



世纪高等教育土木工程系列规划教材

地基处理

第2版

主编 贺建清 雷勇 陈伟

Ground Treatment



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育土木工程系列规划教材

地基处理

第 ② 版

主 编 贺建清 雷 勇 陈 伟
副主编 张学民 李和志 赵永清
参 编 徐望国 段仲沅 刘秀军
江学良 张志军

机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部土木工程专业的课程设置指导意见及《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2014)、《复合地基技术规范》(GB/T 50783—2012)等最新规范编写而成,对目前我国使用的各种地基处理方法的适用范围、加固机理、设计计算、施工工艺及质量检验方法以及符合地基理论等进行了较为全面系统的阐述。主要内容包括:绪论、换填垫层法、预压法、强夯法和强夯置换法、复合地基理论、挤密桩法、浆液固化法、加筋土技术,每种地基处理方法都编写了相应的工程实例。本书重视理论联系实际,叙述简明、文字简练,既能满足普通高等院校的教学要求,又能供从事地基处理工程设计和施工的专业技术人员及科研人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理/贺建清,雷勇,陈伟主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2016.6

21世纪高等教育土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-53863-9

I. ①地… II. ①贺…②雷…③陈… 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(2016)第113562号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静

责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·365千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53863-9

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

本书自2008年出版以来,使用至今已有7年之久。在这7年中,地基处理方法、设计理论、施工工艺及质量检测技术等各方面又有很大发展,相关规范也已做了修正。为了使教材内容反映学科的最新成果,更好地满足教学需要,编写人员认真听取了部分老师和学生对本教材的反馈意见,针对本教材存在的不足,参照最新规范、技术规程以及相关文献资料,对本书进行了重新编写和修订。

修订工作不仅仅限于用新规范代替老规范,而是力图按教材应有的要求修改,更加突出课程的基本要求和人才培养的实用性。与第1版教材比较,本教材主要对以下内容进行了重新编写和修订。

(1) 将第1版教材的第5章和第6章合并为一章,作为本书第6章,并增加了多型桩法这一节新内容。

(2) 新增加复合地基基本理论方面的内容,作为本书第5章,主要介绍了复合地基分类、复合地基作用机理与破坏形式、复合地基承载力、复合地基稳定性分析及复合地基沉降计算等。

(3) 为使教材内容与现行规范尽量保持一致,对第1版教材第7章单液硅化法的部分内容进行了修改和补充。

(4) 为便于读者更好地理解教材内容,增加了部分案例及习题。

全书仍为8章,第1章由湖南科技大学雷勇和贺建清重新编写和修订,第2章由湖南科技大学陈伟和南华大学段仲沅重新编写和修订,第3章由江西科技学院李和志和雷勇重新编写和修订,第4章由贺建清和湖南科技学院赵永清重新编写和修订,第5章由贺建清和深圳冶建院建筑技术有限公司刘秀军编写,第6章由赵永清和南华大学张志军重新编写和修订,第7章由贺建清和湖南科技大学徐望国重新编写和修订,第8章由中南大学张学民和湖南城市学院江学良重新编写和修订,全书由雷勇完成统稿和修改工作。

限于编者水平,书中难免存在不妥之处,敬请同行、专家和各位读者不吝指正。

编 者

第1版前言

本书是根据教育部土木工程专业的课程设置指导意见及《建筑地基处理技术规范》编写而成,是普通高等院校土木工程专业的专业课教材,对目前我国使用的各种地基处理方法的适用范围、加固机理、设计计算、施工工艺及质量检验方法等进行了较为全面系统的阐述。

在本书编写过程中,编写人员认真听取了部分高等院校对近年来本课程的教学及教材的意见,汲取了多年来在教学改革和实践中的经验,并参考了近年来出版的有关教材和文献资料,以国家最新规范、技术规程为主线,注重教材的科学性、实用性和创新性,力图体现学科发展的新水平,反映国内外最新研究成果,在保证编写内容全面、系统的基础上突出重点,重视理论联系实际,并力求做到叙述简明、文字简练,既能满足普通高等院校的教学要求,又能供从事地基处理工程设计和施工的专业技术人员及科研人员自学和参考。

本书采用法定的计量单位,所涉及相关规范均采用目前的最新规范。为便于学习,每章末都引用了工程实例,并附有思考题和习题,书末附有主要参考文献。

全书共8章,第1章由湖南科技大学万文编写,第3、4、6章由湖南科技大学贺建清、徐望国编写,第2章由南华大学段仲沅编写,第5章由南华大学张志军和贺建清编写,第7章由长沙理工大学陈永贵编写,第8章由中南大学张学明和湖南城市学院江学良编写,湖南科技大学曾娟、浙江广厦建筑职业技术学院叶智英参与了部分章节的编写和校稿,全书由贺建清完成统稿和修改工作。

中南大学博士生导师张家生教授、金亮星副教授审阅了本书,提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨表谢意。

由于水平有限,书中难免有不当或疏漏之处,恳请同行、专家和各位读者不吝指正。

编 者

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论 1

1.1 地基处理的定义和目的.....	1
1.1.1 地基处理的定义.....	1
1.1.2 地基处理的目的.....	1
1.2 地基处理的对象及其特性.....	2
1.3 地基处理技术发展概况.....	4
1.4 地基处理方法分类及其使用范围.....	5
1.5 地基处理方法选用原则及设计程序.....	8
1.5.1 地基处理方法的选用原则.....	8
1.5.2 地基处理设计、施工程序.....	9
【思考题与习题】.....	10

第2章 换填垫层法..... 11

2.1 概述.....	11
2.1.1 垫层法.....	11
2.1.2 褥垫法.....	12
2.2 换填垫层设计.....	12
2.2.1 砂(砂石、碎石、粉煤灰、矿渣)垫层设计.....	12
2.2.2 素土和灰土垫层设计.....	15
2.2.3 褥垫层设计.....	16
2.2.4 垫层材料选用.....	17
2.3 垫层碾压施工.....	19
2.3.1 压实机理.....	19
2.3.2 压实方法.....	20
2.3.3 施工要点.....	22
2.4 质量检验.....	23
2.5 换填垫层法处理地基工程实例.....	23
【思考题与习题】.....	24

第3章 预压法	25
3.1 概述	25
3.2 预压法加固机理	26
3.2.1 堆载预压加固机理	26
3.2.2 真空预压加固机理	27
3.2.3 降水预压加固机理	28
3.2.4 电渗预压加固机理	29
3.3 预压法的设计与计算	29
3.3.1 堆载预压法设计计算	29
3.3.2 真空预压法设计计算	48
3.3.3 真空和堆载联合预压法设计计算	49
3.4 预压法施工	50
3.4.1 水平排水垫层的施工	50
3.4.2 竖向排水体施工	50
3.4.3 荷载预压	53
3.5 施工质量监督与检验	56
3.5.1 施工质量监督	56
3.5.2 施工质量检验	58
3.6 工程实例	58
3.6.1 堆载预压法加固软土地基工程实例	58
3.6.2 真空预压法加固软土地基工程实例	60
【思考题与习题】	63
第4章 强夯法和强夯置换法	65
4.1 概述	65
4.2 加固机理	65
4.2.1 动力密实	66
4.2.2 动力固结	66
4.2.3 震动波压密	68
4.2.4 动力置换	68
4.3 设计	69
4.3.1 强夯法设计	69
4.3.2 强夯置换法设计	72
4.4 施工	73
4.4.1 施工机械	73
4.4.2 施工要点	74
4.5 质量检查	75
4.6 工程实例	75
4.6.1 强夯工程实例	75
4.6.2 强夯置换工程实例	78
【思考题与习题】	80

第5章 复合地基理论	81
5.1 概述	81
5.2 复合地基的作用机理与破坏模式	82
5.2.1 复合地基的作用机理	82
5.2.2 复合地基的破坏模式	83
5.3 复合地基承载力	85
5.3.1 复合地基置换率和桩土荷载分担比	85
5.3.2 竖向增强体复合地基承载力特征值的确定	86
5.3.3 水平向增强体复合地基承载力的计算	89
5.4 复合地基稳定性分析	90
5.5 复合地基沉降计算	91
【思考题与习题】	92
第6章 挤密桩法	93
6.1 砂石桩法	93
6.1.1 概述	93
6.1.2 加固机理	94
6.1.3 设计计算	95
6.1.4 施工	99
6.1.5 质量检验	104
6.1.6 砂石桩加固地基工程实例	105
6.2 石灰桩法	108
6.2.1 概述	108
6.2.2 加固机理	109
6.2.3 设计计算	111
6.2.4 施工	112
6.2.5 质量检验	113
6.3 土挤密桩法和灰土挤密桩法	113
6.3.1 概述	113
6.3.2 加固机理	114
6.3.3 设计计算	115
6.3.4 施工	117
6.3.5 质量检验	119
6.4 夯实水泥土桩法	119
6.4.1 概述	119
6.4.2 加固机理	120
6.4.3 设计计算	120
6.4.4 施工	122
6.4.5 质量检验	123
6.4.6 夯实水泥土桩法处理地基工程实例	123
6.5 水泥粉煤灰碎石桩法	126
6.5.1 概述	126

6.5.2	加固机理	127
6.5.3	设计计算	129
6.5.4	施工	132
6.5.5	质量检验	133
6.5.6	水泥粉煤灰碎石桩法加固地基工程实例	133
6.6	柱锤冲扩桩法	136
6.6.1	概述	136
6.6.2	加固机理	136
6.6.3	设计计算	137
6.6.4	施工	139
6.6.5	质量检验	141
6.6.6	柱锤冲扩桩法加固地基工程实例	141
6.7	多型桩法	145
6.7.1	概述	145
6.7.2	加固机理	145
6.7.3	设计计算	146
6.7.4	施工	149
6.7.5	质量检验	149
6.7.6	多型桩法加固地基工程实例	149
	【思考题与习题】	153

第7章 浆液固化法 155

7.1	灌浆法	155
7.1.1	概述	155
7.1.2	加固机理	156
7.1.3	灌浆材料及选用原则	160
7.1.4	灌浆设计	161
7.1.5	施工方法	170
7.1.6	灌浆质量检验	174
7.2	水泥土搅拌法	175
7.2.1	概述	175
7.2.2	加固机理	177
7.2.3	水泥土的物理力学特性	178
7.2.4	设计计算	181
7.2.5	施工方法	187
7.2.6	质量检验	189
7.2.7	工程实例	190
7.3	高压喷射注浆法	193
7.3.1	概述	193
7.3.2	加固机理	198
7.3.3	设计计算	203
7.3.4	施工	207
7.3.5	质量检验	210

7.3.6 高压喷射注浆法加固地基工程实例	211
【思考题与习题】	212
第8章 加筋土技术	214
8.1 概述	214
8.2 土工合成材料分类与性能指标	214
8.2.1 土工合成材料分类	214
8.2.2 土工合成材料的性能指标	216
8.2.3 土工合成材料的允许抗拉强度	216
8.3 土工合成材料主要功能	217
8.3.1 加筋功能	217
8.3.2 过滤和排水功能	217
8.3.3 隔离功能	218
8.3.4 防渗功能	219
8.3.5 防护功能	219
8.4 加筋土的加固机理	219
8.4.1 加筋土的摩擦原理解释	220
8.4.2 加筋土准黏聚力原理解释	220
8.5 加筋地基设计	222
8.5.1 加筋地基简述	222
8.5.2 加筋地基设计原则	223
8.5.3 条形浅基础加筋土地基	223
8.5.4 土堤的加筋土地基	226
8.6 加筋地基施工要点	228
8.7 加筋复合垫层处理地基工程实例	229
【思考题与习题】	232
参考文献	233

绪 论 第1章

1.1 地基处理的定义和目的

1.1.1 地基处理的定义

地基处理 (Ground Treatment/Improvement) 是指为提高地基承载力, 改变其变形性质或渗透性质而采取的人工处理地基的方法。欧美国家称之为地基处理, 也称之为地基加固。我国较多地区分布着不良地基土 (岩), 且种类较多, 主要有软土、冲填土、湿陷性黄土、膨胀土、盐渍土、冻土、岩溶及土洞等, 当作为建 (构) 筑物地基时, 经常产生承载力不足、沉降过大、渗透破坏、地基液化等工程问题, 难以保证建 (构) 筑物安全和正常使用。为此, 可以采用人工手段进行处理, 改善不良地基土 (岩) 的工程性质, 以满足工程建设需要。

1.1.2 地基处理的目的

地基 (Foundation) 是指支承基础的土体或岩体。建 (构) 筑物地基一般存在以下四个方面的问题:

(1) 强度和稳定性问题 当地基的抗剪强度不足以支承上部结构的自重及外荷载时, 地基就会产生局部或整体剪切破坏。

(2) 沉降变形问题 当地基在上部结构的自重及外荷载作用下产生过大的变形时, 会影响结构物的正常使用; 超过建筑物所能允许的不均匀沉降时, 结构可能开裂破坏。

(3) 渗透性问题 地基的渗漏量或水力坡降超过允许值时, 会发生水量损失, 或因潜蚀和管涌导致建 (构) 筑物失事。

(4) 液化问题 在如机器振动荷载、交通荷载、爆破冲击荷载、海浪作用等动力荷载作用下, 引起饱和松散粉细砂或部分粉土产生液化, 使土体失去抗剪强度, 出现近似液体特性的现象, 从而导致地基失稳和震陷。

当建 (构) 筑物的地基存在上述问题时, 必须进行地基处理, 以保证建 (构) 筑物的安全与正常使用。地基处理的目的是采用各种地基处理方法对地基土进行加固, 用以改良地基土的工程特性, 以达到如下目的:

(1) 提高地基的抗剪强度, 增加其稳定性 地基的剪切破坏表现在: 建 (构) 筑物的地基承载力不够; 偏心荷载及侧向土压力的作用使建 (构) 筑物失稳; 由于地面堆载或建 (构) 筑物荷载使邻近地基产生隆起; 土方开挖时边坡失稳; 基坑开挖时坑底隆起。地基的

剪切破坏反映了地基抗剪强度的不足,因此,为了防止剪切破坏,就需要采取措施增加地基土的抗剪强度。

(2) 降低地基土的压缩性,减少地基的沉降变形 地基土的压缩性表现在:建(构)筑物的沉降和差异沉降较大;地面堆载或建(构)筑荷载使邻近地基产生固结沉降;基坑开挖引起邻近地基沉降;由于降水,地基产生固结沉降。地基的压缩性反映在地基土的压缩模量指标的大小,因此,需要采取措施提高地基土的压缩模量,从而减少地基的沉降和不均匀沉降。

(3) 改善地基土的渗透特性,减少地基渗漏或加强其渗透稳定 地基土的渗透性表现在:堤坝等基础产生的地基渗漏;土工建(构)筑物及地基由于渗流作用而出现土层剥落、地面隆起、管涌、流砂等渗透破坏或渗透变形现象。以上都是在地下水的运动过程中所发生的问题。因此,必须采取措施改变渗透破坏或渗透变形产生所需的几何条件和水力条件。

(4) 改善地基土的动力特性,提高地基的抗震性能 地基土的动力特性表现在:地震时饱和松散粉细砂或部分粉土将产生液化;交通荷载反复作用使路基产生工后沉降;机器振动或打桩等原因引起邻近地基振动下沉。因此,需要采取措施防止地基液化并改善其不良特性,以提高地基的抗震性能。

(5) 改善特殊土地基的不良特性,满足工程设计要求 主要是指消除特殊土地基的不良特性,如黄土的遇水湿陷、膨胀土的湿胀干缩、盐渍土的浸水溶陷、冻土的冻胀及融陷、土岩组合地基的差异沉降、岩溶及土洞地基的塌陷等。

1.2 地基处理的对象及其特性

地基处理的对象是具有不良工程特性的岩土地基,主要包括软弱地基和特殊土地基。

1. 软弱地基

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^①规定,软弱地基指主要由淤泥(Muck)、淤泥质土(Mucky Soil)、素填土(Plain Fill)、冲填土(Hydraulic Fill)、杂填土(Miscellaneous Fill)或其他高压缩性土层构成的地基。

(1) 软土 软土是指天然孔隙比大于或等于1.0,且天然含水量大于液限的细粒土,包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等。它是在静水或缓慢流水环境中沉积,经生物化学作用形成的。

软土的特点是:天然含水量高,一般为49%~90%,有的可达200%;孔隙比大,在1.0~2.0之间变化,个别可达5.8;抗剪强度低,不排水抗剪强度为5~25kPa;压缩系数高,压缩系数通常在 $0.5 \sim 2.0 \text{ MPa}^{-1}$ 间变化,最大可达 4.5 MPa^{-1} ;渗透性差,其渗透系数一般小于 10^{-5} mm/s ;软土地基承载力低,在荷载作用下,地基沉降变形大,不均匀沉降也大,而且由于软土具有流变性,除了主固结变形外,还存在着次固结变形,土体长期处于变形中,沉降稳定历时较长,遇到比较深厚的软土层,建筑物基础的沉降稳定往往需要数年乃至数十年才能完成。

软土地基是在工程建设中遇到最多需要处理的软弱地基,它们广泛分布在我国沿海、内

^① 后文如未特别说明,均指本现行规范。

地河流两岸及湖泊地区。

(2) 素填土 素填土是由碎石、砂、黏性土等一种或几种组成未经压实的填土,其中不含杂质或含杂质较少。若经分层压实后则称为压实地基。近年来开山填沟筑地、围海筑地工程较多,填土常用开山石料,大小不一,有的直径达数米,填筑厚度有的达数十米,极为不均。城市基坑建设中因土方开挖而闲置的素填土,由于未经压实,极为松散。未经压实的素填土地基性质取决于填土性质、压实程度及堆填时间。素填土的工程性能较差,不宜直接作为路基及建(构)筑物持力层。

(3) 冲填土 冲填土是指整治和疏浚江河航道时,用挖泥船或泥浆泵将泥砂夹带大量水分吹到江河两岸而形成的沉积土,南方地区称吹填土。冲填土的成分和分布规律与冲填时的泥砂来源及水利条件有关。若充填物以黏性土为主,吹到两岸的土中含有大量水分,且难于排出,故它在形成初期常处于流动状态,这类土属于强度较低和压缩性较高的次固结土;若冲填物是砂或其他粗颗粒土,因其性质与粉细砂类似而不属于软弱土范畴。

(4) 杂填土 杂填土是指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,成分复杂,分布极不均匀,结构疏松。其主要特点是:强度低、压缩性高、均匀性差。某些杂填土内因含有腐殖质、亲水及水溶性物质,一般还具有浸水湿陷性。

2. 特殊土地基

特殊土(Special Soil)地基由于形成年代、形成环境和形成条件等不同。其区域性强,个体之间差异性大,与一般土的工程性质有显著区别。特殊土地基主要包括湿陷性黄土地基、膨胀土地基、盐渍土地基、冻土地基、山区地基等。

(1) 湿陷性黄土地基 湿陷性黄土(Collapsible Loess)是指在覆盖土层的自重应力或自重应力和附加应力作用下,遇水浸湿后土的结构迅速破坏,并发生显著附加下沉,其强度也迅速降低的黄土。因黄土湿陷而引起的建筑物不均匀沉降是造成黄土地区工程事故的主要原因。黄土在我国特别发育,地层多、厚度大,广泛分布在甘肃、陕西、山西大部分地区,以及河南、河北、山东、宁夏、辽宁、新疆等部分地区。当黄土作为建(构)筑物地基时,首先要判断它是否具有湿陷性,然后才考虑是否需要进行地基处理以及如何处理。

(2) 膨胀土地基 膨胀土(Expansive Soil)是指黏粒成分主要由亲水性矿物组成的黏性土,在环境温度和湿度变化时会产生强烈的胀缩变形。利用膨胀土作为建(构)筑物地基时,如果没有采取必要的措施进行地基处理,膨胀土饱水膨胀,失水收缩,常会给建(构)筑物造成危害。膨胀土在我国分布范围很广,广西、云南、湖北、河南、安徽、四川、河北、山东、山西、江苏、内蒙古、贵州和广东等地均有不同程度的分布。

(3) 盐渍土地基 盐渍土(Saline Soil)是指土中含盐量超过一定数量的土。盐渍土地基浸水后,因土中盐溶解可能产生地基溶陷。某些盐渍土如含硫酸钠的土,在环境温度和湿度变化时可能产生体积膨胀。盐渍土中的盐还会导致建(构)筑物基础材料的腐蚀和破坏。我国盐渍土主要分布在西北干旱地区地势低洼的盆地和平原中,在滨海地区也有分布。

(4) 冻土地基 季节性冻土(Seasonally Frozen Soil)是指冬季冻结而夏季融化的土层。如果基底下有季节性冻土层,将会产生难以预估的冻胀和融陷变形,影响建筑物的正常使用,甚至导致破坏。我国东北、华北和西北地区的季节性冻土,深度均在50cm以上,黑龙江北部及青海地区的冻深较大,最深可达3m。

(5) 山区地基 山区地基覆盖层厚薄不均,下卧基岩面起伏较大。土岩组合地基在山区较为普遍,作为道路及建(构)筑物地基极易引起不均匀沉降导致路面及建筑物倾斜、开裂。当地基下卧层岩层为可溶性岩层时,易出现岩溶发育。岩溶在岩层中形成沟槽、裂隙、石牙和空洞,在修建道路和建(构)筑物时易引发空洞顶板塌落使地表产生陷穴、洼地等现象。土洞是岩溶作用的产物,土洞无限制的发展扩大,会引起地表塌陷,导致较大的工程灾害。

1.3 地基处理技术发展概况

地基处理是一门既古老又年轻的学科,早在 3000 年前我们的祖先就采用竹子、木头、麦秸来加固地基,在 2000 多年前就开始采用向软土中夯入碎石等材料来挤密软土。此外,利用夯实的灰土和三合土等作为建筑物垫层,在我国建筑中就更为广泛。

地基处理技术真正得到迅猛发展是在近 60 年,特别是近 30 年间。在 20 世纪 60 年代中期,从如何提高土的抗拉强度这一思路中,发展了土的“加筋法”;从有利于提高土的排水固结效果这一基本观点出发,发展了土工聚合物、砂井预压和塑料排水带;从如何更好地对地基进行深层密实考虑,采用了加大击实功的“强夯法”和“振动水冲法”。地基处理技术最新进展反映在地基处理机械、材料、地基处理设计计算理论、施工工艺、现场监测技术以及地基处理新方法的不断发展和多种地基处理方法的综合应用等方面。

(1) 地基处理机械 近年来地基处理机械品种增加,性能提高,逐步向系列化、标准化发展。例如深层搅拌机,除以前生产的单轴深层搅拌机和固定双轴搅拌机、浆液喷射和粉体喷射深层搅拌机外,还研制成功了四轴深层搅拌机、多头深层搅拌机、能同时喷射浆液和粉体的深层搅拌机。无论是搅拌深度还是成桩直径均在不断扩大,海上深层搅拌机也已投入使用。高压喷射注浆机械喷射压力的提高,增加了对地层的冲切搅拌能力;水平旋喷机械的成功应用,使高压注浆法的应用范围进一步扩大,继单管法、双管法、三管法及多管法后又研制出了新双管法。应用于排水固结法的塑料排水带插带机的出现大大提高了工作效率。塑料排水带插带深度已超过 30m,且排水带施工长度自动记录仪的配置使插带质量得到了控制。干法振动成孔器研制成功,使干法振动碎石桩技术得到应用。地基处理机械的迅速发展,使地基处理能力得到较大提高。

(2) 地基处理材料 地基处理材料的发展也促进了地基处理水平的提高。新材料的应用,不仅使一些原有的地基处理方法效能提高,而且产生了一些新的地基处理方法。土工合成加筋材料的发展促进了加筋土法的发展。轻质土工合成材料 EPS 作为填土材料形成 EPS 超轻质填土法,三维植被网的生产使土坡加固和绿化有机结合起来。塑料排水带的应用提高了排水固结法的施工质量和工效,且便于施工管理。灌浆材料如超细水泥、粉煤灰水泥浆材、硅粉水泥浆材料等水泥系浆材和化学浆材的发展有效地扩大了浆材法的应用范围,满足了工程需要。近年来,地基处理还同工业废料的利用结合起来,粉煤灰垫层、石灰粉煤灰桩复合地基、钢渣桩复合地基、渣土桩复合地基等的应用取得了较好的社会效益和经济效益。

(3) 地基处理计算理论 地基处理的工程实践促进了地基处理计算理论的发展。因为复合地基在地基处理工程中的应用,导致了复合地基承载力和沉降计算理论的产生。除复合地基理论外,在强夯法加固地基机理、强夯加固深度、砂井法非理想井计算理论、真空预压

法计算理论等的研究上取得了不少新的研究成果。同时,地基处理理论的发展又反过来进一步推动地基处理技术的发展。

(4) 施工工艺 各种地基处理方法的施工工艺得到不断的改进和完善,不仅有效地保证和提高了施工质量,提高了工效,而且扩大了应用范围。真空预压法施工工艺的改进使该技术应用得到推广,高压喷射注浆工艺的改进使其应用范围扩大,石灰桩施工工艺的改进使石灰桩法走向成熟,长螺旋钻孔工艺使 CFG 桩复合地基法在全国得到大面积推广,经济效益和社会效益显著。

(5) 现场监测 地基处理工程质量监测受到重视,在地基处理施工过程中和施工后进行监测,用以指导施工、检查处理效果、检验设计参数。监测手段越来越先进,监测精度越来越高。信息化施工技术的逐步实施,有效地保证了施工质量,取得了较好的经济效益。

(6) 地基处理新方法 近年来,在工程实践中还涌现了许多新的地基处理方法,如水泥土搅拌桩桩体中插入 H 型钢或钢筋笼等加筋材料形成刚性桩;碎石桩中加入适量的水泥或粉煤灰等黏结材料形成柔性的 CFG 桩;以强夯法为基础,演化出“孔内深层强夯法”“孔内深层强夯渣土(或混凝土)桩”等。同时,地基处理技术的发展还表现在多种地基处理方法互相嫁接、移植,互相交叉渗透,从而又形成了许多新技术、新工艺。如真空预压法和堆载预压的综合应用克服了真空预压荷载不足 80kPa 的缺点,扩大了其应用范围;高压喷射注浆法与灌浆法相结合提高了灌浆法的加固效果。

目前地基处理已成为岩土工程领域的一个主要分支学科,国际土力学与岩土工程协会下设有专门的地基处理学术委员会。中国土力学与岩土工程学会于 1984 年成立了地基处理学术委员会,迄今先后召开了共十三届全国地基处理学术讨论会,并组织编著了《地基处理手册》(1988)、《地基处理手册》(第 2 版)(2000)、《地基处理手册》(第 3 版)(2008);同时出版了《地基处理》杂志,提供了交流和推广地基处理新技术的园地。我国岩土工程领域学科带头人龚晓南院士 2014 年编的《地基处理技术与发展展望》系统地总结介绍了在我国近 30 年工程建设中应用的各种地基处理技术,全面反映了地基处理技术在我国的发展情况。建设部先后组织编写了《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—1991)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2002)、《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012);交通部颁布了《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ 017—1996)、《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》(JTG/T D31—02—2013)。由此可见,地基处理技术的发展和应用在国内外方兴未艾。

1.4 地基处理方法分类及其使用范围

地基处理的分类方法多种多样,按时间可分为临时处理和永久处理;按处理深度分为浅层处理和深层处理;按处理土性对象分为砂性土处理和黏性土处理,饱和土处理和非饱和土处理;也可按地基处理的加固机理进行分类。因现有的地基处理方法很多,新的地基处理方法还在不断发展,要对各种地基处理方法进行精确分类较为困难。常见的分类方法主要是按照地基处理的加固机理进行分类,见表 1-1,它体现了各种地基处理方法的特点。

表 1-1 地基处理方法分类及其适用范围

类别	方 法	简 要 原 理	适 用 范 围
置换	换土垫层法	将基底下一定深度范围内的软弱土层挖去,换填上强度较大的低压缩性的坚硬、较粗粒径的材料。垫层能有效扩散基底压力,减少沉降	浅层软弱地基及不均匀地基的处理
	挤淤置换法	通过抛石或夯击回填碎石置换淤泥达到加固地基的目的,也有采用爆破挤淤置换	厚度较小的淤泥地基
	褥垫法	在基底一定范围内,将局部压缩性较低的岩石凿去,换填上压缩性较大的材料,然后分层夯实形成的持力层作为基础的部分持力层,使基础整个持力层的变形相互协调,以减少不均匀沉降	山区不均匀岩土地基
	砂石桩置换法	利用振冲法、沉管法等其他方法在饱和黏土地基中成孔,并将碎石、砂或砂石填入已成的孔中,形成砂石桩,砂石桩置换部分土体,形成复合地基,以提高地基承载力,减少沉降	松散砂土、粉土、黏性土、素填土、杂填土等地基以及变形控制要求不严的饱和黏土地基
	石灰桩法	通过机械或人工成孔,在软弱地基中填入生石灰块或生石灰块加其他掺合料,通过石灰的吸水膨胀、放热及离子交换作用改善桩间土的物理力学性质,并形成石灰桩复合地基,提高地基承载力,减少沉降	饱和黏性土、淤泥、淤泥质土、素填土和杂填土地基
	气泡混合轻质料填料法	气泡混合轻质料的重度为 $5 \sim 12 \text{ kN/m}^3$, 具有较好的强度和压缩性能,用作填料可有效减少地基上的荷载,也可减少作用在挡土结构上的侧压力	软弱地基上的填方工程
	强夯置换法	采用边填碎石边强夯的方法在地基中形成碎石墩体,由碎石墩、墩间土及碎石垫层形成复合地基,以提高承载力,减小沉降	粉砂土和软黏土地基等
	EPS 超轻质料填土法	发泡聚苯乙烯(EPS)重度只有土的 $1/100 \sim 1/50$, 并具有较好的强度和压缩性能,用作填料可有效减少地基上的荷载,也可减少作用在挡土结构上的侧压力,需要时也可置换部分地基土,以达到更好效果	软弱地基上的填方工程
排水 固结	堆载预压	在地基中设置排水通道——砂垫层和普通砂井、袋装砂井、塑料排水带等竖向排水体,然后利用建筑物本身重量分级加载,或建筑物建造前,在场地先行加载预压,使土体中的孔隙水缓慢排出,土层逐渐固结,地基发生沉降,同时地基强度逐步提高	淤泥质、淤泥和冲填土等饱和黏性土地基
	真空预压法	在饱和软土地基中打设竖向排水体,在地面铺设排水用砂垫层和抽气管线,然后在砂垫层上铺设不透气的封闭膜使其与大气隔绝,再用真空泵抽气,使排水系统维持较高的真空度,利用大气压力作为预压荷载,增加地基中的有效应力,以利于土体排水固结,达到提高地基承载力,减少工后沉降的目的	很软弱的黏土地基
	真空联合堆载预压	当真空预压达不到设计要求时,在真空预压的同时,再施加一定的堆载,以达到提高地基承载力,减少工后沉降的目的	同上
	电渗预压法	在土中插入金属电极并通以直流电,由于直流电场作用,土中的水分从阳极流向阴极,将水再从阴极排除且无补充水源的情况下,引起土层的压缩固结	饱和粉土或粉质黏土地基
	降水预压法	借助于井点抽水降低地下水位,以增加土的有效自重应力,使地基土产生固结,达到加固目的	地下水位较高的砂或砂质土,或在软土中存在砂或砂质土的情况

(续)

类别	方 法	简要原理	适用范围
振挤 密实	表层原位 压实法	采用人工或机械夯实、碾压或振动,使土体密实。密实范围较浅,常用于分层填筑	杂填土、疏松无黏性土、非饱和黏性土、湿陷性黄土等地基浅层处理
	强夯法	采用质量为10~60t的夯锤从高处自由落下,地基土体在强夯的冲击力和振动力作用下密实,可提高承载力,减小沉降	碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土、杂填土和素填土等地基
	挤密砂石桩法	采用振动沉管法等在地基中设置碎石桩,在制桩过程中对周围土体产生挤密作用。被挤密的桩间土和密实的碎石桩形成碎石桩复合地基,达到提高地基承载力,减小沉降的目的	砂土地基、非饱和黏性土地基
	振冲密实法	一方面依靠振冲器的振动使饱和砂层液化,砂颗粒重新排列,孔隙减少,另一方面依靠振冲器的水平振动力,加回填料使砂层挤密,从而达到提高地基承载力,减少沉降,并提高地基土体抗液化的能力	黏粒含量小于10%的松散砂性土地基
	爆破挤密法	利用在爆破中产生的挤压和振动使地基土密实,以提高地基土体的抗剪强度,达到提高地基承载力,减少沉降的目的	饱和净砂、非饱和但经灌水饱和的砂、粉土、湿陷性黄土地基
振挤 密实	土(灰土) 桩法	利用横向挤压设备成孔,使桩间土得以挤密,用素土或灰土填入桩孔内分层夯实形成土桩或灰土桩,由挤密的桩间土和密实的土桩或灰土桩形成复合地基	地下水位以上的湿陷性黄土、杂填土、素填土等地基
	夯实水泥土 桩法	在地基中人工挖孔,然后填入水泥与土的混合物,分层夯实,形成水泥土桩复合地基,提高地基承载力和减小沉降	
	柱锤冲扩桩法	在地基中采用直径300~500mm,长2~5m、质量1~8t的柱状锤,将地基土层冲击成孔,然后将拌和好的填料分层填入桩孔夯实,形成柱锤冲扩桩复合地基,以提高地基承载力和较小沉降	
浆液 固化	渗透灌浆法	在灌浆压力作用下使浆液充填土中孔隙和裂缝,排挤出孔隙中的自由水和气体,改善土体的物理力学性质	中砂以上的砂性土和有裂隙的岩石
	劈裂灌浆法	在灌浆压力作用下,浆液克服地层的初始应力和抗拉强度,引起岩石和土体结构的破坏和扰动,使其垂直于小主应力的平面上发生劈裂,使地层中原有的裂隙和孔隙张开,或形成新的裂隙和孔隙,并用浆液填充,改善土体的物理力学性质。浆液的可灌性和扩散距离增大,所用灌浆压力较高	岩基或砂、砂砾石、黏性土地基
	挤密灌浆法	在灌浆压力作用下,向土中压入浆液,在地基中形成浆泡,挤压周围土体。通过压密和置换改善地基性能。在灌浆过程中因浆液的挤压作用可产生辐射状上抬力,引起地面隆起	中砂地基,排水条件较好的黏性土地基
	电化学 灌浆法	在黏性土中插入金属电极并通以直流电后,在土中引起电渗。在电渗作用下,孔隙水由阳极流向阴极,促使通电区域中土的含水量降低,并形成渗浆通道,化学浆液也随之流入土的孔隙中,并在土中硬结	黏性土地基