

本书由南京水利科学研究院出版基金资助

JIAGU RUANTU JISHU

ZHENKONG PAISHUI YUYAFA

真空排水预压法 加固软土技术 (第二版)

娄炎 著



人民交通出版社
China Communications Press

本书由南京水利科学研究院出版基金资助

ZHENKONG PAISHUI YUYAFA

JIAGU RUANTU JISHU

真空排水预压法 加固软土技术 (第二版)

娄炎 著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书是在基本延续《真空排水预压法加固软土技术》第一版的编排顺序并保留第一版基本内容的基础上,结合近 10 年真空预压技术在国内外的发展现状,进行知识更新和案例补充。目的是让更多想掌握该技术的年轻人能循序渐进地学习、掌握真空预压加固软土技术的基本知识,并迅速用于实际工程中。

本书可供从事岩土工程研究、地基基础加固设计及现场施工工作的人员使用,也可供高等院校相关专业师生选用。

图书在版编目(CIP)数据

真空排水预压法加固软土技术 / 娄炎著. — 2 版

-- 北京 : 人民交通出版社, 2013.3

ISBN 978-7-114-10307-0

I. ①真… II. ①娄… III. ①真空技术 - 应用 - 软土
地基 - 预压加固 IV. ①TU471.8②TU472.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 007953 号

书 名: 真空排水预压法加固软土技术(第二版)

著 作 者: 娄 炎

责任编辑: 张征宇 郭红蕊 潘艳霞

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.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.25

字 数: 420 千

版 次: 2002 年 1 月 第 1 版

2013 年 3 月 第 2 版

印 次: 2013 年 3 月 第 2 版 第 1 次印刷 总第 2 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10307-0

印 数: 3001-6000 册

定 价: 40.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

谨以此书献给我的第一导师钱家欢教授 ——纪念先生诞辰 90 周年

钱家欢教授诞生于 1923 年 8 月,浙江湖州人。九三学社社员,河海大学教授,博士生导师,首批政府特殊津贴获得者,江苏省第六届人大代表,第六届、第七届全国人大代表。

先生 1945 年毕业于浙江大学土木系,后留学美国,获伊利诺大学硕士学位,于解放前夕毅然返回祖国,先在上海军管会水利训练班及浙江大学任教,后任华东水利学院科研处处长、土力学教研室主任,华东水利学院和河海大学学术委员会和学位委员会委员。历任浙江大学副教授,华东水利学院、河海大学副教授、教授,香港大学荣誉教授,国务院学位委员会第二届学科评议组成员,中国水利学会岩土力学专业委员会副主任,中国土木工程学会土力学与基础工程学会常务理事。曾任《中国科学》编委,《岩土工程学报》编委会主任;1985 年、1987 年、1993 年三次作为特邀报告人分别参加新加坡第二届国际地基加固会议、日本京都亚洲土力学会议和中国广州国际软土会议;1991 年,应日本土质工学会邀请在京都、大阪和东京作了一系列学术报告,1994 年,作为唯一中国专家入选国际土力学学会组建海岸岩土工程委员会,并被确定为核心组成员。

先生毕生从事岩土力学和地基工程的教学和科学研究工作,并在这一领域做出了卓越的贡献。作为全国重点学科的创建者和带头人,先生在软土流变理论、动力固结理论、土坝震后永久变形和土工数值分析等方面在国内做了开拓性的工作,取得多项达到国际领先水平的成果。先生主编的研究生教材《土工原理与计算》、本科教材《土力学》均获水利部优秀教材一等奖,在国内外有很大影响;先生参加和主持的科研项目多次获国家和部、省级奖,其中,“土质防渗体高土石坝研究”和“小浪底土石坝震后永久变形”先后获得国家科技进步一等奖。先生在岩土工程学术界和工程界的学术地位得到国内外同行的一致公认,先生培养的博士和硕士研究生已成为许多单位的学术带头人和业务骨干。

先生正直善良,慈祥忠厚,和蔼可亲,循循善诱,诲人不倦。先生生前曾谆谆教诲“土力学是一门实践性非常强的学科,需要勤勤恳恳读书、踏踏实实做事,打好基础、细心钻研、融会贯通才能有所进步,有所发现”,特别强调对土力学基本概念和基本理论的学习。先生的教导学生永远铭记在心,使晚辈受益匪浅、享用终生。值此先生诞辰 90 周年之际,谨以此书献给先生,以资纪念。

娄 炎

2012 年 10 月 31 日于广州

第二版序

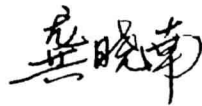
本书初版至今已整整10年了。它是国内外第一本全面、系统地阐述真空排水预压法加固软土地基技术的专著,阐述细致透彻,介绍深入浅出。因此,该书一问世便受到岩土工作者的欢迎,对推动真空预压技术在软土地基加固领域中的应用起了极大的作用。正如当年蒋彭年先生预示的那样,“本书对丰富真空排水预压法的理论、对促进该技术的推广应用将产生积极的影响”。它是一本注重把科技成果转化为生产力,而又便于技术人员掌握的工程应用的好书。

10年来,真空预压加固软土地基技术不仅得到广泛应用,而且也得到积极发展。真空预压技术已被大量应用于各领域、各行业建筑物的软土地基处理中,从国内的软基加固延伸到国外的软基处理;从广泛用于沿海的淤泥、淤泥质土扩展到用于新近吹填的疏浚土处理;从单一的真空预压加固发展到广泛与其他方法的联合加固;从大量用于交通领域的地基处理扩展到水利行业平原水库的防渗密封等;这些都是这10年来真空预压加固技术发展的具体体现。同时,10年来,在原有真空预压技术的基础上,还发展与衍生出一些新技术,形成一些新工法。作者在第二版中对其中的突出成果和新发展都做了介绍和展示,对第一版中的内容也做了大量补充和完善,相信读者能从中得到更多的启发,将会再一次推动该技术深入发展和应用。

作者已是年近古稀之人,至今仍工作在软基加固领域的第一线,为软基加固技术的发展和人才培养辛勤地工作着,用他的话说“我喜欢我的专业”,这大概就是他孜孜不倦、乐此不疲往来于工地现场和试验室的原因。作者的学风严谨认真、崇尚实践,工程经验丰富,退休之后笔耕不辍,去年刚刚出版《高速公路深厚软基工后沉降控制成套技术》一书,今年又完成本书的再版。作者在参与工程建设的同时十分注重总结实践经验、提炼学术成果、服务奉献社会,充分体现老一辈科技工作者的敬业精神,相信读者在汲取技术上的养分之外,也能从中悟出技术工作者的快乐所在。

是为序。

浙江大学教授
中国工程院院士



2012年9月30日于杭州

 序

真空排水预压法这项加固技术在近 20 年有了长足的进展,它主要得益于我国科技工作者的辛勤努力,我国的岩土工程师做了大量的室内、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。20 年来,积累了丰富的工程经验,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一直处于国际先进水平。

本书作者就是这些岩土工程师中的突出一员,10 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 年 5 月 8 日于南京水利科学研究院

第二版前言

国内外第一本全面系统阐述真空预压加固软土技术的专著——《真空排水预压法加固软土技术》自2002年1月出版至今已整整10年,10年来,真空预压技术在国内外得到广泛的应用和飞速的发展,真空预压技术已被大量应用于各领域、各行业建筑物的软土地基处理中。从国内的软土加固延伸到国外(东南亚)承包工程的软基处理;从主要用于沿海多年沉积的淤泥、淤泥质土扩展到用于新近吹填的疏浚土;从单一的利用真空荷载加固软基发展到广泛与其他方法的联合加固;从处理20m左右厚的淤泥层的加固,发展到对厚度近40m的淤泥质土,都取得良好的加固效果;从原本主要解决软基的稳定问题变成深厚软基工后沉降控制的有力手段;从大量用于交通领域的地基处理扩展到水利行业平原水库的防渗密封。这些都是10年来真空预压加固技术巨大发展的具体体现。

这些发展与变化都是围绕着使真空预压加固软土技术能更好地适应各种复杂工况、满足建设发展的需要、获得最好的加固效果和最低的成本进行的。10年来,在原有真空预压技术的基础上,还发展与衍生出不少新技术,形成不少具体的工法,解决了生产实践中不同的问题。这当中,有低位真空预压加固技术、气压劈裂真空预压技术、真空立体降水技术等,这些技术的出现为真空预压加固软土技术的发展和完善做出了积极的贡献,极大地扩展了它的应用范围、丰富了它的内涵,增进了加固效果、降低了工程成本。

随着真空预压技术及其衍生技术的发展和广泛应用,与之紧密相关的现场监测技术也得到快速发展,10年来,完善与发展了一些现场监测技术。如密封膜下地下水位量测技术,排水板、软土中真空度量测技术,分层沉降监测技术,负压下钢弦式孔隙水压力计的制造技术等应运而生,同时也出现了自动化监测系统。把我国的监测工作大大向前推进一步,监测水平有了较大的提高,为加固机理的研究、工程质量的监控、加固效果的分析都创造了极好的条件,为上述各技术的诞生与发展做出重要贡献。

真空预压加固软土技术的不断进步和发展与我国这方面研究工作的深入开展是密切相关的,与我国科研人员的辛勤努力是分不开的,他们做出了巨大的贡献,他们的工作生动地体现科学就是生产力的道理。10年来,科研单位和高校做了大量的研究项目,培养了一批这方面的高级人才。他们或在试验室一丝不苟地做着各种试验、从蛛丝马迹中寻找新的发现;或穿梭于工地现场忙着采集各种科研数据,验证着他们的新方案。研究方式主要有两种,一是在室内做模型试验,剖析影响因素,寻求新的发现,验证新的设想。研究成果大都偏于定性方面,通过试验验证提出技术的可行性、有效性及影响因素等。由于室内模型试验是将实际工程缩小若干倍后进行的,工程的尺寸可以按比例缩小,但土的颗粒尺寸难以缩小

(尤其是粉粒、黏粒)。重力加速度也无法增大,模型所在的应力场都是在1个重力加速度的重力场中产生,试验中得到的土体应力、变形、强度无法与实际工程相应部位对应,因此,模型试验还不宜用来定量解决工程问题。室内模型试验还有许多问题没有解决,所得结果只能用于定性分析和初步判断。因此,近10年较多地开展了现场足尺试验研究,这就是第二种研究方式。随着国力的增强和科技的发展,大型现场试验研究已经成为建设领域中常用的一种解决问题的有效办法,它虽然花钱不少(与工程造价相比还是微不足道的),但效果直观、显著、明确。在试验中不仅能解决方案问题,同时还能得到合理工艺,试验中得到的许多数据为深入研究加固机理、设计计算方法、加固中止标准、工程质量标准等都能提供可靠依据,对新技术、新材料、新工艺、新方法的作用与效果可以在现场试验中加以检验与验证。足尺试验研究主要能定量、全面地解决工程问题,不仅解决技术问题,也能解决新技术在工艺和管理上的问题,以期让新技术能更快、更好、更多地得到应用,现场试验得到的结果是一般室内模型试验难以得到的,二者无法比拟。因此,在许多重大、重要工程项目开工前都要进行现场足尺试验研究。这10年来,真空预压加固的现场试验研究做过不少,都是结合实际工程的。实施的单位也很多,有科研单位、高等院校和一些工程单位,这些工作的开展也大大提升了我国的科研水平,使我国在这方面的水平依然走在世界的前列。

技术的飞速进步、研究成果的大量涌现,也反映出在这一领域中人才培养的快速发展,这10年来,高校与科研单位培养出该专业的第一批硕士、博士,尤其在2002年以后,发表的论文、培养的人才都有明显的增长。表1是明经平博士在他的论文中刊列的国内在真空预压方面的研究成果,原表只列到2007年,作者又请他补充了2008~2010年的资料。这个统计结果充分展示了近10年在真空预压加固软土技术方面的飞速发展和科研工作取得的成就。表中数据清楚地传达了以下信息。第一,论文发表总数与期刊发表数自2002年有大幅度增加(图1),2005年后每年论文总数都超过百篇,一年的量达到2002年前15年的总和;说明该技术自2002年后得到飞速发展,进入广泛应用和深入研究阶段,并取得丰硕成果,这些论文就是这些应用的表述和展现。第二,2003年以前没有博士论文产生,也就是说还没有培养出这方面的博士,2003年之后开始有博士论文出现,说明人才的培养也开始进入高级阶段。研究内容偏重于真空预压加固机理和加固理论,表明这方面的研究水平达到新的高度;硕士论文自2003年后有较大幅度增加,说明专业人才的培养有长足的发展,同时也说明建设对这类人才有更多的需求。

有关真空预压方面的文献在各年度发表数量统计

表 1

年份(年)	1979~1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
期刊论文	10	5	7	7	3	7	4	3	5	0	4	3	4
博士论文	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
硕士论文	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
会议论文及其他	1	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0
小计	11	5	7	7	3	7	4	4	5	2	5	3	4

续上表

年份(年)	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
期刊论文	7	11	14	20	45	50	67	92	94	100	108	111	110
博士论文	0	0	0	0	0	2	1	1	0	2	2	0	1
硕士论文	0	0	0	2	0	2	6	7	9	19	11	4	10
会议论文及其他	0	2	0	0	6	3	3	4	6	9	29	24	24
小计	7	13	14	22	51	57	77	104	109	130	150	139	145

本书再版是想把真空预压加固技术 10 年来的突出成果和新发展作一介绍,并对第一版中的部分内容加以补充和完善,希望再一次推动该技术的发展和运用。由于目前条件尚不具备,有的还不太成熟,成果仅停留在试验阶段和机理研究上。因此,还是本着“实践第一”的原则,着重解决工程中的实际问题,以展现现场研究成果为主,选择一些相对成熟的成果在第二版书中加以补充和介绍。主要有以下内容。一是介绍真空预压加固软土技术的发展,

介绍真空预压技术与其他技术的联合应用,如与强夯法的联合应用;二是介绍真空预压技术在新领域中的应用,如用于新近吹填的超软弱土、平原水库防渗密封膜的气胀以及高速公路工后沉降的控制;三是介绍运用中对一些问题的认识和解决办法,如真空联合堆载预压加荷速率的控制问题,预压中止的综合判定方法;四是真空预压加固软土技术的衍生技术,主要介绍低位真空预压技术、气压劈裂真空预压技术;五是解读新颁布的《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147-2—2009),介绍其中的主要内容和作者的一些看法,供使用者参考;六是附录中列出真空预压技术中使用的主要材料——塑料排水板和密封膜的行业与国家技术标准,希望读者仔细研读,看看这些标准中相关指标的异同,体会它们的含义和侧重点。至于真空预压加固理论与设计方法的新成果,目前的研究结果大都没经过验证、不太成熟,有的尚在进行之中,所以本书不作介绍。本书基本延续第一版的编排顺序并保留了第一版的基本内容,目的就是让更多想掌握该技术的年轻人能循序渐进的学习,掌握真空预压加固软土技术的基本知识,并迅速用于实际工程中。

本书编撰过程得到中交四航工程研究院有限公司董志良先生、东南大学刘松玉教授团队、南水北调东线山东干线公司李志强研究员等提供的资料,使作者得以顺利完成再版书稿,对他们的热忱帮助表示由衷的谢意。同时也参阅了不少已发表的论文(都已列在书末参考文献中),从中吸取了不少营养、引用了部分资料,作者在此向他们表示深深的感谢。

浙江大学教授、中国工程院院士龚晓南百忙之中为本书写了《第二版序》,对本书及个人做了肯定,给作者以极大鼓舞,在此向他表示深切的谢意。

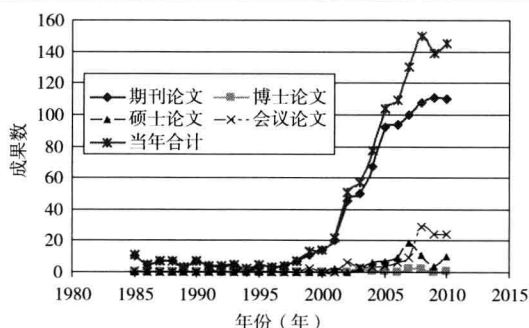


图1 真空预压论文历年发表数统计图

2013年8月,就是我1978年读岩土工程研究生时的第一导师钱家欢教授诞辰90周年的日子。学生的每一点进步与恩师的悉心教导是分不开的。学生不才,无以回报,谨以此书敬献给先生,以资纪念。

本书得到南京水利科学研究院出版基金的资助,得到南京水科院何宁教授的热忱鼓励。人民交通出版社的张征宇、郭红蕊、潘艳霞编辑为本书的出版做了大量细致、艰辛的工作,使本书能按时出版。对此,作者向他们表示衷心的感谢。同时,也特别感谢支持该书出版的各位同仁及家人。

娄 炎

2012年10月28日于广州

前 言

随着改革开放的不断深入,国民经济的基本建设得到日新月异的发展,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10年来得到飞速发展;然而,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,地基加固课题也越来越多,目前已有数十种方法。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工程的建设中得到广泛的运用,并取得了突出的成果。

就作者所知,目前,我国真空排水预压法这项加固技术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的学习、研究心得和积累的经验介绍出来,在这里与大家交流,以期能推动该项技术的进一步发展和在我国的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。

该书得到了南京水利科学研究院科技著作出版基金的资助,并在人民交通出版社的支持下,即将出版发行,在此表示衷心的感谢。

本书共分8章。第1~3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,其余的来自公开发表的论文和学术会议交流的资料。其中,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,也有在水下实施的;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,掺有作者的观点、看法,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5~7章是作者总结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几个因素,偏重于实践方面,是作者多年参与工程实践、积累的经验表述。最后一章讲述本法目前与其他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,他们提供了部分资料;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。

娄 炎

2001年4月30日于南京

目 录

1 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
2 真空排水预压法的加固机理与特征	6
2.1 堆载排水预压法的加固机理	6
2.2 真空排水预压法的加固机理	7
2.3 真空排水预压法加固软土地基的特征	10
2.4 真空排水预压法的特点	12
3 加固设计与计算	14
3.1 总则	14
3.2 实用设计方法	16
3.3 软土地基真空排水预压固结变形的有限元分析	35
4 工程实例	42
4.1 天津新港四港池二号公路旁的现场试验	42
4.2 福州某办公楼地基处理工程	44
4.3 连云港碱厂白煤堆场的软基加固	47
4.4 真空排水预压法加固水下软土地基	52
4.5 浙江舟山老塘山煤码头堆场的地基加固	54
4.6 日本东北地区新干线某段超软土地基处理工程	59
4.7 马来西亚南北大通道试验路之 6/7 段地基加固	62
4.8 某件杂库地基加固	70
5 影响加固效果的几个因素	73
5.1 密封对加固效果的影响	73
5.2 真空度在加固过程中的稳定问题	74
5.3 加固区形状对加固效果的影响	75
5.4 垂直排水通道的影响	78
6 真空排水预压法的施工工艺	81
6.1 真空排水预压法的施工程序	81
6.2 排水系统	82
6.3 抽真空系统	98
6.4 密封系统	106

6.5	加固过程中的管理	112
7	施工监测与加固效果检验	114
7.1	施工监测的目的	114
7.2	施工监测的内容与手段	114
7.3	加固效果的检验	131
8	真空排水预压法与其他方法的联合应用	134
8.1	概述	134
8.2	真空排水预压法与振冲碎石桩的联合加固	135
8.3	真空排水预压与堆载排水预压的联合加固	138
8.4	真空排水预压法与自载预压法的联合应用	147
8.5	真空联合强夯加固软土地基技术	152
9	真空预压加固技术在新领域中的应用	157
9.1	真空联合堆载预压用于控制深厚软基工后沉降	157
9.2	真空预压法用于加固新近吹填的超软弱土	164
9.3	抽真空技术用于解决平原水库库底密封膜防渗的气胀问题	179
9.4	真空预压法用于一次性加固新吹填超软土和深部软土	187
10	由真空预压技术衍生出的新方法	195
10.1	低位真空预压法	195
10.2	气压劈裂真空预压法	209
10.3	由真空预压技术衍生出的其他加固技术	223
11	关于加荷速率控制与预压中止判定	227
11.1	真空联合堆载预压加固软基时加荷速率的控制	227
11.2	预压地基中止加固的综合判定法	231
12	学习《真空预压加固软土地基技术规程》(JTS 147-2—2009)	239
12.1	《规程》的编制背景和特点	239
12.2	《规程》的主要内容	240
12.3	对《规程》中一些条款的建议和意见	243
	附录	247
	附录一 关于塑料排水板的技术标准	247
	附录二 关于密封膜的国家与行业标准	249
	参考文献	253

1 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黏土层,这种土的特点是含水率高,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黏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打设一定间距的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(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。

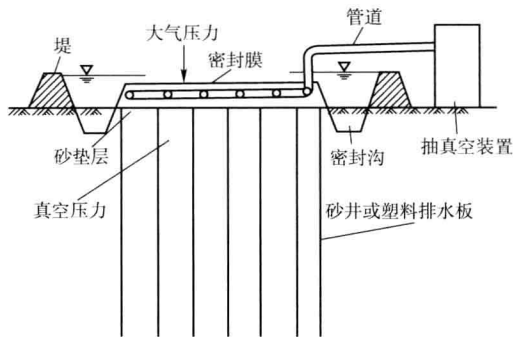


图 1-1 真空排水预压法加固软基的基本原理图

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。加固能加速地基土抗剪强度的增长,从而提高地基的承载力和稳定性。此法主要用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,经抽气预压,使地基土的强度提高、能适应上部建筑物的荷载,使建筑物的整体得以稳定。

真空排水预压法由排水系统、加压系统和密封系统三部分共同组成,如图 1-2 所示。



(1)排水系统。设置排水系统的目的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。

(2)加压系统。对加固区产生起固结作用的荷载,使地基土的有效固结压力增加而产生固结。

(3)密封系统。对加固区域起密封作用,保证加压系统产生的荷载能持久、稳定地作用于加固区,是真空预压加固取得效果的关键措施。

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,地基也就得不到加固。如果只有固结压力,没有良好的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,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。而密封系统是保证加固区域受到持久、恒定荷载的必要条件,没有良好的密封系统,加压系统就起不到相应的作用,或它的作用就大打折扣,会浪费许多能量,延长加固时间,往往难以达到预期的加固效果。所以上述三个系统都是必不可少的,设计时总是要联系起来考虑。



图 1-2 真空排水预压加固软土的三个系统

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期短、费用节省,但是它能施加的最大荷载只有 95kPa 左右,如要再高,则必须与堆载排水预压等方法联合使用。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 年提出的^[1]。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,造成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予以采用。

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 m^2 ,有 763m 长,183m 宽。被加固的土层为 4.6~6.1m 厚的黏质与粉质黏土和位于该层上面、刚吹填不久的厚度为 1.5~3.0m 的沉积黏土和淤泥。粉质黏土中夹有薄的、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,各井出口处都与管道相连。整个地区真空度在达到 380mmHg (1mmHg = 133.322Pa) 后,继续恒压 18d 后停止抽气,达到了预期加固的目的。本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,继而向砂井周围的土体扩散,使土体固结,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。

日本横滨市武丰火力发电厂^[30]运用该法加固地基时,真空度也只达到 405mmHg,一旦停泵 10min,真空度便降至 80 ~ 100mmHg,看来,地表密封还是达不到实用的要求。之后,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。在采取了大功率真空泵后,使泵后真空度保持在 700mmHg,最高达到 720mmHg,膜下真空度仅达到 478mmHg,经过 21d 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 的深处真空度就减小为膜下的 1/5。尽管如此,本项目还是将真空排水预压法的加固技术向前大大推进了一步。

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,使加固第一阶段中几乎没有得到改善的上部 2/3 厚度的软弱吹填土得到改善。加固面积达到 100 万 m²,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),抽气管口用黏土密封。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 430mmHg,在第一期加固工程中便达到 500 ~ 600mmHg。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 630mmHg。

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;1959 年,南京水利科学所在天津做了“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所^[26]在上钢一厂进行小型现场试验,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 为当时现场试验的示意图。报告叙述“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 0.09MPa 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。

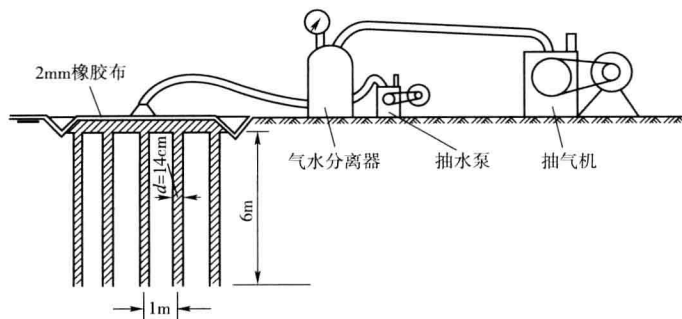


图 1-3 上海某工地真空预压现场试验示意图

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,可能是当时没成功的原因。在哈尔滨可能是受机具和密封材料(用的是黏土)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、不透水、易黏结的以外,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 500m^2 的面积上获得 420mmHg 的真空度,要一台 20 马力($1\text{ 马力}=735.499\text{W}$)的真空泵。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(以下简称“一航局”)为主,天津大学、南京水利科学研究院土工所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 530mmHg ,最大可达到 600mmHg ,从而使该项加固技术的施工工艺有了突破性的进展,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($11\text{m}\times 24\text{m}$)、中间试验(550m^2 , 1250m^2),最后到生产应用($3000\text{m}^2/\text{块}$)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 640mmHg ,相当的预压荷载达到 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 4000m^2 ($50\text{m}\times 80\text{m}$),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,用此法在连云港碱厂加固了近 18万 m^2 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和常规实用的方法。20 世纪 90 年代,在天津新港、浙江舟山市老塘山煤码头、汕头港、京珠高速公路等诸多工程建设中,都采用真