

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0072

ZHANG Yibo, ZHANG Xiyin, LIU Youqian, et al. Effect of permafrost degradation on seismic vulnerability of bridge pile foundations along Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3):953-965. [张益舫, 张熙胤, 刘有乾, 等. 多年冻土退化对青藏铁路桥梁桩基础地震易损性的影响[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3):953-965.]

多年冻土退化对青藏铁路桥梁桩基础 地震易损性的影响

张益舫¹, 张熙胤¹, 刘有乾², 于生生¹, 马华军¹, 王万平¹, 管嘉达¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国铁路青藏集团有限公司, 青海 西宁 810000)

摘 要: 在青藏高原多年冻土退化趋势明显及地震活动频发的背景下, 为研究多年冻土退化对青藏铁路桥梁桩基础地震易损性的影响, 建立了桥梁桩基础-冻土相互作用有限元计算模型, 并通过拟静力模型试验验证了模型的合理性。考虑多年冻土退化效应的影响, 以桩基础曲率延性比为损伤指标, 以地面峰值加速度 PGA 为地震动强度参数, 并选取了符合场地特征的 80 条地震波, 对不同多年冻土活动层厚度和轴压比下的原型桥梁桩基础进行了非线性地震损伤分析。拟静力试验和数值模拟结果表明: 地震作用下桥梁桩基础顶部破坏严重, 是整个桥墩-桩-土体系的薄弱部位; 随着多年冻土活动层厚度的增加 (退化程度加剧), 周围土体对桩基础的约束减弱, 桩身的最大曲率呈减小趋势, 从而降低了地震作用下桥梁桩基础的破坏概率, 但墩顶位移却有所增大, 导致地震过程中落梁风险增加; 而随着桥墩轴压比的增大, 桩身最大曲率明显增加, 多年冻土区桥梁桩基础的地震易损性显著增加。考虑到桥梁桩基础破坏后修复难度较高, 因此多年冻土退化背景下青藏铁路桥梁抗震性能评估还需考虑高桥墩轴压比变化对桩基础地震易损性产生的不利影响。

关键词: 多年冻土退化; 桥梁桩基础; 地震易损性; 拟静力试验; 有限元分析

中图分类号: TU375; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)03-0953-13

0 引言

近年来随着全球气候变化, 青藏高原年平均气温上升趋势明显, 导致了多年冻土的显著退化^[1]。研究发现, 随着多年冻土退化和活动层厚度增加, 包括青藏铁路在内的多年冻土区基础设施破坏风险加剧。青藏高原同时属于大陆地质构造活动较强烈地区, 地震活动相当频繁, 且研究表明该区域未来发生强震的可能性仍然较大^[2]。因此, 多年冻土退化背景下青藏铁路桥梁工程面临着更加严峻的地震安全隐患。考虑到青藏高原多年冻土退化的必然性和破坏性地震发生的可能性, 分析多年冻土退化对青藏铁路桥梁抗震性能的影响, 对未来青藏铁路桥梁工程地震安全性评估及抗震加固具有

重要的理论指导意义。

青藏铁路桥梁工程设计时大量采用了桩基础形式^[3], 青藏铁路建成通车后的早期阶段, 吴志坚等^[4-5]针对青藏铁路桥梁桩基础的地震响应特征开展了研究, 结果表明多年冻土区桩基础的地震响应对周围冻土的温度变化较为敏感, 冻土温度升高会导致桩-土之间出现明显的不稳定滑移, 影响桩基础的稳定性。之后一段时间李永波等^[6-7]提出了改进的冻土-桩基动力相互作用非线性反应分析模型, 并研究了冻土融化深度、行波效应及碰撞效应对多跨简支桥梁结构地震响应的影响。近年来, 本课题组通过拟静力试验探讨多年冻土区铁路桥梁桩基础地震破坏特征及桩-冻土相互作用机理, 认为在多年冻土区桩基础桥梁抗震设防中应当充分

收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2023-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068045); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(P2021G047)资助

作者简介: 张益舫, 硕士研究生, 主要从事冻土区桥梁抗震研究. E-mail: 1497749212@qq.com

通信作者: 张熙胤, 教授, 主要从事寒区工程防灾减灾研究. E-mail: zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

考虑活动层的季节性冻融变化及多年冻土层的状态^[8-11]。地震易损性分析能够从概率角度量化桥梁抗震性能,既可以反映地震动强度与结构破坏程度关系,也可以为确定结构薄弱环节、判断失效路径提供可靠依据,进而预测桥梁结构体系所遭受的地震潜在破坏^[12-13]。近年来,部分学者在进行桥梁结构地震易损性分析时开始关注桩-土相互作用对其产生的影响^[14-16]。而在多年冻土区桥梁工程中,冻土的存在及状态变化会显著改变桩-土相互作用过程^[17],给冻土区桥梁桩基础地震易损性分析带来不确定性。

为了探究多年冻土退化对青藏铁路桥梁桩基础地震易损性的影响,本文建立了桩-冻土相互作用有限元计算模型,并通过拟静力模型试验验证了模型的合理性。首先对桩基础截面进行弯矩-曲率分析,并确定采用曲率延性比作为桩基础的损伤指标,然后选取符合场地特征的80条地震波,考虑多年冻土退化和轴压比变化,对青藏铁路桥梁桩基础进行非线性时程分析,获得桩基础在地震作用下的动力响应和损伤特征,以此构建桩基础的地震易损性曲线,从而对多年冻土区桥梁桩基础的地震损伤状态和抗震性能进行评估。

1 桥梁桩基础拟静力试验

1.1 试验设计

选取我国青藏铁路桥梁中典型的高桩承台基础为研究对象,采用1:8的缩尺比制作模型。桥墩截面的长和宽分别为510 mm和350 mm,墩高为1 000 mm;桩基截面直径为190 mm,桩长1 600 mm,混凝土强度等级为C30,桥墩模型轴压比为4%。桩基础桥墩具体尺寸及配筋构造如图1所示。

本文采用课题组自主设计的钢制模型箱,其尺寸为2.5 m(长)×2.5 m(宽)×2 m(高),通过采用内壁设置柔性材料的方式减小钢制模型箱的边界效应。试验土体选择容重 $\gamma_s=18 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 的粉质黏土,土体含水量控制范围为16%~18%,干密度控制范围为 $1.8\sim 2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,每填20 cm进行分层夯实。模型土体在距地表约0.5 m以内为融土,以下为多年冻土层,通过在土体中埋置冷却管并连接制冷循环机实现土体的冻结,本次试验温度随土体深度变化曲线如图2所示,试验加载系统三维图如图3所示。试验时在墩顶施加低周水平往复荷载,加载时采用位移控制,在20 mm之前使用2 mm幅值加载,在

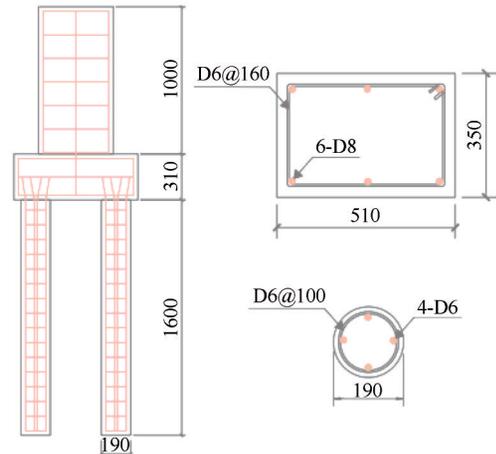


图1 桥墩模型尺寸及配筋构造(单位:mm)
Fig. 1 Bridge pier model size and reinforcement structure (unit: mm)

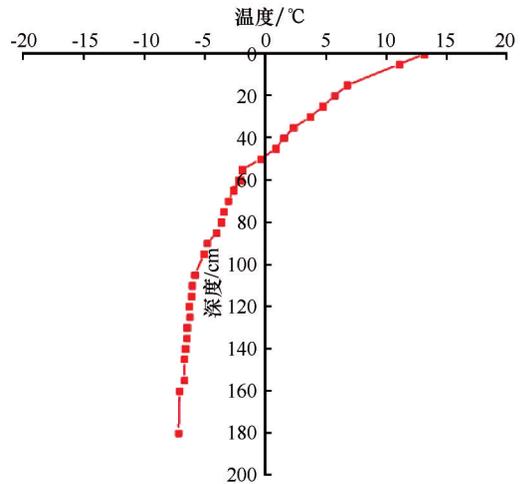


图2 土体温度分布曲线
Fig. 2 Soil temperature distribution curve

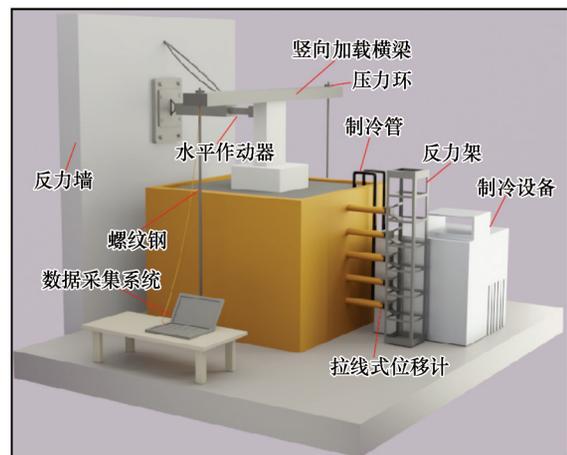


图3 试验加载系统三维图
Fig. 3 The 3D diagram of test loading system

20 mm之后采用5 mm幅值加载,试验加载幅值如图4所示。

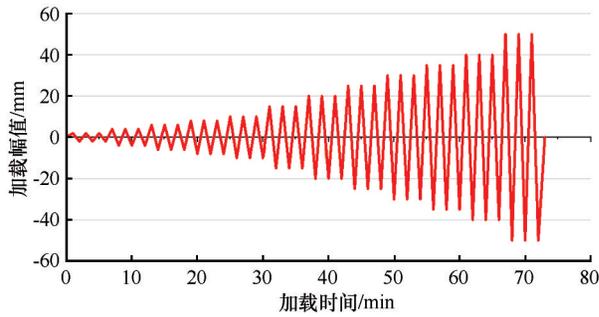


图4 试验加载幅值

Fig. 4 Test loading amplitude

1.2 模型破坏特征分析

试验结束后拆除模型箱一侧的钢板并挖出里面的土体,发现桥墩未发生破坏,但可以明显看到多年冻土中桩基础的裂缝,多年冻土中桩基础的裂缝分布如图5所示。一条主裂缝出现在承台底部以下约 $0.5D\sim 0.7D$ 处(D 为桩基直径);另一条轻微裂缝出现在承台底部下方约 $2.1D$ 处,在桩基础上部形成塑性铰,混凝土被压碎,钢筋发生屈服。文献[18]与本文采用相同的模型尺寸,但所填土体都为融土,得出在距承台底部 $0.6D$ 处有宽度较小的裂缝,桩身开裂区集中在桩-土交界面下 $1.5D\sim 2.0D$ 处,且裂缝出现的位置全部在土面以下。因此,多年冻土层对铁路桥梁桩基础地震破坏特征影响显著,桩基顶部发生了较严重的破坏,是桩-冻土相互作用的脆弱位置,在以后类似工程设计时应引起注意。

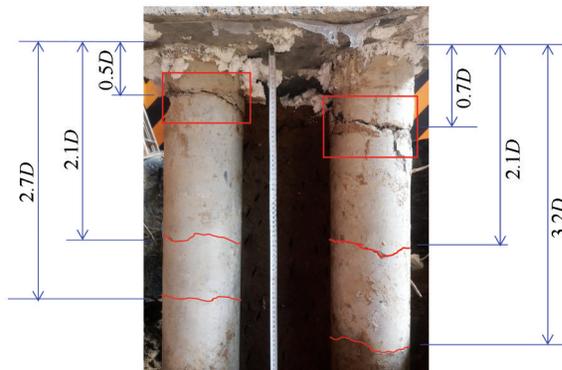


图5 桩基础在冻结条件下的裂缝分布

Fig. 5 Crack distributions of the pile foundations in frozen condition

1.3 模型滞回曲线

桩-冻土相互作用体系的滞回曲线如图6所示。开始加载的小位移阶段,墩顶荷载随着加载位移的增大成线性增长,表明桩-冻土体系均处于弹性阶

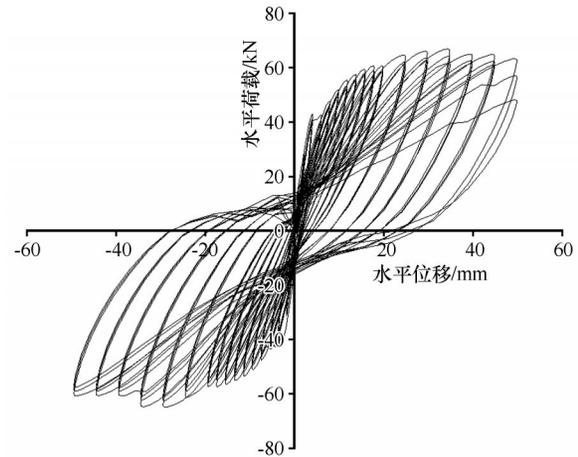


图6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves

段;随着加载位移增大到一定程度后,墩顶荷载近似成水平变化,表明桩-冻土体系逐渐进入塑性阶段;在加载后期,墩顶荷载值开始减小,表明桩-冻土体系破坏较为严重,但出于试验人员安全考虑,并未加载到极限状态。

2 桩-冻土相互作用有限元计算模型

2.1 桩基础桥墩有限元模型

采用MIDAS CIVIL进行计算分析,按照拟静力试验模型建立有限元模型,桩基础和桥墩均采用梁单元,混凝土采用Mander本构模型,钢筋采用双折线本构模型,混凝土和钢筋材料的模型参数分别如表1和表2所示。在地震反应分析时,需考虑桥墩和桩基础的非线性,以便分析其在地震中的损伤特性,在模拟时需给其分配纤维铰。由单柱墩塑性铰长度公式计算得桥墩墩底塑性铰长度约为18 cm,考虑到地震作用下桩基础塑性铰长度受到周围土层的影响,在建模过程中将纤维铰设置在桩基础全部长度范围内,其具体数值通过软件自动计算。模型计算时考虑的荷载有结构自重、墩顶荷载及地震荷载,地震荷载通过时程函数的形式添加到地面加速度,在桩身上添加土弹簧单元来对桩基础桥墩施加约束,选取位于II类场地的缩尺后的桩基础重力式桥墩进行计算分析。

2.2 桩-冻土相互作用的模拟

为了模拟桩-土相互作用,沿桩身按图7所示每隔一定深度设置一个 $p-y$ 弹簧和 $t-z$ 弹簧,桩底设置 $q-z$ 弹簧。模型中,冻土 $p-y$ 弹簧为双向无拉力三段屈服弹簧,融土 $p-y$ 曲线参考美国API规范^[19],多年冻土退化时根据活动层厚度变化来表征。

表1 混凝土材料的模型参数

Table 1 Model parameters of the concrete material

材料	弹性模量 E_c /MPa	最大抗压应力 f_c /MPa	屈服应变 ε_{cv}	最大压应力对应的应变 ε_0	最大抗拉应力 f_t /MPa
无约束混凝土	2.74×10^4	30.00	0.0014	0.0020	0
约束混凝土	2.74×10^4	30.97	0.0015	0.0023	0

表2 钢筋材料的模型参数

Table 2 Model parameters of the reinforcement material

材料	弹性模量 E_s /MPa	屈服强度 f_y /MPa	应变硬化系数 b
钢筋	2×10^5	335	0.001

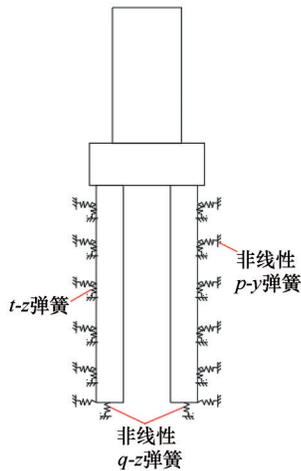


图7 桩基础桥墩的有限元模型

Fig. 7 Diagram of finite element model of pile foundation pier

2.3 土弹簧参数计算

2.3.1 p-y 参数

在地震作用下,冻土对桩基础的影响超出了弹性范围,根据课题组已有研究成果^[20],建立冻土的非线性 p-y 关系,如图8所示。

其中,

$$y_m = k_m d \quad (1)$$

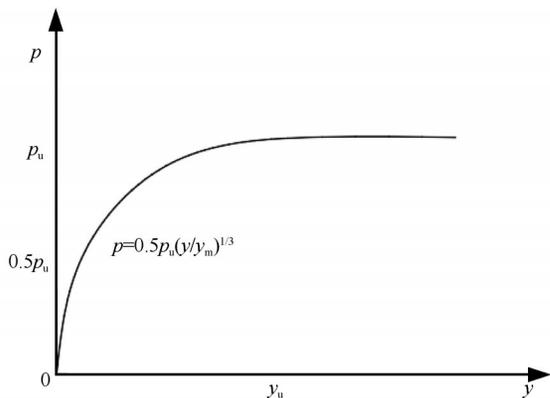


图8 冻土 p-y 曲线示意图

Fig. 8 The p-y curve of frozen soil

$$\begin{cases} p_u = q_u d (1.5 + 0.25 \frac{x_{fs}}{d}) & 0 \leq x_{fs} \leq 12d \\ p_u = 4.5 q_u d & x_{fs} > 12d \end{cases} \quad (2)$$

图8和式中: p 为桩身阻力; p_u 为冻土的极限抗阻力; y 为桩身位移; y_u 为冻土所受荷载压力为 p_u 时的桩身变形; y_m 为冻土体所受荷载为 $0.5p_u$ 时的桩身变形; k_m 为冻土极限强度50%时的应变; d 为桩基直径; q_u 为冻土的压缩强度,由文献[21]得到,如式(3)所示; x_{fs} 为地表下冻土的深度。

$$q_u = 10 \times (0.441T + 0.254T^2 + 0.019T^3) \quad (3)$$

式中: T 为冻土负温。

2.3.2 q-z 参数

桩周及桩底地基土的抗力与位移关系如图9所示,其求解公式参考日本铁路工程抗震设计规范^[22]。图中: R_t 为单桩最大周边承载力; R_p 为单桩标准桩尖承载力; K 为弹性系数。

桩侧设计剪切地基反力系数及桩侧设计剪切弹性系数分别如式(4)和式(5)所示。

$$k_{sv} = f_{rv} (0.09aE_0 D^{-3/4}) \quad (4)$$

$$K_{sv} = k_{sv} U \Delta l \quad (5)$$

式中: k_{sv} 和 K_{sv} 分别为桩侧设计剪切地基反力系数($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)和桩侧设计剪切弹性系数($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); f_{rv} 为地基抗力系数; a 为对 E_0 计算方法的修正系数; E_0 为地基变形模量($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); D 为桩径(m); U 为桩的周长(m); Δl 为剪切弹性系数计算范围内桩的长度(m)。

$$R_t = U \sum r_i l_i \quad (6)$$

式中: R_t 为单桩最大周边承载力(kN); U 为桩的周长(m); r_i 为各土层桩的最大周边承载力($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$); l_i 为各土层的厚度(m)。

2.3.3 t-z 参数

桩尖设计竖向地基反力系数和桩尖设计竖向弹性系数分别如式(7)和式(8)所示。

$$k_v = f_{rv} (0.6aE_0 D^{-3/4}) \quad (7)$$

$$K_v = k_v A_v \quad (8)$$

式中: k_v 和 K_v 分别为桩尖设计竖向地基反力系数($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)和桩尖设计竖向弹性系数($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$); A_v 为桩尖面积(m^2)。其他符号含义同式(4)。

$$R_p = q_p A_p \quad (9)$$

式中: R_p 为单桩标准桩尖承载力(kN); q_p 为单桩标

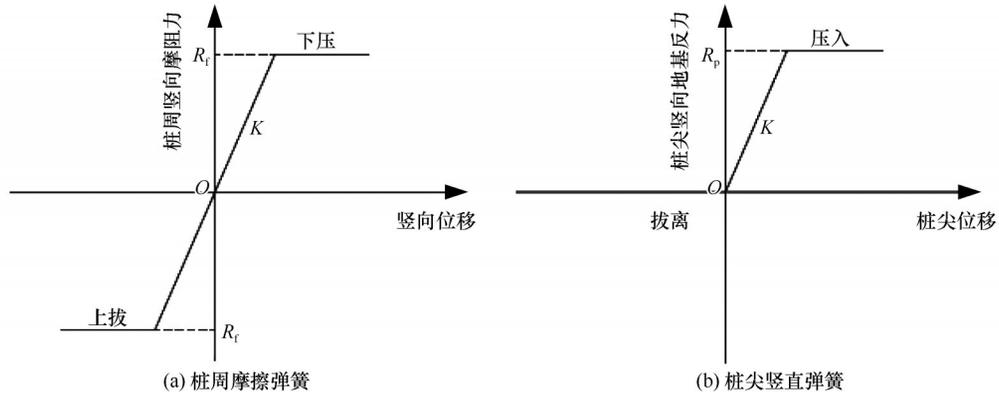


图9 竖向土弹簧骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curve of vertical soil spring: friction spring around pile (a) and pile tip vertical spring (b)

准桩尖承载力强度($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$); A_p 为单桩的桩尖面积(m^2)。

2.4 桩-冻土相互作用有限元模型验证

图10为铁路桥梁桩基础桥墩有限元模型在水平荷载下的应力分布云图,桩基础最大应力分布在距桩顶约0~25 cm处,与拟静力试验中桩基的分布区域相符合。图11为试验和模拟下桩基础桥墩的力-位移骨架曲线对比图。由骨架曲线对比分析可知:

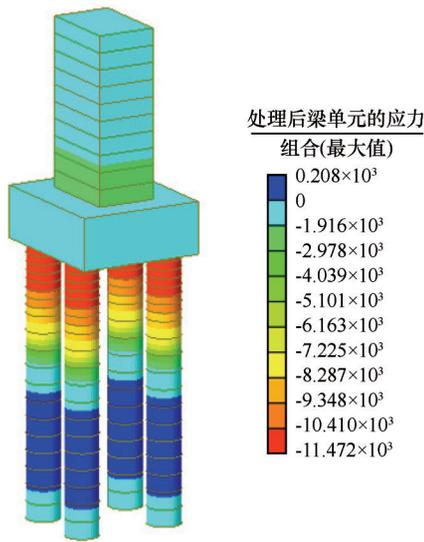


图10 铁路桥梁桩基础桥墩应力分布云图

Fig. 10 Stress distribution nephogram of pile foundation pier of railway bridge

①在弹性阶段,墩顶水平加载位移通常较小,荷载强度与加载位移通常成线性的增长关系,试验值与理论值拟合较好;

②在屈服强化阶段,随着加载位移值的逐渐增大,墩顶水平荷载增长速率不断下降,在正向加载时试验值与理论值拟合较好,反向加载由于混凝土剥落等原因,理论值比试验值较大。

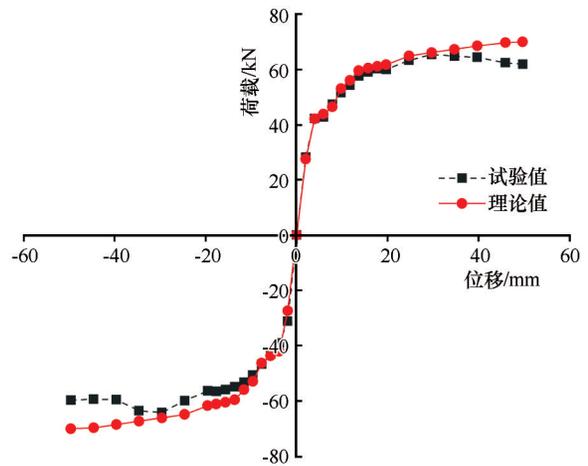


图11 试验与模拟骨架曲线对比

Fig. 11 Comparison of experimental and simulated skeleton curves

因此,建立的模型能够较合理地模拟多年冻土区桩基础桥墩在水平向的变形,为后续桩基础桥墩的抗震性能分析提供基础。

3 桥梁桩基础地震易损性分析

3.1 计算工况

为了使研究结论更好地应用于实际桥梁工程,地震易损性分析以原型铁路桥梁桩基础为研究对象,其尺寸构造和配筋如图12所示,桥墩高度为8 m,桩基长度为15 m。

表3详细介绍了不同工况的基本参数,其中工况1、工况2和工况3考虑了多年冻土活动层厚度的影响,工况3、工况4和工况5考虑了桥墩轴压比对桩基础桥墩的影响。

轴压比的定义为柱的轴向设计压力值与柱的截面积和混凝土轴心设计抗压强度值乘积的比值,其计算公式为

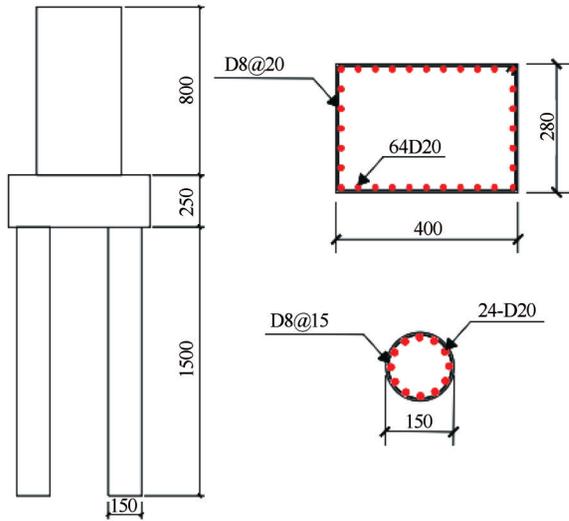


图 12 原型桩基础桥墩尺寸构造及配筋图(单位:cm)
Fig. 12 Size structure and reinforcement diagram of bridge pier of prototype pile foundation (unit: cm)

$$u = N / (A f_c) \quad (10)$$

式中: u 为墩柱的轴压比; N 为墩柱的轴向设计压力

表 3 不同工况的基本参数

Table 3 Basic parameters of different working conditions

工况编号	活动层厚度	桥墩轴压比
工况 1	1 m	4%
工况 2	2 m	4%
工况 3	3 m	4%
工况 4	3 m	5%
工况 5	3 m	6%

值(kN); A 为墩柱的截面面积(m^2); f_c 为混凝土抗压强度设计值(MPa)。

3.2 桩基础损伤指标的确定及其量化

3.2.1 桩基础损伤指标的确定

基于性能的抗震设计中,允许结构在地震动作用下可能出现各种不同程度上的功能破坏,采用传统的力学概念显然不能满足其应用设计需求,必须采用变形或能量等参数,例如位移、位移延性比和曲率延性比等,桩基的各损伤状态的描述及判别准则如表 4 所示。

表 4 桩基各种损伤状态的描述及判别准则

Table 4 Description and criterion of damage state of pile foundation

损伤状态	特征	指标
轻微破坏	外侧混凝土应变 <0.004 , 钢筋尚未屈服	$1 < \mu_\phi \leq \frac{\phi_{d2}}{\phi_{d1}}$
中等破坏	混凝土应变 <0.75 倍极限应变, 纵筋应变 <0.55 倍极限应变	$\frac{\phi_{d2}}{\phi_{d1}} < \mu_\phi \leq \frac{\phi_{d3}}{\phi_{d1}}$
严重破坏	混凝土压应变 $<$ 极限压应变, 纵筋拉应变 $<$ 极限拉应变	$\frac{\phi_{d3}}{\phi_{d1}} < \mu_\phi \leq \frac{\phi_{d4}}{\phi_{d1}}$
完全破坏	混凝土压溃且纵筋拉应变 $>$ 极限拉应变	$\mu_\phi > \frac{\phi_{d4}}{\phi_{d1}}$

注: μ_ϕ 为结构的曲率延性比; ϕ_{d1} 为钢筋的首次屈服曲率; ϕ_{d2} 为结构等效屈服曲率; ϕ_{d3} 为受压区外边缘压应变为 0.004 时的曲率; ϕ_{d4} 为结构极限曲率。

Note: μ_ϕ is the curvature ductility ratio of the structure; ϕ_{d1} is the first yield curvature of the reinforcement; ϕ_{d2} is the equivalent yield curvature of the structure; ϕ_{d3} is the curvature at the outer edge of the compression zone when the compressive strain is 0.004; ϕ_{d4} is the ultimate curvature of the structure.

3.2.2 桩基础损伤指标的量化

本文采用曲率延性系数作为桩基的损伤指标。曲率延性系数定义为截面的极限曲率与屈服曲率之比,即

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (11)$$

式中: ϕ_u 为塑性铰区的极限曲率; ϕ_y 为塑性铰区的屈服曲率。

3.2.3 桩基础截面弯矩-曲率分析

本文通过 XTRACT 软件对桥梁桩基础截面进行弯矩-曲率分析,得到桩基截面的 $M-\phi$ 关系曲线如图 13 所示。根据文献[14],桩基内部钢筋达到首次屈服时发生微小破坏,达到等效屈服时

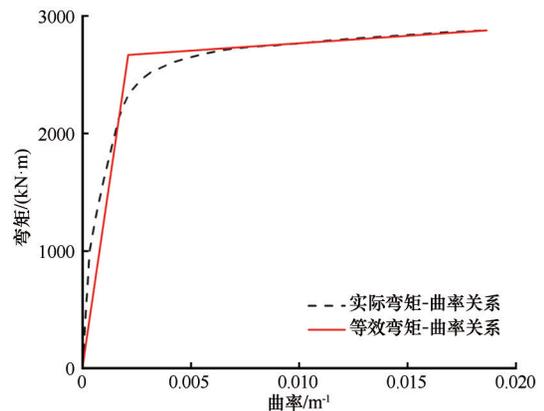


图 13 桩基础截面弯矩-曲率关系

Fig. 13 Relationship between bending moment and curvature of pile foundation section

发生中等破坏, 桩基截面混凝土最大应变达到 0.002 时发生严重破坏, 桩基截面完全破坏时发生倒塌破坏, 表 5 为不同轴压比下桩基截面损伤指标。

表 5 不同轴压比下桩基截面损伤指标

Table 5 Damage index of pile foundation section under different axial compression ratio

损伤状态	轴压比 4%		轴压比 5%		轴压比 6%	
	桩身曲率/ m^{-1}	曲率延性比	桩身曲率/ m^{-1}	曲率延性比	桩身曲率/ m^{-1}	曲率延性比
轻微破坏	0.0017	1.00	0.0017	1.00	0.0018	1.00
中等破坏	0.0021	1.25	0.0021	1.24	0.0022	1.32
严重破坏	0.0125	7.40	0.0097	5.58	0.0085	4.81
完全破坏	0.0187	11.04	0.0165	9.51	0.0147	8.33

4 概率地震需求分析

4.1 地震波的选取

在进行非线性时程分析时, 为获得地面运动输入较广的范围, 参考《铁路工程抗震设计规范》(GB 50111—2006)^[23], 从 PEER 数据库中选取符合 II 类场地特征的地震波共 80 条。采用地面峰值加速度 PGA 为地震动强度指标, 80 条地震波 PGA 范围分布如图 14 所示, 80 条地震波的反应谱图形(5% 的阻尼)如图 15 所示, 通过对大量地震动记录的反应谱求平均值, 可以看出所选地震动记录能够较好地符合所选桥址的场地特征, 进而保证多年冻土区桩基础桥墩时程分析所得出的结果具合理性。

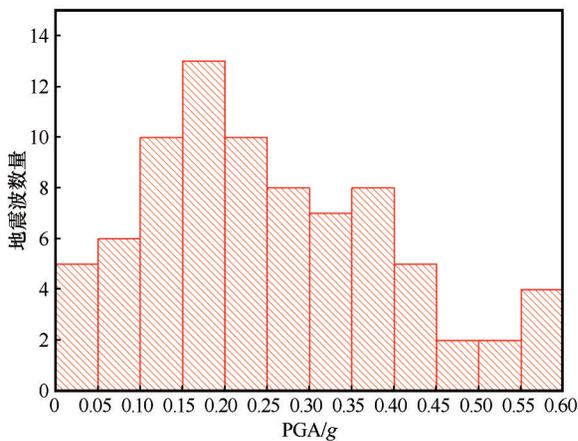


图 14 80 条地震波的 PGA 范围分布

Fig. 14 PGA range distribution of 80 seismic waves

4.2 桩基础地震响应分析

以一条地震波加速度 IDA 分析为例, 计算得到不同条件下桩基础最大曲率如图 16 所示, 不同条件下墩顶最大位移如图 17 所示。随着地面峰值加速度 PGA 的增大, 桩基最大曲率和墩顶最大位移都有显著增长, 在进行桩基础易损性分析时可以选用

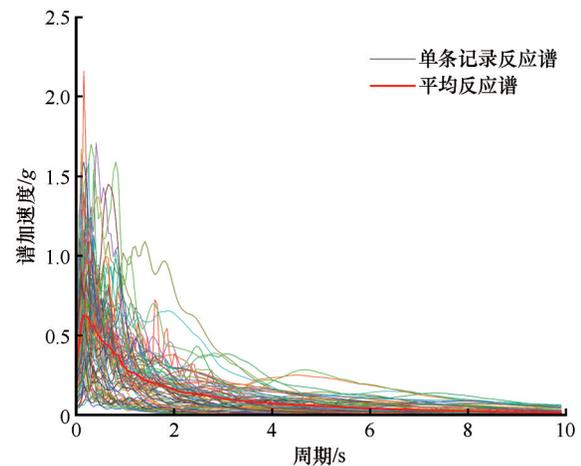


图 15 80 条地震波的反应谱图形(5% 的阻尼)

Fig. 15 Response spectrum graph of 80 seismic waves (5% damping)

PGA 参数作为冻土地质中地震强度指标。随着多年冻土活动层厚度的增大, 桩基最大曲率逐渐减小, 且在 PGA 较大时变化明显, 而冻土退化后对桩基的约束能力变弱, 墩顶最大位移逐渐增大; 随着轴压比的增大, 桩基最大曲率和墩顶最大位移都呈增大趋势。

5 桩基础的地震易损性分析

5.1 理论易损性曲线的建立

易损性曲线横坐标为地震强度指标, 纵坐标为结构反应超过规定破坏极限状态的概率的一种曲线^[24], 这种超越概率可用下式表示^[25]。

$$P_f = P\left(\frac{S_d}{S_c} \geq 1\right) \quad (12)$$

式中: P_f 为超过某一极限状态的概率; S_d 为结构的地震需求; S_c 为结构的能力。

由可靠度理论, 通常假定结构能力 S_c 和结构需求 S_d 服从两参数的对数正态分布。于是有

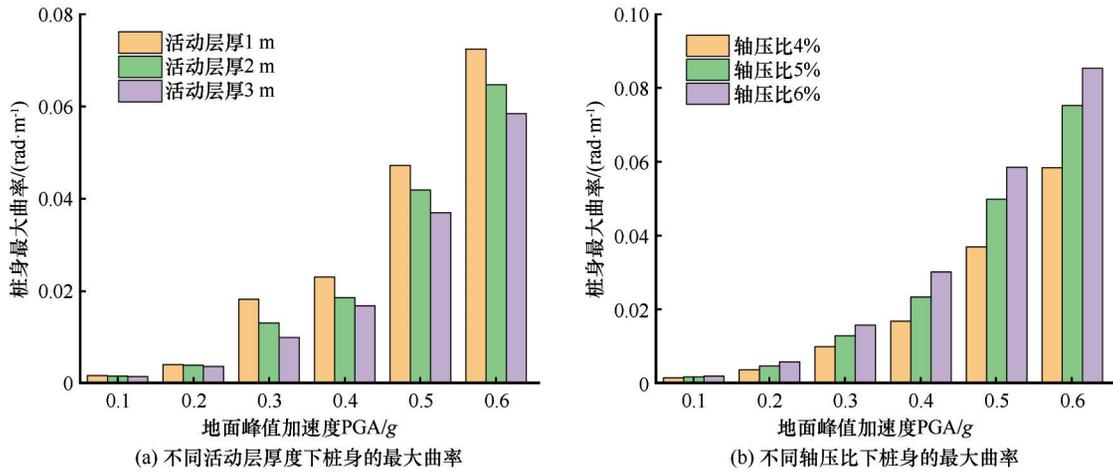


图 16 不同条件下桩身的最大曲率

Fig. 16 Maximum curvature of pile under different permafrost active layer thickness (a) and different axial compression ratio (b)

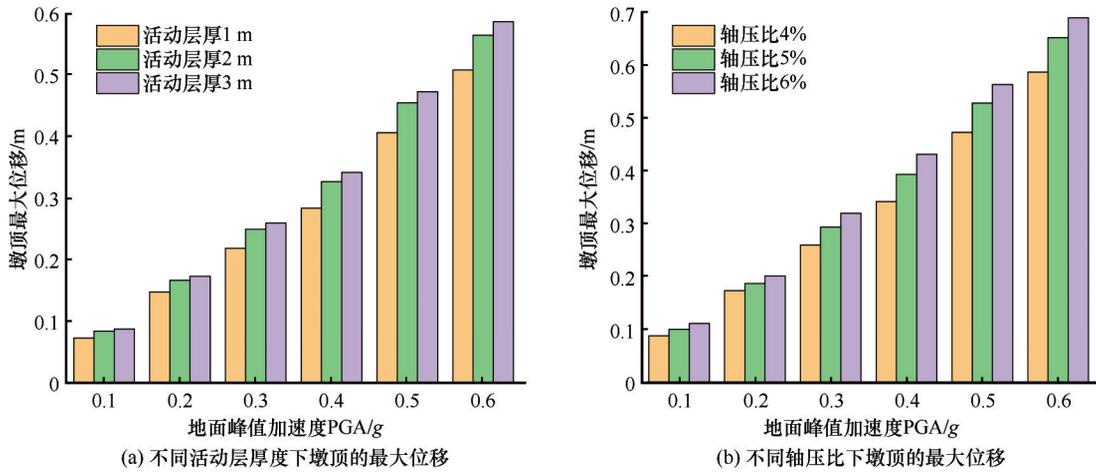


图 17 不同条件下墩顶的最大位移

Fig. 17 Maximum displacement of pier roof under different permafrost active layer thickness (a) and different axial compression ratio (b)

$$P_r = \Phi\left(\frac{\ln(\mu_d/\mu_c)}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right) \quad (13)$$

Cornell 等^[26]假定结构需求参数的均值 μ_d 与地震强度参数 IM 两者之间存在指数关系, 整理后的易损性函数为

$$P_r = \Phi\left(\frac{\ln a + b \ln(\text{IM}) - \ln \mu_c}{\sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2}}\right) \quad (14)$$

式中: μ_d 为结构地震需求的均值; μ_c 为结构抗震能力的均值; β_d 为结构地震需求的对数标准差; β_c 为结构抗震能力的对数标准差; a, b 为常数。

将地震波样本算得的桩基最大曲率延性比的对数 $\ln \mu_\phi$ 和其相对应的 PGA 的对数进行最小二乘曲线拟合, 可以得到不同活动层厚度下多年冻土区桩基的拟合结果。

活动层厚度 1 m 桩基的拟合曲线方程为

$$\ln \mu_\phi = 1.2144 \ln(\text{PGA}) + 2.2741 \quad (15)$$

以工况 1 (活动层厚度 1 m, 轴压比 4%) 的桩基地震易损性曲线为例, 如图 18 所示。桩基在各破坏状态下的破坏概率随着 PGA 的增大而增大, 轻微破坏与中等破坏的概率随着 PGA 的增加逐渐接近, 表明桩基的破坏情况易从轻微破坏发展成中等破坏, 当 PGA 为 0.3g 时, 桩基才开始出现严重破坏和完全破坏, 且 PGA 为 0.6g 时, 桩基发生完全破坏的概率为 6.74%, 表明桩基具有良好的抗震性能, 不容易发生完全破坏。

5.2 多年冻土活动层厚度变化的影响

活动层厚度 2 m 桩基的拟合曲线方程为

$$\ln \mu_\phi = 1.1832 \ln(\text{PGA}) + 2.1048 \quad (16)$$

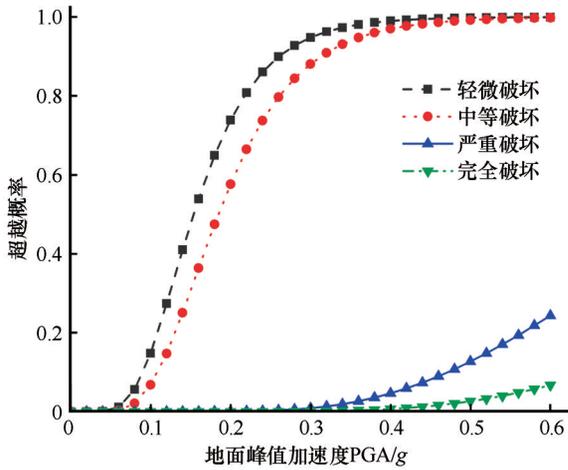


图 18 工况 1 下桩基易损性曲线

Fig. 18 Pile foundation vulnerability curve under Working Condition 1

活动层厚度 3 m 桩基的拟合曲线方程为

$$\ln \mu_{\phi} = 1.1683 \ln(\text{PGA}) + 1.9797 \quad (17)$$

不同多年冻土活动层厚度下桩基的地震易损性曲线如图 19 所示。当多年冻土活动层厚度增加时,桩基础在不同破坏状态下的超越概率均有所降低。当 PGA 为 0.6g 时,相比于活动层厚度为 1 m 时的桩基础,活动层厚度为 2 m 时的桩基础在严重破坏和完全破坏下的破坏概率分别降低了 8.53% 和 3.16%,活动层厚度为 3 m 时的桩基础在严重破坏和完全破坏下的破坏概率分别降低了 13.54% 和 4.66%,桩基发生完全破坏的概率变化较小且其值较低。表明随着多年冻土活动层厚度增加,即多年冻土退化,降低了桩基在地震作用下的破坏概率,特别是在严重破坏情况下降低较多。

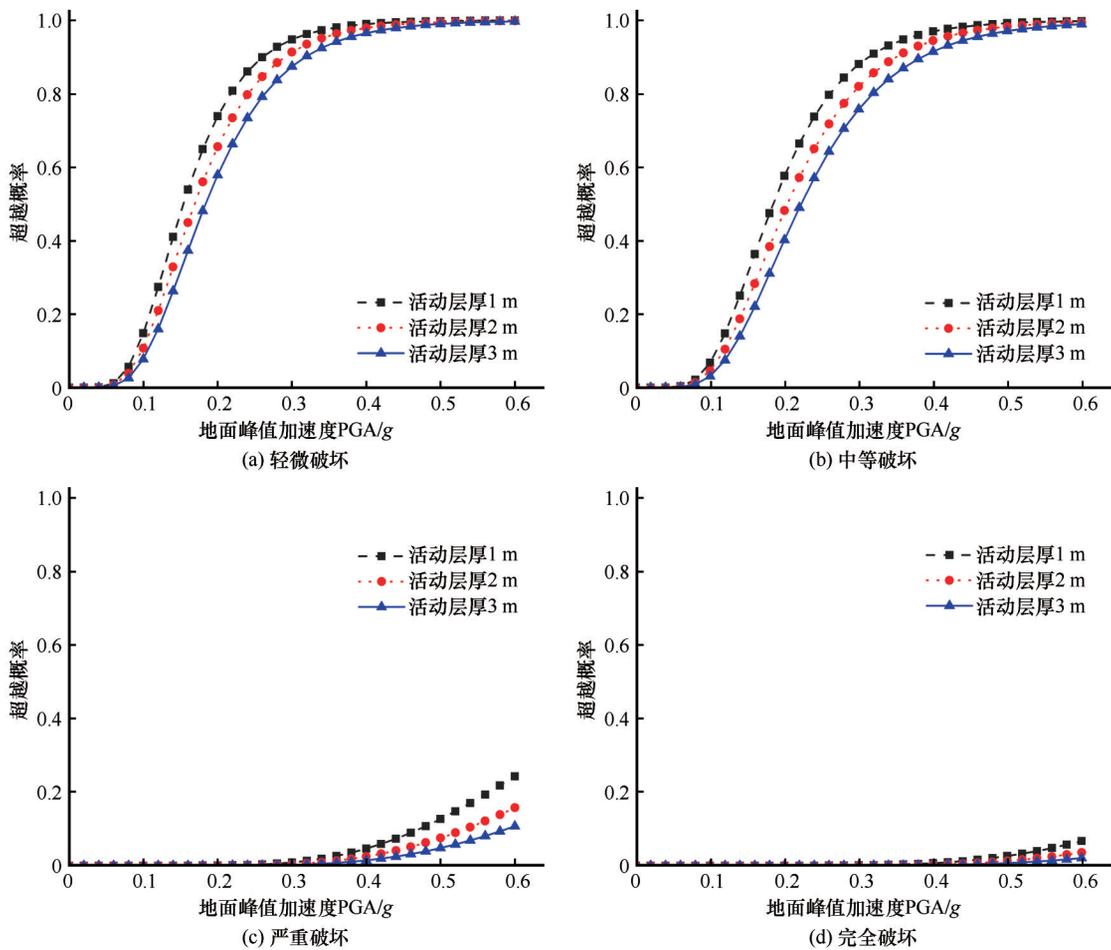


图 19 不同多年冻土活动层厚度下桩基础的地震易损性曲线

Fig. 19 Seismic vulnerability curves of pile foundation under different permafrost active layer thicknesses: slight damage (a), moderate damage (b), severe damage (c) and complete damage (d)

5.3 轴压比变化的影响

轴压比为 5% 时桩基的拟合曲线方程为

$$\ln \mu_{\phi} = 1.1952 \ln(\text{PGA}) + 2.2183 \quad (18)$$

轴压比为 6% 时桩基的拟合曲线方程为

$$\ln \mu_{\phi} = 1.2492 \ln(\text{PGA}) + 2.4246 \quad (19)$$

不同轴压比下多年冻土区桩基在四种破坏状

态下的地震易损性曲线如图20所示。随着桥墩轴压比的增大,桩基础在各破坏状态下的超越概率都在增大,其中,严重破坏和完全破坏情况下变化较为明显。当PGA为0.6g,轴压比为4%、5%和6%时,桩基础发生严重破坏的概率分别为10.80%、

41.19%和66.70%,桩基础发生完全破坏的概率分别为2.08%、9.87%和25.25%。由于桥梁桩基础一旦发生破坏,往往很难修复,因此在实际工程设计中要特别留意多年冻土活动层厚度变化和高桥墩轴压比变化对桩基产生的不利影响。

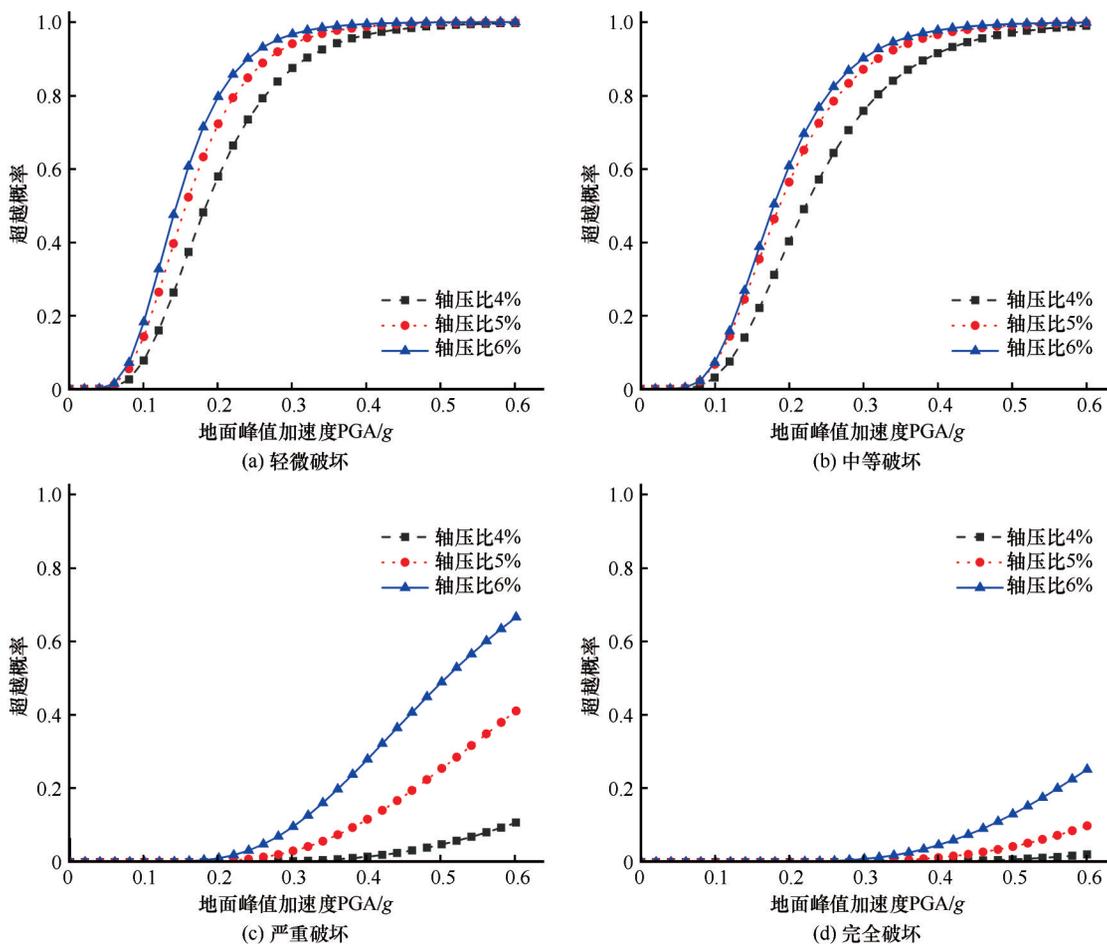


图20 不同轴压比下桩基础的地震易损性曲线

Fig. 20 Seismic vulnerability curve of pile foundation under different axial compression ratio: slight damage (a), moderate damage (b), severe damage (c) and complete damage (d)

6 结论

近年来受到全球气候变暖的影响,青藏高原多年冻土退化趋势明显,加之青藏高原地震活动频繁发生,青藏铁路桥梁工程的地震安全性备受关注。本文开展了不同多年冻土活动层厚度和轴压比条件下的青藏铁路桥梁桩基础地震易损性分析,以期为多年冻土退化背景下青藏铁路桥梁工程抗震性能评估和加固措施提供参考依据。通过研究获得的主要结论如下:

(1)拟静力试验结果表明,多年冻土层对铁路桥梁桩基础地震破坏特征影响显著,桩基顶部发生

了较严重的破坏,是桩-冻土相互作用的脆弱位置,在以后类似工程设计时应引起注意。通过桩基础Pushover分析得到的骨架曲线及桩基模型的应力分布图与拟静力试验结果对比可知,所建桩-冻土相互作用有限元模型能够较好地模拟桩基础在水平荷载下的变形和力学行为,可以用于多年冻土区桥梁桩基础地震反应分析。

(2)通过不同多年冻土活动层厚度变化下桥梁桩基础地震易损性分析发现,当多年冻土活动层厚度增加时,桩基础在不同破坏状态下的超越概率均有所降低,特别是在严重破坏情况下降低较多。具

体而言,当PGA为0.6g时,相比于活动层厚度为1m时的桩基础,活动层厚度为2m时的桩基础在严重破坏和完全破坏下的破坏概率分别降低了8.53%和3.16%,活动层厚度为3m时的桩基础在严重破坏和完全破坏下的破坏概率分别降低了13.54%和4.66%。表明由于多年冻土的退化,使得对桩基础的约束减弱,降低了桩基在地震作用下的破坏概率,但却增大了墩顶位移,容易导致地震作用下梁体位移过大而产生的落梁破坏。

(3)通过不同轴压比条件下桥梁桩基础地震易损性分析发现,随着桥墩轴压比的增大,桩基础在各破坏状态下的超越概率都在增大,其中,严重破坏和完全破坏情况下变化较为明显。具体而言,当PGA为0.6g时,当轴压比为4%、5%和6%时,桩基础发生严重破坏的概率分别为10.80%、41.19%和66.70%,桩基础发生完全破坏的概率分别为2.08%、9.87%和25.25%。考虑桥梁桩基础破坏后修复难度较高,因此多年冻土退化背景下青藏铁路桥梁抗震性能评估还需考虑高桥墩轴压比变化对桩基础地震易损性产生的不利影响。

参考文献(References):

- [1] Zhang Guofei, Nan Zhuotong, Hu Na, et al. Qinghai-Tibet Plateau permafrost at risk in the late 21st century[J]. *Earth's Future*, 2022, 10(6): e2022EF002652.
- [2] Zhang Nan, Xu Wenjun, Wang Jing, et al. Crustal movement field and strong earthquake trend in the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau based on GNSS data[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(3): 649-660. [张楠, 许文俊, 王静, 等. 基于GNSS的青藏高原东北缘地壳运动场及强震趋势研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(3): 649-660.]
- [3] Wu Shaohai. Problems in the cast-in-place pile foundation in permafrost regions of the Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(Suppl 1): 88-91. [吴少海. 青藏铁路多年冻土区钻孔灌注桩设计几个问题的探讨[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(增刊1): 88-91.]
- [4] Wu Zhijian, Che Ailan, Chen Tuo, et al. Test study and numerical analysis of seismic response of pile foundation of bridge at permafrost regions along Qinghai-Tibet Railroad[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(11): 3516-3524. [吴志坚, 车爱兰, 陈拓, 等. 青藏铁路多年冻土区桥梁桩基础地震响应的试验研究与数值分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11): 3516-3524.]
- [5] Wu Zhijian, Wang Ping, Huo Yuankun, 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. [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.]
- [6] Li Yongbo, Zhang Hongru. Study on frozen soil pile interaction model based on dynamic beam on nonlinear Winkler foundation method[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2015, 37(2): 453-459. [李永波, 张鸿儒. 基于动力BNWF法的冻土-桩相互作用模型研究[J]. *地震工程学报*, 2015, 37(2): 453-459.]
- [7] Li Yongbo, Zhang Hongru, Gao Xinjun. Seismic response analysis of MSSS bridge in permafrost including pile-soil interaction[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(11): 183-190. [李永波, 张鸿儒, 郜新军. 考虑桩-土相互作用的多年冻土区多跨简支梁桥地震响应分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(11): 183-190.]
- [8] Zhang Xiyin, Wang Wanping, Yu Shengsheng, et al. Seismic performance and influencing factors of pile foundation of bridges in permafrost regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(9): 1635-1643. [张熙胤, 王万平, 于生生, 等. 多年冻土区桥梁桩基础抗震性能及影响因素分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(9): 1635-1643.]
- [9] Zhang Xiyin, Guan Jiada, Chen Xingchong, et al. Effect of permafrost on seismic performance of railway bridge pile foundation with elevated cap[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2022, 22(11): 2241002.
- [10] Guan Jiada, Zhang Xiyin, Chen Xingchong, et al. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 199: 103581.
- [11] Zhang Xiyin, Yu Shengsheng, Wang Wanping, et al. Seismic failure mechanism and fragility of pile foundation with elevated cap of railway bridge in permafrost region[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(7): 77-89. [张熙胤, 于生生, 王万平, 等. 多年冻土区铁路桥梁高承台桩基础地震破坏机理及易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(7): 77-89.]
- [12] Guan Jiada, Chen Xingchong, Zhang Xiyin. Summary and prospect of research on seismic vulnerability of bridge structures under special complex site conditions[J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(1): 127-138. [管嘉达, 陈兴冲, 张熙胤. 特殊复杂场地条件下桥梁结构地震易损性研究现状及发展趋势分析[J]. *世界地震工程*, 2022, 38(1): 127-138.]
- [13] Li Hongnan, Cheng Hu, Wang Dongsheng. A review of advances in seismic fragility research on bridge structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 1-16. [李宏男, 成虎, 王东升. 桥梁结构地震易损性研究进展述评[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 1-16.]
- [14] Liang Fayun, Liu Bing, Li Jingru. Seismic fragility analysis of bridge pile foundation considering scour effect[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(1): 13-19. [梁发云, 刘兵, 李静茹. 考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(1): 13-19.]
- [15] Zhang Chao, Wu Chengwang, Wang Piguang. Seismic fragility analysis of bridge group pile foundations considering fluid-pile-soil interaction[J]. *Shock and Vibration*, 2020: 8838813.
- [16] Shen Yanli, Zhao Meifeng. Fragility analysis of reinforced concrete bridge piers considering the effect of pile-soil interaction[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2022, 44(5): 60-66. [申彦利, 赵美凤. 考虑桩土作用效应的钢筋混凝土桥墩易损性分析[J]. *工程抗震与加固改造*, 2022, 44(5): 60-66.]
- [17] Wang Wanping, Zhang Xiyin, Chen Xingchong, 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. [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.]

- [18] Yang Chenyin. Study on seismic behavior of pier with high pile cap considering pile-soil interaction[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021. [杨晨吟. 考虑桩-土相互作用的高桩承台桥墩抗震性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.]
- [19] Geotechnical and foundation design considerations[S]. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 2011.
- [20] Zhang Xiyin, Yu Shengsheng, Wang Wanping, et al. Nonlinear seismic response of the bridge pile foundation with elevated and embedded caps in frozen soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 161: 107403.
- [21] Li Yongbo. Seismic response analysis of grand bridge including dynamic frozen soil-pile interaction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013. [李永波. 考虑冻土-桩动力相互作用的长大桥梁地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.]
- [22] Japan Railway Technical Research Institute. Seismic design standards and explanations for railway structures[S]. Tokyo: MARUZEN Co publishing division, 1999. [日本铁道综合技术研究所. 铁道构筑物设计基准、解说设计基准及耐震设计[S]. 东京: 丸善株式会社出版事业部, 1999.]
- [23] Code for seismic design of railway engineering: GB 50111—2006[S]. 2009 ed. Beijing: China Planning Press, 2009. [铁路工程抗震设计规范: GB 50111—2006[S]. 2009年版. 北京: 中国计划出版社, 2009.]
- [24] Liu Chunguang, Qin Leilei, Zhang Shibo, et al. Performance-based seismic fragility analysis of RC bridges[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 50-58. [柳春光, 秦垒磊, 张士博, 等. 基于性能的RC桥梁地震易损性分析[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 50-58.]
- [25] Choi E, Jeon J C. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zone[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2003, 7(1): 41-51.
- [26] Cornell C, Jalayer F, Hamburger R, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128: 526-533.

Effect of permafrost degradation on seismic vulnerability of bridge pile foundations along Qinghai-Tibet Railway

ZHANG Yibo¹, ZHANG Xiyin¹, LIU Youqian², YU Shengsheng¹, MA Huajun¹,
WANG Wanping¹, GUAN Jiada¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co. Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: Permafrost degradation induced by global climate warming in Qinghai-Tibet Plateau has drawn great attention of researchers. Meanwhile, the Qinghai-Tibet Plateau is prone to frequent seismic activities in recent years. In order to study the influence of permafrost degradation on the seismic vulnerability of the bridge pile foundation along Qinghai-Tibet Railway, a pile-frozen soil interaction model was established, and its rationality was verified by the quasi-static test. The pile-frozen soil interaction model can simulate the deformation and mechanical behaviors of the bridge pile foundation under lateral loading, and thus it can be used to analyze the seismic response of bridge pile foundation in permafrost regions. Considering the effect of permafrost degradation, the curvature ductility ratio of the pile foundation was taken as the damage index, the ground peak acceleration (PGA) was taken as the ground vibration intensity parameter, and 80 seismic waves which are consistent with the site characteristics were selected for seismic vulnerability analysis. Nonlinear seismic damage analysis of the bridge pile foundation under different permafrost active layer thickness and axial compression ratio in permafrost region were carried out. The results of quasi-static test and numerical simulation showed that the top of pile foundation is the weak part of the pier-pile-soil system. It is found that when the active layer thickness increased, the damage probability of the pile foundation under different failure states decreased, especially in the case of severe damage. Specifically, when the PGA is 0.6g, compared with the pile foundation with 1 m active layer thickness, the damage probability of the pile foundation with the 2 m active layer thickness was reduced by 8.53% and 3.16% under severe damage and collapse states, respectively. The damage probability of the pile foundation with the 3 m active layer thickness was decreased by 13.54% and 4.66% under severe damage and collapse states, respectively. The results showed that the permafrost degradation weakened the soil constraint on pile foundation, then reduced the damage probability of the pile foundation under seismic action, but increased the displacement of the pier top. This will lead to the beam falling failure caused by excessive beam displacement if earthquake occurs. It can be seen that with the increase of axial compression ratio of the bridge pier, the damage probability of the pile foundation under different failure states increased, and the change was more obvious in the case of severe damage and collapse states. Specifically, when the PGA was 0.6g and the axial compression ratio was 4%, 5% and 6%, the damage probability of the pile foundation was 10.80%, 41.19% and 66.70%, respectively. Since it is difficult to repair the damaged bridge pile foundation, the seismic performance evaluation of the Qinghai-Tibet Railway bridge under permafrost degradation condition should also consider the adverse effect of the change of the axial compression ratio of the high pier on the seismic vulnerability of the pile foundation.

Key words: permafrost degradation; bridge pile foundation; seismic vulnerability; quasi-static test; finite element analysis

(责任编辑: 裴万胜)