

# 冻土层对桩基础铁路重力式桥墩 抗震性能的影响研究

徐振江,张熙胤,管嘉达,于生生,孙斌洁,张益舶

(兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为研究冻土影响下桩基础铁路重力式桥墩的地震破坏特征以及不同影响因素对季节性冻土区桩基础铁路重力式桥墩抗震性能的影响,首先通过拟静力模型试验研究了冻土影响下桩基础铁路重力式桥墩的地震破坏特征;其次建立了考虑冻土效应的桩基础桥墩有限元分析模型,采用数值模拟方法探讨了季节性冻土层厚度、剪跨比、轴压比和承台埋入深度4个参数对冻土区桩基础铁路桥墩抗震性能的影响。研究表明:在一定范围内季节性冻土层厚度的增加有利于提高桩基础铁路重力式桥墩的抗震性能,但当冻土层厚度超出这一范围再增加时,其对桩基础桥墩水平承载能力的影响会变弱,同时冻土层厚度的增加会加速桩-土-桥墩体系的破坏;剪跨比的增大和承台埋入深度的减少均会显著降低冻土影响下桩基础桥墩的抗震性能;轴压比的增大会提高桩基础桥墩的水平承载能力,但会加速桩基础桥墩峰值荷载的出现,同时也会加速桩-土-桥墩体系的破坏。

**关键词:**季节性冻土;桩基础;铁路重力式桥墩;抗震性能;滞回耗能特性

中图分类号:U24

文献标识码:A

## Study on the influence of frozen soil layer on seismic performance of railway gravity bridge piers with pile foundation

XU Zhenjiang, ZHANG Xiyin, GUAN Jiada, YU Shengsheng, SUN Binjie, ZHANG Yibo

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

**Abstract:** This paper aimed to investigate the seismic failure characteristics of the railway gravity piers with pile foundation under the influence of frozen soil layer and the influence of different influencing factors on the seismic performance of railway gravity piers with pile foundation in the seasonal frozen soil region. Firstly, the seismic damage characteristics of the railway gravity bridge pier with pile foundations in frozen soils were investigated by quasi-static model test. Secondly, a finite element model of bridge pier with pile foundation considering frozen soil effect was established. Then, the influence of the seasonal frozen soil layer thickness, shear-span ratio, axial compression ratio and bearing depth of pile cap on seismic performance of the railway gravity bridge pier with pile foundation was discussed by numerical simulation method. The results showed that the increase of seasonal frozen soil layer thickness in a certain range is beneficial to improve the seismic performance of the railway bridge pier with pile foundations, but if the frozen soil layer thickness increased beyond this range, its influence on the lateral bearing capacity of the bridge pier is weakened and the damage of pile-soil-pier system will be accelerated. Increasing the shear-span ratio and decreasing the embedded depth of the pile cap can significantly reduce the seismic performance

收稿日期:2022-10-09; 修回日期:2023-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(52068045);甘肃省科技计划项目-杰出青年基金项目(20JR5RA430);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(P2021G047)

作者简介:徐振江(1998—),男,硕士研究生,主要从事冻土区桥梁抗震研究。E-mail:941396079@qq.com

通讯作者:张熙胤(1989—),男,教授,博士,主要从事冻土区桥梁抗震研究。E-mail:zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

of the bridge pier with pile foundations in frozen soils. Increasing the axial compression ratio can increase the lateral bearing capacity of the bridge pier with pile foundations, but it will accelerate the appearance of peak load of the bridge pier with pile foundations and accelerate the damage of the pile-soil-pier system.

**Key words:** seasonal frozen soil; pile foundation; railway gravity pier; seismic performance; hysteretic energy dissipation characteristics

## 0 引言

冻土在我国分布广泛,其中季节性冻土面积约占我国领土总面积的 53.5%,主要分布在西北、东北和华北地区<sup>[1]</sup>。随着国家西部开发和东北振兴等发展战略的持续推进,我国西北和东北季节性冻土区建设了大规模的线性工程,其中包括哈大、哈齐和兰新等高速铁路以及川藏铁路等。桩基础桥墩由于沉降量小、承载力高以及对冻土热扰动小的优势而被广泛应用于冻土区的公路和铁路桥梁建设中<sup>[2-3]</sup>。同时,我国季节性冻土区存在许多大而密集的地层活动断裂带,地震频繁发生,如 1986 年 5.5 级德都地震、2010 年 7.1 级玉树大地震<sup>[4]</sup>和 2021 年 7.4 级玛多大地震<sup>[5]</sup>等。当季节性冻土区发生地震时,桩基础桥墩的地震反应将受到季节冻土层的显著影响,从而导致桩基础桥梁的破坏及破坏机理发生变化。已有研究发现季节性冻土层的存在会改变场地土层的动力特性,对地震引起的地面运动将产生显著影响<sup>[6]</sup>,给季节性冻土区桥梁的抗震设防带来困难。

大量研究表明桩基础桥墩的地震反应在有无冻土情况下具有显著区别,建议抗震设计中考虑冻土层的影响<sup>[7]</sup>。VAZIRI 等<sup>[8]</sup>和 HAN 等<sup>[9]</sup>通过在模型桩的顶部施加水平激振力,发现季节性冻土层在厚度不足 0.5 m 的情况下亦能显著影响桩基的地震响应。SULEIMAN 等<sup>[10-12]</sup>以季节性冻土区的公路桩柱式桥墩为研究对象,探究了季节性冻融对桥墩-基础-土体系在横向载荷作用下响应的影响,结果表明随着季节性冻土层厚度的增加以及土体温度的降低,桩基础桥墩的刚度有明显提高,桩基础的塑性区长度减少,并且会改变最大弯矩出现的位置。虞庐松等<sup>[13]</sup>通过对随机地震作用下桩基础桥墩的地震响应进行计算,发现随着冻土层厚度的增加,桥墩的地震响应呈减小趋势,说明冻土层的存在对桩基础桥墩抗震来说是有利的。对于季节性冻土区的桩基础桥墩来说,相对于夏季土层的融化状态,在冬季冻结状态下由于土体的刚度提高,对桩的嵌固作用较强,体系的振动周期较短<sup>[14]</sup>。随着季节性冻土层的出现及加深,场地地震反应呈减小趋势,总体表现为季节冻土层对地震具有一定的抑制作用,有利于建筑物的地震安全性<sup>[15]</sup>。不同时期土层的性质会发生很大的变化,其产生的地震力以及其对桩基础桥墩的嵌固作用也会因此改变,所以不同季节桩基础桥墩的地震反应是不同的;在抗震设计中应考虑冬夏两季桩基础桥墩地震力的变化,选取其中的最不利情况进行抗震设计<sup>[7]</sup>。

目前考虑季节性冻土影响的桩基础铁路重力式桥墩的研究偏少,研究者进行考虑桩-土相互作用桩基础桥墩抗震性能研究时并未充分考虑季节性冻土层的影响,此外桩基础铁路桥墩的抗震设计也未考虑季节性冻土的影响。为了揭示季节性冻土层对桩基础铁路桥墩抗震性能的影响机理,本文首先进行了拟静力模型试验研究,并以此为基础建立了有限元分析模型,从冻土层厚度、剪跨比、轴压比及承台埋深等方面分析了各因素对冻土影响下桩基础桥墩抗震性能的影响,旨在为季节性冻土区桩基础铁路桥墩抗震设计提供理论依据。

## 1 拟静力试验设计

### 1.1 模型设计

本试验以我国高速铁路中普遍采用的重力式桩基础桥墩作为原型,以 1:8 缩尺比例制作桥墩-承台-桩基础模型,模型墩、桩和承台均采用 C30 混凝土,模型桩的纵向钢筋采用 4 根直径 6 mm 的 HPB300 钢筋组成,模型墩的纵向受力钢筋则采用 6 根直径为 12 mm 的 HRB335 钢筋,配筋率为 0.36%,桩基础和墩身的所有箍筋均采用 HPB300 钢筋。本次模型试验前分别预留了 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的标准试件和不同规格钢筋材料,通过材料试验测得混凝土及钢筋的材性参数如表 1 所示。模型桥墩简化为矩形,桥墩尺寸及配筋图分别如图 1 和图 2 所示。试验土体选用广泛分布于我国西北季节性冻土区的粉质黏土,通过在土体表层铺设铜管与低温恒温控制器相连接实现土体的降温冻结模拟季节性冻土层。

表 1 钢筋混凝土基本参数

混凝土 $f_{cu}$	HRB335		HPB300	
	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
27.8	373.9	436.4	300	420

注:  $f_{cu}$  为混凝土立方体强度;  $f_y$  和  $f_u$  分别为钢筋屈服强度和极限强度。

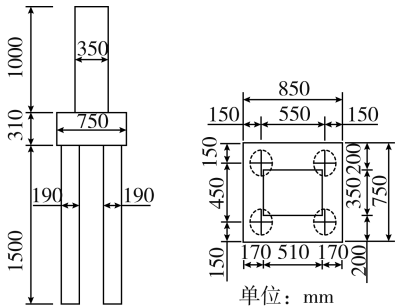


图 1 模型尺寸图

Fig. 1 Dimension drawing of model

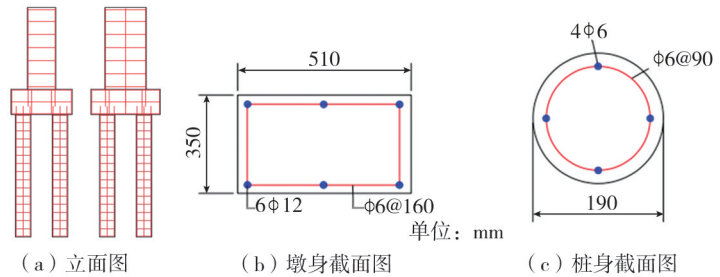


图 2 模型配筋图

Fig. 2 Reinforcement drawing of model

### 1.2 配重装置和加载制度

试验装置如图 3 所示。通过埋设在土体上部的铜管与低温恒温控制器相连接实现土体的降温冻结现象。通过埋设在土体中心不同深度处的温度传感器来监控土体的温度数据。荷载加载系统包括水平和竖向加载。试验过程中用配重的方式在桥墩顶部施加竖向荷载,竖向配重由一个工字型的钢梁和 2 根可以连接地面的精轧螺纹钢组成,通过拧紧地锚螺栓来给桩基础桥墩施加指定的竖向荷载。为保证墩顶发生水平位移后仍能有效施加轴压力,墩顶和横梁之间放置有橡胶垫,同时地面处设置有活动支座来适应水平向加载;横向加载装置中的加力设备为伺服式液压千斤顶,水平液压伺服千斤顶通过位移控制的方式在桩基础桥墩的顶部施加周期性横向载荷,直至桩-桥墩-土体系发生失效破坏。本次模型试验的加载制度如图 4 所示。在加载位移达到 20 mm 之前,位移梯度为 2 mm,加载位移从 20 mm 至破坏的期间位移梯度为 5 mm,每个加载步骤重复 3 次,本试验中的极限加载位移为 55 mm。

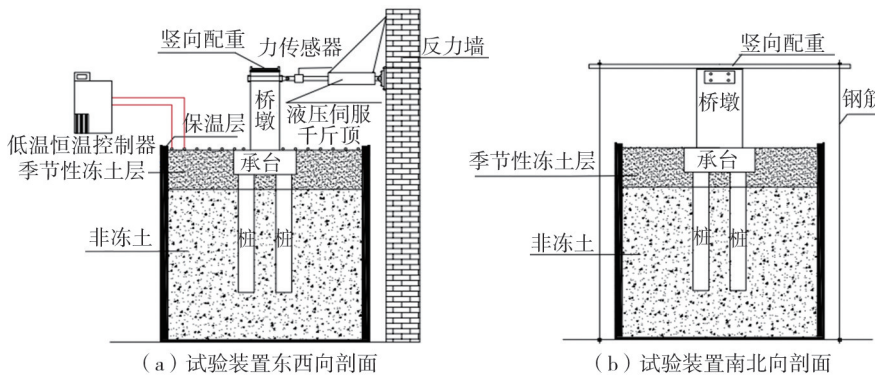


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test device

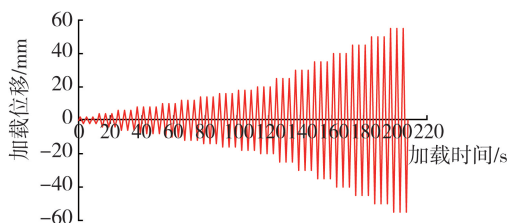


图 4 位移加载历程

Fig. 4 Displacement loading history

## 2 试验结果分析

### 2.1 桥墩破坏特征

本次模型试验加载结束后桩基础桥墩裂缝开展如图5所示。加载位移为 $\pm 12$  mm时,模型桥墩西侧土体与承台出现轻微分离;加载位移为 $\pm 14$  mm时,南侧墩底出现轻微裂缝,加载位移为 $\pm 16$  mm时,西侧墩底出现细微裂缝;加载位移为 $\pm 18$  mm时,墩底西侧、南侧裂缝开始延伸,同时墩身东侧270 mm高度处出现裂缝并贯穿;加载位移为 $\pm 20$  mm时,南侧墩身出现斜裂缝并贯穿;加载位移为 $\pm 25$  mm时,墩身西侧裂缝延伸、扩展;加载位移为 $\pm 30$  mm时,西侧承台与土体之间的间隙明显增大;加载位移为 $\pm 35$  mm时,承台南侧土体出现八字裂缝;加载位移为 $\pm 45$  mm时,东北方向墩底混凝土剥落;加载位移为 $\pm 55$  mm时,墩身四周裂缝和墩底裂缝贯通,试件发生破坏;挖土时发现桩上也出现了微裂缝,但并未形成塑性铰。

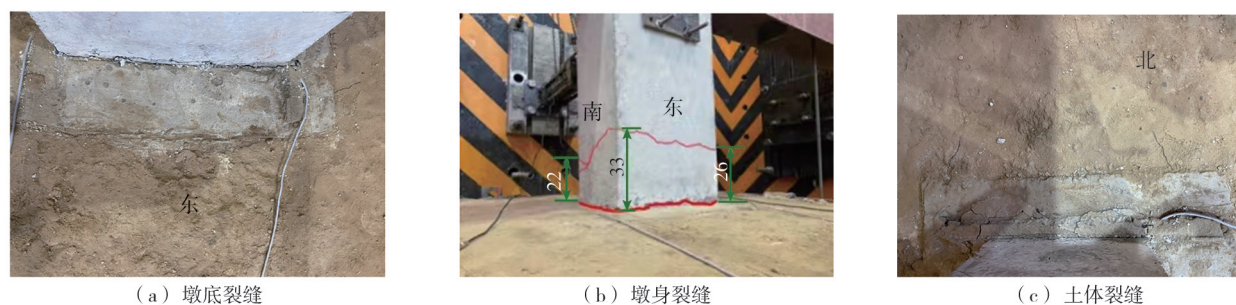


图5 模型裂缝开展示意图

Fig. 5 Schematic diagram of model crack development

### 2.2 滞回特性

试验的滞回和骨架曲线如图6所示。由图可知,当墩顶加载位移较小时,滞回环面积较小,此时试件能量耗散较弱,模型桥墩处于弹性阶段;随着加载位移不断增大,滞回环的形状从狭窄逐渐变成比较丰满的梭形,能量耗散增加,试件处于弹塑性阶段;随着试件墩顶位移的继续增大,滞回环的面积增大,累计耗能增大,试件进入屈服阶段,滞回环形状逐渐发生变化,从梭形慢慢的发展为倒S形出现捏拢现象;当加载位移55 mm进行到第二次循环时,侧向力急剧下降到峰值的85%以下,试件破坏。并且随着循环加载位移逐渐增大,骨架曲线在峰值出现之前斜率逐渐减小,峰值出现之后侧向力开始下降并于55 mm时出现突变。

随着加载位移的增大,桥墩顶部的侧向力越来越大,当侧向力达到峰值后再增大加载位移,侧向力会保持一段时间,之后桥墩顶部的侧向力突然下降到峰值的0.85倍以下,桥墩构件失去承载能力。在相同位移幅值下,随着循环次数的增加,试件加载曲线斜率减小,而卸载曲线斜率几乎不变,说明同级循环位移荷载下桥墩加载刚度在不断退化,而卸载刚度则保持稳定,每次循环的加载过程均会使得桥墩损伤加剧。

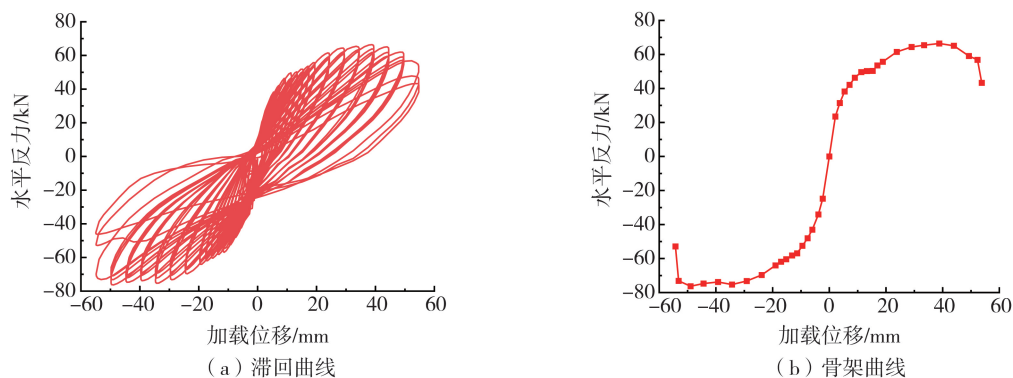


图6 试验滞回与骨架曲线

Fig. 6 Hysteretic and skeleton curves of tests

### 2.3 能量耗散与刚度退化

随着加载位移的逐渐增大,桩基础桥墩耗散的地震能量在逐渐增大,桥墩发生破坏时桩-土-桥墩体系的耗能能力出现了突然的下降如图7所示。试验过程中桩-土-桥墩体系的刚度随着加载位移的增加呈现出前期退化显著,但退化速度在不断减缓的趋势,如图8所示。

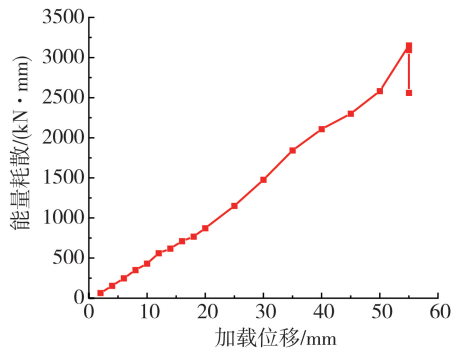


图 7 能量耗散

Fig.7 Energy dissipation

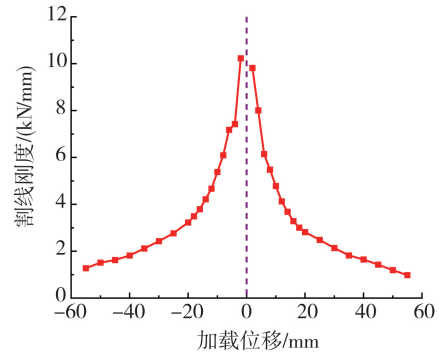


图 8 刚度退化

Fig.8 Stiffness degradation

### 3 有限元模型建立及验证

#### 3.1 模型参数

##### 1) 热力学参数

土体的热力学参数如表 2 所示,桩基础桥墩的钢筋和混凝土热力学参数如表 3 所示。

表 2 土体热力学参数<sup>[16]</sup>

Table 2 Thermo-dynamic parameters of soil mass<sup>[16]</sup>

温度/°C	传导率/(W/(m·°C))	比热/(J/(kg·°C))	相变潜热/(J/kg)
-10	1.15	1455.47	
-5	1.13	1517.96	
0	1.10	1614.94	
5	1.08	1528.02	43 088
10	1.07	1354.87	
30	1.07	1294.52	

表 3 桩基础桥墩热力学参数<sup>[17]</sup>

Table 3 Thermo-dynamic parameters of pile foundation pier<sup>[17]</sup>

材料属性	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	传导率/(W/(m·°C))	比热/(J/(kg·°C))
混凝土	2400	23026	0.2	1.58	960
钢筋	7800	206000	0.3	10	502

##### 2) 力学参数

混凝土和钢筋参数与试验一致,混凝土本构及土体参数取值如表 4 和表 5 所示。

表 4 混凝土本构基本参数取值

Table 4 Values of basic concrete constitutive parameters

弹性模量 $E_c$ /MPa	泊松比	膨胀角/(°)	流动偏角	双轴等压混凝土强度与单轴强度的比值	拉、压子午线上第二应力不变量的比值	粘性系数
23026	0.2	38	0.1	1.16	0.6667	0.001

表 5 土体参数取值<sup>[18-19]</sup>

Table 5 Values of soil parameters<sup>[18-19]</sup>

土体类型	土体温度/°C	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
非冻土	20	24	0.350	23.60	49.3
	0	24	0.350	23.60	49.3
	-0.1	54.80	0.340	23.64	49.5
冻结土	-2	69.90	0.318	24.12	100
	-6	101.80	0.274	25.99	568
	-10	133.59	0.230	30.49	798
	融土	2	5.40	0.350	19.52

### 3.2 单元类型及接触关系

#### 1) 传热模型

分析步类型采用热传导,混凝土使用 DC3D8 单元<sup>[20-21]</sup>;钢筋笼使用传热单元 DC1D2 模拟。土体与承台、土体与桩均采用绑定的方式进行连接<sup>[16]</sup>,将钢筋笼嵌入到混凝土内部,保证模型各构件的位置和接触在热传导过程中不发生变化。

#### 2) 力学模型

桩基础桥墩和土体采用三维实体单元 C3D8R 模拟,钢筋采用桁架单元 T3D2 模拟,钢筋笼与混凝土之间使用“嵌入”功能来实现相互之间的粘结作用,暂未考虑混凝土与钢筋之间的滑移<sup>[22]</sup>。在桥墩顶面中心处设置一个参考点与桥墩顶面之间定义耦合约束,这与试验时在墩顶与工字梁之间加入橡胶垫块的目的是是一致的。桩基础桥墩与土体之间的接触部分采用面与面接触的方式来模拟,切向采用“罚”函数,设置随土体温度变化而变化的摩擦系数来模拟不同温度时土体与桩基础桥墩之间的摩擦现象,法向采用“硬”接触约束类型来模拟桩基础桥墩和土体之间的接触、分离现象。

### 3.3 模型本构及加载方式

#### 1) 传热模型

在预应力场中给模型整体赋予 20 °C 的初始温度,然后给模型上、下表面施加 70 d 的 20 °C 恒温使土体模型形成稳定的地温场,以此保证土体温度场在试验开始之前处于 20 °C 的恒温状态。为了尽量和试验对照,模型各部分的尺寸与拟静力试验中保持一致,随后依据试验过程中温度传感器所采集的温度数据给土体施加相应的温度边界条件,土体四周一直施加绝热边界条件。

#### 2) 力学模型

混凝土采用塑性损伤本构模型<sup>[23]</sup>,钢筋采用改进的 Clough 模型<sup>[24]</sup>,土体采用摩尔-库伦本构模型<sup>[25]</sup>,土体材料属性随温度变化而变化,同时在土体材料属性中设置线膨胀系数来模拟土体的冻胀融沉现象。将土体底部设置为固定约束,侧向边界只对法向进行约束。在初始分析步加相应的约束边界条件并传递,步骤 1 设置为地应力分析步,在该分析步中加重力荷载,后续分析步都设置为静力分析步。步骤 2 中将热传导分析结果中的温度场导入到该模型中,赋予模型与试验相同的温度场,同时通过线膨胀系数使土体出现冻胀融沉现象,分析步时间与热传导分析设置一致。后续分析步在墩顶参考点分别施加竖向荷载和水平反复位移荷载对模型进行分析。水平位移加载级数与试验相同,每级循环一次。力学模型和传热模型网格划分要完全一致。

### 3.4 模型验证

#### 1) 温度场对比

试验通过在土体表层铺设铜管与低温恒温控制器相连接实现土体的降温冻结模拟季节冻土区土体温度场。但由于开始试验前一段时间打开了土体表面保温层,外部环境温度较高,导致表层土体的温度有所回升,季节冻土表层出现了轻微融化现象。有限元模型采用与试验相同的条件设置温度边界,模拟的土体温度场如图 9 所示,所得土体随深度变化的温度曲线与模型试验进行对比,结果如图 10 所示,两者吻合较好。

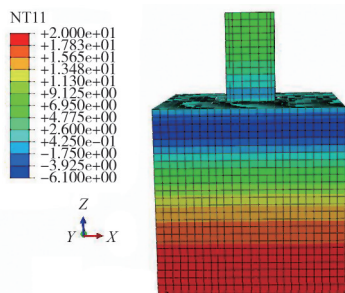


图 9 土体温度场分布

Fig.9 Distribution of soil temperature field

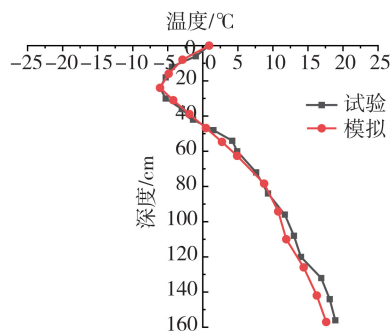


图 10 土体温度曲线对比

Fig.10 Comparison of soil temperature curves

#### 2) 力-位移曲线对比

将传热模型中分析得到的温度场结果导入到力学模型中,在加载前完成体系温度场的建立,并通过线膨胀系数来实现土体的冻胀融沉行为,从而在土体内部形成应力场,实现热-力耦合过程。通过图 11 中的试

验和有限元力-位移曲线对比可以看出,模型能够较为准确地模拟冻土影响下的桩基础桥墩的力学行为,可以保证后续参数分析的合理性和可靠性。

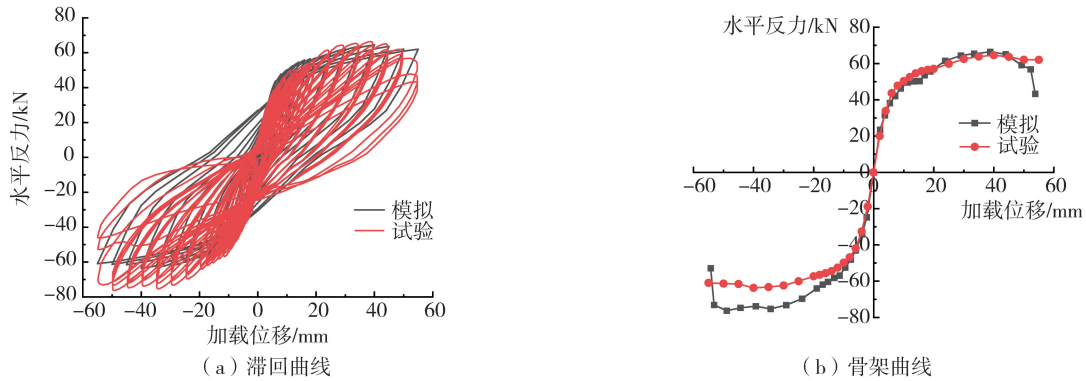


图 11 力-位移曲线对比图

Fig. 11 Comparison of force displacement curves

### 4 季冻区桩基础桥墩抗震性能因素分析

#### 4.1 模型参数概述

以王万平等<sup>[26]</sup>做的静三轴试验为依据进行参数分析,土体的力学参数如表 6 所示,钢筋和混凝土的参数取值和试验一致。具体工况设置如表 7 所示。模型 1 是基准模型。模型 2 和模型 3 主要研究的是季节冻土层厚度对桩基础桥墩的抗震性能影响,模型 2 土体为常温土体,模型 3 土体的冻土层厚度为 500 mm;模型 4和模型 5 研究的是桥墩剪跨比对桩基础桥墩抗震性能的影响,通过调整桩基础桥墩的墩身高度来实现剪跨比的变化;模型 6 和模型 7 研究的是轴压比对桩基础桥墩抗震性能的影响,调整墩顶竖向力的大小来形成不同的轴压比;模型 8 和模型 9 研究的是承台埋深对桩基础桥墩抗震性能的影响。不同冻土层厚度下的温度场分布和温度曲线如图 12、图 13 所示,其他参数变化对土体温度场几乎没有影响,可以保证其他参数变化的模型均在表层季节冻土厚度一致的前提下进行分析。

表 6 土体力学参数<sup>[26]</sup>

Table 6 Mechanical parameters of soil mass<sup>[26]</sup>

土体类型	温度/°C	弹性模量/kPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
冻土	-5	54 347.82	0.2	568.05	25.99
非冻土	0	24 000	0.3	23.60	49.30
	20	24 000	0.3	23.60	49.30

表 7 模型基本工况

Table 7 Basic working conditions of the model

分析模型	季节冻土层厚度/mm	剪跨比	轴压比/%	承台埋深/mm
模型 1	300	2.86	2.1	310
模型 2	0	2.86	2.1	310
模型 3	500	2.86	2.1	310
模型 4	300	3.86	2.1	310
模型 5	300	4.86	2.1	310
模型 6	300	2.86	5	310
模型 7	300	2.86	10	310
模型 8	300	2.86	2.1	155
模型 9	300	2.86	2.1	234

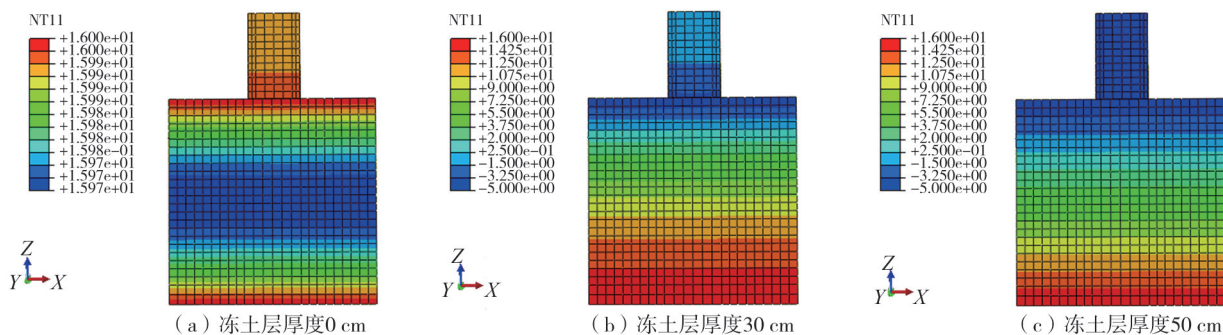


图 12 土体温度分布图

Fig. 12 Soil temperature distribution

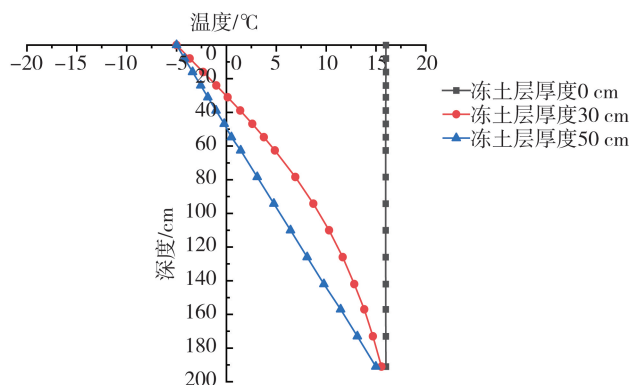


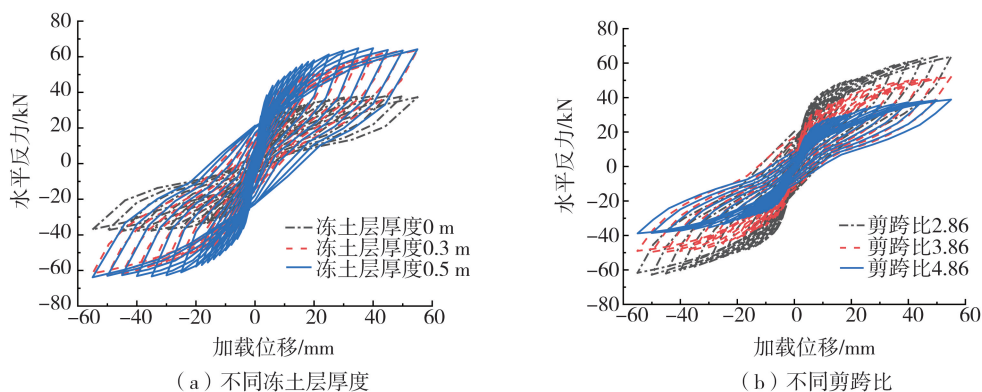
图 13 温度曲线对比图

Fig. 13 Comparison diagram of temperature curves

#### 4.2 滞回曲线特性

不同参数下冻土存在的铁路桩基础桥墩的滞回及骨架曲线如图 14 和图 15 所示。

季节冻土层的存在对桩基础铁路重力式桥墩的抗震性能影响较为明显,其可以大大提高桩基础铁路重力式桥墩的水平承载能力,并且滞回曲线更加饱满。冻土层厚度为 0.3 m 时,桩基础桥墩的极限水平承载能力是常温土工况下的 2 倍。但当冻土层达到一定厚度时,其影响会变弱,水平极限承载能力不再继续提升,滞回环耗能变化不大,此时桩-土-桥墩体系的水平承载能力主要由桩基础桥墩本身强度决定;在给定位移状态下,随着剪跨比的增大,冻土影响下的桩基础桥墩的极限水平承载能力逐渐降低,滞回曲线的捏拢效应逐渐显著,但是桩-土-桥墩体系侧向力下降段的出现变得越来越晚,桩-土-桥墩体系的侧向变形能力有一定提高;而且随着轴压比的增大,冻土影响下的桩基础桥墩的极限水平承载能力出现了大幅度的提高。轴压比为 2.1% 时的极限水平承载能力为 63.88 kN,而轴压比为 10% 的桩基础桥墩的极限水平承载能力为 94.27 kN。但是轴压比越大,桩-土-桥墩体系骨架曲线的下降段越早出现,并且下降速度越快,说明轴压比增大会加快冻土影响下的桩基础桥墩发生破坏;承台埋入深度对冻土影响下的桩基础桥墩抗震性能的影响表现为随着整体埋入深度的减小,桩-土-桥墩体系的极限水平承载能力逐渐下降,同时相同加载位移下桩基础桥墩的滞回环面积减小,这是因为承台埋入深度减少导致土体对桩基础桥墩的嵌固能力降低,从而使桩-土-桥墩体系的抗震能力降低。



(a) 不同冻土层厚度

(b) 不同剪跨比

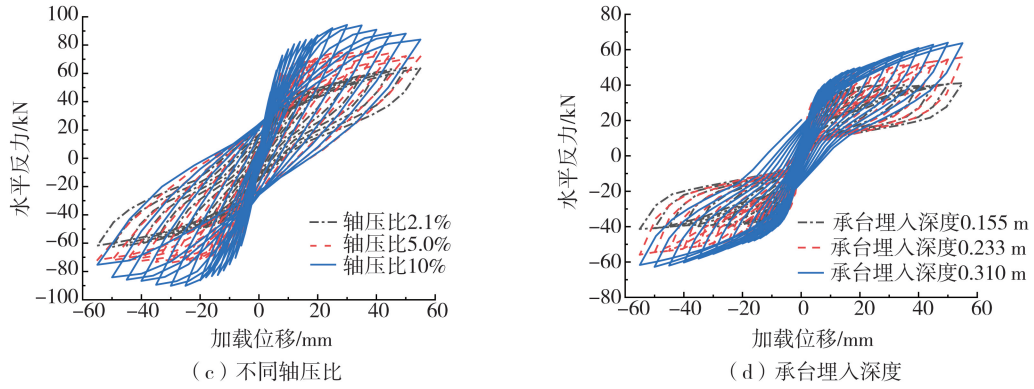


图 14 不同参数下的滞回曲线

Fig. 14 Hysteretic curves under different parameters

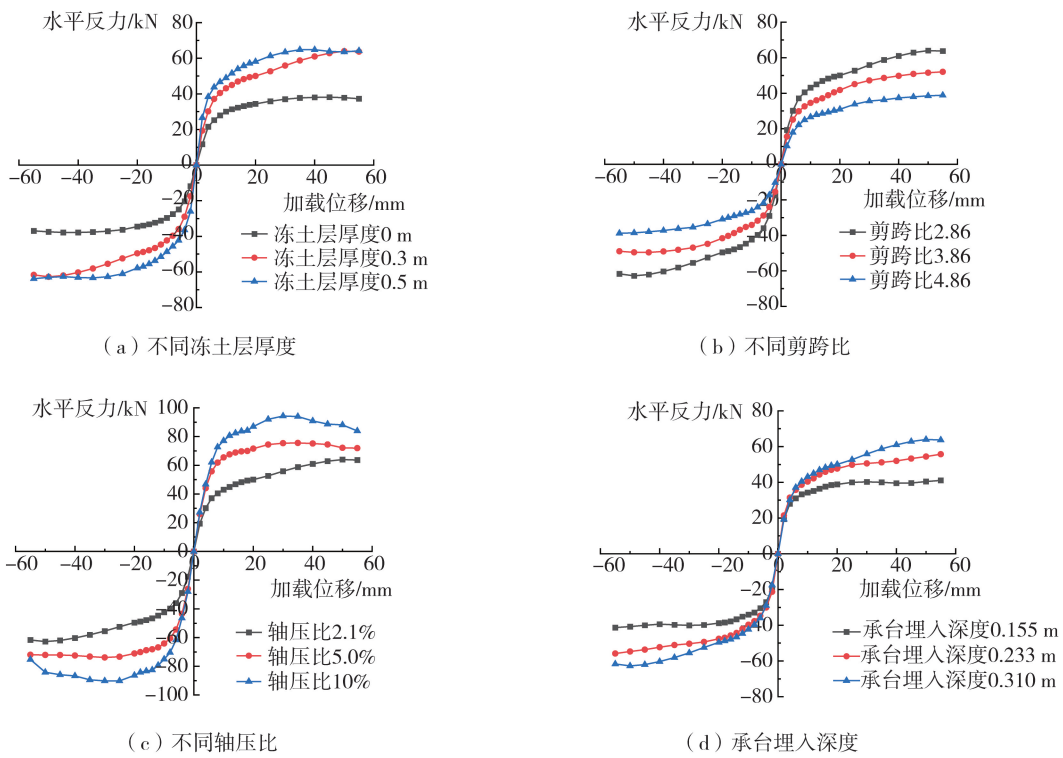
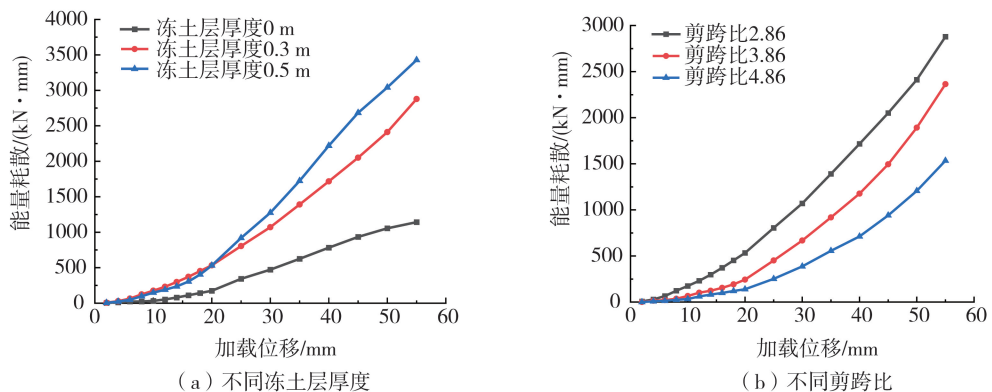


图 15 不同参数下的骨架曲线

Fig. 15 Skeleton curves under different parameters

### 4.3 耗能能力

桥墩的累计耗能定义为力-位移滞回曲线各封闭滞回环所包围的面积之和。桩-土-桥墩体系的累积耗能随位移变化的曲线如图 16 所示。



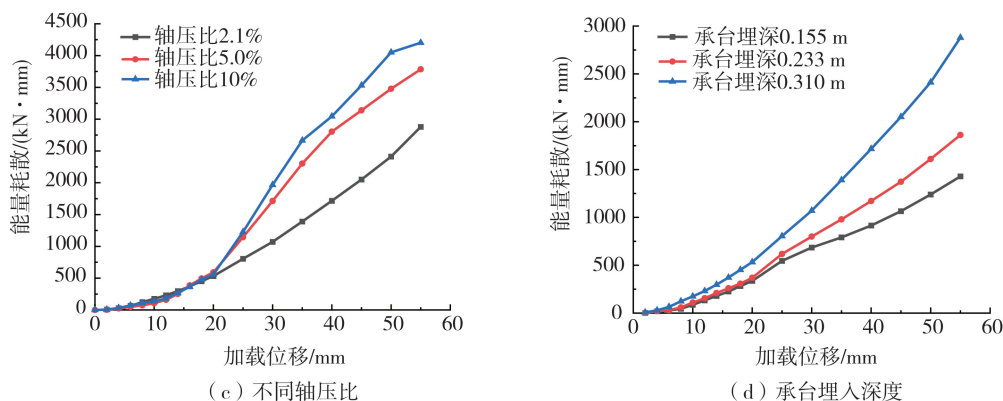


图 16 不同参数下的耗能曲线

Fig. 16 Energy consumption curves of different parameters

由图 16 可知,加载初期,墩顶位移荷载均较小,同一种参数下的不同模型的累积耗能相差较小;但随着加载位移的增大,不同模型墩顶侧向力的差距会逐渐增大,从而导致同一种参数下的不同模型的累积耗能相差越来越大。

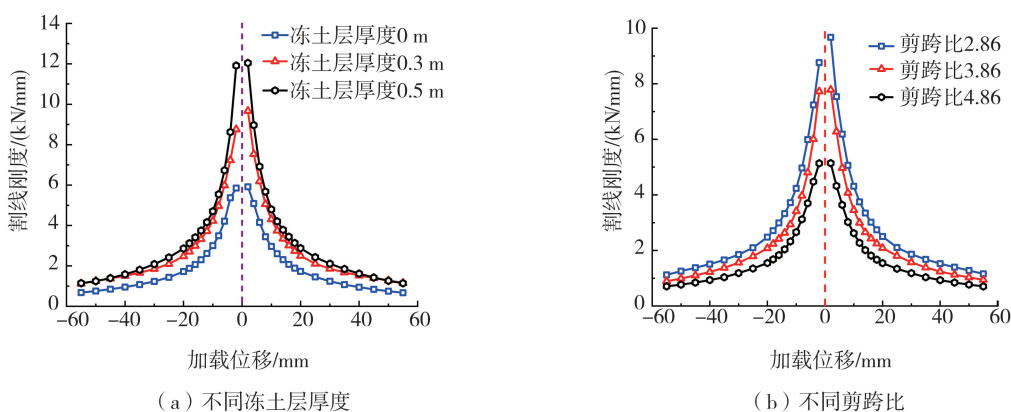
冻土层厚度的出现及增加会增大桩-土-桥墩体系在给定位移状态下耗散的地震能量,这是因为冻土层对于桩基础桥墩的嵌固作用较强,达到相同位移荷载所需的侧向力增大从而导致耗散了更多地震能量;相同加载位移下,随着剪跨比的增大,桩-土-桥墩体系的累积耗能越少,这是因为剪跨比的增大导致墩顶的横向位移荷载向下传导的路径变远,墩顶相同位移作用下墩底薄弱区变形减小,所需侧向力也会减小,从而使桩-土-桥墩体系耗散地震能量减少;相同加载位移下,轴压比越大,桩-土-桥墩体系的累积耗能越多,因为轴压比的增大会增强对桥墩的约束作用,导致相同位移下桥墩顶部的侧向力增大;承台埋入深度的减小也会极大的减小相同位移下桩-土-桥墩体系的耗散的地震能量,这是因为承台埋入深度的减少会导致土体对桩基础桥墩的嵌固作用减弱,达到相同加载位移所需的侧向力减小。

#### 4.4 刚度退化

试件在反复荷载作用下的刚度退化特性,可以用割线刚度来表示。图 17 给出了在冻土层厚度、剪跨比、轴压比和承台埋深等因素影响下桩基础铁路重力式桥墩的刚度随加载位移变化的曲线。

总的来说,各模型的刚度退化规律基本一致,加载初期,刚度随着荷载的增加而迅速下降,随着加载位移的增大,衰减速度放缓,并在后期趋于平稳。

冻土层厚度的增加会导致桩-土-桥墩体系的整体刚度增加,但刚度退化速度会加快。土体冻结后强度和刚度均显著增加,因此冻土层存在时对桩基础桥墩约束作用增强,导致桩-土-桥墩体系的初始刚度显著增加;但是随着剪跨比的增加,桩-土-桥墩体系的初始刚度明显降低,同时刚度退化的速度明显放缓,位移加载至 55 mm 时,各模型的刚度相差不大;而轴压比从 2.1% 上升至 5% 时,桩-土-桥墩体系的初始刚度和整体刚度退化曲线均有明显提高,但轴压比从 5% 上升至 10% 时其影响变得微弱;承台埋深的增加会使桩-土-桥墩体系的初始刚度和整体刚度退化曲线会随着埋深增加有一定提高,但变化并不显著。



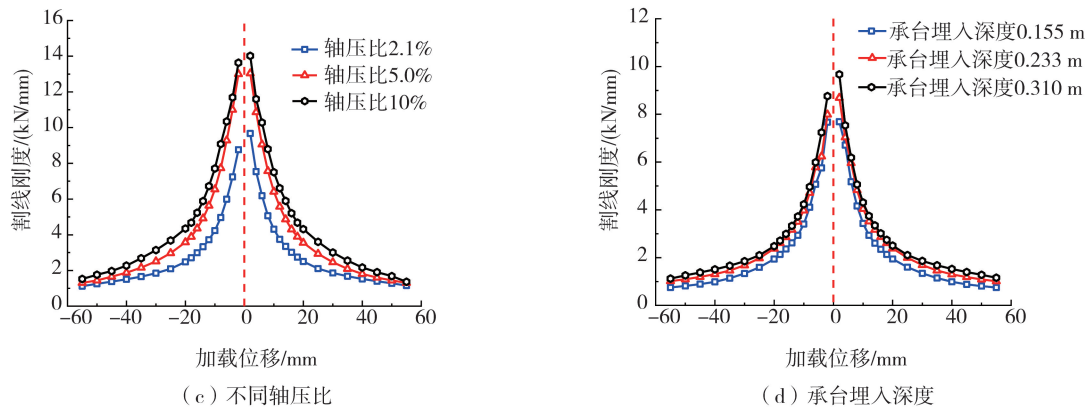


图 17 不同参数下的刚度退化曲线

Fig. 17 Stiffness degradation curves of different parameters

## 5 结论

本文通过拟静力试验与有限元分析相结合的方法分析了冻土影响下桩基础铁路重力式桥墩的地震破坏特征以及不同影响因素对地震作用下桩基础-冻土相互作用过程的影响,得出以下主要结论:

1) 拟静力试验过程中,在水平往复荷载作用下桥墩墩身底部形成塑性铰,最终墩身裂缝贯通导致桥墩发生破坏,同时桩身位置处也出现了轻微破坏,但并未形成塑性铰。

2) 在一定范围内冻土层厚度的增大可以提高桩基础桥墩的抗震性能,但超出这一范围后继续增大对桩基础桥墩承载力的增幅效果会变的微弱,同时冻土层厚度的增加会加速桩-土-桥墩体系的破坏。

3) 剪跨比的增大和承台埋入深度的减少均会显著降低冻土影响下桩基础桥墩的抗震性能,但剪跨比的变化对桥墩变形能力的影响并不明显,而承台埋深的变化对桩-土-桥墩体系的刚度退化曲线无较大影响。

4) 轴压比的增大会提高桥墩的水平承载力,但会加速桩基础桥墩峰值荷载的出现,说明轴压比增大会加速冻土影响下的桩基础桥墩的破坏。

## 参考文献:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
ZHOU Youwu, GUO Dongxin, QIU Guoqing. Frozen soil in China[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [2] 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 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. (in Chinese)
- [3] 景立平, 汪刚, 李嘉瑞, 等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 163-172, 207.  
JING Liping, WANG Gang, LI Jiarui, et al. Shaking table tests and numerical simulations of dynamic interaction of soil-pile-nuclear island system [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 163-172, 207. (in Chinese)
- [4] 魏永明, 李剑南, 陈玉, 等. 不同类型发震断层的同震地表破裂光学遥感特征研究[J]. 第四纪研究, 2021, 41(6): 1513-1531.  
WEI Yongming, LI Jiannan, CHEN Yu, et al. Research on optical remote sensing characteristics of coseismic surface rupture of different types of seismogenic faults[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(6): 1513-1531. (in Chinese)
- [5] 管仲国, 黄勇, 张昊宇, 等. 青海玛多 7.4 级地震桥梁工程震害特性分析[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 38-45.  
GUAN Zhongguo, HUANG Yong, ZHANG Haoyu, et al. Damage characteristics and analysis of bridge engineering in M7.4 Qinghai Maduo earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 38-45. (in Chinese)
- [6] 师黎静, 陈盛扬, 黎明. 哈尔滨季节性冻土地场特征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 1053-1063.  
SHI Lijing, CHEN Shengyang, LI Ming. 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)
- [7] 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.  
CHEN Xingchong, GAO Feng, WU Shaohai. Effect of frozen soil layer on seismic response of bridges[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 120-125. (in Chinese)
- [8] VAZIRI H, HAN Y C. Full-scale field studies of the dynamic response of piles embedded in partially frozen soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(5): 708-718.
- [9] HAN Y C, VAZIRI H, HUBBLE D. Dynamic response of pile foundations in frozen soils[C]//44th Canadian Geotechnical Conference. Calgary: Canadian Science Publishing, 1991, 40: 1-40.

- [10] SULEIMAN M T, SRITHARAN S, WHITE D J. Cyclic lateral load response of bridge column-foundation-soil systems in freezing conditions[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(11): 1745-1754.
- [11] SRITHARAN S, WHITE D J, SULEIMAN M T. Bridge column foundation-soil interaction under earthquake loads in frozen conditions[C]// *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver: WIT Press, 2004: 1-6.
- [12] SRITHARAN S, SULEIMAN M T, WHITE D J. Effects of seasonal freezing on bridge column-foundation-soil interaction and their implications[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 199-222.
- [13] 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分析[J]. *世界地震工程*, 2007, 23(1): 12-16.  
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. (in Chinese)
- [14] 郑海忠, 严武建, 石玉成, 等. 重复列车荷载作用下季节性冻土区桥墩-基础场地振动特性及长期变形分析[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(4): 907-915.  
ZHENG Haizhong, YAN Wujian, SHI Yucheng, et al. Vibration characteristics and long-term deformation analysis of bridge piers-foundation sites in seasonal frozen soil region under repeated train load[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 907-915. (in Chinese)
- [15] QI J L, MA W, SUN C S, et al. Ground motion analysis in seasonally frozen regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 44(2): 111-120.
- [16] 董西好, 叶万军, 杨更社, 等. 温度对黄土热参数影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900.  
DONG Xihao, YE Wanjun, YANG Gengshe, et al. Experimental study of influence of temperature on thermal properties of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(10): 2888-2894, 2900. (in Chinese)
- [17] 孙红运. 冻融环境下钢筋混凝土桥墩抗压性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.  
SUN Hongyun. Compressive behavior of reinforced concrete piers under freeze-thaw cycles[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [18] 张树明. 季节性冻土地区高速铁路路基桩板结构冻胀数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
ZHANG Shuming. Study on the frost heaving simulation model of pile-plank structure in high-speed railway in seasonally frozen region[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [19] 宋明哲. 冻结过程中土的物理力学参数变化分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.  
SONG Mingzhe. Analysis of soil physical and mechanical parameters during freezing[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [20] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.  
ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui, et al. Based on ABAQUS finite element analysis and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [21] 王玉镭, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
WANG Yuzhuo, FU Chuanguo. Engineering analysis of ABAQUS structure and detailed explanation of examples[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [22] 张凯迪, 贾俊峰, 白玉磊, 等. 预应力连接预制节段桥墩拟静力试验数值仿真分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊1): 207-213, 228.  
ZHANG Kaidi, JIA Junfeng, BAI Yulei, et al. Numerical simulation analyses on quasi-static tests of precast segmental prestressed bridge columns[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(S1): 207-213, 228. (in Chinese)
- [23] 龙渝川, 侯鉴珊, 王玉山. 基于能量耗散的混凝土塑性-损伤模型[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(9): 147-153.  
LONG Yuchuan, HOU Jianshan, WANG Yushan. A plastic-damage model of concrete based on energy-loss mechanism[J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(9): 147-153. (in Chinese)
- [24] 姚方宝. 基于 ABAQUS 的高强钢筋混凝土柱数值模拟及抗震性能分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
YAO Fangbao. Numerical simulation and seismic performance analysis of high strength reinforced concrete column based on ABAQUS[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [25] 王丹, 王国富, 路林海, 等. 黄河流域冲积层本构模型的深基坑适用性研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(1): 36-47.  
WANG Dan, WANG Guofu, LU Linhai, et al. Suitable constitutive model of pit in thick alluvial clay along Huanghe River[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(1): 36-47. (in Chinese)
- [26] 王万平, 张熙胤, 王义, 等. 季节冻土区黄土抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(8): 143-150.  
WANG Wanping, ZHANG Xiyin, WANG Yi, et al. Variation characteristics and influencing factors of loess shear strength in seasonal frozen soil region[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(8): 143-150. (in Chinese)