

季节性冻土区桥梁桩基动力响应特性及影响因素分析

罗子兴^{1*} 赵东峰²

1.长沙理工大学土木与环境工程学院 湖南 长沙 410114

2.中交第三公路工程局有限公司 北京 101300

【摘要】：地震作用下桥梁桩基的动力响应特性及影响因素尚值得深入研究。依托实际工程建立了考虑非线性桩-土相互作用的有限元计算模型，据此分析了不同地表温度、冻土层厚度及地震峰值加速度（PGA）工况下季节性冻土区桥梁桩基动力响应。结果表明：不同工况下桩身最大水平位移均位于桩顶；当地表温度从5℃降至-15℃或冻土层厚度从0.5d增大至1.5d，桩周土体的约束增强，桩顶水平位移分别减小34.16%和13.52%，桩身最大弯矩分别增大82.69%和191.69%；其中，弯矩集中位置随冻土层厚度的增加而显著上移；随着地震峰值加速度从0.1g增至0.4g，桩周土体发生塑性屈服致使侧向约束减弱，桩顶水平位移与桩身最大弯矩分别增大222.81%和208.77%。因此，在季节性冻土区桥梁桩基设计中，应重点关注桩顶变形与桩身的抗弯和抗剪承载力。

【关键词】：桥梁工程；冻土桩基；动力响应；数值模拟

DOI:10.12417/2811-0528.26.16.078

为建设交通强国，根据《国家公路网规划(2022年-2035年)》^[1]中的战略方针，我国规划及在建的高速公路大量位于季节性冻土和地震叠加区。季节性冻土区桥梁桩基的动力响应特征较常温条件更复杂。冬季土体冻结后，其对桩基的侧向约束显著增强。该约束虽能在一定程度上抑制桩基的横向位移，但会导致桩身弯矩及剪力集中，极易引发桩身的脆性破坏^[2]。而夏季土体融化后会导致土体强度减弱，侧向约束骤降，在地震荷载下极易引发桥梁桩基的过大变形甚至失稳^[3]。此外，桩周土体反复冻融循环亦会造成桩-土界面剥离，对桩基的长期耐久性构成严重威胁^[4]。桩-土作用体系的动力响应特征不仅取决于地表温度变化引起的土体冻融循环，还受到冻土层厚度以及地震峰值加速度PGA的影响。因此，深入揭示上述关键变量影响下的桩基动力响应变化规律，已成为当前季节性冻土区工程防灾减灾领域亟待解决的核心问题。

鉴于此，本文首先梳理了常温土、冻土的桩-土p-y曲线理论模型；其次，依托实际工程，建立了有限元数值模型；在此基础上，分析了不同地表温度、冻土层厚度以及PGA影响下，桩身的位移和弯矩的变化规律。以期能为季节性冻土桥梁桩基的抗震设计提供依据。

1 桩土相互作用模型

1.1 常温桩土p-y曲线模型

动力p-y弹簧模型能较好地模拟桩土相互作用的动力特

性^[5]。对常温黄土，p-y曲线表达式为：

$$p = \begin{cases} 0.5p_{ult}(y/y_{50})^{1/3} & (y \leq 8y_{50}) \\ p_{ult} & (y > 8y_{50}) \end{cases} \quad (1)$$

式中，p为桩侧土抗力；y为桩身水平位移；y₅₀为桩侧极限土抗力达到一半时的桩身水平位移。

其中，桩侧极限土抗力p_{ult}为：

$$p_{ult} = \begin{cases} 2c_u d + \gamma dz + 2.83c_u z & (z < z_r) \\ 9dc_u & (z \geq z_r) \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}d \quad (3)$$

式中，z为土体深度；c_u为不排水抗剪强度；γ为土体重度；ε₅₀为土体达到极限应力一半时对应的应变；z_r为地表到土抗力减少区域底部的深度；d为桩直径。

1.2 冻土桩基p-y曲线模型

冻土桩基p-y曲线模型，其表达式为^[6]：

$$p = \begin{cases} 0.5p_{ult}(y/y_m)^{1/3} & (y \leq y_{ult}) \\ p_{ult} & (y > y_{ult}) \end{cases} \quad (4)$$

$$y_m = \varepsilon_{50}d \quad (5)$$

式中，y_{ult}为达到极限土抗力时所对应的桩身位移。y_m为水平地基极限反力发挥一半时对应的桩身水平位移。

【作者简介】姓名：罗子兴；民族：汉 性别：男；出生年月：2001.07；籍贯：湖南怀化；学历：硕士；研究方向：桥梁桩基。

姓名：赵东峰；民族：汉；性别：男；出生年月：1981.01；籍贯：河北；学历：大学本科；职称：高级工程师；研究方向：路桥。

冻土地基的 p_{ult} 表达式为:

$$p_{ult} = 1.5(2.15 - 0.33T_z + 0.11T_z^2)d \quad (6)$$

假定场地温度沿深度 z 近似呈线性变化, 对应的温度场分布模式为:

$$T_z = T_0 \left(1 - \frac{L_z}{L_f}\right) \quad (7)$$

式中, T_z 为深度为 z 处的温度, T_0 为地面处冻土温度; L_f 为冻土层厚度; L_z 为温度计算点埋深。

2 动力响应

2.1 模型建立

依托 G341 线白银至中川段桥梁工程^[7], 建立相应的数值计算模型如图 1 所示。桩长 24m, 桩径 1.8m, 桩身环向等间距布置 25 根直径为 28mm 的纵向主筋, 混凝土保护层厚度为 79mm。模型材料参数如表 1 和表 2 所示。

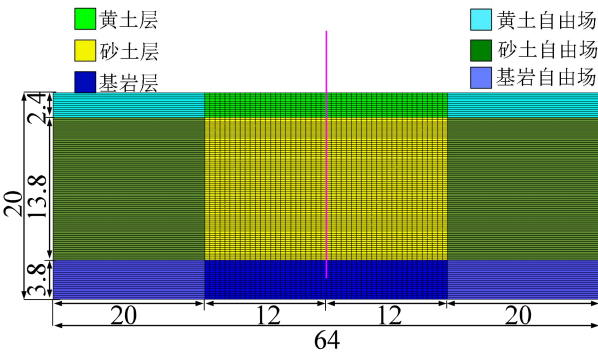


图 1 桩基数值计算模型(尺寸单位: m)

表 1 土层材料参数

	冻结黄土	常温黄土	砂土
密度/g/cm ³	1.80	1.75	1.55
剪切模量/MPa	98.14	7.18	12.40
体积模量/MPa	485	33.5	150
摩擦角/°	/	25	35
黏聚力/kPa	/	25	/
峰值剪应变	0.1	0.1	0.1
有效围压/kPa	100	100	100

表 2 基岩及桩基材料参数

	密度/g/cm ³	弹性模量/MPa	泊松比	直径/m
基岩	2.1	3.0×10 ⁴	0.35	/
桩基	2.0	2.85×10 ⁴	0.33	1.8

2.2 地震波选取

依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)^[8], 以地震波峰值加速度(PGA)为强度指标, 筛选了符合条件的地震波。目标与所选反应谱如图 2 所示。

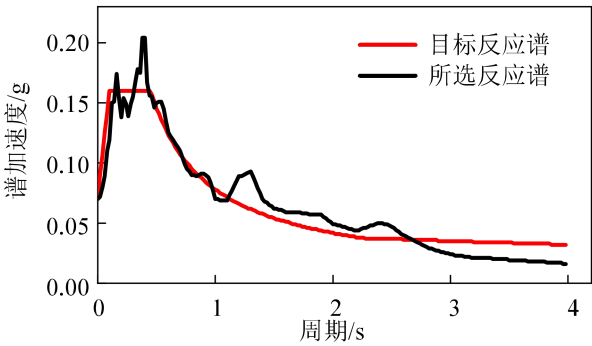


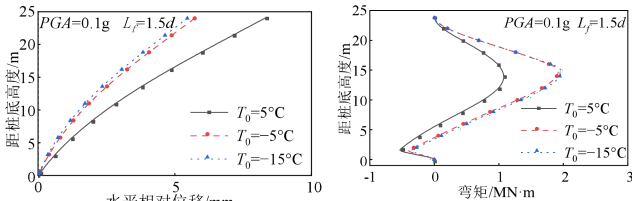
图 2 目标与所选反应谱

3 影响因素分析

在此基础上, 采用单因素控制变量法开展分析: (1) 5℃、-5℃、-15℃三种地表温度下的动力响应; (2) 0.5d、1d 与 1.5d 三个冻土层厚度下的动力响应; (3) 调整 PGA 为 0.1g、0.2g 和 0.4g 三个强度下的动力响应。

3.1 地表温度的影响

通过计算得到 PGA 为 0.1g, 冻土层厚度 L_f 为 1.5d 下地表温度 T_0 为 5℃、-5℃和-15℃时对桩基动力响应特性的影响, 如图 3 所示。



(a) 桩身水平位移 (b) 桩身弯矩

图 3 不同地表温度下桩基动力响应

由图 3 可知, 与 $T_0=5℃$ 相比, $T_0=-5℃$ 和 $T_0=-15℃$ 对应的桩顶水平位移分别减小 30.90% 和 34.16%, 最大弯矩增幅分

别为78.48%和82.69%。这表明冻土虽能有效约束桩身位移，但会引起局部弯矩突变，从而增加桩身脆性破坏的风险。

3.2 冻土层厚度的影响

同理，计算得到PGA为0.1g，地表温度 T_0 为 -10°C ，冻土层厚度 L_f 为 $0.5d$ 、 $1d$ 与 $1.5d$ 时对桩基动力响应特性的影响，如图4所示。

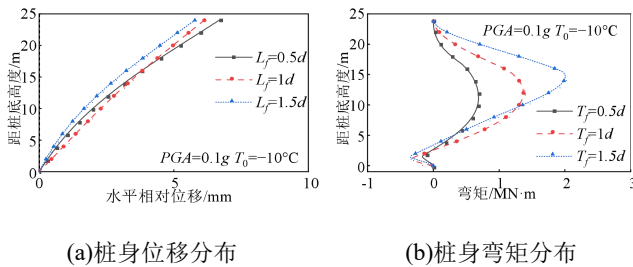


图4 不同冻土层厚度下桩基动力响应

由图4可知，与 $T_f=0.5d$ 相比， $T_f=1d$ 和 $T_f=1.5d$ 的桩顶水平位移分别减小8.32%和13.52%，最大弯矩分别增大99.31%和191.69%。这表明冻土层厚度增加导致侧向约束增强，从而增大桩身峰值弯矩，进而提高桩身的破坏风险。

3.3 不同PGA的影响

同理，计算得到冻土层厚度 L_f 为 $1.5d$ ，地表温度 T_0 为 -10°C ，PGA为0.1g、0.2g与0.4g时对桩基动力响应特性的影响，如图5所示。

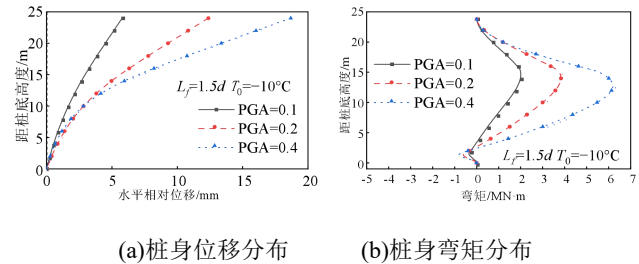


图5 不同PGA下桩基动力响应

由图5可知，相较于PGA=0.1g，PGA=0.2g和PGA=0.4g的桩顶水平位移增幅分别为113.81%和222.81%，桩身最大弯矩分别增大91.10%和208.77%。这表明地震强度的提升会使桩周土体发生塑性屈服，从而增强桩身的动力特征，进而显著增加桩身的破坏风险。

4 结论

本文依托G341线白银至中川段桥梁基础工程，通过建立考虑季节性冻土的桩-土非线性动力数值模型，分析了不同地表温度、冻土层厚度及地震峰值加速工况下，主要结论如下：

- (1) 随着地表温度从 5°C 降至 -15°C ，桩顶水平位移减小了34.16%，桩身最大弯矩增大了82.69%。原因在于土体冻结后对桩基的约束明显加强。
- (2) 随着冻土层厚度由 $0.5d$ 增至 $1.5d$ ，桩顶水平位移降幅为13.52%，桩身最大弯矩却增幅为191.69%。原因在于冻土层厚度增强了侧向约束。
- (3) 当PGA由0.1g提高至0.4g时，桩顶水平位移与最大弯矩分别增长了222.81%和208.77%。原因在于地震强度的提升会加剧桩身的响应特征。

参考文献:

- [1] 张军辉,曾宪璋,高峰,等.换填垫层对多年冻土地基水热分布状态的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(2):674-687.
- [2] 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.
- [3] 刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(5):1334-1348.
- [4] Zhang Y Z,Liu W L,Wang J Z,et al.Experimental study on frost heave characteristics and micro-mechanism of fine-grained soil in seasonally frozen regions[J].Cold Regions Science and Technology,2023,216(4):103990.
- [5] 尹平保,聂道流,杨朝晖,等.斜坡基桩p-y曲线及水平承载计算方法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):996-1003.
- [6] 尹平保,杨铠波,杨朝晖,等.考虑温度和冻融循环的基桩水平承载特性研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):115-124.
- [7] Yang Z.,Shen F.,Yin P.,et al.A new approach for improving lateral performance of pile foundations in seasonally frozen regions[J].Cold Regions Science and Technology,2023,207(3):103778.
- [8] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗震设计规范:JTG/T2231-01—2020[S].北京:人民交通出版社,2020.