地基处理研究进展

刘汉龙[1,2,3] 赵明华[4]
(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室，重庆 400045；2. 重庆大学土木工程学院，重庆 400045；
3. 河海大学，南京 210098；4. 湖南大学，长沙 410082)

摘要：随着国家基础设施的大规模建设，近年来我国地基处理技术与应用得到了持续、长足的发展，新技术、新工艺及新方法不断涌现。该文系统简要地回顾了我国地基处理技术与理论研究进展，着重介绍了近五年逐渐发展的具有特色和代表性的地基处理新技术；结合地基处理相关规范的编制情况，探讨了标准化建设历程及地基处理技术与应用的主要发展方向。

关键词：地基处理；复合地基；规范；综述
中图分类号：TU4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-131X(2016)01-0096-20

Review of ground improvement technical and its application in China

Liu Hanlong[1,2,3] *Zhao Minghua*[4]
(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of the Ministry of Educution, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: With large-scale construction of national infrastructures, a sustainable and substantial development has been achieved in the ground improvement technologies in recent years. New technologies, new processes and new methods are emerging quickly with the vast growing engineering practice. This paper briefly reviews the research and technologies associated with ground improvement. In particular, it highlights new methods developed in the last five years to improve soft ground. Furthermore, some newly issued technical codes and amended technical codes were also introduced to well address the rapid progresses in relevant field, including standardized construction processes and potential key technologies.

Keywords: ground improvement; composite ground; codes; review
E-mail: hliuhhu@163.com

引 言

俗话说“基础不牢，地动山摇”，说明了地基基础及地基处理的重要性。近年来，地基处理技术与应用得到了持续、长足的发展；然而随着国家基础设施建设的逐步推进，不得不越来越多的遇到特殊地基，为地基处理新技术的发展提供了机会和挑战。地基处理逐渐从单一加固技术迅速发展向多方法联合技术方向发展，从大量的人力、材料和费用投入到实现机械、经济方法的方向发展，从高能耗、高污染技术向新型低碳技术、人与自然的和谐发展的方向发展。

中国工程院院士龚晓南先生在其2014年主编的《地基处理技术及发展展望》中根据加固机理、施工工艺及加固材料不同将地基处理进行了分类，见表1。

1 地基处理研究回顾

自1962年，在天津召开《第一届全国土力学及基础工程学术会议》以来，每四年一届(1970年、1974年缺)的全国土力学盛会，均会针对地基处理技术进行了综述。尤其是近三届综述报告中展示了近十几年我国地基处理技术的飞速发展历程。

2003年北京《第9届全国土力学及基础工程学术会议》，郑刚等着重介绍了深层搅拌法、注浆技术、加筋土技术以及刚性桩复合地基等处理处理技术。2007年重庆《第10届全国土力学及基础工程学术会议》，郑刚等分类介绍了房屋建筑地基处理、高速公路地基处理、高速铁路地基处理和大面积地基处理技术；着重介绍了刚性桩复合地基技术、浅层地基处理技术以

基金项目：国家自然科学基金(51420105013，U1134207)
作者简介：刘汉龙，博士，教授
收稿日期：2015-09-28

表 1　我国主要地基处理技术及其分类[1]

Table 1　The typical methods of ground improvement and its classification in China

类别	方法	类别	方法
置换	换土垫层法	振密、挤密	表层原位压实法
	挤淤置换法		强夯法
	褥垫法		振冲密实法
	砂石桩置换法		挤密砂石桩法
	强夯置换法		爆破挤密法
	石灰桩法		土桩、灰土桩
	EPS 超轻质料填土法		夯实水泥土桩法
	堆载预压法(超载、等载或欠载)		孔内夯扩法
排水固结	真空预压法	加筋	加筋土垫层法
	电渗法		加筋土挡墙法
	降低地下水法		土钉支护法
	真空联合堆载预压法、真空联合电渗法、真空-堆载-电渗联合法		锚杆支护法
灌入固化物	深层搅拌法		锚定板挡土结构
	高压喷射注浆法		树根桩法
	水泥加固地下连续墙(TRD)法		柔性桩复合地基法
	渗入性灌浆法		刚性桩复合地基法
	劈裂灌浆法		长短桩、长板-短桩复合地基
	挤密灌浆法		加筋碎石桩复合地基法
	化学注浆	纠倾与迁移	加载纠倾法
	微生物灌浆		掏土纠倾法
托换	基础加宽法		顶升纠倾法
	桩式托换法		综合纠倾法
	综合托换法		迁移

及改良真空预压处理技术等。2011 年兰州《第 11 届全国土力学及基础工程学术会议》,郑刚等[2]着重介绍了地基复合加固技术、大面积地基加固、土工合成材料以及特殊土加固技术(盐渍土、冰渍土、冻土)等,并根据柱体式加固方法中竖向加固体桩体材料、有无黏结强度、抗拉压强度差异可分为:散体类柔性加固体、有一定黏结强度的半刚性加固体、无筋刚性加固体、钢筋混凝土加固体、复合加固体等。

1.1　地基处理概念与发展历程

随着国家“一带一路”计划的提出,对我国的铁路、公路以及其他基础设施建设也提出了相对更高的要求。严苛的工后沉降控制标准,对于地基处理的概念、技术、固结沉降分析等都提出了新的机遇和挑战;尤其是随着我国围垦造田的快速发展,浅滩软土、湖泊、滨海等地基处理加固技术面临严峻挑战。

地基处理技术逐渐从单一技术向多种技术组合综合使用的形式转变,并由此引申出多种新的技术手段。原有地基处理技术,也在面临新应用环境和领域过程中,得到更新发展。

1.2　排水固结法技术应用与研究进展

排水固结法是解决饱和软黏土地基的固结沉降和稳定问题的最常用地基处理方法之一;排水固结法大体可分为堆载预压法、真空预压法、电渗法、降低地下水法、以及真空联合堆载预压法、真空联合电渗法、真空-堆载-电渗联合法等。

1.2.1　堆载预压

堆载预压根据预压荷载的大小与永久使用荷载的相对关系,可以分为欠载预压、等载预压和超载预压三种情况。堆载预压法通常有排水体系和加压体系两部分组成,在排水体系中又可分成普通砂井、袋装砂井和塑料排水板等。

针对堆载预压加固机理,近年来,相关研究人员在已有砂井固结解析解的基础上,逐渐发展了考虑扰动区土体渗透系数沿径向分布(线性、抛物线)、井阻作用、以及地基附加应力沿深度分布模式(均匀分布、正三角形、倒三角形以及梯形分布等)的固结解析解[3]。

1.2.2　真空预压法

真空预压法最早于 20 世纪 50 年代由 Kjellmam 提出,并在美国费城国际机场跑道扩建工程中得到应用。20 世纪 80 年代,真空预压法逐渐开始被广泛应用于我国公路、港口、水利等软基加固工程。近年来,真空预压法逐渐被扩展应用到如海堤软基加固、水力吹填地基加固、含承压水软基加固等领域,并取得了良好的经济效益和社会效益。

真空预压法处理软基沉降理论计算上,需要考虑如下几点关键因素:①如何将真空产生的负压应用于固结理论中,得到负压状态下的固结解;②如何定义真空在排水固结中的传递作用,大部分假设在砂井(或排水板)中以线性或非线性的传递;③如何定义地下水位的变化。针对真空预压固结机理研究,近年来相关研究人员在传统固结理论的基础上进行拓展深化研究。借鉴砂井排水固结理论,Indraratna 等提出抽真空作用下真空度的衰减经验公式,并由此在 Hansbo 的砂井固结理论的基础上分别推导了空间轴对称模型的固结解和平面应变模型的固结解;Tran 和 Mitachi 对 Indraratna 等的推导过程进行了修正。针对真空预压处理效果监测问题,周琦[4]等研究真空预压期间地下水位和出水量的变化规律,研发的新方法对地下水位和出水量开展现场监测。

1.2.3　电渗法

电渗法是通过在插入土中的电极上施加直流电使得土体加速排水、固结,从而使得土体强度增强的一种地基处理方法。电渗法最早于 19 世纪 10 年代即被 Reuss 于试验室内发现,并于 20 世纪 30 年末,由 Cassagrande 首次将其成功应用于德国某铁路边坡工程中。电渗法在我国及世界范围内,开展研究时间较早,但限于电费昂贵、电极材料腐蚀等因素影响,广泛的工程实际应用相对较少。

针对电渗法处理地基技术加固机理研究方面,近年来,相关研究人员基于传统一维电渗固结理论,分别提出考虑电渗作用下电流的变化,电渗固结耦合堆载效应的二维电渗固结理论,并发展电场、渗流场以及应力场耦合的计算与分析模型[5]。为了解决实际工程应用中电费昂贵问题,龚晓南院士等针对不同电极材料、电导率、电极距以及电极布置形式等开展了系列研究,并分析了“间歇通电”、电极反转以及逐级加载电压等技术手段提高电渗电能利用效率[6]。为了解决传统金属电极的腐蚀问题,1996 年,英国学者首次提出了电动土工合成材料的概念,并将该材料成功应用于边坡、路堤加固,城市污泥、矿山尾矿脱水处理,重金属污染土壤修复等工程领域。近年来,我国也研制了一种新型的电动土工合成材料(可导电的塑料排水板),并在吹填工程中测验了它的性能[7]。

1.2.4 真空联合堆载预压、真空联合电渗法、真空-堆载-电渗联合法等

真空预压采用的是负压加固,堆载预压是通过增大孔隙压力而使土体加固,而电渗法采用的是电场加速排水固结的原理。综合各类排水固结法技术特点,近年来,许多新兴的联合应用技术(如真空联合堆载预压、真空联合电渗法[8]、真空-堆载-电渗联合法以及低能量强夯-电渗联合法[9]等)得到了广泛应用,并取得了丰富的成果:建立了真空预压及真空-堆载联合预压作用下地基沉降修正系数公式,建立了真空-堆载联合预压作用下软土蠕变机理及沉降计算方法;相关实测结果表明,真空-电渗-堆载联合加固法,较传统真空联合堆载的处置时间可以缩短约 20% 施工工期[10]。

1.3 桩基复合地基

桩基复合地基的核心思想是桩、土协调共同承担上部荷载;为了协调桩-土荷载分担,桩基复合地基中往往会设置褥垫层;具有竖向沉降变形小、变形稳定时间短的突出优点,且施工质量易控。路堤竣工后不需要放置较长时间,适应工期短的情况。适用范围:主要用于深厚层软弱地基,对地基沉降要求高或存在侧向应力作用如桥路、隧路过渡段、溶沟溶槽地段等)地段,以及不均匀沉降大的地段。目前桩基复合地基中最常见的三种形式为桩-网复合地基、桩-板复合地基和桩-筏复合地基三类。

1.3.1 桩-网复合地基

桩-网复合地基是由刚性桩(群)和桩顶以上的加筋垫层共同组成;最早于在 20 世纪 70 年代在日本获得应用。

目前国内外学者分别采用理论分析、数值计算和试验研究的方法对桩-网复合地基的工作性状进行了研究。在试验研究方面,刘汉龙等[11]进行了路堤下 PCC 桩网复合地基的现场试验,分析了不同填土高度下,PCC 桩复合地基的沉降、桩土差异沉降、桩土应力比、孔隙水压力、桩土荷载分担及水平位移的变化规律。曹新文等以遂渝铁路松软地基为工程背景,原位测试了铺设与不铺设土工格栅两种情况的粉喷桩复合地基的剖面沉降、桩顶和桩间土的土压力、土工格栅拉力。分析结果表明:铺设土工格栅能有效改善附加应力的传递,提高桩土应力比,土工格栅的拉力与沉降成幂函数关系,分析结果对的粉喷桩桩网复合地基设计有重要参考价值。蔡德钩等[12]以武广客运专线为试验工点,进行桩网支承路基的现场填筑试验,研究路基应力传递及格栅变形特性。孔纲强等[13]结合现浇 X 形桩,开展了路堤荷载下现浇 X 形桩桩-网复合地基的现场试验,分析了不同填土高度下,路基的分层沉降、桩-土差异沉降、桩-土应力比、孔隙水压力、桩-土荷载分担及侧向位移等变化规律。数值计算方面,高胜利等运用有限元分析软件 ABAQUS 建立路堤荷载下带帽桩-网复合地基模型,分析得出该复合地基的沉降变形、桩身轴力、桩侧摩阻力和桩土应力比分布基本规律,为工程实践提供一定的参考和指导作用。雷学文等采用 ABAQUS 有限元软件,通过有限元数值模拟的方法分析了路堤荷载作用下桩-网复合地基中土工合成材料刚度、垫层厚度、桩体模量以及桩间距对复合地基的荷载传递特性、桩一土应力比、路基的表面沉降及侧向位移的影响。芮瑞等鉴于现场试验手段的局限性,在现场对比试验的基础上对桩网复合地基和桩承式路堤两种处理方式进行了三维流固耦合模拟和对比分析工作,揭示了不同处理方式桩顶平面沉降变形的特性,同时对桩体的应力进行了对比研究。理论研究方面,高胜利等通过对 HEWLE 工工极限状态土拱效应分析方法的改进和土工格栅加筋垫层拉腆效应的分析,推导出路堤下带帽控沉疏桩桩土应力比计算公式。饶为国等[14]以基于水泥为主要固化剂的深层搅拌桩为例开展研究,根据网单元的受力平衡条件、路堤荷载特点及工后沉降机理,提出了桩一网复合地基桩土应力比计算公式。基于薄板

变形理论和 Winkler 弹性地基模型,提出了桩一网复合地基桩土加固区的工后沉降量计算公式。王洪发等基于土拱理论、薄板变形理论和 Winkler 弹性地基模型,提出了桩一网复合地基工后沉降计算方法和桩土应力比计算方法,该计算模型考虑了桩一网复合地基各组成部分之间的相互作用,能够更准确地反映出桩一网复合地基的工作机理,对于实际工程的应用提供一定的理论依据。薛新华等在简要分析桩一网复合地基沉降构成的基础上,利用 Mindlin- Geddes 方法联合推求加固区附加应力分布,再利用 Boussinesq 方法推求下卧层附加应力的分布,并结合小孔扩张理论求出桩体的刺入变形量,最终对联合求解得到的沉降值进行修正,得到了与实际情况比较吻合的解,可以为类似无砟轨道等对沉降要求严格的铁路工程复合地基沉降计算提供参考。强小俊等[15]从工程实际出发,对 Hewle 土拱效应所考虑的影响因素加以朴充,并根据摩尔一库仑强度准则考虑了路堤填土的黏聚力对土拱效应的影响,以及分析水平加筋体与碎石垫层之间的相互作用,建立加筋体与碎石垫层之间相互作用的力学模型,导出水平加筋体的变形受力计算公式:通过分析水平加筋垫层对土拱效应的影响,改进 Hewle 工工算法,推导出桩网结构支承路堤的桩体荷载分担比和桩土应力比公式,并通过具体工程实测数据的对比分析,验证了改进算法的合理性和可靠性。徐林荣等对软土路堤桩-网复合地基的承载机理和应力传递机理,为桩-网复合地基的设计方法提供了新思路。同时结合沪宁城际铁路桩网复合地基试验段,对桩-网复合地基中基底土压力、土工格栅应力应变、桩和土的沉降及地基侧向位移等进行了长期测试,分析了桩土应力分担比的变化过程、土工格栅的受力特点、沉降及侧向位移规律,推导提出适用于桩网结构的复合地基沉降计算方法。

1.3.2　桩-板复合地基

桩-板复合地基结构是采用混凝土桩、梁、板来处理低填、挖方且地基软弱的一种结构形式。可解决软土地基沉降同时满足基床动力响应要求。“桩-板结构”在欧洲已有较长历史,在英国、比利时、荷兰等国家都发现该技术修建的道路。“桩-板结构”在控制沉降方面具有相当优越性能,我国工程技术人员独立自主研发出多种结构形式已应用在多条客运专线上。如京沪高速铁路 DK13 00 +600 +800 采用桩板结构处理深厚层软土低矮路基。桩板结构共 8 联,承台板采用 C30 钢筋混凝土沿线路纵向跨度 27m,承台板沿线路横向跨度 13m;承台板尺寸:双线 L×B×H =27m×13m×0.8m:桩采用 C30 钢筋混凝土桩径 0.8m。

针对桩-板复合地基承载特性,基于数值分析方法,丁铭绩[16]分析高速铁路 CFG 桩桩板复合地基工后沉降及其影响参数;黄宏伟等在考虑基础板的基础上,对水泥土桩加固复合地基的附加应力和沉降进行了分析。研究表明,基础板对于复合地基的应力和沉降有着重要的影响,对水泥土加固复合地基的设计和施工有一定指导作用。詹永祥等结合武广线桩-板结构路基的设计,初步探讨了桩板结构路基的设计方法,为桩板结构路基的设计及应用提供参考。秦瑞谦等[17]结合遂渝线无碴轨道综合试验段的钢筋混凝土桩板结构软基加固工程,就桩板路基结构和桩板路基地段双块式无碴轨道施工技术进行了总结,苏谦等结合郑西等高速铁路试验段,对桩板路基结构沉降控制效果进行了研究,并通过激振模型试验等对桩板结构的动力特性进行研究,结合试验结果,进一步验证了桩板结构理论计算模式的合理性与设计的安全性,并总结改进了桩板结构的理论计算,对桩板结构设计参数进行了优化。

1.3.3　桩-筏复合地基

桩-筏复合地基来源于房屋建筑工程,也称为沉降控制复合桩基或疏桩基础。桩-筏结构复合地基在国际上也被称为复合桩基,由桩、筏板和桩间土组成。如京沪高速铁路宿州站桩-筏结构:由 C30 混凝土筏板、工作垫层和高强预应力管桩组成。筏板与桩固结(桩基钢筋笼与筏板钢筋连接,一起浇筑),筏板下铺有工作碎石垫层。

与传统由单桩组成的复合地基相比,桩筏结构体系具有刚度大、承载力高、整体性好等特点。适用于荷载较大,地基承载力较低的地基条件。桩基础与筏板锚固连接后,可防止桩的侧向变形,筏板可均化上部荷载传递到地基的分布形式,桩基可将荷载传递至地基土中相对持力层,可有效解决局部应力集中、整体沉降和不均匀沉降等问题。

在建筑地基处理领域:Baziar 等曾进行了系统的模型试验,深入研究了筏板刚度、桩长、桩数及桩的布置方式对桩筏复合地基的影响;试验结果表明,复合地基中的桩可有效减小沉降量及筱板中的弯矩。郑刚等[18]人通过大量的模型试验深入研究了桩筏复合地基沉降控制机理,其中重点研究了桩顶与筏板之间不同构造形式下桩筏复合地基工作性状的差异。试验结果表明桩顶与筏板的不同连接方式可显著影响桩间土的压缩及桩土相对滑移。宰金珉等[19],通过设计系列单桩带台与群桩的桩筏基础模型试验,研究了极限荷载下桩一筏板一地基土的应力与变形性状。试验结果表明,6 倍桩距可视为常规桩基与复合桩基

的分界点。

在高速铁路地基处理领域:曾俊铖等[20]等人对京沪高速铁路中采用的 CFG 桩筏夏合地基进行了现场试验研究,通过测量得到了桩身轴力及侧摩阻力的分布规律。试验结果表明桩身受力与路基填筑高度及地基土固结密切相关。徐林荣等在京沪高速铁路桩筏结构复合地基进行了长期的现场试验研究,测试桩筏结构受力特性、桩土压力、孔隙水压等随时间荷载的变化,分析了筏板、褥垫层、桩的荷载传递规律。探讨桩筏复合地基固结特性与沉降计算方法。

1.4 振密、挤密技术应用与研究进展

1.4.1 强夯法

强夯法又名动力固结法或动力压实法;通过一般重达 8 ~ 30t 的重锤(最大可达 200t)和 8 ~ 20m 的落距(最高可达 40m),反复对地基土施加很大的冲击能,一般能量为 1000 ~ 8000kN · m。在地基土中所产生的冲击波和高应力,可提高地基土的强度、降低土的压缩性、改善砂土的抗液化条件、消除湿陷性黄土的湿陷性等。同时,夯击还可提高土层的均匀程度,减少将来可能出现的差异沉降。

董倩等针对山区碎石土回填地基的特点,探讨采用公式估算法及试验检测法评价其强夯加固效果的有效性、合理性,并结合实际工程进行了对应分析。王旭利用土力学基本原理,推导了一定拟静力作用下的土体夯沉量。根据动量定理,推导了锤一土接触历时,求得强夯施工时的拟静力。在两者的基础上,计算了强夯后的土体相对密度。张建辉等提供了在 3000kN · m 和 8000kN · m 夯击能下,夯击点表面及其下面不同深度处土层沉降的结果,并分析和研究了土层沉降的变化规律,最后对强夯加固的深度预测做了探讨。安春秀等对某 1000kV 特高压变电站高回填碎石土地基强夯工程利用瑞利波法、动力触探法和静载荷试验法所得的相关试验数据,运用统计学的原理,研究分析了三者试验结果之间的相关关系,推测出强夯的影响深度,提出基于梅纳公式的折减系数,同时,利用瑞利波试验数据对其他土力学参数进行了验算,从而对强夯地基作出科学合理的评价。

张清峰[21]等对煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究。之后又通过强夯法加固煤矸石地基物理模型试验,用 DH5939 动态应变仪完整地记录了强夯每一击作用下煤矸石地基中的动应力,系统地研究了不同夯击能和夯击次数作用下不同深度煤矸石地基动应力的分布特征及其衰减规律。张忠苗等对浙江某工业园区强夯法处理地基的事故进行了分析。胡涛等以娄新高速公路岩溶塌陷地基强夯加固工程为背景,对强夯法的主要参数设计、强夯试验和强夯加固岩溶地基效果进行分析。倪宏革等利用风化花岗岩混合通过对潍坊市郊区深坑中高填路堤进行分层强夯填筑,并进行了监测。

1.4.2 振冲密实法

振冲密实法是利用振动和压力水使砂层液化,砂颗粒相互挤密,重新排列,孔隙减少,从而提高地基承载力和抗液化能力,故又名振冲挤密砂桩法。该方法适用于处理松砂地基。振冲时,因振动力强大,振冲器周围一定范围内的饱和砂土发生液化。液化后的土粒在自重、上覆土层压力以及碎石挤压力作用下重新排列,土因孔隙体积减少而得到密实,因此提高了地基承载力,减少了沉降。另一方面,由于预先经历了人工液化,砂土抗地震液化能力也得到提高;同时,已形成的碎石桩,作为良好的排水通道,可使地震时产生的孔隙水压力迅速消散。因此,振冲密实法的加固机理就是振动密实和振动液化。

李进元[22]等结合阴坪水电站工程实践,通过使用大功率机械设备并采取工程措施,在复杂工程地质条件下,阐述了大面积、大深度振冲碎石桩法有效解决地基砂土液化问题、承载力问题、抗剪强度问题,并对复合地基参数取值及如何解决施工中遇到的问题进行总结。周元强等利用试验成果,通过振冲桩施工前后土体的三相组成分析,量化振冲碎石桩的挤密、振实功效,推导出饱和粉土经振冲法处理后的工后孔隙比估算方法,估算结果与实测值的误差在 ±1.5% 以内。利用该方法可以迅速接近最佳的桩距、桩径组合,为节省试验费用和加快试验进度提供可靠的依据。何开胜等对长江下游河漫滩地新吹填的松散粉细砂,通过原位监测仪器和跟踪检测,进行了无填料振冲试验、施工技术开发和设计应用。研究了无填料振冲过程中桩周土的超静孔压变化与振冲有效范围,比较了振冲密实前、后桩周土强度变化。针对施工跟踪检测中发现的桩身土局部欠密实问题,分析了缺陷产生原因,提出了解决措施。

1.4.3 夯实水泥土桩

针对夯实水泥土等截面桩复合地基开展了系统的研究。郭忠贤等[23]对夯实水泥土桩复合地基进行了大量的研究,对桩-土应力比、桩间土、承载力特征值、强度破坏模式、荷载传递规则及侧摩阻力等因素对地基强度的影响。司海宝和肖昭然基于载荷试验结果,利用通用有限元软件 ABAQUS 对夯实水泥土桩复合地基进行了数值模拟性。在国内,刘杰等[24]首次提出采用夯实水泥土楔形桩复合地基加固软土地基,并在合理假定的基础上,构建了夯实水泥土楔形桩复

合地基工作性状的分析方法,并结合模型试验结果,验证了该方法的可行性,得到了夯实水泥土楔形桩复合地基中桩合理楔角范围为 1.0°~3.5°。

1.4.4　孔内夯扩法

采用孔内夯扩法加固地基,首先在地基中成孔,然后在孔中分层填料,并分层夯实填料形成桩体,并在制桩过程中挤密、振密桩间土,通过夯实夯扩填料形成的桩体和挤密的桩间土形成复合地基达到提高地基承载力和减小沉降。孔内夯扩加固地基的原理是通过夯扩桩体,使桩体直径加大、而且密实,达到提高桩体承载力。同时在夯扩制桩过程中使桩间土振密、挤密,桩间土承载力也得到提高。

近年来,各地工程技术人员根据工程地质条件,充分利用地方材料,因地制宜,发展了多种孔内夯扩技术。工程中采用孔内夯扩法加固地基的成孔方法主要有:振动沉管法、人工挖孔法、螺旋钻取土成孔法、柱锤冲击成孔法、爆破成孔法。采用孔内夯扩法加固地基的回填料主要有:由石灰和土拌合制备成灰土、由石灰、粉煤灰和土拌合制备成二灰土、由水泥和土拌合制备成水泥土、由水泥和建筑垃圾制备成渣土、碎石、砂石、矿渣、其他地方材料。

杨玉栋等提出用人工挖孔桩的方法处理人防地道,涂装车间已投入使用之后多年,沉降观测结果,两排桩基沉降大致均匀,差异沉降在容许范围内。利用此种方法,在处理类似的防空洞地基时,同样获得了成功。曹贤发为预防人工挖孔桩窜孔,探讨了桩间土失稳机制,分析了桩间土失稳时的位移特征,建立了桩间土稳定性分析的力学模型,推导了桩间土稳定系数及安全桩净距的计算公式,提出了窜孔防治措施建议。

1.5　土工合成材料加筋技术应用与研究进展

近年来,土工合成材料加筋技术被广泛的应用到地基处理领域中,并取得了显著的效果。包承纲等[25]提出一种新的综合性加筋机制,将筋材的加固机制大致分为直接加筋和间接加固作用,前者是指土与筋材接触面之间以及紧邻的剪切带(界面)的加筋作用,后者是指加筋材料对周围土体的刚度、应力和应变分布以及破坏形式等的影响和加固作用。由此可知,筋材的加筋作用不仅发生在接触面和界面上,而且还发生在界面以外的土体内,使筋材周围一定范围内的土体形成“加筋土体”。土工合成材料被广泛应用于以下几个方面:

(1)土工合成材料(如土工格栅、土工格室以及土工布等)设置在褥垫层中,与桩基组成桩-网复合地基形式加固桥台地基、控制工后沉降[26]。

(2)土工合成材料与土体(或粗粒料)交错布置形成加筋土,加强土体的抗震性能[27]、提高墙体的水平向抗力,以及整体稳定性。

(3)土工合成材料与散体材料桩联合使用,提高散体材料桩的侧向抗力;如加筋碎石桩、布袋注浆桩等。

此外,吴景海等[28]以 5 种国产土工合成材料为加筋材料(分别是针刺无纺土工织物、涤纶纤维经编土工格栅、玻璃纤维土工格栅、聚丙烯双向土工格栅和聚乙烯土工网),用三轴试验比较各种土工合成材料对砂土的加筋效果,可指导土工合成材料的优选和研究加筋机理,同时指出部分国产土工合成材料产品的不足。周镜等[29]从荷载传递与分配、加筋垫层格栅的张拉力和路堤横向滑移三个方面介绍英国、日本、德国和北欧规程中有关加筋垫层桩支承路基的计算方法。分别采用这些计算方法对两个算例的加筋垫层格栅张拉力进行计算,发现计算结果相差较大。不同方法计算结果产生差异的原因是,各规范对拱效应、作用于桩间垫层上的荷载、垫层加筋体张拉力等的计算方法差异较大。建议结合我国铁路建设工程实际,对现有方法中存在的问题进行系统和有计划的研究,建立我国自己的加筋垫层桩支承路基的设计理论和方法。

1.6　灌入固化物技术应用与研究进展

灌人固化物法也称为胶结法,是指向土体内灌入或拌入水泥、水泥砂浆以及石灰等化学固化浆材,在地基中形成加固体或增强体,以达到地基处理的目的。灌入固化物法主要有深层搅拌法、高压喷射注浆法、水泥加固地下连续墙法(TRD)法、灌浆法,灌浆法按工艺又可分为渗入性灌浆、劈裂灌浆、挤密灌浆、化学灌浆等方法。

1.6.1　深层搅拌法

深层搅拌法是于 20 世纪 60 年代日本和瑞典分别开发研究成功的一种用于加固深层软土的方法。我国于 1977 年开始深层搅拌法的室内试验和搅拌机械的研制工作,1978 年研制出 SJB-1 型双搅拌轴、中心管输浆的深层搅拌机及其配套设备。1984 年我国开始生产 SJB 型成套深层搅拌机,首次成功应用于广东铁路工程软地基加固。2002 年上海探矿机械厂为配合土墙水泥墙工法——SMW 工法而研制生产出二种三轴钻孔搅拌机。2009 年我国引进了国外的双轮铣槽机(SCM)工法[30],并在此基础上研发和钻研出了符合国内施工环境的工法及配套仪器。

深层搅拌法适用于加固各种成因的饱和软粘性土。含有蒙脱土黏土矿物的软土加固效果较好;含伊

利土、氯化物和水铝英石等黏土矿物的软土以及有机质含量高、酸碱度(pH 值)较低的软土加固效果较差。

深层搅拌法最大限度地利用了原土,搅拌时无振动、噪音小、无污染可在密集建筑群中进行施工,对周围原有的建筑物及地下沟管影响很小。根据上部结构的需要,可灵活的采用柱状、壁状、格栅状和块状等平面布置加固形式。与钢筋混凝土桩基相比,可节约钢材并降低造价。

但深层搅拌法是使用搅拌头将浆液和软土强制搅和,搅拌次数越多,拌和越均匀,水泥土的强度越高。但搅拌次数越多,施工时间越长,工效越低,它比混凝土灌注桩的强度要小,变形模量要小,且不均匀。

1.6.2 高压喷射注浆法

高压喷射注浆技术[31]是 20 世纪 70 年代末从日本引进的一种加固松软土体的应用技术,是由化学注浆技术结合高压(20 ~ 40MPa)射流切割技术发展起来的其实质是采用钻机先钻进至预定深度后,由钻杆一端安装的特别喷嘴,把水泥浆液高压喷出,以喷射流切割搅动土体,同时钻杆边旋转边提升,使土粒与水泥浆混合凝固,从而造成一个均匀的圆柱状水泥土固结体,以达到加固地基和止水防渗的目的。当前,高压喷射注浆法的基本工艺类型有:单管法、二重管法、三重管法。为适应日益复杂的工程建设环境和不断提高的工程建设要求,我国又先后引进了 MJS 工法(Metro Jet System)和 RJPP(Rodin Jet Pile)系列工法促进了国内高压喷射注浆工艺的进一步发展。

1.6.3 水泥加固地下连续墙法(TRD)

TRD 工法[32]又为水泥加固地下连续墙法;其基本原理是利用链锯式刀具箱竖直插入地层中,然后作水平横向运动,同时由链条带动刀具作上下的回转运动,搅拌混台原土并灌入水泥浆,形成一定厚度的墙。其主要特点是成墙连续、表面平整、厚度一致、墙体均匀性好。主要应用在各类建筑工程、地下工程、护岸工程、大坝、堤防的基础加固、防渗处理等方面。由日本 20 世纪 90 年代初开发研制,我国于 2007 宁抚挖重工机械股份有限公司与日方企业合作引进“TRD”引进这一项技术,同年试车成功,填补了我国 TRD 工法机自主化生产的空白。之后 TRD 工法在我国逐渐推广,我国的南昌绿地广场、丰贤中心企业总部大厦、中钢天津响螺湾项目及淮安雨润中央新天地等工程都利用了 TRD 工法,取得很好的效果。

1.6.4 灌浆法

灌浆法于 1802 年由法国的 Charles Berlghy 所发明,最先用在 Dieppe 冲刷闸的修理上。1856 ~ 1858 年,水泥第一次被用于灌浆。灌浆法在我国的大量采用是在 1949 年新中国成立之后。随着工艺的不断进步,灌浆法也逐渐衍生出各种类型的工艺,主要有渗入性灌浆、劈裂灌浆、挤密灌浆以及化学灌浆等方法。

针对常规水泥浆液的渗入性灌浆、劈裂灌浆以及挤密灌浆,相关研究人员探讨了其注浆引起的大变形,加固机理以及加固效果,为相关工程设计提供参考[33-34]。

化学灌浆是将一定的化学材料(无机或有机材料)配制成溶液,用化学灌浆泵等压崧设备将其灌入地层或缝隙内,使其渗透、扩散、胶凝或固化,以增加地层强度、降低地层渗透性、防止地层变形和进行混凝土建筑裂缝修补的技术。化学灌浆是于 1886 年德国人 Jeziorsky 创造性地采用一个孔灌入硅酸盐溶液、相邻孔灌入氯化钙固化物的土壤硅化法。1925 年荷兰工程师 Joosten 论证了硅酸盐化学灌浆的可靠性。20 世纪 50 后各种不同的化学灌浆材料开始大量出现,我国于 1965 年投产(丙凝)发展至今,已有数十种化学灌浆材料。化学灌浆较水泥灌浆要更易渗透到细微岩土或混凝土裂隙之中,同时,化学灌浆无需破坏原基础结构。但化学灌浆因其材料的原因可能会对环境产生污染,绿色化学灌浆时化学灌浆的主要发展方向。我国常用的化学灌浆材料主要可分为两大类六个系列上百个品牌:一是放渗止水类,水玻璃、丙烯酸盐、水溶性聚氨酯、弹性聚氨酯和木质素浆等;二是加固补强类,有环氧树脂、甲基丙烯酸甲酯、非水溶性聚氨酯浆等,近年来应用最多的是水玻璃、聚氨酯和环氧树脂浆材。

1.7 托换、纠倾与迁移技术应用与研究进展

1.7.1 托换技术

托换技术也称地下托换,狭义上讲是在现有基础的下部增加新的永久性支撑物或基础以提高现有建筑基础的承载力;广义上讲还包括对现有基础建筑物进行加固补强、对建筑物的持力层地基进行改良、新基础设置及新旧基础替换等工程[35]。托换技术在 20 世纪 30 年代美国兴建纽约市的地下铁道时得到迅速发展。近年来大型和深埋的结构物和地下铁道的大量施工,对现有建筑物的改建、加层或加大使用荷载时以及事故建筑物处理都需要采用托换技术。我国广州轨道交通三号线隧道施工中综合运用了筏板基础、袖阀管注浆复合地基和托换法;浙江杭州某高层宾馆加固中运用了混凝土桩进行全柱托换;中国工商银行扬州分行办公楼主楼施工中运用静压锚杆桩托换技术等[36]。

地下托换技术通常用在以下四种情况:①原有建筑物地基的承载力不足;②移动现有建筑物;③在既

有建筑物基础的接近处或正下方修建新的地下工程时,为了防止现有建筑物下沉、倾斜;④由于地震以及地面沉降等原因,造成现有建筑物的下沉及倾斜,对现有建筑物进行纠偏复位。

托换方案的制定主要可从几个方面考虑:

(1)通过改良地基的土体,提高地基土抗剪强度、改善压缩性以满足工程要求,常用方法有:压力注浆、高压喷射注浆、机密加固等技术。

(2)通过加宽原有基础,减小基底接触压力,使满足工程要求,常用方法有:基础加宽;改条形基础、独立基础为阀片基础等。

(3)在地基中设置墩基础或者桩基础等竖向增强体,通过复合地基作用来满足承载力和变形要求,常用方法有:锚杆静压桩、树根桩、钻孔灌注桩等加固技术。

(4)将上述几种技术综合应用。

当前所托换的工程数量日益增多,托换技术也是在应用中发展,托换工程不但需要应用各种地基处理技术,同时需要善于巧妙和灵活地综合选用这些技术,达到既满足工程要求又节约实际成本的目的。

1.7.2　纠倾技术

建筑物由于各种原因产生倾斜,当倾斜值或者沉降量超过允许值时,为了保证建筑物的功能而采用一定的工程措施对建筑物进行扶正,称为纠倾技术[1]。

常用纠倾技术将纠倾加固分为迫降纠倾和顶升纠倾两类。迫降纠倾是通过人为降低沉降较小处基础标高来达到纠偏的目的,常见方法有:基底掏土纠倾法、井式纠倾法、钻孔取土纠倾法、堆载纠倾法、降水纠倾法、地基加固纠倾法、浸水纠倾法等,其中建筑物迫降纠倾中基底掏土纠倾应用最为广泛。顶升纠倾是人为在沉降较大的一侧采用高压注浆和压桩方法,利用压力注浆在地基土中产生的顶升力和桩作为支承点提高的竖向反力,将建筑物抬升,从而达到纠倾的目的。常见的方法有:静压桩顶升法、压密注浆顶升法和石灰桩顶升纠倾法等[1]。

早在 20 世纪 80 年代,纠倾技术在我国就开始运用于实际工程[37]。最典型的一个工程实例即是使苏州的虎丘塔,由于塔基的黏土层厚薄不均,纠倾前塔顶北偏东最大偏移达 2.34m,在对地基进行加固的过程中,在南半部采用了平钻孔掏土纠倾等措施调整不均匀沉降值,结果塔身顶点向南回调 7mm,向西回调 25mm,当时这个尝试为纠倾技术的发展提供了宝贵的经验。现如今,纠倾技术不断发展,方法也逐渐多样化,更是广泛运用于产生倾斜的建筑物地基加固,但是关于这些纠倾方法的系统的理论研究较少。此外,目前的一些纠倾方法主要应用于浅基础,对深基础的讨论较少,这些都促使工程技术人员不断寻找新的理论和方法。

1.7.3　迁移技术

迁移是指通过托换技术使建筑物与基础在某一位置分离,采用钢混或者钢结构进行托换,形成可支承整体的体系。当设置相关轨道及装置即可使建筑物在受力时产生迁移,到达新的位置。这些技术的总称为迁移技术。

迁移技术是伴随着顶升技术的发展而产生的,可用于一般建筑的迁移。并且建筑物迁移技术因为具有成本较低,工期较短,较为环保等优点,在既有建筑物保护与改造领域的应用日益广泛。我国的福建、广东、山西、河南等地区应用该技术较为广泛,经济社会效益十分显著。

建筑物迁移涉及到多个领域的专业技术知识,而我国在专业技术方面还有很长的路要走。从技术出发,迁移技术的发展趋势可简单归纳为技术专门化、多技术一体化和自动化。

2　地基处理技术新进展

2.1　排水固结法

2.1.1　新近吹填土处理技术

新近吹填淤泥软土的工程特性差,承载力近乎为零,处理难度非常大。通常,需要预先处理以达到满足施工机械进场的要求,再进行进一步的加固工作。真空预压法是处理吹填土的一种常用方法,但在处理吹填土时,单一的真空预压法是比较困难。近年来,为了能够更快速、有效的对吹填土进行处理,新吹填土的处理发展了一些新技术,如电渗复合真空覆水预压法、复式负压固结技术、底部抽真空预压法等。

针对吹填土的固结机理,颜永国[38](2011)对 7 组不同颗粒级配的试样进行真空预压室内模型试验,研究了土体的沉降量、排水量、物理力学试验等几个方面的变化,得出了吹填土的颗粒级配对加固效果的影响;梁爱华等(2013)通过对天津临港产业区的新近吹填土进行试验,得出采用较小的排水板间距(0.4 ~ 0.6m)和滤管踩入式真空排水加固超软土的技术能有效的提高超软土的地基加固强度,并缩短加固时间;王军[39](2014)等通过对直排式真空预压法的技术改进和创新,提出了一种滤膜为无凹凸结构亲水性材料的新型防淤堵排水板,并在室内和现场试验对该新材料进行研究。

2.1.2　化学电渗法

化学电渗法是在常规电渗法的基础上发展起来的,在阴阳电极附近分别注入硅酸钠溶液和氯化钙溶液,在直流电场的作用下,化学溶液发生化学反应,生成碳酸钙沉淀物加固土体,加速土体固结速率,并提高土体强度。该技术方法在处理桥台地基等工程中得到应用;台湾欧章煜等针对化学溶液浓度、适用土性种类以及处理效果等开展了系列室内试验研究,并丰富和完善了相应的施工工艺方法[40-41]。国内针对该技术的研究与应用尚处于起步阶段。

2.2 灌入固化物法

2.2.1 高聚物注浆

高分子材料,又称聚合物材料。早在 1937 年德国化学家 Otto Bayer 发现了异氰酸酯与活泼氢化合物的聚合反应,从而建立了聚氨酯化学的基础;并在维修勘萨斯州 50 公路、维修田纳西州某公共排水管道、维修 Dulls 国际机场道面等国外道路、机场跑道、桥头跳车等基础设施的快速维修中取得了 75000 多例成功的应用;我国的高分子材料的研究起步于 20 世纪 50 年代初,在国内工程中该技术的应用才刚刚起步。

高聚物注浆技术用到了高聚物材料混合物的膨胀特性,以稳定土基和抬升路面、地板或建筑物,并且提高地基的承载力。聚氨酯除了拥有膨胀的特性外,还可以抵抗霉菌和真菌的侵蚀。其拥有轻质、早强、防水、耐久、安全、快速、微损、可控。高聚物注浆主要用来脱空填充、稳定、抬升和密封。

高聚物注浆在国内的水泥混凝土道路的维修及高速路的养护和维修上也有着不俗的表现。国内王复明等开展了高聚物处治道路孔洞、高聚物防渗墙、以及高聚物注浆锚杆等应用研究[42-43];近年来,边学成[44]等针对在路基表层和轨道混凝土底座之间进行高聚合物注浆的方式实现轨道结构的整体均匀抬升,并开展抬升后路基在列车长期荷载作用下的动力稳定性。

然而,高聚物注浆虽拥有着许多的优点,但其成本费用与人工费用较高一直是制约其发展的主要因素,这也是高聚物注浆改进的目标。

2.2.2 微生物注浆

微生物灌浆加固技术是利用一项微生物成矿学的最新进展,即微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP),通过向松散砂土地基中低压传输微生物细胞以及营养盐,最终在砂土孔隙中快速析出碳酸钙胶凝结晶,改善地基力学性能[45-46]。微生物灌浆加固技术具有扰动小、工期短、加固效果明显和低耗能等优势,是目前地基加固研究的前沿问题。

2005 年 Mitchell & Santamarina 首次明确提出生物作用可以改善土体特性,并指出可以利用这一潜在的生物过程来解决岩土工程中的问题[47],与此同时美国国家研究委员会(NRC)将微生物岩土工程技术确立为 21 世纪一个重要的研究课题。

近十年来,国内外研究机构对微生物灌浆技术开展了大量的研究,取得了一定的成果。从微观尺度研究认识了 MICP 加固机理,并针对影响菌液浓度、酶活性、营养液浓度、pH 值、灌浆方式等影响因素开展了研究[48-49]。在室内试验中,Dejong 等通过固结不排水三轴剪切试验发现微生物诱导碳酸盐沉淀可以显著提高砂土的剪切刚度和极限承载力,且砂土试件剪切破坏时有明显的应变软化行为[49]。程晓辉等通过标准动三轴及小型振动台试验,研究了微生物灌浆加固液化砂土的抗液化性能,以及其动力性能[50]。在地基原型尺度上 MICP 灌浆加固的研究也有了一定进展,Whiffin 等在 5m 长砂柱中,通过低压灌浆方式对其进行加固,加固结束后砂柱内碳酸钙沉淀生成量平均为 $60kg/m^3$;且固化后砂样最高抗压强度达 570kPa[51]。Van Paassen et al. 进行了 $100m^3$ 大规模原位砂基加固的实验研究,连续灌浆加固 16d 后砂基内生成的碳酸钙量平均为 $110kg/m^3$,切块砂样的单轴抗压强度为 0.7 ~ 12.4MPa,砂基平均剪切波速为 300m/s,有效提高了砂基的承载力与刚度[52]。

通过微生物灌浆胶结砂土的室内试验与模型试验研究,使得其改性与加固现场软弱土体成为可能。2010 年荷兰代尔夫特理工大学首次将微生物灌浆技术应用于现场,即利用微生物灌浆加固一层粘结性较差的砂砾石层,成功阻止其失稳塌落。加固结束后砂砾胶结体中方解石含量高达 6%,并且在进行水平定向钻孔和天然气管道铺设时,砂砾层一直保持着稳定状态,没有发生坍塌事故。微生物灌浆的首次现场应用取得了很好的试验效果。尽管如此,目前关于 MICP 加固土体的研究还主要局限于室内试验,大规模工程应用实例还很少,微生物灌浆施工经验明显不足,因此有必要进一步开展大尺度灌浆模型试验以及现场应用试验,总结软弱地基中微生物灌浆技术的实践经验,以推动该技术在岩土加固领域中的广泛应用。

2.3 刚性桩复合地基法

2.3.1 刚性桩复合地基

(1)横截面异形桩

现浇混凝土大直径管(PCC)桩复合地基,自 2002 年开始应用于高速公路地基处理工程中以来,逐渐在高速铁路、高速公路、市政道路,大型油罐及煤气柜地基处理,污水处理厂大型瀑气池、沉淀池基础处理,以及江河堤防的地基加固等工程中得到推广应用[53-54]。

近年来,随着工艺更新和处治复杂地层等要求的提高,逐步发展了超长 PCC 桩接桩技术以及快速 PCC 桩浇注技术等新工艺。

现浇 X 形桩复合地基技术,利用 X 形截面替代圆形截面浇注成比表面积更大的新型桩。针对现浇 X 形桩复合地基的承载力与沉降特性,相关研究人员开展了系列研究并取得了一些成果,为该新技术的广泛应用打下了良好的基础。该技术普遍适用于黏性土、粉土、淤泥质土、松散或稍密砂土及已完成自重固结的素填土等软土地基处理;经工艺试验成功且制定了质量保证措施等情况下,也可以在厚度较大、灵敏度较高的淤泥和流塑状态的黏性土等软弱土层中采用。

Y 形桩复合地基技术,也同样利用横截面异形效益扩大桩侧摩阻力;增加了其桩侧摩阻力与惯性距,同时还保持了传统沉管灌注桩的优点。目前该技术已在申苏浙皖杭浦申嘉湖高速公路软基处理中应用。与其它同类技术相比造价节约 20% ~25%[55]。

(2)纵截面异形桩

螺钉桩、挤扩支盘桩、扩底楔形桩、哑铃桩等新型纵截面异形桩复合地基技术,近年来在建筑基础地基处理中得到广泛应用[56-57]。工程应用表明,纵截面异形桩与横截面异形桩类似,均可以有效提高单位材料利用率,充分发挥混凝土材料的支撑力。

(3)组合桩

高喷插芯组合桩(JPP 桩)是在高压旋喷水泥土中插入预应力混凝土桩(或沉管桩、钢桩等)作为芯桩而形成的一种新型组合桩;由高压旋喷水泥土桩与强度很高的芯桩两部分组成。相关工程研究表明,JPP 组合桩型承载力比芯桩承载力提高一倍以上,而综合造价却降低三成。本技术适应地层比较广泛,可普遍应用于桩基设计施工中;尤其适合我国沿海软弱地基的施工。目前已通过天津市建委新技术、新产品推广使用认定[58]。

(4)浆固碎石桩

浆固碎石桩是在碎石桩的基础上,灌入水泥浆液,形成直径为 300 ~700mm 左右的浆固碎石桩;浆固碎石桩施工所占用的场地较小,在施工过程中无振动无噪音、不挤土,对周围建筑物影响很小,且施工机械轻便、速度快;同时在注浆过程中浆液可同时改善桩间土的强度及桩土摩擦阻力,提高承载力。浆固碎石桩已在杭-千(杭州至千岛湖)、宁波绕城高速公路等工程中得到应用[59];相关研究人员,基于工程应用开展了浆固碎石桩复合地基承载特性现场试验,建立了路堤极限平衡条件下浆固碎石桩的桩土应力比的理论公式,浆液扩散范围计算公式,以及复合地基沉降的计算公式。

2.3.2　柔性桩复合地基

柔性桩复合地基主要包括加筋碎石桩、土工织物袋装砂桩、双向水泥土搅拌桩、灰土桩以及 CFG 桩复合地基等。柔性桩的加固机理主要是置换作用,破坏形式以刺入破坏为主,有时会出现桩身破坏。

(1)加筋碎石桩

加筋碎石桩[60]是在传统的碎石桩桩顶一定深度范围内(2 ~3 倍桩径)或者通长设置竖向土工套筒形成新型的加筋碎石桩。竖向土工套筒由强度较高的土工材料(土工织物或土工格栅)等制作而成。土工套筒在碎石桩侧向鼓胀时提供额外的侧向约束,提高桩体刚度,其作用类似于钢筋混凝土柱中的箍筋约束。同时,土工材料套筒能防止碎石颗粒挤入周围土体,保持碎石桩的摩擦特性和排水通道。竖向土工加筋体能有效约束碎石桩的侧向鼓胀,在微小侧向变形内提供足够的径向约束应力,提高桩体极限承载能力。筋箍碎石桩的桩-土应力比明显大于传统碎石桩,上部土工加筋体在提高桩体承载力和刚度的同时,可有效地将上部荷载传递至桩底较好土层。

(2)布袋加筋注浆桩

布袋加筋注浆桩[61]是采用适当的注浆设备通过加筋注浆管将浆液注入预先埋设与软土中的土工布袋内,浆液在布袋内的压力大于布袋周围的被动土压力时,膨胀布袋并压密土体,浆液在袋内析水硬化,与加筋注浆管一起形成较规则的圆柱状或葫芦串状的桩体。它与周围土体共同形成复合地基,达到加固软土地基和提高承载力及复合模量的目的。加筋注浆管材料为 PPR 管,具有重量轻、强度高、韧性好、耐久性强、抗腐蚀性好等优点,但其抗压性能较差,而水泥砂块具有较好的抗压性能;与钢筋混凝土的工作原理相似,加筋注浆管与水泥砂块结合能够形成一个整体共同受力,达到扬长补短的效果。

(3)双向水泥土搅拌桩

双向水泥土搅拌桩[62]是指在水泥土搅拌桩成桩过程中,由动力系统带动分别安装在内、外同心钻杆上的两组搅拌叶片,同时正、反向旋转搅拌水泥土而形成的水泥土搅拌桩。该装置对现行水泥土搅拌桩成桩机械的动力传动系统、钻杆以及钻头进行改进,采用同心双轴钻杆,在内钻杆上设置正向旋转搅拌叶片并设置喷浆口:在外钻杆上安装反向旋转搅拌叶片,通过外钻杆上叶片反向旋转过程中的压浆作用和正、反向旋转叶片同时双向搅拌水泥土的作用,阻断水泥浆上冒途径,把水泥浆控制在两组叶片之间,保证水泥浆在桩体中均匀分布和搅拌均匀,确保成桩质

量。双向水泥土搅拌桩是对常规设备进行适当改进，易于推广，同时由正反向叶片同时旋转、切割、搅拌水泥土体，使工效提高 1 倍以上。

3 地基处理标准化建设

随着我国经济的飞速发展，规模宏大的工业与民用建筑、水利工程、环境工程、港口工程、高速铁路、高速公路、机场跑道、大型油罐等基础设施的兴建，对地基处理质量的要求越来越高，各地区因地制宜地提出了众多地基处理新技术、新工艺。各级科研单位和相关研究人员在总结科研成果与工程实践经验的基础上，编制、修订了多本相关的规范、规程，而这些成果也集中反映了我国近十年来在地基处理领域所取得的最新理论进展与实践经验。下面将针对这些内容展开介绍。

3.1 较为综合性的地基基础规范的修订与编制

近四年来，我国修订、编制了多本综合性的建筑地基基础方面的规范、规程，包括 JGJ 123—2012《既有建筑地基基础加固规范》[63]、GB/T 50290—2014《土工合成材料应用技术规范》等[64]的修订，以及 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》[65]等相关规范的编制。

3.1.1 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》

复合地基概念提出伊始，主要是指采用碎石桩加固形成的人工地基，但随着该技术在土木工程领域广泛的推广应用，例如以钢筋混凝土桩复合地基为代表的刚性桩复合地基的产生，复合地基理论也取得了进一步发展。如果将散体材料桩形成的人工地基称为狭义复合地基，则可将包括散体材料桩、各种刚度的黏结材料桩以及各种形式的长-短桩形成的人工地基称为广义复合地基。至此发展形成了广义复合地基理论，而该规范也是基于广义复合地基理论而编写的。针对复合地基工法的设计、施工和质量监测进行了归纳和总结，具体内容与特色如下：

(1)针对同属于散体材料桩复合地基的挤密砂石桩复合地基和置换砂石桩复合地基，两者在成桩方法、加固机理、计算方法、应用范围和发展趋势上都有相近之处，规范编制时将两种工法紧密排列，前者在成桩过程中针对具体的工况可采用沉管、振冲、锤击、夯扩等方法施工，桩间土被挤密或振密，由砂石桩和被挤密的桩间土形成复合地基。后者按施工方法可分为振动水冲(振冲)置换碎石桩复合地基和沉管置换砂石桩复合地基，成桩过程只有置换作用，桩间土未被挤密或振密，由砂石桩和桩间土形成的复合地基。

(2)刚性桩复合地基中的桩体可采用水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)、钢筋混凝土桩、素混凝土桩、预应力管桩、大直径薄壁筒桩、二灰混凝土桩和钢管桩等刚性桩，桩体采用摩擦型桩，为了可以提高桩间土的承载力，其设计要点之一就是需要在复合地基与基础之间设置垫层，尽量使桩发挥的实际承载力不会超过设计分配量，施工时根据具体工程条件选择适当的成桩方法、设置合理的桩间距等。

(3)长-短桩复合地基的竖向增强体由长桩和短桩组成，这是与单一桩体复合地基最大的不同，其中长桩采用刚性桩，支承到较好的土层上；短桩采用柔性桩或散体材料桩，穿过浅层最软弱土层，该技术也可用于处理、湿陷性黄土、可液化土等特殊土质。

(4)该规范中的桩-网复合地基覆盖了桩承堤。但两者有明显的区别，桩-网复合地基中的荷载由桩和桩间土共同承担，换言之，加筋垫层下桩间土将直接参与承担荷载，桩-网复合地基中的桩应是摩擦型桩，而在桩承堤中荷载通过拱作用和土工格栅加筋垫层作用，加筋垫层下桩间土不会直接参与承担荷载，荷载全部由桩承担，桩承堤中的桩应是端承刚性桩，所以该规范中桩-网复合地基的设计与施工也可应用于桩承堤。

3.1.2 JGJ 123—2012《既有建筑地基基础加固技术规范》

随着城市地下空间的开发利用、地下轨道交通的建设等，既有建筑地基基础加固越来越受到关注和重视，其涵盖内容包括地铁穿越既有建筑地基基础引起的基础、地基托换，既有建筑小区增加地下车库、地下商场而进行的地基基础加固，软土地基沉降造成的建筑物损害等，在这些情况下应对影响区域的建筑物地基基础重新实施评估、加固等措施，并对现有的既有建筑地基基础加固技术提出了更高的要求。在此前提下，JGJ 123—2000《既有建筑地基基础加固技术规范》的修订工作随之启动，修订的主要技术内容有：

(1)增加加固后的既有建筑地基基础应满足建筑物承载力、变形和稳定性要求的规定；

(2)增加加固后的既有建筑地基基础设计使用年限应满足加固后既有建筑的设计使用年限的要求；

(3)增加既有建筑地基基础加固使用的材料应符合国家现行有关标准对耐久性和环境保护的要求；

(4)增加既有建筑的地基基础鉴定评价的要求；

(5)增加确定既有建筑地基承载力特征值的持载试验方法；

(6)增加不同加固方法的承载力和变形计算方法；

(7)增加托换加固的内容;

(8)增加当既有建筑地基基础外部条件改变可能影响其正常使用或危及安全时,应遵循预防为主的原则;

(9)增加地下水位过大变化引起的事故补救内容;

(10)增加检验与监测内容。

3.1.3　GB/T 50290—2014《土工合成材料应用技术规范》[64]

土工合成材料是土木工程应用的合成材料的总称。它是以人工合成的聚合物为原料,制成各种类型的产品,置于土体内部、表面或各种土体之间,发挥加强或保护土体的作用,目前已被广泛应用于水利、公路、铁路、建筑、海港、军工等工程。自 GB 50290—98《土工合成材料应用技术规范》[65]发布以来,执行历时已超过 10 年,此间国内外在新材料、新技术或新理论等方面已取得较大创新和发展,原规范已日渐局限,因此对该规范进行了修订,修订的主要内容有:

(1)补充了术语(如土工合成材料隔渗材、软体排、格宾、包容、吸水速凝挡水子堤、土工合成材料加筋桩网基础等)的解释及英文翻译;

(2)增加了环保等土工合成材料应用领域的内容;

(3)补充了新型材料,完善了土工合成材料分类体系;

(4)修改了材料的强度折减系数,增加了材料渗透性指标的折减系数;

(5)反滤和排水一章增加了土坝坝体排水、道路排水、地下埋管降低地下水位等节内容;

(6)防渗一章增加了黏土土工合成材料隔渗材(GCL)用于防渗内容,完善与增加了土工膜隔渗材的设计与施工相关条目内容;

(7)防护一章增加了防汛抢险、土工系统用于防护等节内容;

(8)加筋一章增加了软基上加筋桩网结构的设计与施工内容;

(9)增加了施工检测一章。

3.1.4　其他地基处理规程

随着地基处理技术的多元化发展,为了更好地指导设计、施工及质量监测,涌现出许多新型的地基处理技术规程,不断地丰富和拓宽了原有的技术范畴。具体来说,比如一种基于水泥土桩和预应力高强混凝土管桩两种桩型的特点提出的水泥土复合管桩,它可充分发挥水泥土桩桩侧摩阻力和预应力高强混凝土管桩桩身材料强度,具有大直径、长桩、高承载力、性价比高的特点,与同地区钻孔灌注桩相比施工效率基本相当,而造价则降低约 35%,目前该技术成果已被成熟地应用于工程实践。为了在水泥土复合管桩基础的设计、施工、质量检验与工程验收等方面做到有据可依,编制而成 JGJ/T 330—2014《水泥土复合管桩基础技术规程》[66]。亦或是适用于处理淤泥、淤泥质土、人工填土等地基的劲性复合桩,该桩型通常是由散体桩,柔性桩或刚性桩等通过一定的工艺,将两种或三种单体桩进行互补增强复合而成,根据不同的复合形式可分为散柔复合桩、散

刚复合桩、柔刚复合桩和三元复合桩,为了能充分发挥该桩型的特点,其要点之一就是需要在劲性复合桩桩顶和基础之间设置褥垫层,有效地提高单桩承载力和资源利用率,目前该技术已被广泛应用于实际工程。通过 JGJ/T 327—2014《劲性复合桩技术规程》[67]的编制,使得在劲性复合桩的设计、施工、质量检验等方面做到更规范。复合地基虽然已经是一个应用非常广泛的地基处理类型,但近些年的新技术和新规程仍不断推陈出新,基于此在如前所述 2012 年颁布实施 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》[65]对复合地基技术进行了归纳和总结,而 DJG32/T 047—2011《现浇 X 形桩基复合地基技术规程》[68]中的 X 形桩基复合地基对 GB/T 50783—2012《复合地基技术规范》[65]进行了补充现浇 X 形桩复合地基技术。该技术可用于处理黏性土、粉土、淤泥质土等地基,并且已在江苏等地广泛地推广应用,取得了良好的社会效益和经济效益。

除此之外,还有 JGJ/T 290—2012《组合锤法地基处理技术规程》[69], JGJ/T213—2010《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》[70] JGJ/T 186—2009《逆作复合桩基技术规》[71]等大量介绍地基处理工法的规范。

3.2　以特殊土质为对象的地基处理规范的编制与修订

近四年来,我国启动了建筑特殊土地基基础方面的多本规范的修订与编制,相关规范包括国家标准 GB/T 51064—2015《吹填土地基处理技术规范》[72]、《岩溶地区建筑地基基础技术规范》、GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》等[73]的编写和 GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》等[74]的修订。这些规范、规程的编制也集中反映了我国近年来在地基处理领域取得的理论进展和积累的工程经验。

3.2.1　GB/T 51064—2015《吹填土地基处理技术规范》

为解决我国东部沿海地区土地资源紧张以及南

海岛礁建设用土等问题,多地采用吹填法这一施工技术。但由于吹填土质多为含水率高,渗透性差,固结特性差的软黏土材料,既有国家规范已不能满足工程需要,迫切需要编制针对该土质的新规范。对此,河海大学与上海港湾软基处理公司会同相关单位开展了国家标准《吹填土地基处理技术规范》的编制工作。该规范在归纳吹填土地基处理常规方法的基础上,特别加入了近年来取得良好处理效果和经济效益的相关新技术、新方法。具体内容与特色如下:

(1)针对吹填工程中吹填土分类的要求与场地的形成进行了详细叙述,规定了吹填土地面标高、围堰高程、取土吹填及排水的设计要求,给出了考虑吹填土各部分沉降的计算方法并根据不同土质和不同处理方法给出了吹填土的分类标准。

(2)针对吹填土区域勘察应查明的各种土的分布、影响吹填施工的自然特性、吹填土料的适用性以及所应进行的室内试验进行了详细叙述,规定了吹填区勘察除应提供吹填土地基处理设计和施工所需的相关地质资料外还应提出吹填土地基处理方法的建议。

(3)添加了其他规范中常常忽视的翻晒和压实这一简单易行的处理方法。给出了翻晒适用的条件和翻晒时间及方法,并根据碾压法、振动压实法和冲击压实法的不同分别提出了不同的压实工艺。

(4)针对新近吹填土地基承载力过低,无法直接铺设砂垫层这一问题,加入了已在工程现场取得较好处理效果的无砂垫层真空预压法这一处理方法,并给出了水平排水通道的布置工艺。

(5)总结了降水强夯法的工艺,先采用降水方法使地下水位降低,再对地基土进行浅层加固,并形成表层硬层,再采用低能级强夯进行深层加固。提出了该种方法对土性的要求并规定了开始强夯施工前的地下水位降水要求。

(6)添加了振动水冲法的工艺及设计方法。随着振冲经验的积累,振冲技术、设备的发展,克服了以往振冲过程中孔壁不容易坍塌充当填料,排水固结速率慢等问题,该方法已在工程实践中取得了较为理想的密实效果。

(7)加入了吹填土固化预处理回填工艺及先固后吹工艺。在吹填土中加入固化剂后,可以使细颗粒快速絮凝,并通过一系列物理、化学反应提高土体强度、密度、水稳定性、耐久性、抗冻性,降低土的塑性和渗透性,目前该方法已在工程中证明了它的实用性。

(8)介绍了电渗法的设计、计算及施工工艺。由于电渗法具有无需加荷,对土体扰动小,可以在较短时间内降低土体的含水率,提高土体不排水抗剪强度等优点,而且新电极材料的发展正逐步克服电极的腐蚀问题,因此本方法被加入到该规范中。

3.2.2 岩溶地区建筑地基基础技术相关规范

我国岩溶地区面积占国土面积三分之一,每年因岩溶塌陷等事故造成的直接经济损失在亿元以上,为处理建筑和交通工程的岩溶地基而耗费的人力和财力就更大。而我国现有的岩溶地区地基基础勘察、设计依据不能满足现在大规模、复杂工程建设的需要,为此,华东交通大学与江西中煤建设集团有限公司其他单位编写了《岩溶地区建筑地基基础技术规范》,目前该规范即将颁布。

从岩溶区建筑地基、市政公路路基和桥梁基础工程勘察、溶洞处治、基础设计与施工等方面进行调查研究,对岩溶区地基基础技术、岩溶地质勘察以及岩溶地基的承载力、稳定性、处治方案、基础设计与施工等进行了深入研究与分析。成文的规范主要分为三部分,即岩溶地区地基的勘察与评价、设计与计算、处理方法。其主要内容与特色如下:

(1)从岩溶发育程度、地层组成等角度对岩溶地基进行分类。针对最为常见的红黏土地基,考虑到它的不均匀性,在现有国家标准 GB 50021《岩土工程勘察规范》[75]有关规定基础上,补充了新的详勘条文。

(2)岩溶地区地下水勘察时,在满足现有相关国家国家标准 GB 50021《岩土工程勘察规范》的基础上,补充了对地下水分布特性,流动特性,各层地下水之间的关系,水与地基之间关系的勘察。

(3)针对岩溶地区地基基础设计时要注意的事项进行了特别说明,考虑了存在岩基面起伏、挖填方、地下水等条件时的地基稳定性的计算方法。

(4)考虑到岩溶地区地基的复杂性,介绍了多种不同工况下的岩溶地基处理方法。例如充填法、跨越法、桩基法、注浆法、褥垫层法等方法,充填法在现行国家规范基础上,特别补充了泡沫轻质土充填的设计及施工工艺。每种方法施工时的注意事项,在规范中也有特别提及。

3.2.3 GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》

盐渍土地基在我国西部地区分布广泛,由盐渍土引发诸如建筑物开裂、倾斜或者腐蚀等破坏,给国家带来了大量的直接经济损失。为此,合肥工业大学与中建三局第三建筑工程有限责任公司会同有关单位共同编制了《盐渍土地区建筑技术规范》。其主要内容和特色如下:

(1)盐渍土地基面临的主要问题有三点:溶陷性、

盐胀性、腐蚀性。整本规范的勘察、设计以及地基处理均围绕这三点展开。

(2)从盐的化学成分、含盐量、土粒粒径、环境条件等角度对盐渍土地基进行分类,方便勘察时地基的界定与评价。针对盐渍土地基勘察时所要监测的化学成分与含盐量,在现行国家标准 GB/T 50123《土工试验方法标准》[76]的基础上,补充了监测指标。

(3)在现行国家标准 GB 50007《建筑地基基础设计规范》[77]的基础上,补充了建筑物防水排水、防腐处理的方法并特别建议施工时应做好管道的维护,防水、防漏等。提出了盐渍土地基适宜选择整体性强,空间跨度大,抗不均匀性强的结构的建议。

(4)总结了 7 种地基处理方法,根据含盐量、地下水埋藏深度、土体渗透性的不同,可以选择换填法、预压法、强夯法、碎石桩法、浸水预溶法、盐化法、隔断层法等方法。在选择每种方法时,均应注意在水环境变化和大气环境变化时,做好有效的防范措施。

3.2.4　GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》

《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87)是我国第一本有关膨胀土的国家标准,内容全面,资料翔实。但由于近年来有关膨胀土地区工程建设的复杂性、多样性,该规范已经不能满足工程建设需要,对此,中国建筑科学研究院会同有关单位开展了此规范的修订工作。本次修订的主要内容有:

(1)增加了术语、基本规定、膨胀土自由膨胀率与蒙脱石含量、阳离子交换量的关系等。

新规范增加了膨胀土的判定方法,认为应根据土的自由膨胀率、场地的工程地质特征和建筑物破坏形态综合判定,必要时应根据土的矿物成分,阳离子交换量等试验验证。在进行矿物分析和化学分析时,应注意测定蒙脱石含量和阳离子交换量,并归纳了蒙脱石含量和阳离子交换量与土的自由膨胀率的相关性。

(2)增加了“岩土的工程特性指标”计算表达式。

膨胀土的工程特性指标包括自由膨胀率、不同压力下的膨胀率、膨胀力和收缩系数四项。此次修订,给出了上述四项指标的计算公式,方便了设计与施工。

(3)增加了坡地上基础埋深的计算公式。

考虑到建筑场地工况的多样性,此次修订增加了坡地上基础埋深的计算公式,给出了当坡地坡角为 5°~14°,基础外边缘至坡肩的水平距离为 5m~10m 时,基础埋深的计算公式。

3.3　依据工程条件编制和修订的相关地基处理规范

近十年来,我国陆续修订、编制了多部与工程条件相关的地基处理规范,其中最具代表性的国家、行业及地方标准包括 JTG/TD 31—02—2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》[78]、DB33T 904—2013《公路软土地基路堤设计规范》[79]、TB 10106—2010《铁路工程地基处理技术规程》[80]、GB/T 50756—2012《钢制储罐地基处理技术规范》[81],以及正在公开征求意见的国家标准《煤矿采空区建(构)筑物地基处理规范》,《高填方地基技术规范》。

3.3.1　公路软基处理相关规范

JTJ 017—96《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》是我国公路软基处理方面的首个行业标准,该规范首次确定了软土地基上公路路堤的设计原则和方法、软基处治措施及施工观测方法。其颁布实施以来,对提高我国软土地基公路设计与施工技术水平,保证工程质量起到了重要的作用。

但随着我国公路建设的快速发展,公路工程技术人员积累了较丰富的软土地基处理经验,许多成熟可靠的新理论、新技术、新材料、新工艺在软土地基处理中得到了推广应用,旧的行业标准已不再适用于当前的公路工程。因此,应交通运输部有关要求,中交第一公路勘察设计研究院作为主编单位,编制了 JTG/TD 31-02—2013《公路软土地基路堤设计与施工技术细则》。

新的行业标准进一步完善了对软土地基工程地基勘察的相关规定,优化了软土鉴别指标,沉降、稳定设计计算方法以及复合地基处理设计方法,并且增加了土工泡沫塑料路堤、现浇泡沫轻质土路堤、真空预压、水泥粉煤灰碎石桩、刚性桩、爆炸挤淤、路堤地基隔离墙、强夯和强夯置换以及吹填砂路堤设计和施工等内容。

为了进一步适应地方公路软土地基路堤设计与施工,对我国深厚软土地基具有代表性的浙江省编制了更适用于该省软土地基工程特性的 DB33T 904—2013《公路软土地基路堤设计规范》。该规范制定了一系列适用于浙江省深厚软土特殊工程地质条件的软基路堤处理新方法,如土工合成材料加筋法、桩承式加筋路堤法和塑料套管混凝土桩等,并对每一种公路软土地基路堤处理技术的设计、施工要求及质量检测作了详细的规定。

3.3.2　铁路地基处理相关规范

随着高速铁路建设规模日益扩大,铁路地基沉降控制愈发重要,地基处理难度也越来越高。铁路地基处理的恰当与否,不仅影响工程投资,而且将直接影响铁路工程构筑物的使用性能和工程质量,影响行车的安全性和舒适性。因此在铁道部主持下编制了 TB 10106—2010《铁路工程地基处理技术规程》。

该规范主要适用于铁路路基、涵洞、场坪等的地

基处理。规范中还明确了地基稳定性应按施工期和运营期进行检算,给出了不同速度等级铁路稳定安全系数的取值范围,规定了斜坡软弱地基稳定安全系数的修正方法;并且针对路基、场坪等柔性基础的特点,提出了地基容许承载力的修正方法;明确了侵蚀性环境下地基处理工程的耐久性要求以及换填垫层等 14 种地基处理技术设计、施工、质量检验的要求。

3.3.3 钢制储罐地基处理相关规范

钢制储罐一般用于存储原油、石化液态产品及其他类似液体,其存储的稳定性直接关系到国家能源、化工安全。而且随着近几年国家对能源、化工行业的战略调整,使得国家对石油、石化液态产品等的需求日益高涨,其存储安全备受关注,对钢制储罐地基的处理与施工质量的要求也日渐严格,因此,为确保钢制储罐地基处理设计与施工的安全可靠,在住房和城乡建设部的主持下编制了 GB/T 50756—2012《钢制储罐地基处理技术规范》。

该规范规定了钢制储罐在选择地基处理方案前应研究掌握详细的场地、岩土工程资料及储罐类型等参数,了解当地地基处理经验和施工条件,调查邻近建构筑物、地下工程、管线等环境情况。并详细规定了换填垫层法、充水预压法、强夯法、振冲法等适用于钢制储罐地基处理技术的设计、施工及质量监测标准,确保了钢制储罐地基设计与施工的安全可靠。

3.3.4 煤矿采空区建(构)筑物地基处理相关规范

煤炭作为国家经济发展的核心动力,带动了国家经济建设的高速发展,然而过度的开采使矿井形成了许多采空区,这些采空区塌陷后造成地下水流失,地表严重沉降,给地面新建、改(扩)建的工业与民用建(构)筑工程地基处理设计与施工带来了许多困难。为合理利用采空区上覆陆地以及防治既有建(构)筑物地基沉降破坏,需对采空区上覆陆地进行地基处理。目前由住房和城市建设部主持的《煤矿采空区建(构)筑物地基处理规范》国家标准已编制完成,正公开征求意见。该规范的制定与颁布即将为煤炭采空区建(构)筑物地基处理设计与施工提供相应的标准。

该规范规定了灌注充填法、穿越/跨越法、砌筑法、剥挖回填法等适用于煤炭采空区建(构)筑物地基处理方法应遵循的设计、施工以及质量监测标准,并且给出了采空区综合治理措施、工后评价与变形监测的相应规定和标准,为煤矿采空区地基处理的设计、施工、质量检验和采动边坡的防治等提供了设计和施工标准。

3.3.5 高填方地基处理相关规范

随着我国经济建设的发展,在山区及丘陵地区利用“开山填谷”解决工程建设用地的项目越来越多,由此形成了大面积、大土石方量的填筑方地基。目前,对于该类高填方地基还没有统一的技术标准,并且从既建工程使用情况看,也有发生失稳和沉降变形过大的工程实例。因此,为了使高填方地基技术标准化,确保高填方工程的施工和使用安全,在住房与城乡建设部的主持下制订了《高填方地基技术规范》国家标准,目前该标准已编制完成,正公开征求意见。

该规范比较详细的规定了高填方地基工程中包括施工前应进行的工程测量与勘察、原场地地基处理技术、填筑地基设计与施工以及与之相应的边坡和排水工程的具体设计和施工标准,并且为超过 80m 的高填方填筑地基提供了可供参考的地基处理和设计原则。

3.3.6 港口工程地基处理相关规范

随着国家对大型优质港口的建设需求愈显迫切,对其质量要求也愈显严格。而地基处理的优质与否直接关系到港口的工程质量,因此迫切需要相关的地基处理规范来指导港口工程的地基设计与施工。

由于碎石桩作为地基处理技术加固软土地基,具有施工速度快、适用性广、效果好和造价低等优点,灌注桩具有承载力大,施工方便,不需开挖面积较大的基坑等优点,这两种桩基础在港口工程中得到了广泛的应用。在交通部的主持下编制了 JTJ 246—2004《港口工程碎石桩复合地基设计与施工规程》[82],规定了碎石桩复合地基处理方法在设计、施工与质量监测方面应遵守的原则与标准,统一了港口工程碎石桩等地基设计与施工要求,有效地控制了碎石桩复合地基的工程质量。

4 结论与展望

本文通过针对我国近年来地基处理技术与应用的简要回顾,重点介绍了新技术的发展以及地基处理技术相关标准化进程,可以得到如下几点结论和建议:

(1)随着机械制造工业的持续发展,地基处理机械设备也逐渐向自动化、智能化和信息化发展;地基处理施工技术人员也需要逐渐适应机械化施工的发展趋势。

(2)随着新材料的发展和国家对节能环保的要求,地基处理技术逐渐朝绿色环保、节能减排的可持续发展方面发展。

(3)随着国家南海岛礁建设及沿海围海造地工程建设,海洋岩土工程中涉及的相关地基处理技术,越来越发重要,有待相关工程技术人员和单位加强技术

和经济投入。

(4)伴随着近二十年基础设施的持续高度发展,部分既有建筑物基础、高速公路、铁路等地基的工后沉降控制及修复技术,逐渐摆在我们广大工程技术人员面前。该方面技术研究与应用将成为后续发展的重要方向之一。

(5)近年来,在我国岩土同行的不懈努力下,常规地基处理方法的研究继续深入,新的方法层出不穷,期间积累了丰富的经验。这些针对各类地基处理方法、处理土质以及特定工况下的规范、规程,在应用时更具有针对性,可以更好地为工程建设服务,促进了我国地基处理设计与施工水平的不断提高。而同时随着工程技术水平的持续深化提升,相关规范的标准体系还有望得到进一步的完善。

致谢　本文在撰写过程中,得到了河海大学孔纲强教授、沈扬教授、重庆大学丁选明教授,肖杨副教授,研究生赖建英、孙广超、刘璐、彭怀风、吴迪、励彦德等协助,在此谨表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] 龚晓南. 地基处理技术及发展展望[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014 (Gong Xiaonan. Advances of ground improvement Technologies [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014 (in Chinese))

[2] 郑刚,龚晓南,谢永利,等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146 (Zheng Gang, Gong Xiaonan, Xie Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-145. (in Chinese))

[3] Lu M M, Xie K H, Wang S Y. Consolidation of vertical drain with depth-varying stress induced by multi-stage loading[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(8): 1096-1101

[4] 周琦, 刘汉龙, 顾长存. 真空预压条件下地下水位和出水量现场测试研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3435-3440 (Zhou Qi, Liu Hanlong, Gu Changcun. Field tests on groundwater level and yield of water under vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3435-3440(in Chinese))

[5] 吴辉,胡黎明. 考虑电导率变化的电渗固结模型[J]. 岩土工程学报, 2013(04): 734-738. (Wu Hui, Hu Liming. Numerical simulation of electro-osmosis consolidation considering variation of electrical conductivity [J]. Chinese Journal of Geothechnical Engineering, 2013 (04):734-738(in Chinese))

[6] 陶燕丽,周建,龚晓南. 电极材料对电渗过程作用机理的试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2014(09): 1618-1623 (Tao Yanli, Zhou Jian, Gong Xiaonan, Experimental study on function mechanism of electrode materials upon electro-osmotic process[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2014(09): 1618-1623 (in Chinese))

[7] 庄艳峰, 邹维列, 王钊,等. 一种可导电的塑料排水板: 中国 CN201210197981.4[P]. 2014

[8] 王军,张乐,刘飞禹,等. 真空预压-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014 (S2):4181-4192(Wang Jun, Zhang Le, Liu Feiyu, et al. Experiment study of vacuum preloading combined reinforcement with electro-osmosis in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014 (S2):4181-4192(in Chinese))

[9] 符洪涛,王军,蔡袁强,等. 低能量强夯-电渗法联合加固软黏土地基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(03): 612-620. (Fu Hongtao, Wang Jun, Cai Yuanqiang, et al. Experiment study of combined application of electroosmosis and low-energy dynamic compaction in soft ground refinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015(03): 612-620 (in Chinese))

[10] Liu H, Cui Y, Shen Y, et al. A new method of combination of electroosmosis, vacuum and surcharge preloading for soft ground improvement[J]. China Ocean Engineering, 2014, 28: 511-528

[11] Liu H L, Charles W W, Fei K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case Study[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(12): 1483-1493.

[12] 蔡德钩, 叶阳升, 张千里, 等. 桩网支承路基受力及加筋网垫变形现场试验研究[J]. 中国铁道科学,2009, 30(5):1-8(Cai Degou, Ye Yangsheng, Zhang Qianli, et al. Field test study on the mechanical behaviors of the geosynthetic-reinforced pile-supported embankment and the deformation of the reinforced bedding[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):1-8(in Chinese))

[13] Lv Y R, Liu H L, Ding X M, et al. Field tests on bearing characteristics of X-section pile composite foundation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 2012, 26(2): 180-189

[14] 饶为国. 桩-网复合地基沉降机理及设计方法研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(5): 881-881 Rao Weiguo. (Settlement mechanism and design method of pile-net composite foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 881-881 (in Chinese))

[15] 强小俊, 赵有明, 胡荣华. 桩网结构支承路堤土拱效应改进算法[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 7-12 (Qiang Xiaojun, Zhao Youming, Hu Ronghua. Improved algorithm for the soil arching effect of pile-net supported embankment[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 7-12(in Chinese))

[16] 丁铭绩. 高速铁路 CFG 桩桩板复合地基工后沉降数值模拟[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(3): 1-6 (Ding Mingji. Numerical simulation on the post-construction settlement of CFG pile-slab composite foundation in high-speed railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(3): 1-6(in Chinese))

[17] 秦瑞谦, 陈波. 桩板路基结构及双块式无碴轨道施工技

术[J]. 铁道建筑, 2007(2): 92-94(Qin Ruiqian, Chen Bo. Construction technique of pile-slab-type subgrade structure and ballastless track with twin separated block sleeper[J]. Railway Engineering 2007(2): 92-94(in Chinese))

[18] 郑刚,刘冬林,李金秀. 桩顶与筏板多种连接构造方式工作性状对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 89-94 (Zheng Gang, Lui Donglin, Lin Jinxiu. Experimental study on behaviors of piled foundation with connected and disconnected piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31 (1): 89-94 (in Chinese))

[19] 宰金珉, 蒋刚, 王旭东, 等. 极限荷载下桩筏基础共同作用性状的室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29 (11): 1597-1605. (Zai Jinmin, Jiang Gang, Wang Xudong, et al. Model test on pile-raft foundation interaction under ultimate load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1597-1605(in Chinese))

[20] 曾俊铖, 张继文, 童小东, 等. 高速铁路 CFG 桩-筏复合地基桩侧负摩阻力及其受力特点的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 32-35, +58 (Zeng Juncheng, Zhang Jiwen, Tong Xiaodong, et al. Experimental study on negative skin friction and mechanical behavior of high-speed railway CFG pile-raft composite foundation [J]. Journal of Railway Science And Engineering, 2009, 6(4): 32-35, +58(in Chinese))

[21] 张清峰, 王东权. 煤矸石地基在强夯冲击荷载作用下的物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1049-1056 (Zhang Qingfeng, Wang Dongquan. Physical model tests of coal gangue foundation under dynamic compaction loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 1049-1056(in Chinese))

[22] 李进元. 振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(s1): 2968-2976 (Li Jinyuan. Application of foundation treatment with vibroreplacement stone piles to yinping h · ropower station [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(s1): 2968-2976(in Chinese))

[23] 郭忠贤, 王占雷, 杨志红. 夯实水泥土桩复合地基共同作用的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 763-768 (Guo Zhongxian, Wang Zhanlei, Yang Zhihong. Experimental study of piles-cushion-soil interaction of rammed soil-cement pile composite foundation[J]. Rock And Soil Mechanics, 2007, 28(4): 763-768(in Chinese))

[24] 刘杰, 何杰, 闵长青. 夯实水泥土楔形桩复合地基中桩的合理楔角范围研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 122-127 (Liu Jie, He Jie, Min Changqing. Study of the rational wedge angle range in a composite foundation with rammed soil cement tapered piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 122-127(in Chinese))

[25] 包承纲. 土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1735-1744 (Bao Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1735-1744 (in Chinese))

[26] 肖宏, 罗强, 邓江东, 等. 混凝土夯扩桩和土工格室加固铁路基床试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2157-2162 (Xiao Hong, Luo Qiang, Deng Jiangdong, et al. Test study of reinforcing railway subgrades by using concrete compacted base-enlarged piles and geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8) : 2157-2162 (in Chinese))

[27] 李广信. 土工合成材料构造物的抗震性能[J]. 世界地震工程, 2010, 26(4): 31-36 (Li Guangxin. Behavior of earth structure with geosynthetics in earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26 (4): 31-36 (in Chinese))

[28] 吴景海, 王德群, 陈环. 土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 199-208 (Wu Jinghai, Wang Dequn, Chen Huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 199-208 (in Chinese))

[29] 周镜, 叶阳升, 蔡德钩. 国外加筋垫层桩支承路基计算方法分析[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 1-8 (Zhou Jing, Ye Yangsheng, Cai Degou. Analysis of calculation method for foreign geosynthetic reinforced pile supported embankments[J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 1-8(in Chinese))

[30] 霍镜, 朱进, 胡正亮, 等. 双轮铣深层搅拌水泥土地下连续墙 (CSM 工法) 应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (s1): 666-670 (Huo Jing, Zhu Jin, Hu Zhengliang, et al. Application of deep mixing cement soil mixing wall (CSM)[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(s1): 666-670(in Chinese))

[31] 刘钟, 柳建国, 张义, 等. 隧道全方位高压喷射注浆拱棚超前支护新技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 59-65 (Liu Zhong, Liu Jianguo, Zhang Yi, et al. New technique of rotary horizontal jet grouting for arched tunnel pre-support[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 59-65(in Chinese))

[32] 吴国明, 章兆熊, 谢兆良. TRD 工法在上海国际金融中心 56.73 m 非原位成墙试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (s2): 814-818 (Wu Guoming, Zhang Zhaoxiong, Xie Zhaoliang. Application of TRD method in non-in-situ tests on 56.73 m-wall of Shanghai International Financial Center [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(s2): 814-818. (in Chinese))

[33] 邹金锋, 罗恒, 李亮, 等. 考虑中主应力时土体劈裂灌浆力学机制的大变形分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2515-2520. (Zou Jinfeng, Luo Heng, Li Liang, et al. Mechanism analysis of fracture grouting in soil with large strain considering intermediate principal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2515-2520(in Chinese))

[34] 孙锋, 张顶立, 姚海波. 土坝坝体底部劈裂灌浆加固效果研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1187-1192 (Sun Feng, Zhang Dingli, Yao Haibo. Study of effects of split grouting for reinforcing bottom of embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (4): 1187-1192 (in Chinese))

[35] 许海培. 浅谈地基处理中的地下托换技术[J]. 中国高

新技术企业，2009，122(11)：142-143

[36] 刘家新，曹勇. 静压锚杆桩在某工程结构托换中的应用[J]. 施工技术，2012，41(19)：27-30(Liu Jiaxin，Cao Yong. Application of steady pressed anchor pile in structure underpinning of some project[J]. Construction Technology，2012，41(19)：27-30(in Chinese))

[37] 刘祖德. 纠偏防倾工程十五年(一)[J]. 土工基础，2006，20(4)：108-112(Liu Zude. Fifteen year experience in buildings (structures) rectification and inclination prevention[J]. Soil Eng. and Foundation，2006，20(4)：108-112(in Chinese))

[38] 颜永国，董志良，杨昌斌，等. 颗粒级配对真空预压法处理吹填土效果影响试验研究[J]. 岩土工程学报，2011，33(11)：1775-1779(Yan Yongguo，Dong Zhiliang，Yang Changbin，et al. Experimental study on effect of grain size distribution on improvement of dredger fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2011，33(11)：1775-1779(in Chinese))

[39] 王军，蔡袁强，符洪涛，等. 新型防淤堵真空预压法室内与现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(6)：1257-1268(Wang Jun，Cai Yuanqiang，Fu Hongtao，et al. Indoor and field experiment on vacuum preloading with new anti-clogging measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(6)：1257-1268(in Chinese))

[40] 李洪艺，张澄博，张永定. 盐溶液注入对电动加固软土影响的研究进展[J]. 工程地质学报，2011，19(s1)：288-293(Li Hongyi，Zhang Chengbo，Zhang Yongding. Progress of influence on electrokinetic stabilization soft soil by injection of saline solution[J]. Journal of Engineering Geology，2011，19(s1)：288-293(in Chinese))

[41] Ou C Y，Chien S C，Lee T Y. Development of a suitable operation procedure for electroosmotic chemical soil improvement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2012，139(6)：993-1000.

[42] 石明生，夏威夷，王复明，等. 高聚物锚固体与粉土间黏结性能试验研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(4)：724-730(Shi Mingsheng，Xia Weiyi，Wang Fuming，et al. Experimental study on bond performance between polymer anchorage body and silt[J]. Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(4)：724-730(in Chinese))

[43] 徐建国，王复明，钟燕辉，等. 静动力荷载下土石坝高聚物防渗墙受力特性分析[J]. 岩土工程学报，2012，34(9)：1699-1704(Xu Jianguo，Wang Fuming，Zhong Yanhui，et al. Stress analysis of polymer diaphragm wall for earth-rock dams under static and dynamic loads[J]. Journal of Geotechnical Engineering，2012，34(9)：1699-1704(in Chinese))

[44] 边学成，程翀，王复明，等. 高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后动力性能及长期耐久性的试验研究[J]. 岩土工程学报，2014，36(3)：562-568(Bian Xuecheng，Cheng Chong，Wang Fuming，et al. Experimental study on dynamic performance and long-term durability of high-speed railway subgrade rehabilitated by polymer injection technology[J]. Journal of Geotechnical Engineering，2014，36(3)：562-568(in Chinese))

[45] Ivanov V，Chu J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology，2008，7(2)：139-153

[46] Dejong J，Soga K，Kavazanjian E，et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications：progress，opportunities and challenges[J]. Géotechnique，2013，63(4)：287-301

[47] Mitchell J K，Santamarina J C. Biological considerations in geotechnical engineering[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering，ASCE，2005，131(10)：1222-1233

[48] Al Qabany A，Soga K，Santamarina C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，ASCE，2012，138(8)：992-1001

[49] Dejong J T，Fritzges M B，Nüsslein K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering，ASCE，2006，132(11)：1381-1392

[50] 程晓辉，麻强，杨钻，等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(8)：1486-1495(Cheng Xiaohui，Ma Qiang，Yang Zuan，et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-grouting[J]. Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(8)：1486-1495(in Chinese))

[51] Whiffin V S，Van Paassen L A，Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal，2007，24(5)：417-423

[52] Van Paassen L A，Ghose R，Van Der Linden T J，et al. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis：large-scale biogrout experiment [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2010，136(12)：1721-1728

[53] Thach P N，Liu H L，Kong G Q. Evaluation of PCC pile method in mitigating embankment vibrations from high-speed train [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，ASCE，2013，139(12)：2225-2228

[54] 付强，丁选明，刘汉龙，等. 列车激振荷载下 PCC 桩复合地基动力分析[J]. 岩土力学，2013，34(s2)：413-420(Fu Qiang，Ding Xuanming，Liu Hanlong，et al. Dynamic analysis of PCC pile composite foundation under train vibration load[J]. Rock and Soil Mechanics，2013，34(s2)：413-420(in Chinese))

[55] 王新泉，陈永辉，陈龙，等. 路堤荷载下 Y 形桩与常规桩型对比研究[J]. 铁道工程学报，2011，(11)：46-52(Wang Xinquan，Chen Yonghui，Chen Long，et al. Comparative study on bearing characteristics of Y -section pile and common piles under embankment load [J]. Journal of Railway Engineering Society，2011(11)：46-52(in Chinese))

[56] 陈飞，吴开兴，何书. 挤扩支盘桩承载力性状的现场试验研究[J]. 岩土工程学报，2013，35(s2)：990-993(Chen Fei，Wu Kaixing，He Shu. Field tests on load transfer performances of squeezed branch piles[J]. Journal of Geotechnical Engineering，2013，35(s2)：990-993(in

Chinese))

[57] 孔纲强,周航. 扩底楔形桩沉桩挤土效应理论分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 9-16(Kong Gangqiang, Zhou Hang. Theoretical analysis of soil compaction effect of belled wedge pile China[J]. Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 9-16(in Chinese))

[58] 刘汉龙, 任连伟, 郑浩, 等. 高喷插芯组合桩荷载传递机制足尺模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1395-1401(Liu Hanlong, Ren Lianwei, Zheng Hao, et al. Full-scale model test on load transfer mechanism for jet grouting soil-cement-pile strengthened pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1395-1401(in Chinese))

[59] 闻世强, 陈育民, 丁选明, 等. 路堤下浆固碎石桩复合地基现场试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1559-1563(Wen Shiqiang, Chen Yumin, Ding Xuanming, et al. Application of grouted gravel pile in soft subgrade improvement of expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1559-1563(in Chinese))

[60] 赵明华, 顾美湘, 张玲, 等. 竖向土工加筋体对碎石桩承载变形影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1587-1593(Zhao Minghua, Gu Meixiang, Zhang Ling, et al. Model tests on influence of vertical geosynthetic-encasement on performance of stone columns [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1587-1593(in Chinese))

[61] 李仰波. 布袋加筋注浆桩在软基加固处理中的应用研究[J]. 铁道工程, 2014, 31(12): 33-36(Li Yangbo. Application research on the bag reinforced grouting pile on reinforcement of soft ground[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(12): 33-36(in Chinese))

[62] 刘松玉, 席培胜, 储海岩, 等. 双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 560-564(Liu Songyu, Xi Peisheng, Chu Haiyan, et al. Research on practice of bidirectional deep mixing cement-soil columns for reinforcing soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 560-564(in Chinese))

[63] JGJ 123—2012 既有建筑地基基础加固规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011(JGJ 123—2012 Technical standard of foundation reinforcement for existing buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011(in Chinese))

[64] GB/T 50290—2014 土工合成材料应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014(GB/T 50290—2014 Technical standard for applications of geosynthetics[S]. Beijing: China Planning Press,2014(in Chinese))

[65] GB/T 50783—2012 复合地基技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2012(GB/T 50783—2012 Technical code for composite foundation[S]. Beijing: China Planning Press, 2014(in Chinese))

[66] JGJ/T 330—2014 水泥土复合管桩基础技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014(JGJ/T 330—2014 Technical specification for pile foundation of pipe pile embedded in cement soil[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014(in Chinese))

[67] JGJ/T 327—2014 劲性复合桩技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014(JGJ/T 327—2014 Technical specification for Strength composite piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014(in Chinese))

[68] DJG32/T 047—2011 现浇 X 形桩基复合地基技术规程[S]. 南京:江苏科学技术出版社,2011(DJG32/T 047—2011 Technical code for composite foundation of X - section pile[S]. Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press,2011(in Chinese))

[69] JGJ/T 290—2012 组合锤法地基处理技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012(JGJ/T 290—2012 Technical specification for ground treatment of combination hammer[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2012(in Chinese))

[70] JGJ/T213—2010 现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011(JGJ/T 213—2010 Technical code for composite foundation of PCC pile[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese))

[71] JGJ/T 186—2009 逆作复合桩基技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009(JGJ/T 186—2009 Technical specification for composite pile foundation with top-down method[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2009(in Chinese))

[72] GB/T 51064—2015 吹填土地基处理技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015(GB/T 51064—2015 Technical code for ground treatment of blowing filling[S]. Beijing:China Planning Press,2015(in Chinese))

[73] GB/T 50942—2014 盐渍土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014(GB/T 50942—2014 Technical code for building in saline soil regions[S]. Beijing:China Planning Press,2014(in Chinese))

[74] GB 50112 - 2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2013(GB 50112 - 2013 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014(in Chinese))

[75] GB 50021 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009(GB 50021 Code for investigation of geotechnical enginerring[S]. Beijing: Chinese Building Industry Press, 2009(in Chinese))

[76] GB/T 50123 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999(GB/T 50123 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999(in Chinese))

[77] GB 50007 建筑地基基础设计规范[S]. 北京:中国建筑资讯网,2002(GB 50007 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Building Information Network, 2002(in Chinese))

[78] JTG/TD 31-02—2013 公路软土地基路堤设计与施工技术细则[S]. 北京:人民交通出版社,2013(JTG/TD 31-02—2013 Technical guidelines for design and construction of highway embankment on soft ground[S]. Beijing: China Communications press, 2013(in Chinese))

[79] DB33T 904—2013 公路软土地基路堤设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2013(DB33T 904—2013 Code for design of highway embankment on soft ground[S]. Beijing: Chian Communications press, 2013(in Chinese))

[80] TB 10106—2010 铁路工程地基处理技术规程[S]. 北京:中国铁道出版社,2010(TB 10106—2010 Technical

code for ground treatment of railway engineering [S]. Beijing: Chinese Railway Press, 2010 (in Chinese))

[81] GB/T 50756—2012 钢制储罐地基处理技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012 (GB/T 50756—2012 Technical code for ground treatment of steel tanks [S]. Beijing: China Planning Press, 2012 (in Chinese))

[82] JTJ 246—2004 港口工程碎石桩复合地基设计与施工规程 [S]. 北京:人民交通出版社,2004 (JTJ 246—2004 Specification for design and construction of composite foundation of stone column in harbour engineering [S]. Beijing: Chian Communications press, 2004 (in Chinese))

刘汉龙(1964 -),男,博士,教授。主要从事岩土工程教学与研究。

赵明华(1956 -),男,博士,教授。主要从事岩土工程教学与研究。