

青藏高原多年冻土区单桩承载力的长期稳定性

蒋代军,郭春香

(兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了应对在青藏铁路建设桩基础设计中由于未来气候变暖可能导致的冻土融化及承载力下降问题,以传热学理论为基础,建立了冻土地基单桩地温场的热分析模型,采用有限单元法考虑裸露桩基表面吸收太阳辐射的同时,在大气自然对流换热、冻土相变、气候变暖等条件下,计算分析了典型湿润性永久冻土区在未来 30 年单桩地基桩土体系的温度变化及其长期承载力的变化趋势。研究表明:地表以下 3~20 m 在 2010~2040 年 30 年间,天然地温与桩土体系温度随着时间均有升高,单桩承载力在未来时间内有降低趋势;2040 年夏季桩基承载力较 2010 年同期下降了 41.5%,冬季桩基承载力较 2010 年同期下降了 28.6%;在未来的寒区桩基础设计中应充分考虑这一“动态因素”,对于目前已建成桩基础,提出合理有效的提高桩基承载力的措施是解决这一问题的关键。

关键词:岩土工程;桩基础;太阳辐射;气候变暖;承载力;长期稳定性

中图分类号:U416.168

文献标志码:A

Long-term stability of bearing capacity of single pile in permafrost area on Qinghai-Tibetan Plateau

JIANG Dai-jun, GUO Chun-xiang

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In order to solve the possible problems of decline bearing capacity and thawing of frozen soil resulting from future global warming in the design of pile foundation in Qinghai-Tibet Railway, thermal analysis model of ground temperature field for a single pile in permafrost was established based on the theory of heat conduction. Considering the condition that pile exposed in air absorbed solar radiation and transferred heat with natural air through convection, phase-change and global warming, ground temperature and long-term bearing capacity changes of a single pile in representative humid permafrost area in future 30 years were calculated and analyzed by using finite element method. The results show that in the coming 30 years, the natural geotherm and the temperature of the pile-soil system 3 to 20 m under the surface of the earth become higher as time goes by; the bearing capacity of single pile has the decline tendency in

收稿日期:2015-09-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51268033);国家自然科学基金重点项目(51236003);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1139);兰州交通大学校青年基金项目(2013030)

作者简介:蒋代军(1978-),男,四川广安人,讲师,工学博士研究生,E-mail:jiangdaijun@mail.lzjtu.cn。

future. In 2040 summer, the bearing capacity will drop by 41.5% compared with the same period in 2010; in winter the bearing capacity will drop by 28.6% compared with the same period in 2010. The “dynamic factors” should be taken into account in basic pile design work in cold region in future. For the existing piles, reasonable and effective measures should be taken to improve the piles bearing capacity, which is key in solving the problems. 4 tabs, 12 figs, 20 refs.

Key words: geotechnical engineering; pile foundation; solar radiation; global warming; bearing capacity; long-term stability

0 引言

青藏高冻土区气候变化和工程活动会引起的多年冻土升温、活动层增厚、地下冰融化等效应,对路基工程稳定性会产生影响。多年冻土热力稳定性对气候变暖和生态环境变化、人类活动的响应过程和机理研究将成为今后研究工作的重点^[1-5]。青藏铁路采用了通风路基、片石护坡、热棒等不同路基形式来抵御气候变暖对路基的影响^[6-7]。

青藏铁路建设中采用了大量的桩基础,一般采用灌注施工方法,由于混凝土入模温度及水化热使得桩周冻土融化,经过一段时间桩周冻土回冻,桩土界面冻结而使桩基础具有了承载能力^[8-10]。可见文献中重点关注的是桩基础施工及回冻过程中的冻土温度及桩基承载力,而对于建成后冻土区桩基础温度场及承载力还未见深入研究。米维军等对清水河段建成后桥梁桩基础稳定性进行了探讨,现场实测数据指出,位于桩周不同距离冻土层的最大融化深度是不同的,而且最大融化深度有逐年加深的趋势^[10]。

冻土区桩基础承载力由桩土界面冻结强度及桩端阻力构成,因此桩基础建成后桩周冻土温度变化趋势及最大融化深度等都直接影响桩基础承载力。青藏铁路在运行中已发现个别桩基础由于承载力不够,沉降过大,增加了铁路维护的难度,直接威胁到上部结构的稳定及安全,因此准确把握青藏铁路运营后桩土体系的地温及承载力变化趋势,对于青藏铁路工程的安全和维护具有现实意义。

桩基础建成后打破了冻土层原有的热平衡状态,桩基础在深处冻土层与大气间建立了热交换通道,但在桩基础表面及周围冻土层表面,附面层理论并不适用。在一般地区,混凝土暴露在太阳下的温度最高可达 60℃^[12],青藏高原海拔高、辐射强,桩

基础会吸收更多的太阳辐射热量,这样通过桩基础通道就会把更多的热量传入冻土层中,对桩土界面及周围地基土的温度产生影响。在青藏铁路建设桩基础设计中已经注意到了由于未来气候变暖,可能导致的冻土融化及承载力下降问题,但其设计仍然是一种“静态”模式,对气候变暖这一动态变化因素,桩土体系温度分布认识还不够深入,这也是目前桩基础设计中应充分考虑的问题。为此,本文在考虑太阳辐射、大气对流、气候变暖和冻土相变等条件下,采用有限单元法对青藏铁路建成后典型湿润性地段桩土体系地温场进行分析计算,同时对其承载力的长期稳定性进行了分析与探讨。

1 计算模型与边界条件

本文以具有代表性的青藏高原典型湿润性地段冻土区某桥梁钻孔灌注桩作为分析模型,桩直径为 1.0 m,桩长为 23.0 m,其中 3.0 m 裸露在空气中。取 1/4 作为分析模型。有限元模型如图 1 所示,桩基础水文地质资料及热力学参数见下页表 1,桩基础示意图如下页图 2 所示。

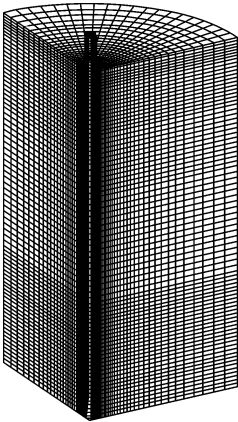


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 3D finite element model

表 1 桩基础水文地质资料及热力学参数

Tab. 1 Hydrogeological condition and thermal physical parameters of pile foundation

材料	离地面 深度/m	含水 量/%	干密度/ (kg·m ⁻³)	λ _s / (kJ·m ⁻³ ·℃)	λ _L / (kJ·m ⁻³ ·℃)	C _s / (kJ·m ⁻³ ·℃)	C _L / (kJ·m ⁻³ ·℃)	C _{fu} / (kJ·m ⁻³ ·℃)
亚粘土	0~1.5	40.0	1 200	4 059	5 690	2 830	2 230	62 254
含泥炭亚粘土	1.5~3.5	60.0	900	2 050	3 054	2 480	1 980	78 125
碎块石亚粘土	3.5~8.0	24.5	1 500	5 105	5 648	2 480	1 871	38 258
风化基岩	>8	4.0	2 500	9 720	9 720	2 290	2 290	39 865
钢筋混凝土			2 500	6 264	6 264	2 300	2 300	

注:λ_s、λ_L、C_s、C_L 分别为地基在固相和液相的等热系数及比热容;C_{fu}为冻土相变区内热容。

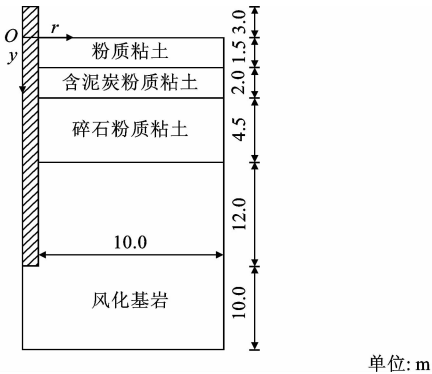


图 2 桩基础示意

Fig. 2 Diagram of pile foundation

1.1 太阳辐射和大气对流

暴露在大气中的桩基础表面吸收太阳辐射热量、与大气自然对流换热以及地面和其他结构的漫辐射,忽略漫辐射则暴露在空气中的混凝土结构热传导方程为

$$\lambda_c \left[\frac{\partial T_c}{\partial n} \right] = h(T_c - T_a) + \alpha S \tag{1}$$

式中:λ_c为混凝土的导热系数(W/(m·℃));T_c为混凝土表面温度(℃);n为温度梯度方向(℃/m);h为考虑对流与辐射中和热交换系数(W/(m²·℃));T_a为与混凝土接触的大气温度(℃);α为混凝土结构表面太阳辐射吸收系数;S为太阳辐射强度(W/m²)。

忽略桩基础阴阳面接受辐射强度的不同及一天当中辐射强度的变化,太阳辐射强度采用依据卫星数据反演的 1998~2002 年青藏高原辐射数据^[13],经回归有

$$S = 186.4 + 66.88 \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t + \theta\right) \tag{2}$$

式中:t为时间(h);θ为计算初始相位角(rad)。

根据文献[14-15],大气温度采用年平均气温为-3.4℃的正弦函数

$$T_a = -3.4 + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t + \theta\right) + At \tag{3}$$

式中:A=2.28×10⁻⁶(℃/h),对应未来 50 年气温

升高 2.6℃。

混凝土结构表面太阳辐射吸收系数 α 为 0.42^[16-17],由于高原风速较大,混凝土表面平均对流换热系数取 h=4.74(W/(m²·℃))^[18-19]。

1.2 初始及边界条件

计算初始条件中地温设定为 2000 年 7 月份实测地温。取桩周 1 m 范围内冻土附面层为自由边界,桩周 1 m 以外范围采用附面层理论。固定边界上的边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 & r = 30 \text{ m} \\ \frac{\partial T}{\partial y} = \xi & y = 30 \text{ m} \\ T = T_1 & r \geq 1.5 \text{ m}, y = 29.5 \text{ m} \end{cases} \tag{4}$$

式中:T为地基土温度(℃);ξ为地温梯度,可取 0.03℃/m;r,y为计算模型坐标,如图 2 所示,r为地基土到桩基轴线的距离(m),y为地基土深度(m);T₁为地表下附面层温度。

则

$$T_1 = -0.9 + 12.2 \sin\left(\frac{2\pi}{8\,760}t + \theta\right) + At \tag{5}$$

1.3 混凝土表面及桩、冻土热传导

桩周冻土的热传导平衡方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \tag{6}$$

式中:ρ为冻土密度(kg/m³);c为地基土比热容(J/(kg·℃));λ为地基土导热系数(W/(m·℃));x、y、z分别为直角坐标;L=334 kJ/kg,为水的相变潜热;f_s为固相率,是无因次量,固相率的增加(或减小)与相变潜热的释放(或吸收)量成正比。

则有

$$f_s = (T_L - T_d)/(T_L - T_s) \tag{7}$$

式中:T_L、T_s分别为融化及冻结温度(℃);T_d为相变区内节点温度(℃)。

在相变区内 λ 可根据温度 T 作线性插值处理,

桩体材料及地基土热物理参数参见文献[8]。

2 数值计算结果

2.1 温度等值线图

根据上述边界及初始条件得到桩基及桩周冻土温度等值线,如图 3~图 6 所示。

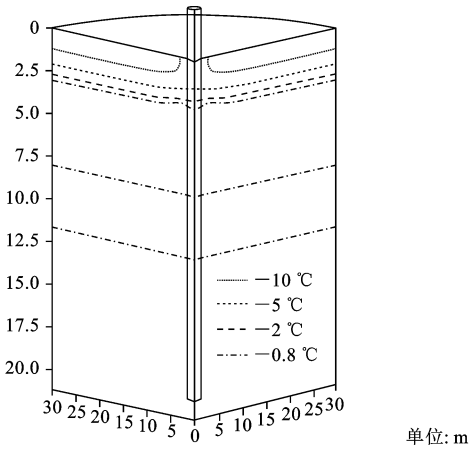


图 3 2000 年 2 月桩基础温度等值线
Fig. 3 Temperature contour lines of pile foundation in February, 2000

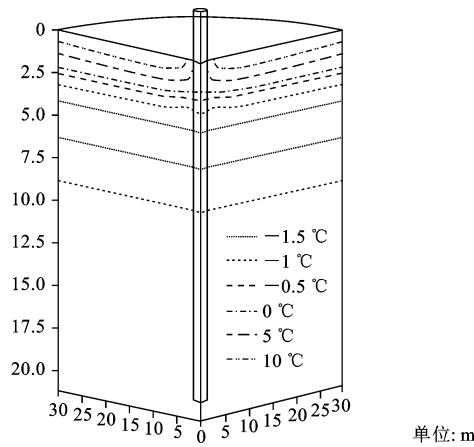


图 4 2040 年 2 月桩基础温度等值线
Fig. 4 Temperature contour lines of pile foundation in February, 2040

从温度等值线中可看出:冬季地表以下 2.5 m 左右范围在桩周附近形成高温区,较深处桩周土温度与同一深度的天然地温(未受扰动)基本一致;夏季地表以下 2.5 m 范围内桩周土温度比同一深度处地温反而要低。说明桩基础通道主要影响桩基础周围浅地表温度。

混凝土桩对地面以下 3 m 范围和桩侧 3 m 范围内地温有影响,并且越浅处地温受到的影响也越大;夏季较高温度的大气与桩表面对流换热,此时太阳辐射的热量相对于对流换热量要小,对流换热占

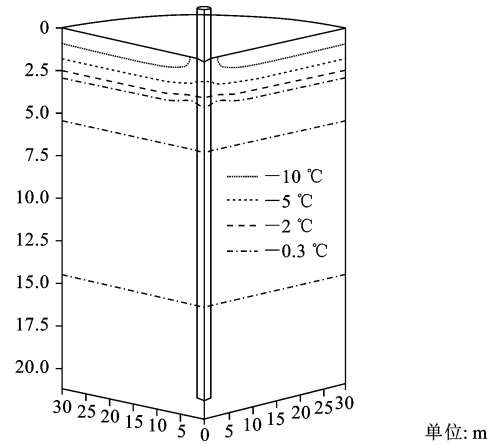


图 5 2000 年 8 月桩基础温度等值线
Fig. 5 Temperature contour lines of pile foundation in August, 2000

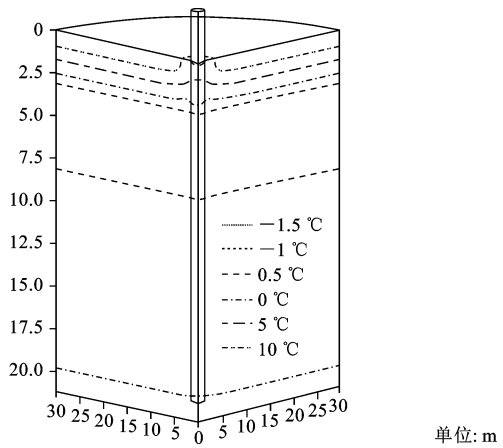


图 6 2040 年 8 月桩基础温度等值线
Fig. 6 Temperature contour lines of pile foundation in August, 2040

主导地位,混凝土保持温度的能力相对于地基土要低,所以在夏季混凝土的日平均温度要低于地基土日平均温度。冬季较低温度的大气与桩表面对流换热,此时太阳辐射的热量相对于对流换热量要大,太阳热辐射占主导地位,太阳辐射的热量通过桩基础通道传入冻土层中,使得桩周土升温。

2.2 桩周土温度

根据下页图 7 可看出,夏季浅地表(地表以下 3.5 m 范围内)桩周附近地温较未受扰动处(距离桩基 30 m)要低,地表以下 1.5 m 处桩土界面温度比天然地温(未受扰动处)平均低 3.25 °C,地表以下 2.2 m 处桩土界面温度比未受扰动处平均低 0.92 °C,地表以下 3.5 m 处桩土界面温度低于未受扰动处地温 0.05 °C。根据下页图 8 可以看出,冬季浅地表(地表以下 3.5 m 范围内)桩周附近地温较未受扰动处(距离桩基 30 m)要高,地表以下 1.5 m 处桩土

界面温度比天然地温(未受扰动处)平均高 2.63 ℃,地表以下 2.2 m 处桩土界面温度比未受扰动处平均高 0.41 ℃,地表以下 3.5 m 处桩土界面温度与未受扰动处地温基本一致。

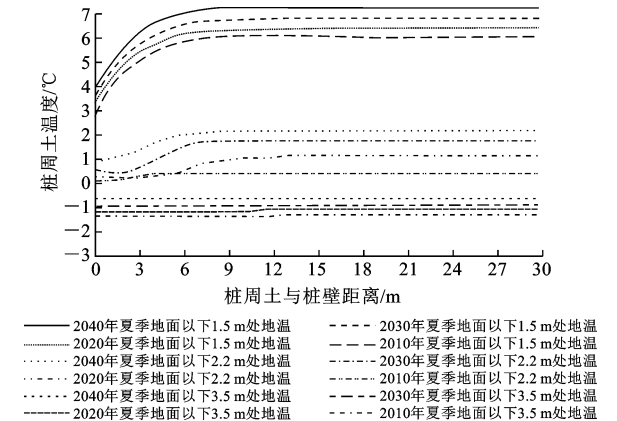


图 7 8 月份不同深度处土体温度随距桩基础距离的变化规律
Fig. 7 Change law of soil temperature with different distances from pile in different depths in August

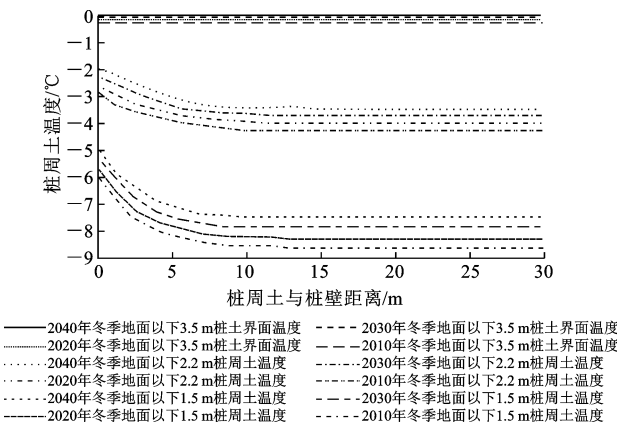


图 8 2 月份不同深度处土体温度随距桩基础距离的变化规律
Fig. 8 Change law of soil temperature with different distances from pile in different depths in February

地表以下 3 m,与桩距离越近受到桩基础通道的影响越大。夏季时浅地表桩周土地温较天然地表低,冬季时浅地表桩周土地温较天然地表高,即降低了浅地表桩周土的温度振幅,冬季地温不至于那么低,夏季地温不至于那么高。

2.3 桩土界面温度及承载力变化趋势

根据图 9、图 10 可看出:8 月份浅地表(地表 3 m 范围内)同一深度天然地温与桩土界面温度存在较大差别,且分布规律也不一致。天然地温在地表处温度最高,地表以下 3 m 范围内大致呈线性分布;桩土界面温度在地表以下 1 m 处温度最高,呈折线型分布,地表以下 3 m 地温分布规律与天然地温分布规律大致相同;根据图 11、图 12,2 月份天然地温与桩土界面温度分布规律亦如此。说明桩基础

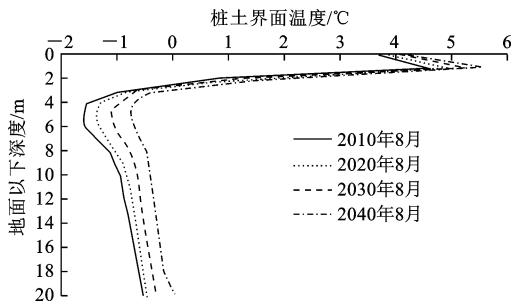


图 9 8 月份桩土界面温度随深度的变化
Fig. 9 Change law of pile-soil interface temperature with depth in August

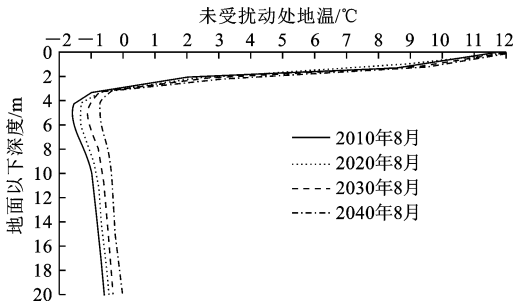


图 10 8 月份天然地温随深度的变化
Fig. 10 Change law of natural geotherm with depth in August

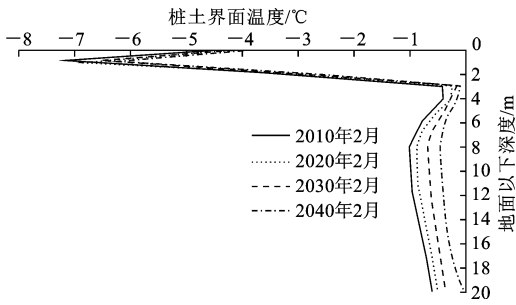


图 11 2 月份桩土界面温度随深度的变化
Fig. 11 Change law of pile-soil interface temperature with depth in February

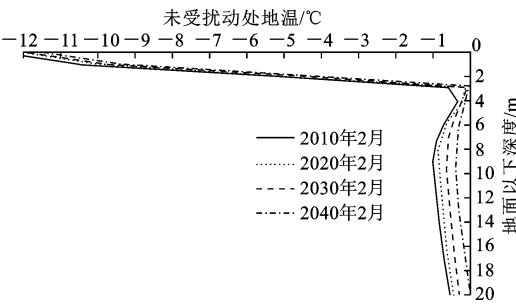


图 12 2 月份天然地温随深度的变化
Fig. 12 Change law of natural geotherm with depth in February

通道对桩基础周围地表以下 3 m 地温有显著影响,使其最高、最低地温出现在地面以下 1 m 处。

通过表 2 可以看出,由于气候变暖,地表以下 3~20 m 在 2010~2040 年 30 年间天然地温与桩土界面温度均有升高。

冻土区桩基承载力是由混凝土桩侧表面与冻土之间的冻结强度及桩底冻土容许承载力 2 项构成的^[20],如表 3 所示。

表 2 3 m 以下桩土界面平均温度

Tab. 2 Average tempretures of pile-soil interface below 3 m				
年份	2 月份地表 以下 3~20 m 桩土界面平 均温度/℃	2 月份未受 扰动地表以 下 3~20 m 平均地温/℃	8 月份地表 以下 3~20 m 桩土界面平 均温度/℃	8 月份未受扰 动地表以下 3~20 m 平 均地温/℃
2010 年	-0.76	-0.78	-1.01	-1.03
2020 年	-0.65	-0.66	-0.88	-0.89
2030 年	-0.48	-0.48	-0.67	-0.68
2040 年	-0.28	-0.29	-0.39	-0.41
30 年间 升温幅 度值/℃	0.48	0.58	0.63	0.70
升温百 分比/%	63.2	74.4	62.4	68.0

表 3 桩侧表面与土之间的切向强度

Tab. 3 Tangential strength between pile surface and soil						
混凝土桩侧表 面与融土单位 摩阻力/kPa	不同温度(℃)下桩侧表面与冻土之间的冻结强度/kPa					
	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0
30	70	110	150	190	230	270

根据文献[20]中式 8.3.5 之规定,冻土条件下钻孔灌注桩的容许承载力为

[P] = 1/2 ∑ τ_iF_im'' + m₀M[σ] (8)

式中:τ_i为桩侧表面与各冻土层之间的冻结强度(kPa);F_i为桩侧表面各冻土层中的冻结面积(m²);m''为冻结力修正系数,取 m'' = 1.4;m₀为桩底支承力修正系数,取 m₀ = 0.7;M为桩底支承面积,按扩底面积计算有 M = 1.54 m²;[σ]为桩底地基土容许承载应力,[σ] = σ₀ = 350 kPa。

从计算结果中可以看出,由于气候变暖及太阳辐射的共同作用使桩土界面温度升高,导致桩基承载力随时间的推移越来越低。单桩的设计荷载为 2 599.6 kN^[8],在此计算模型中,2040 年夏季桩基承载力较 2010 年下降了 41.5%,冬季桩基承载力较 2010 年下降了 28.6%,2040 年夏季桩基最小承载力下降到 2 644.1 kN,如表 4 所示。

表 4 计算桩基承载力

Tab. 4 Calculated bearing capacities of single pile				
种类	桩基承载力/kN			
	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年
最大承载力	6 570.4	6 099.1	5 423.9	4 692.4
最小承载力	4 517.5	4 128.8	3 501.1	2 644.1

3 结 语

(1)由于气候变暖的影响,桩周土及天然地温在 2010~2040 年间均有升高的趋势。2040 年 2 月地表以下 3~20 m 桩土界面、天然地表平均温度比 2010 年同期分别升温 0.48℃、0.58℃,升温幅度分别为 63.2%、74.4%;2040 年 8 月地表以下 3~20 m 桩土界面、天然地表平均温度比 2010 年同期分别升温 0.63℃、0.70℃,升温幅度分别为 62.4%、68.0%。

(2)地表以下 3 m 与桩距离越近,受到桩基础通道的影响越大。夏季时浅地表桩周土地温较天然地表低,冬季时浅地表桩周土地温较天然地表高,即降低了浅地表桩周土的温度振幅,冬季地温不至于那么低,夏季地温不至于那么高。

(3)假定太阳辐射热量由暴露在空气中的桩基础表面平均吸收,没有考虑阴阳面的作用,阳面桩周冻土受桩基础通道影响更显著,而阴面所受影响较弱。

(4)2010~2040 年 30 年间桩土界面温度随着时间均有升高,单桩承载力在未来时间内有降低趋势,2040 年夏季桩基承载力较 2010 年同期下降了 41.5%,冬季桩基承载力较 2010 年同期下降了 28.6%。

(5)在气候变暖及太阳辐射共同作用下,单桩承载力在未来时间内有降低趋势,在未来的设计中应充分考虑这一“动态因素”,对于目前已建成桩基础,提出合理有效的提高桩基承载力的措施是解决这一问题的关键。

参考文献:

References:

[1] 李述训,程国栋. 气候变暖条件下青藏高原高温冻土热状况变化趋势数值模拟[J]. 冰川冻土,1996,18(增1):190-196.
LI Shu-xun,CHENG Guo-dong. Numerical simulation of the future change of thermal regime in the high temperature permafrost of Qinghai-Xizang Plateau under climate warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1996,18(S1):190-196. (in Chinese)
[2] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. 科学通报,2013,58(2):115-130.
WU Qing-bai, NIU Fu-jun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (2): 115-130. (in Chinese)
[3] 张鲁新. 青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J]. 中国铁道科学,2000,21(1):37-47.
ZHANG Lu-xin. Regularity of ground temperature variation in Qinghai-Tibet Plateau permafrost region

- and its effect on subgrade stability[J]. China Railway Science, 2000, 21(1): 37-47. (in Chinese)
- [4] WU Q B, ZHU Y L, LIU Y Z. Evaluating model of frozen soil environment change under engineering actions[J]. Science in China Series D: Earth Science, 2002, 45(10): 893-902.
- [5] LIU Z Q, LAI Y M. Numerical analysis for the ventilated embankment with thermal insulation layer in Qing-Tibetan Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(3): 177-184.
- [6] QIN Y H, ZHANG J M, ZHENG B, et al. Experimental study for the compressible behavior of warm and ice-rich frozen soil under the embankment of Qinghai-Tibet Railroad[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 57(2): 148-153.
- [7] 纳启才, 胡滨, 梁养辉, 等. 多年冻土区钢波纹管涵洞应变测试及效益分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(9): 46-50.
- NA Qi-cai, HU Bin, YANG Liang-hui, et al. Strain test and benefit analysis of corrugated steel culvert at permafrost zone[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2015, 32(9): 46-50. (in Chinese)
- [8] 吴亚平, 苏强, 郭春香, 等. 冻土区桥梁群桩基础地基回冻过程的非线性分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 78-84.
- WU Ya-ping, SU Qiang, GUO Chun-xiang, et al. Non-linear analysis of ground refreezing process for pile group bridge foundation in permafrost[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 78-84. (in Chinese)
- [9] 吴亚平, 郭春香, 赵世运, 等. 青藏高原冻土区灌注桩入模温度对地温场的影响[J]. 铁道学报, 2004, 26(6): 81-85.
- WU Ya-ping, GUO Chun-xiang, ZHAO Shi-yun, et al. Influence of casting temperature of single pile on temperature field of ground in permafrost of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(6): 81-85. (in Chinese)
- [10] 米维军, 李勇, 石刚强, 等. 青藏铁路多年冻土桥梁桩基稳定性探讨[J]. 铁道工程学报, 2010(9): 15-19.
- MI Wei-jun, LI Yong, SHI Gang-qiang, et al. Study on stability of bridge pile foundation in permafrost area along Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(9): 15-19. (in Chinese)
- [11] 王大鹏, 傅智, 房建宏, 等. 太阳辐射对青藏高原不同路面类型表面热状况及其下伏多年冻土的影响[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 38-43.
- WANG Da-peng, FU Zhi, FANG Jian-hong, et al. Influence of solar radiation on surface thermal regime of different pavement types and its permafrost underlying embankment on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 38-43. (in Chinese)
- [12] 张建荣, 周元强, 林建萍, 等. 太阳辐射对混凝土箱梁温度效应的影响[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 1479-1484.
- ZHANG Jian-rong, ZHOU Yuan-qiang, LIN Jian-ping, et al. Solar radiation affection on concrete box girder temperature effect[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(11): 1479-1484. (in Chinese)
- [13] 吕宁, 刘荣高, 刘纪远. 1998—2002年中国地表太阳辐射的时空变化分析[J]. 地球信息科学, 2009, 11(5): 623-630.
- LU Ning, LIU Rong-gao, LIU Ji-yuan. The spatio-temporal variation of downward shortwave radiation over China from 1998 to 2002[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(5): 623-630. (in Chinese)
- [14] 李栋梁, 郭慧, 王文, 等. 青藏铁路沿线平均年气温变化趋势预测[J]. 高原气象, 2003, 22(5): 431-439.
- LI Dong-liang, GUO Hui, WANG Wen, et al. Prediction of annual average temperature change along Qinghai-Xizang Railway[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(5): 431-439. (in Chinese)
- [15] 周宁芳, 秦宇生, 屠其璞, 等. 近50年青藏高原原地面气温变化的区域特性分析[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 344-349.
- ZHOU Ning-fang, QIN Ning-sheng, TU Qi-pu, et al. Analyses on regional characteristics of temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(3): 344-349. (in Chinese)
- [16] 张建荣, 徐向东, 刘文燕. 混凝土表面太阳辐射吸收系数测试研究[J]. 建筑科学, 2006, 22(1): 42-45.
- ZHANG Jian-rong, XU Xiang-dong, LIU Wen-yan. A test study on the solar radiation absorption coefficient of concrete surface[J]. Building Science, 2006, 22(1): 42-45. (in Chinese)
- [17] 刘文燕, 耿耀明. 混凝土表面太阳辐射吸收率试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(4): 8-11.
- LIU Wen-yan, GENG Yao-ming. Experimental research on solar absorption coefficient of concrete surface[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(4): 8-11. (in Chinese)
- [18] 张建荣, 刘照球, 刘文燕. 混凝土表面自然对流换热系数的实验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(5): 143-146.
- ZHANG Jian-rong, LIU Zhao-qiu, LIU Wen-yan. Experimental research on natural convective coefficient of concrete surface[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(5): 143-146. (in Chinese)
- [19] 张建荣, 周元强, 刘照球. 混凝土结构对流换热效应的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(3): 157-160.
- ZHANG Jian-rong, ZHOU Yuan-qiang, LIU Zhao-qiu. The research of convection heat transfer effect in concrete structure[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(3): 157-160. (in Chinese)
- [20] TB 10002.5—2005, 铁路桥涵地基和基础设计规范[S]. TB 10002.5—2005, Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert[S]. (in Chinese)