



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等学校土木工程专业规划教材

# 土力学复习与习题

*Soil Mechanics Summary and Exercises*

钱建固 袁聚云 张陈蓉 编 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等学校土木工程专业规划教材

Soil Mechanics Summary and Exercises

# 土力学复习与习题

钱建固 袁聚云 张陈蓉 编著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是为配合土力学课程学习需要而编写的。本书对土的物理性质及工程分类、黏性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析和地基承载力等土力学知识点进行了系统的归纳和提炼,便于读者复习。为巩固和加深读者所学的知识要点,配备了大量的选择题、判断题以及计算题,同时对习题做了较详细的解答,供读者参考。

本书可作为高等学校土木工程专业、道路桥梁与渡河工程专业的土力学教学参考用书,也可作为硕士研究生入学考试的复习资料,还可供其他相关专业师生及技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土力学复习与习题/钱建固,袁聚云,张陈蓉编著.

—北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.12

ISBN 978-7-114-13566-8

I. ①土… II. ①钱… ②袁… ③张… III. ①土力学  
—高等学校—习题集 IV. ①TU4-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 000791 号

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校土木工程专业规划教材

书 名:土力学复习与习题

著 作 者:钱建固 袁聚云 张陈蓉

责任编辑:李 喆 李 晴

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门内大街斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京盈盛恒通印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16.25

字 数:402 千

版 次:2016 年 12 月 第 1 版

印 次:2016 年 12 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13566-8

定 价:35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前言

## PREFACE

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,是为配合高等学校土木工程专业、道路桥梁与渡河工程专业的土力学学习需要而编写的。本书是在2010年袁聚云等编著的《土力学复习与习题》的基础上充分修订与扩编而成,在编写过程中,吸取了广大师生在土力学课程教学过程中提出的宝贵意见。

本书可配合人民交通出版社股份有限公司出版的《土质学与土力学》供教学使用,同时也可满足各类从事土木工程的技术人员掌握和运用土力学知识的需要。通过对土力学知识要点的复习以及大量习题的练习,读者能够对土力学及其相关知识有更全面的理解和掌握,并且提高其在设计和施工中运用土力学知识的能力。

本书分为三个部分。第一部分为复习要点,主要是对土力学及其相关知识进行归纳和提炼,包括土的物理性质及工程分类、黏性土的物理化学性质、土中水的运动规律、土中应力计算、土的压缩性与地基沉降计算、土的抗剪强度、土压力计算、土坡稳定分析和地基承载力,便于读者复习和提高;第二部分为针对第一部分的复习要点收集并编写的选择题、判断题以及计算题,以利于读者能举一反三,巩固和加深所学的土力学知识要点;第三部分对习题做了解答,供读者参考。

本书由钱建固、袁聚云和张陈蓉编写,书中大部分习题及解答是通过袁聚云教授和汤永净教授编著的《土力学复习与习题》内容修编而成,同时本书还精选了

土木工程专业的《土力学》部分考试真题及解答。

本书是在胡中雄、袁聚云、汤永净等教授多年积累的教学资料基础上形成的，在此深表感谢。

限于编者水平，书中难免存在不当之处，恳请读者提出批评和建议。

编 者

2016 年 12 月于同济大学

# 目 录

## CONTENTS

### 第一部分 复习要点

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第一章 土的物理性质及工程分类     | 3  |
| 第一节 土的三相组成          | 3  |
| 第二节 土的颗粒特征          | 3  |
| 第三节 土的三相比比例指标       | 4  |
| 第四节 黏性土的界限含水率       | 7  |
| 第五节 无黏性土的密实度        | 7  |
| 第六节 土的工程分类          | 8  |
| 第二章 黏性土的物理化学性质      | 10 |
| 第一节 键力的基本概念         | 10 |
| 第二节 黏土矿物颗粒的结晶结构     | 11 |
| 第三节 黏土颗粒的胶体化学性质     | 11 |
| 第四节 黏性土工程性质的利用和改良   | 12 |
| 第三章 土中水的运动规律        | 15 |
| 第一节 土的毛细性           | 15 |
| 第二节 土的渗透性           | 16 |
| 第三节 动水力及渗流破坏        | 18 |
| 第四节 土在冻结过程中水分的迁移和积聚 | 19 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第四章 土中应力计算 .....           | 20 |
| 第一节 土中应力概念 .....           | 20 |
| 第二节 土中自重应力计算 .....         | 20 |
| 第三节 基础底面的压力分布与计算 .....     | 21 |
| 第四节 竖向集中力作用下土中应力计算 .....   | 22 |
| 第五节 竖向分布荷载作用下土中应力计算 .....  | 22 |
| 第六节 应力计算中的其他一些问题 .....     | 26 |
| 第七节 饱和土有效应力原理 .....        | 27 |
| 第五章 土的压缩性与地基沉降计算 .....     | 28 |
| 第一节 土的压缩性概念 .....          | 28 |
| 第二节 土的压缩性试验及指标 .....       | 28 |
| 第三节 地基沉降实用计算方法 .....       | 31 |
| 第四节 饱和黏性土地基沉降与时间的关系 .....  | 35 |
| 第六章 土的抗剪强度 .....           | 40 |
| 第一节 土的抗剪强度概念 .....         | 40 |
| 第二节 土的抗剪强度理论与强度指标 .....    | 40 |
| 第三节 土的抗剪强度指标试验方法及其应用 ..... | 41 |
| 第四节 软土在荷载作用下的强度增长规律 .....  | 45 |
| 第五节 关于土的抗剪强度影响因素的讨论 .....  | 45 |
| 第七章 土压力计算 .....            | 46 |
| 第一节 土压力概念 .....            | 46 |
| 第二节 静止土压力计算 .....          | 46 |
| 第三节 朗金土压力理论 .....          | 47 |
| 第四节 库仑土压力理论 .....          | 51 |
| 第五节 几种特殊情况下的库仑土压力计算 .....  | 53 |
| 第六节 关于土压力的讨论 .....         | 54 |
| 第八章 土坡稳定分析 .....           | 55 |
| 第一节 土坡稳定概念 .....           | 55 |
| 第二节 无黏性土的土坡稳定分析 .....      | 55 |
| 第三节 黏性土的土坡稳定分析 .....       | 56 |

第四节 土坡稳定分析的几个问题 ..... 61
 第九章 地基承载力 ..... 63
 第一节 地基承载力概念 ..... 63
 第二节 临塑荷载和临界荷载的确定 ..... 64
 第三节 极限承载力计算 ..... 65
 第四节 按规范方法确定地基承载力 ..... 68
 第五节 关于地基承载力的讨论 ..... 69

第二部分 习 题

第一章 土的物理性质及工程分类 ..... 73
 第二章 黏性土的物理化学性质 ..... 82
 第三章 土中水的运动规律 ..... 85
 第四章 土中应力计算 ..... 89
 第五章 土的压缩性与地基沉降计算 ..... 96
 第六章 土的抗剪强度..... 109
 第七章 土压力计算..... 118
 第八章 土坡稳定分析..... 126
 第九章 地基承载力..... 133

第三部分 习题参考解答

第一章 土的物理性质及工程分类..... 141
 第二章 黏性土的物理化学性质..... 157
 第三章 土中水的运动规律..... 158
 第四章 土中应力计算..... 161
 第五章 土的压缩性与地基沉降计算..... 173
 第六章 土的抗剪强度..... 192
 第七章 土压力计算..... 210
 第八章 土坡稳定分析..... 227
 第九章 地基承载力..... 241
 参考文献..... 252

# **PART 1** | **第一部分** **复习要点**



## 第一章

# 土的物理性质及工程分类

## 第一节 土的三相组成

土是由固体颗粒(固相)、水(液相)和气体(气相)三部分组成的,称为土的三相组成。随着三相物质的质量和体积的比例不同,土的性质也随之发生变化。

土的固相包括无机矿物颗粒和有机质,是构成土的骨架最基本的物质。

土的液相是指存在于土孔隙中的水。

土的气相是指充填在土孔隙中的气体。

## 第二节 土的颗粒特征

天然土是由大小不同的颗粒所组成的,土粒的大小通常以其平均直径表示,称为粒径,又称为粒度。

土的颗粒大小及其组成情况,通常用土中各个不同粒组的相对含量(各粒组干土质量的百分比)来表示,称为土的颗粒级配,它可用以描述土中不同粒径土粒的分布特征。

常用的土的颗粒级配的表示方法有表格法、累计曲线法和三角坐标法。

(1) 表格法: 是以列表形式直接表达各粒组的相对含量。表格法有两种表示方法, 一种是以累计含量百分比表示的; 另一种是以粒组表示的。

(2) 累计曲线法: 是一种图示的方法, 通常用半对数纸绘制, 横坐标(按对数比例尺)表示某一粒径, 纵坐标表示小于某一粒径的土粒的百分含量。该法是表示颗粒级配最常用的方法。

在累计曲线上, 可确定两个描述土的级配的指标:

$$\text{不均匀系数} \quad C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-1)$$

$$\text{曲率系数} \quad C_s = \frac{d_{30}^2}{d_{60}d_{10}} \quad (1-2)$$

式中:  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$ ——分别相当于累计百分含量为 10%、30% 和 60% 的粒径,  $d_{10}$  称为有效粒径,  $d_{60}$  称为限制粒径。

不均匀系数  $C_u$  反映大小不同粒组的分布情况, 曲率系数则是描述累计曲线整体形状的指标。

(3) 三角坐标法: 也是一种图示法, 它是利用等边三角形内任意一点至三个边的垂直距离的总和恒等于三角形之高的原理, 表示组成土的三个粒组的相对含量。

### 第三节 土的三相比例指标

土的三相物质在体积和质量上的比例关系称为三相比例指标。

三相比例指标反映了土的干燥与潮湿、疏松与紧密, 是评价土的工程性质的最基本的物理性质指标, 也是工程地质勘察报告中不可缺少的基本内容。

把在土体中实际上是处于分散状态的三相物质理想化地分别集中在一起, 构成如图 1-1 所示的三相图。土样的体积  $V$  为土中空气的体积  $V_a$ 、水的体积  $V_w$  和土粒的体积  $V_s$  之和; 土样的质量  $m$  为土中空气的质量  $m_a$ 、水的质量  $m_w$  和土粒的质量  $m_s$  之和; 通常认为空气的质量可以忽略, 则土样的质量就仅为水和土粒质量之和。

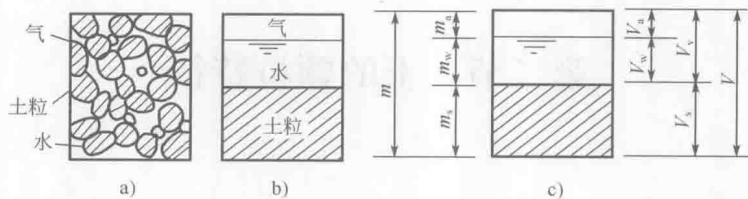


图 1-1 土的三相图

a) 实际土体; b) 土的三相图; c) 各相的质量与体积

土的三相比例指标可分为两类, 一类是试验指标, 另一类是换算指标。

## 一、试验指标

通过试验测定的指标称为试验指标,包括土的密度、土粒比重和含水率。

### 1. 土的密度 $\rho$

土的密度是指单位体积土的质量,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,若土的体积为  $V$ ,质量为  $m$ ,则土的密度  $\rho$  可表示为:

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

由土的质量产生的单位体积的重力称为土的重力密度  $\gamma$ ,简称为重度,其单位为  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,即:

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

对天然土求得的密度称为天然密度或湿密度,相应的重度称为天然重度或湿重度。

### 2. 土粒比重 $G_s$

土粒比重是指土粒质量  $m_s$  与同体积  $4^\circ\text{C}$  时纯水的质量之比,可表示为:

$$G_s = \frac{m_s}{V_s \cdot \rho_{w1}} = \frac{\rho_s}{\rho_{w1}} \quad (1-5)$$

式中:  $\rho_{w1}$ ——纯水在  $4^\circ\text{C}$  时的密度 ( $=1\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_s$ ——土粒密度。

### 3. 土的含水率 $w$

土的含水率是指土中水的质量  $m_w$  与土粒质量  $m_s$  之比,可表示为:

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

## 二、换算指标

通过计算求得的指标称为换算指标,包括土的干密度、饱和密度、有效密度、孔隙比、孔隙率和饱和度。

### 1. 土的干密度 $\rho_d$ 、饱和密度 $\rho_{\text{sat}}$ 和有效密度 $\rho'$

土的干密度是指土的颗粒质量  $m_s$  与土的总体积  $V$  之比,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,可表示为:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (1-7)$$

土的饱和密度是指当土的孔隙中全部为水所充满时的密度,即全部充满孔隙的水的质量  $m_w$  与颗粒质量  $m_s$  之和与土的总体积  $V$  之比,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,可表示为:

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_s + V_v \rho_w}{V} \quad (1-8)$$

式中:  $V_v$ ——土的孔隙体积;

$\rho_w$ ——水的密度 ( $\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$ )。

单位土体积中土粒的质量扣除同体积水的质量后,即为单位土体积中土粒的有效质量,称为土的有效密度(又称浮密度),单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,可表示为:

$$\rho' = \frac{m_s - V_s \rho_w}{V} = \rho_{sat} - \rho_w \tag{1-9}$$

干密度、饱和密度和有效密度乘以重力加速度  $g$ , 则分别为干重度  $\gamma_d$ 、饱和重度  $\gamma_{sat}$  和有效重度  $\gamma'$ , 单位为  $\text{kN/m}^3$ , 由式(1-10) ~ 式(1-12)表示:

$$\gamma_d = \rho_d g \tag{1-10}$$

$$\gamma_{sat} = \rho_{sat} g \tag{1-11}$$

$$\gamma' = \rho' g \tag{1-12}$$

2. 土的孔隙比  $e$  和孔隙率  $n$

土的孔隙比是指土中孔隙的体积  $V_v$  与土粒体积  $V_s$  之比, 以小数计, 可表示为:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \tag{1-13}$$

土的孔隙率是指土中孔隙的体积  $V_v$  与土的总体积  $V$  之比, 以百分数计, 可表示为:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \tag{1-14}$$

3. 土的饱和度  $S_r$

土的饱和度是指土中孔隙中水的体积  $V_w$  与孔隙体积  $V_v$  之比, 以百分数计, 可表示为:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \tag{1-15}$$

三、三相比例指标的互相换算

土的三相比例指标之间可以互相换算, 根据土的密度(或重度)、土粒比重和土的含水率三个试验指标, 可以用换算求得全部计算指标, 也可以用某几个指标换算其他的指标, 土的三相比例指标的换算关系见表 1-1。

土的三相比例指标换算关系 表 1-1

| 换算指标                | 用试验指标计算的公式                                                   | 用其他指标计算的公式                                                                             |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 孔隙比 $e$             | $e = \frac{G_s(1+w)\gamma_w}{\gamma} - 1$                    | $e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$<br>$e = \frac{w G_s}{S_r}$                     |
| 饱和重度 $\gamma_{sat}$ | $\gamma_{sat} = \frac{\gamma(G_s - 1)}{G_s(1+w)} + \gamma_w$ | $\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w$<br>$\gamma_{sat} = \gamma' + \gamma_w$ |
| 饱和度 $S_r$           | $S_r = \frac{\gamma G_s w}{G_s(1+w)\gamma_w - \gamma}$       | $S_r = \frac{w G_s}{e}$                                                                |
| 干重度 $\gamma_d$      | $\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$                            | $\gamma_d = \frac{G_s}{1 + e} \gamma_w$                                                |
| 孔隙率 $n$             | $n = 1 - \frac{\gamma}{G_s(1+w)\gamma_w}$                    | $n = \frac{e}{1 + e}$                                                                  |
| 有效重度 $\gamma'$      | $\gamma' = \frac{\gamma(G_s - 1)}{G_s(1+w)}$                 | $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$                                                    |

## 第四节 黏性土的界限含水率

黏性土从一种状态变到另一种状态的分界含水率称为界限含水率,流动状态与可塑状态间的界限含水率称为液限  $w_L$ ;可塑状态与半固体状态间的界限含水率称为塑限  $w_p$ ;半固体状态与固体状态间的界限含水率称为缩限  $w_s$ 。

测定黏性土的塑限  $w_p$  的试验方法主要是滚搓法。测定黏性土的液限  $w_L$  的试验方法主要有圆锥仪法和碟式仪法,也可采用液塑限联合测定法测定土的液限和塑限。

黏性土可塑性的大小可用黏性土处在可塑状态的含水率变化范围来衡量,从液限到塑限含水率的变化范围越大,土的可塑性越好,这个范围称为塑性指数  $I_p$ 。

$$I_p = w_L - w_p \quad (1-16)$$

塑性指数习惯上用不带%的数值表示。

液性指数  $I_L$  是指黏性土的天然含水率和塑限的差值与塑性指数之比。液性指数可被用来表示黏性土所处的软硬状态,由式(1-17)定义:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \quad (1-17)$$

液性指数越大,表示土越软。可塑状态的土的液性指数在  $0 \sim 1$ ,液性指数大于 1 的土处于流动状态,小于 0 的土则处于固体状态或半固体状态。

## 第五节 无黏性土的密实度

无黏性土一般是指碎石土和砂土,粉土属于砂土和黏性土的过渡类型,但是其物质组成、结构及物理力学性质主要接近砂土,特别是砂质粉土。

无黏性土的密实度是判定其工程性质的重要指标,它综合地反映了无黏性土颗粒的矿物组成、颗粒级配、颗粒形状和排列等对其工程性质的影响。

### 一、砂土相对密度

土的孔隙比一般可以用来描述土的密实程度,但砂土的密实程度并不单独取决于孔隙比,而在很大程度上还取决于土的颗粒级配情况。

当砂土处于最密实状态时,其孔隙比称为最小孔隙比  $e_{\min}$ ;而砂土处于最疏松状态时,其孔隙比则称为最大孔隙比  $e_{\max}$ 。砂土的相对密度  $D_r$  可按式(1-18)计算:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1-18)$$

当砂土的天然孔隙比接近于最小孔隙比时,相对密度  $D_r$  接近于 1,表明砂土接近于最密实的状态;而当天然孔隙比接近于最大孔隙比时,则表明砂土处于最松散的状态,其相对密度接近于 0。

根据砂土的相对密度,可将砂土划分为密实、中密和松散三种密实度。

二、无黏性土密实度分类

在工程实践中通常用标准贯入击数来划分砂土的密实度。

标准贯入试验是用规定的锤重(63.5kg)和落距(76cm),把标准贯入器(带有刃口的对开管,外径 50mm,内径 35mm)打入土中,记录贯入一定深度(30cm)所需的锤击数  $N$  值的原位测试方法。根据标准贯入锤击数,可将砂土划分为密实、中密、稍密和松散四种状态。

碎石土的密实度可根据圆锥动力触探锤击数分类;粉土的密实度可根据孔隙比分类。

第六节 土的工程分类

一、碎石土分类

碎石土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量超过总质量 50% 的土,按颗粒级配和颗粒形状可进一步划分为漂石、块石、卵石、碎石、圆砾和角砾。

二、砂土分类

砂土是指粒径大于 2mm 的颗粒含量不超过总质量 50%,且粒径大于 0.075mm 的颗粒含量超过总质量的 50% 的土。按颗粒级配,砂土可进一步划分为砾砂、粗砂、中砂、细砂和粉砂。

三、细粒土分类

粒径大于 0.075mm 的颗粒含量不超过总质量 50% 的土属于细粒土,按塑性指数,细粒土可划分为粉土和黏性土两大类,黏性土可再进一步划分为粉质黏土和黏土两个亚类。

粉土是介于砂土和黏性土之间的过渡性土类,它具有砂土和黏性土的某些特征,根据黏粒含量可以将粉土划分为砂质粉土和黏质粉土。

四、塑性图分类

塑性图以塑性指数为纵坐标,液限为横坐标,如图 1-2 所示。图中有两条经验界限,斜线称为  $A$  线,它的方程为  $I_p = 0.73(w_L - 20)$ ,它的作用是区分有机土和无机土、黏土和粉土,  $A$  线上侧是无机黏土,下侧是无机粉土或有机土;竖线称为  $B$  线,其方程为  $w_L = 50\%$ ,其作用是区分高塑性土和低塑性土。

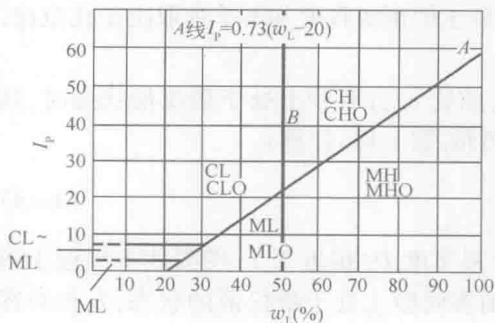


图 1-2 塑性图

在  $A$  线以上的土分类为黏土,液限大于 50%,称为高塑性黏土  $CH$ ,液限小于 50%,称为低塑性黏土  $CL$ 。

在  $A$  线以下的土分类为粉土,液限大于 50%,称为高塑性粉土  $MH$ ,液限小于 50%,称为低塑性

粉土 ML。在低塑性区,如果土样处于 A 线以上,而塑性指数范围在 4~7,则土的分类应给以相应的交界分类 CL~ML。

在应用塑性图分类时,应注意液限试验标准的不同,在欧美国家是采用碟式仪测定的,而我国则采用锥式仪沉入深度 17mm 的标准,因此用塑性图分类的结果也可能不同。