

中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会 组织编写

工程排水与加固技术理论与实践

——第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集

Theory and Practice of Drainage and Reinforcement Engineering
Proceedings of the 7th Symposium on Drainage and Reinforcement Engineering



主 编 赵维炳
副主编 刘国楠 高长胜
主 审 刘家豪 郑培成



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会 组织编写

工程排水与加固技术理论与实践

——第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集

Theory and Practice of Drainage and Reinforcement Engineering

Proceedings of the 7th Symposium on Drainage and Reinforcement Engineering

主 编 赵维炳

副主编 刘国楠 高长胜

主 审 刘家豪 郑培成



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是第七届全国工程排水与加固技术研讨会的论文集,总结和交换了我国在工程排水与加固技术方面,特别是在围堰及造陆工程技术、大面积超软地基处理技术、工程安全与环境监控技术,以及工程排水与加固新材料及新方法等方面所取得的新进展、新经验与新成果。

本书共收录论文 35 篇,包括总报告与综合报告、理论分析、材料与测试、设计与现场试验研究等,内容涉及工程排水与加固技术的各个方面。

本书可供工程排水与加固技术领域的科研人员、工程技术人员和管理人员查阅、使用,也可供相关技术领域的科技人员参考,还可供大专院校相关专业的师生学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程排水与加固技术理论与实践:第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集/赵维炳主编;中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会组织编写. —北京:中国水利水电出版社,2008

ISBN 978-7-5084-5882-3

I. 工… II. ①赵…②中… III. ①基础(工程)—排水—学术会议—文集②基础(工程)—地基处理—学术会议—文集 IV. TU46-53 TU753.8-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 138538 号

书 名	工程排水与加固技术理论与实践 ——第七届全国工程排水与加固技术研讨会论文集
作 者	中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会 组织编写 主编 赵维炳 副主编 刘国楠 高长胜 主审 刘家豪 郑培成
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 16.5 印张 391 千字
版 次	2008 年 10 月第 1 版 2008 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	49.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编：赵维炳

副 主 编：刘国楠 高长胜

主 审：刘家豪 郑培成

编委会成员（按汉语拼音字母为序）：

曹湘波	陈文华	陈振建	董志良	高长胜
郭耿新	刘国楠	刘家豪	束一鸣	王立忠
王明华	王 园	汪肇京	武良金	杨明昌
杨守华	张留俊	张 敬	赵维炳	郑培成

会议召集单位：中国土木工程学会港口工程分会工程排水
与加固专业委员会

承 办 单 位：中国铁道科学研究院深圳研究设计院

协 办 单 位：中交四航工程研究院有限公司

深圳市亚明土工器材有限公司

深圳市勘察测绘院有限公司

深圳市勘察研究院有限公司

深圳市工勘岩土有限公司

深圳市特皓建设基础工程有限公司

江苏南水土建工程公司

前言

金秋时节，我们相聚改革开放的前沿阵地——深圳，召开第七届全国工程排水与加固技术研讨会。关注与总结工程排水与加固技术领域内的工程热点与难点问题，探求其技术发展是本次会议的主题。

近年来我国开展了众多大型造陆与软基处理等重大工程项目，并取得重要进展，为此本次研讨会就是围绕这个主题进行，以交流我国在工程排水与加固技术方面特别是在围堰及造陆工程技术、大面积超软地基处理技术、工程安全与风险监控技术以及工程排水与加固新材料及新方法等方面所取得的新进展、新经验与新成果。

本论文集共收录论文 35 篇，包括总报告与综合报告、理论分析、材料与测试、设计与现场试验研究等，内容涉及工程排水与加固技术的各个方面。

在本次论文集的征集与编写中，得到各有关单位与作者的大力支持，在此一并表示感谢！

赵维炳

2008 年 8 月

目 录

前言

浙江某码头围堤及陆域软基处理效果分析	喻志发	葛 君	白金勇	(1)			
郑州东区某软土基坑降排水方案的比较与选择			王荣彦	(13)			
某抛石填海造陆工程异型锤高能级强夯置换试验研究			詹金林	水伟厚 (21)			
真空预压法加固软基卸荷时机预测方法研究	张 明	赵有明	刘国楠	(28)			
关于吹填淤泥的松方系数			熊 明	林本义 (38)			
用统计方法预测预压加固效果	林本义	王益国	邢繁宇	(43)			
地基处理方案的优化选择			孙 峰	王海龙 (46)			
素混凝土桩复合地基在桥头过渡段的应用			强小俊	江辉煌 (50)			
关于太沙基一维固结方程若干问题的探讨	梅国雄	夏 君	赵维炳	宰金珉 (55)			
大型沉井原位监测试验研究							
.....	朱群峰	刘胜松	张 凌	冯小忠	高长胜	杨守华	(63)
真空联合堆载预压沉降分析与停泵标准研究			高明生	唐彤芝	赵维炳	(71)	
真空预压处理大面积工业厂房软基新工艺应用设计与施工			苏华银	倪洪波	平克磊	(78)	
.....							
真空预压影响范围及其工程防护措施研究			倪洪波	平克磊	王海鹏	(87)	
真空联合堆载预压在大面积厂房地基处理中的应用							
.....	蔡 纯	齐永正	倪洪波	王海鹏	黄鹏飞	(95)	
低位真空预压加固大面积吹填淤泥地基试验研究							
.....	朱群峰	高长胜	杨守华	张 凌	李东兵	(101)	
厦门某吹填泥工程地基处理方案			高长胜	杨守华	胡为贤	(109)	
前海湾围堰工程简介				张 勇	于志强	(118)	
排水板施工扰动对结构性软基沉降的影响				王立忠	李玲玲	(125)	
软黏土不排水抗剪强度的应变率效应				王立忠	但汉波	(134)	
真空预压加固区域边界变形规律研究							
.....	王海鹏	唐彤芝	倪洪波	平克磊	黄鹏飞	(142)	
普通槽型塑料排水板的变形特性与通水能力试验研究	杨京方	尹长权	苗中海			(150)	
深圳吹填软土物理力学特性的试验研究			朱耀庭	郑爱荣		(156)	
电渗固结理论及其局限性	曹永华	郭述军	高志义			(161)	
塑料排水板 6 年检测资料的统计与分析				杨明昌		(167)	

排水板堆载预压加固软基中固结度和沉降的计算	赵 娟	吴友仁	韩瑞芳	(172)
防波堤袋装砂与塑料排水板联合加固应用研究			李榕波	(180)
真空联合堆载预压固结理论在某工程中的应用	董志良	颜永国	黄建华	(192)
真空预压法加固机理研究			胡 珩	(196)
某大型停车场软基处理方案分析及优化	陈志宁	陈海军	唐彤芝	(200)
公路软基处理方案决策的人工神经网络模型			张留俊	(205)
深圳前海湾新吹填超软土地基的预压加固	王益国	熊 明	于志强	张 勇 (212)
软基上路堤稳定性的能量分析法		陈敏华	刘国楠	(222)
新型整体式塑料排水板的新材料和新工艺	朱知辉	许正经	周卫东	(228)
爆炸处理软土地基的附加沉降估算	刘 峰	刘国楠	张志毅	(233)
高水材料在港口工程加固中的试验研究	唐军务	雷霜如	侯林涛	刁景华 (242)
基于实测资料的土体固结系数反分析方法	李树奇	曹永华	叶国良	(247)

浙江某码头围堤及陆域软基处理效果分析

喻志发¹ 葛 君² 白金勇¹

(1. 中交天津港湾工程研究院有限公司 天津 300222;

2. 中交一航局二公司 青岛 266071)

摘 要: 浙江某码头有约 2700m 的围堤和 90 万 m² 的陆域, 采用“塑料排水板+堆载预压”和“塑料排水板+真空联合堆载预压”的方法进行处理。本文通过对沉降盘、分层沉降、边桩位移、测斜仪等监测数据的分析, 表明合理地使用软基处理的方法能达到设计的目的。

关键词: 地基处理 堆载预压 真空联合堆载预压 塑料排水板 加固效果

0 引言

近十几年, 随着国家的快速发展, 国家港口建设也日新月异, 很多大的码头、堆场建成投产。建设码头的—个比较突出的共性就是填海造陆。合理地使用地基处理方法, 可以保证地基处理过程中的地基稳定, 有效地消除工后沉降, 还可以缩短工期, 减少投资。

本文从监测数据的角度, 对浙江某码头约 2700m 的围堤和近 90 万 m² 的堆场软基处理做一个总结, 希望能对类似工程有所借鉴。

1 工程概况

某码头位于浙江沿海, 陆域系由老大堤外的滩涂、老大堤内的洼地、农田及部分开山用地组成, 软基处理面积近 90 万 m²。原设计基本以堆载预压为主, 后来考虑围堤的稳定, 在围堤的后方都采用了真空联合堆载预压的方法, 真空联合堆载预压区总面积约 32.2 万 m², 堆载预压区布置在真空联合堆载预压区的后方, 面积约为 57 万 m²。围堤正堤部分位置地形较低, 水深 6~10m, 长约 1788m, 侧堤长 931m。围堤及陆域地基处理分区见图 1。

本工程围堤及陆域地基处理自 2004 年 3 月开工, 截至 2007 年 8 月, 只有少部分堆载区因缺少石料没有完成, 大部分场地已投入使用。

2 工程地质概况

场区内分布的主要土层如下。

(1) 淤泥: 灰黄色、灰褐色, 流塑, 厚层状, 土质均—, 稀软, 夹少量粉土。本层分布于整个场地, 顶板标高 -1.95~ -0.75m, 厚度 1.4~ 2.5m, 物理力学性质极差, 高压缩性。

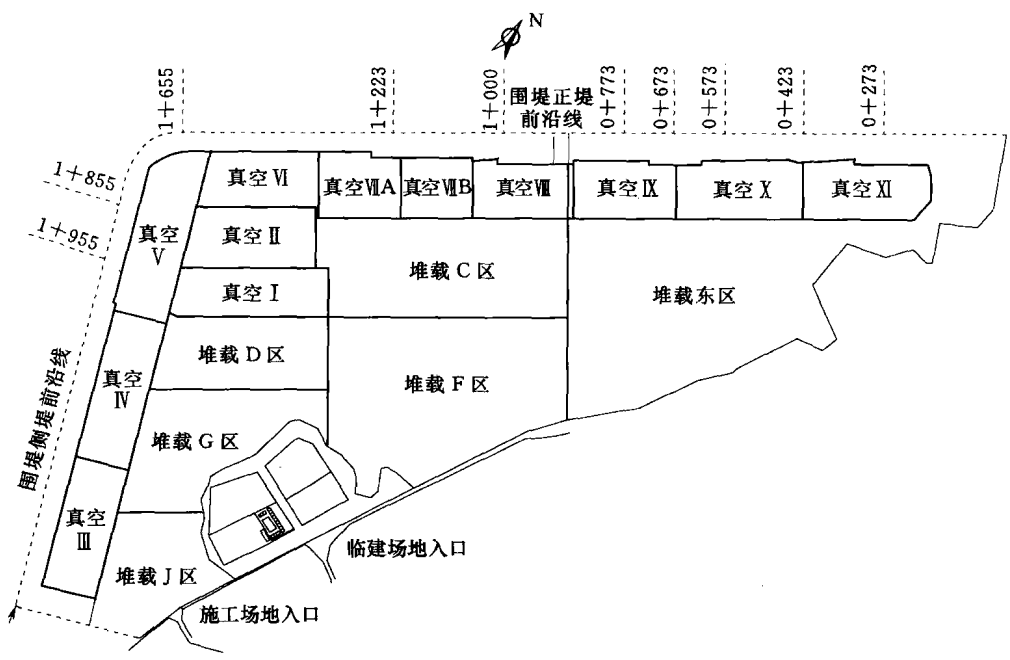


图 1 围堤及陆域地基处理平面图

(2) 淤泥质粉质黏土：灰色，流塑，薄层状—鳞片状，局部层理不清，层间夹少量粉土或粉砂薄层，土质较均一，黏塑性较好，偶见少量贝壳碎屑，局部相变为淤泥质黏土。本层分布于整个场地，顶板标高 $-4.45 \sim -1.69\text{m}$ ，厚度 $3.6 \sim 12.3\text{m}$ ，物理力学性质差，高压缩性。

(3) 淤泥质黏土：灰色，流塑，薄层状为主，局部为鳞片状，夹少量粉土，土质均一，黏塑性好。本层分布广泛，顶板标高 $-16.96 \sim -8.39\text{m}$ ，厚度 $1.4 \sim 16.5\text{m}$ ，物理力学性质差，高压缩性。

各土层的主要物理力学指标见表 1。

表 1 地基土物理力学性质指标一览表

指标	项目	含水量 w (%)	容重 γ (kN/m^3)	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩系数 a_{1-2} (MPa^{-1})	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	直剪固快		直剪快剪	
										内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	内聚力 $C(\text{kPa})$	内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	内聚力 $C(\text{kPa})$
淤泥	最大值	58.0	18.0	1.562	40.6	17.4	2.00	1.38	3.62	9.7	16.0	3.2	13.0
	最小值	43.0	16.9	1.161	33.6	13.4	1.69	0.60	1.86	7.1	12.0	1.1	7.0
	平均值	50.0	17.4	1.360	37.0	15.6	1.83	0.91	2.80	8.4	14.0	2.1	10.0
	样本数	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2
	变异系数												

续表

土层	指标 项目	含水量 w (%)	容重 γ (kN/ m^3)	孔隙 比 e	液限 W_L (%)	塑性 指数 I_p	液性 指数 I_L	压缩 系数 a_{1-2} (M/Pa)	压缩 模量 E_{s1-2} (MPa)	直剪固快		直剪快剪	
										内摩 擦角 $\Phi(^{\circ})$	内聚 力 $C(kPa)$	内摩 擦角 $\Phi(^{\circ})$	内聚 力 $C(kPa)$
淤泥 质粉 质黏 土	最大值	52.1	18.1	1.469	41.8	18.2	2.07	1.49	2.76	11.1	19.0	5	16.0
	最小值	40.1	16.5	1.113	32.3	13.6	1.13	0.51	1.57	7.1	11.0	1.1	7.0
	平均值	46.3	17.3	1.310	36.7	15.8	1.59	1.03	2.17	8.6	16.0	2.5	12.0
	样本数	24	24	24	23	23	24	24	21	15	15	9	9
	变异系数	0.06	0.02	0.07	0.07	0.07	0.15	0.22	0.13	0.13	0.15	0.47	0.25
淤泥 质黏 土	最大值	55.9	18.4	1.611	48	21.4	1.45	1.5	2.91	10.7	22.0	4.5	17.0
	最小值	35.1	16.1	1.004	39.3	16.6	1.03	0.57	1.74	7.2	10.0	2.2	14.0
	平均值	48.4	17.1	1.387	43.8	19.3	1.27	1.05	2.23	8.7	16.0	3.5	15.0
	样本数	21	21	21	20	20	19	21	19	13	13	6	6
	变异系数	0.11	0.03	0.12	0.06	0.07	0.10	0.24	0.15	0.13	0.27	0.27	0.08

3 地基处理及监测项目设计

地基处理设计的原则是：确保围堤安全的基础上，缩短工期，节省投资。为了充分利用场区开山石料，围堤采用抛石堤心，陆域的地基处理主要采用堆载预压和真空联合堆载预压相结合的方法，其中，围堤后方采用真空联合堆载预压，靠近山脚下采用堆载预压法，部分道路区回填开山石后采用强夯法处理。由于强夯法处理的面积较小，本文仅对堆载预压法和真空联合堆载预压法进行分析。

3.1 堆载区设计

场地吹砂至标高+1.0m。塑料排水板按正方形布置，间距1.1m，打设深度一般为25m。

设计堆载料选用本工程范围内的开山石料，堆载料的容重不小于18kN/m³。堆载分三级进行，第一级堆载从+1.0m堆至+3.0m标高，间歇10d；第二级堆载从+3.0m堆至+6.0m标高，间歇30d；第三级堆载从+6.0m堆至+8.0m标高，稳压90d。

在实际施工中，由于工期要求比较紧，大部分区域超载至+10.0m。

3.2 真空联合堆载预压区设计

真空联合堆载预压区共分成12个小区，编号为Ⅰ~Ⅵ、Ⅶ(A)、Ⅶ(B)、Ⅷ~Ⅺ。

吹填砂垫层至标高+2m左右。垂直向排水通道采用塑料排水板，Ⅶ区间距1.0m，其他区间距1.1m，按正方形布置，插板深度控制标高为-24m，Ⅰ~Ⅵ区塑料排水板为C型板，Ⅶ~Ⅺ区塑料排水板为B型板。

采用泥浆搅拌桩密封墙，桩径 $\phi 70\text{cm}$ ，由两排泥浆搅拌桩组成，搭接宽度为20cm，桩中心距50cm。泥浆重度要求达到13kN/m³以上，泥浆的掺入比要达到40%，渗透系数应

小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 打设方式采用四喷四搅方式。打设时应与围堤砂被边界保持 0.5m 净距。

铺设 450 g/m^2 无纺布后可进行分级联合堆载施工。堆载料平均容重不得小于 17 kN/m^3 , 联合堆载高度堆至 $+6 \text{ m}$ (按标高控制), 第一级堆载为一层石粉或砂, 厚度 0.8 m , 整平时只能上小型推土机。第二级至第五级堆载采用自然开山混合级配石料, 在进行第二级堆载时自然开山混合级配石料需卸载在加固区边上。

卸载标准: ①固结度超过 90%; ②保持真空度满足设计要求的条件下, 沉降速率连续 10 天小于 2.0 mm/d 。

3.3 围堤设计

围堤工程包括护底工程、抛石工程、护坡工程及上部结构四部分, 采用袋装砂通长袋及砂肋软体排作加筋层、水抛镇压脚棱体, 陆抛开山石堤心, 2T 钩连块护面, 钢筋混凝土与浆砌块石复合式防浪墙, 单坡 1:2 的斜坡堤结构。围堤地基处理采用先铺设砂被作横向排水垫层, 然后水上施打塑料排水板形成被加固土体竖向排水通道, 再利用堤身结构自重进行压载加固。塑料排水板按正方形布置, 间距 1.0 m , 深度为 30 m 。主要施工工艺包括铺设砂被、水上施打塑料排水板、通长袋、砂肋软体排、水上抛填规格石、陆抛堤心石、堤后反滤层结构、2T 钩连块的制安、防浪墙上部结构等。围堤典型断面图见图 2。

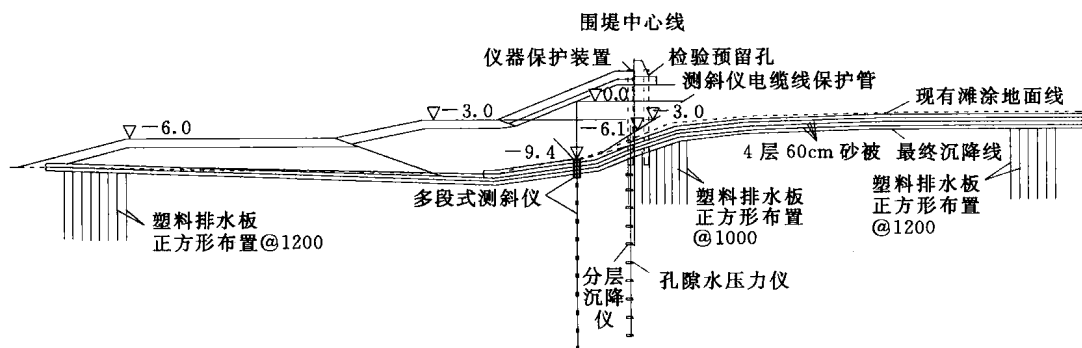


图 2 围堤典型断面图

防浪墙设计顶高程为 $+6.7 \text{ m}$ (85 国家高程)。

3.4 检测项目设计

围堤及陆域地基处理布置的检测项目见表 2。

表 2

检测项目统计表

项 目	孔隙水压力计	分层沉降仪	地表沉降盘	边桩	水位计	测斜	取土试验	载荷板试验	十字板试验
堆载区		7	122	20					
真空区	12	12			12	4	4	3	
围堤	10	10		3		10	4		5
合计	22	29	122	23	12	14	8	3	5

4 加固效果分析

4.1 堆载区

4.1.1 沉降盘

受篇幅的限制,表3只是堆载区部分沉降盘的累计沉降量、观测历时、最大沉降速率、固结度统计表。

表3 各沉降盘累计沉降量、最大沉降速率、固结度统计表

沉降盘 编号	累计 沉降量 (cm)	观测 历时 (d)	最大沉 降速率 (mm/d)	固结度 (%)	沉降盘 编号	累计 沉降量 (cm)	观测 历时 (d)	最大沉 降速率 (mm/d)	固结度 (%)
II S8	186.1	234	20	102.4	II S40	277.1	239	42	108.8
II S9	200.8	133	64	101.1	II S41	234.7	239	54	106.2
II S11	164.6	133	34	103.5	II S42	262.7	208	60	108.4
II S12	175.7	133	40	104.2	II S43	289.1	190	67	104.9
II S13	235.2	239	29	108.1	II S44	284.8	190	58	101.7
II S14	220.9	133	51	107.8	II S45	252.1	185	49	109.2
II S15	215.6	133	46	103.3	II S47	238.5	193	73	106.8
II S16	226.9	133	57	104.1	II S48	271.1	146	57	106.7
II S17	270.8	247	43	104.5	II S49	202.8	145	66	108.8
II S18	243.2	133	57	110.3	II S50	129.8	142	36	103.3
II S19	261.1	133	46	104.3	II S51	237.9	225	56	111.8
II S20	276.0	133	56	103.4	II S52	245.3	211	64	110.7
II S21	242.5	239	38	107.6	II S53	249.7	211	62	110.3
II S22	248.5	133	56	108.1	II S54	256.6	224	66	110.6
II S23	263.4	133	46	101.7	II S55	232.2	212	66	99.2
II S24	247.2	133	58	102.3	II S56	277.3	327	66	117.6
II S25	259.8	233	38	107.7	II S57	163.5	242	39	98.1
II S26	254.6	247	71	105.3	II S58	228.8	227	48	116.1
II S27	249.2	133	48	103.5	II S59	311.4	319	62	116.1
II S28	254.6	239	35	104.4	II S60	318.3	288	55	102.8
II S29	296.3	189	54	107.5	II S61	355.5	318	59	103.3
II S30	276.8	189	64	104.1	II S62	331.9	316	54	104.7
II S32	298.8	197	61	109.0	II S63	268.7	494	52	108.1
II S33	307.5	183	59	108.7	II S64	173.0	181	48	95.4
II S34	336.3	184	74	109.0	II S65	173.3	181	29	93.8
II S36	252.1	239	36	106.0	II S66	177.3	195	31	101.7
II S37	294.7	234	52	102.4	II S68	269.3	195	61	106.9
II S38	283.3	192	47	102.1	II S69	251.5	195	52	104.7
II S39	326.8	192	54	102.7	II S75	182.9	246	24	103.5

堆载区原设计堆载至+8.0m,实际施工时为了抢进度,基本上都超载至+10.0m,为了折算至+8.0m固结度,我们通过理论计算,调整压缩系数和固结系数,拟合了堆载至+10.0m荷载情况下的沉降曲线,然后计算出了+8.0m荷载下的总沉降量。从表3的结果看,折算后的大部分测点的固结度都超过了100%。虽然如此,但考虑到卸载回弹和次固结等因素的影响,实际使用过程中的残余沉降大约10cm。

各沉降盘的加固历时时间平均为225d,平均沉降为250.2cm。最大沉降速率为74mm/d,平均为51.6mm/d,远远超出设计要求的10mm/d。但因为控制得当,没有发生地基失稳的现象。

4.1.2 分层沉降

表4列出了5个分层沉降的数据,堆载区的加固历时平均为229d;平均沉降为242.4cm,最大沉降速率为68.0mm/d,平均为44.0mm/d。

表4 各分层沉降仪累计沉降量、最大速率和加固时间表

分区编号	累计沉降量 (cm)	超载情况	加固历时 (d)	最大沉降速率 (mm/d)	固结度 (%)
D	288.2	2.0m	173	68.0	103.0
C	242.0	2.0m	273	23.3	110.9
G	229.4	2.0m	233	39.6	105.8
F	249.5	2.0m	234	36.7	104.0
J	202.7	2.0m	233	52.3	101.9

由于超载的影响,折算后的固结度也超过了100%。

4.1.3 边桩

表5给出了20个边桩的位移测量数据。从表5的数据看,随着施工的推进,边桩位移点就被堆载料埋掉了,所以每个位移点观测持续的时间都不长。

表5 堆载预压区的边桩位移结果表

位移边桩 编号	累计位移量 (mm)	埋设日期 (年-月-日)	截止日期 (年-月-日)	最大位移速率 (mm/d)	发生日期 (年-月-日)
II B1	77	2004-3-26	2004-7-22	8	2004-4-3
II B2	77	2004-3-26	2004-7-22	5	2004-3-30
II B5	158	2004-3-26	2004-7-15	15	2004-3-30
II B6	6	2004-3-26	2004-3-29	3.5	2004-3-29
II B7	8	2004-3-26	2004-4-4	8	2004-4-2
II B8	35	2004-3-26	2004-4-3	16	2004-4-1
II B9	32	2004-3-26	2004-4-3	15	2004-4-2
II B10	25	2004-3-26	2004-4-2	7	2004-4-1
II B11	8	2004-3-26	2004-4-2	2	2004-3-29
II B14	64	2004-3-28	2004-4-26	23	2004-4-3
II B15	54	2004-3-28	2004-4-1	35	2004-3-30
II B16	138	2004-5-25	2004-7-15	6	2004-6-1

续表

位移边桩 编号	累计位移量 (mm)	埋设日期 (年—月—日)	截止日期 (年—月—日)	最大位移速率 (mm/d)	发生日期 (年—月—日)
Ⅱ B17	122	2004—5—25	2004—7—15	6	2004—6—7
Ⅱ B7—1	171	2004—4—4	2004—7—15	8	2004—4—9
Ⅱ B8—1	67	2004—4—4	2004—5—25	13	2004—4—8
Ⅱ B9—1	147	2004—4—4	2004—7—15	31	2004—5—29
Ⅱ B10—1	31	2004—4—5	2004—5—6	14	2004—4—9
Ⅱ B11—1	201	2004—4—5	2004—7—15	27	2004—4—9
Ⅱ B12—1	61	2004—4—5	2004—4—29	26	2004—4—9
Ⅱ B15—1	30	2004—4—5	2004—4—22	10	2004—4—12

累计位移量最小为 6mm, 最大为 201mm, 平均为 75.6mm。位移的方向指向加固区外。

从位移的速率来看, 各测点的最大位移速率 2.0~35.0mm/d, 平均为 13.9mm/d, 基本上都超过了设计要求的控制标准。一旦沉降和位移均超过了控制标准, 我们密切注意数据的发展和边坡的情况, 必要时让施工单位停止加载, 待位移和沉降速率恢复正常后再重新开始堆载。

4.2 真空联合堆载预压区

4.2.1 分层沉降

真空联合堆载预压区分层沉降的统计表见表 6。

表 6 各真空区累计沉降量、最大沉降速率、加固时间固结度统计表

分区编号	累计沉降量 (cm)	超载情况	加固历时 (d)	最大沉降速率 (mm/d)	固结度 (%)
真空Ⅰ区	284.4	2.5m	116	109.0	92.3
真空Ⅱ区	198.2	2.5m	119	101.8	92.0
真空Ⅲ区	219.9	无	174	50.7	94.5
真空Ⅳ区	233.8	无	139	87.4	89.7
真空Ⅴ区	241.0	2.5m	137	45.5	107.7
真空Ⅵ区	192.2	2.5m	97	83.7	102.5
真空ⅦA区	211.2	无	166	113.0	97.4
真空ⅦB区	206.9	无	121	136.0	98.8
真空Ⅷ区	220.6	无	162	85.3	92.4
真空Ⅸ区	183.6	0.5m	217	40.3	93.9
真空Ⅹ区	227.2	无	249	51.0	96.0
真空Ⅺ区	191.5	无	271	33.0	93.7

真空联合堆载预压区平均沉降量为 217.5cm, 加固时间为 164d, 最大沉降速率为 136.0mm/d, 平均最大沉降速率为 78.1mm/d。Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ区因为堆载料供应不上, 所以时间较长。Ⅵ区因为赶工期, 在很短的时间内完成了堆载 6.5m 石料, 虽然产生了比较大的位移, 但控制得当, 没有对围堤产生不利影响。有的加固区超载, 我们采用了类似的方

表 7 各真空区孔隙水压力加权
平均固结度统计表

分区编号	固结度 (%)
真空Ⅰ区	90.2
真空Ⅱ区	91.8
真空Ⅲ区	93.2
真空Ⅳ区	84.1
真空Ⅴ区	89.9
真空Ⅵ区	82.4
真空ⅦA区	90.7
真空ⅦB区	87.6
真空Ⅷ区	83.5
真空Ⅸ区	90.5
真空Ⅹ区	88.7
真空Ⅺ区	86.8

法进行折算，各真空联合堆载预压区的平均固结度为95.9%，预计的残余沉降为20~30cm。

4.2.2 孔隙水压力

各真空联合堆载预压区的孔隙水压力加权平均固结度见表7。

各区的孔隙水加权平均固结度的平均值为88.3%，小于分层沉降计算的固结度，这是因为二者的概念不同，孔隙水固结度是应力固结度，沉降固结度是应变固结度，在固结度达到100%之前，孔隙水固结度肯定是小于沉降固结度的。

4.2.3 测斜

表8是真空联合堆载预压四个区的测斜测量结果，测斜管都布置在加固区外海侧向。

表 8 真空联合堆载预压的Ⅷ~Ⅺ区测斜管测量结果表

编号	累计位移最大值 (mm)	开始测量日期 (年—月—日)	卸载日期 (年—月—日)	观测历时 (d)	最大位移速率 (mm/d)	发生日期 (年—月—日)
Ⅷ	217.8	2005—5—30	2005—11—5	159	22.3	2005—6—2
Ⅸ	144.4	2005—5—12	2005—12—15	217	8.6	2005—5—19
Ⅹ	231.2	2005—4—28	2006—1—3	250	9.6	2005—5—5
Ⅺ	181.0	2005—4—16	2006—1—9	268	8.1	2005—4—20

在施工期间，四个真空联合堆载预压区的累计最大深层土体水平位移值为231.2mm，最小为144.4mm，平均为193.6mm。该位移值的方向是指向加固区内的。

最大位移速率为8.1~22.3mm/d，平均为12.2mm/d。

由于真空联合堆载预压产生一个指向加固区内的位移，减少了对周围土体的影响，因此，在加固期间，没有对周围土体的稳定安全造成影响。

4.2.4 取土试验

真空联合堆载预压加固后，土体的物理力学指标都有不同程度的改善，见表9。

表 9 加固前后各物理力学指标变化情况统计表

土 层	项目	含水量 W (%)	湿密度 ρ (g/ cm ³)	干密度 ρ_d (g/ cm ³)	孔隙 比 e	液性 指数 I_L	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	压缩系数 α_{1-2} (MPa ⁻¹)	直剪快剪 黏聚力 C(kPa)	直剪快剪 内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	直剪固快 黏聚力 C(kPa)	直剪固快 内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$
淤泥 质粉 质黏 土	加固前	38.6	1.8	1.3	1.086	1.464	3.504	0.623	12.3	12.3	10.3	19
	加固后	33.9	1.87	1.39	0.952	1.08	5.554	0.363	23.3	17.7	24.5	24.6
	增幅(%)	-12.3	3.6	7.3	-12.4	-26.2	58.5	-41.8	89.8	44.5	139	29.4

续表

土层	项目	含水量 W (%)	湿密度 ρ (g/ cm ³)	干密度 ρ_d (g/ cm ³)	孔隙 比 e	液性 指数 I_L	压缩模量 E_{s1-2} (MPa)	压缩系数 α_{1-2} (MPa ⁻¹)	直剪快剪 黏聚力 C (kPa)	直剪快剪 内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$	直剪固快 黏聚力 C (kPa)	直剪固快 内摩擦角 $\Phi(^{\circ})$
淤泥 质黏 土	加固前	37.5	1.82	1.32	1.059	1.277	4.306	0.493	14.5	13.5	10	16.6
	加固后	35	1.85	1.37	0.987	1.073	4.521	0.457	27	14	28.8	19.9
	增幅 (%)	-6.7	1.9	3.7	-6.8	-15.9	5	-7.3	86.2	3.6	187.5	20.2

4.2.5 载荷载板

真空联合堆载预压结束后，对三个区进行了载荷载板试验，试验结果见表 10。

表 10 载荷载板试验统计结果表

试验位置	试验编号	设计承载力 (kPa)	试验确定的承载力特征值 (kPa)
真空Ⅸ区	1	50	150
真空Ⅹ区	2	50	120
真空Ⅺ区	3	50	90

从试验结果看，加固后的地基承载力达到了设计要求。

4.3 围堤

围堤上一共布置了 10 个监测断面，深水区采用了观测平台。深水观测断面的测斜采用了多段式测斜仪，其他断面采用测斜管。

4.3.1 分层沉降

围堤各观测断面的分层沉降统计表见表 11。

表 11 各断面累计沉降量、最大速率、固结度和残余沉降统计表

断面编号	累计沉降量 (cm)	最大沉降速率 (mm/d)	固结度 (%)	残余沉降 (cm)
0+273	210.9	21.0	98.8	2.6
0+423	264.4	42.5	98.4	4.3
0+573	228.7	15.0	97.6	5.6
0+673	227.3	19.0	97.6	5.6
0+773	220.6	15.0	97.8	4.9
1+000	206.6	30.5	82.1	45.1
1+223	194.6	44.7	84.5	35.6
1+655	210.0	46.0	86.7	32.3
1+855	197.1	38.0	81.4	45.0
1+955	221.0	48.6	89.4	26.3

后 5 个断面先施工, 以上数据是施工完成时的计算结果; 前 5 个断面后施工, 施工结束一段时间后才停止测量的。因此, 后 5 个断面的固结度明显小于前面 5 个断面。前 5 个断面的平均沉降为 230.4cm, 平均固结度为 98.0%, 残余沉降为 4.6cm, 最大沉降速率为 45.5mm/d, 平均最大沉降速率为 22.5mm/d; 后 5 个断面的平均沉降为 205.9cm, 平均固结度为 84.8%, 残余沉降为 36.9cm, 最大沉降速率为 48.6mm/d, 平均最大沉降速率为 41.6mm/d。

考虑到次固结等因素的影响, 我们推荐的残余沉降为: 前 5 个断面 15cm, 后 5 个断面 30cm。

在沉降速率超过控制标准后, 我们及时指导施工单位, 停止加载, 等数据显示已经安全了再恢复施工, 因此, 围堤施工没有出现滑坡的情况。

4.3.2 孔隙水压力

表 12 是各断面的孔隙水压力加权平均固结度统计表。

前 4 个断面的平均加权平均固结度为 95.3%, 后 5 个断面的平均加权平均固结度为 83.7%, 均稍小于沉降固结度, 这是正常的。

4.3.3 测斜

表 13 是各断面的测斜测量结果。

表 12 各断面孔隙水压力加权平均固结度统计表

断面编号	加权平均固结度 (%)
0+273	95.3
0+423	96.0
0+673	95.4
0+773	94.3
1+000	75.8
1+223	83.4
1+655	86.4
1+855	84.4
1+955	88.5

表 13 各断面测斜测量结果表

编号	累计位移最大值 (mm)	最大位移速率 (mm/d)
0+273	195.3	4.4
0+423	243.0	6.5
0+573	209.0	4.0
0+673	256.3	6.2
0+773	196.6	4.8
1+000	148.9	5.4
1+223	108.5	4.9
1+655	102.3	5.3
1+855	86.5	7.2
1+955	228.4	74.3

在施工期间, 测斜数据直接关系到围堤的安全, 因此, 施工时严格按照设计控制标准控制。但由于没有经验, 第一个施工断面 1+955 的最大位移速率高达 74.3mm, 施工单位立即采取了措施, 停止加载, 并密切关注监测数据, 待监测数据正常后再恢复施工。各断面累计位移的平均值为 177.5mm, 指向围堤外侧。有了第一个断面的经验后, 其他断面再也没有出现类似的情况。

4.3.4 取土试验

由于篇幅有限, 表 14 是一个围堤断面的施工前后物理力学指标对比表。