

相变混凝土能量桩热-力学特性的数值模拟与试验验证

杨卫波^{1,2}, 杨彬彬¹, 汪峰¹

(1. 扬州大学电气与能源动力工程学院, 扬州 225127; 2. 热流科学与工程教育部重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘要: 为了获得热力耦合作用下相变混凝土能量桩的热-力学特性, 建立了其三维数值模型, 比较了传统和相变混凝土能量桩热-力学特性的差异, 分析了埋管管腿间距及桩体长径比对相变混凝土能量桩热-力学特性的影响规律。结果表明, 相变材料(Phase Change Material, PCM)的固液相变可使单位桩深换热热量提高 10.3%, 且可降低桩身温度变化幅度, 由温度变化所引起的桩身位移、轴力及侧摩阻力变化量也相应减小。随桩基埋管管腿间距增加, 能量桩的换热量和土壤热影响范围增大, 桩身轴力减小, 桩身位移呈现先增大后减小趋势; 加大桩体长径比会增加总换热热量, 但会导致单位桩深换热热量降低及桩顶位移的增加, 不利于桩基结构的稳定性。试验验证表明: 所建能量桩数值模型可用于模拟相变混凝土能量桩的热-力学特性, 其桩壁中点温度与桩顶位移的预测最大相对误差分别在 5.1%与 12%以内, 平均相对误差分别为 4.2%、9.9%。研究结论对于相变混凝土能量桩的优化设计与运行具有重要指导意义。

关键词: 能量桩; 相变; 热力学特性; 数值模拟; 试验验证

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.031

中图分类号: TU473, TU83

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-2-0268-10

杨卫波, 杨彬彬, 汪峰. 相变混凝土能量桩热-力学特性的数值模拟与试验验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 268-277. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.031 http://www.tcsae.org

Yang Weibo, Yang Binbin, Wang Feng. Numerical simulation and experimental validation of the thermo-mechanical characteristics of phase change concrete energy pile[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 268-277. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.031 http://www.tcsae.org

0 引言

地源热泵作为浅层地热能利用技术之一, 因其节能、高效和环保等优势而在建筑节能中得到广泛推广^[1]。然而, 其高额的钻孔费用及占地面积大等缺点在一定程度上限制了地源热泵发展。为此, 有学者提出将地埋管与建筑桩基相结合的能量桩^[2], 能量桩兼具了桩基承载和地下换热双重功能。然而, 实际运行中因桩体温度变化而导致的桩体热变形与热应力会影响能量桩的换热性能与承载能力、危害其安全高效运行。考虑到相变材料(Phase Change Material, PCM)在相变过程中具有相变潜热大及温度恒定的特点, 如将 PCM 作为能量桩一部分填充材料则可在改善传统能量桩蓄能传热特性的同时削弱其换热过程中产生的热变形^[3]。

近年来, 诸多研究者探讨了 PCM 在地源热泵钻孔回填中应用的可行性。李启宇^[4]对比分析了 PCM 回填和普通材料回填地埋管的传热特性, 研究表明, PCM 回填可以有效避免热短路现象的出现, 且换热量会随着流速的增加而增大。Wang 等^[5]数值模拟了原土回填和 PCM 回

填地埋管换热器的传热特性, 结果表明, PCM 回填可有效减少土地使用面积。王畅^[6]模拟研究了夏季间歇运行工况下 PCM 回填地埋管的换热性能, 结果显示, 间歇运行初期, 相变温度较低的 PCM 可明显改善埋管换热量, 但是随着时间的进行, 相变温度较高的 PCM 对换热器换热量的改善效果优于同期相变温度较低的 PCM。Chen 等^[7-8]研究表明: PCM 回填对于持续热需求较小的建筑物更适合, 可采用合适的冷热交替运行方案来提高系统的整体性能。Yang 等^[9-11]试验与模拟研究了 PCM 回填地埋管换热器的蓄能传热特性。结果表明, 夏季和冬季工况下, 采用 PCM 回填可在提高蓄能性能的同时降低钻孔外土壤温度变化幅度, 提高土壤温度恢复率, 减小土壤热影响半径。Lei 等^[12-14]对 PCM 回填套管式地埋管进行理论与试验研究的结果表明, PCM 回填可缩小钻孔间距, 若能密封钻孔且 PCM 价格低廉, 则该 PCM 回填将会有很好的应用前景。Qi 等^[15]研究表明, 由于 PCM 回填会减小热影响范围, 且相变温度恒定, PCM 回填比普通回填更有优势。

在相变能量桩方面, Han 等^[16]通过计算证实了将 PCM 加入到能量桩中可以显著提高其换热性能。白丽丽等^[17]利用简化能量桩段有限元数值模型, 模拟了普通能量桩与相变能量桩的传热过程, 结果表明, 在吸放热工况下添加 PCM 可在相变温度区间内明显减缓桩身升降温速度; 崔宏志等^[18]试验研究了循环温度荷载下相变能源桩的应力应变以及桩顶位移, 结果表明, 在循环温度荷载作用下产生的温度变化会给桩周土体带来一定的温度累积, 沿桩身深度与水平方向存在着不均匀应力应变分

收稿日期: 2020-06-27 修订日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978599); 热流科学与工程教育部重点实验室(西安交通大学)开放基金资助(KLTFSE2016KF05); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDEK1711)

作者简介: 杨卫波, 博士(后), 教授, 博士生导师, 主要从事地源热泵及建筑可再生能源利用方面的研究。

Email: yangwb2004@163.com

布, 桩顶随温度循环过程变化会产生不可恢复的塑性位移。Bao 等^[19]利用膨胀石墨和石墨纳米基复合相变材料研制了一种可用于能量桩的集成水泥基复合材料, 并对其力学性能进行了试验测试, 结果显示, 水泥基复合材料的抗弯强度随复合 PCM 含量的增加而降低。Yang 等^[3]将膨胀石墨基和石墨纳米基两种碳基复合 PCM 分别添加到能量桩中, 发现含有质量分数 10% 石墨纳米基复合 PCM 的能量桩强度可达 37 MPa。

综上可知, 目前在相变回填地埋管方面已取得了一定的进展, 但在相变混凝土能量桩方面研究较少。传统能量桩运行过程温度变化会产生附加温度应力、桩身变形以及承载力降低等影响上部结构稳定性的问题, 而相变混凝土能量桩不仅能够降低桩身温度变化幅度, 还可以改善其换热性能。但目前对其热-力学特性的研究还很缺乏。为此, 本文建立了相变混凝土能量桩的三维数值模型, 并对模型进行了试验验证, 基于模型分析了相变混凝土能量桩的热-力学特性, 以期为进一步深入研究提供参考。

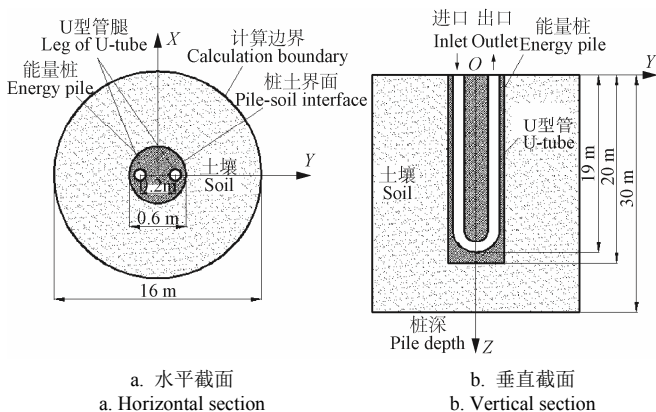
1 计算模型

1.1 物理模型

相变混凝土能量桩与土体间的热力耦合是一个非常复杂的过程, 为简化分析, 特作如下假设^[20]:

- 1) 相变混凝土和桩周土体是均匀各向同性物质, 且物性参数不随温度的改变而变化。
- 2) 能量桩与桩周土体之间只有导热, 不考虑水分迁移等引起的热量传递。
- 3) 不考虑埋管壁与桩身混凝土、桩身混凝土与桩周土体间的接触热阻。
- 4) 能量桩发生弹性变形, 桩周土体发生弹塑性变形。
- 5) 桩-土接触面采用接触单元进行模拟, 模拟过程中桩-土摩擦系数不发生改变。

基于以上假设, 建立如图 1 所示物理模型。



a. 水平截面

a. Horizontal section

b. 垂直截面

b. Vertical section

图 1 相变混凝土能量桩物理模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of physical model of phase change concrete energy pile

1.2 数学模型

1.2.1 桩埋管内流体控制方程

桩埋管内流体处于湍流状态, 流体控制方程主要有连续性方程、动量方程和能量方程^[21]

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_f u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j u_i) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_f T_f) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j T_f) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T_f}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

式中 u 为速度分量, m/s; 下标 i, j 表示方向; x 代表坐标, m; ρ_f 为管内循环流体密度, kg/m³; μ 为动力粘度, Pa·s; μ_t 为湍流粘度, Pa·s; P 为压强, Pa; Pr_t 为湍流普朗特数; T_f 为流体温度, °C; τ 为时间, s。

1.2.2 相变区域控制方程

采用焓法求解相变过程^[21], 利用热焓-多孔性公式代替固液分界面, 将固液模糊区视为一个孔隙度等于液相率的多孔介质区域, 用液相率来表示计算区域的液化程度, 液相率的数值是通过焓平衡法迭代得出。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_l v) = 0 \quad (4)$$

式中: ρ_l 为液相密度, kg/m³; v 为流动流速, m/s。

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_c H) + \nabla \cdot (\rho_c v H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_e \quad (5)$$

$$S_e = \frac{\rho_c}{C_p} \frac{\partial (\Delta H)}{\partial \tau} \quad (6)$$

式中 ρ_c 为相变混凝土密度, kg/m³; H 为相变混凝土的焓, J/kg; λ 为相变混凝土的导热系数, W/(m·K); T 为温度, K; S_e 为源项; C_p 为相变混凝土的比热, J/(kg·K); H 为相变混凝土的焓, 包括显热焓 h_s 和潜热焓 h_l

$$H = h_s + h_l = h_r + \int_{T_r}^T C_p dT + \beta L \quad (7)$$

式中 h_r 为参考焓值, J/kg; h_s 为显热焓值, J/kg; h_l 为潜热焓值, J/kg; T_r 为参考温度, K; L 为 PCM 的相变潜热, J/kg; β 为液相率, 可表示为

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (8)$$

式中 T_s 为相变材料凝固点温度, K; T_l 为相变材料熔化温度, K。

动量方程

$$\frac{\partial (\rho_l v_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho_l v_i \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v_i) - \frac{\partial \rho_l}{\partial x_i} + \rho_l g_i + S_i \quad (9)$$

式中 v_i 为 i 方向上的速度分量, m/s; S_i 为 i 方向上的修正源项, 可表示为

$$S_i = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon_z} A_{\text{mush}} (v - v_p) \quad (10)$$

式中 ε_z 是为使方程有意义, 防止分母为零而定义的小于 0.000 1 的数; A_{mush} 为模糊区常数; v_p 为牵引速度, m/s。

1.2.3 传统桩基和土壤区控制方程

热量以热传导方式传递, 其微分方程为^[21]

$$\rho_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g) + q_g \quad (11)$$

式中 ρ_g 为各区域材料密度, kg/m³; C_g 为各区域材料比热容, J/(kg·K); T_g 为各区域材料温度, K; λ_g 为各区域材料导热系数, W/(m·K); q_g 为各区域材料体积热源, W/m³。

1.2.4 桩土本构模型

由于能量桩的刚度通常远大于桩周土体, 当桩周土体强度超过弹性极限进入了弹塑性阶段时, 能量桩一般仍处于弹性变形阶段。因此, 本文桩身采用线弹性本构模型^[22] (式 (12)); 土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型^[23] (式 (13))。

$$\sigma = D(\varepsilon + \alpha \Delta T) \quad (12)$$

$$F = R_{mc} q - p \tan \phi - c = 0 \quad (13)$$

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \phi \sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{1}{3} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \phi \quad (14)$$

式中 D 为弹性矩阵 (与弹性模量和泊松比有关); ε 为观测应变; α 为桩的热膨胀系数, 1/°C; ΔT 为桩温度变化量, °C; R_{mc} 为 π 平面上屈服面形状的一个度量; q 是偏应力, kPa; p 为平均压力, kPa; ϕ 为土体内摩擦角, (°); c 为土体粘聚力, kPa; θ 为偏极角, (°)。

1.3 定解条件

1.3.1 温度场

初始条件为

$$T_l(z, \tau) = T_p(r, z, \tau) = T_s(r, z, \tau) = T_0 \quad (\tau = 0) \quad (15)$$

边界条件为

1) 土壤远边界条件

$$T_s(r, z, \tau)|_{r=8} = T_0 \quad (16)$$

2) 上部边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0} = 0 \quad (17)$$

3) 底部边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{z=30} = 0 \quad (18)$$

式中 $T_l(z, \tau)$ 为 τ 时刻深度 z 处流体温度, °C; $T_p(r, z, \tau)$ 为 τ 时刻半径 r 、深度 z 处的桩基温度, °C; $T_s(r, z, \tau)$ 为 τ 时刻半径 r 、深度 z 处的土壤温度, °C; T_0 为土壤初始温度, °C。

1.3.2 结构场

本文采用初始地应力定义法^[24]对桩-土有限元模型的地应力进行平衡, 初始地应力按下式计算。

$$\sigma_z = \gamma z \quad (19)$$

$$\sigma_h = K_0 \sigma_z \quad (20)$$

式中 σ_z 为竖向初始地应力, Pa; σ_h 为水平向初始地应力, Pa; γ 为土体重度, N/m³; z 为土体深度, m; K_0 为侧向

土压力系数。

土体的底部 (垂直于 Z 方向) 采用固定端约束, 即 X 、 Y 、 Z 三个方向的位移为零; 土体的顶部认为是自由面, 不施加任何约束; 对于土体侧面边界条件的考虑, 由于本文模拟过程中, 考虑了地应力的平衡, 因此必须对计算域内土体的侧面施加位移约束, 具体约束为: X 、 Y 两个方向位移为零, Z 方向为自由移动。

1.4 网格划分及独立性验证

利用 GAMBIT 软件对计算区域进行网格划分, 考虑到 U 型桩埋管内流体沿深度方向温度变化较小, 为减少网格数量, 在桩深方向选择较大的网格间距。在 U 型桩埋管的弯管处由于流体突然变向, 流场变化剧烈, 故需对弯管所在区域的网格进行加密。桩埋管周围由于温度梯度较大而对管周网格进行加密。此外, 桩土接触面的网格密度相同以保证桩土耦合的准确性, 网格划分如图 2 所示。

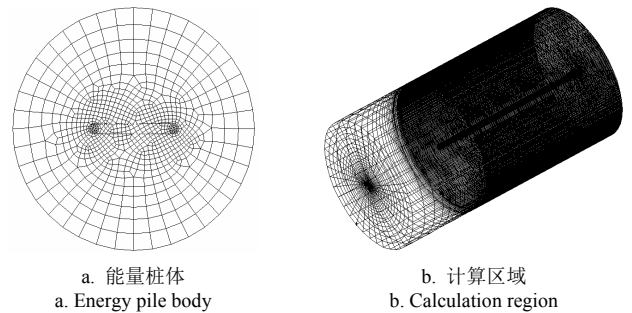


图 2 计算模型的网格划分

Fig.2 Mesh of computational model

为验证网格划分可靠性, 进行了独立性验证。选取 3 种网格密度 (668 175、860 469、1 047 426) 进行计算, 在埋管进口温度一定时, 以计算出的 U 型管出口温度值作为对比基准, 结果如图 3 所示。分析可以看出在不同网格数量下, 埋管出口温度随时间变化趋势相同, 且随网格数量增加相差较小, 考虑到兼顾计算精度与计算时间, 本文采用的网格数量为 860 469。

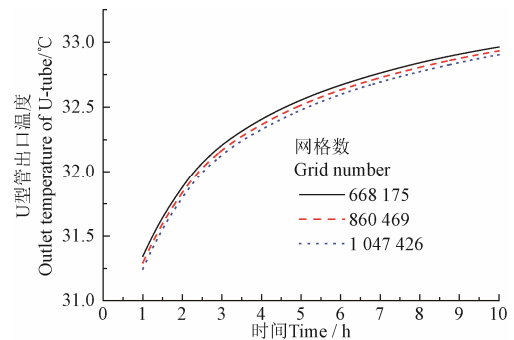


图 3 不同网格数量下的 U 型管出口温度随时间变化

Fig.3 Variations of outlet temperature of U-tube with time for different grid numbers

1.5 计算参数

首先在 FLUENT 中计算出能量桩体内因水流温度改变产生的温度场, 再将结果以体荷载的形式导入到

ABAQUS 结构场中进行热应力模拟分析，使用该种单向耦合方法可以快速的计算出能量桩产生的温度应力。

考虑到相变混凝土内 PCM 比例越大，其储能能力就越强，但抗压强度却越低^[3]。为在保证相变混凝土能量桩强度要求的前提下，尽可能的改善其换热性能，故在混凝土中添加了体积比为 8% 的 PCM，参考实际工程，模拟过程中使用的计算参数见表 1^[25]。

表 1 计算参数
Table 1 Calculated parameters

参数 Parameters	取值 Values
U 型管内径 Inside diameter of U-tube/m	0.005
U 型管外径 Outside diameter of U-tube/m	0.008
U 型管腿间距 Distance between two leg of U-tube/m	0.04
U 型管深度 Depth of U-tube/m	19
能量桩深度 Depth of energy pile/m	20
能量桩直径 Diameter of energy pile/m	0.6
计算区域直径 Diameter of computation region/m	16
U 型管导热系数 Thermal conductivity of U-tube/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.42
U 型管密度 Density of U-tube/(kg·m ⁻³)	950
U 型管比热 Specific heat of U-tube/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2 300
相变混凝土能量桩导热系数 Thermal conductivity of phase change concrete energy pile/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.1
相变混凝土能量桩密度 Density of phase change concrete energy pile/(kg·m ⁻³)	2 100
相变混凝土能量桩比热 Specific heat of phase change concrete energy pile/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 800
相变温度 Phase change temperature/℃	20
相变混凝土能量桩潜热 Latent heat of phase change concrete energy pile/(J·kg ⁻¹)	2 000
传统能量桩导热系数 Thermal conductivity of traditional energy pile/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.3
传统能量桩密度 Density of traditional energy pile/(kg·m ⁻³)	2 300
传统能量桩比热 Specific heat of traditional energy pile/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	980
土壤初始温度 Initial soil temperature/℃	18
土壤导热系数 Thermal conductivity of soil/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.8
土壤密度 Density of soil/(kg·m ⁻³)	1 800
土壤比热 Specific heat of soil/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 600
循环流体导热系数 Thermal conductivity of circulating fluid/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.6
循环流体密度 Density of circulating fluid/(kg·m ⁻³)	998
循环流体比热 Specific heat of circulating fluid/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4 182
能量桩压缩模量 Compression modulus of energy pile/MPa	30 000
土壤压缩模量 Compression modulus of soil/MPa	35
能量桩泊松比 Poisson's ratio of energy pile	0.2
土壤泊松比 Poisson's ratio of soil	0.3
土体粘聚力 Cohesion of soil/kPa	20
土壤摩擦角 Friction angle of soil/(°)	28

2 模型的试验验证

为了验证所建数值模型的可靠性，建立了相变混凝土能量桩缩尺模型试验台^[25]，试验系统由砂箱、恒温进口边界模拟系统、数据采集系统 3 部分组成。砂箱作为

能量桩热力耦合作用区域，内含能量桩区域和桩周土体区域。恒温进口边界模拟系统由恒温水浴实现，可为能量桩提供恒定的进口温度。数据采集系统用于监测能量桩的温度、桩顶位移、桩身应变以及桩周土体温度变化情况，试验台如图 4。其中砂箱的长、宽、高尺寸分别为 800、800、1 200 mm，内置能量桩直径为 100 mm，高度为 1.1 m。

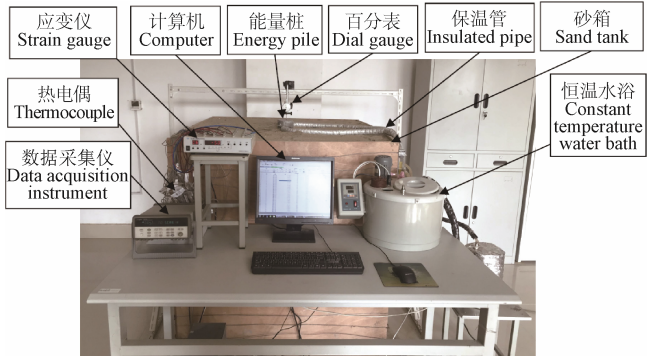


图 4 相变混凝土能量桩缩尺模型试验台
Fig.4 Small-scale model experimental bench of the phase change concrete energy pile

为了获得桩身及桩周土体的温度和桩身变形，在桩壁及桩周土体不同位置处理设热电偶用来测量温度，具体位置为桩体一侧（与进出水管垂直方向）距桩顶距离分别为 300、600、900 mm 处沿水平方向布置了三组热电偶，每组热电偶距桩壁距离依次为 0、20、40、80、120、180、260、360、480 mm；在桩埋管进出口各布置一个热电偶，用来测量进出口水温，以得到能量桩的换热量；沿桩体两侧（与进出水管垂直方向）距桩顶距离分别为 275、450、625、800、975 mm 处对称布置 10 只电阻式应变片以测量桩体应变；桩端放置应变式土压力盒用来测量桩端竖向压应力。

试验过程中，室内环境温度为 13~15 ℃，对比试验与模拟所得相变混凝土能量桩的桩壁中点温度和桩顶位移随时间的变化，结果见表 2~3。

表 2 桩壁中点温度试验值与模拟值比较
Table 2 Comparison of tested and simulated values of pile wall middle temperatures

项目 Items	时间 Time/h							
	1	4	7	10	13	16	21	24
试验值 Tested values/℃	22.7	27.9	28.9	29.4	23.9	20.9	18.5	17.6
模拟值 Simulated values/℃	23.6	28.9	29.9	30.5	24.8	21.9	19.4	18.5
相对误差 Relative error/%	4.0	3.6	3.5	3.7	3.8	4.8	4.9	5.1

分析表 2~3 可以看出，桩壁中点温度和桩顶位移的试验与模拟值随时间变化规律完全一致，但整个运行期间，模拟值略高于试验值，其原因可能是试验中混凝土浇筑不密实，导致相变混凝土能量桩内存在空气热阻，使得热量聚集在能量桩内，而模拟中不会出现上述情况。进一步分析表 2~3 可知，桩壁中点温度与桩顶位移的实时相对误差分别在 5.1%、12% 内，平均相对误差分别为 4.2%、9.9%。这在工程中是允许的，因此所建

立的能量桩数值模型可以用来模拟相变混凝土能量桩的热-力学特性。

表 3 桩顶位移试验值与模拟值比较

Table 3 Comparison of tested and simulated values of pile top displacement

项目 Items	时间 Time/h							
	1	4	7	10	13	16	20	24
试验值 Tested values/mm	0.059	0.095	0.105	0.109	0.055	0.04	0.025	0.021
模拟值 Simulated values/mm	0.065	0.104	0.116	0.12	0.061	0.044	0.028	0.023
相对误差 Relative error/%	5.1	9.5	10.1	10.1	10.9	10.0	12.0	9.5

3 计算结果与分析

基于上述验证的模型,采用表 1 中的计算参数,模拟比较传统能量桩和相变混凝土能量桩的单位桩深换热热量、土壤热影响范围、桩身位移、桩身轴力、桩侧摩阻力等的差异,分析相变过程对能量桩热力学特性的影响规律,研究桩埋管管腿间距及桩体长径比对相变混凝土能量桩热-力学特性的影响。

3.1 相变过程对能量桩热-力学特性的影响

3.1.1 换热性能

由图 5 可知,相变混凝土能量桩的换热热量明显大于传统能量桩,如运行 10 h 后,传统能量桩和相变混凝土能量桩的单位桩深换热热量分别为 125.3 和 138.2 W/m,后者比前者高 10.3%。这是由于相变混凝土能量桩内的 PCM 相变吸收了高温流体部分热量。由此可知,在能量桩中添加 PCM 可有效改善其换热性能。

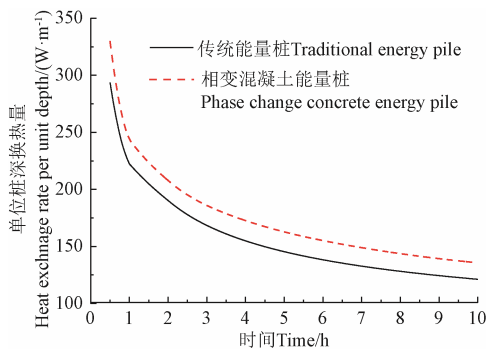


图 5 两种能量桩单位桩深换热热量随时间变化

Fig.5 Variation of heat exchange rate per unit depth with time for two kinds of energy piles

3.1.2 土壤热影响范围

为了获得相变过程对桩周土壤热影响范围的影响,图 6 给出了两种能量桩运行 10 h 后 10 m 深度处桩周土壤温度分布云图。分析图 6 可以看出,传统能量桩热影响区域明显大于相变混凝土能量桩,如传统能量桩在 X 和 Y 方向上的热影响距离分别为 0.36 和 0.42 m,而对应相变混凝土能量桩的热影响距离分别为 0.26 和 0.35 m,这主要是由于 PCM 相变吸热降低了桩身升温幅度,从而缩小了对周围土壤的热影响区域。

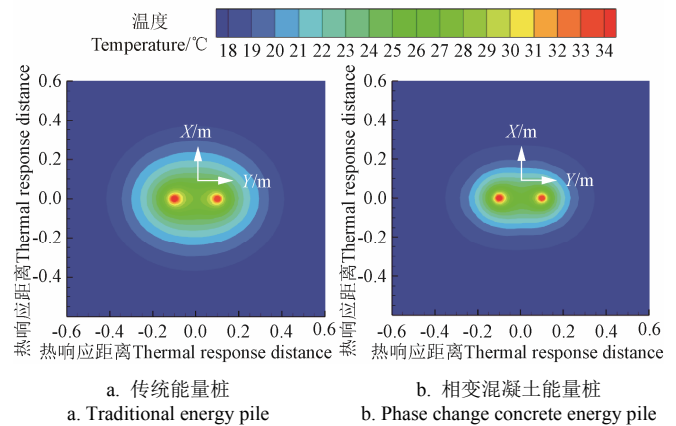


图 6 两种能量桩 10 m 深度处桩周土壤温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution contour of soil at the depth of 10m for two kinds of energy pile

3.1.3 桩身位移

分析图 7 可得,能量桩在单独力荷载作用下,桩身位移沿桩深方向逐渐减小,其主要原因是桩体受桩侧摩阻力的作用,且随着桩深增加,其侧摩阻力越大,因而位移越小。进一步由图 7 可知,在单独温度荷载下,桩身受热膨胀向两端移动,在桩身中部偏下的位置位移为零,且桩端位移小于桩顶位移,这主要是由于桩端处受土体约束,而桩顶处表现为自由膨胀。对比图 7a 与 7b 可以发现,传统能量桩的桩身位移变化量大于相变混凝土能量桩,如传统能量桩的桩顶和桩端位移分别为 0.59 mm 和 0.31 mm,而对应相变混凝土能量桩分别为 0.41 mm 和 0.22 mm,这主要是因为相变混凝土能量桩桩身温度上升幅度小,导致受热膨胀变形较小。这意味着在实际工程中,采用相变混凝土能量桩可以降低桩身与桩顶位移,有利于上部结构的稳定。

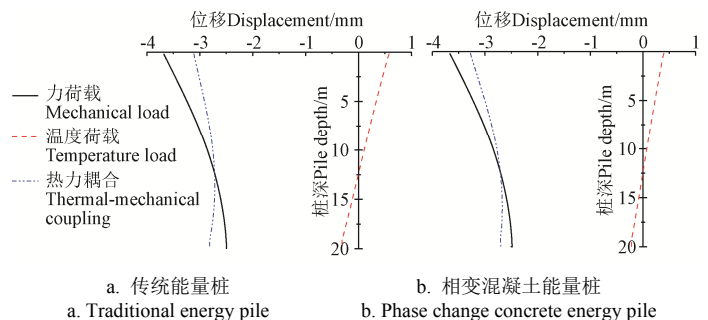


图 7 不同荷载下桩身位移随深度变化

Fig.7 Variation of pile shaft displacement with pile depth for different loads

3.1.4 桩身轴力

由图 8 可得,单独力荷载下,2 种能量桩桩身轴力沿桩深方向均呈现递减趋势,这是因为荷载从桩顶传递到桩端的过程中受到侧摩阻力的削减。单独温度荷载下,温度升高引起的桩身轴力沿桩深方向先逐渐增大,在埋管弯管处达到最大值后逐渐减小。进一步分析图 8a 与 8b 可以发现,与传统能量桩相比,相变混凝土能量桩桩身轴力较小,如桩深 10 m 处,传统和相变混凝土能量桩轴力分别为 595.6 和 576.7 kN,这是由于相

变混凝土能量桩温升幅度较小, 导致热应力较小。从图 8 中还可看出, 由于桩身温度升高引起的热应力表现为压应力, 导致热力耦合作用下桩身轴力相比力荷载单独作用时有所增大, 故在能量桩设计中应对此问题加以注意。

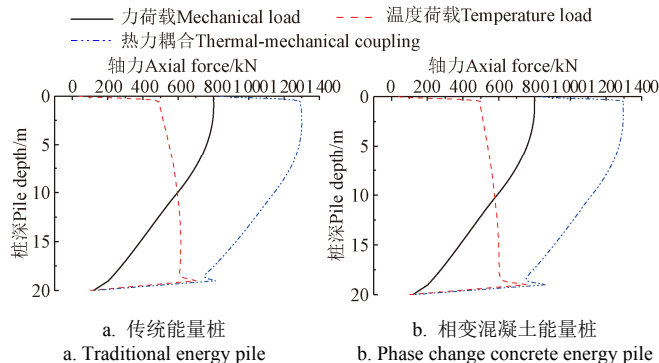


图 8 不同荷载下桩身轴力随深度变化
Fig.8 Variations of pile axial force with pile depth for different loads

3.1.5 侧摩阻力

图 9 给出了传统能量桩与相变混凝土能量桩在力荷载、热力耦合荷载下的侧摩阻力及两者侧摩阻力的增量沿桩深的变化, 可以看出, 热力耦合作用下桩身上部侧摩阻力相对于单独力荷载有所减小, 而桩身下部侧摩阻力有所增大, 这是因为在单独力荷载下桩侧摩阻力方向均向上, 而桩身受热膨胀后向两端移动, 造成附加的桩身上部侧摩阻力方向向下、下部侧摩阻力向上, 从而导致了桩身上部侧摩阻力相互抵消, 桩身下部侧摩阻力相互叠加。进一步对比分析图 9a 与 9b 可得, 相变混凝土能量桩在热力耦合作用下的侧摩阻力相对于单独力荷载的增量小于传统能量桩, 如在桩深 13 m 处, 相变混凝土能量桩和传统能量桩的侧摩阻力增量分别为 1.51 和 2.26 kPa, 这主要是因为相变混凝土能量桩受热膨胀产生的桩土相对位移较小。这说明相变能量桩因受热导致的桩土界面变化相比传统能量桩要小。

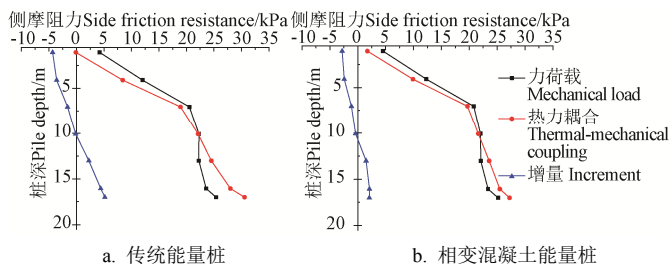


图 9 不同荷载下桩身侧摩阻力随深度变化
Fig.9 Variation of side friction resistance of pile with depth for different loads

3.2 U 型桩埋管管腿间距的影响

由图 10a 可知, 单位桩深换热量随管腿间距增加而增加, 但是增加幅度降低。如运行 5 h 时, 间距为 200 mm 时的单位桩深换热量为 162.8 W/m, 而间距分别为 300 和 400 mm 时分别为 221.1 和 231.4 W/m。这主要是因为随管腿间距加大, 两管腿间的热干扰减弱, 从而有更多的

热量输出。但管腿间距越大, 桩内 PCM 利用率却不一定越高, 正如图 10b 所示, 随着间距增大, PCM 液相率先增大后减小, 间距为 300 mm 时最大。这主要是因为间距为 300 mm 时的高温区最大, 因此 PCM 的液相率最大。由图 10b 可以进一步发现, 间距为 200 mm 时, 运行结束后, PCM 液相率逐渐减小, PCM 逐渐恢复固相; 而当间距达到 300 或 400 mm 时, 停止运行后液相率继续增加, PCM 未进入恢复状态。这主要是由于间距较大时, 高温区比较分散, 停止运行后热量会继续向中心区扩散, 导致 PCM 继续液化。进一步分析不同管腿间距下 10 m 深度处水平截面温度分布图 11 可以看出, 间距为 200 mm 时高温区相对集中, 间距为 300 mm 时高温区增大, 有利于 PCM 的熔化和换热性能的提高。但当间距为 400 mm 时, 高温区开始分散。从图 11 中还可以发现, 间距越小, 桩中心温度越高。例如, 间距为 200 mm 时, 桩中心温度可达 26 °C, 比间距为 300 mm 时高出约 4 °C。但桩中心温度过高会导致 U 形管两腿局部热短路, 不利于传热。因此, 应综合考虑桩中心温度、土壤热影响范围和 PCM 液相率来确定 U 形管两腿间距。

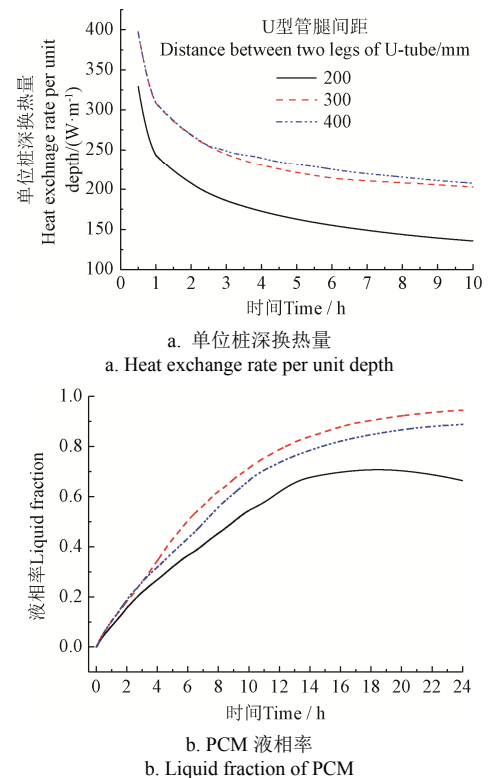


图 10 不同管腿间距下单位桩深换热量与 PCM 液相率随时间变化
Fig.10 Variations of heat exchange rate per unit depth and liquid fraction of PCM with time for different distances between two legs of U-tube

为了获得管腿间距对相变混凝土能量桩力学特性的影响, 图 12 给出了不同管腿间距下桩身位移增量、轴力、侧摩阻力的分布规律。由图 12a 可知, 管腿间距为 300 mm 时桩体受热产生的位移增量最大, 如桩顶处位移增量达 0.47 mm, 其次为管腿间距 400 mm, 最小的是管腿间距 200 mm, 这主要是因为管腿间距为 300 mm 的能量桩桩身

高温区域最大, 导致因温升而产生的膨胀量最大。进一步分析图 12b 可以看出, 桩身轴力随着管腿间距的加大而减小, 且减小的幅度较大, 这主要是因为桩身轴力受桩中心温度影响较大, 温度越高, 桩身轴力就越大。从图 12c 还可

知, 不同管腿间距下的桩侧摩阻力差别很小, 这说明在本文计算条件下, 对不同管腿间距下能量桩加热, 导致的桩土界面变化量很小。由此可得, 加大管腿间距, 可有效减小桩身轴力, 但有可能导致桩身变形增大。

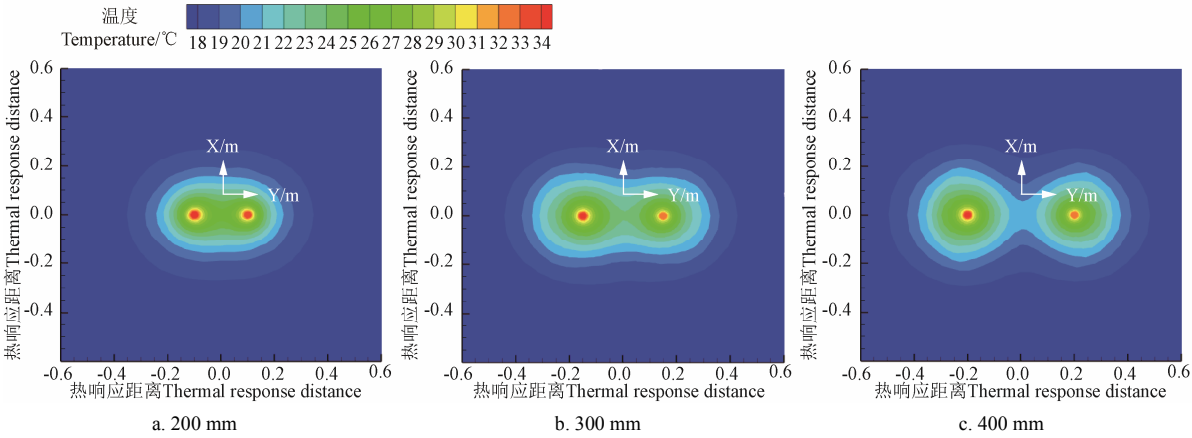


图 11 不同管腿间距下 10 m 深度处水平截面温度分布云图

Fig.11 Temperature distribution of soil at the depth of 10 m for different distances of two legs of U-tube

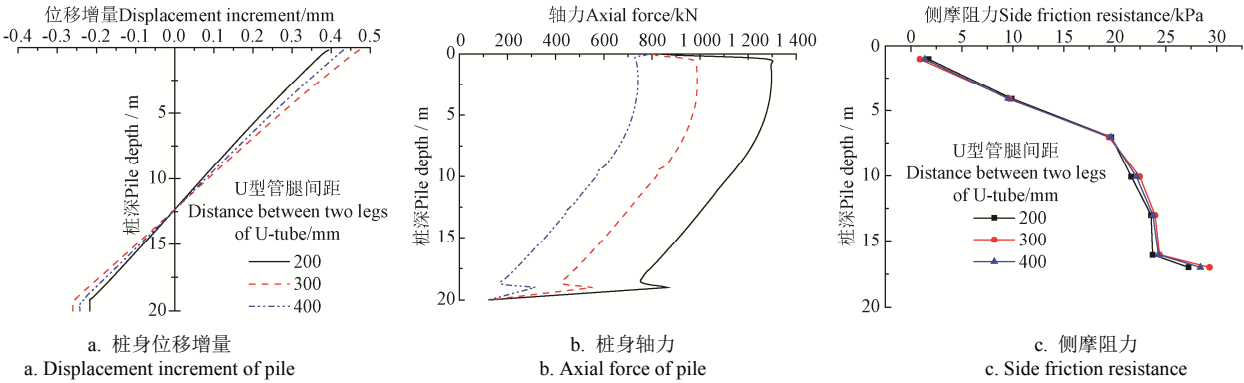


图 12 不同管腿间距下能量桩桩身位移增量、轴力和侧摩阻力沿深度变化

Fig.12 Variations of displacement increment, axial force and side friction resistance of pile with depth for different distances of two legs of U-tube

3.3 桩体长径比

桩直径一定时, 桩越长, 内置埋管总长度也越长, 总换热量越大, 但温度变化产生的桩身变形也将越大。为了探讨长径比对相变混凝土能量桩热-力特性的影响, 表 4 给出了 3 种长径比下相变混凝土能量桩对应的桩径及桩长。

表 4 3 种相变混凝土能量桩尺寸			
Table 4 Size of three kinds of phase change concrete energy pile			
试验工况 Test mode	桩长 Pile length/m	桩径 Pile diameter/m	长径比 Ratio of length to diameter
1	20	0.6	33
2	30	0.6	50
3	40	0.6	67

由图 13a 可以看出, 不同长径比下的总换热量随时间变化趋势相同, 且随着长径比的增加而增大, 如运行至 10 h 时, 长径比为 33、50、67 时的单桩总换热量依次为 2 712.3、5 127.9、6 670 W。这主要是有两方面的原因, 一是长径比越大, 桩内埋管的总长度也就越长, 致使管内流体与桩换热会更加充分; 二是长径比越大,

PCM 融化量越多, 正如图 14a 所示, 吸收的热量也就越大。进一步分析图 13b 可知, 随着运行时间的推移, 长径比为 50 的单位桩深换热量逐渐超过长径比为 67 的能量桩, 这主要是因为两者的总换热量差值逐渐减小, 但前者的桩长却比后者小得多, 最终导致前者的单位桩深换热量反超后者, 这表明加大长径比虽然有利于增加能量桩的总换热量, 但单位桩深换热量未必会随之增加。因此, 应综合考虑蓄热需求以及换热效果来确定能量桩长径比的大小。

由图 14a 可知, 随着长径比的增大, PCM 融化量逐渐增大, 这意味着长径比越大, PCM 相变融化可吸收的热量就越多。进一步分析图 14b 可知, PCM 液相率随着长径比的增加呈现出先增大后减小的趋势, 这主要是因为长径比为 50 的能量桩温升幅度最大, 导致 PCM 融化的比例也就最大。由此可得, 从换热量的角度, 长径比越大, PCM 融化量越大, 可吸收的热量就越多。但从 PCM 利用程度的角度, 长径比越大, PCM 液相率却不一定越大。因此, 实际应用中应充分考虑 PCM 利用率来选定桩长径比。

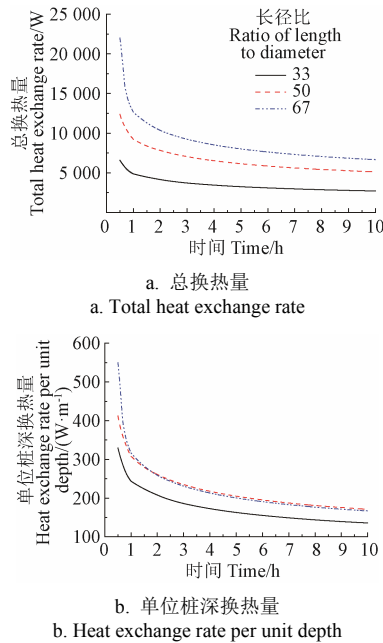


图 13 不同长径比下换热量随时间变化

Fig.13 Variations of heat exchange rate with time for different ratios of length to diameter of pile

为了进一步得到长径比对相变混凝土能量桩力学特性的影响,图 15 给出了不同长径比下相变混凝土能量桩桩身位移增量、轴力、侧摩阻力沿桩深分布曲线。从图 15a 中可以看出,随着长径比的增大,桩身位移零点下移,长径比为 33 的位移零点距桩顶 0.6 倍桩长处,而长径比为 50 和 67 的桩基位移零点则分别距桩顶 0.64 和 0.7 倍桩长处。此外,长径比越大,温度变化所引起的桩身位

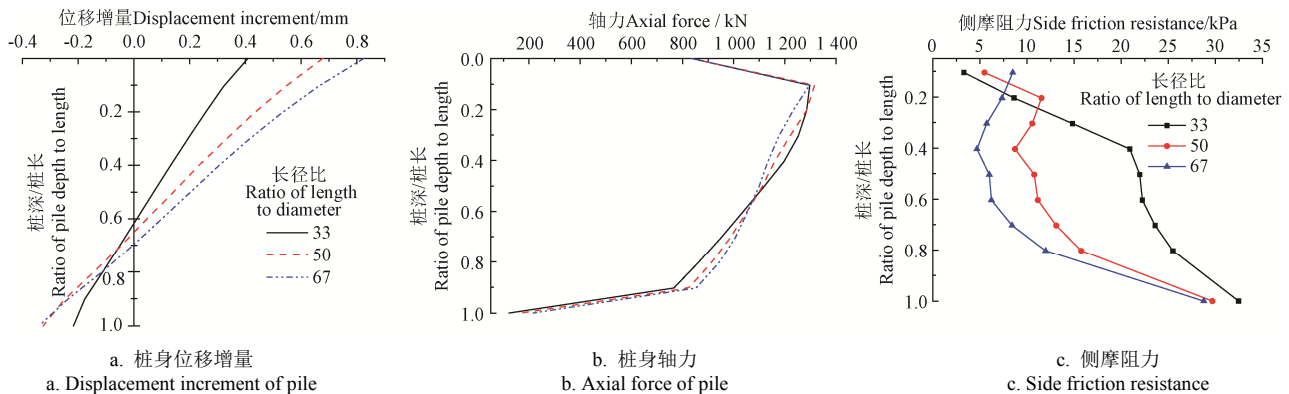


图 15 不同长径比下桩身位移增量、轴力和侧摩阻力分布

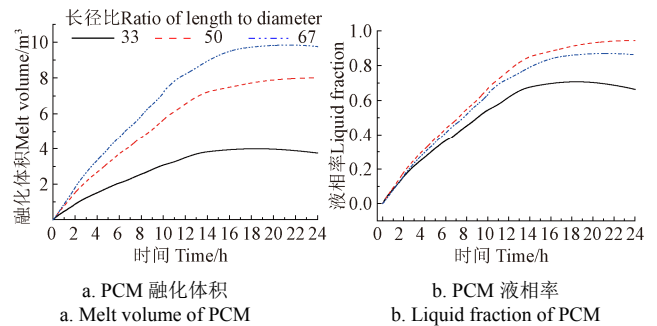
Fig.15 Variations of displacement increment, axial force and side friction resistance of pile with depth for different ratios of length to diameter of pile

4 结论

1) 由于 PCM 相变过程中温度恒定并且液化吸收热量,相比传统能量桩,相变混凝土能量桩的换热性能可提高 10.3%,桩身温度变化幅度降低,土壤热影响范围缩小。

2) 与传统能量桩相比,相变混凝土能量桩由于 PCM 相变吸热导致桩身温升幅度小,从而产生的桩身位移、轴力以及侧摩阻力变化量较小,这有利于上部结构的稳定。传统能量桩的桩顶和桩端位移分别为 0.59 mm 和

移增量变化就越大,如在长径比为 33、50 和 67 时,桩顶位移增量分别为 0.41、0.62 和 0.82 mm。因此,当相变混凝土能量桩长径比较大时,应注意温度变化造成的桩身变形及其对上部建筑物稳定性的影响。进一步分析图 15b 可以发现,对于长径比不同的相变混凝土能量桩,桩身上下部轴力变化趋势相反,桩身上部轴力随着长径比的增大而减小,而桩身下部却随着长径比的增加而增大,这主要是因为桩顶力荷载产生的轴力在桩身上部起到主要作用,而长径比越大,桩顶力荷载产生的轴力就越小,且沿着深度方向逐渐递减,温度荷载产生的轴力将会逐渐起到主要作用。从图 15c 中还可知,随着长径比的增加,桩身上部侧摩阻力逐渐增大,而桩身中下部却呈现递减的趋势。由此可得,桩体长径比对相变混凝土能量桩的力学特性影响较大,实际工程中,应结合换热需求来确定桩体长径比。

图 14 不同长径比下 PCM 融化情况随时间变化
Fig.14 Variations of liquid case of PCM with time for different ratios of length to diameter of pile

0.31 mm,而对应相变混凝土能量桩分别为 0.41 mm 和 0.22 mm;桩深 10 m 处,传统和相变混凝土能量桩轴力分别为 595.6 和 576.7 kN,桩深 13 m 处,传统和相变混凝土能量桩和的侧摩阻力增量分别为 2.26 和 1.51 kPa。

3) 相变混凝土能量桩的换热性能和力学特性受桩埋管管腿间距影响较大,随着腿间距的增大,换热率和土壤热影响范围逐渐增大,温度变化引起的 PCM 液相率和桩身位移增量呈现先增大后减小的趋势。间距为 200 mm 时的单位桩深换热量为 162.8 W/m,而间距为 300 和 400 mm 时分别为 221.1 和 231.4 W/m。此外,管腿间距

越大, 桩轴温升越小, 桩轴力越小。

4) 加大长径比有利于增加相变混凝土能量桩的总换热量, 但单位桩深换热量未必会随之增加。从增加换热量的角度, 长径比越大, PCM 融化量越大, 可吸收的热量就越多。但从 PCM 利用程度的角度, 长径比越大, PCM 液相率却不一定越大。此外, 桩体长径比对相变混凝土能量桩的力学特性影响较大, 实际工程中, 应结合换热需求来确定桩体长径比。

5) 试验验证表明, 桩壁中点温度与桩顶位移的实时相对误差分别在 5.1%、12% 内, 平均相对误差分别为 4.2%、9.9%。这在工程中是允许的, 说明本文所建立的数值模型可以用来模拟相变混凝土能量桩的热力学特性。

[参 考 文 献]

- [1] Yuan Y P, Cao X L, Sun L L, et al. Ground source heat pump system: A review of simulation in Chinese[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(9): 6814-6822.
- [2] Luo J, Zhao H F, Gui S Q, et al. Study of thermal migration and induced mechanical effects in double U-tube energy piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 91: 1-11.
- [3] Yang H B, Memon S A, Bao X H, et al. Design and preparation of carbon based composite phase change material for energy pile[J]. *Material*, 2017, 10: 391.
- [4] 李启宇. 相变材料回填的埋管的传热特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
Li Qiyu. Study on Heat Transfer Characteristics of Phase Change Material Backfilling Ground Source Heat Pump[D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang J L, Zhao J D, Liu N. Numerical simulation of borehole heat transfer with phase change material as grout[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 577: 44-47.
- [6] 王畅. 相变材料回填埋管换热器换热特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Wang Chang. Study on Heat Exchange Characteristics of Ground Tube Heat Exchanger with Phase Change Material backfill[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [7] Chen F, Mao J, Li C, et al. Restoration performance and operation characteristics of a vertical U-tube ground source heat pump system with phase change grouts under different running modes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 467-482.
- [8] Chen F, Mao J, Chen S, et al. Efficiency analysis of utilizing phase change materials as grout for a vertical U-tube heat exchanger coupled ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 698-709.
- [9] Yang W B, Xu R, Yang B B, et al. Experimental and numerical investigations on the thermal performance of a borehole ground heat exchanger with PCM backfill[J]. *Energy*, 2019, 174: 216-235.
- [10] 杨卫波, 孙露露, 吴晷. 相变材料回填埋管换热器蓄能传热特性[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(24): 193-199.
Yang Weibo, Sun Lulu, Wu Xuan. Energy storage and heat transfer characteristics of ground heat exchanger with phase change backfill materials. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(24): 193-99. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨卫波, 徐瑞, 杨晶晶, 等. 相变材料回填埋管换热器热响应特性的数值模拟及试验验证[J]. *流体机械*, 2019, 47(7): 72-79, 60.
Yang Weibo, Xu Rui, Yang Jingjing, et al. Numerical simulation and experimental validation of the thermal response characteristics of ground heat exchanger with PCM backfill[J]. *Fluid Machinery*, 2019, 47(7): 72-79, 60. (in Chinese with English abstract)
- [12] Lei H Y, Zhu N. Analysis of phase change materials (PCMs) used for borehole fill materials[J]. *Transactions - Geothermal Resources Council* 2009, 33: 83-88.
- [13] Lei H Y, Dai C S. Comparative experiment of different backfill grouts for concentric ground heat exchangers[J]. *GRC Transactions* 2013, 37: 597-600.
- [14] 雷海燕. 埋管相变回填材料的理论分析与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
Lei Haiyan. Analytical and Experimental Study of Phase Change Materials Used as Backfill Material for Borehole Heat Exchanger[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [15] Qi D, Pu L, Sun F T, et al. Numerical investigation on thermal performance of ground heat exchangers using phase change materials as grout for ground source heat pump system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 1023-1032.
- [16] Han C J, Yu X. An innovative energy pile technology to expand the viability of geothermal bridge deck snow melting for different United States regions: Computational assisted feasibility analyses[J]. *Renewable Energy*, 2018, 123: 417-427.
- [17] 白丽丽, 裴华富, 宋怀博, 等. 相变能量桩段模型传热模拟[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 684-690.
Bai Lili, Pei Huaifu, Song Huaibo, et al. Heat transfer simulation of phase change energy pile[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 684-690. (in Chinese with English abstract)
- [18] 崔宏志, 李宇博, 包小华, 等. 饱和砂土地基相变桩的热力学特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(4): 564-571.
Cui Hongzhi, Li Yubo, Bao Xiaohua, et al. Investigation on thermo-mechanical characteristics of phase change pile in saturated sand foundation by model tests[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(4): 564-571. (in Chinese with English abstract)
- [19] Bao X H, Memon S A, Yang H B, et al. Thermal properties of cement-based composites for geothermal energy applications[J]. *Material*, 2017, 10: 462.
- [20] Batini N, Rotta Loria A, Conti P, et al. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 86: 199-213.
- [21] ANSYS Fluent Inc. ANSYS fluent user's guide. 2013.

- [22] Jiang G, Li R F, Wang H. Numerical analysis of bearing capacity of floating energy pile during full process thermal-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38: 1-11.
- [23] Fei K, Dai D. Experimental and numerical study on the behavior of energy piles subjected to thermal cycles[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-13.
- [24] 杨金尤, 雷金波, 邹永强, 等. 基于 ABAQUS 的带帽桩复合地基初始地应力平衡方法浅析[J]. 南昌航空大学学报, 2017, 31(4): 73-78.
- Yang Jinyou, Lei Jinbo, Zou Yongqiang, et al. Preliminary analysis on initial stress balance method of composite foundation with cap pile based on ABAQUS[J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences, 2017, 31(4): 73-78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨彬彬. 相变混凝土能量桩换热性能及热力耦合特性的理论与实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- Yang Binbin. Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Performance and Thermo-mechanical Coupling Characteristics of Phase Change Concrete Energy Pile[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020. (in Chinese with English abstract)

Numerical simulation and experimental validation of the thermo-mechanical characteristics of phase change concrete energy pile

Yang Weibo^{1,2}, Yang Binbin¹, Wang Feng¹

(1. College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering (Xi'an Jiaotong University), Ministry of Education, Xi'an 710049, China)

Abstract: Energy shortage and environmental pollution have led to the wide use of clean and renewable energy. A ground source heat pump (GSHP) is extensively utilized in the new building of various renewable energy, because of its energy-saving, high efficiency and environmental friendliness. However, the current GSHP development is limited to a certain extent, due mainly to its high cost, and large land areas resulting from drilling boreholes. Alternatively, the concept of an energy pile was proposed to combine the GSHP exchanger of ground heat with the pile foundation of a building. However, the temperature change of the pile body can result in the thermal expansion and contraction of an energy pile, thereby inducing the pile deformation in the actual operation of energy piles. This variation of temperature has endangered the structural safety of energy piles, particularly on the thermal performance and bearing capacity. Therefore, a feasible energy pile with phase change concrete has been selected, where a type of phase change material (PCM) can serve as a part of filling material in a traditional energy pile. The thermal performance of the energy pile with phase change concrete was greatly enhanced, indicating the weak temperature variation and deformation during the heat exchange, due largely to the invariable temperature and the latent heat released during the phase change of PCM. In this study, a 3D numerical model of energy piles with phase change concrete was established to evaluate the thermo-mechanical characteristics of a whole energy pile under thermal-mechanical coupling loads. A systematic analysis was made to compare the thermo-mechanical characteristics of the traditional energy pile and the new one with phase change concrete. An experiment was conducted to explore the effects of the distance between two legs of U-tube, and the ratio of length to diameter of pile body on the thermo-mechanical behavior of an energy pile with phase change concrete. The results showed that the solid-liquid phase change of PCM increased the heat exchange rate at the per unit depth of pile by 10.3%, while reduced the changes in the temperature of the pile body. There was a reduced change in the displacement, axial force, and side friction resistance of the pile body caused by the temperature change. With the increase of distance between two legs of the U-tube, the heat transfer rate and heat influence range of soil increased in the energy pile, while the axial force of the pile decreased, as well as the pile displacement first increased and then decreased. An increase in the ratio of length to diameter improved the total heat exchange rate of energy piles, but reduced the heat exchange rate at the per unit depth of pile, while increased the pile top displacement, which was not conducive to the stability of the energy pile. The experimental validation showed that the predicted relative errors of middle temperature in the pile wall and displacement at the pile top were within 5.1% and 12%, respectively, and the average relative errors were 4.2% and 9.9%, respectively. Therefore, the developed numerical model of an energy pile can be used to simulate the thermo-mechanical characteristics of an energy pile with phase change concrete.

Keywords: energy pile; phase change ; thermo-mechanical characteristics; numerical simulation; experimental validation