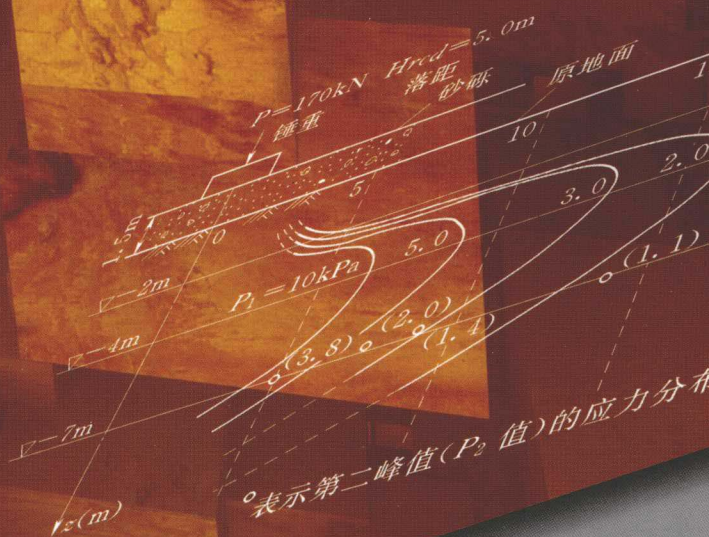


地基处理新技术与工程应用精选



地基处理新技术与工程应用精选

徐至钧 汪国烈 曹名葆 崔江余 编著
陈祥福 主审

常州大学图书馆
藏书章



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书按照我国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)系统地介绍了规范中主要地基处理方法的加固机理、设计计算、施工方法和质量检验等,并详细介绍了各种地基处理方法在实际工程中的应用案例。全书共14章,主要内容为:总论,换填垫层处理,强夯和强夯置换,柱锤冲扩桩复合地基,预压法处理地基,旋喷桩复合地基,水泥土搅拌法,振冲碎石桩和沉管砂石桩复合地基,水泥粉煤灰碎石桩复合地基,复合地基,石灰桩法,灰土挤密桩法和土挤密桩法,微型桩加固,注浆加固。书后还附录了处理后地基静载荷试验要点、复合地基静载荷试验要点和复合地基增强体单桩静载荷试验要点等内容。

本书内容翔实,工程实例丰富,应用性强,是一本系统、完整的符合我国工程实际的地基处理工程技术手册,可供建筑地基处理技术研究人员和有关工程技术人员参考与使用。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理新技术与工程应用精选 / 徐至钧等编著

— 北京:中国水利水电出版社,2013.2

ISBN 978-7-5170-0661-9

I. ①地… II. ①徐… III. ①地基处理 IV.
①TU472

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032121号

书 名	地基处理新技术与工程应用精选
作 者	徐至钧 汪国烈 曹名葆 崔江余 编著 陈祥福 主审
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 40.5印张 960千字
版 次	2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	86.00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

序

随着我国国民经济的持续发展,许多重要的工程建设往往不得不在地质条件十分不良的地基上进行,如经常遇到软弱土、淤泥和淤泥质黏土、杂填土、松散砂土和各种特殊土等,这时地基处理的对象就必须针对各类不良地基施作不同类别的加固手段。但是,各种错综复杂的土质和土性条件,其地基处理上的许多实际问题单纯依靠理论计算分析往往是难于解决的。各类土层千差万别,即使具有各种理论分析程序软件,由于土的参数测定和建模方面的困难等,也不可能从理论上求得完善解决。

众所周知,各类地基处理的理论研究是滞后于工程实践的,在许多场合还不得不依赖现场检测方法,如载荷试验或工程监测的结果以探求其带一定规律性的某些方面,然而这种直接试验方法也有很大的局限性,只能推广到试验条件相同或基本相似的工程;另外,也只能得出个别或局部现象,如地基与土质之间的表面经验性关系,而难以抓住它们的内在本质。因此,地基处理是一门学术内涵丰富,而又实践性很强的工程应用学科,从中求找能以理论密切联系实际,使分析成果便于为工程所用,而又基本符合具体的工程实际,则是业界人士竭力追求的共识。

为适应当前工程建设发展的需要,由陈祥福主审,徐至钧、汪国烈、胡中雄等 20 多位从事地基处理的专家、教授和有丰富实际经验的工程技术人员共同编写的《地基处理新技术与工程应用精选》一书即将付梓问世。该书按照中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)中所述的主要地基处理方法展开介绍并分章列节,如按加固机理、设计计算、施工方法、质量检验等,比较系统地介绍了各种地基处理方法,包括换填、预压、强夯和强夯置换、振冲、砂石桩、低强度桩复合地基、夯实水泥土桩、水泥土搅

拌、高压喷射注浆、石灰桩、灰土挤密桩和土挤密桩、柱锤冲扩桩、注浆加固及微型桩加固等十多种地基处理方法，每章都附有工程应用实例，提供给有关工程技术人员参考应用，并以期通过进一步的工程实践，不断反馈使之更臻完善，也是本书作者们的期望。

我乐观其成，并谨以上面的一点文字，祝贺本书的出版。是为序。

同济大学资深荣誉教授
中国科学院技术科学部院士

孙 钧

2012年3月于上海同济园

前言

地基处理是工程界经常碰到的一门学科。随着我国国民经济的持续发展,事先不仅要选择地质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工程建设,如软弱土层、杂填土、人工填土、特殊土等。地基处理就是对各类不良地基进行加固处理。地基处理的目的是利用换填、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法对地基进行加固,用以改良地基土的工程特性。由于各种错综复杂的土质,地基处理的许多实际问题靠理论上分析是根本无法解决的,这是因为各类土层千差万别,很难列出各种理论计算分析程序,即使列出了,也会因为土的参数测定困难等,而无法从理论上加以求解。当前应该说各类地基处理的理论研究是滞后于实践的,进行完全的理论求解较为困难,于是不得不靠现场检测方法,如载荷试验或工程监测的结果来探求其规律性。但这种直接试验方法也有很大的局限性,即只能推广到试验条件完全相同或相似的工程上去;另外,也只能得出个别现象,地基与土质之间的表面经验性关系,难以抓住它们的内在本质。因此说地基处理是一门实践性很强的应用学科。

本书按中华人民共和国行业标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)的主要地基处理方法的内容进行分章列节,按加固机理、设计计算、施工方法、质量检验等进行介绍,每章都附有工程应用实例,可提供给有关工程技术人员参考和应用。

本书由徐至钧等国内 20 多位地基处理的专家、教授、高级工程师和工程技术人员合作编写,并由陈祥福主审,比较系统地介绍了各种地基处理方法,包括换填、预压、强夯和强夯置换、振冲、砂石桩、低强度桩复合地基、夯实水泥土桩、水泥土搅拌、高压喷射注浆、石灰桩、灰土挤密桩和土挤密桩、柱锤冲扩桩、注浆加固及微型桩加固等十多种地基处理方法,使其能成为一

本较完整的符合我国工程实际的地基处理工程技术手册。

另外，在编写本手册的过程中，深圳市粤地建设工程有限公司、深圳市地质局、深圳市华根建设工程有限公司的汪国烈、曹名葆、崔江余、胡中雄、潘林有、杨瑞清、付细泉、张勇、林婷、张亦农、赵尧钟、李景、陈静等参加了部分编写和校对工作。

在编写中，本手册引用了许多科研、教学和工程单位的一些研究成果和技术总结，在书中参考文献中都尽量注明出处，但难免有遗漏，在此谨向所有原作者表示深切的谢意。

由于水平有限，书中不妥之处，尚祈各界读者朋友不吝指正。

编者

2012年5月

于深圳

目 录

序

前言

第 1 章 总论	1
1.1 地基处理的目的	1
1.2 地基处理技术的发展	2
1.3 各类地基处理技术的发展简况	6
1.4 不良地基的分类和特性	11
1.5 地基处理方法的分类及应用范围	12
1.6 地基处理方案的选择	15
1.7 《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012) 对地基处理方法的适用土层	17
第 2 章 换填垫层处理	19
2.1 概述	19
2.2 换填垫层的设计	20
2.3 换填垫层法的施工	24
2.4 垫层的质量检查	24
2.5 施工注意要点	26
2.6 工程应用实例	29
第 3 章 强夯和强夯置换	49
3.1 概述	49
3.2 强夯的适用范围	50
3.3 加固机理	51
3.4 强夯参数的确定	55
3.5 强夯法和强夯置换法加固地基的设计	62
3.6 强夯加固地基的施工细则	75
3.7 现场测试与质量检验	82
3.8 强夯质量检验要点	84
3.9 工程应用实例	91
第 4 章 柱锤冲扩桩复合地基	109
4.1 概述	109

4.2	作用机理	110
4.3	散体桩加固机理	119
4.4	复合地基计算公式	123
4.5	柱锤冲扩桩深层强夯的承载性状与其他地基加固方法的比较	124
4.6	复合地基的沉降计算	125
4.7	柱锤冲扩桩的施工要点	132
4.8	施工质量的检验	137
4.9	工程应用实例	140
第5章	预压法处理地基	145
5.1	概述	145
5.2	分级等速加载时的地基固结度计算	147
5.3	预压荷载下的地基变形量及强度增长估计	154
5.4	砂井与塑料板竖向排水系统	161
5.5	预压荷载下的土中应力计算	171
5.6	降水预压及真空预压	176
5.7	工程应用实例	194
第6章	旋喷桩复合地基	265
6.1	概述	265
6.2	旋喷注浆的主要特征	273
6.3	适用范围	275
6.4	旋喷注浆的种类	283
6.5	旋喷注浆加固地基的基本原理	289
6.6	注浆材料及配方	299
6.7	旋喷参数的设计	304
6.8	旋喷桩的施工	311
6.9	质量检验和施工监理	315
6.10	工程应用实例	324
第7章	水泥土搅拌法	340
7.1	概述	340
7.2	水泥土的室内外试验	343
7.3	柱状水泥土搅拌桩复合地基的设计与计算	346
7.4	水泥土搅拌桩的设计计算	354
7.5	拱形水泥土搅拌桩挡墙的设计计算	360
7.6	工程实践中值得关注的几个问题	365
7.7	长短桩复合地基的设计	370
7.8	质量检验中应注意的问题	371
7.9	扩大支盘搅拌劲芯桩技术	372

7.10 工程应用实例	376
第8章 振冲碎石桩和沉管砂石桩复合地基	393
8.1 概述	393
8.2 加固机理	395
8.3 设计计算	405
8.4 振冲法施工	434
8.5 施工质量与效果检测	466
8.6 工程应用实例	470
第9章 水泥粉煤灰碎石桩复合地基	485
9.1 水泥粉煤灰碎石桩的优点	485
9.2 水泥粉煤灰碎石桩的特点及适用范围	486
9.3 加固机理	486
9.4 设计计算	488
9.5 施工与机具设备	491
9.6 材料要求及配合比	492
9.7 施工工艺要点	492
9.8 质量检验与控制	493
9.9 工程应用实例	494
第10章 复合地基	502
10.1 概述	502
10.2 复合地基的分类	502
10.3 作用机理	503
10.4 复合地基中桩体的破坏模式	504
10.5 复合地基的应力特征	505
10.6 复合地基的承载力计算	508
10.7 试验检测	510
10.8 工程应用实例	512
第11章 石灰桩法	526
11.1 概述	526
11.2 石灰桩的桩体材料及其性质	527
11.3 石灰桩的物理加固作用	530
11.4 石灰桩的化学加固作用	534
11.5 石灰桩的水下硬化	535
11.6 石灰桩的加固规律	537
11.7 石灰桩的龄期	540
11.8 石灰桩法的适用范围	540

11.9	石灰桩复合地基的设计计算	541
11.10	施工工艺	548
11.11	质量控制与效果检验	551
11.12	工程应用实例	553
第 12 章	灰土挤密桩法和土挤密桩法	558
12.1	概述	558
12.2	加固机理与适用范围	558
12.3	我国挤密地基设计计算方法的形成	560
12.4	挤密地基设计的技术条件	561
12.5	挤密地基处理效果的影响因素	562
12.6	桩孔填料选择	563
12.7	桩孔布置与孔心距确定原则	564
12.8	挤密地基的处理宽度	567
12.9	挤密地基的处理深度	568
12.10	挤密地基的表层松动带	569
12.11	桩孔填料用料与夯实质量的要求尺度与评价	570
12.12	孔心距计算	571
12.13	挤密地基设计	572
12.14	挤密地基施工	573
12.15	质量检验与试验	576
12.16	工程应用实例	581
第 13 章	微型桩加固	586
13.1	概述	586
13.2	适用土层	586
13.3	设计规定	587
13.4	树根桩法	587
13.5	预制桩法	590
13.6	注浆钢管桩法	590
第 14 章	注浆加固	591
14.1	概述	591
14.2	加固机理	593
14.3	注浆材料	602
14.4	注浆方法与注浆工艺	603
14.5	注浆设备	617
14.6	注浆施工监控与注浆效果检测	618
14.7	工程应用实例	619

附录 A 处理后地基静载荷试验要点 628

附录 B 复合地基静载荷试验要点 629

附录 C 复合地基增强体单桩静载荷试验要点 631

参考文献 633

第 1 章 总 论

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，减少房屋的沉降，保证上部结构的安全和正常使用。土的物理力学性质极其复杂，各地地质条件有所差别，给地基处理工作增加了很大难度。到目前为止，我们掌握了一些处理方法，改进了处理工艺，建造起许多房屋，包括高层建筑、工业厂房、港湾海堤等。但应当承认，地基处理的理论还不成熟，仍然是处于发展中的试验和经验性科学。

1.1 地基处理的目的

地基处理（ground treatment）是为了提高地基承载力，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。

我国土地辽阔、幅员广大、自然地理环境不同、土质差异很大、地基条件区域性很强，因而地基处理这门科学特别复杂。地基处理的对象是对天然的软弱地基和人工堆填地基进行加固，以满足各类土木建筑和水利、交通、石化、冶金、电力等工程的技术要求。地基处理的目的是为了提高软弱地基和人工堆填地基的承载力，保证地基的稳定；降低地基的压缩性，减少基础的沉降和不均匀沉降；防止地震时液化；消除特殊性土的湿陷性、胀缩性和冻胀性等。

随着我国国民经济的持续发展，不仅事先要选择在地质条件良好的场地上从事工程建设，而且有时也不得不在地质条件不良的地基上进行建设，另外，随着科学技术的日新月异。结构物的荷载日趋增大，高层建筑层数越来越高，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，也可能在某些特定条件下非进行地基处理不可。所以，我们不仅要善于针对不同的地质条件、不同的结构物选定最合适的基础形式、尺寸和布置方案外；而且要善于选取最恰当的地基处理方法。

在软弱不良地基上建造工程可能发生的问题，如表 1-1 所示。
地基处理的目的，系针对表 1-1 所列举的问题，采取适当的措施以改善地基条件，这些措施应包括以下 5 方面内容：

表 1-1 软弱不良地基上建造工程可能发生的问题

工程性质	地基承载力及稳定	地 基 沉 降	其 他
加载工程	1. 地基剪切破坏； 2. 建筑物基础承载力不足； 3. 由于偏心荷载及压力作用，使结构物产生变形或破坏； 4. 由于填土或建筑物荷载，使邻近地基产生隆起	1. 沉降或差异沉降特大； 2. 作用于建筑物基础的负摩擦； 3. 由于有填土或建筑物荷载，邻近地基产生固结沉降； 4. 大范围地基沉降	1. 由于交通荷载等原因，对邻近地基产生振动下沉； 2. 地震时地基产生液化； 3. 堤坝等基础产生地基渗漏

续表

工程性质	地基承载力及稳定	地 基 沉 降	其 他
开挖工程	1. 开挖时边坡破坏; 2. 开挖时基坑底部隆起; 3. 开挖时的应力降低或松弛, 引起基坑侧壁破坏	1. 开挖引起邻近地基沉降; 2. 由于降水产生地基固结沉降	1. 渗水; 2. 管涌

1. 改善剪切特性

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. 改善压缩特性

需要研究采用何种措施以提高地基土的压缩模量，借以减少地基土的沉降。另外，防止侧向流动（塑性流动）产生的剪切变形，也是改善剪切特性的目的之一。

3. 改善透水特性

由于在地下水的运动中所出现的问题，为此，需要研究采用何种措施使地基土变成不透水或减轻其水压力。

4. 改善动力特性

地震时饱和松散粉细砂（包括一部分轻亚黏土）将会发生液化。为此，需要研究采取何种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性能。

5. 改善特殊土的不良地基的特性

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胀缩性等特殊土的不良地基的特性。

地基处理是工程界经常碰到的一门学科。随着我国国民经济的持续发展，事先不仅要选择地质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工程建设，如软弱土层、杂填土、人工填土、特殊土等。地基处理就是对各类不良地基进行加固处理。由于各种错综复杂的土质，地基处理的许多实际问题靠理论上分析是根本无法解决的，这是因为各类土层千差万别，很难列出各种理论计算分析程序，即使列出了，也会因为土的参数测定困难等，而无法从理论上加以求解。当前应该说各类地基处理的理论研究是滞后于实践的，进行完全的理论求解较为困难，于是不得不靠现场检测方法，如载荷试验或工程监测的结果来探求其规律性。但这种直接试验方法也有很大的局限性，即只能推广到试验条件完全相同或相似的工程上去。另外，也只能得出个别现象，地基与土质之间的表面经验性关系，难以抓住它们的内在本质。因此说地基处理是实践性很强的应用学科。

1.2 地基处理技术的发展

近些年来，基本建设规模不断扩大，在建筑、水利、石化、电力、冶金、交通和铁道等土木工程建设中，人们愈来愈多地遇到不良地基问题，各种不良地基需要进行地基处理才能满足建造上部建（构）筑物的要求，地基处理是否恰当关系到整个工程质量、进度

和投资。合理地选择地基处理方法和基础形式是降低工程造价的重要途径之一。因此地基处理日益得到工程建设部门的重视。

全国土力学及基础工程学术讨论会举办过多届地基处理学术讨论会,例如:第1届(上海宝钢,1986)、第2届(山东烟台,1989)、第3届(河北秦皇岛,1992)、第4届(广东肇庆,1995)、第5届(福建武夷山,1997)、第6届(浙江温州,2000)。第7届(甘肃兰州,2002)地基处理学术讨论会,会议共收到论文114篇,经审查后录用100篇,内容包括基础理论,排水固结,振密,挤密(强夯,强夯置换,碎石桩,灰土桩),灌入固化物(深层搅拌法,高压喷射注浆法,灌浆法),加筋(土工合成材料),刚性桩复合地基和长短桩复合地基,桩基工程,基坑工程,托换与纠倾及其他共9个专题,论文集的内容反映了当前我国地基处理领域的主要成就和发展水平。第8届全国地基处理学术讨论会(湖南长沙,2004),会议收到包括基础理论、排水固结、振密、挤密、灌入固化物、桩基、基坑、托换与纠倾等方面的论文共114篇。第9届全国地基处理学术讨论会2006年在山西太原召开,共收录92篇论文,内容包括基础理论,排水固结,振密、挤密(强夯、强夯置换、碎石桩、灰土桩),灌入固化物(深层搅拌法、高压喷射注浆法、灌浆法),加筋(土工合成材料),刚性桩复合地基和长短桩复合地基,桩基工程,托换与纠倾及其他共9个专题。第10届全国地基处理学术讨论会于2008年11月在南京召开,会议共收到论文130篇,经审查后录用126篇,内容包括现有地基处理技术进展,地基处理新技术的开发和应用,复合地基理论与实践新发展,地基处理工程勘察技术、设计计算、施工设备、质量检验等方面的新发展,地基处理等其他方面的发展共5个主题。第11届全国地基处理学术讨论会于2010年11月在海南召开。

另外,1990年在承德市召开了复合地基会议,收入论文集论文77篇,还有其他兄弟学会也召开了各种形式的地基处理学术讨论会。1988年中国建筑工业出版社出版了由地基处理学术委员会组织编写的《地基处理手册》,受到广大同行的欢迎。中国土木工程学会学术部以及有关单位还在全国各地举办了各种类型的地基处理技术研讨班。这些活动对地基处理技术的推广和普及起了很好的作用。中国建筑科学研究院会同有关高校和科研单位,组织编写了3版《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—91)、(JGJ 79—2002)、(JGJ 79—2012)。上海、天津、广东、深圳、浙江、福建等地已经编制了地区性地基和地基处理规范,根据各自的情况,因地制宜,把一些地基处理方法编入规范。应广大同行的要求,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和浙江大学土木工程学系共同主办《地基处理》刊物为同行们提供了推广、交流地基处理新技术的园地,至今已发行22年出版总数达100期。

近几年来,地基处理的发展主要表现在以下几个方面:

(1)对各种地基处理方法的适用性和优缺点有了进一步的认识,在根据工程实际选用合理的地基处理方法上减少了盲目性。能够注意从实际出发,因地制宜,选用技术先进、确保质量、经济合理的地基处理方案。对有争议的问题,能够采取科学的态度,注意调查研究,开展试验研究,在确定地基处理方案时持慎重态度。能够注意综合应用多种地基处理方法,使选用的地基处理方案更加合理。

(2)地基处理能力有所提高。一方面,已有的地基处理技术本身的发展,如施工机

具、工艺的改进，使地基处理能力提高。另一方面，近年来，各地在实践中因地制宜发展了一些新的地基处理方法，取得了很好的社会、经济效益，各类地基处理技术的发展情况将在本书中作介绍。

(3) 复合地基理论得到发展。随着地基处理技术的发展和各种地基处理方法的推广使用，复合地基概念在土木工程中得到愈来愈多的应用，工程实践要求加强对复合地基基础理论的研究。然而对复合地基承载力和变形计算理论研究还很不够，复合地基理论正处于发展之中，还不够成熟，甚至对什么是复合地基无论是学术界还是工程界尚未统一认识。

复合地基是指天然地基在地基处理过程中部分土体得到增强，或被置换，或在天然地基中设置加筋材料，加固区是由基体（天然地基土体）和增强体两部分组成的人工地基。加固区整体是非均质和各向异性的。根据地基中增强体的方向又可分为纵向增强体和横向增强体复合地基（图 1-1）。

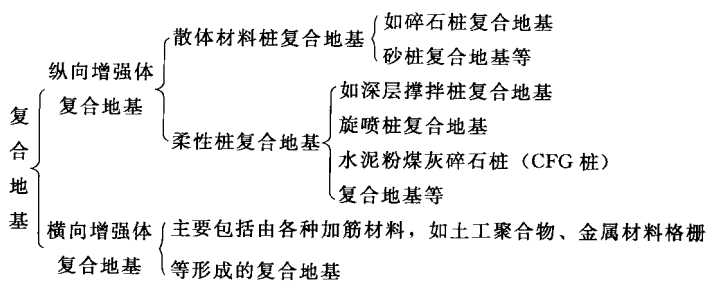


图 1-1 复合地基分类

纵向增强体复合地基根据纵向增强体的性质，可分为散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基。

横向增强体复合地基。散体材料桩复合地基和柔性桩复合地基的载荷传递机理是不同的，应该分别加以研究。国内也有人狭义地只把通过以桩柱形式置换形成的由填料与地基土相互作用并共同承担荷载的地基定义为复合地基。

复合地基有两个基本特点：①它是由基体和增强体组成的，是非均质和各向异性的；②在荷载作用下，基体和增强体共同承担荷载的作用。后一特征使复合地基区别于桩基础。一般说来，对桩基础，荷载是先传给桩，然后通过桩侧摩阻力和桩底端承力把荷载传递给地基土体的。若钢筋混凝土摩擦桩桩径较小，桩距较大，形成所谓疏桩基础，桩土共同承担荷载，也可视为复合地基，应用复合地基理论来计算。

人工地基中有均质地基、双层地基和复合地基等。事实上，对人工地基进行精确分类是很困难的。大家知道，天然地基也不是均质的、各向同性的半无限体。天然地基往往是分层的，而且对每一层土，土体的强度和刚度也是随着深度变化的。天然地基需要进行地基处理时，被处理的区域在满足设计要求的前提下尽可能小，以求较好的经济效果。各种地基处理方法在加固地基的原理上又有很大差异。因此，将形成的人工地基进行精确分类是很困难的。然而，上述的分类有利于我们对各种人工地基的承载力和变形计算理论的研究。按照上述的思路，常见的各种地基，包括天然地基和人工地基，粗略地大致上可分为均质地基、双层地基（或多层地基），复合地基和桩基四大类。以往对均质地基和桩基础

的承载力和变形计算理论研究较多，而对双层地基和复合地基的计算理论研究较少。特别是对复合地基，其承载力和变形计算的一般理论尚未形成，需加强研究。

国内学者对碎石桩复合地基研究较多，通过载荷试验积累了不少资料，并提出了多个碎石桩复合地基承载力计算公式。随着深层搅拌法和高压喷射注浆法形成的水泥土桩的应用，人们开始注意柔性桩复合地基的研究。小桩技术的应用还促使人们注意小桩复合地基设计计算方法的研究。复合地基承载力计算应以增强体和天然地基土体共同作用为基础。对桩体复合地基，人们不仅注意散体材料桩和柔性桩的承载力研究，还注意桩间土承载力的研究。起初用天然地基承载力作为桩间土承载力，现在则已开始考虑由固结引起强度增长，周围桩体的围护，成桩过程中的挤压以及扰动等因素对桩间土承载力的影响。近年来对桩土应力比的确定及影响因素开展了大量研究。试验资料分析表明，桩土应力比与桩体性质、桩距、天然地基承载力、复合地基强度发挥度等因素密切相关，还与施工方法，质量控制等因素有关。桩土应力的确定通常采用现场载荷试验，其测定值也受载荷板尺寸的影响。近几年来，各类复合地基承载力与变形计算的研究工作愈来愈得到人们的重视。然而复合地基计算理论的发展，但还远不能满足工程实践的要求。

2008年出版的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)第一次提出了桩基变刚度调平设计方法，即考虑上部结构形式、荷载和地层分布以及相互作用效应，通过调整桩径、桩长、桩距等改变基桩与支承刚度分布使建筑物沉降趋于均匀，承台内力降低的设计方法。

人们在生产、生活中的排泄物、各类无机和有机垃圾、气体，正与日俱增地堆放在我们这个地球上（包括太空垃圾）。它们占据农田、原野，阻塞道路、河流，污染空气、水源，仅北京市周围就有大小不等的垃圾“山”7000多座，形成包围首都的第二道“长城”。这些污染物每天排出各种废气，随着人力和风力而搬迁、飘移、污染着蓝天，毒害着人们。还有那些正在建设中的工程，随着施工现场不断地开挖、回填，垃圾和土方的运进、运出，车辆及施工机具的噪声与排放的废弃物（灰尘、废气、污水……），给本已污染严重的城市再度加浓抹黑，形成建筑工程对环境的再污染。

人们在盼望着有一种新的技术，既能加固处理各类软弱地基，使其承载力提高、变形小，造价低，以便安全、牢固地修建各类建筑物，又能就地消纳建筑工地的各类废渣、废土，甚至把长期堆积的各类无机废料也能利用来加固地基，变废为宝。这样不仅可以节省大量钢材、水泥等宝贵的建筑材料，降低工程造价，也会大大减少车辆运输排出的废气和噪声，减少建筑工程对城市的再度污染。同时在施工中又能低振动，低噪声，无污染，不扰民。

高级工程师司炳文经多年潜心研究，发明创造了孔内深层强夯法（又称DDC渣土桩技术），获8项国家技术专利，就具备了上述各项优点：能将软弱地基坚实加固；消纳、利用垃圾，变废为宝，减少车辆运输排放的废弃物，降低建筑工程对城市的再污染，并可使工程造价低，节约钢材水泥等。

在宝鸡第二发电厂的地基处理工程中，采用DDC渣土桩技术，消纳了33万多立方米废弃土、垃圾，节约1500多万元。北京天宁寺II栋住宅楼的地基处理工程，采用DDC渣土桩技术，共减少18万立方米土方垃圾的运输和堆放，节约400多万元。人民邮电出版社的地基工程采用DDC渣土桩技术，先后消纳了1.6万多立方米渣土和建筑垃圾。近