

# 地基处理优化技术的发展与应用

王东会, 马孝春, 付宇

(中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**回顾了地基处理技术的应用发展史,将其大致分成压密固结法、换填垫层法、注浆加固法、复合地基法4大类,综述了各类地基处理优化技术的加固机理、施工工艺、加固优势等。重点介绍了这些地基处理技术的工程应用及其今后研究方向;阐明了我国地基处理优化技术的发展趋势。

**关键词:**地基处理技术;地基加固;压密固结;换填垫层;注浆加固;复合地基

**中图分类号:**TU470;TV223;U416 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)06-0066-06

**Development and Application of Optimization Technology of Foundation Treatment/WANG Dong-hui, MA Xiao-chun, FU Yu (China University of Geosciences, Beijing 100083, China)**

**Abstract:** The application history of foundation treatment technology is reviewed, which is roughly divided into 4 categories, namely consolidation method, replacement cushion method, grouting reinforcement method and composite foundation method. The reinforcing mechanisms, construction technology, strengthening advantages for all kinds of optimization technology in foundation treatment are summed up. This paper introduces the engineering application of these foundation treatment technologies and the direction of future research; states the development trend of optimization technology for foundation treatment in China.

**Key words:** foundation treatment technology; foundation reinforcement; consolidation; replacement cushion; grouting reinforcement; composite foundation

## 1 地基处理优化技术的发展趋势

随着人口数量的不断增加,为了有效缓解土地资源短缺及交通压力等的现状,快速交通和立体化城市成了现当代的发展趋势。一方面,地下军用设施、商场、停车场、储藏室、发电站、学校、油库和娱乐场所等的广泛兴建创造了广阔的地下活动空间;铁路提速,高速公路、机场、码头、电厂等基础设施的大量修建有效地缓解了交通阻塞的压力。另一方面,特殊土类(湿陷性黄土、膨胀土、红粘土、多年冻土和盐渍土等)的广泛分布,使土的工程特性随着温度、湿度等的变化表现出稳定性、物理力学性质等的差异性。因此,为保证地基强度、变形和稳定性等的要求,必须对软弱土和特殊土等进行行之有效处理<sup>[1-4]</sup>。这就需要不断优化地基处理技术。

随着科技工作者的不懈努力和工程实践的不断验证,我国地基处理技术不断优化,并已针对不同的施工环境、工程要求和功能需求,使用不同的加固体形成了系列化的地基处理技术。其中,地基处理优化技术的发展趋势如下<sup>[2,5-11]</sup>:

(1)多种处理技术交叉、综合应用,如受施工环境等的限制,变换桩的直径、长短和类型,综合应用

各种组合式的复合地基,目前已成为了行业的主流技术;

(2)加固超软、深厚和深挖等地基,从而解决大型基础过大沉降和不均匀沉降的问题,如上海金茂大厦高420.5 m,占地2.3公顷( $2.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ),钻孔灌注桩等支护技术的应用;温州世贸中心大厦高333 m,占地3.1万 $\text{m}^2$ ,采用桩长达100多米的大口径钻孔灌注桩;

(3)加固体自身作为排水通道,提高桩间土和桩端土的固结效率,如浆固碎石桩在千岛湖和京沪高速等高等级高速公路中的应用;

(4)建设节约和环境友好型的综合处理技术,如以工业废料和建筑垃圾等为原料夯扩灰渣桩、灰土桩、水泥土桩等的发展;

(5)注重优势互补,节约工程造价,如在将沉管桩、钢桩等插入高压旋喷水泥土中,形成高喷插芯组合桩(简称JPP),充分发挥两者的优势;

(6)不断向实用有效等方向发展,如混凝土砂石桩利用超载进行预压,并把芯桩砂石壳作为竖向排水通道,可有效地缩短工期。

收稿日期:2014-02-09;修回日期:2014-03-24

作者简介:王东会(1989-),男(汉族),黑龙江绥化人,中国地质大学(北京)硕士在读,地质工程专业,研究方向为基础工程、岩土工程等,北京市海淀区学院路29号,wdh1666@163.com。

## 2 地基处理技术的发展与现状

根据文献[7]和[11~19],可大致总结出地基处理技术的优化发展历程及现状。

我国地基处理技术历史悠久,最早应用地基处理技术大约在 3000 多年以前,但是对于地基处理技术的大量应用始于 1978 年以后。

土挤密桩(Earth Pile)在 1934 年起源于苏联,由阿别列夫首次提出,并成功应用于湿陷性黄土地基的加固中。我国于 20 世纪 50 年代将其引入,并逐渐转化为灰土挤密桩(Lime Soil Pile)。

1967 年,粉体喷射搅拌桩(Dry Jet Mixing Method 简称 DJM 法)起源于瑞典,并先后传入日本和我国,先期我国主要是将其应用于铁路和房屋建筑中。

碎石桩法在 1835 年起源于法国,后来在 1938 年由 S. 史蒂尔曼引入德国之后才得到广泛应用。其中,美国于 50 年代应用其加固粘土和砂土地基,我国于 1976 年首次引入碎石桩法用于南京船体车间的软土地基加固。

强夯法在 1969 年起源于法国,由 L. Menard 发明,我国于 1978 年引入,并逐渐将其演化为压密强夯法和置换强夯法。中国建筑科学研究院地基所于 90 年代,研制出夯实水泥土桩法(Rammed Soil-cement Pile),广泛应用于华北等地区。

水泥浆搅拌法(Mixed-in-Pile 简称 MIP 法)起源于美国,我国于 70 年代末对其进行引进研究,并在实际工程中取得了较好的应用效果。

1970 年,日本在化学注浆法的基础上研制出了高压喷射注浆法(Jet Grouting),并注重注浆工艺与材料的创新。我国于 1983 年成功引入这一工法并应用于工程实践中。

水泥粉煤灰碎石桩(Cement-flyash-gravel Pile 简称 CFG 桩)是在 20 世纪 80 年代末由中国建筑科学研究院地基所在碎石桩的基础上开发研究的,一方面可以以工业废弃物及建筑垃圾为原料,另一方面还可以有效地提高地基承载力,减小地基变形。并且,随着 CFG 桩复合地基理论与实践的相互促进,其应用领域不仅局限于干法钻进上。

土工织物在 1977 年由 Giroud 和 Perfetti 首次提出,后来在 1994 年的新加坡的国际会议上首次确定了它的工程作用。我国于 20 世纪 60 年代中期,首次应用于渠道防渗工程中。

复合地基在 1962 年首次提出,经过 50 多年的发展形成了多种类型的桩。1990 年,由黄熙龄院士

主持的“复合地基”专题研讨会,促进了复合地基在我国的发展。

由上述文献资料可知,我国地基处理技术大多来源于国外,起步晚。但是,地基处理技术在国内得到了广泛应用,并结合国内的施工条件不断优化,逐渐形成了中国特色的地基处理技术,其中深圳地王大厦、国家大剧院、奥运工程、广州中天大厦等的顺利建成,充分说明了我国地基处理技术在实践应用中的先进性。除此之外,随着(JGJ 79-2012)《建筑地基处理技术规范》、(GB 50007-2011)《建筑地基基础设计规范》、(JGJ/T 210-2010)《刚-柔性桩复合地基技术规范》、(JGJ 123-2012)《既有建筑地基基础加固技术规范》、(GB/T 50783-2012)《复合地基技术规范》、(JGJ/T213-2010)《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》等地基处理技术规范的不完善,我国地基处理技术理论也逐步规范化和系统化。

## 3 地基处理优化技术

地基处理技术按照加固机理的不同,大体可以分为以下 4 类,如表 1 所示<sup>[7]</sup>。由于施工环境、工程要求、建筑物的使用功能等的限制,满足变形条件成为现当代工程设计的重点<sup>[20]</sup>。因此,在使用前需了解各种地基处理技术的加固机理、施工工艺和加固优势等条件,结合工程特点,实时优化,达到控制工后变形的目的。

表 1 地基处理技术的分类<sup>[7]</sup>

序号	加固方法	地基处理技术
1	压密固结法	强夯、振碾、堆载预压、降水预压、真空预压等
2	换填垫层法	砂石垫层、灰土垫层等
3	注浆加固法	水泥注浆、化学注浆等
4	复合地基法	砂桩、碎石桩、粉喷桩、CFG 桩、素混凝土桩、挤扩桩等

### 3.1 真空预压法

该技术于 1952 年由瑞典杰尔曼教授首次提出<sup>[21]</sup>,我国于 1986 年将其列为国家级重点推广项目,现已形成一套技术理论、施工方法、检测手段等较为成熟的地基加固技术,并在最近的规范修订中,将“真空-堆载联合预压”技术增加到(JGJ79-2011)《建筑地基处理技术规范》中。在工程实践中,广泛应用于公路和铁路软弱土等地基处理中,并取得了较好的经济效益和社会效益。根据真空预压技术现已发展出真空-堆载联合预压、高真空击密法、水下真空预压、低位真空预压、立体真空预压、真

空-注气加固法、电渗-真空降水联合加固、电渗-真空降水-低能量强夯联合加固、劈裂真空预压、真空降水联合冲压法等地基处理技术<sup>[22~26]</sup>。

该技术利用密封膜等将土体处于密封状态,应用水汽排除装置使内部土体形成真空,并利用加压系统使土体有效应力增加,达到加固的目的。其施工工艺大体分为3个阶段,即:施工准备阶段、设备安装阶段、预压加固阶段,其施工工艺流程如图1所示<sup>[22,27]</sup>。

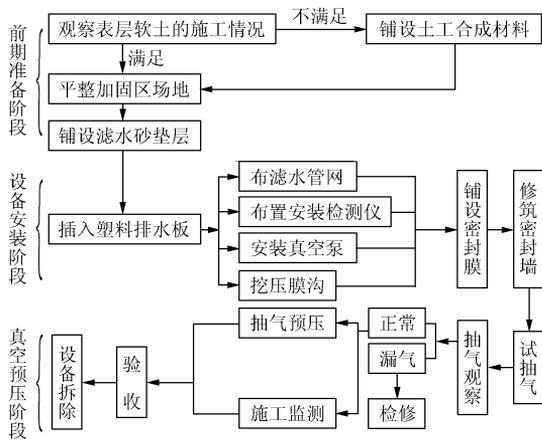


图1 真空预压施工流程图<sup>[22,27]</sup>

技术中使用加压系统、塑料排水系统和抽真空所形成的压力差进行加固,预压过程中不产生剪应力,无需控制加载速率,达到加速土体的固结速度,缩短工期,降低工程造价的目的;真空管连接接头的发明还可以有效避免沙粒阻塞的现象,并且,真空预压加固区地下水位测试装置的发明使测试方便、快捷,测试结果更加真实、可靠;除此之外,将塑料排水板插入土体中作为排水通道和加筋体,可以随时间自动腐蚀,降低对土体的损害,经济环保,加固效果好<sup>[22,27,28]</sup>。

研究方向<sup>[29]</sup>:(1)真空预压加固深度的影响因素及其计算理论;(2)降水的影响范围及边界土体的变形特征;(3)土体强度随加固过程的变化规律;(4)工后沉降的检测技术。

### 3.2 砂石垫层法

该技术主要用于地基处理深度在5 m范围内的软土地基中,应用范围较小,但可结合筏板基础、填石挤土、预压等技术用于建筑物、公路等的基础加固中,例如沪宁高速公路路基加固中超过1/3的长度应用该技术<sup>[9,30,31]</sup>。其施工工艺如表2<sup>[32]</sup>,施工工艺流程如图2所示。

表2 砂石垫层法施工工艺表<sup>[32]</sup>

组成结构	控制标准	确定技术	作用
材料	级配良好,不含植物残体、垃圾等杂质	-	决定垫层的承载力特性
最大干密度	-	室内击实试验	预测土体的沉陷变形
相对干密度	-	相对密度试验	确定粘性土的紧密程度
单层铺设厚度	40~60 cm	-	获取较好的压实效果和较高的承载力
碾压遍数	平碾1遍后振动碾压6~8遍	-	控制碾压效果和施工成本
施工质量控制	压实系数不小于0.97	-	控制基础加固效果

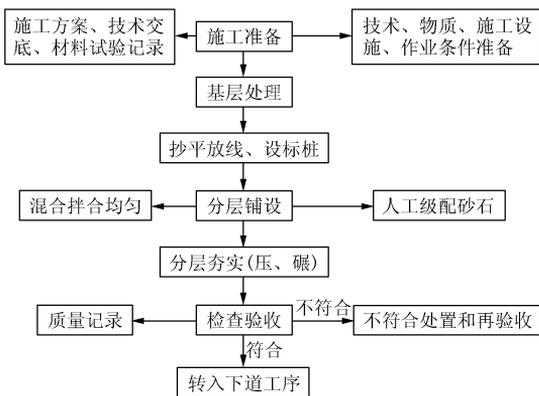


图2 砂石垫层法施工流程图

地基表层的软弱土体被强度较高的砂石等材料置换后,可降低基础附加应力,提高地基承载力,减少沉降;砂石垫层的透水性好,并结合分层碾压所形成的多层地基,可加速地基固结,有效缩短工期,降

低工程造价,还可消除寒冷地区地基的冻胀性和湿陷性黄土地区地基的湿陷性<sup>[32~34]</sup>。但是,砂石垫层作为一种散体材料,只能承受一定压力和剪力,不能承受弯矩和拉力,这就限制了砂石垫层抵抗基础水平位移和不均匀沉降的能力,因此可以与土工织物结合,形成加筋土垫层。该地基处理技术广泛应用于加固油罐、高速公路、铁路、市政工程等软土地基。

今后研究方向<sup>[35]</sup>:(1)土工织物的强度、变形特性、影响范围及其与土作用的表面特性;(2)土工织物与土接触面的作用特性;(3)土工织物加筋垫层的稳定安全系数及其抵抗竖向抗变形能力的计算方法。

### 3.3 复合注浆技术

复合注浆技术是利用高压旋喷技术喷射的高压水或浆射流破坏土体的固有结构,并利用浆液置换

土体中的细小颗粒,然后,利用静压注浆浆液起到渗透、劈裂和挤密的作用。浆体材料的粘结强度可以提高土体的抗拉、抗剪强度,从而达到地基加固的目的<sup>[36~38]</sup>。其施工工艺流程大体可分为<sup>[39]</sup>:(1)注浆前的准备工作,包括钻孔施工和搭建注浆设备;(2)注浆,先进行高压旋喷注浆,后进行静压注浆,其中两种注浆技术各自的施工工艺、工程应用见表3;(3)封孔。

表3 静压注浆法与高压旋喷注浆法的施工工艺和工程应用领域<sup>[39]</sup>

地基处理技术	施工工艺	工程应用
静压注浆	渗透注浆法	边坡加固
	压密注浆法	地基加固
	劈裂注浆法	桩基补强 路基加固
高压旋喷注浆法	单管法	加固地基
	双管法	修筑挡土围堰
	三管法	修筑防渗帷幕
	多重管法	增加土体摩擦力和粘聚力
	超级旋喷法	防止土体的振动液化
	双高压喷射法	防冲刷
	交叉喷射搅拌法	边坡加固
	扩幅式喷射搅拌法	修筑桥梁
	低变位喷射搅拌法	修筑地下建筑

复合注浆技术作为一种新型的注浆技术,将静压注浆技术和高压旋喷注浆技术时序结合而形成的,充分发挥了2种注浆技术的优点,有效地提高了加固效果,并且注浆材料、施工设备和技术、监测和检测手段等方面都得到了发展<sup>[39]</sup>。目前随着浆液种类的不断增多<sup>[40,41]</sup>,该技术已广泛应用于已建建筑物的地基加固、桩基加固、深基坑加固、溶洞等复杂地质条件下的地基补强、成矿巷道加固等岩土工程中,可有效减小土体的振动液化<sup>[42]</sup>,应用范围广;施工时噪声和孔径小、浆液无污染,对周围环境影响小,施工方便、快捷;还可以根据注浆方位的调整,控制桩体形状和强度,成桩质量好。

进一步研究方向<sup>[43,44]</sup>:(1)为了便于随时监测和检测注浆的加固效果,需进一步研究施工控制技术的信息化和现场监测和检测技术;(2)为了提高复合注浆的防渗效果,注重设计优化和加强理论研究;(3)为了更好地了解水泥土的强度特性,注重水泥土的试验和理论研究。

### 3.4 现浇混凝土大直径管桩(Cast-in-Place Concrete Large-Diameter Pipe Pile 简称 PCC 桩)

该工法是由刘汉龙教授等人研制的一种适用于软弱土等地基处理的新型复合地基处理技术,现已应用于沿海、内地等软土地基中的港口、高速公路、

铁路、市政道路等大面积地基处理中,并出版了相应的行业标准<sup>[45~47]</sup>。

该工法是利用相应桩机(如图3)提供的振动力将活瓣桩靴保护下的特定空心圆柱桩体沉入设计深度,并在腔体内浇筑混凝土,分段振动拔桩而形成的大直径管桩,成桩后结合土工织物形成复合地基。



图3 PCC 桩桩机

在振动力的作用下,一方面可以振捣被灌入的混凝土,另一方面还可以挤密桩间土,达到提高成桩质量和地基加固的目的。并可利用室内试验和桩身弯矩与塑性滑移线的位置关系,探讨单桩极限承载力和水平极限承载力<sup>[45,47,48]</sup>。其施工工艺如图4所示<sup>[49]</sup>。

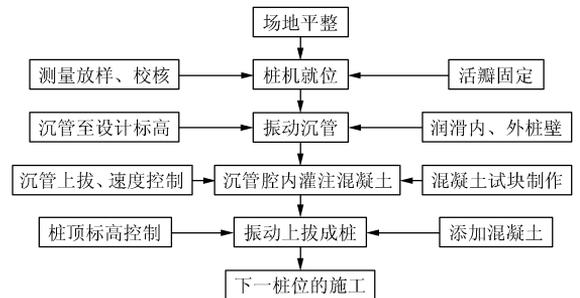


图4 PCC 桩施工流程图<sup>[42]</sup>

在相同截面面积条件下,圆筒形桩较圆柱形桩有较大的外径,因此可以充分发挥桩身的摩擦力,提高复合地基承载力,充分吸收了刚性桩和柔性桩的优点,工程造价低<sup>[50]</sup>。而且由于桩间土可挖除,可以实现人工监测与检测的目的,打破了美国桩基设计规范的检测手段<sup>[51]</sup>,并可有效避免动测法、钻探取心试验和标贯试验等检测法的弊端,其成桩示意图见图5。

研究方向<sup>[45]</sup>:(1)调整桩基高度,打破25m沉桩深度的限制;(2)改善振动装置,减小施工对周围环境的影响。



图5 PCC 桩成桩示意图

#### 4 结语与展望

(1)几十年来,我国地基处理技术注重创新、不断优化,许多技术在现当代工程中得到了广泛应用,并达到了控制工后沉降的目的,逐渐形成了高水平的、具有中国特色的工法;但理论落后于实践的现状需正视。

(2)以真空预压法为核心优化出了多种地基处理技术,同时相应施工设备的研制及改进,也促进了真空预压法的应用效果;但是真空预压法的加固机理、计算方法、检测手段等方面还需要进一步研究。

(3)加筋材料的各向异性,在散体材料地基处理技术中的应用,可提高加固体的刚度,有效控制地基基础的水平位移和不均匀沉降。但是加筋体的强度、变形特性、加固范围及其与被加固材料接触面间的接触特性等方面需要进一步研究。

(4)静压注浆与高压旋喷注浆法的有机结合,拓宽了注浆法的应用领域,但是该技术的设计理论、试验方法、监测手段等方面需要改进。

(5)地基加固中,注重多种地基处理技术的交叉、综合应用,复合地基处理技术已成为地基加固中的主流技术,但是这些加固技术的加固机理、施工设备、设计方法及不同处理技术下的加固区的差异沉降的控制等方面,仍需进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 韩选江. 地下空间资源的开发前景探讨[J]. 南京建筑工程学院学报, 2001, (1): 61 - 70.

[2] 李广信, 张在明, 沈小克, 等. 岩土工程篇[A]. 工程建设技术发展研究报告[C], 2006.

[3] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141 - 161.

[4] 康旭元. 地基处理技术的发展与现状[J]. 山西建筑, 2005, 31(1): 74 - 75.

[5] 刘金砺. 我国地基基础施工技术的新发展[J]. 施工技术, 1990, (2): 1 - 3.

[6] 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 - 136.

[7] 刘金砺. 建设行业岩土工程五十年[J]. 建筑科学, 2000, 16(2): 1 - 4.

[8] 刘金砺. 我国建筑基础工程技术的现状和发展述评[J]. 建筑技术, 1997, 28(7): 466 - 468.

[9] 赵维炳, 球云敏, 麓建勇. 地基处理技术发展简述[A]. 中国土木工程学会第八届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 1999: 33 - 43.

[10] 滕延京, 宫剑飞, 李建民. 基础工程技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 126 - 140.

[11] 龚晓南. 地基处理技术与展望[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.

[12] 华南理工大学. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003. 15 - 39.

[13] Hughes J M O, Withers N J. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns[J]. Ground Engineering, 1974, 7(3): 42 - 49.

[14] 雷晓雨. CFG 桩复合地基非等承载力设计[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[15] Dimillio, A. F. Complementation of ground treatment technology on us highways[J]. Ground Improvement, 1997, (1): 87 - 99.

[16] Menard L, Broise Y. Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation[J]. Geotechnique, 1975, 25(1): 3 - 18.

[17] 刘志刚. 水平荷载作用下刚性桩复合地基的变形性状[D]. 四川成都: 四川大学, 2005.

[18] 董彦莉. 土工格栅加筋砂土的特性研究及加筋垫层的承载力计算[D]. 山西太原: 太原理工大学, 2011.

[19] Schaefer V R, Filz G M, Vanzler L S. SHRP2 R02 Phase 1—Geotechnical Solutions for Soil Improvement, Rapid Embankment Construction, and Stabilization of the Pavement Working Platform[C]. ASCE, 2009: 1 - 11.

[20] 赵维炳, 刘国楠, 李荣强. 控制工后变形新一代软基处理技术的发展[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 78 - 81.

[21] Kjellman W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure[C]//Proceedings of a Conference on Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology. Boston, 1952: 258 - 263.

[22] 赖敏慧, 张括, 秦志光. 真空预压法施工流程概述[J]. 山西建筑, 2008, 34(8): 123 - 125.

[23] 叶柏荣. 真空预压加固法的发展及工程实录[J]. 地基处理, 1995, 6(3): 1 - 10.

[24] 王连文, 郑少河. 高真空击密法加固饱和软土地基的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 521 - 524.

[25] Chang D T T, Lou X M, Xu S L, et al. Innovative Soft Soil Stabilization Using Simultaneous High-Vacuum Dewatering and Dynamic Compaction[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, (1): 138 - 146.

[26] 龚晓南, 岑仰润. 真空预压加固软土地基机理探讨[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(2): 7 - 10.

[27] 刘松良. 真空预压加固机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.

[28] 刘再成. 塑料排水板预压法的发展及应用研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2012, (3): 5.

[29] 任志福. 真空预压法加固软土地基机理相关问题的探讨[J]. 建筑科学, 2008, 24(3): 43 - 47.

[30] 吴国信. 某高层建筑考虑砂石垫层处理地基与筏板基础共同作用的工程实践[J]. 福建建筑, 2010, (5): 76 - 78.

[31] 黄坤, 胡翔, 陈锦晶. 砂石垫层法与填石挤土法结合对近山建筑地基的处理工艺[J]. 四川建筑, 2012, 32(5): 114 - 115.

- [32] 刘志伟,张希宏.砂砾石垫层的施工工艺试验研究[J].工程勘察,2011,39(6):28-31.
- [33] 管飞,王艳静,梁锋.级配砂石在地基回填中的应用[J].河南建材,2012,(6):165-166.
- [34] 谢康和.双层地基一维固结理论与应用[J].岩土工程学报,1994,16(5):24-35.
- [35] 赵维炳,雷国辉,陈永辉,等.土工织物加筋与塑料板排水联合加固软基的计算方法研究[J].岩土工程学报,1998,20(3):61-65.
- [36] 袁邦权,赵铁力,马宏兵.复合注浆技术在地下室裂缝渗漏治理中的应用[J].中国建筑防水,2010,(2):22-24.
- [37] 李娟斌.浅谈地基基础加固的复合注浆技术[J].甘肃科技,2007,(7):68.
- [38] 邹光辉,徐勇.复合注浆技术在桩基加固中的应用浅析[J].科技传播,2011,(4):160.
- [39] Glossop R. The Invention and Development of Injection Processes Part 1: 1902 - 1850 [J]. Geotechnique, 1960, 10(3):91-100.
- [40] Kutzner C. Grouting of rock and soil[M]. Rotterdam,1996.
- [41] Boulanger R W, Hayden R F. Aspects of compaction grouting of liquefiable soil [J]. Journal of geotechnical engineering, 1995, 121(12):844-855.
- [42] 吴海涛.大空隙的深厚覆盖层围堰高压旋喷技术研究[D].湖南长沙:中南大学,2007.
- [43] 韩金田,刘洪波.复合注浆法在地基基础加固中的应用研究[J].岩土工程界,2001,(9):42-45.
- [44] 刘红卫.地基加固的复合注浆技术及应用研究[D].重庆:重庆大学,2003.
- [45] 丁选明,刘汉龙,陈育民.《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》(JGJ/T213-2010)编制与说明[J].施工技术(下半月),2011,(1):91-94.
- [46] 秦俊生,涂晓方,周自梁,等.北京上庄东路巨型砂石坑回填路基复合处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):60-63.
- [47] 张建伟,刘汉龙,丁选明.粘性土中PCC桩水平极限承载力的简化计算方法[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):33-36.
- [48] 刘汉龙,谭慧明,彭劫,等.大型桩基模型试验系统的开发[J].岩土工程学报,2009,31(3):452-457.
- [49] 刘汉龙.岩土工程技术创新方法与实践[J].岩土工程学报,2013,35(1):34-58.
- [50] Liu H L, CHARLES W W Ng, Fei K. Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: case study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(12):1483-1493.
- [51] ASCE 20-96, Standard guidelines for the design and installation of pipe foundations [S].
- [52] 高永民. CFG 桩复合地基处理技术在铁路路基工程中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(6):51-54.
- [53] 秦俊生,涂晓方,周自梁,等.北京上庄东路巨型砂石坑回填路基复合处理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):60-63.
- [54] 赵鹏飞,杨书民.投石压浆无砂砼小桩复合地基处理技术在杂填土地层的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(1):32-33.

致谢:在本论文的撰写过程中,刘汉龙教授提供了一些现场施工的图片,在此表示衷心的感谢!

### (上接第65页)

(3)为保证成墙的厚度,应注意铣头刀片磨损情况,定期测量刀片外径,当磨损达到1 cm时必须对刀片进行修复,确保成墙厚度。

(4)采用顺铣施工向下铣削时,如果其相邻的搅拌墙(第 $n$ 槽段)成墙的时间较长(水泥土超过终凝时间),一组铣轮铣削原状土的速度快,一组铣轮铣削已终凝水泥土的速度慢,易出现正施工的墙(第 $n+1$ 槽段)向已成墙(第 $n$ 槽段)的方向倾斜,在下一槽段(第 $n+2$ 槽段)施工时即使控制好垂直度情况下,第 $n+1$ 槽段和第 $n+2$ 槽段下部搭接长度不足,止水效果不好。因此,向下铣削成槽时,如相邻的搅拌墙成墙时间较长,可采取减慢铣削钻速,降低转数,即采用“吊打”向下铣削施工。操作人员应及时观察成槽过程监视器显示的偏斜量即垂直度(包括前后和左右的偏差)的情况,并及时进行调整,通过控制向下铣削钻速和转数,确保成墙的垂直度控制在 $1/300 \sim 1/500$ 以内。

(5)雨季应避免大雨天施工。向下铣削遇到大

雨可暂停施工,将双轮铣提到地面;向上铣削喷浆遇到大雨可在完成喷浆作业后,再停止施工。雨天施工应减少下搅用水量,同时控制好水泥的掺入量不能少。冬季施工水泥可采用高强度等级(42.5级以上)或掺入早强剂,确保水泥土连续墙的强度。

### 3 结语

CSM工法施工中,只要做好施工前的准备工作,重视施工中的质量控制,就可避免水泥土搅拌墙出现施工的质量问题。

### 参考文献:

- [1] JGJ 120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] JGJ/T 109-2010,型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].
- [3] 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.
- [4] 王占云,等.型钢水泥土搅拌墙(SMW工法)施工与管理[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.116-127.
- [5] 杨文华.深层搅拌桩在基坑支护施工中应注意的问题[J].探矿工程,2002,(3).