

DOI: 10.11779/CJGE202111006

# 冻土-结构相互作用体系振动台试验及数值分析

邢爽, 吴桐, 李曰兵, 潘鑫洲

(东北电力大学建筑工程学院, 吉林 吉林 132000)

**摘要:** 基于冻土-结构动力相互作用体系的振动台试验, 利用自行研制的室内冻土冻结系统, 再现了地震激励下, 冻土地面中上部结构和地基的震害现象以及砂质粉土的液化现象。研究地震作用下, 不同冻结深度的冻土地面的地震响应及其对上部结构的地震响应的影响规律。另外, 利用非线性有限元软件建立了考虑冻土对温度的依存性及地基液化引起的等效剪切刚度变化的非线性计算模型, 为后续的计算分析奠定了基础。分析表明, 地表的地震响应由于土体非线性化进展, 随着输入地震波倍率的增大而变小, 峰值频率变小。上部结构和地基的相互作用明显, 地表面的增幅随着冻结深度的增加而降低, 上部结构的地震响应和峰值频率变大。此可为季冻区冻土-结构动力相互作用研究提供参考。

**关键词:** 振动台试验; 桩基础; 冻土; 液化; 地震响应

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)11-2003-10

**作者简介:** 邢爽(1982—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土动力学和冻土冻胀防治研究等方面的教学和科研工作。E-mail: xingshuang2016@163.com。

## Shaking table tests and numerical analysis of frozen soil-structure interaction system

XING Shuang, WU Tong, LI Yue-bing, PAN Xin-zhou

(School of Civil Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132000, China)

**Abstract:** Based on the shaking table tests on frozen soil-structure dynamic interaction system, the earthquake damage phenomenon of the superstructure and foundation of frozen soil site and the liquefaction phenomenon of sandy silt under earthquake excitation are reproduced by using the self-made indoor frozen soil freezing system, the seismic response of frozen soil sites with different freezing depths and its influence on the seismic response of superstructure are investigated. In addition, a nonlinear model considering the dependence of frozen soil on temperature and the change of equivalent shear stiffness caused by liquefaction of foundation is established by using the nonlinear finite element software, which lays a foundation for the subsequent calculation and analysis. The analysis shows that the seismic response and the peak frequency of the surface decrease with the increase of the input seismic waves due to the non-linear progress of the soil. The interaction between the superstructure and the foundation is obvious, the amplitude of ground surface decreases with the increase of the freezing depth, and the seismic response and the peak frequency of superstructure increase. The above results can provide reference for the study on frozen soil-structure dynamic interaction in seasonal frozen areas.

**Key words:** shaking table test; pile foundation; frozen soil; liquefaction; seismic response

## 0 引言

中国冻土分布广泛, 多年冻土和季节性冻土分别占国土面积的 21.5%和 53.5%<sup>[1-2]</sup>, 并且其中大部分冻土地区位于地震活动区。冻土地区的地表层被一层冬冻夏融的冻结-融化层覆盖, 冻土层的存在使均质场地变为双层地基或多层地基, 改变了地基土的动力特性和卓越周期, 对地震引起的地面运动将产生影响, 从而直接影响上部建筑物的抗震性能的稳定与安全<sup>[3]</sup>。1986年中国发生了德都地震震群。2月9日, 黑龙江德都县发生 5.0 级地震。同年 3 月 1 日发生 5.4 级地震。两次地震德都地区均处于冬季封冻季节, 场地冻

土深 3 m。地震使震中心樟河镇的 7 栋 3 层房屋(其中 2 栋是 4 层)受到严重损害。然而, 这个地区使用期限超过 15 年的大多数泥木房屋, 即木屋架, 木柱, 草瓦房屋的柔性结构损害很轻。同年夏季, 8 月 16 日发生震级 5.0 级地震。此时, 德都地区冻土层全部融化, 地震造成的震害与冬季造成的震害后果相反。对刚性的多层建筑物没有带来新的破坏。相反, 对冬季破坏很轻的单层泥木结构房屋破坏严重。本次

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908106); 吉林省科技发展计划项目(20200801010GH)

收稿日期: 2021-01-25

表 1 振动台相关参数

Table 1 Parameters of shaking table

振动台尺寸	最大加速度/(m·s <sup>-2</sup> )		最大位移/mm	频率范围/Hz	最大荷载/kg
	无荷载时	有荷载时			
1200 mm×600 mm	24.5	0.8	100	0.5~200	300

震害现象充分表明研究冻土地建筑结构的地震响应有着非常重要的意义。

冻土作为一种特殊的土体，具有常规土典型的非线性，温度、围压的变化也会导致冻土的动力学性能的变化<sup>[4-8]</sup>。冻土的动力学特性是寒区工程建设抗震设计的重要依据之一。已有的研究表明冻土的动力特性与常规土有着明显的差别。目前对于冻土的研究主要集中在冻土的动强度和动力学特性以及冻土的本构关系上，对于冻土地震反应及其对上部结构的地震反应的影响规律还不明确，相应的研究成果<sup>[9-13]</sup>还不多。刘鸿绪等人通过实地观测与室内分析计算，研究了季节冻土层对房屋地震破坏的影响，表明刚性结构冬期震害比夏季严重，建议应考虑冻土层对各类结构地震反应的影响<sup>[14]</sup>。Yang 等通过振动台试验，采用水泥砂浆层模拟冻土，研究了冻土-液化土-单桩三者之间的相互作用，分析了由于存在冻土层这一因素对于地基液化和桩基承载性能的影响<sup>[15]</sup>。

已有的研究中，虽利用振动台试验针对土结相互作用体系的动力响应进行了研究<sup>[16-18]</sup>，但缺乏考虑冻土地震上部建筑结构的震害响应研究。而冻土独特的物理力学性质以及动力荷载的特殊性使得在寒区工程建设时必须综合考虑冻土和地震荷载问题。但是，现行的《抗震设计规范对场地的分类和抗震设计按照常规土进行，没有考虑冻土层对地震动响应和反应谱的影响。近年来，随着国家一系列关于寒区经济政策的实施，在冻土地区进行水利工程、工业与民用建筑及交通运输工程的建设，就必须对冻土及其与工程建筑物相互作用的一系列工程冻土学理论和实践问题做出解答，以确保冻土地基上工程建筑物的稳定性、耐久性及经济合理性，因此，研究冻土地震及其上部结构的地震动响应规律具有重要的科学意义和工程应用价值。

本文基于振动台试验，利用自行研制的人工土体冻结系统，再现了地震作用下，冻土地震中地基和上部结构的震害现象以及砂质粉土地基的液化现象，研究地震作用下，不同冻结深度的冻土地震的震害响应及其对上部结构地震响应的影响规律。并利用非线性有限元程序，建立一套通用的可用于冻土-结构相互作用研究的模拟分析方法，有利于促进冻土与结构相互作用体系的地震响应研究的发展，从而对现行规范中冻土地震抗震设计提出初步建议。

1 振动台模型试验

1.1 振动台系统介绍

本试验所采用的振动台可水平双向加载，驱动台面尺寸为 1.2 m×0.6 m，其中加振方向是 1.2 m 长度方向。振动台具体参数见表 1。

1.2 土体边界条件模拟

在实际的环境下，地基在理论上是无边界的，而在振动台试验过程中，由于受试验环境的影响，只能用有限尺寸土槽装模型土来模拟地基。这样，地基边界上的波动反射以及土-结构相互作用体系振动形态的变化将会给试验结果带来一定的误差，即所谓“边界效应”。为消除边界效应的影响，本试验采用自制的柔式叠层剪切土箱，剪切土箱内尺寸为宽 600 mm、深 400 mm、高 480 mm。该模型箱由矩形平面钢框架由下而上叠合制成，层间放置轴承使各层之间可以相对自由滑动，使土体模型的剪切变形不受约束，以模拟土体在动荷载作用下的剪切变形。由于本试验采用的是饱和地基，为防止试验时漏水，试验土箱内壁贴厚度为 2 mm 预制的橡胶模，组装完成的层状剪切模型土箱如图 1 所示，图 2 为层状剪切土箱激振变形示意图。

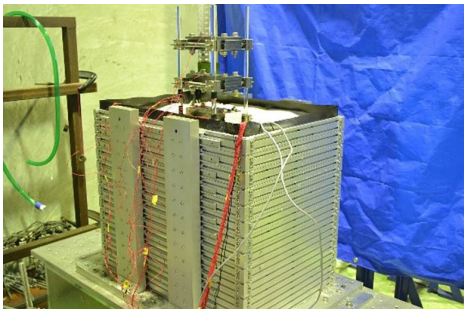


图 1 振动台模型体系

Fig. 1 Shaking table model system

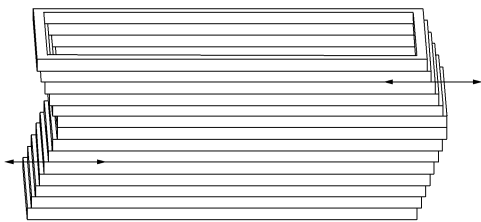


图 2 层状剪切土箱激振变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of seismic deformation of layered shear soil box

1.3 模型的相似设计

振动台模型试验结果的可靠性取决于试验模型能否真实地再现原型结构体系的实际工作状态。在现有的冻土 - 结构动力相互作用的振动台试验中, 由于冻土的复杂性和特殊性, 一般只将上部结构和基础按一定的比例进行缩小, 而忽略了土体的相似模拟, 为了使模型试验结果可以真实地反映实际结构的性状, 本试验使用重力场的相似法则。已知模型的几何尺寸、质量密度和弹性模量等参数, 假定原型与模型均符合线弹性应力应变关系, 可得到材料力学特性及结构动力特性的相似关系。为了反映动力作用效应, 应用动力作用线性累积损伤原理, 并考虑结构的振动与地基土层的动力特性, 遵循 Bockingham  $\pi$  定理分析建立了模型的几何尺寸、弹性模量、密度、时间和加速度等物理量相似关系, 具体相似比见表 2。

表 2 振动台模型试验相似比例

Table 2 Scaling factors for shaking table tests				
类型	参数	相似关系	相似比	
			结构	地基土
几何特征	长度	$\lambda$	25	25
	位移	$\lambda\lambda_e$	25	25
材料特征	弹性模量	$\lambda_E$	3	1
	密度	$\lambda_\rho$	1	1
	应变	$\lambda_e$	1	1
	应力	$\lambda_\sigma$	3	1
动力特征	时间	$(\lambda\lambda_e)^{0.5}$	5	5
	加速度	1	1	1

1.4 上部结构和地基模型的设计与制备

图 3 为振动台模型试验概要图, 上部结构模拟 2 层框架结构, 柱、梁、基础梁使用与桩相同的丙烯圆棒, 柱、梁直径 12 mm, 基础梁直径 18 mm。各接合部用螺栓刚性接合, 各层上以 3 kg 的铁板为质量负重。基础质量为 4.52 kg, 建筑物模型质量为 12.28 kg, 基础固定时上部结构的固有振动频率为 25.3 Hz。桩基建筑物模型的上部构造由 4 根丙烯制成的圆形桩支撑, 桩径为 15 mm, 桩长为 497 mm。桩头及桩端作为固定条件。另外, 桩头通过使用黏接剂与上部结构固定。饱和地基模型土采用砂质粉土, 密度为 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 粒径为 0.635~0.976 mm, 平均粒径  $D_{50}$  约为 0.205 mm。颗粒为次棱角状, 颗粒长径比分布为 1.16~2.27, 颗粒圆度分布为 1.09~1.84。采用人工落雨法制作地基模型, 将试样分为 10 层, 每层试料的落下高度控制为定值。通过不同的落下高度可以获取不同相对密度的试样。本研究中制作的地基模型的相对密度为 60%。结构与土体的参数见表 3, 4。

1.5 冻土模型的制备

关于冻土地基的制作, 使用了如图 4 所示的冻结

系统。冻土模型利用循环制冷机和冷冻板制作。首先制备与土槽(柔式叠层剪切箱)相同尺寸的冷冻板, 将其平放在未冻结土的上部, 然后利用冷冻机将制冷剂冷却到理想温度(-20℃), 并使其在冷冻板里均匀循环, 使其形成温度均匀恒定的冷场源, 模拟天然冻土的形成过程。在冻结循环之前, 在冻土中设置温度传感器和冻结深度计用以观察测量冻土深度, 分阶段进行不同冻结深度的冻土-结构的振动台试验。

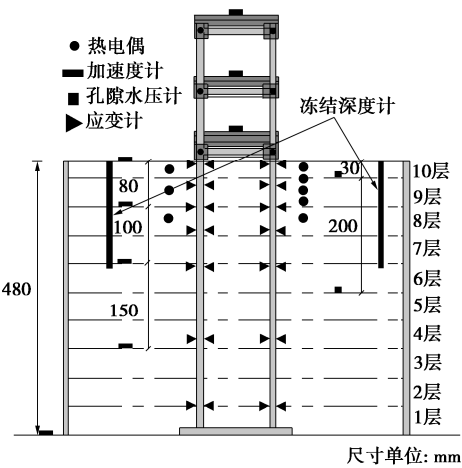


图 3 振动台模型试验概要图

Fig. 3 Overview of shaking table test model

表 3 结构参数

Table 3 Parameters of buildings			
结构种类	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	杨氏模量 /(N·mm <sup>-2</sup> )	泊松比
建筑物上部	10.40	205000	0.30
柱	1.19	5000	0.35
建筑物下部	10.40	205000	0.30
基础	10.40	205000	0.30
桩	7.03	11720	0.30

表 4 土体参数

Table 4 Parameters of soils			
密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/%	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /(N·mm <sup>-2</sup> )
1.98	24	35	$1.0 \times 10^{-6}$

注: 土体的抗压强度和弹性模量等会随着温度的改变而变化。

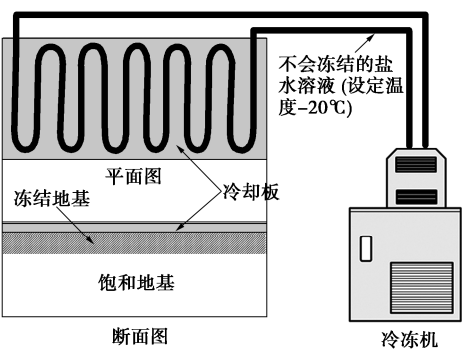


图 4 土体冻结系统

Fig. 4 Soil freezing procedure

图 5 是地基深度 1, 5, 11 cm 的地基温度与冻结时间的关系。如图 5 所示, 地表 1 cm 深度的温度下降较快, 1 d 内降至零下。随着地基深度的增大, 地基的温度变化变小, 地基深度 5 cm 和 11 cm 处的温度分别于 2 d 和 5 d 时下降到零下。另外, 地基达到零下时温度的下降速度变慢。以上数据表明, 这种室内土壤冻结方法可以有效模拟自然条件下土壤冻结, 冻结锋面由地表逐渐下移, 可以明确冻土冻结深度变化并可以考虑冻土的物性对于冻结温度依存性, 是一种简单有效的室内土壤冻结方法。

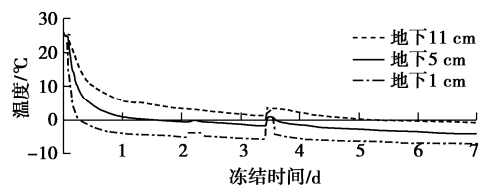


图 5 地基温度与冻结时间的关系

Fig. 5 Relationship between ground temperature and freezing time

1.6 传感器的布置

为观察不同地震波激励下, 冻土 - 结构动力相互作用振动台试验的地震反应, 试验中分别布置了加速度计、应变片, 以量测地基、桩基础和上部结构的地震响应, 同时在距地表 3, 23 cm 的位置布置了孔隙水压力计, 以量测地基中孔隙水压力的变化。另外, 为分阶段进行不同冻结深度的冻土 - 结构的振动台试验, 在地基土中深度 2, 5, 9 和 14 cm 处分别设置了温度传感器 (测温精度为  $-50^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ), 并在土体两侧埋入冻结深度计用以观测冻土深度, 测点布置如图 3 所示。

1.7 振动台试验加载制度

本试验采用依次改变输入振动台的加速度波形种类及加速度振幅的方法实施。输入波使用告示波 (随机相位) 和兵库县南部地震波 (兵库波)。图 6 为 0.179g 告示波和 0.143g 兵库波的加速度时程曲线。告示波和兵库波交替进行, 每种地震波按 3 种级别依次进行加载。首先进行了饱和地基的试验, 然后分别进行了冻结 2 cm、冻结 5 cm、冻结 9 cm 和冻结 14 cm 地基的振动台试验, 具体试验加载制度见表 5。由于篇幅有

限, 本文选取告示波激振下, 饱和地基、冻结 9 cm 和冻结 14 cm 的试验结果进行分析。

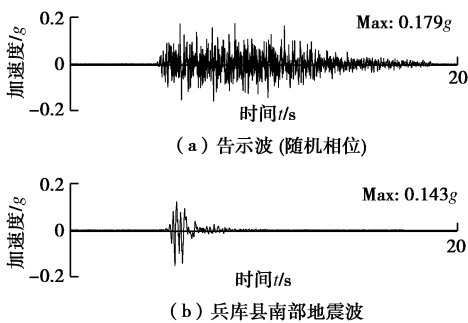


图 6 输入地震波的加速度时程曲线

Fig. 6 Time histories of acceleration of input waves

1.8 振动台试验结果分析

(1) 孔隙水压比

图 7 为试验前和激振 0.358g 告示波后饱和地基的地表情况。试验过程中, 0.072g 告示波输入时, 结构振动幅度小, 地表无出水现象。0.358g 告示波激振后, 如图 7(b) 所示, 土体表面出现大量积水, 并出现“喷砂”现象, 说明饱和砂土发生液化。这一现象与图 8(b) 的孔压比时程曲线结果相吻合。

图 8 为不同工况条件下孔隙水压比时程曲线。由图 8(a), (b) 可知, 饱和地基 0.072g 告示波激振时, 3 cm 深度处和 23 cm 深度处的孔隙水压比上升较小, 没有发生液化现象, 与地基各深度处的反应谱特征一致。3 cm 深度处孔隙水压力比在开始段出现瞬时负压。0.358g 告示波激震时 23 cm 深度处的孔隙水压比在 5 s 附近迅速上升达到 0.8, 地基土液化, 与地基不同深度处的加速度反应谱中峰值变小、卓越周期影响范围变广的液化特征相对应。另外, 反映出地基液化程度随着输入地震波激振振幅的增大而增大。

对比图 8(a), (c), (e) 可知: 深度 3 cm 处的孔隙水压比都很小, 几乎没有上升; 在深度 23 cm 处, 饱和地基和冻结 9 cm 地基中孔隙水压比没有太大的差异, 但是在冻结 14 cm 地基中可以明显的看出其孔隙水压比大于在饱和地基和冻结 9 cm 地基。由图 8(d), (f) 可知, 冻结地基中深度 3 cm 处, 孔隙水压比很小, 几乎没有上升, 这是由于此处在冻结层中,

表 5 试验加载制度

Table 5 Test loading system

激励地震波	加速度峰值	工况代号				
		饱和地基	冻结 2 cm	冻结 5 cm	冻结 9 cm	冻结 14 cm
告示波	0.072g (0.4 倍)	1-WN	1-F2	1-F5	1-F9	1-F14
	0.179g (1.0 倍)	2-WN	2-F2	2-F5	2-F9	2-F14
	0.358g (2.0 倍)	3-WN	3-F2	3-F5	3-F9	3-F14
兵库波	0.057g (0.4 倍)	4-WN	4-F2	4-F5	4-F9	4-F14
	0.143g (1.0 倍)	5-WN	5-F2	5-F5	5-F9	5-F14
	0.286g (2.0 倍)	6-WN	6-F2	6-F5	6-F9	6-F14

冻结层抑制了土体发生液化, 与图 11 (d) 中地基加速度反应谱的特征相对应。在冻结地基深度 23 cm 处, 孔隙水压力比达到 1.0, 冻土下面的融土部分完全液化。

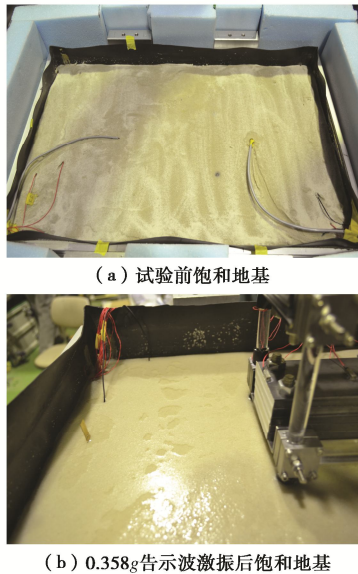


图 7 试验前与试验后地表形态对比图

Fig. 7 Comparison of surface morphologies before and after tests

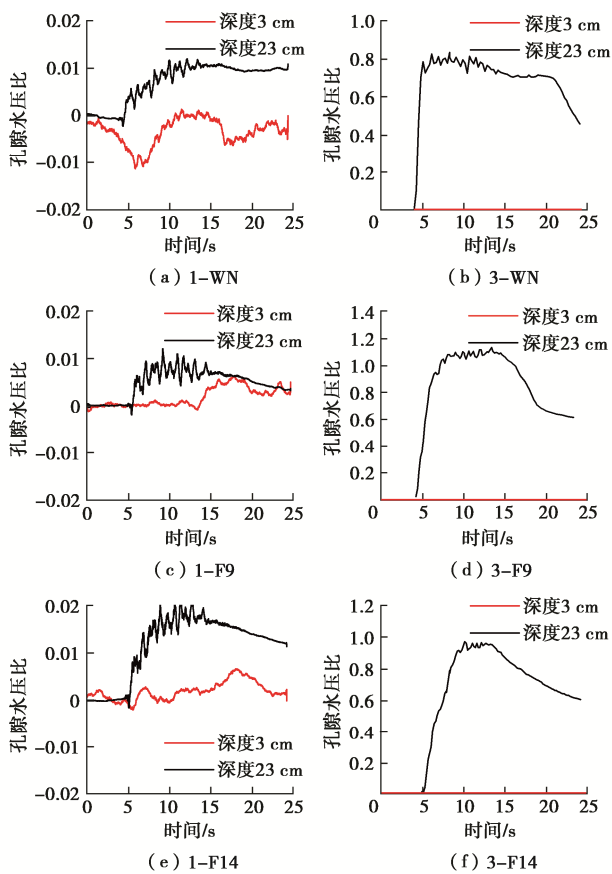


图 8 孔隙水压比时程曲线

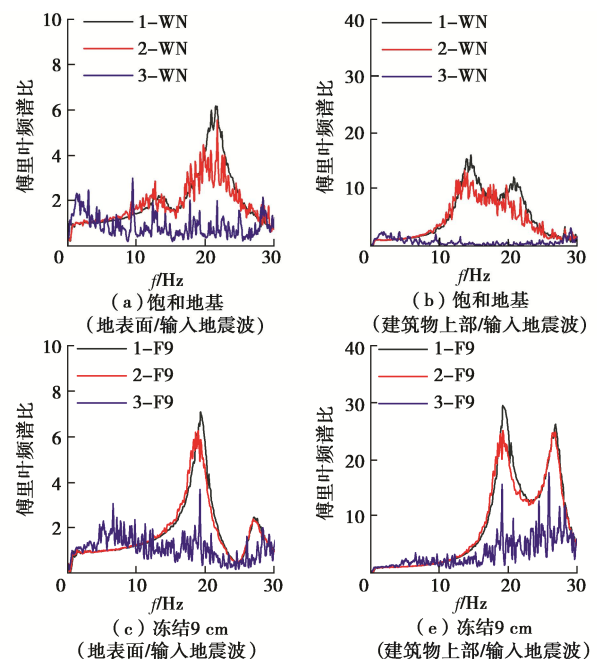
Fig. 8 Time histories of pore water pressure ratio

通过以上分析可得, 地基深度 3 cm 处的孔隙水压比都很小, 在饱和地基中是因为地表面孔隙水压力容

易消散, 在冻结地基中是因为 3 cm 深度位于冻结层中, 会抑制孔隙水压力的产生。在地基深度 23 cm 处, 冻结地基的孔隙水压比高于饱和地基, 并且冻结深度越大, 孔隙水压比越高, 这是因为土体冻结后, 未冻结层越厚, 孔隙水压力越不易消散, 并且由于地震波从地基底部向上传播过程中遇到刚度差异较大的冻土层时产生的复杂的反射和折射, 也会进一步加剧地基的液化程度。所以, 有冻土覆盖的液化场地应充分考虑这一特征。

## (2) 地表和建筑物顶层的傅里叶频谱比

图 9 为输入不同激振级别告示波时地表面和建筑物上部与输入地震波的傅里叶频谱比。如图 9 (a) 所示, 地面的地震响应随着输入地震波激振级别的增大而变小, 峰值频率也变小, 这是由于 0.179g 告示波加振激励地基土非线性化进展的结果。在 0.358g 告示波激振中, 由于地基发生明显液化, 地表几乎没有增幅, 并且没有明显的峰值频率。冻结地基中, 0.179g 告示波加振激励时地基非线性化进展不明显, 但峰值频率有所降低。在 0.358g 告示波激振时, 14 cm 冻结地基中峰值频率较为明显。不考虑土与结构相互作用时上部结构的频率是 25.3 Hz, 但是如图 9 (b) 所示, 0.072g 告示波激振时, 在考虑土结相互作用时上部结构的峰值频率减小为 13 Hz, 土结相互作用效果明显。冻结 9 cm 和冻结 14 cm 时, 由于上部土层冻结, 相互作用效果减弱, 上部结构的峰值频率为 20 Hz, 更接近基础固定时的频率。0.179g 告示波激振时, 冻结地基的建筑物地震响应和地表面的趋势相同, 非线性进展不明显。0.358g 告示波激振时, 冻结地基中上部结构的反应大于饱和地基中时的地震响应。





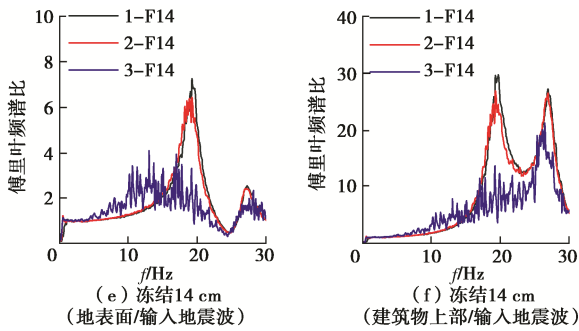


图9 不同激励级别的傅里叶频谱比

Fig. 9 Fourier spectral ratios under different excitation levels

图10为0.072g和0.179g告示波激励时不同冻结深度地基的地表面和上部结构的傅里叶频谱比。如图10(a)所示,由于上部结构和地基的相互作用明显,在地基的频谱中体现了上部结构的特征,由地表面的频谱可知,地表面的增幅随着冻结深度的增加而降低,峰值频率增大。说明地基的冻结会增加地基的整体刚性,冻结越深刚性越大。如图10(b)所示,0.179g告示波激励时,由于饱和地基发生部分液化现象,地表增幅有所降低,峰值频率影响范围较大。相比饱和地基,冻结地基的增幅明显,峰值影响范围较小。如图10(c), (d)所示,考虑上部结构与土相互作用时,在饱和地基中的建筑物的峰值频率为13 Hz,在冻结地基中的冻结层会减弱上部结构与土的相互作用效果,使上部结构的峰值频率增大到20 Hz左右,更接近基础固定时的频率。如图10(e), (f)所示,冻结深度越深,上部结构的地震响应和峰值频率越大,因为土体冻结后相互作用效果减弱,另外,土体冻结越深,上部结构的峰值频率越大,与地基的固有频率越接近,所以,上部结构地震反应增强。

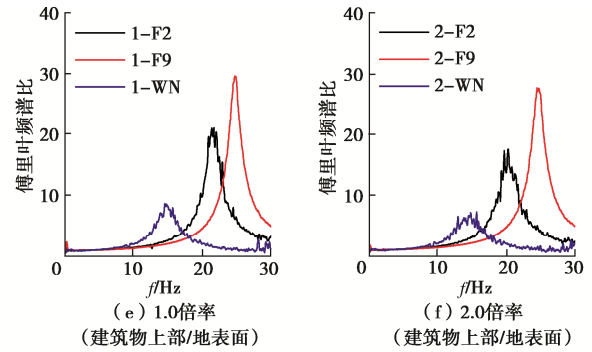
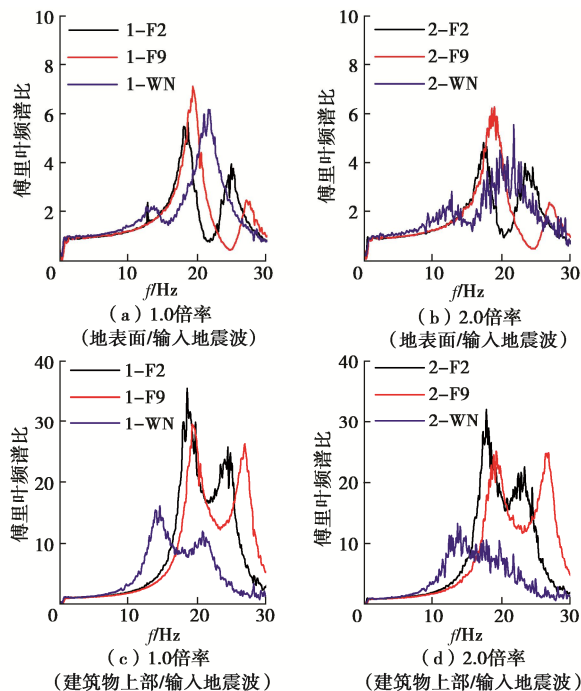


图10 不同冻结深度的傅里叶频谱比

Fig. 10 Fourier spectral ratios under different freezing depths

### (3) 地基不同深度的加速度反应谱

图11为饱和地基和冻结地基中,0.072g告示波激励和0.358g告示波激励时地基不同深度处的加速度反应谱。如图11所示,0.072g告示波激励时,土中地震反应随着距地基地部的高度的增加而逐渐增大,验证了小震时土体对地震波的放大效应。0.358g告示波激励时,非冻结地基由于液化的影响,地基不同深度处反应谱的卓越周期影响范围均变广,说明地基深部都发生了明显的液化。0.072g告示波激励时,冻结14 cm的地基影响范围变小。0.358g告示波激励时,冻结14 cm的地基,由于冻土层的存在,对地基的液化有一定的抑制作用,卓越周期的影响范围和地基未发生液化时一致。但是,地基深度18 cm处的反应谱卓越周期变小,峰值变大,这是由于地基传递地震波的特性与土层性质等因素密切相关,地震波从地基地部向上传播过程中遇到刚度差异较大的冻土层时会产生复杂的反射和折射,导致在地震作用下冻土层下面的地基动力响应突变,显示了冻土地基振动液化的复杂性。

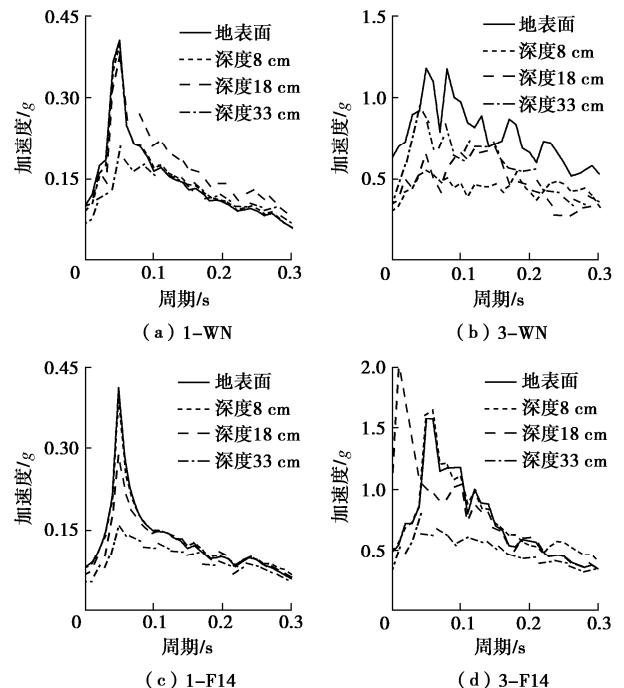


图11 不同深度处的加速度反应谱

Fig. 11 Acceleration response spectra at different depths

#### (4) 桩身最大弯矩

图 12 为告示波激震时饱和地基和冻结地基时桩身最大弯矩图。如图 12 (a) 所示, 在饱和地基中地震波输入  $0.072g$ ,  $0.179g$  告示波时, 桩头附近的弯矩较大, 桩身最大弯矩出现在距桩头附近, 由于桩-土间接接触应力的作用, 在地下  $10\text{ cm}$  处出现反弯点。饱和地基  $0.358g$  告示波激振时, 如图 11 (b) 所示, 地基内部不同深度处都体现了液化特征, 桩-土间接接触应力为零, 由于上部结构的惯性相互作用, 桩身弯矩在深度  $20\text{ cm}$  范围内呈直线分布, 桩头和桩端产生了较大的弯矩。如图 12 (b), (c) 所示, 在冻结地基中,  $0.072g$ ,  $0.179g$  告示波激振时, 桩头最大弯矩较大, 相比饱和地基时, 桩身弯矩变小, 说明了冻结层对桩身弯矩具有一定的抑制作用;  $0.358g$  告示波激振时, 由于冻土层的刚性增加, 桩头的弯矩减小, 且冻结层与未冻结层交界处附近弯矩最大。因为融土与冻土的刚性不同, 其分界处导致桩身内力突变, 冻结层下面一定深度处出现反弯点, 并且随着冻结深度的增加反弯点下移。另外, 地基未冻结部分液化, 冻土层会抑制土体孔隙水压力的释放, 导致液化加剧, 下部未冻结层的侧向流动急剧增加, 桩身的侧向位移明显增大, 从而导致交界处的桩身弯矩增大, 并且冻土层对地震波产生复杂的反射和折射现象引起桩-土接触应力的变化, 也会导致桩身弯矩的突变现象。

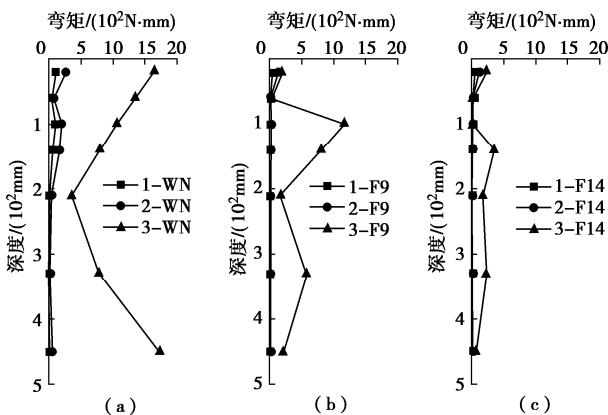


图 12 桩身最大弯矩图

Fig. 12 Distribution of maximum bending moment along pile

## 2 振动台模型试验的有限元模拟

通过建立与振动台试验相吻合的有限元模型, 探索可以考虑冻土温度的依存性和地基液化的有限元建模方法, 为今后冻土场地和可液化场地的结构地震响应分析提供一定的理论基础。

建模时, 首先利用可以考虑土体液化的一维土层地震反应分析软件计算得到与振动台试验的加速度傅里叶谱相吻合的常规土模型, 从而确定常规土的刚

度分布。建模时重点考虑由于饱和地基中的孔隙水压的上升而引起的地基刚性的降低, 作为等价的地基刚度。冻土的动力学参数参照笔者之前做过的冻土样本的室内一轴压缩试验结果, 建模时充分考虑冻土对温度的依存性。

### 2.1 一维有效应力分析

#### (1) 一维有效应力分析模型介绍

在考虑地基的有效应力时, 利用基于重复反射理论的 ShakePro11 软件进行了一维非线性分析。土的非线性模型采用 Hardin-Drnevich (HD) 模型, 孔隙水压计算模型采用社本等的模型<sup>[19]</sup>, 逐次进行非线性分析。

#### (2) 最大孔隙水压比

图 13 为输入  $0.179g$  告示波时, 孔隙水压比沿地基深度分布图。通过对比分析, 饱和地基场地接近地表的孔压比较小, 这是由于地表孔隙水压容易消散。后呈现先增大后减小的趋势。冻结地基场地, 由于地表  $14\text{ cm}$  冻结, 未见孔隙水压增加, 下部未冻结地基的孔压比也呈现先增大后减小的趋势, 相同深度处比饱和地基场地孔压比有所增加。一维有效应力分析与试验结果吻合较好。

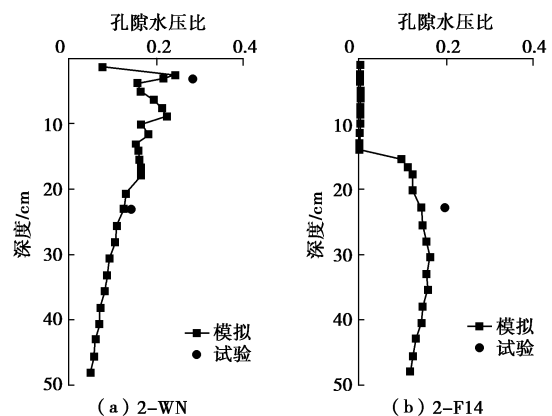


图 13 最大孔隙水压比

Fig. 13 Maximum pore water pressure ratios

#### (3) 等效剪切模量

使用一维有效应力分析得到的相应深度的最大孔隙水压比  $u_{\max}$ , 通过计算可以得到等效剪切模量  $G'$ , 该等效剪切模量将应用于三维 FEM 分析。

图 14 为  $1.0$  倍告示波输入时的饱和地基和冻结  $14\text{ cm}$  的等效剪切模量  $G'$  与初始剪切模量  $G_0$  的比较。由于两地基的孔隙水压上升量都很小, 因此等效剪切模量和初始剪切模量相差很小。

### 2.2 三维有限元数值分析

利用通用三维有限元程序 LS-DYNA 对振动台试验模型进行建模。LS-DYNA 是专门用于显示解法的软件, 适用于动态接触问题的三维有限元分析工具。

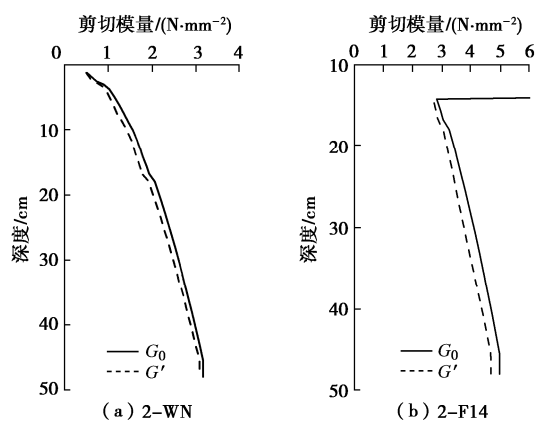


图 14 沿深度方向的剪切模量

Fig. 14 Shear modulus along depth direction

(1) 解析模型概要

分析模型考虑了对称条件,如图 15 为 1/2 的有限元分析模型图。建筑物上部、下部和基础采用刚体材料,柱和桩选用弹性体材料。建筑物和地基的材料参数和大小与模型试验完全一致。地基模型的底面边界为固定条件,为了模拟剪切土槽,地基周围设定了深度相等的节点在  $x, y, z$  方向上的位移相同的约束条件。桩与地基之间是考虑滑动剥离再接触的接触条件,在桩单元与其外周地基单元的接触面上设定接触界面,将切线方向的摩擦系数设为  $\tan\theta$  ( $\theta$  为地基的内摩擦角)。此外,桩与冻结地基之间的接触条件为紧密接触。为了有效模拟地基模型,确认地基卓越周期一致,本次有限元分析的饱和地基的初期刚性根据下式算出:

$$V_s = \alpha(H)^{1/4}, \tag{1}$$

式中,  $V_s$  为 S 波的速度,  $H$  为地基深度。

由式 (1) 算出确定深度方向的剪切波速度,具体地基参数见表 6。

表 6 地基参数

Table 6 Parameters of foundation			
地基	阻尼比/%	固有频率/Hz	$\alpha$ 值
WN	8	18.73	48
2 cm	8	21.91	56
9 cm	8	23.86	60
14 cm	8	24.56	60
冻结层	8	—	—

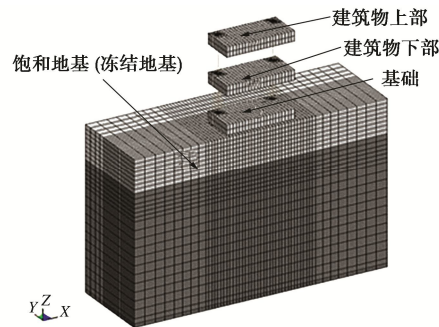


图 15 1/2 的有限元分析模型

Fig. 15 Half of finite element analysis model

(2) 傅里叶频谱比分析

图 16 为 0.072g 告示波激励时饱和地基和冻结地基的地表面和上部结构的傅里叶频谱比。从图 16 中可知,饱和地基的地表和上部结构的地震反应与试验结果吻合较好。与饱和地基相比,冻结地基的解析结果低于试验结果,是由于冻土的构造机理更为复杂,与常规融土不同,冻土是由土颗粒、未冻水、冰晶及气体组成的复杂热敏感四相体系,受内含冰质的影响,其动力学特性与未冻土有显著区别,今后有必要对冻土的本构关系进行更深入的研究,另外地震作用下桩与冻土之间可能会发生的提离、滑移等桩-土接触非线性问题对上部结构的地震响应影响机理没有明确,应该进行进一步的研究。

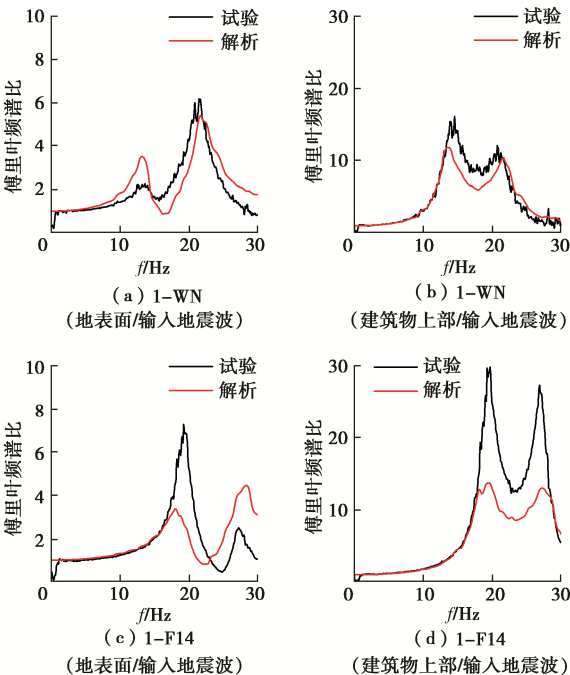


图 16 试验与解析的傅里叶频谱比

Fig. 16 Fourier spectral ratios of tests and analysis

(3) 桩身最大弯矩分析

图 17 为解析的饱和地基和冻结 14 cm 地基中桩身最大弯矩,输入 0.179g 告示波,从图中可以看出饱和

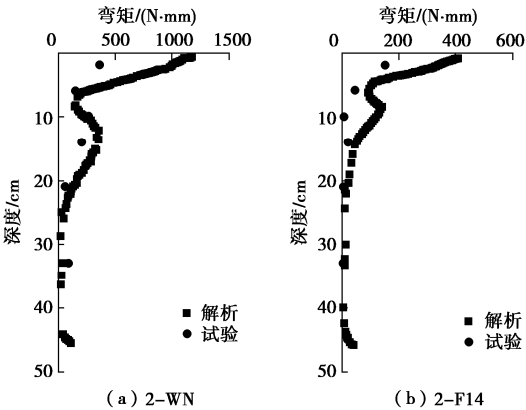


图 17 解析的桩身最大弯矩图

Fig. 17 Distribution of analytical maximum bending moment along pile



地基时, 桩身弯矩与试验结果吻合良好。但冻结 14 cm 时, 由于有限元分析结果大于试验的桩身弯矩, 但总体来看, 桩身弯矩吻合较好。

### 3 结 论

本文基于冻土 - 结构动力相互作用体系的振动台试验, 利用自行研制的室内冻土冻结方法, 再现了地震激励下, 冻土场地中上部结构和地基的震害现象以及砂质粉土的液化现象。分析了冻土地基的地震响应特征, 探讨了冻土地基中结构的地震响应规律。

(1) 输入地震波激振振幅越大, 孔隙水压比越高, 产生的液化程度越大。冻结地基中的冻结层会抑制孔隙水压比的升高, 很难发生液化, 但是冻结地基的未冻结层的孔隙水压比很大, 稍高于在饱和地基中的孔隙水压比。所以, 有冻土覆盖的液化场地应充分考虑这一特征。

(2) 地面的地震响应由于土体非线性化进展随着输入地震波激振振幅的增大而变小, 峰值频率也变小。在最大振幅激振中, 由于地基发生明显液化, 地表几乎没有增幅, 并且没有明显的峰值频率。上部结构和地基的相互作用明显, 地表面的增幅随着冻结深度的增加而降低, 峰值频率增大。冻结深度越深, 上部结构的地震响应和峰值频率越大。由于表面地基冻结时上部结构地震反应增强, 在季节性冻土地区的实际工程要多加考虑。

(3) 桩身最大弯矩随着输入地震波激振振幅增加而增大。地基冻结可以有效抑制桩头产生弯矩, 但在冻结锋面下会发生较大的弯矩。地基发生液化现象时, 桩头会产生较大的弯矩, 并在深度 20 cm 范围内呈直线分布, 桩 - 土间接接触应力为零。在冻土场地和可液化场地设计桩基时有必要给予充分的考虑。

(4) 利用有限元软件 LS-DYNA 建立了考虑冻土对温度的依存性以及地基液化引起的等效剪切刚度变化的非线性有限元计算模型, 与试验结果吻合良好, 为后续的计算分析奠定了基础。

### 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 Wei, WANG Da-yan. 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] 徐学燕, 徐春华, 李晓稚. 冻土地场地震加速度反应谱研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 680 - 683. (XU Xue-yan, XU Chun-hua, LI Xiao-zhi. Research on earthquake acceleration response spectrum of frozen soil ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 680 - 683. (in Chinese))
- [3] 周幼吾, 郭东信. 中国多年冻土的主要特征[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(1): 1 - 19, 95. (ZHOU You-wu, GUO Dong-xin. Principal characteristics of permafrost in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, **4**(1): 1 - 19, 95. (in Chinese))
- [4] LIU J K, CUI Y H, LIU X, et al. Dynamic characteristics of warm frozen soil under direct shear test-comparison with dynamic triaxial test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, **133**: 106114.
- [5] 罗 飞, 赵淑萍, 马 巍, 等. 冻结黏土的动力学参数确定方法研究[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(5): 1340 - 1345. (LUO Fei, ZHAO Shu-ping, MA Wei, et al. Study of determining the dynamic parameters of frozen clay[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(5): 1340 - 1345. (in Chinese))
- [6] WANG J H, ZHANG F, YANG Z H. Anisotropy in small-strain shear modulus of permafrost at rising temperatures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **160**: 1 - 12.
- [7] 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): 80-84. (XU Xue-yan, ZHONG Cong-li, CHEN Ya-ming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(5): 80-84. (in Chinese))
- [8] TANG W R, ZHU Z W, FU T T, et al. Dynamic experiment and numerical simulation of frozen soil under confining pressure[J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, **36**(6): 1302 - 1318.
- [9] 王常峰, 陈兴冲, 丁明波. 季节性冻土区桩基础桥梁地震反应研究[J]. 桥梁建设, 2016, **46**(2): 48 - 53. (WANG Chang-feng, CHEN Xing-chong, DING Ming-bo. Study of seismic responses of bridge with pile foundations in seasonal frozen soil area[J]. Bridge Construction, 2016, **46**(2): 48 - 53. (in Chinese))
- [10] 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 Song-hong, CHEN Xing-chong, GAO Feng. Study on stochastic earthquake characteristics of ground in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(9): 1012 - 1015. (in Chinese))
- [11] 陈 拓, 穆彦虎, 王建州, 等. 活动层对青藏高原冻土区

- 地震反应影响研究[J]. 冰川冻土, 2019, **41**(3): 1 - 8. (CHEN Tuo, MU Yan-hu, WANG Jian-zhou, et al. Influence of the active layer on seismic response in permafrost of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, **41**(3): 1 - 8. (in Chinese))
- [12] 张开健, 孙红, 牛富俊, 等. 多年冻土区缓倾角土层斜坡的地震反应[J]. 岩土力学, 2017, **38**(12): 3469 - 3474. (ZHANG Kai-jian, SUN Hong, NIU Fu-jun, et al. Seismic response of low-angle soil slope in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(12): 3469 - 3474. (in Chinese))
- [13] 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 Li-xia, LING Xian-chang, XU Xue-yan, 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))
- [14] 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. (LIU Hong-xu, SUN Yan-fu, CHEN Ya-ming, et al. Influence of seasonally frozen ground on the seismic damages of buildings[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, **20**(1): 46 - 50. (in Chinese))
- [15] YANG Z H, ZHANG X Y, YANG R L. Shake table modeling of laterally loaded piles in liquefiable soils with a frozen crust[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(204/205/206/207/208): 654 - 658.
- [16] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修力, 等. 液化场地-群桩基础-结构体系动力响应分析: 大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2173 - 2181. (XU Cheng-shun, DOU Peng-fei, DU Xiu-li, et al. Dynamic response analysis of liquefied site-pile group foundation-structure system—large-scale shaking table model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2173 - 2181. (in Chinese))
- [17] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 不同土性的地基-结构动力相互作用振动台模型试验对比研究[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(5): 57 - 64. (CHEN Yue-qing, LÜ Xi-lin, LI Pei-zhen, et al. Comparative study on the dynamic soil-structure interaction system with various soils by using shaking table model tests[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(5): 57 - 64. (in Chinese))
- [18] XING S, MIAYMOTO Y. Seismic response characteristics of a building supported by pile foundation in frozen soil based on shaking table test[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2016, **10**(2): 1640005.
- [19] 社本康広, 時松孝次, 有泉浩蔵. 一次元有効応力解析の实地盤に対する適用性[J]. 日本建築学会構造系論文集, 1992, **433**: 113 - 119. (YASUHIRO Sakimoto, TAKAJI Tokimatsu, HIROZO Ariizumi. Applicability of one-dimensional effective stress analysis to the actual ground[J]. Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ) 1992, **433**: 113 - 119. (in Japanese))