

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0083-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.019

# 冷热循环作用下砂土地基能量桩热传递特性测试系统

宋怀博, 裴华富, 赵维

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 能量桩是一种兼具换热和承担建筑荷载功能的新型建筑节能技术, 为研究冷热循环温度影响下能量传递特性, 设计了一套新型的能量桩模型实验及测试系统, 较为系统地研究了砂土地基中预制单U型混凝土能量桩的传热特性。试验结果表明: 在能量桩换热过程中, 热量更易从桩体传递到土体; 冷热循环中, 桩身温度差异较小, 温度沿桩身分布均匀; 制热工况下能量桩在土体中的温度影响范围大于制冷工况, 能量桩换热效率随着桩身与土体温度差异的减小而减小。

**关键词:** 冷热循环; 传热特性; 测试系统; 相似原理; 模型试验

**中图分类号:** TU83

**文献标识码:** A

## Test-system of Heat Transfer Performance of Energy Pile under Thermal Cycling in Sand

SONG Huaibo, PEI Huafu, ZHAO Wei

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** Energy pile is a new building energy saving technology with both heat exchange and load bearing functions. However, there are few studies aimed at heat transfer performance of energy piles under thermal-cold cycling treatment. In this paper, a novel test system is proposed and fabricated to investigate the heat transfer performance of precast single U concrete energy pile in sand by model test method. The test results show that heat transfer from pile to soil is more easily in the process of energy piles and the difference of temperature along the pile is small and distributed evenly. In addition, the influence range of soil temperature field under cold cycles is greater than the heat cycles. With the decrease of temperature difference between pile and soil, the heat transfer efficiency also decreases.

**Key words:** thermal cycling; heat transfer performance; test system; similar principle; model test

能量桩作为一种新型建筑节能技术, 将地源热泵和桩基础进行有机结合, 兼具换热和承担上部建筑荷载的功能<sup>[1-5]</sup>。

针对能量桩的传热机理和换热性能, Ng<sup>[6]</sup>通过离心模型试验对饱和砂土地基中能量桩的热量传导规律进行了研究。但并未涉及冷循环下传热特性的研究。陈忠购等<sup>[7]</sup>考虑管内循环液体竖向对流换热和支管之间的热干扰, 建立了内置并联U形埋管能量桩热交换的理论模型。Li等<sup>[8]</sup>通过原位试验对比了不同埋管形式的能量桩的换热性能, 但并未分析桩身温度的分布特征。刘汉龙等<sup>[9-10]</sup>通过模型试验

结合数值模拟的方法, 研究了预埋钢管单U型埋管能量桩的传热性能, 并与传统绑扎单U型埋管能量桩进行对比。Suryatriyastuti等<sup>[11-12]</sup>利用COMSAL软件建立数值模型, 比较了不同埋管形式能量桩的换热性能, 但并未涉及能量桩对周围环境的影响。

综上所述, 目前相关研究大多集中于热力耦合作用下能量桩的力学特性与换热能力研究, 而对其在冷热循环温度影响下能量传递特性研究较少。因此, 本文设计了一套测试系统, 通过室内模型试验, 研究了预制单U型混凝土能量桩的能量传递特性, 并对制冷、制热工况下桩身和周围土体传热区域的

收稿日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778107)

作者简介: 宋怀博(1994-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事热力耦合作用下能量桩热力学特性方面的研究。

温度变化规律进行分析,为能量桩传热机制的进一步研究提供参考。

## 1 模型试验概况

### 1.1 相似原理

根据文献[13],定义某物理量的相似倍数为模型与原型参数之比,其表达式为式子(1)。由方程分析法使用相似倍数进行转换,可得到雷诺数、傅立叶数、普朗特数和努塞尔数等四个特征数相等,其表达式见(2)~(4),式中各符号含义可详见文献[14]。

$$C_x = \frac{X_m}{X_p} \quad (1)$$

$$\frac{C_\tau}{C_\rho C_u} \rho_m \frac{\partial u_{fmi}}{\partial \tau_m} + \frac{C_\tau}{C_\rho C_u^2} \rho_m u_{fmi} \frac{\partial u_{fmi}}{\partial j_m} = \frac{1}{C_f} f_{mi} - \frac{C_l}{C_p} \frac{\partial p_m}{\partial i_m} + \frac{C_l^2}{C_\mu C_u} u_m \frac{\partial^2 u_{fmi}}{\partial j_m^2} \quad (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

$$\frac{C_\tau}{C_l} \frac{\partial t_{fm}}{\partial \tau_m} + \frac{C_l}{C_u C_t} u_{fmi} \frac{\partial t_{fm}}{\partial i_m} = \frac{C_l^2}{C_\alpha C_t} \alpha_m \frac{\partial^2 t_{im}}{\partial i_m^2} \quad (i = x, y, z) \quad (3)$$

$$\frac{C_t}{C_\tau} \frac{\partial t_{fm}}{\partial n_m} = -\frac{C_\lambda}{C_l C_h} \frac{h_m}{\lambda_{fm}} (t_{pm} - t_{fm}) \quad (4)$$

倘若模型与原型物理性质取为相同,则各个物理性质相似倍数取值为1,可得到式(5)~(6)。其含义为流速相似倍数与几何相似倍数互为反数;时间相似倍数为几何相似倍数平方的倒数。

$$C_u = \frac{1}{C_l} \quad (5)$$

$$C_\tau = \frac{1}{C_l^2} \quad (6)$$

### 1.2 测试系统

能量桩热量传递特性测试系统由试验装置、冷热循环系统以及量测系统组成。试验装置包含加载设备、隔热垫层和模型箱。试验时通过改变加载盖板堆载重量对桩顶施加不同级别荷载;隔热垫层为0.5 mm厚的交联聚乙烯隔热材料,预先铺设于模型箱内壁;模型箱尺寸为800 mm×800 mm×1 100 mm(长×宽×高)。冷热循环系统由高低温试验箱和循环水泵组成。高低温试验箱温度控制范围为-20~+100℃,控温精度为0.1℃,通过操作PLC控制面板,可实现对恒温箱内部循环液温度的精确控制;循环水泵为变频水泵,可控制循环液在换热管中的流动速度。量测系统包括位移计、压力

传感器和温度传感器。位移计和压力传感器通过转接线与计算机连接,进行数据的读取与记录;温度传感器为NTC热敏电阻高精度温度传感器,测量范围为-50~+105℃,测量精度为0.5℃。试验时,温度传感器与温度采集模块连接,数据自动采集。测试系统整体布置如图1所示。

### 1.3 试验土体参数

试验采用厦门ISO标准砂作为地基,通过室内土工试验测得其最大和最小干密度分别为1.9 g/cm<sup>3</sup>, 1.5 g/cm<sup>3</sup>,平均粒径为0.72 mm,内摩擦角为31°。曲率系数CC=0.62,不均匀系数Cu=6.38,为级配不良的粗砂,其颗粒级配曲线如图2所示。

### 1.4 模型桩制备与布置

取几何相似倍数为0.05。试验所采用的模型桩由C30混凝土灌浆料在塑料模具中浇筑而成,其配合比为水:细集料:粗集料:水泥=0.33:0.74:0.75:1。模型桩直径36 mm(相当于原型720 mm),桩长1 000 mm(相当于原型

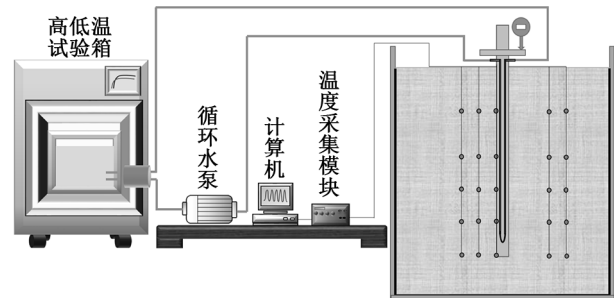


图1 测试系统总体布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the overall layout of the test system

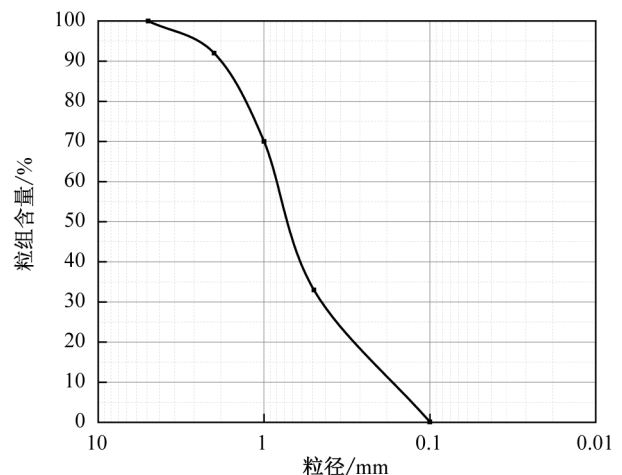


图2 土体颗粒级配曲线

Fig.2 Curve of grain size distribution

20 000 mm), 实际埋入砂土地基中有效长度为 700 mm (相当于原型 14 000 mm)。模型桩内部换热管道为单 U 型 PVC 塑料管, 外径 10 mm, 内径 8 mm, 长度为 880 mm。换热管 U 形部分与桩端距离为 120 mm。

试验时, 模型桩置于模型箱中心处, 其端部与模型箱底部距离为 300 mm, 桩轴心与槽壁之间的距离最小为  $22D$  ( $D$  为模型桩直径), 大于 Parkin<sup>[15]</sup> 所建议的  $20D$ , 因此可忽略边界条件对试验结果所造成的影响。模型桩直径与周围砂土平均粒径比值为 50, 这与 Fioravante<sup>[16]</sup> 建议的最小值相同, 因此也可忽略缩尺效应的影响。

### 1.5 试验方案详述

试验包含制冷和制热两种工况, 考虑到能量桩实际运行中温度范围为  $5 \sim 40^{\circ}\text{C}$ <sup>[17]</sup>, 最终选择制冷工况循环液温度为  $30^{\circ}\text{C}$ , 制热工况为  $7^{\circ}\text{C}$ 。循环液由水组成, 其温度与流速分别由高低温试验箱和循环泵控制, 试验过程中流速均为  $100 \text{ L/min}$ 。试验具体步骤如下:

#### (1) 砂土地基填筑

试验中通过人工夯实将砂土地基相对密实度控制为 70%。将  $1\,126.4 \text{ kg}$  干砂分十级填入模型箱, 每级填砂  $112.64 \text{ kg}$ , 为保证模型箱各处砂土相对密实度相同, 每级取控制高度为  $10 \text{ cm}$  进行夯实。模型箱内砂土高度为  $30 \text{ cm}$  后, 将桩置于模型箱中心处, 将温度传感器布设于预定位置, 而后继续填砂、夯实。

#### (2) 温度传感器布设

温度传感器在砂土填筑过程中埋入预定位置。试验共布置五路温度传感器, 与桩轴线距离分别为  $0.5D$ 、 $1.5D$ 、 $2.5D$ 、 $3.5D$ 、 $4.5D$ , 每路由五个温度传感器组成, 距离土体表面分别为  $140 \text{ mm}$ 、 $280 \text{ mm}$ 、 $420 \text{ mm}$ 、 $560 \text{ mm}$ 、 $700 \text{ mm}$ ; 其中  $0.5D$  处温度传感器用以测量桩体温度, 其余各路分别测量试验过程中的桩周土体不同位置温度变化情况。U 型换热管进出水口分别安置一个温度传感器, 测量循环液的换热过程中温度的改变。桩体及温度传感器布置情况见图 3。

#### (3) 温度荷载施加

制冷工况模拟夏季能量桩制冷, 热量通过高温循环液传递到桩体和桩周土体, 试验时将高低温试验箱设定为  $30^{\circ}\text{C}$ , 循环液温度稳定后, 打开水循环泵进行热循环, 待热量传输稳定后, 约为  $300 \text{ min}$

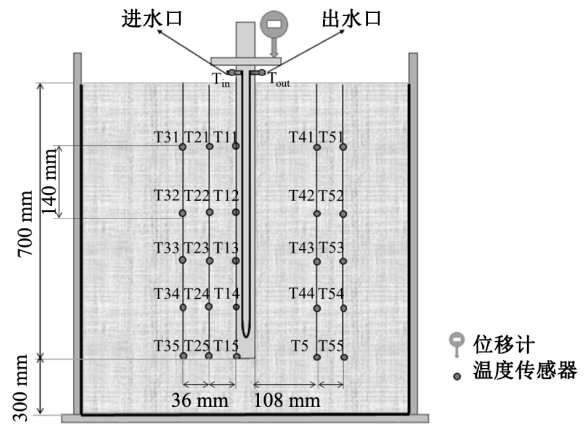


图3 温度传感器布置示意图

Fig.3 Diagrams of temperature sensors layout

(相当于原型 83 天), 停止通循环液, 自然冷却  $8 \text{ h}$  (相当于原型  $133 \text{ 天}$ ), 至桩体及桩周土体均恢复到室温; 制热工况模拟冬季能量桩制热, 热量由桩周土体传到桩体, 再传递到循环液中, 试验时将高低温试验箱设定为  $7^{\circ}\text{C}$ , 循环液温度稳定后, 打开水循环泵进行冷循环, 运行  $300 \text{ min}$  后停止, 而后自然冷却  $8 \text{ h}$ , 至桩体及桩周土体温度均恢复到室温。试验在密闭地下室中进行, 室温为  $16^{\circ}\text{C}$ , 昼夜温差不超过  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。在实验过程中, 保持循环流速恒定为  $1.33 \text{ m/s}$  (相当于原型流速为  $0.0665 \text{ m/s}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 桩体温度分布规律

从图 4(a) 可以看出, 在制冷工况下, 当  $30^{\circ}\text{C}$  的循环液从进水管通入 U 型换热管后, T11、T12、T13 和 T14 处桩体温度在最初的  $10 \text{ min}$  内迅速上升, 循环进行  $3 \text{ h}$  后逐渐趋于稳定; T15 处桩体温度上升速度较为缓慢, 直到热循环时间为  $300 \text{ min}$  时才逐渐趋于换热稳定状态, 此时温度为  $20.3^{\circ}\text{C}$ 。T12、T13 和 T14 处温度差值小于  $1^{\circ}\text{C}$ , 此范围内桩体温度基本均匀分布; T11 温度略低 T12、T13 和 T14 温度, 其原因在于 T11 所在位置靠近土体表面, 与大气换热较为迅速, 因此热量损失较多; T15 温度变化幅度最小, 且升温较为缓慢, 其原因在于 U 型换热管的 U 型部分与桩端有  $120 \text{ mm}$  的距离, 热量沿径向从循环液中依次通过 PVC 塑料管和桩身混凝土, 然后传入到桩周土体中, 而桩端处温度变化主要是由热量沿桩体轴向传递所引起的, 因此传热速度较慢。

从图 4(b) 可以看出, 在制热工况下, 当  $7^{\circ}\text{C}$  的

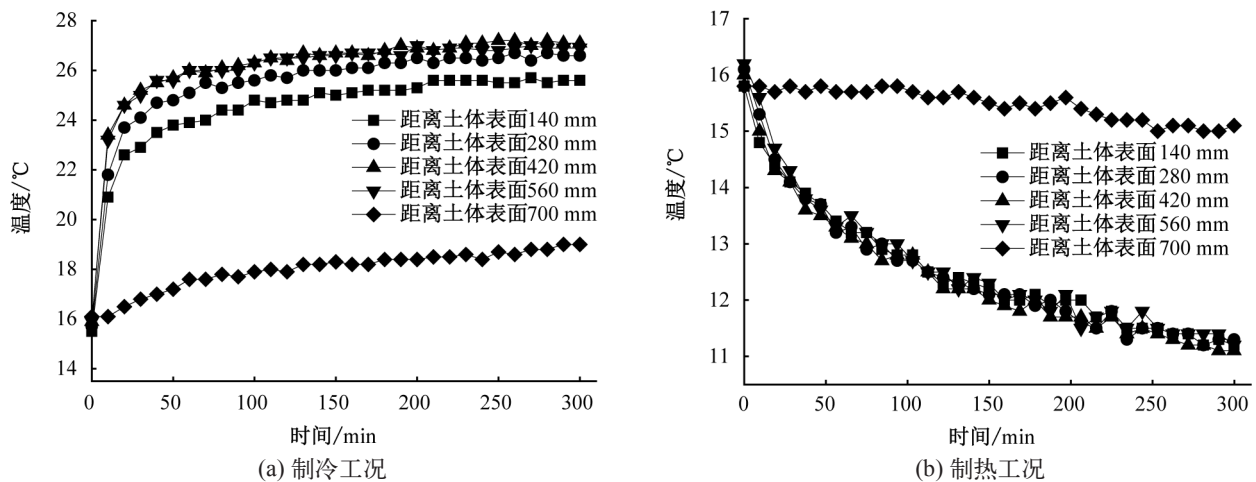


图4 桩体温度变化曲线

Fig.4 Variations of pile shaft temperature

循环液通入能量桩模型后, 桩身温度逐渐下降。在循环开始前 30 min, T11 至 T14 范围内桩身温度下降较快, 随着时间的增加, 下降速率不断降低, 在循环进行 4 h 后, 桩体温度已经逐渐趋于稳定状态。桩体在 T11 至 T14 范围内温度差异较小, 约为  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 可以认为均匀分布; T15 处温度变化幅度最小, 其原因与制冷工况相同。从两种工况下桩身温度变化规律可知, 制冷工况下, 循环进行 3 h 时土体温度场已经基本稳定, 而制热工况在循环开始 4 h 后才逐渐趋于稳定, 这说明能量桩在工作状态时, 热量从桩身混凝土向桩周土体传递效率要高于从土体传递到桩身混凝土, 表明对于同一根能量桩而言, 在相同的运行条件下, 其制冷效果要高于制热效果。上述规律与黄旭等<sup>[18]</sup>所研究的 PCC 能量桩传热特性相似。

图 5 给出了不同循环时间时, 温度沿桩体深度的分布情况。从 5(a) 可以看出, 制冷工况下, 通入热循环液后, 桩体温度逐渐升高, 循环 3 h 后, 桩体温度达到稳定状态, 此时最大为  $26.8^{\circ}\text{C}$ , 最小为  $25.9^{\circ}\text{C}$ , 相差  $0.9^{\circ}\text{C}$ 。在热循环过程中, 桩体温度从上到下逐渐增加, 在桩中部位位置达到最大。图 5(b) 给出了制热工况下桩深温度分布随时间变化曲线, 从图中可以看出, 随着循环的进行, 桩体温度不断降低, 约在 4 h 后换热进入稳定状态, 此时温度最大为  $11.3^{\circ}\text{C}$ , 最小为  $11^{\circ}\text{C}$ , 相差  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。综合两种工况下桩深温度分布情况来看, 可知其差异均较小, 基本均匀分布。

## 2.2 土体温度分布规律

距离土体表面 420 mm 处桩周土体在制冷工况下温度场变化曲线如图 6(a) 所示, 从图中可以看出, 在循环稳定之前, 桩周土体温度随着与桩轴线距离远近逐级开始变化, 且随着距桩轴线距离的增大, 土体升温幅度逐渐减小, 在距离桩身 4D 处, 温度变化幅度小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 因此超过四倍桩径的土体区域, 其温度场受到的桩体换热影响可适当忽略; 由不同时间的温度变化曲线可以看出, 随着循环的进行, 同一位置土体升温速率逐渐降低, 说明随着土体和桩体之间温差的减小, 能量桩换热效率逐渐降低。

图 6(b) 给出了制热工况下桩周土体温度的变化曲线, 从图中可以看出, 越靠近桩身, 土体降温越小。不同于制冷工况的是, 降温幅度在距桩身 4D 处介于  $0.5\text{--}1^{\circ}\text{C}$  之间, 说明制热工况时温度影响区域范围大于制冷工况; 而由不同时间温度变化曲线可知, 随着循环的进行, 土体温度下降速率不断减小, 即桩土之间的换热效率逐渐降低。

## 3 结论

1) 制冷和制热工况下, 能量桩换热效率不同。热量从桩身混凝土传到至桩周土体的效率高于从土体传到至桩身混凝土, 表明对于同一根能量桩而言, 在相同的运行条件下, 其制冷效果要高于制热效果。

2) 在冷热循环中, 桩身温度基本均匀分布; 制冷与制热工况下, 土体温度场影响范围不同。在制冷工况下, 温度场影响范围为 4 倍桩径, 而制热工况下大于 4 倍桩径, 并且随着桩身与土体温度差异的减小, 换热效率逐渐降低。

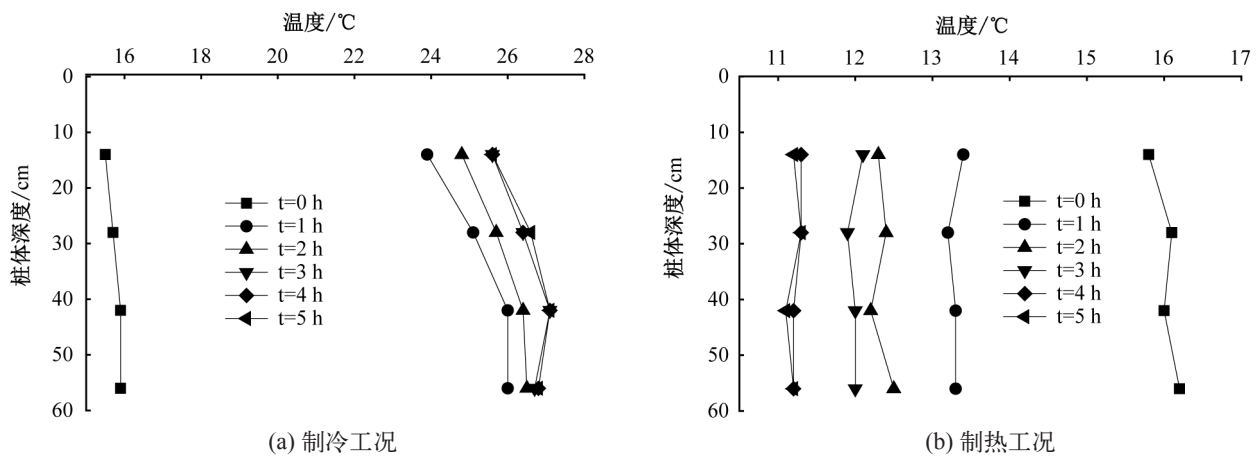


图 5 桩体温度变化曲线

Fig.5 Variations of pile shaft temperature

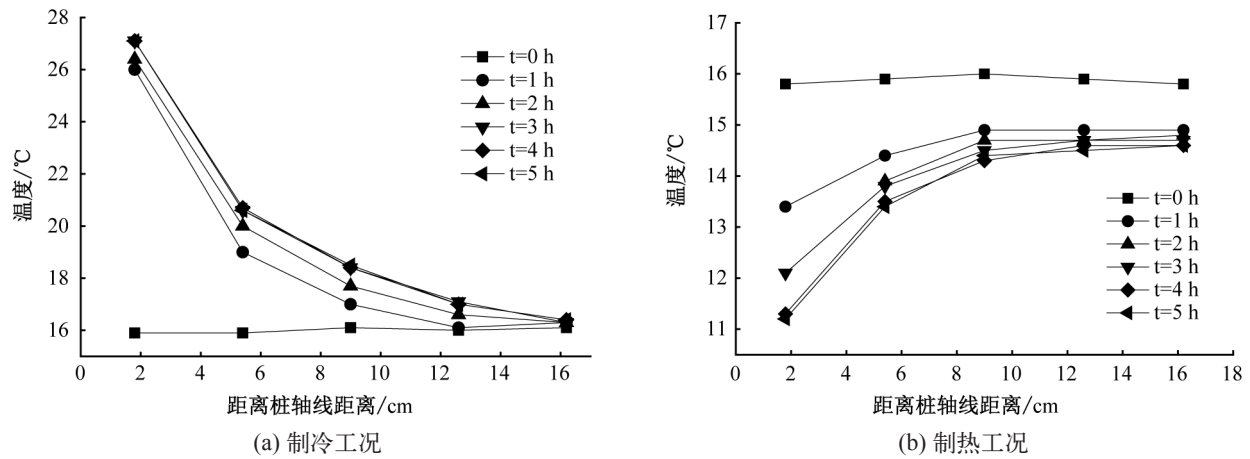


图 6 桩体温度变化曲线

Fig.6 Variations of pile shaft temperature

参考文献:

[1] 余 闯, 潘林有, 刘松玉, 等. 热交换桩的作用机制及其应用 [J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 933-937.  
 [2] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.  
 [3] ENNIGKEIT A, KATZENBACH R. The double use of piles as foundation and heat exchanging elements[J]. Balkema, 2001.  
 [4] KNELLWOLF C, PÉRON H, LALOUI L. Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(10): 890-902.  
 [5] 刘汉龙, 孔纲强, 吴宏伟. 能量桩工程应用研究进展 PCC 能量桩技术开发 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 176 - 181.  
 [6] NG C W W, SHI C, GUNAWAN A, et al. Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand. [J]. Canadian Geotechnical Journal,

2015, 52: 150113073645001.  
 [7] 陈忠购, 赵石烧, 张正威. 内置 U 形埋管能量桩换热性能研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(5): 238-243.  
 [8] LI X, CHEN Y, CHEN Z, et al. Thermal performances of different types of underground heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(5): 543 - 547.  
 [9] 刘汉龙, 吴 迪, 孔纲强, 等. 预埋与绑扎埋管形式能量桩传热特性研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 333-340.  
 [10] 赵嵩颖, 张柏林, 刘奕彤, 等. 能量桩换热管不同埋设方式储热模拟研究 [J]. 建筑节能, 2013, 41(11): 66-67.  
 [11] SURYATRIYASTUTI M., MROUEH H, BURLON S. A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 378 - 391  
 [12] BOURNE-WEBB P, AMATYA B, SOGA K, et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles[J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 237-248

( 下转第 108 页 )

$$\begin{cases} \max M\{T(x, \xi) \leq 66\} \\ s.t. \\ M\{C(x, \xi) \leq 58\ 900\} \geq 0.85 \\ T_j(x, \xi) = \max_{(i,j) \in A} \{T_i(x, \xi) + \xi_i + x_i + T_{ij}\} \\ x_i \in [-4, 3], x_i \in Z, 1 \leq i < j \leq 18. \end{cases} \quad (7)$$

由定理 1 知, 不确定规划模型 (7) 等价转化为确定模型 (8), 即

$$\begin{cases} \max \beta \\ s.t. \\ \Psi^{-1}(x, \beta) = 66 \\ \Upsilon^{-1}(x, 0.85) \leq 58\ 900 \\ \Psi_j^{-1}(x, \beta) = \max_{(i,j) \in A} \{\Psi_i^{-1}(x, \beta) + \Phi_i^{-1}(\beta) + x_i + \Psi_{ij}^{-1}(\beta)\} \\ x_i \in [-4, 3], x_i \in Z, i \in V. \end{cases} \quad (8)$$

利用 LINGO 求得模型 (8) 最优解  $x^* = (3, 3, -4, 3, 0, -1, 2, 3, 3, -1, 3, 3, -4, 3, 0)$  和  $M\{T(x, \xi) \leq 66\} = 0.844$ .

注: 在该模型中, 项目按期完工的可能性为 0.844, 且实际费用比预算费用少 74.25 个单位。通过计算网络图中线路长度可知, 与关键线路长度 (66 个单位) 的差值在 1 个单位以内的线路共 6 条。因此, 通过合理分配有限资源在工序的使用量调整工序持续时间, 达到项目工期与费用之间优化目的。

### 3 结论

1) 本文的研究侧重于在目标工期上有要求的项目, 结合工程项目的实际情况, 构建了以项目按期完工的可能性最大为目标的规划模型。由于该模型

可转化为确定模型, 所以其具有可操作性。

2) 通过分析模型的优化结果, 计算出了项目中各工序的持续时间。这一方面为管理者确定项目的重点控制目标提供理论依据, 另一方面帮助管理者合理地分配项目中可利用的有限资源并实现项目的优化目标。因此, 所建的模型具有实用性。

#### 参考文献:

- [1] LIU B D. Uncertainty Theory[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 2007.
- [2] LIU B D. Theory and Practice of Uncertain Programming[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [3] KE H, LIU H, TIAN G. Optimizing project time-cost trade-off based on uncertain measure[J]. <https://www.docin.com/p-1512887514>, 2013.
- [4] CRANDALL. Project planning with precedence lead/lag factors[J]. Project Management Quarterly, 1973, 4(3): 18-27.
- [5] 杨冰. 网络计划计算模型的统一[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(3): 51-55.
- [6] 贺兆泽. 考虑工时相依性的施工工期优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
- [7] LIU B D. Uncertain Theory: A Branch of Mathematics for Modeling Human Uncertainty[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [8] LIU B D. Uncertain risk analysis and uncertain reliability analysis[J]. Journal of Uncertain Systems, 2010, 4(3): 163-170.

(责任编辑 李新)

(上接第 87 页)

- [13] 彭远玲, 李文欣, 韦科娟, 等. 竖直地埋管热相似试验台原理及试验验证[J]. 暖通空调, 2018, 48(9): 45-49.
- [14] 王丰. 相似理论及其在传热学中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 105-163
- [15] PARKIN A K, LUNNE T. Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer[J]. Norwegian Geotechnical Institute Publication, 1982.
- [16] FIORAVANTE V. On the Shaft Friction Modelling

of Non-Displacement Piles in Sand[J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society Soils & Foundation, 2002, 42(2): 23-33.

- [17] NGUYEN V T, TANG A M, PEREIRA J M. Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand[J]. Acta Geotechnica, 2017(3): 1-9.
- [18] 黄旭, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 循环温度场作用下 PCC 能量桩热力学特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 667-673.

(责任编辑 李新)