



21世纪全国本科院校土木建筑类**创新型**应用人才培养规划教材

# 地基处理

主 编 刘起霞

赠送电子课件

- 重点介绍各种地基处理方法
- 采用最新建筑地基基础设计规范
- 参照注册岩土工程师考试编写思考题和习题



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书主要介绍常用地基处理方法的加固原理、适用范围、设计方法、施工工艺和质量检验方法,以及既有建(构)筑物地基加固技术。全书共九章,分别是:绪论、复合地基理论、换土垫层法、深层密实法、排水固结法、化学加固法、加筋法、特殊土地基处理、托换技术。

本书主要供普通高等学校土木工程类专业师生使用,也可供从事土木工程地基处理的科研、设计和施工人员参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

地基处理/刘起霞主编. —北京:北京大学出版社, 2013. 1

(21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21485-5

I. ①地… II. ①刘… III. ①地基处理—高等学校—教材 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 254863 号

书 名: 地基处理

著作责任者: 刘起霞 主编

策 划 编 辑: 吴 迪

责 任 编 辑: 伍大维

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-21485-5/TU·0292

出 版 发 行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电 子 信 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 三河市北燕印装有限公司

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.5 印张 583 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

我国幅员辽阔,地理条件和土质差别很大,因而给从事工程地质、岩土工程领域的工作者提出了许多新的课题。近年来,我国经济迅速发展,常常需要在各种复杂的地质条件下建造工程,需要事先选择地质条件良好的场地,但有时也不得不在条件不好的地段进行建设,有时还需要对天然的不良地基进行处理或加固等。为解决好这些问题,工程地质和岩土工程界的学者和技术人员进行了不懈的努力,取得了许多成果,积累了丰富的经验,促使新技术、新方法不断涌现。

地基处理在岩土工程领域是一门较新的学科。它的任务在于提高地基承载能力,减小地基变形和减少建(构)筑物的沉降,保证上部结构的安全和正常使用。但是,土的力学性质极其复杂,各地地质条件有很大差别,这给地基处理工作增加了很大的难度。同时我国经济建设的蓬勃发展给建筑工程领域提出了许多新的课题,特别是近年来建筑工程的规模越来越大,对地基的承载力与变形的要求越来越高,而天然地基往往不能满足其要求。另外,由于建筑物的增多,人们不得不在工程地质条件差的地方兴建工程,于是就需要对天然地基进行处理。因此,地基处理在建筑工程领域逐渐成为热点问题。作为应用型本科土木类专业的学生,在学习土力学与地基基础基本理论的基础上,很有必要掌握一些地基处理的方法与技术,这样可以缩短参加工作后的适应期,增强其解决问题的能力。

按照高等学校土木工程学科专业指导委员会关于“土木工程专业本科(四年制)培养方案”的要求,“地基处理”是高等院校土木工程专业(应用型)岩土工程课群组四年制本科教育的一门专业选修课,是地下、岩土、矿山专业课群组的核心课程,是继“土力学”和“基础工程”等主干课程之后开设的又一门重要专业课。本书主要作为高等学校土木工程专业“地基处理与托换技术”课程的教材,严格按照新修订的“地基处理”课程教学大纲要求和新的国家规范编写,内容主要包括绪论、复合地基理论、换土垫层法、深层密实法、排水固结法、化学加固法、加筋法、特殊土地基处理、托换技术,并编入适量思考题和习题。

本书以《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》(GB 50202—2002)为主线,深入浅出地阐述了各种地基处理方法的加固理论,强调适用性和可操作性,以达到解决工程实际问题的目的。各章重点叙述了各种地基处理方法的加固机理、适用范围、设计计算方法、施工质量控制要点以及质量验收方法,并参照近年来注册岩土工程师考试的内容和题型编写了课后思考题和习题。

本书由河南工业大学刘起霞担任主编,编写人员具体分工如下:第1章、第2章、第3章由刘起霞编写;第5章、第7章由河南工程学院张明编写;第6章由黄河勘测规划设计有限公司王志宏编写;第8章由黄河勘测规划设计有限公司刘庆军编写;第4章、第9章由陕西水文公司朱运明编写。

本书在编写过程中，还得到河南工业大学和河南工程学院部分教师的大力支持，在此表示感谢。

最后，编者向本书的主审邹剑峰教授以及本书参考文献的所有作者和同行表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免会出现一些疏漏和不足，恳请广大读者批评指正！

编 者

2012 年 10 月

# 目 录

|                           |    |                             |    |
|---------------------------|----|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....            | 1  | 习题 .....                    | 21 |
| 1.1 地基处理的概念、目的和意义 .....   | 2  | 第 2 章 复合地基理论 .....          | 23 |
| 1.1.1 地基处理的概念 .....       | 2  | 2.1 概述 .....                | 24 |
| 1.1.2 地基处理的目的和意义 .....    | 3  | 2.1.1 复合地基分类 .....          | 24 |
| 1.2 地基处理的对象及其特性 .....     | 4  | 2.1.2 复合地基的基本特点 .....       | 26 |
| 1.2.1 地基处理的对象 .....       | 4  | 2.1.3 复合地基的形成条件 .....       | 26 |
| 1.2.2 地基处理的对象及其特性 .....   | 6  | 2.1.4 复合地基与浅基础和桩基础的区别 ..... | 27 |
| 1.3 地基处理的方法分类及适用范围 .....  | 7  | 2.2 复合地基的作用机理与破坏模式 .....    | 29 |
| 1.3.1 换土垫层法 .....         | 10 | 2.2.1 复合地基的作用机理 .....       | 29 |
| 1.3.2 振密、挤密法 .....        | 10 | 2.2.2 复合地基的破坏模式 .....       | 30 |
| 1.3.3 排水固结法 .....         | 10 | 2.3 复合地基的设计 .....           | 32 |
| 1.3.4 置换法 .....           | 11 | 2.3.1 复合地基设计的步骤 .....       | 32 |
| 1.3.5 加筋法 .....           | 12 | 2.3.2 复合地基的设计原则 .....       | 33 |
| 1.3.6 胶结法 .....           | 13 | 2.3.3 复合地基置换率 .....         | 33 |
| 1.3.7 冷热处理法 .....         | 14 | 2.3.4 复合地基的应力比 .....        | 34 |
| 1.3.8 其他方法 .....          | 14 | 2.4 复合地基承载力 .....           | 34 |
| 1.4 地基处理方案的选择和设计原则 .....  | 15 | 2.4.1 复合地基承载力计算 .....       | 34 |
| 1.4.1 地基处理设计前的工作内容 .....  | 15 | 2.4.2 水平向增强体复合地基承载力计算 ..... | 35 |
| 1.4.2 地基处理方案的确定步骤 .....   | 16 | 2.4.3 复合地基的载荷试验 .....       | 36 |
| 1.4.3 地基处理方案的选择 .....     | 16 | 2.5 复合地基变形与沉降计算 .....       | 38 |
| 1.5 地基处理技术在我国的发展概况 .....  | 18 | 2.5.1 复合地基的变形 .....         | 38 |
| 1.5.1 地基处理技术的发展历史 .....   | 18 | 2.5.2 复合地基的沉降 .....         | 40 |
| 1.5.2 地基处理发展中存在的问题 .....  | 19 | 本章小结 .....                  | 42 |
| 1.5.3 地基处理技术未来发展的展望 ..... | 19 | 习题 .....                    | 42 |
| 本章小结 .....                | 21 | 第 3 章 换土垫层法 .....           | 44 |
|                           |    | 3.1 概述 .....                | 45 |
|                           |    | 3.1.1 换土垫层法的特点及适用范围 .....   | 45 |
|                           |    | 3.1.2 垫层的作用和原理 .....        | 46 |

|                                    |           |                            |            |
|------------------------------------|-----------|----------------------------|------------|
| 3.2 土的压实机理 .....                   | 47        | 4.2.2 设计计算 .....           | 80         |
| 3.2.1 土的压实与含水率<br>的关系 .....        | 47        | 4.2.3 施工方法 .....           | 83         |
| 3.2.2 击实功 .....                    | 48        | 4.2.4 质量检验 .....           | 83         |
| 3.2.3 土的级配 .....                   | 49        | 4.2.5 工程实例 .....           | 84         |
| 3.3 垫层设计 .....                     | 49        | 4.3 碎(砂)石桩 .....           | 87         |
| 3.3.1 垫层材料的选择 .....                | 49        | 4.3.1 加固机理 .....           | 88         |
| 3.3.2 砂垫层厚度的确定 .....               | 51        | 4.3.2 设计计算 .....           | 90         |
| 3.3.3 砂垫层宽度的确定 .....               | 52        | 4.3.3 施工方法 .....           | 96         |
| 3.3.4 砂垫层承载力的确定 .....              | 52        | 4.3.4 质量检验 .....           | 99         |
| 3.3.5 沉降计算 .....                   | 53        | 4.3.5 工程实例 .....           | 100        |
| 3.3.6 其他几种材料的垫层<br>的设计 .....       | 55        | 4.4 石灰桩 .....              | 100        |
| 3.4 换土垫层法的施工 .....                 | 57        | 4.4.1 加固机理 .....           | 101        |
| 3.4.1 垫层施工的分类 .....                | 57        | 4.4.2 设计计算 .....           | 103        |
| 3.4.2 垫层材料的选择 .....                | 58        | 4.4.3 施工方法 .....           | 104        |
| 3.4.3 施工参数、机具简介 .....              | 58        | 4.4.4 质量检验 .....           | 106        |
| 3.4.4 施工要点 .....                   | 60        | 4.4.5 工程实例 .....           | 106        |
| 3.4.5 三种不同的垫层<br>施工方法 .....        | 62        | 4.5 土(或灰土、二灰土)桩 .....      | 107        |
| 3.5 换土垫层法的质量检验 .....               | 64        | 4.5.1 加固机理 .....           | 109        |
| 3.5.1 垫层质量检验 .....                 | 64        | 4.5.2 设计计算 .....           | 110        |
| 3.5.2 施工中常见的质量<br>问题及预防处理措施 .....  | 65        | 4.5.3 施工方法 .....           | 111        |
| 3.6 工程实例 .....                     | 66        | 4.5.4 质量检验 .....           | 113        |
| 3.6.1 上海机械学院动力馆<br>砂垫层地基处理工程 ..... | 66        | 4.5.5 工程实例 .....           | 114        |
| 3.6.2 河北涿州某工程区的<br>地基特征及处理方法 ..... | 68        | 4.6 CFG 桩(水泥粉煤灰碎石桩) .....  | 115        |
| 3.6.3 北京田村路北小区工程 .....             | 69        | 4.6.1 加固机理 .....           | 117        |
| 本章小结 .....                         | 69        | 4.6.2 设计计算 .....           | 117        |
| 习题 .....                           | 69        | 4.6.3 施工方法 .....           | 118        |
|                                    |           | 4.6.4 质量检验 .....           | 121        |
|                                    |           | 4.6.5 工程实例 .....           | 121        |
|                                    |           | 本章小结 .....                 | 122        |
|                                    |           | 习题 .....                   | 123        |
| <b>第4章 深层密实法 .....</b>             | <b>72</b> | <b>第5章 排水固结法 .....</b>     | <b>126</b> |
| 4.1 概述 .....                       | 73        | 5.1 概述 .....               | 127        |
| 4.1.1 深层密实法按施工方法<br>的分类 .....      | 73        | 5.2 加固机理 .....             | 129        |
| 4.1.2 深层密实法的处理效果 .....             | 74        | 5.2.1 堆载预压法的加固<br>机理 ..... | 130        |
| 4.1.3 深层密实法的加固机理 .....             | 74        | 5.2.2 真空预压法的加固<br>机理 ..... | 130        |
| 4.2 强夯法 .....                      | 77        | 5.3 设计与计算 .....            | 131        |
| 4.2.1 加固机理 .....                   | 77        | 5.3.1 设计计算理论 .....         | 131        |

|                            |     |                               |     |
|----------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| 5.3.2 竖井排水法 .....          | 139 | 6.4.2 水泥土的物理力学<br>性质 .....    | 203 |
| 5.3.3 预压法 .....            | 141 | 6.4.3 设计计算 .....              | 204 |
| 5.4 施工工艺 .....             | 145 | 6.4.4 施工方法 .....              | 206 |
| 5.4.1 水平排水系统 .....         | 145 | 6.4.5 质量检验 .....              | 210 |
| 5.4.2 竖向排水系统 .....         | 146 | 6.4.6 工程实例 .....              | 211 |
| 5.4.3 预压荷载 .....           | 149 | 6.5 几种新型地基处理方法概述 .....        | 212 |
| 5.5 施工监测与效果检测 .....        | 152 | 6.5.1 排水粉喷桩复合<br>地基法 .....    | 212 |
| 5.5.1 现场监测 .....           | 152 | 6.5.2 双向水泥土搅拌桩法 .....         | 215 |
| 5.5.2 效果检测 .....           | 155 | 6.5.3 钉形双向水泥土<br>搅拌桩法 .....   | 219 |
| 5.6 工程实例 .....             | 155 | 本章小结 .....                    | 222 |
| 5.6.1 工程概况 .....           | 155 | 习题 .....                      | 223 |
| 5.6.2 设计计算 .....           | 157 | <b>第7章 加筋法</b> .....          | 226 |
| 5.6.3 施工工艺 .....           | 158 | 7.1 概述 .....                  | 227 |
| 5.6.4 施工监测与检测 .....        | 158 | 7.2 土工合成材料 .....              | 228 |
| 5.6.5 加固效果评价 .....         | 158 | 7.2.1 土工合成材料的分类 .....         | 229 |
| 本章小结 .....                 | 159 | 7.2.2 土工合成材料的主要<br>功能 .....   | 230 |
| 习题 .....                   | 159 | 7.2.3 土工合成材料的特性<br>指标 .....   | 233 |
| <b>第6章 化学加固法</b> .....     | 163 | 7.2.4 工程实例 .....              | 234 |
| 6.1 概述 .....               | 164 | 7.3 加筋土挡墙 .....               | 235 |
| 6.1.1 化学加固法的分类 .....       | 164 | 7.3.1 加筋土挡墙的特点和<br>破坏机理 ..... | 236 |
| 6.1.2 化学加固法的使用<br>范围 ..... | 166 | 7.3.2 设计计算 .....              | 238 |
| 6.2 灌浆法 .....              | 167 | 7.3.3 施工方法 .....              | 242 |
| 6.2.1 概述 .....             | 167 | 7.3.4 质量检验 .....              | 243 |
| 6.2.2 灌浆材料 .....           | 171 | 7.4 土钉 .....                  | 244 |
| 6.2.3 灌浆理论 .....           | 174 | 7.4.1 土钉支护结构的加固<br>机理 .....   | 244 |
| 6.2.4 灌浆设计 .....           | 175 | 7.4.2 土钉支护结构的设计<br>计算 .....   | 246 |
| 6.2.5 灌浆的施工 .....          | 181 | 7.4.3 施工技术与质量检验 .....         | 248 |
| 6.2.6 质量检验 .....           | 186 | 7.5 树根桩 .....                 | 250 |
| 6.2.7 工程实例 .....           | 188 | 7.5.1 设计计算 .....              | 251 |
| 6.3 高压喷射注浆法 .....          | 188 | 7.5.2 施工方法 .....              | 252 |
| 6.3.1 概述 .....             | 189 | 7.5.3 工程实例 .....              | 253 |
| 6.3.2 加固机理 .....           | 192 | 7.6 植被护坡技术 .....              | 254 |
| 6.3.3 设计计算 .....           | 194 |                               |     |
| 6.3.4 施工工艺 .....           | 196 |                               |     |
| 6.3.5 质量检验 .....           | 199 |                               |     |
| 6.3.6 工程实例 .....           | 199 |                               |     |
| 6.4 水泥土搅拌法 .....           | 201 |                               |     |
| 6.4.1 加固机理 .....           | 202 |                               |     |

|                           |     |                                |     |
|---------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 7.6.1 植被影响边坡稳定性的方式 .....  | 254 | 8.4.5 盐渍土地基设计与防护措施 .....       | 308 |
| 7.6.2 植被护坡机理 .....        | 255 | 8.5 混合土地基处理 .....              | 312 |
| 7.6.3 边坡稳定性分析 .....       | 258 | 8.5.1 混合土的勘察 .....             | 313 |
| 7.6.4 植被护坡设计与施工 .....     | 260 | 8.5.2 混合土的评价 .....             | 315 |
| 本章小结 .....                | 262 | 8.5.3 混合土的处理措施 .....           | 316 |
| 习题 .....                  | 262 | 8.6 污染土地基处理 .....              | 317 |
| <b>第8章 特殊土地基处理</b> .....  | 265 | 8.6.1 污染土勘察 .....              | 317 |
| 8.1 膨胀土地基处理 .....         | 266 | 8.6.2 污染土地基的评价 .....           | 320 |
| 8.1.1 膨胀土的主要工程性质 .....    | 267 | 8.6.3 污染土的防治措施 .....           | 323 |
| 8.1.2 膨胀土的判别与分类 .....     | 270 | 本章小结 .....                     | 326 |
| 8.1.3 膨胀土的工程特性指标 .....    | 273 | 习题 .....                       | 326 |
| 8.1.4 膨胀土地基处理技术 .....     | 274 | <b>第9章 托换技术</b> .....          | 329 |
| 8.1.5 膨胀土路基处治设计与施工 .....  | 275 | 9.1 既有建筑物地基加固设计 .....          | 331 |
| 8.2 湿陷性黄土地基处理 .....       | 279 | 9.2 基础加宽托换 .....               | 332 |
| 8.2.1 我国湿陷性黄土的工程性质 .....  | 280 | 9.2.1 加大基础底面积法 .....           | 332 |
| 8.2.2 黄土的湿陷机理 .....       | 281 | 9.2.2 加深基础法 .....              | 335 |
| 8.2.3 黄土的湿陷性评价 .....      | 282 | 9.2.3 加厚加固 .....               | 336 |
| 8.2.4 黄土地基的承载力 .....      | 284 | 9.3 坑式托换 .....                 | 336 |
| 8.2.5 黄土地基的变形计算 .....     | 286 | 9.3.1 适用范围及优、缺点 .....          | 336 |
| 8.2.6 湿陷性黄土地基处理技术 .....   | 288 | 9.3.2 设计要点 .....               | 337 |
| 8.2.7 湿陷性黄土地基注浆加固实例 ..... | 293 | 9.3.3 施工步骤 .....               | 337 |
| 8.3 红黏土地基处理 .....         | 294 | 9.4 桩式托换 .....                 | 338 |
| 8.3.1 红黏土的形成和分布 .....     | 294 | 9.4.1 锚杆静压桩托换 .....            | 338 |
| 8.3.2 红黏土的分类 .....        | 295 | 9.4.2 预制桩托换 .....              | 341 |
| 8.3.3 红黏土的工程性质 .....      | 297 | 9.4.3 树根桩托换 .....              | 342 |
| 8.3.4 红黏土的岩土工程评价 .....    | 298 | 9.5 灌浆托换 .....                 | 345 |
| 8.3.5 红黏土的处理方法 .....      | 299 | 9.5.1 渗透灌浆法 .....              | 345 |
| 8.4 盐渍土地基处理 .....         | 301 | 9.5.2 劈裂灌浆法 .....              | 345 |
| 8.4.1 盐渍土的分类 .....        | 302 | 9.5.3 高压喷射注浆 .....             | 346 |
| 8.4.2 盐渍土的野外判别 .....      | 304 | 9.5.4 挤密灌浆法 .....              | 346 |
| 8.4.3 盐渍土的工程性质 .....      | 305 | 9.5.5 电动化学灌浆法 .....            | 346 |
| 8.4.4 盐渍土的岩土工程评价 .....    | 306 | 9.6 建筑物纠偏 .....                | 347 |
|                           |     | 9.6.1 造成建(构)筑物损坏与病害的原因分析 ..... | 347 |
|                           |     | 9.6.2 建筑物发生裂损、倾斜的原因分析 .....    | 348 |
|                           |     | 9.6.3 裂损、倾斜建筑物治理方案的制订 .....    | 349 |

|                                |     |                   |     |
|--------------------------------|-----|-------------------|-----|
| 9.6.4 建筑物纠偏的分类 .....           | 350 | 附录 1 主要符号索引 ..... | 355 |
| 9.6.5 建筑物纠偏加固的施工<br>技术要点 ..... | 352 | 附录 2 地质年代表 .....  | 358 |
| 本章小结 .....                     | 352 | 参考文献 .....        | 362 |
| 习题 .....                       | 353 |                   |     |

# 第1章

## 绪论

### 教学目标

本章主要讲述地基处理的概念、目的、意义、处理的对象，地基处理方法的分类以及适用范围、发展概况等。通过本章的学习，应达到以下目标：

- (1) 掌握地基处理的基本概念与意义；
- (2) 重点掌握地基处理的分类及适用范围；
- (3) 熟悉地基处理方法的选择和设计原则；
- (4) 了解地基处理技术在我国的发展阶段和发展趋势。

### 教学要求

| 知识要点           | 能力要求                                                                                                                                                  | 相关知识                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地基处理的概念、目的和意义  | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 掌握地基处理的概念</li> <li>(2) 掌握人工地基和天然地基的概念</li> <li>(3) 掌握地基处理的目的</li> <li>(4) 掌握地基处理的意义</li> </ol>             | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 天然地基和人工地基的概念</li> <li>(2) 地基处理的概念</li> <li>(3) 地基处理的目的</li> <li>(4) 地基处理的意义</li> </ol>                                                                                              |
| 地基处理的对象及其特性    | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 掌握地基处理的对象</li> <li>(2) 熟悉软黏土的特性</li> <li>(3) 熟悉冻土的特性</li> <li>(4) 熟悉填土的特性</li> <li>(5) 熟悉混合土的特性</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 软弱地基</li> <li>(2) 特殊土地基</li> <li>(3) 湿陷性黄土</li> <li>(4) 盐渍土及其特性</li> <li>(5) 混合土及其特性</li> <li>(6) 填土及其特性</li> </ol>                                                                 |
| 地基处理的方法分类及适用范围 | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 掌握地基处理方法的分类</li> <li>(2) 掌握地基处理方法的原理</li> <li>(3) 掌握地基处理方法的适用范围</li> </ol>                                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 换土垫层法</li> <li>(2) 重锤夯实法</li> <li>(3) 平板振动法</li> <li>(4) 强夯挤淤法</li> <li>(5) 强夯法</li> <li>(6) 挤密法</li> <li>(7) 堆载预压</li> <li>(8) 加筋法</li> <li>(9) 热学法</li> <li>(10) 化学加固法</li> </ol> |
| 地基处理方案的选择和设计原则 | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 了解地基处理设计前的工作内容</li> <li>(2) 掌握地基处理方案的确定步骤</li> </ol>                                                       | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 地基处理设计方法</li> <li>(2) 影响地基处理的因素</li> </ol>                                                                                                                                          |
| 地基处理技术在我国的发展简况 | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 了解地基处理发展阶段</li> <li>(2) 了解地基处理技术存在的问题</li> <li>(3) 了解地基处理技术在我国的发展简况</li> </ol>                             | <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 建筑地基处理技术规范</li> <li>(2) 优化设计理论</li> </ol>                                                                                                                                           |

基本概念

基础、地基、天然地基、人工地基、地基处理、托换技术、软弱地基、软黏土、湿陷性黄土、膨胀土、红黏土、冻土、盐渍土、混合土等。

引例

在土木工程建设中,天然地基在上部结构传递的荷载及外加荷载作用下,往往由于强度不足会产生较大的沉降和侧向变形,影响建(构)筑物的稳定性。人们常常采用不同的方法加固和处理地基,特别是现在建筑的类型复杂性越来越大,大桥的规模也越来越大,高速公路和高速铁路的修建,都使我们面临的地基处理问题难度越来越大,所以深入研究地基处理问题具有巨大的现实意义。

## 1.1 地基处理的概念、目的和意义

我国地域广阔,软弱地基类别多、分布广,当今国内土木工程建设规模大、发展快。尤其对于软弱地基,复合地基(指部分土体被增强或被置换,而形成的由地基土和增强体共同承担荷载的人工地基)是一种必不可少的基础技术处理方法,在当今的工程实践中往往能有效地解决所遇到的难题。复合地基较好地利用了天然地基土和增强体,两者共同承担建(构)筑物荷载的潜能,具有比较经济的特点,得到了学术界和工程界从事岩土工作的专家和学者的广泛兴趣和高度重视。

### 1.1.1 地基处理的概念

任何建筑物的荷载最终将传递到地基上,由于上部结构材料强度很高,而地基土强度很低,压缩性较大,因此通过设置一定结构形式和尺寸的基础才能解决这个矛盾。基础具有承上启下的作用,它一方面处于上部结构荷载及地基反力的共同作用下,承受由此产生的内力;基础底面的反力反过来又作为地基土的荷载,使地基产生应力和变形。基础设计时,除了需保证基础结构本身具有足够的刚度和强度外,同时还需选择合理的基础尺寸和布置方案,使地基的强度和沉降保持在规范允许的范围内。因此,基础设计又常被称为地基基础设计。凡是基础直接建在未经加固的天然土层上时,这种地基称之为天然地基。若天然地基很软弱,则需要事先经过人工处理后再建造基础,这种地基称之为人工地基。

地基处理工程的设计和施工质量直接关系到建筑物的安全,如处理不当,往往会发生工程事故,且事后补救大多比较困难。因此,对地基处理要求实行严格的质量控制和验收制度,以确保工程质量。

地基处理(Foundation Treatment)一般是指用于改善支承建筑物的地基(土或岩石)的承载能力或抗渗能力所采取的工程技术措施,主要分为基础工程措施和岩土加固措施。有的工程不改变地基的工程性质,而只采取基础工程措施;有的工程还同时对地基的土和岩石加固,以改善其工程性质。

随着国民经济的高速发展,不仅需要选择在地基条件良好的场地从事建设,而且有时

也不得不在地质条件不良的地基上进行修建。另外,科学技术的日新月异也使结构物的荷载日益增大,对变形要求越来越严,因而原来一般可被评价为良好的地基,也可能在某种特定条件下非进行地基处理不可,因此,地基处理的重要地位也日益明显,已成为制约工程建设的主要因素,如何选择一种既满足工程要求,又节约投资的设计、施工和验算方法,已经刻不容缓地呈现在广大工程技术人员面前。

### 1.1.2 地基处理的目的和意义

软弱地基(Soft Foundation)就是指压缩层主要由淤泥、淤泥质土、充填土、杂填土或其他高压缩性土层构成的地基。它是指基本上未经受过地形及地质变动,未受过荷载及地震动力等物理作用或土颗粒间的化学作用的软黏土、有机质土、饱和松砂土和淤泥质土等土层构成的地基。

软黏土(Soft Clag, 又称软土)是指近代沉积的软弱土层,由于它所具有的低强度、高压缩性和弱透水性,作为地基,常常成为棘手的工程地质问题。软黏土的成分主要包括饱含水分的软弱黏土和淤泥土,其工程性质主要取决于颗粒组成、有机质含量、土的结构、孔隙比及天然含水率。软黏土地基的共同特性是,天然含水率高,最小为30%~40%,最高可达200%;孔隙比大,最小为0.8~1.2,最大达5;压缩系数大;渗透系数小,一般小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ;灵敏度高,在2~10之间,灵敏度高的软土,经扰动后强度便降低很多。

软弱地基的特点决定了在这种地基上建造工程,必须进行地基处理。地基处理的目的就是利用换填、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法对地基土进行加固,用以改良地基土的工程特性,主要包括以下方面。

#### 1. 提高地基土的抗剪强度

地基的剪切破坏以及在土压力作用下的稳定性,取决于地基土的抗剪强度。因此,为了防止剪切破坏以及减轻土压力,需要采取一定措施以增加地基土的抗剪强度。

#### 2. 降低地基的压缩性

主要是采用一定措施以提高地基土的压缩模量,以减少地基土的沉降。另外,防止侧向流动(塑性流动)产生持续的剪切变形,也是改善剪切特性的目的之一。

#### 3. 改善透水特性

由于地下水的运动会引起地基出现一些问题,为此,需要采取一定措施使地基土变成不透水层或减轻其水压力。

#### 4. 改善动力特性

地震时饱和松散粉细砂(包括一部分粉土)将会产生液化。因此,需要采取一定措施防止地基土液化,并改善其振动特性以提高地基的抗震特性。

#### 5. 改善特殊土的不良地基特性

主要是指消除或减少黄土的湿陷性和膨胀土的膨胀性等以及其他特殊土的不良地基特性。

软弱土地基经过处理,不用再建造深基础或设置桩基,防止了各类倒塌、下沉、倾斜等恶性事故的发生,确保了上部基础和建筑结构的使用安全和耐久性,具有巨大的技术和

经济意义。

## 1.2 地基处理的对象及其特性

### 1.2.1 地基处理的对象

#### 1. 软弱地基

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中规定,软弱地基系指主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填地或其他高压缩性土层构成的地基。

##### 1) 软黏土

淤泥及淤泥质土总称为软黏土,一般是第四纪后期在滨海、湖泊、河滩、三角洲、冰碛等地质沉积环境下沉积形成的,还有部分冲填土和杂填土。这类土的物理特性大部分是饱和的,含有机质,天然含水率大于液限,孔隙比大于1。当天然孔隙比大于1.5时,称为淤泥,天然孔隙比大于1而小于1.5时,则称为淤泥质土。这类土工程特性甚为软弱,抗剪强度很低,压缩性较高,渗透性很小,并具有结构性,广泛分布于我国东南沿海地区和内陆江河湖泊的周围,是软弱土的主要土类,通称为软土。

##### 2) 冲填土

在整治和疏通江河航道时,用泥浆泵将挖泥船挖出的泥砂,通过输泥管吹填到江河两岸而形成的沉积土,称为冲(吹)填土(Hydraulic Fill)。

冲填土的成分比较复杂,如以黏性土为例,由于土中含有大量的水分而难以排出,土体在沉积初期处于流动状态。因而冲填土属于强度较低、压缩性较高的欠固结土。另外,主要以砂或其他粗粒土所组成的冲填土,其性质基本上类似于粉细砂面不属于软弱土范围。可见,冲填土的工程性质主要取决于其颗粒组成、均匀性和沉积过程中的排水固结条件。

##### 3) 杂填土

杂填土(Miscellaneous Fill)是由于人类活动而任意堆填的建筑垃圾、工业废料和生活垃圾。杂填土的成因很不规律,组成物杂乱分布极不均匀,结构松散。它的主要特性是强度低、压缩性高和均匀性差,一般还具有浸水湿陷性。对有机质含量较多的生活垃圾和对基础有侵蚀性的工业废料等杂填土,未经处理不宜作为基础的持力层。

##### 4) 其他高压缩性土

饱和松散粉细砂(包括部分粉土)也应该属于软弱地基的范围。当机械设备振动或地震荷载重复作用于该类地基土时,将使地基土产生液化;基坑开挖时也会产生管涌。

对软弱地基的勘察,应查明软弱土层的均匀性、组成、分布范围和土质情况。对冲填土应了解排水固结条件,对杂填土应查明堆载历史,明确在自重作用下的稳定性和湿陷性等基本因素。

#### 2. 特殊土地基

特殊土地基(Special Ground)大部分具有地区性特点,它包括软黏土、湿陷性黄土、

膨胀土、红黏土、冻土以及盐渍土、混合土等。

#### 1) 软黏土

软黏土是在静水或非常缓慢的流水环境中沉积,并经生物化学作用形成,其天然含水率大于液限,天然孔隙比大于1.0的黏性土。当软黏土的天然孔隙比大于1.5时称为淤泥(Muck)。软黏土广布在我国东南沿海、内陆平原和山区,如上海、杭州、温州、福州、广州、宁波、天津和厦门等沿海地区,以及武汉和昆明等内陆地区。

软黏土的特性是天然含水率高、天然孔隙比大、抗剪强度低、压缩系数大、渗透系数小。在外荷载作用下地基承载力低、变形大、不均匀变形也大、透水性差和变形稳定历时较长。在比较深厚的软黏土层上,建筑物基础的沉降常持续数年乃至数十年之久。

#### 2) 湿陷性黄土

凡天然黄土在上覆土的自重应力作用下,或在上覆土自重应力和附加应力的共同作用下。受水浸湿后土的结构迅速破坏而发生显著附加沉降的黄土,称为湿陷性黄土(Collapsible Loess)。

由于黄土的浸水湿陷而引起建(构)筑物的不均匀沉降是造成黄土地区工程事故的主要原因,设计时首先要判断其是否具有湿陷性,再考虑如何进行地基处理。

我国湿陷性黄土广泛分布在甘肃、陕西、黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山东、河北、河南、山西、宁夏、青海和新疆等地。

#### 3) 膨胀土

膨胀土(Expansive Soil)是指土的黏性成分主要是由亲水性黏土矿物组成的黏性土,是一种吸水膨胀、失水收缩,具有较大的胀缩变形性能且反复变形的高塑性黏土。

我国膨胀土分布在广西、云南、湖北、河南、安徽、四川、河北、山东、陕西、江苏、贵州和广东等省。利用膨胀土作为建筑物地基时,必须进行地基处理。

#### 4) 红黏土

在亚热带温湿气候条件下,石灰岩和白云岩等碳酸盐类岩石经风化作用所形成的褐红色黏性土,称为红黏土(Red Clay)。

红黏土通常是较好的地基土,但由于下卧岩层面起伏变化,以及基岩的溶沟、溶槽等部位常常存在软弱土层,致使地基土层厚度及强度分布不均匀,此时容易引起地基的不均匀变形。

#### 5) 冻土

当温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,土中液态水冻结成冰并胶结土粒而形成的一种特殊土,称为冻土。冻土按冻结持续时间又分为季节性冻土(Seasonally Frozen Ground)和多年冻土。季节性冻土是指冬季冻结、夏季融化的土层。冻结状态持续三年以上的土层称为多年冻土或冻土(Permafrost)。

季节性冻土在我国东北、华北和西北广大地区均有分布,因其呈周期性的冻结和融化,对地基的稳定性影响较大。例如,冻土区地基因冻胀而隆起,可能导致基础被抬起、开裂及变形,而融化又使地基沉降,再加上建筑物下面各处地基土冻融程度不均匀,往往造成建筑物的严重破坏。

#### 6) 岩溶

岩溶(Karst)主要出现在碳酸类岩石地区。其基本特性是地基主要受力层范围内受水的化学和机械作用而形成溶洞、溶沟、溶槽、落水洞以及土洞等。

我国岩溶地基广泛分布在贵州和广西两省。溶洞的规模不同,且沿水平方向延伸,有的有经常性水流,有的已干涸或被泥砂填实。

建造在岩溶地基上的建筑物,要慎重考虑可能会造成的地面变形和地基陷落。山区地基条件比较复杂,主要表现在地基的不均匀性和场地的稳定性两方面,基岩表面常常起伏大,而且可能存在大块孤石;另外还会遇到滑坡、崩塌和泥石流等不良地质现象。

### 1.2.2 地基处理的对象及其特性

软弱土是指淤泥、淤泥质土和部分冲填土、杂填土及其他高压缩性土。由软弱土组成的地基称为软弱土地基,一般具有下列工程特性。

#### 1. 含水率较高,孔隙比较大

因为软黏土的成分主要是由黏土粒组和粉土粒组组成,并含少量的有机质。黏粒的矿物成分为蒙脱石、高岭石和伊利石。这些矿物晶粒很细,呈薄片状,表面带负电荷,它与周围介质的水和阳离子相互作用,形成偶极水分子,并吸附于表面形成水膜。在不同的地质环境下沉积形成各种絮状结构。因此,这类土的含水率和孔隙比都比较高。根据统计,一般含水率为35%~80%,孔隙比为1~2。软黏土的高含水率和大孔隙比不但反映土中的矿物成分与介质相互作用的性质,同时也反映软黏土的抗剪强度和压缩性的大小。含水率愈大,土的抗剪强度愈小,压缩性愈大。反之,强度愈大,压缩性愈小。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)利用这一特性按含水率确定软黏土地基的承载力基本值。许多学者把软黏土的天然含水率与土的压缩指数建立相关关系,推算土的压缩指数。

由此可见,从软黏土的天然含水率可以略知其强度和压缩性的大小,欲要改善地基软黏土的强度和变形特性,那么首先应考虑采用何种地基处理的方法来降低软黏土的含水率。

#### 2. 抗剪强度很低

根据土工试验的结果,我国软黏土的天然不排水抗剪强度一般小于20kPa,其变化范围约在5~25kPa。有效内摩擦角约为 $\varphi' = 20^\circ \sim 35^\circ$ 。固结不排水剪内摩擦角 $\varphi_{cu} = 12^\circ \sim 17^\circ$ 。正常固结的软黏土层的不排水剪切强度往往是随离地表深度的增加而增大,从地表往下每米的增长率约为1~2kPa。在荷载的作用下,如果地基能够排水固结,软黏土的强度将产生显著的变化,土层的固结速率愈快,软黏土的强度增加愈大。加速软黏土层的固结速率是改善软黏土强度特性的一项有效途径。

#### 3. 压缩性较高

一般正常固结的软黏土层的压缩系数为 $a_{1-2} = 0.5 \sim 1.5 \text{MPa}^{-1}$ ,最大可达到 $a_{1-2} = 4.5 \text{MPa}^{-1}$ ;压缩指数为 $C_c = 0.35 \sim 0.75$ ,它与天然含水率的关系为 $C_c = 0.0147\omega - 0.213$ 。天然状态的软黏土层大多数属于正常固结状态,但也有部分是属于超固结状态,近代海岸滩涂沉积为欠固结状态。欠固结状态土在荷重作用下产生较大沉降。超固结状态土,当应力未超过先期固结压力时,地基的沉降很小。因此研究软黏土的变形特性时应注意考虑软黏土的天然固结状态。先期固结压力 $P_c$ 和超固结比OCR是表示土层固结状态的一个重要参数。它不但影响土的变形特性,同时也影响土的强度变化。

#### 4. 渗透性很小

软黏土的渗透系数一般约为  $n \times 10^{-6} \sim n \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , 所以在荷载作用下固结速率很慢。若软黏土层的厚度超过  $10\text{cm}$ , 要使土层达到较大的固结度(如  $U=90\%$ )往往需要  $5 \sim 10$  年之久。所以在软黏土层上的建筑物基础的沉降往往拖延很长时间才能稳定, 同样在荷载作用下地基土的强度增长也是很缓慢的。这对于改善地基土的工程特性是十分不利的。软黏土层的渗透性有明显的各向异性, 水平向的渗透系数往往要比垂直向的渗透系数大, 特别是含有水平夹砂层的软黏土层更为显著, 这是改善软黏土层工程特性的一个有利因素。

#### 5. 具有明显的结构性

软黏土一般为絮状结构, 尤以海相黏土更为明显。这种土一旦受到扰动(振动、搅拌、挤压等), 土的强度显著降低, 甚至呈流动状态。土的结构性常用灵敏度  $S_t$  表示。我国沿海软黏土的灵敏度一般为  $4 \sim 10$ , 属于高灵敏土。因此, 在软黏土层中进行地基处理和基坑开挖, 若不注意避免扰动土的结构, 就会加剧土体的变形, 降低地基土的强度, 影响地基处理的效果。

#### 6. 具有明显的流变性

在荷载的作用下, 软黏土承受剪应力的作用产生缓慢的剪切变形, 并可能导致抗剪强度的衰减, 在主固结沉降完毕之后还可能继续产生可观的次固结沉降。

根据上述软黏土的特点, 以软黏土作为建筑物的地基是十分不利的。由于软黏土的强度很低, 天然地基上浅基础的承载力基本值一般为  $50 \sim 80\text{kPa}$ , 这就不能承受较大的建筑物荷载, 否则就可能出现地基的局部破坏乃至整体滑动, 在开挖较深的基坑时, 就可能出现基坑的隆起和坑壁的失稳现象。由于软黏土的压缩性较高, 建筑物基础的沉降和不均匀沉降是比较大的, 对于一般  $4 \sim 7$  层的砌体承重结构房屋, 最终沉降约为  $0.2 \sim 0.5\text{m}$ , 对于荷载较大的构筑物(储罐、粮仓、水池)基础的沉降一般达  $0.5\text{m}$  以上, 有些甚至达到  $2\text{m}$  以上。如果建筑物各部位荷载差异较大, 体形又比较复杂, 那就要产生较大的不均匀沉降。沉降和不均匀沉降过大将引起建筑物基础标高的降低, 影响建筑物的使用条件, 或者造成倾斜、开裂破坏。由于渗透性很小, 固结速率很慢, 沉降延续的时间很长, 给建筑物内部设备的安装和与外部的连接带来许多困难, 同时, 软黏土的强度增长比较缓慢, 长期处于软弱状态, 影响地基加固的效果。由于软黏土具有比较高的灵敏度, 若在地基施工中采取振动、挤压和搅拌等作用, 就可能引起软黏土结构的破坏, 降低软黏土的强度。因此, 在软黏土地基上建造建筑物, 则要求对软黏土地基进行处理。地基处理的目的是改善地基土的工程性质, 达到满足建筑物对地基稳定和变形的要求, 包括改善地基土的变形特性和渗透性, 提高其抗剪强度和抗液化能力, 消除其他不利的影响。

## 1.3 地基处理的方法分类及适用范围

近年来许多重要的工程和复杂的工业厂房在软弱土地基上兴建, 工程实践的要求推动了软弱土地基处理技术的迅速发展, 地基处理的途径愈来愈多, 考虑问题的思路日益新

颖，老的方法不断改进完善，新的方法不断涌现。根据地基处理方法的原理，基本上分为如表 1-1 所示的几类。

表 1-1 常用地基处理方法的原理、作用及适用范围

| 分类    | 处理方法                                   | 原理及作用                                                                                                                   | 适用范围                                                                                         |
|-------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 换土垫层法 | 机械碾压法                                  | 挖除浅层软弱土或不良土，分层碾压或夯实土，按回填的材料可分为砂垫层、碎石垫层、粉煤灰垫层、干渣垫层、灰土垫层、二灰土垫层和素土垫层等。可提高持力层的承载力，减少沉降量，消除或部分消除土的湿陷性和胀缩性，防止土的冻胀作用以及改善土的抗液化性 | 常用于基坑面积宽大和开挖土方量较大的回填土方工程，一般适用于处理浅层软弱地基、湿陷性黄土地基、膨胀土地基、季节性冻土地基、素填土和杂填土地基                       |
|       | 重锤夯实法                                  |                                                                                                                         | 一般适用于地下水位以上稍湿的黏性土、砂土、湿陷性黄土、杂填土以及分层填土地层                                                       |
|       | 平板振动法                                  |                                                                                                                         | 适用于处理无黏性土或黏粒含量少和透水性好的杂填土地基                                                                   |
|       | 强夯挤淤法                                  | 采用边强夯、边填碎石、边挤淤的方法，在地基中形成碎石墩体，以提高地基承载力和减小沉降                                                                              | 适用于厚度较小的淤泥和淤泥质土地基。应通过现场试验才能确定其适用性                                                            |
| 深层密实法 | 强夯法                                    | 利用强大的夯击能，迫使深层土液化和动力固结而密实                                                                                                | 适用于碎石土、砂土、素填土、杂填土、低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土，对淤泥质土经试验证明施工有效时方可使用                                      |
|       | 挤密法(砂桩挤密法)(振动水冲法)(灰土、二灰或土桩挤密法)(石灰桩挤密法) | 通过挤密或振动使深层土密实，并在振动挤密过程中，回填砂、砾石、灰土、土或石灰等形成砂桩、碎石桩、灰土桩、二灰土桩、土桩或石灰桩，与桩间土一起组成复合地基，从而提高地基承载力，减少沉降量，消除或部分消除土的湿陷性或液化性           | 砂桩挤密法和振动水冲法一般适用于杂填土和松散砂土，对软黏土地基经试验证明加固有效时方可使用灰土桩、二灰土桩、土桩挤密法一般适用于地下水位以上，深度为 5~10m 的湿陷性黄土和人工填土 |
| 排水固结法 | 堆载预压法、真空预压法、降水预压法、电渗排水法                | 通过布置垂直排水井，改善地基的排水条件，及采取加压、抽气、抽水和电渗等措施，以加速地基土的固结和强度增长，提高地基土的稳定性，并使沉降提前完成                                                 | 适用于处理厚度较大的饱和软黏土和冲填土地基，但需要有预压的荷载和时间的条件。对于厚的泥炭层则要慎重对待                                          |