

DOI: 10.11779/CJGE201410018

热管及保温材料在青藏直流联网工程中的应用研究

穆彦虎¹, 俞祁浩¹, 李国玉¹, 马巍¹, 毛云程², 郭磊¹

(1. 中科院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省交通科学研究所有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 针对青藏直流联网工程塔基热管措施应用效果, 通过现场实测资料确定了热管年内工作周期及混凝土桩基表面热效应, 考虑无绝热段热管传热过程组成, 建立空气-热管-土体耦合传热数学模型, 利用有限元方法系统模拟不同年平均地温分区锥柱式塔基传热过程及气候变暖背景下基础周围多年冻土热状况发展变化趋势。结果表明: 冷季热管工作期间, 其对周围土体冷却降温效果显著, 同时由于混凝土塔基为热的良导体, 热管产生的“冷量”通过基础及其底座快速向基础周围传递, 使得基础下形成大范围低温冻土。暖季, 热管停止工作期间, 由于基础埋设较浅, 混凝土塔基良好的导热性能使得其周围浅层土体温度升温较快, 量值基本与天然地表下同一深度接近, 而基础下部深层地温则主要受热管作用控制, 温度较低。在单一塔腿4根热管及50 a气温升高2.6℃背景下, -1.0℃、-1.5℃两种年平均地温条件下, 桩基础下部多年冻土仍保持冻结状态, 满足工程对于冻土地基热状况的要求。-0.5℃年平均地温条件下, 运营后期桩基础周围土体季节融化深度已大于桩基埋深。在该地温条件下, 通过热管-保温板复合措施的采用, 可有效发挥热管的“冷却降温”及保温板的“隔热保冷”效能, 在大幅减小基础周围土体的最大季节融化深度的同时降低锥柱式基础底部深层地温, 进而满足工程需求。

关键词: 青藏直流联网工程; 塔基; 热管; 保温板; 气候变暖

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)10-1896-12

作者简介: 穆彦虎(1985-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事寒区工程与冻土力学方面的研究。E-mail: muyanhu@lzb.ac.cn。

Application of thermosyphons and insulated boards in Qinghai-Tibet DC Interconnection Project in permafrost regions

MU Yan-hu¹, YU Qi-hao¹, LI Guo-yu¹, MA Wei¹, MAO Yun-cheng², GUO Lei¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Communication Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The working period of thermosyphons and the thermal effect of concrete tower footing are determined using the in-situ measured data. A coupled heat transfer model among air, thermosyphon and soil is established considering heat transfer processes within the thermosyphon without adiabatic section. Based on the model, the heat transfer processes around the tower footing and the temporal variations of thermal regime around the tower footing are studied by numerical simulation under a climate warming scenario. The results indicate that in cold seasons when thermosyphon works, the soils around the thermosyphon are obviously colder than those far away, revealing a remarkable cooling effect. Meanwhile, cold energy from the thermosyphon flows quickly to the base of tower footing due to its larger thermal conductivity. As a consequence, extensive cold permafrost develops beneath the footing. While in warm seasons, the shallow soils around the tower footing warm quickly, but those beneath the tower footing are still colder due to the cooling effect of the thermosyphon. Under the scenario of climate warming, the soils beneath the tower footing installed with four thermosyphons still keep frozen in permafrost region with the mean annual ground temperatures of -1.0℃ and -1.5℃, meeting the need of the project. But for permafrost region with the mean annual ground temperature of -0.5℃, the maximum seasonally thawing depth around the tower footing is already larger than the buried-depth of the tower footing during the later period of operation. Using the combined method of thermosyphons and insulated boards, the maximum thawing depth around the tower footing can be diminished obviously and will be less than the buried-depth of the tower footing. And meanwhile, the deep soil temperatures beneath the tower footing will also be much lower.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB026106); 国家电网公司科技项目(SGJSJS(2010)935-936); 中国科学院西部之光“西部博士”项目(51Y351211)

收稿日期: 2014-01-13

Key words: Qinghai-Tibet DC Interconnection Project; tower footing; thermosyphon; insulated board; climate warming

0 引 言

青藏格尔木—西藏拉萨±400 kV直流联网工程（青藏直流联网工程）是目前世界上海拔最高、穿越多年冻土区最长、建设难度最大、规模最大的寒区输电工程，被称作“电力天路”。工程全长1038 km^[1]，沿线平均海拔4500 m，穿越632 km的多年冻土区，其中大片连续多年冻土区长度约550 km，岛状不连续多年冻土区长度约为82 km^[2]。在多年冻土区，青藏直流联网工程共有杆塔1207基，超过全线杆塔数量的50%^[3]。已有的工程经验及研究表明，多年冻土区工程构筑物基础的稳定性与下部多年冻土的热状况联系密切^[4-7]。构筑物在修筑及运营期间，将不可避免地改变地表原有的能量平衡，进而影响到下部多年冻土的热状况，导致多年冻土的升温及退化，尤其在气候变暖背景下^[8-13]。因此，维持下部多年冻土的热稳定性成为保证上部构筑物稳定性能及服役性能的关键^[14]。为此，青藏直流联网工程应用了大量的热管措施，整个工程已使用的热管数量超过7000根。

热管作为一种新型、高效的传热元件，美国、加拿大及前苏联最早将其应用于多年冻土地区的工业与民用建筑、公路工程、铁路工程、机场工程、大坝及冻结墙等，成功地解决了由多年冻土升温及融化带来的工程病害^[14-18]。在中国，中铁西北研究院于1987年开展了“冻土地区应用热管技术的研究”科研项目，成功解决了热管制作工艺、低温风洞试验等关键技术^[19]。随后，热管广泛应用于青藏公路路基、涵洞严重病害路段的治理与修复，取得了较好的工程效果^[20-21]。青藏铁路于2001年在清水河试验段开展了热管路现场试验研究，验证了热管的显著冷却降温效果及保持路基整体稳定性的有效性^[22]。对于青藏直流联网工程而言，由于基础形式（浅埋大开挖群桩基础）、热管布设方式、热管形式（无绝热段）等诸多因素的不同，热管措施作用下塔基基础的传热过程及冷却降温效果势必与其在冻土路基中的应用存在一定的不同。因此，开展热管—桩基础的传热过程及热管冷却降温效果的预测研究，获得气候变暖背景下塔基周围多年冻土长期热状况发展变化趋势，可服务于工程运营的预警预测及后期维护与补强措施的采用。

本文以青藏直流联网工程大量采用的锥柱式基础为研究对象，以现场实测资料确定热管年内工作周期及桩基础表面温度边界条件。在此基础上，考虑无绝热段热管传热过程组成，建立空气—热管—土体耦合的数学传热模型。结合工程实际，开展气候变暖背景下锥柱式基础热管措施应用效果的三维数值模拟及预测

研究，分析热管措施作用下锥柱式基础冷暖季的传热过程、气候变暖及热管双重作用下基础周围多年冻土热状况发展趋势。针对现场监测中已出现的热管降温效能不足问题，提出应用热管—保温板复合措施，并对该措施的长期工程效果进行预测。

1 热管年内工作周期

对于热管而言，当蒸发端与冷凝端温差达到一定值（启动温差）时，热管启动工作，而当温差小于启动温差时，热管停止工作。但是，由于现场工作与室内试验环境条件差异较大，因此通过室内试验确定的启动温差来判断热管的工作与否会与现场实际存在一定出入。为准确获得热管的工作时间，笔者在青藏直流联网工程斜水河#2监测场地埋设了热管蒸发段管壁测温电缆。图1给出了热管管壁年内不同月份地温沿深度分布情况。

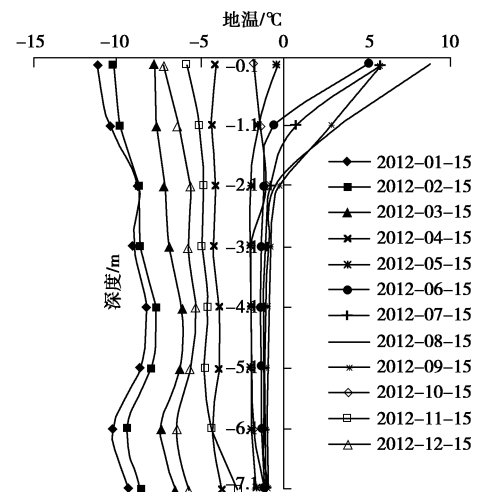


图1 现场实测热管管壁温度

Fig. 1 Observed temperature distribution along evaporation the section of thermosyphon

可以看出，每年的冷季，即10月份至次年的4月份，热管管壁温度明显小于该场地天然地表下同一深度地温。以4月15日为例，热管蒸发段底部温度为-3.71℃，而同一深度天然孔温度只有-0.51℃，表明在这一时间段内热管处于工作期间。此外，对比发现1月份热管管壁温度最低，由此说明该时间段内热管工作强度最大。由于取消了绝热段，热管管壁温度自天然地表以下均较低，沿深度方向基本无梯度分布。

而在每年的暖季，即5月份至10月份，热管管壁温度沿深度方向存在明显地温梯度，浅层温度主要受环境温度影响，附近多年冻土上限埋深与天然孔相同。而深层地温，这一阶段内各月份地温基本相同。由此说明，热管在这一时间段内处于不工作状态。与同一

深度天然孔地温相比, 热管蒸发段深层地温仍明显较低, 体现了热管的冷却降温效果。基于上述分析, 即可确定热管的年内工作周期。

2 桩基表面热效应现场监测

为获得桩基混凝土表面温度边界条件, 图 2 给出了青藏高原北麓河地区 2011 年 6 月至 2013 年 3 月期间混凝土桩基表面及天然地表浅层地温 (测温深度 5 cm) 监测序列。可以看出, 混凝土桩基作为热的良导体, 暖季表面温度高于天然地表, 而冷季则低于天然地表。从年变化幅值看, 桩基表面年变化幅值高出天然地表约 3℃, 而年平均温度较天然地表高出约 1.5℃。这与由附面层理论获得的两种附面层下的年平均温度差异基本接近。

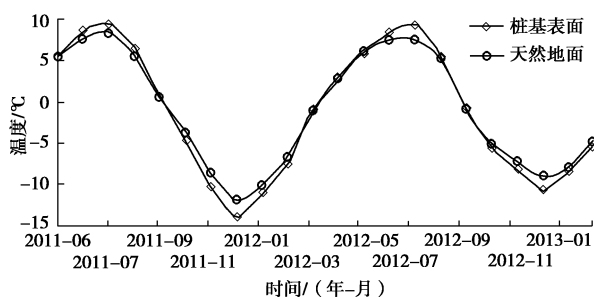


图 2 天然地表及混凝土桩基表面实测地温时间序列

Fig. 2 Observed time series of temperatures on natural ground surface and tower footing surface

3 空气-热管-土体耦合数值传热模型

3.1 热管的换(传)热过程

青藏直流联网工程采用的热管取消了绝热段, 仅有冷凝段和蒸发段两部分组成, 其中冷凝段散热面积不小于 6.5 m²[23]。对于无绝热段热管而言, 其传热过程包括冷凝段外壁面 (包括冷凝段外壁及翅片面) 与冷源间 (空气) 的换热过程、冷凝段固体壁的导热过程、冷凝段的凝结换热过程、蒸发段工质的蒸发 (沸腾) 换热过程及蒸发段固体壁的导热过程 5 个部分组成[24-25], 对应热阻组成及传热过程如图 3 所示。

对于冷凝段而言, 其热阻为 $R_1+R_2+R_3$, 各项热阻计算分别如下:

(1) 冷凝段外壁与空气间的换热热阻 R_1

$$R_1 = \frac{1}{A_{co}\alpha_1}, \quad (1)$$

式中, A_{co} 为热管冷凝段面积, $A_{co} = \pi l_c d_o + 2n\pi \left[\left(\frac{d_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \right]$, 式中 l_c 为冷凝段长度, d_o 为热管外径, d_i 为热管内径; α_1 为冷凝段外部换热系数,

$$\alpha_1 = 0.134 Re_f^{0.681} Pr_f^{\frac{1}{3}} \left(\frac{s_f}{H_c} \right)^{0.2} \left(\frac{s_f}{\delta_f} \right)^{0.1134} \frac{\lambda_f}{d_o}, \quad \text{其中 } \frac{s_f}{H_c} \text{ 为}$$

翅片间距和翅片高度之比, $\frac{s_f}{\delta_f}$ 为翅片间距与翅片厚度

之比; λ_f 为空气导热系数, 取值为 $0.023 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

Re_f 为热管外部空气的雷诺数, 根据空气动力学理论,

$$Re_f = \frac{\rho_f v_f d_o}{\mu_f}, \quad \rho_f \text{ 为空气的密度, } v_f \text{ 为外界风速, } \mu_f$$

为空气的动力黏度。青藏高原地区的上述空气参数为:

$\rho_f = 0.641 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\mu_f = 0.0000175 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。青藏高原

的主导风向为西风, 地面以上 10 m 高度标准风速变化规律可近似表示为[26]

$$V = 3.64 + 1.10 \sin \left(\frac{2\pi}{8760} t_h + \pi + \alpha_0 \right). \quad (2)$$

(2) 冷凝段的固体壁的导热热阻 R_2

$$R_2 = \frac{1}{2\pi\lambda l_c} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right), \quad (3)$$

式中, λ 为热管管壁导热系数, 文中取值 $49.61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

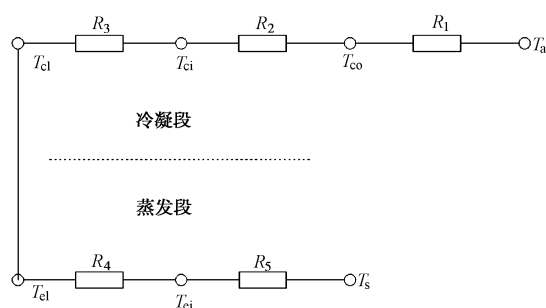


图 3 热管传热过程及热阻组成

Fig. 3 Thermal resistances of thermosyphons

(3) 冷凝段的凝结换热热阻 R_3

$$R_3 = \frac{1}{A_{ci}\alpha_3}, \quad (4)$$

式中, A_{ci} 为热管冷凝段内表面积, $A_{ci} = \pi d_i l_c$, α_3 为

凝结换热系数, $\alpha_3 = 0.925 \left(\frac{\lambda_f^3 \rho_f^2 g l}{\mu_f q_c l_c} \right)^{1/3}$ 。

对于蒸发段而言, 其热阻为 R_4+R_5 , 各项热阻计算分别如下:

(1) 工质的蒸发换热热阻 R_4

$$R_4 = \frac{1}{A_{ei}\alpha_4}, \quad (5)$$

式中, A_{ei} 为热管蒸发段内表面积, $A_{ei} = \pi d_i l_e$, α_4 为

蒸发换热系数, $\alpha_4 = 0.32 \left(\frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} c_{pi}^{0.7} g^{0.2} q_e^{0.4}}{\rho_v^{0.25} l^{0.4} \mu_l^{0.1}} \right)$ 。

$\left(\frac{p_{sat}}{p_a} \right)^{0.3}$ 。

(2) 固体壁的导热热阻 R_5

$$R_5 = \frac{1}{2\pi\lambda_l} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right), \quad (5)$$

综述所述, 热管在传热过程中, 其总热阻为

$$R = \sum_{i=1}^5 R_i, \quad (6)$$

青藏直流联网工程采用的热管的具体参数见表 1。

表 1 热管参数

Table 1 Physical parameters of the thermosyphon

参数	量值	参数	量值
冷凝段长度 (l_c)	3 m	热管内径(d_i)	66 mm
蒸发段长度 (l_e)	7 m	翅片间距与高度比 ($\frac{s_f}{H_c}$)	0.4
热管外径(d_o)	76 mm	翅片间距与厚度比 ($\frac{s_f}{\delta_f}$)	6.67

3.2 空气-热管-土体耦合传热模型

热管-锥柱式桩基础的传热过程是空气-热管-土体三者之间的耦合传热问题。结合上述热管的传热过程及土体的经典热传导理论, 可建立空气-热管-土体的耦合传热模型:

(1) 热管: 通过上述热管传热过程的分析, 可以得出热管传递的热量为

$$Q = \frac{T_a - T_{co}}{R_1} = \frac{T_{co} - T_{ci}}{R_2} = \frac{T_{ci} - T_{el}}{R_3} = \frac{T_{cl} - T_{ci}}{R_4} = \frac{T_{ci} - T_s}{R_5} = \frac{T_a - T_s}{R}, \quad (7)$$

式中, $T_{cl} = T_{ci}$ 。

(2) 土体: 其传热过程可采用经典的热传导理论, 在计算中, 忽略对流及质量迁移等其它作用, 仅考虑土体的热传导及冰水相变作用, 则其传热控制方程如下^[27]:

$$C_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (8)$$

式中, C_e 及 λ_e 为土体等效热容及等效导热系数。对于冰水相变作用, 应用显热容法, 假设土体中的水相变发生在温度区间 $T_m \pm \Delta T$, 文中 T_m , ΔT 分别均取值为 -0.15°C 。同时, 假设土体在已冻、未冻时的体积热容为 C_{sf} 和 C_{su} , 导热系数为 λ_{sf} 和 λ_{su} , 单位体积土体的相变潜热为 L_s , 由此简化构造出 C_e 及 λ_e 的表达式如下:

$$C_e = \begin{cases} C_{sf} & (T < T_m - \Delta T) \\ \frac{L_s}{2\Delta T} + \frac{C_{sf} + C_{su}}{2} & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T) \\ C_{su} & (T > T_m + \Delta T) \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lambda_e = \begin{cases} \lambda_{sf} & (T < T_m - \Delta T) \\ \lambda_{sf} + \frac{\lambda_{sf} - \lambda_{su}}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & (T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T) \\ \lambda_{su} & (T > T_m + \Delta T) \end{cases}. \quad (10)$$

(3) 基于热量平衡, 热管蒸发段传入土体的热量等于土体吸热量, 可以得到空气-热管-土体间的耦合传热模型如下:

$$Q = \frac{T_a - T_s}{R} = -\lambda_e \frac{\partial T}{\partial n} \pi d_o l_e. \quad (11)$$

利用上述模型即可获得热管措施作用下锥柱式基础周围多年冻土温度场的分布, 然而该问题是一个强非线性问题, 因此利用有限元数值计算方法解决该问题。在数值计算中, 由于热管尺寸相对与基础及地基较小, 因此将其简化为随外界变化的热流边界条件, 则热管工作期间其等效换热系数为

$$h_{\text{eff}} = \frac{1}{\pi d_o l_e R} = \frac{1}{\pi d_o l_e \sum_{i=1}^5 R_i}. \quad (12)$$

4 数值计算模型及计算参数

4.1 物理模型

为保证塔基周围多年冻土热稳定性及均一性, 青藏直流联网工程热管在 4 个塔腿桩基础上的布设位置、使用数量均为一样。目前, 每个塔腿桩基础热管的数量为 4, 2, 1 根 3 种情况。对于锥柱式基础, 在富冰冻土以上冻土区, 每个塔腿桩基础均使用 4 根热管, 本文主要针对这种热管布设方式开展研究(图 4)。

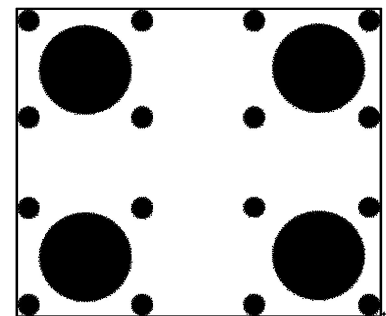


图 4 塔基热管布设方案示意图

Fig. 4 Distribution of thermosyphons around tower footings

已有的青藏直流联网工程现场监测数据表明, 在塔腿根开(两个塔腿桩基础间的垂直距离)为 8 m 的情况下, 4 个塔腿桩基础间不存在显著的“裙桩热效应”^[3], 笔者对单桩基础的二维数值模拟也验证了这一点^[28-29]。已有的青藏铁路、青藏公路、柴木铁路实测结果表明, 热管有效热影响半径均在 2.5 m 左右^[30-32]。因此, 对于青藏直流联网工程塔基而言, 可以单一塔

腿桩基础及周围 4 根热管为研究对象开展热管措施作用下整个塔基的热稳定性研究。考虑到桩基础及热管布设的几何对称性,可取单桩基础含热管部分的 1/8 建立三维物理模型。

4.2 数值模型

根据现场典型断面工程地质条件,建立三维数值计算模型。模型中土层分布为 3 层:活动层,土质类型为砂土;第二层桩基周围,为富冰以上冻土层,土质类型为粉质黏土;第三层为少冰冻土强风化泥岩,土层厚度分别取为 2, 6, 12 m。为满足热管-桩基础传热计算尺度要求,参考无热管措施下桩基础传热过程的二维数值计算结果^[28-29],模型宽度方向取 15 m,深度方向取 20 m。数值模型热管剖面锥柱式基础尺寸(埋深 3.7 m)及热管位置(距桩基中心 4 m)均按照现场实际情况设置,具体如图 5 (a) 热管传热剖面所示。三维数值模型及网格划分如图 5 (b) 所示,网格划分过程中重点细化桩基础及热管附近区域,以便满足传热计算及结果处理精度。

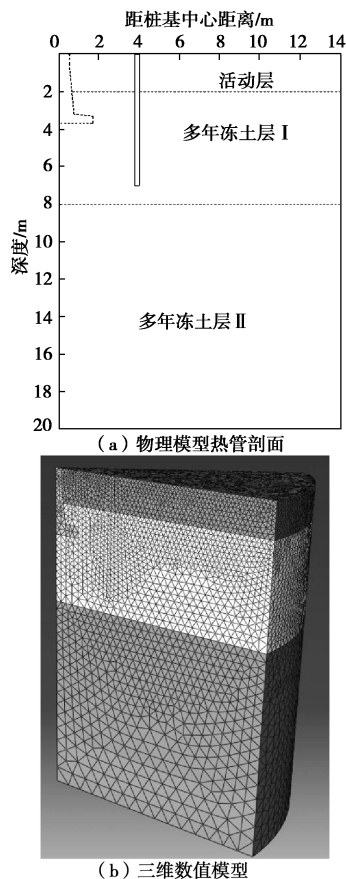


图 5 物理模型和三维数值模型

Fig. 5 Physical model and 3D numerical model

4.3 热物理参数及边界条件

根据青藏直流联网工程清水河附近#490 锥柱式桩基础地温孔岩芯现场测试数据,结合相关文献^[33],模型中采用的桩基础及土体热物理参数取值如表 2。

表 2 桩基础及土体热物理参数

Table 2 Thermal-physical parameters of soil layers and concrete tower footing

土层	C_{sf} $/(J \cdot kg^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$	C_{su} $/(J \cdot kg^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$	λ_{sf} $/(J \cdot m^{-1}h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	λ_{su} $/(J \cdot m^{-1}h^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	L_s $/(J \cdot m^{-3})$
混凝土桩	830	830	10624	10624	0
细砂	906	1170	8921	6854	7.73×10^7
粉质黏土	1275	1730	6022	3931	14.98×10^7
风化泥岩	1108	1344	4977	4474	11.11×10^7

根据青藏高原多年观测资料及附面层原理^[34],计算区域的天然上边界温度条件可以表示为如下的正弦函数形式:

$$T = T_n + A \sin(2\pi t / 8760 + \alpha_0) + \alpha t \quad , \quad (13)$$

式中, T_n 为计算模型中上边界温度的年平均值, A 为上边界温度的振幅, α 为未来 50 a 内由气候变暖引起的上边界年平均温度增温率,本文取 $\alpha = 0.052^\circ C$ 。为考察不同年平均地温冻土区的桩基热管应用效果,根据青藏高原冻土区年平均地温的变化范围及热管措施应用范围,本文分别针对 $-0.5^\circ C$ 、 $-1.0^\circ C$ 、 $-1.5^\circ C$ 3 种冻土年平均地温条件下开展。结合附面层原理及上述现场桩基表面热效应监测研究,对于上边界温度幅值,天然地表 A 取 $13^\circ C$,混凝土表面 A 取 $16^\circ C$ 。3 种年平均地温条件下气温、天然地表以及桩基表面的平均温度 T_n 选值如表 3 所示。

表 3 天然地表及桩基础表明平均温度

Table 3 Mean annual temperatures at ground surface and tower footing surface

footing surface		
年平均气温/ $^\circ C$	天然地表/ $^\circ C$	桩基表面/ $^\circ C$
-3.0	-0.5	1.0
-3.5	-1.0	0.5
-4.0	-1.5	0
附面层增温	2.5	4.0

三维模型中轴线、中间剖面及 15 m 外弧面视为绝热边界。底面边界为热流边界,3 种地温条件下该深度热流由风化泥岩(冻结)导热系数及青藏直流联网工程现场监测(对应 3 种地温)地温监测孔 20 m 附近地温梯度计算得到。对于热管而言,在数值模拟过程中,热管的年内工作周期为每年的 10 月中旬至次年的 4 月中旬,工作强度由地气温差($T_a - T_s$)决定。

4.4 数值模型验证

青藏直流联网工程中,清水河监测场地年平均地温 $-1.2^\circ C$ 左右,与年平均地温 $-1.0^\circ C$ 模型接近,因此选取该场地现场监测结果对模型可靠性进行验证。

图 6 给出了清水河监测场地热管管壁地温剖面图及 $-1.0^\circ C$ 年平均地温条件下桩基周围数值模拟地温剖面图,图中 Y 为垂向深度, X 为水平向距离。现场监

测结果中 (图 6 (a)), 2011 年 10 月时桩基周围地温等值线呈水平状, 桩基壁面附近 0°C 等温线略低于周围土体, 体现了桩基是热的良导体。桩基底部以下, 存在 -1.5°C 低温冻土, 体现了热管的冷却降温效果。2012 年 4 月时, 经过一个冷季的冷却降温后, 桩基下部地温明显低于周围土体地温。数值模拟结果中 (图 6 (b)), 第二年 10 月份时 (2011 年 10 月), 桩基周围等温线均呈水平分布, 桩基下部同样存在 -1.5°C 等温线。2012 年 4 月, 桩基周围土体地温明显降低, 各组等温线与现场实测结果深度上对应较好。因此, 文中所建立的空气-热管-土体耦合传热模型及相应土层的热物理参数的选取, 能够可靠反应热管作用下桩基周围多年冻土热状况发展变化趋势。

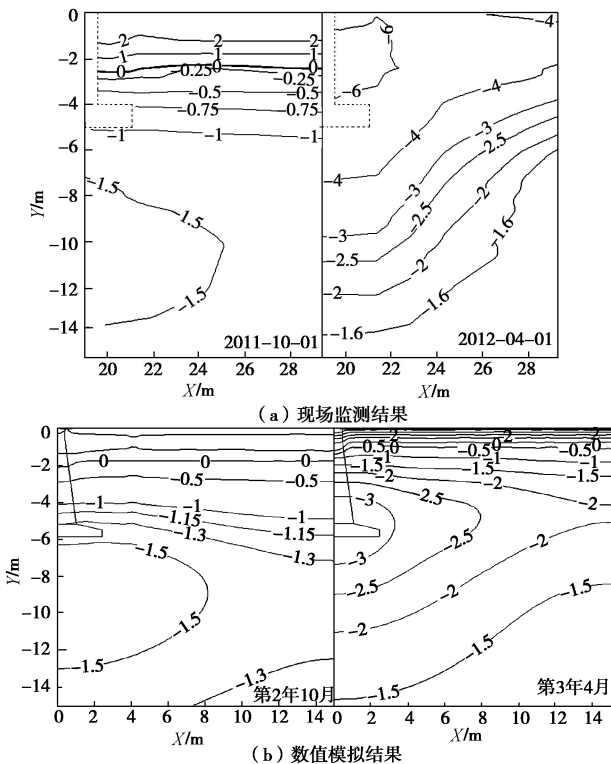


图 6 塔基周围地温剖面图

Fig. 6 Observed and simulated ground temperature fields within thermosyphone profile

5 热管-桩基传热过程及热管冷却降温效果分析

5.1 冷季桩基-热管传热过程分析

图 7 给出了热管措施应用后第 2 年 1 月份热管剖面地温剖面图。每年的 1 月份一般为热管工作强度最大的时期。从图 7 中可以看出, 3 种地温状况下, 热管周围地温梯度明显较大, 充分体现了热管的冷却降温作用。值得注意的是, 热管中下部地温曲线分布不对称, 桩基及桩基下部地温明显低于热管另一侧对称位置地温。这与以往冻土路基中热管两侧对称性地温分布存在不同。这是由于锥柱式基础及基础底座为混

凝土材料, 相对于另外一侧土体而言是热的良导体, 因此热管产生的冷量明显向桩基一侧及桩基下部传递, 使得桩基底部冻土地温明显低于天然地表下同一深度地温。可以看出, 3 种地温状况下, 桩基底部地温分别约为 -2°C , -3.0°C , -4°C , 而同一深度天然地表以下地温分别为 $-0.3^{\circ}\text{C} \sim -0.4^{\circ}\text{C}$, $-1.0^{\circ}\text{C} \sim -1.2^{\circ}\text{C}$, $-2.1^{\circ}\text{C} \sim -2.3^{\circ}\text{C}$ 之间。热管对于桩基底部冻土地温的明显降温及锥柱式基础的快速“导冷”作用, 对于主要考虑“融沉”病害的锥柱式基础而言十分有利。

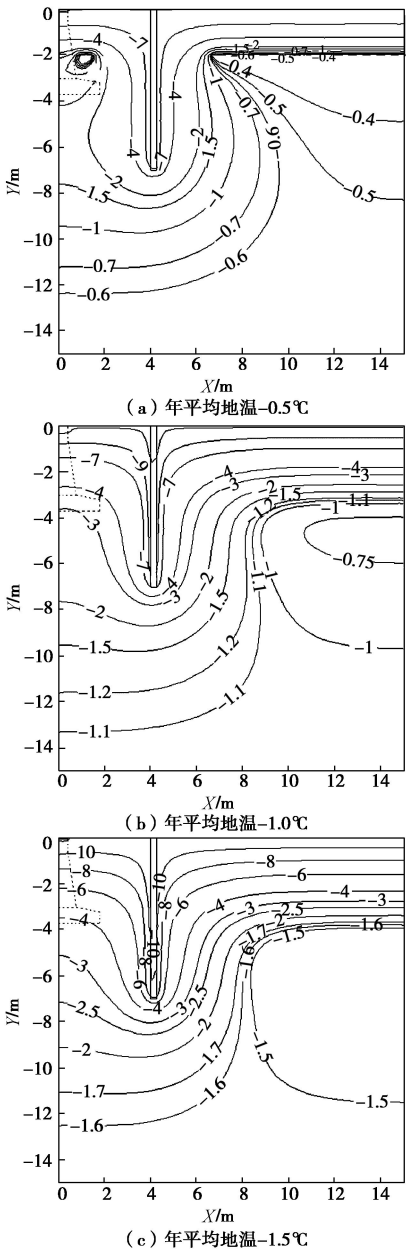
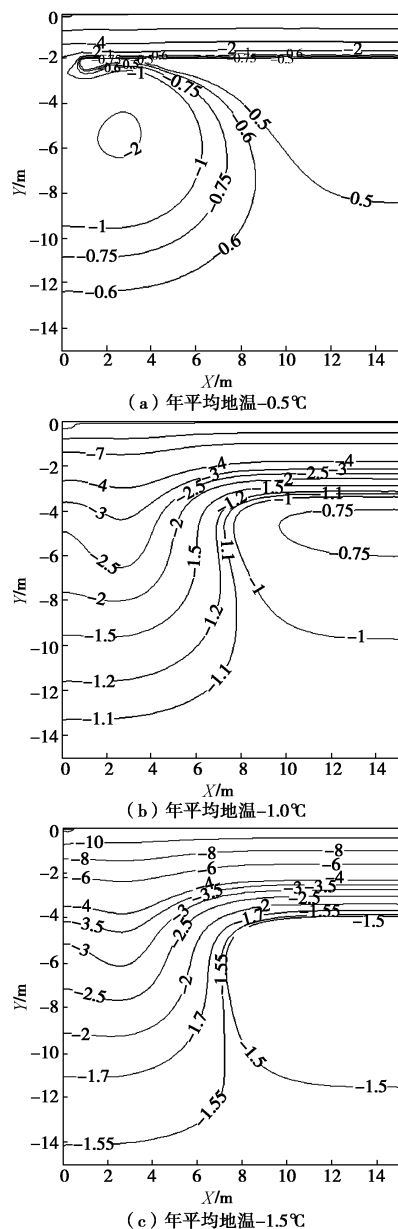


图 7 第 2 年 1 月份热管剖面地温剖面图

Fig. 7 Ground temperature fields within thermosyphone profile in January of second year after construction

图 8 给出了热管措施应用后第 2 年 1 月份中间剖面 (无热管) 地温剖面图。由于该剖面距离热管垂直距离约 2.8 m 左右, 因此在热管对应垂直位置处已无明显密集等温线分布, 地温梯度较小。如前所述, 锥

柱式基础及其底座作为热的良导体,为热管产生冷量向中间剖面传递提供了“快速通道”,因此锥柱式基础本身在该平面上温度较低,导致基础周围及下部多年冻土地温明显降低,进而使得基础底座附近地温与热管剖面上基本相同。通过热管剖面及中间剖面的对比,表明在基础底部附近热管剖面及中间剖面 45°C 水平弧面内,冻土地温分布仍然较为均匀,无明显梯度分布。基础以下及周围均匀的地温分布,可显著消除地基差异变形带来的基础倾斜,有利于锥柱式基础的整体稳定性。



2.25, 2.09, 1.9 m, 天然地表下天然上限分别为1.85, 1.74, 1.65 m, 3者差值分别为0.4, 0.35, 0.25 m, 反映了桩基作为热的良导体, 夏季最大季节融化深度大于天然场地。但是从目前已有短期监测结果看, 上述差异小于现场监测结果, 这主要是由于现场短期桩基周围热状况受基坑开挖、塔基浇筑、基坑回填等施工过程影响显著。

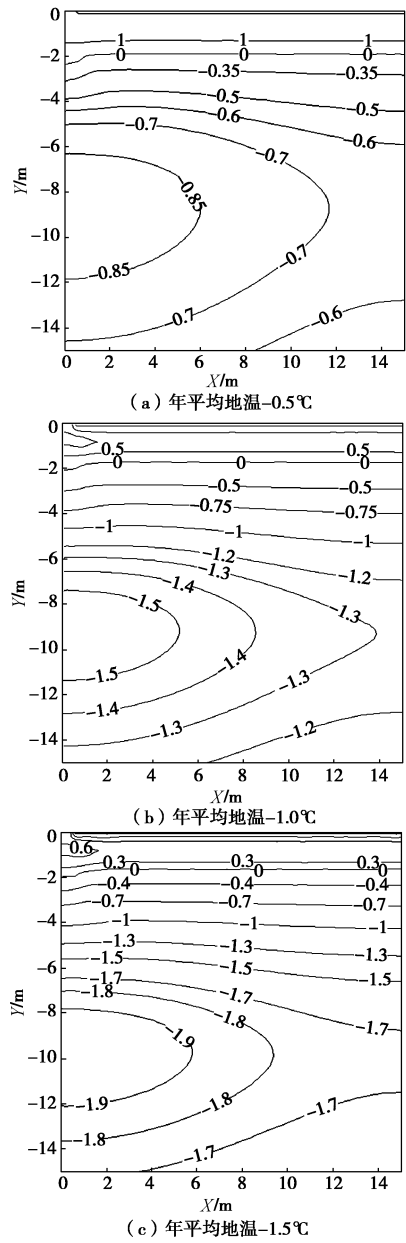


图 10 第 2 年 10 月份中间剖面地温剖面图

Fig. 10 Ground temperature fields within thermosyphon profile in October of second year after construction

5.3 热管及气候变暖双重作用下基础周围多年冻土热状况变化

从上述分析可以看出, 热管剖面及中间剖面地温分布接近, 因此后续热管及气候双重作用下基础周围多年冻土热状况变化分析主要针对中间剖面开展。

图 11 给出了热管措施应用后第 5 年 10 月份中间

剖面地温剖面图。可以看出, 经过 5 个冷季热管的冷却降温作用后, 锥柱式基础下部深层地温继续降低。3 种地温条件下, 锥柱式基础底座下部大范围低温冻土地温继续降低, 分别约为 -0.9°C , -1.7°C , -2.1°C 左右, 较第 2 年该范围冻土地温分别降低约 0.2°C 左右, 表明在此期间, 桩基下部多年冻土热状况仍主要受热管冷却降温效果控制。

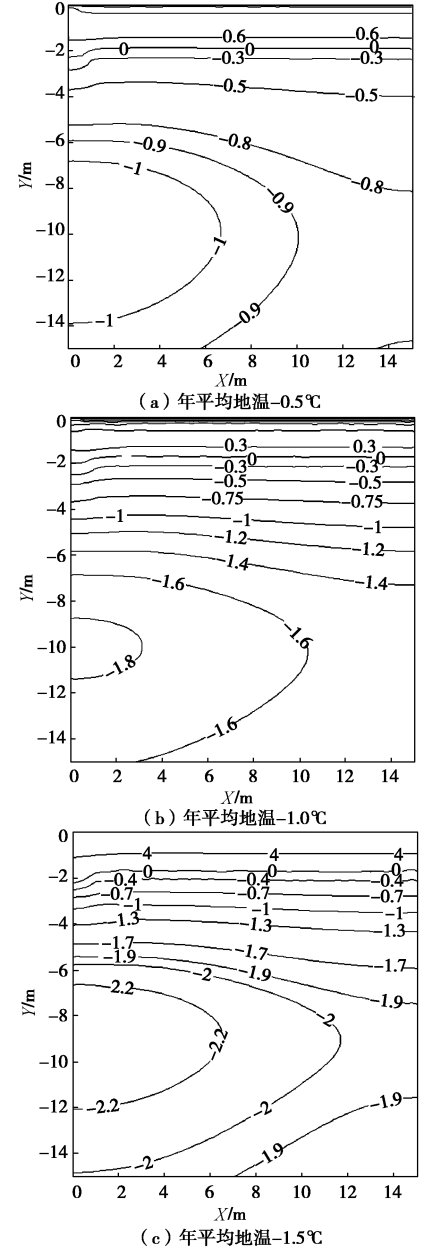


图 11 第 5 年 10 月份中间剖面地温剖面图

Fig. 11 Ground temperature fields within middle profile in October of fifth year after construction

随着运营时间的增加, 在气候变暖影响下锥柱式基础下部及周围多年冻土地温缓慢升高。第 20 年时, 3 种地温条件下, 锥柱式基础底座下部大范围低温冻土地温分别升高至 -0.8°C , -1.5°C , -1.7°C , 较第 5 年时分别升高了约 0.1°C , 0.2°C , 0.4°C 。至第 50 年时 (图 12), 气温升高 2.6°C 背景下, 锥柱式基础下部大范围

低温冻土温度分别升高至 -0.4°C 、 -0.5°C 、 -0.65°C ，较初始地温分别升高约 0.1°C 、 0.5°C 、 0.85°C 。3种地温条件下，不同的升温幅度，充分体现了不同年平均地温冻土的热惰性差异，同时从升温幅度及速率上与目前青藏公路长序列现场监测结果接近^[8]，一定程度上反应了本文模型中热物理参数选取的合理性。从融化深度看，50年时中间剖面3种地温条件下，桩基中心人为上限深度分别为3.7、2.7、2.5 m，天然地表下天然上限分别为4.4、2.5、2.1 m，桩基中心人为上限分别较第二年增加1.2、0.5、0.4 m，天然上限分别较第二年增加2.6、0.8、0.5 m。天然上限增加速率模拟结果在量值上均处在青藏公路沿线多年冻土活动层增加速率范围的下限^[8]。主要是由模型中活动层以下多

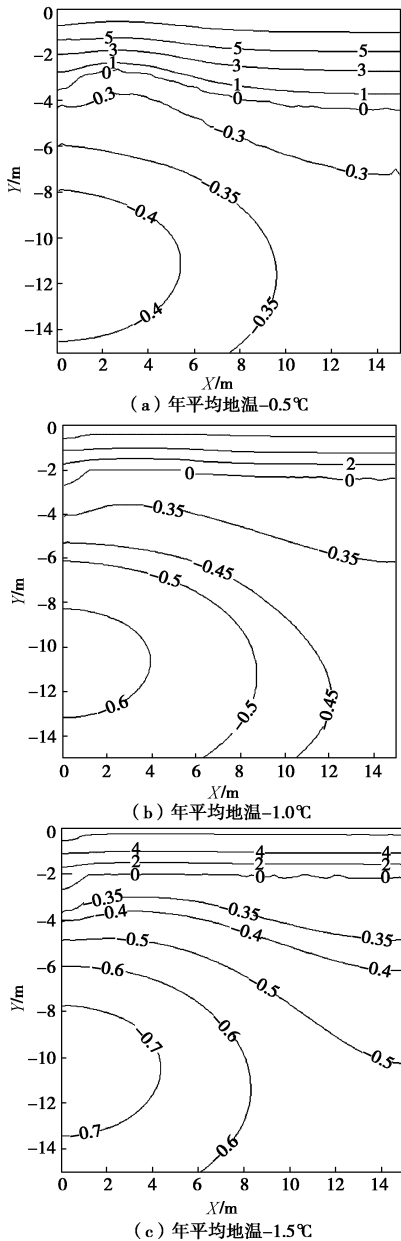


图 12 第 50 年 10 月份中间剖面地温剖面图

Fig. 12 Ground temperature fields within middle profile in October of fiftieth year after construction

年冻土均为富冰以上冻土所导致。此外，不同年平均地温分区冻土地温的升温幅度及上限的增加幅度差异很好地反应了气候变暖背景下冻土的升温退化过程^[35]。

为更好地反应桩基下部冻土地温变化过程，图 13 给出了 3 种地温条件下桩基底部地温随时间变化过程。可见，桩基底部前 5 年地温主要经历降温过程，之后在气候变暖背景下，开始缓慢升温。对于 -1.0°C 、 -1.5°C 两种地温下，50 年时桩基底部土体仍然处于冻结状态，能够满足青藏直联网工程对于桩基周围多年冻土热稳定性的要求。但是对于 -0.5°C 地温条件下而言，运营后期桩基底部多年冻土出现融化现象，无法满足工程需求。

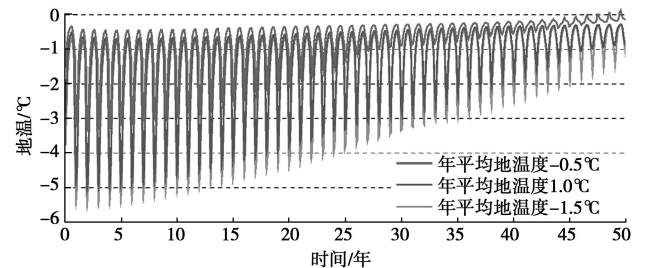


图 13 桩基底部地温时间序列

Fig. 13 Time series of ground temperature beneath tower footing

5.4 热管-保温材料复合措施的应用

通过上述分析可知，在 50 年气温升高 2.6°C 背景下，对于 -0.5°C 高温冻土区而言，运营后期锥柱式基础周围多年冻土最大季节融化深度已经大于桩基埋深，无法满足塔基对于地基热稳定性的要求。目前，已有现场监测结果也表明，在部分高温冻土区当基础埋设较浅时，尽管冷季时热管的降温效果显著，但暖季时基础底部浅层及底部土体温度仍然升温很快。为减缓塔基良好的导热性能导致的周围土体暖季快速升温，可在桩基周围浅层地表铺设保温材料。保温材料作为一种被动保护多年冻土热稳定性措施，已经广泛应用于青藏公路、青藏铁路等重大高原冻土工程当中，并取得良好的应用效果^[36-37]。应用本文所采用的数值模型，在模型中桩基周围添加 EPS 保温板，保温板厚度为 10 cm，宽度方向覆盖单一塔基 4 根桩基并延伸至热管附近。EPS 保温板的导热系数取 $0.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，比热取 $1400 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-3}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，密度 $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

图 14 给出了热管-保温材料复合措施下第二年冷、暖季时中间剖面的地温剖面图。可以看出，冷季时，保温板的铺设阻止了桩基周围浅层土层内冻结锋面的快速推进，但是桩基底部附近土体受热管措施的冷却降温，地温仍然明显低于同一深度天然地表下土体温度，即冷季时保温板的应用对于热管措施对于桩基周围土体的冷却降温效果影响不大。暖季时，保温板的铺设显著减缓了桩基周围土层内融化锋面的推进速度，使得桩基周围土体长时间保持负温状态，土体

最大季节融化深度只有 1.55 m, 这一量值较无保温板时减小了接近 1 m。

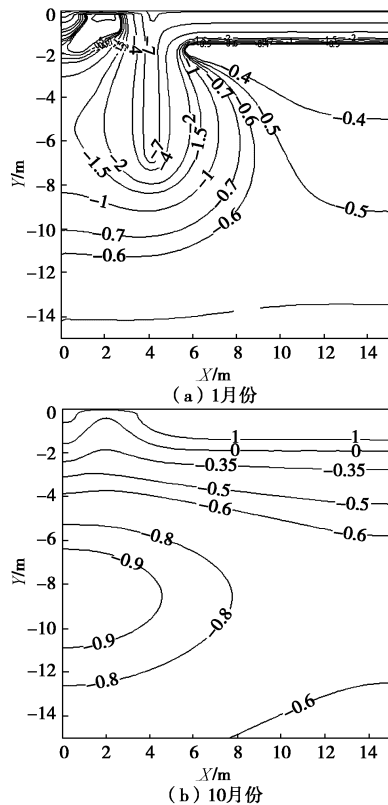


图 14 热管-保温材料复合措施下中间剖面第 2 年地温剖面图
Fig. 14 Ground temperature fields within middle profile in second year after construction

图 15 给出了热管-保温板复合措施下桩基中心剖面 50 年 10 月份地温剖面图, 可以看出, 热管的“冷却降温”及保温板的“隔热保冷”效果很好地抵御了气候变暖的影响, 桩基周围最大季节融化深度只有 2.96 m, 已经小于桩基埋深 (3.7 m), 能够满足青藏直流联网工程对于桩基周围多年冻土热稳定性的影响。从图 16 也可看出, 保温板的采用明显降低了桩基底部土体温度, 使得其暖季最高温度只有 -0.5°C 左右, 且最低温度明显低于无保温措施情况。

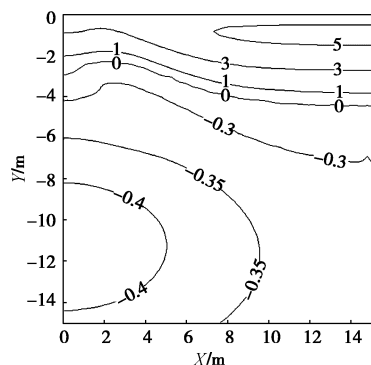


图 15 热管-保温材料复合措施下中间剖面第 50 年地温剖面图
Fig. 15 Ground temperature fields within middle profile in fiftieth year after construction

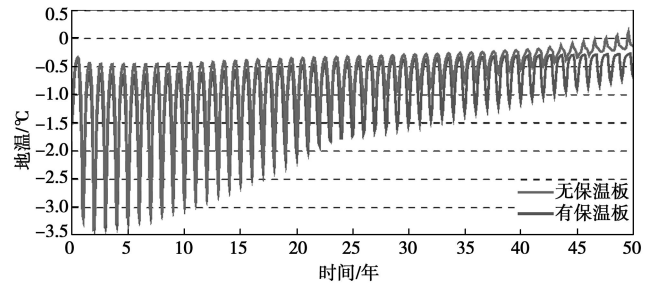


图 16 有无保温板桩基底部地温时间序列
Fig. 16 Time series of ground temperatures beneath tower footing with and without insulation boards

6 结 论

以青藏直流联网工程为背景, 通过现场监测数据确定热管年内工作周期及桩基热效应。在此基础上, 系统开展气候变暖背景下不同年平均地温分区锥柱式基础-热管传热过程、基础周围多年冻土热状况发展变化趋势的数值模拟及预测研究, 主要结论如下:

(1) 冷季热管工作期间, 其冷却降温效果显著, 热管周围地温梯度明显较大。同时, 由于锥柱式基础及其底座为热的良导体, 热管产生的冷量通过锥柱式基础及其底座快速向基础底部传递, 使得基础下形成大范围低温冻土。在单一塔腿 4 根热管布置情况下, 锥柱式基础周围多年冻土地温分布较为均匀。

(2) 暖季热管停止工作期间, 锥柱式基础埋设较浅, 其良好的导热性能导致其底部土体地温升温较快, 与天然地表下同一深度地温基本持平。基础深层地温主要受热管作用控制, 温度显著低于天然地表下同一深度地温。

(3) 在 50 a 气温升高 2.6°C 背景下, -1.0°C 、 -1.5°C 两种年平均地温条件下, 3.7 m 埋深的锥柱式基础底部多年冻土仍然处于冻结状态, 因此能够满足工程对于桩基础周围多年冻土热稳定性要求。然而, 对于 -0.5°C 地温条件下, 运营后期锥柱式基础周围多年冻土最大季节融化深度已经大于桩基埋深, 无法满足塔基稳定性要求。

(4) 对于高温冻土区, 应用热管-保温板复合措施, 可有效发挥热管冷季的“冷却降温”和保温板暖季的“隔热保冷”效能, 可有效降低桩基底部深层地温的同时, 大幅减小桩基浅层土体的最大季节融化深度。

参考文献:

- [1] 俞祁浩, 刘厚健, 钱进, 等. 青藏直流联网工程 $\pm 500\text{ kV}$ 输电线路的工程问题分析[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(6): 806 - 812. (YU Qi-hao, LIU Hou-jian, QIAN Jin, et al. Research on frozen engineering of Qinghai-Tibet 500 kV DC

- power transmission line[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, **6**(6): 806 – 812. (in Chinese))
- [2] 马 巍, 刘 端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(3): 571 – 579. (MA Wei, LIU Duan, WU Qing-bai. Monitoring and analysis of embankment deformation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(3): 571 – 579. (in Chinese))
- [3] 俞祁浩, 温 智, 丁燕生, 等. 青藏直流线路东土地基监测研究[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(5): 1165 – 1172. (YU Qi-hao, WEN Zhi, DING Yan-sheng, et al. Monitoring the tower foundation in the permafrost regions along the Qinghai-Tibet DC transmission line from Qinghai Province to Tibetan autonomous region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(5): 1165 – 1172. (in Chinese))
- [4] INSTANES A. Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In: arctic climate impact assessment[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [5] 程国栋, 何 平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 213 – 217. (CHENG Guo-dong, HE Ping. Linearity engineering in permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 213 – 217. (in Chinese))
- [6] 马 巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(5): 579 – 587. (MA Wei, CHENG Guo-dong, WU Qing-bai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 579 – 587. (in Chinese))
- [7] WU Qing-bai, LIU Yong-zhi, ZHANG Jian-ming. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2002, **13**(3): 199 – 205.
- [8] WU Qing-bai, NIU Fu-jun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, **58**: 1079 – 1084.
- [9] 吴青柏, 施 斌, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土与公路相互作用研究[J]. 中国科学(D辑), 2002, **32**(6): 514 – 520. (WU Qing-bai, SHI Bin, LIU Yong-zhi. Interaction study of permafrost and highway along Qinghai-Xizang Highway[J]. Scientia Sinica Terrae, 2002, **32**(6): 514 – 520. (in Chinese))
- [10] 金会军, 喻文兵, 陈友昌, 等. 多年冻土区输油管道工程中的(差异性)融沉和冻胀问题[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(3): 454 – 464. (JIN Hui-jun, YU Wen-bing, CHEN You-chang, et al. (Differential) Frost heave and thaw settlement in the engineering design and construction of oil pipelines in permafrost regions: a review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(3): 454 – 464. (in Chinese))
- [11] 马 巍, 穆彦虎, 李国玉, 等. 多年冻土区铁路路基热状况对工程扰动及气候变化的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(3): 478 – 489. (MA Wei, MU Yan-hu, LI Guo-yu, et al. Responses of embankment thermal regime to engineering activities and climate change along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Scientia Sinica Terrae: Earth Science, 2013, **43**(3): 478 – 489. (in Chinese))
- [12] 牛富俊, 马 巍, 吴青柏. 青藏铁路主要冻土路基工程热稳定性及主要冻融灾害[J]. 地球科学与环境学报, 2011, **33**(2): 196 – 206. (NIU Fu-jun, MA Wei, WU Qing-bai. Thermal stability of roadbeds of the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions and the main freezing-thawing hazards[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2011, **33**(2): 196 – 206. (in Chinese))
- [13] MA Wei, MU Yan-hu, WU Qing-bai, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, **67**(2): 178 – 186.
- [14] GOERING D. Loft road extension: ACE & thermosyphon design features[J]. Alaskan Transportation, 2003, **28**(1): 1 – 4.
- [15] XU J F, GOERING D. Experimental validation of passive permafrost cooling systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008: 283 – 297.
- [16] MCKENNA J K, BIGGAR K W. The rehabilitation of a passive-ventilated slab on grade foundation using horizontal thermosyphon[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(2): 684 – 691.
- [17] SMITH L B, GRAHAM J P, NIXON J F. Thermal analysis of forced-air and thermosyphon cooling systems for the Inuvik airport expansion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1992, **29**(2): 73 – 85.
- [18] BRADLEY G P, YAMARK E. Passive thermal stabilization of the bethel runway-a construction view[C]// Cold Regions Engineering Northern Resource Development Specialty Conference. Alberta, 1984: 221 – 228.
- [19] 丁靖康. 冻土地区热桩技术应用研究[D]. 兰州: 中铁西北研究院, 2002. (DING Jing-kang. Application of heat pipe in permafrost regions[D]. Lanzhou: Northwest Research Institute Co., Ltd of C.R.E.C, 2002. (in Chinese))
- [20] 章金钊. 热桩在青藏高原多年冻土地区涵洞工程中的应用[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊): 96 – 100. (ZHANG Jin-zhao. Application of thermal pipe to the culvert engineering in permafrost region on Qinghai-Xizang

- Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S0): 96 - 100. (in Chinese))
- [21] 汪双杰, 陈建兵, 李仙虎. 多年冻土区公路修筑技术研究
与工程实践[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(2): 384 - 392. (WANG Shuang-jie, CHENG Jian-bing, LI Xian-hu. The highway construction technology in permafrost regions: research and engineering practice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(2): 384 - 392. (in Chinese))
- [22] 程红彬. 青藏铁路冻土区低温热管应用关键技术研究[D]. 兰州: 中国科学院研究生院, 2007. (CHENG Hong-bin. Study on the key technology of application of thermosyphon along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[D]. Lanzhou: University of the Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese))
- [23] 谭青海, 童武, 吴海洋, 等. 热棒技术在青藏直流工程中的应用[J]. 华北电力技术, 2012(2): 16 - 19. (TAN Qing-hai, TONG Wu, WU Hai-yang, et al. Application of hot rod technology in Qinghai-Tibet DC Project[J]. North China Electric Power, 2012(2): 16 - 19. (in Chinese))
- [24] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (HOLMAN J P. Heat transfer[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese))
- [25] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010. (YANG Shi-ming. Heat transfer[M]. Beijing: High Education Press, 2010. (in Chinese))
- [26] 张明义. 多年冻土区气冷路基长期热稳定性研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007. (ZHANG Ming-yi. Study on long-term thermal stability of air-cooled subgrade in permafrost regions[D]. Lanzhou: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2007 (in Chinese))
- [27] 赖远明, 张明义, 李双洋. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (LAI Yuan-ming, ZHANG Ming-yi, LI Shuang-yang. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [28] 陈赵育, 李国玉, 穆彦虎, 等. 不同升温模式下冻土区装配式基础热稳定性研究[J]. 地震工程学报, 2013, **35**(4): 877 - 884. (CHEN Zhao-yu, LI Guo-yu, MU Yan-hu, et al. Research on thermal stability of fabricated foundation with different warming patterns in permafrost regions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, **35**(4): 877 - 884. (in Chinese))
- [29] 陈赵育, 李国玉, 穆彦虎, 等. 入模温度和水化热对青藏直流联网工程冻土桩基温度特性影响研究[J]. 冰川冻土, 2014, **36**(4): 818 - 827. (CHEN Zhao-yu, LI Guo-yu, MU Yan-hu, et al. Impact of molding temperature and hydration heat on thermal properties of pile foundation in permafrost regions along the Qinghai-Tibet DC interconnection project[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, **36**(4): 818 - 827. ((in Chinese)))
- [30] WU Jun-jie, MA Wei, SUN Zhi-zhong, et al. In-situ study on cooling effect of the two-phase closed thermosyphon and insulation combinational embankment of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **60**(2): 234 - 244.
- [31] 周勇, 董献付, 张波, 等. 柴达尔—木里铁路冻土路基热棒冷却效果的试验研究[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(4): 688 - 694. (ZHOU Yong, DONG Xian-fu, ZHANG Bo, et al. Experimental study on the cooling effect of heat pipe along the Chaidar-Muli Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(4): 688 - 694. (in Chinese))
- [32] 金龙. 多年冻土区热管路基降温效能分析及设计方法研究[D]. 兰州: 中国科学院研究生院, 2013. (JING Long. Study on cooling effect and design method of thermosyphon embankment in permafrost regions[D]. Lanzhou: University of the Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese))
- [33] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [34] 朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(1): 8 - 14. (ZHU Lin-nan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(1): 8 - 14. (in Chinese))
- [35] JIN Hun-jun, ZHAO Lin, WANG Shao-ling, et al. Thermal regimes and degradation modes of permafrost along the Qinghai-Tibet Highway[J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 2006, **49**(11): 1170 - 1183.
- [36] 盛煜, 温智, 马巍. 青藏铁路北麓河试验段路基保温材料处理措施初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(增刊 2): 2659 - 3663. (SHENG Yu, WEN Zhi, MA Wei. Preliminary analysis on insulation treatment of embankment at beilhehe test section of Qinghai-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(S2): 2659 - 3663. (in Chinese))
- [37] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 保温法保护多年冻土的长期效果分析[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(5): 760 - 765. (WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Long term effect of insulation on permafrost on the Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(5): 760 - 765. (in Chinese))