

齐煜,张熙胤,王万平,等. 2024. 冻土区桥梁桩基础抗震试验研究现状及展望[J]. 地震研究, 47(1): 051–061, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0034.

Qi Y, Zhang X Y, Wang W P, et al. 2024. Research status and prospect of seismic test of the bridge pile foundation in frozen soil region [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 051–061, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0034.

冻土区桥梁桩基础抗震试验研究现状及展望*

齐煜, 张熙胤✉, 王万平, 黄安琪, 张文静

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 总结了现阶段冻土区桥梁桩基础抗震试验研究的主要任务, 从试验的目的、优势、设计和不足等方面对冻土三轴压缩试验、桩–冻土体系拟静力试验和地震模拟振动台试验的研究现状进行了系统的总结与分析, 提出了相应的改进措施和发展方向。考虑到室内试验中桥梁桩基础–冻土相互作用体系实施难度的问题, 提出了采用子结构试验方法开展冻土区桥梁抗震试验的思路。

关键词: 冻土区; 桥梁桩基础; 三轴压缩试验; 拟静力试验; 振动台试验

中图分类号: U442.5+5; TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2024)01–0051–11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2024.0034

0 引言

冻土是指负温或零温并含有冰的土类和岩石。我国是世界第三大冻土国, 多年冻土和季节冻土面积分别占国土面积的 21.5% 和 53.5% (马巍, 王大雁, 2012), 主要分布于东北、西北和青藏高原地区。随着我国“一带一路”倡议的实施以及推进西部大开发形成新格局的要求, 西部冻土区必将迎来新一轮重大公路和铁路工程的建设热潮。已经建成运营的青藏公路、青藏铁路、共玉高速公路, 以及正在规划或建设的川藏铁路、青藏高原等国家级“百年大计”工程, 都大量采用了以桥带路的施工方案 (薛翊国等, 2020)。青藏铁路格尔木至拉萨段, 全长 1 142 km, 穿越冻土地段 632 km, 以桥代路的桥梁长度达 120 km (黄海, 2004), 占线路总长的 10%。为了减少对冻土的热扰动影响以及防止冻胀、融沉等不良地质现象对桥梁的破坏, 基础形式以桩基础为主。

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。20

世纪以来, 三分之一的大陆型强震发生在我国境内。西部冻土区是我国地震频发区之一, 近年来发生在该地区的典型大地震包括 2001 年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大地震、2010 年青海玉树 $M_s 7.1$ 地震以及 2021 年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震。以青藏铁路为代表的西部冻土区重大线路工程上的桩基础桥梁在整个服役期间遭受地震灾害的可能性非常大 (张熙胤等, 2020a), 因此, 开展冻土区桥梁桩基础抗震试验研究, 对既有桥梁的抗震加固与震后修复、新建桥梁的抗震设计具有重要意义。

1 冻土区桥梁桩基础抗震试验研究任务

试验是工程结构抗震研究的重要手段之一, 通过试验可以直观地得到结构的力学参数、荷载响应、破坏特征等信息。早期的冻土区桥梁桩基础 (图 1, 2) 抗震理论不完善, 冻土层对桥梁桩基础抗震性能的影响尚不明确, 学者们通过开展冻土区桥梁桩基础抗震试验来验证理论和猜想的

* 收稿日期: 2023–07–03.

基金项目: 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目 (2023CXZX–597)。

第一作者简介: 齐煜 (1996–), 硕士研究生在读, 主要从事冻土区桥梁抗震研究. E-mail: 403665532@qq.com.

✉通信作者简介: 张熙胤 (1989–), 教授, 博士生导师, 主要从事寒区工程防灾减灾研究。

E-mail: zhangxiyin@mail.lzjtu.cn.

正确性及适用性,如 Vaziri 和 Han (1991) 对处于季节性冻土层中的足尺桩进行了现场试验,结果表明即使是 0.4 m 的冻土层也会对桩的动力响应产生显著影响,与无冻土层相比,冻土层中桩基础的水平刚度和共振频率都大大提高。其试验结果对以下理论和猜想进行了验证:①有学者认为,只有季节性冻土层深度超过 0.5 m 时,工程构筑物才会呈现出明显的冻、融灾害(马巍,王大雁,2014)。Vaziri 和 Han (1991) 的试验则表明,在考虑季节性冻融对桩基础抗震性能的影响时,这种报道并不准确。②Novak 和 Sheta (1980) 为了研究高应变下土体屈服可能引起的非线性对桩响应的影响,引入了边界区的概念,认为桩周圆柱形环带区域内的土体性质与周围均质土体不同,其中的一些假设受到了部分学者的质疑。Vaziri 和 Han (1991) 的试验结果可被用来检验边界区概念所提出的假设的实际影响。



图1 冻土区的桩基础桥梁

Fig. 1 A pile-foundation bridge in the frozen soil area in China



图2 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震中遭到破坏的桥梁(张昊宇摄)

Fig. 2 A damaged bridge in the 2021 Maduo, Qinghai $M_s7.4$ earthquake (photo by Zhang Haoyu)

20 世纪 60 年代,工程设计中的“计算机辅助工程”(Computer Aided Engineering, CAE)开始出现,到 90 年代,CAE 软件在功能、可靠性、对运行环境的适应性等方面已基本能满足用户需求(董其伍等,2002),科学研究由传统的理论和试验两类基本方法发展成理论、试验和数值模拟三足鼎立的研究体系(中国公路学报编辑部,2014)。在冻土区桥梁抗震研究领域,也有越来越多的学者开始使用 CAE 软件,如 ANSYS、ABAQUS、MIDAS 等来分析桥梁桩基础在地震作用下的响应情况,并通过参数调整和模型修改进行多种工况下的抗震研究,一定程度上解决了因工况较多试验难以全部开展的问题,推动了冻土区桥梁桩基础抗震研究的发展。而在进行多工况计算前,模型的动力参数、材料属性等需要通过试验获得,其接触设计、网格划分等是否合理也需要通过对比模拟结果与试验结果来验证。综上所述,现阶段冻土区桥梁桩基础抗震试验研究的主要任务包括以下 3 个方面:①获得结构的恢复力特性、动力响应等,分析结构的破坏机理和抗震性能。②利用试验数据为数值模型提供参数,如冻土的力学参数:弹性模量、摩擦角等。③验证抗震计算理论和计算模型的正确性,如将试验获得的结构恢复力特性、破坏特征、动力响应等与模拟结果进行比对,验证模型的正确性。

2 冻土区桥梁桩基础抗震试验研究现状

2.1 冻土三轴压缩试验

冻土的静力学性质和动力学性质与对应的融土相比均存在较大差异(陈敦等,2017;雷乐乐等,2018),对桥梁结构的地震反应有显著影响(陈兴冲等,2003)。为研究冻土区桥梁桩基础抗震性能,需要开展冻土力学特性试验。三轴压缩试验是一种较完善且常用的测定土体力学特性的试验方法(周永毅等,2022)。通过冻土三轴试验研究冻土力学参数的变化规律,可以为冻土区桥梁桩基础地震模拟的参数确定提供理论依据。

随着全球变暖的加剧,多年冻土层温度的升高成为必然趋势(Lu *et al.*, 2017),此外冻土的力学性质与土壤类型、含水率、加载速率、干密度和围压等密切相关(齐吉琳,马巍,2010),学者

们以上述因素为变量开展了不同类型的三轴压缩试验,如赵淑萍等(2003)对取自青藏铁路北麓河试验段的两种路基土进行动三轴试验,通过对试验数据进行回归分析,得到冻结粉质黏土、冻结细砂弹性模量和动阻尼与频率之间的对数关系式;王丽霞等(2005)对采自青藏铁路中的粉质黏土进行低温动、静三轴对比试验,研究表明冻土的内摩擦角和破坏所需的动应力都随振动频率的增大而减小,即随着地震烈度的增大,冻土更易被破坏;王万平等(2022)对兰州黄土过筛烘干,人工调配不同含水率后进行低温冻土三轴试验,指出以最优含水率为分界点,冻土的黏聚力和内摩擦角呈现先增大后减小的变化趋势。在实际工程中有必要考虑冻土初始含水率与最优含水率的关系,初始含水率低于最优含水率时对桩-冻土体系的稳定性更有利。目前对冻土力学性质影响因素的研究较多考虑的是单因素或双因素的影响。Zhang等(2023)将取自西北寒区的粉质黏土碾碎、烘干后制样,通过低温动三轴试验,综合研究了围压、温度、含水率及加载频率耦合作用下冻结粉质黏土动弹性模量、参考应变幅值和阻尼比的变化规律,并提出预测公式。

在数值模拟中,以土体建模常用的 Mohr - Coulomb 模型为例,所需的弹性模量、摩擦角、膨胀角、黏聚力、屈服应力、绝对塑性应变等参数均要通过试验获得,所以确保试验数据的准确性对模拟结果有重要意义。由于埋置较深的多年冻土取样不易以及有进行多工况研究的需要,学者们进行冻土三轴压缩试验时较多采用人工降温的重塑土作为试样,但已有研究表明重塑土在初始切线模量、抗剪强度、渗透系数变化、强度衰减等方面均与原状土存在一定差异(王淑云,楼志刚,2000;顾正维等,2003;杨雪强等,2013;王炳忠等,2019)。重塑土的制备工艺一般包括碾碎筛分、配置静置、分层击实、包裹保湿等环节(图3),一些学者通过优化制备工艺或添加外加剂的方法对重塑土进行性质改良(聂良佐,2007;罗开泰等,2013;周林康等,2018),但因未以冻土为研究对象,不能证实该方法对冻土具有适用性。开展冻土三轴压缩试验中重塑土试样的优化研究,减小重塑土对试验结果的影响是需要关注的重点方向。

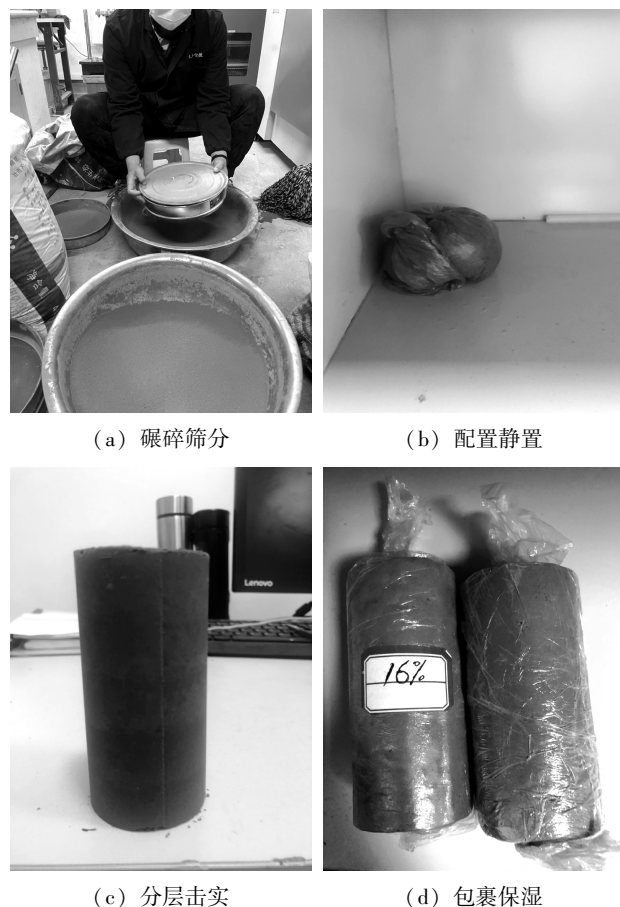


图3 重塑土制备工艺(据 Zhang 等, 2023)

Fig. 3 Preparation of the remolded soil
(according to Zhang *et al.*, 2023)

2.2 桩-冻土体系拟静力试验

拟静力试验是以一定的力或位移作为控制值对结构进行低周循环加载,用以模拟地震时结构在往复振动中受力和变形特点的一种试验方式。拟静力试验的加载可以随时停止或调整,便于观测结构的开裂和破坏状态。同时,模型尺寸相对较大,减小了尺寸效应对试验结果的影响。通过试验可以得到结构的滞回曲线、骨架曲线、累计耗能、等效黏滞阻尼比、屈服位移、极限位移、延性系数、刚度退化等信息,以此来分析结构的抗震性能。

拟静力试验是结构抗震试验中应用最广泛的试验方法(杜修力等,2021),在冻土区桥梁桩基础抗震研究领域,学者们也开展了众多的此类试验。Sritharan等(2007)在夏季(23℃)和冬季(-10℃和-6℃)对美国爱荷华州立大学冰碛试验场的3个桩基础桥柱施加循环侧向荷载,并建立

考虑温度变化对桩-土-结构相互作用影响的有限元模型。模拟的桩身最大弯矩位置与试验基本一致,验证了模型的正确性。随后开展了温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的模拟,结果显示季节性冻土层的存在增大了体系的有效刚度,但使塑性区长度减少,导致结构由延性破坏转变为脆性破坏,这与抗震延性设计方法相违背且给震后修复增加了难度。基于此, Yang 等 (2023) 考虑采用一种对温度不敏感的复合材料代替桩周土,来降低土体季节性冻融对桩基础抗震性能的不利影响。通过对3个1:12的混凝土桩进行土体未冻结、冻结和局部置换并冻结3种工况下的拟静力试验,发现土体冻结时桩发生了脆性破坏,证实了季节性冻土对桩基础抗震的不利影响,土体局部置换并冻结时桩的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、弯矩分布、割线刚度等与土体未冻结时基本一致,表明局部替换方法可以有效降低土体季节性冻融对桩基础的不利影响。现行抗震设计中较少考虑季节性冻土区温度变化的影响。Wotherspoon 等 (2010a, b) 对季节性冻土区的两个室外桩基础进行循环横向加载,根据试验结果建立了考虑季节性冻土区的桩基础桥梁地震反应分析模型。在对模型进行25、72、500和2 500 a 重现期的地震波加载时发现,夏季模型和冬季模型最大弯矩的变化规律存在明显差异。对于季节性冻土

区的桩基础桥梁,在进行基于性能的抗震设计和多级设防水准条件下,只有考虑季节性冻融的影响才能得到合理的抗震性能评价指标。Li 和 Yang (2017) 通过对室外试验场地的钢管混凝土桩施加循环的静态侧向荷载开展地震作用下的冻土侧阻力研究,根据桩身弯矩和挠度数据提出了冻结粉土的 $p-y$ 曲线,采用曲线对试桩进行建模的结果与试验结果吻合较好,可以为冻结粉土 $p-y$ 曲线的参数选取提供参考。张熙胤等 (2022b, c)、Guan 等 (2022) 和 Zhang 等 (2021, 2022a, b) 以青藏铁路沿线典型桩基础桥梁为依托,设计制作了1:8 缩尺的高承台桩基础桥墩模型,将与制冷循环机相连的冷却管预先埋设在土体内部,并在土体四周铺设保温棉,从而实现了土体的冻结与保温 (图4)。在此基础上开展了非冻土、季节性冻土和多年冻土环境下的拟静力试验,并建立了冻土-高承台桩基础有限元模型,模型所用冻土力学参数取自三轴试验 (王万平等, 2022)。于生等 (2022) 将模拟所得的骨架曲线与试验数据进行对比,拟合情况较好,验证了模型的合理性 (图5)。并基于有限元模型,系统分析了季节冻土层厚度、季节冻土表层融深、桩长、桩径、桩自由端长度、墩顶荷载以及桩基配筋率等因素对冻土区桥梁桩基础抗震性能的影响规律,研究结果可以为冻土区桥梁桩基础抗震设计提供参考。

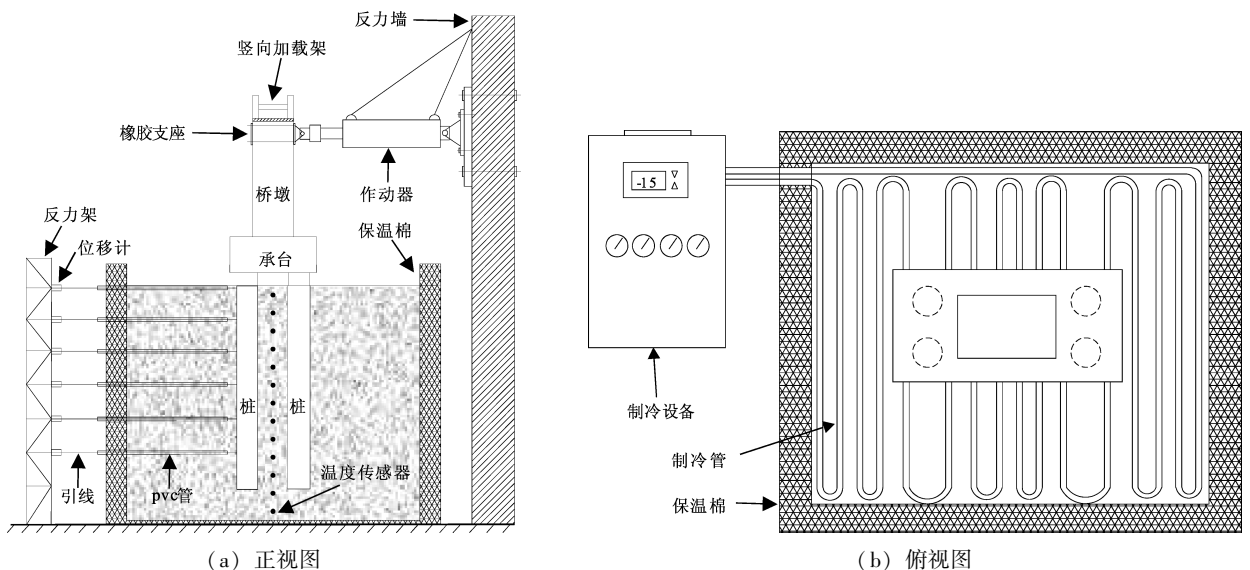


图4 冻土区桥梁桩基础拟静力试验布置图 (据张熙胤, 2020b)

Fig. 4 Pseudo-static test layout of the bridge pile foundation in frozen soil area
(according to Zhang, 2020b)

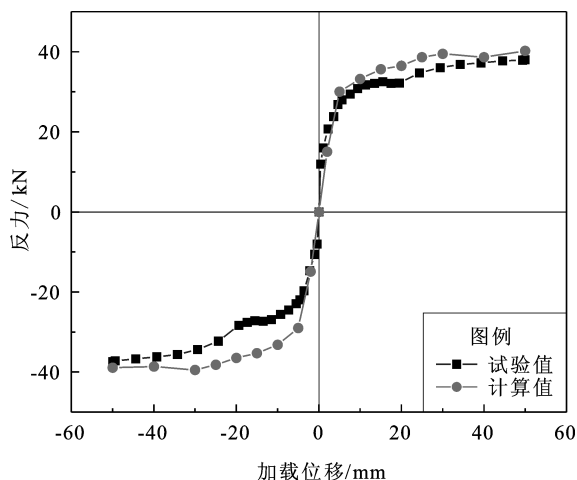


图5 有限元分析与拟静力试验的结果对比 (据于生生等, 2022)

Fig. 5 Comparison of the results from the finite element analysis and pseudo-static test (according to Yu *et al.*, 2022)

拟静力试验的缺点是用静力模拟地震对工程结构的作用,不能反映应变速率的影响,Fei等(2018)提出了用修正的 von Mises 模型来模拟应变速率、温度和干密度对冻结粉土力学性质的影响,利用季节性冻土层中的两根大型钢套管混凝土桩在水平荷载作用下的现场试验数据对有限元模型进行了校准,为冻土区桥梁桩基础拟静力试验的完善提供了参考。此外,地震对结构的作用为三维作用,而目前开展的冻土区桥梁桩基础拟静力试验较少考虑地震的多向耦合效应,不能反映桥梁桩基础在地震作用下的真实响应,试验结果高估了结构的抗震性能(邱法维等,2001;夏樟华等,2012)。李宏男等(2013)研究表明只要采用合理的荷载分布形式和加载制度,拟静力试验也能较好地再现结构在地震中的破坏状态,因此开展多维加载试验并研究合理的加载规则可以成为冻土区拟静力试验的研究方向。

2.3 地震模拟振动台试验

地震模拟振动台试验通过振动台台面对结构输入地面运动,模拟地震波对结构的作用,能真实再现结构开裂至破坏的全过程,是在实验室中研究地震反应和破坏机理、检验结构抗震性能最直接的方法(王燕华,2018)。1994年美国北岭地

震和1995年日本阪神地震后,许多国家和地区强烈地意识到强震观测的重要性,纷纷提高强震观测台网布设密度,扩大台网覆盖面积(周雍年,2001),因而记录到大量真实的地震波数据,可供振动台试验加载时使用,推动了振动台试验的发展。较为经典的有 EL-Centro 波、Northridge 波、Taft 波和汶川波等。与房屋或高层建筑的振动台试验不同,开展冻土区桥梁桩基础振动台试验,首先需要一个能承装地基土和桩体模型的容器,但是有限尺寸的容器会导致地震波在边界处发生反射,对试验结果产生影响,即“模型箱效应”。常见的试验土箱有刚性土箱,圆柱形柔性土箱和层状剪切模型箱3种。层状剪切模型箱能较好地模拟土体的剪切变形,同时由于其是刚性框架结构,也能对土体提供侧向约束,阻止土体向外膨胀,因而在桩-土动力作用试验中被广泛使用(陈之毅,李月阳,2015)。图6为兰州交通大学单向电液伺服驱动式3 m×3 m地震模拟振动台及层状剪切模型箱。



图6 地震模拟振动台(3 m×3 m)与层状剪切模型箱(据张熙胤等,2022a)

Fig. 6 Seismic simulation shaking table (3 m×3 m) and laminar shear model box (according to Zhang *et al.*, 2022a)

吴志坚等(2009)以多年冻土区青藏铁路清水河特大桥的桩基础为研究对象,开展了1:100的缩尺振动台试验。在模型箱四周内衬绝热保温材料,使用低温酒精进行恒温冷浴循环对土体进行降温,模拟多年冻土环境,模型桩使用水泥与砂

按 1:3 的比例制备,强度为 C30。试验结果表明地震荷载会导致桩周土体产生升温效应,使多年冻土强度下降,地基承载力减小。吴志坚等(2010, 2003)和 Che 等(2014)根据试验结果建立清水河特大桥桩基础有限元模型,进一步研究地震动作用下冻土升温效应对桩基础的影响,土体参数取自低温动三轴试验。模拟结果表明,温度升高会对冻土-桩体系的地震响应产生显著影响,增大桩与土体的滑移和脱离,对桩基础的稳定性产生不利影响。杨润林等(2014a, b)用水泥砂浆层模拟季节性冻土,用长 1.4 m、直径 5 cm、壁厚为 0.18 cm 的 Q235 空心钢管桩模拟桥梁桩基础,开展了振动台试验,研究地震激励下冻土、液化砂土与桩之间的相互作用。结果表明,地基液化前,季节性冻土层为桩基提供了一定的侧向约束,从而提高了桩基的承载力;液化发生后冻土层使地基液化趋势增强,导致桩基承载力下降。1964 年美国阿拉斯加 M_w 9.2 特大地震中液化土层上覆冻土的侧向扩展诱发了广泛的桥梁基础破坏, Yang 等(2012, 2018)以此为研究对象开展振动台试验,试验结果揭示出冻土中桩的破坏机制与桩承台连接处相似,冻土层在液化导致的地面侧向扩展中充当了天然承台的作用,约束了桩头的转动。该研究为有限元模型的校准提供了数据,有助于深入了解液化引起的侧向扩展作用下冻土层对桩基抗震性能的影响。Chen 等(2012)对一根长 406 mm、直径 6 mm 的钢管混凝土桩进行了自由水平振动试验,提出可以采用自由衰减响应信号来监测桩-冻土相互作用的响应情况。冻土区尤其是多年冻土区的桩基础一般埋置较深,检测难度较大,该研究对估算多年冻土区桩基础的完整性和刚度有重要意义。

模型混凝土和原型结构材料属性的相似程度对地震模拟振动台试验至关重要,由于台面尺寸和承载能力的限制,以及对模型土体负温的精度控制,冻土区地震模拟振动台试验的模型比例一般较小,而混凝土结构的小比例强度模型,其材料的完全相似难以得到满足。一些学者使用金属材料来模拟桩体,这种方法可以模拟弹性状态,但很难再现钢筋混凝土的非弹性损伤行为。微粒

混凝土是一种由小粒径骨料、水泥和水按一定比例组成的新型人工材料。20 世纪 90 年代后,我国学者逐步开展微粒混凝土的相关研究(鞠杨等, 1994; 杨政等, 2002; 沈朝勇等, 2005),结果表明,可以通过合理的级配和选材获得满足原型混凝土抗压强度、弹性模量、表观密度等相似要求的微粒混凝土(沈德建, 吕西林, 2010; 李绿宇, 国巍, 2016; 刘畅等, 2021)。为提高试验结果的准确性,可以在冻土区桩基础振动台试验中考虑采用满足冻土区桩基础材料相似性的微粒混凝土替代常规混凝土材料。

2.4 子结构试验方法

地震对结构的破坏一般从薄弱环节开始,这些部位在地震作用下的力学行为通常伴随着大变形和强非线性,需要通过试验才能理解和把握。结构其余部分损伤程度较低,用数值模拟方法计算也有较高的精度。这种将真实的物理加载试验和有限元数值模拟耦合使用的试验方法称为子结构试验,试验部分为试验子结构,模拟部分为计算子结构。

桩-土相互作用一直是桥梁抗震研究中的重点,由于土体的非线性,完全拟合实际情况求出精确解是非常困难的,通常选择建立简化模型模拟桩-土相互作用效应。但是因为冻土受温度和水热效应的影响,现有桩-土相互作用计算模型无法有效应用于冻土领域(王万平等, 2020),给冻土区桥梁桩基础的抗震分析带来困难。子结构试验为解决此问题提供了思路,将桩基础作为试验子结构,加载位移由桩-冻土结构整体动力方程计算,土体的非线性特征被包含在测量的恢复力之中。数值子结构计算的精确性是试验成功的关键,美国伊利诺斯州立大学研发的 UI-SinCor 系统、加州伯克利分校提出的 OpenFresco 系统、湖南大学建设的网格化结构实验室 NetSLab、中国台湾地区工程研究中心搭建的混合试验平台等(王涛, 潘鹏, 2018)均在不同程度上提高了数值子结构计算的精确性,使开展子结构试验弥补桩-冻土相互作用计算模型的不足成为可能。

受试验设备尺寸的限制,传统振动台试验中将土和结构同时作为试验对象的整体分析法难以

适用于长大型桥梁,李振宝等(2011)将土模型作为计算子结构,桥梁作为试验子结构,提出了一种考虑土-结构相互作用的多维多点地震模拟振动台试验方法。郭珺等(2017)对一座多跨连续刚构桥梁进行考虑土-结构相互作用的抗震性能研究,1:25 缩尺后模型总长仍有 14 m,试验设备无法满足研究要求。将桥墩基础与土体作为数值子结构,将桥梁自身作为试验子结构完成了现有设备条件下考虑土-结构相互作用影响的振动台试验。针对传统振动台试验只能完成小尺寸储罐模型试验的问题,Xu 等(2020)提出了一种考虑土-结构相互作用的振动台子结构试验方法用以研究大型储罐的抗震性能,通过理论分析和试验结果验证了该方法的可行性,该方法可以为桥梁等大型结构的振动台试验提供参考。综上所述,考虑到室内试验中桥梁桩基础-冻土相互作用体系的实施难度较大,子结构试验方法可以成为今后冻土区桥梁桩基础抗震试验的重点关注方向,对推动冻土区桥梁桩基础抗震研究有重要价值。

3 结论

本文总结了现阶段冻土区桥梁桩基础抗震试验的任务,对国内外冻土区桥梁桩基础抗震性能试验的研究现状进行了详细论述,指出了试验设计中存在的一些不足,得出以下主要结论:

(1) 冻土三轴压缩试验较多采用重塑土,为提高试验的准确性需要对重塑土进行性能优化,而对重塑土性能优化的研究较少针对冻土。

(2) 桩-冻土体系拟静力试验主要以一维加载为主,难以反映桩基础在实际地震作用下的响应情况,研究合理的荷载分布形式和加载规则,开展多维拟静力试验,可以成为冻土区拟静力试验的发展趋势。

(3) 由于台面尺寸和承载能力的限制,以及对模型土体负温的精度控制,冻土区地震模拟振动台试验的模型比例一般较小,难以满足与原型材料的相似比要求,可以在冻土区桩基础振动台试验中,考虑采用满足与桩基础材料相似性的微粒混凝土替代常规混凝土材料。

(4) 桩-冻土相互作用计算模型尚不完善,并且考虑桩-冻土相互作用时,传统振动台试验对长大型桥梁无法适用,子结构试验方法能够有效解决以上问题,可以成为今后冻土区桥梁桩基础抗震试验的重点关注方向。

参考文献:

- 陈敦,马巍,赵淑萍,等. 2017. 冻土动力学研究的现状及展望[J]. 冰川冻土,39(4):868-883.
- Chen D, Ma W, Zhao S P, et al. 2017. Recent research progress and prospect of frozen soil dynamics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 39(4):868-883. (in Chinese)
- 陈兴冲,高峰,王旭. 2003. 多年冻土区桥墩抗震性能研究[J]. 岩石力学与工程学报,22(S2):2682-2685.
- Chen X C, Gao F, Wan X. 2003. Study on aseismic property of bridge piers in permafrost region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(S2):2682-2685. (in Chinese)
- 陈之毅,李月阳. 2015. 模型箱设计中的边界变形研究[J]. 工程抗震与加固改造,37(5):106-112.
- Chen Z Y, Li Y Y. 2015. Research progress on the model box for shaking table tests[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 37(5):106-112. (in Chinese)
- 董其伍,刘启玉,刘敏珊. 2002. CAE 技术回顾与展望[J]. 计算机工程与应用, (14):82-84.
- Dong Q W, Liu Q Y, Liu M S. 2002. Review and expectation of CAE technology[J]. Computer Engineering and Applications, (14):82-84. (in Chinese)
- 杜修力,韩润波,许成顺,等. 2021. 地下结构抗震拟静力试验研究现状及展望[J]. 防灾减灾工程学报,41(4):850-859.
- Du X L, Han R B, Xu C S, et al. 2021. Research status and prospects of quasi-static test for seismic research of underground structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 41(4):850-859. (in Chinese)
- 顾正维,孙炳楠,董邑宁. 2003. 粘土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,22(3):505-508.
- Gu Z W, Sun B N, Dong Y N. 2003. Testing study of permeability of the original clay, recomposed clay and improved clay with stabilizer ZDYT-1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 22(3):505-508. (in Chinese)
- 郭珺,唐贞云,李易,等. 2017. 基于子结构试验的土-结相互作用实现研究[J]. 工程力学,34(S1):214-219.
- Guo J, Tang Z Y, Li Y, et al. 2017. The simulation of soil structure interaction based on substructuring testing[J]. Engineering Mechanics, 34(S1):214-219. (in Chinese)
- 黄海. 2004. 以桥代路在青藏铁路多年冻土区的应用[J]. 山西建筑, (9):118-119.
- Huang H. 2004. Causes of joint failures of cement concrete pavement and prevention measures[J]. Shanxi Architecture, (9):118-119. (in Chinese)

- 鞠杨,苏宏,李锡静,等. 1994. 微粒混凝土配制技术[J]. 低温建筑技术, (4): 25-26.
- Ju Y, Su H, Li X J, *et al.* 1994. Techniques of microconcrete manufacture [J]. Low Temperature Architecture Technology, (4): 25-26. (in Chinese)
- 雷乐乐,谢艳丽,王大雁,等. 2018. 冻土静力学室内试验研究进展[J]. 冰川冻土, 40(4): 802-811.
- Lei L L, Xie Y L, Wang D Y, *et al.* 2018. Laboratory studies of frozen soil statics; Recent progress and prospect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 40(4): 802-811. (in Chinese)
- 李宏男,陈国兴,刘晶波,等. 2013. 地震工程学[M]. 北京:机械工业出版社, 270.
- Li H N, Chen G X, Liu J B, *et al.* 2013. Earthquake Engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 270. (in Chinese)
- 李绿宇,国巍. 2016. 微粒混凝土基本力学特性及其影响参数的试验研究[J]. 世界地震工程, 32(4): 277-283.
- Li L Y, Guo W. 2016. Experimental research on basic mechanical properties of microconcrete and its influence parameters [J]. World Earthquake Engineering, 32(4): 277-283. (in Chinese)
- 李振宝,唐贞云,纪金豹,等. 2011. 基于多振动台的土-结相互作用动力子结构试验方法研究[J]. 结构工程师, 27(S1): 76-81.
- Li Z B, Tang Z Y, Ji J B, *et al.* 2011. Research on the dynamic sub-structuring testing method for SSI based on shaking table array [J]. Structural Engineers, 27(S1): 76-81. (in Chinese)
- 刘畅,郝玮,孙巧珍,等. 2021. 微粒混凝土力学性能影响因素及调整方法的试验研究[J]. 建筑科学, 37(5): 92-98.
- Liu C, Hao W, Sun Q Z, *et al.* 2021. Experimental study on the influencing factors and adjustment methods for the mechanical properties of microconcrete [J]. Building Science, 37(5): 92-98. (in Chinese)
- 罗开泰,聂晔,张树伟,等. 2013. 人工制备初始应力各向异性结构性土方法探讨[J]. 岩土力学, 34(10): 2815-2820, 2834.
- Luo K T, Nie Q, Zhang S Y, *et al.* 2013. Investigation on artificially structured soils with initial stress-induced anisotropy [J]. Rock and Soil Mechanics, 34(10): 2815-2820, 2834. (in Chinese)
- 马巍,王大雁. 2012. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 34(4): 625-640.
- Ma W, Wang D Y. 2012. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 34(4): 625-640. (in Chinese)
- 马巍,王大雁. 2014. 冻土力学[M]. 北京:科学出版社.
- Ma W, Wang D Y. 2014. Mechanics of Frozen Soil [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 聂良佐. 2007. 重塑土物理力学特性试验参数的影响因素分析[J]. 实验技术与管理, (12): 30-34, 47.
- Nie L Z. 2007. Analysis of the experimental parameter of remolded soils physical and mechanical properties [J]. Experimental Technology and Management, (12): 30-34, 47. (in Chinese)
- 齐吉琳,马巍. 2010. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 31(1): 133-143.
- Qi J L, Ma W. 2010. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 31(1): 133-143. (in Chinese)
- 邱法维,李文峰,潘鹏,等. 2001. 钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究[J]. 建筑结构学报, (5): 26-31.
- Qiu F W, Li W F, Pan P, *et al.* 2001. Quasi-static test research of reinforced concrete column under biaxial loading [J]. Journal of Building Structures, (5): 26-31. (in Chinese)
- 沈朝勇,周福霖,黄襄云,等. 2005. 动力试验模型用微粒混凝土的初步试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), (3): 249-253.
- Shen C Y, Zhou F L, Huang X Y, *et al.* 2005. Experimental research on microconcrete used in dynamic test model [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), (3): 249-253. (in Chinese)
- 沈德建,吕西林. 2010. 模型试验的微粒混凝土力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 43(10): 14-21.
- Shen D J, Lyu X L. 2010. Experimental study on the mechanical property of microconcrete in model test [J]. China Civil Engineering Journal, 43(10): 14-21. (in Chinese)
- 王炳忠,王起才,张戎令,等. 2019. 荷载条件下原状与重塑泥岩渗透性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 46(1): 123-128.
- Wang B Z, Wang Q C, Zhang R L, *et al.* 2019. An experimental study of the permeability of undisturbed and remolded mudstones under the loading condition [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 46(1): 123-128. (in Chinese)
- 王丽霞,凌贤长,徐学燕,等. 2005. 青藏铁路冻结粉质粘土动静三轴试验对比[J]. 岩土工程学报, 27(2): 202-205.
- Wang L X, Ling X Z, Xu X Y, *et al.* 2005. Comparison of dynamic and static triaxial test on frozen silty clay of Qinghai-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 27(2): 202-205. (in Chinese)
- 王淑云,楼志刚. 2000. 原状和重塑海洋粘土经历动载后的静强度衰减[J]. 岩土力学, 23(1): 20-23.
- Wang S Y, Lou Z G. 2000. The degradation of undrained shear strength of undisturbed and remolded marine clay after cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 23(1): 20-23. (in Chinese)
- 王涛,潘鹏. 2018. 子结构混合试验方法研究与应用[J]. 工程力学, 35(2): 1-12.
- Wang T, Pan P. 2018. Study and application of substructure online hybrid test method [J]. Engineering Mechanics, 35(2): 1-12. (in Chinese)
- 王万平,张熙胤,陈兴冲,等. 2020. 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, 42(4): 1213-1219.
- Wang W P, Zhang X Y, Chen X C, *et al.* 2020. Study on dynamic interaction between bridge pile and soil with permafrost effect: status and review [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 42(4): 1213-1219. (in Chinese)
- 王万平,张熙胤,王义,等. 2022. 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, 54(8): 143-150.
- Wang W P, Zhang X Y, Wang Y, *et al.* 2022. Variation characteristics and influencing factors of loess shear strength in seasonal frozen soil re-

- gion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 54(8):143-150. (in Chinese)
- 王燕华. 2018. 地震模拟振动台试验及案例[M]. 南京:东南大学出版社.
- Wang Y H. 2018. Seismic simulation shaking table test and case [M]. Nanjing:Southeast University Press. (in Chinese)
- 吴志坚,车爱兰,陈拓,等. 2010. 青藏铁路多年冻土区桥梁桩基础地震响应的试验研究与数值分析[J]. 岩土力学, 31(11):3516-3524.
- Wu Z J, Che A L, Chen T, et al. 2010. Test study and numerical analysis of seismic response of pile foundation of bridge at permafrost regions along Qinghai-Tibet railroad [J]. Rock and Soil Mechanics, 31(11):3516-3524. (in Chinese)
- 吴志坚,王兰民,马巍,等. 2003. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, (3):19-23.
- Wu Z J, Wang L M, Ma W, et al. 2003. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamic loading [J]. China Earthquake Engineering Journal, (3):19-23. (in Chinese)
- 吴志坚,王平,霍元坤,等. 2009. 多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J]. 西北地震学报, 31(4):319-326.
- Wu Z J, Wang P, Huo Y K, et al. 2009. Study on shaking table test for seismic response of pile foundation of bridges at the permafrost regions [J]. China Earthquake Engineering Journal, 31(4):319-326. (in Chinese)
- 夏樟华,宗周红,程浩德. 2012. 双向拟静力加载规则对钢筋混凝土高墩滞回性能的影响[J]. 实验力学, 27(3):343-353.
- Xia Z H, Zong Z H, Cheng H D. 2012. Effect of bidirectional quasi-static loading rule on hysteretic properties of reinforced concrete high pier [J]. Journal of Experimental Mechanics, 27(3):343-353. (in Chinese)
- 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等. 2020. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 39(3):445-468.
- Xue Y G, Kong F M, Yang W M, et al. 2020. Main unfavorable geological conditions and engineering geological problems along Sichuan-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(3):445-468. (in Chinese)
- 杨润林,乔春明, Zhang X Y, 等. 2014a. 冻土覆盖下液化场地桩基础地震响应的振动台试验研究[J]. 北京科技大学学报, 36(1):131-137.
- Yang R L, Qiao C M, Zhang X Y, et al. 2014a. Shaking table test study on seismic responses of pile foundations embedded in liquefiable ground with the frozen crust [J]. Chinese Journal of Engineering, 36(1):131-137. (in Chinese)
- 杨润林,杨朝晖,乔春明,等. 2014b. 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, 36(4):612-617.
- Yang R L, Yang Z H, Qiao C M, et al. 2014b. Experimental study on frozen soil-liquefiable soil-single pile interaction during earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36(4):612-617. (in Chinese)
- 杨雪强,刘文治,刘祖德,等. 2013. 武汉原状粉质黏土与其重塑土的试验对比研究(I):试验结果描述[J]. 广东工业大学学报, 30(1):18-24.
- Yang X Q, Liu W Z, Liu Z D, et al. 2013. A contrastive study of natural and remoulded silty clays in Wuhan(I):Description of experimental results [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 30(1):18-24. (in Chinese)
- 杨政,廖建建,楼康禹. 2002. 微粒混凝土受压应力应变全曲线试验研究[J]. 工程力学, (2):92-96.
- Yang Z, Liao H J, Lou K Y. 2022. Experimental study of the full curve of the stress-strain relationship for microconcrete [J]. Engineering Mechanics, (2):92-96. (in Chinese)
- 于生生,张熙胤,王万平,等. 2022. 考虑土体季节性冻融效应的铁路桥梁桩基础抗震性能及影响因素分析[J]. 铁道学报, 44(5):141-148.
- Yu S S, Zhang X Y, Wang W P, et al. 2022. Seismic performance and influencing factors of railway bridge pile foundation considering seasonal freezing and thawing effect of soil [J]. Journal of the China Railway Society, 44(5):141-148. (in Chinese)
- 张熙胤,陈兴冲,高建强. 2020a. 多年冻土区桥梁抗震研究进展[J]. 兰州理工大学学报. 46(2):116-120.
- Zhang X Y, Chen X C, Gao J Q. 2020a. Research advance on seismic performance of bridges in permafrost regions [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 46(2):116-120. (in Chinese)
- 张熙胤,管嘉达,陈兴冲,等. 2022a. 一种可用于模拟冻土区工程结构基础地震反应试验装置:CN217520941U [P]. 2022-09-30.
- Zhang X Y, Guan J D, Chen X C, et al. 2022a. A test device for simulating seismic response of engineering structure foundation in frozen soil area:CN217520941U [P]. 2022-09-30. (in Chinese)
- 张熙胤,王万平,于生生,等. 2020b. 一种可用于模拟冻土环境下工程结构基础水平荷载反应的试验系统:CN11912721A [P]. 2020-11-10.
- Zhang X Y, Wang W P, Yu S S, et al. 2020b. A test system for simulating horizontal load response of engineering structure foundation in frozen soil environment: CN11912721A [P]. 2020-11-10. (in Chinese)
- 张熙胤,王万平,于生生,等. 2022b. 多年冻土区桥梁桩基础抗震性能及影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 44(9):1635-1643.
- Zhang X Y, Wang W P, Yu S S, et al. 2022b. Seismic performance and influencing factors of pile foundation of bridges in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 44(9):1635-1643. (in Chinese)
- 张熙胤,于生生,王万平,等. 2022c. 多年冻土区铁路桥梁高承台桩基础地震破坏机理及易损性研究[J]. 土木工程学报, 55(7):77-89.
- Zhang X Y, Yu S S, W P, et al. 2022c. Seismic failure mechanism and fragility of pile foundation with elevated cap of railway bridge in permafrost region [J]. China Civil Engineering Journal, 55(7):77-89. (in Chinese)

- 赵淑萍,朱元林,何平,等. 2003. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报,22(S2):2677-2681.
- Zhao S P,Zhu Y L,He P,*et al.* 2003. Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,22(S2):2677-2681. (in Chinese)
- 中国公路学报编辑部. 2014. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报,27(5):1-96.
- Editorial department of China highway and transportation journal. 2014. Review on China's bridge engineering research;2014[J]. China Journal of Highway and Transportation,27(5):1-96. (in Chinese)
- 周林康,邓宏凯,晋华. 2018. 分层击实法制备的重塑土不均匀性试验研究[J]. 公路,63(5):17-21.
- Zhou L K,Deng H K,Jin H. 2018. Experimental study on heterogeneity of remolded soil prepared by layered compaction method[J]. Highway,63(5):17-21. (in Chinese)
- 周雍年. 2001. 强震观测的发展趋势和任务[J]. 世界地震工程,(4):19-26.
- Zhou Y N. 2001. Developing trend and tasks of strong motion observation[J]. World Earthquake Engineering,(4):19-26. (in Chinese)
- 周永毅,张建经,闫世杰,等. 2022. 土体冻融特性试验研究现状与思考[J]. 岩石力学与工程学报,41(6):1267-1284.
- Zhou Y Y,Zhang J J,Yan S J,*et al.* 2022. Advance and review on the experimental researches of the freezing and thawing characteristics of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,41(6):1267-1284. (in Chinese)
- Che A L,Wu Z J,Wang P. 2014. Stability of pile foundations base on warming effects on the permafrost under earthquake motions[J]. Soils and Foundations,54(4):639-647.
- Chen S G,Davis D,Hulsey L J. 2012. Measurement of frozen soil - pile dynamic properties;A system identification approach[J]. Cold Regions Science and Technology,70(G79):98-106.
- Fei W P,Yang Z J,Sun T C. 2018. Ground freezing impact on laterally loaded pile foundations considering strain rate effect[J]. Cold Regions Science and Technology,157:53-63.
- Guan J D,Zhang X Y,Chen X C,*et al.* 2022. Influence of seasonal freezing - thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology,199:103581.
- Li Q,Yang Z J. 2017. P - Y approach for laterally loaded piles in frozen Silt[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,143(5):04017001.
- Lu Q,Zhao D,Wu S. 2017. Simulated responses of permafrost distribution to climate change on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Sci Rep,7(1):3845.
- Novak M,Sheta M. 1980. Approximate approach to contact effects of piles[M]// ASCE. Proceedings of Dynamic Response of Pile Foundations;Analytical Aspects. New York,53-79.
- Sritharan S,Suleiman M T,White D J,*et al.* 2007. Effects of seasonal freezing on bridge column-foundation-soil interaction and their implications[J]. Earthquake Spectra,23(1):199-222.
- Vaziri H,Han Y C. 1991. Full-scale field studies of the dynamic response of piles embedded in partially frozen soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,28(5):708-718.
- Wotherspoon L M,Sritharan S,Pender M J,*et al.* 2010a. Investigation on the impact of seasonally frozen soil on seismic response of bridge columns[J]. Journal of Bridge Engineering,5(15):473-481.
- Wotherspoon L M,Sritharan S,Pender M J. 2010b. Modelling the response of cyclically loaded bridge columns embedded in warm and seasonally frozen soils[J]. Engineering Structures,4(32):933-943.
- Xu G,Ding Y,Xu J,*et al.* 2020. A shaking table substructure testing method for the structural seismic evaluation considering soil - structure interactions[J]. Advances in Structural Engineering,23(1):136943322092726.
- Yang Z H,Shen F Q,Yin P B,*et al.* 2023. A new approach for improving lateral performance of pile foundations in seasonally frozen regions[J]. Cold Regions Science and Technology,207:103778.
- Yang Z H,Zhang X Y,Yang R L,*et al.* 2018. Shake table modeling of pile foundation performance in laterally spreading frozen ground crust overlying liquefiable soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering,32(4):04018012.
- Yang Z H,Zhang X Y,Yang R L. 2012. Shake table modeling of laterally loaded piles in liquefiable soils with a frozen crust[J]. Applied Mechanics and Materials,1975:204-208.
- Zhang X Y,Guan J D,Chen X C,*et al.* 2022a. Effect of permafrost on seismic performance of railway bridge pile foundation with elevated cap[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics,22(11):2241002.
- Zhang X Y,Sun B J,Xu Z J,*et al.* 2023. Experimental study on the dynamic characteristics of frozen silty clay and its influencing factors[J]. Sustainability,15(2):1205.
- Zhang X Y,Yang Z H,Chen X C,*et al.* 2021. Experimental study of frozen soil effect on seismic behavior of bridge pile foundations in cold regions[J]. Structures,32:1752-1762.
- Zhang X Y,Yu S S,Wang W P,*et al.* 2022b. Nonlinear seismic response of the bridge pile foundation with elevated and embedded caps in frozen soils[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,161:107476.

Research Status and Prospect of Seismic Test of the Bridge Pile Foundation in Frozen Soil Region

QI Yu, ZHANG Xiyin, WANG Wanping, HUANG Anqi, ZHANG Wenjing

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

Abstract

This paper provides a comprehensive overview of the current research on seismic testing of bridge pile foundations in the frozen soil region. The purpose, advantages, design, and shortcomings of the frozen soil triaxial compression test, the pile-frozen soil system pseudo-static test, and the seismic simulation shaking table test are systematically summarized and analyzed; corresponding improvement measures and development directions are proposed. Considering the challenges associated with implementing the interaction system between the bridge pile foundations and the frozen soil in laboratory experiments, the idea of utilizing the substructure test method to conduct seismic testing of bridges in the frozen soil regions is proposed.

Keywords: frozen soil region; bridge pile foundation; triaxial compression test; pseudo-static test; shaking table test