

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.003

青藏工程走廊多年冻土地震安全性研究进展*

马巍^{1,3}, 苏永奇²

(1. 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;
2. 甘肃煤田地质局, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 宽度不到 10 km 的青藏工程走廊穿越长约 550 km 的多年冻土区, 承载了青藏铁路、青藏公路等重要生命线工程, 同时, 该地区强震多发, 工程设施未来遭遇地震作用的风险较大。围绕青藏工程走廊多年冻土区这一特殊研究区域, 从地震危险性分析和多年冻土地震动特征研究两方面对青藏工程走廊多年冻土区场地地震安全性研究现状进行回顾, 并介绍最新研究进展。基于青藏工程走廊地震危险性对比分析结果, 分别给出 50 年和 100 年超越概率 63%、10%、2% 的青藏工程走廊基岩地震动区划图, 并转换得到 50 年超越概率 10% 的青藏工程走廊一般场地 PGA 区划图, 与第五代中国地震动参数区划图相比, $PGA=0.2g$ 的范围有所扩大。场地反应分析结果表明, 多年冻土地震动特征与冻土层温度及厚度、季节融化层厚度、冻土夹层厚度及其埋深有关。完全冻结场地震动特征主要受冻土层温度和厚度影响, 季节融化场地震动特征主要受季节融化层厚度和多年冻土层厚度影响, 多年冻土夹层场地震动特征主要受冻土夹层厚度及埋深影响。研究结果可为青藏工程走廊内多年冻土地震灾害风险区划、重大冻土工程地震安全性评价、寒区新建工程抗震设防及已有工程设施抗震加固等提供参考。

关键词: 多年冻土; 地震动特征; 地震危险性分析; 青藏工程走廊

中图分类号: TU435; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0723-11

Advances on Seismic Safety Study of the Permafrost Sites along Qinghai-Tibet Project Corridor

MA Wei^{1,3}, SU Yongqi²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Bureau of Coal Geology, Lanzhou 730000, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Engineering Corridor (QTEC) with a width of less than 10 km passes through a permafrost region about 550 km long, carrying important lifeline projects such as the Qinghai-Tibet Railway and the Qinghai-Tibet Highway. At the same time, in this area, strong earthquakes are frequent, and the engineering facilities will face greater risk of earthquake damage in the future. Focusing on the particular study area of the permafrost region in the QTEC, the present state of seismic safety study on the permafrost site along QTEC is reviewed, and the latest research progress is introduced from the aspects of seismic hazard analysis and ground motion characteristics of permafrost sites. Based on the results of comparative analysis of the seismic hazards along QTEC, bedrock site

* 收稿日期: 2020-10-30; 修回日期: 2020-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630636)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2016IESLZ02)资助
作者简介: 马巍(1963—), 男, 俄罗斯工程院外籍院士、研究员, 博导, 博士。主要从事冻土力学及冻土工程方面的研究。

E-mail: mawei@lzb.ac.cn

PGA zonation maps of QTEC for 63% P.E, 10% P.E, 2% P.E in 50a and 100a are given, and then are converted to general site PGA zonation maps of QTEC for 10% P.E in 50a. By comparing with the fifth-generation seismic ground motion parameters zonation map of China, the range of $PGA=0.2g$ extends. The results of the site seismic response analysis show that the seismic ground motion characteristics of the permafrost sites are related to the temperature and thickness of the frozen layer, the thickness of the seasonal thawing layer, and the thickness and buried depth of the frozen interlayer. The ground motion characteristics of the completely frozen site are mainly affected by the temperature and thickness of the frozen soil. The ground motion characteristics of the seasonal thawing site are mainly affected by the thickness of the seasonal thawing layer and the thickness of the permafrost layer. The ground motion characteristics of the site with frozen interlayer are mainly affected by the thickness and buried depth of the frozen interlayer. The research results can provide a reference for the seismic disaster risk assessment, seismic safety evaluation of major permafrost project, the seismic fortification of new projects and the seismic strengthening of existing engineering facilities in the permafrost region along QTEC.

Keywords: permafrost; ground motion characteristics; seismic hazard analysis; Qinghai-Tibet Engineering Corridor

引 言

我国冻土分布十分广泛,占国土面积的75%左右,其中季节冻土区约占53.5%,多年冻土区约占21.5%^[1],而青藏高原地区多年冻土占其面积的一半以上,达 $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[2]。近些年,随着西部大开发战略的稳步推进,一批连接青藏两省的重大工程得以建设,其中以青藏公路、青藏铁路、输变电线等工程为典型代表,未来还需兴建青藏高速公路、输油/气管线等重大生命线工程,这些重大寒区生命线工程的推进,将极大促进藏区经济发展,同时巩固国防安全。但由于自然条件、施工条件及后续养护的需求,这些工程均集中在青藏高原宽度不到10 km的工程走廊内,穿越约550 km长的多年冻土区,走廊内重大生命线工程的密集程度愈来愈高^[3]。

青藏工程走廊多年冻土区沿线及附近区域新构造运动强烈、活动断裂发育、强震多发,未来遭遇地震的危险性较大^[4-5]。区域范围内活动断裂密布,由北到南,发育有东昆仑断裂、通天河断裂、玉树—甘孜断裂、乌兰乌拉湖—岗齐曲三断裂、雁石坪断裂、雁石坪南断裂、安多北断裂和安多南断裂等全新世活动的断裂构造,可能还存在一些尚未被人们认识和发现的其它活动断裂,在这些活动断裂上均可能发生破坏性地震。自有历史记载以来,在青藏工程走廊及区域范围($85^\circ \sim 100^\circ \text{E}$, $28^\circ \sim 38^\circ \text{N}$)内共

发生7级以上地震21次,8级以上地震5次,区内地震呈现出频次、震级双高的特点,未来遭遇地震的危险性较大。强震对该地区铁路、公路及管线等生命线工程极有可能造成严重破坏,如2001年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 强震造成长约426 km的地表破裂带,对青藏公路和当时在建的青藏铁路造成了极大破坏^[6-7]。

走廊内多年冻土广布、重大生命线工程增多,冻融灾害频发。加之强震多发的冻土工程环境使得该地区寒区基础设施遭遇强震影响的可能性较大,震灾损失风险也相应较高。相对于低海拔地区,该地区自然环境恶劣,人烟稀少,区内的活动构造及多年冻土地带工程地质条件调查均较困难,这从客观上造成该地区的地震危险性分析存在基础资料不足和重视程度不高的局面^[8]。而早期的多年冻土地带地震动特征研究也因多年冻土动力非线性参数及波速等基础研究深度的不足,相关研究成果缺乏可靠性、系统性和工程应用性^[9]。而当前工程设计中对多年冻土的特殊性和是否有工程抗震危害性考虑不足,各类抗震设计规范中尚未考虑多年冻土这样一类特殊土对设计地震动参数的影响。

近年来,伴随着青藏铁路等重大生命线工程的建设运营,以及2001年11月中国青海昆仑山口 $M_s 8.1$ 地震、2002年11月美国阿拉斯加 $M_w 7.9$ 地震、2010年4月中国青海玉树 $M_s 7.1$ 地震发生后造成的桥梁、道路及基础设施破坏,使得地震破坏中的冻土效应进入人们的视野,并逐渐引起学者们对青藏工

程走廊多年冻土地地震安全性的重视,该地区的地震危险性分析及多年冻土地地震动特征研究取得了新的进展。

本文围绕青藏工程走廊多年冻土区这一特殊研究区域内的场地地震安全性研究现状及进展,对青藏工程走廊多年冻土区地震危险性分析、场地地震动特征研究文献资料进行回顾和梳理,并展示最新研究进展,以期为青藏工程走廊内多年冻土区地震动区划、重大冻土工程地震安全性评价及寒区工程抗震设计等提供参考。

1 青藏工程走廊地震危险性分析与区划

1.1 概率地震危险性分析方法

概率地震危险性分析(PSHA)由美国学者 C. A. Cornell^[10]于 1968 年提出,用于评价某一场点在某一超越概率时可能遭遇的地震危险性。PSHA 方法提出后得到广泛应用,成为世界范围内地震危险性分析最为常用的概率方法^[11]。

在编制我国第三代地震烈度图过程中,该方法得到首次应用,考虑到我国地震活动的时空不均匀性,我国地震工作者对该方法进行了改进,形成“考虑地震活动时空不均匀性的概率地震危险性分析方法(CPSHA)”^[12-13]。苏永奇等^[8]对 CPSHA 方法在我国的应用进行了总结,我国第三、第四和第五代地震区划图均采用 CPSHA 方法,国内重大建设工程的工程场地地震安全性评价工作也广泛采用该方法。

1.2 青藏工程走廊地震危险性分析与区划

原中国地震局工程地震研究中心等单位在青藏铁路建设前期开展了青藏铁路沿线地震区划及重点桥梁、隧道工程的地震安全性评价,其中“青藏铁路沿线重点地段活动断层鉴定和地震区划”项目采用概率地震危险性分析方法给出了青藏铁路沿线 1:100 万地震烈度区划图,与第三代《中国地震烈度区划图(1990)》^[14]相比,走廊沿线多年冻土区高烈度区域有所增加,原Ⅵ度区全部提升为Ⅶ度区,不冻泉以北的Ⅷ度区范围向北扩展约 20 km,抗震设防水平有所提高,与第四代《中国地震动参数区划图》^[15]所给出的抗震设防水平基本一致,一般场地 PGA 为 0.1g~0.2g。第五代《中国地震动参数区划图》^[16]颁布实施后,该地区抗震设防水平显著提

升,一般场地 PGA 提升为 0.15g~0.3g,其中安多、温泉—雁石坪、北麓河地区由原Ⅶ度设防区提升为Ⅷ度设防区。

为了进行更细致的青藏工程走廊地震危险性分析研究,苏永奇等^[8]采用不同的潜在震源区地震活动性参数方案、不同的地震动衰减关系方案,沿走廊线进行概率地震危险性对比分析。在具体分析中,地震动衰减关系采用了西部地区、青藏高原东北缘、川藏地区及云南地区 4 组水平地震加速度衰减关系^[17-18];潜在震源区划分和地震统计区活动性参数采用第五代《中国地震动参数区划图》^[16]所采用的方案和参数,潜在震源区划分如图 1 所示;潜在震源区空间分布函数则分别采用基于多因子赋值法给出的自编空间分布函数和第五代《中国地震动参数区划图》^[16]空间分布函数;潜在震源区空间分布函数的震级分档划分为两类:Ⅰ型分档为 4.0、5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5,Ⅱ型分档为 4.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0,实际分析中共形成自编Ⅰ型、自编Ⅱ型、五代图Ⅰ型和五代图Ⅱ型共 4 组潜在震源区空间分布函数;根据不同地震动衰减关系、不同空间分布函数及不同震级分档的对比分析结果,采用

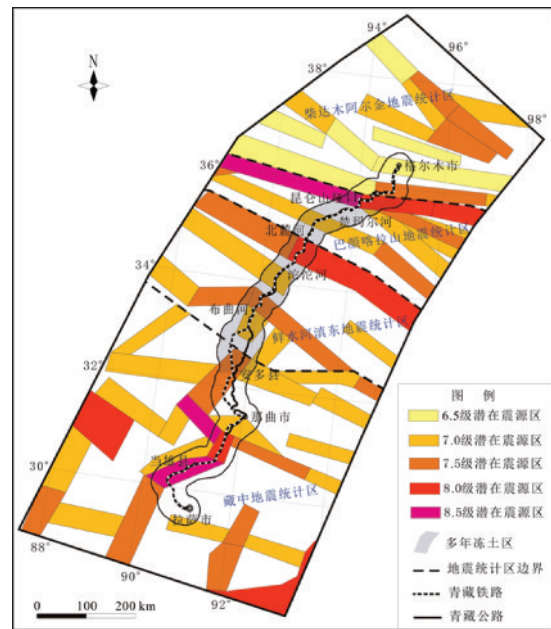


图 1 青藏工程走廊潜在震源区划分^[8]

Fig.1 The potential seismic source zones map in the region of QTEC^[8]

自编Ⅱ型震级分档空间分布函数与川藏地区地震动衰减关系组合的计算结果较为理想^[8]。

选用自编Ⅱ型震级分档空间分布函数与川藏地区

地震动衰减关系组合,利用概率地震危险性分析方法进行青藏工程走廊沿线的地震动区划,区划范围为青藏铁路及青藏公路向两侧延伸20~30 km,宽60~90 km,长约1 190 km的狭长区域,分别计算区域内各格点(0.05°×0.05°)50年及100年超越概率63%、10%、2%的基岩PGA,同时根据基岩场地与一般场地地震动参数的对应关系,将各个格点50年超越概率10%的基岩场地PGA进行转换,得到50年超越概率10%的

一般场地(Ⅱ类场地)PGA,并采用《中国地震动参数区划图》^[16]附录G给出的场地地震动峰值加速度与地震烈度对照表,给出50年超越概率10%的一般场地基本地震烈度,在此基础上,编制了青藏工程走廊50年和100年超越概率63%、10%、2%的基岩PGA区划图(图2~图4)、50年超越概率10%的一般场地PGA区划图(图5(a))和基本地震烈度区划图(图5(b))。

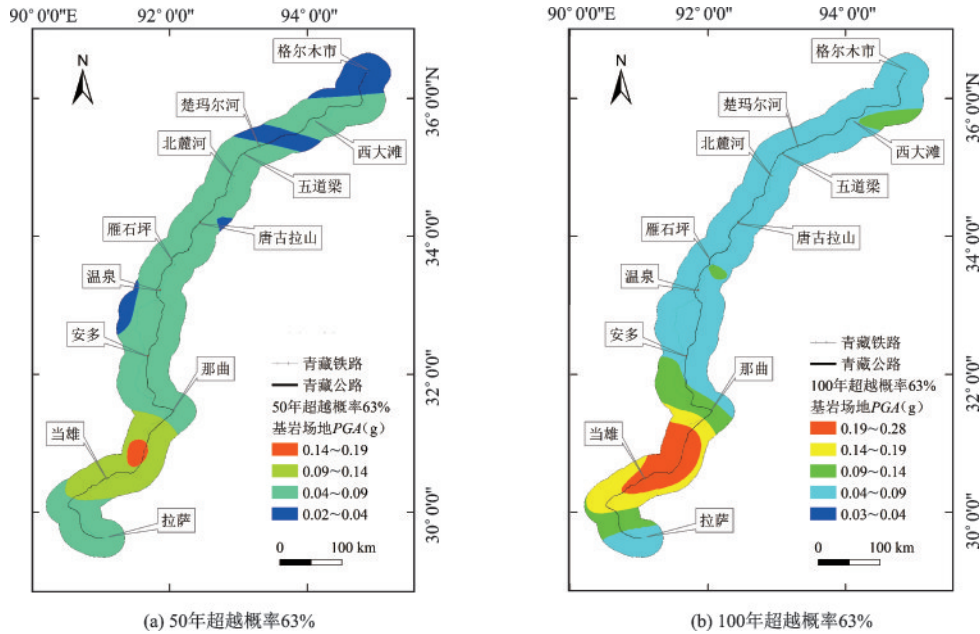


图2 青藏工程走廊50年、100年超越概率63%基岩场地PGA区划

Fig.2 Bedrock site PGA for 63% P.E in 50 a and 100 a zonation maps of QTEC

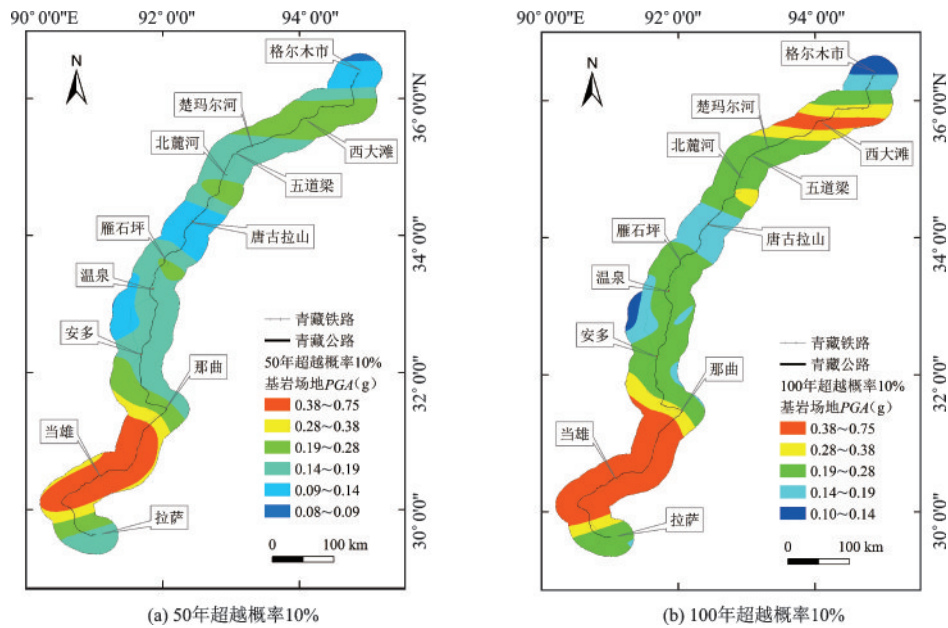


图3 青藏工程走廊50年、100年超越概率10%基岩场地PGA区划

Fig.3 Bedrock site PGA for 10% P.E in 50 a and 100 a zonation maps of QTEC

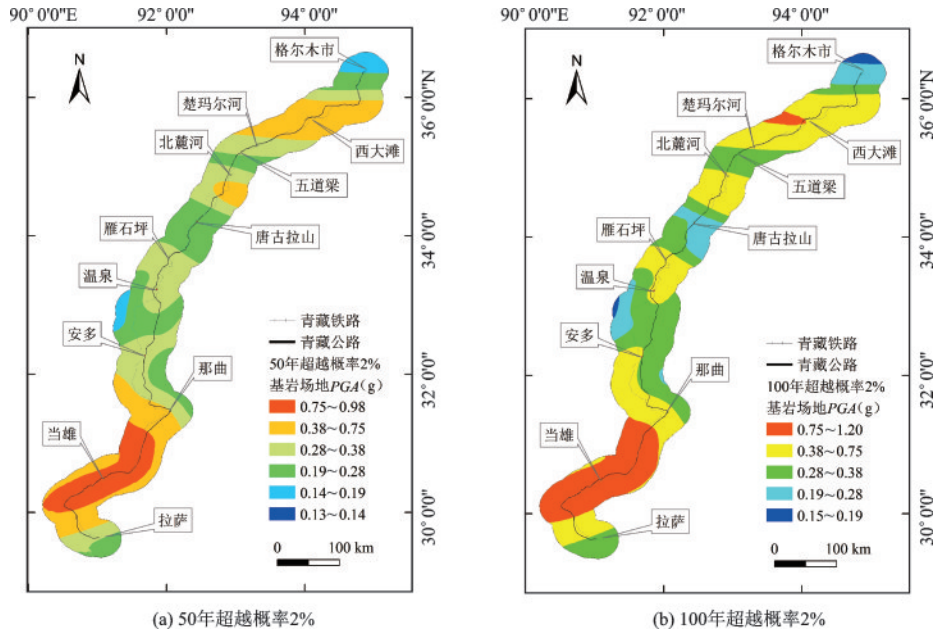


图4 青藏工程走廊50年、100年超越概率2%基岩场地PGA区划
Fig.4 Bedrock site PGA for 2% P.E in 50 a and 100 a zonation maps of QTEC

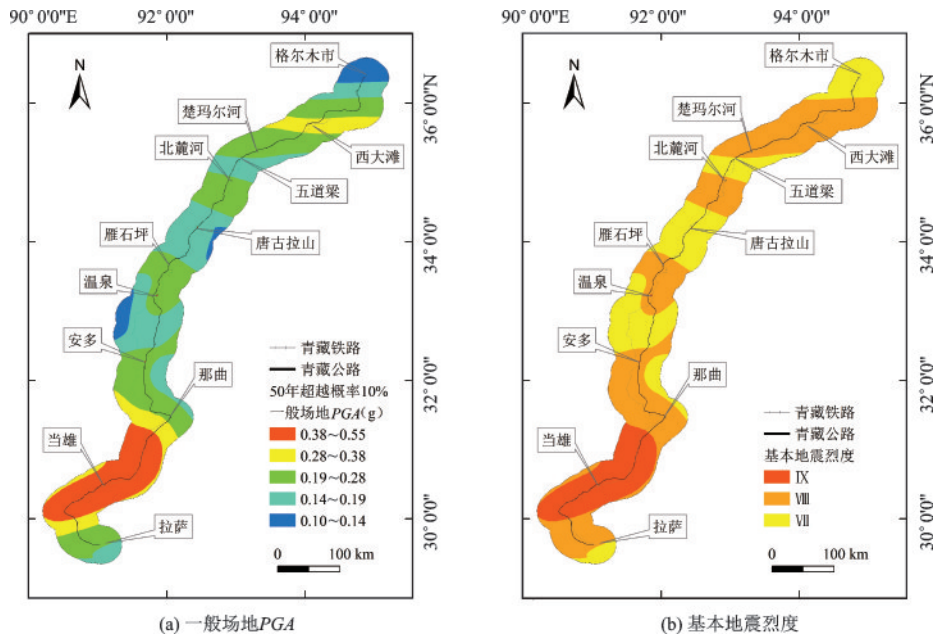


图5 青藏工程走廊50年超越概率10%一般场地PGA及基本地震烈度区划^[8]
Fig.5 General site PGA and basic earthquake intensity for 10% P.E in 50 a zonation maps of QTEC^[8]

将图5(a)中的青藏工程走廊50年超越概率10%的一般场地PGA区划图与第五代《中国地震动参数区划图》^[16]附录A中国地震动加速度区划图进行对比,可以发现,图8中的青藏工程走廊多年冻土区 $PGA=0.2g$ 的范围有所增加,楚玛尔河至五道梁段 PGA 由 $0.15g$ 变为 $0.20g$,温泉南 $PGA=0.2g$ 区域向南延伸 $5\sim 10\text{ km}$ ^[8]。图5(b)与第五代《中国地震动参数区划图》^[16]附录A中国地震动加速度区

划图转换得到的基本地震烈度区划结果基本一致,说明抗震设防烈度无明显变化。

2 青藏工程走廊多年冻土地震震动特征

基岩输入地震动在穿越场地土层时,其振幅、频率及持时等均会发生变化,使得地表输出地震动

不同于基岩输入地震动,即场地在地震作用下会表现出场地效应。非冻土区的大量场地地震反应分析结果表明,场地覆盖层厚度、土层波速及土层动力学参数会影响场地地震反应分析的结果,使得场地地震动因场地条件的变化而呈现出不同的特征。多年冻土场地因多年冻土层厚度及温度变化、地表季节融化层厚度、土层中冻土夹层位置及厚度变化等因素的影响,场地地震效应及场地地震动可能会呈现出不同的类型和特征。

场地地震动特征的研究途径主要有两类:一类是基于地震发生时通过强震动台网记录到的强震动时程进行地震动特征的分析,但青藏高原多年冻土区由于自然环境恶劣、缺乏基础配套设施及运营维护条件,该地区强震动固定观测台站建设滞后,虽然该地区曾发生2001年昆仑山 M_s 8.1地震、玉树 M_s 7.1地震等强震,但并无多年冻土区强震动记录可用;另一类是基于数值方法的场地地震反应分析进行研究,学者们有关冻土场地地震动特征的研究基本基于后者。

2.1 多年冻土场地地震动特征研究现状

科研人员对冻土场地地震动的研究始于20世纪70年代,最早的研究出现在北美地区。S. Singh等^[19]研究了多年冻土场地浅层土冻结—融化过程对地表地震反应的影响。W.D.L.Finn等^[20]研究了1964年阿拉斯加 M_w 9.2地震中冻土地场地的地震动特征,结果表明土层完全冻结后能够减轻地震作用,但当表层冻结而下部存在未冻结的无黏性可液化土层时,可能导致因液化而引起地表破坏,加剧震害。U.Dutta等^[21]根据强震动记录资料对Alaska地区的冻土场地地震动特征进行了研究,认为冻土层对1 Hz以上的频率成分影响较大,而对1 Hz以下的频率成分影响较小,可以忽略其影响。Z. Yang等^[22]采用一维等效线性法研究了阿拉斯加地区多年冻土场地地震效应,分析了多年冻土层厚度和基岩埋深对场地PGA及反应谱SA的影响,多年冻土层的存在会改变场地地震动特征,并建议在抗震设计中予以考虑。G. Xu等^[23]研究了阿拉斯加季节冻土场地地震效应,探讨了冻土波速、季节冻土厚度对季节冻土场地PGA及SA的影响,结果显示季节冻土层厚度的增加有利于减小地表加速度、抑制土层对地震动的放大作用。B. Dadfar等^[24]通过小型振动台试验和FLAC软件分析了不连续多年冻土

场地的地震动特征,结果显示不连续多年冻土层对场地动力响应有明显影响。

国内研究人员对冻土场地地震动特征的研究始于20世纪90年代,但在2001年11月昆仑山口西 M_s 8.1地震发生后方才逐步增多。徐学燕等^[25]采用一维等效线性化方法研究了多年冻土地场地的地震反应谱特征,结果显示:随温度的降低,多年冻土地场地加速度反应谱峰值逐渐降低,随冻土层厚度的增加,多年冻土加速度反应谱峰值先增大后减小,长周期反应谱值有所增大。王兰民等^[26]利用青藏铁路沿线4个冻土剖面为场地模型,采用一组50年超越概率63%、10%和2%的人造基岩地震动时程作为输入地震动,分析计算了不同地温下冻土地场地地震动参数的变化特征,结果表明场地PGA随地温的降低呈现先减小后增大再缓慢减小的变化规律。王丽霞等^[27]通过青藏铁路多年冻土地路基地震反应分析,研究了多年冻土地路基地震加速度反应谱特征和地震位移形状,认为冻土层的存在使得路基地震动应力幅值、频率增大,可能加剧了路基的震害响应,这一结论与震灾调查及其他研究结果有所不同。严松宏等^[28]基于随机振动理论,对青藏铁路沿线多年冻土区场地进行了随机地震反应分析,研究了冻土层厚度的变化对场地地震动特征的影响,认为冻土层厚度的增加会减小土层的放大作用,增大场地卓越频率。

齐吉琳等^[29]基于季节冻土区场地地脉动测试及室内动三轴试验,进行了张掖地区季节冻土地场地的地震反应分析,认为冻土层的存在对地震反应有抑制作用,且效果随冻土层厚度的增加而越加显著,场地卓越周期随冻土层厚度的增加而减小。高峰等^[30]采用一维等效线性化分析理论对季节冻土和多年冻土地场地进行了不同地震输入作用下的场地地震反应分析,结果表明冻土层厚度越大,地表峰值加速度越小,但作者对反应谱的变化未做研究。吴志坚等^[31-32]基于青藏铁路沿线的实测钻孔波速资料及室内动三轴试验获取的冻土动力学参数,采用青藏人造基岩地震波作为输入地震动,对青藏铁路沿线多年冻土区的10个场地开展了一维场地地震反应分析,分析研究了青藏铁路沿线冻土地场地地震动加速度时程与加速度反应谱的基本特征,结果显示,冻土地场地地表峰值加速度随土层温度的降低先减小后增大继而再减小,特征周期随土层温度的降低而不断减小,当输入地震动相同时,不同冻

土地的地表加速度反应谱有所不同,体现了地震动参数的场地相关性特征。

陈拓^[33]建立了假设的冻土地震模型,分析了活动层厚度及冻土层厚度对地震动参数的影响,活动层融化对地震动有放大作用,随冻土层厚度的增加,地表峰值加速度也有所增大,这与学者们普遍认为的冻土层有利于抑制地震作用的观点有所不同。Sh.Y.Li等^[34-35]基于传热学、冻土物理学、冻土力学及土动力学分别建立了热-动力耦合和水-热-动力耦合模型,对青藏铁路服役25年后多年冻土路基某断面进行了地震反应模拟,得到了路基的加速度、速度、位移时程及孔隙水压力时程,但该模型没有考虑土的动力非线性特性。苏永奇等^[9]对青藏工程走廊多年冻土区场地地震动加速度峰值进行了研究,结果显示活动层的融化会放大场地峰值加速度。

总体而言,学者们对多年冻土地震动特征的研究主要以定性分析为主,对影响研究结果的土层动力非线性参数及冻土波速的研究程度不高,相关研究成果的可靠性、系统性和工程应用性有待进一步提高。

2.2 青藏工程走廊多年冻土地震动特征研究进展

2018年7月,我们开展了青藏工程走廊多年冻土地形地貌、场地工程地质条件的调查测试工作。调查结果显示,青藏工程走廊多年冻土区总体为高平原地貌,以盆地平原、河谷平原地貌为主,中低山、丘陵区地貌为辅,其中平原地貌以砂砾石土、粉质黏土或黏土沉积为主,中低山、丘陵区地貌则主要为基岩区。现场调查期间,在走廊沿线布置了地球物理勘探线,在高寒缺氧,条件非常艰苦的环境下完成高密度电法测线5条,高密度电法测试数据的反演结果质量较好,能较好地反映冻土分布情况。高密度电法勘探结果显示,多年冻土区内存在岛状融土区、岛状冻土区,并且存在多年冻区边界区的土层物理状态差异等情况,这些都可能导致在小范围内的场地地表地震动存在较大差异,增加重要工程设施的地震安全风险。

因此,在冻土动力非线性参数及冻土波速研究的基础上确定 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的冻土动力非线性参数和冻土剪切波速值,结合青藏工程走廊多年冻土区工程地质条件,建立考虑冻土层厚度、季节融化层厚度、土层中冻土夹层厚度及埋深变化

的一维场地反应分析模型,以考虑地震构造背景的人造地震波作为场地反应分析输入波,采用等效线性化方法开展场地地震反应分析,研究探讨了青藏工程走廊多年冻土地震效应及地震动特征。

2.2.1 完全冻结场地地震动特征

完全冻结场地地震动特征主要受冻土层温度和厚度影响。随冻土温度的升高,场地放大系数谱 $R(S)$ (场地地表加速度反应谱与基岩加速度反应谱的比值)普遍增大,冻土地震效应逐渐增强。温度越低,越有利于降低地震破坏风险;场地温度越高,场地地震动放大效应越明显,这可能会增加地震破坏风险,不利于冻土地建构筑物的抗震安全性。

随冻土层厚度的增加,场地地震动放大效应敏感段周期逐渐增大,场地对中短周期地震动的放大效应先增强后减弱,对长周期段的放大效应逐渐增强。当土层厚度大于30 m后,场地效应表现出抑制与放大并存,即中短周期地震动受到抑制,冻土地震 $R(S)$ 值出现小于1的情况,而中长周期地震动得到放大,这有利于刚性建构筑物的抗震安全性,但不利于柔性建构筑物的抗震安全性。冻土层厚度对地震动的影响程度与冻土温度有关,温度对抑制效应的影响较小,对放大效应的影响较明显,温度越高,冻土层厚度影响越大,场地效应越强烈。

2.2.2 季节融化场地地震动特征

季节融化场地地震动特征主要受季节融化层厚度和多年冻土层厚度影响。随季节融化层厚度的增加,场地对中短周期地震动的放大效应逐渐增强,对中长周期地震动的影响则较小,可以忽略不计。季节融化层的存在对周期 $0\sim 0.4\text{ s}$ 的多年冻土地震加速度反应谱起到了放大作用,周期 0.1 s 附近放大效应最为明显,融化层越厚,放大效应越强烈。同时,季节融化层厚度对场地地震动的影响程度又与下覆多年冻土层厚度有关,当季节融化层厚度较厚、下覆多年冻土层厚度较薄时,季节融化层对场地地震动的放大效应相对较明显,而当下覆多年冻土层厚度较厚时,场地地震动特征逐渐接近完全冻结场地,季节融化层对场地地震动的影响趋于减弱。

下覆多年冻土层的存在对中短周期地震动起到了抑制效应,对中长周期地震动则起到了放大效应。随下覆多年冻土层厚度的增加,冻土层对中短周期地震动的抑制效应逐渐增强,冻土层的抑制效

应部分抵消了融化层的放大效应,逐渐抑制了季节融化层对中短周期地震动的放大效应,表现为场地对中短周期地震动的放大效应减弱,甚至起到抑制作用;但场地对中长周期地震动的放大效应逐渐增强,放大效应敏感段周期逐渐增大,场地地震动特征逐渐接近完全冻结场地。

2.2.3 多年冻土夹层场地地震动特征

在部分河谷及断陷盆地内,松散沉积层厚度较大,基岩面埋深较深,基岩面之上存在未冻结的松散沉积层,多年冻土层则位于季节融化层和下覆未冻结松散层之间,以夹层的形式存在,其对场地地震效应及地震动特征会产生影响。

多年冻土夹层场地地震动特征主要受冻土夹层厚度及其埋深影响。随冻土夹层厚度的增大,场地对中短周期地震动的抑制效应先增强后减弱,对中长周期地震动的放大效应逐渐减弱。随冻土夹层上限埋深的增加,冻土夹层对场地地震动的抑制效应趋于减弱,当埋深大于20 m后,上部融化层对地震动的放大效应占据主导作用,冻土夹层的抑制效应受到压制。多年冻土夹层场地对长周期地震动的放大效应主要受冻土夹层厚度或下覆未冻层厚度影响,受季节融化层的影响较小,随冻土夹层厚度的增大或下覆未冻层厚度的减小,场地对长周期地震动的放大效应趋于减弱。相对于完全融化场地,松散沉积层中发育的冻土夹层有助于抑制地震作用。

综上所述,场地地震反应分析结果显示多年冻土层的存在及变化将会显著影响场地地震动特征。研究结果印证了V.I.Dzhurik等^[36]在Barguzin盆地获得的多年冻土地场地地震动观测结果,即厚层冻土地场地地震放大效应不明显,而且可能会抑制中短周期地震作用,薄层冻土区场地的 $R(S)$ 值在中短周期显著大于基岩场地和厚层冻土地场地,完全融化场地的 $R(S)$ 值要大于薄层冻土地场地。因此,在确定多年冻土地场地地震动特征及参数时,应预测设计基准期内冻土的变化情况,在此基础上综合确定场地地震动参数。

3 结论与展望

在回顾青藏工程走廊地震危险性分析和多年冻土地场地地震动特征研究现状的基础上,介绍了青藏工程走廊多年冻土区地震危险性对比分析及区

划、走廊多年冻土地场地地震动特征研究的最新进展,主要结论如下:

(1)采用自编Ⅱ型震级分档空间分布函数方案与川藏地区地震动衰减关系组合,经地震危险性分析计算给出了青藏工程走廊100年和50年超越概率63%、10%、2%的基岩PGA区划图,并转换得到50年超越概率10%的一般场地PGA区划图,与第五代《中国地震动参数区划图》^[16]相比,走廊多年冻土区 $PGA=0.2g$ 的范围有所扩大,楚玛尔河至五道梁段(长约50 km)PGA由0.15g提高为0.20g,温泉南 $PGA=0.2g$ 的区域向南延伸5~10 km。

(2)完全冻结场地地震动特征主要受冻土层温度和厚度影响。随温度的升高,场地地震效应逐渐增强;随冻土层厚度的增加,场地对中短周期地震动的放大效应先增强后减弱,当土层厚度大于30 m后,场地效应表现出抑制与放大并存,中短周期地震动受到抑制,中长周期地震动受到放大。

(3)季节融化场地地震动特征主要受季节融化层厚度和多年冻土层厚度影响。随季节融化层厚度的增加,场地对中短周期地震动的放大效应逐渐增强;随下覆多年冻土层厚度的增加,冻土层对中短周期地震动的抑制效应逐渐增强,场地地震动特征逐渐接近完全冻结场地。

(4)多年冻土夹层场地地震动特征主要与冻土夹层厚度及埋深有关。随冻土夹层厚度的增加,场地对中短周期地震动的抑制效应先增强后减弱,对中长周期地震动的放大效应逐渐减弱;随冻土夹层上限埋深的增加,冻土夹层对场地地震动的抑制效应趋于减弱,季节融化层的放大效应逐渐占据主导地位。

(5)在确定多年冻土区重大工程场地地震动参数时,应预测设计基准期内场地冻土的变化情况,在此基础上综合确定场地地震动参数。

有关青藏工程走廊多年冻土地场地地震安全性的探索研究虽取得了一些初步的认识和进展,但仍旧有许多不足,有很多需要进一步思考的问题、进一步深化的方面,后续可以在当前研究的基础上进一步开展以下工作:

(1)结合青藏工程走廊重大工程的建设,在遥感、航拍影像识别的基础上,开展青藏工程走廊多年冻土区沿线区域范围内的活动构造详细调查,有效判识潜在发震构造,为潜在震源区划分、震级上限的确定以及线性工程抗断错设计提供更加可靠

的依据,提升地震危险性分析结果的可靠性,避免出现预测盲区而低估场地遭遇地震作用的风险。

(2)结合青藏工程走廊重大冻土工程建设,如青藏高速线路勘察钻探阶段,系统测试走廊内多年冻土地地的钻孔剪切波速,并结合钻孔温度、含水率测试,研究各类冻土剪切波速随钻孔深度、温度及含水率的变化规律,同时开展原状土样的动力学试验,获得反映场地真实状况的土层动力非线性参数和剪切波速值,在此基础上进一步开展多年冻土地地地震动特征研究。

(3)温度在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻土对气候变化及工程扰动十分敏感,也是走廊内多年冻土地地地震动研究的难点,应借助仪器设备的进步,开展高温、高含冰量冻土的动力非线性参数及波速测试,在此基础上进一步开展高温多年冻土地地地震动特征研究。

(4)开展考虑多年冻土地地条件及冻土退化的多概率水准地震动参数区划研究,服务青藏工程走廊重大冻土工程抗震设防、抗震性能鉴定及抗震加固。

参考文献:

- [1] 马巍,王大雁.中国冻土力学研究50a回顾与展望[J].岩土工程学报,2012,34(4):625-640.
Ma W, Wang D Y. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625-640. (in Chinese)
- [2] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000:40-45.
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. Frozen ground in China[M]. Beijing: Science Press, 2000: 40-45. (in Chinese)
- [3] 马巍,牛富俊,穆彦虎.青藏高原重大冻土工程的基础研究[J].地球科学进展,2012,27(11):1185-1191.
Ma W, Niu F J, Mu Y H. Basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet plateau[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11): 1185-1191. (in Chinese)
- [4] Lin A M, Fu B H, Guo J M, et al. Co-seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 M_s 8.1 Central Kunlun earthquake[J]. Science, 2002, 296(5575): 2015-2017.
- [5] 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.
Deng Q D, Cheng Sh P, Ma J, et al. Seismic activities and earthquake potential in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7): 2025-2042. (in Chinese)
- [6] 徐锡伟,陈文彬,于贵华,等.2001年11月14日昆仑山库赛湖地震(M_s 8.1)地表破裂带的基本特征[J].地震地质,2002,24(1):1-13.
Xu X W, Chen W B, Yu G H, et al. Characteristic features of the surface ruptures of the Hoh Sai Hu Kunlun-shan Earthquake (M_s 8.1), Northern Tibetan Plateau, China[J]. Seismology and Geology, 2002, 24(1): 1-13. (in Chinese)
- [7] 陈永明,王兰民,代炜,等.2001年昆仑山口西8.1级地震区的冻土及地震破坏特征[J].中国地震,2004,20(2):161-169.
Chen Y M, Wang L M, Dai W, et al. The frozen soils and devastating characteristics of west Kunlun mountains Pass M_s 8.1 earthquake area in 2001[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(2): 161-169. (in Chinese)
- [8] 苏永奇,马巍,马尔曼,等.青藏工程走廊地震危险性对比分析及区划[J].地震工程学报,2017,39(2):311-320.
Su Y Q, Ma W, Ma E M, et al. Seismic hazard comparative analysis and zonation along Qinghai-Tibet engineering corridor[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 311-320. (in Chinese)
- [9] 苏永奇,马巍,吴志坚,等.青藏工程走廊多年冻土地地震动加速度峰值特征研究[J].冰川冻土,2016,38(4):1090-1098.
Su Y Q, Ma W, Wu Zh J, et al. Study on characteristics of seismic peak ground acceleration at permafrost sites along Qinghai-Tibet Engineering Corridor [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1090-1098. (in Chinese)
- [10] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [11] 胡聿贤.地震安全性评价教程[M].北京:地震出版社,1999:217-220.
Hu Y X. Seismic safety evaluation tutorial [M]. Beijing: Seismological Press, 1999: 217-220. (in Chinese)
- [12] 国家地震局.中国地震烈度区划图(1990)概论[M].北京:地震出版社,1996.
China Earthquake Administration. Introduction to the seismic intensity zonation map of China (1990) [M]. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese)
- [13] 潘华.概率地震危险性分析中参数不确定性研究[D].

- 北京:中国地震局地球物理研究所,2000.
- Pan H. Study on uncertainties in the parameters of PSHA [D]. Beijing: Institute of GeoPhysics, China Earthquake Administration, 2000. (in Chinese)
- [14] 国家地震局.中国地震烈度区划图(1990)[S].北京:地震出版社,1992.
- China Earthquake Administration.The seismic intensity zonation map of China (1990)[S].Beijing: Seismological Press, 1992. (in Chinese)
- [15] 中国地震动参数区划图:GB18306—2001 [S].北京:中国标准出版社出版,2001.
- Seismic ground motion parameter zonation map of China: GB18306—2001 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001. (in Chinese)
- [16] 中国地震动参数区划图:GB18306—2015 [S].北京:中国标准出版社,2015.
- Seismic ground motion parameters zonation map of China : GB18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [17] 俞言祥,汪素云.中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J].震灾防御技术,2006,1(3):206-217.
- Yu Y X, Wang S Y. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in Eastern and Western China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3):206-217. (in Chinese)
- [18] 俞言祥,汪素云.青藏高原东北地区水平向基岩加速度峰值与反应谱衰减关系[J].地震学报,2004,26(6):591-600.
- Yu Y X, Wang S Y. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in Northeastern Tibetan Plateau Region [J]. ACTA Seismologica Sinica, 2004, 26(6):591-600. (in Chinese)
- [19] Singh S, Donovan N C. Seismic response of frozen-thawed soil systems[C]//Proceedings of Sixth World Conference On Earthquake Engineering.Meerut, India: Sarita Prakashan, 1977, III: 2262-2267.
- [20] Finn W D L, Yong R N Y. Seismic response of frozen ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(10): 1225-1241.
- [21] Dutta U, Yang Z, Xu G, et al. Effect of seasonally frozen soil and permafrost on seismic site response[C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing:[s.n.], 2008.
- [22] Yang Z, Dutta U, Xu G, et al. Numerical analysis of permafrost effects on the seismic site response[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 282-290.
- [23] Xu G, Dutta U, Yang Z, et al. Seasonally frozen soil effects on the seismic site response[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 25(2): 53-70.
- [24] Dadfar B, Naggar M H EI, Nastev M. Experimental and analytical study of seismic site response of discontinuous permafrost [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1363-1375.
- [25] 徐学燕,徐春华,李晓稚.冻土地地震加速度反应谱研究[J].岩土工程学报,2003,25(6):680-683.
- Xu X Y, Xu Ch H, Li X Zh. Research on earthquake acceleration response spectrum of frozen soil ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6):680-683. (in Chinese)
- [26] 王兰民,张冬丽,吴志坚,等.地温对冻土动力特性及其场地地震动参数的影响[J].中国地震,2003,19(3):195-205.
- Wang L M, Zhang D L, Wu Zh J, et al. The influence if earth temperature on dynamic characteristics of frozen soil and the parameters of ground motion on the sites of frozen soil [J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(3): 195-205. (in Chinese)
- [27] 王丽霞,凌贤长,徐学燕,等.多年冻土地路基地震加速度反应谱特性研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1330-1335.
- Wang L X, Ling X Zh, Xu X Y, et al. Study on response spectrum characteristics of earthquake acceleration for roadbed on permafrost site [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1330-1335. (in Chinese)
- [28] 严松宏,陈兴冲,高峰.多年冻土区场地地震动随机特性研究[J].岩土工程学报,2005,27(9):1012-1015.
- Yan S H, Chen X Ch, Gao F. Study on stochastic earthquake characteristics of ground in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1012-1015. (in Chinese)
- [29] 齐吉琳,马巍,孙崇绍,等.张掖地区季节冻土地上的地震动效应[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2082-2088.
- Qi J L, Ma W, Sun Ch Sh, et al. Seismic response analysis of seasonally frozen ground of Zhangye area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12):2082-2088. (in Chinese)
- [30] 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.
- Gao F, Chen X Ch, Yan S H. Influence of permafrost and seasonally frozen soil on seismic responses of sites

