

DOI: 10.11779/CJGE202209008

# 多年冻土区桥梁桩基础抗震性能及影响因素分析

张熙胤, 王万平, 于生生, 管嘉达, 秦训才

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为研究多年冻土区桥梁桩基础抗震性能及影响因素, 以中国多年冻土区广泛存在的高承台桩基础为研究对象, 通过拟静力试验结合有限元方法探讨了多年冻土区桥梁桩基础地震破坏特征及冻土层物理力学特性变化对其抗震性能的影响规律。结果表明, 随着土体温度的降低, 桩-冻土体系的水平承载力、初始刚度均呈增大趋势, 桩身位移在土体冻结前后变化显著。土体初始含水率的改变对桩-冻土体系的水平承载力及桩身位移的影响较小, 但以土体最优含水率为界限, 界限含水率两侧桩-冻土体系的刚度变化存在较大差异。土体压实度的改变对桩-冻土体系的水平承载力及桩身位移的改变影响较小, 桩-冻土体系的初始刚度随着压实度的增大而增大。因此, 在冻土区桩基础桥梁抗震设防中应当充分考虑桩周冻土物理力学特性变化对其抗震性能的影响。

**关键词:** 桥梁桩基础; 抗震性能; 拟静力试验; 有限元分析; 多年冻土区

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)09-1635-09

**作者简介:** 张熙胤(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特殊复杂环境条件(寒区)下工程防震减灾方面的研究工作。E-mail: zhangxiyin@mail.lzjtu.cn。

## Seismic performance and influencing factors of pile foundation of bridges in permafrost regions

ZHANG Xi-yin, WANG Wan-ping, YU Sheng-sheng, GUAN Jia-da, QIN Xun-cai

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

**Abstract:** In order to study the seismic performance and influencing factors of the pile foundation of bridges in permafrost regions, the pile foundation of bridges with elevated caps widely used in the permafrost regions of China is taken as the research object. The seismic failure characteristics of the pile foundation of bridges in the permafrost regions, and the influences of the physical and mechanical properties of frozen soil on its seismic performance are discussed by using the quasi-static tests and combining with the finite element method. It is found that the lateral bearing capacity and the initial stiffness of the pile-frozen soil system increase with the decreasing temperature of the frozen soil. The displacement of piles changes significantly before and after soil freezing. The change of the initial moisture content of soil has small influences on the lateral bearing capacity of the pile-frozen soil system and the displacement of piles. Take the optimal moisture content of soil as a boundary, the stiffness changes of the pile-frozen soil system are quite different under both sides of the boundary moisture content. The change of soil compaction degree has small influences on the change of the lateral bearing capacity of the pile-frozen system and the displacement of piles. The initial stiffness of the pile-frozen soil system increases with the increase of compaction degree of soil. Therefore, the physical and mechanical properties of the surrounding frozen soil of piles should be fully considered in the seismic performance evaluation of bridges with pile foundation in frozen soil regions.

**Key words:** pile foundation of bridge; seismic performance; quasi-static test; finite element analysis; permafrost region

## 0 引言

冻土在中国广泛分布, 东部季风区、西北干旱区和青藏高原地区均有存在<sup>[1]</sup>, 而多年冻土则主要分布于西部青藏高原地区。近年来, 随着国家“一带一路”和“西部大开发”战略的实施, 青藏高原地区包括公路和铁路在内的基础设施建设突飞猛进<sup>[2]</sup>。考虑到多年冻土的敏感和脆弱性, 由于桩基础桥梁对冻土

热扰动小的优势被广泛应用于多年冻土区公路和铁路建设中<sup>[3-4]</sup>。然而, 青藏高原地区其地质构造活跃, 地震活动频繁。例如, 2001年8.1级昆仑山大地震<sup>[5]</sup>、

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51808273, 52068045); 中国博士后科学基金面上项目(2018M643767); 甘肃省科技计划项目杰出青年基金项目(20JR5RA430); 第五届中国科协青年人才托举工程项目(YESS20200278); 兰州交通大学天佑青年托举人才项目  
收稿日期: 2021-09-30

2010年7.1级玉树大地震<sup>[6]</sup>以及2021年青海玛多7.4级地震<sup>[7]</sup>都直接发生在青藏高原地区<sup>[8]</sup>。当多年冻土区发生地震时,桩基础桥梁的地震反应将受到冻土层的显著影响,从而改变桩基础的破坏特征。已有研究表明,多年冻土层的存在会使地基土体的动力特性和卓越周期发生改变<sup>[9]</sup>,而土体力学特性的改变使得冻土区桩基础桥梁地震响应趋于复杂化<sup>[10]</sup>,给冻土区桥梁抗震设防及抗震性能的综合评价带来困难。

国内外众多学者对冻土区桩基础桥梁的抗震性能展开了研究。王常峰等<sup>[11]</sup>以青藏线高桩承台简支梁桥为工程背景,分析了冻土和非冻土条件下结构的地震响应,结果显示冻土状态下承台的加速度、桩的剪力和弯矩的最大值较大,而非冻土状态下承台的水平位移和震后的残余缝隙较大。吴志坚等<sup>[12]</sup>以清水河大桥基础为原型,开展负温条件下的缩尺模型振动台试验,研究了地震作用下桩-冻土相互作用效应以及动荷载对桩周冻土地温场和应变场的影响规律;周云东等<sup>[13]</sup>通过有限元建模分析了地震荷载作用下温度的变化对冻土区桩基础的影响,并指出冻土温度的升高不利于结构的抗震;Wotherspoon等<sup>[14]</sup>通过全尺寸桩基础拟静力试验表明,桩基础的动力特性受周围土体的影响较大,冻土温度和冻土层厚度对桩基础弯矩、位移具有较大的影响。Fei等<sup>[15]</sup>研究表明地基土的冻结会将桩-土体系在横向荷载作用下的延性破坏转变成脆性破坏,这对冻土区桥梁桩基础的抗震设计是极为关键的。Plotnikova等<sup>[16]</sup>研究表明土体季节性冻融对桥梁自振频率和振型具有显著影响,土体季节性冻融导致的桥梁动力特性和边界条件的改变将会进一步影响其抗震性能。Zhang等<sup>[17]</sup>为研究季节冻土区桩基础抗震性能,进行了室内拟静力缩尺试验,对比分析了土体冻结与未冻结两种情况下桩基础的破坏特征,结果显示,冻土层的存在能够显著提高桩基础的承载力以及地震作用下的耗能能力。

可以看出,冻土层的存在对桥梁桩基础的抗震性能影响显著,但现有研究主要针对的是表层季节冻土层对桥梁桩基础地震响应的影响,忽略了深部多年冻土层的影响;另外,已有研究忽略了冻土物理力学参数变化(例如水热特性)对桩基础抗震性能的影响。为此,本文以中国多年冻土区广泛采用的桩基础桥梁为研究对象,首先开展了多年冻土-桩基础相互作用拟静力试验,其次建立了多年冻土-桩基础桥墩的有限元模型,并通过拟静力试验结果验证了其正确性与可靠性。基于有限元模型进一步分析了冻土温度、含水率、压实度等主要物理力学特性的改变对桩基础水平承载力、刚度特性以及桩身位移的影响规律,为冻土区桩基础桥梁的抗震设计及抗震性能的综合评价提

供参考和依据。

## 1 桥梁桩基础拟静力试验研究及有限元模型验证

### 1.1 拟静力试验设计

以多年冻土区某桥梁桩基础1:8缩尺模型为研究对象,采用高桩承台基础,模型桥墩、承台以及桩基础均采用C30混凝土。桩基础均匀布置4根 $\phi 6$ 的纵筋,纵筋采用HPB300钢筋,其配筋率为0.4%,桥墩配6根HRB335钢筋,其配筋率为0.38%,桩基础和桥墩箍筋均采用HPB300钢筋,承台按规范配构造钢筋,模型尺寸和配筋如图1所示。模型箱采用5mm厚度钢板制成,尺寸为2.5m $\times$ 2.5m $\times$ 2m,为了减小边界效应模型箱内侧布置5cm厚度泡沫板。另外,在模型箱内外侧包裹保温棉以保证冻结效果。土体的冻结通过埋置于土体中的冷却管与制冷循环机之间冷却液的循环而实现,制冷循环机的控温精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,模型箱的温控均度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。考虑到模型的自重等各种荷载的总和,按照相似比例缩小后,施加到墩顶的竖向力为上部结构自重97.4kN和考虑缩尺模型后重度不足的配重91.1kN。试验时在模型墩顶施加低周水平往复荷载,加载制度采用位移控制,在20mm位移之前采用2mm幅值加载,超过20mm采用5mm幅值加载,加载幅值及试验整体加载系统分别如图2、图3所示。试验所用土体为粉质黏土,其初始含水率为8.6%,最优含水率为13.8%,重度 $\gamma_s=18\text{ kN/m}^3$ 。土体内部埋设多组温度传感器实现对温度的动态监控。环境冷却系统如图4所示,图5为加载时土体温度沿着深度分布情况,图6为多年冻土试验完成后拆掉模型箱侧板,土体冻结效果。

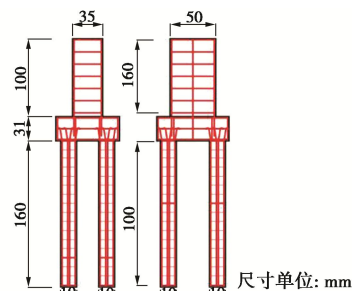


图1 模型尺寸及配筋图

Fig. 1 Sizes and reinforcement of model pier

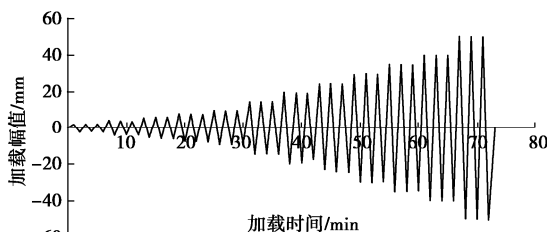


图2 试验加载幅值

Fig. 2 Loading amplitudes of tests

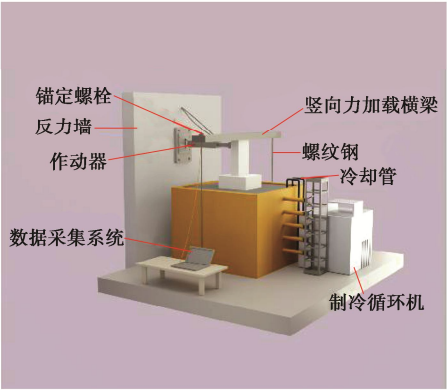


图 3 试验加载系统

Fig. 3 Diagram of loading system for tests

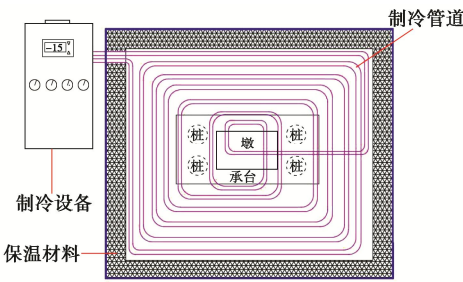


图 4 制冷设备示意图

Fig. 4 Schematic diagram of refrigeration

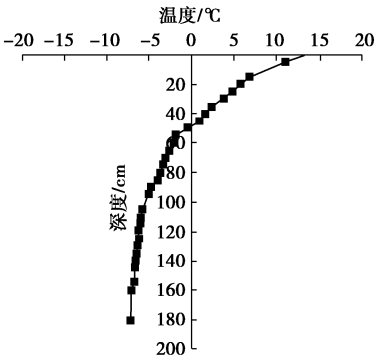


图 5 土体温度沿深度分布

Fig. 5 Distribution of soil temperature along depth



图 6 土体冻结效果

Fig. 6 Frozen soil layer

1.2 拟静力试验结果分析

桩基础-多年冻土体系的滞回曲线及骨架曲线如图 7, 8 所示。加载初期, 墩顶加载位移较小, 桩基础-

多年冻土体系均处于弹性阶段, 随着加载位移的增大, 首先在桩顶出现细微裂缝, 随着加载位移进一步增大, 桩顶裂缝持续扩大, 桩基础表现出强烈的非线性, 此时由于桩基础周围土体进入塑性阶段开裂以及桩基础本身裂缝的进一步开展, 随着加载位移的增大桩体出现明显的抬升, 且桩基础-多年冻土体系的水平承载力增长速率开始减缓, 当到达加载后期时, 墩顶承载力开始出现略微下降。通过滞回曲线和骨架曲线计算桩基础-多年冻土体系的耗能、刚度退化以及残余变形率如图 9 所示。

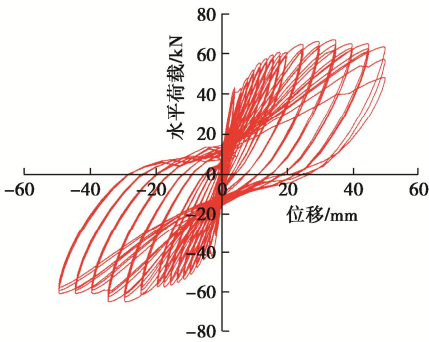


图 7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of the system

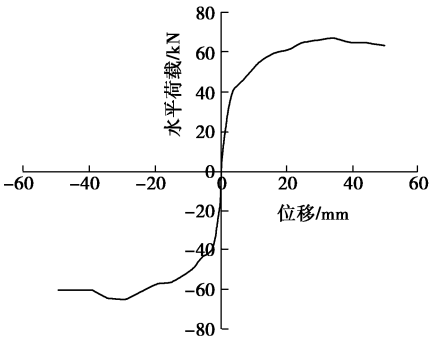


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves of the system

总体来看, 整个体系的耗能分为 3 个阶段, 第一个阶段为加载位移在 20 mm 之前, 桩基础-多年冻土体系耗能随着加载位移的增大缓慢增加, 第二个阶段为加载位移 20~40 mm, 体系的耗能随着加载位移的增大迅速增长, 其主要原因是加载幅值由之前的 2 mm 增长至 5 mm, 第三个阶段为加载位移 40 mm 之后, 桩土体系开始破坏, 耗能开始降低; 而其刚度退化则表现为在达到屈服位移前, 刚度随着荷载的增加而迅速下降, 达到屈服位移以后, 衰减速度放缓, 并在后期趋于平稳, 且当加载位移为 40 mm 时, 其刚度几乎保持不变; 残余变形率对于结构的震后评价和修复非常重要, 桩基础-多年冻土体系的残余变形率随着加载位移的增大几乎保持在同一水准, 均大于 0.35, 说明多年冻土存在时桩土体系的损伤程度较大, 震后可修复性较差。

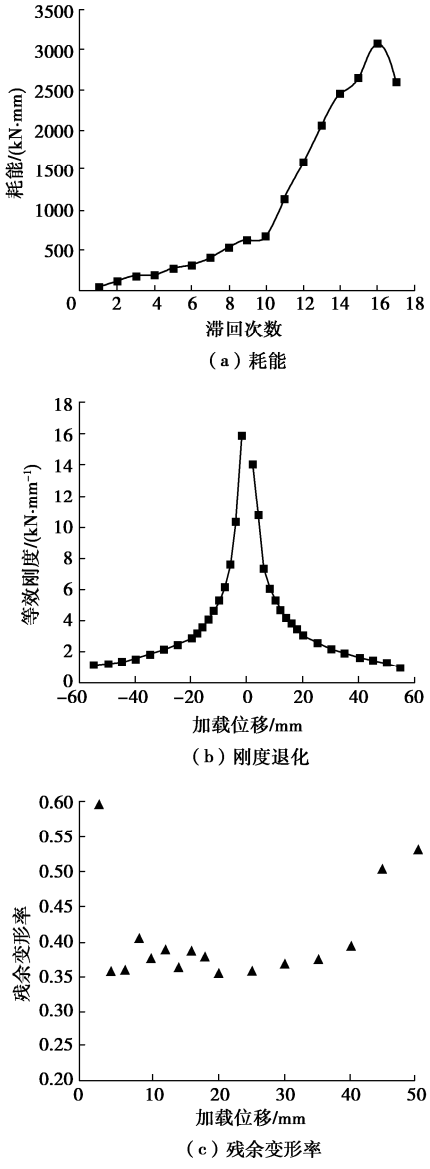


图 9 桩基础-多年冻土体系耗能、刚度退化及残余变形率曲线  
Fig. 9 Curves of energy dissipation, stiffness degradation and residual deformation rate of pile - frozen soil system

多年冻土桩基础开裂破坏情况如图 10 所示, 试验加载结束后土体表面裂缝分布情况如图 11 所示。试验结束后挖除模型箱里面土体, 可以明显的看到多年冻土中桩基础裂缝开展充分, 且在桩头附近形成塑性铰区, 钢筋屈服并部分拉断, 混凝土压碎情况明显。

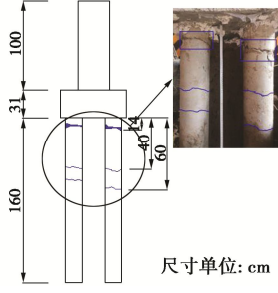


图 10 桩基础开裂破坏情况  
Fig. 10 Cracking failure of pile foundation

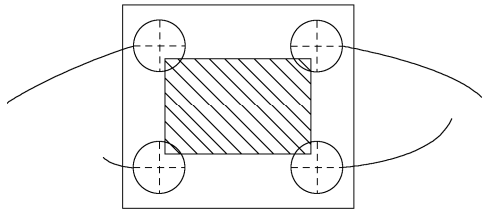


图 11 试验过程土体开裂示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of soil cracking

对于土体而言, 加载初期土体处于弹性阶段, 随着加载位移的增大, 土体由弹性过渡到塑性阶段, 开始有细微的裂缝出现, 随着水平位移的继续增大, 早期出现的裂缝继续扩展, 呈现出从桩基础周围开始向两侧延伸并在靠近模型箱边缘处呈相交趋势。

1.3 有限元模型验证

建模过程中为了减小边界效应的影响, 土体宽度取 5 m, 高度为 2 m, 其余条件均与拟静力试验一致。模型单元划分方面, 混凝土和土体均采用三维实体单元 (C3D8R), 钢筋采用桁架单元 (T3D2)。桩侧和桩底与土体的接触, 用表面与表面接触, 即在法向采用硬接触, 切向采用“罚”接触, “罚”接触与设置摩擦系数类似, 此外, 钢筋与桩基础的接触方式为嵌入。边界条件方面, 土体底面限制其 3 个方向的平动及转动位移, 土体侧面面对与坐标轴平行方向的位移进行限制。模型本构方面, 混凝土本构采用混凝土损伤塑性模型<sup>[18]</sup>, 钢筋本构选用双线性本构模型<sup>[19]</sup>, 土体本构选用 Mohr-Coulomb 模型<sup>[20]</sup>, 模拟所用的土体力学参数通过冻土静三轴试验所得, 冻土静三轴试验用土与拟静力试验用土一致, 试验结果如表 1 所示。建立的有限元模型如图 12 所示, 有限元数值模拟与试验所得骨架曲线对比及模型应力云图如图 13, 14 所示。

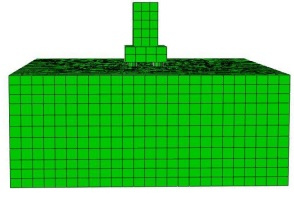


图 12 三维实体有限元模型  
Fig. 12 3D finite element model

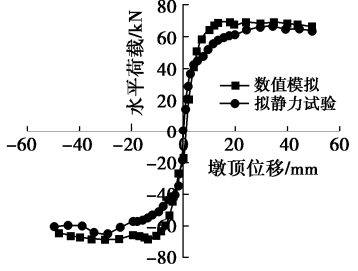


图 13 试验与模拟骨架曲线对比  
Fig. 13 Comparison of experimental and simulated skeleton curves



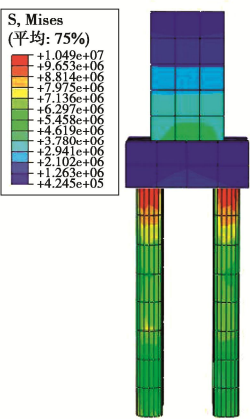


图 14 模型应力云图分布

Fig. 14 Stress nephogram distribution of the model

可以看出有限元计算所得的骨架曲线与试验结果拟合较好,且模型应力云图中最大应力分布位置与桩基础的开裂位置相近。因此,所建模型可准确模拟水平往复荷载作用下桩基础桥墩的力学行为,能够保证后续多年冻土区桩基础抗震性能参数化分析结果的合理性。

2 多年冻土区桥梁桩基础抗震性能参数化分析

为深入研究多年冻土区土体力学特性对桥梁桩基础抗震性能的影响,基于已验证的有限元模型,研究了冻结土体的温度、初始含水率以及压实度改变后土力学特性变化对桥梁桩基础抗震性能产生的影响机制。冻结土体力学参数通过冻土静三轴试验得出,具体如表 1 所示,本次有限元模拟工况如表 2 所示。

表 1 不同变量土体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils with different variables							
试验 工况	含水 率/%	干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	温度 /°C	围压 /kPa	弹性模量 /kPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
1	10%	1.75	-5	50			
2	10%	1.75	-5	100		355.95	24.76
3	10%	1.75	-5	200	85723.19		
4	14%	1.75	-5	50			
5	14%	1.75	-5	100		568.05	25.99
6	14%	1.75	-5	200	54347.82		
7	16%	1.75	-5	50			
8	16%	1.75	-5	100		500.67	25.36
9	16%	1.75	-5	200	49083.27		
10	14%	1.75	2	50			
11	14%	1.75	2	100		15.57	19.52
12	14%	1.75	2	200	5433.04		
13	14%	1.75	-9	50			
14	14%	1.75	-9	100		798.41	30.49
15	14%	1.75	-9	200	158985.18		
16	14%	1.65	-5	50			
17	14%	1.65	-5	100		407.62	24.16
18	14%	1.65	-5	200	51916.93		
19	14%	1.85	-5	50			
20	14%	1.85	-5	100		638.96	27.85
21	14%	1.85	-5	200	123211.26		

表 2 有限元模拟工况

Table 2 Finite element simulation conditions

模拟工况	含水率/%	温度/°C	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
模型 1	14	2	1.75
模型 2	14	-5	1.75
模型 3	14	-9	1.75
模型 4	10	-5	1.75
模型 5	14	-5	1.75
模型 6	16	-5	1.75
模型 7	14	-5	1.65
模型 8	14	-5	1.75
模型 9	14	-5	1.85

2.1 骨架曲线

骨架曲线为滞回曲线的外包络线,反应出结构在不同阶段的变形受力特征<sup>[21]</sup>。本文提取模型多年冻土层所处位置土体在不同温度(2℃, -5℃, -9℃对应工况分别为模型 1, 2, 3)、不同的初始含水率(10%, 14%, 16%对应工况分别为模型 4, 5, 6)、不同的压实度(1.65, 1.75, 1.85 g/cm<sup>3</sup>对应工况分别为模型 7, 8, 9)情况下桩-土体系的骨架曲线如图 15 所示。

如图 15 所示,不同变量(温度、含水率、压实度)情况下桩土体系的骨架曲线均呈现 S 形状,分为 3 个阶段,第一阶段为弹性阶段,墩顶的水平荷载与位移呈正相关,反映到曲线形式上其近似的为一条直线,第二阶段为塑性阶段,随着加载位移的增大整个体系进入塑性,这一阶段施加的位移与所受的桩顶水平荷载不再呈线性规律,最后随着加载位移的增大,桩土体系发生破坏。由图 15 结合提取的数据可知,土体温度为 2℃时,桩基础-多年冻土体系正向最大水平承载力为 32.94 kN,负向最大水平承载力为-32.98 kN; -5℃时体系的正向最大水平承载力为 68.42 kN,负向最大水平承载力为-68.74 kN,可以发现,当温度从 2℃降至-5℃,桩土体系的正向承载力提高了 107%,负向承载力提高了 108%。对比土体温度为-5℃与-9℃,体系的正向承载力分别为 68.42, 69.31 kN,负向承载力分别为-68.74, -68.22 kN,桩土体系的水平承载力变化不明显。因此,从融土向冻土转化过程中,土体温度的降低确实对桩基础-多年冻土体系的水平承载力存在显著的影响,但当土体冻结后,土体温度的变化对桩土体系承载力的影响就会减弱。当土体初始含水率从 10%增长至 14%时,桩基础-多年冻土体系的最大水平承载力呈增大趋势,而随着含水率继续增大,其最大水平承载力将会出现降低趋势,但总体而言土体初始含水率对桩基础桥墩水平承载力影响较小。由于冻土静三轴试验所用土样体积一定,因此以干密度控制土体压实度,当土体干密度为

1.65 g/cm<sup>3</sup>, 桩基础-多年冻土体系的最大水平承载力为 64.09 kN, 土体的干密度为 1.75 g/cm<sup>3</sup>, 其最大水平承载力为 68.66 kN, 土体的干密度为 1.85 g/cm<sup>3</sup>, 桩基础-多年冻土体系的最大水平承载力为 70.91 kN, 增长幅度分别为 7%和 3%, 因此可以知道桩基础-多年冻土体系的最大水平承载力随着冻结土体压实度的增大而缓慢增大。

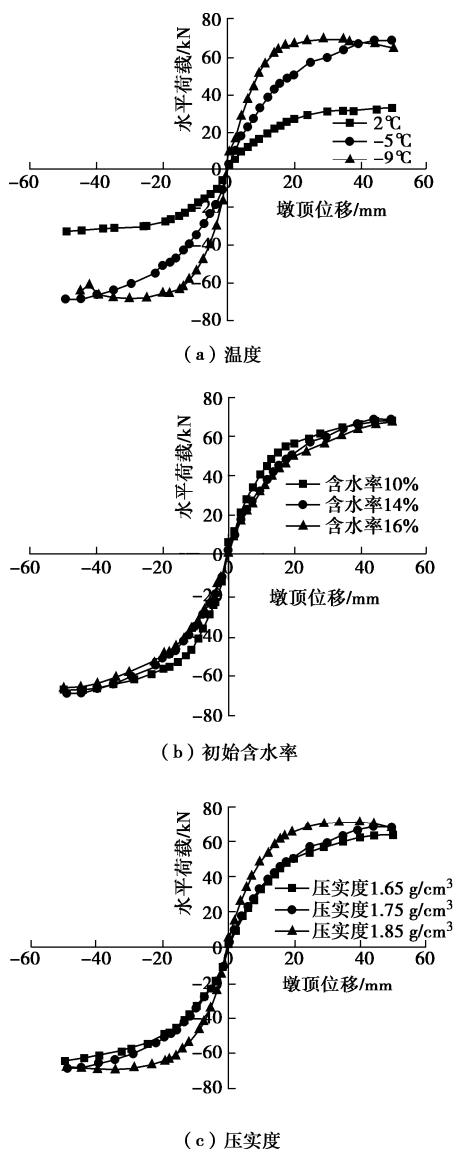


图 15 不同初始条件体系骨架曲线

Fig. 15 Skeleton curves of systems under different initial conditions

## 2.2 刚度退化

刚度是指材料或者结构受力时抵抗变形的能力<sup>[22]</sup>, 结构在往复荷载作用下其刚度会逐渐减小, 结构受力状态将发生变化, 对结构产生不利的影响, 因此在结构抗震设计中应该考虑结构的刚度退化。刚度退化是指结构在循环反复荷载作用下, 保持相同的峰值荷载时, 峰值点的位移随着循环次数的增加而减小的现象<sup>[23]</sup>。通常用

等效刚度来表示:

$$k = \frac{p_i}{\Delta_i} \quad (1)$$

式中,  $p_i$  和  $\Delta_i$  分别为第  $i$  次循环的峰值荷载和峰值位移。本次试验所得到的不同初始变量体系的刚度退化曲线如图 16 所示。

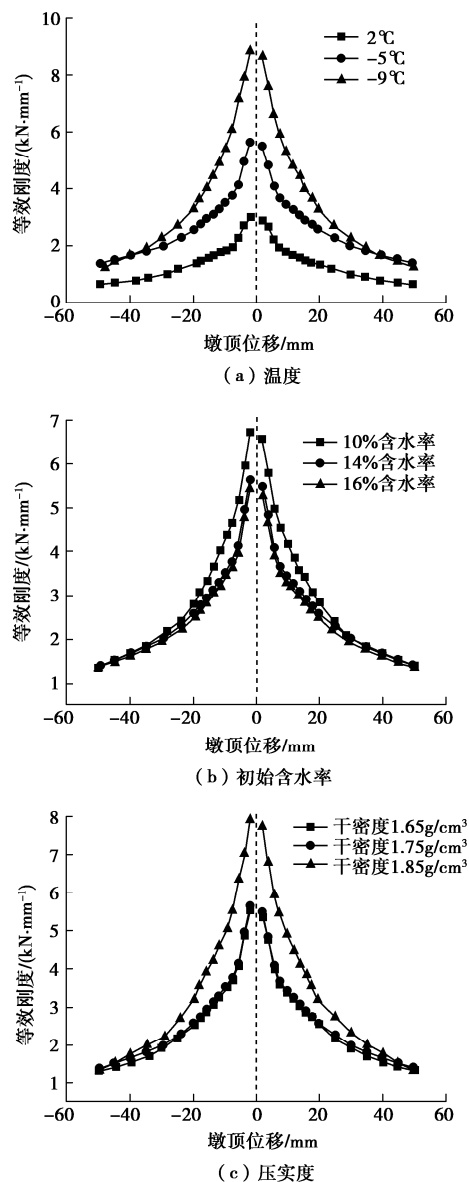


图 16 不同初始条件体系刚度退化曲线

Fig. 16 Stiffness degradation curves of systems under different initial conditions

从图 16 可知, 不同初始条件下桩基础-多年冻土体系的刚度退化规律相似, 都表现为在达到屈服位移前, 刚度随着荷载的增加而迅速下降, 达到屈服位移以后, 衰减速度放缓, 并在后期趋于平稳, 且当加载位移为  $\pm 40$  mm 时, 其刚度几乎保持不变。其中, 温度对桩基础-多年冻土体系的初始刚度影响非常大, 随着土体温度的降低, 其初始刚度显著增高, 而当土体冻结后温度对其后期刚度的影响较小; 以初始含水率为变量, 土

体初始含水率从 10%增加至 14%, 初始刚度明显降低, 随着含水率的继续增大, 其对桩基础 - 多年冻土体系刚度的影响较小; 随着土体压实度的增大, 桩基础 - 多年冻土体系的初始刚度呈增大趋势。

2.3 桩身位移

桩身位移可作为震害分析中的关键指标。为探讨冻结土体不同特性对桥梁桩基础桩身位移的影响规律, 提取所建有限元模型位移沿着桩身变化曲线如图 17 所示。

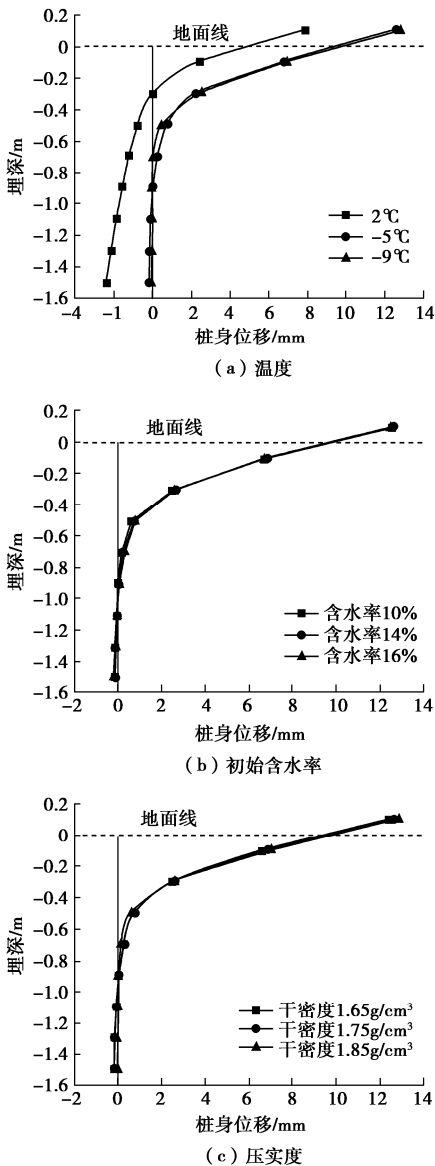


图 17 不同初始条件桩身位移变化

Fig. 17 Displacements of piles under different initial conditions

由图 17 结合提取的数据可知, 土体温度对桩身位移影响较大, 尤其是土体冻结前后, 对比 2℃与-5℃可知, 2℃时桩头处位移为 7.9 mm, -5℃桩头处的位移为 12.6 mm, 增长了近 60%, 对于桩底位移, 融土状态明显大于冻结土体状态。冻土静三轴试验表明, 土体冻结后强度和刚度均显著增加, 因此多年冻土层存在时对桩

基础下半部分的水平约束作用增强, 导致多年冻土层中的桩基础位移比较小。而当土体为完全融化状态时, 土体的刚度和强度较小, 土层对桩基础的水平约束作用相对较弱, 在横向荷载作用下桩基在土体中产生较大的旋转, 造成了桩底处的水平负向位移增大而桩顶处的水平位移减小。另外, 当有多年冻土存在时, 在横向荷载作用下桩基础的竖向抬升较大, 桩基的竖向抬升也会加大桩顶处的水平位移。因此当有多年冻土层存在时桩基础顶部的位移反而变大; 冻结土体初始含水率对桩体位移影响较小; 以土体压实度为变量, 土体密度为 1.65, 1.75, 1.85 g/cm<sup>3</sup> 时, 桩身位移分别为 12.3, 12.6, 12.8 mm, 随着土体压实度的增大, 桩身位移逐渐增大, 但影响幅度较小。

3 结 论

通过拟静力试验分析了多年冻土区桥梁桩基础在水平往复荷载作用下的破坏特征, 并建立了桩土体系的三维实体有限元模型, 以冻结土体特性为变量, 探讨了桩周土体物理力学特性的改变对多年冻土区桩基础抗震性能的影响, 得到如下 4 点结论:

(1) 建立的有限元模型计算与拟静力试验结果吻合较好, 能够有效模拟多年冻土区桥梁桩基础的力学行为, 拟静力试验和有限元计算结果表明, 桥梁桩基础顶部破坏严重, 是整个体系的薄弱部位, 在工程抗震设计中应特别考虑。

(2) 从融土向冻土转变的过程中, 土体温度的降低对桩土体系的水平承载力存在显著的影响, 但土体冻结后, 土体温度的降低对桩基础 - 多年冻土体系的水平承载力影响较小; 土体的初始含水率及压实度对桩基础 - 多年冻土体系的水平承载力影响较小。

(3) 随着土体温度的降低, 桩基础 - 多年冻土体系的刚度整体呈增大趋势; 对于初始含水率, 以最优含水率为界限, 界限含水率两侧桩 - 冻土体系的刚度变化存在较大差异; 桩基础 - 多年冻土体系的初始刚度随着压实度的增大呈增大趋势, 但其对整个体系后期刚度影响较小。

(4) 土体温度对桩基础水平位移的影响较大, 尤其是土体冻结前后桩基础的水平位移变化明显; 土体初始含水率及压实度对桩基础水平位移影响较小。

参考文献:

[1] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZHOU You-wu. Geocryology in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))  
[2] 王万平, 张熙胤, 陈兴冲, 等. 考虑冻土效应的桥梁桩 - 土

- 动力相互作用研究现状与展望[J]. 冰川冻土, 2020, **42**(4): 1213 - 1219. (WANG Wan-ping, ZHANG Xi-yin, CHEN Xing-chong, et al. Study on dynamic interaction between bridge pile and soil with permafrost effect: status and review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, **42**(4): 1213 - 1219. (in Chinese))
- [3] 张熙胤, 陈兴冲, 高建强. 多年冻土区桥梁抗震研究进展[J]. 兰州理工大学学报, 2020, **46**(2): 116 - 120. (ZHANG Xi-yin, CHEN Xing-chong, GAO Jian-qiang. Research advance on seismic performance of bridges in permafrost regions[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, **46**(2): 116 - 120. (in Chinese))
- [4] 景立平, 汪刚, 李嘉瑞, 等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 163 - 172, 207. (JING Li-ping, WANG Gang, LI Jia-rui, et al. Shaking table tests and numerical simulations of dynamic interaction of soil-pile-nuclear island system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 163 - 172, 207. (in Chinese))
- [5] 任天翔, 程惠红, 张贝, 等. 2001年昆仑山口西Ms8.1地震对周围断层的应力影响数值分析[J]. 地球物理学报, 2018, **61**(12): 4838 - 4850. (REN Tian-xiang, CHENG Hui-hong, ZHANG Bei, et al. Numerical study on the co-seismic stress changes of surrounding faults due to the Ms8.1 earthquake, 2001, Kokoxili earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, **61**(12): 4838 - 4850. (in Chinese))
- [6] 蒋瑶, 吴中海, 李家存, 等. 2010年玉树7.1级地震诱发滑坡特征及其地震地质意义[J]. 地质学报, 2014, **88**(6): 1157 - 1176. (JIANG Yao, WU Zhong-hai, LI Jia-cun, et al. The characteristics of landslides triggered by the Yushu ms 7.1 earthquake and its seismogeology implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, **88**(6): 1157 - 1176. (in Chinese))
- [7] 管仲国, 黄勇, 张昊宇, 等. 青海玛多7.4级地震桥梁工程震害特性分析[J]. 世界地震工程, 2021, **37**(3): 8 - 45. (GUAN Zhong-guo, HUANG Yong, ZHANG Hao-yu, et al. Damage characteristics and analysis of bridge engineering in M7.4 Qinghai Maduo earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2021, **37**(3): 8 - 45. (in Chinese))
- [8] 于生生, 张熙胤, 陈兴冲, 等. 场地地震反应分析研究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, **41**(1): 181 - 192. (YU Sheng-sheng, ZHANG Xi-yin, CHEN Xing-chong, et al. Present research situation and prospect on analysis of site seismic response[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, **41**(1): 181 - 192. (in Chinese))
- [9] 邢爽, 吴桐, 李曰兵, 等. 冻土-结构相互作用体系振动台试验及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2021(11): 2003 - 2012, I0008. (XING Shuang, WU Tong, LI Yue-bing, et al. Shaking table tests and numerical analysis of frozen soil-structure interaction system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021(11): 2003 - 2012, I0008. (in Chinese))
- [10] 燕斌, 王志强, 王君杰. 桩土相互作用研究领域的Winkler地基梁模型综述[J]. 建筑结构, 2011, **41**(S1): 1363 - 1368. (YAN Bin, WANG Zhi-qiang, WANG Jun-jie. Review of winkler foundation beam model on pile-soil interaction research area[J]. Building Structure, 2011, **41**(S1): 1363 - 1368. (in Chinese))
- [11] 王常峰, 陈兴冲, 丁明波. 季节性冻土区桩基础桥梁地震反应研究[J]. 桥梁建设, 2016, **46**(2): 48 - 53. (WANG Chang-feng, CHEN Xing-chong, DING Ming-bo. Study of seismic responses of bridge with pile foundations in seasonal frozen soil area[J]. Bridge Construction, 2016, **46**(2): 48 - 53. (in Chinese))
- [12] 吴志坚, 王平, 霍元坤, 等. 多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J]. 西北地震学报, 2009, **31**(4): 319 - 326. (WU Zhi-jian, WANG Ping, HUO Yuan-kun, et al. Study on shaking table test for seismic response of pile foundation of bridges at the permafrost regions[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, **31**(4): 319 - 326. (in Chinese))
- [13] 周云东, 刘云波, 杨德. 动载下冻土区温度变化对桩基受力影响数值分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2016, **33**(1): 11 - 15, 23. (ZHOU Yun-dong, LIU Yun-bo, YANG De. Numerical simulation analysis of influence of temperature variations on the pile force in permafrost zone under dynamic loads[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2016, **33**(1): 11 - 15, 23. (in Chinese))
- [14] WOTHERSPOON L M, SRITHARAN S, PENDER M J. Modelling the response of cyclically loaded bridge columns embedded in warm and seasonally frozen soils[J]. Engineering Structures, 2010, **32**(4): 933 - 943.
- [15] FEI W P, YANG Z J, SUN T C. Ground freezing impact on laterally loaded pile foundations considering strain rate effect[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **157**: 53 - 63.
- [16] PLOTNIKOVA A, WOTHERSPOON L, BESKHYROUN S,



- et al. Influence of seasonal freezing on dynamic bridge characteristics using in situ monitoring data[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **160**: 184 - 193.
- [17] ZHANG X Y, YANG Z H, CHEN X C, et al. Experimental study of frozen soil effect on seismic behavior of bridge pile foundations in cold regions[J]. Structures, 2021, **32**: 1752 - 1762.
- [18] 朱兴一, 鲁乘鸿, 戴子薇, 等. 土木工程材料自愈合行为的若干力学问题与研究进展[J]. 科学通报, 2021, **66**(22): 2802 - 2819. (ZHU Xing-yi, LU Cheng-hong, DAI Zi-wei, et al. Application of self-healing engineering materials: mechanical problems and research progress[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, **66**(22): 2802 - 2819. (in Chinese))
- [19] 李冀龙, 欧进萍. X 形和三角形钢板阻尼器的阻尼力模型 (I): 基于双线性本构关系[J]. 世界地震工程, 2004, **20**(1): 10-16. (LI Ji-long, OU Jin-ping. Damping force hysteresis loop models for X type and triangle mild steel dampers (I) — Based on double linear constitutive model[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, **20**(1): 10 - 16. (in Chinese))
- [20] 杨 涛, 滕世权, 李国维, 等. 动载下桩承式路堤中平面土拱形态演化的数值模拟[J]. 公路交通科技, 2020, **37**(5): 25 - 32. (YANG Tao, TENG Shi-quan, LI Guo-wei, et al. Numerical simulation of evolution of 2D soil arch shape in pile supported embankment under dynamic load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, **37**(5): 25 - 32. (in Chinese))
- [21] 谷 音, 彭晨星. PVA-ECC 加固桥墩抗震性能试验研究 [J]. 振动与冲击, 2021, **40**(14): 92 - 99. (GU Yin, PENG Chen-xing. Experimental study on the seismic behavior of bridge piers strengthened with PVA-ECC[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, **40**(14): 92 - 99. (in Chinese))
- [22] 鲁锦华, 陈兴冲, 丁明波, 等. 不同配筋率下铁路重力式桥墩抗震性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2021, **42**(3): 47 - 54. (LU Jin-hua, CHEN Xing-chong, DING Ming-bo, et al. Experimental study on seismic performance of railway gravity bridge piers with different reinforcement ratios[J]. China Railway Science, 2021, **42**(3): 47 - 54. (in Chinese))
- [23] 吴 轶, 杨 春, 陈力邦, 等. 梁柱-支撑式胶合木框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(8): 43 - 55. (WU Yi, YANG Chun, CHEN Li-bang, et al. Experimental study on seismic performance of glued laminated timber K-braces frame structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(8): 43 - 55. (in Chinese))

## 中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会 (第一号通知)

**主办单位:** 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

**承办单位:** 中国科学院武汉岩土力学研究所; 岩土力学与工程国家重点实验室

**征文内容:** 会议主要研讨双碳战略下岩土工程理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容主要包括以下14个方面。①岩土基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价; ③地基处理与基础工程; ④特殊土力学与工程; ⑤边坡工程与地质灾害; ⑥地下工程及能源储备; ⑦土动力学与岩土地震工程; ⑧海洋岩土力学与岛礁工程; ⑨环境岩土工程与固废处置; ⑩二氧化碳地质利用与封存; ⑪数值仿真与岩土工程大数据; ⑫岩土工程新材料、新装备与智能建造; ⑬岩土力学与工程前沿交叉; ⑭重大岩土工程实录。

**投稿要求:** 大会组委会于2022年7月1日开始接收论文投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未公开发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 论文请按《岩

土力学》期刊格式撰写, 论文模板请登录《岩土力学》网站下载中心下载, 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

根据被录用论文的研究内容与学术水平, 分别推荐论文由《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》、《土木工程学报》、《岩土工程学报》、《力学与实践》、《土工基础》等近10个国内高水平期刊以正刊、专刊或增刊形式发表, 其中多本期刊的专刊或增刊可被SCI或EI检索。热忱欢迎国内外从事岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

**联系方式:** 郭 妍(13871535559), 卢 正(13469993948), 刘 磊(15871497846), 孙冠华(18672321892); 湖北省武汉市武昌八一路小洪山2号, 中国科学院武汉岩土力学研究所(430071); E-mail: cismge2023@whrsm.ac.cn; 电话: 027-87198413。

(大会组委会 供稿)