

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

桩埋管参数对渗流下能量桩热--力耦合特性的影响

杨卫波,张来军,汪 峰

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

YANG Weibo, ZHANG Laijun, and WANG Feng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108036

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage 李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

基于能量法的轴横向荷载作用下单桩受力变形分析

Deformation analysis of pile under combined axial and lateral loads by using the energy method 张玲, 陈金海, 欧强 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 81-91

半干旱地区地表--地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas 马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu 曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

"引哈济党"工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波,李玉山,胡立堂,尹政,胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland 都会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182–191



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108036

杨卫波,张来军,汪峰. 桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 176-185. YANG Weibo, ZHANG Laijun, WANG Feng. Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 176-185.

桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

杨卫波,张来军,汪 峰

(扬州大学电气与能源动力工程学院,江苏扬州 225127)

摘要:为获得地下水渗流作用下桩埋管参数对能量桩热-力耦合特性的影响,建立了不同埋管参数的能量桩数值模型,分 析了桩埋管数量、埋管布置形式、埋管管径对单位桩深换热量、日换热量、桩截面平均温升、桩身位移增量及桩身附加温 度荷载的影响。结果表明:增加埋管数量可以增大能量桩换热量,但也会加剧桩内不同埋管间的热干扰,导致换热性能下 降及桩身位移和附加温度荷载的增加;渗流下桩埋管的布置形式对其换热性能有显著影响,而对桩的力学特性影响较小, 且渗流速度越大,2种布置形式对应的能量桩换热量差异逐渐增加,桩顶位移增量与桩身附加温度荷载逐渐减少;增加埋管 管径可以提高能量桩的换热量,但也会加大桩身和桩周土壤温升,导致桩身位移和附加温度荷载增大。研究结论对于渗流 作用下能量桩的优化设计与高效运行具有一定的指导意义。

关键词:能量桩;地下水渗流;桩埋管参数;热-力耦合;数值模拟 中图分类号:TU832;TV139.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3665(2022)05-0176-10

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermalmechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

YANG Weibo, ZHANG Laijun, WANG Feng

(College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

Abstract: In order to examine the influences of buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy piles under the groundwater seepage, the numerical models of energy piles with different buried pipe parameters are established. The influences of the buried pipe number, layout of buried pipe, and diameter of buried pipe on the heat exchange rate per pile depth, daily heat exchange amount, pile body average temperature rises, displacement increment, and additional temperature load are investigated. The results show that the increasing number of buried pipes can improve the heat transfer of energy pile, but also increase the thermal interference between different buried pipes in the pile, resulting in the decrease of heat transfer performance and the increase of pile displacement and additional temperature load. Under the groundwater seepage, the layout of buried pipes has a significant effect on the heat transfer performance, but has little effect on the mechanical properties of the pile. Moreover, with the increasing seepage velocity, the difference of heat transfer rates of the pile energy piles corresponding to two layouts increases gradually, and the pile top displacement increment and the pile

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2021-12-12 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978599);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1711) 第一作者:杨卫波(1975-),男,博士,教授,博导,主要从事地源热泵与建筑节能等方面的研究。E-mail: yangwb2004@163.com additional temperature load decrease gradually. The increasing diameter of buried pipe can improve the heat transfer of energy pile, but it will also increase the temperature rise of the pile and the soil around the pile, leading to the increase of pile displacement and additional temperature load. The research results can provide guidance for the optimal design and efficient operation of energy pile under seepage action.

Keywords: energy pile; groundwater seepage; pile buried pipe parameter; thermal-mechanical coupling; numerical simulation

地源热泵由于其节能、高效、环保等优势而被认 为是可再生能源建筑应用最为有效的技术之一^[1],然 而,地源热泵高额的钻孔费用与大的埋管占地面积, 在一定程度上限制了其大面积推广。能量桩作为一 种将地源热泵地埋管与桩基相结合而构成的兼具承 担建筑荷载及换热双重功能的新型能源地下结构,因 其相对于传统地源热泵技术,具有节约埋管占地面 积、降低钻孔费用等优势而在建筑节能领域得到推广 应用^[2-3]。

能量桩的热-力耦合特性受多种因素的影响,其中 包括地下水渗流与桩埋管参数。吴冠中等鬥针对埋设 有单U与双U管的PHC预制管能量桩开展了单U、 双U管能量桩的现场热响应测试,获得了2种埋管形 式能量桩在加热过程中桩身的温度与应变变化情 况。常虹等^[5]基于 ABAQUS 软件,比较了在循环温度 荷载下,不同埋管形式能量桩的热-力学特性,结果显 示相同输入功率下并联U型桩的换热量、桩顶沉降量 和桩侧摩阻力均高于单U型桩。赵蕾等⁶⁶基于 COM-SOL软件对比分析了并联双螺旋形、双螺旋形及 W形埋管能量桩的热-力耦合特性,结果表明双螺旋 形埋管能量桩的换热性能较好,有利于提高热泵系统 性能,W形埋管能量桩桩体温度、附加温度荷载较其 他2种大。王成龙等^[7]针对单U型、W型、螺旋型埋 管能量桩开展了对比模型试验,结果表明输入功率相 同时 W 型和螺旋型埋管能量桩的应力变化和桩顶沉 降量均高于单U型桩。Park 等^[8-9] 对不同埋管形式的 能量桩进行了现场热响应试验,结果表明增加换热面 积和管长可改善能量桩热性能,但由于每个管道回路 之间的热干扰,过于密集会降低热性能改善。

为进一步评价地下水渗流对能量桩热-力学特性 的影响, Go等^[10]分析了地下水渗流对能量桩换热对 长期土壤温度响应的影响, 结果表明相比于无地下水 渗流, 地下水渗流可以削减土壤温升。You等^[11]和Wang 等^[12]利用三维有限元模型模拟研究了不同地下水渗 流速度下能量桩的换热性能, 认为地下水渗流除了能 显著增加桩基地埋管换热器的传热性能, 还能加速其 传热性能达到稳定状态的过程。Zhang 等^[13] 建立了考虑3个方向渗流的能量桩三维渗流传热数学模型。Go等^[14] 提出了一种考虑地下水平流的螺旋形能量桩混合设计算法,研究了地下水水平渗流对能量桩运行参数设计结果的影响,结果表明水平渗流减小了桩间的相互热干扰效应,有利于能源桩的经济设计。You等^[15] 建立了考虑地下水渗流的螺旋埋管能量桩桩群三维解析模型,分析了不同参数对桩群传热性能的影响,结果表明渗流速度对保持桩周土壤温度场稳定的贡献最大,且较大的渗流速度可以缓解土壤因年取热排热不平衡而引起的长期温度失衡问题。

综上可以看出,目前有关桩埋管参数的研究主要 集中于埋管形式对能量桩热性能与力学特性的影响, 地下水渗流方面主要侧重于地下水渗流对能量桩换 热性能的影响,而针对渗流作用下桩埋管参数对能量 桩热-力耦合特性影响的研究较少,尤其是地下水渗流 作用下桩埋管布置形式、数量及埋管直径等对能量桩 热-力学特性影响机理需进一步研究。

1 计算模型

1.1 物理模型

渗流作用下能量桩与周围土壤间的相互作用是 一个复杂的热-流-力耦合过程,包括桩埋管内的对流 换热、埋管壁与混凝土桩身的导热、混凝土桩身与桩 周土壤的导热、地下水渗流传热及桩土温度变化而引 起的热变形等,为简化分析作如下假设:

(1)传热过程中桩身混凝土的热物性参数保持不 变,桩身混凝土以导热的方式进行热量传递;

(2)不考虑土壤沿深度方向的温度变化和地表表 面空气换热的影响;

(3)桩周土壤是一种充满水的多孔介质,且热量 传递是通过多孔介质固相以传导方式和多孔介质液 相对流换热的方式进行;

(4)不考虑桩埋管管壁与桩身、桩身与桩周土壤的接触热阻;

(5)渗流速度和方向保持不变,且不考虑渗流速

度沿深度方向的变化;

(6)桩体为弹性变形,桩周土壤发生弹塑性变形, 桩土间摩擦系数保持不变。

基于以上假设,参考实际工程中能量桩所用参数,建立了渗流场下内置并联双U埋管能量桩的换热 及热-力耦合物理模型。为便于分析,定义x正方向为 渗流下游,y方向垂直于渗流方向,z方向为深度方向, 能量桩物理模型示意图见图1,其中尺寸以模拟周期 内计算边界不受干扰为依据确定。



注: T_m代表进口流体的温度; T_{out}代表出口流体的温度。

1.2 数学模型

1.2.1 管内流体控制方程

能量桩内置U型管内换热流体处于湍流状态,采用 Realizable *k-ε* 湍流模型^[16]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\rm f}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{\rm f}\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_{\rm f}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho_{\rm f} C_1 E\varepsilon - \rho_{\rm f} C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}}$$
(1)

式中: t---时间/s;

- *x_j*——坐标分量/m;
- u_j — x_j 坐标上的速度矢量分量/(m·s⁻¹);
- E——应变率张量的标量形式/(s⁻¹);
- μ——动力黏度/(Pa·s);
- v——运动黏度/(m²·s⁻¹);
- μ_{f} —湍流黏度/(Pa·s);
- ε——湍流耗散率;
- σ_{ε} ——湍动能 ε 的普朗特数;

 C_1 、 C_2 ——经验常数。

1.2.2 桩基传热控制方程

能量桩混凝土桩基内部热量传递以热传导方式^[17] 进行:

$$\rho_{\rm c}C_{\rm c}\frac{\partial T_{\rm c}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\rm c}\nabla T_{\rm c}) + q_{\rm c}$$
(2)

式中: ρ_{c} ——混凝土桩基密度/(kg·m⁻³);

- C_{c} ——混凝土桩基比热容/(J·kg⁻¹·K⁻¹);
- λ_c ——混凝土桩基导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹);

 q_{c} —桩基体积热源/(W·m⁻³)。

1.2.3 土壤多孔介质区域控制方程 能量方程^[17] 为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\gamma \rho_{\rm sf} E_{\rm sf} + (1 - \gamma) \rho_{\rm s} E_{\rm s} \right] + \nabla \cdot \left[\boldsymbol{\nu} \left(\rho_{\rm sf} E_{\rm sf} + P \right) \right] = S_{\rm sf} + \nabla \cdot \left[\lambda_{\rm eff} \nabla T - \left(\sum_{i} h_{i} J_{i} \right) + (\bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \boldsymbol{\nu}) \right]$$
(3)

式中:γ——多孔介质孔隙率;

 $ρ_{sfv} ρ_s \longrightarrow$ 多孔介质流体密度和固体密度/(kg·m⁻³); $E_{sv} E_{sf} \longrightarrow$ 多孔介质中固体和渗流流体的比能 /(J·kg⁻¹);

- S_{sf} —体积热源和化学反应产热率/(W·m⁻³);
- h_i ——渗流流体的比焓/(J·kg⁻¹);
- J_i ——渗流流体扩散通量/(kg·m⁻²·s⁻¹);
- **v**——流体表观流速/(m·s⁻¹);
- λ_{eff}——土壤的有效热传导系数/(W·m⁻¹·K⁻¹);

 $\bar{\tau} \cdot v$ — 黏性耗散/(W·m⁻²)。

多孔介质有效热传导系数λ_{eff}计算公式如下:

$$\lambda_{\rm eff} = \gamma \lambda_{\rm sf} + (1 - \gamma) \lambda_{\rm s} \tag{4}$$

式中: λ_{sf} 、 λ_{s} —多孔介质中渗流流体和固体的热传导 率/($\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1}$)。

动量方程是在标准流体流动方程中加入动量源项,视土壤为均匀多孔介质,其动量源项可以简化为:

连续性方程为:

$$\frac{\partial(\gamma\rho_{\rm sf})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\rho_{\rm sf}\nu) = 0 \tag{6}$$

1.2.4 桩土本构模型

桩周土壤强度超过屈服极限时会进入弹塑性阶段,而此时桩身由于混凝土的刚度远大于桩周土壤而始终处于弹性变形阶段。因此,此处能量桩桩身采用理想状态下的弹性本构模型¹⁸,见式(7):

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{Obs}} + \boldsymbol{\alpha}_{\text{c}} \Delta T) \tag{7}$$

式中: σ——应力矩阵/kPa;

D——弹性矩阵/kPa;

 a_{c} ——桩身混凝土的热膨胀系数矩阵/°C⁻¹;

 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{Obs}}$ ——桩身受热产生的观测应变矩阵;

 ΔT ——桩身温度相对于初始温度的变化值/°C。

桩周土壤采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型^[18], 见式(8):

$$R_{\rm mc}q - p\tan\varphi - c = 0 \tag{8}$$

$$R_{\rm mc} = \frac{1}{\sqrt{3}}\cos\varphi\sin\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3}\cos\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right)\tan\varphi \qquad (9)$$

1.3 定解条件

1.3.1 温度场

(1)初始条件

$$T_{\rm f}(z,t) = T_{\rm c}(x,y,z,t) = T_{\rm s}(x,y,z,t) = T_{\rm 0}(t=0)$$
(10)
(2) \delta \,\mathbf{R}_{\rm A}/\delta.

(2) 辺界余件

$$\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0 \tag{11}$$

2)底部边界条件:

$$\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=25} = 0 \tag{12}$$

3) 土壤远边界条件:

$$T_{s}(y,z,t)\Big|_{y=\pm7.5} = T_{0}$$
(13)

式中: *T_i*(*z*, *t*) ----- *t* 时刻能量桩内置 U 型管内流体沿深 度 *z* 处的温度/°C;

 T_0 —土壤初始温度/°C。

1.3.2 渗流场

杨卫波,等:桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

多孔介质渗流入口采用速度边界,进口流体速度 设置为恒定,且渗流进口流体温度为17.5℃,渗流方 向只沿 x 轴正方向,为避免计算过程产生回流效应将 出口设置为压力出口。

1.3.3 结构场

结构场约束主要分为以下 4 个方面:(1)土壤的底 部设置为固定端约束,即来自 x、y、z 3 个方向的位移 均为 0;(2)土壤的顶部不施加约束,将其视为自由面; (3)数值模型中考虑了初始地应力的平衡问题,在设 置土体侧面边界条件时,须保持计算域内土壤在 z 方 向上为自由移动状态,并对土壤 x、y 边界面施加位移 为 0 的约束;(4)桩顶施加向下的力荷载,同时桩身受 热(受冷)可以自由膨胀(收缩),即桩身在 x、y、z 3 个 方向上均为自由移动状态。

1.4 网格划分

利用 Gambit 软件建立了内置并联双U型埋管的 能量桩模型。考虑到U型管沿深度方向较长,沿深度 方向采用较大的网格间距;U型管弯管部分易产生流 动漩涡,加密该处的网格数量;为保证各接触面处模 拟结果的准确性,U型埋管、桩身和桩周土壤沿深度 方向的网格划分间距一致;U型弯管周围桩身采用非 结构化网格,将其加密处理以提高网格质量;桩身下 部桩周土壤区域的网格沿深度方向由密到疏以减少 网格数量。部分网格划分示意图如图2所示。



为了验证网格划分的可靠性,对网格进行密度和时间步长的独立性验证,分别建立网格数量为70×10⁴、99×10⁴、116×10⁴、225×10⁴和342×10⁴的模型,将模型在相同的计算条件下连续运行24h,并选取时间步

长 60, 120, 300, 600, 900, 1 200 s, 综合考虑精度与计算 时间, 最终得到网格数为 116×10⁴、时间步长为 600 s。

2 计算条件

· 180 ·

利用 Fluent 软件模拟研究了渗流场下能量桩的换 热性能,模拟运行时间为 14 d,桩埋管入口水温为 35 °C,流速为 0.6 m/s,桩身及桩周土壤的初始温度设 定为 17.5 °C,选取 60 m/a 作为地下水渗流速度。基于 有限元 Abaqus 软件求解渗流场下能量桩的热-力耦合 特性,模拟条件见表 1^[19]。

表 1 模拟计算条件 Table 1 Calculated conditions for simulation

参数	数值
 U型管内/外径/mm	25/32
U型管导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.48
U型管密度/(kg·m ⁻³)	1 200
U型管比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2 300
混凝土密度/(kg·m ⁻³)	2 500
混凝土导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.3
混凝土比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	960
土壤固体成分密度/(kg·m ⁻³)	1 800
土壤固体成分比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 600
土壤固体成分导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.7
土壤孔隙率	0.4
循环流体密度/(kg·m ⁻³)	1 000
循环流体导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.67
循环流体比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4 216
土壤压缩模量/MPa	35
土壤泊松比	0.3
土壤黏聚力/kPa	20
土壤内摩擦角/(°)	30
混凝土压缩模量/MPa	30 000
混凝土泊松比	0.2

3 分析与讨论

3.1 桩埋管数量

为了获得桩埋管数量对能量桩热-力耦合特性的 影响,对比分析了内置单U、并联双U、并联4U和并 联5U埋管能量桩的换热性能和力学特性,其中单 U管脚间距为0.4 m,双U和4U管脚间距为0.2 m, 5U管脚间距为0.12 m,图3中给出了4种桩埋管数量 截面图。

由图 4 可知, 4 种埋管数量下单位桩深换热量和 日换热量均随运行时间逐渐减小, 且运行至第 5 天后 换热量衰减趋于平稳。这主要是由于运行初始阶段, 桩身与桩周土壤换热温差大, 但随着运行时间的增



Fig. 3 Section diagram of energy pile with four kinds of buried pipe numbers

加,换热温差迅速减小,同时渗流将部分换热量沿渗 流方向携带至下游,改善了能量桩的换热性能,因而 能量桩的换热量呈现出先下降后平稳的变化趋势。 进一步分析图4还可知,当埋管数量从单U增加至 4U时,单位桩深换热量会逐渐增大,但当超过4个以 后换热量反而减少。正如图4所示,运行结束后,单 U、双U、4U、5U埋管对应的单位桩深换热量分别为





71.46,94.71,115.04,113.99 W/m,对应的日换热量分别为92.66,122.80,149.14,147.78 MJ,这主要是因为增加桩内埋管数量,在增加换热面积的同时也增加了U型支管间的热短路效应,削弱了埋管与桩身之间的换热效率;当埋管数超过某一值后,桩内产生严重的热量堆积,此时增加桩埋管数量反而会削弱埋管与桩身的换交换。因此实际工程中,应合理确定桩内埋管数量。

为进一步探讨渗流场下桩埋管数量对能量桩力 学特性的影响,图5给出了4种埋管数量下桩身截面 平均温升、位移增量及附加温度荷载沿深度方向分布 曲线。从图中可以看出,桩埋管数量越多,桩身温升、 位移增量、附加温度荷载越大。如运行结束后,单U、 双U、4U、5U埋管对应的最大桩身温升分别为9.95, 12.95,15.55,15.75°C,对应的桩顶位移增量分别为0.75, 0.95,1.15,1.16 mm,相应的最大附加热荷载分别为 53.3,64.7,76.9,79.1 kN。这主要是由于桩埋管数量的 增加,使得桩内储存的热量越多,桩身温升也越大,从 而导致桩身位移、附加温度荷载也随之增大。



Fig. 5 Variations of the section mean temperature, displacement increment and added temperature load with pile depth for four kinds of buried pipe numbers

3.2 桩埋管布置形式

为了分析桩埋管布置形式对渗流作用下能量桩 换热及力学特性的影响,对图 6 中的单 U、并联双 U 埋管能量桩的 2 种典型布置形式进行了对比分析, 结果如图 7-11 和表 2 所示。



由图 7(a)可知, 渗流场下单 U 与双 U 埋管布置 二的单位桩深换热量明显高于对应布置一, 如运行 结束时单 U 与双 U 埋管布置二的单位桩深换热量分 别为 76.34 W/m 和 100.47 W/m, 而对应布置一分别为 71.46 W/m 和 94.71 W/m。进一步分析图 7(b)可得, 运 行第 14 天时单 U 布置一、布置二的日换热量分别为 92.66 MJ 和 98.98 MJ, 对应双 U 布置一、布置二的日 换热量分别为 122.80 MJ 和 130.26 MJ。显然单 U 与 双 U 布置二的日换热量分别比对应布置一高出 6.82%、 6.07%。这主要是由于单 U 布置一较布置二回水管位 于桩身右侧, 双 U 布置一与布置二相比右侧 U 型管整 个位于桩身右侧,导致单 U 和双 U 布置一不利于渗流 换热, 从而导致其换热性能低于对应布置二。

为进一步评价 2 种布置形式下双 U 埋管内 2 个 U 型管的换热情况,图 8 给出了 2 种布置形式下双 U 埋管能量桩内 2 个 U 型管单位管长换热量随时间 的变化,可以看出,布置一-U 型管 1、2 对应的单位管 长换热量分别为 27.44 W/m 和 21.21 W/m,对应布置二 分别为 25.89 W/m 和 25.72 W/m。显然布置一-U 型管 1 的单位管长换热量是 U 型管 2 的 1.29 倍,而布置二-U 型管 1 和布置二-U 型管 2 单位管长换热量仅相差 0.17 W/m。这说明渗流作用下布置二的 2 个 U 型管换 热能力相当,但布置一-U 型管 2 位于对应 U 型管 1 的渗流下游,会受到干扰,导致其换热性能降低。







图 8 2 种布置形式下双 U 埋管能量桩内 U 型管单位管长换热量 随时间变化



表 2 给出了不同桩埋管布置形式对应的力学特性,可以看出单U布置二相较于布置一桩身最大附加 温度荷载减小了 2.63%,对应的双U布置二相较于布 置一桩身最大附加温度荷载增大了 1.39%。此外,单 U和并联双U埋管能量桩 2 种布置形式对应的桩顶



图 9 2 种布置形式下能量桩日换热量随渗流速度的变化

Fig. 9 Variations of the daily heat exchange amount of energy pile with groundwater seepage velocity for two kinds of layouts



图 10 2 种布置形式下桩顶位移增量随渗流速度变化

Fig. 10 Variations of the pile top displacement increment with groundwater seepage velocity for two kinds of layouts

表 2 不同桩埋管布置形式下能量桩的力学特性 Table 2 Mechanical properties of energy pile for different

|--|

桩埋管形式	布置形式	桩顶位移增量/mm	最大附加温度荷载/kN
单U	布置一	0.75	53.3
	布置二	0.74	51.9
双U	布置一	0.95	64.7
	布置二	0.97	65.6

位移差值较小。由此可知,当渗流速度为60m/a时,可以在不影响力学性能的前提下,通过改变桩埋管布 置形式以达到提高换热量的目的。

为进一步获得不同渗流速度下桩埋管布置形式 的影响,图 9—11 给出了 2 种桩埋管布置形式对应的 日换热量、桩顶位移增量及桩身附加温度荷载随渗流 速度的变化规律。

由图 9 可知, 2 种布置形式下能量桩日换热量均 随渗流速度增加而增大, 且渗流速度越大, 2 种布置形 式对应的能量桩换热量差异逐渐增加, 如渗流速度为





60, 80, 120, 200 m/a 时单 U-布置二的日换热量分别高 于布置一 6.82%、8.53%、11.04%、14.08%, 对应的双 U埋管能量桩分别为 6.07%、7.80%、10.46%、13.93%。 进一步分析图 10 可以看出,随着地下水渗流速度的 增大,2种布置形式下单U和双U埋管能量桩的桩顶 位移增量均逐渐减少,这主要是由于渗流速度越大, 渗流扩散传热效果越好,桩身温升减小,桩身受热膨 胀幅度相应降低。与此同时,单U埋管能量桩2种桩 埋管布置形式对应的桩顶位移增量几乎相同, 而双 U 能量桩2种桩埋管布置形式对应的桩顶位移虽有差 别,但差值极小;正如图 10 所示,渗流速度 200 m/a 下 双U-布置一、布置二对应的桩顶位移值分别为0.83 mm 和 0.86 mm, 即布置二相对于布置一增加了 0.03 mm。 这是因为双 U-布置二对应的桩身平均温升高于布置 一,因而布置二对应的桩顶位移大于布置一,但温升 幅度差值小,对桩身热膨胀效应影响不明显。

分析图 11 可知,随着渗流速度的增大,2种布置 形式下单U和双U埋管能量桩的桩身附加温度荷载 均逐渐减少,这是渗流速度增加导致桩身温升降低的 缘故。进一步分析图 11 可知,单 U布置一在渗流 速度 60,120,200 m/a时对应的桩身最大附加温度荷 载比布置二分别高出 1.4,1.4,1.5 kN,而双 U 布置二比 对应布置一分别增加了 0.9,1.3,1.4 kN,增加幅度均较 小。这主要是由于同一渗流速度下,桩埋管排列形式对 应的桩身温升幅度不同,但温升幅度差较小,所以不 同桩埋管布置形式对附加温度荷载的影响并不明显。

综上可以看出,地下水渗流下桩埋管布置形式对 能量桩换热性能影响较大,而对桩力学特性影响较 小。在设计桩埋管布置形式时,本文模拟条件下,当 渗流速度大于 60 m/a 时,对于单U埋管的能量桩,建 议将U型埋管管脚方向与渗流方向垂直,而对于双 U埋管能量桩,则建议将内置的2个U型埋管管脚方 向均与渗流方向平行。

3.3 桩埋管管径

为获得桩埋管管径对能量桩换热性能及力学特性的影响,选取工程中常见的 De25、De32、De40(内径分别为 20, 26, 32 mm)3 种典型管径为代表进行分析, 模拟结果见图 12—13。



Fig. 12 Variations of the heat exchange rate per unit pipe length with time for different buried pipe diameters

由图 12 可知,随着管径的增加,单位桩深换热量 逐渐增大,如运行结束时 De25 的单位桩深换热量为 92.26 W/m,而管径 De32 和 De40 的分别为 95.12 W/m 和 98.10 W/m,即埋管管径 De32、De40 相对于 De25 的 单位桩深换热量分别提高了 3.10%、6.33%,这是因为 入口流速不变,增大埋管管径,既增加了换热面积,又 提高了管内换热流体的流量,使得埋管与桩身单位时 间内可以交换更多的热量。为了进一步获得渗流场 下桩埋管管径对能量桩力学特性的影响规律,图 13 给出了不同埋管管径下运行 14 d 后桩身截面平均温 升、位移增量、附加温度荷载随桩深的变化规律。正 如图 13(a)所示,埋管管径越大桩身截面平均温升越



Fig. 13 Variations of the section mean temperature, displacement increment and added temperature load with pile depth for different buried pipe diameters

大,如运行结束后 De25、De32、De40 对应的深 7.5 m 处桩身截面平均温升分别为 12.65, 13.05, 13.45 °C。分 析图 13(b)(c)可以看出,加大埋管管径,桩身位移增 量、附加温度荷载逐渐增大,如运行结束后,De32、 De40 相对于 De25 桩顶位移增量分别增加 1.05%、6.32%, 对应的最大附加温度荷载分别增加 2.07%、8.43%。这 主要是由于随着管径的增加,桩身温升幅度增大,桩 身受热膨胀效应也越大的缘故。

4 结论

(1)增加桩埋管数量可增大能量桩换热量,但当 埋管增加到一定数量后会加剧桩内不同埋管间的热 干扰,导致换热性能下降。且埋管数的增加也会造成 桩身位移和附加温度荷载的增加,因此,对于特定尺 寸的能量桩存在最优配置的桩内埋管数。

(2) 渗流下桩埋管布置形式对其换热性能有显著 影响, 而对力学特性影响较小。本文模拟条件下, 在 渗流速度为 60 m/a 时, 单 U 与双 U 布置二的日换热量 分别比对应布置一高出 6.82%、6.07%, 对应桩顶位移 增量与桩身最大附加温度荷载相差较小。

(3)不同布置形式下能量桩日换热量均随渗流速 度增加而增大,且渗流速度越大,2种布置形式对应的 能量桩换热量差异逐渐增加,桩顶位移增量、桩身附 加温度荷载均逐渐减少。对于单U埋管的能量桩,建 议将U型埋管管脚方向与渗流方向垂直,而对于双 U埋管能量桩,则建议将内置的2个U型埋管管脚方 向均与渗流方向平行。

(4)增加埋管管径可以提高能量桩的换热量,但 也会加大桩身和桩周土壤温升,导致桩身位移和附加 温度荷载增大,因此在选用埋管管径时需要综合考虑 换热和力学性能两方面的要求。

参考文献(References):

- [1] 金光,张之强,吴暄,等. 严寒地区地源热泵地埋管周 围土壤冻结影响因素的实验研究[J].水文地质工程 地质,2017,44(6):164-168. [JIN Guang, ZHANG Zhiqiang, WU Xuan, et al. Experimental study on influencing factors of soil freezing around ground source heat pump buried pipe in cold region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 164 - 168. (in Chinese with English abstract)]
- WANG Z J, ZHANG R H, FANG P F, et al. Analysis of an energy pile enduring cyclic temperature loads[J].
 Geotechnical Research, 2019, 6(3): 227 – 233.
- [3] 杨涛,刘律智,花永盛.冷-热循环下能量桩热-力学特性的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2019,39(4):585-591.[YANG Tao, LIU Lvzhi, HUA Yongsheng. Numerical simulation of thermo-mechanical behaviour of energy pile subjected to cooling-heating cycle[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4):585-591.(in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴冠中,张丹,程健,等.不同埋管形式的预制能量管 桩热响应试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019, 39(4): 615 - 621. [WU Guanzhong, ZHANG Dan, CHENG Jian, et al. Thermal response tests on PHC energy piles with different configuration of heat exchange loop[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 615 - 621. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 常虹,李洋,李宗效.不同埋管形式对混凝土能量桩受 力特性的数值模拟研究[J].吉林建筑大学学报,2021, 38(1):27-33. [CHANG Hong, LI Yang, LI Zongxiao. Numerical simulation study on mechanical characteristics of concrete energy pile under different buried pipe forms[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2021,

38(1): 27 – 33. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 赵蕾,高林,张爽,等.不同埋管形式能量桩换热性能 与承载性能的对比研究[J].安全与环境学报,2020, 20(1):81-90. [ZHAO Lei, GAO Lin, ZHANG Shuang, et al. Exploration of the thermo-mechanical features of energy piles in regard to the different types of buried pipes[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1):81-90. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王成龙,刘汉龙,孔纲强,等.不同埋管形式下能量桩 热力学特性模型试验研究[J].工程力学,2017,34(1): 85 - 91. [WANG Chenglong, LIU Hanlong, KONG Gangqiang, et al. Model tests on thermal mechanical behaviour of energy piles influenced with heat exchangers types[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 85 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [8] PARK S, LEE S, LEE D, et al. Effect of thermal interference on energy piles considering various configurations of heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2019, 199: 381 – 401.
- [9] PARK S, LEE S, OH K, et al. Engineering chart for thermal performance of cast-in-place energy pile considering thermal resistance[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 899 – 921.
- GO G H, LEE S R, YOON S, KANG H. Design of spiral coil PHC energy pile considering effective borehole thermal resistance and groundwater advection effects[J].
 Applied Energy, 2014, 125: 165 178.
- [11] YOU S, CHENG X H, YU C L, et al. Effects of groundwater flow on the heat transfer performance of energy piles: Experimental and numerical analysis[J]. Energy and Buildings, 2017, 155: 249 – 259.
- WANG D Q, LU L, ZHANG W K, et al. Numerical and analytical analysis of groundwater influence on the pile geothermal heat exchanger with cast-in spiral coils[J].
 Applied Energy, 2015, 160: 705 714.
- [13] ZHANG W K, YANG H X, FANG L, et al. Study on heat

transfer of pile foundation ground heat exchanger with three-dimensional groundwater seepage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 105: 58 - 66.

- [14] GO G H, LEE S R, KANG H B, et al. A novel hybrid design algorithm for spiral coil energy piles that considers groundwater advection[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 196 – 208.
- [15] YOU T, YANG H X. Influences of different factors on the three-dimensional heat transfer of spiral-coil energy pile group with seepage[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2020, 15: 458 – 470.
- [16] CHEN F, MAO J F, CHEN S Y, 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.
- [17] ANSYS Fluent Inc. ANSYS fluent user's guide[M]. Canonsburg, PA: [s.n.], 2013.
- [18] 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. [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)]
- [19] 张来军. 渗流场下能量桩换热及热-力耦合特性的理 论和实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. [ZHANG Laijun. Theoretical and experimental study on heat transfer and thermo-mechanical coupling characteristics of energy piles under seepage field[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华 实习编辑: 刘真真