



普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材

地基处理新技术

DIJI CHULI XINJISHU

王俊杰 唐彤芝 彭劼 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

744)2

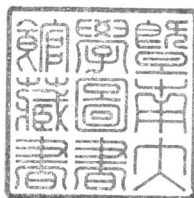
20133



普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材

地基处理新技术

王俊杰 唐彤芝 彭劼 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

地基处理是一门实践性和应用性很强的课程,随着技术和设备的更新和完善,一些地基处理的新方法、新技术、新理念不断被提出。本书在全面总结、介绍现有不同地基处理方法的适用范围、加固原理、设计计算方法、施工工艺及质量检验的基础上,给出了典型工程实例,并尽量引入近年来发展和提出的新方法增强了其实践性和创新性。全书共包括绪论、换填垫层法、强夯法、排水固结法、桩土复合地基法、注浆法、特殊土地基处理、常用监测与检测方法 8 个部分。

本书可作为水利工程、土木工程、交通工程等相关专业高年级本科生和研究生的教材使用,亦可供相关专业的设计及施工人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理新技术 / 王俊杰, 唐彤芝, 彭劼编著. --
北京: 中国水利水电出版社, 2013. 1
普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0643-5

I. ①地… II. ①王… ②唐… ③彭… 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(2013)第026562号

书 名	普通高等教育土木与交通类“十二五”规划教材 地基处理新技术
作 者	王俊杰 唐彤芝 彭劼 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 16.75 印张 397 千字
版 次	2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	32.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国地域辽阔,各地自然、地理、环境、地质等条件差异很大,各类软弱地基和特殊土地基分布广。随着我国经济建设的快速发展和城市化进程的不断加快,高速铁路、公路、港口码头、机场以及高层建筑、大型桥梁等各项重大基础设施的建设日新月异。与此同时,地基处理技术也得到了广泛应用和快速发展,尤其是近十余年来,一些地基处理的新方法、新技术、新理念不断被提出、发展和应用。近几年来,地基处理发展的典型趋势是在已有的方法基础上不断发展新的方法,特别是将多种方法综合,形成复合加固技术。其发展特点主要包括:单一加固技术向复合加固技术发展,复合地基的加固体由单一材料向复合加固体发展,复合地基加固技术与非复合地基加固技术的结合,静力加固与动力加固技术的结合,以及机械加固与非机械加固的结合。

地基处理是为提高地基承载力,改善其变形性质或渗透性质而采取的人工处理地基的方法,其目的是提高地基土的抗剪强度、降低地基的压缩性、改善地基的透水特性、改善地基的动力特性及改善特殊土的不良地基特性。

地基处理的方法多种多样,加固原理和适用范围也不尽相同,因而要根据不同的地质条件选用恰当的地基处理方法。

地基处理是水利工程、土木工程、交通工程等相关专业高年级本科生及研究生的一门专业课,是一门实践性和应用性很强的课程,而且随着技术、设备的更新和完善,许多方法处于不断研究发展中。通过本课程学习,扩大读者的专业技术知识面,了解地基处理的新方法及其发展动态,掌握各类地基处理方法的选用原则、适用范围、加固原理、设计计算方法等,为在实际工程中运用打下基础。

本书在全面总结、介绍现有不同地基处理方法的适用范围、加固原理、设计计算方法、施工工艺及质量检验的基础上,给出了典型工程实例,并对各类方法的最新国内外研究进展进行了总结分析,重视理论联系实际,力求做到既具有科学性、实用性和创新性,又便于读者自学。

本书共分8章,第1、2章由重庆交通大学王俊杰教授编写;第3、5章由南京水利科学研究院唐彤芝高工编写,其中5.7节、5.8节由河海大学丁选明

副教授编写；第4章由河海大学彭劼副教授编写；第6~8章由南京水利科学研究院唐彤芝、龚丽飞、朱方方、程万钊、关云飞、吴月龙、张红编写。全书由王俊杰、唐彤芝和彭劼统稿。

本书由重庆交通大学研究生教育创新基金支持出版。编写过程中引用了很多单位和个人的科研成果，研究生邓文杰、邓弟平、马伟、郝建云、邱珍锋、吴洋、伍应华、尹文、温雨眠、王晓龙、栗维、卢孝志等参与了本书的校对、插图绘制等工作，谨向这些单位和个人致以衷心的感谢！

本书力求在理论上推导严谨、描述清晰，内容上尽可能做到深入浅出、循序渐进，便于读者掌握基本要领及深刻内涵。限于作者水平，书中不足和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2012年9月

- a : 基底压力扩散系数;
 $\bar{a}_i$: 基础底面计算点至第 i 层土底面范围内平均附加应力系数;
 a_w : 水泥掺合比;
 A : 处理面积;
 A_c : 桩体所承担的加固面积;
 A_p : 桩的截面积;
 b : 截面宽度;
 b' : 垫层底面宽度;
 B : 建筑物基础宽度; 复合地基上荷载作用宽度;
 c_c : 复合土体黏聚力;
 c_s : 桩间土的黏聚力;
 c_p : 桩体的黏聚力;
 c_u : 天然地基土的不排水抗剪强度;
CBR: 承载比;
 d : 直径;
 d_e : 一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径;
 d_{15} : 小于某粒径的含量占总重 15% 的粒径;
 d_{85} : 小于某粒径的含量占总重 85% 的粒径;
 D : 基础埋置深度;
 D_e : 旋喷体直径;
 D_p : 当量换算直径;
 D_0 : 注浆管直径;
 e : 土体孔隙比;
 e_0 : 处理前 (初始) 土的孔隙比;
 e_{0i} : 第 i 层中点土自重应力所对应的孔隙比;
 e_1 : 挤密后要求达到的孔隙比;
 e_{1i} : 第 i 层中点土自重应力与附加应力之和所对应的孔隙比;
 $e_{\max}$: 最大孔隙比;
 $e_{\min}$: 最小孔隙比;
 E : 单击夯击能; 电场强度;
 E_p : 桩体压缩模量;
 E_s : 桩间土压缩模量;

$\bar{E}_s$: 变形计算深度范围内压缩模量的当量值;
 E_{si} : 基础底面下第 i 层土的压缩模量值;
 E_{sp} : 复合地基压缩模量;
 E_w : 夯击能最低值;
 f : 桩周土的极限摩擦力;
 f_a : 修正后的地基承载力特征值;
 f_{ak} : 天然地基承载力特征值;
 f_{az} : 软弱下卧层顶面处经深度修正后地基承载力特征值;
 f_{ck} : 桩身混凝土轴心抗压强度标准值;
 f_{cu} : 立方体抗压强度平均值;
 f_k : 地基承载力标准值;
 f_{pk} : 桩体单位截面积承载力的特征值;
 f_{sk} : 处理后桩间土的承载力特征值;
 f_{spk} : 桩间土承载力特征值; 复合地基承载力特征值;
 f_z : 垫层底面处经深度修正后的地基承载力特征值;
 g : 重力加速度;
 h : 注浆段的长度;
 h_i : 第 i 层土层厚度;
 h_s : 垫层厚度;
 H : 地基加固深度 (应从起夯面算起); 强夯加固影响深度;
 H_g : 自室外地面起算的建筑物高度;
 i : 水力坡降;
 I : 电流密度;
 I_e : 电压比降;
 I_0 : 单位电板长度上的电流值;
 k : 有效加固深度修正系数; 渗透系数;
 k_e : 电渗系数;
 k_h : 天然土层水平向渗透系数;
 k_s : 涂抹区土的水平向渗透系数;
 K_p : 被动土压力系数;
 l : 砂井间距; 孔距;
 L : 渗透距离; 竖井深度;
 m : 面积置换率;
 M : 锤重;
 n : 桩土应力比; 孔隙率;
 N : 桩土荷载分担比; 标准贯入击数;
 N_k : 圆锥系数;
 p : 基底压力;

p_b : 作用在下卧层顶面的荷载;
 p_{α} : 自重压力值;
 p_e : 容许注浆压力;
 p_k : 基础底面处的平均压力值;
 p_{pf} : 桩体极限承载力;
 p_s : 桩间土承担的荷载;
 p_{sf} : 天然地基极限承载力;
 p_u : 极限荷载;
 p_z : 附加压力值;
 p_1 : 第一级容许施加的荷载;
 p_2 : 第二级所施加的荷载;
 q : 桩体极限抗压强度;
 q_c : 锥尖阻力;
 q_p : 桩端天然地基土的承载力标准值;
 q_{pk} : 极限端阻力标准值;
 q_s : 桩侧容许摩阻力;
 q_w : 井纵向通水量;
 Q : 注浆量; 喷浆量;
 Q_p : 单桩竖向荷载;
 Q_{uk} : 单桩竖向极限承载力标准值;
 r : 有效加固半径;
 r_c : 砂井影响区半径;
 r_s : 涂抹区半径;
 r_0 : 电极半径;
 R : 桩端土极限承载力; 桩身强度;
 R_a : 单桩竖向承载力特征值;
 S : 复合地基的总沉降量;
 S_p : 桩身压缩量;
 S_u : 黏土不排水抗剪强度;
 S_1 : 加固区的变形量;
 S_2 : 下卧层土层的压缩量;
 S_3 : 垫层的压缩量;
 S'_1 : 按分层总和法计算的复合加固层沉降量;
 T_v : 时间因数;
 u : 工作电压;
 u_{em} : 带电离子在土体孔隙水中的电迁移速率;
 u_p : 桩周边长;
 U : 固结度;

$\bar{U}$: 平均固结度;

v : 孔隙水的渗透速度; 离子迁移率; 提升速度; 浆液流速;

v_e : 电渗速度;

V : 土体体积;

ω_0 : 土的天然含水率;

ω_{op} : 土的最优含水率;

ω_p : 土的塑限含水率;

W : 单方用水量;

z : 基础底面下垫层的厚度; 离子电荷数;

α : 与圆柱顶底面剪应力的分布有关的系数;

β : 与土排水固结条件有关的参数;

β_x : 充盈折减系数;

γ : 土的重度;

γ_1 : 注浆重度;

η : 桩身强度折减系数;

θ : 垫层的压力扩散角;

θ_0 : 复合地基压力扩散角;

λ : 沿程阻力系数;

λ_c : 压实系数;

λ_1 : 桩体极限强度发挥度;

λ_2 : 桩间土极限强度发挥度;

μ : 动力黏滞系数; 泊松比;

ρ : 土的比电阻;

ρ_d : 干密度;

ρ_{dmax} : 最大干密度;

ρ_s : 固态细粒土的密度;

ρ_w : 水的密度;

σ : 总应力;

σ' : 有效应力;

τ_p : 桩体抗剪强度;

τ_s : 桩间土抗剪强度;

φ_c : 复合土体内摩擦角;

φ_s : 桩间土的内摩擦角;

φ_p : 桩的内摩擦角;

ψ_s : 沉降计算经验系数;

ζ : 模量提高系数; 桩周摩阻力的分布系数; 修正系数; 电动电位;

ξ_P : 端阻力修正系数。

前言

符号说明

第1章 绪论	1
1.1 地基处理的定义	1
1.1.1 场地、地基和基础的定义	1
1.1.2 建筑物地基面临的问题	1
1.1.3 地基处理	2
1.2 地基处理的对象及其特征	2
1.2.1 软弱地基	2
1.2.2 特殊土地基	3
1.3 地基处理的目的	5
1.4 地基处理方法的分类、原理及适用范围	5
1.5 地基处理的岩土工程勘察要求	8
1.5.1 地基处理的岩土工程勘察基本要求	8
1.5.2 换填垫层法的岩土工程勘察内容	9
1.5.3 预压法的岩土工程勘察内容	9
1.5.4 强夯法的岩土工程勘察内容	9
1.5.5 桩土复合地基的岩土工程勘察内容	9
1.5.6 注浆法的岩土工程勘察内容	10
1.6 地基处理设计要求	10
1.6.1 地基处理方法设计顺序	10
1.6.2 选择地基处理方案前的工作	10
1.6.3 地基处理方法的确定步骤	10
1.6.4 处理后地基的承载力、变形要求	11
1.7 地基处理工程的施工管理	13
1.8 地基处理工程的质量检验要点	13
1.8.1 换填垫层法的质量检验要点	13
1.8.2 强夯法的质量检验要点	14
1.8.3 预压法的质量检验要点	14
1.8.4 桩土复合地基法的质量检验要点	14
1.8.5 注浆法的质量检验要点	14

思考题 14

第2章 换填垫层法 15

2.1 概述..... 15

2.1.1 换填垫层的作用 15

2.1.2 换填垫层材料 16

2.1.3 换填垫层分类 18

2.2 加固原理..... 18

2.2.1 压实原理..... 18

2.2.2 压实系数..... 21

2.3 垫层设计与计算方法..... 22

2.3.1 垫层厚度的确定 22

2.3.2 垫层宽度的确定 23

2.3.3 垫层承载力的确定 23

2.3.4 沉降计算..... 24

2.4 施工工艺及质量检验..... 25

2.4.1 按密实方法分类 25

2.4.2 按垫层材料分类 27

2.4.3 垫层施工中常见质量问题及预防处理措施..... 31

2.4.4 质量检验..... 31

2.5 工程案例..... 32

2.5.1 工程概况..... 32

2.5.2 工程地质条件 32

2.5.3 设计方案选择 33

2.5.4 施工情况..... 34

2.5.5 效果评价..... 34

2.6 国内外最新研究进展..... 34

2.6.1 EPS 轻质填料 34

2.6.2 加筋法 35

思考题 36

第3章 强夯法 37

3.1 概述 37

3.2 加固机理..... 37

3.2.1 动力密实..... 37

3.2.2 动力固结..... 39

3.2.3 振动波压密 41

3.2.4 动力置换..... 42

3.3 设计计算方法..... 42

3.3.1	强夯法设计要点	42
3.3.2	强夯置换法设计要点	48
3.3.3	降水联合低能级强夯法设计要点	50
3.4	施工工艺与质量检验	51
3.4.1	施工机具和设备	51
3.4.2	施工要点	53
3.4.3	现场观测与质量检验	54
3.5	工程案例	57
3.5.1	强夯法地基处理工程实例	57
3.5.2	强夯置换法地基处理工程实例	59
3.6	国内外最新研究进展	62
3.6.1	高能级强夯法	62
3.6.2	高真空井点降水+强夯法	63
3.6.3	其他降水法+强夯法	65
	思考题	65
第4章	排水固结法	67
4.1	概述	67
4.1.1	预压法加固原理	67
4.1.2	设计计算方法	68
4.1.3	排水系统的施工工艺	71
4.2	堆载预压法	75
4.2.1	加固机理	75
4.2.2	设计计算方法	76
4.2.3	施工工艺	77
4.3	真空预压法	78
4.3.1	加固机理	78
4.3.2	设计计算方法	79
4.3.3	施工工艺	80
4.3.4	最大加固深度	82
4.3.5	对周围环境的影响以及防护措施	82
4.3.6	真空预压法和堆载预压法的比较	83
4.4	真空-堆载联合预压	85
4.4.1	加固机理	85
4.4.2	叠加效果分析	86
4.4.3	施工工艺	86
4.5	电渗法	87
4.5.1	加固机理	87
4.5.2	设计计算方法	88

4.5.3	施工工艺	90
4.5.4	质量检验	91
4.6	固结度和沉降计算	92
4.6.1	固结度的定义	92
4.6.2	堆载预压固结度计算	92
4.6.3	真空预压固结计算	94
4.7	工程案例	94
4.7.1	真空预压法地基处理工程实例	94
4.7.2	真空-堆载联合预压法地基处理工程实例	96
4.7.3	电渗法地基处理工程实例	100
4.8	发展趋势	102
4.8.1	无砂真空预压法	102
4.8.2	双层滤管真空预压法	104
4.8.3	气压劈裂真空预压法	104
	思考题	105
第5章	桩土复合地基法	107
5.1	复合地基概论	107
5.1.1	复合地基的定义和分类	107
5.1.2	复合地基的几个重要概念	108
5.1.3	复合地基的形成条件	111
5.1.4	复合地基的作用机理	111
5.1.5	复合地基与浅基础、桩基础、双层地基的关系与区别	112
5.2	挤密砂石桩复合地基	113
5.2.1	加固原理	114
5.2.2	设计计算方法	115
5.2.3	施工工艺	117
5.2.4	工程实例	120
5.3	水泥搅拌桩复合地基	122
5.3.1	加固原理	122
5.3.2	设计计算方法	123
5.3.3	施工工艺	124
5.3.4	工程实例	126
5.4	CFG桩复合地基	127
5.4.1	加固原理	127
5.4.2	设计计算方法	128
5.4.3	施工工艺	130
5.4.4	工程实例	131
5.5	预制管桩复合地基	133

5.5.1	加固原理	133
5.5.2	设计计算方法	133
5.5.3	施工工艺	134
5.5.4	工程实例	137
5.6	低强度混凝土桩复合地基	138
5.6.1	加固原理	139
5.6.2	设计计算方法	139
5.6.3	施工工艺	141
5.6.4	工程实例	142
5.7	PCC 桩复合地基	143
5.7.1	加固原理	144
5.7.2	设计计算方法	144
5.7.3	施工工艺	146
5.7.4	工程实例	147
5.8	现浇 X 形桩复合地基	148
5.8.1	加固原理	148
5.8.2	设计计算方法	149
5.8.3	施工工艺	151
5.8.4	工程实例	152
5.9	最新研究进展	152
5.9.1	小直径塑料套管混凝土桩	153
5.9.2	双向水泥土搅拌桩、钉形水泥搅拌桩	153
5.9.3	长短桩联合处理复合地基法	155
5.9.4	长板短桩复合地基法	156
5.9.5	透水预制管桩	156
5.9.6	混凝土芯砂石桩	157
5.9.7	排水粉喷桩	158
5.9.8	真空预压联合桩土复合地基处理技术	159
5.9.9	螺杆桩高强度复合地基	160
	思考题	161
第 6 章	注浆法	162
6.1	概述	162
6.2	高压喷射注浆法	162
6.2.1	加固机理	162
6.2.2	高压喷射注浆法分类	163
6.2.3	设计计算方法	163
6.2.4	施工工艺	167
6.2.5	工程实例	170

6.3 单液硅化法	172
6.3.1 加固原理	172
6.3.2 设计计算方法	172
6.3.3 施工工艺	174
6.3.4 质量检验与记录	175
6.3.5 工程实例	176
6.4 碱液法	176
6.4.1 加固原理	177
6.4.2 设计计算方法	177
6.4.3 施工工艺	178
6.4.4 质量检验	178
6.4.5 工程实例	178
6.5 双液注浆法	179
6.5.1 加固原理	179
6.5.2 设计计算方法	180
6.5.3 施工工艺	181
6.5.4 质量检验	183
6.5.5 工程实例	183
思考题	184
第7章 特殊土地基处理	185
7.1 湿陷性黄土地基	185
7.1.1 地基处理措施	185
7.1.2 防水措施	186
7.1.3 结构措施	187
7.1.4 工程实例	187
7.2 膨胀土地基	188
7.2.1 膨胀土的工程危害	188
7.2.2 膨胀土地基处理措施	190
7.2.3 工程实例	191
7.3 盐渍土地基	193
7.3.1 盐渍土的工程危害	193
7.3.2 盐渍土地基处理技术	193
7.3.3 工程实例	195
7.4 冻土地基	196
7.4.1 冻土的工程危害	196
7.4.2 冻土地基处理技术	196
7.4.3 工程实例	199
7.5 岩溶地基处理	200

7.5.1 岩溶的工程危害	200
7.5.2 岩溶地基处理	200
7.5.3 工程实例	202
7.6 吹填土地基	203
7.6.1 吹填淤泥的固结过程	203
7.6.2 吹填淤泥地基处理技术	204
7.6.3 最新进展	211
7.7 污染土地基	213
7.7.1 污染土的工程危害	213
7.7.2 污染土的防治和地基处理技术	214
7.7.3 工程实例	215
思考题	215
第8章 常用监测与检测方法	217
8.1 概述	217
8.1.1 现场监测与质量检验的目的	217
8.1.2 现场监测的主要步骤与内容	217
8.1.3 常用的地基处理现场检测方法	219
8.1.4 室内试验	219
8.2 沉降观测	219
8.2.1 表面沉降观测	219
8.2.2 分层沉降观测	221
8.3 水平位移观测	223
8.3.1 表面水平位移观测	223
8.3.2 深层水平位移观测	223
8.4 地基土应力测试	226
8.4.1 孔隙水压力观测	226
8.4.2 土压力观测	228
8.5 载荷试验	230
8.5.1 概述	230
8.5.2 平板载荷试验	231
8.5.3 复合地基载荷试验	233
8.6 静力触探	235
8.6.1 概述	235
8.6.2 静力触探设备	235
8.6.3 现场检测内容	236
8.6.4 试验成果的应用	237
8.7 十字板剪切试验	237
8.7.1 概述	237

8.7.2 十字板剪切试验设备 238

8.7.3 试验原理 238

8.7.4 试验的技术要求 239

8.7.5 试验成果整理 240

8.8 现场监测与检测新技术 240

8.8.1 光纤传感技术 240

8.8.2 无线传感技术 243

思考题..... 244

参考文献..... 245