

考虑材料冻融劣化与多年冻土退化影响效应的 桥梁桩基础抗震性能

张熙胤,于生生,王万平,文海荣

(兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:以中国青藏高原为代表的高寒高烈度地区,由冻融循环作用导致材料性能劣化和气候变暖导致的多年冻土退化问题日益严峻,给桥梁桩基础抗震性能评估带来巨大挑战。为系统研究多年冻土退化以及材料冻融劣化对桥梁桩基础抗震性能的影响,确保其合理的抗震设计,该文建立考虑多年冻土退化和材料冻融劣化的桩-冻土相互作用有限元模型,对比分析了不同因素对多年冻土区桥梁桩基础抗震性能的影响机制。研究表明:随着桥梁服役时间的增加,桩-冻土体系的水平承载力、等效刚度和耗能能力均呈下降趋势;多年冻土退化与材料冻融劣化的叠加效应对桩基础抗震性能的影响更显著,具体表现为在桥梁服役100年时,桩-冻土体系的水平承载力降至初始值的55%左右,但仅考虑多年冻土退化时,其水平承载力降至初始值的89%左右。因此,如果忽略材料冻融劣化的影响,会导致桥梁桩基础抗震性能评估结果偏不安全。在多年冻土区桥梁桩基础的抗震性能分析中,除了考虑多年冻土退化的影响,还必须充分考虑材料冻融劣化的影响。

关键词:桥梁桩基础;抗震性能;多年冻土退化;材料冻融劣化;有限元模型

中图分类号:U443

文献标志码:A

Seismic Performance of Bridge Pile Foundation Considering Effects of Material Freeze-Thaw Deterioration and Permafrost Degradation

ZHANG Xiyin, YU Shengsheng, WANG Wanping, WEN Hairong

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

Abstract: In cold and high-seismic regions, such as the Qinghai-Xizang Plateau in China, the deterioration of material properties caused by freeze-thaw cycles and permafrost degradation due to climate change have become increasingly severe, posing significant challenges for the seismic performance assessment of bridge pile foundations. To systematically investigate the impact of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration on the seismic performance of bridge pile foundations and ensure proper seismic design, a finite element model was established, considering the dual effects of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration. A comparative analysis was conducted to evaluate the influence mechanisms of various factors on the seismic performance of bridge pile foundations in permafrost regions. The results indicate that as the bridge service life increases, the horizontal bearing capacity, equivalent stiffness, and energy dissipation capacity of the pile-permafrost system all show a decreasing trend. Notably, the combined effect of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration has a more significant impact on the seismic performance of the bridge pile foundation. Specifically, after 100 years of bridge service, the horizontal bearing capacity of the pile-permafrost system reduces to approximately 55% of its initial value, whereas when only permafrost degradation is considered, the horizontal bearing capacity drops to around 89% of its initial value. Therefore, neglecting the effect of material freeze-thaw deterioration will lead to an unsafe seismic performance

收稿日期:2024-12-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52068045)

作者简介:张熙胤,男,博士,教授. Email:zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

assessment of the bridge pile foundation. In the seismic performance analysis of bridge pile foundations in permafrost regions, it is essential to consider not only the effect of permafrost degradation but also the impact of material freeze-thaw deterioration.

Keywords: bridge pile foundation; seismic performance; permafrost degradation; material freeze-thaw deterioration; finite element model

0 引言

随着全球气候变化的不断加剧,冻土区的环境正发生显著变化,尤其是青藏高原等高寒地区的多年冻土层正在逐步退化^[1-4]。这一变化不仅对自然生态造成深远影响,还对区域交通基础设施,给桥梁的结构运维安全带来严重挑战。桥梁作为关键交通基础设施,其安全性直接关系到交通运输的顺畅与人民的生命财产安全。由于冻土区特殊的地理与环境条件,桥梁桩基础在设计、施工及运营过程中面临着更加复杂的受力问题^[5],尤其在抗震性能方面,多年冻土退化与材料劣化对桥梁桩基础的影响尚未得到足够的关注和研究。

在冻土区,桩基础抗震设计需充分考虑桩-土相互作用的复杂性。研究表明:冻土层的力学性质会随负温度的变化发生显著变化^[6],进而影响桩基础的抗震性能,尤其在冻土退化或融化的过程中,桩基础的承载力和稳定性可能出现较大波动^[7]。吴志坚等^[8]、Wu等^[9]、Che等^[10]对青藏铁路高温不稳定多年冻土区的桥梁桩基础进行了地震响应分析,研究结果表明:冻土层温度对桥梁桩基础的地震稳定性起到了关键作用。随着全球气候变暖以及人类工程活动的影响,中国西部青藏高原及周边地区的多年冻土正处于加速退化之中^[11],冻土上限变化对桩基础部分的塑性铰发展及破坏模式产生显著影响,进而增加了桩基础地震损伤的不确定性^[12]。因此,在多年冻土区进行桥梁桩基础的抗震性能评估时,必须充分考虑多年冻土退化的影响。

除了多年冻土退化,季节性冻融作用也对桥梁桩基础的耐久性造成重要影响^[13]。多年冻土区活动层的季节性冻融过程导致土体温度发生剧烈波动,影响了桩基础的长期稳定性^[14]。冻融循环导致混凝土表面发生剥落,一旦保护层受损,钢筋暴露在外界环境中便易遭受锈蚀。钢筋锈蚀不仅降低混凝土的承载能力,还加速了桥梁结构的整体劣化^[15]。冻融作用还会导致混凝土内部水分结冰膨胀,产生微裂

纹,进一步加速混凝土劣化并降低其强度。随着时间推移,混凝土和钢筋的强度逐渐衰退,进而使桥梁的承载力和抗震能力显著下降。李喜梅等^[16]通过有限元分析研究了一桩柱式公路桥墩,发现钢筋混凝土材料的劣化显著降低了该桥墩的抗震性能;傅沛瑶等^[17]则建立了考虑材料劣化时变效应的公路桥墩有限元模型,采用IDA分析方法研究了桥墩的时变地震易损性,结果表明:材料劣化对纵向地震易损性的影响较横向地震易损性的影响更显著,且服役时间越长,构件的地震损伤概率越高;马玉宏等^[18]对近海桥梁的地震响应进行了分析,发现箍筋的劣化会降低桥墩截面的延性,而纵筋的劣化则使抗弯能力下降。由此可见,钢筋混凝土材料劣化对桥梁抗震性能和地震破坏程度有着显著影响。因此,充分考虑材料劣化的影响效应,有助于准确评估冻土区既有桥梁的抗震性能。

虽然已有学者研究了多年冻土退化对桥梁桩基础竖向承载性能及抗震性能的影响^[19-21],但目前鲜有研究同时关注多年冻土退化和混凝土材料冻融劣化对桩基础抗震性能的双重影响。为此,本文建立了考虑多年冻土退化和材料冻融劣化效应的桩-冻土相互作用有限元模型,系统分析了不同服役时间段内桥梁桩基础的抗震性能。该研究结果有助于准确评估全寿命周期内多年冻土区桥梁桩基础抗震性能,可为多年冻土区桥梁桩基础的抗震设计提供参考依据。

1 考虑材料劣化的多年冻土区桥梁桩基础有限元模型

1.1 桥梁桩基础有限元建模简介

为了研究多年冻土退化及材料冻融劣化对桥梁桩基础抗震性能的影响,选取了青藏高原某桥墩的桩基础作为研究对象,桥梁桩基础体系的尺寸如图1所示。分别在0年、25年、50年、75年和100年这5个时间节点,分析了桥梁桩基础的抗震性能。张中琼等^[22]基于Stefan公式预测了青藏高原多年冻土区的

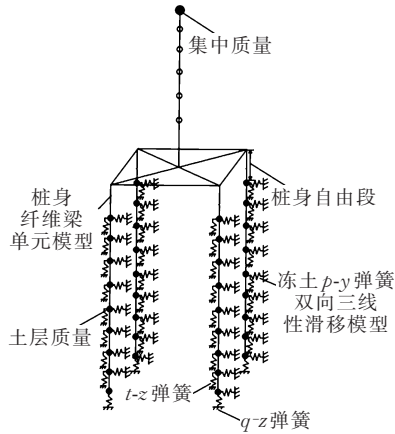


图2 桩-冻土体系非线性分析模型

Figure 2 Nonlinear analysis model of pile-permafrost system

个桩基区域分配纤维铰,其塑性区域可由软件自动计算。承台与桩基础之间的相互作用采用刚性连接来模拟。钢筋本构采用等效双线性模型(图3),混凝土本构采用Mander模型(图4)。其中,钢筋等效双线性模型参数见表2。钢筋混凝土参数、多年冻土层厚度与拟静力试验保持一致,在桥墩顶部采用静力荷载进行加载,加载制度如图5所示。模型的边界条件设置如下:在桩身每隔10 cm设置一个节点,并在每个节点上施加相应的土弹簧以模拟土体对桩基础的约束作用。

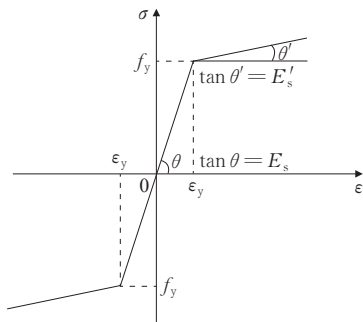


图3 钢筋等效双线性模型

Figure 3 Equivalent bilinear model for rebar

图6为数值结果与试验结果的对比。从图6可以看出:滞回曲线和骨架曲线模拟结果与试验结果吻合较好,试验所得滞回曲线的塑性变形和能量耗散在数值模拟中得到了很好的体现。桩基础在水平荷载下的应力分布如图7所示。其中, D 为桩径。从图7可以看出:桩基础的最大应力分布于距桩顶0~50 cm处,与试验中桩基的塑性区位置基本一致,总体来说该桩-冻土相互作用分析模型能较准确地模拟水平循环荷载作用下桥墩桩基础的力学行为。

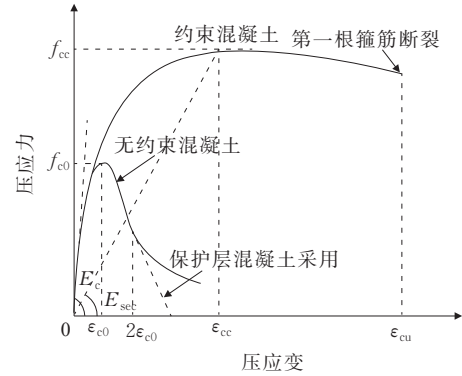


图4 混凝土Mander本构模型

Figure 4 Mander constitutive model of concrete

表2 钢筋等效双线性模型参数

Table 2 Parameters of equivalent bilinear model for rebar

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
7 800	210	0.3	335	510

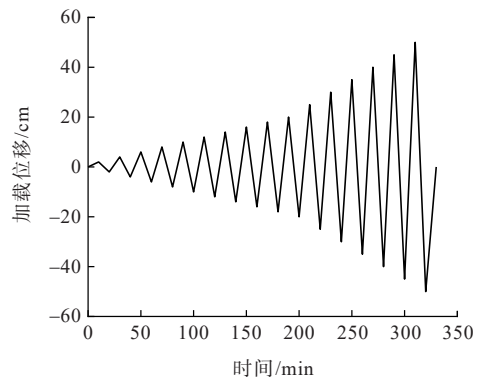


图5 模型加载制度

Figure 5 Model loading system

2 计算结果分析

2.1 滞回特性

图8展示了仅考虑多年冻土退化时,桩-冻土相互作用体系在不同服役时间段的滞回曲线。从图8可以看出:不同服役时间段的桩-冻土体系滞回曲线存在一定差异:在桥梁服役的第25年和第50年,随着水平位移的增加,桩-冻土体系的水平力呈现出先增大后减小的趋势;而在服役第75年和第100年时,桩-冻土体系的水平力随着水平位移的增加持续增大。此外,随着桥梁服役时间的增加,桩-冻土体系滞回环的面积明显减小。图9则展示了在考虑多年冻土退化和材料冻融劣化双重影响下,桩-冻土体系在不同服役时间段的滞回曲线。从图9可以看出:随

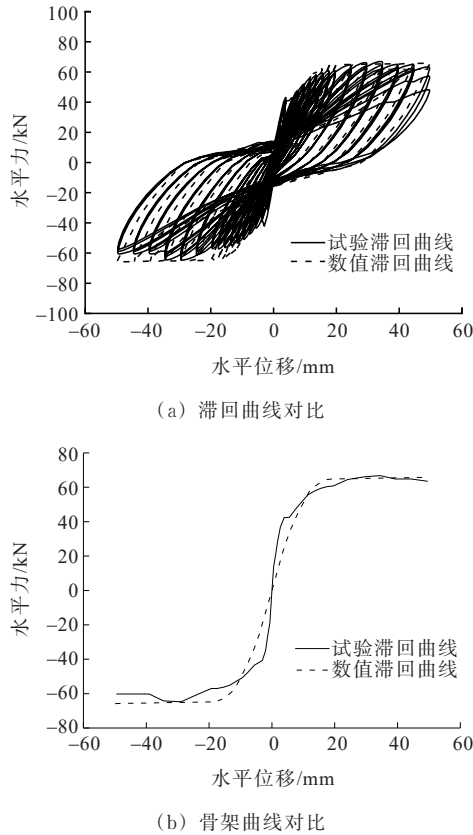


图 6 数值结果与试验结果对比

Figure 6 Comparison between numerical values and test results

随着服役时间的增加,各服役阶段的滞回曲线在形状和大小上均发生了明显变化;滞回环的捏缩效应逐渐增强,且峰值荷载与极限位移显著减小,桩-土体系的耗能能力也表现出下降趋势。这表明:材料劣化对桩-冻土体系的承载能力和耗能能力具有显著影响。因此,在对多年冻土区桥梁桩基础进行抗震性能分析时,除考虑多年冻土退化的影响外,还应充

分考虑材料冻融劣化的影响。

表 3 展示了仅考虑冻土退化时桩-冻土体系在不同服役时间段的骨架曲线特征值。

表 3 仅考虑多年冻土退化时不同服役时间段的骨架曲线特征值

Table 3 Characteristic values of skeleton curves for different service periods when considering only permafrost degradation

服役时间/年	正向加载			负向加载		
	屈服位移/cm	极限荷载/kN	位移延性系数	屈服位移/cm	极限荷载/kN	位移延性系数
0	12.50	1 147.5	3.19	12.51	1 145.8	3.20
25	13.11	1 125.6	3.04	13.12	1 125.6	3.05
50	13.35	1 102.2	2.99	13.36	1 102.5	2.99
75	13.73	1 062.1	2.88	13.79	1 065.3	2.89
100	14.31	1 024.4	2.80	14.30	1 024.1	2.80

由表 3 可知:随着桥梁服役时间的增加,桩-冻土体系的极限水平承载力逐渐下降,当桥梁服役时间达到 100 年时,桩-冻土体系的水平承载力下降至初始服役时间的 89% 左右;同时,桩-冻土体系的屈服位移增大,导致其变形能力随着服役时间的增加而下降。表 4 则展示了在同时考虑冻土退化和材料冻融劣化双重作用下,桩-冻土体系在不同服役时间段的骨架曲线特性值。由图 4 可以看出:随着桥梁服役时间的增长,桩-冻土体系的水平极限承载力呈下降趋势,并且其衰减速率随着服役时间的增加显著加快。尤其在服役时间达到 100 年时,水平承载力仅为初始服役时间的 55% 左右。此外,考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重影响时,桩-冻土体系的水平承载力远低于仅考虑多年冻土退化时的水平承载力

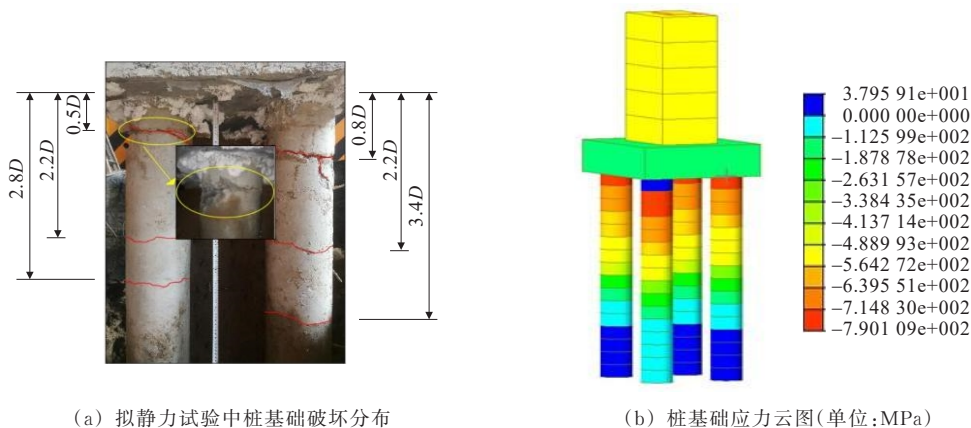


图 7 桩基础破坏特征对比

Figure 7 Comparison of pile foundation failure characteristics

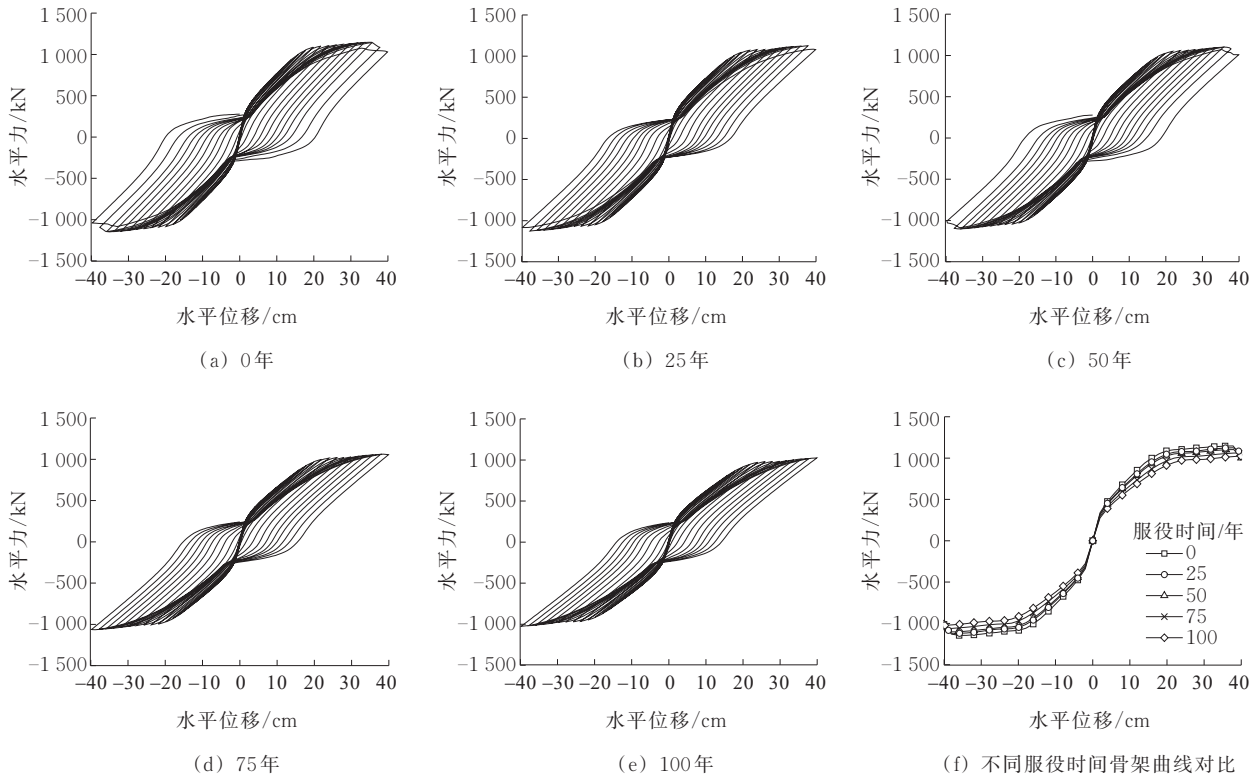


图8 仅考虑多年冻土退化时桩-冻土体系的滞回特性

Figure 8 Hysteretic characteristics of pile-permafrost system when considering only permafrost degradation

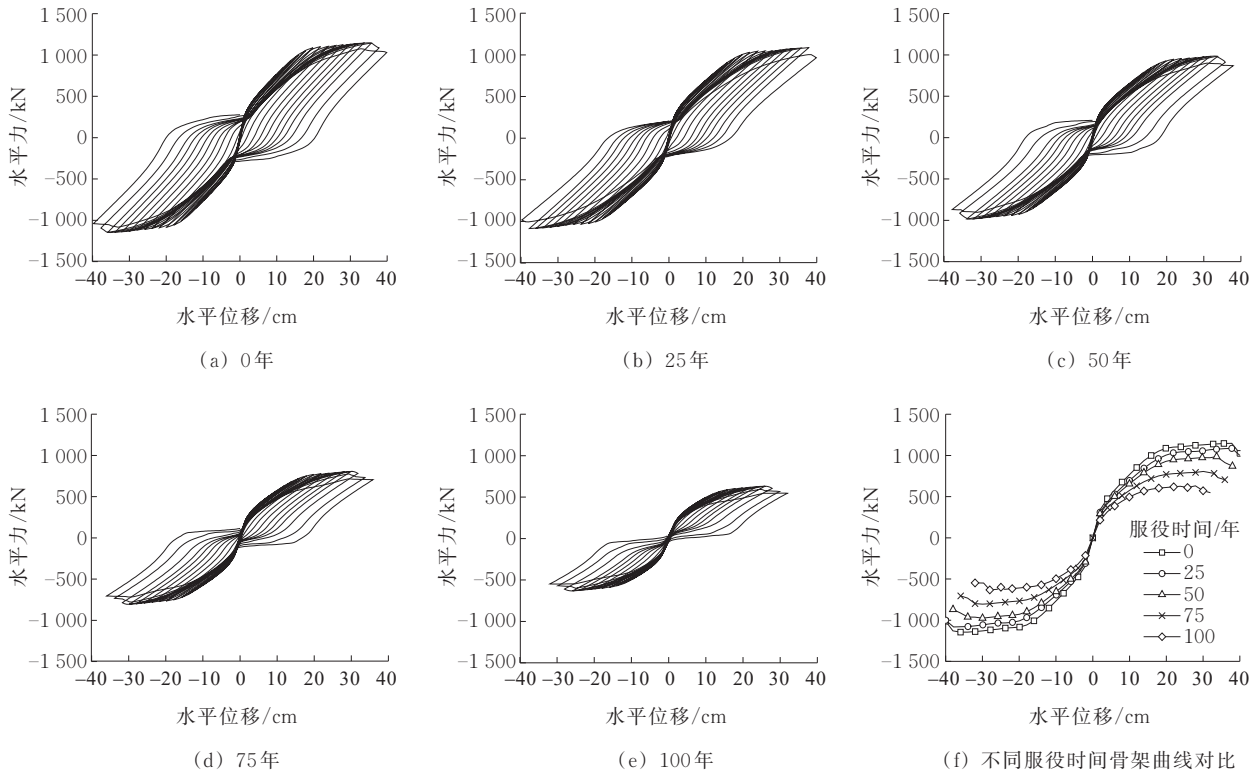


图9 考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用时桩-冻土体系的滞回特性

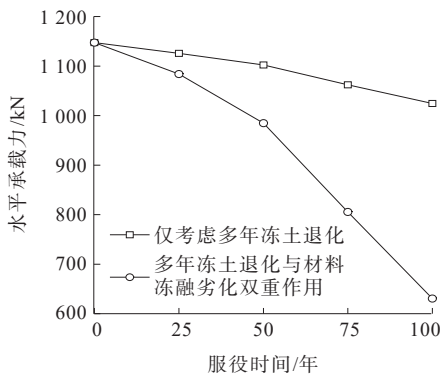
Figure 9 Hysteretic characteristics of pile-permafrost system when considering dual effects of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration

[图 10(a)]。因此,在分析多年冻土区桥梁桩基础水平承载力时,忽略材料性能劣化会导致桥梁不安全。

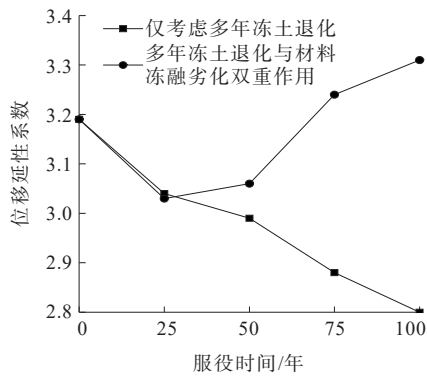
表 4 考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用时不同服役时间段的骨架曲线特征值

Table 4 Characteristic values of skeleton curves for different service periods when considering dual effects of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration

服役时间/年	正向加载				负向加载			
	屈服位移/cm	极限荷载/kN	极限位移/cm	位移延性系数	屈服位移/cm	极限荷载/kN	极限位移/cm	位移延性系数
0	12.50	1 147.5	39.92	3.19	12.51	1 145.8	39.95	3.20
25	13.20	1 084.0	39.98	3.03	13.15	1 081.8	39.94	3.04
50	12.40	984.7	37.96	3.06	12.41	984.9	38.00	3.06
75	11.06	805.4	35.86	3.24	11.05	805.8	35.90	3.25
100	9.66	630.6	31.98	3.31	9.68	632.6	31.98	3.30



(a) 桩-冻土体系水平承载力



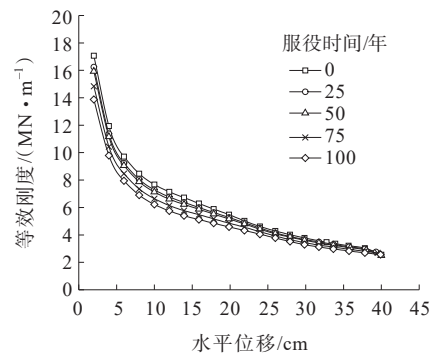
(b) 桩-冻土体系位移延性系数

图 10 不同服役时间段桩-冻土体系水平承载力及变形能力
Figure 10 Horizontal bearing capacity and deformation capacity of pile-permafrost system for different service periods

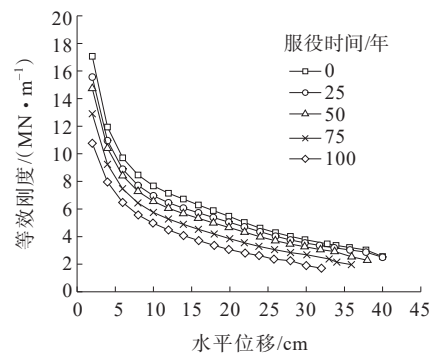
另一方面,当仅考虑多年冻土退化时,桩-冻土体系的位移延性系数随着服役时间的增加逐渐减小;然而,在多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用下,桩-冻土体系的位移延性系数表现出先减小后增大的趋势,如图 10(b)所示。造成这一差异的主要原因如下:随着多年冻土退化,土体对桩基的约束逐渐减弱,从而导致桩-冻土体系的屈服位移增大,进而使位移延性减小。而当考虑材料冻融劣化效应时,桩基的屈服位移随着服役时间的增加逐渐减小。然而,在服役期的第 25 年,材料的冻融劣化程度很小,对桩-冻土体系的位移延性几乎没有影响,因此桩-冻土体系的位移延性呈现出先减小后增大的趋势。

2.2 刚度特性

图 11 给出了桩-冻土相互作用体系刚度随桥梁服役时间的变化曲线。总体而言,不同服役时间下的刚度退化规律基本一致,均表现为初期快速衰减,随后逐渐趋于平稳。此外,随着桥梁服役时间的增长,桩-冻土体系的初始刚度呈减小趋势。然而,在整个服役周期内,多年冻土退化对桩-冻土体系等效



(a) 仅考虑多年冻土退化



(b) 多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用

图 11 等效刚度曲线

Figure 11 Equivalent stiffness curve

刚度的影响较为有限。但当同时考虑多年冻土退化与材料冻融劣化的双重作用时,桩-冻土体系的等效刚度随服役时间的增长显著降低。

2.3 能量耗散

图12显示了桥梁在各服役阶段,桩-冻土体系在逐级水平位移荷载作用下的能量耗散特性。

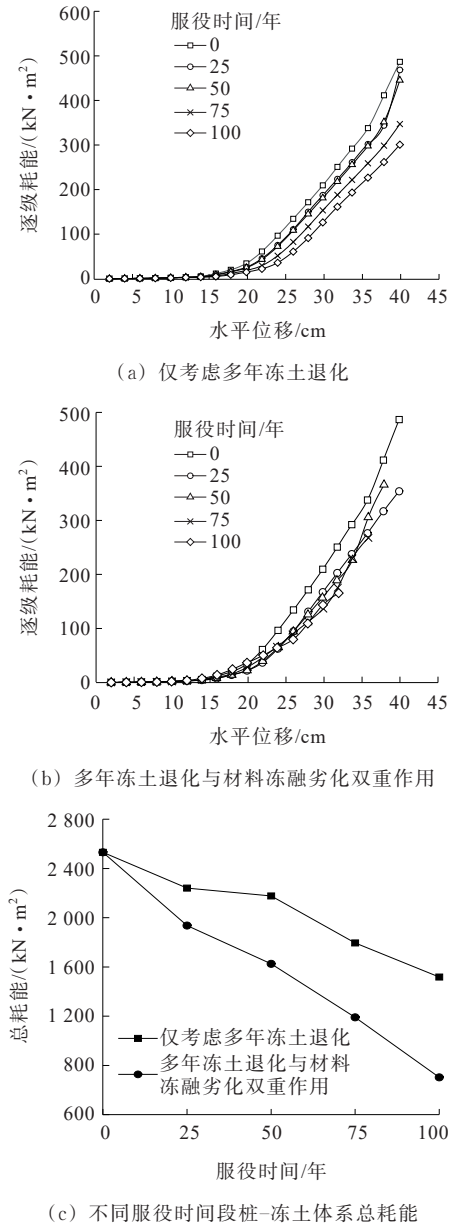


图12 能量耗散曲线

Figure 12 Energy dissipation curve

从图12可以看出:随着水平位移的增加,桩-冻土体系的逐级耗能呈持续增长趋势,且增长速率逐步加快。与此同时,随着桥梁服役时间的增长,桩-冻土体系的总耗能逐渐减少。相比仅考虑多年冻土退化的情况,当同时考虑多年冻土退化与材料冻融

劣化的双重作用时,桩-冻土体系的总耗能减小速率和减小幅度随着桥梁服役时间的增长表现得更加显著。

2.4 桩基位移与内力分布

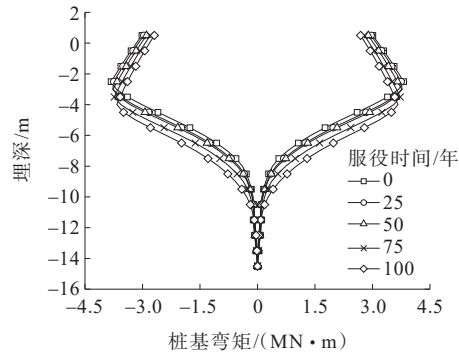
地震作用下,桩基础常常面临震害,其桩身位移、桩身弯矩和桩身剪力是桩基础抗震设计中需要重点考虑的参数。明确这些参数沿桩身的分布情况,对桩基的抗震设计及桩基破坏机理的研究具有重要意义。考虑不同作用条件下加载的桩基弯矩、剪力和水平位移响应峰值沿桩基埋深的分布情况如图13、14所示。从图13(a)和(b)可以看出:桩基的最大弯矩和剪力均发生在多年冻土层内,并且随着多年冻土的退化,桩基的最大弯矩和剪力逐渐减小,且其位置向下移动。从图13(c)可以看出:随着多年冻土的退化,桩身的最大位移呈现增大趋势。这一现象主要是冻土退化导致表层土体对桩基础的约束作用减弱,从而使桩基位移进一步发展。

对比图13、14可以发现:仅考虑多年冻土退化和同时考虑多年冻土退化与材料冻融劣化两种条件下桩身内力的分布规律基本一致。然而,当同时考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用时,随着桥梁服役时间的增长,桩身的内力明显减小。这主要是因为随着材料的逐渐劣化,桩基础的破坏程度增大,导致其水平承载能力下降。进一步分析表明:在同时考虑多年冻土退化与材料冻融劣化的情况下,桥梁桩基础在各服役时间段的水平位移峰值基本一致[图14(c)]。这主要是因为随着多年冻土退化,桩基础的位移逐渐增大;而随着材料性能劣化,桩-冻土体系的极限位移逐渐减小,两者相互作用共同影响了桩基位移的变化。

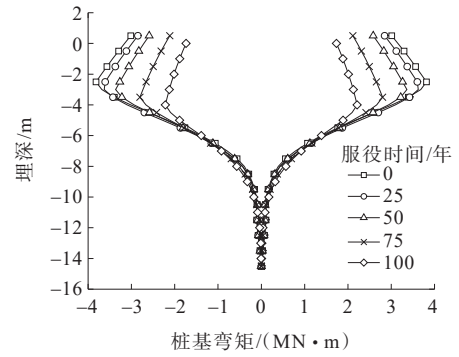
3 结论

为研究多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用对桥梁桩基础抗震性能的影响,本文建立了考虑这两种因素的桩-冻土体系相互作用有限元模型,系统分析了不同服役时间段内桥梁桩基础的抗震性能得出以下结论:

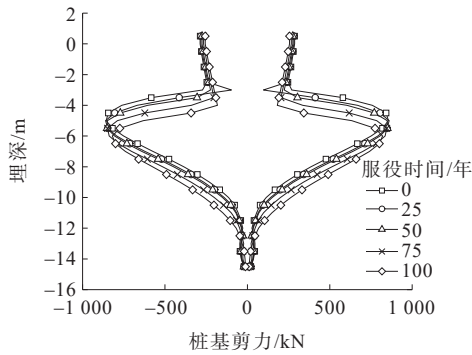
(1) 仅考虑多年冻土退化的情况,桩-冻土体系的水平承载力、变形能力、等效刚度及耗能能力等均随着桥梁服役时间的增加逐渐减小,桩基的水平位移则呈现逐渐增大的趋势。然而,在桥梁整个服役期间,多年冻土退化对桩-冻土体系的抗震性能影响较小,在桥梁服役100年时,桩-冻土体系的水平承载



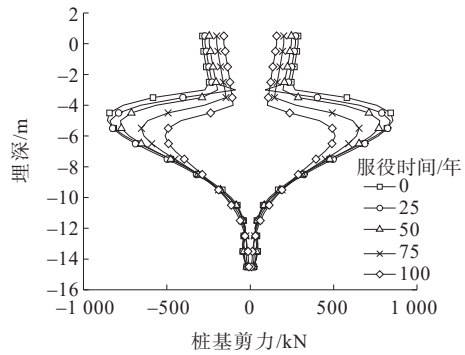
(a) 桩基弯矩分布



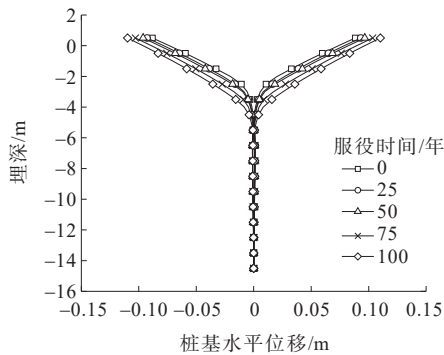
(a) 桩基弯矩分布



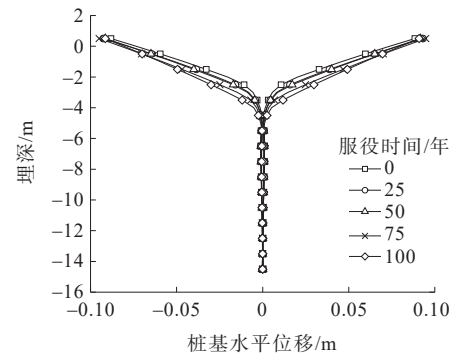
(b) 桩基剪力分布



(b) 桩基剪力分布



(c) 桩基水平位移分布



(c) 桩基水平位移分布

图 13 仅考虑多年冻土退化时桩基位移与内力分布

Figure 13 Displacement and internal force distribution of pile foundation when only considering permafrost degradation

力降低至初始值的 89% 左右。

(2) 考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用后,随着桥梁服役时间的增加,桩-冻土体系的水平承载力、等效刚度及耗能能力均出现明显下降,且下降速率逐渐加快。到桥梁服役 100 年时,桩-冻土体系的水平承载力仅为初始值的 55% 左右。此外,在多年冻土退化与材料冻融劣化双重因素作用下,桩-冻土体系的位移、延性随着服役时间的增加呈先减小后增大的趋势,这一结论与仅考虑多年冻土退

图 14 考虑多年冻土退化与材料冻融劣化双重作用时

Figure 14 Displacement and internal force distribution of pile foundation when considering dual effects of permafrost degradation and material freeze-thaw deterioration

化时的结果存在显著差异。

(3) 多年冻土退化与材料冻融劣化的叠加效应对冻土区桥梁桩基础的抗震性能影响显著。如果忽视钢筋混凝土材料的冻融劣化效应,将导致对多年冻土区桥梁桩基础抗震性能评估的不安全预测。因此,在多年冻土区桥梁桩基础的抗震性能分析中,除了考虑多年冻土退化,还应充分考虑钢筋混凝土材料冻融劣化的影响。

参考文献:

References:

- [1] 马巍,周国庆,牛富俊,等.青藏高原重大冻土工程的基础研究进展与展望[J].中国基础科学,2016,18(6):9-19,2,63-64.
MA Wei, ZHOU Guoqing, NIU Fujun, et al. Progress and prospect of the basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. China Basic Science, 2016, 18(6): 9-19, 2, 63-64.
- [2] 高峰,曾宪璋,钟闻华,等.多年冻土区道路工程病害处治技术研究进展与展望[J].中外公路,2024,44(5):1-16.
GAO Feng, ZENG Xianzhang, ZHONG Wenhua, et al. Progress and prospects of road engineering disease treatment technology in permafrost regions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(5): 1-16.
- [3] 刘润喜,陈泽盟,王豪,等.高原冻土地区柱式桥墩病害分析及防护施工措施[J].中外公路,2021,41(4):119-124.
LIU Rongxi, CHEN Zemeng, WANG Hao, et al. Disease analysis and protective construction measures of column piers in plateau permafrost area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 119-124.
- [4] 李真,陈泽盟.高原冻土地区公路涵洞冻融力学特性分析[J].中外公路,2023,43(6):240-246.
LI Zhen, CHEN Zemeng. Analysis of freezing-thawing mechanical characteristics of highway culverts in plateau permafrost area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 240-246.
- [5] 吴少海.青藏铁路多年冻土区桥梁设计特点[J].中国铁路,2002(9):35-37,4.
WU Shaohai. Design characteristics of bridges in permafrost area of Qinghai-Tibet Railway[J]. China Railway, 2002(9): 35-37, 4.
- [6] 陈克政,丁琳,孙剑飞.冻土动力学研究综述[J].世界地震工程,2024,40(1):185-198.
CHEN Kezheng, DING Lin, SUN Jianfei. Review on dynamics of frozen soil[J]. World Earthquake Engineering, 2024, 40(1): 185-198.
- [7] 董金科,王志文,谢晨鑫,等.多年冻土退化对桩基础竖向承载力影响的有限元分析[J/OL].公路,2024:1-6.(2024-12-10). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GLGL2024121000P&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
DONG Jinke, WANG Zhiwen, XIE Chenxin, et al. Finite element analysis of influence of permafrost degradation on vertical bearing capacity of pile foundation[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-6. (2024-12-10). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GLGL2024121000P&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [8] 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.
WU Zhijian, CHE Ailan, GHEN 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.
- [9] WU Z J, WANG L M, CHEN T. Study on dynamic response of bridge pile foundation at the permafrost regions under seismic load[C]//Cold Regions Engineering 2012. Quebec City, Canada. American Society of Civil Engineers, 2012: 489-497.
- [10] CHE A L, WU Z J, WANG P. Stability of pile foundations base on warming effects on the permafrost under earthquake motions[J]. Soils and Foundations, 2014, 54(4): 639-647.
- [11] SUN Z, ZHAO L, HU G J, et al. Modeling permafrost changes on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1966 to 2100: A case study from two boreholes along the Qinghai-Tibet engineering corridor[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2020, 31(1): 156-171.
- [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 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.
- [13] 李忠,李涛,崔凤坤,等.寒冷地区冰冻海域混凝土桥梁耐久性现场检测及评估[J].公路,2024,69(5):414-418.
LI Zhong, LI Tao, CUI Fengkun, et al. On-site inspection and evaluation of durability of concrete bridges in frozen sea areas in cold regions[J]. Highway, 2024, 69(5): 414-418.
- [14] 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 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.
- [15] 徐略勤,鲁小罗,周建庭.空心板桥考虑服役劣化的地震损伤破坏模式研究[J].振动与冲击,2020,39(16):222-230.
XU Lueqin, LU Xiaoluo, ZHOU Jianting. A study on damage and failure modes of a voided slab bridge under earthquake excitations considering structural deterioration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 222-230.
- [16] 李喜梅,付阿雄.考虑材料劣化钢筋混凝土梁桥抗震性能分析[J].兰州理工大学学报,2021,47(3):139-145.
LI Ximei, FU Axiang. Seismic performance analysis of reinforced concrete beam bridges considering material deterioration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021, 47(3): 139-145.
- [17] 傅沛瑶,徐略勤,龚恋,等.材料性能劣化对刚构桥地震易损性的影响分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):779-788,810.
FU Peiyao, XU Lueqin, GONG Lian, et al. Effect of material deterioration on the seismic fragility of rigid frame bridges[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 779-788, 810.

- [18] 马玉宏,邱洁鹏,刘用奇,等.基于高阻尼橡胶支座及墩柱劣化的近海隔震桥梁地震响应分析[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(2):23-33.
MA Yuhong, QIU Jiepeng, LIU Yongqi, et al. Seismic response analysis of offshore isolated bridge based on performance degradation of high damping rubber bearing and pier[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2): 23-33.
- [19] 张熙胤,刘宁宁,蔡德钧,等.多年冻土区铁路桥梁桩基础竖向承载特性分析[J].中国铁道科学,2024,45(5):77-89.
ZHANG Xiyin, LIU Ningning, CAI Degou, et al. Analysis of vertical bearing characteristics of railway bridge pile foundation in permafrost region[J]. China Railway Science, 2024, 45(5): 77-89.
- [20] 张益舶,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.
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.
- [21] 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.
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.
- [22] 张中琼,吴青柏.气候变化情景下青藏高原多年冻土活动层厚度变化预测[J].冰川冻土,2012,34(3):505-511.
ZHANG Zhongqiong, WU Qingbai. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(3): 505-511.
- [23] 贾超,纪圣振,张峰.冻融作用对混凝土跨海大桥桥墩稳定性影响研究[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(3):7-1.
JIA Chao, JI Shengzhen, ZHANG Feng. Study on the stability of concrete bay bridge pier under freeze-thaw action[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(3): 7-1.
- [24] 吴庆,袁迎曙.锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J].土木工程学报,2008,41(12):42-47.
WU Qing, YUAN Yingshu. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47.
- [25] ZHANG X Y, YU S S, WANG W P, 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: 10740.