



“十三五”普通高等教育本科规划教材

建筑结构

徐亚丰 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

建筑结构

主 编 徐亚丰
编 写 王广林 孙立晔 金 路
陈 鑫 应 力 白首晏
主 审 贾连光



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以国家现行标准为依据,以房屋建筑工程中涉及的重要知识为主线,并将建筑地基基础、结构基本设计原则、钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构、结构抗震设计、多层及高层建筑设计、建筑结构选型有机地整理到一起。通过本书的学习,读者可以对建筑结构的设计理论和设计方法有比较全面、深入的理解,并进行一般常用结构和构件的设计。

本书可作为普通高等学校土木与建筑工程专业的教材,也可供相关工程技术人员设计、施工时参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构/徐亚丰主编. —北京:中国电力出版社, 2017. 7

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-0819-8

I. ①建… II. ①徐… III. ①建筑结构—高等学校—教材 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 132729 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:孙 静 (010-63412542) 彭莉莉

责任校对:闫秀英

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:航远印刷有限公司

版 次:2017 年 7 月第一版

印 次:2017 年 7 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:20.25

字 数:492 千字

定 价:42.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

为了适应教学发展的需要,结合任课教师使用教材的具体情况,从2015年开始,成立“建筑结构”教材编写组,并按照最新规范开展具体编写工作,历时两年,终于完稿。

本书是按照非土木工程专业(本科)教学课程《建筑结构》的教学要求,并根据中华人民共和国住房和城乡建设部或有关部门发布的现行规范或规程,如GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》、GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》、GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50003—2011《砌体结构设计规范》、GB 50017—2014《钢结构设计规范》、GB 50206—2012《木结构工程施工质量验收规范》、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、JGT 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》等编写的。

全书共分为九章,内容包括建筑地基基础、结构基本设计原则、钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构、木结构、结构抗震设计、多层及高层结构设计、结构选型。本书内容密切结合我国工程实际,力求文字简练,深入浅出。为了使读者既能深入地、系统地理解构件和结构的受力性能和破坏机理,又能正确地、灵活地掌握构件和结构的设计方法。为了便于教学工作和学生学习,在各章中还提供了必要的思考题和习题。

本书由沈阳建筑大学编写,具体分工为:第一章由徐亚丰、孙立晔执笔;第二、三章由孙立晔、王广林执笔;第四章由徐亚丰、王广林、陈鑫执笔;第五章由金路、陈鑫、应力执笔;第六章由徐亚丰、应力、王广林执笔;第七章由徐亚丰、孙立晔执笔;第八章由徐亚丰、白首晏执笔;第九章由白首晏执笔。

在本书编写过程中,张月、敕勒格尔、牟璐、金松、杨林、戴颖、李瑞清、夏志新、李子奇、唐媛圆、魏亚男、徐诚皓做了大量资料收集和整理工作,在此一并表示感谢。

本书由沈阳建筑大学徐亚丰主编,贾连光主审。

由于作者水平所限,书中有不妥或疏忽之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年5月

目 录

前言	
第一章 建筑地基基础	1
第一节 土的物理性质及工程分类	1
第二节 地基中的应力和变形	9
第三节 土的抗剪强度与地基承载力	12
第四节 天然地基上浅基础设计	15
第五节 桩基础	24
第六节 地基处理及加固	29
复习与思考题	33
习题	34
第二章 结构的基本设计原则	35
第一节 概述	35
第二节 结构计算的要求	35
第三节 结构的设计方法	36
第四节 结构的作用、作用效应、结构抗力和实用设计表达式	38
复习与思考题	41
第三章 钢筋混凝土结构	42
第一节 概述	42
第二节 钢筋混凝土的材料力学性能	43
第三节 受弯构件的计算与构造	56
第四节 受压构件的计算与构造	73
第五节 受扭构件的受力性能及其构造要求	80
第六节 预应力混凝土基本知识	82
第七节 正常使用极限状态的验算	86
第八节 现浇单向板肋梁楼盖	88
第九节 双向板肋梁楼盖	120
第十节 楼梯设计	124
复习与思考题	129
习题	130
第四章 砌体结构	131
第一节 砌体及其力学性能	131
第二节 无筋砌体的承载力计算	137
第三节 混合结构房屋设计	142

第四节 墙、柱的主要构造要求·····	144
第五节 过梁、圈梁、墙梁及挑梁·····	151
复习与思考题·····	155
习题·····	155
第五章 钢结构·····	157
第一节 钢结构的特点及应用范围·····	157
第二节 钢结构的材料·····	158
第三节 钢结构的连接·····	166
第四节 钢结构基本构件·····	174
第五节 屋盖结构·····	185
第六节 压型钢板设计·····	190
复习与思考题·····	196
习题·····	196
第六章 木结构·····	198
第一节 木结构的特点及适用范围·····	198
第二节 木材的组织及木结构选材·····	198
第三节 木材的力学性能·····	204
第四节 木结构的防护和防火·····	209
第五节 木结构的连接·····	213
第六节 木桁架·····	219
复习与思考题·····	222
第七章 建筑结构抗震设计·····	224
第一节 抗震设计原则·····	224
第二节 场地、地基与基础·····	232
第三节 地震作用计算与截面抗震验算·····	234
第四节 多层砌体房屋和底部框架、内框架房屋·····	238
第五节 多层和高层钢筋混凝土房屋·····	245
第六节 底层框架和多层内框架砖房·····	251
第七节 多高层钢结构房屋·····	253
第八节 单层工业厂房·····	259
第九节 单层空旷房屋·····	260
复习与思考题·····	261
习题·····	262
第八章 多层及高层建筑设计·····	263
第一节 概述·····	263
第二节 结构设计原则与结构体系的选择·····	265
第三节 高层建筑的结构布置·····	270
第四节 高层建筑结构设计荷载·····	273
第五节 高层建筑结构的计算·····	274

第六节 高层建筑结构构造	278
复习与思考题	282
习题	282
第九章 建筑结构选型	284
第一节 多层与高层建筑结构	284
第二节 单层大跨度建筑结构选型	288
复习与思考题	297
附录 A 混凝土强度标准值	298
附录 B 混凝土强度设计值	298
附录 C 混凝土弹性模量	298
附录 D 普通钢筋强度标准值	298
附录 E 普通钢筋强度设计值	299
附录 F 预应力筋强度标准值	299
附录 G 预应力筋强度设计值	299
附录 H 钢筋的弹性模量	300
附录 I 等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数	300
附录 J 常用材料和构件自重	308
附录 K 钢筋混凝土板每米宽的钢筋面积	311
附录 L 民用建筑楼面均布活荷载标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数	312
参考文献	314

第一章 建筑地基基础

建筑物一般都建在地层之上,为了安全地将建筑物的全部重量传给地基,就需要将建筑物底部与地基接触部分的尺寸扩大。这个被扩大的部分,就称为建筑物的基础,是建筑物结构的一个组成部分。建筑物上的各种作用通过基础传给土层,使土层产生附加应力和变形,并向四周土中扩散且逐渐减少。把土层中附加应力和变形不能忽略的那部分土层(岩层)称为地基。

根据地基与基础的接触关系,地基中的地层分为覆盖层、持力层和下卧层。持力层是直接承托基础底面的地层。地基基础设计时,通常选择强度较高、变形较小、稳定性较强的地层作为地基的持力层。位于持力层以上的所有地层称为覆盖层。位于持力层以下的地层,统称为下卧层。当地基下卧层中有较持力层更软弱的地层时,该地层称为软弱下卧层。当下卧层中具有如岩层之类强度很高的地层时,这种地层称为刚性下卧层。

基础把上部结构的各种作用传至地基,在基础底面与持力层的接触面上产生接触应力(压力),把基础对地基施加的压力称为基底压力。基底压力在地基中扩散,引起地基中应力的变化,并使地基产生变形。

为保证建筑物的功能需要和安全使用的目的,地基、基础在设计计算中,必须满足以下三点要求:

(1) 地基变形必须控制在容许范围内。地基变形反映在基础上,就是基础的沉降。建筑工程对基础的沉降比较敏感,房屋开裂在很大程度上是由于基础不均匀沉降引起的,因此在容许范围内控制地基变形是地基、基础设计计算的重点。

(2) 地基的荷载量不能超过地基承载力容许值。地基承载力是指地基承受荷载的能力。在保证地基稳定的条件下,使建筑物的沉降量不超过允许值的地基承载力称为地基承载力允许值。地基承载力容许值取决于两个条件:一是地基有一定的强度安全储备;二是地基沉降不应大于相应的容许值。同时,地基承载力验算又称为地基强度验算,是地基基础设计一项重要的验算指标。

(3) 地基必须有足够的稳定性。当建筑物承受水平荷载或建筑物位于边坡地带时,地基的稳定性显得很重要。

地基基础的设计与处理,选择切合工程实际的最佳方案,是工程成败的关键,对工程的经济和技术效益至关重要。地基、基础设计时,必须依据场地的工程地质条件、建筑形态、结构类型、结构布置、建筑物的安全等级等,选择合理的计算模式和参数,采取恰当的技术措施。

第一节 土的物理性质及工程分类

土的物理性质是土最基本的性质,是分析土的工程性质的重要依据。土最重要的特点就

是它不是一种连续性的材料，而是由三相不同物质（固体、液体、气体）组成的集合体，同时又是地质历史的产物。影响这种散粒性材料物理性质的主要因素是：三相组成本身的性质及其相互作用——土的组成；三相之间相对含量比例的变化——土的状态；颗粒的排列方式和连接状况——土的结构。

一、土的生成

工程上所谓的土，是指覆盖在地球上大部分陆地表面和部分海底的碎散岩石的堆积物。除火山灰、硅藻土等外，土都是岩石风化后的产物。根据风化作用的性质及其影响因素，岩石的风化可分为物理风化、化学风化和生物风化三种类型。在自然界中，岩石风化的各种类型一般不是单独进行的，而是互相联系、同时并存、共同作用的，只是在不同地区、不同条件下有主次之分而已。

（一）物理风化

地壳表层的岩石长期暴露在大气中，受到温度、湿度变化的影响，体积经常在膨胀或收缩，不均匀的胀缩使岩石产生裂隙而解体。与此同时，还受到风、霜、雨、雪的侵蚀及植物根系的破坏，岩体就逐渐崩解，破碎为一些大小和形状不同的碎块，这个过程叫做物理风化。

物理风化是一个量变过程，它只改变颗粒的大小和形状，而不改变颗粒的成分。因此，其产物保持了与母岩相同的矿物成分，称为原生矿物。物理风化的结果，产生了像砂、卵石、砾石等颗粒间没有黏结作用的粗粒土，也叫无黏性土。

（二）化学风化

物理风化后形成的碎块与周围的水、氧气、二氧化碳等接触，并受到有机质、微生物等的作用，引起化学变化，使岩石性质发生质变，产生出更细的与母岩矿物成分不同的次生矿物颗粒。这个过程叫做化学风化。化学风化所形成的细粒土，颗粒间具有黏结能力。

（三）生物风化

生物（包括人类）的活动，经常对岩石进行机械性破坏，如树根长入岩石的裂缝中，吸取岩石中的营养成分，随着树根的生长，岩石裂缝被挤压而进一步发展，最后导致破坏。此外，生物新陈代谢时的分泌物，以及生物死亡后产生的碳酸，都将对岩石产生严重侵蚀，构成对岩石的生物风化作用。人类活动中对岩石的破坏作用是最显著的，其中的工业与生活废水更是造成岩石风化的重要因素。

岩石表面风化后所生成的土，没有经过搬运而残留在原来地方的叫做残积土，一般分布在山顶或山坡上，无层理构造，均质性很差。

岩石的风化产物如果被各种自然力（如重力、流水、风力、冰川等）搬运至别的地方再沉积下来，可以总称为沉积土。细分可有坡积土、洪积土、风积土以及冰积土等。

总之，土都是由岩体经过长期的风化、搬运、堆积而成的。实践证明，不同成因和年代的土，具有不同的工程性质。

二、土的三相组成

土的三相结构中，土的颗粒是主体，构成土的骨架，而空气和水则填充其孔隙。土的物理性质在很大程度上取决于组成土的固体颗粒大小及其矿物成分，不同粒径组成的土体有不同的工程性质。大的固体颗粒本身具有较高的强度，而微小固体颗粒则具有胶体性质。

(一) 土的固体颗粒

土的固体颗粒主要是矿物颗粒,也包括有机质和腐殖质颗粒,它们构成了土的骨架,是土的主体。固体的矿物成分、粒径大小和级配是影响土物理性质的重要因素。

1. 土的矿物成分

土的矿物成分主要取决于母岩的成分和经历的成土过程,其矿物成分可分为原生矿物和次生矿物两大类。在地壳中由岩浆冷凝而成的天然元素或化合物,称为原生矿物。由原生矿物经风化形成的新化合物,称为次生矿物。土的粒径与其矿物成分有较密切的关系,一般原生矿物粒径较大,而次生矿物粒径较小。

漂石、卵石、圆砾等粗大土粒都具有岩石的碎屑,多为原生矿物。

砂粒大部分是母岩中的单矿物颗粒,如石英、长石和云母等。

粉粒的矿物成分是多样性的,主要是石英和 MgCO_3 、 CaCO_3 等难溶盐的颗粒。

黏粒的矿物成分主要是黏土矿物、氧化物、氢氧化物和各种难溶盐类(如碳酸钙等),它们都是次生矿物。黏土矿物的颗粒很小,呈鳞片状或片状,内部具有层状晶体构造。

2. 土的颗粒组的划分

土粒的大小不同对其性质影响很大,例如颗粒粗大的比表面小,透水性大,不具有黏性;颗粒细小的比表面大,透水性差,具有黏性。因此,可按土的粒径大小分为若干组,称为粒组。粒组与粒组之间的分界尺寸称为界限粒径。由此可知,粒组是指相邻两界限粒径之间性质相近的土粒。分组间的界限粒径在不同国家不尽相同。我国通用的各粒组名称及其分界粒径尺寸见表 1-1。

表 1-1 土的粒组名称及其分界粒径

粒组名称	漂石 (块石)	卵石 (碎石)	圆砾 (角砾)	砂粒	粉粒	黏粒
粒径范围 (mm)	>200	200~20	20~2	2~0.075	0.075~0.005	<0.005

3. 土的颗粒级配

土中各个粒组相对含量百分比称为土的颗粒级配。土的颗粒级配反映了土中各种颗粒所占的比例,对土的性质影响较大,是进行土工程分类的主要依据。

土的颗粒级配可通过颗粒分析试验测定,工程中常用的颗粒分析方法有筛分法和比重计法两种。

筛分法适用于分析粒径大于 0.075mm 的粗颗粒土。比重计法的基本原理是建立在斯托克定律的基础上的,它适用于分析粒径小于 0.075mm 的细颗粒土。筛分法和比重计法的试验方法,详见 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》。

根据土的颗粒分析试验结果,在半对数坐标纸上,以纵坐标表示小于某粒径的土的含量百分比,横坐标(采用对数尺度)表示粒径,从而绘出比较直观的颗粒级配曲线。颗粒级配曲线能很好地描述土中粒组范围及各粒组的含量与颗粒分布。根据级配曲线的陡、缓情况,可定性分析土中颗粒的均匀程度和级配的好坏。如曲线平缓,表示粒径相差大,颗粒不均匀,各级粒组搭配良好,即级配好;如曲线很陡,表示粒径均匀,级配不好。

在工程计算中,常用不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 两个指标来定量地反映颗粒级配情况,即

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60}d_{10}} \quad (1-2)$$

式中 d_{60} ——限定粒径，表示小于该粒径的颗粒占总土重的 60%；

d_{10} ——有效粒径，表示小于该粒径的颗粒占总土重的 10%；

d_{30} ——半间粒径，表示小于该粒径的颗粒占总土重的 30%。

不均匀系数 C_u 可用来反映曲线的坡度， C_u 越大，曲线越平缓，土越不均匀，说明这种土粗细搭配越好，粗颗粒形成的孔洞可被中、细颗粒填满，压实时就能获得较高的密度，因而土的压缩性小、强度高。工程上一般把 $C_u \leq 5$ 的土称为级配均匀或级配不良的土，而 $C_u > 10$ 的土则称为级配良好的土。

曲率系数 C_c 可用来反映曲线形状是否连续。一般，当 $C_c = 1 \sim 3$ 时，可以表示土的级配连续性能好。

评价土的级配是否良好应该用 C_u 和 C_c 两个指标。SL 237—1999《土工试验规程》中规定，级配良好的土必须同时满足 $C_u \geq 5$ ， $C_c = 1 \sim 3$ 的要求。

(二) 土中的水

水在土中存在的状态有液态水、气态水和固态水。

固态水是指土中的水在温度低于 0°C 时结成的冰，土中的水结冰后，会形成冻土。

气态水是指土中出现水蒸气，一般对土的影响不大。

土中的液态水主要有结合水和自由水两类。结合水是指受电分子引力而吸附于土粒表面的土中水。结合水又可以分为强结合水和弱结合水两种。强结合水又称吸着水，是指紧靠土粒表面的结合水。其特点是：没有溶解盐类的能力，不能传递静水压力，密度大，性质类似于固体， -78°C 才结冰，具有极大的黏滞度、弹性和抗剪强度。弱结合水又称薄膜水，是紧靠强结合水的一层水膜。弱结合水仍然不能传递静水压力，但水膜较厚的弱结合水能向邻近较薄的水膜缓慢移动。当土中含有较多的弱结合水时，土体具有一定的塑性。

自由水是存在于土粒表面电力场影响范围以外的水。它和普通水一样，能传递静水压力，有溶解能力，具有一定的矿化度，其冰点较普通水有所降低。自由水按其移动所受的作用力不同，可以分为重力水和毛细水。重力水是存在于地下水位以下透水层中的地下水，在重力或其他外力作用下流动，服从有关水力学定律，对土粒有浮力作用。毛细水是受到水与空气交界面张力作用的自由水。毛细水的存在，对建筑工程防潮、土的浸湿和冻胀有影响。

(三) 土中的气体

当土中气体与大气相通时，易被排出，对土的力学性质影响不大。在细粒土中常存在与大气隔绝的封闭气泡，在压力作用下可被压缩或溶解于水中，压力减小时能有所恢复，使土的透水性减小，弹性变形增大。

三、土的物理性质指标

反映土三相比例的物理性质指标最基本的有 9 个，其中 3 个需要用土样试验测定，称为直接测定指标，其余指标则可根据这 3 个指标换算得出，称为换算指标。

土的三相组成示意图如图 1-1 所示，图中 V 为总体积； V_s 、 V_w 和 V_a 分别为颗粒、孔隙中的水和孔隙中的气体占据的体积； V_v 为孔隙的体积； m 为总质量； m_s 和 m_w 分别为颗

粒的质量和孔隙中水的质量；气体质量略去不计。

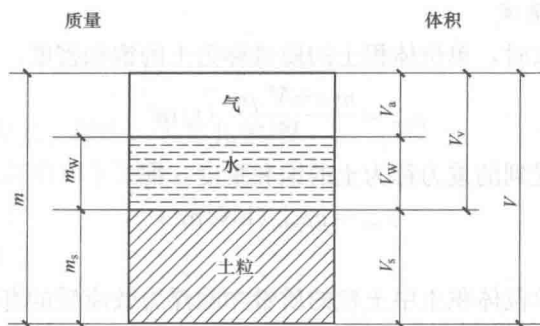


图 1-1 土的三相组成示意图

图 1-1 中各物理量有以下关系：

$$m = m_s + m_w$$

$$V = V_s + V_w + V_a = V_s + V_v$$

(一) 直接测定的指标

1. 土的质量密度 ρ 与重力密度 γ

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (1-3)$$

$$\gamma = \rho g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-4)$$

一般土的重力密度为 $16 \sim 20 \text{ kN/m}^3$ 。

2. 土粒的相对密度

土粒的密度 ρ_s 与 4°C 纯水的密度 ρ_w 之比称为土粒的相对密度。

$$d_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_s/V_s}{\rho_w} = \frac{m_s}{V_s \rho_w} \quad (1-5)$$

土粒的 d_s 值取决于土粒矿物成分及有机物质含量，普通土的土粒相对密度值变化幅度较小。

3. 含水量

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

含水量反映土的干湿程度。粉土、黏性土的工程性质与含水量关系较大，含水量越高时，其强度越低。

(二) 土的换算指标

1. 干密度与干重度

单位体积土中干土粒的质量称为土的干密度，即

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (1-7)$$

单位体积土中干土粒所受到的重力称为土的干重度，即

$$\gamma_d = \rho_d g \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-8)$$

干重度可用于评定土粒排列的密实程度，工程上用 γ_d 作为人工填土压实质量的控制指

标,一般 γ_d 达到 16.4kN/m^3 以上时,土就较密实。

2. 饱和密度与饱和重度

土中孔隙完全充满水时,单位体积土的质量称为土的饱和密度,即

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (1-9)$$

单位体积饱和土所受到的重力称为土的饱和重度,即

$$\gamma_{\text{sat}} = g \rho_{\text{sat}} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-10)$$

3. 浮密度与浮重度

在地下水位以下,单位体积土中土粒的质量扣除浮力效应后的有效质量称为土的浮密度或有效密度,即

$$\rho' = \frac{m_s - V_v \rho_w}{V} \quad (\text{t/m}^3) \quad (1-11)$$

在地下水位以下,单位体积土中,土粒所受的重力扣除浮力后的重度称为浮重度,即

$$\gamma' = g \rho' \quad (1-12)$$

各种状态下土的密度与量度在数值上有以下关系:

$$\rho' \leq \rho_d \leq \rho \leq \rho_{\text{sat}} < \rho_w d_s \quad (1-13)$$

$$\gamma' \leq \gamma_d \leq \gamma \leq \gamma_{\text{sat}} < \gamma_w d_s \quad (1-14)$$

4. 孔隙比

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-15)$$

孔隙比是反映土密实程度的指标,工程中经常用到。同一类土的孔隙比越大,土越松,反之则越密实。

5. 孔隙率

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-16)$$

6. 饱和度

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-17)$$

根据饱和度的大小,可将土划分为以下三种相对湿度状态:

$S_r \leq 50\%$: 稍湿。

$50\% < S_r \leq 80\%$: 很湿。

$S_r > 80\%$: 饱和。

四、土的物理状态指标

(一) 无黏性土的密实度

无黏性土一般指砂土和碎石土。天然条件下它们是无黏性散体的单粒结构,当处于密实状态时其强度高,压缩性低,是良好的建筑地基;反之,当无黏性土处于松散状态时,其压缩性与透水性较高,强度低,对工程建设不利。密实度是评定碎石土与砂土地基承载力的主要指标。

1. 砂土的密实度

(1) 用相对密实度 D_r 评定砂土的密实度: 孔隙比 e 在一定程度上能反映砂土的密实程

度，一般 e 越小土就越密实。但 e 不能反映砂土的级配， D_r 能够同时考虑土的孔隙与级配因素：

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

(1-18)

式中 $e_{\max}$ 、 $e_{\min}$ 、 e ——最大、最小、天然孔隙比。

根据 D_r 砂土的密实状态有以下划分：

- $0 < D_r \leq 0.33$ ：疏松的。
- $0.33 < D_r \leq 0.67$ ：中密的。
- $0.67 < D_r \leq 1.0$ ：密实的。

由于测定 $e_{\max}$ 和 $e_{\min}$ 时影响因素较多，容易引起较大的误差，加上无黏性土原状土样采取有一定难度且不易准确确定，因此 D_r 的使用受到一定限制，一般只用于堤坝、路基及填土地基配料与室内科研试验。

(2) 用标准贯入试验锤击数 N 评定砂土的密实度。GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》根据标准贯入试验锤击数 N 来划分砂土的密实度，见表 1-2。

表 1-2 砂土的密实度

密实度	密实	中密	稍密	松散
标准贯入锤击数 N	$N > 30$	$15 < N \leq 30$	$10 < N \leq 15$	$N \leq 10$

2. 碎石土的密实度

碎石土由于既难以取样，又难以进行标准贯入试验，其密实度通常在现场根据野外鉴别方法来定性地划分，其密度分为密实、中密和稍密三种状态。

(二) 黏性土的物理特征

当土中颗粒主要成分是黏粒时，土的比表面大，呈现黏土所特有的工程性质，主要表现为与水相互作用的能力较强，具有黏聚力、灵敏度和触变性。

1. 界限含水量

随着含水量的增加，重塑黏性土的状态会发生改变，由固态转化为半固态，黏性土由一种状态转化为另一种状态的分界含水量称为界限含水量。各界限含水量与黏性土相关状态的关系如图 1-2 所示，图中 w_s 、 w_p 和 w_L 分别称为缩限、塑限和液限。

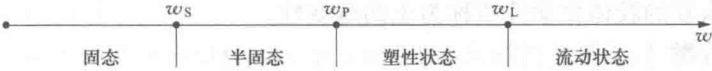


图 1-2 黏性土的状态与界限含水量的关系

土的界限含水量可通过室内土工试验方法测定。当土中含有大量的自由水时，土呈流动状态；当弱结合水减少而主要含强结合水时，土呈半固态；当土中只含强结合水时，土呈固体状态。

2. 塑性指数 I_P 和液性指数 I_L

$$I_P = w_L - w_p$$

(1-19)

塑性指数习惯上用百分数的绝对值表示，而不带 % 符号。塑性指数越大，表示土中黏粒含量越多，含水量范围越大，土的黏性与塑性越好。GB 50007—2011 根据 I_P 将黏性土分为

粉质黏土和黏土。

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-20)$$

液性指数是用来判定黏性土软硬程度的指标,即状态指标,也称稠度。GB 50007—2011 中对黏性土的稠度划分见表 1-3。

表 1-3 黏性土软硬状态的划分

状态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑
液性指数	$I_L \leq 0$	$0 < I_L \leq 0.25$	$0.05 < I_L \leq 0.75$	$0.75 < I_L \leq 1.0$	$I_L > 1.0$

3. 含水比、液塑比

含水比是反映红黏土物理状态的重要指标,液塑比是反映红黏土成分的重要指标,两者在确定红黏土承载力时经常采用。

(1) 含水比:

$$\alpha_w = \frac{w}{w_L} \quad (1-21)$$

含水比反映土的软硬程度, α_w 值越大,土越软,反之越硬。

(2) 液塑比:

$$I_r = \frac{w_L}{w_p} \quad (1-22)$$

液塑比反映土的塑性范围, I_r 值越大,塑性范围越大,土粒越细,对应的地基承载力越低。

4. 灵敏度和触变性

天然状态下的黏性土结构一旦被扰动,其强度就会降低而压缩性增大,土的结构性对强度的这种影响程度一般用灵敏度来衡量。天然结构被破坏前、后抗压强度的比值称为灵敏度 S_r , 根据 S_r 将饱和黏性土分为:

$1 < S_r \leq 2$: 低灵敏。

$2 < S_r \leq 4$: 中灵敏。

$S_r > 4$: 高灵敏。

饱和黏性土结构受到扰动,强度会降低,但当扰动停止时,强度又有所恢复,黏性土的这种强度随时间恢复的胶体化学性质称为土的触变性。

五、岩土的分类

岩土的形成、结构等条件不同,其工程性质差别很大。为便于分析和评价具体的地基土,必须对不同性质的岩土进行分类。岩土分类的原则很多,GB 50007—2011 将岩土分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土六大类。

(一) 岩石

岩石是颗粒间牢固连接,呈整体或具有节理裂隙的岩体。

岩石根据成因分为岩浆岩、沉积岩和变质岩;根据其坚固性分为硬质岩石和软质岩石两大类;按风化程度分为微风化、中等风化和强风化 3 个等级。

(二) 碎石土

粒径大于 2mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土称为碎石土。根据粒组含量和颗粒形状分

为漂石或块石、卵石或碎石、圆砾或角砾共 3 档 6 类。碎石土按密实度分为密实、中密、稍密和松散四种状态。

(三) 砂土

粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过全重 50%、粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土称为砂土。砂土根据粒组含量分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂五类。

砂土根据标准贯入试验锤击数 N 划分密实度等级。砂土湿度等级根据饱和度 S_r 划分。

(四) 粉土

粉土是指塑性指数 $I_p \leq 10$ 、粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过全重 50% 的土。粉土的性质介于砂土与黏性土之间，密实度根据天然孔隙比 e 确定，湿度根据饱和度分类。

(五) 黏性土

黏性土是指 $I_p > 10$ 的土，按塑性指数可将黏性土分为粉质黏土和黏土两类，见表 1-4。

表 1-4 黏性土的分类	
塑性指数 I_p	土的名称
$I_p > 17$	黏土
$10 < I_p \leq 17$	粉质黏土

黏性土的物理状态根据 I_L 划分为 5 个等级，见表 1-3。

在静水或缓慢的流水环境中沉积，并经生物化学作用形成，其天然含水量大于液限，天然孔隙比大于或等于 1.5 的黏性土称为淤泥。天然孔隙比小于 1.5 但大于或等于 1.0 的土称为淤泥质土。淤泥和淤泥质土的主要特点是强度低、压缩性高、透水性差，固结历时长。

红黏土是指碳酸盐岩系在亚热带温湿气候条件下经红土化作用形成的棕红、褐黄等色的高塑性黏土，其液限一般大于 50%。经搬运后仍保留红黏土基本特征，液限大于 45% 的土称为次生红黏土。

(六) 人工填土

人工填土是指由于人类活动形成的堆积土。人工填土成分比较复杂，均匀性差，根据其组成和成因，可分为素填土、杂填土和冲填土。

素填土是指由碎石土、砂土、粉土和黏性土等一种或几种天然土料堆填而成的填土。

杂填土是由建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物堆填而成的填土。冲填土是由水力吸泥机冲填泥砂形成的填土。

从以上分类可见，地基土中粒径大于 0.075mm 的颗粒是否超过土样全重的 50% 为分类界限，如超过就根据粒组含量分类，不超过便按 I_p 分类。

第二节 地基中的应力和变形

建筑物的建造改变了地基中原有的应力状态，在地基中产生应力和变形，使基础出现沉降。地基中应力的计算是计算基础沉降的基础，同时也是研究地基承载力及强度问题的基础。

基础的沉降和不均匀沉降超过一定的限度，将导致建筑物的过大下沉、倾斜、开裂，影响建筑物正常使用，严重时危及建筑物安全，导致工程事故。因此，研究地基变形，对保

证建筑物的安全和正常使用具有重要意义。

一、基底压力

建筑物和基础本身的重量，都是通过基础传给地基的。基础在与地基接触的面上，对地基施加接触压力，称为基底压力。基底压力的分布规律与大小，是计算地基中的附加应力以及进行基础结构设计时十分重要的荷载条件。

试验和理论研究表明，基底压力分布受上部结构的刚度和荷载大小，基础的刚度、形状、大小、埋深的影响，还与地基土的性质有关。基底压力的分布形式是十分复杂的。

目前，在地基计算中，允许采用简化方法，即假定基底压力按直线分布，用材料力学的方法，根据基础的静力平衡方程，得到基底压力的大小。但要注意，简化方法用于计算基础内力会引起较大误差。

二、地基中的自重应力

在没有修建建筑物之前，地基中由于土体本身的有效重量而产生的应力叫自重应力。研究地基中自重应力的目的，是为了确定土体的初始应力状态。把地基假定为半无限弹性体，地基中任意深度处的竖向重应力就等于单位面积上的土柱重量。自重应力随深度增加而增大，且呈线性变化。

三、地基中的附加应力

由建筑物的荷载在地基中产生的应力称为地基的附加应力。它是使地基发生变形，引起基础沉降的主要原因。地基中附加应力的计算，建立在土体是均质、连续、各向同性的半无限线性变形体这一假定之上，以竖向集中力作用的布西奈斯克解和水平集中力作用的西罗提解为基础，用数学积分方法求解。附加应力随深度增加而减小，且呈非线性变化。附加应力具有扩散作用，不仅发生在荷载作用域以下，而且发生在荷载作用域以外的一定范围内。

四、土的压缩性

土的压缩性是指土体在压力作用下体积压缩的性能。土产生压缩变形的主要原因是由于土骨架受到有效应力的作用，使土粒重新排列，相互挤紧，孔隙中的水和气体被挤出，使孔隙体积减小。通过室内侧限压缩试验，可以确定反映土压缩性的孔隙比与压力变化的关系曲线——压缩曲线、回弹曲线和再压缩曲线，如图 1-3 所示。根据这些曲线认识和了解土压缩变形的规律和特点，同时为地基沉降计算提供压缩性的指标。

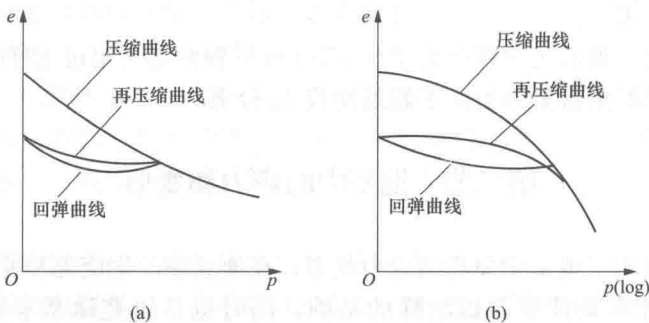


图 1-3 土的压缩、回弹曲线和再压缩曲线
(a) $e-p$ 曲线; (b) $e-\log p$ 曲线