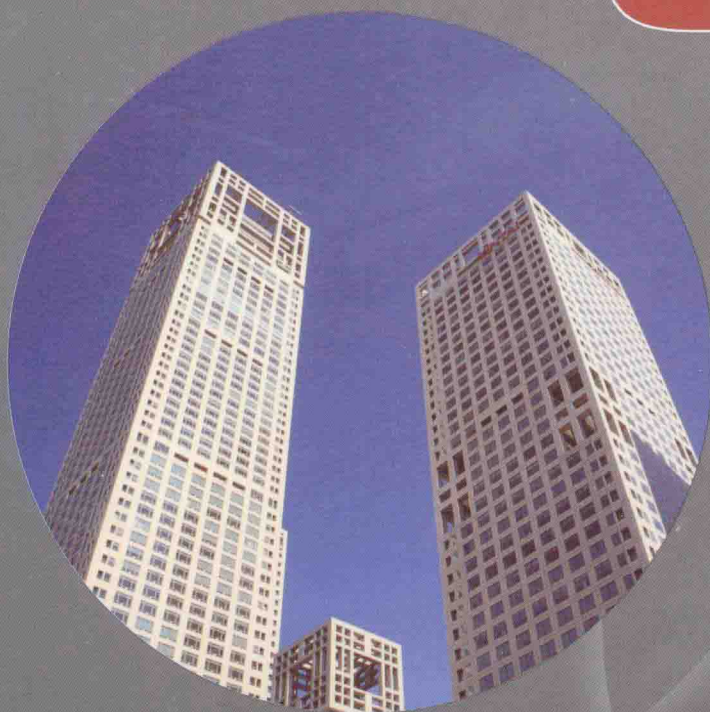




21世纪技术与工程著作系列·土木工程

新编地基处理技术与工程实践

张季超 陈一平 蓝维 王可怡 许勇 著



科学出版社

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



新编地基处理技术与工程实践

张季超 陈一平 蓝 维 王可怡 许 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍常用地基处理方法的加固原理、适用范围和设计方法,相应地基处理方法的施工工艺和质量检验方法,既有建(构)筑物地基加固技术,国内外地基处理新技术的发展概况,并详细介绍了21个重大工程实例及算例。

本书内容包括绪论,排水固结法,强夯地基加固理论与实践,强夯加固机理,强夯加固地基的设计与施工,强夯加固后的地基变形计算,强夯加固前后饱和软土微结构研究,动静固结法处理工程实例,土工合成材料加筋土理论与实践,振冲法,挤密桩法,砂石桩、石灰桩、柱锤冲扩桩、水泥粉煤灰碎石桩,水泥土搅拌法,高压喷射注浆法,化学加固法,既有建(构)筑物地基加固理论与实践。

本书可供从事土木工程领域研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新编地基处理技术与工程实践/张季超等著. —北京:科学出版社,2014
(21世纪技术与工程著作系列·土木工程)
ISBN 978-7-03-039782-9

I. ①新… II. ①张… III. ①地基处理-研究 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 028703 号

责任编辑:童安齐 闫洪霞/责任校对:王万红
责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:29 1/4

字数:680 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8305(HF02)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303



前 言

我国地域辽阔、幅员广大，从沿海到内陆、从山区到平原，自然地理环境不同、土质各异、地基条件区域性较强，从而使地基处理技术显得较为复杂。例如，随着我国国民经济的快速发展，许多土木工程建筑物不仅要在地质条件良好的场地上建设，而且还要在地质条件不良的地基上修建；随着科学技术的日新月异，建筑物上部结构的荷载日益增大，对变形要求也越来越严，因而原来一般可被评价为良好的地基，也可能在特定条件下需要进行地基处理；随着我国城市化进程的加快，新建的土木工程越来越多，而且不少工程如大规模的填海造地、移山造地等工程均拟在不良地基上开发，这就必须对地基进行处理，以满足建筑物上部结构正常使用阶段和施工阶段的承载力要求。

本书根据作者长期从事的科学研究与工程实践，结合数项已获得的科学技术奖（2013 年的河南省建设科学技术进步一等奖“地基处理新技术与工程实践”，2009 年的广东省科学技术特等奖“广东科学中心建设与管理创新实践”，2006 年的广东省科学技术二等奖“广东科学中心饱和软土地基预处理技术研究与应用”，2007 年的广州市科学技术二等奖“广州大学城软弱地基处理新技术的研究与应用”，1996 年的河南省科学技术进步三等奖“超高层建筑桩基静载试验及机理分析”等），并按照国家最新技术规范和规程，深入浅出地对地基处理新技术进行了全面阐述，对作者主持和参与的 20 多项工程应用实例进行了详细介绍与分析。

本书由张季超、陈一平、蓝维、王可怡、许勇撰写。广州大学土木工程专业研究生徐新星、马旭、李冠泽、霍灵召、奚贤慧、陈兆荣、张焱君及陈晓旭等参加了本书相关资料的整理工作。

由于作者水平所限，书中不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

作 者

2013 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 地基处理方法的分类	7
1.3 复合地基的概念与分类	11
1.4 地基处理方法的选择及步骤	15
1.5 地基处理设计与施工时应注意的关键问题	16
1.6 地基处理的监测与质量检测	17
第二章 排水固结法	28
2.1 概述	28
2.2 排水系统	29
2.3 排水固结法的原理	30
2.4 排水固结法的计算理论	32
2.5 堆载预压法设计计算	35
2.6 其他方法简介	40
2.7 施工方法	44
2.8 质量检验	49
2.9 工程实录	51
第三章 强夯地基加固理论与实践	62
3.1 强夯法的产生及发展	62
3.2 强夯法的特性	63
3.3 国内外强夯法的研究与使用情况	63
第四章 强夯加固机理	68
4.1 夯击能传递机理	68
4.2 强夯法的加固机理	69
4.3 动力排水固结法加固机理	72
4.4 强夯室内实验与现场试验	78
4.5 强夯法加固地基的工程应用	80
第五章 强夯加固地基的设计与施工	83
5.1 强夯设计	83

5.2 强夯施工	87
5.3 动力排水固结新工艺	93
第六章 强夯加固后的地基变形计算	95
6.1 强夯施工中地面的变形特点	95
6.2 非饱和土强夯后场地平均沉降量计算	96
6.3 经验公式法确定非饱和土夯后平均沉降	98
6.4 饱和软土强夯中场地平均夯沉量计算	99
第七章 强夯加固前后饱和软土微结构研究	103
7.1 土体微结构分析技术	103
7.2 强夯处理前后饱和软土微结构形态变化规律	111
7.3 软土工程性质指标与微结构参数的相关性分析	131
第八章 动静固结法处理工程实例	141
8.1 广东科学中心饱和软土地基预处理技术研究与应用	144
8.2 焦作市热电厂工程及检测实录	183
8.3 解放军洛阳外国语学院主教学楼强夯技术处理及检测实录	201
8.4 首阳山电厂二期扩建工程徐家沟灰场强夯技术处理及试夯区检测 报告实录	227
8.5 广州南沙区外国语学校软基处理设计及检测报告实录 (真空预压)	241
8.6 广州市工商行政管理局南沙分局动力 (强夯) 排水固结处理技术及 检测实录	259
8.7 惠州市大亚湾石化工业区 I1 地块软弱地基处理工程一期工程检测 实录	279
8.8 保利金沙洲西海岸 04 地块项目地基强夯工程技术处理及检测报告 实录	297
第九章 土工合成材料加筋土理论与实践	302
9.1 概述	302
9.2 土工织物抗拔性能试验研究	309
9.3 土-土工织物界面摩擦特性试验研究	313
9.4 土工织物拉伸性能试验研究	317
9.5 土工织物加筋土三轴试验研究	320
9.6 加筋粉土的剪切强度试验研究	323
9.7 多层土工织物加筋土地基承载力计算方法探讨	328
9.8 加筋土坡的极限平衡设计方法	334
9.9 土工织物加筋土的工程应用实例	336

第十章 振冲法	345
10.1 概述	345
10.2 振冲法加固原理	345
10.3 设计与计算	347
10.4 施工工艺	352
10.5 质量检验	356
10.6 工程实录	357
第十一章 挤密桩法	360
11.1 概述	360
11.2 灰土挤密桩的加固机理	360
11.3 挤密桩的设计	362
11.4 挤密桩的施工	366
11.5 挤密桩地基的质量检验	367
11.6 工程实录	367
第十二章 砂石桩、石灰桩、柱锤冲扩桩、水泥粉煤灰碎石桩	370
12.1 砂石桩	370
12.2 石灰桩法	372
12.3 柱锤冲扩法	377
12.4 水泥粉煤灰碎石桩	379
第十三章 水泥土搅拌法	386
13.1 概述	386
13.2 加固原理	386
13.3 最新技术动态	388
13.4 设计计算	389
13.5 水泥土搅拌法施工	393
13.6 搅拌桩质量检测	395
13.7 工程实例	396
第十四章 高压喷射注浆法	401
14.1 概述	401
14.2 地基加固原理	403
14.3 加固土的基本性状和特征	405
14.4 设计与计算	406
14.5 施工工艺	410
14.6 质量检验	412
14.7 工程实录	414

第十五章 化学加固法	416
15.1 夯实水泥土桩法.....	416
15.2 压力灌浆法	418
15.3 单液硅化法和盐碱法	425
第十六章 既有建（构）筑物地基加固理论与实践	429
16.1 概述	429
16.2 既有建筑地基基础的鉴定	431
16.3 既有建筑地基计算	432
16.4 既有建筑地基基础的加固方法.....	435
16.5 既有建筑地基加固工程实录	441
附表	449
主要参考文献.....	459

第一章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 地基处理的目的

地基是承托工程结构基础的场地，当其强度、变形性能或渗透性能等不满足工程建设要求时，往往容易导致非常严重的工程质量事故。由于地基承载力不足发生地基滑动事故的典型工程是加拿大特朗斯康谷仓，该建筑物设计时未对地基进行勘察，不了解基底下有厚达 15m 左右的软黏土下卧层，仅根据对邻近建筑的调查决定了地基承载力。谷仓建成后于 1913 年 9 月开始均匀地向内装载谷物，10 月发现谷仓 1h 内的垂直沉降量竟达到 30.5cm，在其后的 24h 内谷仓倾倒，倾倒后谷仓的西侧下沉达 7.32m，东侧则抬高了 1.53m，整体倾斜达 $26^{\circ}53'$ （图 1.1.1）。墨西哥城的一幢建筑在使用过程中出现了沉降量过大的事故（图 1.1.2），该建筑地基土层为深厚的湖相沉积层，土的天然含水量高达 650%，液限为 500%，塑性指数为 350，孔隙比为 15，具有极高的压缩性，在建设过程中未进行相应处理。

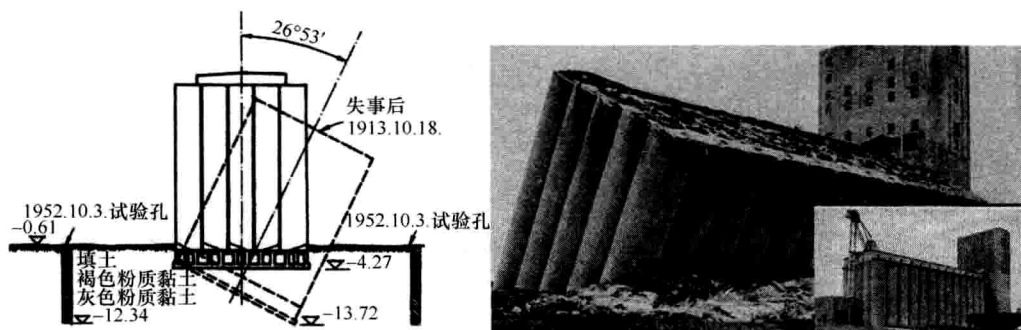


图 1.1.1 加拿大特朗斯康谷仓地基滑动事故

地基处理是提高地基强度，改善其变形性能或渗透性能而采取的技术措施。在我国加速城市化建设的过程中，大规模的基本建设需要以及可用于建设的土地减少，需要进行地基处理的工程大量增加。近年来，我国地基处理技术有了很大发展，但由于工程建设的需要，建筑使用功能的要求的不断提高，需要地基处理的场地范围进一步扩大，用于地基处理的费用在工程建设投资中所占比重的也在不断增大。地基处理技术的安全适用、技术先进、经济合理、确保质量、保护环境的要求日益增强。

地基处理时通过采用技术措施对地基进行人工处理，以改良地基土的工程特性，提高地基承载力、控制地基沉降、改善动力特性、改善剪切特性、增加地基的稳定性、改善透水特性和改善特殊土地基的不良工程特性，最终实现以下目的：



图 1.1.2 墨西哥城某建筑沉降量过重大事故

1. 改善剪切特性

地基基础设计首先必须保证在荷载作用下地基不会因为剪切破坏而失效。当地基的抗剪切强度不足以支承上部结构的自重及外荷载时，地基就会产生局部和整体剪切破坏；对经常承受水平荷载的高层建筑、高耸结构和挡土墙等，以及建造在斜坡上或边坡附近的建筑物和构筑物，其地基及土坡失稳的主要原因也是土的抗剪强度不足。

2. 改善压缩特性

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，会影响结构物的使用功能；当沉降或不均匀沉降过大时，不仅会影响建筑物的使用，甚至会造成建筑物倾斜、开裂，危及建筑物安全。地基处理可以提高地基土压缩模量，以减少地基的沉降。

3. 解决渗透问题

地基的透水性表现在地下水渗透及上浮力，当土层内常夹有薄层粉砂或粉土时，由于地下水在运动中产生水量的损失，或因潜蚀、流砂和管涌而可能导致建筑物产生事故，应采取措施使地基土变成不透水层或减轻基底水压力。

4. 解决液化问题

在地震、车辆荷载或打桩等动力荷载作用下，饱和松散粉细砂（包括部分粉土）将会产生液化，使土体失去抗剪强度近似液体特性的现象，从而导致地基失稳和震陷。

5. 解决特殊土的不良地质问题

其主要是指满足湿陷性黄土、膨胀土、内陆性盐渍土等特殊土上的建筑物不会由于不良土性而发生的损坏。

6. 解决地基基础的耐久性问题

其主要是指地基处理采用的材料，应根据场地类别符合有关标准对耐久性设计与使用的要求，以达到地基基础的设计使用年限大于上部结构的设计使用年限的新理念。

1.1.2 地基处理技术的发展

地基处理有着悠久的历史，古代劳动人民就懂得对天然地层进行人工处理，并积

累了极其宝贵的经验。例如,早在两千年前我国就已在软土地基中采用了夯入碎石等压实土层的夯实法;灰土和三合土的垫层法也是我国古代传统的建筑技术之一。

20 世纪五六十年代,我国地基处理技术进入了起步应用阶段。这一时期由于新中国刚刚成立,百废待兴,为了满足新中国建设的需要,我国从苏联引进了较多的地基处理技术。这个时期,砂石垫层法、砂桩挤密法、石灰桩、化学灌浆法、重锤夯实法、堆载预压法、挤密土桩和灰土桩、预浸水法以及并点降水等地基处理技术先后被引进或开发使用。如 20 世纪 50 年代初,长江水利委员会运用超载预压排水固结方法处理杜家台分洪闸软土地基;1959 年采用砂井排水成功处理了宁波铁路堤及舟山、宁波冷库的软土地基;1970 年采用油罐内充水预压方法处理了上海高桥炼油厂 2 万 m^3 油罐软土地基。但是,受当时对地基处理加固机理的科学研究、认识水平、实践经验的限制,在地基处理中主要是参照苏联的规范和实践经验,仍有一定的盲目性。

20 世纪 70 年代中后期至今,是我国地基处理技术应用、发展和创新阶段。这一时期大量的国外先进技术和机械被引进国门,并结合我国自身特点,初步形成了具有中国特色的地基处理技术。石灰桩、碎石桩、强夯法、高压喷射注浆法、深层搅拌法、真空预压法、砂井法和塑料排水板法都得到了广泛的研究和应用发展。如 1977 年我国开始采用袋装砂井,继后采用塑料板排水;1980 年交通部第一航务工程局采用真空预压提高吹填土及软土地基承载力;强夯法是法国 Menard 技术公司于 20 世纪 60 年代末首次提出的,我国于 1978 年引进并加以发展,采用设置透水垫层、排水砂井方法拓宽强夯法在饱和软土地基中使用;长江水利委员会于 1988 年首次采用强夯挤淤方法形成拦淤堤封闭式置换地基成功地处理深圳机场 5~10m 厚淤泥;1993 年长江水利委员会首次采用爆破褥垫方法成功地解决珠海机场岩基与软基结合段不均匀沉降课题,并从如何进行深层密实处理考虑,加大击实功能的措施,发展了“强夯法”和振动“水冲法”等。

现代工业的发展,对地基工程提供了强大的生产手段,如能制造重达几十吨的专用地基加固施工机械(使用强夯法时的起重机械);潜水电机的出现,带来了振动水冲法的振动器的施工机械;真空泵的问世,建立真空预压法;20 000kPa 的压缩空气机出现,催生了“高压喷射注浆法”;深层搅拌机由单轴、双轴发展到三轴式深层搅拌机,由陆域搅拌机发展到深层水泥拌和船,由竖向搅拌机械发展到搅拌斜桩的机械,施工工艺流程得到大大改进、加固深度得到大大提高。日本在 20 世纪 70 年代中期开始研制和应用深层搅拌法加固软土,1975 年进入实用阶段,我国交通部水运规划设计院和冶金部建筑总院从 1977 年开始研制深搅机械和试验,1980 年开始在宝钢和连云港工程中运用,1992 年我国第一艘深搅船诞生,进行海上深搅施工;高压旋喷桩系 20 世纪 60 年代末日本首创,我国铁道科学研究院等单位于 1972 年开始研制专用机具、浆液配方和施工工艺,1975 年开始用于地基加固工程;1985 年我国首次采用水下爆夯方法处理连云港淤泥。

新材料、新理论的进一步发展和提高,是我国地基处理技术发展的又一特点。从如何提高土的抗拉强度这一思路出发,我国在 20 世纪 80 年代开始采用土工合成材料

作为加筋垫层加固软基，张道宽于 1987 年得出加筋垫层有四种破坏类型及相应实用计算方法，杨光煦于 1995 年指出土工网格提高软基承载力、抗滑稳定及减少不均匀沉降效果优于土工织物，高强度、高性能的土工织物开始在建筑工程领域推广应用；从如何有利于土的排水和加速固结观点出发，发展了土工聚合物、砂井预压和塑料排水带。张季超于 2004 年提出了“吹砂填淤、动静结合、分区处理、少击多遍、逐级加能、双向排水”的饱和地基预处理技术，并将其成功应用于广东科学中心（图 1.1.3）、广州外国语学校、惠州大亚湾天海地基处理等工程；围绕着性能化设计的要求，张季超发展了基于性能的地基处理设计理论，提出基于性能的地基处理设计流程（图 1.1.4），并将其成功应用于广州市工商行政管理局南沙分局综合服务中心工程。利用设置变刚度垫层和竖向增强体、基于变刚度调平概念设计的变桩径（桩距）或长短桩（图 1.1.5）、预应力高性能混凝土异形桩（图 1.1.6）、自适应变形调节器（图 1.1.7）、桩伴侣（图 1.1.8）、纵向预应变桩（图 1.1.9）等措施，实现地基处理性能化设计已经成为工程技术领域实践与研究的一大热点。

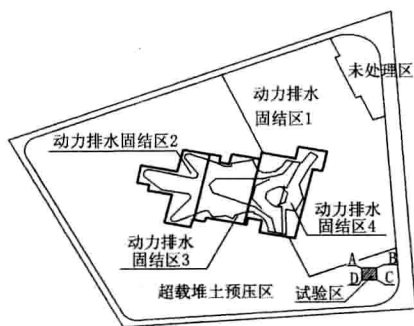


图 1.1.3 饱和地基预处理技术处理的应用

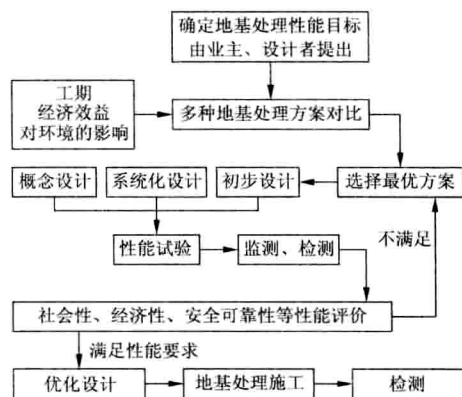


图 1.1.4 基于性能的地基处理设计流程

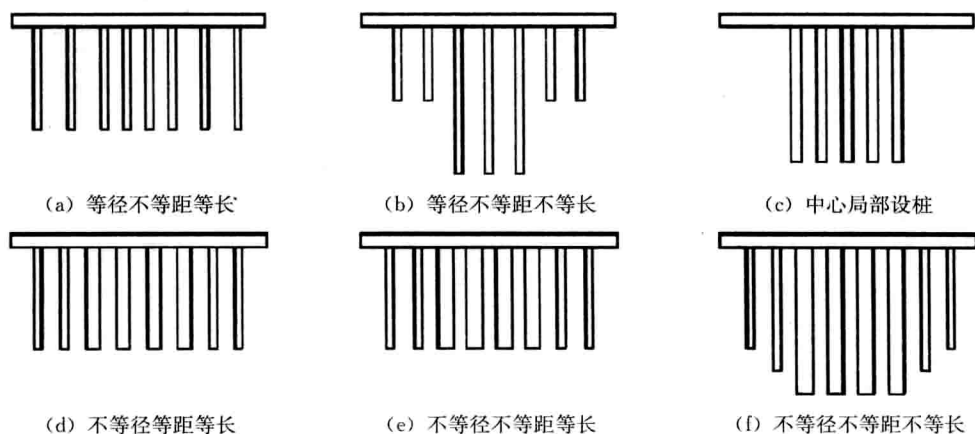


图 1.1.5 采用“内强外弱”方法来调整桩基支承刚度的几种组合



图 1.1.6 预应力高性能混凝土异形桩

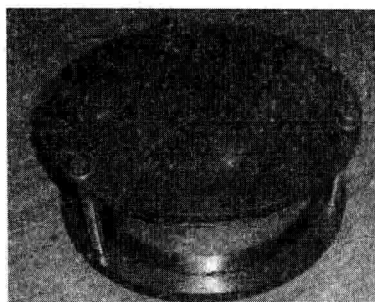


图 1.1.7 自适应变形调节器

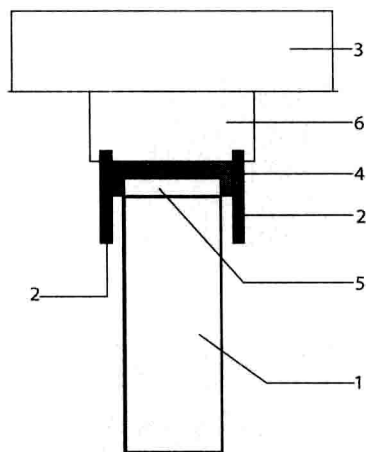


图 1.1.8 桩伴侣构造

1. 桩; 2. 箍; 3. 上部结构; 4. 垫层;
5. 预留净空; 6. 桩承台

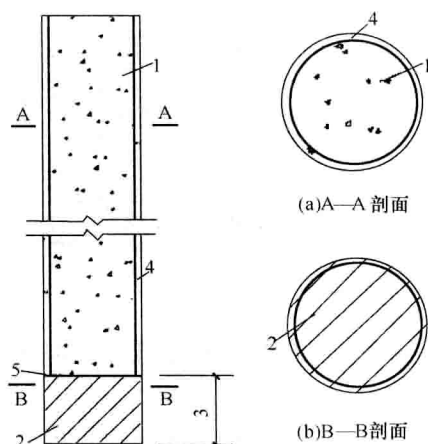


图 1.1.9 纵向预应变桩构造

1. 混凝土桩体; 2. 柔性材料 (普通泡沫);
3. 柔性桩体; 4. 钢筋; 5. 隔板

近年来,在湖泊、海洋水域边进行围海造地,是土地资源开发的新的途径和思路。人工岛的建设出现了一片繁荣的景象,地基处理技术呈现了从解决一般工程地基加固技术问题向解决各类超软、深厚、深挖等大型工程复杂地基综合加固难题方向发展。2011年阿塞拜疆投资1000亿美元于首都巴库西南部23km处沿普尔斯克港海岸动工建造包括41座人工岛、159座桥连接、面积为20km²的哈扎岛。2001年迪拜耗资120亿美元将9400万m³的沙和700万t石头填进波斯湾建造世界闻名的朱美拉棕榈岛(图1.1.10),其核心地带包括一条单轨铁路和一条8车道的高速公路。2004年阿拉伯半岛国家卡塔尔耗资约25亿美元在距离海岸线约350m的海岸填海4km²建成了总面积达4km²的珍珠岛(图1.1.11)。2004年巴林投资60亿美元建造了由15个独立的人工岛屿组成的面积约为214km²的安瓦吉群岛,包括6个环礁,5个鱼形岛和2个新月形的岛屿(图1.1.12)。日本神奈川县到千叶市的高速公路穿过东京湾在水中横断接入一条通往川崎的隧道,形成了美丽的东京湾海萤(图1.1.13)。1998年7月对外开放的我国香港赤鱲角国际机场建造于花了6年时间和200亿美元建设的人工岛上(图1.1.14),使香港的面积增加了1%。2007年11月我国在江苏西太阳沙人工岛建造

了第一个 1.5km^2 的液化天然气接收站 (图 1.1.15), 在完成上百个试验的基础上, 突破了在沙洲原有表面上吹填 10m 高的沙土的禁区建港系列地基处理技术难题。



图 1.1.10 迪拜朱美拉棕榈岛

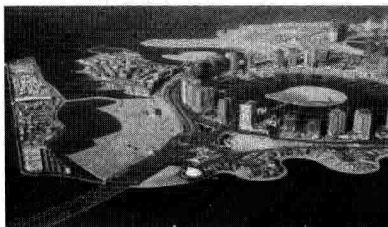


图 1.1.11 卡塔尔珍珠岛



图 1.1.12 巴林安瓦吉群岛



图 1.1.13 日本东京湾海萤人工岛



图 1.1.14 香港国际机场

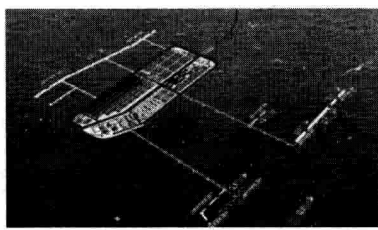


图 1.1.15 江苏西太阳沙人工岛

随着土木工程实践的不断发 展, 我国地基处理技术发展呈现了许多新的趋势。在地基处理目的方面, 从以提高地基承载力与稳定性为目的向以解决基础过大沉降和不均匀沉降为目的方向发展, 如高速公路的工后沉降、基坑开挖的侧向变形和大型油罐的不均匀沉降等; 在加固技术方面, 各类施工方法不断以现代新技术新材料充实和改进施工工艺, 向实用有效、随土质和加固要求而定、可控、可靠方向发展, 如砂石垫层向加筋土垫层发展, 砂井向袋装砂井、塑料排水板发展, 水泥土搅拌法的质量监控系统研发等; 在设计理论方面, 基于大量工程实践, 修订或完善了地基处理的设计规范和设计手册, 如中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79)、《既有建筑地基基础加固技术规范》(JGJ 123), 中国工程建设标准化协会标准《建筑物移位纠倾增层改造技术规范》(CECS 225) 等; 大量现场监测技术的应用, 使信息设计和施工成为今后重大工程设计和施工的发展方向; 多种方法的联合处理, 满足不同工程的要求, 如土工织物垫层和排水板联合处理、真空预压与堆载预压联合处理、加筋垫层和水泥土搅拌法联合处理等; 随着真空预压联合堆载预压技术、土工布联合砂井技

术、土钉与锚杆联合应用技术、土钉与水泥土挡墙联合应用技术等地基处理工程不断出现,多种地基处理方法综合使用的地基处理设计理论得以发展。

发达国家地基处理技术的主要特点是注重提高工效,施工机械趋于大型化、自动化;注意环境保护,避免污染;广泛采用电子计算机,实现信息化施工和资料积累,推行反分析不断提高设计、施工质量等。虽然我国地基处理已形成系列,但配套能力较差,工效较低,检测技术水平不高,在许多方面仍与国外存在差距。随着工程建设发展的需要及研究的不断深入,我国必将在设计理论、计算方法、施工工艺、质量检测、设备等一系列方面获得突破。

1.2 地基处理方法的分类

地基处理方法的分类

大量地基处理技术规范及规程的编制和颁布,以及技术文献的出版,给我国地基处理的设计、施工和质量检验等提供了技术依据,促进了地基处理技术的普及,也促进了地基处理技术的提高,使我国地基处理技术逐渐成熟和完备。例如,中国建筑科学研究院主持编制了《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79),广东省等编制了地方性的地基处理技术规范,浙江省等在地基基础设计规范中列出地基处理的专门条款和特殊土地基处理规定,中国土木工程学会土力学及基础工程学会地基处理学术委员会主持编制了《地基处理手册》,龚晓南院士编制了《复合地基》、《复合地基设计和施工指南》、《地基处理技术发展展望》等技术文献。

根据我国技术规范、规程及技术文献,常用的地基处理方法分类如表 1.2.1 所示,分为换填垫层、预压地基、压实地基和夯实地基、复合地基、注浆加固和微型桩加固等。由表 1.2.1 可知,很多地基处理方法往往具有多种处理的效果,如振冲碎石桩对不同性质的土层分别具有置换、挤密、振动密实、排水和加筋等多重作用;土工合成材料法既可用于浅层换填垫层中,也可用于形成复合地基,发挥置换、排水和加筋等多重作用,当荷载增加引起侧压力增加时,土工合成材料无显著变形(图 1.2.1),可用于高边坡等工程的加固处理(图 1.2.2)。

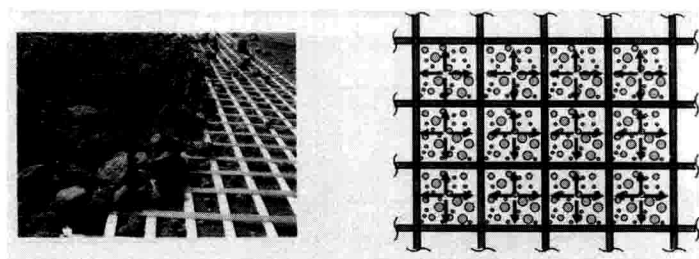


图 1.2.1 土工合成材料法作用机理



图 1.2.2 土工合成材料法处理意大利特兰托高边坡工程

表 1.2.1 地基处理方法分类

处理方法		简要原理	适用范围	优点及局限性
换填垫层法		挖除基础底面下一定范围内的软弱土层或不均匀土层，回填其他性能稳定、无侵蚀性、强度较高的材料，并夯压密实形成的垫层	适用于软弱土层或不均匀土层的浅层地基处理	适用于处理各类浅层软弱地基。较深厚下卧软弱土层在荷载作用下的长期变形可能依然很大
预压法	堆载预压法	地基上堆加荷载使地基土固结压密的地基处理方法	适用于处理淤泥质土、淤泥、冲填土等饱和黏性土地基	处理时间长，经济性好
	真空预压法	通过对覆盖于竖井地基表面的封闭薄膜内抽真空排水使地基土固结压密的地基处理方法		加固土层上覆盖有厚度大于5m以上的回填土或承载力较高的黏性土层时，不宜采用真空预压加固
	真空和堆载联合预压法	当真空预压达不到要求的预压荷载时，可与堆载预压联合使用，其堆载预压荷载和真空预压荷载可叠加计算		
	降水预压	通过与透水层连接的排水井抽水，降低地下水位以增加土的自重应力，从而达到预压效果	砂性土或透水性较好的软黏土层	无需堆载；需长时间抽水，耗电量大。使临近建筑周围产生附加下沉
	电渗排水预压	通过向土中插入通直流电的金属电极，土中水流由正极区域流向负极区域，从而达到固结	饱和软黏性土、砂土	使临近建筑周围产生附加下沉
压实法	碾压法	通过压路机、推土机、羊足碾等压实机械压实地基表层土体	适用于地下水位以上填土的压实	适用于处理大面积填土地基，简易可行；仅限于表层处理
	振动压实法	用振动压实机械在地基表面施加振动力来振实浅层松散土	适用于非黏性土或黏粒含量少、透水性较好的松散填土地基	适用于处理大面积填土地基，简易可行，仅限于表层处理

续表

处理方法	简要原理		适用范围	优点及局限性
夯 实 法	强夯法	反复将夯锤（质量一般为 10~40t）提到一定高度使其自由落下（落距一般为 10~40m），给地基以冲击和振动能量，从而提高地基的承载力并降低其压缩性，改善地基性能	适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基	施工速度快，质量容易保证，经处理后土性较为均匀，造价经济。对于软土地基，如果未采取辅助措施，一般来说处理效果不显著
	强夯置换法	采用在夯坑内回填块石、碎石等粗颗粒材料，用夯锤连续夯击形成强夯置换墩	适用于高饱和度的粉土与软塑~流塑的黏性土等地基上对变形控制要求不严的工程	设计、施工不当，加固后出现下沉较大或墩体与墩间土下沉不等的情况
复 合 地 基 法	振冲碎石桩复合地基	在振冲孔内加填碎石（或卵石等）回填料，制成密实的振冲桩	适用于处理松散砂土、粉土、粉质黏土、素填土、杂填土等地基处理，以及用于处理可液化地基	如不经过预压，处理后地基仍将发生较大的沉降，对沉降要求严格的建筑结构难以满足允许的沉降要求。对于塑性指数高的硬黏性土、密实砂土不宜采用
	沉管砂石桩复合地基	采用振动或锤击沉管等方式在软弱地基中成孔后，再将砂或碎石挤压入已成的孔中，在成桩过程中逐层挤密、振密，形成大直径的砂石体所构成的密实桩体		
	旋喷桩复合地基	通过钻杆的旋转、提升高压水泥浆由水平方向的喷嘴喷出，形成喷射流，以此切割土体并与土拌合形成水泥土竖向增强体的复合地基	适用于处理淤泥、淤泥质土、黏性土（流塑、软塑和可塑）、粉土、砂土、黄土、素填土、碎石土等地基	当土中含有较多的大直径块石、大量植物根茎和高含量的有机质，以及地下水流速较大的工程，应根据现场试验结果确定其适应性
	水泥土搅拌桩复合地基	利用水泥等材料作为固化剂通过特制的搅拌机械，就地将软土和固化剂（浆液或粉体）强制搅拌，使软土硬结成具有整体性、水稳性和一定强度的水泥加固土，从而提高地基土强度和增大变形模量	适用于处理正常固结的淤泥、淤泥质土、素填土、软~可塑黏性土、松散~中密粉细砂、稍密~中密粉土、松散~稍密中粗砂、饱和黄土等土层	不适用于含大孤石或障碍物较多且不易清除的杂填土、欠固结的淤泥和淤泥质土、硬塑及坚硬的黏性土、密实的砂类土，以及地下水渗流影响成桩质量的土层。当地基土的天然含水量小于 30%（黄土含水量小于 25%）时不宜采用干法
	灰土挤密桩复合地基、土挤密桩复合地基	用灰土、石灰与粉煤灰等掺和料或土填入孔内分层夯实形成竖向增强体，与挤密的桩间土一起组成复合地基，共同承受基础的上部荷载	适用于处理地下水位以上的粉土、黏性土、素填土、杂填土和湿陷性黄土等地基	可处理地基的厚度宜为 3~15m，当地基土的含水量大于 24%、饱和度大于 65%时，应通过试验确定其适用性