



普通高等教育“十三五”应用型规划教材

土力学与地基基础

T U L I X U E Y U D I J I J I C H U

主 编 朱韶茹 潘桔椽



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十三五”应用型规划教材

土力学与地基基础

主 编	朱韶茹	潘棣椽	
副主编	杨丽平	易 凌	
参 编	岳欢欢	刘依莲	胡 帆

东南大学出版社

·南京·

内 容 提 要

《土力学与地基基础》从“土力学”和“地基基础”两个方面系统阐述了土的物理性质、土中应力计算、土的变形性质与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力与土坡稳定、地基承载力、浅基础设计、桩基础、区域性地基和地基处理,共 11 章内容。

本书依据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》所提出的知识单元和知识点,并主要参考《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)编写。内容广泛,实用性强,理论联系实际。

本书既可作为高等院校土木工程专业应用型本科教材,又可供土木工程相关专业,如建筑工程、岩土工程、工程管理、公路桥梁工程等专业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础 / 朱韶茹, 潘桔椽主编. — 南京:
东南大学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5641-7333-3

I. ①土… II. ①朱… ②潘… III. ①土力学 ②地基—基础(工程) IV. ①TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 171956 号

土力学与地基基础

出版发行: 东南大学出版社
社 址: 南京市四牌楼 2 号 邮编: 210096
出 版 人: 江建中
责任编辑: 史建农 戴坚敏
网 址: <http://www.seupress.com>
电子邮箱: press@seupress.com
经 销: 全国各地新华书店
印 刷: 常州市武进第三印刷有限公司
开 本: 787mm×1092mm 1/16
印 张: 17.5
字 数: 448 千字
版 次: 2017 年 8 月第 1 版
印 次: 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-5641-7333-3
印 数: 1—3 000 册
定 价: 46.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话:025-83791830

前 言

《土力学与地基基础》是高等学校土木工程本科专业的一门主干课程。随着城市建设的快速发展以及高层建筑、大型公共建筑、重型设备基础、城市地铁、越江越海隧道等工程的大量兴建,土力学理论与地基基础技术显得越来越重要。据统计,国内外发生的工程事故中,以地基基础领域的事故为最多,并且造成的损失和对社会的不良影响越来越大,事故处理的成本与难度也在不断增加,因此,土建类专业的学生及相关工程技术人员应重视本学科知识的学习。

编者根据课程的定位和培养目标,以应用型本科教育为导向进行课程内容编著,立足于实际能力的培养,全书由浅入深、概念清楚、层次分明、重点突出,注重实用性内容,并附有思考题和习题,以巩固学生的学习。本书注重反映地基基础领域的新规范、新规程及推广应用的新技术、新工艺。本书采用的规范、规程有《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001(2009 修订))、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)、《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)等。

本书共 11 章,由武汉华夏理工学院朱韶茹、潘栳橡主编,武汉华夏理工学院杨丽平、江西理工大学应用科学学院易凌副主编,武汉华夏理工学院岳欢欢、刘依莲、胡帆参编。具体编写分工如下:朱韶茹编写第 4、5、6、11 章,潘栳橡编写第 1 章,杨丽平编写第 9 章,易凌编写第 2 章,岳欢欢编写第 7、8 章,刘依莲编写第 3 章,胡帆编写第 10 章。全书由朱韶茹统稿完成。

由于时间和编者水平有限,书中不妥之处敬请读者批评指正。

编者

2017 年 5 月

目 录

1	绪论	1
1.1	土力学与地基基础的概念	1
1.2	国内外土木工程事故案例及对策	3
1.3	本课程的内容和特点	7
2	土的物理性质	9
2.1	土的三相组成	9
2.2	土的结构和构造	14
2.3	土的物理性质指标	16
2.4	土的物理性质	21
2.5	土的渗透及渗流	25
2.6	土的压实原理	30
3	土中应力计算	35
3.1	土的自重应力	35
3.2	基底压力	37
3.3	地基附加应力	40
3.4	有效应力原理	58
4	土的变形性质与地基沉降计算	61
4.1	土的压缩性	61
4.2	地基最终沉降量计算	66
4.3	应力历史对地基沉降的影响	77
4.4	地基沉降与时间的关系	78
4.5	地基变形特征与建筑物沉降观测	84
5	土的抗剪强度	90
5.1	土的抗剪强度	90
5.2	抗剪强度的测定方法	93
5.3	孔隙压力系数	100
5.4	土的抗剪强度指标	102
6	土压力与土坡稳定	109
6.1	土压力概述	109
6.2	土压力计算	110
6.3	挡土墙设计	122

6.4	土坡稳定分析	127
7	地基承载力	135
7.1	地基破坏形式及地基承载力	135
7.2	浅基础地基极限承载力	138
7.3	地基承载力的确定方法	142
8	浅基础设计	148
8.1	地基基础的基本设计原则	148
8.2	浅基础的类型	152
8.3	基础埋深的选择	156
8.4	基础底面尺寸的确定	161
8.5	地基变形验算	168
8.6	无筋扩展基础的设计	170
8.7	墙下钢筋混凝土条形基础设计	173
8.8	柱下钢筋混凝土独立基础设计	177
8.9	减轻不均匀沉降的措施	184
9	桩基础	190
9.1	概述	190
9.2	桩的分类	193
9.3	单桩在竖向荷载下的性状	197
9.4	单桩竖向承载力	199
9.5	群桩基础	207
9.6	桩基础的设计	213
10	区域性地基	230
10.1	概述	230
10.2	湿陷性黄土地基	230
10.3	膨胀土地基	233
10.4	红黏土地基	238
10.5	山区地基	239
11	地基处理	243
11.1	概述	243
11.2	复合地基理论	246
11.3	换土垫层法	251
11.4	重锤夯实与强夯法	255
11.5	碎(砂)石桩法	257
11.6	排水固结法	259
11.7	高压喷射注浆法与深层搅拌法	265
11.8	水泥土搅拌桩法	267
11.9	土工合成材料	269
11.10	托换技术	271
	参考文献	274

1.1 土力学与地基基础的概念

1.1.1 土与土力学

土是在第四纪地质历史时期地壳表层母岩经受强烈风化作用后所形成的大小不等的颗粒状堆积物,是覆盖于地壳最表面的一种松散的或松软的物质。土是由固体颗粒、液体水和气体组成的一种三相体。固体颗粒之间没有连接强度或连接强度远小于颗粒本身的强度是土有别于其他连续介质的一大特点。因此,土体具有以下3个特性。

1) 强度低

土体发生破坏,是剪应力过大所致,因此土的强度是指抗剪强度。土的抗剪强度由摩擦力和黏阻力组成,其强度大大低于钢材、混凝土、砖石、木材等的强度。

2) 变形大

土颗粒之间联结很弱或无联结,在荷载作用下土颗粒很容易发生相对位移,土中水和气体从孔隙排出而使孔隙体积减小,所以土的压缩变形较大。而且,土的变形并不是在加荷(载)瞬间就完成的,而是要经历一定时间才能完成。除了弹性变形外,还有部分不可恢复的塑性变形存在。

3) 透水性大

土颗粒之间具有无数连通的孔隙,形成水气通道,使水可以通过孔隙流动。水在土体内流动称为渗透,又称渗流。砂、石的孔隙大,透水性很大;黏性土的孔隙小,透水性较小。与混凝土等材料相比,土的渗透性很强。

土在地球表面分布极广,它与工程建设关系密切。在工程建设中,土被广泛用作各种建筑物的地基或材料,或构成建筑物周围的环境或护层。在土层上修建工业厂房、民用住宅、涵管、桥梁、码头等时,土是作为承受上述结构物荷载的地基;修筑土质堤坝、路基等时,土又被用做建筑材料,在我国的边远和不发达地区,目前仍有大量的土木结构类型的农舍存在。

总之,土的性质对于工程建设的质量、性状等具有直接的重大影响。土力学是以传统的工程力学和地质学的知识为基础,研究与土木工程有关的土中应力、变形、强度和稳定性的应用力学分支。此外,还要用专门的土工试验技术来研究土的物理化学特性以及土的强度、变形和渗透等特殊力学特性。

1.1.2 地基和基础

支承基础的土体或岩体,称为地基。任何建筑物或构筑物都是建造在地层上的,地基是地层的部分。基础上的压力通过一定深度和宽度的土体或岩体来承担,这部分土体或岩体就是地基。由于土的压缩性大,强度小,因而在绝大多数情况下上部结构荷载不能直接通过墙、柱等传给下部土层(地基),而必须在墙、柱、底梁等和地基接触处适当扩大尺寸,把荷载扩散以后安全地传递给地基,这种位于建筑物墙、柱、底梁以下,经过适当扩大尺寸的建筑物最下部结构称为基础。直接和基础底面接触的土层,称为基础的持力层,简称持力层。土层、地基和基础之间的关系如图 1-1 所示。

土的性质极其复杂。为了保证建筑物的安全,地基需要满足强度、刚度和稳定性条件。强度条件要求地基不发生剪切破坏,即作用于地基上的荷载不超过地基的承载能力;刚度条件就是地基在建筑物荷载作用下的变形不能太大,从而保证建筑物不因地基变形而发生开裂、损坏或者影响正常使用;稳定性条件要求在建筑物使用期间,地基不应发生开裂、滑移和塌陷等有害地质现象,基坑施工过程中开挖边坡不发生滑移。

当地层条件较好、地基土的力学性能较好、能满足地基基础设计对地基的要求时,建筑物的基础被直接设置在天然地层上,这样的地基被称为天然地基;而当地层条件较差,地基土强度指标较低,压缩性较大,无法满足地基基础设计对地基的承载力和变形要求时,常需要对基础底面以下一定深度范围内的地基土体进行加固或处理,这种部分经过人工改造的地基被称为人工地基。

基础底面到地面的距离,称为基础的埋置深度。根据埋置深度的不同,可将基础分为浅基础和深基础两类。通常把埋置深度小于或等于其底面宽度的基础,称为浅基础,如柱下独立基础[图 1-2(a)]、墙下条形基础、筏形基础、箱形基础等;而对于浅层土质不良,需要利用深处良

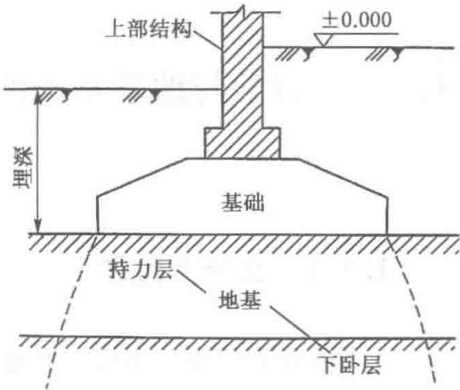
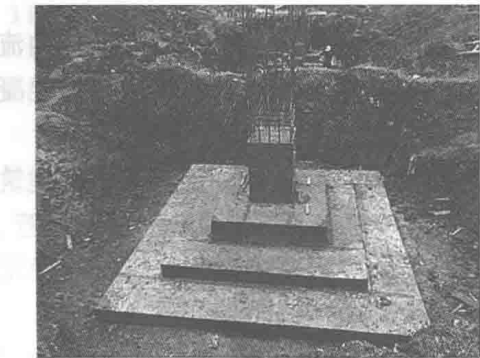
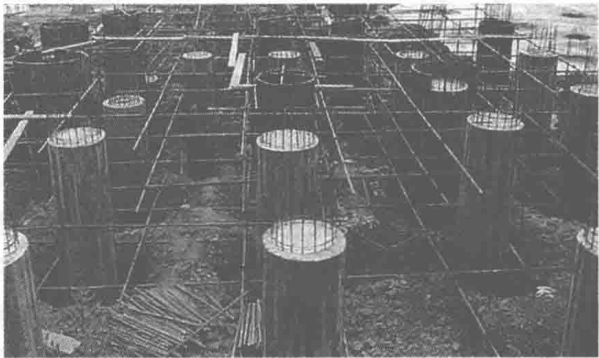


图 1-1 地基及基础示意图



(a) 柱下独立基础



(b) 桩基础

图 1-2 典型的基础形式

好地层的承载能力,采用专门施工方法和机具建造的基础,称为深基础,如桩基础[图 1-2 (b)]、沉井基础、沉箱基础和地下连续墙等。

地基和基础是建筑物的根基,又属于隐蔽工程,它的勘察、设计和施工质量直接关系到建筑物的安危。工程实践表明,建筑物的事故很多都与地基基础问题有关,而且一旦发生地基基础事故,往往后果严重,补救十分困难,有些即使可以补救,但其加固修复工程所需的费用也非常高。

1.2 国内外土木工程事故案例及对策

地基与基础是建筑物的重要组成部分,又属于地下隐蔽工程,一旦发生事故,难以补救,有时会造成重大经济损失甚至人员伤亡。此外,基础工程的费用可占建筑物总造价的 10%~30%。实践证明,建筑工程实践中出现的很多事故均与地基基础有关。随着高层建筑物的兴起,深基础工程增多,这对地基基础的设计和施工提出了更高的要求。

1.2.1 地基工程事故类别

地基工程事故,按其性质可分为强度和变形两大问题。地基强度问题引起的地基事故主要表现在地基承载力不足导致地基丧失稳定性和斜坡丧失稳定性两个方面。地基的变形问题引起的地基事故表现为地基过量变形或不均匀变形,使上部结构出现裂缝、倾斜,削弱和破坏了结构的整体性,并影响建筑物的正常使用,甚至导致建筑物倒塌。

1) 地基失稳事故

基底压力超过地基的承载力,使地基土发生剪切滑移破坏,地基便失稳了。地基失稳破坏,主要发生在软弱地基中。

斜坡失稳以滑坡形式出现。滑坡可以是缓慢的、长期的,也可以是突然发生的。滑坡规模差异很大,滑坡体积从数百立方米到数百万立方米,对工程危害极大。斜坡上和斜坡附近的房屋,因所处位置不同,所受到的危害也不相同,大致可以分为以下 3 类。

(1) 位于斜坡顶部的房屋。从顶部形成滑坡,土从房屋下挤出,地基土松动。房屋出现不均匀沉降,可导致开裂损坏或倾斜。

(2) 位于斜坡上部的房屋。滑坡发生时,房屋下的土发生移动,部分土绕过房屋基础移动,使房屋产生过大变形,导致结构破坏。

(3) 位于斜坡下部的房屋。房屋要经受滑动土体的侧压力。对房屋造成的危害程度与滑坡规模、移动速度有关。事故常常是灾难性的。

建筑施工中,深基坑的开挖,牵涉边坡稳定问题。要满足边坡稳定,方法之一是放坡开挖,但需要的施工场地很大,在城市内施工受到限制;方法之二是垂直开挖,边坡支护,占用场地小,适合城市工地。如果基坑支护不牢,会导致基坑事故或使周围建筑物受到不同程度的损害。

2) 地基变形事故

地基变形引起的不均匀沉降,对上部结构的影响主要体现在以下几个方面。

(1) 砖墙开裂。

(2) 砖柱断裂。

(3) 钢筋混凝土柱倾斜或开裂。

(4) 高层建筑或高耸构筑物倾斜。建在软土地基上的烟囱、水塔、油罐、储气柜等高耸构筑物,若采用天然地基,则产生倾斜的可能性较大。

1.2.2 地基失稳案例

地基失稳较典型的案例是特朗斯康谷仓事故。

加拿大特朗斯康谷仓,平面呈矩形,长度为 59.44 m,宽度为 23.47 m;谷仓高度为 31.00 m,总容积为 36 368 m³。每排 13 个圆形筒仓,共布置 5 排,总计 65 个筒仓构成一个整体。基础为钢筋混凝土筏形基础,其中筏板厚度为 61 cm,埋深 3.66 m。

谷仓于 1911 年开始施工,1913 年秋完工。谷仓自重 20 000 t,相当于装满谷物后满载总重量的 42.5%。1913 年 9 月起往谷仓装谷物,仔细地装载,使谷物均匀分布。10 月,当谷仓装了 31 822 m³ 谷物时,发现 1 小时内垂直沉降达 30.5 cm。结构物向西倾斜,并在 24 小时时间谷仓倾倒,倾斜度离垂线达 26°53'。谷仓西端下沉 7.32 m,东端上抬 1.52 m。整个谷仓倾斜 26°53',如图 1-3 所示。经过检查,钢筋混凝土筒仓除个别部位出现裂纹外,其余部分完好无损。

该工程未做岩土工程勘察,仅根据邻近工程基槽开挖试验结果进行设计。该基础下有厚达 16 m 的软土层,承载能力远低于设计采用值。在自重和稻谷重量共同作用下,基底实际压力远远大于基土的极限承载力,引起土体整体剪切滑移破坏,致使结构下陷、倾斜。为修复筒仓,在基础下设置了 70 多个支承于深 16 m 基岩上的混凝土墩,使用了 388 个千斤顶,逐渐将倾斜的筒仓纠正。补救工作是在倾斜谷仓底部水平巷道中进行的,新的基础在地表下深 10.36 m。经过纠倾处理后,谷仓于 1916 年起恢复使用。修复后的位置比原来降低了 4 m。

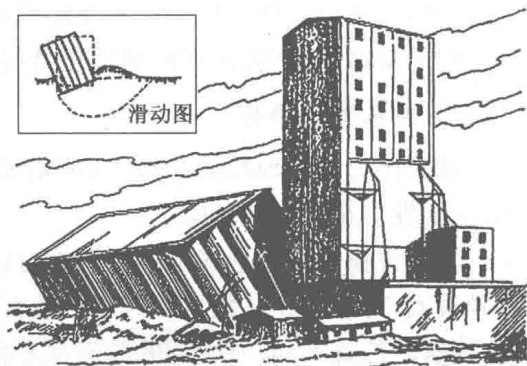


图 1-3 特朗斯康谷仓

1.2.3 斜坡失稳案例

斜坡失稳引起的地基事故典型的是香港宝城滑坡。

1972 年 7 月某日清晨,香港宝城路附近,20 000 m³ 残积土从山坡上下滑,巨大滑动体正好冲过一幢高层住宅——宝城大厦,顷刻间宝城大厦被冲毁倒塌并砸毁相邻一幢大楼一角的 5 层住宅,事故死亡 67 人。如图 1-4 所示。



图 1-4 香港宝城大厦

山坡上残积土本身强度较低,加之雨水入渗使其强度进一步大大降低,使得土体滑动力超过土的强度,于是山坡土体发生滑动。

1.2.4 地基变形案例

1) 比萨斜塔

比萨斜塔,位于意大利西部古城比萨市,石砌建筑,塔身为圆筒形,是比萨大教堂的钟楼,共 8 层,总高 55 m,如图 1-5 所示。

该塔于 1173 年破土动工,开始时,塔高设计为 100 m 左右,但动工五六年,后,塔身从 3 层开始倾斜,限于当时的技术水平,因不知原因而于 1178 年停工。1272 年重新开工,倾斜问题不能解决,1278 年又停工;1360 年再次复工,直到 1370 年全塔竣工。完工后还在持续倾斜,在其关闭之前,塔顶已南倾(即塔顶偏离垂直线)3.5 m。1990 年,意大利政府将其关闭,开始进行整修工作。该塔楼以斜闻名,伽利略曾在此做过自由落体的科学试验,现已成为意大利的重要旅游景点。

全塔总质量大约 14 500 t,塔北侧沉降超过 1 m,南侧下沉近 3 m,倾斜严重时塔顶偏离竖直中心线 5 m 多。这是典型的地基不均匀沉降导致的倾斜。1932 年做过一次纠偏处理,当时在塔基灌注了 1 000 t 水泥,但未能奏效。21 世纪初,经过科学家和工程技术人员的不懈努力,该塔的倾斜程度明显减小,加固取得成功。目前塔向南倾,南北两端沉降差 1.80 m,塔顶偏离中心线已达 5.27 m,倾斜 5.5° 。



图 1-5 比萨斜塔

2) 虎丘塔

虎丘塔(图 1-6)位于苏州市西北虎丘公园山顶,建成于 959~961 年,为七级八角形砖塔,塔底直径 13.66 m,全塔 7 层,高 47.5 m,重 63 000 kN。塔的平面呈八角形,由外壁、回廊与塔心三部分组成。虎丘塔全部砖砌,外形完全模仿楼阁式木塔。从明朝起,虎丘塔即已开始倾斜,至今,塔身最大倾角为 $3^{\circ}59'$,塔顶偏离中心线距离已达 2.31 m,而且底层塔身发生不少裂缝,被称为“中国第一斜塔”。1961 年,作为苏州最古老的建筑物被列为国家级保护文物。塔建成后由于历经战火沧桑、风雨侵蚀,使塔体严重损坏,为了使该名胜古迹安全留存,我国于 1956~1957 年对其进行了上部结构修缮,但修缮的结果使塔体重量增加了约 2 000 kN,同时加速了塔体的不均匀沉降,塔顶偏离中心线的距离由 1957 年的 1.7 m 发展到 1978 年的 2.31 m,并导致地层砌体产生局部破坏。后于 1983 年对该塔进行了基础托换,使其不均匀沉降得以控制。

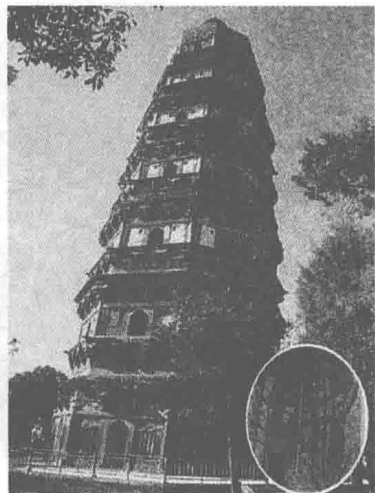


图 1-6 虎丘塔

虎丘塔倾斜的主要原因是坐落于不均匀粉质黏土层上,产生不均匀沉降。虎丘塔没有做扩大的基础,砖砌塔身垂直向下砌八皮砖,即埋深 0.5 m,直接置于块石填土人工地基上。估算塔重 63 000 kN,则地基单位面积压力高达 435 kPa,超过了地基承载力。塔倾斜后,使东北部位应力集中,超过砖体抗压强度而压裂。最后在塔四周建造一圈桩排式地下连续墙并对塔周围与塔基进行钻孔注浆和打设树根桩加固塔身,效果良好。

1.2.5 地基工程事故处理方法

出现地基工程事故的原因大致可归纳为岩土工程勘察失误、设计方案和计算错误、施工未按规定进行、环境发生变化、不合理使用等几个方面。地基事故发生后,首先应进行认真细致的调查研究,然后根据事故发生原因和类型,因地制宜地选择相应的基础托换方法。根据其原理不同可概括为下列 5 类:

(1) 基础扩大托换——减少基础底面压力。

(2) 基础加深托换——对原地基持力层卸荷,将基础上荷载传递到较好的新的持力层上。如坑式托换和桩式托换。

(3) 灌浆托换——对地基加固提高地基承载力。

(4) 纠偏托换——调整地基沉降,如迫降纠偏托换和顶升纠偏托换。

(5) 排水、支挡、减重和护坡等措施综合治理。

如果建筑物基础需要进行托换,在施工开始前,首先要对该建筑物被托换的安全性予以论证;其次,在建筑物基础托换过程中,还要借助于监测手段,来保证建筑物各部位之间不致产生过大的沉降差;第三要保证其邻近建筑物的安全性。

1.3 本课程的内容和特点

土力学及基础工程是土木建筑、公路、铁路、水利、地下建筑、采矿和岩土工程等有关专业的一门主要课程,属于专业基础课范畴。土力学是基础工程设计和施工技术的理论基础,而基础工程则是土力学与结构工程相结合的结果。它们二者构成本课程的完整体系。

1.3.1 土力学基本内容

土力学部分包括:土的工程性质指标的试验与设计参数确定方法,土的渗透、变形和强度稳定性的计算原理。土的工程性质指标包括物理性质指标和力学性质指标两类,物理指标是指用于定量描述土的组成、土的干湿、疏密与软硬程度的指标;力学性质指标主要是用于定量描述土的变形规律、强度规律和渗透规律的指标。测定这些指标的试验方法包括室内试验和原位测试两类,它们各有其特点和适用条件,学习土力学的理论知识的同时必须重视学习与掌握这些指标的试验测定方法,了解这些指标的适用条件,因此对主要的试验指标,在理论教学的过程中还要安排实验教学,学习土工试验的操作与数据整理方法。

1.3.2 基础工程基本内容

地基基础部分包括地基承载力、浅基础的设计、桩基础、区域性地基和地基处理。该部分内容主要是从地基基础的设计和施工方法进行阐述。

地基承载力包括:地基破坏形式与地基承载力、浅基础地基极限承载力、地基承载力的确定方法。

浅基础设计包括:地基基础的基本设计原则、浅基础的类型、基础埋深的选择、基础底面尺寸的确定、地基变形验算、无筋扩展基础的设计、墙下钢筋混凝土条形基础设计、柱下钢筋混凝土独立基础设计和减轻不均匀沉降的措施。

桩基础包括:桩的分类、单桩在竖向荷载下的性状、单桩竖向承载力、群桩基础和桩基础的设计。

区域性地基包括:湿陷性黄土地基、膨胀土地基、红黏土地基和山区地基。

地基处理包括:复合地基理论、换土垫层法、重锤夯实与强夯法、碎(砂)石桩法、排水固结法、高压喷射注浆法与深层搅拌法、水泥土搅拌桩法、土工合成材料和托换技术。

1.3.3 本学科的发展概况

土力学与地基基础是一项古老的学科和建筑工程技术。早在几千年前的人类建筑活动中,人们就懂得利用土进行建筑。西安新石器时代的半坡村遗址,就发现有土台和石础,这就是古代的“堂高三尺、茅茨土阶”的建筑。我国举世闻名的秦万里长城逾千百年而留存至今,充

分体现了我国古代劳动人民的高超水平。隋朝石工李春所修建成的赵州石拱桥,造型美观,至今安然无恙。桥台砌置于密实的粗砂层上,一千三百多年来估计沉降量约几厘米。现在验算其基底压力约 500~600 kPa,这与现代土力学理论给出的承载力值很接近。北宋初著名木工喻皓(公元 989 年)在建造开封开宝寺木塔时,考虑到当地多西北风,便特意使建于饱和土上的塔身稍向西北倾斜,设想在风力的长期断续作用下可以渐趋复正。可见当时的工匠已考虑到建筑物地基的沉降问题了。

上述一切证明,人类在其建筑工程实践中积累了丰富的基础工程设计、施工经验和知识,但是由于受到当时的生产实践规模和知识水平限制,相当长的历史时期内,地基基础仅作为一项建筑工程技术而停留在经验积累和感性认识阶段。

而作为本学科理论基础的土力学的发端,始于 18 世纪欧洲产业革命以后,水利、道路以及城市建设工程中大型建筑物的兴建,提出了大量与土的力学性态有关的问题并积累了不少成功经验和工程事故教训。特别是这些工程事故教训,使得原来按以往建设经验来指导工程的做法已无法适应当时的工程建设发展。这就促使人们寻求对许多类似的工程问题的理论解释,并要求在大量实践基础上建立起一定的理论来指导以后的工程实践。例如,17 世纪末期欧洲各国大规模的城堡建设推动了筑城学的发展并提出了墙后土压力问题,许多工程技术人员发表了多种墙后土压力的计算公式,为法国的库仑(Coulomb, C. A. 1773)提出著名的抗剪强度公式和土压力理论奠定了基础。19 世纪中叶开始,大规模的桥梁、铁路和公路建设推动了桩基和深基础的理论与施工方法的发展。路堑和路堤、运河渠道边坡、水坝等的建设,提出了土坡稳定性的分析问题。1856 年,法国工程师达西(H. Darcy)研究了砂土的透水性,创立了达西渗透公式;1857 年,英国学者朗肯(W. Jm. Rankine)建立了另一种土压力理论与库仑理论相辅相成;1885 年,法国科学家布辛内斯克(J. Boussinesq)提出了半无限弹性体中的应力分布计算公式,至今仍是地基中应力计算的主要方法。1922 年,瑞典学者 W. 费兰纽斯(Fellenius)提出了一种土坡稳定的分析方法。这一时期的理论研究为土力学发展成为一门独立学科奠定了基础。

从 20 世纪 20 年代起,不少学者发表了许多理论和系统的著作。1916 年瑞典彼得森提出了计算边坡稳定性的圆弧滑动法;1920 年法国普兰特发表了地基滑动面的数学公式;而最具代表意义的是 1925 年美国太沙基(K. Terzaghi)首次发表了《土力学》一书,这本著作比较系统地论述了若干重要的土力学问题,提出了著名的有效应力原理,至此,土力学开始真正地形成独立学科。

自 20 世纪 60 年代以来,随着电子计算机的出现和计算技术的高速发展,使土力学的研究进入了一个全新的阶段。现代土力学主要表现为 1 个模型(即本构模型)、3 个理论(即非饱和土的固结理论、液化破坏理论和逐渐破坏理论)、4 个分支(即理论土力学、计算土力学、实验土力学和应用土力学)。其中,理论土力学是龙头,计算土力学是筋脉,实验土力学是基础,应用土力学是动力。近年来,我国在工程地质勘察,室内及现场土工试验,地基处理新设备、新材料、新工艺的研究和应用方面取得了很大的进展。在大量理论研究与实践经验的基础上,有关基础工程的各种设计与施工规范或规程等也相应问世或日臻完善。当然,由于土性的复杂,目前的土力学地基基础理论尚需不断完善。

2.1 土的三相组成

土是由岩石风化生成的松散沉积物,其物质成分包括构成土骨架的矿物颗粒及填充在孔隙中的水和气体,形成所谓的三相体系,即固相(颗粒)、液相(水)和气相(空气)。特殊情况下,土由两相组成:干土由颗粒和气体组成,没有水;饱和土由颗粒和水组成,没有气体。土的三相组成物质的性质,相对含量以及土的构造,都会对土的物理力学性质产生影响。

2.1.1 土的固相颗粒(固相)

固体颗粒(固相)构成土的骨架,土粒大小与其颗粒形状、矿物成分及其组成情况对土物理力学性质影响很大。

1) 土的矿物成分

土的矿物成分主要取决于母岩的矿物成分及其所经受的风化作用。不同的矿物成分对土的性质有着不同的影响,通常,粗大土粒其矿物成分往往保持母岩未风化的原生矿物,而细小土粒主要是次生矿物等无机物质以及土生成过程中混入的有机质。因此,细粒土的矿物成分更为重要。

土的矿物成分可分为原生矿物和次生矿物。原生矿物是由岩浆在冷凝过程中形成的矿物,其矿物成分与母岩相同,常见的如石英、长石、云母等。一般较粗颗粒的漂石、卵石、圆砾等,都是由原生矿物组成的。由于其颗粒大,比表面积小(单位体积内颗粒的总表面积),与水的作用能力弱,其抗水性和抗风化作用都强,故工程性质比较稳定。其组成的土具有无黏性、强度高、压缩性较低的特征。

次生矿物是原生矿物经化学风化作用后形成的新矿物(例如黏土矿物)。它们颗粒细小,呈片状,是黏性土固相的主要成分,其矿物成分与母岩不相同。例如黏土矿物的蒙脱石、伊利石、高岭石等。由于其粒径非常小(小于 $2\text{ }\mu\text{m}$),具有很大的比表面积,与水的作用能力很强,能发生一系列复杂的物理、化学变化。上述 3 种黏土矿物的亲水性和膨胀性依次减弱。

2) 土粒粒组

自然界中的土都是由大小不同的土粒组成,大的有几十厘米,小的只有千分之几毫米;形

状也不一样,粗大土粒往往是岩石经物理风化作用形成的原岩碎屑,是物理化学性质比较稳定的原生矿物颗粒,其形状呈块状或粒状。细小土粒主要是化学风化作用形成的次生矿物颗粒和生成过程中介入的有机物质,其形状主要呈片状。这与土的矿物成分有关,也与土粒所经历的风化、搬运过程有关。

土粒的大小称为粒度,通常以粒径表示。工程上一般将大小相近、性质相似的土粒合并为组,这种按土粒粒径大小和工程性质归并、划分的组别称为粒组。而划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。对于粒组的划分方法,目前各个国家、各个部门并不统一。表 2-1 为一种常用的土粒粒组的划分方法。表中根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007),按规定的界限粒径 200 mm、60 mm、2 mm、0.075 mm 和 0.005 mm,将土粒粒组先粗分为巨粒、粗粒和细粒 3 个统称,再细分为 6 个粒组:漂石(块石)、卵石(碎石)、圆砾(角砾)、砂粒、粉粒和黏粒。

表 2-1 土粒粒组的划分

粒组统称	粒组名称		粒径范围(mm)	一般特征
巨 粒	漂石或块石颗粒		>200	透水性很大,无黏性,无毛细水
	卵石或碎石颗粒		60~200	
粗 粒	圆砾或角砾颗粒	粗	20~60	透水性大,无黏性,毛细水上升高度不超过粒径大小
		中	5~20	
		细	2~5	
	砂 粒	粗	0.5~2	易透水,当混入云母等杂质时透水性减小,而压缩性增加;无黏性,遇水不膨胀,干燥时松散;毛细水上升高度不大,随粒径变小而增大
		中	0.25~0.5	
		细	0.075~0.25	
细 粒	粉 粒		0.005~0.075	透水性小,湿时稍有黏性,遇水膨胀小,干时收缩显著;毛细水上升高度较大较快,极易出现冻胀现象
	黏 粒		<0.005	透水性很小,湿时有黏性、可塑性,遇水膨胀大,干时收缩显著;毛细水上升高度大,但速度较慢

注:(1) 漂石、卵石和圆砾颗粒均呈一定的磨圆状(圆形或亚圆形);块石、碎石和角砾颗粒均呈棱角状;
(2) 粉粒可称为粉土粒,粉粒的粒径上限 0.075 mm 相当于 200 号筛的孔径;
(3) 黏粒可称为黏土粒,黏粒的粒径上限也有采用 0.002 mm 为标准的。

3) 土的颗粒级配

土中土颗粒的大小及其组成情况,通常用颗粒级配来表示。所谓颗粒级配,就是土中各个粒组的相对含量,即各粒径的质量占总质量的百分数。确定土中各个粒组相对含量的方法称为土的颗粒分析试验,有筛分法和沉降分析法两种。筛分法适用于粒径小于或等于 60 mm、大于 0.075 mm 的粗粒土。对于粒径小于 0.075 mm 的细粒土,则可用沉降分析法(水分法)。通常需将上述两种方法联合使用。

(1) 筛分法

用一套标准筛子[如孔径(mm)分别为 60、40、20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.1、0.075],按从上至下筛孔逐渐减小放置,将风干且分散了的有代表性的试样倒入标准筛内摇振,然后分别称

出留在各筛子上的土重,并计算出各粒组的相对含量,即得土的颗粒级配。

(2) 沉降分析法

具体有密度计法和移液管法(也称吸管法)。这两种方法的理论基础都是依据 Stokes(斯托克斯)定律,即球状的细颗粒在水中的下沉速度与颗粒直径的平方成正比,用公式表示为

$$d = 1.126 \sqrt{v} \quad (2-1)$$

注:直径 d 以毫米计。实际上土粒并不是圆球形颗粒,因此用 Stokes 公式求得的粒径并不是实际土粒的尺寸,而是与实际土粒有相同沉降速度的理想球体的直径,称为水力直径。

具体的试验过程是:将过了筛的风干试样盛入 1 000 mL 的量筒中,注入蒸馏水搅拌制成一定体积的均匀浓度的悬浮液,如图 2-1 所示。停止搅拌静置一段时间 t 后,根据式(2-1),在液面以下深度 L_i 以上的溶液中就不会有大于 d_i 的颗粒(见图 2-1),如在 L_i 处考虑一小区段 $m \sim n$,则 $m \sim n$ 内的悬浮液中只有等于及小于 d_i 的颗粒,而且等于及小于 d_i 颗粒的浓度与开始时均匀悬浮液中等于及小于 d_i 颗粒浓度相等。其效果如同土样在孔径为 d_i 的筛子里一样。这样,任一时刻在任一 L_i 处悬浮液中 d_i 颗粒浓度可用密度计法或移液管法测定。

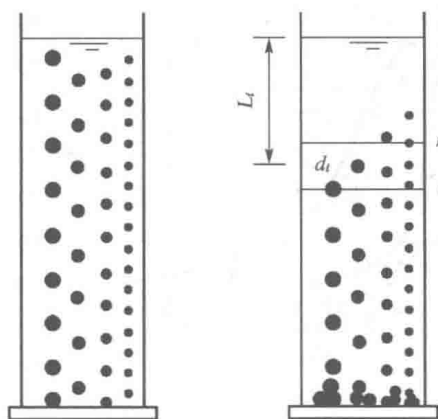


图 2-1 土粒在悬浮液中的沉降

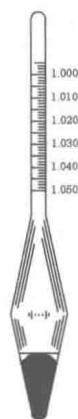


图 2-2 密度计

密度计的外形如图 2-2 所示,它的读数既表示浮泡中心处的悬浮液密度 ρ_i ,又表示从悬浮液表面到浮泡中心处的沉降距离 L_i 。速度 $v_i = L_i/t_i$; $d_i = 1.126 \sqrt{L_i/t_i}$ 。则在深度 L_i 处等于及小于 d_i 粒径的土粒质量 m_{si} 为

$$m_{si} = 1\,000 \frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \rho_s \quad (2-2)$$

式中: ρ_s ——土粒的密度(g/cm^3);

ρ_w ——水的密度(g/cm^3)。

那么,相应 d_i (mm)的土粒质量 m_{si} 占土粒总质量 m_s 的累计百分比 P_i (以%表示)为

$$P_i = \frac{m_{si}}{m_s} \quad (2-3)$$

因此,具体试验时,只要将悬液搅拌均匀后,放入密度计,隔不同的时间 t_i (min)(1、2、5、15、30、60、240、1 440),测读密度计读数 ρ_i 及 L_i ,就能求出相应于不同时间 t_i 的一系列 d_i 和