

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220704001

西北季节性冻土场地地震反应特性研究*

黄安琪, 张熙胤, 管嘉达, 张益舫, 孙斌洁, 丁明波

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 我国西北地区被季节冻土全覆盖,且近年来该区域地震频发。为研究我国西北地区季节性冻土地震反应特性,开展了季节性冻土地震动台试验,并建立了不同冻结深度的三维实体有限差分模型,对比分析了不同地震激励作用下的季节性冻土地震反应特征和土体的动剪应力—动剪应变规律。结果表明:在地震激励下,冻土层的存在虽然有效抑制了地震动能量,但冻结期场地的水平位移与非冻结期相比明显较大,且竖向位移呈显著的层状震陷特征;冻土地震的峰值放大系数呈先增大后减小然后再增大的规律,并且冻土层深度越大其峰值放大系数越小。此外,通过土体的动剪应力—动剪应变关系可以发现,冻土地震反应具有明显的非线性特征,且冻土层的存在对地震能量具有一定的削弱作用。

关键词: 季节性冻土地震;地震反应特征;有限差分模型;动剪应力—动剪应变

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0156-09

Seismic Response Characteristics of Seasonally Frozen Soil Sites in Northwest China

HUANG Anqi, ZHANG Xiyin, GUAN Jiada, ZHANG Yibo, SUN Binjie, DING Mingbo
(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Seasonally frozen soil covers the whole area of Northwestern China where earthquakes have happened frequently in recent years. In order to study the seismic response characteristics of seasonally frozen soil sites in Northwestern China, shaking table tests of seasonally frozen soil sites were carried out, and three-dimensional solid finite difference models with different freezing depths were established. Seismic responses and soil dynamic shear stress-strain relationship under different seismic excitations were analyzed. Results showed that the existence of the frozen soil layer effectively restrained the ground motion energy, while the horizontal displacement of the site in frozen status was larger than that in unfrozen status. Besides, the vertical displacement showed a significant layered seismic settlement. The peak amplification coefficient of the seasonally frozen soil first increased, then decreased and finally increased again. It was found that the thicker the frozen layer, the smaller the peak amplification coefficient. In addition, the dynamic shear stress-strain relationship of soil exhibited obvious nonlinearity, and the frozen soil layer can dissipate the seismic energy during earthquakes.

Keywords: seasonally frozen soil site; seismic response; finite difference model; dynamic shear stress-strain relationship

* 收稿日期:2022-07-04;修回日期:2022-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52068045,U21A2012)资助

作者简介:黄安琪(1995—),女,硕士研究生。主要从事寒区工程防震减灾研究。E-mail:616424696@qq.com

通讯作者:张熙胤(1989—),男,教授,博士。主要从事寒区工程防震减灾研究。E-mail:zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

0 引言

十四五以来,在深入实施西部大开发战略背景下,统筹推进西部地区基础设施网路的建设举足轻重。西北地区不但是我国的气候变化敏感区,还是我国冻土的主要分布区,除了青藏高原、阿尔泰山、天山、祁连山的高寒山区有着多年冻土分布外,其余多数地区分布着3~6个月的季节性冻土^[1]。早在20世纪70年代,W.D.L.Finn等^[2]就已经关注到了冻土地震反应的特殊性,此后虽然也有部分学者针对冻土地震效应相继做了一些探索性研究并建议场地分类时考虑冻土效应^[3],但冻土地震的特殊性一直未引起足够重视。

近年来,随着冻土区地震活动频繁发生^[4-6],冻土区工程结构抗震问题又重新引起了各方的关注^[7-10],其中冻土地震反应特性分析是冻土区结构抗震设计和性能评估的首要前提。

目前,学者们对于冻土地震问题的研究主要以剪切波速为切入点,以现场地脉动观测和室内动三轴试验结合数值模拟为研究方法,分析探讨冻土层深度、地面温度、含冰量等表征冻土地震特征参数对场地地震反应的影响。L.Wang等^[11]通过研究发现地面温度和含冰量是影响多年冻土地震剪切波速的重要因素;Z.Yang等^[12]对多年冻土地震不同冻土层深度和不同剪切波速的地震反应进行了分析,认为多年冻土层的放大效应主要由顶部的季节活动层引起,其本身反而会减弱基岩运动的高频成分,与之相得益彰的是孙益哲^[13]依据动三轴试验结合有限差分软件模拟分析同样认为冻土层的存在一定程度上削弱了地震反应;徐学燕等^[14]、陈卓识^[15]先后通过分析季节性冻土地震的加速度反应谱给出了相应的抗震设计建议;师黎静等^[16]提出了一种估算冻土层深度的方法,并由此研究了季节性冻土地震的动力学参数和地震动差异;Y.Miao等^[17]则提出了一个与加权累积冻结天数相关的经验模型,由此估计季节性冻土对近地表地震速度的影响;G.Xu等^[18]通过对剪切波速和冻土层深度的不确定性分析认为季节性冻土厚度与地震反应谱呈负相关性;齐吉琳等^[19]通过地脉动观测结合动三轴试验对季节性冻土地震的地震动效应进行了研究,同样认为冻土层对强震有一定抑制作用。

对于自由场地地震问题的研究,还有很多学者

选择采用振动台试验的方法进行分析并获得了一定成果^[20-22],但很少有研究在自由场地振动台试验中考虑冻土效应的影响。

鉴于此,本文开展了季节性冻土地震非冻结期和冻结期的自由场地振动台试验研究,并建立了不同冻结深度的季节性冻土地震有限差分模型,通过与试验对比,验证了其有效性及可靠性,分析了不同地震动强度和不同冻结深度季节性冻土地震的地震反应规律以及土体动剪应力—动剪应变规律,旨在为季节性冻土区结构抗震设计和性能评估提供参考和依据。

1 季节性冻土地震振动台试验及模型验证

1.1 振动台试验设计

以我国西北某季节性冻土地震1:10缩尺模型为研究对象,土体选用季节性冻土区的粉质黏土^[23],以分层填土的方式填入1.7 m(长)×1.7 m(宽)×2.0 m(高)的层状剪切模型箱中(图1(a)),填土高度为1.6 m。前期进行非冻结期的振动台试验,用以验证模型箱的边界效应并作为后续冻结期试验的参照。

为保证模型箱上部土体形成厚度为40 cm的冻土层,土体装填过程中在相应位置布设制冷循环铜管(图1(b)),通过连接外部的低温恒温控制系统实现土体降温冻结为监测土体温度变化,每60 mm左右土层中埋设温度传感器。另外,在土体中布设加速度和位移传感器,具体布置如图1(c)所示。试验加载方向为水平向,采用三种典型的地震记录分别是:EL-Centro波、Kobe波和Northridge波,加载工况见表1。

考虑到振动台和模型尺寸有限,无法准确反应实际的大变形地震动情况,因此采用室内振动台试验旨在揭示季节性冻土地震地震动规律,主要为建立科学合理的有限差分模型提供数据支撑。

1.2 试验结果分析

通过季节性冻土地震振动台试验,可以直观看到冻土层的存在对场地放大效应的影响。

图2给出了季节性冻土地震在0.3g各工况地震波输入时的峰值放大系数。在图2中,非冻结期场地的峰值放大系数呈现先增大后减小的趋势,冻结

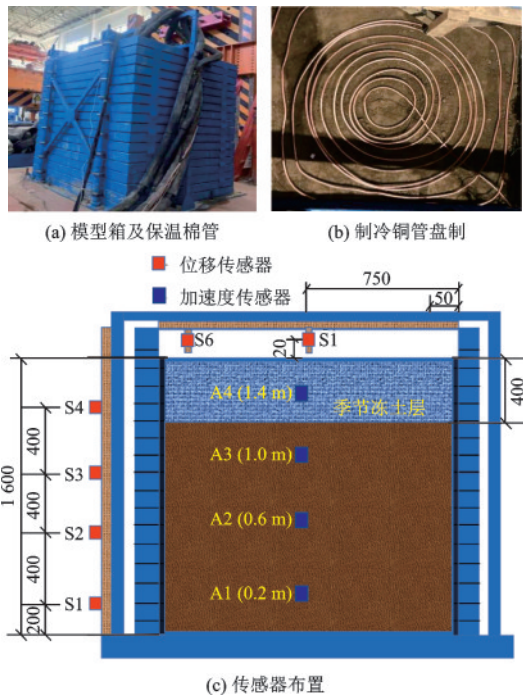


图1 模型及传感器布置

Fig.1 Model and sensors arrangement

表1 试验加载工况

Table 1 Test loading condition

地震波形	编号	加速度峰值/g	循环次数	地震动持续时间/s
EL-Centro	EL1	0.30	3	15
EL-Centro	EL2	0.57	3	15
EL-Centro	EL3	0.96	3	15
Kobe	KB1	0.30	3	15
Kobe	KB2	0.57	3	15
Kobe	KB3	0.96	3	15
Northridge	NR1	0.30	3	15
Northridge	NR2	0.57	3	15
Northridge	NR3	0.96	3	15

期则是先增大后减小然后再增大再减小。造成这一现象的原因可能是冻结期上部土层进入塑性阶段。三种工况下,非冻结期加速度放大系数跨度较大,均介于1~1.9,而冻结期场地的加速度峰值系数介于0.6~1.2,冻结期土层的加速度响应明显小于非冻结期。由此可以发现,季节性冻土层的存在抑制了土层的加速度响应。

1.3 有限差分模型建立

基于有限差分软件建立了季节性冻土地模型,为验证数值分析模型,建立的季节性冻土地

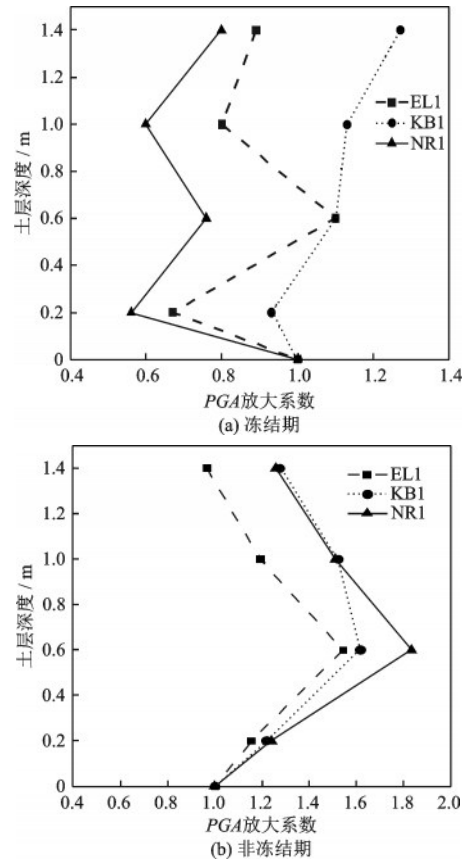


图2 不同土层深度季节性冻土地峰值放大系数

Fig.2 Peak amplification factor of seasonally frozen soil site at different soil depths

模型尺寸、加载条件、土体参数等条件均与振动台模型试验保持一致。

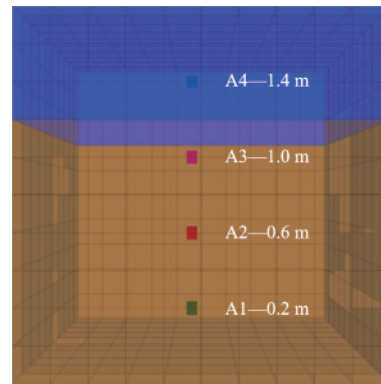


图3 有限差分模型

Fig.3 Finite difference model diagram

数值分析模型以0.16 m为单位划分网格,场地土体的本构关系采用Mohr-Coulomb模型并采用瑞利阻尼,临界阻尼比取用5%,而中心频率通过建立无阻尼模型在重力作用下求解一定步数获得。模

型的边界条件选用静态边界,地震波从模型底部沿水平向输入。

1.4 振动台试验与数值模拟结果对比

图4(a)为NR1工况下振动台试验过程中土体顶面的位移时程曲线,图4(b)为NR1工况下数值模拟过程中土体的竖向位移云图。数值模拟结果表明,在地震动输入后模拟的场地位移变形呈层状分布,土体整体下陷,最大震陷位移为0.346 8 mm。结合振动台试验结果,震前竖向位移计的读数为-7.98 mm,加载NR1工况时位移计的峰值位移为-8.46 mm,震后为-8.066 mm,说明地震激励后土体震陷,最大震陷位移为0.48 mm,数值模拟也表现出类似的变形规律。图5为NR3工况下中轴各监测点处试验与模拟的加速度时程对比,两者加速度幅值随深度呈现先增大再减小后增大的趋势,由于动力加载试验在加速度测定部分存在一定的不稳定性,而模拟分析的结果更趋于理想化且时间步长更为细化,所以二者的加速度时程规律虽然一致但存在一定的偏差。

根据以上模拟与试验的位移反应和加速度规律对比分析可知,本文建立的季节性冻土地模型

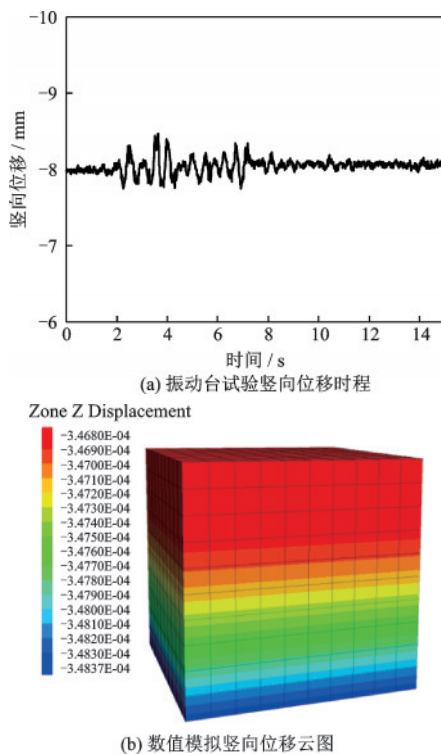


图4 NR1工况下试验与模拟竖向位移
Fig.4 Experimental and simulated vertical displacement under NR1 condition

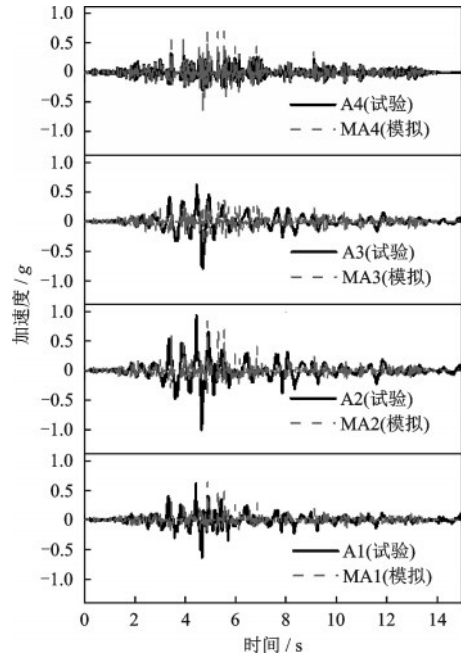


图5 NR3工况下模拟与试验加速度时程对比
Fig.5 Experimental and simulated acceleration time history under NR3 condition

能够较准确合理地模拟场地地震反映特征。

2 不同厚度季节冻土层场地地震反应分析

2.1 分析工况

基于上述验证合理可行的季节性冻土地模型,充分考虑不同冻结深度的季节性冻土地在不同地震动输入下的加速度时频谱以及土体的动剪应力-动剪应变规律,衍生建立原型场地模型。建模方式同1.3节一致。表2为所建模型的不同工况设置,表3为土体参数设置,土体参数均为试验用土的室内实测值,试验仪器为CSY-20型低温冻土三

表2 模型参数设置

Table 2 Model parameters settings

模型名称	冻结深度/m	加载工况(参照表1)			
M1 (非冻结期)	0	NR1	KB1	NR1	EL1
M2	1	NR1	NR1	NR2	NR3
M3	2	NR1	NR1	NR2	NR3
M4	3	NR1	KB1	EL1	NR1 NR1 NR2 NR3

表3 土体参数设置

Table 3 Soil parameter settings

土体名称	平均容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比
非冻土	19	3	21.6	22.5	0.3
季节性冻土	18	10.6	251	36	0.2

轴仪。

根据文献[1]所知西北地区季节性冻土的冻结深度多数分布在0~3 m,因此设置模型的冻结深度在此范围内。其中,模型M1与M4分别输入EL1、KB1和NR1工况用于探究不同地震波激励下非冻结期与冻结期季节性冻土地场的差异;M2、M3和M4统一输入NR1工况用于探究同一地震激励下不同冻结深度的影响规律;再分别输入NR1、NR2、NR3工况用于探究不同冻结深度下同一地震波不

同激励强度的影响规律。

2.2 场地地震动位移及应力分析

图6为模型M1和M4在NR1工况下的位移以及应力云图,由于篇幅有限M1和M4在NR3工况下的位移以及应力云图、M2与M3的位移与应力云图不再附于文中。

对比两种模型的位移和应力反应可以看到,水平位移云图表现差异最大。当输入NR1工况时,场地竖向位移呈现层状分布且场地整体发生震陷,M1场地土层深度越深位移变化越小,位移变化集中在36.3~32.5 mm,M4场地位移变化规律同M1相同,但位移变化集中在82.6~75 mm,显然M4具有更大的震陷程度;通过M1和M4的水平位移云图可以看到,在数值上二者的水平位移在场地底部基本相同,沿深度向上差异明显。

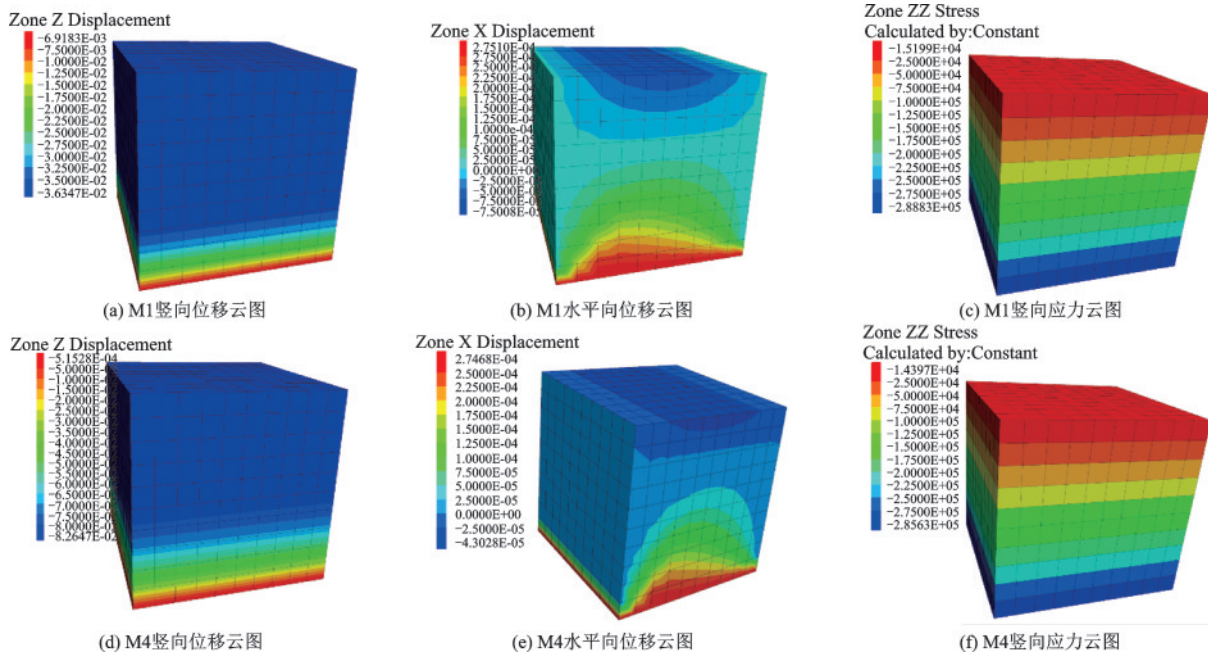


图6 NR1工况下位移与应力云图分布

Fig.6 Displacement and stress distributions under NR1 condition

进一步分析两者的竖向位移反应,可以看到最大应力均出现在地表,M1地表的震动应力为15.2 kPa,M4地表的震动应力为14.4 kPa,随深度增加二者的应力值逐渐接近。同理,输入NR3工况并与NR1工况进行对比分析,可以发现M1的地表竖向位移减小了0.1 mm,而M4增加了0.8 mm;二者的水平位移整体增大,但M1的水平位移变化程度更大;二者的竖向应力变化微弱,地表

最大震动应力均减小了0.002 kPa左右。关于冻结深度对于位移及应力反应的影响,比较M2、M3和M4的位移与应力云图可以发现,在输入相同震动的情况下,冻结深度越大震陷程度和水平位移变化越小,应力只在场地底部有变小的趋势。

总结分析上述场地位移与应力云图可以发现,季节性冻土地场非冻结期与冻结期的震动位移

与应力规律有以下几个特点:

(1)季节性冻土场地在 seismic 激励后竖向位移分布呈层状,随土层深度越深位移变化越小并整体发生震陷,而冻结期的季节性冻土场地的震陷程度明显更大,这一规律与文献[13]一致。由于加载为水平向地震动,场地冻结期与非冻结期水平位移反应差异明显,随土层深度增加差异变大,而两者的地表地震动应力规律一致,非冻结期的地表动应力略大于冻结期。

(2)随着季节性冻土场地输入地震动强度的增大,非冻结期场地的竖向位移减少且水平位移变化程度加剧,而冻结期场地的竖向位移增加,二者的最大动应力均减小。

(3)季节性冻土场地冻结期的位移反应随冻结深度增加而减小,并且应力反应差异不大但也有变小的趋势。

2.3 地震动加速度时程分析

地震动具有两类明显的非平稳特性分别是时域非平稳性和频域非平稳性。对于时域非平稳性,它指的是地震动强度具有明显的时间变化性,对于频域非平稳性则指的是地震动的频域能量分布随时间变化^[24]。通过研究季节性冻土场地地震动加速度时程的峰值放大系数以及傅立叶谱,进而了解其时、频域特征,由此全面地认识季节冻土层的存在对场地地震反应的影响。

为了探究季节性冻土场地冻结期与非冻结期场地地震反应的差异,分别输入 EL1、KB1 和 NR1 工况提取加速度时程并绘制其部分时、频域特性图谱如图 7~10 所示。

通过图 7 的加速度时程图可以看到冻土层的存在改变了场地土层的地震动特性,具体如下:在土层深度 14 m 以下,场地冻结期的加速度幅值大于非冻结期,而 14 m 以上冻结期的加速度幅值明显小于非冻结期,计算三种工况下地表的加速度峰值变化差值可以发现,冻结期场地地表的峰值加速度比非冻结期小了 12.5%~21.4%,由此说明冻土层的存在一定程度上抑制了地震反应,主要表现在对峰值加速度的削弱,这一规律与文献[13]、[19]相一致。

为了研究不同冻结深度的季节性冻土场地地震反应规律,图 8 为 M2、M3 和 M4 模型统一输入

NR1 工况下的加速度峰值放大系数。总的来说,各模型的时域变化规律基本一致,但冻结深度越大,加速度峰值时间出现的时间越早,地表处的峰值放大系数越小。

图 9(a)和(b)分别为冻结期和非冻结期 NR1 工况下场地土层深度 2 m 处和地表处的傅里叶谱,可以发现随着土层深度增加直至地表处时,季节性冻土场地冻结期的卓越频率逐渐减小到同非冻结期接近且振幅的放大效应显著。由图 10(a)和(b)可知,季节性冻土场地的峰值放大系数呈现先增大再减小再增大的规律,非冻结期的峰值放大系数范围普遍大于冻结期。有关冻结期的峰值放大系数规律与试验所得结论一致,非冻结期的规律与试验有一定差异。由此说明,虽然季节性冻土场地振动台试验无法真实反应大变形,但仍能合理体现部分地震反应规律。

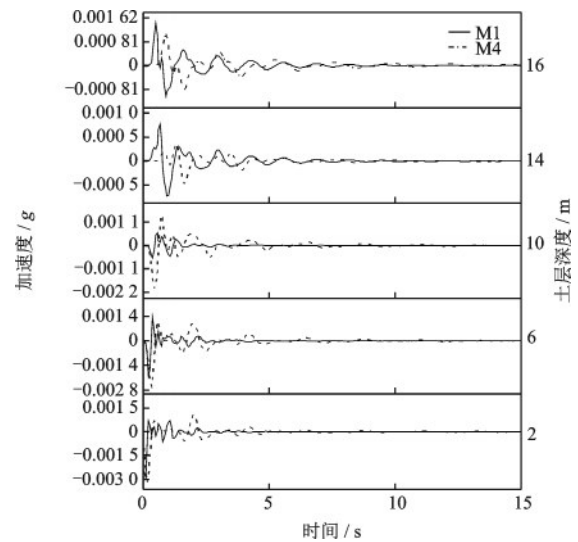


图 7 NR1-非冻结期与冻结期加速度时程

Fig.7 Acceleration time history of non-freezing period and freezing period under NR1 condition

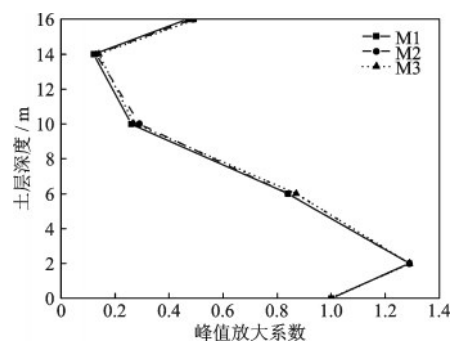


图 8 NR1 工况下的加速度峰值放大系数

Fig.8 Peak amplification factor of acceleration under NR1 condition

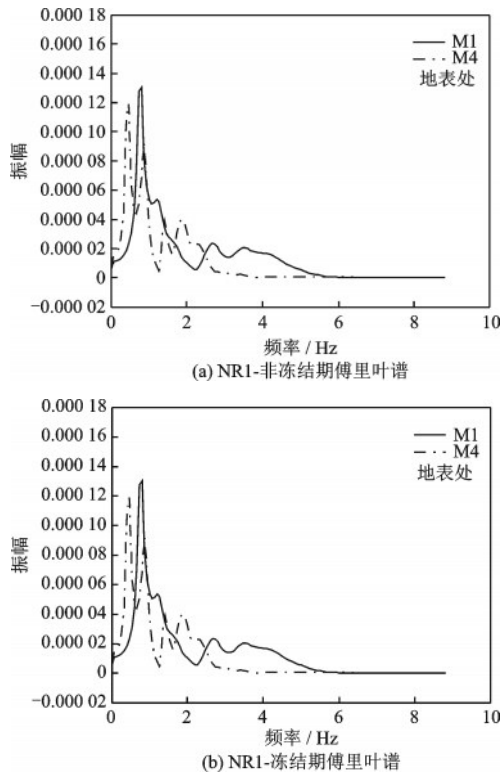


图9 季节性冻土地地冻结期与非冻结期频域分析

Fig.9 Frequency domain analysis of freezing period and non-freezing period in seasonally frozen soil site

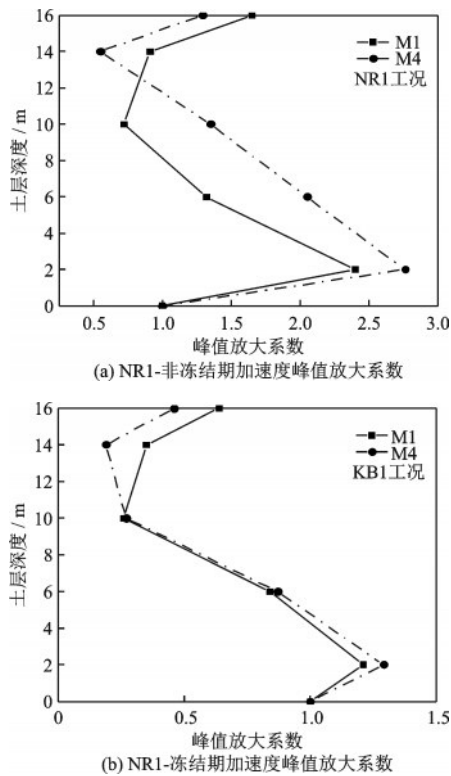


图10 季节性冻土地地冻结期与非冻结期时域分析

Fig.10 Time domain analysis of freezing period and non-freezing period in seasonally frozen soil site

3 季节性冻土地地土体动剪应力—动剪应变关系分析

土体的动剪应力—动剪应变关系同样可以反应地震动能量对土层的影响^[25]。根据 M.Zeghal 等^[26]提出的线性反演法(式(1)~(2)),通过输入 NR1 工况,监测模拟场地各测点的加速度和位移来探究地震激励下季节性冻土地地土体的动剪应力—动剪应变关系并获取其发展规律。

$$\tau_i(t) = \sum_{k=1}^i \rho \frac{\alpha_k(t) + \alpha_{k-1}(t)}{2} \Delta z_k \quad (i=1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

式中, i 为自地表从上到下的第 i 个测点; τ_i 为测点 i 处的剪应力; ρ 为土体密度; Δz_k 为测点 $k-1$ 至测点 k 的距离; α_k, α_{k-1} 为测点 k 和 $k-1$ 在某时的加速度幅值。

$$\gamma_i(t) = \frac{1}{\Delta Z_{i+1} + \Delta Z_i} \left[(u_i(t) - u_{i-1}(t)) \frac{\Delta Z_{i+1}}{\Delta Z_i} + (u_{i+1}(t) - u_i(t)) \frac{\Delta Z_i}{\Delta Z_{i+1}} \right] \quad (2)$$

式中, γ_i 为测点 i 处的剪应变; u_i 为测点处的位移。

从图 11 中可以看到,当输入 0.3g Northridge 波时,随覆盖层厚度的增加,季节性冻场地土体动剪应力—动剪应变曲线表现出明显的非线性,其面积呈现逐渐减小然后增大再减小的趋势。在 2 m 厚度处,存在动剪应力和动剪应变最大值,说明在场地底部土体发生较大的变形且受到明显的地震动能

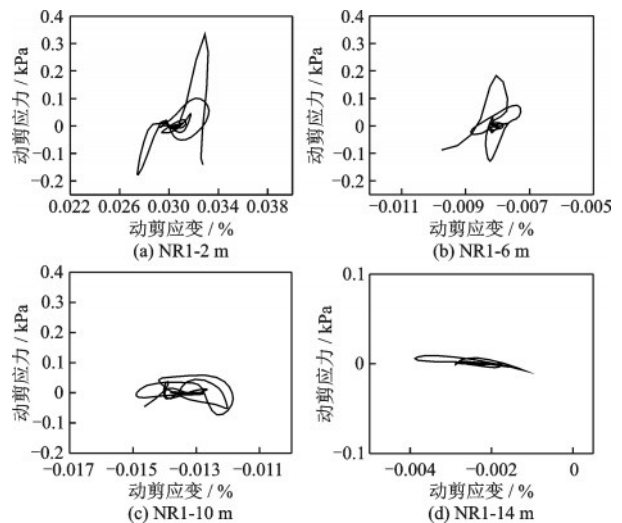


图11 不同土层深度处土体动剪应力—动剪应变曲线

Fig.11 Dynamic shear stress-strain curve at different soil depths

量影响;随着土层深度逐渐升高至14 m处,可以发现与10 m处相比土体的动剪应力—动剪应变曲线面积减小,冻土层处土体的地震动能量减少,这与2.3节中场地峰值加速度的减小正好对应。

4 结 论

为了探究季节性冻土层对场地地震反应的影响,通过振动台试验并结合有限差分数值模拟方法,对季节性冻土地震响应和土体的动剪应力—动剪应变关系进行分析,得到以下主要结论:

(1) 建立的季节性冻土地有限差分模型位移与加速度变化规律与振动台试验结果值吻合较好,能够有效模拟水平输入地震动情况下场地的动力反应,计算结果表明季节性冻土地震的冻结期与非冻结期在地震反应规律上存在明显的差异。

(2) 对比冻结期与非冻结期的季节性冻土地震动反应规律可以发现,季节性冻土地震受地震激励后竖向位移分布呈层状,且冻结期的震陷程度比未冻时更显著。冻结期季节冻土区场地地表的峰值加速度比非冻结期降低了12.5%~21.4%,由此说明冻土层的存在很大程度上削弱了地震反应。

(3) 地震动强度增大后,冻结期场地的竖向位移随之增加;随着冻结深度的增大,冻结期的位移、应力反应和地表处的峰值放大系数均呈现逐渐减小的趋势,并且加速度峰值的出现时间提前。

(4) 通过研究季节性冻土地震土体的动剪应力—动剪应变关系可以发现,季节性冻土地震反应的发展具有明显的非线性特征,并且地震反应所引起的土体变形随着土层深度的减小呈现先减小后增大特征,冻土层削弱地震动能量后则出现明显减小的趋势。

参考文献:

[1] 杨小利,王劲松.西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J].土壤通报,2008,39(2):238-243.
Yang X L, Wang J S. The change characteristics of maximum frozen soil depth of seasonal frozen soil in northwest China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008,39(2):238-243. (in Chinese)

[2] Finn W D L, Yong R N. Seismic response of frozen ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(10):1225-1241.

[3] Cox B R, Wood C M, Hazirbaba K. Frozen and unfrozen shear wave velocity seismic site classification of Fairbanks, Alaska[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2012, 26(3): 118-145.

[4] 盛书中,万永革,王未来,等.2010年玉树 $M_s7.1$ 地震发震断层参数的确定[J].地球物理学进展,2014,29(4):1555-1562.
Sheng S Z, Wan Y G, Wang W L, et al. The fault plane parameter determination of the 2010 Yushu $M_s7.1$ earthquake[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1555-1562. (in Chinese)

[5] Wang W M, He J K, Wang X, et al. Rupture process models of the Yangbi and Maduo earthquakes that struck the eastern Tibetan Plateau in May 2021[J]. Science Bulletin, 2022, 67(5): 466.

[6] 潘家伟,李海兵,刘栋梁,等.2022年青海门源 $M_s6.9$ 地震地表破裂带及发震构造研究[J].地质学报,2022,96(1):215-231.
Pan J W, Li H B, Liu D L, et al. Coseismic surface rupture and seismogenic structure of the 2022 $M_s6.9$ Menyuan earthquake, Qinghai Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022,96(1):215-231. (in Chinese)

[7] 彭强.青藏铁路9度地震区桥梁抗震设计浅析[J].桥梁建设,2005(5):68-69,77.
Peng Q. Simple analysis of aseismatic design of bridges at 9° seismic zone of Qinghai-Tibet railway[J]. Bridge Construction, 2005(5): 68-69, 77. (in Chinese)

[8] 青藏铁路:编写委员会.青藏铁路.科学技术卷[M]//多年冻土篇.北京:中国铁道出版社,2010.
Qinghai-Tibet Railway: writing committee. Qinghai-Tibet Railway. Science and technology volume[M]//Permafrost. Beijing: China Railway Publishing House, 2010. (in Chinese)

[9] 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.
Zhang X Y, Chen X C, Gao J Q. Research advance on seismic performance of bridges in permafrost regions[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(2): 116-120. (in Chinese)

[10] 于生生,张熙胤,陈兴冲,等.场地地震反应分析研究现状及展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(1):181-192.
Yu S S, Zhang X Y, Chen X C, et al. Present research situation and prospect on analysis of site seismic response[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(1):181-192. (in Chinese)

[11] Wang L, Wu Z, Sun J, et al. Characteristics of ground motion at permafrost sites along the Qinghai-Tibet rail-

- way [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(6): 974-981.
- [12] 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.
- [13] 孙益哲. 季节性冻土场地地震动力反应特性研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2020.
Sun Y Z. Study on seismic dynamic response characteristics of seasonal frozen soil site [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University. 2020. (in Chinese)
- [14] 徐学燕, 徐春华, 李晓稚. 冻土场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 C H, Li X Z. Research on earthquake acceleration response spectrum of frozen soil ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, 25(6): 680-683. (in Chinese)
- [15] 陈卓识. 季冻区场地地震响应规律初探[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
Chen Z S. A preliminary study on the law of earthquake ground response in the seasonal frozen regions [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012. (in Chinese)
- [16] 师黎静, 陈盛扬, 黎明. 哈尔滨季节性冻土场地特征参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(5): 1053-1063.
Shi L J, Chen S Y, Li M. Research on the characteristic parameters of Harbin seasonal frozen soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(5): 1053-1063. (in Chinese)
- [17] Miao Y, Shi Y, Zhuang H Y, et al. Influence of seasonal frozen soil on near-surface shear wave velocity in Eastern Hokkaido, Japan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 9497-9508.
- [18] Xu G, Yang Z, Dutta U, et al. Seasonally frozen soil effects on the seismic site response [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2011, 25(2): 53-70.
- [19] 齐吉琳, 马巍, 孙崇绍, 等. 张掖地区季节冻土地震动的地震动效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2082-2088.
Qi J L, Ma W, Sun C S, 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)
- [20] Varghese R M, Latha G M. Shaking table tests to investigate the influence of various factors on the liquefaction resistance of sands [J]. *Natural Hazards*, 2014, 73(3): 1337-1351.
- [21] Toyota H, Towhata I, Imamura S, et al. Shaking table tests on flow dynamics in liquefied slope [J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(5): 67-84.
- [22] 吕西林, 任红梅, 李培振, 等. 液化场地自由场体系的数值分析及振动台试验验证[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增2): 4046-4053.
Lyu X L, Ren H M, Li P Z, et al. Numerical analysis of free field system in liquefiable site and validation of shaking table tests [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup2): 4046-4053. (in Chinese)
- [23] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(5): 77-81.
Xu X Y, Zhong C L, Chen Y M, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 77-81. (in Chinese)
- [24] 范增磊. 非平稳地震动演变功率谱的估计与建模研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
Fan Z L. Study on evolution of non-stationary seismic ground motion estimation and modeling of power spectrum [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017. (in Chinese)
- [25] 阮志环. 砂卵石土场地地震反应特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
Ruan Z H. Study on seismic response characteristics of sand gravel soil site [D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [26] Zeghal M, Elgamel A W, Tang H T, et al. Lotung downhole array II: evaluation of soil nonlinear properties [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 121(4): 363-378.

(本文编辑: 池营营)