

全国注册土木工程师（岩土）继续教育必修教材（之一）

# 岩土工程设计

## 安全度

YANTU  
GONGCHENG SHEJI  
ANQUANDU

顾宝和 毛尚之 李镜培 编著  
高大钊 审定

YANTU GONGCHENG SHEJI ANQUANDU



中国计划出版社



全国注册土木工程师(岩土)继续教育必修教材(之一)

# 岩土工程设计安全度

顾宝和 毛尚之 李镜培 编著  
高大钊 审定

中国计划出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

岩土工程设计安全度/顾宝和, 毛尚之, 李镜培编著.

北京: 中国计划出版社, 2009. 3

全国注册土木工程师 (岩土) 继续教育必修教材

ISBN 978-7-80242-290-2

I. 岩… II. ①顾…②毛…③李… III. 岩土工程—建筑设计—结构安全度—工程技术人员—终生教育—教材  
IV. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 013340 号

全国注册土木工程师 (岩土) 继续教育必修教材 (之一)

**岩土工程设计安全度**

顾宝和 毛尚之 李镜培 编著

高大钊 审定

☆

中国计划出版社出版

(地址: 北京市西城区木樨地北里甲 11 号国宏大厦 C 座 4 层)

(邮政编码: 100038 电话: 63906433 63906381)

新华书店发行所发行

三河富华印刷包装有限公司印刷

---

787 × 1092 毫米 1/16 13.25 印张 324 千字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

印数 1—6000 册

☆

ISBN 978-7-80242-290-2

定价: 24.00 元

## 前 言

本书是受住房和城乡建设部执业资格注册中心委托编写的，作为注册土木工程师（岩土）继续教育必修教材。

工程设计必须保证工程的适用性、安全性、耐久性、经济性和可持续发展的要求，其中安全性更是首当其冲。现在，结构设计已经普遍采用概率极限状态，用分项系数表达，岩土工程设计由于固有的复杂性和研究积累不足，至今仍主要采用容许应力法和单一安全系数法，于是产生了多种设计方法在同一工程中互相交叉的问题。例如基础设计，计算基础面积用容许应力法，确定基础配筋用概率极限状态法，两者的荷载取值和抗力取值各不相同。再如钢筋混凝土挡土墙设计，挡土墙的结构设计用概率极限状态法，抗滑和抗倾覆稳定性验算用单一安全系数法，地基承载力用容许应力法，荷载取值和抗力取值各不相同。有时，同一问题各本规范采用了各不相同的处理方法，使设计人员觉得眼花缭乱，稍一不慎就可能犯原则性错误，危及工程安全。为了帮助工作在勘察设计第一线的注册土木工程师（岩土）理解岩土工程设计的安全度问题，提高执业水平，我们编写了这本教材，用于注册土木工程师（岩土）第一注册期继续教育。容许应力法和单一安全系数法容易理解，无需多作说明；概率极限状态法涉及问题比较复杂，相当多的注册土木工程师（岩土）还不熟悉，故用较大篇幅介绍。考虑到多数读者的接受程度和实际需要，本书只介绍了一些基本知识，未深入展开，尚待继续研究的新理论、新方法从略。

有人可能认为，既然岩土工程尚未普遍采用概率极限状态设计，为什么要花这么多时间学习呢？这是基于以下两方面考虑：一是岩土与结构关系密切，注册土木工程师（岩土）应当熟悉结构设计的基本原则，以便处理好岩土和结构两个专业之间的关系；二是掌握了可靠性分析的基本原理，才能理解岩土工程应用可靠性的难点和问题，才能深入理解规范对安全度问题的规定。至于各本规范对同一问题各不相同的规定，本教材无意一一厘清。但为了避免由此产生的混乱，教材第6章选择了几本有代表性的规范，列出对照，以利读者理解和讨论。

现有注册土木工程师（岩土）的教育背景大致有两种情况，一是所学专业为工程地质，主要从事勘察，一般对设计安全度问题了解较少；二是所学专业为结构，主要从事设计，对岩土工程不确定性特点的认识往往不够深入。希望这本教材对两类不同背景的工程师都有所裨益。

本书共分7章。第1章主要介绍岩土工程的特点、可靠性分析的发展和问题。第2章介绍可靠度的基本概念,第3、4、5章分别介绍荷载、材料和极限状态,这几章的学习,目的在于使读者对极限状态、可靠度、荷载和材料有比较系统的了解。第6章介绍几本主要规范对安全度问题的处理。第7章介绍岩土工程安全度的控制、风险评估和概念设计,这是岩土工程安全度问题的自然延伸。本书第1、6、7章由顾宝和编写,第2章由李镜培编写,其他各章均由毛尚之编写。本教材脱稿后,《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50135—2008)批准发布,对原标准有较重要的修订,本教材未能及时列入,只能在再版时补充。

作为注册土木工程师(岩土)继续教育教材,本教材是初次编写。限于编者水平,谬误在所难免,希望读者多多提出宝贵意见,以便修改补充。关于岩土工程安全度问题,目前尚有许多不同看法,本书作为教材,注重内容的客观性和兼容性,不作过多的主观评论。建议讲授时不要照本宣科,应根据学员具体情况,突出重点,在讨论中促进和提高。

编者

二〇〇八年十二月

# 目 录

## 前言

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 1 概述                     | ( 1 )  |
| 1.1 岩土工程及其与相邻专业关系        | ( 1 )  |
| 1.1.1 岩土工程的定义和领域         | ( 1 )  |
| 1.1.2 岩土工程与工程地质关系        | ( 2 )  |
| 1.1.3 岩土工程和结构工程关系        | ( 2 )  |
| 1.2 岩土工程的特点              | ( 3 )  |
| 1.2.1 岩土体结构的不确定性         | ( 3 )  |
| 1.2.2 岩土参数的不确定性          | ( 4 )  |
| 1.2.3 裂隙水和孔隙水压力的多变性      | ( 4 )  |
| 1.2.4 地质作用和地质演化的复杂性      | ( 5 )  |
| 1.2.5 计算模式的不确切性          | ( 5 )  |
| 1.2.6 理论导向和经验判断          | ( 6 )  |
| 1.3 事物的不确定性和工程的安全性       | ( 6 )  |
| 1.3.1 事物的不确定性            | ( 6 )  |
| 1.3.2 工程的安全性和可持续发展       | ( 7 )  |
| 1.3.3 安全度的表达             | ( 7 )  |
| 1.4 岩土工程可靠性分析的发展和问题      | ( 8 )  |
| 1.4.1 可靠性分析发展的简要回顾       | ( 8 )  |
| 1.4.2 可靠性分析应用于岩土工程的研究    | ( 9 )  |
| 1.4.3 可靠度在岩土工程设计规范中的应用问题 | ( 13 ) |
| 2 可靠度设计基础                | ( 15 ) |
| 2.1 可靠度理论的发展与应用          | ( 15 ) |
| 2.1.1 土木工程可靠性理论的形成与发展    | ( 15 ) |
| 2.1.2 土木工程可靠性理论的应用       | ( 15 ) |
| 2.2 可靠度基本概念              | ( 17 ) |
| 2.2.1 可靠性与可靠度            | ( 17 ) |
| 2.2.2 可靠度设计水准            | ( 18 ) |
| 2.2.3 可靠度与失效概率           | ( 19 ) |
| 2.2.4 可靠指标               | ( 21 ) |
| 2.2.5 可靠指标与安全系数 $K$ 的关系  | ( 26 ) |

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| 2.2.6 可靠指标与分项系数的关系 .....          | ( 27 ) |
| 2.3 可靠度计算方法 .....                 | ( 28 ) |
| 2.3.1 均值一次二阶矩法 (中心点法) .....       | ( 29 ) |
| 2.3.2 改进的一次二阶矩法 (验算点法) .....      | ( 32 ) |
| 2.3.3 JC 法 .....                  | ( 36 ) |
| 2.3.4 蒙特卡罗法 (Monte Carlo 法) ..... | ( 39 ) |
| 2.4 岩土工程可靠度分析的发展状况 .....          | ( 41 ) |
| 2.4.1 岩土工程中的不确定性 .....            | ( 42 ) |
| 2.4.2 岩土工程可靠性问题的特点 .....          | ( 42 ) |
| 2.4.3 岩土工程可靠性理论的发展 .....          | ( 43 ) |
| 3 岩土工程荷载 .....                    | ( 46 ) |
| 3.1 荷载的类型 .....                   | ( 46 ) |
| 3.1.1 荷载与作用 .....                 | ( 46 ) |
| 3.1.2 作用分类 .....                  | ( 47 ) |
| 3.1.3 规范对荷载分类的规定 .....            | ( 47 ) |
| 3.2 荷载的统计与概率模型 .....              | ( 49 ) |
| 3.2.1 永久荷载的统计与分布 .....            | ( 49 ) |
| 3.2.2 可变荷载的统计与分布 .....            | ( 49 ) |
| 3.2.3 地震作用的取值 .....               | ( 57 ) |
| 3.2.4 偶然荷载 .....                  | ( 62 ) |
| 3.2.5 岩土压力 .....                  | ( 63 ) |
| 3.2.6 其他作用 .....                  | ( 65 ) |
| 3.3 荷载的代表值 .....                  | ( 65 ) |
| 3.3.1 荷载标准值 .....                 | ( 65 ) |
| 3.3.2 可变荷载组合值 .....               | ( 66 ) |
| 3.3.3 可变荷载频遇值 .....               | ( 66 ) |
| 3.3.4 可变荷载准永久值 .....              | ( 66 ) |
| 3.3.5 荷载代表值的选用 .....              | ( 66 ) |
| 3.3.6 荷载设计值 .....                 | ( 67 ) |
| 3.4 荷载组合与荷载分项系数 .....             | ( 67 ) |
| 3.4.1 荷载组合理论 .....                | ( 67 ) |
| 3.4.2 荷载组合规定 .....                | ( 69 ) |
| 3.4.3 荷载分项系数 .....                | ( 71 ) |
| 4 岩土工程材料 .....                    | ( 75 ) |
| 4.1 工程材料的基本性质 .....               | ( 75 ) |
| 4.1.1 决定材料性能的因素 .....             | ( 75 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| 4.1.2 材料的基本物理性质 .....          | ( 78 )  |
| 4.1.3 材料的基本力学性质 .....          | ( 80 )  |
| 4.1.4 材料的耐久性 .....             | ( 83 )  |
| 4.2 建筑钢材 .....                 | ( 83 )  |
| 4.2.1 钢材的组成 .....              | ( 83 )  |
| 4.2.2 建筑钢材的主要力学性能 .....        | ( 85 )  |
| 4.2.3 建筑钢材的选用 .....            | ( 88 )  |
| 4.3 水泥 .....                   | ( 93 )  |
| 4.3.1 硅酸盐水泥的矿物组成 .....         | ( 93 )  |
| 4.3.2 硅酸盐水泥的技术性质 .....         | ( 93 )  |
| 4.3.3 硅酸盐水泥的水化与凝结硬化 .....      | ( 95 )  |
| 4.3.4 掺混合材料的硅酸盐水泥 .....        | ( 98 )  |
| 4.3.5 常用水泥的选用 .....            | ( 101 ) |
| 4.3.6 其他水泥 .....               | ( 102 ) |
| 4.4 混凝土 .....                  | ( 104 ) |
| 4.4.1 混凝土的分类 .....             | ( 105 ) |
| 4.4.2 普通混凝土的组成材料 .....         | ( 105 ) |
| 4.4.3 普通混凝土的主要技术性质 .....       | ( 111 ) |
| 4.4.4 混凝土材料的可靠性与质量控制 .....     | ( 120 ) |
| 4.5 钢筋混凝土 .....                | ( 121 ) |
| 4.5.1 钢筋与混凝土共同工作的基础——黏结力 ..... | ( 122 ) |
| 4.5.2 钢筋混凝土的受力与变形性能 .....      | ( 123 ) |
| 4.5.3 钢筋混凝土的其他性能特点 .....       | ( 124 ) |
| 4.5.4 钢筋混凝土结构设计方法的演化 .....     | ( 125 ) |
| 4.6 土工合成材料 .....               | ( 127 ) |
| 4.6.1 土工合成材料的分类与一般特性 .....     | ( 127 ) |
| 4.6.2 土工合成材料的工程特性 .....        | ( 131 ) |
| 4.6.3 土工合成材料的功能与应用 .....       | ( 142 ) |
| 4.7 可靠性设计中材料性能参数的选取 .....      | ( 147 ) |
| 5 岩土工程的极限状态 .....              | ( 149 ) |
| 5.1 极限状态 .....                 | ( 149 ) |
| 5.1.1 极限状态的定义 .....            | ( 149 ) |
| 5.1.2 承载能力极限状态 .....           | ( 149 ) |
| 5.1.3 正常使用极限状态 .....           | ( 150 ) |
| 5.1.4 极限状态方程 .....             | ( 150 ) |
| 5.2 极限状态设计的要求 .....            | ( 151 ) |
| 5.2.1 结构的设计状况 .....            | ( 151 ) |
| 5.2.2 极限状态设计的作用组合 .....        | ( 151 ) |

|       |                 |       |
|-------|-----------------|-------|
| 5.2.3 | 极限状态设计的要求       | (151) |
| 5.2.4 | 极限状态设计表达式       | (152) |
| 5.3   | 岩土工程极限状态        | (153) |
| 5.3.1 | 岩土工程极限状态        | (153) |
| 5.3.2 | 岩土工程承载能力极限状态    | (154) |
| 5.3.3 | 岩土工程正常使用极限状态    | (154) |
| 5.3.4 | 岩土工程极限状态设计      | (155) |
| 6     | 设计规范安全度问题的处理    | (156) |
| 6.1   | 概述              | (156) |
| 6.2   | 设计原则            | (156) |
| 6.2.1 | 《工程结构可靠度设计统一标准》 | (156) |
| 6.2.2 | 《建筑地基基础设计规范》    | (158) |
| 6.2.3 | 上海《地基基础设计规范》    | (160) |
| 6.2.4 | 《港口工程地基规范》      | (161) |
| 6.2.5 | 《建筑桩基技术规范》      | (162) |
| 6.2.6 | 讨论              | (163) |
| 6.3   | 岩土性能参数代表值       | (164) |
| 6.3.1 | 岩土性能参数标准值的定义和取值 | (164) |
| 6.3.2 | 《岩土工程勘察规范》      | (165) |
| 6.3.3 | 《建筑地基基础设计规范》    | (166) |
| 6.3.4 | 《港口工程地基规范》      | (167) |
| 6.3.5 | 《水利水电工程地质勘察规范》  | (169) |
| 6.3.6 | 讨论              | (170) |
| 6.4   | 地基承载力           | (172) |
| 6.4.1 | 《建筑地基基础设计规范》    | (172) |
| 6.4.2 | 《北京地区地基基础设计规范》  | (174) |
| 6.4.3 | 上海《地基基础设计规范》    | (174) |
| 6.4.4 | 《港口工程地基规范》      | (177) |
| 6.4.5 | 讨论              | (178) |
| 6.5   | 边坡稳定分析          | (179) |
| 6.5.1 | 《建筑边坡工程技术规范》    | (179) |
| 6.5.2 | 《建筑地基基础设计规范》    | (182) |
| 6.5.3 | 《港口工程地基规范》      | (183) |
| 6.5.4 | 讨论              | (184) |
| 7     | 岩土工程的安全控制与概念设计  | (188) |
| 7.1   | 岩土工程的安全控制       | (188) |
| 7.1.1 | 设计安全度           | (188) |

|       |                        |         |
|-------|------------------------|---------|
| 7.1.2 | 设计基础资料 .....           | ( 189 ) |
| 7.1.3 | 材料和施工质量 .....          | ( 190 ) |
| 7.1.4 | 检验、监测和应急措施 .....       | ( 190 ) |
| 7.1.5 | 地质变化和地质灾害 .....        | ( 191 ) |
| 7.2   | 岩土工程的安全风险评估 .....      | ( 191 ) |
| 7.2.1 | 概述 .....               | ( 191 ) |
| 7.2.2 | 岩土工程风险分析评估的方法 .....    | ( 192 ) |
| 7.2.3 | 岩土工程风险分析评估存在的问题 .....  | ( 192 ) |
| 7.2.4 | 地铁和地下工程的安全风险评估 .....   | ( 193 ) |
| 7.3   | 岩土工程概念设计 .....         | ( 196 ) |
| 7.3.1 | 从场地和工程的实际出发 .....      | ( 196 ) |
| 7.3.2 | 抓住关键,突出难点和重点 .....     | ( 197 ) |
| 7.3.3 | 坚持设计理性,避免盲目 .....      | ( 197 ) |
| 7.3.4 | 注重综合判断和现场试验 .....      | ( 197 ) |
| 7.3.5 | 统筹兼顾,协调配合,注意总体效果 ..... | ( 198 ) |
| 7.3.6 | 设置多道防线,确保工程安全 .....    | ( 198 ) |
| 7.3.7 | 小结 .....               | ( 198 ) |

# 1 概 述

## 1.1 岩土工程及其与相邻专业关系

### 1.1.1 岩土工程的定义和领域

《岩土工程基本术语标准》GB/T 50279—98 定义岩土工程为：“土木工程中涉及岩石和土的利用、处理和改良的科学技术”。中国大百科全书定义为：“土木工程的一个分支，以工程地质学、岩石力学、土力学与基础工程为理论基础，涉及岩石和土的利用、整治和改造的一门技术科学”。也有专家定义为：“土木工程的一个分支，研究岩土（包括其中的水）作为支承体、荷载、介质或材料，必要时对其改良或治理的一门工程技术”。

以上表述方法虽不完全一致，但主要方面是相似或相同的。第一，岩土工程是土木工程的一个分支；第二，研究对象是岩石和土，包括岩土中的水；第三，是一门技术科学或工程技术。

从实践角度，岩土工程包括下列领域：

#### 1 岩土作为支承体

房屋建筑、道路、桥梁、堤坝、堆场、大型设备等，都建造在岩土上，岩土作为地基，作为支承体，研究的主要问题是承载力和变形，有时还涉及渗透问题。

#### 2 岩土作为荷载和自承体

边坡工程、基坑工程、露天矿等地面开挖，隧道、城市地铁、地下洞室等地下开挖，面临的是另一类稳定和变形问题。这时，岩土体担任的角色，既可能是荷载，也可能是支承体。同时，地下水的控制常常具有举足轻重的影响。

#### 3 岩土作为材料

土石坝、围堰、路堤、填方（特别是大面积高填方）、填海造陆，要用大量岩土作为材料，这些工程除了研究其稳定、变形和渗透外，岩土材料的选用和质量控制是主要问题。

#### 4 地质灾害的防治

岩溶、塌陷、崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降等地质灾害，对工程构成严重威胁。对地质灾害现状和发展趋势的评估，防治工程的设计和施工，必须按地质演化规律和岩土力学原理进行。地震也是一种地质灾害，场地和地基的地震效应评价也是岩土工程的一部分。

#### 5 环境岩土工程

地质和水文地质环境的评估、废弃物的卫生填埋、土石文物的保护等，都涉及复杂的环境岩土工程问题。随着人们对环境保护的重视，人地和谐的认知，可持续发展方针的贯彻，环境岩土工程正日益受到重视。

还可以举出一些，但主要是以上五大类。

以上各类工程，不仅涉及天然岩土，还包括各种人工土，包括对天然土的加固和改良，利用排水、压实、加筋、改性、注浆、锚定、设置增强体等方法，改变岩土体的强

度、变形和渗透性能。岩土加固和改良是岩土工程的重要组成。

岩土工程与许多专业关系密切，且互相搭接，边界模糊。边界附近你中有我，我中有你。诸如：工程地质、结构工程、水利和水电工程、道路桥梁和隧道工程、港口和航道工程、采矿工程、地震工程、海洋工程、环境工程等。下面仅就岩土工程与工程地质的关系，岩土工程与结构工程的关系做些说明。

### 1.1.2 岩土工程与工程地质关系

工程地质学是地质学的一个分支，是研究与工程建设有关地质问题的科学。工程地质学的产生源于土木工程的需要，其本质是一门应用科学；岩土工程是土木工程的一个分支，其本质是一门工程技术。从事工程地质的是地质专家（地质师），侧重于研究地质现象、地质成因和演化、地质规律、地质与工程的相互作用；从事岩土工程的是工程师，关心的是如何根据工程目的和地质条件，建造满足使用要求和安全要求的工程或工程的一部分，解决工程建设中的岩土技术问题。因此，无论学科领域、工作内容、关心的问题，两者都是有区别的。

但是，工程地质与岩土工程的关系又非常密切。有人说，工程地质是岩土工程的基础，岩土工程是工程地质的延伸，虽然不一定十分确切，但有一定道理。岩土工程师面临的岩土材料，无论性能和结构，都是自然形成，经过了漫长的地质历史，经过多次复杂地质作用形成的产物。对岩土的性能和结构，只能通过勘察来查明，而又不能完全查明。一些关键性的问题，需根据地质规律推断或预测。尤其在地质构造复杂的山区，有经验的工程地质学家，通过地面调查，就可大致判断地质构造的轮廓，利用物探、钻探、槽井探等，由粗而细，由浅而深，构造出工程地质模型。没有地质学基础，哪能识别断层？哪能识别软夹层和结构面的空间分布？哪能说清地下水的赋存和运动规律？如开挖隧道，哪些地段会冒顶？哪些地段会突水？在地质复杂地区，离开了工程地质专家，土木工程师寸步难行。

### 1.1.3 岩土工程和结构工程关系

土木工程可分为结构工程和岩土工程两大类：前者是用混凝土等人工材料建造工程，如混凝土结构、钢结构、砌体结构、木结构等；后者是涉及岩石和土的工程问题，如地基、边坡、开挖、填方等。岩土工程和结构工程关系密切，这是显而易见的。无论房屋结构或桥梁结构，都建造在地基上。地基是否稳定，直接影响结构的安危；地基是否会产生过量变形，直接影响结构的功能。地基出了问题又很难补救，因此结构工程十分关心地基的稳定和变形。现在，一般地基基础设计由结构工程师考虑上部结构要求统一完成，只有复杂地基基础问题或需专门处理的地基才要求岩土工程师参与。同样，岩土工程师在进行地基的勘察设计时，必须详细了解结构的型式、荷载及其分布，特别是要了解基础的型式和刚度，了解对地基变形的限制要求，以便有的放矢，满足结构功能要求。岩土工程师与结构工程师的密切配合至关重要。

结构和地基是一个整体，相互作用，相互影响。地基变形会改变结构的应力，结构的荷载分布和不同刚度会产生不同的地基变形。人们常常用调整基础和上部结构刚度的办法来适应地基变形，地基、基础和上部结构的协同作用分析是当前的热门话题。反过来，也可通过地基处理提高地基的承载力和刚度来适应上部结构的要求。

岩土工程与结构工程你中有我，我中有你，互相搭接，互相重叠的例子不胜枚举。例

如桩基础,作为结构的延伸,桩是结构的一部分,但桩基的承载力和变形则主要取决于岩土性能,与岩土的关系更为密切。再如基坑工程和地下开挖,土石方开挖、地下水的治理、岩土压力的计算等等都与岩土有关,但护坡桩、地下连续墙、锚杆、内支撑、地下工程的衬砌和防水等都是结构。边坡工程和地质灾害的治理,似乎都是地质和岩土问题,但常常离不开结构措施。单纯的岩土工程,如围海造陆、堤防工程,大面积高填方等并不多见。结构工程师和岩土工程师虽然有所分工,有所侧重,但互相配合更多。因此,结构工程师应当具备必要的岩土知识,岩土工程师也必须具备必要的结构知识。由于一般情况下结构专业处于主导地位,故岩土工程师承担的主要任务,经常是结构工程师觉得难以承担的较为复杂的或较为专门的岩土工程任务。

## 1.2 岩土工程的特点

岩土工程最突出的特点是其不确定性。包括岩土体结构和岩土材料性能的不确定性,裂隙水和孔隙水压力的多变性,信息的随机性、模糊性和不完善性,信息处理和计算方法的不确切性和不精确性等。科学技术崇尚定量和精确,从这个意义上看,岩土工程还是一门不严密、不完善、不够成熟的科学技术,因而岩土工程设计采取了定性判断和定量计算兼顾,理论和经验并重的指导方针。

### 1.2.1 岩土体结构的不确定性

岩土工程作为土木工程的一个分支,以传统力学为基础发展起来。但很快发现,单纯的力学计算不能解决实际工程问题。主要原因就在于岩土工程对自然条件的依赖性,岩土体结构和岩土材料性能参数的不确定性。试与结构专业比较,结构工程师的建筑设计、桥梁结构设计等,结构体系和构件尺寸都是工程师自己设计的;结构工程师面临的混凝土、型钢等人工材料,都是工程师自己选定的,都是可控的。而地质结构和岩土材料,都是自然形成,不能由工程师选定和控制,只能通过勘察查明,而又不能完全查明。对于结构工程,结构体系和结构构件非常明确,计算条件也很明确,因而建立在力学基础上的计算是可信的。而岩土体则分不清“体系”和“构件”,界面模糊而不规律,地质条件复杂时又很难确切掌握岩土的空间分布,存在计算条件的模糊性和信息的不完善性。岩土工程没有明确的构件截面和结点,不能像结构工程那样进行截面计算,分析截面可靠度。岩土的破坏有时取决于某一段岩土体强度的平均水平,有时取决于某一薄弱区段。虽然岩土工程计算方法取得了长足进步,发挥了重要作用,但由于计算假定、计算模式、计算参数与实际之间存在很多差别,计算结果与工程实际之间总存在或多或少的差别,需要岩土工程师综合判断。“不求计算精确,只求判断正确”,强调概念设计,已是岩土工程界的共识。

现以岩体为例进一步说明其结构的不确定性。

自然界的岩石,不仅强度和模量多种多样,差别悬殊,而且总是或稀或密、或宽或窄、或长或短地存在着各种裂隙,这是岩石区别于混凝土的主要特点。这些裂隙有的粗糙,有的光滑;有的平直,有的弯曲;有的充填,有的不充填;有的产状规则,有的规律性很差。裂隙的成因多种多样,有岩浆凝固收缩形成的原生节理,有沉积间断形成的层理,有构造应力形成的构造节理,有表生作用形成的卸荷节理和风化裂隙,还有变质作用

形成的片理、劈理等等，在岩石中构成极为多样非常复杂的裂隙系统。人们有时将岩石和裂隙视为一个整体称之为“岩体”，将裂隙概化为“结构面”。显然，结构面是岩体中最薄弱的环节。就力学性质而言，岩石材料的力学参数、结构面的力学参数和岩体的力学参数是不同的，有很大区别。搞清结构面的产状、参数和分布，是岩土工程勘察设计的重点，也是难点。

### 1.2.2 岩土参数的不确定性

混凝土和钢材的材质不仅可控，而且相对均匀，变异性较小，且其性能指标不因所在位置而变化。岩土则不同，不仅指标的变异性大，而且即使是同一种土，同一种岩石，其性能指标也随位置的不同而变化。

同一类型岩土体测试数据的离散性有两方面的原因，一是由于取样、运输、样品制备、试验操作等环节的扰动，取值、计算等产生的误差，使测试数据呈随机分布，这方面产生的不确定性与混凝土、钢材等测试数据的随机性质基本相同，只是变异性更大。二是岩土测试数据还和样品的位置有关，这是人造工程材料不具备的特性。自然界的岩土，即使是同一层，其性质也是有差别的。既有规律性的水平相变和竖向相变，也有无规律的指标离散。因此，个别样品测试的指标一般缺乏代表性，必须有一定数量的测试指标，经统计分析，才能得到代表值。结构设计注重构件截面计算，而岩土工程分析没有截面计算，被分析的岩土体的尺寸与试验样品的尺寸比较，要大许多倍，因而考虑的是岩土体参数值的综合水平，所以岩土指标标准值的计算方法与混凝土、钢材等是不同的。构件截面可靠度的分析已基本成熟，并已列入规范；而岩土工程的可靠度分析尚处在研究阶段，由于问题复杂，积累不足，尚难在工程中普遍应用。

岩土工程的测试可以分为室内试验、原位测试和原型监测三大类，还有各种模型试验，极为多样，各有各的特点和用途。同一种参数，测试方法不同，得出的成果数据也不同。选用合理的测试方法成为岩土工程计算能否达到预期效果的重要环节。例如土的模量有压缩模量、变形模量、旁压模量、反演模量等。土的抗剪强度室内试验有直剪和三轴剪；直剪又有快剪、固结快剪和慢剪；三轴剪又有不固结不排水剪、固结不排水剪、固结排水剪和固结不排水剪测孔隙水压力；原位测试有十字板剪切试验和野外大型剪切试验。由于试验条件不同，试验结果各异。用哪种试验方法合理，由岩土工程师根据具体条件确定。这种测试方法的多样性，也是岩土工程区别于结构工程的一个重要方面。岩土工程计算时应注意计算模式、计算参数和安全度的配套，而其中计算参数的正确选定最为重要。

### 1.2.3 裂隙水和孔隙水压力的多变性

结构设计有时也会遇到水压力问题，但远比岩土工程中的裂隙水或孔隙水压力简单。岩体中的地下水沿着岩体中的裂隙和洞穴流动，随着裂隙和洞穴的形态和分布的不同，有脉状裂隙水、网状裂隙水、层状裂隙水、岩溶水等不同的地下水类型。不同地段岩体的富水性、透水性和水压力差别非常大。摸清裂隙岩溶水的规律有时非常困难。

无论岩石中的裂隙岩溶水还是土中的孔隙水，其水位或压力水头都是变化的。有季节变化，有多年变化，还有因工程建设、开采地下水、水资源调配等人为原因产生的变化。这些变化往往很难准确预测，特别是人类活动造成的变化更难。地下水的压力既有静水压力，又有渗透力，可能造成严重的渗透破坏。

饱和土是固、液两相，非饱和土是固、液、气三相。于是产生了有效应力原理。有效

应力原理是土力学区别于一般材料力学的主要标志,在土工计算中产生了总应力法和有效应力法两种方法。孔隙水压力的增长和消散,在土工分析中是一个十分突出的问题:不同的加荷速率,地基承载力不同;是否及时支撑,对软土基坑稳定有不同的表现;渗透系数和地层组合的差别,导致基础沉降速率的差别等。饱和土中的超静水压力可产生挤土效应,使桩被挤断、挤歪和上浮;地震时的超静水压力导致砂土和粉土液化。非饱和土的孔隙气压力形成基质吸力,基质吸力随着土中含水量的增加而降低,因而不是不稳定的。膨胀土和黄土随湿度的增加而强度显著降低,非饱和土基坑雨季容易发生事故,花岗岩残积土边坡暴雨容易发生浅层滑坡,都和基质吸力降低有关。总之,把握好孔隙压力是岩土工程分析的重要关键。

#### 1.2.4 地质作用和地质演化的复杂性

当前的地质结构和岩土材料都是长期地质作用的产物,经历了漫长而复杂的地质演化过程。对于工程建设的时间尺度,有些地质作用和演化过程,如大地升降、褶皱运动、岩浆侵入、变质作用等,已是地质历史,工程设计可以不予考虑。但有些地质作用是必须考虑的,如地震活动引起的液化、震陷、塌陷、边坡失稳、永久性地面变形和诱发各种地质灾害;河水、湖水、海水运动产生的冲刷、侵蚀、搬运和淤积,对水利工程和航道工程的影响;地下水的地质作用造成岩溶发育,形成潜蚀,土洞,塌陷,使工程失稳;风化作用一般是比较缓慢的,但有的岩石在一定条件下风化作用发展很快,危害工程的安全;滑坡和泥石流等都是不良地质作用导致的地质灾害,都有发生、发展、消亡、复活等复杂的地质演化过程。地质作用、地质演化和地质过程,虽然也可以进行数学模拟,用数学表达式来描述,但离开解决实际工程问题还远。实际工程问题一般还是根据观察、测试、地质演化规律作出判断,工程师的经验起着决定性的作用。

#### 1.2.5 计算模式的不确切性

岩土工程发展到今天,理论和计算确实取得了长足进步,包括各种岩土本构模型,各种解析法和数值法计算,相应地研发了许多计算软件,但用到工程上则不一定都能得到满意的结果。其原因,除了参数的不确定性外,计算模式的不确切性也是重要问题。以地基承载力计算为例,早在1920年,Prandtl就根据极限平衡理论导出了地基极限承载力公式,后经Ressiner、Terzaghi、Meyerhoff、Hansen、Vesic等补充修正,历时已近90年,仍有很大的局限性。基于塑性区开展深度的临界荷载公式虽被《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002采用,但因与载荷试验结果不合,该规范根据工程经验和载荷试验成果对承载力系数进行了调整。《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》原有承载力计算公式,由于与工程经验不合而在修订时被取消,改用经验方法。多数规范的沉降计算公式也非常粗糙,只考虑一维压缩,未考虑侧向膨胀;只考虑主固结,未考虑次固结;只考虑正常压密土,未考虑欠压密和超压密状态等。学术界虽然提出了理论上比较完善的计算方法,但由于其计算参数难以准确测试和工程经验不足,反而不如用简易计算方法加经验修正更方便,更切合实际。

一般说来,结构截面计算是可信的。但是,由于钻探、取样、试验、取值、计算等环节的误差积累,用室内土工试验取得的岩土工程参数进行计算,其结果与工程实测有时差别很大。为了弥补这方面的误差,岩土工程设计常常采用经验系数修正的方法。例如国标《地基基础设计规范》GB 50007—2002中的沉降计算经验修正系数为0.2~1.3。实践经

验表明,利用静力触探、标准贯入、波速测试等原位测试成果与土的力学参数、地基承载力等建立经验关系,有时比用室内试验指标求解析解的效果更好。因而采用回归分析建立经验方程的方法在岩土工程勘察设计中被广泛应用。经验系数和经验公式的局限性是客观存在,如设计不注意这一点,误以为普遍真理,到处套用,显然是不正确的。

#### 1.2.6 理论导向和经验判断

刘建航院士提出的“理论导向,经验判断,实测定量”十二个字,切中要害,生动地反映了岩土工程设计的特点,也是岩土工程设计经验简洁而准确的概括,值得提倡。

有人说岩土工程没有什么理论,或者说理论没有用,就是靠经验,这当然是片面的。试想如果没有太沙基的有效应力原理,没有库仑-朗肯土压力理论,没有岩体结构面和结构体理论,我们的岩土工程设计将是一个什么局面?岩土本构关系的研究虽然备受争议,但对岩土工程师深入理解土的应力应变关系也是很有益处的。理论使我们认清事物的本质,认清事物的概念。概念清楚的人,能透过现象,看到本质,举一反三,将经验与理论结合。概念不清的人,往往只见现象,不见本质,凭直观和局部经验处理工程问题,极易犯概念性原则性的错误。只有植根于理论的经验才有生命力。

但是,单纯的理论计算往往是不可靠的,其主要原因就在于岩土工程设计充满着不确定性和信息的不完全性。地质边界的不确定性,岩土性能指标的不确定性,原始应力和孔隙水压力的不确定性,外荷载及其分布的不确定性,岩土应力应变模型的不确定性,计算理论和计算方法的不确定性等,使得岩土工程设计不得不依靠经验判断或者综合判断。理论只能是一个导向,在理论导向和经验判断的基础上作出设计决策。这里所说的经验判断,包括岩土工程师本人的经验,也包括专家群体总结写入规范的经验。例如一个深基坑工程的设计,运用土压力理论和相应软件进行计算当然是必要的,但更重要的是类似工程的经验,工程周边的环境以及影响工程安全关键性因素的把握,根据这些做出正确的设计决策。

实测定量或实试验证,是岩土工程设计非常重要的一环。譬如一项基础工程或基坑工程,设计时计算了沉降、变形或者位移,在施工和使用过程中进行变形监测。变形监测就是实测定量,也是最后的验证。只有这时才能称得上真正意义上的定量,预先的计算只是一种测算,与实测总有一定的差距。工程监测有两个作用:一是为本工程的安全设置最后一道保障,以便必要时启动紧急预案;二是以工程为科学实验,为今后类似的设计积累经验。

### 1.3 事物的不确定性和工程的安全性

#### 1.3.1 事物的不确定性

事物的不确定性可以分为三类:

##### 1 事物的随机性

由于事件发生的条件不充分,使条件与事件之间不能出现必然的因果联系,从而使事件的出现表现出不确定性,这就是事件的随机性。典型例子是抛硬币,事先不能肯定正是反,是随机的;但事后出现正或反则是明确的,不含糊的。描述随机性问题的数学方法是概率论、数理统计和随机过程。

## 2 事物的模糊性

事物本身的概念就是模糊的,一个集合包括哪些事物就是模糊的,非明确的,主要表现为客观事物差异中间过渡的不明确性和模糊性。如正常和不正常,适用和不适用,耐久和不耐久,地基的均匀与不均匀,岩石的风化程度等,没有明确的界限,模糊性比随机性更为深刻的不确定性,描述模糊性问题的数学方法是模糊数学。

## 3 知识的不完善性

按知识掌握的完善程度,可分为白色、黑色和灰色三种系统。白色是完全掌握的知识系统,黑色是毫无知识的系统,灰色是部分掌握部分未掌握的系统,随着科技进步,黑色系统可转为灰色系统,灰色系统可转为白色系统。

工程知识的不完善性有两种:一种是客观信息的不完善性,是由于客观条件的限制造成的,如由于勘察测试数量和精度限制,设计信息不完善。另一种是主观知识的不完善,对客观事物的认识不清晰,不确切,如未来地震强度的预测,液化的预测等。地基承载力的确定和地基变形计算也是不完善的,也在灰色系统之列。对知识不完善性的描述,目前还没有成熟的数学方法。只能引入经验参数,或由有经验的专家对不确定性进行评估。目前,结构可靠性设计主要是基于随机性问题不确定性的处理,模糊可靠性理论正在研究和发展的。岩土工程中存在大量知识不完善性的问题,是可靠度方法在岩土工程设计中难以推行的重要原因之一。

### 1.3.2 工程的安全性和可持续发展

工程建设应满足工程适用性、安全性、耐久性、经济性和可持续发展的要求,其中安全性更是首当其冲。传统设计采用安全系数(safety factor)量度安全性,这种方法在岩土工程设计中至今仍广为应用。上世纪中叶以来,工程结构的可靠性理论得到迅速发展,并在结构设计中普遍应用,也受到岩土工程界的关注,发表了不少研究成果,并开始应用于部分工程。

可靠性(reliability)可定义为“在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的能力”。可靠性是比较宽泛的术语,可靠度(degree of reliability)是对可靠性的定量描述,可定义为“在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率”。

当然,工程设计只考虑安全性是不够的,还要考虑适用性、耐久性和可持续发展。根据 ISO/DIS 15392 对可持续发展(sustainable development)的定义,工程建设的可持续发展可理解为“这种发展既满足当代人的需要,又不损害后代人满足其需要的能力”,主要包括经济、环境和社会三个方面:

在经济方面,不仅要考虑建设施工发生的费用,还应综合考虑今后维修改造的费用,对边坡工程、地质灾害整治工程,这个问题尤为突出。在环境方面,应力求避免大挖大填,大抽大排,尽量减小对环境的冲击;应力求保护土地资源、水资源,力求减少对生态的影响。这个问题对岩土工程特别重要,并已形成了“环境岩土工程”广阔领域。在社会方面,设计者应以人为本,保护人的健康和舒适;保护人类的文化价值;应避免使用有毒有害材料,注意某些材料的可降解性;应阻止已有污染源的扩散,防止新污染源的发生。可持续发展是岩土工程设计的重要指导思想,因不属于本教材范畴,从略。

### 1.3.3 安全度的表达

荷载(作用)和抗力是任何工程普遍存在的一对矛盾,为了确保工程安全,抗力对