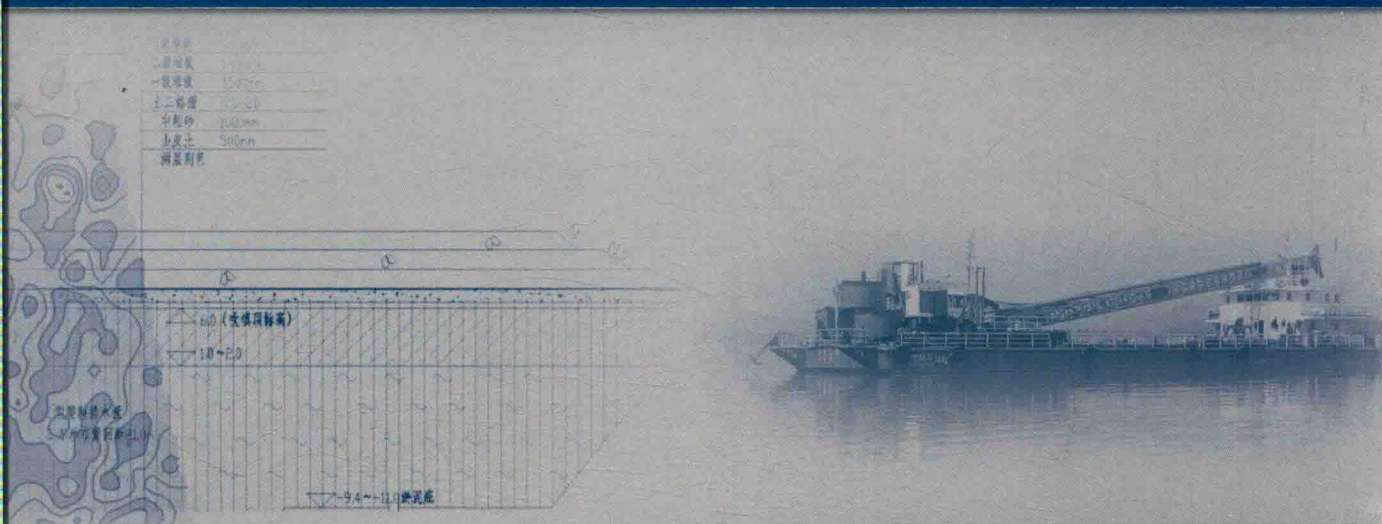


主 编 吴 澎 戴济群
副主编 蔡艳君 高长胜



港口工程及工程排水与加固 理论与技术进展

中国土木工程学会港口工程技术交流大会
第十届工程排水与加固技术研讨会 论文集

论文集



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

非外借

南京水利科学研究院出版基金资助

港口工程及工程排水与加固 理论与技术进展

中国土木工程学会港口工程技术交流大会
第十届工程排水与加固技术研讨会 论文集

主 编 吴 澎 戴济群
副主编 蔡艳君 高长胜

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是中国土木工程学会港口工程技术交流大会暨第十届工程排水与加固技术研讨会论文集，总结和交流了我国近年来水运、水利、公路、市政等行业的重大工程以及工程排水与加固领域的热点问题和创新成果。本书论文内容涉及工程排水与加固、港口工程领域理论研究、设计计算、新技术新材料、现场监测与检测等方面。

本书适合从事港口工程、岩土工程领域科研、设计、施工和管理人员阅读和参考。

图书在版编目（C I P）数据

港口工程及工程排水与加固理论与技术进展：中国
土木工程学会港口工程技术交流大会第十届工程排水与加
固技术研讨会论文集 / 吴澎，戴济群主编. — 北京：
中国水利水电出版社，2017. 10
ISBN 978-7-5170-5970-7

I. ①港… II. ①吴… ②戴… III. ①港口工程—学
术会议—文集 IV. ①U65-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第257897号

书 名	港口工程及工程排水与加固理论与技术进展 中国土木工程学会港口工程技术交流大会 论文集 第十届工程排水与加固技术研讨会 GANGKOU GONGCHENG JI GONGCHENG PAISHUI YU JIAGU LILUN YU JISHU JINZHAN ZHONGGUO TUMU GONGCHENG XUEHUI GANGKOU GONGCHENG JISHU JIAOLIU DAHUI DI - SHIJIE GONGCHENG PAISHUI YU JIAGU JISHU YANTAOHUI LUNWENJI
作 者	主 编 吴 澎 戴济群 副主编 蔡艳君 高长胜
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.75印张 563千字
版 次	2017年10月第1版 2017年10月第1次印刷
定 价	140.00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

中国土木工程学会港口工程技术交流大会 第十届工程排水与加固技术研讨会

主办单位

中国土木工程学会港口工程分会

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

浙江省围海建设集团股份有限公司

协办单位

浙江大学宁波理工学院

中国电建集团华东勘测设计研究院

南京瑞迪建设科技有限公司

宁波大学

温州大学

支持单位

宁波市科学技术协会

中国土木工程学会港口工程技术交流大会 第十届工程排水与加固技术研讨会

学术委员会

主 任：吴 澎

副 主 任：戴济群 王掌权

委 员：（按姓氏笔画排序）

王立忠	王永平	王 园	王宝善	王 晋	文 立
方家强	卢永昌	田正宏	吕卫清	刘国楠	刘爱民
阮春生	杨守华	沈雪松	张功新	张留俊	陈文华
陈永辉	陈 达	季则舟	俞元洪	高长胜	唐云清
程泽坤	蔡正银				

组织委员会

主 任：俞元洪

副 主 任：蔡艳君 高长胜 王立忠

委 员：（按姓氏笔画排序）

王 军	邓岳保	朱丽妮	朱鸿鸣	刘干斌	关云飞
祁 峰	杨明昌	郁建红	郑澄锋	胡海晓	耿之周
徐 锴	黄 瑶	谢新宇			

秘 书 处：关云飞 耿之周 占鑫杰 王 武 张 宁

P 前言

REFACE

“一带一路”倡议的实施为交通、水利、市政等行业带来了新的机遇与挑战，“十三五”期间，我国港口建设有序推进，内河水运加快发展，主要港口大型综合性港区布局逐步优化，一大批港口深水航道、防波堤、码头等基础设施正在建设，在技术创新、理论研究、工程建设等方面取得了丰硕的成果。为及时总结我国港口工程和工程排水与加固领域的热点和难点问题，推动和促进港口建设、运行、管理和工程排水与加固领域的科技进步，为广大科研、设计、施工和管理人员提供新理论、新技术、新材料的交流平台，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于2017年11月在浙江省宁波市联合召开中国土木工程学会港口工程技术交流大会暨第十届工程排水与加固技术研讨会。

本次会议共收到论文56篇，经专家评审后选录52篇，内容包括港口工程和工程排水与加固领域理论研究、设计计算与分析、新技术新材料及工程应用、现场监测与检测等。本次会议论文征集工作得到了中国土木工程学会港口工程分会和工程排水与加固专业委员会各位理事与论文作者的大力支持。论文集的出版得到了南京水利科学研究院出版基金的资助。在此，对各成员单位、各位理事、论文作者和评审专家表示感谢！

编者

2017年10月

C 目录

CONTENTS

前言

第一部分 工程排水与加固篇

基于实测资料对真空联合堆载预压法中软土受力-变形过程的探讨	周彦章 何 宁 何 斌 汪璋淳 钱亚俊 王国利 (3)
竖井地基固结理论研究现状及发展	邓岳保 谢康和 (15)
真空井点降水联合强夯加固粉土地基的现场试验研究	陈 庚 彭中浩 王雅茹 陈永辉 吴立平 (26)
电渗法与真空预压联合电渗法加固超软土地基的室内试验分析	刘文彬 侯晋芳 (36)
珊瑚砂剪切性质的单剪试验研究	张宇亭 纪文栋 左殿军 王 欢 (47)
排水条件对重塑黏性土一维压缩特性影响的试验研究	刘忠玉 张家超 夏洋洋 冯 超 (54)
吹填土地基真空预压单井模型试验研究	王 婧 周红星 李晋骅 (61)
塑料排水板滤膜的淤堵试验研究	郑爱荣 朱洪满 (70)
浅析大面积堆载预压淤泥处理中不均匀沉降的分布与发展规律	郭 栋 江辉煌 (76)
考虑挤土效应的沉入式筒式基础稳定性计算方法	杨立功 张宇亭 左殿军 (83)
基于模拟退火法的填海造地地基沉降预测	钱 彬 范明桥 张兴刚 (93)
超载超速作用下风积沙低路堤与地基动力特性研究	刘军勇 张洪伟 刘振正 哈 图 (98)
交通荷载作用下风积沙低路基动力响应分析	刘军勇 邱 睿 张洪伟 哈 图 (108)
地下水对不同土质边坡的影响分析	魏 芸 蔡 波 (117)
天津海相软土边坡可靠度分析	喻志发 闫澍旺 曹永华 (121)
港口地区软土地基真空预压处理对邻近建筑物影响分析	徐宾宾 司 维 (127)
可降解排水板加固效果现场试验研究	陈明玉 冯旭松 王福喜 吉 锋 赵泽涛 (132)
沉管隧道过渡段挤密砂桩复合地基沉降现场试验研究	侯晋芳 李树奇 于 健 (138)
淤泥固化技术在软基工程中的应用	干焕军 (143)

吹填场地大面积淤泥包的处置与加固技术分析	曾子明	周红星	牛 飞	(148)
某排水固结路基滑塌原因分析			刘吉福	(155)
软土地基厚垫层泡沫轻质土路堤变形性状研究	杨德广	李永良	刘耀富	张留俊 (161)
软土地基宽幅轻质土路基填筑方案及变形性质研究	张发如	杨德广		张留俊 (166)
大超载比下深厚超软地基处理效果分析	龚丽飞	顾 翔	高 郢	单欢欢 陆明晨 (174)
砂质粉质黏土遇水软化的深基坑现场监测分析				王亮先 (184)
GPS RTK 技术在防波堤沉降监测中的应用	侯艳乐	杨守华	占鑫杰	朱群峰 (194)
软土地基路基大变形沉降自动监测系统研究	尹利华	杨 平	李美霞	张留俊 (199)
河湖库塘黑臭底泥“四化”处理处置技术路线及标准探讨	宁顺理	徐 镨	邱 辉	俞演名 郭伟建 吴天或 宋 睿 (207)
酸雨环境下磷酸镁水泥固化锌污染土强度特性研究	庄迎春	吴雪辉	周红利	宋 睿 王 哲 (214)
城市黑臭河道底泥脱水固结一体化处理技术试验研究	张 红	祁 锋	陈海波	吴月龙 张金良 孙爱权 (222)
高耐候聚脲复合涂层材料体系的设计与性能研究	汪在芹	梁 慧	廖灵敏	陈 亮 肖承京 李 珍 (235)
CW 系列抗冲耐磨材料及其应用	冯 菁	陈 亮	汪在芹	肖承京 魏 涛 张 达 (241)
透水边界下密实混凝土浇筑分析			田正宏	焦新宸 (250)
矿石堆载深厚淤泥地基处理技术及沉降长期监测研究	宋 兵	张广娟	郭玉昌	蔡云晟 (259)

第二部分 港口工程技术篇

我国港口与航道工程建设技术进展	吴 澎	蔡艳君		曹凤帅 (267)
董家口港 40 万 t 矿石码头引桥设计	王 涛			任增金 (275)
国际航运协会航道宽度计算方法分析	肖 鑫			曹凤帅 (281)
上海横沙深水新港区规划建设方案研究	薛晓晓	周玉华	刘晓玲	曹凤帅 (292)
工业大数据在现代港口设备故障诊断与预测中的应用与研发	杨永刚			杨宝珠 (298)
论 E - House 在港口的应用发展趋势	冀文峰			杨宇慧 (303)
利泽航运枢纽工程平面布置研究	阙得静	吴志龙	汤建宏	罗少桢 韩巍巍 (307)

宁波港镇海港区某化工码头钢管桩腐蚀状况调查
..... 冯龙海 李 宁 俞 荣 李森林 (312)

浮头湾砂石料过驳工程单点系泊应用研究 张美林 陈 谦 (315)

浅谈人工岛护岸修复方案 张建鑫 蒋国栋 (325)

规则波作用下梳式防波堤水动力行为的数值研究 高成岩 黄道刚 (331)

爆破挤淤治理抛石堤滑坡的研究与应用 张广娟 高兆福 宋 兵 (338)

毛竹桩在某软基护岸工程中的应用 杨 杰 杨奕健 (343)

海上人工岛施工期原观技术研究 苏冬林 (349)

第三部分 经会议推荐至期刊的论文

药剂真空预压法处理城市生活污水污泥试验研究 武亚军 王光坤 胡 挺 (359)

疏浚底泥稳固化处理及应用研究
..... 史燕南 孙伯永 鲍 玲 俞炯奇 张超杰 汤明礼 (360)

真空预压加固吹填软土地基的室内模型试验与淤堵机制
..... 朱向阳 陈祥龙 江舜武 邓永锋 金亚伟 (361)

颗粒形状对钙质砂砾压缩性能影响试验研究
..... 孟庆山 王 帅 雷学文 李雨杰 徐亚飞 胡思前 (362)

附 录

中国土木工程学会港口工程分会第八届理事会..... (365)

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第九届委员会..... (366)

工程排水与加固专业委员会历届会议..... (367)

第一部分 工程排水与 加固篇

基于实测资料对真空联合堆载预压法中 软土受力-变形过程的探讨

周彦章¹ 何 宁^{1,2} 何 斌¹ 汪璋淳¹ 钱亚俊¹ 王国利^{1,2}

(1. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210024;

2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

摘 要: 真空联合堆载预压加固软土地基的受力和固结机理等问题仍存在争议, 基于典型工程实例中真空联合堆载预压加固深厚软土地基的孔隙水压力及分层沉降实测资料, 分析其有效加固深度和负超静孔隙水压力分布规律。根据有效应力原理和沉降固结理论计算分析地基土体的受力和变形发展规律, 对比实测资料进行了验证和分析讨论, 现有真空联合堆载预压技术的基本理论和计算方法基本满足工程实践要求, 为适应其设计和施工精细化需要, 相关理论有待完善。

关键词: 真空联合堆载预压; 孔隙水压力; 分层沉降; 受力; 变形; 固结

1 引言

真空联合堆载预压法^[1-4]是利用抽真空时产生的真空荷载联合其上部堆土荷载来加固软土地基的一种方法。真空排水预压加固软土地基中, 抽气后, 密封膜内水平排水层中气体先被抽出, 其压力逐渐下降, 密封膜内外形成一个压差 Δp , 这个压差称为“真空度”; 抽气后水平排水层中的真空度通过垂直排水通道逐渐向下延伸, 由垂直排水通道向其周围土体传递, 土中孔隙水压力降低, 形成负的超静孔隙水压力, 土体中有效应力增加, 土体在该有效应力作用下得到加固。堆载预压法在被加固软土地基上部堆土(或其他荷载)以施加外荷载, 在土体中形成附加应力使土体总应力增加, 增加的总应力先由土体中孔隙水承担, 土体中形成正超静孔隙水应力, 正超静孔隙水压力消散后, 土体中有效应力增加, 加固土体。真空预压和堆载预压均为排水预压法, 垂直排水通道在两种排水预压法中的作用是垂直排水、减小排水间距及加速土体固结; 真空预压法中垂直排水通道同时传递真空度, 其“预压荷载(真空度)”通过垂直排水通道向土体施加。

目前我国在真空预压法的工程应用和配套工艺技术等方面, 已取得大量成果, 但其理论研究明显落后于工程实践, 不少理论问题仍未能得到解决, 对于真空预压法受力和固结机理的认识尚不明确或长期存在争论, 其有效加固深度、真空预压区内地下水位变化及影

作者简介: 周彦章(1982—), 吉林临江人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程监测, 软土特性、地基改良及相关工程问题的研究与实践。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379131、51579152)。

响等存在分歧。真空联合堆载预压法在真空预压法的基础上发展而来,在真空-堆载联合作用的受力和固结机理、真空预压和堆载预压的影响是否可以叠加、如何叠加等方面的认识目前仍不明确。

本文根据土力学有效应力原理和固结理论,利用杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路工程中真空联合堆载预压法加固处理的两种不同性质软土地基的孔隙水压力及分层沉降等实测资料,分析讨论真空联合堆载预压法中地基软土受力和变形规律,以期促进真空联合堆载预压法的受力-固结机理研究,为完善其理论发展提供借鉴和依据。

2 有效应力原理及固结理论

2.1 有效应力原理

根据太沙基(Terzaghi)有效应力原理^[5],当总应力保持不变时,孔隙水压力与有效应力可互相转化,即孔隙水压力减小(增大)等于有效应力的等值增大(减小),其数学表达式为:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (1)$$

从 Terzaghi 有效应力原理来看,真空排水预压法加固过程是在总应力没有增加,即 $\Delta\sigma=0$ 的情况下发生的,加固过程中降低的孔隙水压力即等于增加的有效应力,即 $\Delta\sigma' = -\Delta u$,土体在该有效应力作用下得到加固。

堆载预压法中,堆载作用下在土体中产生附加应力 σ_z ,其总应力增加 $\Delta\sigma = \sigma_z$,增加的总应力先由土体中孔隙水承担,土体中形成正超静孔隙水压力 $\Delta u = \sigma_z$,正超静孔隙水压力的消散使土体中有效应力增加,消散完成后附加应力全部转化为有效应力 $\Delta\sigma' = \sigma_z$,土体得到加固。

2.2 沉降固结理论

土体在荷载作用下,土体孔隙中的水缓慢流出,体积逐渐缩减,土体被压缩,产生压缩(沉降)变形,即土的固结。土体压缩变形(固结沉降)采用无侧向变形条件下的压缩量计算公式^[5]:

$$S = \frac{e_2 - e_1}{1 + e_1} H = \frac{-\Delta e}{1 + e_1} H \quad (2)$$

土体竖向固结计算采用 Terzaghi 一维固结理论^[5],水平向固结计算采用巴隆(Barron)轴对称固结理论^[6,7]。真空排水预压加固软土地基时,抽真空 5d 左右膜下真空度达到最大,为简化计算,在计算固结度以推算加固期间地基压缩沉降量时将真空荷载视为瞬时荷载,按堆载排水预压法瞬时加荷情况考虑,因此真空排水预压法的真空荷载和堆载排水预压法的各级荷载在加固历时的平均固结度均按下式计算^[7,8]:

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (3)$$

式中 α 、 β ——排水固结参数。

各种情况下 α 、 β 的取值见表 1。

表 1 排水固结参数 α 、 β 取值表^[8]

固结参数		径向排水	竖向排水	竖向和径向组合三维排水
β	理想井	$\beta_r = \frac{8C_h}{F_n d_e^2}$	$\beta_z = \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$	$\beta_r + \beta_z$
	非理想井	$\beta_r = \frac{8C_h}{(F_n + J + \pi G) d_e^2}$		
α		1	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8}{\pi^2}$

表中 C_v 、 C_h 分别为竖向和水平向固结系数， F_n 为井径比因子， G 为井阻因子， J 为涂抹因子， H 为固结土层竖向渗流最大距离。土体固结度是指在某一固结应力作用下，经某一时间 t 后，土体发生固结或孔隙水压力消散程度，固结度也常用于已计算得土层最终沉降量 S 的情况下某一固结历时 t 的沉降量 S_t 。

3 工程概况及实施

杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路试验段工程主要包括两段，其中一段位于浙江慈北冲积平原，主要由冲海积黏土、亚黏土和亚砂土组成^[9]，软土最大厚度达 38m，区内土层分 5 层，自地表向下依次为②₁ 亚黏土层，浅层为耕植土，大部分为软塑状，少数为可塑状，厚度 2~2.5m；②₂ 淤泥质亚砂土层，呈流塑状，饱和，厚度 6~11m；③₁ 淤泥质亚黏土层，呈流塑状，饱和，厚度 20~30m；③₂ 亚黏土层，呈灰色，以流塑状为主，少数软塑，饱和；⑤₂ 细砂、粉砂层，厚度大于 4.2m。另一试验路段位于宁波江北区姚江冲积平原区，其主要软土层为淤泥质亚黏土，其上无覆盖层，自地表向下依次为③₁ 淤泥质亚黏土层，但其含水率大、液性指数高，性质较慈北冲积平原③₁ 层更差，土层厚度 14~26m；③₂ 亚黏土层，土层厚度 5~9m。两典型软土路段土层主要物理力学指标见表 2。

表 2 工程区内土层主要物理力学指标表

试验路段	土层代号	土层厚度 /m	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	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_v/MPa	固结系数 $C_v/(10^{-3}\text{cm}^2/\text{s})$
慈北平原	② ₁	2~2.5	30.8	1.90	0.874	33.6	12.8	0.79	0.35	7.21
	② ₂	6~11	38.1	1.83	1.037	30.4	9.7	1.82	0.46	8.50
	③ ₁	20~30	41.9	1.79	1.165	36.2	13.8	1.44	0.54	5.78
	③ ₂	1~10	32.9	1.88	0.930	30.8	11.5	1.26	0.29	7.50
	⑤ ₂	>5	28.5	1.85	0.87	—	—	—	—	—
姚江平原	③ ₁	14~26	45.2	1.77	1.254	36.9	15.4	1.54	1.30	2.09
	③ ₂	5~9	28.3	1.92	0.827	33.9	14.2	0.74	0.22	7.33

以杭州湾跨海大桥南岸接线高速公路试验段工程中，N5、N6 和 S3 三个真空联合堆载加固处理路段的重点监测断面 K118+880、断面 K118+980 和断面 K134+428 的孔隙水压力和分层沉降监测资料为例，分析和讨论真空联合堆载预压法中软土受力和变形规律，其中 N5 和 N6 段落位于慈北冲积平原、S3 段落位于姚江冲积平原，上述三个路段特性及加固处理设计方案参数见表 3，监测仪器布置设计实施情况见表 4，段落内重点监测

断面软土分布情况见表 5。

表 3 N5、N6 和 S3 路段地基加固处理设计方案

区号	起讫桩号	长度	设计路堤高度	路段类型	软土最大深度	处理方案		
						处理方法	深度	间距
N5	K118+827~K118+935	108	4.3	一般	30.0	真空堆载（F 板）	31.0	1.2
N6	K118+935~K119+035	100	3.5	一般	30.0	真空堆载（C 板）	31.0	1.2
S3	K134+413~K134+464	51	4.5	桥头	24.0	真空堆载（C 板）	28.0	1.0

表 4 N5、N6 和 S3 路段监测仪器设计布置方案

区号	处理方法	路段类型	监测类型	观测断面位置	监测仪器数量				
					地面沉降/支	分层沉降/孔	测斜孔/孔	孔压计/支	水位观测/孔
N5	真空堆载（F 板）	一般	重点	K118+880	3	1	1	10	2
N6	真空堆载（C 板）	一般	重点	K118+980	3	1	1	10	—
S3	真空堆载（C 板）	桥头	重点	K134+428	3	1	1	10	2

表 5 N5、N6 和 S3 路段软土层分布

土层代号	N5 K118+880		N6 K118+980		S3 K134+428	
	地层分层厚度 /m	板顶埋深 /m	地层分层厚度 /m	板顶埋深 /m	地层分层厚度 /m	板顶埋深 /m
② ₁	2.5	0	2.2	0	—	—
② ₂	10.8	2.5	7.4	2.2	—	—
③ ₁	25.8		29.4		14.2	0
③ ₂	1.0	39.0			9.9	14.2

N5、N6 和 S3 三段重点断面观测指标包括地面沉降、土体分层沉降、土体深层水平位移及孔隙水压力、地下水位，其中地表沉降标安装在路堤左、中、右位置，采用水准仪测量，土体分层沉降测量系统安装在断面中心位置，采用铁环式分层沉降仪，沿地基深度根据软土层厚度布置 10~12 个，深层水平位移测斜管 1 套并安装在路堤外 5m 位置，采用伺服加速度式测斜仪测量，10 支孔隙水压力计安装在断面中心位置，沿深度每隔 3m 安装 1 支钢弦式孔隙水压力计，地下水位监测孔布置在加固区外 7m 和 15m 位置，安装埋设水位监测管，采用电测水位计测量。

4 实测资料分析

根据试验段工程三个路段重点监测断面孔隙水压力和分层沉降监测资料实测结果，得到超静孔隙水压力变化过程如图 1~图 3 所示，分层沉降过程线如图 4~图 6^[9] 所示。

试验段三个路段分处慈北平原和姚江平原，土性存在明显差异，采用真空联合堆载预压法加固软土地基时，地基土体在真空作用下产生负超静孔隙水压力的传递和扩散规律、

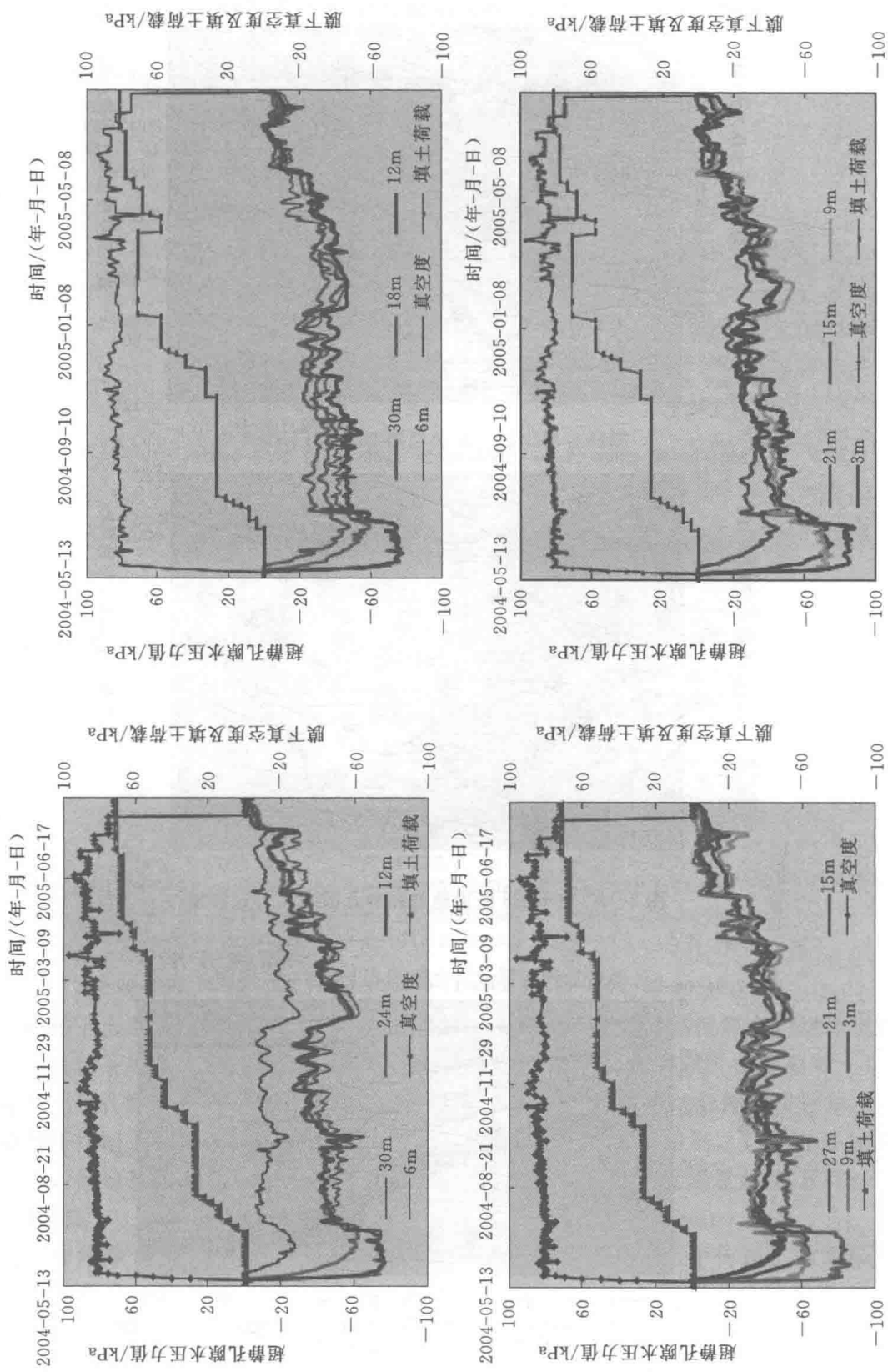


图 1 K118+880 断面地基超静孔隙水压力过程线

图 2 K118+980 断面地基超静孔隙水压力过程线

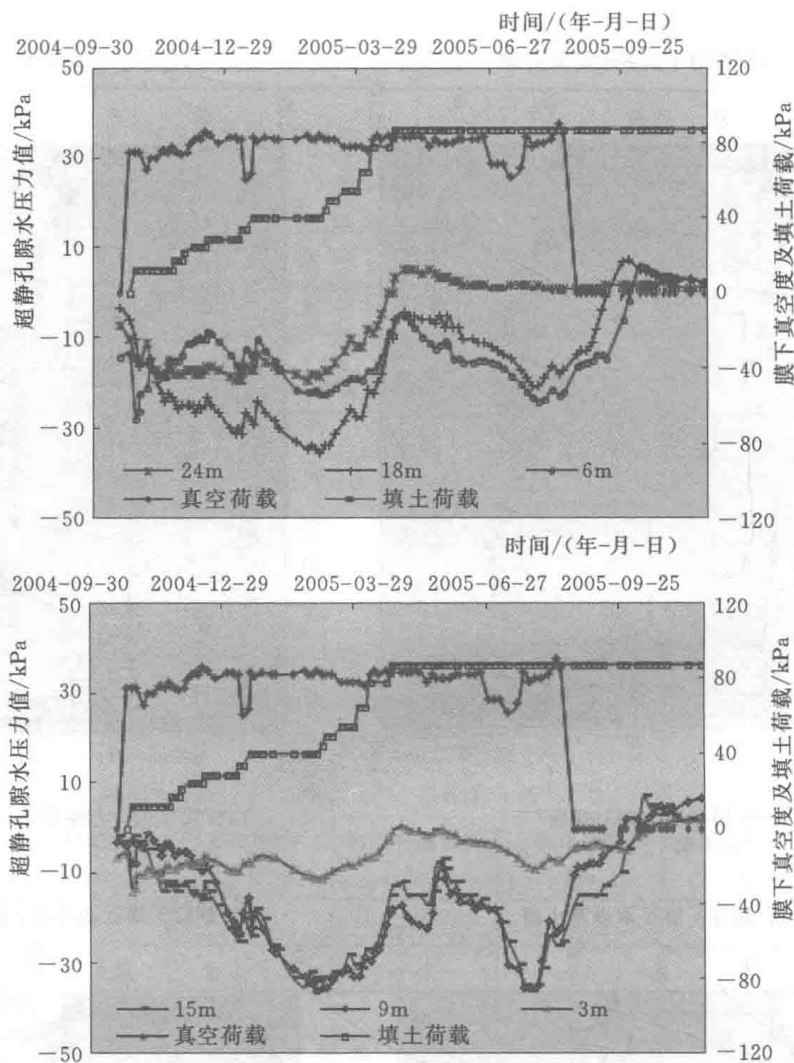


图 3 K134+428 断面地基超静孔隙水压力过程线

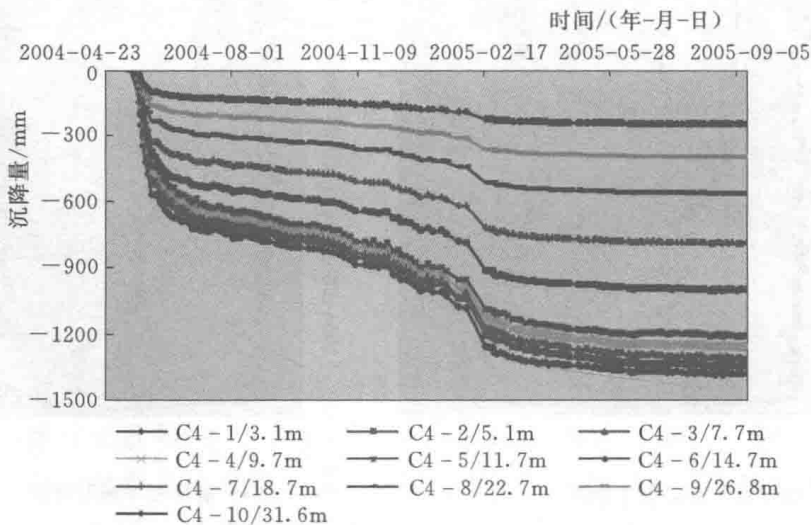


图 4 K118+880 断面地基分层沉降过程线