

Diji Chuli Jishu Yu Anli Fenxi

地基处理技术与案例分析

璩继立 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Diji Chuli Jishu Yu Anli Fenxi

地基处理技术 与案例分析

主 编 璩继立

副主编 孙中明 江海洋

参 编 李贝贝 李陈财 俞汉宁 刘宝石
郑七振 周 奎 陈 刚 魏天乐



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分七章, 主要讲述了置换法、振密(挤密)法、排水固结法、胶结法、冷热处理法、加筋法六种地基处理技术, 并分别用实践中遇到的案例加以详细讲解。

本书可供地基处理技术的理论研究者和从事地基工作的工程技术人员借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

地基处理技术与案例分析/璩继立主编. — 北京: 中国电力出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5123-6275-8

I. ①地… II. ①璩… III. ①地基处理 IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 173689 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 关 童 联系电话: 010-63412603

责任印制: 蔺义舟 责任校对: 常燕昆

北京博图彩色印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2016 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·11.75 印张·283 千字

定价: 48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着我国经济社会的发展，许多工程逐渐转向沿海、沿河等软弱地基土地区。为使地基土能满足建筑物的承载力要求，首先要解决的就是地基的技术处理问题。然而，各种千变万化的土质在不同环境条件下，其处理方法往往也不尽相同。应该说，各种方法都有各自的特点，也有各自的适用范围，而且还与工程所在地区及环境条件相关。因此，如何选用加固处理方法，需要因地制宜，综合研究而定。

为了适应当前工程建设的需求，使广大地基处理技术的工程实践者与理论研究者对地基处理的方法有一个系统的了解。本书编者在借鉴前人实践研究的基础上进行编写。本书共分为七章，分别从置换法、振密（挤密）法、排水固结法、胶结法、冷热处理法、加筋法六种地基处理方法进行讲述。为便于读者更加形象地学习，每种方法还举以案例进行讲解。

另外，特别说明的是书中所举案例均是实际工程中遇到的，只是在工程具体位置表述时用“××”或“某”。

本书可供地基处理技术的理论研究者 and 从事地基工作的工程技术人员借鉴与参考，也可做为高校相关专业的学习用书。

本书由璩继立等参加编写。在编写过程中，参考了许多文献，在此向文献的相关作者表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中若有欠妥之处，请读者批评指正，以便改进。

编者

目 录

前言

第一章 概述	1
一、地基加固处理的原理	1
二、地基处理技术的发展历程	2
三、地基处理技术的未来展望	2
第二章 置换法	4
一、振冲置换法	4
二、石灰桩法	8
三、强夯置换法	12
四、水泥粉煤灰碎石桩 (CFG 桩) 法	15
五、柱锤冲扩法	20
六、EPS 超轻质料填土法	24
第三章 振密 (挤密) 法	29
一、表层压实法	30
二、强夯法	33
三、振冲法	39
四、夯 (挤) 置换法	42
五、砂桩法	45
六、夯实水泥土桩法	48
七、爆破法	51
第四章 排水固结法	55
一、排水固结法作用	55
二、排水固结法组成系统	55
三、排水固结法应用条件	56

四、排水固结法原理	57
五、砂井法	59
六、塑料排水带法	64
七、预压法	65
八、降低地下水位法	75
九、电渗排水法	79
第五章 胶结法	84
一、注浆法	84
二、高压喷射注浆法	98
三、水泥土搅拌法	107
第六章 冷热处理法	118
一、冻结法	118
二、烧结法	127
第七章 加筋法	136
一、概述	136
二、土工合成材料	136
三、加筋土	147
四、土层锚杆	160
五、土钉	163
六、树根桩法	175
参考文献	181

第一章 概 述

一、地基加固处理的原理

（一）加固目的

软土地基加固的主要目的是利用置换、改良与加筋等方法对软土地基进行改造和加固，以改善软土地基的剪切特性、压缩特性、渗透特性、动力特性等不良特性，用以提高不良地基的强度和稳定性、降低地基的压缩性、减少沉降和不均匀沉降，以满足建（构）筑物对地基的要求，保证其安全与正常使用。

地基处理有别于人工基础或桩基，它以较为简单、可靠、经济的方式处理软土地基，防止了各类建（构）筑物倒坍、下沉、倾斜等事故的发生，确保了建（构）筑物的安全。

（二）加固原理

软土地基处理的方法很多，其加固原理可分为置换、改良与加筋三种。

1. 置换

置换是指在荷载作用面上，而不是指置换深度，置换可分为部分置换和全置换，部分置换形成复合基础；全置换形成浅基础。

2. 改良

改良是指通过物理、化学或物理化学方法对软土地基进行土质改良。主要有振（挤）密法、排水固结法、胶结法、冷热处理法等。

振（挤）密法主要适用于可压缩性地基，其加固原理是通过强振或强挤使土体密实，从而提高地基土体的抗剪强度、减小土体的沉降。

排水固结法是指土体在一定荷载下排水固结，孔隙比减小，抗剪强度提高，以达到提高地基承载力的目的。

胶结法是指在地基中灌入固化物，通过物理化学反应，形成抗剪强度高、压缩性小的增强体，从而达到提高地基承载力的目的。

冷热处理法是指通过冻结或焙烧、加热地基土体，以改变土体物理力学性能而达到地

基处理的目的。

3. 加筋

加筋法根据加筋的方向不同,可分为水平向加筋与竖向加筋。水平向加筋主要指在地基土层中铺设土工合成材料(土工织物或土工格栅)等的加固处理方法;竖向加筋主要指在地基中设置钢筋混凝土桩或低强度桩形成复合地基,设置土钉、树根桩而形成加筋土的加固处理方法。

一种地基加固处理方法中,其原理也并不仅仅是一种,而是多种的。例如,土桩和灰土桩既有挤密作用,又有置换作用;石灰桩既有置换作用,又有化学作用,还有热效应;砂石桩既有置换作用,又有排水固结作用。其实,在现实工程中即使是一种地基土,其加固处理的方法也并非单一,而是根据条件不同而因地制宜。

二、地基处理技术的发展历程

地基加固处理技术在我国的发展可谓源远流长,早在 3000 年前,我国就采用过竹子、木头、麦秸来加固地基;在 2000 多年前,人们早就采用了在软土中夯入碎石等压密土层的方法来对软土地基进行加固处理;灰土和三合土的垫层法,也一直是我国古代传统的建筑技术之一。新中国成立以来,我国地基处理技术的发展历程大体可分为以下两个阶段。

第一阶段:20 世纪 50~60 年代的起步应用阶段。这一时期大量地基处理技术从苏联引进,最为广泛使用的是垫层等浅层处理法。主要为砂石垫层、砂桩挤密、石灰桩、灰土桩、化学灌浆、重锤夯实、预浸水及井点降水等方法。该阶段的地基加固处理实践,为我国地基处理技术的发展积累了很多经验和教训。但由于受科学研究、实践经验的限制,在地基处理中主要参照苏联的规范与经验,仍具有一定的盲目性。

第二阶段:20 世纪 70 年代至今为应用、发展、创新阶段。这是我国地基处理技术发展的最主要阶段,大批的国外先进地基处理技术被引进国内,极大地促进了我国地基处理技术的应用和研究,初步形成了具有中国特色的地基加固处理技术。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、砂井法等都得到了广泛的研究和应用。另外,新材料、新机械的产生,使得地基加固处理技术得到了长足发展。

三、地基处理技术的未来展望

(一) 优化设计理论研究

地基处理实践的发展势必促进地基处理理论的进步,理论的进步又将指导地基处理实践的进一步发展。在加强地基处理一般理论研究的同时,应特别重视对地基处理优化设计理论的深入研究。地基处理优化设计包括两个层面:一是地基处理方法的合理选用;二是

方法的优化设计。目前,许多地基处理设计仅停留在能够解决工程问题上,没有做到合理选用设计方法,更没有做到优化设计方法。今后,应加强地基处理优化设计理论的研究。

(二) 新材料的开发应用

新材料的开发应用包括新型材料的开发和工业废渣、废料及建筑垃圾的利用两个方面。新型材料主要是指土工合成材料的开发,如目前常用的土工织物、土工膜、土工格栅、土工网、塑料排水带等。新型土工合成材料具有特殊的性能,能够明显改善地基土的性能,提高地基承载力、减小沉降和增加地基的稳定性。土工合成新型材料的发展必将促进地基处理新技术的发展。

近年来,利用工业废渣、废料和城市建筑垃圾处理地基的研究也取得了可喜的进步,如采用生石灰和粉煤灰开发的二灰桩复合地基、利用废钢渣开发的钢渣桩复合地基、利用城市建筑垃圾开发的渣土桩复合地基。这些工业废弃物的利用,是对我国生态文明建设、绿色工程建设的有益探索,可取得经济与生态的双重效益。

(三) 先进施工机械的研制

目前,在地基处理领域,我国施工机械能力与国外差距较大。如深层搅拌法、振冲法、高压喷射注浆法等工法的施工机械性能,与国外相比有着较大的差距。在引进国外先进施工机械的同时,更应重视自主创新能力的培养,积极研制国产高性能的先进施工机械,这必将是未来地基处理发展中急需解决的问题之一。

(四) 新工艺新技术的发展

地基处理理论的深入研究、新材料的开发、先进施工机械的研制必将促进地基处理的新工艺、新技术发展。新工艺和新技术必将带来更好的技术效果和经济效益,发展地基处理的新工艺、新技术也是工程建设的需要。

(五) 多种地基处理技术的综合应用

土的种类千变万化,即使同一种土在不同条件下也具有不同的特征,因此,地基处理的方法并非单一不变,往往是要根据不同条件、环境而采用多种方法综合处理。随着地基处理技术水平的提高,多种地基处理技术的综合应用将是我国地基处理技术发展的一个新动向。

第二章 置 换 法

采用爆破、夯击、挤压和振动及加入抗剪强度高的材料等方法,对地基深层的软弱土体进行振密和挤密的地基加固方法称为置换法。置换法适用于软土厚度 $>3\text{m}$ 的中厚软土的加固,分布面积广的软基加固处理,其加固深度可达到 30m 。

通过振动、挤压使地基中土体密实、固结,并利用加入的具有高抗剪强度的桩体材料置换部分软弱土体中的三相(气相、液相与固相)部分而形成复合地基,达到提高抗剪强度的目的。

置换法的主要加固方法:碎石桩法(振冲置换法)、石灰桩法、强夯置换法、水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩法)、柱锤冲扩法、EPS超轻质料填土法。代表方法有碎石桩法、强夯法、水泥粉煤灰碎石桩法、石灰桩法。

一、振冲置换法

(一) 概述

振冲置换法又称碎石桩法。

振冲法原是国外加固承载力低的黏性土、粉土、砂土、填土类地基的一种方法,又叫振冲挤密桩技术。在20世纪下半叶,原联邦德国、英国等国的工程界对此加以改造,通过振冲器的振动、射水,对地基振冲置换或振冲密实处理,在边振边冲的联合作用下形成桩孔,回填石料并挤密振实,从而在地基中形成密实桩体,使复合地基承载力得到提高,因而此法又叫振冲置换法。由于各国地质地理上的差异,这种先进的施工技术在各地有不同的应用,工艺也有所不同。近年来,我国东部地区已有总结这方面的施工技术的论文,在西部较为少见。在 $\times\times$ 电厂三期水源热泵房采用此法,取得了较好的效果。由于地泵房中间有一眼或两眼机井,在振冲中防范井位偏移的技术要求很强,国内外现有的资料少,因而将此法做如下介绍:

振冲挤密桩技术即振冲置换法先使用振冲器边沿水平方向振动,在高压水流的配合下在地基上打孔,然后用碎石等坚硬材料填充并用振冲器挤密,形成碎石桩。这样既使原地基被碎石桩挤实,又使软地基中的水分被压入碎石中,从而使原地基的物理力学性能极大改善,从而提高了地基的承载力,降低了地基的沉降量。根据验算,式(2-1)、式(2-2)可以估算处理后的地基承载力:

$$F_{CL}=[1+M(N-1)]R_S \quad (2-1)$$

$$F_{CL}=[1+M(N-1)] \times 3S_U \quad (2-2)$$

式中 F_{CL} ——复合地基容许承载力；

M ——面积转换率；

N ——桩土应力比；

R_S ——原地基容许承载力；

S_U ——原地基土的十字板抗剪强度，取平均值。

振冲置换法加固地基技术施工设备少、工艺简单、质量可靠、加固费用低廉、施工方便、工期短、经济效益良好。

(二) 案例分析

1. 工程概况

××电厂三期水源地泵房，沿渭河依次建在渭河漫滩和一级阶地上，从西向东有高架单井泵房 8 座，双井泵房 2 座。取水泵房见图 2-1。由于渭河漫滩地长年种植莲菜，属常年积水地段，地基承载力差，达不到设计要求。一级阶地属过去渭河淤积的砂黏土，承载力低，地震时有发生液化的可能性。为了提高地基承载力和消除在 8 度地震烈度下发生液化的可能性，在地基施工中对滩地和一级阶地上所建的 10 个泵房地基采用振冲法加固。



图 2-1 取水泵房

2. 施工准备

(1) 三通一平。

1) 水通。水是振冲的主要组成部分。一是要保证水通，保证施工所需的用水量；二是注意将施工中产生的泥浆有序排入泥浆池，集中处理。压力水同高压水泵通过胶管进入振冲器水管出口，水压需 400~600kPa。振冲器的管线上设置阀门，以便随时调节水量，施工中产生的泥浆通过明沟引入泥浆池集中处理，不能直接排入农田。

2) 电通。施工所需的电源,由施工单位自备 75kW 和 50kW 柴油发电机两台,施工用的三相电源,电压为 $380\text{V} \pm 20\text{V}$,过高、过低都会影响施工质量及损坏振冲器的潜水电机。

3) 料通。由于泵房位置比较分散,故要集中备料,以防运料路线对施工作业路线的干扰以及发生停工待料的现象。

4) 场地平整。将施工现场全面清理,恢复到原始地面标高,清除地基中的淤泥、杂草和障碍物等,因为障碍物会影响振冲器的正常工作,甚至损坏振冲器,淤泥会造成塌孔。

(2) 施工场地布置。根据施工场地具体情况,对场地中的供水管、电路、运输道路、排水明沟、料场、泥浆池、清水池等事项均事先布置,逐一安排。

(3) 桩位的确定。平整场地后测量地面标高,按桩位设计图在现场用小木桩标出桩位,偏差不得大于 3cm。

(4) 施工机具选择。主要机具是振冲器、吊车和各种水泵,振冲器是利用一个偏心体的旋转产生一定频率的水平向振力进行振冲置换施工的一种专用机械,本工程采用 ZC230 振冲器,此型号振冲器的潜水电机功率为 30kW,转速 1450r/min,额定电流 60A,振幅 1~2mm,最大水平振动 60kN。由于本工程场地小、转场多,所以选用易于在较小施工现场进行施工的、进出场方便、最大加固深度不小于 11m 的 12t 胎式吊车和抗扭胶管式专用汽车。水泵的规格选出口水压 400~600kPa,流量不小于 $40\text{m}^3/\text{h}$,每台振冲器配 2 台。其他设备有:运料工具、泥浆泵、配电柜等。

(5) 填充料的要求。制作桩体填料按设计要求为 3~7cm 砾石,含泥量不大于 8%,对填料的颗粒级配没有特别要求,但填料最大砾径最好不要大于 5cm,太大易卡孔。

3. 施工工艺

(1) 制桩的操作步骤:机具定位→造孔→扩孔→清孔→填料。

1) 机具定位。将振冲器对准桩位,开启下射水口并接通电源,检查水压、电压和振冲器的空载电流,要求水压大于 500kPa,电压等于 $380\text{V} \pm 20\text{V}$,空载电流小于 25A。

2) 造孔。启动施工车使振冲器以 1~2m/min 速度下沉,每贯入 0.5~1m 宜留振 5~10s 扩孔,待孔内泥浆溢出时再继续下沉,注意振冲器下沉中的电流不得超过电机的额定电流值。在造孔过程中,要记录振冲器经过各深度的电流值和时间。

3) 扩孔。当振冲器达到设计加固深度以上 30~50cm 时,开始将振冲器以 5~6m/min 上提,水压减小至 300~400kPa。

4) 清孔。重复上述步骤 1~2 次,如果孔口有泥块堵住应将其清除,最后将振冲器停留在设计加固深度以上 30~50cm 处,借循环水使孔内泥浆变稀,使水压保持在 400kPa,冲水清洗 1~2min,然后将振冲器提出孔口,准备填料。

5) 间断下料。往孔内倒 $0.15 \sim 0.5\text{m}^3$ 高度 0.5~1m 的填料,将振冲器沉至料中振实,这时振冲器不仅使填料密实,并使填料挤入孔壁中,从而使桩径扩大。由于填料的不断挤入,孔壁上的约束力逐渐增大,直到约束力和振冲器产生的振力相等,桩径不再扩大。这

时,振冲器电机的电流值迅速增大,达到规定值 55~60A,表示该处桩体已经密实,可提出振冲器再次填料。振冲填料时宜小量给水,3m 以下水压保持在 500kPa,3m 以上减至 300kPa,以防泥砂倒灌入水管。每倒一批料进行振密,都必须记录深度、填料量、振密时间和电流。

6) 重复以上步骤,自下而上制作桩体,直至成桩。

7) 关振冲器、关水、移位。

(2) 桩的施工顺序。由于本工程中央有一眼或两眼井,为了避免振冲施工影响井位,使其发生偏移,施工顺序采用“由里向外”的方式,对称制桩,并在邻近井位时应减幅制桩,以减少振冲对井位的影响。

(3) 填料方式。

1) 31 号、32 号、33 号泵房位于一级阶地,其桩制作是在地基内成孔后,将振冲器提出孔口,接着往孔内加填料,往孔内倒入约 1m 高填料,然后下降振冲器将填料振实,如此循环,直至成桩。

2) 对位于莲菜地的 24~30 号泵房桩基,采用“先护壁,后制桩”的施工方法,即成孔时不要一下达到设计深度,而是先达到软层上部 1m 范围内时将振冲器提出,加第一批填料,再下降振冲器将这批填料挤入孔壁,使这段孔壁加强以防坍孔,然后使振冲器下降至下一段软土中,用同样的方法护壁。如此重复,直至设计深度,再按常规制桩。

(4) 记录。振冲置换施工完毕,要及时填写制桩统计表。填写内容:桩号、制桩深度、填料量、时间和完成日期。

(5) 表层处理。桩顶部约 1.5~1.8m 范围内,由于该处地基土的覆盖压力小,施工时桩体的密度很难达到要求,为此将该段挖去,铺上 50cm 砾石垫层做基础。

4. 施工质量控制

对振冲桩施工质量的控制实质上就是水、电、料三者的控制。

(1) 水。要控制水量、水压,造孔时水压大于 500kPa,扩孔洗孔的水压为 400kPa,填料水压控制在 300kPa,保证水量充足,使孔内充满水可防塌孔,使制桩工作顺利进行。

(2) 电。主要控制加料振密过程中的密实电流。密实电流规定值根据桩的桩径、桩长而定,本工程为 55~60A。在制桩时,值得注意的是不能把振冲器刚接触到填料的瞬时电流作为密实电流,瞬时电流有时可能达 100~120A,但只要振冲器停住不降,电流值就会立即变小。只有振冲器在固定深度留振一定时间,电流值稳定在某一数值,这一稳定电流才代表填料密实程度。稳定电流超过密实电流值,该段桩才算制作完毕。

(3) 料。加填料不宜过猛,原则上“少吃多餐”,即勤加料。每批填料不要加得太多。值得注意的是在制作最深处桩体时,达到密实电流所需的填料远比制作其他部分要多。

总的说来,施工质量的控制,就是谨慎地掌握好填料量、密实电流和留振时间这三个要素。只有这三个方面都达到规定值,施工质量才有保证,才能达到预期的加固效果。

5. 总结

本工程委托××市勘察测绘院地基检测站进行地基质量检测。按照规范要求,检测试验应在振冲桩制作结束,待桩体及桩间超孔隙水压基本消散后进行。本工程检测时间定在制桩完毕后16天进行。

检测方法:采用重型2动力触探法。随机选取单元为4个,总检测桩数为32根,约占总桩数的3%以上,每单元的点位数为4处。

结果:单元工程质量达到优良等级的占总数的84.38%,达到合格标准的占100%。地基处理后的相对紧密度满足8度地震设防抗液化的要求,达到了设计预期的效果。与处理前比较,承载力提高了3倍。

××电厂24~30号10个泵房地基设计要求允许承载力为180kPa,并消除8度地震烈度下发生液化的可能性。

本工程地基处理采用振冲置换法(碎石桩法),此次处理共计882根桩,桩径80cm,桩长7~8m,桩距为1.5m,经振冲法加固处理后的地基承载力24~30号达到220kPa,31~33号达到260kPa,是设计要求的1.2~1.5倍,并消除了8度地震烈度下发生液化的可能性,效果显著。

二、石灰桩法

(一) 概述

石灰桩法适用于处理饱和黏性土、淤泥、淤泥质土、素填土和杂填土地基。目前,这种建筑技术还在进一步的深入研究,使其施工工艺更加完善,适用范围更加广泛,并在设计与施工中更加地科学化、规范化,以便取得更好的经济效益。石灰桩法处理软土地基见图2-2。



图 2-2 石灰桩法处理软土地基

1. 物理加固机理

石灰桩在不排土成桩过程中,对土会发生挤密效果,静压、振动、击入成孔和成桩夯实料的不同,桩径和桩距的不同,都会对挤密效果有一定影响,土质、上覆压力和地下水状况也与挤密效果密切相关。

浅层加固的石灰桩,加固土层的上覆盖压力不大,会有隆起现象发生,挤密效应不大。一般的黏性土、粉土可以采用 1.1 左右的承载力提高系数,杂填土和含水量高的素填土提高系数定在 1.2 左右,饱和黏性土则可以不予考虑。石灰桩在吸水后会发生膨胀,对挤密有加固作用,经挤密后桩间土的强度为原来强度的 1.1~1.2 倍。

石灰桩和天然地基组成复合地基,石灰桩一般承受总荷载的 35%~60%,荷载应力在桩上集中,从而使复合地基的承载力大幅度提高,这在提高地基承载力上有很重要的作用。

当下卧层强度较低时,可以增加石灰桩的数量,采用排土成桩,这样加固层的自重降低,作用在桩端平面的自重应力也相应减小,对下卧层的减载有很好的作用。

2. 化学加固作用

试验表明,石灰和粉煤灰组成的桩体反应后会产生六种化合物,新生的化合物不仅仅是单一的硅酸盐类,还有复式盐及碳酸盐类,这些都不易溶于水,在含水量高的地基中,这种桩可以很好地硬化,承载效果好。

石灰桩还可以与桩周土进行离子交换,改变黏性土的带电状态,使其土粒凝聚、团粒增大、塑性减小、抗剪强度提高。

石灰桩中的钙离子可以与胶态硅、铝发生化学反应,生成复杂的化合物。反应虽然很慢,但一旦生成胶粘剂后,土的强度就会明显提高,且具有长期的稳定性。

3. 石灰桩的龄期

石灰桩的加固机理主要有物理和化学两方面,物理的固化完成得较快,需要时间短,化学的固化作用相对用时较长。石灰桩一个月的强度可以达到半年强度的 70%左右,7 天的强度大致相当于一个月龄期的 65%左右。石灰桩的强度提升是一个漫长的过程,施工几年后经观察强度还会有所提升。桩间土的长期稳定性和天然地基也很接近。

(二) 案例分析

1. 工程概况

某沿江城市新建 110kV 变电所,总建筑面积约 3600m²。该变电所场区地势平坦,地貌形态属长江河漫滩阶地。据勘察,土层自上而下分别为杂填土、黏土、粉质黏土夹粉土、淤泥质黏土、粉砂夹粉质黏土。各土层岩性特征分述如下:

① 杂填土。层厚 1.0~1.5m, 由黏性土夹生活垃圾组成, 结构杂乱, 土质不均。

② 黏土。层厚 3.5~4.5m, 黄褐色, 稍湿~湿, 可塑偏软, 属中压缩性土层。 $f_{ak}=100\text{kPa}$, $E_s=4.3\text{MPa}$ 。

③ 粉质黏土夹粉砂。层厚 1.8~3.2m, 褐灰色~灰色, 很湿~饱和, 软塑~流塑, 属中~高压压缩性土层。 $f_{ak}=80\text{kPa}$, $E_s=3.3\text{MPa}$ 。

④ 淤泥质黏土。层厚 1.5~4.9m, 青灰色, 湿, 软~流塑, 夹泥炭, 属高压压缩性土层。 $f_{ak}=80\text{kPa}$, $E_s=3.0\text{MPa}$ 。

⑤ 粉砂夹粉质黏土。层厚 4.1~4.8m, 灰色, 很湿~饱和, 稍密, 属中~高压压缩性土层。 $f_{ak}=140\text{kPa}$ 。

2. 工程设计

基础占地面积为 526m^2 , 原设计采用预应力混凝土管桩, 桩长为 10m, 总桩数 510 根, 造价较高。后应建设方要求, 设计人员重新进行了方案比较, 经多方讨论后, 决定采用人工石灰桩法来进行地基处理。

由于人工石灰桩施工深度有限, 仅对地表下 5m 内②黏土进行浅层处理。本工程设计桩径 $d=300\text{mm}$, 桩距为 700mm, 正方形布置, 设计桩长 4m, 复合地基承载力设计值为 140kPa。

由于设计桩径 $d=300\text{mm}$, 膨胀后实际桩径约为 330mm, 外加桩边约 1cm 厚硬壳层, 则实际桩径 $d_1=350\text{mm}$ 。

采用下式计算桩间土承载力 f_{sk} :

$$f_{sk} = \left[\frac{(K-1)d^2}{A_c(1-m)} + 1 \right] \mu f_{ak}$$

$$m = \frac{d^2}{d_c^2}$$

式中 f_{sk} ——天然地基承载力特征值 (kPa), 本工程中, $f_{sk}=100\text{kPa}$;

K ——桩边土强度提高系数, 取 1.4~1.6, 软土取高值, 本工程中, 选取 $k=1.6$;

A_c ——一根桩分担的地基处理面积 (m^2);

m ——面积置换率;

d ——桩身平均直径 (m);

μ ——成桩中挤压系统排土成孔时 $\mu=1$, 挤土成孔时 $\mu=1\sim 1.3$ (可挤密土取高值, 饱和和软土取 1), 本工程中, 选取 $\mu=1$ 。

经计算: 平均置换率 $m=0.196$; 理论布桩总数 $n=1072$ (实际布桩总数 1120 根), $f_{sk}=118\text{kPa}$ 。

然后, 根据下式计算石灰桩复合地基承载力特征值 f_{spk}

$$f_{spk} = m f_{pk} + (1-m) f_{sk}$$

式中 f_{pk} ——石灰桩桩身抗压强度比例界限值 (kPa), 本工程中, 选取 $f_{pk}=300\text{kPa}$;

f_{sk} ——石灰桩处理后桩间土的承载力特征值 (kPa), $f_{sk}=118\text{kPa}$;

m ——石灰桩面积置换率, 取 0.196。

经计算: $f_{spk}=154\text{kPa}>140\text{kPa}$, 满足设计要求。

3. 工程施工

本工程石灰桩施工采用人工洛阳铲成孔工艺。人工洛阳铲成孔具有施工条件简单、施工速度快、不受场地条件限制和造价低等优点。

石灰桩桩体材料为生石灰和活性掺合料。规定生石灰 CaO 含量不得小于 70%, 石灰块直径不超过 5~8cm。根据该场地地质条件, 掺合料选用粉煤灰, 材料配比为生石灰:粉煤灰=1:2 (体积比)。粉煤灰含水量在 30%左右。在石灰桩施工过程中, 成孔、清底、抽水、夯填、封口过程中的施工质量均进行严格把关。孔深、孔径均达到设计要求, 填料均在孔口充分拌匀, 而且每次下料高度都不大于 0.4m, 夯填密实度大于设计配合比最佳密实度 90%。

由于生石灰与粉煤灰表现密度小于地基土, 因此排土成孔石灰桩施工工艺具有使加固层减载的优点。由于桩体材料置换土体, 使得石灰桩比同体积的土体重量减小了 1/3 以上, 因而对软弱下卧层的压力减小, 这个因素在此工程设计计算中未考虑, 作为安全储备。

为使桩间土得到最佳的挤密效果, 此工程施工顺序为从外向里, 隔排施工。先施工最外排石灰桩, 可起到隔水的作用, 场地地下水因石灰桩灌孔时抽水外排而不断降低, 这对于保证成桩速度和成桩质量都起到了积极作用。

石灰桩施工进度较快, 全部石灰桩施工在 20 天左右。

4. 工程检测及效果

石灰桩 28 天龄期的桩身强度仅为后期强度的 50%~60%, 通常以 28 天检测结果确定石灰桩复合地基承载力。

本工程共对 15 根桩和桩间土 15 个点进行了静力触探检测。结果表明, 桩体强度 $f_{pk}=320\text{kPa}$, 桩间土承载力 $f_{sk}=120\text{kPa}$, 石灰桩复合地基承载力 $f_{spk}=160\text{kPa}$, 满足设计要求。

建筑物施工过程中进行了沉降观测, 竣工后一年, 沉降基本均匀且趋于稳定, 满足设计要求。

5. 总结

(1) 一般在软土地区 7 层以下工业与民用建筑物, 在地下水位很高的条件下, 采用石灰桩法处理地基基础往往既经济, 施工进度又较快, 效果较佳。

(2) 采用石灰桩法处理地基时, 为防止石灰桩向上膨胀, 在桩顶部分用黏土夯实, 且封土厚度均不小于 0.4m。这样可使石灰桩侧向膨胀, 将地基土挤密。