

水化热对地源热泵地埋管夏季换热效果的影响

夏才初^{1,2}, 刘志方¹, 肖素光¹, 黄 曼^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 通过数值模拟与现场实测地温的变化, 研究了水泥水化热对地埋管周围地温的影响; 通过理论分析、现场实测地埋管换热能力以及数值模拟研究了地埋管周围地温变化对地埋管夏季工况换热效果的影响。对上海自然博物馆地埋管系统的研究表明: 在地源热泵投入使用时, 地下室底板以下约 10 m 处的地温受水泥水化热影响最大, 距离地下连续墙 2.85 m 处地温的平均升高为 2.2℃; 地埋管夏季工况的换热量随初始地温的升高而线性减小, 地埋管周围地温每升高 1℃, 将使地埋管夏季工况的换热量减小 5% 以上; 地源热泵系统由夏季工况作为首次投入使用时应对距离地下连续墙 13 m 以内地埋管采取相应措施, 以保证换热系统高效运行。

关键词: 水泥水化热; 地温; 地源热泵; 地埋管; 换热效果
中图分类号: TU111.1; TU924 **文献标志码:** A

Influence of Hydration Heat on Heat Transfer Effect of Ground Heat Exchanger of Ground Source Heat Pump in Summer

XIA Caichu^{1,2}, LIU Zhifang¹, XIAO Suguang¹, HUANG Man^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Zhejiang Shaoxing 312000, China)

Abstract: Influence of the hydration heat by cement on the ground temperature around the ground heat exchanger was investigated by numerical simulation and field measurement for ground temperature. Influence of the ground temperature around the ground heat exchanger on the heat transfer effect in ground heat exchanger was investigated by theoretical analysis, heat transfer experiments of ground heat exchanger, and numerical simulation. Researches on the ground heat exchanger in Shanghai Museum of Natural History shows that the ground temperature approximately 10 m below the basement floor is most affected by the hydration heat of

cement, and the average ground temperature 2.85 m away from the underground diaphragm wall increases by 2.2℃, when the ground source heat pump system is initiated. The heat transfer rate in ground heat exchanger decreases linearly with the increase in initial ground temperature in summer; Moreover, the heat transfer rate in the ground heat exchanger decreases by more than 5% in summer when the ground temperature around the ground heat exchanger is 1℃ higher. Measures should be taken to the ground heat exchangers whose distances between the underground diaphragm wall are no more than 13 m to ensure an efficiently operational heat transfer system, when the system is initiated in summer.

Key words: hydration heat of cement; ground temperature; ground source heat pump; ground heat exchanger; heat transfer effect

为了克服地埋管地源热泵占地和初成本高等缺点, 夏才初等^[1]提出了一种将地源热泵系统的地下管路直接植入地下工程的能源地下工程技术, 但在地下工程施工过程中, 大体积混凝土的浇筑与地基加固会产生大量的水泥水化热, 而混凝土及加固体与周围土体的导热系数较小, 使得地温恢复的速度非常缓慢(4 年以上)^[2]。地温升高将会使得地源热泵系统夏季工况的换热效率降低。

目前通过实验及数值模拟等手段对混凝土水化放热过程进行了大量研究, 并得出了一些推荐值或经验公式^[3-4]; 朱伯芳^[5]提出用复合指数式表示水泥水化热和混凝土绝热温升, 并根据试验资料给出参数的经验值; Schindler^[6]通过半绝热放热试验建立与水化温度相关的热率模型, 分析了不同掺量粉煤灰和矿渣对水化过程的影响, 并总结已有试验数据, 提出水化放热累计量的计算公式; 李明贤等^[7]通过实验手段研究了混凝土水化热对多年冻土地温的影

响,得到了桩基础水化热的扩散半径。

刘俊等^[8]对地源热泵土壤温度的恢复特性进行了模拟与研究,得出了地源热泵系统运营过程中冷热负荷不均衡引起地温变化以及地温恢复的规律;闫晓娜等^[9]对地源热泵U形埋管的土壤温度场进行了模拟研究与实验对比,得到了换热器的传热半径;曹诗定^[10]针对能源地铁站主要热交换构件提出了平面、柱面及球面的热源模型,并给出相应的理论解或数值解;孙猛^[11]基于能量守恒原理建立了地下连续墙内埋管的传热模型理论并采用分离变量法和格林函数法给出了解析解,并初步研究了水化热对围护结构温度场的影响;但并未开展水化热对地埋管周围地温的影响研究;而地温变化对地埋管换热效果影响的研究尚不多见。

本文依托上海市自然博物馆能源地下工程项目,基于上述水泥水化放热量求解方法以及地埋管周围地温场变化特性,开展研究地下工程中水泥水化热对地埋管周围地温的影响;然后基于上述地下连续墙内埋管的传热理论研究地温变化对地埋管夏季工况换热效果的影响,从而得出水化热对地源热泵地埋管换热效果的影响,为保障地源热泵系统的高效运行提供相应指导。

1 上海市自然博物馆工程概况

上海自然博物馆位于上海市静安区雕塑公园中。地铁13号线从其下部穿越。基坑开挖深度为17.5 m,采用地下连续墙作为围护结构。为了减小基坑施工对周围建筑的影响,在基坑的局部区域采用搅拌桩进行地基加固,基坑内搅拌桩加固区域宽8 m,内坑外搅拌区宽0.85 m,加固范围为从第一道圈梁至底板以下4 m;圈梁至底板搅拌区的水泥参量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,底板下部搅拌区的水泥参量 $360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;D2型地下连续墙尺寸为 $1 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 38 \text{ m}$,内衬墙厚度为0.6 m,底板厚度为1.5 m。地基加固平面如图1所示。

上海自然博物馆采用地源热泵系统来承担建筑冬季热负荷和部分夏季冷负荷。受场地限制,采用能源地下工程的理念将地源热泵系统地埋管布置在地铁连续墙内、自然博物馆外围连续墙内以及自然博物馆地下室范围内的灌注桩内,如图2所示。

2 水泥水化热对地温的影响

通过Ansys数值模拟与现场实测地温的变化来

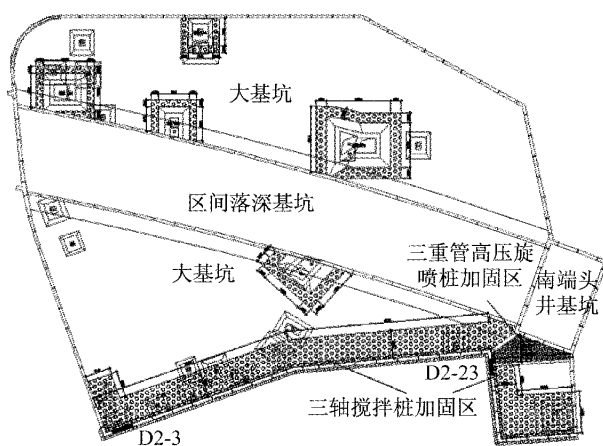


图1 上海自然博物馆地基加固平面示意图

Fig.1 Floor plan of foundation reinforcement at Shanghai Museum of Natural History

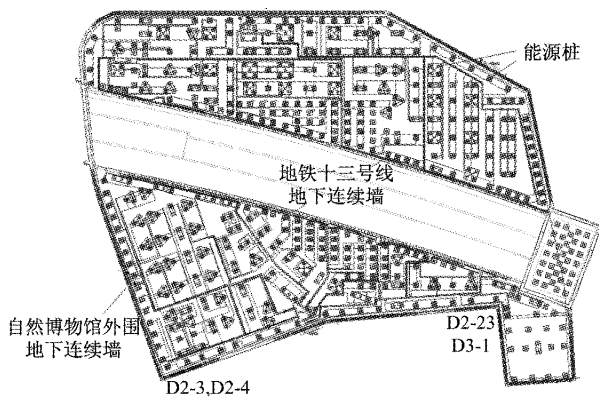


图2 上海自然博物馆地源热泵地埋管设计平面示意图

Fig.2 Design plan of ground heat exchanger of ground source heat pump at Shanghai Museum of Natural History

研究在地源热泵系统投入使用时水泥水化热对地温的影响。数值模型依据上海自然博物馆的D2-3地下连续墙与其周围的加固土体(图1)建立,同时现场测试该地下连续墙埋深25 m和37 m处地温的变化。

2.1 基本假设

(1) 假设埋深小于5 m的初始地温场由地表空气对流换热作用10年形成;

(2) 当地层埋深大于等于5 m时,不考虑气温对地温的影响,且认为地温随埋深成线性递增;因为埋深5 m处的地温随气温变化的振幅已衰减为地表的2.3%^[10];

(3) 不考虑混凝土与土体之间的接触热阻;

(4) 不考虑工程桩的水化热,因为工程桩的有效面积比较小。

2.2 计算模型

二维计算剖面如图3a所示,地下连续墙宽1 m,

地下连续墙左侧(基坑外)土体宽度取 20 m,右侧(基坑内)宽度取 28 m,地表以下取 60 m;计算模型如图 3b 所示。

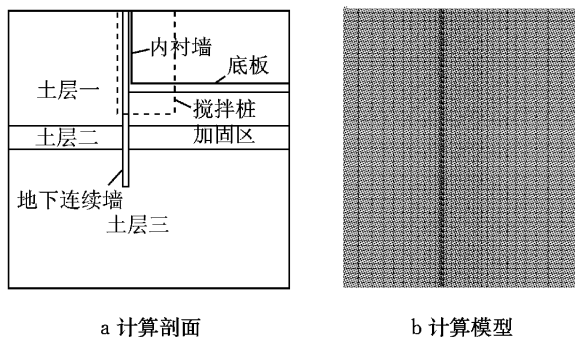


图 3 计算剖面与模型

Fig.3 Calculation of profile and model

2.3 热物理参数

为了简化数值模型,将计算范围热物理性质相近的土层归为同一土层,共分三层:软土层(0~25 m),硬土层(25~30 m),承压含水层(30~60 m),并将各层内热物理参数的平均值作为相应土层的热物理参数值。各土层、搅拌桩及混凝土的材料热物理参数见表 1。

表 1 计算模型的热物理参数

Tab.1 Thermophysical parameters of the calculation model

土层	热传导率 $k/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热 $c/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	质量密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
土层 1(0~25 m)	1.10	1 750	1 775
土层 2(25~30 m)	1.30	1 660	1 880
土层 3(30~60 m)	1.60	1 300	1 900
混凝土	2.34	1 046	2 500
搅拌桩	1.80	1 200	2 100

2.4 边界条件

空气与土体和混凝土之间属于第三类边界条件。

(1) 初始地温场:通过数值计算 10 年时间的地表空气对流换热作用得到埋深小于 5 m 的初始地温场。对上海地区现有地温测试数据进行拟合得到埋深大于等于 5 m 的地温函数:

$$T_z = 17.239 + 0.023z, 5 \text{ m} \leq z \leq 100 \text{ m} \quad (1)$$

表 3 地下连续墙及地基加固区水化热总量

Tab.3 Total amount of hydration heat of underground diaphragm wall and foundation reinforcement

类型	水泥类型	水泥含量/kg	粉煤灰含量/kg	水泥放热量/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	粉煤灰放热量/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	混凝土(搅拌桩)水化热 总量/($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
地下连续墙	P·O42.5	343	85	477	437	200 756
圈梁至底板搅拌区	P·O32.5	180		350		63 000
底板下部搅拌桩区	P·O32.5	360		350		126 000

式中: T_z 为地温, $^\circ\text{C}$; z 为地层埋深, m。

(2) 对流换热系数:粗糙固体表面(土体和混凝土)与空气之间的对流换热系数与风速有关,计算式如下^[12]:

$$h = 6.64 + 4.03v_a \quad (2)$$

式中: h 为边界对流换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; v_a 为风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

上海市年平均风速为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,市区地面和基坑内空气流动速度较小,所以取地面风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,基坑内风速为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由式(2)可得空气与地面热对流换热系数为 $14.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,空气与基坑内混凝土和土体的对流换热系数为 $8.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

(3) 大气温度:大气温度取上海全年各月的平均温度,见表 2。

表 2 上海全年平均气温

Tab.2 Annual average temperature of air in Shanghai

月份/月	平均气温/ $^\circ\text{C}$	月份/月	平均气温/ $^\circ\text{C}$
1	3.7	7	27.8
2	4.6	8	27.7
3	8.5	9	23.6
4	14.2	10	18.3
5	19.2	11	12.4
6	23.4	12	6.1

2.5 水化放热模型

由于水泥材料的水化热释放过程相对于地下工程的建设过程较短,所以,对地温场起决定性作用的是水化热总量,而与其水化放热的模型关系相对较小。由此,混凝土与搅拌桩的水化热模型均采用复合指数模型,单位时间的水化放热量 q_t 为

$$q_t = Q_0(e^{-a(t-1)^b} - e^{-a^b}) \quad (3)$$

式中: Q_0 为水化热总量, J; t 为时间, s; a 、 b 为水泥水化热系数;对于混凝土 $a=0.69$, $b=0.56$,对于搅拌桩 $a=0.9$, $b=0.6$ ^[5],因为搅拌桩所用的水泥净浆水灰比为 1:1,混凝土水灰比为 1:2.5,即水泥土的水化速率比混凝土大。地下连续墙和搅拌桩的水化热总量见表 3。

2.6 水化热施加过程

按照上海自然博物馆的实际工况进行模拟。为

了简化模拟过程,水化热每天施加一次,混凝土和土体与空气的对流换热每月进行一次,空气温度取每月的平均温度,见表4。

表4 水化热施加过程

Tab.4 Application process of hydration heat		
施工阶段	时间/d	阶段新增水化热
初始状态	0~3 630	地表空气对流换热
地下连续墙浇注, 搅拌桩加固	3 631	墙体混凝土水化热, 搅拌桩水化热
基坑开挖	3 781	基坑内空气对流换热
底板,内衬墙浇注	3 961	底板和内衬墙混凝土水化热
主体结构施工	3 961~4 590	

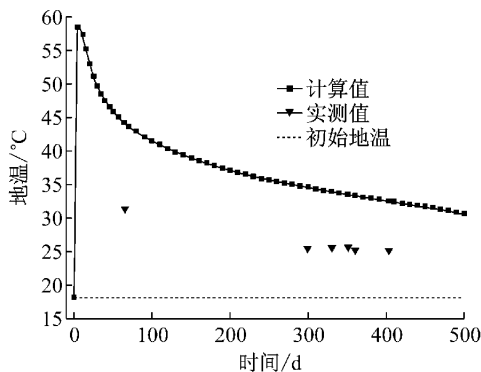


图4 D2-3 地下连续墙埋深 25 m 处的温度计算值与实测值
Fig.4 Measured values and calculated values of D2-3 underground diaphragm wall temperature at depth of 25 m

上海自然博物馆埋管灌注桩(图2)的有效深度为地下室底板以下0~45 m,以此埋深范围内的地温变化来评判水化热对地埋管换热效果的影响。图6是距地下连续墙一定范围内地温平均升高的情况,即距离地下连续墙2.85 m处地温的平均升高为2.2℃,距地下连续墙13 m以内地温的平均升高在1℃以上。

图7是在地源热泵投入使用时沿深度方向的地温分布曲线,即距离地下连续墙越近,地温受到水化热的影响越明显,底板以下约10 m处的地温受水化热影响最大。

3 地温升高对地埋管换热效果的影响

3.1 地温升高对地埋管换热效果影响的理论分析

由牛顿冷却定律可以得到单位时间对流换热量:

$$\Phi = hA(t_w - t_f) \quad (4)$$

式中: Φ 为对流换热量,J; h 为对流换热系数, $W \cdot$

2.7 计算结果

对D2-3地下连续墙埋深25和37 m处的温度变化进行数值计算,并与实测数据对比。地下连续墙埋深25 m处温度的实测值与计算值偏差较大,如图4所示;而埋深37 m处两者的数据较为吻合(图5)。

地基加固的区域为第一道圈梁至基坑底板以下4 m(埋深21.5 m),25 m处测点的温度受搅拌桩水化热的影响较大,但实测值与理论计算值有一定的偏差,原因之一是搅拌桩施工质量受诸多因素的影响,相比地下连续墙其施工质量较难得到保证,如搅拌的均匀性,水泥净浆掺入量会随深度而不均匀,尤其是当深度较大时水泥净浆掺入量较难保证。

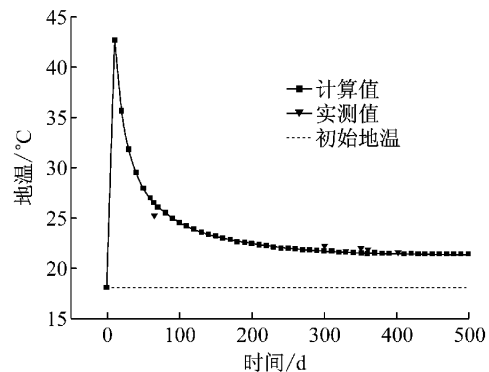


图5 D2-3 地下连续墙埋深 37 m 处的温度计算值与实测值
Fig.5 Measured values and calculated values of D2-3 underground diaphragm wall temperature at depth of 37 m

$m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$; t_w 为管壁温度, $^\circ C$; t_f 为流体温度, $^\circ C$; A 为传热面积, m^2 。

不考虑时间因素,由式(4)可知,对流换热量和流体温度 t_f 与地埋管管壁温度 t_w 的差值成线性关系,管壁温度 t_w 的初始值与地温相同。若对流换热系数和对流面积不变,则地埋管换热量的变化率 V_r 为

$$V_r = (\Phi_1 - \Phi_0) / \Phi_0 \quad (5)$$

$$\Phi_0 = hA(t_{f0} - t_{s0}) \quad (6)$$

$$\Phi_1 = hA(t_{f1} - t_{s1}) \quad (7)$$

式(5)~(7)中: Φ_0 为原始温度时对流换热量,J; Φ_1 为温度变化后对流换热量,J; t_{f0} 为原始进水温度, $^\circ C$; t_{s0} 为原始地温, $^\circ C$; t_{f1} 为变化后进水温度, $^\circ C$; t_{s1} 为变化后地温, $^\circ C$ 。

将式(6)~(7)代入式(5)可得:

$$V_r = [(t_{f1} - t_{s1}) - (t_{f0} - t_{s0})] / (t_{f0} - t_{s0}) \quad (8)$$

即地温变化对换热量的影响和地源热泵地埋管的设计进水温度与周围地温的温差有关。地源热泵

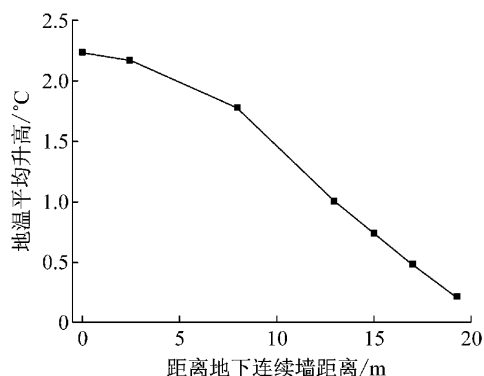


图 6 埋管灌注桩有效深度范围内地温平均升高曲线
Fig.6 Average rising curve of ground temperature within effective depth of energy pile

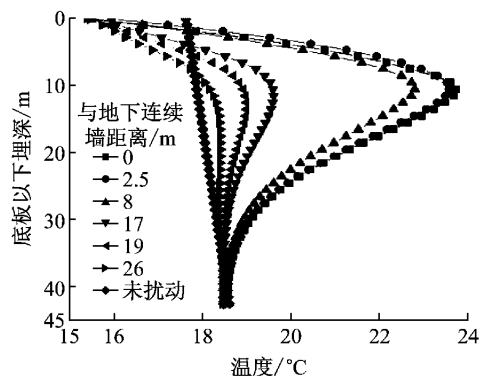


图 7 底板以下沿深度方向地温的分布曲线
Fig.7 Distribution curve of ground temperature along the depth direction below the floor

地埋管设计的夏季进水温度和地温的差值一般在 20℃ 以内,由式(8)可知周围土体变化 1℃,对地埋管换热量的影响在 5% 以上。

上海自然博物馆夏季工况地埋管设计进水温度为 35℃,原始地温的平均温度为 17.6℃。由式(8)可得该工况下地温升高 1℃,换热量减小 5.75%。

3.2 地埋管换热效果的现场实测分析

分别对上海自然博物馆的 D2-23 和 D3-1 地下

连续墙内埋管进行换热能力测试。

采用恒温法测试地下连续墙内埋管的换热效果。受水化热的影响,在开始测试前地温仍然维持在较高的温度(平均值为 29.5℃),为了保证一定的温差,结合实验条件,地下连续墙内埋管的进水温度调整为 38℃。实测进回水温度变化曲线如图 8 和图 9 所示,实验结果见表 5。

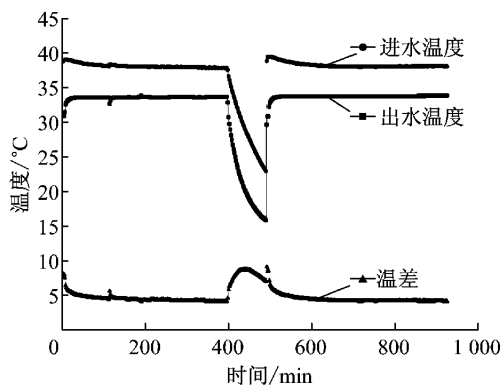


图 8 D2-23 地下连续墙夏季工况进出水温变化曲线
Fig.8 Water temperature variation curve of inlet and outlet of D2-23 underground diaphragm wall in summer

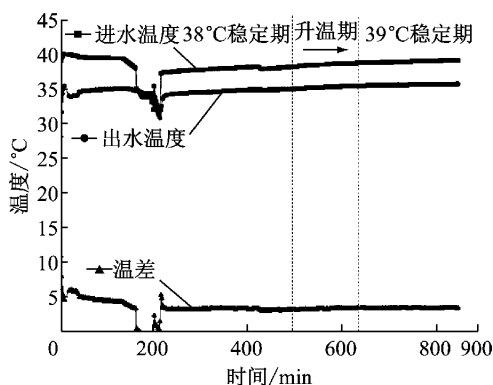


图 9 D3-1 地下连续墙夏季工况进出水温变化曲线
Fig.9 Water temperature variation curve of inlet and outlet of D3-1 underground diaphragm wall in summer

表 5 换热量计算结果

Tab.5 Calculation results of heat transfer

试验工况	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	进水温度/℃	回水温度/℃	平均地温/℃	换热量/kw
D2-23 夏季工况	0.56	38	33.8	29.5	2.74
D3-1 夏季工况	0.61	38	34.9	29.5	2.21
D3-1 夏季工况	0.61	39	35.6	29.5	2.42

从 D3-1 测试数据可看出,开始试验 500 min 后进出水温差接近稳定,此时进出口水温差为 3.1℃,换热量为 2.21 kw,然后将进水温度逐渐提高至 39℃,进出口水温差增加为 3.4℃,换热量为 2.42 kw,

换热量提高了 9.50%。由式(8)计算该试验工况中换热量提高的变化率为 11.76%,由于 39℃ 的进水温度在换热量达到稳定期时已经历了约 650 min,地埋管周围的地温会随实验的运行而升高,受现场实验

条件制约,此时的地温仍按实验前的平均地温,因此由式(8)计算得到的换热量变化率比现场实测的换热量变化率大。

3.3 地温升高对地埋管换热效果影响的数值分析

将地埋管对流换热问题由三维转换成二维进行分析,然后基于 Ansys 软件进行数值模拟。首先确定管内流体的平均温度,然后计算流体出水温度,从而得到地埋管的换热量。

3.3.1 基本假设

- (1) 土层热物理参数取不同埋深的平均值;
- (2) 热物理参数不随温度变化;
- (3) 将系统运行 12h 之后的换热量作为换热效果的参考,因为地温场在系统运行 12h 后达到稳定;
- (4) 各个管内沿长度方向同一断面的换热量相同。

3.3.2 计算模型

根据 D2-23 段地下连续墙的埋管形式建立有限元模型,试验时地下连续墙水平断面有 4 根地埋管,取对称模型,其中混凝土厚度为 1 m,基坑内、外土宽度体分别为 1 m 和 2 m,模型宽度为 3 m,如图 10a 所示。地埋管、混凝土和土体采用实体单元,在地埋管管壁附加表面效应单元,将热对流边界施加于表面效应单元上。计算模型如图 10b 所示。

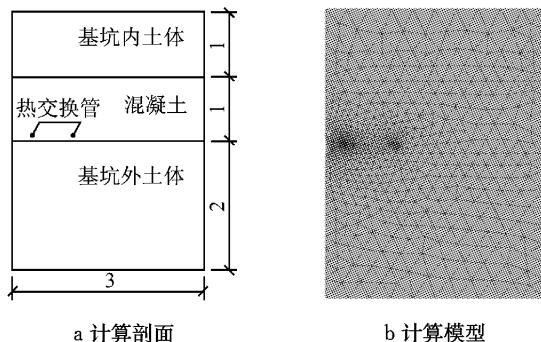


图 10 计算剖面 and 模型 (单位:m)

Fig.10 Calculation of profile and model (unit:m)

3.3.3 热物理参数

模型中介质的热物理参数见表 6。

表 6 计算模型的热物理参数

Tab.6 Thermophysical parameters of the calculation model

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	对流换热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)		
		土体	混凝土	地埋管
0.56	2 250	1.60	2.34	0.42

3.3.4 边界条件

如图 10b 中,模型左侧为对称边界,其他边界为恒温边界(温度与地温相同);地埋管管内壁为热流

边界。

3.3.5 计算结果

对 D2-23 地下连续墙进水温度为 38°C ,平均地温为 29.5°C 的实验工况进行数值计算,得到的换热量为 2.63kw ,现场实测结果为 2.74kw (表 5),两者换热量相差为 4.0% 。虽然有限元法不能准确地模拟热响应试验过程,但是用其计算温度场稳定时地下连续墙内埋管换的热量与试验结果较为吻合。

对进水温度为 35°C ,地温为 $17.6^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 的试验工况进行数值计算,得到系统在运行 48 h 的换热量,如图 11 所示。图中, R 为相关系数。

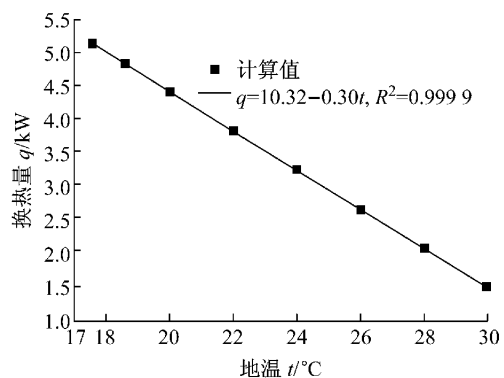


图 11 地下连续墙内埋管换热量随地温升高的变化曲线
Fig. 11 Variation curve of heat transfer of heat exchanger in underground diaphragm wall with the ground temperature increasing in summer

由上述计算可知上海自然博物馆地源热泵夏季工况地埋管总换热量随初始地温升高而线性减小,且地温升高 1°C ,换热量减小 5.76% ,与式(8)计算所得的 5.75% 较为吻合。

3.4 结果对比分析

通过现场实测 D3-1 地下连续墙内埋管在进水温度变化 1°C 时换热量的变化,得到相应的换热量的变化率,并与理论分析进行对比,验证了式(8)的合理性,然后通过式(8)计算得到地温变化 1°C 对上海自然博物馆地源热泵地埋管换热量的影响。

将现场实测 D2-23 地下连续墙内埋管的换热量与数值计算进行对比,验证了数值计算的合理性,然后通过数值计算得到地温变化 1°C 对上海自然博物馆地源热泵地埋管换热量的影响。

4 结论

- (1) 受地下工程混凝土与地基加固区水泥水化热的影响,在地源热泵系统投入使用时,上海自然博

物馆地下室底板以下约 10 m 处的地温受水化热影响最大,在距离地下连续墙 2.85 m 处地温的平均升高为 2.2℃。

(2) 对于地源热泵系统的夏季工况,地埋管换热量随初始地温升高而线性减小,周围地温每升高 1℃,将使地埋管的换热量减小 5% 以上。

(3) 地源热泵系统由夏季工况作为首次投入使用时应对距离地下连续墙 13 m 以内地埋管采取较低温度的水循环回冷等措施,以保证换热系统高效运行。

参考文献:

- [1] 夏才初,曹诗定,王伟. 能源地下工程的概念、应用与前景展望[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 419.
XIA Caichu, CAO Shiding, WANG Wei. An introduction to energy geotechnical engineering and its application and prospect [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 419.
- [2] 孙猛. 地源热泵型软土围护结构内地下换热器传热理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
SUN Meng. Study on heat transfer theory of geothermal underground heat exchangers in soft-soil building envelope[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [3] 栾尧, 阎培渝, 杨耀辉, 等. 大体积混凝土水化热温度场的数值计算[J]. 工业建筑, 2008, 38(2): 81.
LUAN Yao, YAN Peiyu, YANG Yaohui, *et al.* Numerical calculation of the hydration temperature field in a mass concrete[J]. Industrial Construction Magazine Agency, 2008, 38(2): 81.
- [4] 蔡正咏. 混凝土性能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1979.
CAI Zhengyong. The performance of concrete[M]. Beijing: Chinese Building Industry Press. 1979.
- [5] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [6] Schindler A K. Effect of temperature on the hydration of cementitious materials[J]. Materials Journal, 2004, 101(1): 72.
- [7] 李明贤, 张辰熙. 混凝土水化热对多年冻土地温的影响研究[J]. 低温建筑技术, 2013(7): 114.
LI Mingxian, ZHANG Chenxi, The influence of concrete hydration on the permafrost ground temperature [J]. Construction Technology of Low Temperature, 2013(7): 114.
- [8] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵土壤温度恢复特性研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 147.
LIU Jun, ZHANG Xu, GAO Jun, *et al.* Research of soil temperature restoration characteristics of ground source heat pump systems [J]. Heating Ventilation Air Conditioning, 2008, 38(11): 147.
- [9] 闫晓娜, 谈莹莹, 王雨. 地源热泵 U 型埋管土壤温度场数值模拟[J]. 制冷与空调, 2009, 23(2): 37.
YAN Xiaona, Tan Yingying, WANG Yu. Numerical simulation of soil temperature of U-pipe geothermal heat pumps [J]. Refrigeration Air-Conditioning, 2009, 23(2): 37.
- [10] 曹诗定. 能源地铁车站主要热交换构件传热计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
CAO Shiding. Calculation method of heat transfer of main heat exchangers in energy subway station [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [11] Sun M, Xia C C, Zhang G Z. Heat transfer model and design method for geothermal heat exchange tubes in diaphragm walls [J]. Energy and Buildings, 2013, 61, 250.
- [12] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣. 传热学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
ZHANG Ximin, REN Zepei, MEI feiming. Heat transfer theory [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007.