

## 基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究

程瑾, 曹凯, 吴玉涛, 金亚伟, 张勇, 张珍, 高天宇, 王小东

### A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology

CHENG Jin, CAO Kai, WU Yutao, JIN Yawei, ZHANG Yong, ZHANG Zhen, GAO Tianyu, and WANG Xiaodong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology

袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74

#### 加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究

`\${suggestArticle.titleEn}`

王天园, 邓岳保, 毛伟, 刘铨 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 62-68

#### 浅埋洞口段黄土公路隧道施工变形性状现场测试研究

Field test on the construction deformation characteristics for a loess highway tunnel at the shallow portal section

邱明明, 杨果林, 张沛然, 段君义 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 135-143

#### 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算

Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading

陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 贺建清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 138-145

#### 侵蚀环境中碱渣-矿渣固化淤泥的力学性质

Mechanical properties of the soft soil stabilized with soda residue and ground granulated blast furnace slag under the erosion environment

何俊, 栗志翔, 石小康, 王小琦 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 83-89

#### 生物酶改良淤泥质土的时效强度试验研究

Experimental study of aging strength of the mucky soils improved with bio-enzyme

董辉, 程子华, 刘禹岐, 朱宪明 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 84-94



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203003

程瑾, 曹凯, 吴玉涛, 等. 基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 125-134.  
CHENG Jin, CAO Kai, WU Yutao, *et al.* A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 125-134.

## 基于增温加热技术的淤泥真空预压现场试验研究

程瑾<sup>1</sup>, 曹凯<sup>1</sup>, 吴玉涛<sup>1</sup>, 金亚伟<sup>2</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 张珍<sup>1</sup>, 高天宇<sup>1</sup>, 王小东<sup>2</sup>

(1. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202;

2. 江苏鑫泰岩土科技有限公司, 江苏宜兴 214200)

**摘要:** 增温加热联合真空预压技术是一种新型淤泥脱水固结技术, 尚未开展有关的现场试验研究。以白洋淀底泥为研究对象, 采用一种间歇式温致相变汽化发生器联合真空预压技术进行淤泥脱水固结的现场试验, 从热动力学和渗透固结理论方面阐述了增温加热联合真空预压的技术原理, 并将处理效果与常规真空预压进行对比分析。结果表明: 增温加热联合真空预压技术可大幅度提高底泥的固结沉降, 体积压缩率约为常规真空预压的3倍, 底泥含水率为34.59%, 较常规真空预压降低了18.6%, 十字板强度提高了约2倍, 处理61 d后的固结度达83.3%~85.4%, 但处理后的底泥表面存在不均匀沉降现象, 在平面上表现为距增温装置越远, 沉降量越小。根据饱和土的有效应力理论, 距离增温装置越近, 孔隙水压力消散的越快, 当停止增温加热时, 孔隙水压力产生了明显的回弹现象, 距离增温装置越近, 回弹量越大, 这主要与增温装置的埋设深度、加载时长和温度加载模式有关。同时, 根据底泥含水率和沉降变化规律, 初步厘定了该增温装置的有效半径为2~3 m。研究结果可为该技术的工程应用提供技术指导。

**关键词:** 增温加热; 真空预压; 淤泥; 现场试验

中图分类号: P642.13<sup>+3</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)04-0125-10

## A field experimental study of sludge vacuum preloading based on the temperature increasing heating technology

CHENG Jin<sup>1</sup>, CAO Kai<sup>1</sup>, WU Yutao<sup>1</sup>, JIN Yawei<sup>2</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>,  
GAO Tianyu<sup>1</sup>, WANG Xiaodong<sup>2</sup>

(1. CCCC (Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300202, China; 2. Jiangsu Xintai Geotechnical Technology Co. Ltd., Yixing, Jiangsu 214200, China)

**Abstract:** Temperature increasing heating combined with vacuum preloading is a new sludge dewatering and consolidation technology, and relevant field experimental research has not been carried out. The Baiyangdian sediments are taken as the research object in this study, an intermittent temperature mass phase change vaporizer combined with vacuum preloading is used to conduct field experimental research on sludge dewatering and consolidation. The technical principle of temperature increasing heating combined with vacuum preloading is expounded from the aspects of thermodynamics and osmotic consolidation theory, and the treatment effect is compared with conventional vacuum preloading. The results show that the technology of warming and heating combined with vacuum preloading can greatly improve the consolidation settlement of sediments. The volume

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-03-30

投稿网址: [www.swdgedz.com](http://www.swdgedz.com)

基金项目: 雄安新区改革发展局专项研究项目 (THJ-KX(2019)197)

第一作者: 程瑾(1965-), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程等方面的研究工作。E-mail: 1548815054@qq.com

compression rate is about 3 times that of the conventional vacuum preloading, the water content of the sediments is 34.59%, which is 18.6% lower than that of the conventional vacuum preloading, the strength of vane is about 2 times higher, and the degree of consolidation after 61 d of treatment is 83.3% to 85.4%. However, there is uneven settlement on the surface of sediments after treatment, showing that the farther away from the warming device on the plane, the smaller the settlement. According to the effective stress theory of saturated soil, the closer to the temperature increasing device, the faster the pore water pressure dissipates. When the temperature increasing heating stops, the pore water pressure has an obvious rebound phenomenon. The closer to the temperature increasing device, the greater the rebound, which is mainly related to the buried depth, loading time and temperature loading mode of the temperature increasing device. At the same time, according to the variation law of sediment moisture content and settlement, it is preliminarily determined that the effective radius of the temperature increasing device is 2 m to 3 m. The results may provide technical guidance for the engineering application of this technology.

**Keywords:** warming heating; vacuum preloading; silt; field test

随着国家对河湖水库环境修复治理力度的加大, 在施工过程中将产生大量高含水量、高孔隙比、低渗透性、高压缩性的清淤淤泥, 淤泥堆放需占用大量的土地资源, 且在短时间内无法进行消耗和二次利用, 制约着该地区的城镇规划建设和社会经济发展。目前, 处理疏浚清淤淤泥的方法主要有真空预压法<sup>[1-3]</sup>, 包括增压式真空预压<sup>[4]</sup>、无砂垫层真空预压<sup>[5]</sup>和堆载联合真空预压<sup>[6]</sup>, 上述处理方法存在以下缺点: (1) 土体强度增长有限, 主要是因为真空压力与渗透力达到平衡后, 土体中的水便无法排出, 致使土体强度增长有限; (2) 有效加固深度小, 由于淤泥土黏粒含量较高、可压缩性较大, 导致竖向排水板严重淤堵和弯折, 排水系统内真空度损失较大, 深部土体处理效果较差; (3) 处理后的土体性能不均匀, 真空预压处理后的土体在浅表层形成一层硬壳层, 内部土体含水率仍较高, 形成了上部土体硬, 下部土体软的现象。电渗联合真空预压虽然解决了上述部分问题<sup>[7-9]</sup>, 但由于电压加载模式模糊和电极腐蚀能耗严重等问题, 导致经济成本较高, 未被大规模应用。热排水固结法是近年来提出并逐渐引起关注的一种软基处理方法<sup>[10]</sup>, Abuelnaga 等<sup>[11]</sup>首先开展了模型试验, 将排水固结法与加热相结合, 发现加热能加快竖井地基固结; 随后, Demars 等<sup>[12]</sup>、Cekerevac 等<sup>[13]</sup>、Kuntiwattanukul 等<sup>[14]</sup>、Bruyn 等<sup>[15]</sup>通过水浴加热或电热线圈加热来控制试样温度, 研制了不同的温控三轴仪, 分析了不同温度方式对土体力学特性的影响; Sultan 等<sup>[16]</sup>改进了 GDS 三轴仪, 将加热线圈置于压力室罩的外壁, 并由电热偶控制压力室温度。国内于 21 世纪初才开展温度对土体排水固结影响的研究, 范高飞等<sup>[17]</sup>通过非等温管道流竖井地基

热排水固结模拟试验, 得出研究温度可使地基土渗透系数增大、固结速率加快; 王天圆等<sup>[18]</sup>通过不同温度下的排水固结试验研究, 得到土体物性指标的发展规律和适宜的加热温度; 尹铁峰等<sup>[19]</sup>通过研究软黏土的热固结发现温度主要通过影响水的黏滞系数来提高土体的渗透系数, 且温差越大, 影响效果越明显。

目前, 升温加热联合真空预压技术对土体的排水固结现场研究较少, 本文通过室内模型试验、现场试验研究初步阐述了升温加热联合真空预压的技术原理, 从沉降量、孔隙水压力变化规律、抗剪强度、固结度和工后土体物理力学指标分析了该技术的脱水固结效果, 同时, 初步厘定了该间歇式温致相变汽化发生器的有效半径, 为该技术的工程应用提供理论支持和技术指导。

## 1 升温加热联合真空预压的技术原理

升温加热联合真空预压技术是在常规真空预压的基础上, 联合升温加热技术改变了土中水的形态特征, 改善了土体渗透径流系统, 实现了土体的快速高效排水固结。该方法涉及到温度场、应力场和水汽渗流场的相互作用, 机理较为复杂。目前, 真空预压原理的研究较为成熟, 本文主要探讨温度和应力的耦合作用对土体排水固结的影响。

(1) 温压对土中水的影响。加热升温可使液态水发生汽化, 通过室内模型试验得到了真空压力和水的沸点关系(图 1), 在一定的真空压力条件下, 温度增加, 液态水达到汽化点温度后开始汽化, 液态水转为气态水, 当到达沸点后, 汽化达到最大值, 真空压力越大, 汽化点温度越低。常规真空预压的真空度一般为

80 ~ 90 kPa, 此时, 水的汽化温度为 41 ~ 61 °C。汽化的液态水更易在土中渗透径流, 也更容易从排水板中排出, 进而加速了土的排水固结。

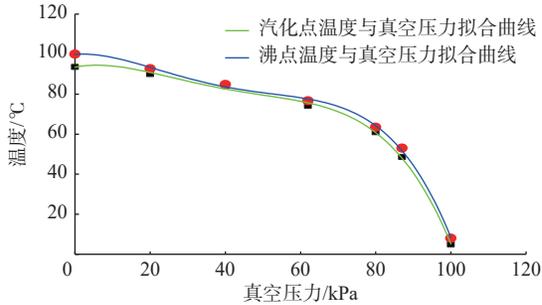


图 1 真空压力与水的沸点温度关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between vacuum pressure and boiling point temperature of water

### (2) 温压对土体渗透性的影响

Derjaguin 等<sup>[20]</sup>指出土体中孔隙水在不同温度下的状态不同; 当温度升高到一定值时(如 70 °C), 结合水性能接近自由水; 当温度越高, 土体中结合水膜厚度越小, 黏滞系数越小, 孔隙水渗透性就越大。Delage 等<sup>[21]</sup>对温度介于常温至 90 °C 的正常固结黏土进行渗透性测试, 发现温度较高时土体的渗透系数是常温下的 4 倍左右, 王媛等<sup>[22]</sup>对南京地区 3 种土样进行了 5 ~ 45 °C 不同温度下的渗透试验, 发现加热对提高土样渗透性的作用明显。上述研究表明: 升温可减小孔隙水的黏滞系数, 而黏滞系数与土体的渗透性密切相关, 由此来改善土体的渗透性(图 2)。

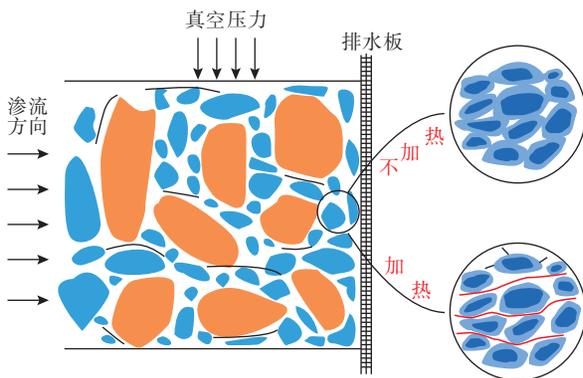


图 2 加热对土体渗透性影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram of influence of heating on soil permeability

从孔隙水的热动力学角度来看, 根据饱和蒸气压理论, 土颗粒压缩后形成相对封闭的空隙, 其中的水较难排出, 而在温度和压力的作用下, 在液体表面上方形形成蒸汽, 液体表面受到的压力等于其饱和蒸气压, 饱和蒸气压主要由液态表面的小水滴产生的。同

时根据 Kelvin 公式可知, 温度和压力增加, 饱和蒸气压增大, 也就是说液体表面的小水滴半径将会进一步减小来满足饱和蒸气压的动态平衡。



饱和蒸气压的存在使得密闭的土颗粒存在一定的张力, 土颗粒之间可能产生新的孔隙, 小水滴沿孔隙逃离, 进一步增加土的排水固结, 当饱和蒸气压与土颗粒上部应力相等时, 由饱和蒸气压促使的排水固结完成。孔隙水的饱和蒸气压对土体的排水固结具有一定的影响, 其中复杂的热动力学解析是研究的难点问题, 需要进一步的深入研究。

### (3) 温压对软土压缩性的影响

加热对软土压缩性影响的研究共识主要有两方面。一是加热对软土先期固结压力的影响。Eriksson<sup>[23]</sup>、Laloui 等<sup>[24]</sup>在不同温度下对不同类型土进行等温固结实验, 均得到先期固结压力随温度增加而减小的规律。二是应力历史对软土温度效应的影响(这里的应力历史通常指超固结比 OCR)<sup>[25]</sup>。正常固结土或超固结比较小的土(OCR=1~2)在加热时产生收缩(热沉降), 冷却后该变形不能全部恢复; 强超固结土在加热时产生膨胀(热回弹), 冷却后膨胀可以完全恢复; 弱超固结土的温度效应介于上述两者之间。因此, 温度对土体压缩性的影响较为复杂, 可能会使土体的压缩性增大, 也可能减小, 对于重塑软土(欠固结, OCR<1)和正常固结软土, 加热使得土体的压缩性增大。

### (4) 温压对排水通道的影响

升温加热联合真空预压技术的排水通道通常是塑料排水板, 排水板中间是塑料芯板, 两面以非织造土工织物包裹作滤膜。芯板通常采用聚丙烯和聚乙烯混合掺配制, 滤膜采用长纤热扎无纺布。上述材料的热变形温度在 90 ~ 100 °C; 因此当加热温度控制在一定值时(如 70 °C), 加热对排水板的影响不大。需要注意的是, 排水通道材料在加热情况下的耐久性问题需要开展进一步细致研究。

## 2 工程概况及设计方案

### 2.1 工程概况

试验场地位于白洋淀采蒲台地区, 场地呈梯形, 面积为 1 853 m<sup>2</sup>, 疏浚吹填淤泥为白洋淀淀区底泥, 厚度为 6 m。底泥物理性质指标如表 1 所示。颗粒组成为 0.075 ~ 0.005 mm 颗粒占 66.67%, 小于 0.005 mm 的颗粒占 30.16%。疏浚吹填底泥具有含水率高、渗透性

表1 底泥物理力学性质表

Table 1 Physical and mechanical properties of sediment

名称	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
流泥	100.54	1.41	2.85	34.4	22.4	12	6.5

低、压缩性高等特点,吹填静置数月后仍呈流塑状。

2.2 方案设计及增温装置介绍

试验区根据排水板间距分为两个单元(图3),

A单元排水板间距为0.6 m, B单元排水板间距为0.8 m, 排水板打插深度至原状土层约0.5 m处。A和B单元各布设一台真空泵,提供真空压力。首先,为防止排水板淤堵或泥浆翻涌,试运行阶段真空度采用逐级加载的方式,初级加载为30 kPa,时间为24 h,后续为60 kPa,时间为24 h,最后稳定在85 kPa左右。增温加热联合真空预压邻区为常规真空预压区,试验条件与B单元一致。



(a) 人工插板照片



(b) 现场密封照片

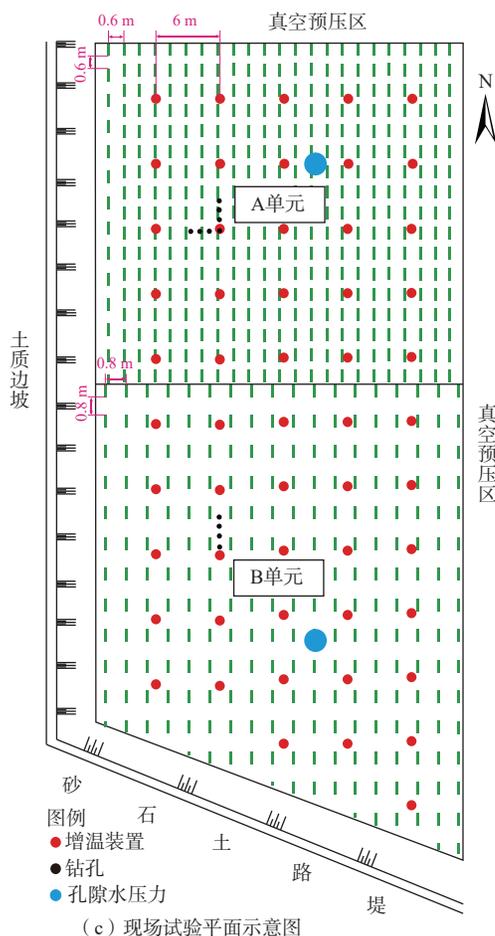


图3 增温加热联合真空预压试验场地示意图

Fig. 3 Plan of temperature increasing heating combined with vacuum preloading test site

增温装置采用一种间歇式温致相变汽化发生器<sup>[26]</sup>(图4),呈圆柱形,长66 cm,直径为8 cm,该装置主要由上下两部分组成,上部分为基座,下部分为发热体,发热体上开设喷气孔,高温气体对底泥产生增温作用,加快底泥的排水固结。将增温装置垂直插入到底泥底部,埋深约6 m,平面呈正方形,间距为6 m(图3)。由于真空压力随深度的递减规律,并结合图1压力与水汽化温度之间的关系,加热装置温度设定为70 °C运行2 min,间歇10 min,试运行阶段开始加热增温。

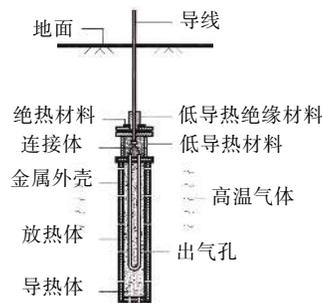


图4 增温装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of warming device

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 膜下真空度

抽真空前期为防止泥浆翻涌、排水板淤堵或形成土柱等问题, 真空度维持在 30 ~ 60 kPa, 48 h 后真空度逐渐增加至 85 kPa 左右, 但 B 单元南侧为土石方坝, 由碎石土压实组成, 密封性较差, 导致 B 单元膜下真空度无法达到 80 kPa 以上, 因此在 B 单元增加一台射流泵, 膜下真空度逐渐提高至 85 kPa 左右。(图 5)。

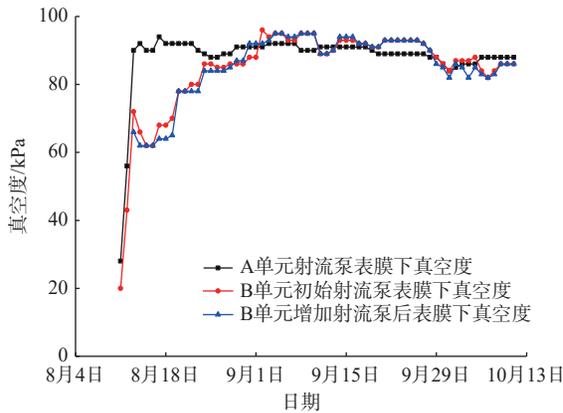


图 5 膜下真空度  
Fig. 5 Under film vacuum

#### 3.2 沉降量

试验处理周期为 61 d, 对试验区进行网格密度为 1 m × 3 m 的高程点测量(图 6), 同时, 根据日沉降量监测数据绘制沉降曲线(图 7), 在相同的时间内, A 单元沉降量为 1.71 m, B 单元沉降量为 1.66 m, 常规真空预压单元沉降量为 0.58 m, 增温加热联合真空预压可大幅度提高底泥的固结沉降量, 体积压缩约为常规真空预压的 3 倍。针对 A、B 单元而言, 初始阶段 A 单元沉降速率大于 B 单元, 但随着沉降的进行, 二者最终沉降差逐渐减小, 反映在试验前期为较小的排水板间距可实现土体的快速固结沉降, 但受排水板有效排水半径的影响, 最终的脱水固结效果相差较小, 绝大

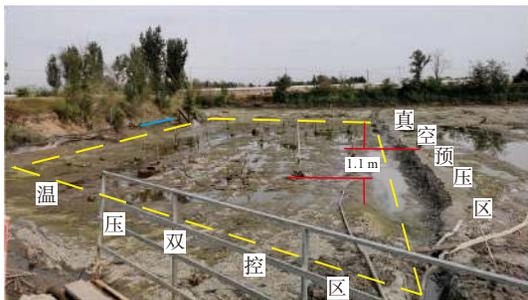


图 6 现场处理照片  
Fig. 6 Site processing photos

多数研究者认为当排水板间距小于 0.7 m 时, 排水板间距将不再影响底泥的固结沉降<sup>[27]</sup>。因此, 在排水板有效排水半径范围内, 排水板间距大小对底泥最终的脱水效果基本无影响, 排水板有效半径主要受两种因素影响, 一是排水板自身的性能, 包括排水板板芯和滤膜的物理力学性能<sup>[28]</sup>, 其次是土体的成分、结构和物理力学性质等<sup>[29]</sup>。

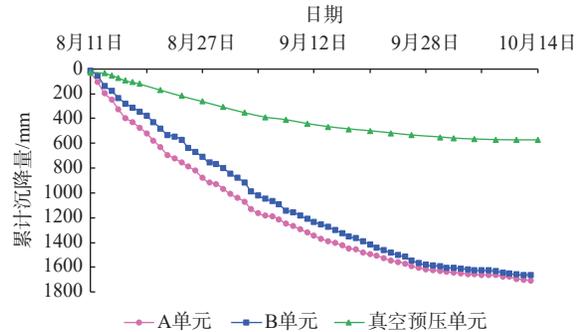


图 7 增温加热区与真空预压区累计沉降曲线  
Fig. 7 Cumulative settlement curve of heating zone and vacuum preloading zone

#### 3.3 不均匀沉降

增温加热联合真空预压技术脱水后的淤泥出现不均匀沉降现象(图 8), 底泥表面整体呈凹凸不平状, 主要表现为以增温装置地表投影为沉降中心, 距离越远沉降量越小, 由于 A 单元北边缘 2 个增温装置和 B 单元中部 1 个增温装置失效, 该点位底泥顶面表现为明显的凸起, 其他地区仍呈凹凸不平状。如何减小或消除增温加热技术产生的差异沉降, 需要进一步研究, 从真空预压和电渗真空预压消除不均匀沉降的研究成果来看, 可从改变增温装置的布设形式、埋设深度、增温间歇时间、高低温循环加热等方式来实现。

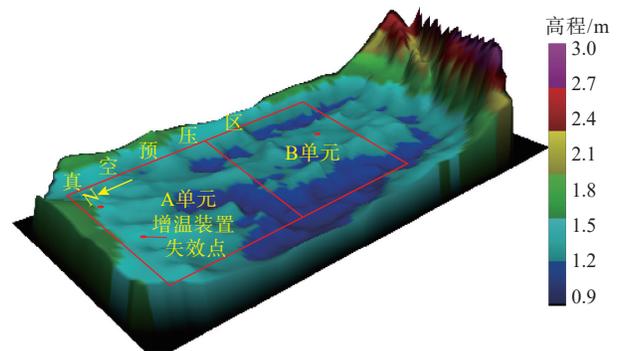


图 8 增温加热联合真空预压区底泥顶面高程三维图  
Fig. 8 Three dimensional elevation of sediment top surface in heating and vacuum preloading area

### 3.4 孔隙水压力

在 A、B 单元深 2、4 m 处分别埋设孔隙水压力监测仪, 根据孔隙水压力变化曲线(图 9)可知, 8 月 11 日开始满载抽真空, 8 月 20 日未增温之前, 由于覆水影响, 孔隙水压力有所增大, 但随着真空压力向下传递, 孔隙水压力逐渐减小, 但减小速率较为缓慢, 而 A 单元 4 m 深处的孔隙水压力从开始便急剧减小, 其原因可能是距离排水板较近, 导致孔隙水压力变化异常。

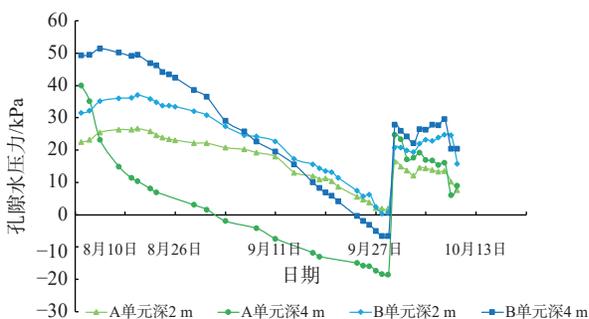


图 9 A、B 单元不同深度孔隙水压力变化曲线

Fig. 9 Variation curves of pore water pressure at different depths of units A and B

开始增温之前, 相同深度下 A 单元的孔隙水压力小于 B 单元的孔隙水压力, 主要是因为 A 单元排水板间距小于 B 单元, A 单元排水板间距较小, 真空压力传递较快, 孔隙水压力较小。8 月 20 日开始增温, 增温后孔隙水压力有所增大, 主要是因为增温导致水分子动能增加, 液态水汽化, 孔隙扩张, 孔隙水压力有所增大, 随着孔隙水被排出, 孔隙水压力消散速率和幅度明显增加。B 单元 4 m 深处由于温度较高, 孔隙水压力消散更快, 因此, 温度升高有利于孔隙水消散, 加快了土体的脱水固结。当停止增温后, 孔隙水压力出现明显的回弹, 2 m 深处的孔隙水压力回弹了 17.4 kPa, 4 m 深处的孔隙水压力回弹了 34.6 kPa, 反映孔隙水压力对温度变化具有较高的敏感性, 且温度越高回弹量越大, 因此, 在停止增温之前, 应采用逐级降

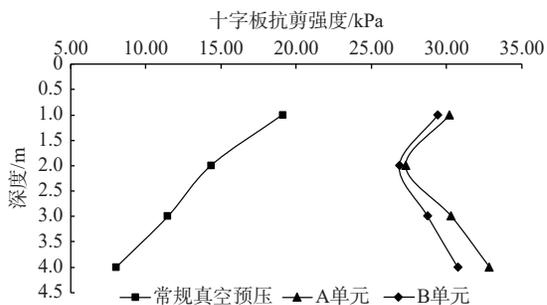


图 10 十字板抗剪强度随深度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of vane shear strength with depth

温的方法, 防止孔隙水压力过渡回弹而引起的残余沉降量过大。

### 3.5 试验后底泥指标变化

处理后的底泥物理力学性质如表 2 所示, 常规真空预压处理后的底泥含水率为 53.20%, 增温加热联合真空预压技术处理后的底泥含水率为 34.59%, 含水率明显降低, 较常规真空预压降低了 18.6%。同时, 由于 A 单元排水板间距较小, 底泥固结效果较好, 其密度有所增大, 孔隙比有所减小。经常规真空预压处理后的底泥呈软塑状, 而经增温加热联合真空预压技术处理后的底泥呈可塑状。

表 2 处理后底泥物理力学性质表

Table 2 Physical and mechanical properties of treated sediment

单元	含水率 /%	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	液性指数
常规真空预压	53.20	1.65	1.33	38.9	24.8	14.1	0.95
增温加热A单元	33.48	1.79	1.13	37.1	22.7	14.4	0.45
增温加热B单元	35.96	1.78	1.18	39.3	25	14.3	0.55

十字板抗剪强度是评价底泥处理效果的重要指标(图 10), 常规真空预压处理后的底泥抗剪强度随深度增加而减小, 整体抗剪强度为 13.23 kPa, 而经增温加热联合真空预压处理后的底泥, 受增温效果的影响, 整体抗剪强度为 29.57 kPa, 较常规真空预压增长了 2.2 倍。增温装置埋深约为 4 m, 受底部增温效果的影响, 4 m 深处的底泥抗剪强度大于顶面底泥抗剪强度, 反映底泥抗剪强度随温度升高增长较大; 同时, 受增温装置有效半径影响, 距离增温装置越近, 温度相对越高, 底泥脱水固结效果越好, 抗剪强度越大。当距离增温装置在 2 m 左右时, 底泥抗剪强度曲线出现明显的拐点, 即: 抗剪强度随深度增加而减小的规律变为距增温加热装置越近抗剪强度越大的特点。因此, 受真空度随深度递减与增温加热作用的耦合影响, 底泥抗剪强度整体表现为上下大、中间小的特征。除此之外, 由于 A 单元排水板间距较小, 同等深度下, 底泥抗剪强度略大于 B 单元。

### 3.6 固结度

固结度表示土的固结程度, 是地基处理效果的重要检测指标, 试验结束后, 依据《吹填土地基处理技术规范》(GB/T 51064—2015) 计算底泥的固结度。

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + t\beta} \quad (1)$$

$$S_\infty = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

式中:  $S_t$ ——满载  $t$  时刻的实测沉降量/mm;

$S_0$ ——满载开始时的实测沉降量/mm;  
 $t$ ——从满载时刻算起的预压时间/s;  
 $S_\infty$ ——最终沉降量/mm;  
 $\alpha$ 、 $\beta$ ——计算参数, 根据实测资料确定(图 11)。

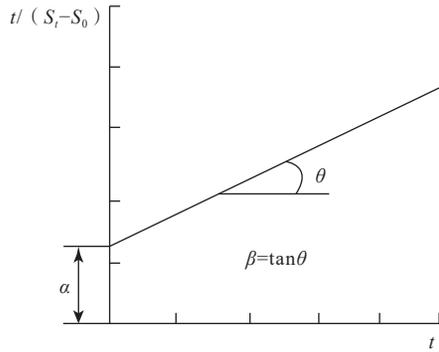


图 11  $\alpha$ 、 $\beta$  值确定示意图

Fig. 11 Determine  $\alpha$ ,  $\beta$  schematic diagram of values

因此, 固结度计算可根据:

$$U'_{tz} = \frac{S_t}{S_\infty} \quad (3)$$

式中:  $U'_{tz}$ ——固结度/%。

如表 3 可知, A 单元最终固结度为 85.4%, B 单元最终固结度为 83.3%, A 单元底泥固结度略大于 B 单元, 主要是因为 A 单元排水板间距小于 B 单元所致。

表 3 A、B 单元固结度计算表

Table 3 A and B unit consolidation degree calculation table

单元	$S_0$ /mm	$\alpha$	$\beta^{-1}$	$S_t$ /mm	$U'_{tz}/\%$
A	850	1 895.0	769.2	1 382.7	85.4
B	811	2 814.4	714.3	1 270.6	83.3

### 3.7 增温装置的有效半径

为了厘定增温装置的有效半径, 现以增温装置为中心, 向下和向外进行钻孔取样, 取样间距为 1 m, 测定土体含水率变化规律(图 12), 在横向上, 距离增温装置越远, 土体含水率越大, 当距离超过 2 m 时, 含水率随距离变化曲线呈水平状, 变化较小; 在纵向上, 土体含水率变化特征与横向上基本一致。因此, 从土体含水率变化规律可知, 增温装置的有效半径约为 2 m。

从沉降量上来看, 以增温装置地表投影为中心(A 点和 B 点), 统计 A、B 点半径差为 1 m 的圆或圆弧内的高程变化规律(图 13), 各圆或圆环内高程变化如表 4 所示。统计各圆内高程与增温装置距离变化关系, 如图 14 所示, 距离增温装置越远, 地表高程越大, 当距离超过 3 m 时, 地表高程变化曲线呈水平状, 地势相对平缓。因此, 从沉降量来看, 增温装置的有效半径约 3 m。

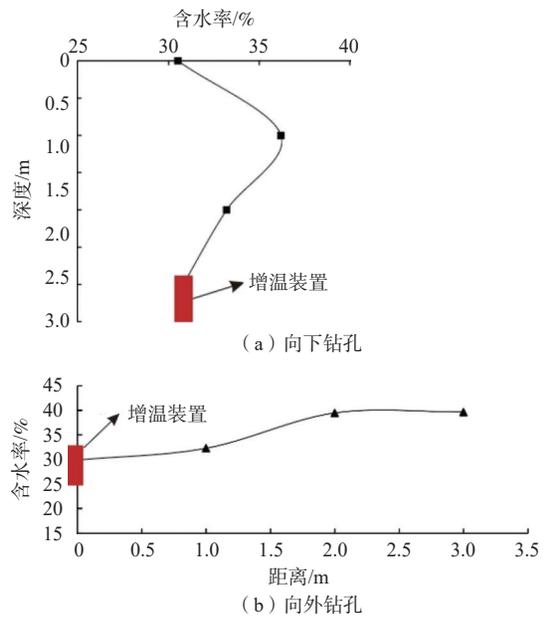


图 12 含水率与深度(距离)变化曲线

Fig. 12 Variation curve of water content and depth (distance)

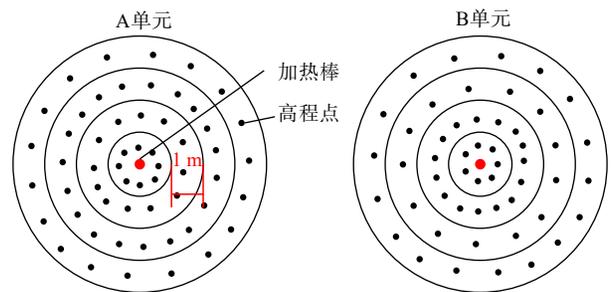


图 13 标高测量点示意图

Fig. 13 Schematic diagram of elevation measuring points

综上所述, 从底泥含水率、地表高程与增温装置的距离变化规律可知, 该增温装置的有效半径为 2 ~ 3 m, 由此可知, 单个增温装置的有效加固深度约为 3 m。而在一定的深度范围内, 根据增温装置的有效半径进行埋设, 其结构稳定性和加热温度以及热传导作用受底泥厚度变化影响较小, 其有效加固深度受真空预压有效加固深度的影响较大, 以往绝大多数学者认为真空预压的有效加固深度一般为 10 m<sup>[30]</sup>, 但随着真空预压理论的完善和排水板新材料的研发, 许多学者研究发现真空预压的加固深度可达 20 m<sup>[31]</sup>, 甚至是 25 m 左右<sup>[32]</sup>。但随着加固厚度的增大, 底泥将产生较大的沉降, 对增温装置的导线传输技术要求较高, 其有效加固深度需要进一步的研究和验证。

## 4 结论

(1) 从增温加热联合真空预压理论出发, 阐述了

表 4 增温中心不同距离点高程

Table 4 Elevation of points at different distances from the heating center

A点	高程/m				B点	高程/m			
	0~1 m 范围	1~2 m 范围	2~3 m 范围	3~4 m 范围		0~1 m 范围	1~2 m 范围	2~3 m 范围	3~4 m 范围
1.06	0.95	1.29	1.19	1.16	1.09	1.10	1.06	1.02	1.06
	0.98	1.15	1.18	1.06		1.20	1.16	1.17	1.08
	1.01	1.03	1.09	1.06		1.20	1.16	1.23	1.13
	1.03	0.90	1.03	1.15		1.01	1.15	1.27	1.16
	1.21	1.17	1.14	1.16		1.10	1.15	1.29	1.36
	1.23	1.09	1.15	1.15		1.08	1.16	1.14	1.29
	1.19	1.11	1.22	1.14		1.14	1.23	1.19	1.32
	1.15	0.96	1.09	1.08			1.22	1.15	1.25
		0.99	1.18	1.08			1.10	1.24	1.11
		1.20	1.09	0.97			1.21	1.23	1.12
		1.12	1.15	1.11			1.14	1.26	1.16
		1.14	0.97	1.16			1.21	1.26	1.20
			1.00	1.07			1.21	1.17	1.21
			1.01	1.11			1.21		1.32
			1.10	1.23			1.13		1.34
			1.16	1.26					1.30
			1.17	1.21					1.07
			1.30	1.20					
			1.23						

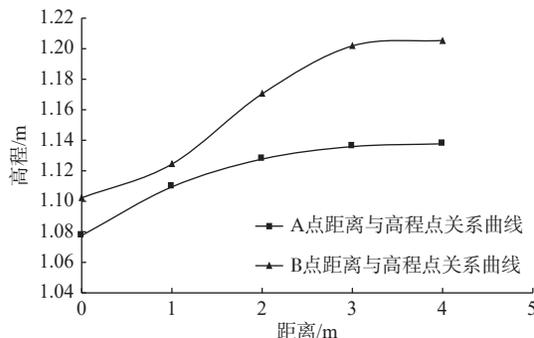


图 14 距增温装置地表投影中心高程变化曲线

Fig. 14 Elevation change curve from surface projection center of temperature increasing device

温度和压力对土中水、土体渗透性、土的压缩性和排水通道的影响,为增温加热联合真空预压技术在底泥排水固结应用中提供理论支持。

(2)增温加热联合真空预压技术相对常规真空预压,处理周期缩短为 61 d,沉降量明显增加,体积压缩是常规真空预压的 3 倍,底泥含水率为 34.59%,较常规真空预压降低了约 18.61%,抗剪强度增长了 2.2 倍,固结度可达 83.3%~85.4%,但也存在不均匀沉降量现象,其影响因素有待进一步研究。

(3)根据饱和土的有效应力理论,孔隙水消散,有

效应力增加,在真空负压环境下,孔隙水压消散速率对温度具有较高的敏感性,温度越高,孔隙水压消散的越快。同样,停止增温加热时,孔隙水压力产生回弹,温度越高,回弹量越大。

(4)根据本次现场试验研究,初步厘定了该增温装置的有效半径为 2~3m,为后期工程应用提供技术指导。

参考文献 (References) :

[ 1 ] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2): 127 - 146. [ ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127 - 146. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] 岑仰润.真空预压加固地基的试验及理论研究[D].杭州:浙江大学,2003. [ CEN Yangrun. Vacuum preloading: experiment and theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese with English abstract) ]

[ 3 ] 王洪余.真空预压技术在天津港软基处理中的应用[J].山西建筑,2010,36(5): 100 - 101. [ WANG Hongyu. The application of vacuum preloading technique in soft soil foundation treatment of Tianjin Port[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(5): 100 - 101. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] 曾芳金,位会星,王军,等.深层增压式真空预压法处理软土地基室内模型试验[J].工业建筑,2014,44(7): 90 - 94. [ ZENG Fangjin, WEI Huixing, WANG Jun, et al. Laboratory model test of treating soft soil ground using deep air-boasted vacuum preloading[J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 90 - 94. (in Chinese with English abstract) ]

[ 5 ] 沈浩.无砂垫层真空预压法在地基处理中的应用——以台州湾循环经济产业集聚区三山涂涂面整理一期工程为例[J].中国水运(下半月),2021,21(1): 156 - 158. [ SHEN Hao. Application of vacuum preloading method without sand cushion in foundation treatment: Taking the first phase of Sanshan coating finishing project in Taizhou Bay circular economy industrial cluster as an example[J]. China Water Transport, 2021, 21(1): 156 - 158. (in Chinese) ]

[ 6 ] 黄臣瑞,林伟斌.真空-堆载联合预压法加固软土地基的效果分析[J].工程建设,2021,53(1): 29 - 33. [ HUANG Chenrui, LIN Weibin. Analysis on effect of vacuum and preloading method on mollisol foundation teinforcement[J]. Engineering Construction, 2021, 53(1):

- 29-33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 李明东,潘耀森,郎钞棚,等.真空预压法处理吹填超软地基10 a进展及展望[J].*科学技术与工程*,2020,20(1):15-22. [ LI Mingdong, PAN Yaosen, LANG Chaopeng, et al. Review and outlook in improvement of hydraulic fill via vacuum preloading in the past ten years[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(1): 15-22. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 刘飞禹,李哲,袁国辉,等.真空预压联合间歇电渗加固疏浚淤泥试验研究[J].*土木与环境工程学报(中英文)*,2021,43(5):1-9. [ LIU Feiyu, LI Zhe, YUAN Guohui, et al. Experimental study on dredged slurry improvement by vacuum preloading combined with intermittent electroosmotic[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(5): 1-9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 朱栋梁,林融冰,柏巍,等.电渗-真空预压复合处理吹填淤泥试验研究[J].*中国农村水利水电*,2019(5):170-174. [ ZHU Dongliang, LIN Rongbing, BAI Wei, et al. The effects on the fresh hydraulic fill mud under the electroosmosis in combination with vacuum preloading method[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(5): 170-174. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 陶海冰,刘干斌,谢康和,等.竖井地基热排水固结本构模型及试验验证[J].*岩土工程学报*,2015,37(6):1077-1085. [ TAO Haibing, LIU Ganbin, XIE Kanghe, et al. A constitutive model for thermal consolidation with vertical drains and its experimental verification[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1077-1085. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, CHAIPRAKAIKEOW S. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain during the preloading process[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(6): 359-370.
- [ 12 ] DEMARS K R, CHARLES R D. Soil volume changes induced by temperature cycling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(2): 188-194.
- [ 13 ] CEKEREVAC C, LALOU L, VULLIET L. A novel triaxial apparatus for thermo-mechanical testing of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2005, 28(2): 161-170.
- [ 14 ] KUNTIWATTANAKUL P, TOWHATA I, OHISHI K, et al. Temperature effects on undrained shear characteristics of clay[J]. *Soils and Foundations*, 1995, 35(1): 147-162.
- [ 15 ] BRUYN D D, THIMUS J F. The influence of temperature on mechanical characteristics of Boom clay: The results of an initial laboratory programme[J]. *Engineering Geology*, 1996, 41(1/2/3/4): 117-126.
- [ 16 ] SULTAN N, DELAGE P, CUI Y J. Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(2/3): 135-145.
- [ 17 ] 范高飞,刘干斌,黎明,等.基于非等温管道流竖井地基热排水固结模拟[J].*岩土力学*,2015,36(增刊1):614-618. [ FAN Gaofei, LIU Ganbin, LI Ming, et al. Simulation of consolidation by vertical thermal drain based on non-isothermal conduit flow[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup 1): 614-618. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 王天园,邓岳保,毛伟赟,等.加热对软土地基真空预压排水固结的影响研究[J].*水文地质工程地质*,2020,47(1):62-68. [ WANG Tianyuan, DENG Yuebao, MAO Weiyun, et al. A study of the effect of heating on vacuum preloading for soft ground[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 62-68. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 尹铁锋,刘干斌,郭桢.宁波地区典型软黏土热固结特性理论与试验研究[J].*建筑结构*,2014,44(8):66-69. [ YIN Tiefeng, LIU Ganbin, GUO Zhen. Theoretical and experimental study on thermal consolidation characteristics of typical soft clay in Ningbo region[J]. *Building Structure*, 2014, 44(8): 66-69. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] DERJAGUIN B V, KARASEV V V, KHROMOVA E N. Thermal expansion of water in fine pores[J]. *Progress in Surface Science*, 1992, 40(1/2/3/4): 391-392.
- [ 21 ] DELAGE P, SULTAN N, CUI Y J. On the thermal consolidation of Boom clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(2): 343-354.
- [ 22 ] 王媛,施斌,高磊,等.黏性土渗透性温度效应实验研究[J].*工程地质学报*,2010,18(3):351-356. [ WANG Yuan, SHI Bin, GAO Lei, et al. Laboratory tests for temperature effects of clayey soil permeability[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3): 351-356. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] ERIKSSON L G. Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays[C]//Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 1989: 2087-2090.
- [ 24 ] LALOU L, CEKEREVAC C. Numerical simulation of the non-isothermal mechanical behaviour of soils[J].

- [Computers and Geotechnics](#), 2008, 35(5): 729 – 745.
- [25] ABUEL-NAGA H M, MLORENZO G A, BERGADO D T. Current state of knowledge on thermal consolidation using prefabricated vertical drains[J]. *Geotechnical Engineering Journal of the Seags & Agssea*, 2013, 44(4): 132 – 141.
- [26] 金亚伟, 王军, 程瑾, 等. 一种增压热敏汽化相变固结法及其热脱敏间歇式蒸发器: 中国, CN112281807A [P]. 2021-01-29. [ JIN Yawei, WANG Jun, CHENG Jin, et al. A pressurized thermal sensitive vaporization phase change consolidation method and its thermal desensitization intermittent evaporator: China, CN112281807A [P]. 2021-01-29. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 陈伟东, 丁明武, 陈平山. 不同排水板间距处理新吹填淤泥效果分析[J]. *施工技术*, 2014, 43(11): 119 – 121. [ CHEN Weidong, DING Mingwu, CHEN Pingshan. The effect analysis of newly dredged sludge treatment with different drainage board spacing[J]. *Construction Technology*, 2014, 43(11): 119 – 121. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 王婧, 李涛. 塑料排水板芯板及滤膜物理力学性能研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊1): 125 – 129. [ WANG Jing, LI Tao. Physical and mechanical properties of core and filter membrane for plastic vertical drains[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Sup 1): 125 – 129. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 王景环, 陈志成, 周俊磊, 等. 影响塑料排水板加固效果因素的探讨[J]. *华东交通大学学报*, 2008, 25(3): 14 – 17. [ WANG Jinghuan, CHEN Zhicheng, ZHOU Junlei, et al. Research on factors affecting the consolidation by using prefabricated drains[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2008, 25(3): 14 – 17. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 吴迪, 孙田. 真空预压地基处理的加固深度研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2011, 9(6): 51 – 54. [ WU Di, SUN Tian. Research on reinforcement depth for foundation treatment by vacuum preloading[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2011, 9(6): 51 – 54. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 闫澍旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 774 – 778. [ YAN Shuwang, HOU Jinfang, CHENG Dongdong. Effective depth of vacuum preloading for reinforcing soft soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 774 – 778. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 吴春勇. 真空预压加固深度分析与探讨[J]. *东北水利水电*, 2010, 28(12): 1 – 3. [ WU Chunyong. Analysis and discussion of reinforcement depth in vacuum preloading[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2010, 28(12): 1 – 3. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 宗 爽