



天津市科协资助出版

Zhenkong Yuyafa De Lilun Yu Shijian

真空预压法的理论与实践

≈ 高志义 编著 ≈



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

天津市科协资助出版

真空预压法的理论与实践

≈ 高志义 编著 ≈



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

北 京

图书在版编目(CIP)数据

真空预压法的理论与实践 / 高志义编著. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2015. 11

ISBN 978-7-114-12610-9

I. ①真… II. ①高… III. ①真空预压 - 研究
IV. ①TU472

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 268474 号

书 名: 真空预压法的理论与实践

著 作 者: 高志义

责任编辑: 杨 川 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.chinasybook.com>

销售电话: (010)64981400, 59757915

总 经 销: 北京交实文化发展有限公司

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 880 × 1230 1/16

印 张: 32.75

插 页: 1

字 数: 943 千

版 次: 2015 年 11 月 第 1 版

印 次: 2015 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12610-9

定 价: 80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

1980 年是我国改革开放的第三年,也是国家“六五”计划的第一年。天津港在“六五”和“七五”期间有大面积软基需要加固,若采用常规堆载预压法,大量堆载料难以供应,而且工期长、施工难度大、易滑坡,严重影响工程进展。当时,软基加固已成为天津港发展的瓶颈,其他大多数港口的发展也遇到了同样问题;1980 年初在交通部的安排和指导下,第一航务工程局的直接领导与组织下,天津港务局出资,并提供试验场地,由中交天津港湾工程研究院(原交通部第一航务工程局科学研究所)组织两个现场试验研究组,同时进行探索性试验。叶柏荣教授级高工和本书作者经调研和比选进行真空预压法现场探索性试验,另两位同事进行强夯法探索性试验。两探索性试验的共同特点是,加固中均不需要大量的堆载材料和建筑材料。1980 年 10 月真空预压探索性试验结束,在国内外首次取得了完全满足工程应用的加固效果,这是一次历史性突破。接着两年又增加了科研人员,继续进行中间试验。1983 年 5 月,真空预压法纳入国家“六五”科技攻关项目(即第 33-1-2 号专项合同),并邀请天津大学、南京水利科学研究院参加共同攻关。1985 年 12 月 7 日,本攻关项目通过了国家鉴定,并列为国家“七五”重点推广项目之一。这些年来,真空预压法在我国得到了大面积推广应用,已纳入我国各行业的建筑地基规范中,并成为软基加固的首选方法之一。自探索性试验研究以来的三十多年中,在广大科技和施工人员的长期不懈努力下,使得该技术日臻成熟与完善。但当前对某些问题仍存在不同的认识,设计方法、施工工艺等仍有进一步改进的空间,需要更深入的研究与创新。恳望本书能够对真空预压法的发展助微薄之力,使这一技术能够更好地为祖国四个现代化以及实现中国梦发挥出更大的作用。

本书共分九章。第一章简述国内外真空预压法的发展概况;第二章针对国内提出不同的真空预压机理进行分析与讨论;第三、四章分别为真空预压的设计与施工;第五章介绍了真空预压的衍生加固方法;第六章为真空预压联合其他加固的八种方法;第七章介绍了在特殊地基下的真空预压法;第八章为真空预压的监测与检测;第九章是对当前真空预压法热点问题的讨论,主要汇集了作者参与讨论中公开发表的有关文章,也可认为是第二章真空预压机理讨论的续篇;第五章至第七章各种加固方法中均附有工程实例。同时,从第四章至第八章各节的最后一小节为“问题的讨论与注意事项”。对该节中进一步的问题进行讨论,并提出作者的认识,诚然不一定正确,恳望能起到抛砖引玉的作用。

本书编写过程中,中交天津港湾工程研究院叶国良总工、梁爱华高级工程师和喻志发教授级高工参加了第五章、第七章相关内容的编写工作。一航局副局长工程师刘亚平博士、中交天津港湾工程研究院王良臣教授级高工、朱耀庭教授级高工、刘天韵高级工程师、吴国庆工程师等提供了部分资料,并给予了大力支持。全书的打字和绘图全部由王健工程师完成。书稿完成后由中交天津港湾工程研究院叶国良总工、张美燕原副总工审稿,并提出了宝贵意见。本书的出版得到了李树奇院长、杨京方副院长、刘爱民副总工的大力帮助。在此一并致以深深谢意!

由于作者水平所限,难免存在错误或表达不当之处,敬请专家、同行和读者提出批评指正!

高志义

2015 年 10 月于天津

目 录

第1章 真空预压加固法的发展与现状	1
1.1 真空预压加固法初期发展	1
1.1.1 真空预压加固法的提出	1
1.1.2 国内外真空预压法试验研究的初期发展概况	2
1.2 我国真空预压加固法探索性现场试验研究	4
1.2.1 真空预压加固法探索性试验研究的迫切性及其概况	4
1.2.2 探索性试验的位置、地质条件	5
1.2.3 探索性试验研究成功——历史性的突破	6
1.2.4 探索性试验研究的四大突破点	7
1.3 真空预压法列为国家“六五”科技攻关项目	8
1.3.1 国家“六五”科技攻关内容与分工	8
1.3.2 “六五”科技攻关试验研究概况及成果	9
1.3.3 国家“六五”科技攻关鉴定意见	14
1.4 真空预压法的现状与水平	15
1.4.1 国外真空预压法的现状	15
1.4.2 我国真空预压法的现状与水平	16
参考文献	21
第2章 真空预压法的机理及其分析	22
2.1 饱和土的固结概念	22
2.1.1 土体的有效应力原理和固结概念	22
2.1.2 存在新增有效应力,且方向应与土体变形方向一致——固结的必要条件	23
2.1.3 边界上具备排水条件——固结的充分条件	24
2.2 真空预压加固法概述	26
2.2.1 真空预压加固法的构成	26
2.2.2 真空预压加固法的基本原理	28
2.3 影响真空预压加固效果的因素分析	29
2.3.1 密封系统的密封性对加固效果的影响	29
2.3.2 抽真空时的真空强度和泵的数量对加固效果的影响	31
2.3.3 加固区地质条件对加固效果的影响	32
2.3.4 水平向、竖向排水通道对加固效果的影响	32
2.3.5 边界问题对加固效果的影响	33
2.4 真空预压法的几种不同机理认识与分析	37
2.4.1 真空预压法的几种不同机理认识	37
2.4.2 对真空预压法的几种不同机理分析	38

2.5 真空预压与堆载预压的差别及其应力、应变分析	41
2.5.1 真空预压与堆载预压的差别	41
2.5.2 真空预压与堆载预压的应力应变分析	42
2.6 渗流和固结并非因果关系	44
2.7 真空预压法的特点及其适用条件	44
2.7.1 真空预压法的特点	44
2.7.2 真空预压法的适应条件	46
参考文献	49
第3章 真空预压法的加固设计	51
3.1 综述	51
3.1.1 设计的基本依据	51
3.1.2 真空预压设计方法的讨论	53
3.1.3 真空预压的设计程序框图	56
3.2 设计理论	57
3.2.1 土体固结理论	57
3.2.2 沉降计算	64
3.2.3 吹填土地基的固结度与沉降计算	75
3.2.4 强度增长与稳定	80
3.2.5 真空预压的有限单元计算法	81
3.3 设计内容	86
3.3.1 设计前的准备工作	86
3.3.2 加固分区的划分及预压荷载设计值的确定	87
3.3.3 水平排水传压通道设计	89
3.3.4 竖向排水传压通道设计	91
3.3.5 有关计算、卸荷标准、交工指标	95
3.3.6 密封系统设计	96
3.3.7 抽真空设备设计	100
3.3.8 监测与检测设计	101
3.3.9 主要设计图纸	103
参考文献	104
第4章 真空预压法施工工艺	106
4.1 前期准备工作和施工流程	106
4.1.1 前期准备工作	106
4.1.2 真空预压法施工流程	107
4.2 施工准备工序	109
4.2.1 现场施工条件	109
4.2.2 工作垫层	112
4.2.3 问题的讨论及注意事项	115
1. 吹填土为超软土时设计与施工中应特别注意的安全问题	115
2. 超软基上先铺设一层编织布的利弊讨论	115

3. “竹杆 + 土工布”结构层是超软基真空预压更佳的工作垫层	116
4. $\leq 20\%$ 水泥搅拌或旋喷单体墙作为密封墙, 而格栅墙作为支挡墙的讨论	117
4.3 水平排水传压通道的施工	117
4.3.1 水平排水传压通道的作用	117
4.3.2 水平传压排水垫层施工	118
4.3.3 真空滤管施工	125
4.3.4 问题的讨论及注意事项	130
1. 粉细砂作为水平排水砂垫层的可行性问题	130
2. 提高砂被质量的注意事项	130
3. 常规真空预压地表形常呈硬壳层, 直排式真空预压形不成硬壳层的讨论	131
4. 塑料盲沟的适用范围	131
5. 真空滤管直径的讨论	131
6. 取消真空主管的利与弊讨论	132
4.4 竖向排水传压通道的施工	132
4.4.1 竖向排水传压通道的作用及适用性	132
4.4.2 竖向排水传压通道的种类及特点	134
4.4.3 塑料排水板的型号、性能指标、检测试验方法	142
4.4.4 竖向排水通道打设机	146
4.4.5 竖向排水通道施工	155
4.4.6 竖向排水板现场施工质量控制要点	159
4.4.7 问题的讨论及注意事项	162
1. 不能采用再生料塑料排水板问题的讨论	162
2. 竖向排水通道施工效果影响因素	162
3. 竖向排水通道在真空预压中的特殊重要作用	163
4. 竖向排水通道打设深度和回带等是施工质量的重要控制点	163
4.5 表层密封系统施工工艺	164
4.5.1 密封膜	164
4.5.2 压膜沟	169
4.5.3 覆水围埝与膜上覆水	170
4.5.4 问题的讨论及注意事项	171
1. 密封膜上覆水的密封作用讨论	171
2. 真空预压冬季施工问题	172
3. 粘土作为密封层的利与弊	172
4. 加固过程中影响地表裂缝处理问题	173
4.6 中下部密封系统施工工艺	173
4.6.1 不同土质条件下密封墙形式的选择	173
4.6.2 不同的强透水透气土层采用不同的密封技术	176
4.6.3 粘土泥浆搅拌桩密封墙施工工艺	179
4.6.4 垂直塑料膜密封墙施工工艺	189
4.6.5 问题的讨论及注意事项	191

1. 密封墙的设置一定要想办法构成开敞式边界	191
2. 真空预压中将封闭式边界转化为开敞式边界的方法	191
3. 粘土泥浆搅拌桩密封墙比钢板桩密封墙的加固效果更好	191
4. 水泥掺量 $\leq 20\%$ 搅拌或旋喷桩单体墙可作为密封墙	192
5. 竖向排水通道打至承压水土层表面造成大量涌水的解决办法	192
4.7 抽真空设备	192
4.7.1 射流泵——真空预压的动力源	192
4.7.2 射流器——射流泵的心脏	195
4.7.3 射流泵的发展与改进	197
4.7.4 高效节能大功率真空泵	200
4.7.5 出膜装置	204
4.7.6 问题的讨论及注意事项	204
1. 真空预压后期减少射流泵台数对加固效果有较大的降低	204
2. 射流泵施工与使用应注意的问题	206
3. 射流泵运行中真空度变小的原因分析	206
4. 射流泵故障的检查与排除	207
参考文献	207
第5章 真空预压法的衍生加固方法	210
5.1 水下真空预压法	210
5.1.1 概述	210
5.1.2 水下真空预压机理	211
5.1.3 施工工艺	216
5.1.4 室内试验实例	219
【实例5-1】水下真空预压法加固软土地基机理研究	219
5.1.5 问题的讨论与注意事项	225
1. 水下真空预压和真空联合堆载预压加固机理的差异	225
2. 真空预压时地下水位变化的讨论	226
5.2 潮差带真空预压加固法	226
5.2.1 适用范围	226
5.2.2 潮差带真空预压需改进的施工工艺	227
5.2.3 潮差带真空预压工程比较	230
5.2.4 工程实例	230
【实例5-2】潮差带地区水下真空预压加固软基技术研究	230
5.3 直排式真空预压法	236
5.3.1 产生背景及其适用范围	236
5.3.2 需改进的七项施工工序	238
5.3.3 优势与不足分析	240
5.3.4 工程实例	241
【实例5-3】浅层处理与真空预压联合处理在超软基加固工程中的应用	241
5.3.5 问题的讨论及注意事项	246

1. 直排式真空预压地基表面先铺设编织布的不利后果	246
2. 直排式真空预压时淤堵原因分析及预防措施	246
3. 直排式真空预压与常规真空预压在塑料排水板内真空度分布的比较	247
5.4 低位真空预压法	248
5.4.1 主要特征和适用范围	248
5.4.2 加固原理	249
5.4.3 设计	250
5.4.4 施工工艺	251
5.4.5 低位真空预压法与常规真空预压法的比较	252
5.4.6 工程实例	252
【实例 5-4】低位真空预压法在软基处理中的应用	252
5.4.7 问题的讨论及注意事项	255
1. 单元加固面积大小对于低位与常规两种真空预压方法不存在差别	255
2. 常规与低位两种真空预压法,都可弥补地基沉降造成的高程不足问题	256
3. 建议在水平排水管网之上铺一层土工布	256
4. 施工过程中应注意问题	256
5.5 自密封真空预压法	256
5.5.1 问题的提出及适宜范围	256
5.5.2 方法简介	257
5.5.3 自密封真空预压的优缺点	258
5.5.4 室内试验实例	259
【实例 5-5】自密封真空预压模型试验研究	259
5.5.5 问题的讨论及注意事项	263
1. 自密封真空预压法是优点和缺点都非常突出的加固方法	263
2. 快捷处理自密封真空预压地表密封层软粘土的方法	263
3. 自密封真空预压中应注意的问题	264
参考文献	264
第 6 章 真空预压联合其他加固方法	266
6.1 概述	266
6.2 真空联合堆载预压加固法	267
6.2.1 问题的提出	267
6.2.2 适用范围及注意事项	268
6.2.3 加固原理	270
6.2.4 施工工艺	271
6.2.5 工程实例	273
【实例 6-2】真空联合堆载预压法在汕头港码头后方堆场加固中的应用	273
6.2.6 问题讨论与注意事项	277
1. 应特别重视施加第一级联合堆载的问题	277
2. 沉降计算中 m_v 值的确定	277
3. 巧妙地利用预压荷载问题	278

4. 竖向排水通道中真空度传递及其井阻问题 278

6.3 真空联合自重预压加固法 278

6.3.1 适用范围及条件 278

6.3.2 加固原理及其残余沉降分析 279

6.3.3 施工工艺 281

6.3.4 工程实例 281

【实例 6-3】杭金衢高速公路萧山段真空联合自重预压加固现场试验研究 281

6.3.5 问题讨论与注意事项 285

1. 真空联合自重预压后仍存在较大残余沉降的原因分析 286

2. 真空联合自重预压后残余沉降满足要求,且加固时间最短方法的讨论 286

3. 真空联合堆载或自重预压法施工期沉降速率的控制问题 287

6.4 真空联合电渗加固法 287

6.4.1 适用条件及影响因素 287

6.4.2 加固原理 288

6.4.3 设计 288

6.4.4 室内试验实例 290

【实例 6-4】真空预压联合电渗法室内模型试验研究 290

6.4.5 问题的讨论及注意事项 294

1. 对初始含水量大于液限的土宜先真空预压,再真空联合电渗法 294

2. 电渗时电流密度选用问题 294

3. 电渗中应注意的节电问题 294

4. 室内模型试验时应尽可能采用开敞式边界 294

6.5 真空预压联合真空井点降水预压加固法 295

6.5.1 真空井点转化为真空预压的条件及其适用范围 295

6.5.2 加固原理 296

6.5.3 真空井点设计与施工 298

6.5.4 工程实例 298

【实例 6-5】真空降水预压(联合塑料排水板)的加固机理及加固效果研究 298

6.5.5 问题讨论与注意事项 302

1. 真空预压和一般井点降水预压是不能联合加固的 302

2. 真空预压联合真空井点降水预压时可以降低地下水位的原因分析 302

3. 对真空预压联合真空井点预压加固法机理的进一步讨论 302

6.6 真空预压联合真空井点降水和强夯加固法(高真空击密加固法) 303

6.6.1 适用范围 303

6.6.2 加固原理 304

6.6.3 施工工艺 305

6.6.4 工程实例 308

【实例 6-6】上海浦东国际机场东西向联络滑行道地基处理试验研究报告 308

6.6.5 问题讨论与注意事项 313

1. 强夯法有效加固深度 313

2. 夯点间距	314
3. 夯击遍数和每遍的夯击次数	314
4. 夯击能	315
5. 强夯加固工程应设立强夯试验区	315
6. 夯点间距越小,则加固效果越好,这是一种误解	316
7. 强夯区与周围建筑物的合理间距问题	316
8. 严防粘性土地基在强夯过程中,产生弹簧土现象	316
6.7 超低位真空预压联合真空深井降水和低能量强夯加固法	316
6.7.1 适用条件、构成及其优越性	316
6.7.2 加固原理	317
6.7.3 设计与施工	317
6.7.4 工程实例	318
【实例 6-7】井点降水联合低能量强夯法在某码头工程中的应用	318
6.7.5 对【实例 6-7】加固方法选择的讨论	324
6.7.6 问题讨论与注意事项	325
1. 超低位真空预压联合真空深井降水和低能量强夯法与真空预压相比的优点	325
6.8 真空预压联合正压加固法(气压劈裂真空预压法)	325
6.8.1 问题的提出	325
6.8.2 加固原理	327
6.8.3 施工工艺	327
6.8.4 工程实例	328
【实例 6-8a】气压破裂真空预压法加固深厚软土施工技术	328
【实例 6-8b】天津真空预压软基加固增压法等新技术试验和工程应用研究	330
6.9 真空预压联合碎石桩加固法	332
6.9.1 适用范围及条件	332
6.9.2 加固原理	333
6.9.3 设计与施工	333
6.9.4 工程实例	335
【实例 6-9】真空预压联合碎石桩加固天津新港堆场地基	335
6.9.5 问题讨论与注意事项	338
1. 碎石桩施工质量控制	338
2. 减少对加固区毗邻建筑物的振动影响问题	338
参考文献	338
第 7 章 特殊地基的真空预压法	340
7.1 一般吹填土地基的真空预压法	340
7.1.1 概述	340
7.1.2 围埝结构型式的选择	340
7.1.3 吹填工程的施工工艺	353
7.1.4 吹填土地基加固方法的选择	355
7.1.5 吹填土地基的固结度与沉降计算	356

7.1.6 工程实例	358
【实例 7-1】天津港东突堤码头堆场 48 万 m ² 超软基国际招标加固工程	358
7.1.7 问题的讨论及注意事项	370
1. 关于吹填临时围埝问题	370
2. 中小型工程的吹填施工工艺	370
3. 排泥管口经常移动的必要性的重要性	371
4. 特别注意吹填土地基的沉降与固结度计算方法问题	372
5. 侧向变形对土体固结沉降的影响及其计算问题	372
6. 地基平均总固结度达到甚至超过 100% 时仍存在残余沉降的原因分析	372
7.2 超软土地基的真空预压法	372
7.2.1 问题的提出及其界定	372
7.2.2 超软土的工程性质	375
7.2.3 超软土地基加固方案的选择	383
7.2.4 超软土地基加固时需解决的施工难题	383
7.2.5 工程实例	386
【实例 7-2】浅层快速超软基处理技术	386
7.2.6 问题的讨论及注意事项	391
1. 超软土界定问题的讨论	391
2. 超软土加固后强度仍然偏低的原因分析	391
3. 超软土地基设计与施工时应特别注意的安全问题	392
4. 一次浅层真空预压加固的讨论	392
7.3 地表为硬土层的真空预压法	392
7.3.1 硬壳层的软土地基加固	392
7.3.2 施工工艺的特殊性	393
7.3.3 工程实例	394
【实例 7-3】南宁机场软土地基真空预压施工	394
7.3.4 问题的讨论及注意事项	397
1. 地表为坚硬土层时加固方法的讨论	397
2. 用水平排水板代替真空滤管问题	397
7.4 碱渣及软土地基的真空预压法	397
7.4.1 国内外现状	397
7.4.2 碱渣的成分、构造及工程性质	398
7.4.3 碱渣室内真空预压与堆载预压对比试验	399
7.4.4 工程实例	401
【实例 7-4】用真空预压法加固碱渣软土地基效果评价	401
7.4.5 问题的讨论及注意事项	404
1. 不能以土性指标来判断碱渣的性质	404
参考文献	405
第 8 章 监测与检测	407
8.1 导言	407

8.1.1 监测与检测的意义、目的及其有关要求	407
8.1.2 监测与检测的内容	408
8.1.3 监测与检测所需资料	409
8.2 陆上监测	409
8.2.1 真空度监测	409
8.2.2 孔隙水压力监测	412
8.2.3 地下水位监测	414
8.2.4 地表沉降监测	420
8.2.5 分层沉降监测	422
8.2.6 深层水平位移监测	424
8.2.7 问题讨论与注意事项	426
1. 真空度测头的尼龙软管蘑菇头之制作	426
2. 孔隙水压力测头排气和防淤堵方法	427
3. 分层沉降磁环三个弹簧片捆绑与埋设方法	427
8.3 水下监测	428
8.3.1 概述	428
8.3.2 自动采集与传输系统	430
8.3.3 GK-4600 钢弦式沉降仪	433
8.3.4 GK-4650 钢弦式沉降仪	436
8.3.5 液体压差沉降仪	439
8.3.6 断面地表沉降监测	442
8.3.7 分层沉降监测	445
8.3.8 土体深层水平位移监测	447
8.3.9 孔隙水压力监测	449
8.4 检测试验	451
8.4.1 十字板剪切试验	451
8.4.2 标准贯入试验	455
8.4.3 静力触探试验	458
8.4.4 载荷试验	461
8.4.5 地基反应模量试验	465
8.4.6 室内土工试验	467
8.4.7 问题讨论与注意事项	468
1. W_L 、 W_p 、 I_p 不能作为加固前后的对比指标	468
2. 固结快剪指标也不能作为加固前后的对比指标	468
3. 加固后不能也不需要再做固结快剪试验	468
4. 某层土的平均强度指标的统计方法,及其如何选用问题	469
5. 某层土的平均压缩曲线的统计方法,及其如何选用问题	469
参考文献	470
第9章 真空预压法的热点讨论	471
9.1 概述	471

9.2 真空预压中真空度和孔隙水压力测试与分析 474

9.2.1 真空度、孔隙水压力、超静孔隙水压力、负压等的基本概念 474

9.2.2 真空度、孔隙水压力在现场测试中的影响因素 476

9.2.3 真空度与孔隙水压力的现场测试 476

9.2.4 结论 477

9.3 真空预压法地下水位分析及其测试方法 477

9.3.1 导言 477

9.3.2 地下水位定义 478

9.3.3 地下水位测试中影响因素 479

9.3.4 对地下水位下降各种解释的分析 479

9.3.5 地下水位变化的条件 479

9.3.6 真空预压时地下水位是不变的 480

9.3.7 一种棒式真空预压地下水位测试仪 482

9.3.8 结论 482

9.4 真空预压的加固深度问题 483

9.4.1 真空预压与井点降水的受力分析 483

9.4.2 真空预压加固深度的决定因素 485

9.4.3 真空预压加固深度的影响因素 489

9.4.4 结论 489

9.5 边界问题及其对真空预压的影响 489

9.5.1 真空预压加固区四周侧面的边界问题 490

9.5.2 刚性密封膜与柔性密封膜问题 492

9.5.3 密封墙和支挡墙的功能与关系 494

9.5.4 水泥搅拌与旋喷桩墙的形式和功能划分的讨论 495

9.6 真空预压对土体影响及其平衡条件 497

9.6.1 真空预压对地基土体的五项影响 497

9.6.2 真空预压中四项平衡条件 499

9.7 真空预压影响区的宽度及其防护措施 500

9.7.1 引言 500

9.7.2 对影响区产生变形的影响因素 500

9.7.3 影响区宽度的确定 503

9.7.4 影响区建(构)筑物安全的防护措施 505

参考文献 508

第1章 真空预压加固法的发展与现状

1.1 真空预压加固法初期发展

1.1.1 真空预压加固法的提出

1952年瑞典皇家地质学院杰尔曼教授(W. Kjellman)在美国麻省理工学院召开土的稳定会议会刊上,发表了“利用大气压力的方法固结粘土”一文,首次提出了真空预压加固法^[1]。此文报导了他在20世纪40年代末所做的5组现场试验,如图1-1所示。在加固的地基中打设垂直排水通道③,即16英尺(约4.8m)长、间距约0.5m的排水纸板;地面上铺设0.3~0.5m厚的粗砂和砾石混合的水平排水垫层②;其上铺设不透气的密封膜①,前三组试验是采用0.3mm厚的聚乙烯塑料膜,因日照和气候变化引起的老化作用,一个月后塑料膜变脆并出现了漏洞。后来的试验改为涂胶的窄条状纤维布,并缝制成大块纤维布。虽然提高了抗老化能力,但接缝处存在密封问题,且造价过高;将密封膜四周埋设至地下水位以下;然后,采用真空泵④,并通过②和③对地基土抽真空。随着土体中气和水的排出,地基土被加固。最大沉降54cm,加固效果明显。

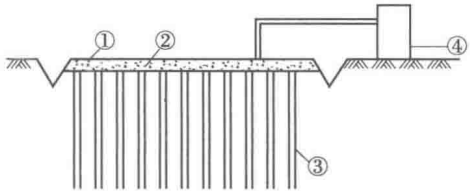


图1-1 杰尔曼的现场试验
①密封膜;②砂垫层;③垂直排水通道;④真空泵

当时杰尔曼教授采用的抽真空设备是效率较低的真空泵,密封膜也不太理想,且砂和砾石垫层中并没有埋设真空滤管,故达不到理想的加固效果。文中提出了真空预压法的理论解释,他认为抽真空是改变土中的孔隙水压力值,致使有效应力发生变化,从而土体被加固。据此,提出了真空作用下地基最终有效应力分布图形,如图1-2所示。

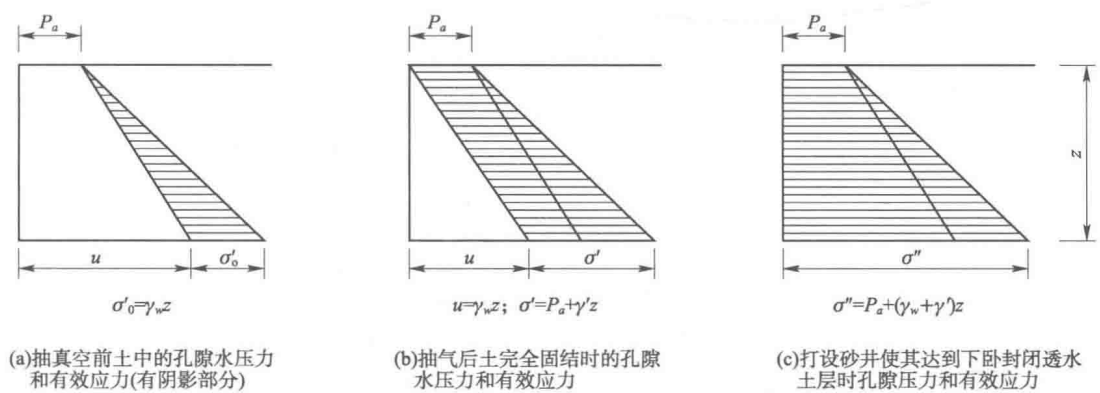


图1-2 真空作用下土中的最终有效应力

上述 W. Kjellman 的理论解释无疑是正确的,但最终有效应力分布图形并非完全合理。如,图1-2中无砂井下(b)图形值得商榷,实践中在没有打设竖向排水通道的情况下负压传递深度很浅,实际有效应力很难达到(b)图中分布情况。这一事实已被1980年在天津港的真空预压探索性试验所证明,请参阅1.2.3节。(b)图的有效应力分布,应该是打设砂井情况下最终有效应力分布图形;又如,杰尔曼教授认为图1-2中(c)是打设砂井情况下最终有效应力分布。然而,打设砂井只能缩短固结时间,增加真空压力

传递深度,并不能增加真空压力传递的强度,且真空压力传递强度也绝不会大于一个大气压力 P_a 值。众所周知,因井阻的影响不但不能增加强度,在传递中反而会减少真空压力强度。所以,(c)图中随着深度的增加,有效应力也随之增加,且深度越深有效应力越大,且越来越大大于 P_a 值,这一现象绝对不可能发生。所以,有砂井情况下最终有效应力分布,不是(c)图,而应该是(b)图分布。

1.1.2 国内外真空预压法试验研究的初期发展概况

1. 国内真空预压法试验研究的初期发展概况
我国对真空预压法的研究起步较早,早期研究主要有:

(1)1957 年哈尔滨军事工程学院和 807 部队进行了室内真空预压加固试验研究^[2],其剖面示意图如图 1-3(a)所示。试验采用初始含水量 $w_0 = 42.6\%$ 的淤泥,图中心处为原状土,原状土以外四周为扰动土,上面为橡皮膜,其上连接真空泵。抽真空约 3 天,负压保持在 $0.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 。最大沉降 10.1mm,各处含水量降低情况,如图中所示。试验已显示出加固效果;并在 1959 年他们又对野外淤泥地基上进行了现场试验研究,加固效果并不理想。

(2)1958 年天津大学在室内作了真空预压加固试验^[3]。试验是在 $\phi 20\text{cm}$ 圆筒中进行的,其剖面示意图如图 1-3(b)所示。首先,配制成均匀的初始含水量 $w_0 = 86\%$ 的软土,分四层填入筒中,每层之间填以粗砂层,以利孔隙水压力的量测和消散,软土总厚度为 23cm。在 -80kPa ($0.8\text{kg}/\text{cm}^2$) 负压作用下,连续抽气 84 小时后平均含水量降至 52.2%,下面两层土平均含水量降至 42.0%,说明有明显的加固效果;随后,又作了室内模型试验,砂井间距 7cm,在 -60kPa 负压作用下,经 26 小时后,两砂井间的软土含水量从 68.3% 降至 49.1%,也说明有明显加固效果。

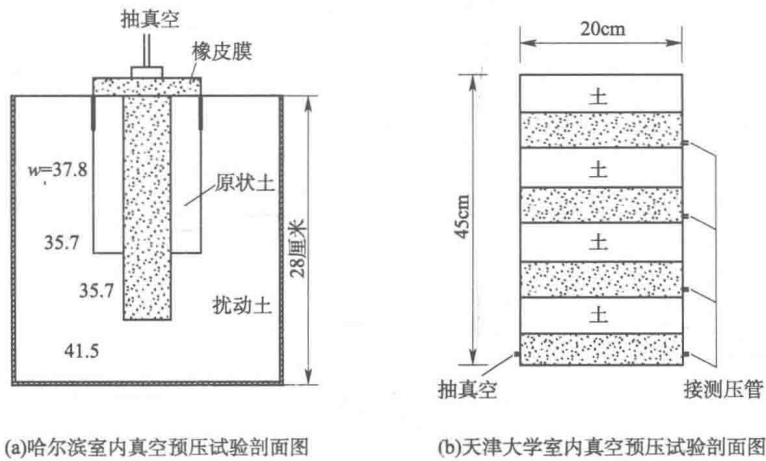


图 1-3

(3)1959 年,天津港务局作了较大比尺的模型试验^[4],平面尺寸为 $12\text{m} \times 4\text{m}$,排水砂井深 2m,经过 120 小时的抽真空试验。虽然取得一定效果,但密封膜下真空度仅达 -26kPa ,故加固效果不甚理想。

(4)1960 年同济大学和南京水科所在上钢一厂做了一个小型现场试验^[5],如图 1-4 所示。试验区地表铺设一层砂卵石,其上覆盖 2mm 厚的橡胶布作为密封层,打设直径为 12cm、间距 1m、深 6m 砂井。用抽气机开始抽气后,泵上真空压力很快便达到 -0.9MPa ,橡胶布紧紧地被吸在砂卵石层上。但是,地基始终未发生显著的沉降,埋在地面下 2~3m 的沉降标点几乎未见有沉降的迹象,显然试验并未成功。

综上所述,1980 年以前,国内虽然进行了一些室内外真空预压加固试验,但加固效并不太理想。如文献[4]中的大比尺的模型试验,其密封膜下真空度仅达 -26kPa 。又如文献[5]中的现场试验,几乎没有沉降产生。所以,这期间的试验与研究,根本无法推广到工程上应用。

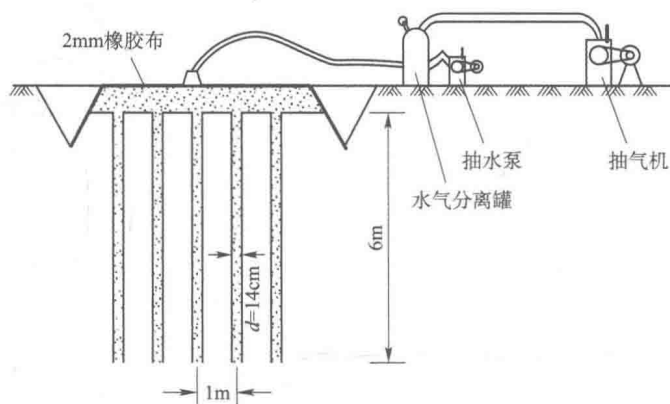


图 1-4 同济大学与南科所真空预压现场试验示意图

2. 国外真空预压法试验研究的初期发展概况

1980 年前,如美国、日本、芬兰、苏联、法国、瑞典等国都有真空预压加固法的试验研究报导。以下重点介绍美国和日本初期发展概况。

(1) 美国费城机场跑道扩建工程

早在 1958 年美国费城机场跑道扩建工程中,采用了真空预压联合真空深井降水预压加固法^[6],加固了 763m×183m 约 14 万 m² 跑道地基。地基表层为近年来疏浚河道的吹填沉积的 1.5~3.0m 厚淤泥、粘土,正好作为密封层;其下为 4.6~6.1m 厚的粘土与粉质粘土,层中夹有薄的、不连续的扁豆形细砂层,流限为 40%~50%,含水量大于或等于流限,以上土层约 8m 厚;其下为厚约 30m 的粗砂、砂砾层。

地表很软,铺柴排施工。加固区内打设 595 根排水砂井,膨润土封口;加固区四周打设 15 口深 21.3m、间距 183 m 的真空深井井点,各井口也用膨润土密封。各井口上部用管道相连,每一深井安装一台立式涡轮真空泵,功率为 1000 加仑/分^①。利用四周真空深井井底的粗砂、砂砾层作为水平排水通道,砂井作为竖向排水通道,地表的吹填淤泥、粘土作为密封层,真空泵作为负压源,从而构成真空预压加固法。加之真空深井的联合加固,因此转化为真空预压联合真空深井降水预压加固法。连续抽真空 18 天后加固区内形成 -50kPa (380mmHg^②) 负压,尔后负压已不能再降低了。共抽真空 40 天,总沉降量为 54cm,达到了设计预压加固的目的。

道面结构层施工结束时又沉降 31cm。虽然采用了真空预压联合真空深井降水加固方法,并采用了膨润土密封了深井和砂井的井口,但是加固区只形成 -50kPa 负压。显然,井底的砂砾层漏气、抽真空设备效率及其砂井数量并非十分理想,导致加固效果较差。而且,对于适当深度处不存在砂层的工程,也无法推广应用。

(2) 美国的霍尔茨某公路工程

另外,也曾见报道,在 1975 年美国的霍尔茨某公路有 200m×30m 的公路段采用 0.6~0.7 kg/cm² 的负压进行路基加固的实例。

(3) 日本爱知县电力武丰火力发电站的地基加固试验工程

1964 年在日本横滨市爱知县中部的武丰火力发电站地基加固试验工程,加固面积约 1200m²。地基为新吹填土,其内夹杂许多薄砂层,平均固结系数 $C_v = 7.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$,且 $C_h = 2C_v$ 。打设排水纸板,板间距为 2 根/m²,30cm 厚砂垫层。采用 6.8m 宽、41m 长的橡胶膜作为密封膜,现场用工业胶结剂粘结,搭接宽度为 13~15cm。四周挖 0.8~1.0m 深的压膜沟。采用 2 台 15 马力^③(1 台为 11kW) 真空泵,交替

① 1000(美制)加仑/分 = 3.785m³/分;1000(英制)加仑/分 = 4.546m³/分;

② 1mmHg 即 1mm 汞柱高 = 133.322Pa;1 大气压 = 760mmHg = 100kPa;

③ 1 马力(一般指米制马力) = 0.98632 英马力 = 0.98592 电工马力 = 735.499W。