

地基处理技术

4

排水固结法与挤密法

冶金工业部建筑研究总院 主编



地基处理技术

4

排水固结法与挤密法

冶金工业部建筑研究总院 主编

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍国内外地基处理的新技术与工程实践经验。

全书共分五册：

第一册 强力夯实法与振动水冲法

第二册 喷射注浆法与深层搅拌法

第三册 桩和桩基

第四册 排水固结法与挤密法

第五册 基坑开挖与支护技术

本册为第四册，分别叙述了砂井排水固结法和挤密法的作用机理、适用条件、设计和施工方法、施工机具、设计和施工注意事项、工程实例和科研成果。

本书可供从事建筑、水利、港口、铁道、公路工程地基处理的研究、设计、施工人员及大专院校有关师生参考。

地 基 处 理 技 术

第 四 册

排水固结法与挤密法

冶金工业部建筑研究总院 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 5 1/2 字数 143 千字

1989年2月第一版 1989年2月第一次印刷

印数00,001~8,000册

ISBN 7-5024-0204-7

TU·8 定价2.40元

前 言

我国地域辽阔，工程地质条件各异，在工程建设中经常会遇到不良的土质条件，从而需要进行地基处理。近十年来，我国在不良地基处理技术方面有很大进展，新的方法不断引进或开发，传统方法不断得到改进和充实，并在许多工程项目中取得良好的技术经济效益。这些方法包括：强力夯实法、振动水冲法、喷射注浆法、深层搅拌法、振实砂桩法以及预应力混凝土桩、钢管桩、大直径灌注桩等。

目前这些方面的资料较多，但多较零散，因而使用很不方便。我们组织编写这套《地基处理技术》丛书旨在就上述多种地基处理方法给从事地基处理工程的设计、施工、科研、教学人员提供一套系统的技术用书。

全书以实用为主，理论为辅，着重介绍我国工程实践经验，同时兼收了国外地基处理的新成果，以期满足我国当前地基处理技术迅速发展的需要。

全书分为五册，由王吉望、周国钧、周志道、王盛衡同志负责组织编写。

本册为第四册，在排水固结法中主要介绍了常用的普通砂井法和新出现的袋装砂井法，挤密法中主要介绍了砂桩、土桩和灰土桩。

本册由冶金工业部建筑研究总院徐克静主编。参加编写的有：第一篇，冶金工业部建筑研究总院朱琴芬；第二篇第一章，徐克静；第二章，陕西省建筑科学研究所杨鸿贵。本书编写中，许多单位和个人给我们提供了宝贵的参考资料，在此致以深切谢意。

限于作者水平，书中不妥之处，敬请读者指正。

编 者

一九八六年十二月

目 录

第一篇 排水固结法	1
第一章 砂井法	1
第一节 概述	1
第二节 砂井法的基本原理和适用范围	2
第三节 砂井施工	5
第四节 砂井设计	17
第五节 预压和施工管理	45
第六节 最终沉降量和辐射向固结系数推算	54
第七节 砂井法应用实例	58
第二章 袋装砂井法	68
第一节 概述	68
第二节 袋装砂井施工	69
第三节 袋装砂井设计	72
参考文献	76
第二篇 挤密法	77
第一章 砂桩	77
第一节 概述	77
第二节 砂桩的作用原理	78
第三节 砂桩设计	80
第四节 砂桩施工	93
第五节 效果检验	100
第六节 工程实例	117
第二章 土桩和灰土桩	124
第一节 概述	124
第二节 土桩和灰土桩作用原理	125
第三节 试验研究	136
第四节 土桩和灰土桩设计	143
第五节 土桩和灰土桩施工	150
第六节 工程实例	163
参考文献	169

第一篇 排水固结法

第一章 砂 井 法

第一节 概 述

在高压缩性的饱和软土层中做成一个圆柱形孔，孔中填充透水的砂，即成砂井。利用土中的砂井作为排水通道，缩短孔隙水排出的途径，并在砂井顶部铺设砂垫层，砂垫层上部压载以增加土中附加应力；附加应力产生超静水压力将水排出土体，使软土提前固结以增加地基土的强度。这种方法称为砂井压载排水法（简称砂井法）。砂井法中，压载是不可缺少的组成部分。没有压载，砂井效果就不明显。在工程施工中，可采用分期施加建筑荷载进行压载（如筑堤、贮罐等），也可采用堆土或其他加载预压方法。压载需继续到所期望的排水结束为止。

1925年，丹尼尔·莫兰（Daniel, E. Moran）最早将垂直砂井用于土的深层加固，并于1926年获得专利。莫兰首先采用砂井的工程是费城-奥克兰海湾大桥公路软土路基的加固。随后，加利福尼亚州公路部于1933年和1934年间进行了室内与现场的实验，并于1934年建造了第一个砂井工程。这些初试的成功，使砂井法得到进一步的应用和发展。加利福尼亚州公路部的波特（O. J. Potter），继而工程兵团自1941年开始将砂井法应用于美国东部地区，与此同时，太沙基（Terzaghi, K.）也采用了这种方法。从此砂井法的工程应用就不断增加。

最早采用砂井法时，并无适用的理论根据，而是按经验设计。1940~1942年，巴伦（Barron）基于太沙基的固结理论，提出砂井法的设计计算方法。虽然其他学者也做了不少工作，但巴伦的理论应用最广。这个理论既考虑了垂直向渗透固结，又考

虑了径向的排水固结。五十年代以后，随着设计理论的深入发展，选用土质指标的重要性也逐渐被重视起来，一直发展到目前比较完善的固结理论计算水平。我国从五十年代起陆续在各种工程中应用砂井法。特别是近几年来，在利用砂井预压法处理沿海码头堆场软粘土地基方面做了很多工作。

砂井法主要适用于没有较大集中荷载的大面积荷重或堆土荷重工程，例如水库土坝、油罐、仓库、铁路路堤、贮矿场以及港口的水工建筑物（如码头、防波堤）等工程。砂井法要求精心的设计和严格的施工管理。

第二节 砂井法的基本原理和适用范围

一、软土固结的基本概念

土由矿物颗粒、空气和水三相组成。矿物颗粒构成土骨架，土粒和土粒之间则形成孔隙，孔隙由水或水和空气所充满。

天然软土系指湖、河、海沿岸近代水下沉积生成的、有结构性的软弱饱和粘性土和松散粉细砂。软弱饱和粘性土一般具有压缩性高、天然强度低和透水性差的特点，受扰动后土结构易受破坏，强度有所降低，但是间隔一定时间后，土的强度又有不同程度的恢复。松散粉细砂具有在震动荷载作用下产生液化现象的特点。

由于软土的渗透系数 K 较小（一般 $K=10^{-6}\sim 10^{-7}$ 厘米/秒），因此承受荷载后，土的压缩强度变化不是瞬间完成的，而需经过相当长的时间。

图1.1.1所示为一维固结示意图，地基中有一可压缩的饱和粘性土层，其上下均为砂层（透水层）。粘性土层在某一压力 P 作用下，孔隙中的自由水逐渐向上、下砂层排出。

为简化起见，假定荷载（附加应力）是瞬时施加的，粘性土承受的应力是均布的和不随深度而变化的。为了说明孔隙中水压力随时间的变化，设想在土层中有若干根测压管，加荷前各个深度的土体孔隙中的水压力为静水压力，测压管中的水头等于地下

水位。在荷载施加的瞬时，由于土体孔隙中的水来不及被挤出，此时应力全部由孔隙中的水负担，各个测压管的水头就上升至

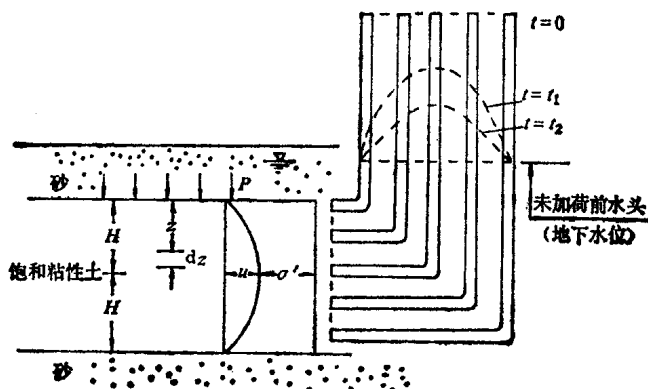


图 1.1.1 一维固结示意图

$t = 0$ 处。这个由附加应力所引起的土体孔隙中的水压力称为超静水压力（或称孔隙水压力或孔隙压力），它是超过静水压力以外的压力。随着时间的推移，孔隙中承受超静水压力的孔隙水就逐渐被挤出，流向上下砂层，测压管中的水头就逐渐下降，如图中 $t = t_1$ 、 $t = t_2$ 等曲线所示。因粘性土层的上下部接近于砂层，故上下部的排水比中间的快，形成中部超静水压力大，而上下部超静水压力较小。随着超静水压力的逐渐消散，有效应力（颗粒之间的接触压力）逐渐增加，最后附加应力全部由土颗粒承受，超静水压力等于零，此时在压应力 P 作用下的固结过程就完成了。土力学中把土在某一压力作用下，自由水逐渐排出，土体的压缩量、密实度和强度随时间增长的过程称为土的固结过程。概括地说，固结过程就是超静水压力消散、有效应力增长、土体逐步压密的过程。

以 u 表示超静水压力， σ' 表示有效应力，固结度 $U = \frac{\sigma'}{u + \sigma'}$ ，则加荷后土的固结过程表示为：

$t = 0$ 时, $u = p$, $\sigma' = 0$ $U = 0$;

$0 < t < \infty$ 时, $u + \sigma' = P$, $0 < U < 1$;

$t = \infty$ 时, $u = 0$, $\sigma' = P$, $U = 1$, 固结完成。

二、砂井法的固结原理

在软基上直接建造构筑物或大面积堆荷时,地基将因固结或剪切变形产生很大沉降,甚至因强度不足而产生破坏。但是,如果作用于地基的荷载小于地基破坏荷载,则在荷载作用下地基由于软土层产生固结从而可以提高强度。根据固结理论,土的固结时间与渗透排水距离的平方成正比,因此如果在软基上建造建筑物的软土层较厚,则荷载施加后在超静水压力作用下孔隙水的垂直渗透路径就很长,相应的固结时间就需要十几年甚至更长的时间。砂井间距一般为2~3米,设置砂井后孔隙水的渗透路径可缩短到1~2米,在这种辐射向渗透情况下,超静水压力能较快地消散,从而可以加快软土的固结速度,缩短固结时间。因此,缩短排水距离是减小固结时间的最有效办法。此外,随着孔隙水的排出,土中有效应力相应逐步增加,土的抗剪强度也随之增大。

三、砂井法的适用范围

考虑地基加固方案时,除了应考虑工程特性、施工条件外,还必须特别重视具体的地质条件。一般来说,砂井法适用于软土地基,特别是用于软基中存在连续薄砂层时效果更好。

下列土质不宜采用砂井法:

(1) 渗透性好的土,如砂性土、粉质土或渗透系数 K 为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 厘米/秒的土。

(2) 含有大量腐烂植物的土。对这种土采用排水固结,其强度提高得有限。特殊的土如泥炭是以次固结(土骨架的蠕变)为主,不存在固结时间与排水距离的平方成正比的关系。因此,这类土也不宜采用砂井法。也就是说,砂井法只对固结速率起作用,而对次固结并无直接的效果。

在研究砂井法的工程应用时,需注意原地基的固结状态。砂井法的效果与原地基的固结状态关系极大,例如当先期固结压力

(系指该土层在地质历史上所曾经承受过的最大上覆土层自重压力或其它外来荷载作用下已压密稳定的最大压力)已超过设计堆载的压力值时,加载就不可能产生超静水压力,砂井就没有排水效果;当先期固结压力值达到加载值的一部分时,则在该部分堆载作用下砂井也无排水效果。

此外,对灵敏度高的软土使用砂井法时,要注意其触变性,尤其是采用封底钢管的冲击法(或振动法)施工时,土体结构因受机械扰动而破坏,打砂井后一个月以内土体强度不仅没有提高反而会降低,在这段时间内就不能压载,需要一个等待使强度恢复的时间。

砂井法的主要缺点是需要加荷、卸荷和三、四个月以上的预压时间。

第三节 砂 井 施 工

砂井施工时,一般是先在地基土中成孔,然后往孔内灌砂形成砂井。砂井成孔方法可采用表1.1.1中所示的几种方法。选用时应根据软土的性质和砂井的直径、间距、深度等,尽量选用那些对周围土体产生扰动小而施工效率高的方法。

砂井成孔和灌砂方法

表 1.1.1

类 型	成 孔 方 法		灌 砂 方 法	
使用套管	管端封闭	冲击打入 振动打入	用压缩空气	静力提拔套管 振动提拔套管
		静力压入	用饱和砂	静力提拔套管
	管端敞口	射水排土 螺旋钻排土	浸水自然下沉	静力提拔套管
不使用套管	旋转、射水 冲击、射水	用 饱 和 砂		

砂井成孔的典型方法有套管法和射水法。日本用得最多的是套管法,欧洲各国用得较多的是射水法。国内也有使用爆破法成

井的。

一、射水法成井

射水法成井是利用高压水通过射水管形成高速水流的冲击和环刀的机械切削，使土体破坏，并形成一定直径和深度的砂井孔，然后灌砂而成砂井。

1. 施工设备

射水法成井的主要设备由高压水泵、XU100型钻机的横轴箱、升降机、7.5千瓦电动机和三角承重架、射水头喷嘴和高压软管等组成（图1.1.2）。

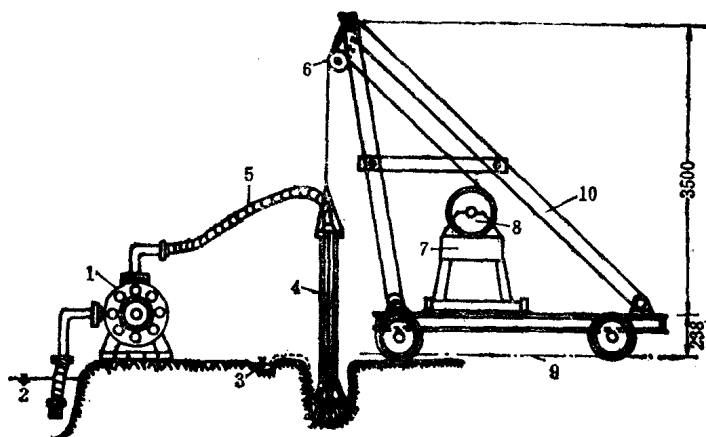


图 1.1.2 射水法成井设备示意图

- 1—水泵；2—水池；3—排水沟；4—射水管；
5— $\phi 50$ 毫米胶管；6—滑轮；7—钻机；8—卷扬
机；9—钢轨轨顶；10—架子

(1) 射水管。射水管主要由管体、中心管、环刀、射水嘴等组成（图1.1.3）。管体由直径200毫米左右的钢管焊成，其下有可更换的环刀，环刀直径根据井孔直径选定。例如要冲成直径300毫米的井孔，可选用直径250毫米的环刀。

中心管上端连接（ $\phi 50$ 毫米）高压水管，下端连接射水嘴。射水嘴可以做成各种型式和各种直径，以适应各种土质和砂

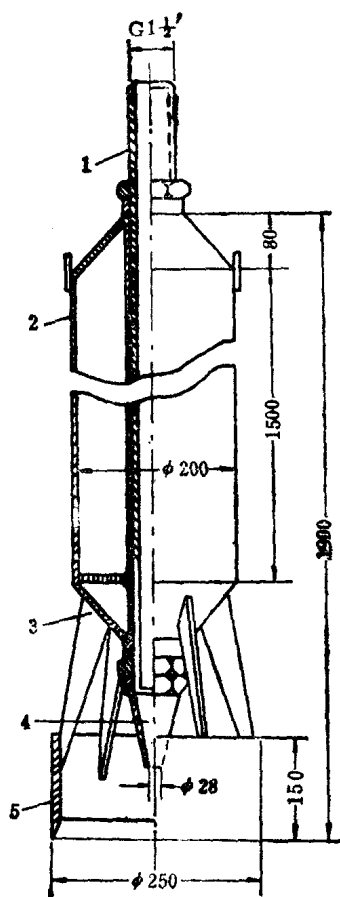


图 1.1.3 射水管构造图

1—中心管，2—管体，3—刀脚，4—射水嘴，5—环刀

井直径的需要。根据一些工程使用经验，射水嘴宜做成锥形单孔出水口型式。对一般软粘土，当砂井直径为300毫米、水泵流量为30吨/时、压力为1000千帕^①时，出水口的直径为26~30毫米较合适。出水口直径太小，水流速度就增大，水流对土体的破坏

① 本书中，100千帕=1公斤/厘米²。

能力也增大,但是有效破坏面积缩小;出水口直径太大,流速就降低,水流对土体的破坏能力就被削弱,冲孔速度减慢。因此,对一定的土质、一定的砂井直径和一定的水泵应有最佳出水口直径,才能使成孔速度达到最快。

(2) 水泵。水泵可根据具体工程和土质条件选用。在一般软粘土地区,可选用流量为25~35吨/时、压力为1000千帕的水泵。

(3) 卷扬和冲击机具。

(4) 移动承重架。除水泵外,其余设备全部安置在可移动的架子上,车子可沿临时铺设的轨道移动到施工的孔位。起吊射水管用的架子高4~5米。

2. 施工顺序

砂井施工前必须做好准备工作,如场地平整、水泵选择和设置、挖排水沟、铺设临时轨道等。所有设备都要连接好,并且妥善安置。

射水法成井的施工顺序:

(1) 射水管定位。在准备施工的孔位处,挖出20~30厘米深的小坑,将射水管头部放在坑内。

(2) 冲孔。开动水泵,射水冲孔。射水过程中应上下移动射水管(冲次约20~30次/分,冲程20~40厘米),以加速土体破坏。到达设计深度后应继续射水,直至射水管完全拔出后能停止射水。考虑到泥浆会有少量淤积,所以射水管环刀到达的深度应比设计深度大30~50厘米,以保证砂井达到设计长度。

(3) 清孔。射水管环刀到达设计深度后,上下移动射水管,清孔2~3分钟,使孔内泥浆充分排出。

(4) 灌砂。射水管拔出后应立即灌砂。灌砂时要计算灌砂率(实际灌入砂子体积与理论砂井体积之比),灌砂率应大于90%,否则应重新施工。

对软弱土也可采用套管射水排土法,其施工顺序如图1.1.4所示。

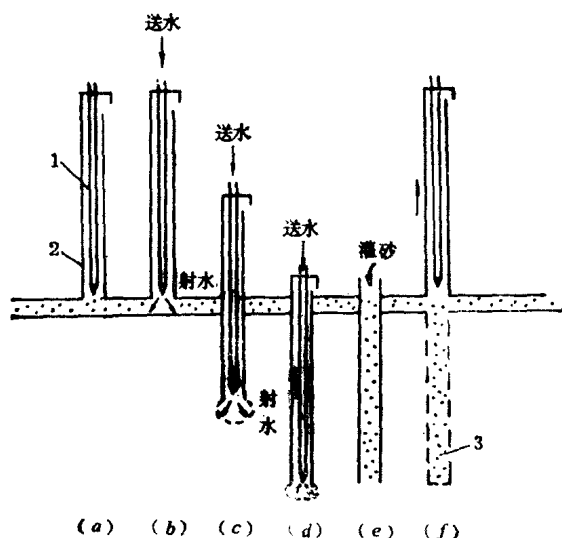


图 1.1.4 套管射水排土法的施工顺序
 (a) 套管定位；(b) 用套管内的射水管进行射水；(c) 射水时套管慢慢下沉；(d) 套管下沉到所要求位置后，上下移动射水管，使套管内的土充分排出；(e) 向套管内灌砂；(f) 拔出套管，形成砂井

1—射水管；2—套管；3—砂井

3. 施工效率及主要优缺点

射水法成井施工每台班需15~20人，其施工效率随土质、砂井长度及机械设备而异。施工长度为15米左右的砂井时，每台班可完成200~250延米。

射水法成井与下述的套管施打法成井相比，其主要优点是设备简便，成本低，操作容易，施打砂井深度不受设备限制，对土层扰动较小。

但当土层中夹有较大碎石时，射水成井法施工就比较困难。

二、套管施打法成井

1. 主要机具设备

(1) 打管和拔管机具。过去国内多数使用蒸汽打桩机施打钢管(套管)。例如, 宁波基地用的蒸汽打桩机, 其桩架高30米, 总重48吨; 东北某线河滩软土路堤砂井施工中, 使用过钢龙门架, 打桩采用重4.3吨的C-231复打汽锤, 锤和桩架总重25吨。这样笨重的机具, 搬运、安装、移孔困难, 因而效率低。近年来, 国内对履带起重机进行了改装, 在履带起重机的吊臂上装置一个供穿心锤导向用的导向架(图1.1.5), 导向架用24千克/米和12千克/米的钢轨焊成, 高13米, 可施打8~9米长的砂井。锤重1.5吨, 用铸铁制成。锤的升降用吊车卷扬机控制, 由导向架导向。

国外大多用振动方式将钢管沉入土中。表1.1.2是从日本引进的KM₂-12000A型振动打桩机组的规格和型号。图1.1.6为90千瓦振动打桩机。

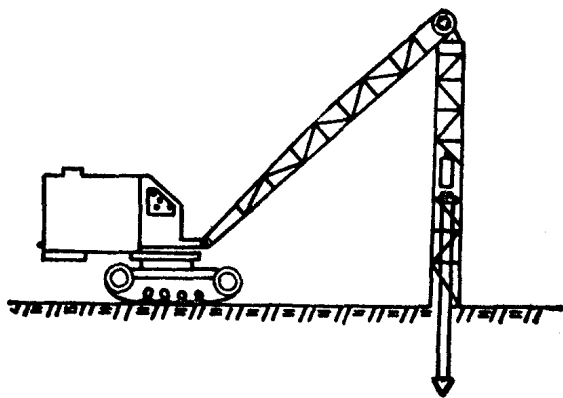


图 1.1.5 锤击式施工示意图

(2) 套管(钢管)。套管规格根据砂井的孔径与深度选定, 其长度一般应比砂井长0.5~1.0米。国内一般使用活瓣桩尖和固定式钢筋混凝土桩尖(留在土中)。图1.1.7是从日本引进的

KM₂-12000A型振动打桩机组规格和型号

表 1.1.2

设备名称	规格	备注
履带式起重机	起吊能力40吨, 额定功率110千瓦 (150马力), 最大行走速度 1.2 公 里/小时	日本石川岛公司制造的 IPD-80型
装载机	满载容量0.65米 ³	国内配套选用上海工程机 械厂履带式1米 ³ 挖土机改装
振动器	偏心力矩1.2千牛·米 振动频率580转/分 起振力349千牛 电动机额定功率, 90千瓦	
底端带活门的特种钢管	φ 406.4 × 20500毫米 壁厚12.7毫米	
减振器	可吊30吨的能力	
导架	750 × 1100 × 30000毫米	
空压机	气压700千帕, 排风量9米 ³ /分, 配 电功率88千瓦	国内配套选用型号 W-9/7型
贮气罐	容量2.2米 ³ , 耐压700千帕	
自动记录仪	可以记录钢管贯入深度、管内砂 面高度、管内砂的排出量和电流值	由日本三兴电机厂引进
上料斗	容量0.65米 ³	

底端带活门的特种钢管。

2. 施工顺序

套管施打法成井的施工顺序如图1.1.8所示。

3. 劳动组织及施工效率

使用从日本引进的振动打桩机施工时, 单机需5人, 即机长、司机、仪表管理、上砂机司机、空压机管理各一人。施工长度为20米的砂井时, 每台班可完成200延米。

使用锤击法施工时, 需要一套打桩设备, 设备比较重。施工长度为8~11米的砂井时, 每台班可完成200~250延米。



图 1.1.6 90千瓦振动打桩机



图 1.1.7 底端带活门的特种钢管

三、爆破成井法

除上述两种常用的施工方法外，国内还采用爆破法施工砂井。铁道部在修建某线工程中，摸索出一套用爆破法进行砂井施