

DOI:10.11918/202311022

冻土地基桩基础承载特性温度与流变响应试验

施瑞^{1,2,3}, 温智^{1,3}, 王旭^{1,2}

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室(兰州交通大学), 兰州 730070;
3. 冻土工程国家重点实验室(中国科学院西北生态环境资源研究院), 兰州 730000)

摘要: 为揭示冻土温度、流变特性对桩基承载性能的作用效应, 进行温度、流变响应试验分析, 采用自行设计的大型冻土桩基承载性能试验装置, 开展了不同地温、不同加载过程下桩基承载特性模型试验, 分析了轴力与侧摩阻力的温度、流变响应。结果表明: 地基温度对桩基刚度具有显著影响, 温度较高(约 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)时, 刚度仅为温度较低(约 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$)时的 $1/10$ 。其次, 温度较低时, 轴力沿深度迅速衰减, 侧摩阻力呈上大下小, 桩体上部(约 $1/3$)主要承载; 温度较高时, 轴力分布平缓, 深部侧摩阻力发挥程度相应提高。再者, 流变效应对侧摩阻力的发展、变化存在显著影响, 持荷阶段流变导致的侧摩阻力降低逾 200 kPa 。此外, 流变效应亦受地基温度及荷载水平的影响: 地温较高时, 流变导致的侧摩阻力松弛近乎初值的 50% ; 荷载水平升高时, 流变效应呈现先增大后减小的趋势。冻土地基中桩基础承载性能具有显著的温度、流变响应, 实际工程设计、运维必须予以考虑, 研究结果可为工程实践提供理论支撑。

关键词: 冻土地基; 桩基础; 承载特性; 温度效应; 流变效应; 室内模型试验

中图分类号: TU471.7

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)07-0132-10

Tests on thermal and rheological responses on bearing characteristics of pile in frozen ground

SHI Rui^{1,2,3}, WEN Zhi^{1,3}, WANG Xu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province (Lanzhou Jiaotong University), Lanzhou 730070, China; 3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences), Lanzhou 730000, China)

Abstract: To reveal the effect on the bearing characteristics of piles from thermal and rheological properties of frozen soil, experimental analysis on thermal and rheological responses was conducted. Using a self-designed large-scale test apparatus, several laboratory model tests on the bearing characteristics of piles in the frozen ground were performed under different temperatures and loading processes. The thermal and rheological responses of axial force and shaft resistance were analyzed. Results show that, firstly, the ground temperature has a significant effect on the foundation stiffness. With a higher ground temperature (about $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$), the pile stiffness reduces to only $1/10$ of that when the temperature is lower (about $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$). Secondly, with the lower ground temperature, the axial force decreases rapidly along the depth, and shaft resistance is large on the top and small on the bottom, that is, the upper part of the pile (about upper $1/3$) bears the major load. On the contrary, with the higher ground temperature, the axial force distribution becomes relatively gentle along the whole pile length, and the shaft resistance on the deeper pile obtains an increasing exertion correspondingly. Thirdly, the rheological effect has a significant influence on the development and variation of shaft resistance. Due to the rheological effect, shaft resistance has a significant decrease of more than 200 kPa in the load-holding stage. Furthermore, the rheological effect is also affected by ground temperature and load level. When the ground temperature increases, the relaxation of shaft resistance resulting from the rheological effect is nearly 50% of the initial value. When the load level increases, the rheological effect presents a developing trend that increases first and then decreases. The bearing characteristics of piles in frozen soil have significant thermal and rheological responses, which must be considered in practical engineering design, operation, and maintenance. The results of this study can provide theoretical support for engineering practice.

Keywords: frozen ground; pile foundation; bearing characteristics; thermal effect; rheological effect; laboratory model tests

收稿日期: 2023-11-07; 录用日期: 2023-12-02; 网络首发日期: 2024-04-03

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240403.1324.002>

基金项目: 国家自然科学基金(42362033); 甘肃省自然科学基金重点项目(23JRRA854); 甘肃省青年科技基金(23JRRA853); 甘肃省重点实验室开放课题(42362033)

作者简介: 施瑞(1991—), 男, 博士, 讲师; 温智(1976—), 男, 研究员, 博士生导师; 王旭(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 温智, wenzhi@lzb.ac.cn

中国是世界第三冻土大国,其中多年冻土面积占国土总面积约 21.5%,若包括季节冻土,该比例将高达 75%^[1]。由于冻土是大气层与岩石圈层长期相互作用的历史产物,一旦外部环境变化,其物理力学性质也必将发生显著改变。在保证承载稳定性的前提下,为尽可能降低工程建设、运营对下伏冻土的环境扰动,经国内外大量研究论证,桩基础成为包括住建^[2]、铁路^[3]、电力^[4]等部门相关规范建议的冻土区主要基础形式。在青藏高原约 $2.58 \times 10^6 \text{ km}^2$ 之中,多年冻土面积占比高达 42.5%。随着西部大开发逐渐深化,大批包括青藏公路、青藏铁路及高压输电等基础设施在内的工程建设在青藏高原多年冻土区先后开展^[5]。桩基础因热扰动小、刚度大且热稳定性相对较高,在青藏高原工程建设中发挥了重要作用。然而,在全球气候暖湿化^[6-7]大背景与人类工程活动的多重影响下,冻土环境显著变化。青藏公路沿线的地温连续观测表明,6.0 m 深度处年平均温度在 12 年内升高 0.67 °C,活动层平均每年增厚 7.5 cm^[8],且该种升温退化趋势仍将持续^[9]。冻土退化会引起严重的工程病害问题,俄罗斯多年冻土区外贝加尔铁路、阿穆尔铁路病害率达 40.5%^[10];加拿大多年冻土区哈德逊湾铁路病害率高达 60%^[11]。中国在桩基础实际应用中也出现各类工程病害问题^[12],青藏铁路多年冻土区共 447 座桥梁中,梁体位移等冻融病害十分常见^[13]。图 1 为赴现场考察时拍摄的部分因桩基础承载性能劣化导致的工程病害问题照片。



图 1 青藏高原桩基础劣化

Fig. 1 Deterioration of pile in Qinghai-Xizang Plateau

冻土的热敏感性与强流变性是桩基础承载性能劣化的主要原因。除部分端承桩(如电力塔锥形桩)外,大部分桩基础荷载传递功能均依赖桩-土相

互作用。在冻土地基中,当土颗粒与桩侧冻结时,冻结力能够大大提高桩基刚度;然而一旦地基升温,冻结力就会降低甚至消失,进而产生承载性能严重劣化的温度响应。因而实际设计中,冻土温度参数一般取融化盘下冻土最高温度^[14],安全储备显然过大。此外,冻土作为特殊的三相四组分材料,由于冰的融化、水分重分布、土颗粒移动及冻土结构缺陷的产生与发展,具有显著的流变性^[15],使得桩基承载特性存在时空变异性,且该种变异性又与地基温度密切联系,导致冻土桩基础承载特性的流变响应十分复杂。实际设计中,为获得长期承载力,往往以瞬时单轴抗压极限强度据经验进行折减(一般 1/6 至 1/8^[16]),经济性进一步降低。综上,针对冻土桩基础温度、流变响应的研究尚浅,难以支撑实际设计、施工及运维,工程经济性严重不足。

针对冻土地基中桩基础承载特性,已有很多学者进行了研究。数值、理论方面,文献[17]从冻土-桩基础接触面出发,利用 ANSYS 对竖向荷载下的受力变形进行了分析。文献[18]考虑地、气温度与活动层厚度等因素,建立了竖向承载力的预报模型。温度影响方面。文献[19]对不同荷载组合作用行了室内模型试验,指出温度是冻土桩基础承载力的主要影响因素。文献[20]通过大兴安岭原位实验,指出钻孔灌注桩回冻后承载力增大 42%。进而,大批学者就冻土地基温度场进行深入研究,文献[21]通过北麓河现场实验,对浇筑后桩体、地基的升温-回冻规律进行了分析研究。文献[22]通过室内实验,证明人工冻结减缓、转变对冻土退化引起的桩基刚度降低具有显著效果。流变影响方面,文献[23]对冻土-桩界面的剪切蠕变特性进行了试验分析,并提出了桩-冻土/冰界面蠕滑模型。文献[24]通过三轴卸荷蠕变试验,研究了应力路径对冻土蠕变特性的影响。文献[25]采用室内模型试验,指出桩底水热会增大桩基流变效应,严重降低桩基承载力。

然而,现有研究虽已明确地温对桩基承载力具有控制性作用,但大多只针对冻土地基温度场演化规律,未就冻土桩基的温度响应,如温度波动下桩身内力、侧摩阻力及基础刚度等的变化进行深入研究。此外,针对流变效应,大多研究集中于数值仿真、桩-土界面蠕变试验及冻土蠕变试验研究,未能就流变效应下,冻土桩基轴力、侧摩阻力的流变响应进行深入分析,亦未涉及温度变化对流变效应的影响。

考虑到温度、流变效应对冻土桩基承载特性具有极其显著的影响,亟需开展冻土地基中桩基础温度响应与流变响应的针对性研究,阐明桩体受力状况的温度、流变响应,为冻土地区工程建设提供理论

依据,更好地服务于青藏高原多年冻土地区重大基础设施建设、区域经济发展及安全稳定。

1 材料与方法

试验土体取自中国科学院北麓河冻土观测站附近,该站位于青藏高原连续多年冻土区腹地,海拔 4 628 m;青藏高原属亚北极半干旱气候,年平均气温 -3.8 ℃,年平均地温 -2.0 ~ -0.5 ℃;活动层厚度约 2.5 m,冻土上限深度约 3.05 m;上限以下普遍存在含土冰层,厚度为 1~4 m,体积含冰量超 50% [26]。

经室内土工实验,土样颗粒比重为 2.821,属黏土质砂,塑限为 14.1%,76 g 圆锥锥尖入土深度 10 mm 液限为 20.2%,17 mm 液限为 22.8%,最优含水率为 13.4%,最大干密度为 1.86 g/cm³。

模型桩材料选用有机玻璃,以北麓河冻土观测站现浇钢筋混凝土试桩为原型(桩径为 1 m,桩长为 15 m),取相似比为 20,故模型桩桩径为 5 cm,桩长为 100 cm,其中入土长度 75 cm,如图 2 所示。在试桩表面粘贴砂粒以模拟现浇桩侧粗糙度,砂粒粒度成分参考现浇桩实测形状资料 [27],通过建立桩侧起伏指标与不同粒度颗粒质量比的关系,最终得到不同粒组的砂粒占比,见表 1。



图 2 模型桩尺寸图

Fig. 2 Dimensions of model pile

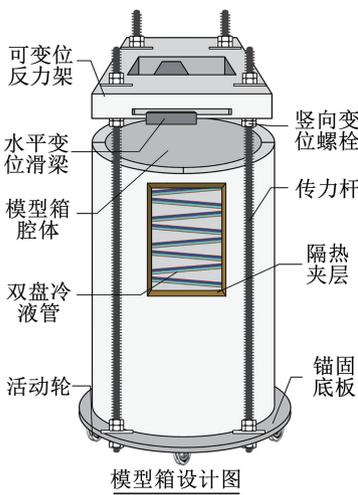
表 1 模拟桩侧粗糙度所需颗粒粒度成分

Tab. 1 Granulometric composition required to simulate roughness of pile shaft

粒组/mm	0 ~ <0.25	0.25 ~ <0.50	0.50 ~ <0.71	0.71 ~ <1.00	1.00 ~ <1.40	1.40 ~ <1.70	1.70 ~ 2.00
质量分数/%	10.9	15.9	23.4	23.3	20.5	5.2	0.8

模型箱采用圆截面形式(图 3)。相关规范规定,单桩竖向静载荷实验时,桩心距不能小于 4 倍桩径 [28];一般性勘探孔深度应达桩端以下 3~5 倍桩径 [29]。因而,模型桩中心至模型边界的水平距离取

6 倍桩径(即 30 cm),模型底边界与桩底距离取 5 倍桩径(即 25 cm),故模型箱具体尺寸确定为 φ60 × 100 cm。



(a) 模型箱设计图



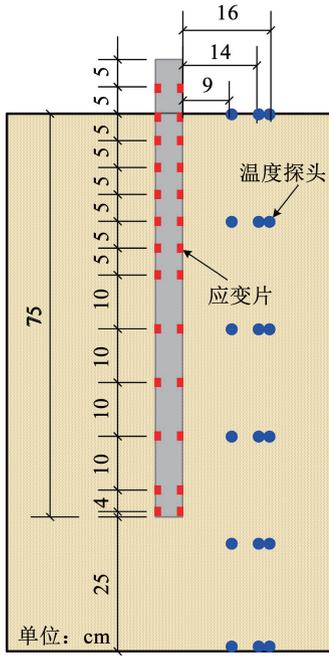
(b) 模型箱照片

图 3 可控温模型箱

Fig. 3 Temperature controllable model box

应力测量选用 BE120-3AA 型应变片,敏感栅尺寸为 0.3 mm × 1.8 mm,使用温度为 -30 ~ 80 ℃,沿桩身布置为上密下疏的形式。试验填土目标含水率

为 16%,实测为 16.16%;按目标压实度为 0.9 分 5 层填筑,同时在设计位置安放试桩与温度探头。具体布置与填筑情况如图 4 所示。



(a) 监测元件布置图



(b) 试桩



(c) 模型箱填筑

图4 监测元件布置与试验照片

Fig. 4 Arrangement of monitoring components and some photos during tests

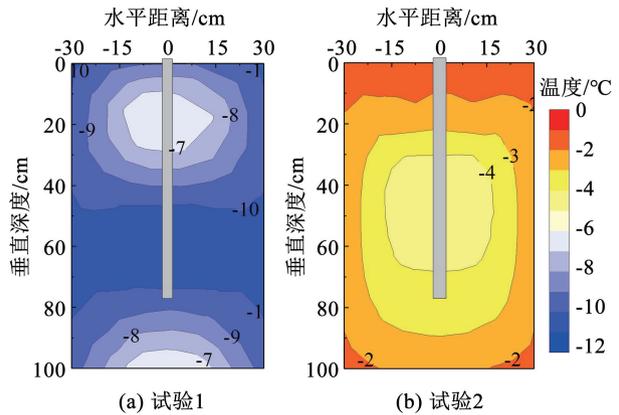
两次加载试验地温与加载等级等工况详见表2。试验过程中地温场、桩身轴向应力、桩顶沉降及荷载,分别由CR3000数据采集器、静态应变测试系统、数显百分表及荷载传感器采集;参考相关规范与相似比,稳定标准为0.01 mm/h。图5为模型试验加载、反力系统实拍照。

表2 模型试验工况

Tab.2 Different conditions of model tests

试验工况	预定地温/℃	初级荷载/kN	后续每级荷载/kN	卸荷方式
1	-6	8.0	4	每15 min 逐级卸载
2	-3	3.8	5	自然卸载

中地基土温度在-7 ~ -10 °C之间,如图6(a)所示;试验2中地基土温度在-4 ~ -2 °C之间,如图6(b)所示。



(a) 试验1

(b) 试验2

图6 两次试验中桩基础温度场典型剖面

Fig. 6 Typical profiles of pile foundation temperature field in two tests

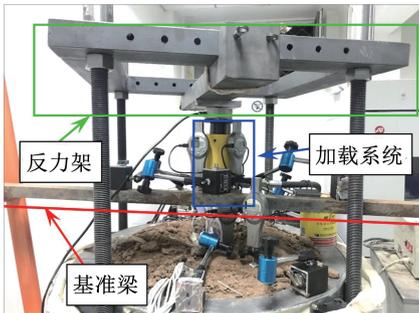


图5 加载与反力系统

Fig. 5 Loading and reaction system

2.1 沉降及刚度特性

图7为试验1、2中桩顶累积沉降与荷载关系曲线。试验1中,加卸载曲线大体呈线性,表明地基温度较低时,桩基础大体处于线弹性状态;滞回圈呈长条状,围成面积较小,表明加卸载过程中冻土桩基损伤程度较低,能量耗散量较小;同时也表明试验1中桩基础承载力发挥程度很小,加载至预估极限荷载(50 kN)时,仍未达极限承载状态。试验2中,沉降-荷载呈二次曲线形式,随荷载增大,沉降速率亦

2 结果与讨论

试验中地基温场典型剖面如图6所示。试验1

逐渐增大;因该试验加载完成后采取自然卸载措施(停止补载,荷载随桩体沉降缓慢降低),故不存在加载卸滞回圈;此外在自然卸载阶段,沉降较慢,自然卸载至约 38 kN 时桩体基本停止下沉,处于稳定状态。

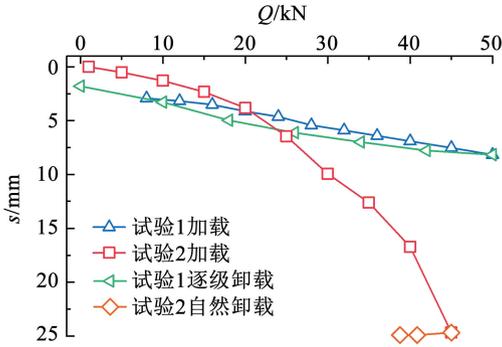
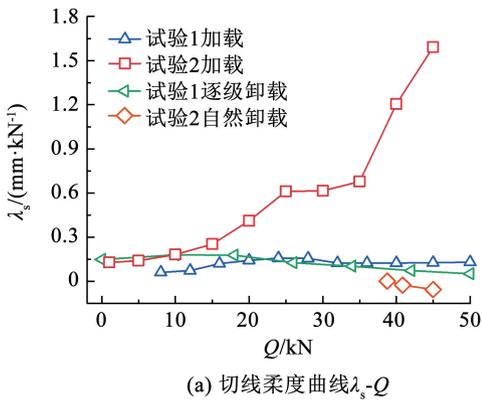


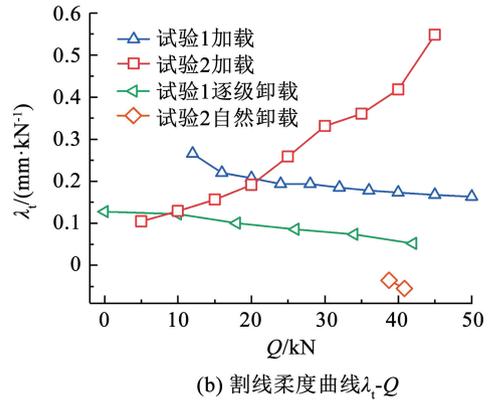
图 7 桩顶累积沉降与荷载关系曲线(s-Q)

Fig. 7 Curves of accumulative settlement against load(s-Q)

图 8 为不同荷载水平下桩基础切线柔度与割线柔度。由图 8(a)可知,由于试验 1 中地基温度较低,



(a) 切线柔度曲线 λ_s-Q



(b) 割线柔度曲线 λ_t-Q

图 8 桩基础切线柔度、割线柔度与荷载水平关系曲线

Fig. 8 Curves of secant flexibility and tangent flexibility of pile foundation against load level

反观试验 2,由于地基温度较高,桩土接触面存在明显的软化现象。随着荷载水平提高,切线柔度由初始的 0.13 mm/kN 增大至 0.61 mm/kN;随后荷载增大至 25 kN,桩土间发生滑移,桩端承载占比增大,桩身应力重分布,切线柔度增幅减小,亦即桩基础刚度软化趋势变缓;而后荷载增至 35 kN,桩底土体孔隙压溃或桩底土未冻水含量增大(冻结温度与压力的线性关系斜率约 $-0.075\text{ }^\circ\text{C}/\text{MPa}$ ^[30],本例引起冻结温度升高约 $0.38\text{ }^\circ\text{C}$),接触面进入极限状态(桩底压力约 5 MPa,与马魏等^[15]的试验结果同数量级),沉降持续发展,切线柔度急剧增大至 1.2 mm/kN,最终停止补载时,切线柔度达到 1.6 mm/kN。由于试验结束加载后采取自然卸载程序,期间桩顶逐渐下沉而荷载随之松弛、降低,因而切线柔度为负值。与试验 1 初期卸载阶段类似,由

桩土接触面刚度较大,试验过程中始终未达软化阶段,切线柔度波动不明显且数值较为集中,加载阶段切线柔度分布在 0.06 ~ 0.16 mm/kN 之间,卸载阶段为 0.07 ~ 0.18 mm/kN;此外,卸载初期同荷载水平下卸载柔度小于加载柔度,卸载后期,同荷载水平下卸载柔度大于加载柔度,临界点为 22 kN。分析认为,这是由于冻土地基中桩基础的非线性本构关系导致的。加载结束时,桩基础处于受力约束状态,较小的约束松弛即可释放大约约束力(为便于描述,称之“高压效应”);同时,由于桩基础已经历一次受力变形,存在无法恢复的塑性变形,卸载至既定荷载所需的位移势必小于首次加载至该荷载时的位移量(为便于描述,称之“超压效应”)。卸载初期,高压效应占据主导地位,卸载柔度小于加载柔度;随着逐级卸载,高压效应逐渐弱化,超压效应逐渐强化,二者作用效应平衡点即为荷载水平 22 kN;22 kN后,超压效应占据主导,卸载柔度大于加载柔度。

于高压效应的作用,试验 2 自然卸载阶段的切线柔度数值同样较大。

从图 8(b)中的割线柔度同样可以看出,加载阶段,试验 1 中因桩基础温度较低而存在硬化现象,试验 2 中则软化现象明显。卸(掉)载阶段,试验 1 中卸载柔度大于加载柔度逾 2 倍,且荷载水平较低(15 kN 以内)时差异更加明显。

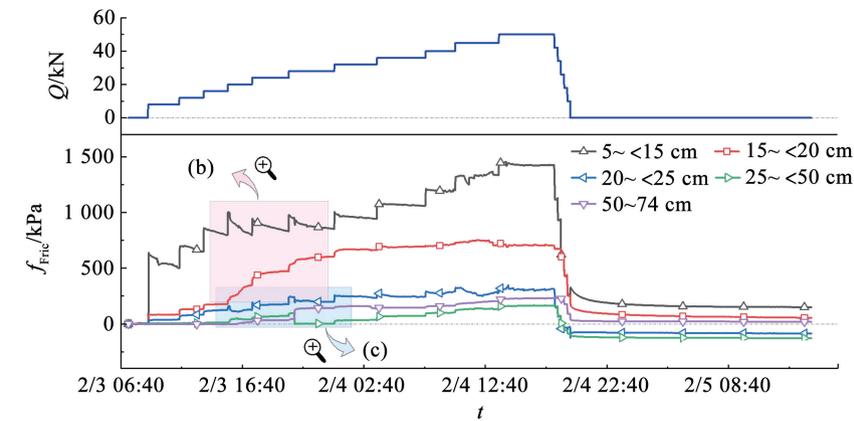
2.2 桩侧摩阻力的流变响应与荷载响应

图 9 为试验 1 中荷载与不同桩身区段侧摩阻力时程曲线及其局部放大图。由图 9(a)可见,随着荷载逐级增加,各桩身区段内侧摩阻力均随荷载水平的增大而增大,体现了桩基础承载性能的发挥,属于桩基础荷载响应。但桩侧摩阻力还具有明显的时间变异性,在各持荷期内均发生缓慢降低,分析应为桩土接触面间流变效应引起,属流变响应。流变是物

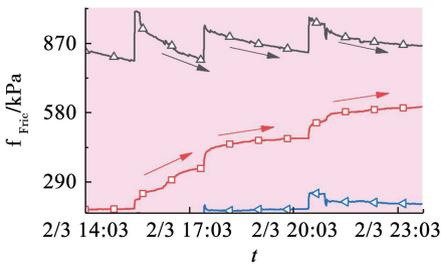
体受力时存在的与时间有关的变形性质,对于冻土,是由于冰的融化与水分重分布,土颗粒移动及冻土结构缺陷的产生及发展引起的,这同时也会引起冻土-桩基础接触面发生显著的剪切流变。冻土与接触面二者的流变效应使得桩基础在受力、承载方面产生相应的流变响应。由图9(b)、9(c)中各级荷载下侧摩阻力降低值可见,流变响应与荷载响应对于桩侧摩阻力具有相同量级的影响。

首先,流变效应的发挥受一定范围内界面应力水平的影响,经历微弱、显著及弱化3种状态变化。例如图9(a)中,前3级荷载作用下,在15~<20 cm内桩侧摩阻力荷载响应显著,而流变响应并不明显。这是由于此时上部在5~<15 cm内桩土接触面应力水平较低,流变松弛微弱,所释放的、需要下部在15~<20 cm内接触面承担的上部荷载分量较小,而下部20 cm以下接触面承载力储备又远未发挥,对该分量敏感性不高,故而在15~<20 cm内流变

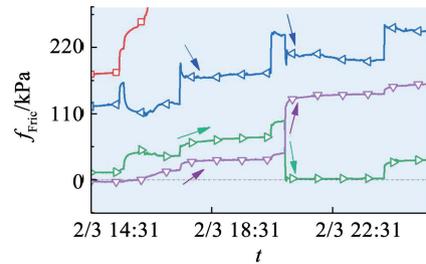
效应进一步淡化,流变响应几乎不可见。随着荷载增大,桩土接触面应力水平升高,上部在5~<15 cm内接触面流变响应逐渐显著,因流变松弛而下传的荷载分量逐渐增大,加之下部在15~<20 cm内接触面承载力发挥程度业已相对较高,荷载敏感度增大,故而第5级荷载作用期间,在5~<15 cm内桩侧摩阻力松弛明显,同时在15~<20 cm内侧摩阻力亦相应显著增大,如图9(b)所示,桩土接触面流变响应显著。此后,上部在5~<15 cm内接触面流变效应导致的界面应力重分布已达极限,加之下部在15~<20 cm内接触面已具有较高的承载力发挥程度,且更深处20 cm以下接触面承载力也已开始发挥,桩基础进入全桩承载阶段,每级荷载施加后,较深处桩身区段的荷载增量分担比更大,流变效应逐渐向更深处发挥作用,上部桩土接触面流变响应进入弱化阶段。图9(c)中相邻区段的桩侧摩阻力发展也存在相似规律。



(a) 荷载 (Q) 与侧摩阻力 (f_{Fric}) 时程曲线



(b) 红框放大图



(c) 蓝框放大图

图9 试验1中荷载与不同桩身区段侧摩阻力时程曲线及其局部放大图

Fig.9 Time-history curves of load, shaft resistance on different pile sections in test 1 and partial enlarged view

表3为深度在5~<15 cm内桩侧摩阻力随荷载变化情况,其中,流变响应值为某一荷载作用期间内侧摩阻力初始值减去终了值,流变响应比为流变响应值除以该级荷载作用下侧摩阻力初始值,荷载响应值为某级荷载终了值减去下一级荷载初始值,荷载响应比为荷载响应除以上级荷载终了值。由表

可知,流变响应最大值为206.0 kPa,与该区段最大荷载响应(212.7 kPa)相当(96.8%),流变速率高达103.0 kPa/h。但流变响应随着荷载水平的提高迅速衰减,如40 kN时流变响应值为10.7 kPa,仅为荷载响应值(154.8 kPa)的6.9%,流变速率降低为4.4 kPa/h。

其次,流变效应对桩侧摩阻力的发展存在显著影响。由图 9(b)可见,在 5 ~ <15 cm 内侧摩阻力随每级荷载的施加发生瞬时增大,由表 3 可见,荷载由 12 kN 增至 16 kN 时,侧摩阻力瞬时增幅达 212.7 kPa;但侧摩阻力随即缓慢降低,同时引起在 15 ~ <20 cm 内侧摩阻力相应地逐渐增大。桩土接触面流变使得上部桩土界面发生松弛,桩侧摩阻力逐渐降低,所能扩散至地基土中的上部荷载分量相应减小,只能沿桩体向更深处传递,继而引起下部桩侧摩阻力随上部侧摩阻力的减小而相应增大,下部桩身承载力逐渐发挥。

更进一步,桩侧摩阻力的流变效应与荷载效应均与荷载水平有关,但二者规律不尽相同。图 10 描绘了深度在 5 ~ <15 cm 内桩侧摩阻力流变响应与

荷载响应随荷载的变化情况。由图 10(a)可见,除首级加载存在桩周土“压实”使得流变响应比较大外,流变效应随荷载水平的提高存在先增大后减小的趋势。由图 10(b)可知,荷载 12、16 kN 时,流变响应比分别为较小的 7.5% 与 7.1%,属于前述微弱状态;此后荷载 20 kN 时,流变响应比增至 20.5%,达极限状态;随后逐渐降低,至 40 kN 时,仅为 0.9%。反观荷载响应,在整个加荷过程中均呈减小趋势。荷载 8 kN 为首级荷载,不存在所谓荷载效应比,次级荷载即 12 kN 时荷载响应比最大,为 40.0%;此后逐渐降低,至末级荷载 50 kN 时,降至 8.8%。换言之,加荷引起的桩侧摩阻力增量会随荷载水平的提高而减小,这是由桩侧承载力,亦即侧摩阻力由浅及深逐步发挥的特性决定的。

表 3 试验 1 中深度 5 ~ <15 cm 内桩侧摩阻力随荷载变化情况

Tab. 3 Variations of shaft resistance from 5 to <15 cm with raising load in test 1

荷载/kN	侧摩阻力/kPa		流变响应值/ kPa	流变速率/ (kPa · h ⁻¹)	流变响应比/ %	荷载响应值/ kPa	荷载响应比/ %
	初始值	终了值					
8	639.5	500.1	139.4	54.7	21.8	199.8	40.0
12	699.9	647.2	52.7	26.6	7.5	212.7	32.9
16	860.0	799.0	61.0	30.5	7.1	204.1	25.5
20	1 003.1	797.1	206.0	103.0	20.5	141.5	17.7
24	938.6	832.0	106.6	35.3	11.4	144.1	17.3
28	976.0	852.8	123.2	32.9	12.6	153.0	17.9
32	1 005.8	944.5	61.3	17.5	6.1	138.1	14.6
36	1 082.6	1 059.6	23.1	5.8	2.1	154.8	14.6
40	1 214.4	1 203.7	10.7	4.4	0.9	117.3	9.7
45	1 321.0	1 338.5	-17.5	-4.9	-1.3	117.5	8.8
50	1 456.1	1 427.9	28.2	6.2	1.9		

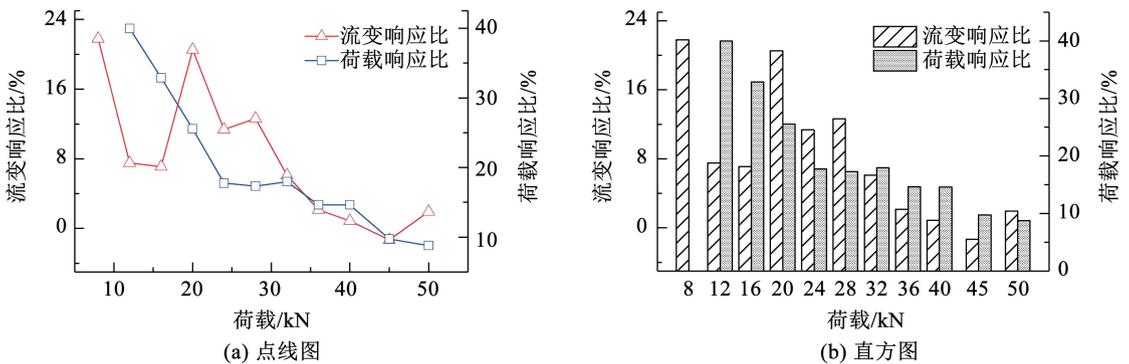


图 10 试验 1 中桩侧摩阻力流变响应比与荷载响应比随荷载变化情况

Fig. 10 Ratios of creep response and loading response of shaft resistance against load level in test 1

地温升高对多年冻土地基中桩基础承载特性具有重大影响。图 11 为试验 2,即地基土温度较高条件下的桩侧摩阻力随荷载变化情况及其局部放大图。由图 11(a)可见,与地温较低时(图 9)桩侧摩阻力由浅及深依次减小不同,地温升高会使深部桩侧摩阻力增大,尤其荷载水平较高时。如图 11(a)中,

首级荷载 5 kN 作用下,中上部在 20 ~ <25 cm 处桩侧摩阻力最大,以下侧摩阻力差异不明显;但当荷载增至 10 kN 时,中上部侧摩阻力依然最大,而深部在 50 ~ 74 cm 处次之,然后依次为中下部 40 ~ <50 cm、中上部 25 ~ <40 cm 处。换言之,地温较高时,桩侧摩阻力沿深度发挥更快。

不同深度内桩侧摩阻力发展情况由其各自刚度、强度及其间大小关系决定;因桩土接触面刚度、强度密切受控于地温,故归根是由不同深度处地温对不同深度处桩土接触面力学特性的作用效应及其差异导致的。图 11(b)描绘了次级荷载施加过程中不同深度内桩侧摩阻力变化情况。由图可见,深度在 25 ~ < 40 cm 内侧摩阻力发生陡降,应由地温升高引起该处桩土界面劣化、强度降低所致;故须更深

处桩侧提供抗力,因而深度在 40 ~ < 50 cm 与 50 ~ 74 cm 内桩侧摩阻力均呈瞬时增大;但因前者范围内地温较高,故其桩土界面刚度、强度较低,无法承载全部荷载,因而向下传递部分荷载分量;后者因温度更低,桩土界面刚度、强度较大,故其具有更大的桩侧摩阻力。最终体现为侧摩阻力沿深度方向的“大→小→大”分布形态。

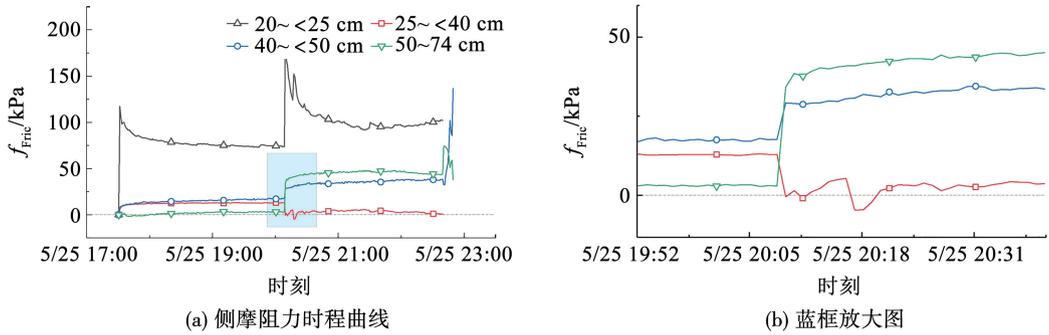


图 11 试验 2 中不同桩身区段侧摩阻力时程曲线及局部放大图

Fig. 11 Time-history curves of shaft resistance on different pile sections in test 2 and partial enlarged view

再者,地温升高会加剧桩土接触面流变效应。表 4 为试验 2 中前两级荷载下深度 20 ~ < 25 cm 内桩侧摩阻力流变响应与荷载响应情况。由表可知,首级荷载(5 kN)作用下,流变响应比即高达 37.0%,大于试验 1 中地温更低、荷载更大(8 kN)时的 21.8%(表 3);次级荷载增至 10 kN 时,流变响应比

增大至 48.0%,不仅远大于试验 1 中次级荷载 12 kN 时的 7.5%,较之试验 1 中的流变响应比最大值 21.8%,仍是其 2.2 倍。流变速率方面,试验 2 中荷载 10 kN 时流变速率达 37.4 kPa/h,分别为试验 1 中荷载为 12、16 kN 时的 1.4 倍与 1.2 倍,体现出地温对流变效应极其显著的影响。

表 4 试验 2 中深度 20 ~ < 25 cm 内桩侧摩阻力随荷载变化情况

Tab. 4 Variations of shaft resistance from 20 to < 25 cm with raising load in test 2

荷载/kN	侧摩阻力/kPa		流变响应值/ kPa	流变速率/ (kPa · h ⁻¹)	流变响应比/ %	荷载响应值/ kPa	荷载响应比/ %
	初始值	终了值					
5	117.2	73.8	43.4	16.5	37.0	122.5	166.0
10	196.3	102.2	94.1	37.4	48.0		

图 12 为试验 1、2 中不同荷载等级下初始、终了桩身侧摩阻力沿深度分布曲线,及其局部放大图。由图 12(a)可见,在试验 1 较低的地温条件下,每族曲线,即各级荷载作用期间首、末时刻的桩侧摩阻力深度分布曲线,均呈现“上大下小”的特征,荷载主要由上部 20 cm 内桩侧承担。随着荷载增大,各深度处桩侧摩阻力均相应增大,侧摩阻力深度分布曲线均匀变化。第 6 级荷载下,桩侧摩阻力深度分布发生显著变化;由图 12(b)可见,在 25 ~ < 40 cm 内桩侧摩阻力降低而 40 cm 以下桩侧摩阻力增大,表明在 25 ~ < 40 cm 内接触面发生软化,上部荷载向更深处传递,故而 40 cm 以下桩侧摩阻力显著增大。图 12(c)及由图 12(d)可见,经过第 6 级荷载时的

侧摩阻力重新分布,第 7 级荷载以后,桩基础承载状态相对稳定,后续荷载增大时,侧摩阻力深度分布曲线继续较为均匀地增大。

试验 2 中,由于地基土温度偏高,由图 12(e)可见,桩侧摩阻力深度分布较之试验 1 中图 12(a)更为均匀。此外,由于地基土温度较高,桩土接触面强度远低于试验 1,故第 2 级荷载中桩侧摩阻力就发生了突变,上部桩侧摩阻力陡降而下部桩侧摩阻力显著增大,同时桩端承载占比也显著提高。由于试验后期应变片失效,故无法得出后续桩侧摩阻力发展,但已能说明地基土升温会导致桩侧承载性能弱化,使桩基础承载模式向桩端承载方向转变,对桩基础承载模式产生决定性影响。

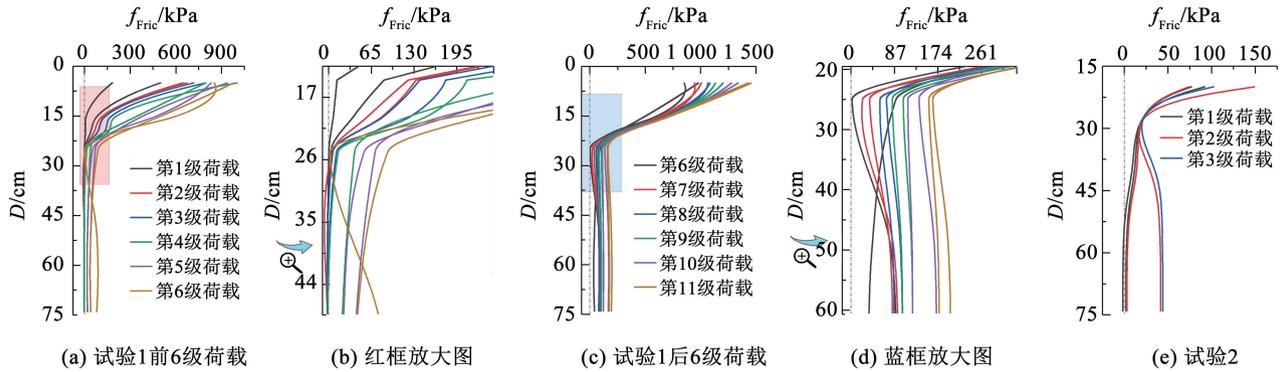


图 12 试验 1、2 中不同荷载等级下初始、终了桩身侧摩阻力沿深度分布曲线及其局部放大图

Fig. 12 Distribution of initial and final shaft resistance under different load grades along pile length in tests 1 and 2 and partial enlarged view

3 结论与建议

采用自行设计的全包围型可控温模型箱,通过室内模型试验,进行了不同地温与加卸载条件下的冻土地基中桩基础承载特性研究,结论如下:

1) 冻土地基中桩基础沉降特性与地基温度密切相关,温度较低时沉降与荷载近似呈线性关系,且存在加载硬化现象;温度较高时,非线性程度逐渐增大,且存在受力软化现象。卸(掉)载时,回弹变形随卸载量的增大而增大,并逐渐平稳;卸载、加载柔度的相对大小关系与荷载水平有关,且存在一个作为阈值的临界荷载。自然卸载时,桩体缓慢下沉,且下沉速率迅速衰减,30 h 后基本不发生位移。

2) 流变效应与荷载效应对于桩侧摩阻力具有相同量级的影响,且流变效应与荷载效应均与荷载水平有关,但二者规律不尽相同;其中,受一定范围内桩-土接触面应力水平的影响,流变效应的发挥依次经历微弱、显著及弱化 3 个阶段,亦即流变效应随荷载水平的提高存在先增大后减小的趋势;而荷载响应在整个加荷过程中均呈减小趋势,亦即加荷引起的桩侧摩阻力增量会随荷载水平的增大而减小,这是由桩侧承载力,亦即侧摩阻力由浅及深逐步发挥的特性决定的。

3) 不同深度内桩侧摩阻力发展情况由其各自刚度、强度,以及各区段彼此间的大小关系决定。地温通过对冻土-桩基础接触面刚度、强度的作用,最终对桩基础承载模式产生影响。多年冻土地温升高会弱化桩侧承载性能,同时加剧桩土接触面流变效应,使深部桩侧摩阻力增大(尤其荷载水平较高时),导致桩基础承载模式向桩端承载方向转变,对桩基础承载模式产生决定性影响。冻土地基中桩基础实际工程设计、运维须对其承载特性的温度、流变响应予以考虑,本研究结果可为类似工程实践提供理论支撑。

参考文献

- [1] 徐家祖, 王家澄. 中国冻土分布及其地带性规律的初步探讨 [C]//第二届全国冻土学术会议论文集选集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1945
XU Xiaozu, WANG Jiacheng. A preliminary study on the distribution and zonal regularity of frozen soil in China [C]//Proceedings of the Second National Conference on Permafrost. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1945
- [2] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [3] 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017
Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert: TB 10093—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017
- [4] 冻土地区架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5501—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015
Technical code for foundation design of overhead transmission line in frozen soil region: DLT 5501—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014
- [5] SHI Rui, WEN Zhi, LI Desheng, et al. Effect of freeze-thaw cycles on cast-in-place pile performance variation in permafrost regions: working state and action effect sharing [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2022, 33: 147. DOI: 10.1002/ppp.2140
- [6] YAO Tandong. Tackling on environmental changes in Tibetan Plateau with focus on water, ecosystem and adaptation [J]. Science Bulletin, 2019, 64(7): 5. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.033
- [7] 温婷婷, 高晓清, 余迪, 等. 增暖背景下青藏高原雨季环流演变特征 [J]. 高原气象, 2021, 40(5): 991
WEN Tingting, GAO Xiaqing, YU Di, et al. Circulation evolution characteristics of the Qinghai-Xizang Plateau rainy season under the warming background [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 991. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00096
- [8] 吴青柏, 张中琼, 刘戈. 青藏高原气候变暖与冻土工程的关系 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 342
WU Qingbai, ZHANG Zhongqiong, LIU Ge. Relationships between climate warming and engineering stability of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 342. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-084
- [9] PENG Hui, MA Wei, MU Yanhu, et al. Degradation characteristics of permafrost under the effect of climate warming and engineering

- disturbance along the Qinghai-Tibet Highway[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2589. DOI: 10.1007/s11069-014-1444-5
- [10] KONDRA TJEV V G. Strengthening railroad roadbed bases constructed on icy permafrost soils [C]//Proceedings of 8th International Conference on Cold Regions Engineering. Fairbanks: ASCE, 1996: 688
- [11] AYALEW L, YAMAGISHI H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan[J]. *Geomorphology*, 2005, 65(1/2): 15. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.06.010
- [12] 施瑞, 温智, 高楠, 等. 考虑非荷载变形的冻土区灌注桩轴力失真纠偏计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(10): 1942
SHI Rui, WEN Zhi, GAO Qiang, et al. Correction calculation method for axial force distortion of cast-in-place piles in permafrost regions considering non-load deformation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(10): 1942. DOI: 10.11779/CJGE202210021
- [13] 孟超, 韩龙武, 赵相卿, 等. 气温持续升高对青藏铁路运输安全的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(增刊2): 1
MENG Chao, HAN Longwu, ZHAO Xiangqing, et al. Study on influence of continuous rising temperature on transportation safety of Qinghai-Tibet Railway[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(Sup.2): 1. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.S2.001
- [14] 冻土地区建筑地基基础设计规范: JGJ 118—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region: JGJ 118—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [15] 马巍, 王大雁, 张建明, 等. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014
MA Wei, WANG Dayan, ZHANG Jianming, et al. *Mechanics of frozen soil*[M]. Beijing: Science Press, 2014
- [16] 张俊兵. 青藏铁路多年冻土区桥梁工程关键技术研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005
ZHANG Junbin. Study on the key technology of bridge engineering in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005. DOI: 10.7666/d.Y823837
- [17] 贾艳敏, 郭红雨, 郭启臣. 多年冻土区灌注桩-冻土相互作用有限元分析[J]. *岩土力学与工程学报*, 2007, 26(增刊1): 3134
JIA Yanmin, GUO Hongyu, GUO Qichen. Finite element analysis of bored pile-frozen soil interactions in permafrost [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Sup.1): 3134. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.zl.082
- [18] 唐丽云, 杨更社. 多年冻土区桩基竖向承载力的预报模型[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊2): 169
TANG Liyun, YANG Gengshe. A prediction model of vertical bearing capacity of pile foundation in permafrost region[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup.2): 169. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.s2.052
- [19] 程永锋, 鲁先龙, 刘华清, 等. 青藏铁路 110 kV 输电线路冻土桩基模型试验研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2004, 23(增刊1): 4378
CHEN Yongfeng, LU Xianlong, LIU Huaqing, et al. Model test study on pile foundation of 110 kV transmission line of Qinghai-Tibet Railway in frozen soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(Sup.1): 4378. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2004.zl.022
- [20] 宇德忠, 程培峰, 季成, 等. 高纬度低海拔岛状多年冻土桩基回冻前后承载力的试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊2): 486
YU Dezhong, CHENG Peifeng, JI Cheng, et al. Experimental study of bearing capacity of island permafrost pile foundation before and after refreezing in low altitude and high latitude area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup.2): 486. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.066
- [21] 陈坤, 俞祁浩, 郭磊, 等. 基于灌注桩试验的多年冻土区桩-土传热过程分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1483
CHEN Kun, YU Qihao, GUO Lei, et al. Analysis of pile-soil heat transfer process based on field test in permafrost regions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1483. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0903
- [22] 范长新. 基于人工冻结的多年冻土区桩基础沉降病害应急抢修技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022
FAN Changxin. Research on emergency repair technology for pile foundation settlement diseases in permafrost area based on artificial freezing [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. DOI: 10.27205/d.cnki.gltec.2022.001127
- [23] GAO Qiang, WEN Zhi, ZHOU Zhiwei, et al. A creep model of pile-frozen soil interface considering damage effect and ice effect [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2022, 31(1): 3. DOI: 10.1177/10567895211019067
- [24] SHEN Mingde, ZHOU Zhiwei, MA Wei. Experimental and theoretical investigation on the unloading creep behaviors of frozen soil[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(8): 5833. DOI: 10.1007/s00603-023-03369-1
- [25] 吴亚平, 刘振, 王宁, 等. 桩底水热效应对模型桩-冻土流变特性影响的试验研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2016, 35(增刊1): 3424
WU Yaping, LIU Zhen, WANG Ning, et al. Experimental study of the thermal effect of pile bottom water on the rheological property of model pile-frozen soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup.1): 3424. DOI: CNKI:SUN:YSLX.0.2016-S1-095
- [26] 温智, 盛煜, 马巍, 等. 青藏高原北麓河地区原状多年冻土导热系数的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 182
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Experimental studies of thermal conductivity of undisturbed permafrost at Beiluhe testing site on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 182. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2005.02.005
- [27] 金子豪, 杨奇, 陈琛, 等. 粗糙度对混凝土-砂土接触面力学特性的影响试验研究[J]. *岩土力学与工程学报*, 2018, 37(3): 754
JIN Zihao, YANG Qi, CHEN Shen, et al. Experimental study on effects of the roughness on mechanical behaviors of concrete-sand interface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 754. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1311
- [28] 铁路工程基桩检测技术规程: TB 10218—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019
Technical specification for testing of railway piles: TB 10218—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019
- [29] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002
Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002
- [30] 张立新, 徐敦祖, 张招祥, 等. 冻土未冻水含量与压力关系的实验研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(2): 124
ZHANG Lixin, XU Xiaozu, ZHANG Zhaoxiang. Experimental study of the relationship between the unfrozen water content of frozen soil and pressure [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(2): 124