

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211120020

太阳能热排水固结模型试验研究*

邓岳保¹, 韩逸冬¹, 郑良科¹, 郑荣跃¹, 姚燕明²

(1. 宁波大学滨海城市轨道交通协同创新中心, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 太阳能热排水固结技术是利用太阳能对软土地基进行加热,再结合竖井排水固结,由此达到提升软基处理效果的目标。为检验该技术加固效果,开展竖井地基排水固结模型试验,对比测试常规堆载预压和太阳能热排水固结加固软基的沉降和孔压发展规律,结果发现:太阳能在模型地基中形成温度场,使地基土温度平均上升了15℃;太阳能循环变温引起土中孔压波动,其幅度达10 kPa;太阳能加快了软土地基排水固结过程,使模型地基土体固结系数提升了1.54倍,土层固结度达到90%所需时间减少34%;太阳能加热还使模型地基最终沉降增大12%,这对于加速软基沉降稳定、减小工后沉降有积极意义。

关键词: 软基处理; 排水固结; 竖井; 太阳能; 模型试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0905-08

Model Test Research on Preloading Combined with Solar Thermal Drainage Consolidation Technology

DENG Yuebao¹, HAN Yidong¹, ZHENG Liangke¹, ZHENG Rongyue¹, YAO Yanming²

(1. Ningbo University, Coastal Urban Rail Transit Collaborative Innovation Center, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Rail Transit Group Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: Solar thermal drainage consolidation technology uses solar energy to heat the soft soil foundation, combined with shaft drainage and consolidation, thereby improving the treatment effect of the soft foundation. To test the reinforcement effect of this technology, a model test of drainage consolidation of shaft foundation was carried out to compare and test the settlement and pore water pressure development law of conventional preloading and solar thermal drainage consolidation of soft foundation. The results show that the solar energy forms a temperature field, which increases the temperature of the foundation soil by an average of 15°C; the solar cycle temperature change caused the pore pressure in the soil to fluctuate with an amplitude of 10 kPa; the solar energy accelerates the process of drainage and consolidation of soft soil, and increases the consolidation coefficient of the model foundation by 1.54. The time required for soil consolidation to reach 90% is reduced by 34%; solar heating also increases the final settlement of the model foundation by 12%, which has a positive significance for accelerating the stability of soft foundation settlement and reducing post-construction settlement.

Keywords: soft ground improvement; drainage consolidation; vertical drain; solar energy; model test

* 收稿日期:2021-10-04;修回日期:2021-12-17

基金项目:浙江省基础公益研究计划(LGG21E080005)资助

作者简介:邓岳保(1983—),男,教授,博士。主要从事软土特性、软基处理及能源岩土工程研究。

E-mail: 254967808@qq.com

引言

在沿海地区基础设施建设以及海洋开发过程中,经常面临含水率高、孔隙比大、压缩性高、渗透性低的软土地基。软基沉降时间长,易产生较大沉降和不均匀沉降,甚至失稳破坏。所以软基通常要进行处理,以提高软土抗变形能力和强度。排水固结法是软基处理应用较多的一种方法。该法在低渗透性的软黏土地基中应用时,排水固结费时较长,甚至有可能达不到预期效果。国内外研究人员一直在尝试地基处理中新工艺和新方法研究^[1],我国“一带一路”及海洋开发战略进一步突出了相关研究的迫切性和必要性。

热排水固结法是近年来提出并逐渐引起关注的软基处理方法^[2]。该法在传统竖井排水固结基础之上对地基进行加热,由此达到改善土体固结性状并加速软基固结的目标。H.M.Abu-el-Naga等^[3]和S.Chai-prakai-keow^[4]首先提出热排水固结处理法,并通过模型试验测试了加固效果^[5]。C.Pothiraksanon等^[6]针对曼谷黏土开展天然地基试验,对比了常规排水固结和增设U型导热管的热排水固结(加热至70℃)加固效果,结果显示后者能加速土体排水固结过程,反演分析表明土体固结系数提高了1.7倍。国内方面,陶海冰等^[7]研究了软土温度效应,并开展竖井地基热排水固结模型试验分析该法的加固机理。刘干斌等^[8]基于自主设计的模型试验系统,针对宁波软黏土开展竖井地基热排水固结模型试验,表明热排水固结法固结度达到90%所需时间较常温方法所需时间减少。张佩^[9]提出采用热、化学调理联合真空预压对填埋污泥进行减量处置方法,并通过模型试验研究了填埋市政污泥在化学调理作用下的排水效果。邓岳保等^[10-13]设计研发了多种带升温装置的软土地基模型试验装置,对比测试了堆载预压联合加热、真空预压联合加热以及真空预压联合间歇性加热等处治方法的加固效果。

上述研究表明,热排水固结法可缩短软基处理工期,提升软基加固效果。但热排水固结法借助电能加热会消耗大量电能,且造价较高。另外,对于近海工程以及海岛开发来说,有时交通闭塞,用电得不到保证。胡黎明等^[14]发明了一种利用太阳能的电渗固结软基处理方法,该法通过设置阳极、阴极实现对软基进行间歇电渗处理,由此加速软基固

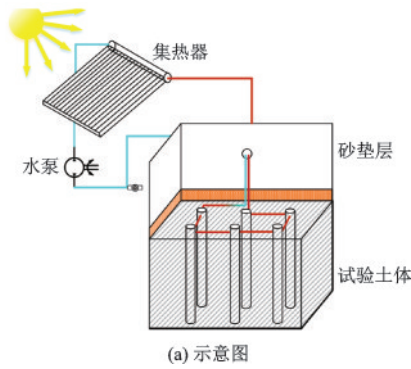
结;黄健钧等^[15]发明了一种电渗与强夯联合的软基加固装置,该装置可利用太阳能进行电渗固结,进而减少电耗能和碳排放;董建华等^[16]发明了一种边坡自排水电渗锚杆及施工方法,该法可实现锚固、排水和坡体固结的功能。

综上所述,将太阳能应用到地基加固已有初步设想,但未见太阳能热排水固结技术报道。围绕太阳能热排水固结技术申请发明专利^[17],并探讨了该技术的施工方法^[18]。但由于太阳能热排水固结法作用机理复杂,涉及土力学、渗流力学、热力学等相互耦合,其实际效果还有待进一步研究。对此,开展太阳能热排水固结模型试验,分析太阳能热排水固结法作用机理及加固效果。

1 试验方案与设备

为测试竖井地基联合太阳能热排水固结法加固软土地基的效果,设计两组模型试验。一组为常规竖井地基模型试验,另一组是竖井地基联合太阳能热排水法加固软基模型试验。常规法是通过打设塑料排水板,在地基中形成竖向排水通道(竖井),再通过施加压力对地基土体进行排水固结。太阳能热排水固结法是在常规竖井排水法的基础上,采用太阳能光转热的原理对水加热,与预先设置的热水管形成循环水并对地基土体进行加热,再通过堆载预压对土体进行排水固结,如图1(a)所示。试验中测试太阳能在地基中产生的热量分布及其发展变化,监测模型地基孔隙水压力和沉降发展过程,由此来分析太阳能加热对软土地基排水固结过程的影响。

图1(b)所示为太阳能热排水固结模型试验系统实物图,可分为五个部分:模型桶、太阳能热水循环装置、排水系统、加载装置和监控装置。模型桶长、宽、高尺寸分别为100、60、120 cm,材料为不锈钢;在1/3和2/3高度处分别设置两道角钢圈梁,增大模型桶的抗变形能力。太阳能热水循环装置包括太阳能热水器、导热管和水泵。太阳能面板吸收太阳能转化为热能,以水媒介储存;导热管由金属波纹管弯折成型,预先埋入地基,两端分别与太阳能热水器进出水管相连;水泵使水箱、水管和导热管中的水循环流动,由此对地基土体循环加热。排水系统包括竖向排水通道和水平向排水通道。前者是在地基内设置塑料排水板,由此形成竖向排水



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 模型试验装置

Fig.1 Model test system

井;后者在地表铺设砂垫层,形成地表透水边界。在堆载作用下,地基土中形成孔压梯度迫使软土中的水进入竖向排水通道和地表排水边界。

预压荷载通过砝码堆载和杠杆加载完成;后者包括带孔盖板(透水)、千斤顶、反力架、杠杆(加载比1:10)、吊篮和砝码。监控装置包括压力计、孔隙水压力计、百分表和温度计等。压力计用来确定竖向施加荷载;孔压计测试地基土中孔压和温度;百分表测试地表沉降;温度计测试大气环境温度和水温。

2 试验过程

试验用土取自宁波轨道交通某基坑工程,为滨海地区典型淤泥质软土。土样液限 $w_L=42\%$,塑限 $w_p=20\%$;含水率 $w=40\%\sim 42\%$;孔隙比 $e=1.20\sim 1.45$ 。在开始试验前,利用砂浆搅拌机对软土进行充分搅拌,然后分层填入模型桶。待地基软土填筑0.5 m高度后,将预先成型的多拱门架型导热管插入土层;导热管高度0.75 m,其底部与底板接触;然后,连接水泵和太阳能热水器,检查导热管水循环通畅,如图2所示。其后,继续填筑模型地基,填筑高度为105 cm。在模型地基表层,通过满

铺砂袋施加2 kPa预压荷载。预压一周后,土层沉降基本稳定,模型地基下降4.5 cm。其后,撤去预压荷载,取不同深度处的三个土样测试基本指标,结果见表1(平均值)。



图2 地基土中导热管设置

Fig.2 Heat pipe setting in the foundation soil

表1 试验土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of test soil samples

密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率 $w/$ %	土粒比重 d_s	孔隙比 e
1.745	41.5	2.74	1.22

在模型地基中按正方形插设6个塑料排水板,间距0.4 m,如图3所示。排水板为市场上常见的B型排水板,宽度100 mm,厚度4 mm,长度0.9 m。排水板在地基中打设深度为0.8 m,剩下0.1 m嵌入砂垫层;砂垫层厚度为0.2 m。为监测地基土中孔压和温度,在模型地基中分别埋入孔压计7个(加热组)和2个(对照组),其位置见表2。其后在模型地基四角设置开孔竖管,用来渗水以维持模型地基饱水状态。盖上开孔盖板并左右对称架设两个百分表,用来监测地基沉降过程。利用砝码在盖板上施加2 kPa荷载(预压荷载)。在桶外侧裹上保温隔热层,记录环境温度。

预压完成后,开始加载加温排水固结试验。对于常温组,首先将预压的砝码取出,安装好杠杆,挂



图3 竖向排水井设置

Fig.3 Vertical drain setting

表 2 孔压计埋设位置

编号	深度/m	离竖井距离/cm
A11	0.25	5
A12	0.25	15
A13	0.25	25
A21	0.50	5
A22	0.50	15
A23	0.50	25
A32	0.75	15
B22	0.50	15
B32	0.75	15

上吊篮和砝码(图4),通过压力计和加载面积确定加载值;第一级荷载 5 kPa,第二级荷载 12.5 kPa,第三级荷载 25 kPa;每级荷载作用 11 d。对于加热组,首先打开太阳能热水器及水泵,实现热水在地基中循环;与此同时,开始分级加载,加载过程与量值与常温组相同。全程记录试验过程中温度、孔压和地表沉降。其中温度监测包括试验环境温度、导热管水温 and 地基温度。



图 4 太阳能热排水固结模型试验

Fig.4 Model test of solar thermal drainage consolidation

3 试验数据及分析

3.1 试验数据

3.1.1 温度

常温组环境温度在 14~26 °C,地基土温度在 18~26 °C。试验场地环境昼夜温差约 5 °C,地基土昼夜温差 3 °C。加热组温度变化如图 5 所示,由图 5 可知:(1)热水管温度与环境温度变化趋势一致,热水管最高温度出现时刻(16时)比环境最高温出现时刻(14时)晚 2 h;热水管最高温度 50~60 °C,热水

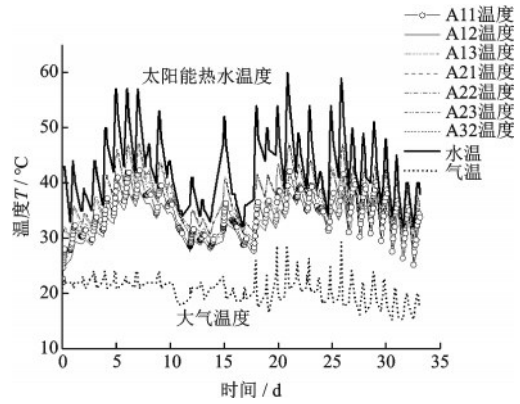


图 5 温度随时间变化

Fig.5 Variation of temperature with time

管最低温度为 35~40 °C。(2)模型地基土体初始温度 22 °C,在太阳能加热条件下土体呈现循环加热规律。土体温度变化规律与热水管温度变化规律一致,土体最高温度出现时刻(18时)比热水管最高温出现时刻(16时)晚 2 小时。地基土从早上 6 点开始进入升温状态,到 18 点温度达到顶峰,之后逐渐降温至第二天 6 点。土体最高温度为 36~47 °C(大气最高温度 25~30 °C),最低温度为 30~35 °C(大气温度最低温度 14~22 °C)。地基土单日最大温差为 8 °C。(3)地基土中的温度空间分布总体较为均匀,离热水管越近温度略高;埋深越深,温度相对较低,昼夜温差也越小。

3.1.2 孔压

常温状态下,土体孔压在加载后快速上升,随后逐渐消散,消散速率随固结时间延长而减缓;昼夜温差对孔压波动有小幅影响,其波动值在 1 kPa 以内。加热组模型地基中不同位置处的孔压分布及其发展变化如图 6 所示。由图 6 可知:

(1)加载后土中孔压快速上升,然后随时间逐渐消散,消散速率随固结时间延长而减缓。(2)第一

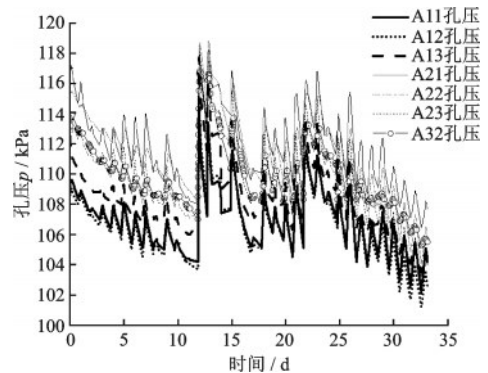


图 6 孔压随时间变化

Fig.6 Variation of pore water pressure with time

级热力耦合作用下最高孔压为 117 kPa, 11 d 之后孔压下降约 15 kPa(平均值); 第二级热力耦合作用下最高孔压为 120 kPa, 11 d 之后孔压变化约 12 kPa; 第三级热力耦合作用下最高孔压为 117 kPa, 11 d 后降到 105 kPa, 孔压变化约 12 kPa。(3) 土中孔压受循环加热影响明显, 孔压波动趋势与土中温度变化趋势一致。第一级荷载作用下, 孔压波动在固结初期幅度较小, 约 1 kPa; 随着固结进行, 孔压波动幅度越来越大, 达到 2~3 kPa。随着加载压力的增大, 加热引起的孔压波动幅度进一步增大, 达到 8~10 kPa。(4) 离竖井相同距离情况下, 埋深越深, 孔压峰值越大。在浅层土体中, 由于距离砂垫层近, 排水距离短, 孔压消散速度较快, 孔压峰值低。此外, 离热水管近的孔压峰值比距离远的孔压峰值大 0.6~1.3 kPa。

3.1.3 沉降

两组试验地表沉降过程如图 7 所示。由图 7 可知: (1) 地基沉降在加载后迅速增大, 其后沉降速率逐渐趋缓。(2) 常温组第一级荷载作用 11 d 后沉降约 12 mm, 第二级荷载作用 11 d 之后沉降量达 21 mm, 第三级荷载作用 11 d 后沉降达 26 mm。(3) 加载联合加温情况, 地基沉降速率更快。具体来说, 第一级荷载作用 11 d 后沉降约 13 mm, 第二级荷载作用 11 d 后沉降达 23 mm, 第三级荷载作用 11 d 之后沉降量达 30 mm。(4) 在太阳能加热条件下, 固结初期沉降曲线斜率较常温下曲线斜率大, 说明加温可有效加快土样固结速率; 在固结后期, 加热组沉降速率变小, 表明加热使地基沉降稳定加速。同时, 加热还导致了约 4 mm 的附加沉降, 这与土体结构在高温情况下屈服强度减小有关。(5) 相较于第一级荷载, 第二级荷载情况下温度效应更明显, 表明软土的热固结性状与荷载水平有关。(6) 循环加热过程中发现, 在固结沉降后期阶段, 白天地基沉降几乎不变的情况

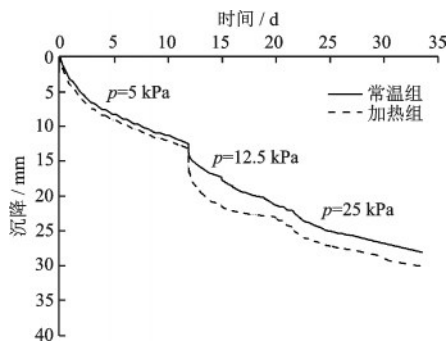


图 7 沉降随时间变化

Fig.7 Variation of settlement with time

下, 夜间会重新开始沉降; 这与土体热胀冷缩属性以及热超静孔压的消散有关。

3.2 理论分析

3.2.1 沉降

在常温状态下, 根据 $e-p$ 曲线法, 土体在竖向压力作用下产生的固结压缩量 S_{cq} :

$$S_{cq} = \frac{H}{1 + e_0} C_c \log \frac{p_c + \Delta p_q}{p_c} \quad (1)$$

式中, H 为固结压缩土层厚度; e_0 为土体初始孔隙比; C_c 为土的压缩指数; p_c 为土体初始有效自重应力; Δp_q 为荷载引起的附加应力增量。

加热时需考虑温度对土体先期固结压力的影响以及热胀冷缩对土体孔隙比的影响, 升温阶段土体发生“热胀”。升温阶段的固结沉降计算式为:

$$S_{cT} = \frac{H}{1 + e_0} C_e \log \left(\frac{p_c}{p_c + \Delta p_{cT}} \right) - \alpha_T \Delta T \cdot H \quad (2)$$

式中, C_e 为土体回弹指数; Δp_{cT} 表示加热引起先期固结压力 p_c 变化量; α_T 为饱和土在排水条件下的热膨胀系数, 单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

同理在降温阶段, 土体发生“冷缩”, 固结沉降计算式如下:

$$S_{cT} = -\alpha_T \Delta T \cdot H \quad (3)$$

式中, ΔT 为降温时土体的温度变化量, 取负值。

由式(1)~(3)可计算得到整个升温—降温过程中土体的总沉降量 S_c 。假设常温下土体的固结系数为 c_{v0} , 加热时固结系数为 c_{vT} 。由太沙基一维固结公式可得任意时刻的固结度 U_t :

$$U_t = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 m^2} \exp \left(-\frac{1}{4} \pi^2 m^2 \frac{c_{vT} t}{H^2} \right) \quad (4)$$

式中, t 为固结时间; $m=1, 3, 5, \dots$ 。

据此, 由固结度的定义可得任意时刻的沉降 S_t :

$$S_t = S_c \cdot U_t \quad (5)$$

3.2.2 孔压

竖向渗透方面, 基于改进太沙基一维固结理论, 升温情况下土中超静孔压计算式如下:

$$u_{pt} = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{\pi m} \sin \left(\frac{\pi m z}{2H} \right) \cdot \exp \left(-\frac{m^2 \pi^2}{4} \frac{C_v t}{H^2} \right) \quad (6)$$

式中, z 为深度; u_0 为初始超静孔压。

其中, 热力耦合状态下由加热引起的初始超静孔压由 Campanella 提出的计算式来确定^[19]:

$$u_{T0} = \frac{\Delta T (n_v (\alpha_f - \alpha_s) + \alpha_{st})}{m_v} \quad (7)$$

式中, α_t 和 α_s 分别为水和土体膨胀系数; α_{st} 为由于土的结构在温度作用下产生的体积改变系数; n_v 为孔隙率; m_v 为土的体积压缩系数。

对于径向渗流, 根据改进的经典竖井地基固结理论^[20], 地基中孔压消散式如下:

$$u_{ht} = u_0 \exp\left(-\frac{8c_{hT}t}{Fd_e^2}\right) \quad (8)$$

式中, c_{hT} 为 T 温度下土体水平向固结系数, 常温情况下为 c_{h0} ; d_e 为单井影响范围直径; $F = Fn + Fs + Fr$; F_n 、 F_s 和 F_r 分别为单井影响区、涂抹区和井阻对竖井地基固结的影响因子; 对于理想井而言, $F = Fn = \ln n - 0.75$; $n = d_e/d_w$; d_w 为竖井直径。

地基总体固结度 U_z 与径、竖向固结度之间存在下面的关系式:

$$U_z = 1 - (1 - U_r)(1 - U_r) \quad (9)$$

式(9)也可用于计算竖井地基平均孔压^[20]。

3.2.3 计算分析

基于分级加载的竖井地基排水固结理论, 考虑加热对固结系数影响, 对模型地基进行计算。计算假设土体为各向同性材料, 土层厚度 $H = 1$ m; 竖井直径 d_w 根据 Hansbo 塑料排水板等效直径计算公式得到^[20]; 热膨胀系数根据相关研究取值^[12]; 其它参数见表3。另外, 常温组计算时忽略温度变化影响; 太阳能加热组温度变化如图5所示; 升温时土体固结系数通过沉降实测值反演分析得到。

表3 土体计算参数及其取值

Table 3 Soil calculation parameters and their values						
C_c	C_e	e_0	n_v	P_c/kPa	$\alpha_T/^\circ\text{C}^{-1}$	$\alpha_{st}/^\circ\text{C}^{-1}$
0.35	0.035	1.22	0.55	18	1.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}
$\alpha_s/^\circ\text{C}^{-1}$	m_v/MPa^{-1}	d_e/m	d_w/m	$c_{v0}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$c_{h0}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	
3.0×10^{-5}	0.5	0.45	0.07	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	

沉降计算: 首先根据式(1)~(3)得到模型地基的总沉降量; 再由式(4)得到土体任意时刻的固结度; 最后由式(5)即可得到土体任意时刻的沉降量。经过沉降反演分析, 升温情况下土体固结系数 $c_{vT} = c_{hT} = 3.85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$; 相比于常温情况, 土层固结系数提升了1.54倍, 这说明土体固结系数会随温度升高而增大。同时土体沉降量提升却未达到1.54倍, 这是因为在升温过程中土体除了产生热沉降, 还会因为其热胀冷缩的属性而产生

热回弹。图8所示为两组试验沉降理论值与实测值对比情况。由图8可知: 理论值可较好的拟合实测值; 相比于常温情况, 太阳能加热状态下土体的排水固结速率快, 土体的沉降量大于单独加荷下的土体, 表明太阳能加热能够加快土体排水固结进程, 并使土体产生更大的沉降。进一步的计算分析表明: 相比于对照组, 加热组地基土层固结度达到90%所需时间减少34%, 加热组地基最终沉降量增大12%。

孔压计算: 首先根据荷载值和式(7)确定初始超静孔压(扣除静水压力); 然后根据式(6)和(8)分别计算竖向渗流和径向渗流孔压; 最后再根据 Carrillo 理论得到平均超静孔压。图9所示为两组试验超静孔压的理论值与实测值对比。由图可知: 加热引起土体孔压波动较为明显, 波动趋势与土体温度变化趋势一致; 同时, 随着固结排水和荷载值增大, 孔压波动越来越明显, 呈现快速上升和快速消散趋势; 热力耦合下孔压变化幅度远大于仅加荷情况; 孔压峰值和孔压消散方面, 加热组大于常温组, 表明太阳能加热对孔压的产生及消散产生影响。

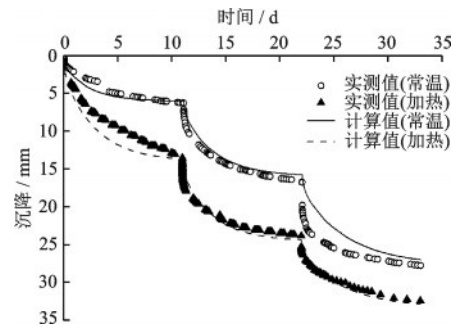


图8 沉降理论值与实测值对比

Fig.8 Comparison of theoretical and measured settlements

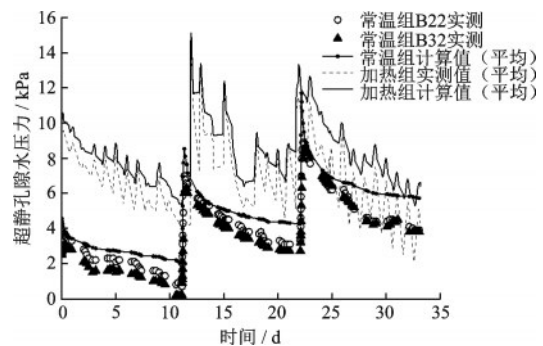


图9 超静孔压理论值与实测值对比

Fig.9 Comparison of theoretical and measured excessive pore pressures

4 结 论

(1)相比于环境温度(平均 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$),太阳能使热水管水温上升 $15\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ (平均 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$),使地基土温度上升 $11\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (平均 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)。热水管在地基中形成温度场,温差 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,离热水管越近温度越高;昼夜温差引起地基温度变化 $8\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)热力耦合时土中孔压快速上升,然后逐渐消散,后期消散速率减缓。太阳能循环变温对土中孔压影响明显,白天孔压上升,晚上孔压下降;孔压波动趋势与土中温度变化趋势一致;随着固结进行,孔压波动幅度增大,最大达 10 kPa 。

(3)相同温度下离排水板相同距离情况下,深度越深,孔压峰值越大;浅层土体由于距离排水边界较近,孔压消散速度快,孔压峰值小,太阳能循环变温引起的孔压波动幅度亦小。

(4)太阳能加热使地基沉降速率快,土体固结系数提升 1.54 倍,土层固结度达 90% 所需时间减少 34% ;使土体屈服强度减小,软基最终沉降增大 12% ,这对于减小工后沉降有积极意义。

参考文献:

- [1] Deng Y B, Mao W Y, Kong G Q, et al. Primary and secondary consolidation compression for saturated soil considering coupling effect of loading and heating [J]. Journal of Central South University, 2021, 28: 2514-2526.
- [2] 陶海冰. 热流固作用下软土静动力学特性及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Tao H B. The thermo-hydro-mechanical effect on static and dynamic properties of soft soil and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [3] Abuel-Naga H M. Thermal-hydro-mechanical behaviour of soft bangkok clay[M]. Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology, 2007.
- [4] Chairakaikeow, S. Thermal consolidation of soft bangkok clay with PVD [D] Bangkok, Thailand: Master Geotechnical Engineering Thesis, Asian Institute of Technology, 2005.
- [5] Abuel-Naga H M, Bergado D T, Chairakaikeow 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.
- [6] Pothiraksanon C, Bergado D T, Abuel-Naga H M. Full scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(5): 579-588.
- [7] 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 H B, Liu G B, Xie K H, et al. A constitutive model for thermal consolidation with vertical drains and its experimental verification [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1077-1085. (in Chinese)
- [8] 刘干斌, 范高飞, 陶海冰, 等. 竖井地基热排水固结模型试验 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 448-456.
Liu G B, Fan G F, Tao H B, et al. Model test on thermal drainage consolidation of foundation with vertical drain [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(2): 448-456. (in Chinese)
- [9] 张佩. 温度和化学调理对填埋污泥排水固结特性影响及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Zhang P. Effects of temperature and chemical conditioning on drainage and consolidation characteristics of landfill sludge and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [10] 邓岳保, 陈菲, 刘铨, 等. 温控软土地基模型试验装置研发及其应用 [J]. 水道港口, 2018, 39(2): 223-229.
Deng Y B, Chen F, Liu Q, et al. Development and application of a temperature-controlled model test device for soft soil ground [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(2): 223-229. (in Chinese)
- [11] 邓岳保, 王天园, 毛伟赞, 等. 真空预压联合加热技术模型试验及作用机理研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(1): 206-217.
Deng Y B, Wang T Y, Mao W Y, et al. Model test and mechanism study on the ground improvement method of vacuum preloading with heating [J]. Journal of Basic science and Engineering, 2021, 29(1): 206-217. (in Chinese)
- [12] 王天园, 邓岳保, 毛伟赞, 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 T Y, Deng Y B, Mao W Y, 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)
- [13] 郑良科, 郑荣跃, 邓岳保, 等. 真空预压联合间歇式加热排水固结法加固软黏土模型试验研究 [J]. 水道港口, 2020, 41(6): 713-719.

- Zheng L K, Zheng R Y, Deng Y B, et al. Experimental study on consolidation by vacuum preloading combined with intermittent heating [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2020, 41(6): 713-719. (in Chinese)
- [14] 胡黎明, 吴辉. 太阳能电渗固结软土地基的装置: 中国, CN 203795412U [P]. 2014-08-27.
Hu L M, Wu H. Device for consolidating soft soil foundation by solar electroosmosis: China, CN 203795412U [P]. 2014-08-27. (in Chinese)
- [15] 黄健钧, 王嘉炜, 黄永泉, 等. 一种太阳能电渗强夯联合合法加固软土地基装置: 中国, CN 206204927U [P]. 2017-05-31.
Huang J J, Wang J W, Huang Y Q, et al. A device for strengthening soft soil foundation with solar electroosmosis dynamic compaction combined method: China, CN206204927U [P]. 2017-05-31. (in Chinese)
- [16] 董建华, 董旭光, 朱彦鹏, 等. 一种边坡自排水电渗锚杆及施工方法: 中国, CN1048787 60A [P]. 2015-09-02.
Dong J H, Dong X G, Zhu Y P, et al. Self-draining electroosmotic anchor rod for side slope and construction method: China, CN1048787 60A [P]. 2015-09-02. (in Chinese)
- [17] 王天园, 邓岳保, 刘铨, 等. 一种利用太阳能的地基处理装置及其使用方法: 中国, CN108517857A [P]. 2018-09-11.
Wang T Y, Deng Y B, Liu Q, et al. Ground treatment device using solar energy and its use method: China, CN108517857A [P]. 2018-09-11. (in Chinese)
- [18] 何旭聪, 邓岳保, 邹维, 等. 基于太阳能的人工海岛软基处理方法及试验研究 [J]. 浙江建筑, 2020, 37(2): 31-34, 38.
He X C, Deng Y B, Zou W, et al. Soft base treatment method and experimental research of artificial island based on solar energy [J]. Zhejiang Construction, 2020, 37(2): 31-34, 38. (in Chinese)
- [19] 吕塞·拉卢伊, 何莉塞·迪·唐纳. 能源地下结构 [M]. 孔纲强, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Lysesse Laloui, Alice Di Donna. Energy Underground Structure [M]. Kong G Q translate. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [20] 邓岳保. 竖井地基固结解析理论与有限元分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Deng Y B. Analytical theory and finite element analysis of shaft foundation consolidation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- (本文责编: 苏泽云)



(上接第 896 页)

- [18] Habibzadeh O, Yu X B, Li T, et al. A novel full-scale external geothermal heating system for bridge deck de-icing [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 285: 116365.
- [19] Li T, Yu X B, Lei G, et al. Numerical analyses of a laboratory test of a geothermal bridge deck externally heated under controlled temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 225255.
- [20] Chen X, Kong G Q, Liu H L, et al. Field tests on the prediction of heating power requirements for deicing in Jiangyin, China [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100293>.
- [21] ASHRAE. ASHRAE Handbook [S]. Atlanta USA: American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers, 2007.
- [22] Chen X, Kong G Q, Liu H L, et al. Experimental on thermal performance of bridge deck with hydronic heating system [J]. Cold Regions Science & Technology, 2020, 178: 103130.
- [23] 陈智, 高华雨, 肖衡林, 等. 温度荷载作用下灌注型能量桩热力响应原位试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 592-598.
Chen Z, Gao H Y, Xiao H L, et al. In-situ thermo-mechanical response test of perfusion energy pile under temperature loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39 (4): 592-598. (in Chinese)