

不同升温模式下冻土地区装配式基础热稳定性研究

陈赵育^{1,2}, 李国玉¹, 穆彦虎¹, 俞祁浩¹, 毛云程^{1,3}

(1.中国科学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.中国科学院大学,北京 100049; 3. 甘肃省交通科学研究院有限公司,甘肃兰州 730050)

摘要:以IPCC SRES A2、A1B、B1三种气候变化模式为基础,利用数值方法研究了青藏直流联网工程冻土区装配式基础的冻融过程以及活动层、融化深度、地温的变化规律。结果表明:工程扰动和气候变暖改变了冻土的热状态,促进了冻土退化,均为影响基础长期稳定性的重要因素,其中混凝土桩基的强化导热作用加剧了冻融过程,气候升温导致活动层厚度增加,土层温度升高;随着深度的增加,冻土响应减弱,冻土温度变化幅度越小;在三种升温模式下50年后融化深度分别达到3.12 m、5.07 m和6.02 m,而同期天然场地活动层厚度为2.07 m、4.37 m、5.62 m,说明冻土对不同升温模式的响应程度不同,且中心冻土在气候变暖和工程扰动双重影响下退化更快;从第10年到第50年,这三种模式下桩基中心融化速率分别为 $1.5 \text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$ 、 $6.2 \text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$ 、 $8.6 \text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$,即随着升温速率的增加,土层融化深度增加,冻土退化速度加快;低升温率时冻土变化主要受工程作用,而在较高升温模式下冻土退化则主要受气候变暖的影响。

关键词:青藏直流输电工程; 升温模式; 装配式基础; 热稳定性; 多年冻土

中图分类号:TV445 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2013)04-877-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.877

Thermal Stability of Fabricated Foundations with Different Warming Patterns in Permafrost Regions

CHEN Zhao-yu^{1,2}, LI Guo-yu¹, MU Yan-hu¹, YU Qi-hao¹, MAO Yun-cheng^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Transportation Research Institute Co., Ltd, Lanzhou Gansu 730050, China)

Abstract: Climate warming and engineering activities could cause changes in the thermal conditions of permafrost, mainly in two ways: warming of the permafrost and increasing the thickness of the active layer, which will lead to a marked change in the thermal stability of foundations in permafrost regions. Generally based on the IPCC SRES A2, A1B, and B1 climatic changes, this study uses numerical methods to research the freezing and thawing process, the changes in the active layer, the thaw depth and the soil temperature of fabricated foundations in permafrost regions along the $\pm 400 \text{ kV}$ Qinghai-Tibet power transmission line. The results show that engineering activities and climate warming change the thermal conditions of permafrost and promote degradation; these are important factors affecting the long-term stability of foundations. Enhanced heat conduction from concrete pile

收稿日期:2013-10-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973项目)(2012CB0261061);国家自然科学基金创新群体(4112106);国家电网公司科技项目(SGJSJS(2010)935-936);冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZY-11)

作者简介:陈赵育(1987-)男(汉族),安徽安庆人,硕士研究生,主要从事寒区工程研究.E-mail: chenzhaoyu@lzb.ac.cn

通讯作者:李国玉, E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn

foundations aggravates the freezing and thawing process, and climatic warming leads to a decrease in the thickness of the active layer and a rise in soil temperature. With increasing depth, the permafrost response decreases, and the rate of change of temperature becomes small. The permafrost response increases and the rate of change of temperature is greatly altered closer to the active layer. Under three warming patterns, after 50 years, the soil temperature at 1 m depth increases to 2.80 °C, 4.66 °C, and 5.60 °C from 1.90 °C, the soil temperature at 2 m depth increases to 1.22 °C, 3.66 °C, and 4.82 °C from 0.50 °C, and at 10 m depth, the permafrost temperature will rise from -0.70 °C to -0.42 °C, -0.35 °C, and -0.30 °C. With the three warming patterns, IPCC SRES B1, A1B, and A2, the maximum thaw depths under the centers of foundations are 3.12 m, 5.07 m, and 6.02 m after 50 years, while the thicknesses of the active layers of natural ground are 2.07 m, 4.37 m, and 5.62 m. The maximum thaw depth of natural ground is much shallow than the maximum thaw depth under the centers of foundations. This shows that permafrost has different responses to different warming patterns, and the degradation of permafrost under the centers of pile foundations is faster under the twin effects of climatic warming and engineering activities. There will be hidden troubles with foundation bases after 50 years if steps to prevent the degradation of permafrost under warming patterns A2 and A1B are not taken. The thawing rates of the permafrost under the foundation centers are 1.5, 6.2, and 8.6 with the three warming patterns B1, A1B, and A2 from the tenth year to the fiftieth year. The thaw depth increases with a rise in the rate of change of temperature, and the speed of degradation accelerates with increasing rate of change of temperature. The thaw depth of permafrost under the centers of foundations is three times deeper as that of the permafrost of natural ground. This is because engineering activities promote permafrost degradation with a low rate of temperature increase. At this point, permafrost mainly is changed by engineering activities, while permafrost degradation is mainly influenced by climate warming with a higher heating rate.

Key words: Qinghai-Tibet DC power transmission line; warming patterns; fabricated foundation; thermal stability; permafrost

0 引言

青藏直流联网工程是国家西部大开发重点工程之一,该工程由青海境内西宁-格尔木 750 kV 交流输变电工程、青海格尔木-西藏拉萨±400 kV 直流输电工程、藏中 220 kV 电网工程三部分组成,其中青藏格尔木-西藏拉萨±400 kV 直流输电工程全长 1 038 km,穿越了青藏高原腹地,是迄今为止在世界上海拔最高、穿越多年冻土区最长、建设难度最大、规模最大的输变电工程。沿线平均海拔为 4 500 m,最高海拔达到 5 300 m,其中大片连续多年冻土区长达 550 km,年平均地温高于-1.0°C 的高温多年冻土区为 275 km,高含冰量多年冻土区为 221 km,高温高含冰量重叠路段约为 134 km。高温高含冰量冻土热稳定性差,对环境变化极为敏感^[1-3]。研究表明青藏高原未来 50 年气温可能上升 2.2~2.6 °C,多年冻土面积将要减小 10~15 %^[4]。气候变暖和工程作用加速了冻土退化,加剧了输电线路冻土基础的冻胀、融沉等问题,这将严重影响输电线路的安全运行。

针对气候变暖下青藏高原冻土响应,国内学者已经从不同的角度开展了大量研究。马巍、穆彦虎等通过青藏铁路现场监测数据研究了多年冻土区铁路块石、热棒路基热状况,以及其对气候变化的响应,并据此对青藏铁路路基热状况进行了分类^[5-7];李生辰、宋辞、周宁芳等对近 50 年以来青藏高原气温变化、影响因素、研究进展进行了总结,研究成果得出青藏高原气温近 50 年来明显上升,柴达木盆地增温幅度最大,影响气温变化因素主要有海拔、天文因素、气象要素以及外部环流影响等^[8-10];马巍、王绍令、金会军等总结了冻土环境与全球气候变化研究进展,青藏高原冻土对气候变化的响应,气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响^[11-13];李述训、朱文琴等在 50 年气温上升 2 °C 模式下,通过数值模拟出青藏高原多年冻土变化趋势以及青藏高原气候变化的特征^[14-15];李国玉等在考虑青藏高原未来 50 年气温上升 2.6 °C 时,利用数值方法研究了不同含冰量和年平均地温对青藏直流联网工程冻土区锥柱基础的影响,得出这种升温模式下 50 年

后少冰高温冻土区桩底最大融化深度达到5.8 m^[1,16-17]；俞祁浩等结合现场实测资料指出青藏直联工程塔基目前总体处于稳定状态^[3,18]；张中琼等通过考虑不同气候变化条件，定量预测了青藏高原天然场地多年冻土活动层厚度的变化情况，指出百年后青藏高原多年冻土将发生显著变化，气候变化影响活动层厚度变化，引起多年冻土融化和活动层内部水热重分布，进而改变土的物理性质，最终对大气与冻土间能量交换、水力传导造成影响^[19]；钱进等通过研究塔基在不同冻土区的稳定性，对可能存在的问题进行了分析并给出了相应的工程措施^[20]。

目前针对青藏高原多年冻土地区输电塔基桩基在不同升温模式和工程作用下的长期热稳定性并未进行系统研究。因此，本文以青藏直流输电工程装配式混凝土基础为背景，结合现场实测资料建立二维传热模型，利用大型数值模拟软件通过数值方法来研究不同升温模式下冻土桩基热稳定性，定量研究不同气候变暖背景下桩土之间传热过程、桩基中心温度、桩底融化层厚度及桩基温度场变化规律。研究结果可为输电线路冻土区桩基设计、施工和运行维护提供参考，为降低冻土基础融沉灾害和其他寒区桩基工程研究奠定基础。

1 数值方法

为了研究气候变暖条件下输电塔基冻土状态长期变化，建立不考虑对流的二维柱坐标热传导偏微分方程^[2]，利用数值方法对冻土塔基温度场进行模拟研究。混凝土装配式基础桩基之间距离较远，相互没有热影响，可以采用单桩进行数值模拟^[1]。考虑到结构和荷载的对称性，在建立数值模拟模型时取其1/4部分进行分析研究。

1.1 数值分析模型

为满足温度场计算的尺寸要求，使计算结果与实际情况相一致，在保证有限元计算精度前提下模型宽度方向取15 m，深度方向取20 m。根据现场资料，计算模型中土层分为三层：第一层为活动层，土质类型为砂土；第二层为多年冻土层，土质类型为粉质粘土，根据含冰量的不同可分为少冰、多冰、含土冰层；第三层也为多年冻土层，土质类型为少冰冻土的粉质粘土。三层土的厚度分别为2 m、6 m、12 m。物理模型如图1所示。

1.2 边界条件

模型初始温度场根据上边界条件（不考虑全球气候变暖的影响）和地热流作为边界条件，逐时段求解，直到年变化层以下温度场基本保持稳定且年变化层以上相同位置上的温度值在同一时间逐年相同为止。这里选取模拟100年后稳定的年平均地温为-0.5℃的高温冻土10月底的地温场为初始温度场进行不同条件下的数值分析。

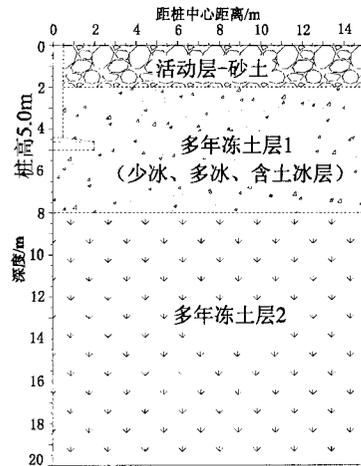


图1 数值分析模型

Fig.1 Analyzing model for numerical simulation

上边界条件为温度边界，考虑青藏高原气候变暖对桩基热稳定性的影响，高原气温在将来50年内变暖一定的量值。

IPCC第四次评估报告^[21]基于人口、经济发展水平、温室气体排放情况等给出了IPCC SRES三种不同情景，即全球经济、人口快速增长，温室气体快速增加的A2情景（高碳排放，注重经济增长的区域发展情景）；经济、人口迅速发展，温室气体浓度增加有所减弱的A1B情景（中碳排放，注重经济增长的全球共同发展情景）；温室气体浓度增加缓慢并趋于稳定的B1情景（低碳排放，强调环境可持续开发的全球共同发展情景）。随着气候的变暖，青藏高原在不同情景下气温增长速率不同，分别为：A2情景下0.052℃·α⁻¹，A1B情景下0.04℃·α⁻¹，B1情景下0.023℃·α⁻¹，气候正处在转暖趋势^[19,22]。在这三种不同升温模式下，本模型取50年升温2.6℃、2.0℃、1.15℃。

$$T_{,t} = T_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{8760}t\right) + \frac{k}{365 \times 24 \times 50}t \quad (1)$$

式中， $T_{,t}$ 是与时间 t 相关的温度函数； k 是在不同升温模式下青藏高原50年气温增加值，将此函数作为边界条件施加于模型；针对高温冻土区，依据相关文献，本文天然地表的 T_0 、 A 分别取值1.4和13；桩基表面的 T_0 、 A 取2.4和16。下边界条件为热流边界，取0.02℃·m⁻¹，热流值为100 J·h⁻¹·m⁻²，而边界条件剖开的1/4可以按绝热条件处理^[2]。

1.3 计算单元选取

模型计算采用的是大型数值模拟软件。装配式基础和土体均采用4节点四边形二维PLANE55单元，该单元可以用于轴对称二维非稳态热分析，采用映射网络划分单元，以保证单元的形状比较规则。

1.4 模型验证

数值模拟分析之前需要对模型进行验证,图2给出了572塔基装配式基础的2012年1月1日现场实测地温和数值模拟计算结果对比。从图中可以看出模拟结果和现场实测地温基本一致,只是在活动层以上有点差异。造成这种差异的主要原因是浅地表层地温容易受施工的影响,如地表植被、水、热扰动等。同时表明了本数值模型模拟输电线路冻土桩基长期热稳定性的合理性。

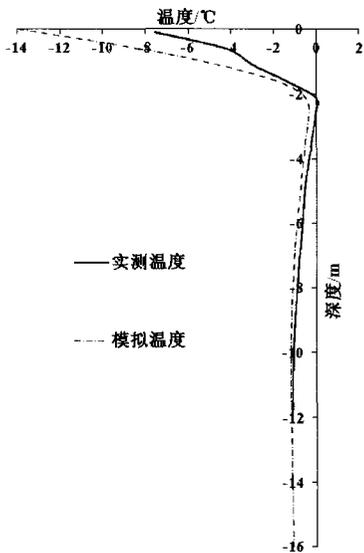


图2 模拟与实测低温资料的对比

Fig. 2 Comparison between the simulated and observed ground temperatures

2 物理参数

分析多年冻土区装配式基础的热稳定性不同于普通土体桩基,除了存在热传导外,由于冻土中冰的存在还需要考虑土中的冰转化为水的相变问题。有冰水相变的冻土-桩基间热传递问题是一个强非线性问题,给出材料的热相关性能后,可以运用显热容法来实现相变的计算:首先根据相应土体类型及含水量和干密度确定未冻水含量,假设冻土中未冻水含量在0~-0.3°C之间发生,相应的相变潜热根据公式就可以确定^[23-24],通过现场实测和其他学者的文献得到的材料热物理参数见表1^[2,24]。

表1 材料的热物理参数

Table 1 Thermal physical parameters of materials

物理参数	ρ	C^-	C^+	λ^-	λ^+	w
	$/(kg \cdot m^{-3})$	$/(J/kg \cdot K)$		$/(W/m \cdot K)$		%
细砂(活动层)	1 710	906	1 170	8 921	6 854	15
粉质粘土(少冰)	1 660	1 108	1 344	4 977	4 474	20
粉质粘土(富冰)	1 280	1 275	1 730	6 022	3 931	35
粉质粘土(饱冰)	1 050	1 241	2 024	7 026	3 806	50
混凝土桩	2 500	830	830	10 624	10 624	0

3 结果分析

多年冻土区装配式桩基长5.0 m,以高温不稳定多年冻土(年平均地温-0.5°C)为例,不考虑施工影响,通过有限元软件在考虑全球气候变暖不同升温模式下分析桩基的长期热稳定性、传热特性及其对周围冻土热状态的影

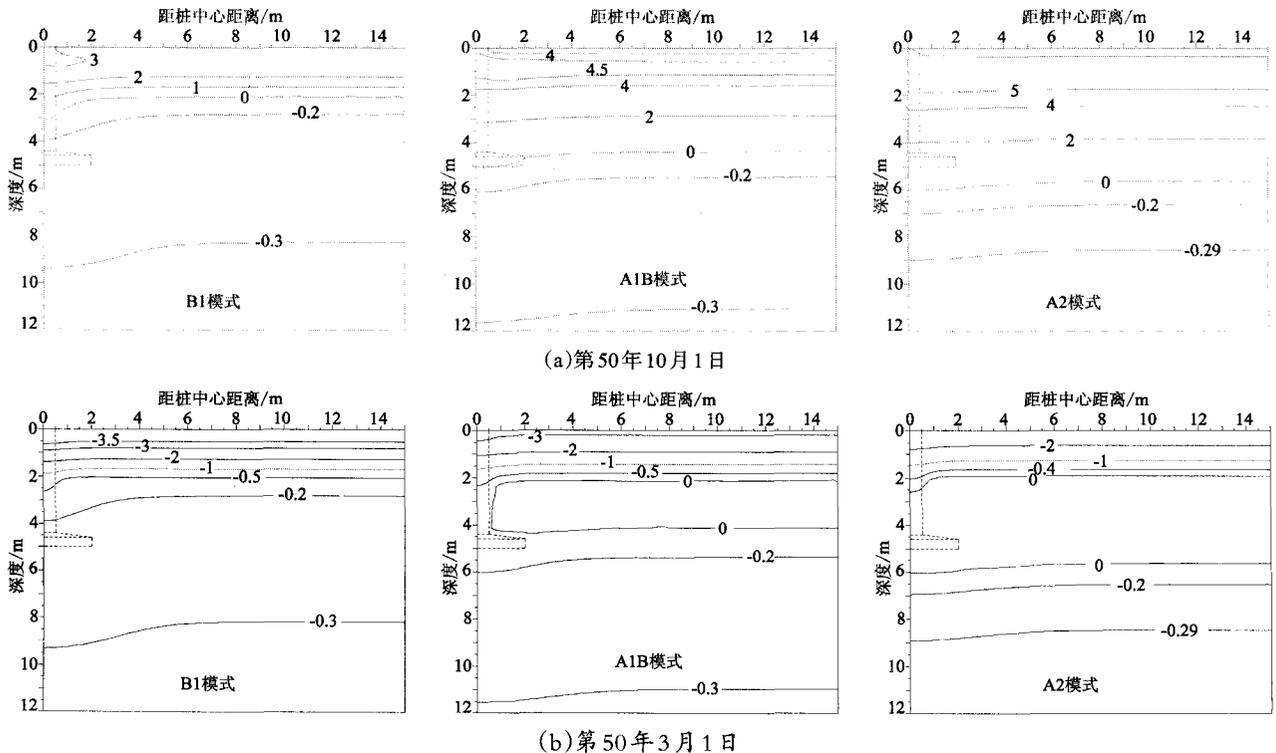


图3 50年后不同时间的装配式桩基等温线

Fig. 3 Isotherm of fabricated foundation on different days after 50 years

响。

3.1 冻融过程分析

计算结果图3给出了第50年10月1日和3月1日在不同升温模式下典型夏季、冬季桩基周围温度场分布。由图可知，桩周土体的温度与远离桩基的土层温度差异非常明显。分析混凝土基础与冻土热相互作用得知，混凝土桩是一个良的热导体，夏季较周围土体传热快，冬季较周围土体放热快，在冬季会放出较多热量冷却周围土体，在夏季桩基会吸收较多热量使周围土体升温，混凝土桩基的强化导热作用加速了冻融过程。

从图3(a)中可看出，同一深度处，B1升温模式下的土层温度较A1B模式下的低，而A2模式下的较A1B模式下的土层温度高。三种模式下50年后融化深度越来越大，即伴随着冻土温度的增加活动层厚度相应增加，冻土厚度变薄。B1升温模式下50年后活动层厚度为3.12 m，A1B模式下为5.07 m，而A2模式达到6.02 m，这说明升温模式是影响活动层厚度变化的重要因素。

图3(b)中给出了50年后三种模式下桩基在冬季时典型温度场分布，A2和A1B模式下的冻土区桩基周围分别出现约2 m、3.5 m厚度的融化夹层，冬季不能完全回冻，而B1升温模式下的冻土区桩基周围融土冬季可以完全回冻，其桩基冻结深度明显较前两种升温模式影响下的深。

从以上分析可得知，混凝土桩基和不同的升温模式均为影响基础稳定性的重要因素，冻土在这两种因素的影响下响应明显：其中混凝土桩基的强化导热作用加剧了冻融过程，全球气候变暖导致了活动层厚度的增加和冻土厚度的减小。

3.2 融化深度分析

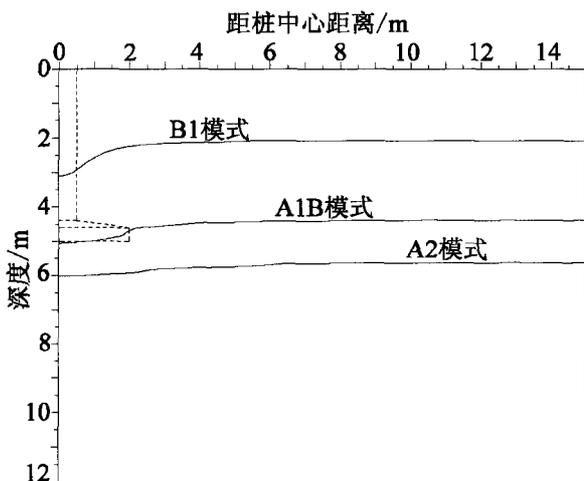


图4 50年后最大融化深度分布图

Fig. 4 Maximum thaw depth distribution with different warming patterns after 50 years

图4是50年后不同升温模式温下夏季最大融化深度分布图。由于全球气候变暖的影响，随着升温速率的增加土层融化深度均逐渐增加，冻土处于退化状态；A2模式下桩基中心融化深度明显大于A1B和B1模式下的融深。从图5可看出，随着时间的推移差异显著增加，第10年A2和B1模式下相差0.06 m，到第50年两种升温模式下融深差异扩大到2.90 m；A2模式下桩基中心融化深度从第10年到第30年增加1.04 m，但第30年到第50年融深增加2.39 m，是前20年融深增加的2倍，说明在全球气候变暖背景下冻土上限融化深度逐渐增加，融化速度加快。

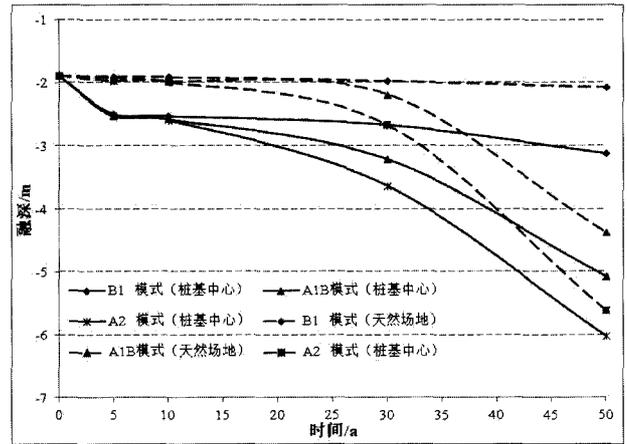


图5 桩基中心、天然场地融深随时间变化图

Fig. 5 Change of maximum thaw depth with different warming patterns under the center and natural ground

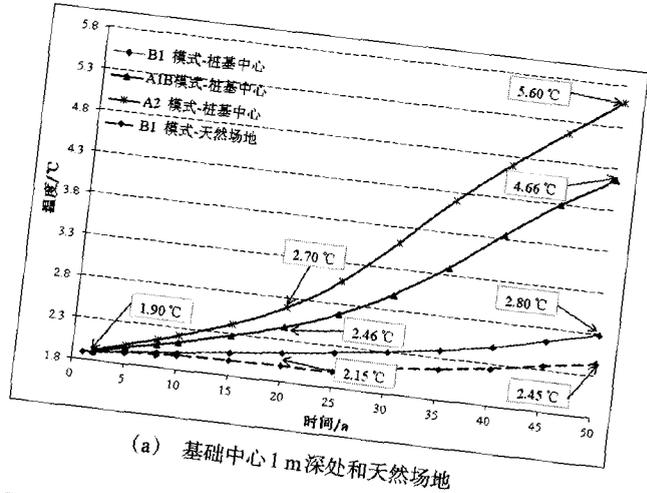
从图5还可以看出，B1模式下天然场地融化深度变化极小，40年增加了20 cm，而桩基中心增加了59 cm。导致这一差距的原因是在全球气候变暖背景下，升温速率较低时，由于工程的热扰动极大的促进了冻土的退化，致使工程状态下冻土对气候变化的响应相对不敏感，此时冻土的变化主要受混凝土桩基的强化导热作用影响。

图5中三种升温模式下，天然场地融化深度均明显较桩基中心浅。第50年夏季B1、A1B和A2模式下桩基中心较天然场地融化深度分别厚105 cm、70 cm、40 cm，说明桩基中心在工程热扰动和气候转暖双因素影响下，冻土的响应较天然场地剧烈。

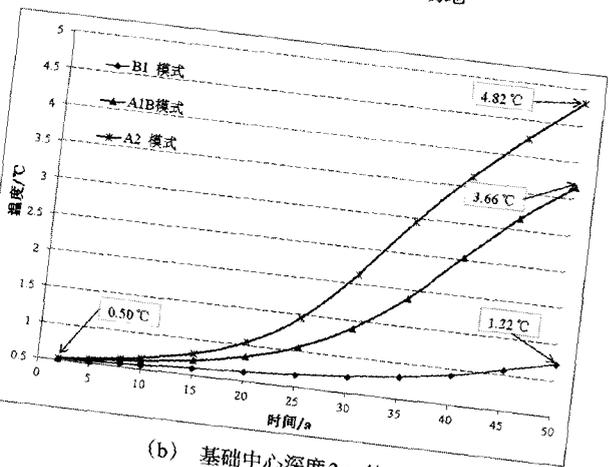
从第10年到第50年，B1、A1B和A2模式下桩基中心融化速率分别为 $1.5 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $6.2 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $8.6 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ，天然场地对应的融化速率为 $0.5 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $6.1 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $9.1 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ，即前两种模式下桩基中心融深增加速率较天然场地快，而在A2模式下天然场地平均融深增加速率反而超过桩基中心。再次证明不同升温模式下冻土退化主导因素有区别，即低升温速率时冻土的退化主要受工程热扰动作用，较高升温率时冻土退化主要受气候变暖的影

3.3 地温分析

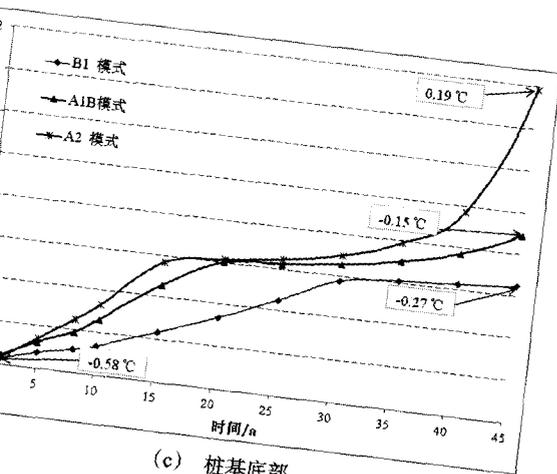
以浅表层(1 m, 2 m)和深部土层(10 m)三个深度处夏季接近最大融化深度时(10月1日)温度随时间变化为例研究地温对气候转暖的响应,如图6所示。



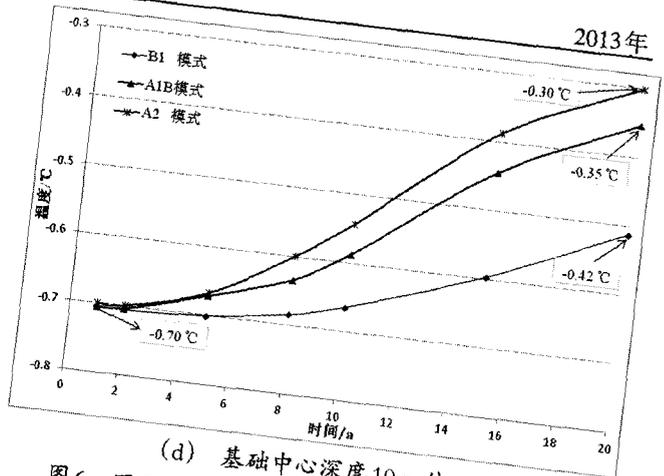
(a) 基础中心1 m深处和天然场地



(b) 基础中心深度2 m处



(c) 桩基底部



(d) 基础中心深度10 m处

图6 不同温度模式下不同深度的冻土温度变化
Fig. 6 Temperatura Changes of permafrost in different depths for three models

图6(a)给出的是三种升温模式下基础中心和天然场地1 m深度处,在夏季接近最大融化深度浅层土层温度在气候转暖背景下随时间的变化规律。B1、A1B和A2模式下50年后1 m深度处土层温度分别从第一年的1.90 °C上升到2.80 °C、4.66 °C、5.60 °C,且桩基中心温度随着时间推移上升速率逐渐增大。B1模式下天然场地50年后1 m处土层温度达到2.45 °C,相比桩基中心冻土退化缓慢;A2模式下前20年土层升温速率为0.04 °C·a⁻¹,后30年平均升温速率达到0.1 °C·a⁻¹,50年后该种模式下土层的温度是B1模式下的2倍。

图6(b)中给出了活动层位置2 m处桩基中心温度随时间变化图。相比1 m处,三种模式下50年后土层温度均较1 m位置土层低,分别由第一年的0.50 °C上升到1.22 °C、3.66 °C、4.82 °C;随着时间的推移升温速率逐渐增加,三种模式下50年平均升温速率依次为0.01 °C·a⁻¹、0.06 °C·a⁻¹和0.09 °C·a⁻¹。

在图6(c)中,三种模式下,随着时间推移基础底部冻土处于退化阶段,A2模式下40年后冻土退化成融土,对桩基的稳定性构成了威胁。

图6(d)给出的是10 m处深部多年冻土在气候变化作用下的响应。土层温度第一年为-0.70 °C,历经50年后三种模式下多年冻土温度分别上升到-0.42 °C、-0.35 °C和-0.30 °C。相比浅层、活动层温度的变化,深部多年冻土温度变化在量值上较小,这主要是不同位置土层对气候变化的响应不同,并且深部多年冻土冷储量较大,其热状态的改变较浅层缓慢,这一规律再次验证了气候变化使多年冻土热状态发生变化。

从以上分析可知,冻土对气候变暖的响应,随着深度的增加,响应减弱,距离地表越近,响应越显著。

4 结论

根据以上分析结果,可以初步得出如下结论:

(1) 混凝土桩基和全球气候变暖改变了冻土的热状态,均为影响基础长期稳定性的重要因素。在这两种因素的影响下冻土退化明显。其中混凝土桩基的强化导热作用加剧了冻融过程,气候升温导致活动层厚度增加、冻土温度升高,对桩基的长期稳定性构成潜在威胁。

(2) 三种升温模式下,基础中心50年后B1模式下融化深度为3.12m,A1B模式下为5.07m,A2模式下达到6.02m;天然场地50年后B1模式下活动层厚度为2.07m,A1B模式下为4.37m,A2模式下达到5.62m,融深均较桩基中心浅,这说明冻土对不同升温模式的响应程度不同,且桩基中心冻土在气候变暖和工程扰动双重影响下退化更快。在A1B和A2升温模式下,50年后基础如果不采取工程措施将不能安全运营。

(3) B1模式下,天然场地融化深度变化仅为桩基中心的1/3,说明升温速率较低时,由于工程的热扰动放大了冻土的变化,此时冻土的变化主要受混凝土桩基的强化导热作用,而在较高升温率模式下,冻土退化主要受气候变暖的影响。

(4) 随着时间的推移不同模式下融化深度差异逐渐增加,第10年A2和B1模式下融深相差0.06m,第50年扩大到2.90m;此外,从第10年到第50年,B1、A1B和A2模式下桩基中心融化速率分别为 $1.5\text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$ 、 $6.2\text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$ 、 $8.6\text{ cm}\cdot\alpha^{-1}$,即随着升温速率的增加土层融化深度增加,冻土退化速度越快。

(5) B1、A1B和A2模式下50年后1m深度处土层温度分别从第1年的 $1.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $2.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $4.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,B1模式下的天然场地50年后1m处土层温度达到 $2.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,较中心低;2m处三种模式下桩基中心温度50年后分别由第1年的 $0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $1.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $4.82\text{ }^{\circ}\text{C}$;A2模式下40年后桩基底部冻土退化成融土,对桩基的稳定性构成了威胁;10m处深部多年冻土在气候变化作用下的响应从第1年的 $-0.70\text{ }^{\circ}\text{C}$,历经50年后,多年冻土温度上升到 $-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献(References)

[1] LI Guo-yu, YU Qi-hao, MA Wei, et al. Impacts of Permafrost Mean Annual Ground Temperature and Ice Content on Thermal Regime of Pile Foundation of Qinghai-Tibet Power Transmission Line[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610-613: 2832-2839.

[2] 陈赵育, 李国玉, 俞祁浩, 等. 青藏直联工程多年冻土区桩灌注桩基础长期热稳定性预测研究[J]. *冰川冻土*,

2013, 35(5): 1209-1218.

CHEN Zhao-yu, LI Guo-yu, YU Qi-hao, et al. Study on Thermal Stability of Cast-in-place Piles in Permafrost Regions along the Qinghai-Tibet DC Interconnection Project[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1209-1218. (in Chinese)

- [3] 俞祁浩, 温智, 丁燕生, 等. 青藏直联线路冻土地基监测研究[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] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 321-328.
- QIN Da-he, DING Yi-hui, WANG Shao-wu, et al. A Study of Environment Change and Its Impacts in Western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 321-328. (in Chinese)
- [5] 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: D辑*, 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. *Scientia Sinica Terrae*[J]. *Science in China: D series*, 2013, 43(3): 478-489. (in Chinese)
- [6] MU Yan-hu, MA Wei, WU Qing-bai, et al. Cooling Processes and Effects of Crushed Rock Embankment along the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 107-114.
- [7] MU Yan-hu, MA Wei, WU Qing-bai, et al. Thermal Regime of Conventional Embankments along the Qinghai-Tibet Railway in Permafrost Regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 70: 123-131.
- [8] 李生辰, 徐亮, 郭英香, 等. 近34年青藏高原年气温变化[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 27-34.
- LI Sheng-chen, XU Liang, GUO Ying-xiang, et al. Change of Annual Air Temperature over Qinghai-Tibet Plateau during Recent 34 Years[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 27-34. (in Chinese)
- [9] 周宁芳, 秦宁生, 屠其璞, 等. 近50年青藏高原地面气温变化的区域特征分析[J]. *高原气象*, 2005, 24(3): 344-350.
- ZHOU Ning-fang, QIN Ning-sheng, TU Qi-pu, et al. Analysis on Regional Characteristics of Temperature Changes over Qinghai-Xizang Plateau in Recent 50 Years[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(3): 344-350. (in Chinese)
- [10] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960年以来青藏高原气温变化研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 31(11): 1503-1509.

- SONG Ci, PEI Tao, ZHOU Cheng-hu. Research Progresses of Surface Temperature Characteristic Change over Tibetan Plateau since 1960[J]. Progress In Geography, 2012, 31(11): 1503-1509. (in Chinese)
- [11] 马巍, 金会军. 正在变暖的地球上的多年冻土--2008年第九届国际冻土大会(NICOP)综述[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 843-854.
- MA Wei, JIN Hui-jun. Permafrost on a Warming Planet -- Summary Review of the Ninth International Conference on Permafrost in 2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 843-854. (in Chinese)
- [12] 王绍令, 赵秀锋, 郭东信, 等. 青藏高原冻土对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊): 157-165.
- WANG Shao-ling, ZHAO Xiu-feng, GUO Dong-xin, et al. Response of Permafrost to Climate Change in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl): 157-165. (in Chinese)
- [13] 金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 161-173.
- JIN Hui-jun, LI Shu-xun, WANG Shao-ling, et al. Impacts of Climatic Change on Permafrost and Cold Regions Environments in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 161-173. (in Chinese)
- [14] 李述训, 程国栋, 郭东信. 气候持续变暖条件下青藏高原多年冻土变化趋势数值模拟[J]. 中国科学:D辑, 1996, 26(4): 342-347.
- LI Shu-xun, CHENG Guo-dong, GUO Dong-xin. The Future Thermal Regime of Numerical Simulating Permafrost on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China, Under Climate Warming[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(4): 342-347. (in Chinese)
- [15] 朱文琴, 陈隆勋, 周自江. 现代青藏高原气候变化的几个特征[J]. 中国科学:D辑, 2001, 31(增刊): 327-334.
- ZHU Wen-qin, CHEN Long-xun, ZHOU Zi-jiang. Several Characteristics of Climatic Change in Modern Tibetan Plateau [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(Suppl): 327-334. (in Chinese)
- [16] 张学东, 言志信, 张森. ANSYS在岩质边坡动力响应分析中的应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 117-121.
- ZHANG Xue-dong, YAN Zhi-xin, ZHANG Sen. Numerical Analysis on Dynamic Response of Rock Slope Using ANSYS Software[J]. North Western Seismological Journal, 2010, 32(2): 117-121. (in Chinese)
- [17] 梁伟锋, 刘芳, 徐云马, 等. 青藏高原东缘重力观测及对芦山 M7.0 地震的反映[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 266-271.
- LIANG Wei-feng, LIU Fang, XU Yun-ma, et al. Gravity Observation in the Eastern Margin of Qinghai-Tibetan Plateau and Reflect to the Lushan M7.0 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 266-271. (in Chinese)
- [18] 倪国泉, 杨军, 潘鹏, 等. 预应力混凝土空心方桩承台节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(2): 246-251.
- NI Guo-quan, YANG Jun, PAN Peng, et al. Quasi-static Tests of Pile-cap Connections for Prestressed Spun Concrete Square Piles[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 246-251. (in Chinese)
- [19] 张中琼, 吴青柏. 气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 505-511.
- ZHANG Zhong-qiong, WU Qing-bai. Predicting Changes of Active Layer Thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as Climate Warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 505-511. (in Chinese)
- [20] 钱进, 刘厚建, 俞祁浩, 等. 青藏 500 kV 输电工程沿线冻土工程特性及其对策探讨[J]. 中国农村水利水电, 2009, (4): 106-111.
- QIAN Jin, LIU Hou-jian, YU Qi-hao, et al. A Discussion on Permafrost Engineering Characteristics along Qinghai-Tibet 500 kV Power Transmission Line and Countermeasures[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009, (4): 106-111. (in Chinese)
- [21] IPCC. Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [22] 翟建青, 曾小凡, 苏布达, 等. 基于ECHAM5 模式预估 2050 年前中国旱涝格局趋势[J]. 气候变化进展, 2009, 5(4): 220-225.
- ZHAI Jian-qing, ZENG Xiao-fan, SU Bu-da, et al. Patterns of Dryness/Wetness in China before 2050 Projected by the ECHAM5 Model[J]. Advance in Climate Change Research, 2009, 5(4): 220-225. (in Chinese)
- [23] LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Numerical Studies for the Thermal Regime of a Roadbed with Insulation on Permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 35: 1-13.
- [24] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of Frozen Soil[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)