑物的荷重通过基础底面传递给地基,使地基原有应力状态发生改变,并增加了一个附加的应力,从而使地基产生变形。若荷重过大,则会使地基的变形过大,甚至会发生地基失稳,从而影响建筑物的正常使用。因此,了解地基土中各点应力的大小及其分布的规律对定量分析建筑物地基变形和稳定性具有重要意义。

土体中的应力主要包括:

- (1) 由土体自身重量产生的自重应力;
- (2) 由建筑物荷载及其它外荷在土体中引起的附加应力;
- (3) 土体中渗透水流引起的渗流应力。

本章只介绍自重应力和附加应力,有关渗透应力在第三章中介绍。

1.1.1 应力-应变关系的假定

土体中的应力分布,主要取决于土的应力-应变关系。土的真实应力-应变关系是相当复杂的,工程实用中计算地基应力时,常视土为线弹性体,即假设其应力与应变呈线性关系,服从广义虎克定律。实践表明这种用经典弹性力学理论计算土中应力的简化方法能够满足一般工程设计的要求。

关于连续介质问题 土是一种多相松散集合体,并非连续介质。因此,研究土体内部微观受力情况时,必须把土当成散粒状的多相体来看待;而当研究宏观土体的受力问题时,土体的尺寸远远大于土颗粒的尺寸,就可以把土颗粒和孔隙混在一起,视土体为连续体,从平均应力的概念出发,用一般材料力学的方法来定义土中的应力。

关于线弹性体问题 理想弹性体的应力与应变成正比线性关系,且应力卸除后变形可以完全恢复。土则不是纯弹性材料而是弹塑性材料,它的应力-应变关系是非线性的和弹塑性的。从图1-1可见,即使在很低的应力情况下,土的应力-应变关系也表现出了曲线特性,而且在应力卸除后,应变也不能完全恢复。考虑到一般建筑物荷载在地基中引起的应力增量不是很大,土中尚未形成塑性破坏区或塑性破坏区很小,故将土的应力-应变关系简化为直线,用弹性理论

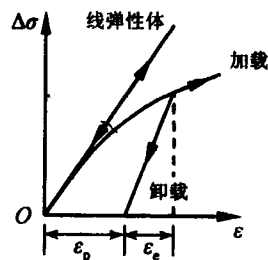


图 1-1 土的应力-应变关系
 ϵ_e ——弹性应变; ϵ_p ——塑性应变

求解土中的应力分布。

关于均质等向问题 所谓均质,是指受力体各点的性质相同;等向则是指在同一点处的各个方向上性质相同。天然地基往往是由多层土所组成,而且常常是各向异性的,因此,视土体为均质等向将带来误差。但当土层性质变化不大时,这种假设对竖直应力分布引起的误差,通常也在容许范围之内。若土层性质变化较大时,就要考虑非均质或各向异性的影响。

1.1.2 地基中的几种应力状态

计算地基应力时,一般都将地基当作半无限空间弹性体来考虑,即把地基看作是一个具有水平界面、深度和广度都无限大的空间弹性体。常见的地基中的应力状态有如下三种类型:

三维应力状态(空间应力状态) 在局部荷载作用下,地基中的应力状态均属三维应力状态。三维应力状态是建筑物中最普遍的一种应力状态,例如单独柱基础下地基中各点应力就是典型的三维空间应力状态(图 1-2),此时,每一点的应力都是三个坐标 x 、 y 、 z 的函数,每一点的应力状态都可用 9 个应力分量(独立的有 6 个)来表示,其矩阵形式为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

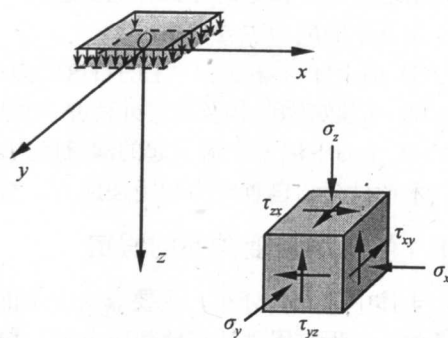


图 1-2 空间应力状态

二维应变状态(平面应变状态) 由于土不能切成薄片受力,故土中二维问题往往都是平面应变问题而不是平面应力问题。当建筑物基础一个方向的尺寸远比另一个方向的尺寸大,且每个横截面上的应力大小和分布形式均相同时,在地基中引起的应力状态,即可简化为二维应变状态,堤坝或挡土墙下地基中的应力状态就属于这一类(图 1-3)。这时沿着长度方向切出的任一 Oxz 截面都可以认为是

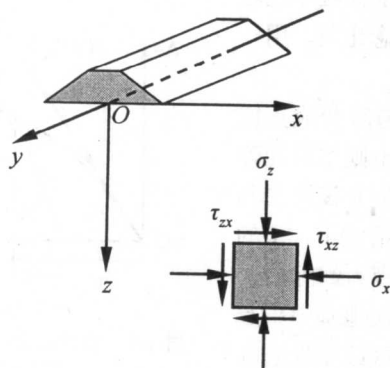


图 1-3 平面应力状态

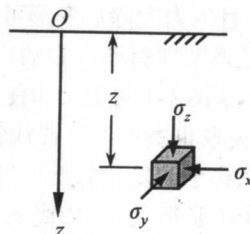


图 1-4 侧限应力状态

对称面, 应力分量只是 x 、 z 两个坐标的函数, 并且沿 y 方向的应变 $\varepsilon_y = 0$, 由于对称性, $\tau_{yx} = \tau_{yz} = 0$ 。这种应力状态的应力矩阵可表示为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \tau_{xz} \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ \tau_{xz} & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

侧限应力状态 侧限应力状态是指侧向应变为零的一种应力状态, 地基在自重作用下的应力状态即属于此种应力类型(图 1-4)。由于把地基视为半无限弹性体, 因此, 同一深度 z 处的土单元受力条件均相同, 土体不可能发生侧向变形, 而只能发生竖向的变形; 且任何竖直面都是对称面, 故在任何竖直面和水平面上都不会有剪应力存在, 即 $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, 于是应力矩阵变为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

根据 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ 的边界条件, 可知 $\sigma_x = \sigma_y$, 并与 σ_z 成正比。

1.1.3 土力学中应力符号的规定

土不同于一般工程材料, 一般不能承受拉应力。在土中出现拉应力的情况很少, 故土力学中规定: 法向应力, 以压为正, 以拉为负。剪应力的正负号的规定是: 当剪应力作用面上的法向应力方向与坐标轴的正方向一致时, 剪应力的方向与坐标轴正方向一致为正, 反之为负; 当剪应力作用面上的法向应力方向与坐标轴的正方向相反时, 剪应力的方向与坐标轴正方向相反为正, 反之为负。

1.2 土的有效应力原理

在外荷作用下土体中引起的应力是通过颗粒间的接触和孔隙中的水或气来传递的。由颗粒间接触点传递的应力, 会使土的颗粒产生位移, 引起土体的变形和强度的变化。这种通过固体颗粒间传递的粒间应力, 称为有效应力。而由孔隙水传递的应力, 称孔隙水压力, 它服从于静水压力分布规律。由于孔隙水在土中一点各方向产生的压力相等, 它只能压缩土颗粒本身但不能使土粒产生位移(土粒本身的压缩量是可以忽略的), 这种不能直接引起土体变形和强度变化的孔隙水压力, 又称中性应力。

如图 1-5 所示, $a-a$ 为饱和单元土体的一水平截面, 其面积为 A , 截面上作用总应力为 σ 。在水平截面 $a-a$ 处, 土颗粒接触面间的作用法向应力为 σ_s , 各颗粒间接触面积之和为 A_s 。孔隙内的水压力为 u_w , 相应的作用面积为 A_w 。由此可以建立力的平衡条件:

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u_w A_w \quad (1-1)$$

式 (1-1) 可写成

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u_w (A - A_s)$$

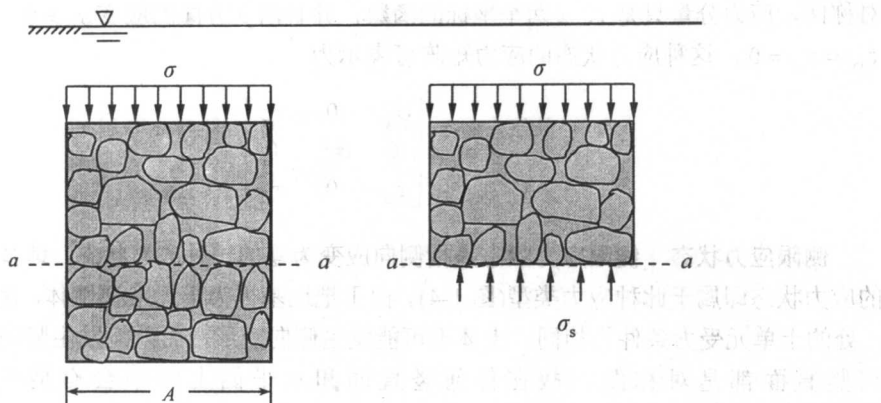


图 1-5 饱和土体单元

或

$$\sigma = \frac{\sigma_s A_s}{A} + u_w \left(1 - \frac{A_s}{A} \right) \quad (1-2)$$

由于颗粒间的接触面积很小, 故 $\frac{A_s}{A}$ 可忽略不计, 而 $\frac{\sigma_s A_s}{A}$ 实际上是土颗粒间的接触应力在截面 A 上的平均应力, 称为土的有效应力, 通常表示为 σ' 。若把孔隙水压力 u_w 用 u 表示, 式 (1-2) 可以写成

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1-3)$$

式 (1-3) 说明了单位面积上的总应力等于有效应力和孔隙水压力之和。当总应力不变时, 土中孔隙水压力的增减, 势必导致有效应力的减增, 从而影响土体的变形和强度变化。这就是饱和土体的有效应力原理 (Terzaghi K, 1925), 是土力学的基本概念之一。它为土体变形及稳定性分析奠定了重要的理论基础。

对于非饱和土, 孔隙中除了水压力外, 还存在气体压力 u_a , 如图 1-6 所示, $b-b$ 截面上有

$$\sigma A = \sigma_s A_s + u_w A_w + u_a A_a \quad (1-4)$$

上式可写成

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_s A_s}{A} + u_w \frac{A_w}{A} + u_a \frac{A - A_w - A_s}{A} \\ &= \sigma' + u_a - (u_a - u_w) \frac{A_w}{A} - u_a \frac{A_s}{A} \end{aligned} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 等号右边的 $\frac{A_s}{A}$ 项可忽略不计, 于是上式可写成

$$\sigma = \sigma' + u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1-6)$$

式 (1-6) 是由毕肖普 (Bishop, 1955) 提出的, 认为总应力 σ 为孔隙水压力 u_w 、孔隙气

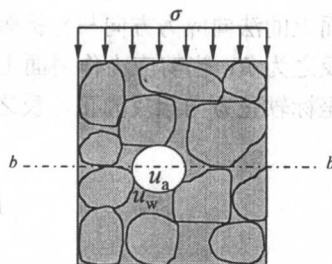


图 1-6 非饱和土体单元