

地基处理技术丛书之二

© 赵维炳 唐彤芝 高长胜 戴济群 编著

# 控制工后沉降处理 深厚软土 地基

KONGZHIGONGHOU  
CHENJIANGCHULI  
SHENHOURUANTU  
DIJI



人民交通出版社  
China Communications Press

# 控制工后沉降处理深厚软土地基

(本书由南京水利科学研究院出版基金资助)

赵维炳 唐彤芝 编著  
高长胜 戴济群

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是作者们多年理论与工程实践的总结,对于解决深厚软土地基处理这一重大技术难题、推动地基处理技术的更新换代、提高工程质量和降低工程造价均具有重要意义。本书全面地阐述了大面积深厚软基处理施工工艺、设计方法、质量保证措施、加固效果检验方法与标准。这些内容不仅能促进地基处理学术理论的发展,而且可以直接推广应用于工程建设实践,为工程技术人员处理类似工程问题提供重要的指导和借鉴。

本书适合于从事公路、水利、港口、机场等工程的设计人员、施工人员和研究人员使用,也可供高等院校相关专业的师生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工后沉降处理深厚软土地基/赵维炳等编著.  
北京:人民交通出版社,2006.9  
ISBN 7-114-06126-9

I.控... II.赵... III.软土地基-沉降(土建)  
-地基处理 IV.TU447

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 097032 号

书 名:控制工后沉降处理深厚软土地基

著 作 者:赵维炳 唐彤芝 高长胜 戴济群

责任编辑:侯素燕

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)85285838,85285995

总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司

经 销:各地新华书店

印 刷:北京凯通印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:15

字 数:365 千

版 次:2006 年 10 月 第 1 版

印 次:2006 年 10 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-114-06126-9

印 数:0001—3000 册

定 价:28.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 序 言

在水利、交通等土木工程建设中,深厚软基处理和控制工后沉降是亟待研究解决的两个重大关键性难题,经常成为重大工程设计方案审查论证时争论的焦点。

地基处理从保证地基承载力或稳定性为主转向以控制变形,尤其是控制工后沉降为主,既是工程的客观需求,也是技术发展的必然趋势。深厚软基控制工后沉降处理技术不仅包含施工设备和工艺问题,也牵涉到复杂的学术理论和设计方法问题。由于问题的复杂性,长期以来并未得到系统地解决,直接影响到工程的质量、投资及工期。

赵维炳教授领导的科研小组长期以来致力于深厚软基控制工后沉降处理技术研究。他们强调对工程第一手资料的掌握和不同类型工程经验的总结,在此基础上,深入分析工后沉降机理与变化规律,建立考虑软土弹塑性、流变及固结特性影响的工后沉降计算方法,揭示现有处理方法存在的问题及改进方向,对控制工后沉降要求下的深厚软土地基处理的新技术进行深入系统的研究,解决了许多重大技术问题,并建立了系统性的新的深厚软土地基固结、变形及工后沉降的计算理论和方法。

本书是作者们多年理论研究与工程实践的总结,对于解决深厚软土地基处理这一重大技术难题、推动地基处理技术的更新换代、提高工程质量和降低工程造价均具有重要作用。本书所涉及的大面积深厚软基处理施工工艺、设计方法、质量保证措施、加固效果检验方法与标准等成果不仅促进了地基处理学术理论的发展,而且可以直接推广应用于工程建设实践,为工程技术人员处理类似工程问题提供重要的指导和借鉴。

中国工程院院士

张在明

# 前 言

深厚软土地基的处理一直是困扰工程建设者的重大技术难题,直接影响到工程的质量、投资及工期。地基处理从保证地基稳定性(或承载力)为主转向控制变形(尤其是工后沉降)为主,这是工程技术发展的必然趋势,有利于提高工程质量。但目前地基固结变形计算理论与方法仍需进一步改进,深厚软土地基的变形特性仍需进一步研究,这些情况均不能适应按控制变形设计的深厚软土地基处理要求。为此我们结合近年来所承担的国家自然科学基金项目“控制工后沉降地基处理设计理论与方法研究”(批准号:50279021)、水利部科技创新基金项目“控制工后沉降深厚软粘土地基处理技术研究”(批准号:SCX2002-17)等研究成果,对控制工后沉降处理深厚软土地基的理论与实践进行了归纳总结,遂成此书。可以说,本书是近年来作者们理论与工程实践的总结。

本书由赵维炳总负责并审核。全书共分四章,第一章介绍按控制工后沉降深厚软土地基处理的基本概念,由赵维炳编写。第二章介绍采用真空联合堆载预压法处理深厚软土地基的原理、本构模型、固结设计理论、现场试验研究以及控制工后沉降的设计方法等内容,由高长胜统稿,赵维炳编写第1节,明经平编写第2节,高长胜、刘加才编写第3节、第6节,黄家青编写第4节,乐茂华编写第5节。第三章介绍采用CFG桩处理深厚软土地基的机理、室内外模型试验、固结理论以及控制工后沉降设计方法等内容,由唐彤芝统稿,赵维炳编写第1节,戴济群编写第2节、第5节,唐彤芝编写第3节、第6节,高长胜编写第4节。第四章介绍薄壁管桩技术处理深厚软土地基的机理、设计计算方法和现场试验等,由娄炎统稿,娄炎、韩雪峰编写第1、第2、第3、第4、第6节,娄炎、何宁、关秉洪编写第5节。

本书在编写过程中参考了大量的技术文献,引用了国内外许多专家学者的研究成果和资料,在此表示诚挚的谢意。

本书得到了南京水利科学研究院出版基金的资助,中国工程院张在明院士在百忙中为本书作序,人民交通出版社的夏迎同志为本书出版做了大量的工作,在此作者表示诚挚谢意,并向支持本书出版的各位领导和专家表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不当之处,恳请各位专家和读者批评指正。

赵维炳

2006年8月于南京

# 目次

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第一章 控制工后沉降深厚软基处理技术的基本概念   | 1   |
| 第1节 工后沉降的基本概念及控制的重要性      | 1   |
| 1.1 概述                    | 1   |
| 1.2 工后沉降的概念及分类            | 2   |
| 1.3 按控制工后沉降进行设计及带来的影响     | 2   |
| 第2节 目前常用深厚软基处理方法的局限性      | 3   |
| 第3节 深厚软基控制工后沉降处理技术亟需研究的问题 | 3   |
| 本章主要参考文献                  | 5   |
| 第二章 真空联合堆载预压法处理深厚软土地基     | 6   |
| 第1节 真空联合堆载预压法原理           | 6   |
| 1.1 真空预压法基本原理             | 6   |
| 1.2 堆载预压法基本原理             | 7   |
| 1.3 真空联合堆载预压法基本原理         | 7   |
| 第2节 本构模型                  | 8   |
| 2.1 真空压力卸载下软土地基变形规律研究     | 8   |
| 2.2 软土卸载再加载本构模型研究         | 23  |
| 2.3 考虑卸载一再加载本构模型的改进       | 24  |
| 第3节 固结理论                  | 29  |
| 3.1 单向固结问题                | 29  |
| 3.2 竖井打穿软土层情况             | 47  |
| 3.3 竖井未打穿软土层情况            | 60  |
| 3.4 固结计算中若干指标             | 76  |
| 第4节 现场试验研究                | 84  |
| 4.1 真空联合堆载预压试验研究          | 84  |
| 4.2 真空联合堆载预压与堆载预压现场对比试验研究 | 99  |
| 第5节 提高软基深层加固效果的措施         | 106 |
| 5.1 概述                    | 106 |
| 5.2 现场试验研究                | 106 |
| 5.3 结论                    | 112 |
| 第6节 按控制工后沉降设计方法           | 112 |
| 6.1 按工后沉降控制实用设计方法研究       | 112 |
| 6.2 工后沉降预测与计算方法           | 120 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 6.3 控制沉降真空预压停泵标准 .....           | 125 |
| 本章主要参考文献 .....                   | 128 |
| <b>第三章 CFG桩复合地基法处理深厚软基</b> ..... | 131 |
| 第1节 加固原理及适用条件 .....              | 131 |
| 第2节 研究依托工程 .....                 | 132 |
| 2.1 地理位置 .....                   | 132 |
| 2.2 试验段选择及软基处理设计方案 .....         | 132 |
| 2.3 试验段工程地质概况 .....              | 133 |
| 第3节 CFG桩复合地基成桩效应及固结理论 .....      | 141 |
| 3.1 复合地基固结理论研究综述 .....           | 141 |
| 3.2 打穿软土层 CFG桩复合地基固结理论 .....     | 143 |
| 3.3 未打穿软土层 CFG桩复合地基固结理论 .....    | 155 |
| 第4节 CFG桩复合地基室内模型试验研究 .....       | 171 |
| 4.1 引言 .....                     | 171 |
| 4.2 模型制备 .....                   | 171 |
| 4.3 载荷试验 .....                   | 173 |
| 4.4 试验结果分析 .....                 | 174 |
| 4.5 结论 .....                     | 178 |
| 第5节 现场试验研究及分析 .....              | 179 |
| 5.1 施工工艺研究 .....                 | 179 |
| 5.2 CFG桩复合地基平面应变有限元模拟 .....      | 181 |
| 第6节 CFG桩加固深厚软基的实用设计方法 .....      | 189 |
| 6.1 CFG桩复合地基减少工后沉降机理 .....       | 189 |
| 6.2 现有复合地基沉降计算方法 .....           | 190 |
| 6.3 CFG桩复合地基工后沉降设计计算方法 .....     | 191 |
| 本章主要参考文献 .....                   | 195 |
| <b>第四章 薄壁管桩处理深厚软基</b> .....      | 196 |
| 第1节 薄壁管桩加固深厚软基的机理 .....          | 196 |
| 1.1 引言 .....                     | 196 |
| 1.2 机理分析 .....                   | 196 |
| 第2节 依托工程概况 .....                 | 196 |
| 2.1 试验段概况 .....                  | 196 |
| 2.2 预应力管桩处理段的工程地质特征 .....        | 197 |
| 第3节 管桩复合地基的 ABAQUS 模拟 .....      | 198 |
| 3.1 有限元法的基本原理 .....              | 198 |
| 3.2 ABAQUS 程序介绍 .....            | 200 |
| 3.3 工程实例分析 .....                 | 202 |
| 3.4 小结 .....                     | 207 |
| 第4节 管桩复合地基受力及沉降特性分析 .....        | 207 |
| 4.1 复合地基桩土共同作用机理 .....           | 207 |

|          |                         |     |
|----------|-------------------------|-----|
| 4.2      | 数值模拟方案 .....            | 208 |
| 4.3      | 桩、土应力比分析 .....          | 208 |
| 4.4      | 桩身荷载传递分析 .....          | 209 |
| 4.5      | 管桩复合地基沉降特性分析 .....      | 211 |
| 4.6      | 小结 .....                | 214 |
| 第 5 节    | 薄壁管桩复合地基现场试验研究 .....    | 215 |
| 5.1      | 试验监测 .....              | 215 |
| 5.2      | 仪器的布置和埋设 .....          | 216 |
| 5.3      | 加载前观测分析 .....           | 217 |
| 5.4      | 路堤荷载下观测结果分析 .....       | 218 |
| 5.5      | 小结 .....                | 221 |
| 第 6 节    | 薄壁管桩加固深厚软基的实用设计方法 ..... | 221 |
| 6.1      | 管桩复合地基桩土应力比计算方法 .....   | 221 |
| 6.2      | 管桩复合地基承载力计算 .....       | 223 |
| 6.3      | 管桩复合地基沉降量计算 .....       | 224 |
| 6.4      | 工程实例分析 .....            | 225 |
| 6.5      | 小结 .....                | 225 |
| 本章主要参考文献 | .....                   | 225 |



# 第一章 控制工后沉降深厚软基处理技术的基本概念

## 第1节 工后沉降的基本概念及控制的重要性

### 1.1 概述

地基处理是岩土工程实践的重要内容,具有很悠久的历史,积累了丰富的经验。我国目前正处在水利、交通、电力、市政等基础设施建设的高潮期,工程建设中遇到大量的深厚软土地基处理问题。长期以来,地基处理以保证地基在上部结构施工和使用过程中的稳定性和安全为目的,据此形成了比较成熟的设计方法与施工技术,积累了丰富的经验,其设计、施工和质量检验标准和方法等较为成熟。

随着经济建设和工程技术的发展,对地基处理提出了新的更高的要求,通过工程实践,人们认识到建筑工程仅仅保证稳定性和安全还不够,有些工程由于变形过大影响使用功能,甚至导致工程失事。如,基坑和隧道支护结构因水平位移过大(并未超出挡土结构稳定的位移极限值)而产生的周围建筑物开裂或管线拉裂等环境影响事故;地基不均匀沉降导致建筑物倾斜或结构内有害内力、道路不平整和桥头跳车等。工程实践表明,深厚软土地基经过处理后,其变形尤其是工后沉降过大,常导致工程发生质量事故,这就使得工程实践中对变形的要求不断提高。如高速公路路面施工前路基沉降的控制标准从1990年的10mm/月提高到目前的5mm/月。总之,只保证地基的稳定性并不够,还必须控制地基的变形,尤其是工后沉降,才能更好地保证工程的质量和安全性。变形的控制隐含着对稳定性的控制,而且要求更高和更合理,是设计理论与方法为了适应国家经济发展对地基处理提出的更高要求而发展的必然结果。地基处理从控制稳定向控制变形转变,将带来设计理论与方法、检测及施工技术等方面的重要变化。

工程实践表明,尽管在我国的一些设计规范中规定工后沉降、沉降速率及平整度均不得超过规定的标准,工程设计中一般也按此要求进行计算,据此对地基处理方法进行设计,但是目前的这种计算分析还是相当粗糙的,计算结果的误差极大,经常出现误差超过100%甚至更大的情况。因此设计人员在实际设计中仍重点考虑控制地基稳定性,地基处理方案设计以经验类比为主,控制工后沉降方面一般只作初步验算,因把握不足而盲目从严要求,缺乏对工后沉降深入准确的分析及对加固技术参数的优化设计,也经常会出现因工后沉降估算不准而导致地基处理方法选择不当现象。总之,在设计中规范虽提出了控制工后沉降的要求,但实际设计中因技术上的困难而执行不严和工作粗糙,亟待解决的问题很多。强调地基处理从控制工后沉降出发,有利于加强对变形问题的认识,促进变形计算和地基处理技术的发展。

## 1.2 工后沉降的概念及分类

工后沉降是指建筑物竣工以后至大修或报废为止一段时间(简称为工后)内发生的沉降。它直接关系到建筑物的使用效果和安全,而施工期和大修后的沉降并不对上部结构产生危害,因此工程设计以工后沉降作为控制目标是合理的。

工后沉降  $S_h$  根据其产生的原因可划分为加固体工后压缩量  $S_{gh}$ , 下卧层工后压缩量  $S_{xh}$ 、加固体和下卧层工后次固结压缩量  $S_{ch}$  三部分, 即:

$$S_h = S_{gh} + S_{xh} + S_{ch} \quad (1.1-1)$$

而每一部分工后压缩量又可写成对应的总压缩量  $S^*$  与变形比增量  $\Delta V^* = V_x^* - V_j^*$  之乘积。其中  $V$  表示变形比, 即某时刻压缩量与最终压缩量的比值, 对弹性土体且一次性加载情况下等于固结度  $U$ , 对于软土具有流变性和分级加载等情况变形比不等于固结度, 以下为简化起见假设固结变形比等于固结度。 $*$  表示以上三部分中的一种,  $x$  表示大修或报废时,  $j$  表示竣工时。因此公式(1.1-1)又可写成

$$S_h = S_g^* (V_{gx} - V_{gj}) + S_x^* (V_{xx} - V_{xj}) + S_c^* (V_{cx} - V_{cj}) \quad (1.1-2)$$

## 1.3 按控制工后沉降进行设计及带来的影响

按控制工后沉降设计就是把工后沉降控制在规定的限制值内作为目标, 据此进行设计, 它概括了保证安全稳定和正常使用功能两方面的要求。从公式(1.1-2)可以看出, 要控制工后沉降必须从解决加固体工后压缩量、下卧层工后压缩量、加固体和下卧层工后次固结压缩量三方面入手。由于土是塑性为主的弹塑性材料, 变形大部分不可恢复, 企图使加固体在加固施工期的压缩量超过其设计荷载下的总压缩量来抵消下卧层工后压缩量及工后次固结压缩量的做法是不可能实现的。换言之, 必须通过加固将三部分工后压缩量都控制得比较小, 才能保证工后沉降控制在规定的较小值。目前工程实践中经常发生施工期安全和稳定得到了保证, 但工后沉降过大的现象, 其主要原因是对加固体的设计较重视, 而对下卧层和次固结问题重视不够, 下卧层工后压缩量及次固结压缩量过大, 从而导致工后沉降过大。

另一方面, 从公式(1.1-2)可以看出, 在工后沉降控制值和各部分总压缩量不变的条件下, 保证工后沉降总量不超过控制值有多种选择, 使得设计时有一定的回旋余地, 如施工期加固体变形比较大(超载预压时可达或超过 100%), 则下卧层变形比可较小, 次固结性质不明显的土, 其(主)固结变形可以较大等。

按控制工后沉降来进行设计, 将带来许多重要的变化, 主要包括:

(1) 设计方法的变化。现设计以稳定(承载力)计算和控制为主, 变形计算处于次要位置, 现应转化到变形计算和控制为主, 必要时验算稳定性(一般能满足)。但目前工后变形控制标准的制订仍不成熟和缺乏经验, 根据保证结构使用效能和安全稳定制订工后变形控制标准的工作亟待加强和深化。

(2) 变形和固结计算方法的进步。现有计算方法过于粗糙, 精度低, 很不成熟, 这与过去研究工作重视不够有密切关系。随着按工后沉降控制设计的实现, 以分层总和为代表的总沉降计算方法、以太沙基和巴隆公式为基础的固结计算方法、次固结变形的经验公式计算方法亟待完善, 以比奥固结理论为基础的变形与应力耦合数值分析方法将得到广泛的应用, 其中应考虑

土体的弹塑性、流变性 & 施工过程的影响。

(3) 计算范围扩大。现有设计方法中对加固体性质和影响的研究与计算较为重视,对下卧层和次固结变形的研究和计算不够重视,今后应该加强。

(4) 处理深度加大。现有设计方法从保证安全稳定和控制总沉降量出发,对地面以下 20m (有些工程甚至只考虑 15m) 深度范围内主要压缩层的软土进行加固,遇到下卧土层仍为中高压缩性土时因下卧层工后压缩量大而导致工后沉降过大。因此,必须加强对深部土层工后压缩量的计算分析工作,必要时加大处理深度。

(5) 新型加固施工机械和施工工艺的发展。控制工后沉降新一代地基处理技术,除了对上部土层加固以外,还要对深层土进行加固,对沿海、沿江流变性质显著的软土,要采取措施改变其结构从而减少工后次固结压缩量。为适应这些新的要求,地基处理技术必然要改进,一些新的处理技术将得到发展和应用。

(6) 测试技术和工程质量检验技术的发展。由于加固深度的加大,工后沉降的历时长,工后沉降的量相对总沉降量而言较小,要求提高新一代地基处理技术中测试技术的精度和稳定性,测试深度要深。

## 第 2 节 目前常用深厚软基处理方法的局限性

深厚软土地基主要有饱和软粘土土层为主和松散沙(粉)土土层为主的两大类地基。这两类土的物理、力学性质很不相同,在工程实践中必须注意它们的各自特性,采取不同的地基处理方法进行处理。

目前深厚饱和粘土为主地基的处理方法主要是堆载预压和水泥搅拌(含粉喷)桩等方法,其中堆载预压排水固结方法存在加固期长、加固深度浅、工后沉降大、为保证地基稳定对加载速度要求严等问题;水泥搅拌桩存在加固深度浅(粉喷桩一般不宜超过 12m、喷浆搅拌桩一般不宜超过 14m)、因配合比和施工工艺必须根据地质条件及时调整而对施工单位技术水平要求严格、施工质量难以保证等问题。采用完全的刚性桩基础,其地基处理的成本又将大大增加。

深厚松散沙(粉)土为主地基的处理方法主要有强夯法、挤密砂(石)桩法和水泥搅拌(含粉喷)桩等方法。其中强夯法存在缺乏成熟设计计算方法、加固设备夯击能量小、加固深度浅(一般在 10m 左右)等问题,遇到地下水位高时还将产生施工困难、加固效果差等问题;挤密砂(石)桩存在遇到硬夹层穿透困难、天然软土强度低时桩的承载力小等问题。

## 第 3 节 深厚软基控制工后沉降处理技术亟需研究的问题

控制工后沉降和深厚软基处理是亟待研究解决的两个重大关键性难题,经常成为重大工程设计方案审查论证时争论的焦点。深厚软基控制工后沉降处理技术既包含施工设备和工艺问题,也牵涉到复杂的学术理论问题,由于问题的复杂性,长期以来未得到很好解决。

针对上述情况,依托有关深厚软土地基处理工程,应用软土弹塑性、固结、流变、施工扰动损伤等理论,对深厚软土地基的应力传播和工后沉降变化规律进行深入研究,对深厚软土地基工后沉降计算分析的基本理论和方法,特别是适用于严格控制工后沉降要求下深厚软土地基

处理的真空联合堆载、水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)和薄壁管桩处理方法的加固机理、施工工艺、设计方法、质量保证措施、加固效果等进行系统研究,对促进深厚软土地基处理技术的发展具有重大意义。研究内容具体可分为以下几个方面:

(1)深厚软基工后沉降规律研究。对软土粘性、弹性、塑性、固结等工程性质进行试验研究,改进和提出适用于软土的本构关系模型,在比奥固结理论基础上,考虑施工过程影响(如排水固结方法中设置竖向排水通道时对地基中软土的扰动,复合地基中柔性桩成桩过程中对周围软土的扰动、挤密、水泥浆渗入固化等),利用有限元等数值分析方法对地基处理效果和稳定变形性状进行仿真分析,阐明加固机理,明确深厚软土地基和复合地基中应力传播和工后沉降的变化规律,揭示现有加固方法存在的问题,提出改进、完善现有加固方法和开发新型加固技术的发展方向。

(2)真空联合堆载排水预压加固技术研究。真空联合堆载排水预压加固是将真空排水预压固结和堆载排水预压固结相结合进行软弱地基加固的地基处理方法。在加固软土时分别产生负超静孔隙水压力(真空预压)和正超静孔隙水压力(堆载产生),而且两者可以叠加,最终使土体产生垂直压缩变形和使土体强度提高。从地基变形的角度分析,真空预压过程中,土体的沉降主要是土体中孔隙水的排出,减小孔隙比,土体压密所产生的固结沉降。由于真空预压土体固结为等向固结,不产生剪应力,即预压区周围不会产生剪切变形引起的垂直向沉降,也就是说真空预压的侧向变形为向着加固区内的收缩变形,该变形不引起附加沉降量。而堆载预压加固地基产生的侧向变形为侧向挤出变形,由其引起的垂直附加沉降量很大。因此,将两者结合起来进行深厚软土地基的加固可以发挥各自的优势,提高加荷速率、缩短工期、提高加固深度及减少工后沉降。目前真空联合堆载加固深厚软基亟需研究解决提高深层处理效果措施、真空度传递规律、较准确实用的下卧层固结度计算方法、处理后软基工后沉降较准确的分析方法等。

(3)CFG 桩复合地基加固技术研究。CFG 桩(Cement Flyash Gravel pile)是在碎石桩的基础上掺加适量石屑、粉煤灰和水泥加水拌和,制成一种粘结强度较高的半刚性桩体,又称水泥粉煤灰碎石桩,这是近年来新开发的一种地基处理技术。CFG 桩可在全长范围内发挥其摩擦力和端承力,桩体强度具有可调性(通常在 C5 ~ C15 之间变化),可避免散体材料桩(碎石桩、砂桩)及低强度材料桩(石灰桩、灰土桩)由于桩身材料强度的限制而使荷载传递深度有限的缺陷,可大幅度提高地基的承载力。CFG 桩属高粘结强度桩,可和褥垫层、桩间土一起组成复合地基,通过调整桩长、桩距和褥垫层厚度,既可较好地满足承载力要求,也较容易调整天然地基和复合地基之间的差异沉降。CFG 桩复合地基技术具有适应性广、造价低、施工简便、质量可靠的突出优点,已在全国 21 个省、市、自治区的建筑工程中推广应用,是“九五”期间建设部重点推广的新技术之一。该技术存在问题主要是荷载传递规律不明确、成桩过程中桩间软土扰动与固结挤密效应分析方法未建立、复合地基工后沉降计算与实用设计方法不成熟,经济合理、方便可靠的检测方法亟待开发。

(4)薄壁管桩加固技术研究。薄壁管桩可避免因施工质量难以控制而出现的缺陷,可有效调整桩的长度提高地基承载力。薄壁管桩属刚性桩,通过调整桩长、桩距等,可较好地满足承载力要求。该技术存在问题与 CFG 桩复合地基技术类似。

(5)大功率振冲砂(石)桩复合地基加固技术研究。振冲碎石桩是用振动器产生的能量在

地基中成孔并灌入粗砂或者碎石形成砂(石)桩,桩与桩间土构成所谓的复合地基,使地基承载力提高,减少沉降和不均匀沉降,增强地基稳定性,提高地基抗地震液化能力。该方法由南京水利科学研究院开发,主要用于加密松砂和加固粘性土等松软土地基。目前该方法的主要问题是振冲器功率小,遇到硬夹层穿透困难或者无法穿透,同时设计方法也不够成熟,缺乏合适的检测手段。

(6)高能量强夯法处理技术研究。强夯法是将重锤从高处自由落下给地基以冲击力和振动,从而提高地基土的强度并降低其压缩性。经过十几年的发展,它已适用于加固从砾石到粘性土的各类地基土,施工工艺简单,费用低廉。目前我国在强夯法加固地基技术方面存在的主要问题是设计计算方法不成熟,施工机具技术水平低,夯击能小,加固深度小(一般在 10m 左右)。

由于深厚饱和软粘土土层和松散沙(粉)土土层这两类土的物理、力学性质很不相同,在地基处理方法上应采取不同的方法。考虑到问题的复杂性,本书仅对以饱和软粘土土层为主的按控制工后沉降深厚地基处理技术中的真空联合堆载预压技术、CFG 桩技术以及薄壁管桩技术的相关理论与实践成果进行介绍。

### 本章主要参考文献

- [1] 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.土木工程学报,第 37 卷第 6 期,2004 年 6 月.

## 第二章 真空联合堆载预压法处理深厚软土地基

### 第 1 节 真空联合堆载预压法原理

我国许多地区分布着大量近代沉积的软粘土层。这种软粘土层具有含水量高、强度低、压缩性大、渗透性差,并具有明显的流变性等特点。在这种软土地基上进行工程建设,采用有效的加固措施是必要的,否则,会产生填筑过程中的地基失稳等工程问题和工后沉降过大等工程质量问题。常用的软基加固方法主要有堆载预压法、粉喷桩复合地基法、真空联合堆载预压法等。大量的工程实例表明,在考虑投资效益和工程质量的建设中,真空联合堆载预压法是加固深厚软土地基较理想的地基处理方法之一。

#### 1.1 真空预压法基本原理

从加固原理上看,真空预压法和堆载预压法都属于排水加固法。真空预压法是在需要加固的软基表面先铺设适当厚度的砂垫层,然后打设一定间距(1.0~1.5m)的袋装砂井或塑料排水板,再将不透气的塑料薄膜铺设在砂垫层上,借助于埋设在砂垫层中的滤管,通过抽真空装置将膜下土体中的空气和水抽出,使土体得以排水固结,土体的强度同时也得到增强。用真空预压方法加固软基时,是把大气压力作为荷载,在抽真空前,薄膜内外都受大气压力  $P_a$  作用,土体孔隙中的气体与地下水面上都处于大气压力状态;抽气后薄膜内砂垫层中的气体首先被抽出,其压力逐渐下降至  $P$ ,薄膜内外形成一个压差( $P_a - P$ ),使薄膜紧贴于砂垫层上,这个压差称之为“真空度”。砂垫层中形成的真空度,通过塑料排水板或砂井逐渐向下延伸,同时真空度又由塑料板或砂井向其四周的土体扩展,引起土中孔隙水压力降低,形成负的超静孔隙水压力,使土体孔隙中的气和水向塑料排水板或砂井渗流,最后由塑料排水板或砂井汇至地表砂垫层中被泵抽出。

从太沙基的有效应力原理来看,真空排水预压法加固的整个过程是在总应力没有增加的情况下发生的,加固中降低的孔隙水压力  $\Delta u$  就等于增加的有效应力  $\Delta\sigma'$ ,即:

$$\Delta\sigma' = -\Delta u \quad (2.1-1)$$

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u = 0 \quad (2.1-2)$$

由式(2.1-2)可知,降低的孔隙水压力就等于增加的有效应力,加固区域内土体就是在该有效应力作用下得到加固的。所以进行真空预压时,软土是在有效应力作用下得到加固的,而且塑料排水板或砂井在真空预压法中起的作用为:①作为垂直排水通道,减小排水距离、加速土体固结;②传递真空度,“预压荷载”在这里是通过塑料排水板或砂井向土体施加的。

从图 2.1-1 也可以分析真空预压加固饱和软土的作用。设加固前地基土中原有的应力状态为  $D$ (有效应力圆),平均应力为  $P_0' = 0.5(\sigma'_{10} + \sigma'_{30})$ ,加固过程中地基土增加的有效应

力为  $\Delta\sigma'$ , 由于孔隙水压力是一个球应力, 在各个方向均增加  $\Delta\sigma'$ , 因此,  $\sigma'_1 = \sigma'_{10} + \Delta\sigma'$ ,  $\sigma'_3 = \sigma'_{30} + \Delta\sigma'$ , 其有效应力应由  $D$  位置向右移到  $D'$ , 平均应力增加  $P' = P'_0 + \Delta\sigma'$ , 但应力圆的半径没有变化。当加固结束, “荷载”卸除后, 地基土的强度将沿超固结包线退到  $F$  点, 与原有抗剪强度  $\tau_0$  相比, 抗剪强度增加了  $\Delta\tau$ , 即加固后强度得到了提高。

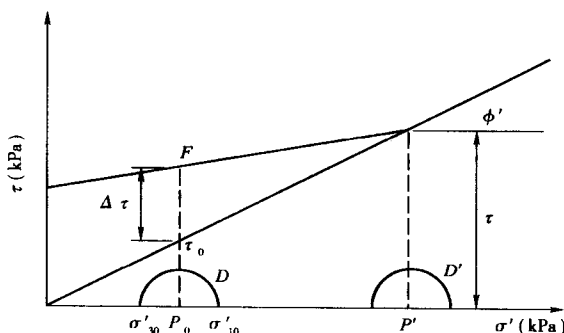


图 2.1-1 真空预压强度增长示意图

## 1.2 堆载预压法基本原理

堆载预压法是在需要加固的软基表面先铺设砂垫层作为水平排水体, 然后打设一定间距 (1.0~1.5m) 的袋装砂井或塑料排水板作为竖向排水体, 再通过施加外载, 增加总应力或软土中孔隙水压力并使之超过砂井中的孔隙水压力, 使土中的水向砂井汇流排出而产生固结。从太沙基的有效应力原理  $\sigma = \sigma' + u$  来看, 堆载瞬间, 总应力  $\sigma$  增加而有效应力  $\sigma'$  不增加, 导致孔隙水压力  $u$  的增大, 产生超静孔压使孔隙水向砂井 (或排水板) 渗流。因而堆载预压加固软基的效果取决于堆载的大小和超静孔压的消散程度, 有时为了达到加固效果, 需要超载, 但一次施加的荷载又不可超出软基的强度, 因而堆载速度不能太快, 预压时间也较长。

可见真空预压与堆载预压在加固机理上有以下几点区别:

(1) 真空预压中增加的是有效应力, 孔隙水压力增加的是负值, 它是靠负孔隙水压力的形成来实现的; 而堆载预压增加的是总应力, 孔隙水压力增加的是正值, 有效应力的增加是靠正超静孔隙水压力的消散来实现的。

(2) 真空预压中地基土体的水平位移向内, 对地基稳定有利, 而堆载预压是向外, 对地基稳定不利。

(3) 真空预压有效应力的增加具有各向同性, 而堆载预压有效应力的增加一般具有各向异性的特征。

## 1.3 真空联合堆载预压法基本原理

堆载预压虽然也使土中孔隙的水向排水井中汇集, 但与真空预压引起土中水渗流的原因却有本质上的不同。真空联合堆载预压往往是利用工程需要堆载 (如路堤填土), 并在真空预压的基础上利用填筑施加外载, 增加总应力, 增加软土中孔隙水压力, 加大软土与排水通道中的孔隙水压力差, 加快软土排水固结。真空预压法加固地基具有施工工期短、无需分级加载等

优点,但真空预压方法最大加载值为 80kPa 左右,对于荷载较大,承载力和沉降要求较高的建筑物地基,往往需要与其他方法联合使用。堆载预压方法技术可靠且费用较为节省,但堆载需要分级施加,且工期较长。根据两种方法加固作用的可叠加性及互补性,将两种方法联合应用从而形成真空联合堆载预压加固软粘土地基方法。

真空联合堆载预压是利用真空预压和堆载预压两种荷载同时作用,促使土体中的孔隙水加速排出,降低土中孔隙水压力,增加有效应力,加快土体固结,形成两种荷载作用的叠加。同时,由抽真空引起的负超静孔隙水压力和由堆载引起的超静孔隙水压力可以产生部分抵消应力,使土体在快速堆载时不致产生过高的超静水压力,从而也保证了工程施工时的稳定。真空联合堆载预压加固地基方法如图 2.1-2 所示,真空预压的效果和堆载预压的效果是可以叠加的。所以当真空预压与堆载联合应用时,地基的深层加固压力大,深层土体的压缩量也大,影响深度深,下卧层加固期的固结压缩量大,工后沉降小。

通过对真空预压、堆载预压以及真空联合堆载预压加固软基的基本原理的分析,可以看出真空联合堆载预压有以下特征:

(1)在真空预压中的真空压力导致土中有有效应力球应力增长,真空压力愈大地基愈稳定,而不必控制填筑时的加载速率,可较堆载预压明显缩短工期。

(2)由于真空与堆载联合作用,使地基的深层加固压力大,土体的压缩量大,加固的影响深度深,地基下卧层加固期固结压缩量大,工后沉降小。

(3)对于真空预压和堆载预压来说,由于真空预压中水平位移向内收缩,因此在沉降量相同的条件下其加固效果好于堆载预压。

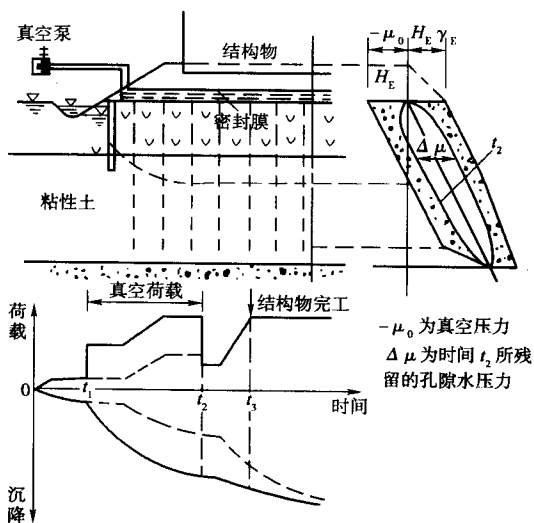


图 2.1-2 真空联合堆载预压加固地基原理

## 第 2 节 本构模型

### 2.1 真空压力卸载下软土地基变形规律研究

真空预压法处理软土地基中有一个真空压力卸除的特殊过程,人们在工程计算和实践中发现,真空压力卸除时,实测的地面回弹量比按弹性参数计算的回弹量要小很多。要比较准确地计算出真空压力卸除时软土地基的回弹量,必须研究软土在球应力卸载情况下变形的影响因素、变形规律和变形计算模式。

#### 2.1.1 真空压力卸载及卸载变形特性

##### (1) 真空压力卸载的物理本质

研究表明真空预压法加固软土地基的机理与堆载预压一样,都是通过排出孔隙中的流体,



增加有效应力,从而实现土体密度和强度增大的过程。但真空预压中,地基的总应力保持不变,通过减小孔隙压力,从而增大有效应力。孔隙压力的减小是通过抽真空来实现,有效应力的增量是各向均等的球应力增量。真空压力卸载是真空度减小,并恢复到正常大气压力,从而导致有效应力减小的过程,这时有效应力减小量也是各向均等的球应力量。因此,真空压力卸载的物理本质应是土体有效球应力卸载。

## (2) 卸载变形计算的基本理论

由土体的弹塑性理论可知,土体的总变形由两部分组成,即包括可以恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形两部分。土体的弹性变形定义为土体卸除荷载后可以恢复的变形。根据这个定义,土体卸载情况下的变形就必然包括弹性变形。

一般固体的线弹性理论可以用广义虎克定律来表达。广义虎克定律有如下三种等效的表达方式。

在笛卡尔坐标系中,广义虎克定律可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_x - \mu (\Delta \sigma_y + \Delta \sigma_z)] \\ \Delta \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_y - \mu (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_z)] \\ \Delta \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_z - \mu (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y)] \\ \Delta \gamma_{xy} &= \Delta \tau_{xy} / G, \Delta \gamma_{yz} = \Delta \tau_{yz} / G, \Delta \gamma_{zx} = \Delta \tau_{zx} / G \end{aligned} \right\} \quad (2.2-1)$$

式中,  $E, \mu, G$  分别为弹性模量、泊松比和剪切模量。

用八面体应力和八面体应变来表示,则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_v &= \frac{1}{K} \Delta \sigma_{oct} \\ \Delta \gamma_{oct} &= \frac{1}{G} \Delta \tau_{oct} \end{aligned} \right\} \quad \text{或} \quad \left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_v &= \frac{1}{K} \Delta p \\ \Delta \epsilon_s &= \frac{1}{3G} \Delta q \end{aligned} \right\}, \quad (2.2-2)$$

式中,  $K, G$  分别为体积变形模量和剪切变形模量。

用平均正应力  $\sigma_m$  和应力偏张量  $S'_{ij}$  来表示,则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_m &= \frac{1}{3K} \Delta \sigma_m \\ \Delta S'_{ij} &= 2G \Delta \epsilon'_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (2.2-3)$$

与一般固体(如金属)相比,由于土体结构组成上的特殊性,决定了这种材料在力学性质上的特殊性。土体是一种多相(土骨架、水和空气)散粒体材料,其区别于金属材料最主要的两个性质是土体的剪胀性和土体的压硬性。压硬性指土体在受压后,强度和剪切模量增加的性质。沈珠江早就指出,土体的压硬性还表现在压应力的变化也会引起剪切变形,特别是退压软化会引起剪变的显著增加甚至使土体破坏。他提出了表示土体变形的表达式如式(2.2-4):

$$\left. \begin{aligned} d\epsilon &= \frac{d\bar{\sigma}}{K_0} + \frac{d\tau}{K_d} \\ d\gamma &= \frac{-d\bar{\sigma}}{G_0} + \frac{d\tau}{G_d} \end{aligned} \right\} \quad (2.2-4)$$