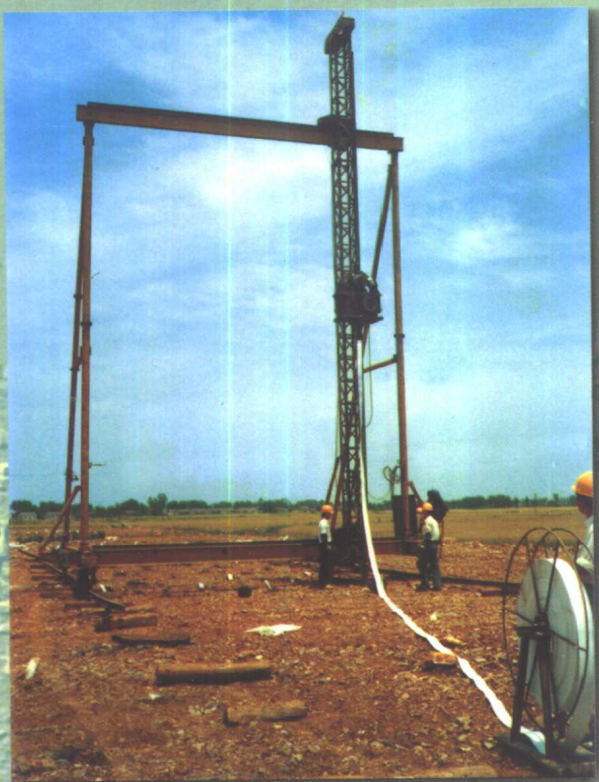


真空排水预压法 加固软土技术

娄炎 编著

ZHENKONG PAISHUI
YUYAFA JIAGU RUANTU
JISHU



人民交通出版社
China Communications Press

Zhenkong Paishui Yuyafa Jiagu Ruantu Jishu

真空排水预压法加固软土技术

娄 炎 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了近 20 年发展起来的真空排水预压法加固软土技术,是作者几十年从事该项研究工作的总结,也是国内近 20 年该项技术发展情况的汇总。全书共 8 章,主要内容有:加固机理与特征、加固设计与计算、工程实例、影响加固效果的因素、施工工艺、施工监测与加固效果检验,以及与其他方法的联合使用,附录共六个主要收集了排水板、土工膜标准及国内已施工工点名录。

图书在版编目(CIP)数据

真空排水预压法加固软土技术 / 娄炎编著. —北京:
人民交通出版社, 2001. 8

ISBN 7-114-04041-5

I. 真... II. 娄... III. 真空技术-应用-软土地
基-预压加固 IV. TU447

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 059712 号

真空排水预压法加固软土技术

娄 炎 编著

正文设计:彭小秋 责任校对:尹 静 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:9.25 字数:221 千

2002 年 1 月 第 1 版

2002 年 1 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—3000 册 定价:20.00 元

ISBN 7-114-04041-5

TU·00083

序

真空排水预压法加固软土技术在近 20 年有了长足地发展,它主要得益于我国科技工作者的辛勤努力。20 年来,我国岩土工程师做了大量室内、现场试验和理论分析研究,使该项加固技术在施工工艺、施工设备和加固机理的认识上都有了质的飞跃,积累了丰富的工程实践经验,取得了不少较高水平的研究成果,从而使我国在该项加固技术上达到了国际先进水平。

本书作者就是这些岩土工程师中的突出—员,十多年来他长年往来于试验室和施工现场,潜心研究,孜孜不倦,取得了不少科研成果,这些在本书的内容上已能清楚地显现。本书的特点是理论与实践的紧密结合,既有理论认识的分析,也有实用计算的介绍,而且有更多地对施工方法、施工工艺和效果检验的详尽阐述,这些都是作者多年经验的积累和总结。作者的写作认真而务实,全面又细致,思路清晰,逻辑严密,毋庸置疑本书对丰富真空排水预压法的理论、对促进该项技术的推广应用将产生积极的影响,是一本值得推荐的好书。对致力于岩土工程研究、从事地基加固设计和进行现场施工的朋友们都有很好的借鉴、参考价值,相信本书一定会使各位得到教益。

蒋彭年

2001.5.8 于南京水利科学研究院

前 言

随着改革开放的不断深入,国民经济中基本建设得到日新月异地发展,厂房、码头、港口、机场、高速公路等建筑物不断增多,尤其是高速公路近十年来得到了飞速发展。然而可以不经处理直接利用的天然优良地基却越来越少,不少建筑物不得不建造在较差的松软地基上,因而给我们提出的地基加固课题也越来越多。真空排水预压法就是近 20 年来又重新发展起来的一种新型地基加固方法,它在天津新港、连云港碱厂、舟山老塘山煤码头堆场等等工程的建设中得到了广泛的运用,并取得了突出的成果。

就笔者所知,真空排水预压法这项加固技术,我国目前在国际上是处于领先地位的。20 年来,我国的岩土工程师做了大量室内、现场试验,积累了丰富的资料,得到许多较高水平的研究成果,也积累了不少设计与施工经验,使得该项加固技术日臻成熟、完善。作者在这方面也做了许多工作。面对目前飞速发展的国民经济建设,作者希望能将自己多年学习、研究心得和积累的经验与大家交流,以期能推动该项技术的进一步发展和在我国建设中发挥出更大的作用,并在国际上能继续保持领先的地位。

本书得到南京水利科学研究院出版基金的资助,并在人民交通出版社的支持下,即将出版发行。在此作者非常感激,并向支持该书出版的各位领导,同仁表示衷心地感谢。

本书共分 8 章。第 1 章到第 3 章主要是叙述真空排水预压法的概念、机理与设计计算,较偏重于理论方面,包含了作者的一些研究心得。第 4 章是介绍国内外运用此法的典型工程实例,这些实例除笔者直接参与完成的以外,其余的是来自公开发表的论文和学术会议交流的资料。这当中有国内第一个成功应用的实例;也有国外的两个例子;有在陆上进行的和在水下实施的;还有一个是作者认为不太成功的实例。在介绍这些例子的同时也掺有作者的观点、看法,也请读者以批评的眼光来阅读。另外,在第 8 章中也有类似的情况。第 5 章到第 7 章是作者总结的该法的施工工艺及施工监测与加固效果的检验方法,也阐述了影响加固效果的因素,偏重于实践方面,是作者多年参与工程实践、积累的经验的表述。最后一章讲述本法目前与其它方法联合应用的情况。

本书经历了两年的努力完成了写作,这当中得到沈珠江院士和福建省建筑设计研究院戴一鸣先生、广州四航局刘成云先生和天津港湾工程研究所唐敏先生等人的大力支持,提供了部分资料;土力学界前辈蒋彭年先生也一直关心本人的成长和本书的写作,书稿完成后为本书写了序,这些都给作者以极大的鼓舞。应该说本书也是集体智慧的概括和总结。全书的底图都是由袁伟先生描绘完成的。在此,对他们的大力帮助与支持表示由衷的谢意。

姜 炎

2001 年 4 月 30 日于南京

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 真空排水预压法的概念	1
1.2 真空排水预压法的发展状况	2
第 2 章 真空排水预压法的加固机理与特征	5
2.1 堆载排水预压法的加固机理	5
2.2 真空排水预压法的加固机理	6
2.3 真空排水预压法加固软土地基的特征	9
2.3.1 关于分级加荷	9
2.3.2 关于侧向变形	10
2.4 真空排水预压法的特点	11
第 3 章 加固设计与计算	12
3.1 总则	12
3.2 实用设计方法	14
3.2.1 沉降计算	14
3.2.2 固结度的计算	20
3.2.3 强度增长的估计	22
3.2.4 设计实例	28
3.3 软土地基真空排水预压固结变形的有限元分析	30
第 4 章 工程实例	37
4.1 天津新港四港池后方软土地基加固	37
4.2 福州某办公楼工程软土地基加固	38
4.3 连云港碱厂白煤堆场的软土地基加固	41
4.4 真空排水预压法加固水下软土地基	46
4.5 浙江舟山老塘山煤码头堆场的地基加固	48
4.5.1 工程概况	48
4.5.2 地质概况及加固方案的选择	48
4.5.3 现场施工	50
4.5.4 现场观测及观测资料分析	51
4.6 日本东北地区新干线某段超软土地基加固	53
4.6.1 地质概况	53
4.6.2 施工情况	53
4.6.3 现场观测结果	54
4.6.4 结论	55
4.7 马来西亚南北大通道试验路之 6/7 段地基加固	55

4.7.1	背景资料	55
4.7.2	地质概况与土的性质	56
4.7.3	设计方案与加固要求	58
4.7.4	施工要点	58
4.7.5	加固效果分析	60
4.7.6	讨论	63
4.7.7	结论	63
4.8	某杂件库地基加固	63
第 5 章	影响加固效果的因素	67
5.1	密封对加固效果的影响	67
5.1.1	加固区表面的密封	67
5.1.2	土层深部的密封	68
5.2	真空度在加固过程中的稳定性对加固效果的影响	68
5.3	加固区形状对加固效果的影响	69
5.4	垂直排水通道对加固效果的影响	71
第 6 章	真空排水预压法的施工工艺	75
6.1	真空排水预压法的施工程序	75
6.2	排水系统	75
6.2.1	场地平整	75
6.2.2	垂直排水系统——塑料排水板和袋装砂井	75
6.2.3	水平排水系统——砂垫层	80
6.3	抽真空系统	81
6.3.1	主滤、管及其布置	81
6.3.2	主管的出膜装置	84
6.3.3	抽真空装置	86
6.4	密封系统	89
6.4.1	密封膜及铺设	89
6.4.2	密封沟	92
6.4.3	土层深部的密封	93
6.4.4	加固过程中对地表裂缝的处理	94
6.5	加固过程中的管理	94
第 7 章	施工监测与加固效果检验	96
7.1	施工监测的目的	96
7.2	施工监测的内容与手段	96
7.2.1	膜下真空度的监测	96
7.2.2	垂直排水通道与淤泥中真空度的量测	97
7.2.3	负孔隙水压力的量测	99
7.2.4	地表面的沉降观测	101
7.2.5	土层深部沉降观测	103
7.2.6	土层深部水平位移观测	104

7.2.7 地下水位观测	107
7.3 加固效果的检验	108
7.3.1 钻孔取土的室内试验分析	109
7.3.2 现场十字板剪切试验	109
7.3.3 现场大型平板荷载试验	109
第 8 章 真空排水预压法与其它方法的联合应用	110
8.1 概述	110
8.2 真空排水预压法与碎石桩的联合应用	110
8.3 真空排水预压法与堆载压法的联合应用	113
8.4 真空排水预压法与自载预压法的联合应用	122
附 录	127
附录一 塑料排水板的行业标准(JTJ/T257-96)	127
附录二 聚氯乙烯(PVC)土工膜国家标准(GB/T 17688-1999)	127
附录三 聚乙烯(PE)土工膜的国揭标准(GB/T 17643-1998)	128
附录四 国内部分生产企业塑料排水板产品技术指标	130
附录五 国内企业密封膜产品技术指标	130
附录六 国内运用真空排水预压法加固软土地基部分工程名录	133
参考文献	136

第 1 章 概 述

1.1 真空排水预压法的概念

在沿海和内陆地区广泛分布着海相沉积、湖相沉积和河相沉积的软弱粘土层。这种土的特点是含水量高,压缩性大,强度低,透水性差。由于其压缩性高、透水性差,在建筑物荷载作用下会产生相当大的沉降和沉降差,而且沉降过程延续的时间可能很长,有可能影响建筑物的正常使用。另外,由于其强度低,地基承载力和稳定性往往不够,不能满足工程要求。因此,这种地基通常需要采取加固处理措施,真空排水预压法就是处理软粘土地基的有效方法之一。真空排水预压法加固软土地基的方法是属于排水固结法的一种。运用该法加固软土地基时,一般来说都是先在欲加固的软土地基上按一定间距打设塑料排水板或袋装砂井(统称垂直排水通道),然后在地面上铺设一定厚度的砂垫层,再将不透气的薄膜铺设在砂垫层上,借助于埋设在砂垫层中的管道,通过抽真空装置将膜下土体中的空气和水抽出(见图 1-1),使土体得以排水固结,土体的强度同时也得到增长,达到加固的目的。

按照具体工程的使用目的,真空排水预压法可以解决以下两方面的问题:

1. 沉降问题。使地基的沉降在抽气加载预压期间大部分被消除(一般是 80%)或基本消除,建筑物在使用期间不致有过大的沉降和沉降差。

对工后沉降要求较高或较敏感的集装箱堆场、大型仓库、冷藏库、斗轮机轨道及飞机跑道等,常可采用预压法进行处理,而真空排水预压法是常常被优先考虑的一种方法,它一般先进行抽气预压,待消除大部分沉降之后,再建造建筑物。

2. 稳定问题。加固能加速地基土的抗剪强度的增长,从而提高地基的承载力和稳定性。

对于主要应用此法来加速地基土抗剪强度增长、缩短工期的工程,如路堤整体稳定、土堤边坡、码头堆场、货场等,则经抽气预压,使地基土强度的提高能适应上部建筑物的荷载,使建筑物的整体得以稳定。

真空排水预压法是由排水系统和加压系统两部分共同组成:

排水系统:设置排水系统主要在于改变地基原有的排水边界条件和借助排水系统来传递真空压力,增加孔隙水排出的途径,缩短排水距离,减少加固时间。

加压系统:就是起固结作用的荷载,使地基土的有效固结压力增加而产生固结。

排水系统是一种手段,如果没有加压系统,孔隙中的水没有压力差,水就不会自然排出,地

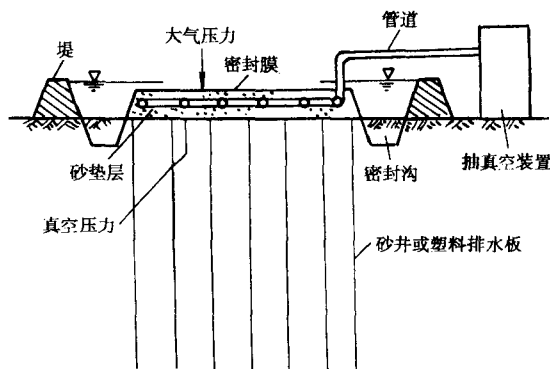


图 1-1 真空排水预压法加固软基的基本原理图

基也就得不到加固。如果只增加固结压力,无排水系统或不缩短土层的排水距离,则不能取得好的加固效果或不能在预压期间尽快地完成设计所要求的沉降量,强度不能及时提高,加载也就不能顺利进行,工期要求得不到满足。所以上述两个系统都是必不可少的,设计时总是要联系起来考虑的。真空排水预压的两个系统见图 1-2 所示。

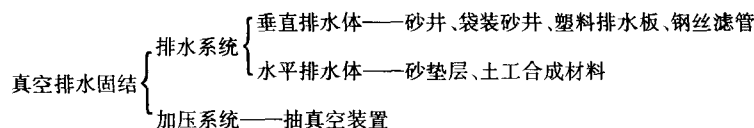


图 1-2 真空排水预压的两个系统

真空排水预压法与常规的堆载排水预压法相比,具有加荷速度快、无需堆载材料、加荷中不会出现地基失稳现象等优点,因此它相对来说施工工期短、费用少,但是它能施加的最大压力只有 95kPa 左右,如要再高,则必需与堆载排水预压法等联合使用。这些后面还会详述。

1.2 真空排水预压法的发展状况

真空排水预压法加固软土地基的基本原理,最早由瑞典皇家地质学院的杰尔曼教授(W. Kjellman)于 1952 年提出。但是多年来由于施工工艺方面的困难,主要是抽气设备、密封材料、垂直排水通道、打设技术等方面的原因,这一技术的发展相当缓慢,没有得到大规模的生产应用,过去几十年也仅仅在少量几个工程中被采用。

1958 年美国费城机场^[27]曾用真空井点降水与排水砂井相结合,解决了飞机跑道的扩建工程。加固区面积近 14 万平方米,有 763m 长,183m 宽。被加固的土层为 4.6~6.1m 厚的粘质和粉质粘土和位于该层上面的刚吹填不久的厚度为 1.5~3.0m 的沉积粘土和淤泥,粉质粘土中夹有薄的、不连续扁豆形细砂层,再往下是粗砂和砂砾层。加固区内打设 595 口排水砂井,在加固区四周打设 15 口真空深井,井深 21.3m,每一深井安装一台立式涡轮真空泵。深井用来形成负压源,所用的抽气设备是深井立式涡轮真空泵,用膨润土将管口密封,各井出口处都由管道相连,整个地区真空度在达到 380mm 汞柱(约 50kPa)后,继续恒压 18 天后停止抽气,加固达到了预期的目的。本项工程最大的特点就是充分利用地层的特点,将负压源设在地下,充分利用不连续扁豆形细砂层和粗砂与砂砾层作为传递真空度的水平通道,将真空度传递到排水砂井周围的土层中,从而向砂井周围的土体扩散,使土体产生固结。解决了负压源设在地表而表层大面积密封的困难。这是一次成功的实践,然而抽真空设备的效率和深井井口的密封应该说还是不够理想的。

日本横滨市武丰火力发电厂运用该法加固地基时,真空度也只达到 405mm 汞柱^①,一旦停泵 10min,真空度便降至 80~100mm 汞柱。看来地表密封还是达不到实用的要求。20 世纪 70 年代日本东北地区新干线^[28]在第七号谷地的泥炭土和混有有机物的淤泥土地区,在采用真空排水预压法进行加固时,加固区内打设了垂直排水通道——纸板,加固区四周打设钢板桩并施加了膨润土溶液进行密封,解决了漏气问题,使泵后真空度保持在 700mm 汞柱,最高达到 720mm 汞柱,膜下真空度仅达到 478mm 汞柱。经过 21 天的抽气压载使加固区发生近 83cm 的沉降量,使地基土的无侧限抗压强度提高 1 倍多,加固取得了明显的效果。然而受纸板材料的影响,真空度沿纸板的传递衰减很大,离地面 2m 深处真空度就减小为膜下的五分之一。尽管

① 1mm 汞柱 = 133.322Pa。

如此,本项目的成功还是将真空排水预压法的加固技术向前大大推进了一步。

到了1982年,日本大阪南港^[29]在第二阶段的加固工程中,采用袋装砂井或排水纸板作为垂直排水通道,采用抽真空与抽水相结合来降低水位的方法,加固第一阶段中几乎没有得到改善的上部2/3厚度的软弱吹填土,加固面积达到100万平方米,它也是通过密封管道将真空源置于被加固层下、运用潜水泵将水排出,在被加固的吹填土上回填5~8m厚的砂质土作为密封层(该层本身就是地面高程所需要回填的),而抽气管口用粘土密封。这样,就因地制宜地解决了大面积场地的密封问题,把该项技术的应用推向一个新的阶段。在初期试验阶段真空度也仅仅达到430mm汞柱,在第一期加固工程中便达到500~600mm汞柱。经过对泵设备的进一步改进,在第二期工程中管内真空度始终保持在630mm汞柱。

我国开始研究此项加固技术还是较早的,1957年807部队和哈尔滨军事工程学院在室内和室外做过真空预压试验,王仁权就探讨过用真空预压法加固淤泥地基,1959年他们对淤泥地基加固的野外试验进行了总结;1959年天津大学开展了室内真空预压试验研究来探讨真空预压的规律性和效果,提出了“吹填土真空排水固结试验研究”的报告;同年南京科学研究所天津做了“电渗真空砂井联合作业法”的试验研究,于1960年提出“电渗排水加速海淤软土固结试验报告”;1960年同济大学和南京水利科学研究^[26]在上钢一厂做了小型现场试验,提出了“用真空预压法加固吹填土的试验小结”的报告,图1-3就是当时现场试验的示意图,报告叙述说“地面上铺设了一层砂卵石,其上覆以一层不透气的材料(用的是厚度为2mm的橡胶布),用抽气机将砂卵石和砂井中的空气抽去以后,在一定范围内的土层中形成真空。试验时,抽气开始后,抽气机上的真空压力很快便达到了相当于0.9MPa的压力,覆盖层紧紧地被吸住了,贴在砂卵石上。用手指去掀它,简直像石头一样。这种现象表示大气压力似乎已经有效地利用了。但奇怪的是地基始终没有显著的沉降发生,埋在地面下2~3m的标点几乎未见有沉降的迹象。”试验没有成功,大面积使用也就未能付诸实施。

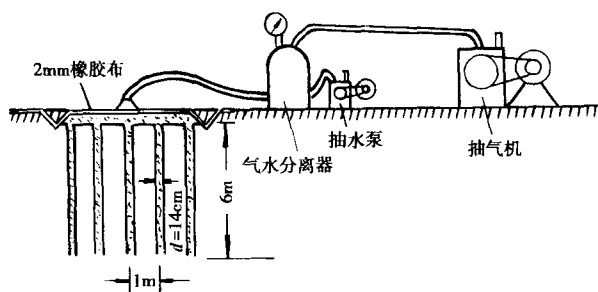


图1-3 上海某工地真空预压现场试验示意图

从现在的技术水平来看,膜下没有设置滤管系统、抽真空设备(不是射流泵)效率低下,可能是当时试验没成功的原因。在哈尔滨的试验可能是受机具和密封材料(用的是粘土)的限制,密封问题没有解决好,膜下与土层中真空度达不到人们期望的要求,因而也不能付诸生产实践。此外,天津港务局也进行过现场试验研究及工艺试验,都没能很好解决施工工艺问题。

发生这种情况的主要原因,除密封材料当时没有轻、薄、不透气的材料以外,主要是当时国内外抽气用的都是真空泵,再配上气水分离器,将分离出的水由离心泵抽走,如日本东北地区新干线的施工就是如此。因此“如不采用排气量很大的真空泵,便不能得到高的真空度...”^[30]。所以,在日本大阪南港加固过程中,加大泵的功率是提高真空度的措施之一。日本藤森谦一等曾指出,为了在500m²的面积上获得420mm汞柱的真空度,要一台20马力的^①真空泵。这也是我国过去试验中真空度提不高的一个根本原因。

到了20世纪80年代,以交通部第一航务工程局为主,天津大学、南京水利科学院土工所

^① 1 马力 = 735.499W

参加的联合攻关小组,对该项加固技术又重新进行了探索、研究。经过几年的努力,一航局解决了关键的抽气设备,用射流泵代替了上述真空泵,很好地解决了气水分离问题,使抽真空的效率大大提高,膜下真空度稳定在 530mm 汞柱,最大可达到 600mm 汞柱,从而使该项加固技术的施工工艺有了突破性地进展,使之能满足加固大面积软土地基的要求,并使相当的预压荷载达到 80kPa。该法在天津新港经历了由探索试验(11m×24m)、中间试验(550m²,1250m²),最后到生产应用(3000m²/块)的过程,逐步走向完善成熟。

与此同时,国内也有不少地方采用该法加固软土地基,并不断改进,使现行的施工工艺越来越完善。如福州市采用此法加固某软土地基^[32],真空度达到 640mm 汞柱,相当预压荷载达到 87kPa。1984 年由南京水科院与江苏盐业公司基础工程处在连云港海滩共同进行了现场试验,当时进行的是生产性试验,试验后的场地即用作生产地基,其面积为 4000m²(50m×80m),是当时国内单块面积最大的。经过共同努力取得了成功并在施工工艺上又有了一些改进,用此法还在连云港碱厂加固了近 18 万平方米地基,使这项加固技术有了新的提高。

经过国内外几十年来的不断探索和研究,使该法日臻完善,早已进入大面积应用、实施阶段,成为目前加固软土地基的一个行之有效的、常规实用的方法。近十多年来,在天津新港建设中、在浙江舟山市老塘山煤码头建造中、在汕头港和京珠高速公路等诸多工程项目建设中,都采用了真空排水预压法或真空排水预压与堆载预压相结合的方法加固了软土地基,为国民经济建设作出了贡献,并使该项加固技术水平走在了世界的前列。

第2章 真空排水预压法的加固机理与特征

真空排水预压法与堆载预压法同属于排水固结法,那么二者有没有不同?真空排水预压法的加固机理又是什么呢?让我们从有效应力原理出发加以分析。太沙基的有效应力原理告诉我们,土体强度的增长、压缩量的发生,都是以有效应力的变化为前提的。只有土体的有效应力发生了变化,土体的变形才会发生,强度才会有变化。排水固结法加固软土地基的基本原理就是基于此。在分析真空排水预压法的机理之前,让我们先看看堆载排水预压法的加固机理。

2.1 堆载排水预压法的加固机理

堆载排水预压法以土料、块石、砂料或建筑物本身(路堤、坝体、房屋等)作为荷载,对被加固的地基进行预压。软土地基在此附加荷载作用下,产生正的超静水压力。经过一段时间后,超静水压力逐渐消散,土中有效应力不断增长,地基土得以固结,产生垂直变形,同时强度也得到了提高。有时为了缩短加固时间,加快加固的进程,在地基中打设一定深度的砂井、袋装砂井或塑料排水板一类的垂直排水通道。

图 2-1a) 表示正常固结土地基用堆载排水预压法进行加固时的情形,土体中 A、B、C 三点加固前处于 K_0 应力状态(图 2-1b)),由外荷产生的附加应力如图 2-1c) 所示。加固前,与 K_0 应力状态相应的应力圆可用图 2-2 中的 D 圆表示,与其相对应的强度可近似用其平均有效应力 $P_0' = 1/2(\sigma_{10}' + \sigma_{30}')$ 所对应的强度 τ_0 (图 2-2 中的 E 点)来表示。

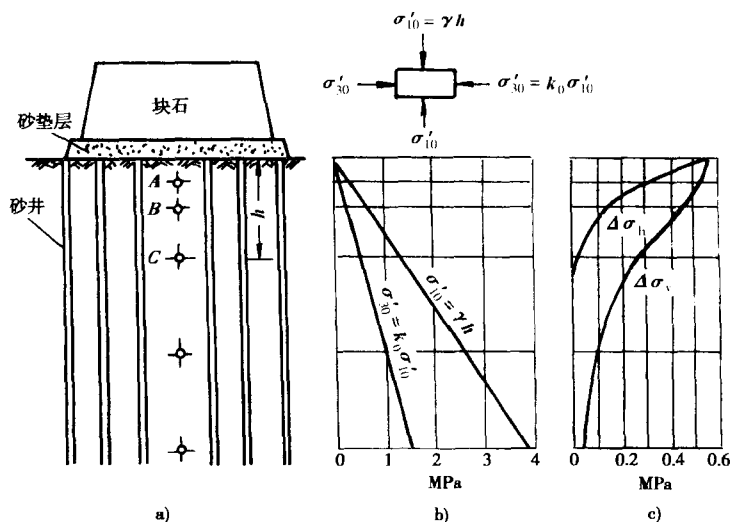


图 2-1 正常固结土的堆载排水预压加固应力分布

当用堆载预压法进行加固时,在土中形成的超静水压力消散完毕后,土体主固结完成,相

应的有效应力圆移到 D' 位置。此时

$$\sigma_1' = \sigma_{10}' + \Delta\sigma_v' \quad (2-1)$$

$$\sigma_3' = \sigma_{30}' + \Delta\sigma_h' \quad (2-2)$$

$$p' = 1/2(\sigma_1' + \sigma_3') = p_0' + 1/2(\Delta\sigma_v' + \Delta\sigma_h') \quad (2-3)$$

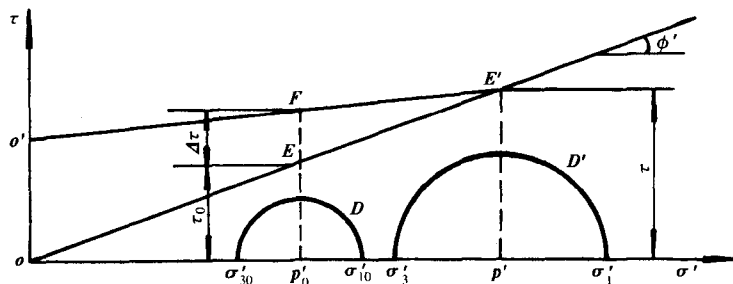


图 2-2 堆载排水预压加固地基强度的增长

D' 圆的圆心 P' 对应的强度为 τ ，土体的强度由 E 点移到 E' 点，可见土体的强度有了提高。当外荷卸去以后，被加固的土体由正常固结状态变成超固结状态，土体中的强度沿超固结强度包线 $O'E'$ 返回到 F 点， F 点与 E 点相比具有较高的抗剪强度，因此，经过预压加固土体的强度得到了提高。

从变形看（见图 2-3），加荷后土体中应力由 p_0' 发展到 p' ，孔隙比发生 Δe 的变化。卸荷后应力又返回到 p_0' ，变形由 C 点沿回弹曲线回到 A' 点，扣除回弹之后，土体的压缩量为 $\Delta e'$ 。若再受荷，土体沿再压缩曲线 $A'C$ 发展，直至荷载超过 p' 后才沿初始压缩曲线发展。加固过程中，土体的固结是与土中超静水压力的消散紧密相关的。

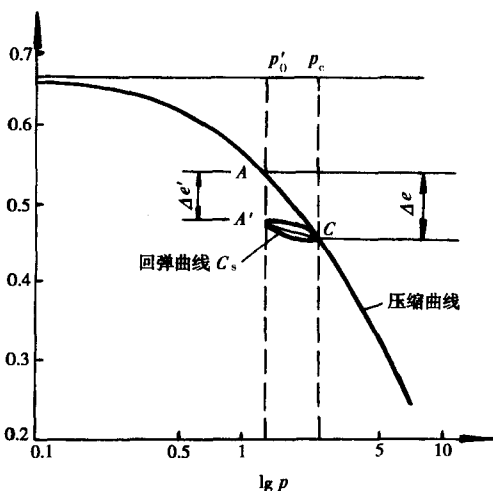


图 2-3 堆载排水预压加固地基土的压缩变形

在土层较厚、渗透性较差的软土地基中，垂直排水通道能加速超静水压力的消散，加快土体的固结进程，减小了建筑物在使用期间的沉降变形和差异沉降。

2.2 真空排水预压法的加固机理

用真空排水预压法加固软土地基时，在地上施加的不是实际重物，而是把大气作为荷载。在抽气前，薄膜内外都受大气压力作用，土体孔隙中的气体与地下水面以上都是处于大气压力状态（见图 2-4）。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_n ，薄膜内外形成一个压差 Δp ，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，通过垂直排水通道逐渐向下延伸，同时真空度又由垂直排水通道向其四周的土体传递与扩展，引起土中孔隙水压力降低，形成负的超静孔隙水压力。所谓负的是指形成的孔隙水压力小于原大气状态下的孔隙水压力，其增量值是负的。从而使土体孔隙中的气和水由土体向垂直排水通道的渗流，最后由垂直排水通道汇至地表砂垫层中被泵抽出。在堆载排水预压法中，

虽然也是土中孔隙的水向垂直排水通道中汇集,然而二者引起土中的水发生渗流的原因却有本质的不同。真空排水预压法是在不施加外荷的前提下,以降低垂直排水通道中的孔隙水压力,使之小于土中原有的孔隙水压力,形成渗流所需的水力梯度;而堆载排水预压法却是通过施加外荷载,增加总应力,增加软土中孔隙水压力,并使之超过垂直排水通道中的孔隙水压力,使土中的水向垂直排水通道中汇流。

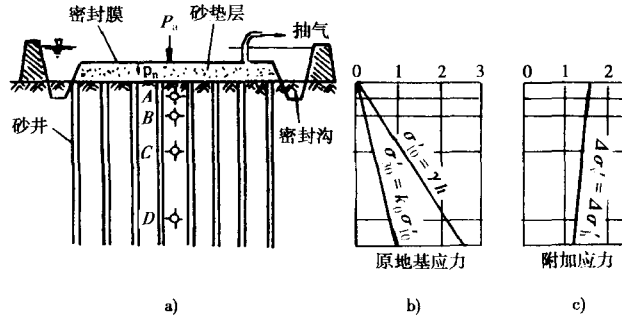


图 2-4 真空排水预压加固软土地基的应力分布

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,即 ($\Delta\sigma = 0$) 的情况下发生的。加固中降低的孔隙水压力就等于增加的有效应力,即

$$\Delta\sigma' = -\Delta u \quad (2-4)$$

或

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u = 0 \quad (2-5)$$

土体就是在该有效应力作用下得到加固的。

从以上分析可以看出,垂直排水通道在真空排水预压法中,不仅仅起着垂直排水、减小排水距离、加速土体固结的作用,而且起着传递真空度的作用。“预压荷载”在这里是通过垂直排水通道向土体施加的,垂直排水通道在这里是起着双重作用。

从有效应力路径分析来看,加固前地基中原有的应力状态如图 2-1b) 和图 2-4 所示,平均应力为

$$p_0' = 1/2(\sigma'_{10} + \sigma'_{30}) \quad (2-6)$$

加固中地基土体中增加的有效应力为 $\Delta\sigma'$, 由于孔隙水压力是一个球应力,所以在各个方向均增加 $\Delta\sigma'$, 因此

$$\sigma_3' = \sigma'_{30} + \Delta\sigma' \quad (2-7)$$

$$\sigma_1' = \sigma'_{10} + \Delta\sigma' \quad (2-8)$$

其有效应力圆由 D 位置向右移到 D' (见图 2-5), 平均应力增加到

$$p' = p_0' + \Delta\sigma' \quad (2-9)$$

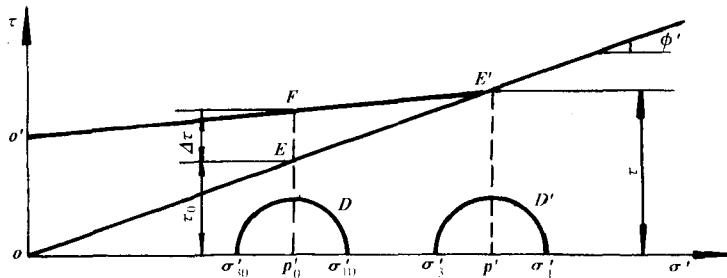


图 2-5

但应力圆的半径没有变化。当加固结束、“荷载”卸除后,地基土的强度沿超固结包线退到 F 点,和原有强度相比增加了 $\Delta\tau$,所以加固后土体强度亦有了提高。

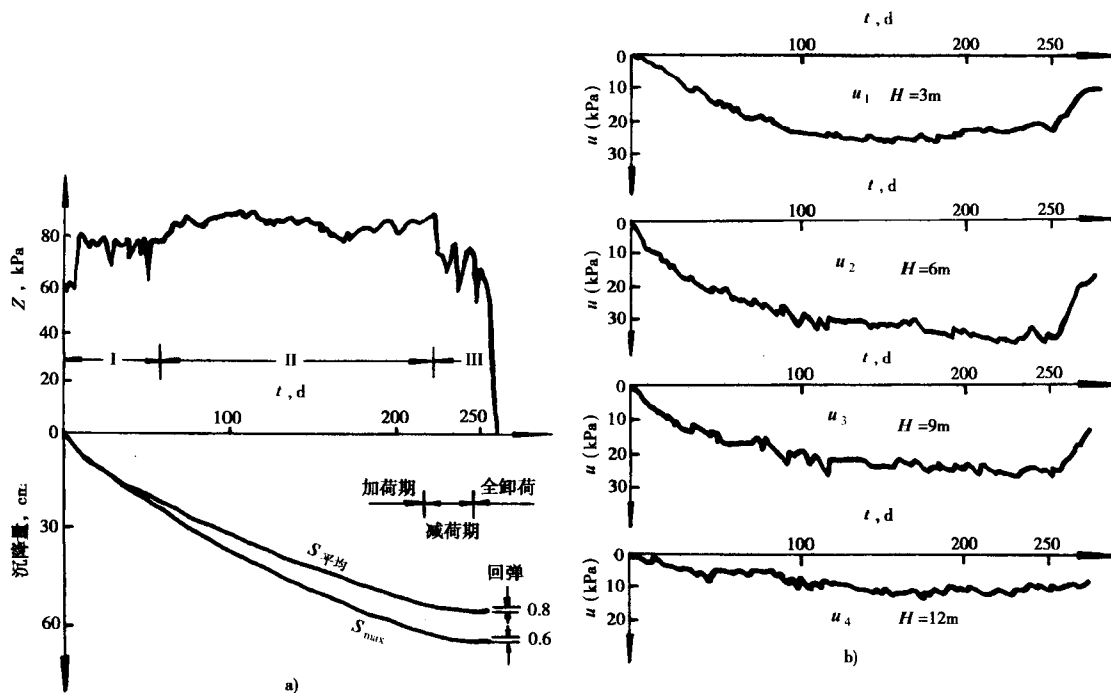


图 2-6

a)膜下真空度与膜面沉降过程线; b)淤泥土中负孔隙水压力过程线

在堆载排水预压法的加固过程中,地基土孔隙里产生正的超静水压力,这已被大量的现场试验量测结果所证实,这里不再叙述。然而在真空排水预压加固中,土体中是否产生如文中所说负的超静水压力呢?笔者于1984年运用真空排水预压法在连云港碱厂白煤堆场的加固中,首次于现场实测到被加固的软土地基中不同深度处都产生了负的超静水压力,如图2-6b)所示。图2-6a)中也绘出相应的膜下真空度的时间过程线和地表沉降时间过程线。从图中可以明显看出,随着抽真空的进行,膜下真空度逐渐上升并相对稳定在640mm汞柱(相当87kPa)左右,土中孔隙水压力则越来越低,负的超静水压力也越来越大,地表也随时间逐渐发生沉降,说明土中有有效应力存在并使地基产生压缩,该有效应力应该是负的超静水压力转化而来。随着抽气的结束,负的超静水压力也逐渐减小,慢慢恢复到零,地表沉降也渐渐中止,说明有效应力也渐“消失”。现场试验的量测结果完全证实了以上的理论分析。

在分析了堆载排水预压法与真空排水预压法的加固机理之后,我们很容易地看出他们二者在加固机理方面的区别。

第一,堆载排水预压法中,土体中的总应力是增加的;而真空排水预压中总应力是没有增加的。

第二,堆载排水预压法中,土体孔隙中形成的孔隙水压力增量是正值,即超静水压力是正值;而真空排水预压法中,土体孔隙中形成的孔隙水压力增量是负值,即是小于静水压力的值。

第三,堆载排水预压法中,土体有效应力的增长是通过正的超静水压力的消散来实现的,而且随着超静水压力逐步消散为零,有效应力增加达到最大值;而真空排水预压法中,土体有

效应力的增长是靠负的超静水压力的形成来实现的,随着负的超静水压力的增大,有效应力也逐渐增大,一旦负的超静水压力发生“消散”,则有效应力也随之降低,当负的超静水压力“消散”为零时,土体中形成的有效应力则亦降为零。

第四,堆载排水预压法中,土体加固后形成的有效应力与上部施加的荷载大小有关,而且在垂直向和水平向上大小一般是不同的,当加固完成后,上部荷载没有移去,则土体中有效应力的增加依然存在,土体总有效应力是增大的;真空排水预压法中土体有效应力的增加具有最大值,理论上最大为一个大气压,一般都低于此值,由于有效应力的增加是依赖于孔隙水压力的降低来实现的。

所以,土体加固过程中有效应力增加值在垂直、水平及各个方向上具有相同值,并且随着加固过程的结束,“荷载”亦即消失,加固过程中形成的有效应力亦随之消失,土体中总有效应力恢复到原有水平,所以经真空排水预压加固过的土体会处于超固结状态。

2.3 真空排水预压法加固软土地基的特征

对真空排水预压法的加固机理进行了有效应力分析之后,让我们再运用应力路径的分析手段来认识一下该法的特征。同样,这些特征是相对于堆载排水预压法的,所以也要对二者进行同步分析比较。

现场试验结果已经表明,真空排水预压法的加固特征与堆载排水预压法有根本的不同。其主要表现为两方面:其一,用真空排水预压法加固时,“荷载”是一次施加的,可看作瞬时加荷,荷载无须分级施加,不必担心加固过程中会出现地基失稳情况;而对堆载排水预压法来说,一般荷载是要分级施加的,不能一次施加,加固中需要研究地基的稳定问题。其二,经真空排水预压法加固的地基,其侧向变形是向着加固区的;而堆载排水预压法加固的地基,一般其侧向变形是朝向加固区外的。现分述如下:

2.3.1 关于分级加荷

在堆载排水预压法中,如前所述,加荷时应力圆由 D 移到 D' (见图 2-2),可以看到不仅平均应力增大了,而且应力圆的半径亦增大,这意味着地基土的强度和剪应力都在增大。从图 2-7a) 和图 2-1b) 可以看出,土体原处于 k_0 应力状态,位于 $p'-q$ 图中的 k_0 线上,当加荷后,其有效应力路线如图 2-7a) 中虚线所示。若一次施加的总应力太大,当有效应力增长较慢时,则土体很容易达到破坏包线 k_f , 从而发生失稳剪切破坏。因此,一定得控制加荷速率,让土体强度的增长大于剪应力的增加。这就是堆载排水预压法中荷载要分级施加的原因。图 2-7b)、c) 说明分级次数或加荷的有效应力路径不同,土体所具有强度也迥然不同。

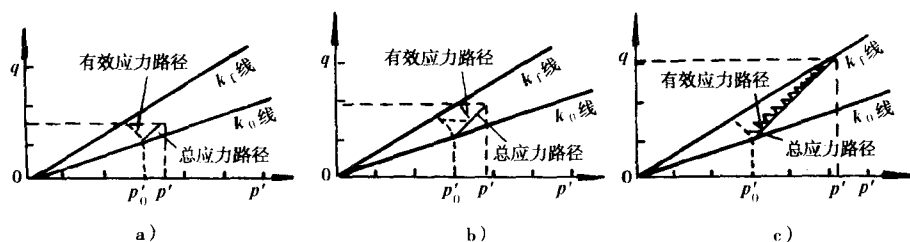


图 2-7 分级加荷土体强度增长的有效应力路径

a) 一次加荷; b) 一次加荷; c) 多级加荷