

高等学校土木工程专业系列教材

# 基础工程

FOUNDATION ENGINEERING

彭社琴 赵其华 主编

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业系列教材

# 基 础 工 程

彭社琴 赵其华 主编

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基础工程/彭社琴等主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-112-14627-7

I. ①基… II. ①彭… III. ①地基-基础 (工程)  
IV. ①TU47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 201260 号

本书系统介绍了基础工程的设计原理和方法, 包括基础工程设计的一般原则、地基设计计算原理、浅基础常规设计、弹性地基上的梁和板分析、深基础设计等。其中地基设计计算主要包括基础埋置深度选择、地基承载力计算、变形计算、稳定性计算等。浅基础常规设计主要介绍了可按简化方法设计的各类基础的设计思路和方法, 包括无筋扩展基础、扩展基础、柱下条形基础等。弹性地基上的梁和板分析则从地基基础共同作用出发, 介绍弹性地基上梁和板的分析理论, 用以解决连续基础的设计计算问题。深基础设计中主要介绍了桩基础在竖向荷载、水平荷载作用下的承载力计算、变形计算以及桩基础结构设计。同时对沉井和地下连续墙等深基础的设计和施工进行了简要介绍。最后对动力机器基础的设计要点进行了介绍。

本书主要面向土木工程、勘察技术与工程以及地质工程专业的高年级本科生、研究生, 同时可供建筑工程、市政工程、公路工程、铁路工程、港口工程等领域的专业技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑: 张幼平  
责任设计: 张 虹  
责任校对: 党 蕾 王雪竹

高等学校土木工程专业系列教材

### 基础工程

彭社琴 赵其华 主编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 18¼ 字数: 440 千字

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-112-14627-7

(22684)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

# 前 言

## 一、地基、基础及上部结构的概念

万丈高楼平地起，任何建（构）筑物都是建造在一定的地基基础上的。建筑物的全部荷载都由它下面的地层来承担，受建筑物荷载作用影响的那一部分地层称为**地基**（sub-grade），建筑物向地基传递荷载的下部结构就是**基础**（foundation）。

**地基土或岩石**（sub-soil 或 rock）是自然界的产物。认识它的形成过程，了解其物质成分，掌握其工程特性及其所处的自然环境，是进行基础设计必备的基本知识。

**上部结构**（superstructure）是建筑物的主体结构。人们建造建筑物的目的及其应该具有的功能在此被充分表现出来。它的安全稳定很大程度上取决于地基及基础的支承作用。

**基础工程**（foundation engineering）作为天然地基或人工地基与上部结构的联系载体具有非常重要的作用。地基土有软有硬，其承载力有高有低。当上部结构荷载较大时，人们可以扩大上部结构置入地基中的墙或柱的截面尺寸，以分散上部结构荷载对地基土的作用，从而满足地基土承载力及变形的要求；若无法满足要求，则可将基础底面进一步扩大，形成连续基础；若还不能满足要求，则可采用桩基础、沉井基础或地下连续墙等。

因此，基础的结构形式很多，设计时应选择既能适应上部结构要求，同时也能适合场地工程地质条件，并在技术和经济上合理可行的基础结构方案。通常把埋置深度较浅，且施工简单的基础称为**浅基础**（shallow foundation）；反之，若浅层土质不良，须埋置于较深的土层中，且需借助于特殊的施工方法的基础则为**深基础**（deep foundation）。当选定合适的基础形式后，地基不加以处理就可以满足设计要求的，称为**天然地基**（natural ground）；反之，当地基土的强度不足或压缩性很大而不能满足设计要求时，则需对地基进行处理，经过处理后的地基称为**人工地基**（artificial ground）。

建筑物的地基、基础和上部结构三部分，虽然各自功能不同、研究方法相异，然而，对一个建筑物来说，在荷载作用下，这三部分却是彼此联系、相互制约的整体。在处理地基基础问题时，应该从地基—基础—上部结构相互作用的整体概念出发，全面地加以考虑，才能达到比较理想的效果。

基础工程是隐蔽工程，影响因素很多，稍有不慎就有可能给工程留下隐患。大量工程实践表明，整个工程的成败，在很大程度上取决于基础工程的质量和水平，建筑物事故的发生，很多与基础工程问题有关。由此可见，基础工程设计与施工质量的优劣，直接关系到建筑物的安危。此外，基础工程的造价通常在整个工程造价中占有相当大的比例，尤其在地质条件复杂地区更是如此，其节省建设资金的潜力很大，因此，基础工程在整个建筑工程中的重要性是显而易见的。

## 二、基础工程的发展概况

基础工程是土木工程学科的一个重要分支，是人类在长期的生产实践中发展起来的一门

应用学科。追本溯源，我们的祖先早在史前的建筑活动中就创造了自己的基础工程工艺，如宏伟的宫殿寺院和巍巍耸立的高塔，正因为基础牢固，方能历经无数次大风、强震考验而安然无恙，方能度过千百年而留存至今。但是，古代劳动人民的大量基础工程实践经验，主要体现在能工巧匠的高超技艺上，受当时生产力水平的限制，还未能提炼成系统的科学理论。

18 世纪欧洲工业革命开始以后，随着资本主义工业化的发展，城建、水利、道路等建筑规模也在不断扩大，从而促使人们对基础工程加以重视并开展研究。当时在作为本学科理论基础的土力学方面，砂土抗剪强度公式、土压力理论等相继提出，基础工程也随之得到了发展。到了 20 世纪 20 年代，太沙基（Terzaghi）归纳了以往土力学方面的成就，分别发表了《土力学》和《工程土质学》等专著，从而带动了各国学者对基础工程各方面进行研究和探索，并取得不断进展。

近几十年来，由于土木工程建设的需要，特别是电子计算机和计算技术的进步，使基础工程，无论在设计理论上，还是在施工技术上，都得到了迅速的发展，出现了一系列复合结构形式的基础类型，如补偿式基础、桩—筏基础、桩—箱基础等。与此同时，在地基处理技术方面，创造和完善了强夯法、振冲法、旋喷法、深层搅拌法等方法。

但是，由于地基土的非均质、其应力—应变关系的非线性及非完全弹性等诸多因素，虽然目前基础工程设计理论和施工技术比几十年前有突飞猛进的发展，但仍有许多问题值得研究和探讨，如从地基、基础及上部结构共同作用出发来设计基础时，地基计算模型的进一步完善优化问题、上部结构刚度对基础受力状况的影响问题等，都需要深入研究。

### 三、课程内容及学习要求

基础工程是土木工程专业一门重要的技术基础课。主要向读者介绍基础工程的设计原理和方法。包括：（1）基础工程设计的一般原则。以《工程结构可靠性设计统一标准》为准则，以《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）为基础介绍地基基础设计应掌握的一般原则；（2）地基设计计算原理。主要介绍地基土种类和特性、地基承载力计算、地基变形验算、地基稳定性计算等计算原理和方法；（3）浅基础常规设计。介绍可以简化成常规设计方法计算的各类浅基础的设计和计算，包括无筋扩展基础、扩展基础、柱下条形基础、筏形基础等；（4）弹性地基上的梁和板的分析。在介绍地基计算模型基础上，以柱下条形基础为重点解剖对象，介绍考虑地基基础相互作用的分析计算原理和方法；（5）桩基础。主要介绍桩基础的设计原理和方法；（6）沉井及地下连续墙。主要介绍沉井和地下连续墙的设计理论及设计要点；（7）动力机器基础。主要介绍动力机器基础的设计要点。

学习中要注意掌握每一类基础的基本设计原理和方法，同时注意设计计算要点和相应的构造要求。

本教材在 2003 年校编教材基础上，按 2010 年前后新颁布的一批土木工程领域规范进行编写，力争反映本学科领域的最新研究成果，努力将基础工程的设计理论与实际相结合，意在让学生既掌握基础工程设计的基本理论，又具有较强的形成实际设计成果的动手能力。其中第二章、第六章由赵其华编写，其他各章由彭社琴编写。

由于时间和编者水平所限，书中错误和不当之处在所难免，欢迎批评指正。

另外，在本教材编写过程中，作者的学生陈子扬、杨帆、魏斌斌、赵丹丹、韩刚、陈继彬、高锐、周波、陈鸿等做了大量辅助工作，在此一并致谢！

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 基础工程设计的一般原则         | 1  |
| 1.1 基础工程的设计原则           | 1  |
| 1.1.1 基础工程设计使用年限        | 1  |
| 1.1.2 基础工程的设计等级         | 1  |
| 1.1.3 基础工程的极限状态设计       | 2  |
| 1.2 地基基础分析和计算原则         | 6  |
| 1.2.1 地基、基础与上部结构共同工作的概念 | 6  |
| 1.2.2 地基基础分析与计算         | 9  |
| 1.3 基础工程的设计内容           | 10 |
| 思考题                     | 11 |
| 第二章 地基设计计算原理            | 12 |
| 2.1 概述                  | 12 |
| 2.2 地基类型                | 13 |
| 2.2.1 山区地基              | 13 |
| 2.2.2 软弱地基              | 15 |
| 2.3 基础埋置深度的选择           | 15 |
| 2.4 基底压力的简化计算           | 20 |
| 2.4.1 基础上的荷载            | 21 |
| 2.4.2 基底压力简化计算          | 21 |
| 2.4.3 基底附加压力            | 23 |
| 2.5 地基承载力特征值的确定         | 23 |
| 2.5.1 确定地基承载力特征值的方法     | 24 |
| 2.5.2 地基承载力特征值的深宽修正     | 28 |
| 2.6 按地基承载力确定基础底面尺寸      | 29 |
| 2.6.1 基底持力层承载力验算        | 29 |
| 2.6.2 地基软弱下卧层承载力验算      | 34 |
| 2.7 地基变形计算              | 36 |
| 2.7.1 地基变形特征            | 36 |
| 2.7.2 地基沉降量计算原理和方法      | 38 |
| 2.7.3 地基变形验算            | 45 |
| 2.7.4 防止和减轻沉降及不均匀沉降的措施  | 47 |
| 2.8 地基基础稳定性验算           | 51 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 思考题 .....                   | 54  |
| 习题 .....                    | 54  |
| 第三章 浅基础常规设计 .....           | 56  |
| 3.1 概述 .....                | 56  |
| 3.2 浅基础的类型 .....            | 56  |
| 3.3 无筋扩展基础 .....            | 61  |
| 3.4 扩展基础 .....              | 64  |
| 3.4.1 基底净反力 .....           | 65  |
| 3.4.2 墙下条形基础 .....          | 65  |
| 3.4.3 柱下独立基础 .....          | 69  |
| 3.5 柱下条形基础 .....            | 81  |
| 3.6 筏形基础 .....              | 87  |
| 案例 柱下独立基础（联合基础）设计计算 .....   | 92  |
| 思考题 .....                   | 106 |
| 习题 .....                    | 107 |
| 第四章 弹性地基上的梁和板分析 .....       | 109 |
| 4.1 地基计算模型 .....            | 109 |
| 4.1.1 线性弹性地基模型 .....        | 109 |
| 4.1.2 非线性弹性地基模型 .....       | 112 |
| 4.1.3 地基的柔度矩阵和刚度矩阵 .....    | 114 |
| 4.1.4 地基模型参数的确定 .....       | 117 |
| 4.2 文克勒地基上梁的计算 .....        | 121 |
| 4.2.1 无限长梁 .....            | 121 |
| 4.2.2 有限长梁 .....            | 123 |
| 4.2.3 地基上梁的分类 .....         | 127 |
| 4.3 地基上梁的数值分析 .....         | 129 |
| 4.3.1 有限差分法 .....           | 130 |
| 4.3.2 有限单元法 .....           | 132 |
| 4.4 刚性基础的基底反力、沉降和倾斜计算 ..... | 138 |
| 4.5 地基上板的有限差分分析法 .....      | 139 |
| 4.6 十字交叉条形基础 .....          | 146 |
| 4.7 箱形基础 .....              | 148 |
| 思考题 .....                   | 152 |
| 习题 .....                    | 152 |
| 第五章 桩基础 .....               | 153 |
| 5.1 概述 .....                | 153 |
| 5.2 桩的类型 .....              | 156 |
| 5.2.1 桩的工程分类 .....          | 156 |
| 5.2.2 混凝土预制桩、灌注桩的特点 .....   | 158 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 5.3 单桩竖向荷载传递机理 .....           | 159 |
| 5.4 单桩竖向承载力的确定 .....           | 164 |
| 5.5 群桩效应及基桩的承载力 .....          | 171 |
| 5.6 单桩的水平承载力及位移 .....          | 174 |
| 5.6.1 单桩水平静载荷试验 .....          | 175 |
| 5.6.2 桩的弹性地基理论计算 .....         | 176 |
| 5.6.3 基桩水平承载力 .....            | 179 |
| 5.7 桩基承载力验算 .....              | 181 |
| 5.7.1 基桩桩顶作用荷载计算 .....         | 181 |
| 5.7.2 基桩承载力验算 .....            | 182 |
| 5.7.3 软弱下卧层承载力验算 .....         | 182 |
| 5.7.4 负摩阻力验算 .....             | 184 |
| 5.7.5 上拔力验算 .....              | 186 |
| 5.8 桩基变形验算 .....               | 187 |
| 5.8.1 一般桩基础 .....              | 187 |
| 5.8.2 软土地基减沉复合疏桩基础 .....       | 191 |
| 5.9 桩基础设计 .....                | 192 |
| 5.9.1 桩的选型及布置 .....            | 192 |
| 5.9.2 桩身结构设计 .....             | 195 |
| 5.9.3 承台设计 .....               | 199 |
| 桩基础设计示例 .....                  | 207 |
| 思考题 .....                      | 217 |
| 习题 .....                       | 218 |
| 第六章 沉井及地下连续墙 .....             | 220 |
| 6.1 概述 .....                   | 220 |
| 6.1.1 基本概念 .....               | 220 |
| 6.1.2 沉井和地下连续墙的适用条件 .....      | 222 |
| 6.2 沉井和地下连续墙的施工工艺 .....        | 222 |
| 6.2.1 沉井的构造及施工工艺 .....         | 222 |
| 6.2.2 地下连续墙的形式及施工工艺 .....      | 223 |
| 6.3 沉井的设计与计算 .....             | 226 |
| 6.3.1 设计内容及构造要求 .....          | 226 |
| 6.3.2 设计计算 .....               | 228 |
| 6.4 地下连续墙设计 .....              | 233 |
| 6.4.1 地下连续墙设计计算的主要内容 .....     | 233 |
| 6.4.2 槽壁稳定计算 .....             | 235 |
| 6.4.3 开挖过程中地下连续墙的内力和变形计算 ..... | 237 |
| 6.4.4 地下连续墙入土深度计算 .....        | 239 |
| 思考题 .....                      | 240 |

习题 ..... 240

第七章 动力机器基础..... 242

7.1 概述 ..... 242

7.1.1 机器基础上的动力作用（扰力） ..... 242

7.1.2 动力机器基础分类 ..... 243

7.1.3 动力基础设计要求 ..... 244

7.2 基础—地基系统振动计算理论 ..... 245

7.3 锻锤基础设计 ..... 252

7.4 活塞式压缩机基础设计 ..... 258

7.5 减振和隔振 ..... 264

思考题 ..... 265

参考文献..... 267

附录..... 268

# 第一章 基础工程设计的一般原则

基础工程设计必须坚持因地制宜、就地取材、保护环境和节约资源的原则，根据场地工程地质条件、拟建建筑物功能和规模，综合考虑上部结构类型、建筑材料情况与施工条件等因素，确定经济合理的地基基础方案，选择适当的设计计算方法，精心设计。

## 1.1 基础工程的设计原则

### 1.1.1 基础工程设计使用年限

#### 一、功能要求

基础工程应满足的功能要求包括：

(1) 安全性 即能承受正常施工和使用时可能出现的各种作用。当发生火灾时，在规定的时间内可保持足够的承载力；当发生爆炸、撞击、人为错误等偶然事件时能保持必需的整体稳固性，不出现与起因不相称的破坏后果，防止出现结构的连续倒塌。

(2) 适用性 即基础在正常使用时应具有良好的工作性。如不产生影响上部结构安全和使用的沉降与不均匀沉降。

(3) 耐久性 基础应具有足够的耐久性，完好使用到设计规定的使用年限。如混凝土不发生严重风化、腐蚀，基础中钢筋不发生锈蚀等。

#### 二、设计使用年限

基础工程与其他结构工程一样在规定的设计使用年限内应具有足够的可靠度，满足各项功能要求。

《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008) 根据各类工程结构的特点规定了其设计使用年限。

对于房屋建筑结构，临时性建筑结构的设计使用年限为 5 年，普通房屋和构筑物的设计使用年限为 50 年，纪念性建筑和特别重要的建筑设计使用年限为 100 年；

铁路桥涵的设计使用年限为 100 年；

公路桥涵结构的设计使用年限，对于小桥、涵洞为 30 年，对于中桥、重要小桥为 50 年，对于特大桥、大桥、重要中桥为 100 年；

港口工程结构设计使用年限，对于临时性港口建筑物为 5~10 年，对于永久性港口建筑物为 50 年。

支承各类上部结构物的基础，应与上部结构的设计使用年限相一致，因此，基础工程的设计使用年限不应小于各类结构物的设计使用年限。

### 1.1.2 基础工程的设计等级

结构物基础的设计，离不开对结构物本身特征和地基具体情况的考虑，因此基础工程

设计又常称为地基基础设计。建筑物的规模越大、地基情况越复杂，所需要考虑的问题就会越多。如果基础工程出现问题会引起重要建筑物的直接损坏或使其不能正常使用，显然从建筑物整体角度出发，须加大基础设计的保证率，否则，保证率可适当降低。

一、基础工程设计等级

《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2011）根据地基复杂程度、建筑物规模和功能特征以及由于地基问题可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，将地基基础设计分为甲级、乙级、丙级三个设计等级，见表 1-1。设计时应根据具体情况合理采用。

| 地基基础设计等级 |                                                                                                                                                                                                                                                      | 表 1-1 |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 设计等级     | 建筑和地基类型                                                                                                                                                                                                                                              |       |
| 甲级       | 重要的工业与民用建筑<br>30 层以上的高层建筑<br>体型复杂，层数相差超过 10 层的高低层连成一体建筑物<br>大面积的多层地下建筑物（如地下车库、商场、运动场等）<br>对地基变形有特殊要求的建筑物<br>复杂地质条件下的坡上建筑物（包括高边坡）<br>对原有工程影响较大的新建建筑物<br>场地和地基条件复杂的一般建筑物<br>位于复杂地质条件及软土地区的二层及二层以上地下室的基坑工程<br>开挖深度大于 15m 的基坑工程<br>周边环境条件复杂、环境保护要求高的基坑工程 |       |
| 乙级       | 除甲级、丙级以外的工业与民用建筑物<br>除甲级、丙级以外的基坑工程                                                                                                                                                                                                                   |       |
| 丙级       | 场地和地基条件简单、荷载分布均匀的 7 层及 7 层以下民用建筑及一般工业建筑；次要的轻型建筑物<br>非软土地区且场地地质条件简单、基坑周边环境条件简单、环境保护要求不高且开挖深度小于 5.0m 的基坑工程                                                                                                                                             |       |

二、地基复杂程度

1. 符合下列条件之一者为一级地基（复杂地基）：

- (1) 岩土种类多，很不均匀，性质变化大，需特殊处理；
- (2) 严重湿陷、膨胀、盐渍、污染的特殊性岩土，以及其他情况复杂，需作专门处理的岩土。

2. 符合下列条件之一者为二级地基（中等复杂地基）：

- (1) 岩土种类较多，不均匀，性质变化较大；
- (2) 除上述款规定的以外的特殊性岩土。

3. 符合下列条件者为三级地基（简单地基）：

- (1) 岩土种类单一、均匀，性质变化不大；
- (2) 无特殊性岩土。

1.1.3 基础工程的极限状态设计

基础工程设计包括对地基土这一较为复杂介质材料的设计和判断，以及结构物基础的

设计计算，涉及建筑、公路、铁路、港口码头等行业。基础工程的设计方法和其他工程结构物一样，先后经历了工程类比法、安全系数法到概率极限状态设计法。目前基础工程的设计形成了以基于极限状态的可靠性设计为主，安全系数法、容许应力法仍在一定范围设计中采用，如地基基础稳定性计算实质上采用的是安全系数法，公路桥涵中地基承载力计算采用的是容许应力法。

### 一、极限状态 (limit state)

极限状态分为两类：

#### 1. 承载能力极限状态 (load capacity limit state)

这种极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了承载能力极限状态：

- (1) 结构构件或连接因超过材料强度而破坏，或因过度变形而不适于继续承载；
- (2) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡；
- (3) 结构转变为机动体系；
- (4) 结构或结构构件丧失稳定；
- (5) 结构因局部破坏而发生连续倒塌；
- (6) 地基丧失承载力而破坏；
- (7) 结构或结构构件的疲劳破坏。

#### 2. 正常使用极限状态 (service ability limit state)

这种极限状态对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。

当结构或结构构件出现下列状态之一时，应认为超过了正常使用极限状态：

- (1) 影响正常使用或外观的变形；
- (2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏（包括裂缝）；
- (3) 影响正常使用的振动；
- (4) 影响正常使用的其他特定状态。

结构设计时应应对结构的不同极限状态分别进行计算或验算；当某一极限状态的计算或验算起控制作用时，可仅对该极限状态进行计算或验算。

### 二、设计状况 (design situation)

工程结构设计时应区分下列设计状况：

1. 持久设计状况 (persistent design situation)，适用于结构使用时的正常情况；
2. 短暂设计状况 (transient design situation)，适用于结构出现的临时情况，包括结构施工和维修时的情况等；
3. 偶然设计状况 (accidental design situation)，适用于结构出现的异常情况，包括结构遭受火灾、爆炸、撞击时的情况等；
4. 地震设计状况 (seismic design situation)，适用于结构遭受地震时的情况，在抗震设防地区必须考虑地震设计状况。

工程结构设计时，对不同的设计状况，应采用相应的结构体系、可靠度水平、基本变量和作用组合等。

### 三、极限状态设计

对于上述的四种工程结构设计状况应分别进行极限状态设计，即对四种设计状况均应

进行承载能力极限状态设计；对持久设计状况尚应进行正常使用极限状态设计；对短暂设计状况和地震设计状况可根据需要进行正常使用极限状态设计；对偶然设计状况可不进行正常使用极限状态设计。

进行承载能力极限状态设计时，应根据不同的设计状况采用下列作用组合：

1. 基本组合，用于持久设计状况或短暂设计状况；
2. 偶然组合，用于偶然设计状况；
3. 地震组合，用于地震设计状况。

进行正常使用极限状态设计时，应采用下列作用组合：

1. 标准组合，宜用于不可逆正常使用极限状态设计；
2. 频遇组合，宜用于可逆正常使用极限状态设计；
3. 准永久组合，宜用于长期效应是决定性因素的正常使用极限状态。

对于每一种作用组合，工程结构设计均应采用其最不利的效应设计值进行。

目前，基础工程设计除基于极限状态的可靠度设计方法外，安全系数法和容许应力法的表达形式在不同行业的地基基础设计规范中也还存在。如《公路桥涵地基基础设计规范》的地基承载力计算采用的就是容许应力法形式的容许承载力计算方法；地基稳定性计算、桩基承载力特征值确定等包含了安全系数法的设计思想。

#### 四、极限状态设计表达式

基础的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计应符合下式要求：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1-1)$$

式中  $\gamma_0$  ——结构重要性系数；

$S_d$  ——作用组合的效应设计值；

$R_d$  ——结构或结构构件的抗力设计值。

地基的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计，可采用分项系数法，也可以采用容许应力法。

《建筑地基基础设计规范》(GB 5007—2011)规定，地基基础设计时，所采用的作用效应与相应的抗力限值应符合下列规定：

(1) 按地基承载力确定基础底面积及埋深或按单桩承载力确定桩数时，传至基础或承台底面上的作用效应应按正常使用极限状态下作用的标准组合；相应的抗力应采用地基承载力特征值或单桩承载力特征值；

(2) 计算地基变形时，传至基础底面上的作用效应应按正常使用极限状态下作用的准永久组合，不应计入风荷载和地震作用；相应的限值应为地基变形允许值；

(3) 计算挡土墙、地基或滑坡稳定以及基础抗浮稳定时，作用效应应按承载能力极限状态下作用的基本组合，但其分项系数均为 1.0；

(4) 在确定基础或桩基承台高度、支挡结构截面、计算基础或支挡结构内力、确定配筋和验算材料强度时，上部结构传来的作用效应和相应的基底反力、挡土墙土压力以及滑坡推力，应按承载能力极限状态下作用的基本组合，采用相应的分项系数；

当需要验算基础裂缝宽度时，应按正常使用极限状态下作用的标准组合；

(5) 基础设计安全等级、结构设计使用年限、结构重要性系数应按有关规范的规定采用，但结构重要性系数  $\gamma_0$  不应小于 1.0。

地基基础设计时,作用组合的效应设计值应符合下列规定:

承载能力极限状态下,由可变作用控制的基本组合的效应设计值  $S_d$ ,应按下列式确定:

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \gamma_{Q2} \psi_{c2} S_{Q2k} + \cdots + \gamma_{Qn} \psi_{cn} S_{Qnk} \quad (1-2)$$

对由永久作用控制的基本组合,也可采用简化规则,基本组合的效应设计值  $S_d$  按下式确定:

$$S_d = 1.35 S_k \quad (1-3)$$

式中  $S_k$ ——标准组合的作用效应设计值。

正常使用极限状态下,标准组合的效应设计值  $S_k$  应按下列式确定:

$$S_k = S_{Gk} + S_{Q1k} + \psi_{c2} S_{Q2k} + \cdots + \psi_{cn} S_{Qnk} \quad (1-4)$$

准永久组合的效应设计值  $S_k$  应按下列式确定:

$$S_k = S_{Gk} + \psi_{q1} S_{Q1k} + \psi_{q2} S_{Q2k} + \cdots + \psi_{qn} S_{Qnk} \quad (1-5)$$

式中  $S_{Gk}$ ——永久作用标准值  $G_k$  的效应;

$S_{Qnk}$ ——第  $n$  个可变作用标准值  $Q_{nk}$  的效应;

$\psi_{ci}$ ——第  $i$  个可变作用  $Q_i$  的组合值系数,按现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定取值;

$\psi_{qi}$ ——第  $i$  个可变作用的准永久值系数,按现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定取值;

$\gamma_G$ ——永久作用的分项系数,按现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定取值;

$\gamma_{Qi}$ ——第  $i$  个可变作用的分项系数,按现行《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定取值。

《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D 63—2007)则有以下规定:

(1) 按承载能力极限状态要求,结构构件自身承载力及稳定性应采用作用效应基本组合和偶然组合进行验算。

(2) 当基础结构需要进行正常使用极限状态设计时,作用短期效应组合和长期效应组合表达式、频遇值系数及准永久值系数,均应按现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60)确定。

(3) 地基进行竖向承载力验算时,传至基底或承台底面的作用效应应按正常使用极限状态的短期效应组合采用;同时尚应考虑作用效应的偶然组合(不包括地震作用)。作用效应组合值应小于或等于相应的抗力——地基承载力容许值或单桩承载力容许值。

① 当采用作用短期效应组合时,其中可变作用的频遇值系数均取为 1.0,且汽车荷载应计入冲击系数。

填料厚度(包括路面厚度)等于或大于 0.5m 的拱桥、涵洞,以及重力式墩台,其地基计算可不计汽车冲击系数。

② 当采用作用效应的偶然组合时,其组合表达式按式 1-6 采用,但不考虑结构重要性系数,并且其中的作用分项系数  $\gamma_{Gi}$  和  $\gamma_{Qi}$  频遇值系数  $\psi_{1i}$  和准永久值系数  $\psi_{2i}$  均取为 1.0。

(4) 计算基础沉降时,传至基础底面的作用效应应按正常使用极限状态下作用长期效应组合。该组合仅为直接施加于结构上的永久作用标准值(不包括混凝土收缩及徐变作用、基础变位作用)和可变作用准永久值(仅指汽车荷载和人群荷载)引起的效应。

偶然组合（不包括地震作用）的作用效应组合可采用下式：

$$\gamma_0 S_{ad} = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{Gik} + \gamma_a S_{ak} + \psi_{11} S_{Q1k} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} S_{Qjk} \quad (1-6)$$

式中  $\gamma_0$  ——结构重要性系数，取  $\gamma_0 = 1.0$ ；

$S_{ad}$  ——承载力极限状态下作用偶然组合的效应组合值；

$S_{Gik}$  ——第  $i$  个永久作用标准值效应；

$S_{ak}$  ——偶然作用标准值效应；

$S_{Q1k}$  ——除偶然作用外，第一个可变作用标准值效应，该标准值效应大于任意第  $j$  个可变作用标准值效应；

$S_{Qjk}$  ——其他第  $j$  个可变作用标准值效应；

$\psi_{11}$  ——第一个可变作用的频遇值系数；

$\psi_{2j}$  ——其他第  $j$  个可变作用的频遇值系数；稳定验算时取  $\psi_{2j} = 1.0$ ；

$\gamma_{Gi}$ 、 $\gamma_a$  ——相应作用效应的分项系数，均取  $1.0$ 。

## 1.2 地基基础分析和计算原则

地基、基础和上部结构三者是彼此联系的整体，然而三者具有的结构特征、介质材料类型和功能差异较大，因而在解决地基基础设计问题时，目前存在既矛盾又统一的设计计算理念和方法。对不同计算方法的理解和把握，应从建立地基、基础、上部结构相互作用、共同工作的概念开始。

### 1.2.1 地基、基础与上部结构共同工作的概念

任何工程结构物基础总是坐落于地表或掩埋于土（岩石）中的，结构物的重量由地基土层支承力和地下水的浮力来平衡，即通常所说的静力平衡。因此，将受上部结构物作用的那一部分土体或岩体称为地基。基础则是将上部结构所承受的各种作用传递到地基上的结构组成部分。显而易见，在基础工作状态中，其下部总是与地基接触，上部总是与主体结构相连，即地基、基础和上部结构在接触部位变形协调，共同工作。三者各自的工作性状（例如变形和内力或应力）不仅取决于荷载的大小与分布，在一定意义上更取决于三者抵抗变形的刚度大小及其相互关系。

#### 一、地基与基础的相互作用

首先只考虑基础本身刚度的作用而忽略上部结构的影响。为了建立相互作用的基本概念，以下先讨论柔性基础和刚性基础两种极端情况。

##### 1. 柔性基础（flexible foundation）

柔性基础的抗弯刚度很小，它好比放在地上的柔软薄膜，可以随着地基的变形而任意弯曲。作用在基础上的荷载就像直接作用在地基上一样。基础上任一点的荷载传递到基底时不可能向四周扩散分布，所以，柔性基础的基底反力分布与作用在基础上的荷载分布完全一致（如图 1-1a）。如果假设地基是均质的弹性半空间，则可利用角点法求得柔性基础底面任意点的沉降。可以得出均布荷载下柔性基础的基底沉降是中部大、边缘小。

如果要使柔性基础底面的沉降趋于均匀，显然就得增大基础边缘的荷载，并使中部的

荷载相应减少，这样，荷载和反力就应该变成如图 1-1 (b) 所示的非均布的形状了。

由此可见，缺乏刚度的基础，基底反力分布与外荷载一致，无力调整基底的不均匀沉降。

## 2. 刚性基础 (rigid foundation)

刚性基础具有非常大的抗弯刚度，受荷后基础不挠曲，因此，原来是平面的基底，沉降后仍然保持平面。若基础的荷载合力通过基底形心，刚性基础将迫使基底各点同步均匀下沉。这样，根据上述柔性基础沉降均匀时基底反力分布特点，可以推断中心荷载下刚性基础基底反力的分布也应该是边缘大、中部小，见图 1-2 中实线所示。由此可见，具有刚度的基础，在迫使基底沉降趋于均匀的同时，也使基底反力由中部向边缘转移。此处把刚性基础能跨越基底中部，将所承担的荷载相对集中地传至基底边缘的现象叫做基础的“架越作用”。

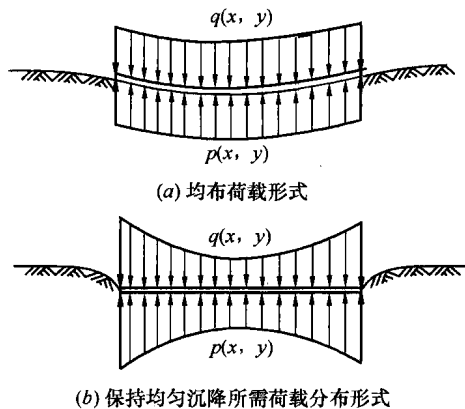


图 1-1 绝对柔性基础基底反力分布

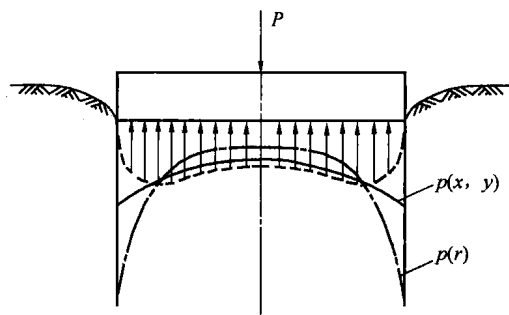


图 1-2 刚性基础基底反力分布

理论上，均质弹性半空间地基上的刚性基础，其基底反力分布形式如图 1-2 中点画线所示，即在基底边缘处，其值趋于无限大。然而，事实上由于地基局部剪切破坏，边缘处的接触压力不可能超过一定的数值，因而势必引起反力的重新分布。结果，基底反力图可呈如图 1-2 中虚线所示的马鞍形。

由此可见，在基础的架越作用以及由于土中塑性区的开展而发生反力重分布这两方面的综合影响下，基底反力的分布规律变得更加复杂。基底下塑性区发展的范围与荷载大小、土的抗剪强度、基础埋深（侧边超载）以及基底尺寸等因素有关。随着荷载的增加，邻近基底边缘的塑性区逐渐扩大，所增加的荷载必须靠基底中部反力的增大来平衡，于是，反力图由马鞍形逐渐变成抛物线形。但是，一般说来，据实测资料，无论无黏性土还是黏性土地基，只要基础埋深和基底面积足够大而荷载不太大时，基底反力图均呈马鞍形。

实际中并不存在绝对刚性和绝对柔性的基础，基础的刚度总是介于上述两种极端情况之间。基础刚度越大，基础的架越作用越强。基础调整不均匀沉降的能力越强，地基与基础的相互作用越明显，如筏形基础、箱形基础等，尤其是箱形基础具有很大的空间刚度。因此，基础与地基的相对刚度决定了基础架越作用的强弱以及基底压力的分布形式。

## 二、上部结构的刚度对基础受力状况的影响

基础是埋入土体中的结构物的一部分，上部与主体结构物紧密相连，因此上部结构物

的刚度会对基础实际刚度产生影响。为了说明问题,先讨论如图 1-3 所示上部结构为绝对刚性和绝对柔性的两种极端情况。

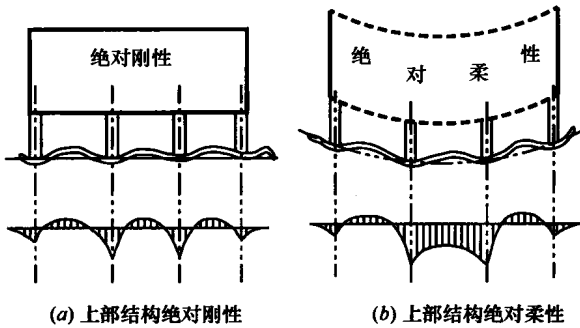


图 1-3 上部结构刚度对基础受力状况影响

### 1. 刚性上部结构

图 1-3 (a) 中上部结构为绝对刚性,当地基变形时,各柱只能均匀下沉:如忽略柱端的抗转动能力,则柱支座可视为基础梁的不动铰支座,亦即基础梁犹如倒置的连续梁,不产生整体弯曲,却以基底分布反力为外荷载,产生局部弯曲。

### 2. 柔性上部结构

如图 1-3 (b) 所示,若上部结构为绝对柔性,对基础的变形毫无约束作用,于是基础梁在产生局部弯曲的同时,还经受很大的整体弯曲。

上述两种极端情况下基础梁的内力(例如弯矩)分布形式与大小产生很大的差别。

实际结构物常介于上述两种情况之间,其整体刚度的考虑非常困难,只能依靠计算机来分析。实践中往往只能根据经验定性地判断比较接近哪一种情况,例如上部结构为剪力墙体系的高层建筑接近于绝对刚性,单层排架结构则接近于绝对柔性。刚度大的上部结构抵抗和调整了地基的变形,但会在结构内产生很高的次应力;反之,结构刚度愈小,次应力也愈小。

综上所述,基底压力(基底反力)的大小和分布形式受到上部结构荷载大小、地基土的强度、基础刚度等影响。这也是基础工程研究的重点和难点之一。

## 三、基底压力

基底压力是基础作用在地基土接触部位的压强强度。若以基础为研究对象则称为基底反力。基底压力和基底反力是一对作用力与反作用力。基础设计中要解决的关键问题之一便是采用什么样的计算理论和方法获得基底压力(基底反力)的大小和分布形式,使得既满足设计精度要求,同时计算工作量又相对较小。

实际中对基底压力(基底反力)的分布可考虑采用下述方式确定:

(1) 对于绝对柔性的基础(即基础的抗弯刚度趋于零),基底压力与上部荷载(加上基础部分)的大小及分布完全相同。

(2) 简化成直线分布。当基底反力分布符合简化条件时,可将基底反力形式简化成直线形式。即在中心荷载或均布荷载作用下,基底反力为均布的直线形;在偏心荷载作用下则为梯形或三角形分布。

(3) 对地基基础进行共同工作分析。对于地基基础相互作用不可忽略的地基基础,在合适的地基计算模型基础上,建立地基梁和板的差分方程或微分方程,通过数值分析获得基底反力分布。

(4) 实测基底反力。对于不同平面布置的筏形基础、箱形基础,通过大量实测资料分析总结,获得地基反力系数表。基底反力分布可通过基础底面相应位置处的地基反力系数乘以基底平均压力获得。