

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0100

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.]

考虑冻土效应的桥梁桩-土动力相互作用 研究现状与展望

王万平¹, 张熙胤^{1,2}, 陈兴冲¹, 王 义¹, 于生生¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冻土和地震是我国西部高寒高烈度地区桥梁工程建设中主要面临的两大挑战。冻土区线路工程广泛采用桩基础桥梁, 土体冻结后会显著影响地震作用下桩-土动力相互作用过程, 给桩基础桥梁抗震分析带来困难。首先系统总结和分析了冻土对桥梁结构地震响应的影响、桩-冻土相互作用效应及其计算模型等方面的研究现状, 进而对相关成果进行了科学分析。研究表明: 冻土的存在对桥梁结构地震反应的影响是显著的, 桩基础桥梁抗震设计中不考虑冻土效应是不合理的。目前还存在的问题包括: 冻土区桥梁结构地震反应的研究中, 未充分考虑冻土效应; 现有桩-土相互作用模型无法有效应用于冻土领域; 地震作用下桩-冻土体系相互作用机理及其破坏特征不明确。在此基础上, 提出了考虑冻土效应后桥梁桩-土动力相互作用为今后需要重点研究的方向。

关键词: 冻土区; 桥梁结构; 桩-土动力相互作用; 地震反应

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1213-07

0 引言

冻土在我国分布广泛, 季节冻土(包括冻结深度大于0.45 m的季节冻土在内)和多年冻土面积接近全国总面积的70%^[1], 在我国西部地区冻土全区域覆盖。近年来, 随着“一带一路”和“西部大开发”国家战略的实施, 我国西部地区包括公路和铁路在内的基础设施工程建设突飞猛进。以青藏地区为代表, 青藏公路格尔木-拉萨段全长1 147 km, 穿越多年冻土区760 km^[2]; 青海共和至玉树高速公路全长634.8 km, 其中多年冻土区路段达227 km^[3]; 青藏铁路格拉段全长1 142 km, 其中穿过长达550 km的多年冻土区^[4]。为了保证工程的质量以及最小程度的减小施工对周围冻土环境的扰动, 冻土区线路工程中大量采用了“以桥代路”的施工措施,

以青藏铁路格拉段为例, 全线共建大中型桥梁317座, 桥梁总长156.7 km, 其中冻土区“以桥代路”桥梁长达123.3 km^[5], 占线路总长的10.8%。图1和图2分别是青藏公路和铁路中典型的桥梁工程。

我国西部地区属于地震多发区, 以青藏高原为代表, 该区域地质构造活跃, 地震活动频繁, 且震级较高^[6-7]。统计数据表明1900年以来, 在中国及边邻地区发生8.0级地震约20次, 17次集中于我国大陆西部^[8]。有学者统计了1963-2017年间我国大陆地区7.0级以上地震震中的分布, 可以得知我国大陆地区的大地震主要集中分布于西部地区^[9], 而青藏高原无疑是我国西部地震活动最强烈的地区^[10]。近年来直接发生在青藏高原地区的典型较大地震包括2001年的8.1级昆仑山大地震^[11]和

收稿日期: 2019-06-21; 修订日期: 2020-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808273); 中国博士后科学基金面上项目(2018M643767); 兰州交通大学“天佑青年托举人才计划”项目(张熙胤); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201912)资助

作者简介: 王万平(1994-), 男, 甘肃会宁人, 2018年在烟台大学获学士学位, 现为兰州交通大学在读硕士研究生, 从事寒区桥梁抗震研究. E-mail: 2786689150@qq.com

通信作者: 张熙胤, 副教授, 从事寒区工程防震减灾研究. E-mail: zhangxiyin@mail.lzjtu.cn.



图1 青藏公路中的桥梁工程

Fig. 1 Photo showing a bridge in the Qinghai-Tibet Highway



图2 青藏铁路中的桥梁工程

Fig. 2 Photo showing a bridge in the Qinghai-Tibet Railway

2010年的7.1级玉树大地震^[12],另外2008年发生的8.0级汶川大地震以及2017年的7.0级的九寨沟地震均与青藏高原地质构造活动相关^[13-14]。

因此,位于我国西部冻土地区的桥梁工程,未来遭遇地震的可能性较大。对于冻土区广泛使用的桩基础桥梁,由于冻土效应的存在,使地震作用下桩-土动力相互作用过程复杂化,给冻土区桩基础桥梁的抗震设计计算带来困难。所以,考虑冻土效应的桩-土相互作用机理是冻土区桥梁设计及抗震研究中亟需解决的问题之一,其研究同时具有重要的工程实用意义。国内外学者针对冻土区桥梁抗震开展了大量研究,取得了一些成果,但还存在一些问题,本文从冻土对桥梁结构地震响应的影响、桩-冻土相互作用效应及其计算模型等方面进行了比较全面的分析,系统总结了考虑冻土效应的桥梁桩-土动力相互作用的研究现状及存在的问题,梳理出了今后需要重点研究的方向。

1 考虑冻土效应的桥梁地震反应研究

俄罗斯是世界上冻土区面积分布最大的国家,冻土区面积占陆地总面积的60%以上^[15],加拿大多

年冻土分布面积约为 $3.89 \times 10^6 \sim 4.92 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国面积的40%~50%^[16],而我国是世界第三大冻土国。除此之外,日本和美国等众多国家地震区也都存在着季节冻土或多年冻土,有早期研究报道过冻土层对结构地震反应及破坏特征的影响^[17-18],但冻土对结构地震反应的具体影响在很长一段时间内并未得到足够的重视。1995年俄罗斯远东地区萨哈林岛发生7.5级强烈地震^[19],2001年,我国青藏高原多年冻土区发生了8.1级昆仑山大地震^[20],2002年美国阿拉斯加多年冻土区发生了7.9级大地震^[21],这几次冻土区地震让全世界的研究者们再次意识到了冻土对结构地震反应影响的重要性。

土体冻结,首先会改变其力学特性,进而会对地震作用下基础及上部结构造成影响。已有试验研究表明冻土层的存在会减小桥墩的地震反应,具体表现在随着冻土层厚度的增加,桥墩的地震响应呈减小的趋势^[22],但冻土层的存在并不全是减小桥墩的地震反应,也存在相反情况。另外有研究表明,不同的地震波对于冻土-桩基-承台的地震响应是不同的,冻土对S波有明显的放大作用,冻土地场的加速度大于未冻场地,但其对P波有抑制作用,因此对不同地震类型的抗震设计应该分开计算^[23],并且桥墩高度和场地类型也对冻土区桥墩的地震反应存在显著的影响^[24-25]。其次,近数十年由于全球气候变暖,冻土区面临着退化,意味着冻土的强度会降低,从而对冻土区桥梁产生不利影响^[26-27]。为了分析冻土退化时桥墩对随机地震的反应,李涛^[4]等对桥梁-轨道桥面-地基共同受力的全桥整体模型进行一系列分析,发现随着全球气温的升高,冻土融化,地基约束力降低,桥梁的自震周期增大,墩身地震弯矩减小,桩身弯矩与墩顶的位移增大;张钊^[28]通过有限元数值模拟分析发现饱冰粉土对温度变化比较敏感,其退化对桥墩的抗震性能最不利,这充分说明冻土的退化会对冻土区桥梁的抗震性能产生重大影响。也有学者研究了不同强度地震动下桩柱式桥墩结构的地震响应,认为在基于性能的抗震设计和多级设防水准条件下,对于冻土区桩基础桥梁,只有考虑冻土影响才能得到其合理的抗震性能评价指标^[29],因此在冻土区桩基础抗震计算中考虑冻土效应是非常有必要的。桩-土相互作用的机理非常复杂,如果能够建立模型有效的模拟桩土相互作用,势必给解决相关问题带来事半功倍的效果。

2 桩-冻土体系相互作用的效应及计算模型

桩土相互作用是一个非常复杂的过程,要完全拟合实际情况通过积分的形式求出精确解是非常困难的,解决此问题的有效方法是建立简化模型进行桩土相互作用效应模拟。桩-土相互作用模型目前较多,但现有模型在冻土中的应用极为有限,如何将现有的桩土相互作用分析方法和模型通过改进后应用到冻土中是今后研究的重点。

2.1 桩-土相互作用的分析模型

以下简要介绍了现阶段应用较为广泛的几种桩-土相互作用简化分析模型,包括 Penzien 模型、改进的集中质量模型、动力 Winkler 模型、改进的

动力 Winkler 模型及动力 BNWF 模型理论。

(1) Penzien 模型

该模型将整个群桩结构浓缩为一根合成的桩,合成桩的面积、抗弯惯性矩、抗扭惯性矩等一些参数是各个单桩的面积、抗弯惯性矩、抗扭惯性矩之和。利用抗弯转动弹簧模拟轴力的抗弯作用,如果有较大的扭转变形发生,还要附加抗扭转动弹簧以模拟相应的位置所产生的抗扭作用。土的附加作用利用与桩直接连接的附加质量来模拟,桩与土的相互作用通过水平桩土相互作用弹簧和阻尼器来表示,具体如图 3 所示。Penzien 模型本身将群桩合并为一个桩,因此 Penzien 模型与群桩所包含的桩的根数无关,只与土层的划分有关,这是 Penzien 模型显著的优点。

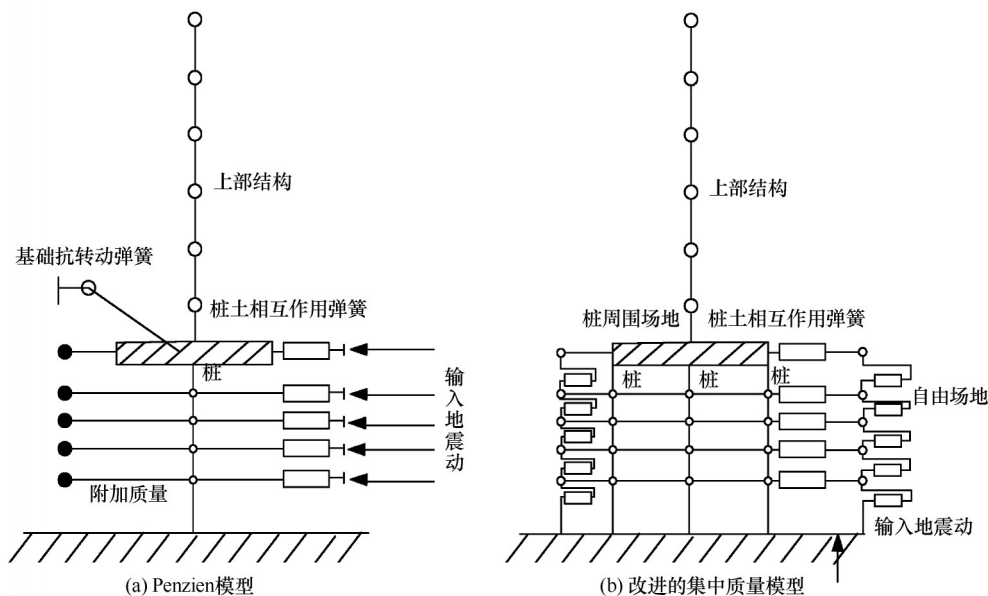


图3 Penzien模型及改进的集中质量模型^[30]

Fig. 3 The Penzien model (a) and the improved lumped mass model (b)

(2) 改进的集中质量模型

孙利民等^[30]在 Penzien 模型的基础上作了以下三方面的改进。

第一,桩基础部分由单桩模型变为多桩模型,桩的根数可与实际结构完全相同也可根据需要进行适当的并桩。假定桩间不发生相对水平位移,则改进的模型与 Penzien 模型相比有以下两个优点:①可以直接提供桩头处的抗转动刚度,不再需要另外增加等效抗转动弹簧;②受地震作用时,桩的轴力将发生变化。

第二,将 Penzien 模型中的附加质量赋予更具体的物理意义,认为桩周围一定范围内的场地土与

桩附着在一起共同运动。在模型中,桩周土质量间增加了土的剪切弹簧和阻尼器。

第三,增加了自由场地模型,计算可由原 Penzien 模型的多点输入问题变为一个仅由基岩输入的相对坐标系下的动力反应问题。目前 Penzien 模型和改进的集中质量模型均未见在桩-冻土相互作用研究中应用。

(3) 动力 Winkler 模型

该模型将桩看成置于土介质中的梁,将桩周土对桩的动力阻抗用连续分布且相互独立的弹簧和阻尼器代替,可以进一步考虑土层沿深度的非均匀变化以及土的非线性性质。这种方法,不仅能够考

考虑桩土的非线性,而且能够分析群桩的竖向振动效应,难点是确定桩土之间的弹簧刚度和阻尼^[31]。

(4) 改进的动力 Winkler 模型

为了真实反映实际工程中桩土动力相互作用的工作状态,许多学者对经典动力 Winkler 模型进行了改进,以使模型能够更准确的模拟桩-土相互作用的过程,为桩-土动力相互作用分析提供实用而有效的参数。最具代表性的改进的动力 Winkler 模型有 Matlock 非线性动力 Winkler 模型、Nogami 非线性动力 Winkler 模型、Rojas 非线性动力 Winkler 模型。目前,动力 Winkler 模型和改进的动力 Winkler 模型也未见在桩-冻土相互作用研究中的应用。

动力 BNWF 模型理论也常用于桩-土相互作用分析中。我国学者李永波等^[32]在非线性 BNWF 模型的基础上,提出了改进的桩-冻土作用的非线性分析模型,在该模型中,利用改进的双向无拉力多段屈服弹簧模拟桩侧冻土的水平非线性力学特性,同时兼顾桩侧与冻土的竖向非线性摩擦效应,桩尖土的挤压与分离作用以及远场土体对桩基动力特性的影响。通过试验初步表明该模型在模拟桩-冻土相互作用中具有良好的拟合度,但能否推广还需进一步研究。

2.2 考虑冻土效应的桩-土相互作用

地震作用下,冻土-桩-结构体系各组成部分的运动和变形相互制约影响,且冻土动力特性易受众多外界因素的干扰,其动力特性改变会影响桩基及上部结构的力学行为。因此,如何合理考虑冻土效应对桩-土动力相互作用的影响成为了冻土区桩基础桥梁抗震研究的关键问题之一。早期关于桩-冻土相互作用的研究大多侧重于竖向或水平静力荷载作用下桩基承载力、变形及其与桩周冻土之间的相互作用关系^[33-34]。近年来,以 Wotherspoon^[35]为代表的国外学者分别在冬夏两季进行了相同的原型尺寸桩基础横向荷载试验,试验结果表明冻土与基础的相互作用受冻结温度与冻土层的影响十分显著,不同温度和冻土层条件下桩基的位移、有效刚度、最大力矩等都有着明显的差异。这足以说明冻土效应对桩-土相互作用的影响是不可忽略的。

桩-冻土相互作用首先体现在桩基与桩周土体温度之间的相互影响。一方面,桩基对桩周冻土温度变化产生影响,由于桩基材料良好的导热性加强了桩周冻土与大气的热交换,导致桩周地温年较差

明显增大,改变了桩-冻土体系的动力特性,从而影响到桩基础桥梁的地震响应^[36]。同时,冻土易受水热效应的影响^[37],冻土区桩基施工时,灌注混凝土的水化热和入模温度会对桩周冻土产生较大的热扰动,使桩周土体的温度平衡状态破坏,导致桩周土体的冻结强度降低,使桩基承载能力降低^[38-39]。另一方面,冻土地基温度分布的差异对地震作用下桥梁桩基础的位移、剪力和弯矩变化都具有显著的影响^[40],蒋代军^[41]以青藏高原多年冻土桩基工程为研究对象,研究了不同温升条件下桩基承载力的计算方法与变化规律。也有学者通过室内模型试验研究发现,融土表层范围内,在负温条件下随着温度的升高,桩身弯矩与桩身应变呈增大趋势,而当温度继续升高至 2℃融土状态时相应的桩身弯矩和桩身应变却显著减小,桩基的水平临界荷载、极限承载力、承载力特征值均出现降低^[42]。这充分说明冻土层温度对冻土区桥梁桩基础地震稳定性起着关键性作用。

其次,冻土层在地震作用下可能发生液化,严重时会导致建筑物受损,研究显示在地基液化发生前,冻土层可以给桩基提供一定的侧向约束,有利于提高其承载力并抑制其侧向变形,而土体一旦液化,冻土层可能增强地基液化的趋势,导致桩基承载性能下降^[43],究其原因当地基土液化时,由于冻土层的存在限制了孔隙水的排出,从而导致了液化程度的加剧,使桩基的侧向变形快速增长,桩基的抗震性能大幅下降^[44]。

3 结论与展望

本文系统总结了冻土对桥梁结构地震响应的影响、桩-冻土相互作用效应及其计算模型等方面的研究现状。通过以上内容可以总结出目前桩-冻土相互作用研究中存在的主要问题有:

(1) 已有研究表明,冻土对桥梁结构地震反应存在较大影响,但现有的桩-土相互作用的研究未充分考虑冻土效应的影响,给冻土区梁桩基础抗震分析带来影响。

(2) 桩-土相互作用模型较多,但现有模型在冻土中应用很少,给冻土区桩-土相互作用的分析带来困难。

(3) 地震作用下冻土区桥梁桩基础-冻土体系相互作用机理及破坏特征不明确,冻土区桥梁桩基础抗震性能评估和抗震设防无法合理考虑冻土层

对其的影响效应。

针对以上问题, 未来需要研究解决的方向有:

(1) 在冻土对桥梁结构地震反应研究中, 应当充分考虑冻土效应, 以此更加全面的反应真实的冻土区桥梁地震响应。

(2) 建立考虑冻土效应的桩-土相互作用计算模型, 为冻土区桥梁桩基础抗震分析提供理论支持。

(3) 揭示地震作用下多年冻土区桥梁桩-冻土体系相互作用机理及破坏特征, 为多年冻土区桥梁桩基础抗震性能评估和抗震设防提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Gao Feng, Chen Xingchong, Yan Songhong. Influence of permafrost and seasonally frozen soil on seismic responses of sites [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1639 - 1644. [高峰, 陈兴冲, 严松宏. 季节性冻土和多年冻土对场地地震反应的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1639 - 1644.]
- [2] Fu Jin, Xie Qianbo, Qi Haiyun. A review of culvert engineering in permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Highway, 2014, 59(3): 28 - 33. [符进, 谢前波, 祁海云. 青藏高原多年冻土区涵洞工程现状综述[J]. 公路, 2014, 59(3): 28 - 33.]
- [3] Feng Ziliang, Sheng Yu, Chen Ji, et al. A preliminary analysis of protective on permafrost of typical embankment along Gonghe-Yushu Highway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 638 - 648. [冯子亮, 盛煜, 陈继, 等. 青海省共和-玉树高速公路沿线典型冻土路基保护多年冻土效果的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 638 - 648.]
- [4] Li Tao, Wei Qingchao, Liu Lin. Effect of climate getting warmer on the seismic safety performance of Qinghai-Tibet Railway bridge in the perennial frozen soil region [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(4): 104 - 109. [李涛, 魏庆朝, 刘林. 青藏铁路多年冻土区桥梁地基融化时的抗震安全性分析[J]. 铁道学报, 2005, 27(4): 104 - 109.]
- [5] Huang Hai. Replacing railway by bridge in permafrost region in Qinghai-Tibet Railway project [J]. Shanxi Architecture, 2004, (9): 118 - 119. [黄海. 以桥代路在青藏铁路多年冻土区的应用[J]. 山西建筑, 2004, (9): 118 - 119.]
- [6] Chen Lijun. Seismotectonic and seismic activity of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(1): 123 - 131. [陈立军. 青藏高原的地震构造与地震活动[J]. 地震研究, 2013, 36(1): 123 - 131.]
- [7] Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7): 2025 - 2042. [邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025 - 2042.]
- [8] Dong Zhiping, Cheng Jianwu. Characteristics of space-time activity of magnitude 8 earthquake in China [J]. Recent Developments in World Seismology, 2018(4): 34 - 38. [董治平, 程建武. 中国8级地震时空活动特点[J]. 国际地震动态, 2018(4): 34 - 38.]
- [9] Chen Xuezhong, Li Yan'e, Wang Hengxin, et al. Relation between the seasonal variation of earth's rotation and strong earthquakes around the world ($M_s \geq 8.0$) and in Mainland China ($M_s \geq 7.0$) [J]. Recent Developments in World Seismology, 2018, 472(4): 39 - 47. [陈学忠, 李艳娥, 王恒信, 等. 全球 $M_s \geq 8.0$ 地震和中国大陆 $M_s \geq 7.0$ 地震发生与地球自转速率变化的关系[J]. 国际地震动态, 2018, 472(4): 39 - 47.]
- [10] Cui Peng, Jia Yang, Su Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 985 - 992. [崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985 - 992.]
- [11] Cui D, Wang Q L, Wang W P. Effect of Kunlun Ms 8.1 earthquake on crustal deformation in northeastern edge region of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geodesy and Geodynamics, 2010, 1(1): 34 - 41.
- [12] Ni S D, Wang W T, Li L. The April 14th, 2010 Yushu Earthquake, a devastating earthquake with foreshocks [J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(6): 791 - 793.
- [13] Deng Qidong, Gao Xiang, Chen Guihua, et al. Recent tectonic activity of Bayankala fault-block and the Kunlun-Wenchuan Earthquake series of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(5): 163 - 178. [邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 青藏高原昆仑-汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J]. 地学前缘, 2010, 17(5): 163 - 178.]
- [14] Xu Xiwei, Chen Guihua, Wang Qixin, et al. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou Earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4018 - 4026. [徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 九寨沟地震震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4018 - 4026.]
- [15] Anisimov O, Reneva S, Li Na. Permafrost and changing climate: the Russian perspective [J]. AMBIO-A Journal of the Human Environment, 2006, 35(4): 169 - 175. [Oleg Anisimov, Svetlana Reneva, 李娜. 永久冻土与变化的气候: 俄罗斯的前景[J]. AMBIO-人类环境杂志, 2006, 35(4): 169 - 175.]
- [16] Cheng Guodong. Some differences between permafrost in Qinghai-Tibet Plateau of China and permafrost in northern Canada [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1979(2): 39 - 43. [程国栋. 中国青藏高原多年冻土与加拿大北部多年冻土的一些差别[J]. 冰川冻土, 1979(2): 39 - 43.]
- [17] Liu Hongxu, Sun Yanfu, Chen Yaming, et al. Influence of seasonally frozen ground on the seismic damages of buildings [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 46 - 50. [刘鸿绪, 孙彦福, 陈亚明, 等. 季节冻土层对房屋地震破坏的影响[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 46 - 50.]
- [18] Yang Limin, Jia Changdi, Fan Chunting, et al. Permafrost and earthquakes [J]. Low Temperature Architecture Technology, 1998(1): 40 - 41. [杨利民, 贾长娣, 樊春亭, 等. 冻土与地震[J]. 低温建筑技术, 1998(1): 40 - 41.]
- [19] Zhang Hongyou, Li Huaiying. An overview of the strong earthquake occurring in Sakhalin Island of Russia on May 27, 1995 [J]. Recent Development in World Seismology, 1995(9): 19 - 23. [张洪由, 李怀英. 1995年5月27日俄罗斯萨哈林岛强烈地震概况[J]. 国际地震动态, 1995(9): 19 - 23.]
- [20] Wu Zhonghai, Hu Daogong, Wu Zhenhan. Characteristics of co-seismic surface rupture of the 2001 Ms8.1 central Kunlun earthquake in the area adjacent to the Qingzang Railway [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(4): 411 - 414. [吴中海, 胡道功, 吴珍汉. 青藏铁路邻昆仑山2001年Ms8.1级地震

- 地表破裂特征分析[J]. 地球学报, 2004, 25(4): 411 – 414.]
- [21] Kayen R, Thompson E, Minasian D, et al. Geotechnical reconnaissance of the 2002 Denali fault, Alaska, earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2004, 20(3): 639 – 667.
- [22] Yu Lusong, Yan Songhong, Chen Xingchong, et al. Stochastic earthquake response analysis of bridge piers with pile foundation in the permafrost regions[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(1): 12 – 16. [虞庐松, 严松宏, 陈兴冲, 等. 多年冻土区桩基础桥墩随机地震反应的分析[J]. 世界地震工程, 2007, 23(1): 12 – 16.]
- [23] Xu Junhao. Analysis of ground seismic characteristics and pile foundation dynamic response in permafrost site in the cold region[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. [许俊豪. 西北寒区多年冻土地震特性及桩基动力响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.]
- [24] Chen Xingchong, Yan Songhong, Gao Feng. Stochastic earthquake response analysis of bridge piers in the permafrost regions of Qingzang Railway [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 79 – 83. [陈兴冲, 严松宏, 高峰. 青藏铁路多年冻土区桥墩随机地震反应分析[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 79 – 83.]
- [25] Chen Xingchong, Gao Feng, Wu Shaohai. Effect of frozen soil layer on seismic response of bridges[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 120 – 125. [陈兴冲, 高峰, 吴少海. 冻土层对桥梁地震反应的影响[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 120 – 125.]
- [26] Tang Liyun, Wang Ke, Deng Lijun, et al. Axial loading behavior of laboratory concrete piles subjected to permafrost degradation [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 166: 102820.
- [27] Xiao F, Chen G S, Hulsey J L, et al. Characterization of the viscoelastic effects of thawed frozen soil on pile by measurement of free response[J]. Cold Regions science and Technology, 2018, 145: 229 – 236.
- [28] Zhang Zhao. Analysis and study on the influence of permafrost degradation on the seismic performance of bridge piers [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017. [张钊. 多年冻土退化对桥墩及其桩基础抗震性能影响的分析研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.]
- [29] Wotherspoon L M, Sriharan S, Pender M J, et al. Investigation on the impact of seasonally frozen soil on seismic response of bridge columns[J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 15(5): 473 – 481.
- [30] Sun Limin, Zhang Chennan, Pan Long, et al. Lumped-mass model and its parameters for dynamic analysis of bridge pier-pile-soil system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(4): 409 – 415. [孙利民, 张晨南, 潘龙, 等. 桥梁桩土相互作用的集中质量模型及参数确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 409 – 415.]
- [31] Zhao Yawen. Seismic response of high-piled wharf based on lumped mass model [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. [赵雅文. 基于集中质量法高桩码头的地震动力响应[D]. 天津: 天津大学, 2016.]
- [32] 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.]
- [33] Weaver J S, Morgenstern N R. Pile design in permafrost [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(3): 357 – 370.
- [34] Li Guoliang, Zhao Xisheng, Wang Huaqin, et al. Investigation of pile foundation in permafrost region [J]. Journal of the China Railway Society, 1980(1): 83 – 94. [励国良, 赵西生, 王化卿, 等. 多年冻土地区桩基试验研究[J]. 铁道学报, 1980(1): 83 – 94.]
- [35] Wotherspoon L M, Spitharan S, Pender M J. Modelling the response of cyclically loaded bridge columns embedded in warm and seasonally frozen soils [J]. Engineering Structures, 2009, 32(4): 933 – 943.
- [36] Shang Yunhu, Niu Fujun, Liu Minghao, et al. Long-term effect of a pile foundation on ground temperatures in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2313 – 2323. [商允虎, 牛富俊, 刘明浩, 等. 多年冻土区桥梁工程桩基础服役期温度场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2313 – 2323.]
- [37] Zhang Xiyin, Chen Xingchong, Gao Jianqiang. Research advance on seismic performance of bridges in permafrost regions [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(2): 116 – 120. [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.]
- [38] Yuan Xizhong, Ma Wei, Liu Yongzhi. Study on thermal regime of high-temperature frozen soil while construction of cast-in-place pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1052 – 1055. [原喜忠, 马巍, 刘永智. 桥梁钻孔灌注桩施工中高温冻土地基温度场动态监测与研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1052 – 1055.]
- [39] Li Xiaohu, Yang Yongping, Wei Qingchao. Numerical simulation of pile foundation conduction at different molding temperature in permafrost regions [J]. Journal of Beijing JiaoTong University, 2005, 29(1): 9 – 13. [李小和, 杨永平, 魏庆朝. 多年冻土地区不同入模温度下桩基温度场数值分析[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 9 – 13.]
- [40] Zhang Xiyin, Zhang Mingyi, Chen Xingchong, et al. Effect of thermal regime on the seismic response of a dry bridge in a permafrost region along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Earthquakes and Structures, 2017, 13(5): 429 – 442.
- [41] Jiang Daijun. Study on pile-soil interface property and vertical bearing behavior of pile foundation in permafrost [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. [蒋代军. 多年冻土地基桩土界面特性及桩基竖向承载性状研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.]
- [42] Wang Haixin, Wu Yaping, Sun Anyuan, et al. Mechanical properties research about frozen soil pile foundation under cyclic loading [J]. Journal of Railway Research and Engineering, 2017, 14(10): 2111 – 2117. [王海新, 吴亚平, 孙安元, 等. 循环荷载下冻土桩基力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2111 – 2117.]
- [43] Yang Runlin, Qiao Chunming, Zhang Xiaoyu, et al. Shaking table test study on seismic responses of pile foundations embedded in liquefiable ground with the frozen crust [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(1): 131 – 137. [杨润林, 乔春明, Zhang Xiaoyu, 等. 冻土覆盖下液化场地桩基地震响应的振动台试验研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(1): 131 – 137.]
- [44] Yang Runlin, Yang Chaohui, Qiao Chunming, et al. Experimental study on frozen soil-liquefiable soil-single pile interaction during earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 612 – 617. [杨润林, 杨朝晖, 乔春明, 等. 震激励下冻土 – 液化土 – 单桩共同作用试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 612 – 617.]

Study on dynamic interaction between bridge pile and soil with permafrost effect: status and review

WANG Wanping¹, ZHANG Xiyin^{1,2}, CHEN Xingchong¹, WANG Yi¹, YU Shengsheng¹

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

Abstract: permafrost (frozen soil) and earthquake are two major challenges for the bridge construction in cold regions with high earthquake intensity in western China. Especially to the widely applied bridges with pile-foundation, the permafrost will significantly affect the pile-soil dynamic interaction process under the earthquake action, and bring difficulties to the seismic analysis. Previous studies have shown that the presence of permafrost had a significant impact on the seismic response of bridge structures, and it was unreasonable without considering the effect of permafrost in the seismic design of pile foundation bridges. It is reviewed that the effect on seismic response of bridges, frozen soil-pile interaction effect and its calculation model and so on. It is unreasonable that not to consider permafrost effect on seismic design of bridge with pile foundation. The problems in current researches are: (1) soil freezing effect has not been fully considered in the research of the bridge seismic response in frozen regions; (2) the existing pile-soil interaction model is rarely applied in permafrost; (3) the interaction mechanism and destroy characteristics of pile-soil system under earthquake are not clear. Based on these situations, some proposals are put forward for future researches.

Key words: permafrost region; bridge structure; pile-soil dynamic interaction; seismic response

(责任编辑: 齐吉琳; 编辑: 周成林)