

服务热线: 400-615-1233



配套精品教学资料包

www.huatengedu.com.cn

TULIXUE YU DIJI JICHU

# 土力学 与地基基础

ISBN 978-7-5635-7727-9



9 787563 577279 >

定价: 58.00元

策划编辑: 胡 娟

责任编辑: 边丽新

封面设计: 黄燕美

甘肃省“十四五”首批职业教育省级规划教材立项教材

## 土力学与地基基础

主编 唐庆尧

北京邮电大学出版社



甘肃省“十四五”首批职业教育省级规划教材立项教材

# 土力学 与地基基础

主编 唐庆尧



北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com



甘肃省“十四五”首批职业教育省级规划教材立项教材

# 土力学 与地基基础

主 编 唐庆尧

副主编 冯 旺 关子香 宁 瑜



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内 容 简 介

本书依据现阶段我国职业教育教学改革的需要,在充分总结职业院校一线教师教学经验的基础上编写而成。全书共分为10个模块,内容包括土的物理性质与工程分类、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度及地基容许承载力的确定、土压力计算及边坡稳定性分析、天然地基上浅基础的设计与施工、地基处理、桩基础、沉井基础以及工程地质勘察。此外,书后还附有土工试验指导。

本书可作为职业院校“土力学与地基基础”课程的教材,也可作为相关人员自学的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学与地基基础 / 唐庆尧主编. -- 北京: 北京  
邮电大学出版社, 2025. -- ISBN 978-7-5635-7727-9  
I. TU4  
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20253P2C24 号

策划编辑: 胡 娟      责任编辑: 边丽新      封面设计: 黄燕美

---

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185    传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 三河市龙大印装有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm    1/16

印 张: 17.75 插页 1

字 数: 367 千字

版 次: 2025 年 12 月第 1 版

印 次: 2025 年 12 月第 1 次印刷

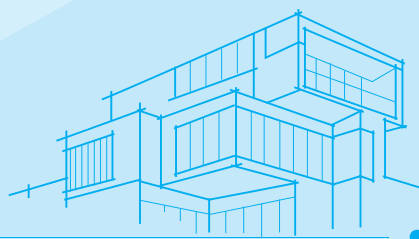
---

ISBN 978-7-5635-7727-9

定 价: 58.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话: 400-615-1233



# 前言

本书以服务职业院校高技能人才培养为目标,依据国家现行规范及标准,结合课程教学改革的总体方向与实践经验编写而成。

为深入贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想,落实教育部职业教育教学标准要求,本书以党的二十大精神为指导,在编写过程中融入课程思政内容,实现专业教学与思想政治教育的有机融合。

本书的编写团队由长期从事“土力学与地基基础”教学的一线教师及企业技术骨干组成。本书参编教师均具备“双师型”核心职业素养,既具有教师资格,又取得了结构工程师、岩土工程师、建造师等相关执业资格,同时积累了深厚的企业一线实践经验,充分了解职业教育“德技双修、工学结合”的人才培养需求。

全书共 10 个模块,书后附有土工试验指导,具体内容及学时分配如下表所示。

| 内 容                    | 学 时 |
|------------------------|-----|
| 模块 1 土的物理性质与工程分类       | 2   |
| 模块 2 土中应力计算            | 6   |
| 模块 3 土的压缩性与地基沉降计算      | 6   |
| 模块 4 土的抗剪强度及地基容许承载力的确定 | 6   |
| 模块 5 土压力计算及边坡稳定性分析     | 6   |
| 模块 6 天然地基上浅基础的设计与施工    | 6   |
| 模块 7 地基处理              | 4   |
| 模块 8 桩基础               | 4   |
| 模块 9 沉井基础              | 2   |
| 模块 10 工程地质勘察           | 4   |
| 附录 土工试验指导              | 10  |
| 总计                     | 56  |





本书的编写理念源于编者十余年的教学与教材建设经验,重点体现在以下几个方面。

### 1. 以工程实践为导向,强化技能培养

本书突出实践教学环节,重点培养学生的工程应用能力;主要内容涵盖土力学基本原理、地基基础设计方法及常见地基问题处理,旨在帮助学生将理论知识应用于实际工程,提高岗位适应能力。

### 2. 突出专业特色,体现行业发展趋势

本书结合行业技术进步与发展方向,融入最新科研成果与工程案例;通过引入新型地基处理技术、土性参数测试方法等内容,使学生了解行业前沿动态,拓宽专业视野,为今后的职业发展奠定基础。

### 3. 注重理论与实践结合,提升综合能力

本书通过典型案例与工程实例,帮助学生在理解理论的同时掌握实际应用方法;配合实验教学与实习实践环节,使学生在动手操作中深化理解、提高分析与解决工程问题的能力。

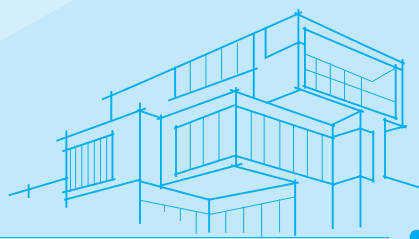
### 4. 优化知识体系,便于教学与学习

本书在结构安排上注重逻辑性与系统性,确保知识点衔接合理,方便教师教学与学生学习;语言表述力求简明准确,配以必要的图表说明,提高内容的可读性与教学实用性。

本书由兰州现代职业学院城市建设学院(兰州城市建设学校)唐庆尧任主编,兰州现代职业学院城市建设学院(兰州城市建设学校)冯旺、甘肃工程地质研究院关子香、兰州现代职业学院城市建设学院(兰州城市建设学校)宁瑜任副主编。具体编写分工如下:唐庆尧编写模块1、模块2、模块5和模块7,冯旺编写模块3、模块6和模块9,关子香编写模块4、模块8和模块10,宁瑜编写附录。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者



# 目录

## 模块 1 土的物理性质与工程分类 1

- 1.1 土的基本特性 3
- 1.2 土的物理性质与指标 10
- 1.3 土的物理状态指标 14
- 1.4 岩土的工程分类与现场鉴别 18
- 思考与练习 23

## 模块 2 土中应力计算 24

- 2.1 自重应力的计算 26
- 2.2 土中附加应力的计算 29
- 2.3 基底压力的计算 40
- 思考与练习 46

## 模块 3 土的压缩性与地基沉降计算 47

- 3.1 土的压缩性试验及评价指标 49
- 3.2 地基最终沉降量计算 57
- 3.3 地基沉降与时间的关系 64
- 3.4 地基容许沉降量的确定与减小沉降的措施 69
- 思考与练习 72

## 模块 4 土的抗剪强度及地基容许承载力的确定 74

- 4.1 土的抗剪强度与极限平衡条件 76
- 4.2 土的抗剪强度试验 81
- 4.3 地基剪切破坏 85
- 4.4 地基容许承载力的确定 88
- 思考与练习 99





## 模块 5 土压力计算及边坡稳定性分析 100

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 5.1 土压力的类型、分布及影响因素 | 102 |
| 5.2 静止土压力及其计算      | 105 |
| 5.3 朗肯土压力理论        | 106 |
| 5.4 库仑土压力理论        | 114 |
| 5.5 挡土墙结构          | 117 |
| 5.6 边坡稳定性分析        | 121 |
| 思考与练习              | 127 |

## 模块 6 天然地基上浅基础的设计与施工 128

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 6.1 浅基础的类型      | 130 |
| 6.2 天然地基上浅基础的设计 | 135 |
| 6.3 天然地基上浅基础的施工 | 148 |
| 思考与练习           | 161 |

## 模块 7 地基处理 162

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 7.1 软弱土地基及其处理方法 | 164 |
| 7.2 换填垫层法       | 167 |
| 7.3 挤密压实法       | 171 |
| 7.4 预压法         | 178 |
| 7.5 化学加固法       | 180 |
| 思考与练习           | 186 |

## 模块 8 桩基础 187

|           |     |
|-----------|-----|
| 8.1 桩基础概述 | 189 |
| 8.2 桩基础施工 | 194 |
| 8.3 桩基础设计 | 201 |
| 8.4 桩的检测  | 210 |
| 思考与练习     | 218 |

## 模块 9 沉井基础 219

|            |     |
|------------|-----|
| 9.1 沉井基础概述 | 221 |
|------------|-----|



|                     |            |
|---------------------|------------|
| 9.2 沉井基础施工          | 227        |
| 思考与练习               | 235        |
| <b>模块 10 工程地质勘察</b> | <b>236</b> |
| 10.1 工程地质勘察概述       | 238        |
| 10.2 工程地质勘察方法       | 242        |
| 10.3 地质图的识读         | 248        |
| 10.4 工程地质勘察报告       | 253        |
| 思考与练习               | 255        |
| <b>附录 土工试验指导</b>    | <b>256</b> |
| 试验 1 土的物理性质基本指标测定   | 257        |
| 试验 2 界限含水率测定        | 261        |
| 试验 3 土的标准固结试验       | 267        |
| 试验 4 直接剪切试验         | 270        |
| 试验 5 三轴压缩试验         | 274        |
| <b>参考文献</b>         | <b>278</b> |







# 模块

---

## 土的物理性质 与工程分类





比萨斜塔是意大利比萨大教堂的独立式钟楼,位于比萨大教堂后方,与相邻的大教堂、洗礼堂、墓园等共同对 11 世纪至 14 世纪的意大利建筑艺术产生了深远影响。1590 年,伽利略曾在此塔进行落体试验,创立了物理学上著名的自由落体定律,因此斜塔成为世界上极具价值的历史文物之一。

比萨斜塔从地面至塔顶高约 56 m。建筑工程始于 1173 年,在施工早期由于地基土层软弱引起不均匀沉降,塔身出现明显倾斜,被迫停工。此后在 13~14 世纪间多次复工与暂停,最终于 14 世纪后期完工。整体建造过程跨越近 200 年,充分体现了在复杂地基条件下修建大型石砌结构所面临的技术挑战。

比萨斜塔原设计为垂直结构,但在建至第 3 层时塔已向北倾斜约  $0.25^\circ$ 。在随后的施工中,建造者采取了多种措施试图修正倾斜,如刻意将上部结构反向倾斜,以补偿重心偏移。据史料记载,1278 年建至第 7 层时,塔已向南倾斜约  $0.6^\circ$ ;到 1360 年建造顶层钟房时,倾角增至  $1.6^\circ$ 。

比萨斜塔倾斜的根本原因在于其地基条件差。塔身建于深厚的高压缩性土层之上,持力层为粉砂层,其下依次为粉土层和黏土层。地基发生不均匀沉降,导致塔身产生倾斜。根据文字记载,几个世纪以来,斜塔倾斜速率较缓,这是因为塔体与其下方土层在一定程度上达到了平衡状态。在 1550 年至 1817 年的 267 年间,塔的总倾斜量不超过 5 cm。然而,1838 年一次工程施工使倾斜量突然增加了 20 cm。此后数年,塔的倾斜加速,随后趋于稳定,倾斜速率减小至每年约 1 mm。

到 1990 年 1 月,比萨斜塔南北两端的沉降差已达 1.8 m,塔顶中心线与塔底中心线的水平偏移为 5.27 m,倾角为  $5^\circ 21' 16''$ ,斜率为 9.3%。由于倾斜过大存在安全隐患,斜塔于 1990 年停止对游客开放。经过为期 12 年的修缮,塔身被扶正 44 cm,并于 2001 年 12 月重新开放。

### 学习描述

#### 知识目标

- (1) 了解土的成因和组成。
- (2) 明确土的结构与构造。
- (3) 掌握土的物理性质指标。
- (4) 掌握土的物理状态指标。
- (5) 掌握岩土的工程分类与现场鉴别方法。

#### 能力目标

- (1) 具备常见土的鉴别能力。
- (2) 初步具备土的性能指标分析能力。

#### 素质目标

- (1) 培养工程技术人员、工程管理人员应具备的职业道德与敬业务实精神。
- (2) 培养团队协作精神、科学的工作态度和严谨的工作作风,并具备环保意识与开拓精神。



## 课程思政

港珠澳大桥,这座横跨伶仃洋的超级工程,不仅展示了我国在桥梁建设领域的卓越成就,也体现了科技创新与集体智慧的结晶。在人工岛填筑过程中,面对复杂多变的海洋地质条件,工程师们根据不同土质的特性进行了科学调配。正如一位高明的厨师精心挑选食材、巧妙搭配,最终“烹制”出一道令人惊叹的“工程大餐”。

这种科学调配体现了对土壤多样性的深刻理解与尊重。正如每个人都是独一无二的个体,拥有不同的性格、能力与潜力,土壤资源同样具有多样性,其物理、化学与生物性质的差异共同构成了自然界的丰富画卷。在港珠澳大桥的建设中,工程师们并未忽视这种多样性,而是充分发挥其特性,实现了工程的最优方案。这种包容性的态度,不仅保障了工程的顺利实施,也为我们带来了深刻的启示:在多元化的社会中,我们应学会尊重并接纳不同的个体与文化,让它们在相互融合中共同发展。

更进一步,港珠澳大桥的建设过程是集体智慧与团队协作的典范。面对前所未有的工程挑战,数以千计的科技工作者和工程师齐心协力,共同攻克了一个又一个技术难题。这种集体智慧的力量,让我们看到了人类在应对复杂问题时所展现的无限可能。正如多元化的社会需要不同个体的共同努力与智慧碰撞才能繁荣发展一样,港珠澳大桥的建设同样离不开每一位参与者的辛勤付出与无私奉献。

因此,我们应从港珠澳大桥人工岛填筑的科学调配中汲取智慧,学会尊重土壤的多样性,包容不同的土质与文化,并在集体智慧的光芒下携手前行。在未来的日子里,让我们共同努力,创造一个更加包容、和谐、美好的世界。

## 1.1 土的基本特性

土是覆盖地球表面最广泛的自然介质,是地质演化与生态环境共同作用的产物。不同成因类型的土体具有各自独特的物理力学特性,其颗粒级配、矿物成分与结构特征中蕴含着区域地质历史与气候变迁的信息。从工程地质角度看,土的工程特性直接受其物质组成与结构特征控制;在环境科学领域,土的三相体系构成了物质循环与能量交换的重要界面。

### 1.1.1 土的成因与类型

#### 1. 土的成因

自然界中的土主要由岩石在风化作用下发生分解、破碎并伴随成分变化而形成。风化作用包括物理风化、化学风化和生物风化。地壳表层的岩石长期暴露在大气中,经受气候变化影响,会逐渐崩解、破碎成大小和形状各异的碎块,这一过程称为物理风化。经物理风化后的产物与母岩具有相同的矿物成分,这类矿物称为原生矿物,如石英、长石、云母等。

物理风化形成的碎块与水、氧气、二氧化碳等物质接触时,会发生化学变化,这一过程称为化学风化。化学风化会改变原有矿物的成分,生成与母岩矿物成分不同的次生矿物,如黏土矿物、铝铁氧化物和氢氧化物等。



生物风化是指动植物及人类活动对岩石造成的破坏,例如植物根系对岩石的劈裂作用、人类的采石开山等。经生物风化作用的岩石,其矿物成分一般未发生显著变化。

### 2. 土的类型

岩石风化产生的碎屑颗粒在原地堆积,或经风力、水流等搬运作用沉积,形成松散的沉积物,即工程上所称的土。根据不同的沉积成因类型,土可分为残积土、坡积土、洪积土、冲积土、湖积土、冰川积土和风积土等。此外,在特殊环境下还会形成特殊土,如沿海地区的软土、陕甘晋地区的黄土、滇黔桂地区的红黏土等。不同沉积类型的土具有各自的分布规律和工程地质特征,下面将简单介绍几种主要类型的土。



测试:随堂测试

(1)残积土。残积土是指残留在原地、未被搬运的母岩风化产物。残积土与基岩之间无明显界限,一般由基岩风化带直接过渡到新鲜基岩。其主要工程地质特征为:无明显层理构造,均质性差,物理力学性质差异较大;颗粒多较粗且具棱角,孔隙率较高,作为地基时易产生不均匀沉降。

(2)坡积土。坡积土是高处岩石风化产物在雨水、融雪及缓慢水流的冲刷剥蚀作用下,沿斜坡逐渐下移并沉积于平缓山坡上形成的沉积物。其主要工程地质特征为:常沿下伏基岩的倾斜面滑动;颗粒粗细不均、土质不均匀,厚度变化大,作为地基时易引起不均匀沉降;新近堆积的坡积土结构疏松、压缩性较高。

(3)洪积土。洪积土是岩石风化产物经暂时性山洪急流搬运后,堆积于山谷冲沟出口或山前倾斜平原而形成的沉积物。其主要工程地质特征为:常呈不规则交错的层理构造;靠近山地的洪积土颗粒较粗,地下水位埋藏较深,承载力一般较高,可作为良好天然地基;距山较远地区的洪积土颗粒较细,成分较均匀,厚度较大,土质密实,一般亦为良好天然地基。

(4)冲积土。冲积土是江河两岸的基岩及其上覆的坡积、洪积物,经流水剥蚀、搬运与沉积,在平缓地带形成的沉积物。按成因环境可分为平原河谷冲积土、山区河谷冲积土和三角洲冲积土。

①平原河谷冲积土:包括河床沉积土、河漫滩沉积土、河流阶地沉积土和古河道沉积土。河床沉积土多为中密砂砾,承载力较高,但需注意河流冲刷及凹岸边坡稳定;河漫滩沉积土地下水埋藏浅,下部常为砂砾、卵石等粗粒土,上部为较细颗粒土,局部夹有淤泥和泥炭,压缩性较高、承载力低;河流阶地沉积土强度较高,一般为良好地基。

②山区河谷冲积土:颗粒较粗,通常为砂粒充填的石块或圆砾,在高阶地处多为岩石或坚硬土层,适宜作为天然地基。

③三角洲冲积土:颗粒较细,含水率大,呈饱和状态,常分布有较厚的淤泥或淤泥质土层,承载力低。



### 知识拓展

#### 土的成因与地质循环

在地球漫长的地质演化进程中,岩土始终处于动态循环的演变状态。浑浊的泥浆状洪水流至江河下游,流速骤减,泥沙依粒径逐级沉积——胶体颗粒通过絮凝作用形成

冲积层,粗粒物质在重力分选作用下堆积成洪积扇,历经脱水与固结,最终演化为第四纪沉积物。这些新生地层在地壳运动中持续承受上覆岩层的静压力与构造应力,通过压实作用及硅质、钙质胶结逐步固化为沉积岩。

当地质抬升使岩层暴露于地表,物理风化(昼夜温差引起的热胀冷缩致使岩体破裂)与化学风化(水、氧作用导致的矿物水解)协同作用,侵蚀岩体,使其经历从微风化裂隙发育到强风化碎屑堆积的完整降解过程。风化产物在重力崩塌、水流搬运及风力吹扬作用下再次迁移沉积,完成“岩—土—岩”的物质循环。

这种跨越亿万年时空的相态转换,犹如地球表层系统的呼吸韵律,使无机质的岩土具备了类生命体般的循环特征。

### 1.1.2 土的组成与性质指标

在自然状态下,土由固体颗粒、水和气体组成。固体颗粒构成土的骨架,骨架之间存在孔隙,孔隙中填充着水和气体,因此土也被称为三相孔隙介质。

#### 1. 土的固体颗粒

土的固体颗粒简称土颗粒或土粒,其矿物成分、组成情况、大小及形状是决定土的工程性质的重要因素。

(1)土颗粒的矿物成分。土颗粒的矿物成分可分为原生矿物和次生矿物。一般粗颗粒的砾石、砂等主要由原生矿物构成,其成分与母岩相同,性质较稳定,工程性质表现为无黏性、透水性大、压缩性低,常见的原生矿物有石英、长石、云母等。细粒土主要由次生矿物构成,次生矿物多为黏土矿物,其成分与母岩差异较大,性质相对不稳定,具有较强的亲水性,遇水易膨胀、失水易收缩。常见的黏土矿物有蒙脱石、伊利石和高岭石,其亲水性依次减弱。

(2)土的粒组划分。自然界中的土由不同粒径的颗粒组成,土颗粒大小与土的性质密切相关。例如,颗粒由粗变细时,土的性质可由无黏性转变为黏性。在一定粒径范围内,土的矿物成分和性质通常较接近。因此,可将土中不同粒径的颗粒按适当的粒径范围划分为若干粒组,各粒组的性质随分界尺寸的变化而呈现不同特征。划分粒组的分界尺寸称为界限粒径。我国常用的土粒组划分方案见表 1-1。

表 1-1 我国常用的土粒组划分方案

| 粒组统称 | 粒组名称    |    | 粒径范围 $d/\text{mm}$    | 分析方法 | 主要特征                    |
|------|---------|----|-----------------------|------|-------------------------|
| 巨粒   | 漂石(块石)粒 |    | $d > 200$             | 直接测定 | 透水性极大,压缩性极小,颗粒间无黏结,无毛细性 |
|      | 卵石(碎石)粒 |    | $60 < d \leq 200$     |      |                         |
| 粗粒   | 砾粒      | 粗砾 | $20 < d \leq 60$      | 筛分法  | 透水性大,压缩性小,无黏性,具有一定毛细性   |
|      |         | 砂粒 | $2 < d \leq 20$       |      |                         |
|      | 粗粒      | 粗砂 | $0.5 < d \leq 2$      |      |                         |
|      |         | 中砂 | $0.25 < d \leq 0.5$   |      |                         |
|      |         | 细砂 | $0.075 < d \leq 0.25$ |      |                         |



续表

| 粒组统称 | 粒组名称 | 粒径范围 $d/\text{mm}$     | 分析方法   | 主要特征                        |
|------|------|------------------------|--------|-----------------------------|
| 细粒   | 粉粒   | $0.005 < d \leq 0.075$ | 静水沉降原理 | 透水性极弱, 压缩性变化大, 具有黏性和可塑性     |
|      | 黏粒   | $d \leq 0.005$         |        | 透水性小, 压缩性中等, 毛细上升高度大, 具有微黏性 |

(3)土的颗粒级配。土的颗粒级配是指土中各粒组占土粒总量的百分率,常用于表示土粒的大小组成及分布情况。

确定各粒组相对含量的颗粒分析方法有筛分法和沉降分析法两种。筛分法利用一套不同孔径的标准筛将各粒组分离,适用于粒径为 0.075~60 mm 的土。沉降分析法包括密度计法(比重计法)和移液管法(吸管法),利用不同粒径土粒在水中沉降速度不同的原理,确定粒径小于 0.075 mm 的土粒含量。

根据颗粒分析试验结果可绘制颗粒级配曲线,用以判断土的级配状况。如图 1-1 所示,颗粒级配曲线的横坐标表示粒径,由于土粒粒径相差悬殊(可达百倍、千倍),故采用对数坐标;纵坐标表示小于某一粒径的土的质量分数(累计百分含量)。

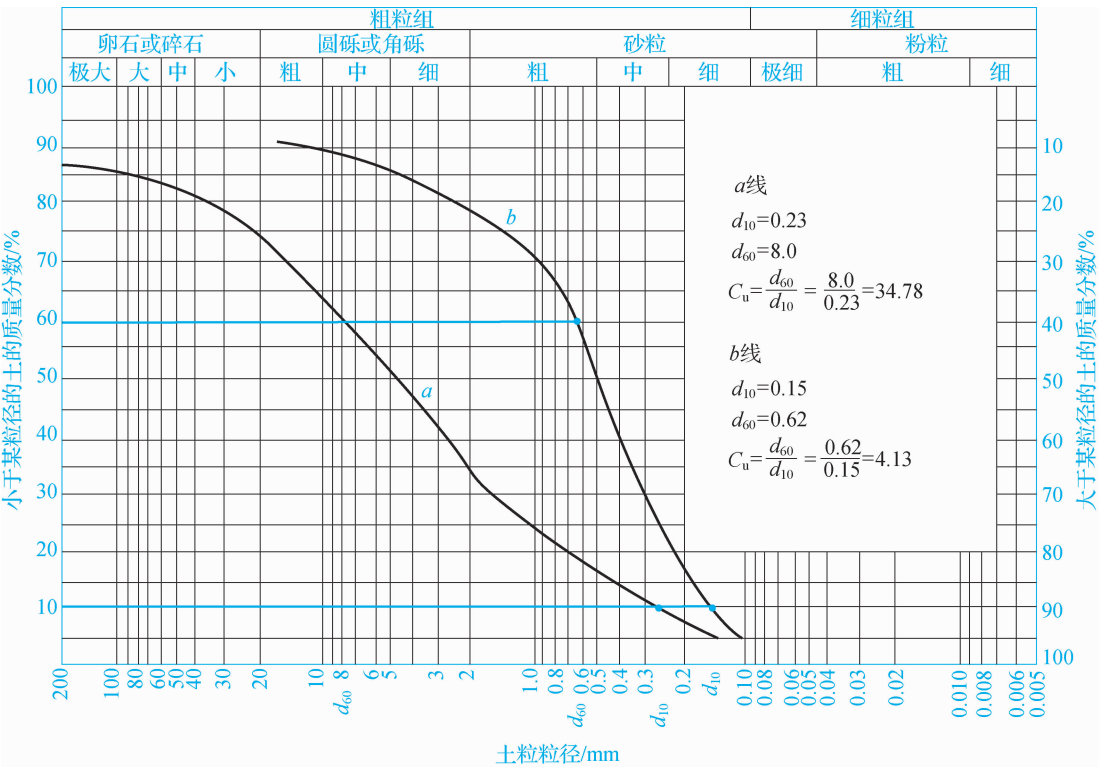


图 1-1 颗粒级配曲线

在图 1-1 中,曲线  $a$  较平缓,表示土样粒径范围宽、差异大,土粒不均匀,较大颗粒间的孔隙被小颗粒填充,密实度高,级配良好;曲线  $b$  较陡,表示粒径范围窄、差异小,土粒较均匀,级配不良。



为定量反映土颗粒的组成特征,工程上常用不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  两个指标描述。

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

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

式中,  $d_{60}$  为限定粒径,小于该粒径的土粒质量占总质量 60% 时对应的粒径;  $d_{10}$  为有效粒径,小于该粒径的土粒质量占总质量 10% 时对应的粒径;  $d_{30}$  为小于该粒径的土粒质量占总质量 30% 时对应的粒径。

不均匀系数  $C_u$  反映不同粒组的分布情况:  $C_u$  越大,曲线越平缓,粒径范围宽,土粒不均匀,级配良好;  $C_u$  越小,曲线越陡,粒径范围窄,土粒均匀,级配不良。

工程上规定:  $C_u < 5$  的土为均粒土,级配不良;  $C_u > 10$  的土为级配良好的非均粒土。

曲率系数  $C_c$  反映级配曲线的整体形状。当级配曲线斜率过大时,说明某一粒组含量过于集中,其他粒组相对较少。经验表明,连续级配土的  $C_c$  通常在 1~3 之间。

《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)规定:对于砂类或砾类土,当  $C_u \geq 5$  且  $C_c = 1 \sim 3$  时,级配良好;不能同时满足上述条件时,级配不良。级配良好的土强度和稳定性较高,透水性和压缩性较小,是填方工程的优质材料。

## 2. 土中水

自然状态下,土中普遍含有水。土中水的存在状态及其与土颗粒的相互作用对土的性质影响显著,且颗粒越细,影响越大。

按存在状态,土中水可分为固态水、气态水和液态水。固态水指土中的冰。水结成冰后体积膨胀,会引起土体冻胀并破坏其结构;冰融化后土体强度又会急剧降低,对地基不利。气态水指土中以水蒸气形式存在的水,其对土的性质影响较小。工程上所说的土中水通常指液态水,液态水可分为结合水和自由水两类。

(1) 结合水。结合水又称吸附水,是受土粒表面电场吸引而附着在土颗粒表面的水。按与土粒表面的距离可分为强结合水和弱结合水。

① 强结合水:指紧密附着在土颗粒表面的一层水膜,其厚度通常仅为几个水分子。在强电场力的作用下,强结合水受到颗粒吸引而固定,不随重力而流动,其物理性质接近固体。该类水分不传递静水压力,但具有一定的黏滞性、弹性和抗剪强度。其冰点远低于 0 °C (可低至 -78 °C),只有在加热至 105 °C 以上时才会完全蒸发。

② 弱结合水:位于强结合水层以外、仍处于颗粒表面电场影响范围内的水。其所受吸引力较弱,且随与颗粒距离增大而逐渐减小,最终过渡为自由水。弱结合水的黏滞性高于自由水,呈黏滞水膜形态;在电场力作用下可在土粒之间迁移,虽可发生形变,但不因重力而流动,亦不传递静水压力。弱结合水对黏性土工程性质影响最为显著,是黏性土在一定含水率区间内表现出可塑性的主要原因。

(2) 自由水。自由水是指存在于土粒电场作用范围以外、性质与普通水相同的水,能传递静水压力。自由水按分布状态可分为重力水和毛细水。

① 重力水:存在于地下水位以下土的孔隙中,可在重力或压力差作用下流动,对土粒具



有浮力作用,从而改变土的应力状态。施工中,重力水对基坑开挖、排水等有重要影响。

②毛细水:存在于地下水位以上土的孔隙中。土粒间孔隙相互连通,形成大量不规则毛细管,水在水—气界面表面张力作用下沿毛细管上升,形成毛细水。毛细管越细,毛细水上升高度越大,因此粉粒土的毛细水上升高度高于砂类土。在工程中,毛细水对地基土的湿陷、冻胀及地下构筑物防潮等有重要影响。

### 3. 土中气体

土中气体分布于未被水充填的孔隙内,主要有两种形态:一类与大气相通,另一类封闭在孔隙中而与大气隔绝。

在靠近地表的粗粒土中,孔隙气体多与大气相通,受外力时可被挤排,对土体工程性质影响较小;而细粒土中常存在与外界隔绝的封闭气泡,不易逸散。受压时,这些气泡会被压缩;卸荷后又部分回弹,从而提高土体的弹性与压缩性,延长变形稳定所需时间,并使透水性降低。

例如,在淤泥、泥炭等有机质土中,微生物分解会产生甲烷等可燃气体并在土中蓄积,使土体在自重作用下长期难以压密,形成高压缩性土层。

## 1.1.3 土的结构与构造特征

### 1. 土的结构

土的结构是指由土粒的大小、形状、表面特征、相互排列及联结关系等因素所形成的综合特征。土的结构对其工程性质具有重要影响,一般可分为单粒结构、蜂窝结构和絮状结构三种基本类型。

(1)单粒结构。单粒结构是无黏性土的基本结构形式,由粗颗粒土(如卵石、砂等)在重力作用下沉积形成。其特点是颗粒较大,土粒间分子吸引力较小,几乎没有联结或仅有微弱的毛细水联结。单粒结构可分为疏松状和紧密状两类,如图 1-2 所示。疏松状单粒结构在受到震动或其他外力作用时,土粒易发生位移并产生较大变形,未经处理一般不宜作为建筑物地基。紧密状单粒结构的土强度较高、压缩性较小,可作为良好的天然地基。

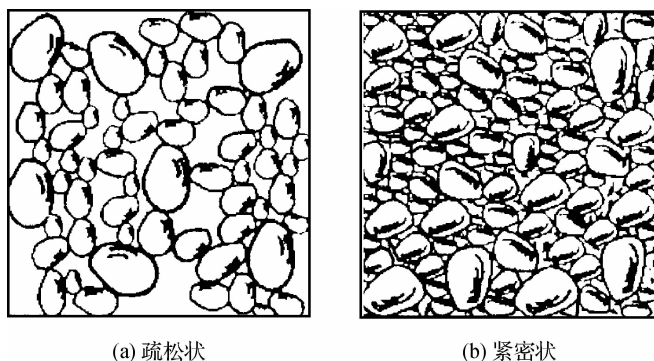


图 1-2 土的单粒结构

(2)蜂窝结构。蜂窝结构是细颗粒土的一种结构形式,由粒径为  $0.005\sim 0.075\text{ mm}$  的土粒(主要为粉粒)在水中下沉时形成。这类土颗粒间的相互引力大于其自重,下沉的颗粒

在与其他正在下沉或已沉积的土粒接触时会停留在接触面上,从而形成孔隙较大的蜂窝状结构(见图 1-3)。

(3)絮状结构。絮状结构是黏粒土的结构形式,黏粒粒径小于  $0.005\text{ mm}$ ,自重很轻,在水中不会迅速下沉,长期处于悬浮状态。当这些悬浮的黏粒进入电解质浓度较高的环境时,会凝聚成絮状黏粒集合体下沉,并与已沉积的絮状集合体相互接触,形成孔隙较大的絮状结构(见图 1-4)。

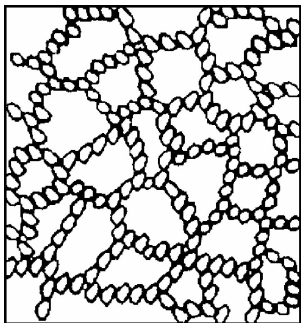


图 1-3 土的蜂窝状结构

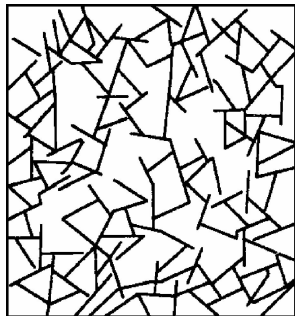


图 1-4 土的絮状结构

蜂窝状结构和絮状结构的土中孔隙较多,结构不稳定,一旦其天然结构被破坏,压缩性会显著增大、强度降低,因此一般不能直接作为地基。



### 小提示

土体结构一经形成,当外界条件发生变化时,其结构会随之调整。例如,在压密固结过程中,颗粒排列趋于更加紧密;而当作用于土体的外力消失或减弱时,土体可能发生膨胀,使结构相对松散。基于此,在土工试验与施工过程中应尽量减少对土样的扰动,以避免破坏其原状结构。

## 2. 土的构造

土的构造是指同一土层中结构不同部分的相互排列特征。常见的土构造形式包括层状构造、分散构造、裂隙构造和结核构造。

(1)层状构造:由不同颜色或不同粒径的土相互平行排列形成层理,一层层相互平行。这种构造反映了土粒在沉积过程中的不同阶段和搬运条件,是细粒土的重要特征之一。

(2)分散构造:土层中土颗粒性质相近、分布均匀的构造形式。分散构造多见于厚层的粗粒土(如砂层、卵石层等),其工程性质通常较好。

(3)裂隙构造:土体中存在大量不连续的小裂隙,这些裂隙削弱了土体的整体性,使强度和稳定性降低,同时渗透性增大,工程性质变差。某些坚硬或硬塑状态的黏土即表现为裂隙构造。

(4)结核构造:在细粒土中混有粗颗粒或各种结核(如含砾石的黏土)。结核构造土的工程性质主要取决于细粒土部分的性质。



## 1.2 土的物理性质与指标

自然界中土体的结构与组成十分复杂。为便于分析,通常将土简化为由固相、液相和气相组成的三相体系:固相为土粒,液相为水,气相为孔隙中的气体。在一个土单元中,三相所占比例并非固定不变,而是随环境条件变化而改变。土的三相比例不同,其状态及工程性质也随之改变。

描述土的三相物质在体积和质量上比例关系的指标,称为土的三相比例指标。三相比例指标反映了土的干湿程度、松密状态以及软硬特性,是评价土工程性质的最基本物理指标,也是工程地质报告中不可缺少的基本内容。三相比例指标可分为两类:基本指标和导出指标。

### 1.2.1 土的三相图

为更直观地反映土中三相物质的比例关系,通常将分散在土中的三相物质分别集中,并按相应比例绘制成三相图(见图 1-5)。图的左侧表示各相的质量,右侧表示各相所占的体积。各符号的意义: $m_s$ 为土中固体土粒的质量(g); $m_w$ 为土中水的质量(g); $m_a$ 为土中气体的质量, $m_a \approx 0$  g; $m$ 为土的总质量(g), $m = m_s + m_w + m_a \approx m_s + m_w$ ;  $V_s$ 为土中固体颗粒的体积( $\text{cm}^3$ ); $V_w$ 为土中水的体积( $\text{cm}^3$ ); $V_a$ 为土中气体的体积( $\text{cm}^3$ ); $V_v$ 为土中孔隙的体积( $\text{cm}^3$ ), $V_v = V_w + V_a$ ;  $V$ 为土的总体积( $\text{cm}^3$ ), $V = V_s + V_w + V_a = V_s + V_v$ 。

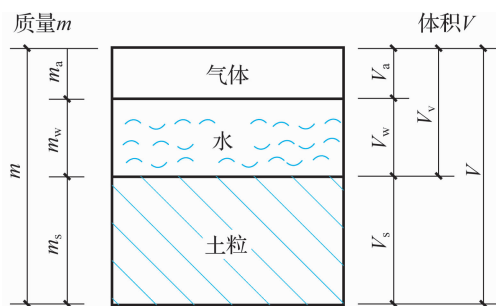


图 1-5 土的三相图

### 1.2.2 基本指标

为了确定三相图中的各物理量,必须通过实验室试验测定几个基本指标。通常进行的三个基本物理性质试验为土的密度试验、土粒比重(相对密度)试验和土的含水率试验,由此得到土的密度  $\rho$ 、土粒比重  $G_s$  以及土的含水率  $\omega$  这三项基本指标。

#### 1. 土的密度

土的密度定义为单位体积土的质量,用  $\rho$  表示,单位为  $\text{t/m}^3$  或  $\text{g/cm}^3$ ,其计算公式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-3)$$



天然状态下,土的密度变化范围较大:一般黏性土和粉土的  $\rho$  为  $1.8 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ ;砂土为  $1.6 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ ;腐殖土为  $1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 。

土的密度常采用环刀法测定。试验时,将刀刃向下的圆环刀放在削平的原状土样表面,缓慢削去环刀外围的土,同时边削边压,使保持天然状态的土样充满环刀,称量环刀内土样的质量,并将其与环刀容积之比作为该土样的密度。

在实际工程中,常将土的密度换算为土的重力密度(简称重度)。重度定义为单位体积土的重量,是重力的函数,用  $\gamma$  表示,单位为  $\text{kN/m}^3$ ,其计算公式为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho g \quad (1-4)$$

式中, $G$  为土的重量( $\text{kN}$ ); $g$  为重力加速度, $g=9.80665 \text{ m/s}^2$ ,工程计算中常取  $g=10 \text{ m/s}^2$ 。

## 2. 土粒比重

土粒比重是土粒密度(单位体积土粒的质量)与  $4^\circ\text{C}$  时纯水密度之比,用  $G_s$  表示,为无量纲量。其计算公式为

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1-5)$$

式中, $\rho_s$  为土粒的密度( $\text{g/cm}^3$ ); $\rho_w$  为  $4^\circ\text{C}$  时纯水的密度( $\text{g/cm}^3$ ), $\rho_w=1.00 \text{ g/cm}^3$ 。

土粒比重通常在实验室采用比重瓶法测定。由于土粒比重变化范围较小,实际工程中可按经验取值,具体参考表 1-2。

表 1-2 土粒比重参考值

| 土的名称 | 砂土        | 粉土        | 黏性土       |           |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |           |           | 粉质黏土      | 黏土        |
| 土粒比重 | 2.65~2.69 | 2.70~2.71 | 2.72~2.73 | 2.74~2.76 |

## 3. 土的含水率

土的含水率定义为土中水的质量与土粒质量之比,用  $\omega$  表示,以百分数计。其计算公式为

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

式中, $m_w$  为土中水的质量( $\text{g}$ ); $m_s$  为土粒的质量( $\text{g}$ )。

含水率  $\omega$  是表示土湿度的重要物理指标。天然土层的含水率变化范围较大,与土的种类、埋藏条件及所处的自然地理环境密切相关。一般而言,同类土在含水率增大时,其强度会降低。

土的含水率常采用烘干法测定。试验步骤为:先称取小块原状湿土质量  $m$ ,然后将土样置于烘箱内,在  $100^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$  温度下烘干至恒重,再称取干土质量  $m_s$ ,计算湿、干土质量差  $(m-m_s)$  与干土质量  $m_s$  的比值,即为土的含水率。

### 1.2.3 导出指标

在测定了土的密度、土粒比重和土的含水率这三项基本指标后,可根据三相图计算出三相



组成在体积和质量上的含量。工程上,为便于表示三相含量的特征,常定义以下几类导出指标。

### 1. 表示土中孔隙含量的指标

工程上常用孔隙比  $e$  或孔隙率  $n$  表示土中孔隙的含量。

(1) 孔隙比  $e$ : 土中孔隙体积与土粒体积之比, 公式为

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-7)$$

孔隙比用小数表示, 是评价天然土层密实程度的重要物理指标。一般情况下,  $e < 0.6$  的土为密实的低压缩性土,  $e > 1.0$  的土为疏松的高压缩性土。

(2) 孔隙率  $n$ : 土中孔隙体积与土总体积之比, 以百分数计, 公式为

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

(3) 孔隙比与孔隙率的关系:

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\% \quad (1-9)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-10)$$

### 2. 表示土中含水程度的指标

当土的孔隙中不含水时, 称为干土; 在地下水位以下, 孔隙被水完全充满时, 称为饱和土; 当孔隙中同时存在水和气体时, 称为非饱和土(又称湿土)。

工程上用饱和度表示孔隙中充水的程度。饱和度  $S_r$  定义为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中,  $V_w$  为水的体积( $\text{cm}^3$ ),  $V_v$  为孔隙的体积( $\text{cm}^3$ )。

砂土湿度状态可按饱和度划分(见表 1-3)。

表 1-3 砂土湿度状态的划分

| 砂土湿度状态       | 稍湿            | 很湿                 | 饱和         |
|--------------|---------------|--------------------|------------|
| 饱和度 $S_r/\%$ | $S_r \leq 50$ | $50 < S_r \leq 80$ | $S_r > 80$ |

显然, 干土的饱和度  $S_r = 0$ , 完全饱和土的饱和度  $S_r = 100\%$ 。

### 3. 表示土的密度和重度的几种指标

除了天然密度(或称湿密度), 工程计算中还常用饱和密度和干密度。

(1) 饱和密度  $\rho_{\text{sat}}$ : 孔隙完全充满水时的土密度, 公式为

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + m_w}{V} \quad (1-12)$$

(2) 干密度  $\rho_d$ : 单位土体积中土粒的质量, 公式为

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-13)$$

在计算土的自重应力时, 应使用重力密度(简称重度)。与上述密度相对应的有天然重度  $\gamma$ 、饱和重度  $\gamma_{\text{sat}}$ 、干重度  $\gamma_d$ , 它们与密度的关系为



测试: 随堂测试

$$\gamma = \rho g, \quad \gamma_{\text{sat}} = \rho_{\text{sat}} g, \quad \gamma_d = \rho_d g$$

对于地下水位以下的土体,因受水的浮力作用,扣除浮力后单位体积土体所受的重力称为有效重度(又称浮重度),记为  $\gamma'$ 。当认为水下土体处于饱和状态时,有

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w \quad (1-14)$$

式中,  $\gamma_w = \rho_w g$  为水的重度。

显然,各种密度与重度之间在数值上满足以下关系:

$$\begin{aligned} \rho_d &\leq \rho \leq \rho_{\text{sat}} \\ \gamma' &< \gamma_d \leq \gamma \leq \gamma_{\text{sat}} \end{aligned}$$

### 1.2.4 三相比例指标之间的换算关系

在土的三相比例指标中,含水率、密度和土粒比重三项基本指标是通过试验测定的,其余各项指标可通过土的三相比例关系换算求得。各项常用指标之间的换算公式见表 1-4。

表 1-4 土的三相比例指标换算公式

| 指 标            | 常用换算公式                                     | 指 标                        | 常用换算公式                                                  |
|----------------|--------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|
| 土粒比重 $G_s$     | $G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$              | 饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}$ | $\gamma_{\text{sat}} = \frac{\gamma_w(G_s + e)}{1 + e}$ |
| 含水率 $\omega$   | $\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\%$    | 干重度 $\gamma_d$             | $\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}$                  |
| 干密度 $\rho_d$   | $\rho_d = \frac{\rho}{1 + \omega}$         | 重度 $\gamma$                | $\gamma = \rho g$                                       |
| 有效重度 $\gamma'$ | $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$ | 孔隙比 $e$                    | $e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1$   |
| 孔隙率 $n$        | $n = \frac{e}{1 + e} \times 100\%$         | 饱和度 $S_r$                  | $S_r = \frac{\omega G_s}{e} \times 100\%$               |

注:在使用换算公式时,含水率  $\omega$  应以小数形式代入计算。

**【例 1-1】** 某原状土样,试验测得土的天然密度  $\rho = 1.70 \text{ g/cm}^3$ ,含水率  $\omega = 22.0\%$ ,土粒比重  $G_s = 2.72$ 。试求土的孔隙比  $e$ 、孔隙率  $n$  和饱和度  $S_r$ 。

**【解】** 由表 1-4:

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{G_s (1 + \omega) \rho_w}{\rho} - 1 = \frac{2.72 \times (1 + 0.22) \times 1.00}{1.70} - 1 = 0.952$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \times 100\% = \frac{0.952}{1 + 0.952} \times 100\% \approx 48.8\%$$

$$S_r = \frac{\omega G_s}{e} \times 100\% = \frac{0.22 \times 2.72}{0.952} \times 100\% \approx 62.9\%$$

**【例 1-2】** 用环刀切取一土样,测得该土样的体积为  $60 \text{ cm}^3$ ,质量为  $114 \text{ g}$ 。土样烘干后测得其质量为  $100 \text{ g}$ 。若土粒比重  $G_s = 2.7$ ,试求土的密度、含水率和孔隙比。

**【解】** 由表 1-4 得:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{114}{60} = 1.9 (\text{g/cm}^3)$$



$$\omega = \frac{m_w}{m_s} \times 100\% = \frac{114 - 100}{100} \times 100\% = 14\%$$

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1 = \frac{G_s (1 + \omega) \rho_w}{\rho} - 1 = \frac{1.00 \times 2.7 \times (1 + 0.14)}{1.9} - 1 = 0.62$$

## 1.3 土的物理状态指标

所谓土的物理状态,是指土所表现出的干湿、软硬、松密程度等特征。对于无黏性土,物理状态主要体现为土的密实度;对于黏性土,则表现为土的软硬程度,即稠度。

### 1.3.1 无黏性土的物理状态指标

无黏性土是指具有单粒结构的碎石土与砂土。当其颗粒排列紧密、处于密实状态时,强度较高、压缩性较小,可作为良好的天然地基;当颗粒排列松散时,强度较低、压缩性较大,为不良地基。评价无黏性土工程性质的关键在于正确划分其密实度,即单位体积中固体颗粒所占的充填程度。



文本:土力学

发展过程中出现的著名学者

#### 1. 碎石土的密实度

碎石土的密实度一般可根据重型圆锥动力触探锤击数  $N_{63.5}$  确定(见表 1-5);也可在现场根据骨架颗粒含量、排列、可挖性及可钻性综合鉴别(见表 1-6)。

表 1-5 碎石土的密实度

| 重型圆锥动力触探锤击数 $N_{63.5}$ | $N_{63.5} \leq 5$ | $5 < N_{63.5} \leq 10$ | $10 < N_{63.5} \leq 20$ | $N_{63.5} > 20$ |
|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|
| 密实度                    | 松散                | 稍密                     | 中密                      | 密实              |

注:1. 本表适用于平均粒径不大于 50 mm 且最大粒径不超过 100 mm 的卵石、碎石、圆砾、角砾。对于平均粒径大于 50 mm 或最大粒径大于 100 mm 的碎石土,可按表 1-6 鉴别密实度。

2. 表内  $N_{63.5}$  为经综合修正后的平均值。

表 1-6 碎石土密实度的野外鉴别方法

| 密实度 | 骨架颗粒的含量和排列             | 可挖性                             | 可钻性                           |
|-----|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 密实  | 含量大于 70%,呈交错排列,连续接触    | 锹、镐挖掘,用撬棍方能松动,井壁一般稳定            | 钻进极困难,冲击钻探时钻杆、吊锤跳动剧烈,孔壁较稳定    |
| 中密  | 含量 60%~70%,呈交错排列,大部分接触 | 锹、镐可挖掘,井壁有掉块,从井壁取出大颗粒处能保持颗粒凹面形状 | 钻进较困难,冲击钻探时钻杆、吊锤跳动不剧烈,孔壁有坍塌现象 |
| 稍密  | 含量 55%~60%,排列混乱,大部分不接触 | 锹可挖掘,井壁易坍塌,从井壁取出大颗粒后砂土立即坍落      | 钻进较容易,冲击钻探时钻杆稍有跳动,孔壁易坍塌       |
| 松散  | 含量小于 55%,排列混乱,绝大部分不接触  | 锹易挖掘,井壁极易坍塌                     | 钻进很容易,冲击钻探时钻杆无跳动,孔壁极易坍塌       |

注:1. 密实度应按表中各项特征综合确定。

2. 骨架颗粒系指与表 1-1 中相对应粒径的颗粒。



## 2. 砂土的密实度

判别砂土密实状态的常用指标主要有以下三种。

(1) 孔隙比  $e$ 。采用天然孔隙比的大小来判断砂土密实度是一种较为简便的方法。一般情况下,当  $e < 0.60$  时,砂土处于密实状态,属良好的天然地基;当  $e > 0.95$  时,砂土处于松散状态,不宜作为天然地基。

该方法的不足在于未考虑级配对砂土密实度的影响。不同粒径级配的砂土,即使孔隙比相同,由于颗粒大小与排列方式不同,其密实状态也会有所差异。此外,对于砂土而言,取得原状土样以测定孔隙比往往比较困难。

(2) 相对密度  $D_r$ 。当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比  $e_{\min}$ ;当砂土处于最疏松状态时,其孔隙比称为最大孔隙比  $e_{\max}$ ;砂土在天然状态下的孔隙比用  $e$  表示,则相对密度  $D_r$  为

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-15)$$

当天然孔隙比接近最大孔隙比时,  $D_r$  接近 0, 表明砂土处于最松散状态;当天然孔隙比接近最小孔隙比时,  $D_r$  接近 1, 表明砂土处于最密实状态。

根据相对密度  $D_r$ , 可将砂土分为松散、中密和密实三种状态(见表 1-7)。

表 1-7 用相对密度划分砂土密实度

| 相对密度 $D_r$ | $0 \leq D_r \leq 1/3$ | $1/3 < D_r \leq 2/3$ | $2/3 < D_r \leq 1$ |
|------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| 密实度        | 松散                    | 中密                   | 密实                 |

(3) 标准贯入锤击数  $N$ 。虽然相对密度在理论上能反映颗粒级配、颗粒形状等因素,但要准确测量天然孔隙比及最大、最小孔隙比往往十分困难。在实际工程中,常采用标准贯入试验、静力触探或动力触探等原位测试方法来评价砂土的密实度。

标准贯入试验是将标准重锤(63.5 kg)以规定落距(76 cm)自由下落,驱动标准贯入器入土,记录其贯入最后 30 cm 所需的锤击数  $N$ 。锤击数的大小可反映砂土的密实度(见表 1-8)。

表 1-8 按锤击数  $N$  划分砂土密实度

| 密实度           | 松散          | 稍密               | 中密               | 密实       |
|---------------|-------------|------------------|------------------|----------|
| 标准贯入试验锤击数 $N$ | $N \leq 10$ | $10 < N \leq 15$ | $15 < N \leq 30$ | $N > 30$ |

**【例 1-3】** 某砂土试样试验测得:土粒比重  $G_s = 2.7$ , 含水率  $\omega = 9.43\%$ , 天然密度  $\rho = 1.66 \text{ g/cm}^3$ 。对该砂土在最密实与最松散两种状态下,取单位体积  $V = 1\,000 \text{ cm}^3$  的土样:在最密实状态下,干砂质量  $m_{s1} = 1.62 \text{ kg}$ ;在最松散状态下,干砂质量  $m_{s2} = 1.45 \text{ kg}$ 。求该砂土的相对密度  $D_r$ ,并据此判断密实状态。

**【解】** 砂土在天然状态下的孔隙比为

$$e = \frac{G_s(1+\omega)\rho_w}{\rho} - 1 = \frac{2.7 \times (1+0.0943) \times 1}{1.66} - 1 \approx 0.78$$

两种状态下的干密度为

$$\rho_{d\max} = \frac{m_{s1}}{V} = \frac{1\,620}{1\,000} = 1.62 (\text{g/cm}^3)$$



$$\rho_{dmin} = \frac{m_{s2}}{V} = \frac{1\ 450}{1\ 000} = 1.45(\text{g/cm}^3)$$

最小、最大孔隙比分别为

$$e_{min} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{dmax}} - 1 = \frac{2.7 \times 1}{1.62} - 1 \approx 0.67$$

$$e_{max} = \frac{G_s \rho_w}{\rho_{dmin}} - 1 = \frac{2.7 \times 1}{1.45} - 1 \approx 0.86$$

相对密度为

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{0.86 - 0.78}{0.86 - 0.67} \approx 0.42$$

由于  $0.33 < D_r < 0.67$ , 根据表 1-7 可判定该砂土处于中密状态。

### 1.3.2 黏性土的物理状态指标

黏性土的主要成分是黏粒,土粒细小,比表面积大(单位体积内颗粒总表面积大),且黏粒表面与水的相互作用能力强。黏性土的物理状态通常用稠度表示,黏度反映了黏性土在不同含水率条件下的软硬程度或稀稠程度。由于含水率不同,黏性土可处于固态、半固态、可塑状态或流动状态。

#### 1. 黏性土的界限含水率

如图 1-6 所示,当含水率很大时,黏性土呈黏滞流动的液体状态,即泥浆状态,此时称为流动状态。随着含水率的减少,黏滞流动特征逐渐消失,土体开始表现出可塑性(在外力作用下可被塑造成任意形状而不产生裂纹,并且在外力移去后仍能保持原形的性质),此时为可塑状态。当含水率继续减少,可塑性逐渐减弱,土由可塑状态转变为半固态。当含水率很低时,土的体积不再随含水率减少而减小,此时称为固态。

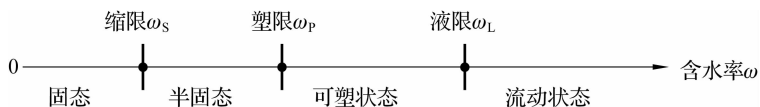


图 1-6 黏性土的物理状态与含水率的关系

黏性土从一种状态向另一种状态过渡时所对应的含水率称为界限含水率。其中,由可塑状态转变为流动状态时的界限含水率称为液限  $\omega_L$ ;由半固态转变为可塑状态时的界限含水率称为塑限  $\omega_P$ ,由固态转变为半固态时的界限含水率称为缩限  $\omega_S$ 。

工程中常用的界限含水率为液限和塑限,通常采用液塑限联合测定仪进行测定。此外,塑限还常用滚搓塑限法测定。具体操作方法可参见附录。

#### 2. 黏性土的塑性指数 $I_P$

塑性指数是液限  $\omega_L$ 和塑限  $\omega_P$ 的差值,即黏性土处于可塑状态时含水率的变化范围,用  $I_P$ 表示,其计算公式为

$$I_P = \omega_L - \omega_P \quad (1-16)$$

式中, $\omega_L$ 为黏性土的液限(%); $\omega_P$ 为黏性土的塑限(%)。

计算塑性指数时,应去掉百分符号,仅取数值进行运算。

显然,塑性指数反映黏性土的可塑范围大小。塑性指数越大,表明黏性土的黏性和塑性越强。塑性指数的大小与土中结合水的可能含量相关,而结合水的含量又受土的颗粒组成、矿物组成以及水中离子的种类和浓度等因素控制。一般来说,土粒越细、黏粒含量越高,比表面积越大,与水作用并发生离子交换的机会越多,因而塑性指数也越大。

由于塑性指数在一定程度上综合反映了影响黏性土物理状态的各种重要因素,因此工程上常按塑性指数对黏性土进行分类,如表 1-9 所示。

表 1-9 黏性土的分类

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 塑性指数 $I_P$ | $10 < I_P \leq 17$ | $I_P > 17$ |
| 土的名称       | 粉质黏土               | 黏土         |

### 3. 黏性土的液性指数 $I_L$

液性指数是指土的天然含水率与塑限的差值与塑性指数  $I_P$  之比,用  $I_L$  表示,其计算公式为

$$I_L = \frac{\omega - \omega_P}{I_P} \quad (1-17)$$

式中, $\omega$  为黏性土的天然含水率(%); $\omega_P$  为黏性土的塑限(%)。

计算时,应去掉百分符号,仅取数值代入公式。

液性指数是反映黏性土软硬程度(稠度)的物理指标。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定,可根据液性指数  $I_L$  将黏性土划分为五种状态,如表 1-10 所示。

表 1-10 黏性土状态的划分

|            |              |                     |                        |                     |           |
|------------|--------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------|
| 状 态        | 坚硬           | 硬塑                  | 可塑                     | 软塑                  | 流塑        |
| 液性指数 $I_L$ | $I_L \leq 0$ | $0 < I_L \leq 0.25$ | $0.25 < I_L \leq 0.75$ | $0.75 < I_L \leq 1$ | $I_L > 1$ |



## 知识拓展

### 塑性指数及其工程意义

塑性指数越大,土的可塑性就越强。形象地说,如果用一块黏性土来塑像,这种土在塑像过程中,不会因风吹失水而很快变硬失去塑性,也不会因稍多加水而迅速变得稀软、失去成型能力。反之,塑性指数较小的土,易因风吹失水或稍加水而失去可塑性,即可塑性差。

可塑性的高低具有重要的工程意义。一般而言,塑性指数大的黏性土往往具有明显的胀缩性,性质不稳定,不宜作为工程填料和地基土。但事物具有两面性,塑性指数大的黏性土由于颗粒细、黏塑性高、遇水易软化,与水搅拌后均匀性好、不易沉淀,因此在水下灌注桩、地下连续墙施工中,常作为护壁泥浆的优良配料材料。

需要注意的是,黏性土的塑性指数由土性决定,是其固有属性,与土的状态无关,常用于土的分类;而液性指数由当前含水率决定,反映黏性土软硬的一种状态。对于同一种黏性土,塑性指数保持不变,而液性指数会随含水率的变化而改变。



#### 4. 黏性土的灵敏度 $S_t$

天然状态下的黏性土通常具有一定的结构性。当土体受到扰动时,结构被破坏,强度降低,压缩量增大。通常以灵敏度  $S_t$  表征结构性对黏性土强度的影响,其定义为

$$S_t = \frac{q_n}{q_0} \quad (1-18)$$

式中,  $q_n$  为原状土的无侧限抗压强度(kPa),即在保持土体结构和含水率不变的天然状态下测得的强度;  $q_0$  为重塑土的无侧限抗压强度(kPa),即土样经完全扰动后重新压实至与原状土相同密实度,且含水率保持不变时的强度。

在实际工程中,可根据灵敏度大小对饱和黏性土进行分类(见表 1-11)。

表 1-11 饱和黏性土按灵敏度分类

| 灵敏度 $S_t$ | $1 < S_t \leq 2$ | $2 < S_t \leq 4$ | $S_t > 4$ |
|-----------|------------------|------------------|-----------|
| 分 类       | 低灵敏土             | 中灵敏土             | 高灵敏土      |

土的灵敏度越高,结构性越强,受扰动后强度降低的幅度越大。黏性土受扰动导致强度降低的特性,对工程建设通常是不利的。例如,在基坑开挖过程中,由于施工扰动,地基土可能发生强度下降,从而影响基坑稳定。

#### 5. 黏性土的触变性

黏性土在受到扰动后强度会降低;若将其静置一段时间,强度可逐步恢复,此现象称为触变性。

触变性产生的原因在于土体结构联结形态的变化。当土体受到扰动时,原有结构被破坏,导致强度下降;在静置过程中,土粒间的结合逐渐恢复,微观结构重新排列,从而在宏观上表现为强度回升。

在地基处理中,可利用黏性土的触变性以恢复地基强度。例如,采用深层挤密类处理方法时,应在施工完成后静置一段时间,再进行上部结构施工,以充分发挥触变效应,促进地基强度恢复。

## 1.4 岩土的工程分类与现场鉴别

### 1.4.1 地基岩土的分类

岩土的分类方法很多,《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)将作为建筑地基的岩土分为岩石、碎石土、砂土、粉土、黏性土和人工填土六类。

#### 1. 岩石

岩石由颗粒间牢固胶结形成,可表现为整体岩体,亦可能含有节理、裂隙。作为建筑物地基时,除确定其地质名称(如花岗岩、砂岩等)外,还应依据坚硬程度与完整程度进行分类(见表 1-12 和表 1-13)。

表 1-12 岩石坚硬程度的划分

| 坚硬程度类别                          | 坚硬岩           | 较硬岩                   | 较软岩                   | 软岩                   | 极软岩             |
|---------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| 饱和单轴抗压强度标准值 $f_{rk}/\text{MPa}$ | $f_{rk} > 60$ | $60 \geq f_{rk} > 30$ | $30 \geq f_{rk} > 15$ | $15 \geq f_{rk} > 5$ | $f_{rk} \leq 5$ |

表 1-13 岩石完整程度的划分

| 完整程度等级 | 完整       | 较完整              | 较破碎              | 破碎               | 极破碎      |
|--------|----------|------------------|------------------|------------------|----------|
| 完整性指数  | $> 0.75$ | $0.75 \sim 0.55$ | $0.55 \sim 0.35$ | $0.35 \sim 0.15$ | $< 0.15$ |

注:完整性指数为岩体纵波波速与岩块纵波波速之比的平方。选定岩体和岩块进行波速测定时,应具有代表性。

## 2. 碎石土

碎石土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土,可分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾,其具体分类见表 1-14。碎石土的密实度可分为松散、稍密、中密、密实,划分依据见表 1-5 和表 1-6。

表 1-14 碎石土的分类

| 土的名称 | 颗粒形状     | 粒组含量                      |
|------|----------|---------------------------|
| 漂石   | 圆形及亚圆形为主 | 粒径大于 200 mm 的颗粒含量超过全重 50% |
| 块石   | 棱角形为主    |                           |
| 卵石   | 圆形及亚圆形为主 | 粒径大于 20 mm 的颗粒含量超过全重 50%  |
| 碎石   | 棱角形为主    |                           |
| 圆砾   | 圆形及亚圆形为主 | 粒径大于 2 mm 的颗粒含量超过全重 50%   |
| 角砾   | 棱角形为主    |                           |

注:分类时应根据粒组含量栏从上到下,以最先符合者确定。

## 3. 砂土

砂土是指粒径大于 2 mm 的颗粒含量不超过全重 50%、粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 50% 的土。砂土可按表 1-15 分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。砂土的密实度分类见表 1-7 和表 1-8。

表 1-15 砂土的分类

| 土的名称 | 粒组含量                        |
|------|-----------------------------|
| 砾砂   | 粒径大于 2 mm 的颗粒含量占全重 25%~50%  |
| 粗砂   | 粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量超过全重 50%   |
| 中砂   | 粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量超过全重 50%  |
| 细砂   | 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 85% |
| 粉砂   | 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量超过全重 50% |

注:分类时应根据粒组含量栏从上到下,以最先符合者确定。

## 4. 粉土

粉土为介于砂土与黏性土之间,塑性指数  $I_p \leq 10$  且粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量不超过全重 50% 的土。其兼具砂土和黏性土的某些特征。





### 5. 黏性土

黏性土为塑性指数  $I_p > 10$  的土,可分为黏土和粉质黏土(见表 1-9)。根据液性指数  $I_L$ ,可将黏性土的软硬程度分为坚硬、硬塑、可塑、软塑和流塑五种状态(见表 1-10)。

### 6. 人工填土

人工填土是由人类活动堆填形成的土。按其组成和成因,人工填土可分为素填土、压实填土、杂填土和冲填土。

(1)素填土:由碎石土、砂土、粉土、黏性土等组成的填土。

(2)压实填土:经过压实或夯实的素填土。

(3)杂填土:含有建筑垃圾、工业废料、生活垃圾等杂物的填土。

(4)冲填土:由水力冲填泥沙形成的填土。

人工填土物质成分复杂,均匀性差,作为地基时应注意其不均匀性。

除上述六类土外,还有一些特殊土,如软土、红黏土、湿陷性黄土、膨胀土等。这些土在特定地理环境和气候等条件下形成,具有特殊的工程性质。

**【例 1-4】** 对某住宅进行工程地质勘察时,取回一个砂土试样。经筛分试验,得到各粒组含量百分率,如图 1-7 所示。试确定该砂土的名称。

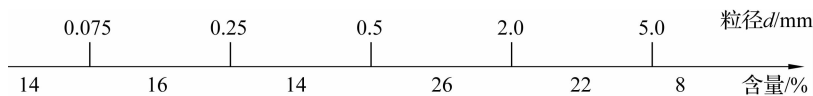


图 1-7 例 1-4 附图

**【解】** 根据砂土的分类标准(见表 1-15)及“按粒组含量由大到小、以最先符合者为准”的规定,该砂土中粒径  $d > 2 \text{ mm}$  的颗粒含量占 30%,处于 25%~50%之间,因此应判定为砾砂。

**【例 1-5】** 图 1-8 为 A、B、C 三种土的颗粒级配曲线。试按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中的分类方法确定三种土的名称。

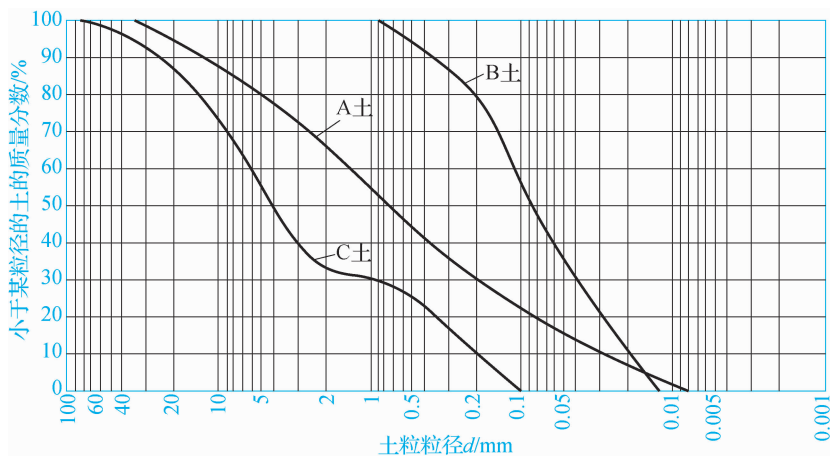


图 1-8 例 1-5 附图



图文:填土压实的  
影响因素

【解】 A土:由级配曲线查得,粒径小于2 mm的颗粒占总质量的67%,粒径小于0.075 mm的占21%,符合“粒径大于2 mm的颗粒不超过50%,且粒径大于0.075 mm的颗粒超过50%”的条件,因此该土属于砂土。又因粒径大于2 mm的颗粒含量为33%,在25%~50%范围内(见表1-15),故命名为砾砂。

B土:无粒径大于2 mm的颗粒,粒径大于0.075 mm的颗粒占52%,属于砂土。按表1-15,应命名为粉砂。

C土:粒径大于2 mm的颗粒占67%,粒径大于20 mm的颗粒占13%,符合碎石土的判定条件。按表1-14,应命名为圆砾或角砾。

【例 1-6】 有A、B两种土样,试验结果见表1-16,试确定两种土的名称及软硬状态。

表 1-16 例 1-6 中土样试验结果

| 土 样 | 天然含水率 $\omega/\%$ | 塑限 $\omega_p/\%$ | 液限 $\omega_L/\%$ |
|-----|-------------------|------------------|------------------|
| A   | 40.4              | 25.4             | 47.9             |
| B   | 23.2              | 21.0             | 31.2             |

【解】 (1)A土样。

塑性指数为

$$I_p = \omega_L - \omega_p = 47.9 - 25.4 = 22.5$$

液性指数为

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{I_p} = \frac{40.4 - 25.4}{22.5} \approx 0.67$$

按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),细粒土中当  $I_p > 17$  时为黏土;液性指数  $0.5 < I_L \leq 0.75$  时,土处于可塑状态。

因此,A土样为黏土,处于可塑状态。

(2)B土样。

塑性指数为

$$I_p = \omega_L - \omega_p = 31.2 - 21.0 = 10.2$$

液性指数为

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{I_p} = \frac{23.2 - 21.0}{10.2} \approx 0.22$$

按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),细粒土中当  $7 \leq I_p \leq 17$  时为粉质黏土;液性指数  $0 < I_L \leq 0.25$ ,土处于硬塑状态。

因此,B土样为粉质黏土,处于硬塑状态。

### 1.4.2 岩土现场鉴别

在建筑施工中,常按开挖难易程度将土(含岩)分为八类:松软土、普通土、坚土、砂砾性土、软石(又称较坚石)、次坚石、坚石、特坚石。其中前四类归为一般土体,后四类归为岩石。土的工程分类与现场鉴别方法见表1-17。



表 1-17 土的工程分类与现场鉴别方法

| 土的分类          | 土的名称                                         | $K_s$     | $K_r$     | 主要开挖方法与工具            |
|---------------|----------------------------------------------|-----------|-----------|----------------------|
| 一类土<br>(松软土)  | 砂土、粉土、冲积砂土层、疏松的种植土、泥炭(淤泥)                    | 1.08~1.14 | 1.01~1.05 | 以锹掘进,辅以钎挖,少量脚蹬即可     |
| 二类土<br>(普通土)  | 粉质黏土、潮湿黄土、夹碎石或卵石的砂、粉土、混卵(碎)石、种植土、填土          | 1.14~1.28 | 1.02~1.05 | 以锹、条钎挖掘,局部可用镐松动      |
| 三类土<br>(坚土)   | 软~中等密实黏土、重粉质黏土、粉质黄土、碎石土、干黄土、含碎(卵)石黄土、压实填土    | 1.24~1.30 | 1.04~1.07 | 以镐为主,辅以锹掘,局部用撬棍      |
| 四类土<br>(砂砾性土) | 坚硬密实黏性土、中密砂卵石土、粗卵石、天然配砂石、钙泥灰岩、砾石含石英岩         | 1.26~1.37 | 1.06~1.15 | 先用镐、撬棍,再用钎挖;局部用楔子与大锤 |
| 五类土<br>(软石)   | 硬质黏土、中密页岩、泥灰岩、白垩土、胶结不紧的碎屑、软石灰岩及风化灰岩          | 1.30~1.45 | 1.10~1.20 | 镐或撬棍、大锤为主,局部需小规模爆破   |
| 六类土<br>(次坚石)  | 泥岩、砂岩、硬黏土、坚实页岩、致密石灰岩、风化花岗岩、片麻岩、正长岩           | 1.30~1.45 | 1.10~1.20 | 爆破开挖,局部可配风镐          |
| 七类土<br>(坚石)   | 大理岩、辉绿岩、粗粒花岗岩;坚实白云岩、砂岩、砾岩、片麻岩、石灰岩、弱风化花岗岩、玄武岩 | 1.30~1.45 | 1.10~1.20 | 爆破开挖                 |
| 八类土<br>(特坚石)  | 安山岩、云母岩、花岗片麻岩、坚实细粒花岗岩、闪长岩、石英岩、辉长岩、辉绿岩、角闪岩    | 1.45~1.50 | 1.20~1.30 | 爆破开挖                 |

注:1.  $K_s$  为最初回松性系数,指原状土体松方体积与原状体积之比; $K_r$  为最终压实系数,指回填压实后的最终密实体积与原状体积之比。

2. 现场鉴别应综合颗粒组成、密实程度、含水状况、可挖性及边坡稳定性等特征进行判断;边界条件应取中间偏不利一侧。



## 知识链接

赵州桥,又名安济桥,位于中国河北省赵县汶河之上,建于隋代,由著名匠师李春设计建造,距今已有 1 400 余年历史。该桥是世界上现存最古老、保存最完好的单孔敞肩石拱桥,以卓越的建筑技艺与科学设计而闻名于世。

赵州桥全长 64.4 m,主拱跨径 37.02 m,桥身由天然石料砌筑,结构轻盈而稳固。其首创的“敞肩拱”设计(在拱肩两侧各设两个小拱),不仅有效减轻了桥体自重、节省材料,还增强了泄洪能力,降低了水流对桥墩的冲击,体现出古代工匠的高超智慧。这一设计比欧洲同类桥梁早约 1 200 年,对后世桥梁工程的发展产生了深远影响。

赵州桥历经多次地震、洪水及战乱仍屹立不倒,至今仍可通行,被誉为“中国古代工程技术的典范”。桥体造型古朴雄伟,栏板雕刻精美,兼具实用性与艺术性,被称为“天下第一桥”。1961 年,赵州桥被列为全国重点文物保护单位,并入选世界文化遗产预备名录,成为研究中国古代桥梁史与建筑史的重要实物见证。



## 思政实践园地

### 1. 理论知识学习

学生首先通过课堂讲授与实验操作,学习土的粒度组成、密度、含水率等基本物理性质,以及这些性质对土在工程中的应用影响。教师强调理论知识的重要性,并引导学生通过实

践加深对理论知识的理解。

## 2. 实地调研

学生分组前往当地建筑工地、农田等地点,对不同类型的土壤进行实地观察与采样。在调研过程中,记录土壤的颜色、湿度、结构等特征,并收集样本用于后续实验分析。该环节旨在让学生亲身感受土壤的多样性,增强对土壤物理性质的直观认识。

## 3. 实验分析与社会思考

学生将收集的土壤样本带回实验室,开展粒度分析、密度测定等实验,获得土壤物理性质数据。同时,教师引导学生思考土壤性质与土地利用、环境保护之间的关系。例如:土壤物理性质对农作物生长的影响;改善土壤质量以提升农作物产量的方法;在建筑工程中,依据土壤性质选择基础处理方式的原则。通过这些思考,使学生认识到学习土壤物理性质的重要性,并激发其为社会发展与环境保护贡献力量的责任感。

## 4. 成果汇报与总结

学生将调研与实验成果整理成报告,并在课堂上汇报。汇报内容包括实验结果、对土地利用和环境保护的思考,以及个人学习过程中的体会与收获。教师对汇报进行点评与总结,强调学习土壤物理性质不仅是掌握专业知识,更体现了社会责任的担当。

## 5. 实践创新

学生分组采集不同区域的土样,利用环刀法、比重瓶法测定密度与含水率等物理指标,并结合液塑限联合测定仪划分土类。同时,引入图像识别与机器学习技术,拍摄土样颗粒分布图像,训练模型实现土样的快速分类。通过对比传统试验与智能技术的结果,分析误差与优势,既巩固了基础理论,又探索了土性分类的新方法,激发了学生的创新思维。

# 思考与练习

1. 简述塑性指数的概念,说明其反映的含义,并列举影响其大小的主要因素。
2. 简述液性指数的概念,并说明其作为指标的作用。
3. 简述土的触变性的含义,并说明其工程意义。
4. 列举地基岩土的主要类型。
5. 简述建筑施工中土的分类依据,并说明哪些属于一般土,哪些属于岩石。



文本:习题答案