

DOI: 10.11779/CJGE20240657

锥形桩冻拔特性多因素影响规律及抗拔机理研究

杨志浩¹, 程世奥², 岳祖润^{*1}, 冯怀平², 赵得杰³, 马德良¹, 李同海⁴

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 3. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308; 4. 中铁十七局集团有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 为探究锥形桩冻拔特性演变特征及抗拔机理, 研发锥形桩抗冻拔性能测试装置, 开展单向冻结下锥形桩冻拔试验, 分析桩体材质、锥角、桩周土含水率及冻融循环对锥形桩冻拔性能的影响规律, 讨论锥形桩抗拔机理。表明: 同等条件下, 桩体冻拔位移随锥角增大呈指数形式递减; 随冻融循环次数增大, 直柱桩冻拔位移增长速率呈半对数形式增长, 而锥形桩变化不明显; 桩体材质对锥形桩冻拔特性影响显著, 且木质桩体会发生融拔现象; 单向冻结过程中桩周土内部水分由底部向上迁移, 初始含水率越大, 水分迁移越明显, 桩体冻拔位移越大, 但含水率对冻拔位移影响程度弱于锥角; 桩周土冻结过程中冻深增大, 桩体表面切向冻胀力增大、法向冻胀力由压应力逐渐减小并转换为拉应力, 当上述两个力分别大于桩土切向冻结强度和极限法向抗拉强度时, 桩体发生冻拔。综合考虑抗冻拔、经济性及对冻土保护, 抗冻拔锥形桩锥角宜设计为 $7^\circ \sim 9^\circ$, 但仍需考虑桩深参数。

关键词: 冻土区; 锥形桩; 冻拔机理; 锥角设计

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)07-1382-10

作者简介: 杨志浩(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事交通岩土工程方面的研究工作。E-mail: yangzhihao@stdu.edu.cn。

Multifactorial influence patterns and resistance mechanisms of frost-jacking characteristics in conical piles

YANG Zhihao¹, CHENG Shi'ao², YUE Zurun¹, FENG Huaiping², ZHAO Dejie³, MA Deliang¹, LI Tonghai⁴

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University,

Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. China

Railway Liuyuan Group Co., Ltd, Tianjin 300308, China; 4. China Railway 17th Bureau Group Co., Ltd, Taiyuan 030006, China)

Abstract: To investigate their evolution characteristics of frost-jacking behavior and their resistance mechanisms, a testing device for the anti-frost-jacking performance of conical piles is developed. The unidirectional freezing tests on the conical piles are conducted to analyze the effects of pile materials, cone angles, soil moisture contents around the piles and freeze-thaw cycles on their frost-jacking performance as well as their anti-frost-jacking mechanisms. It is indicated that under the same conditions, the frost-jacking displacement of the piles decreases exponentially with the increase in the cone angles. As the number of freeze-thaw cycles increases, the growth rate of the frost-jacking displacement for vertical piles increases in a semi-logarithmic manner, while changes in the conical piles are not significant. The pile materials have a significant impact on the frost-jacking characteristics of the conical piles, and the wooden pile may experience thawing extraction. During the unidirectional freezing process, the moisture within the soil surrounding the piles migrates upward from the bottom. The greater the initial moisture contents, the more pronounced the migration, leading to larger frost-jacking displacements. However, the effects of the moisture contents on the frost-jacking displacement are weaker than those of the cone angles. During the freezing process of the soil around the piles, the freezing depth increases, the tangential frost-jacking force on the pile surface increases, and the normal frost jacking force gradually decreases from compressive stress to tensile one. When these two forces exceed the tangential freezing strength of the soil and the ultimate normal tensile strength, the frost-jacking of the piles occurs. Considering

基金项目: 国家自然科学基金项目(52302518); 河北省自然科学基金项目(E2023210054); 石家庄市驻冀高校基础研究优青项目(241790557A); 河北省高等学校科学研究项目(CXZX2025005) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52302518), the Natural Science Foundation of Hebei Province (Grant No. E2023210054), the Shijiazhuang City Outstanding Youth Project for Basic Research in Hebei Province Universities (Grant No. 241790557A), and the Science and Technology Project of Hebei Education Department (Grant No. CXZX2025005).

收稿日期(Received): 2024-07-08 修回日期(Revised): 2025-02-18 接受日期(Accepted): 2025-02-25 网络出版日期(Online): 2025-02-26

*通信作者 (E-mail: 731191861@qq.com)

the resistance to frost jacking, economic factors and the protection of frozen soil, the cone angles of the anti-frost-jacking conical piles should be designed to be between 7° and 9° , but the pile depth must also be taken into account.

Key words: frozen soil region; conical pile; frost-jacking mechanism; conical angle design

0 引言

冻土区多类轻负荷桩基会发生不同程度冻拔病害, 严重时冻拔位移高达几十厘米, 如图1所示。锥形桩由于特殊几何形式, 抗冻拔性能较好, 目前冻土区多类杆塔基础亦采用锥形桩形式。然而, 随着锥形桩在更广冻土区域范围及更大体量的应用与实施, 其冻拔病害问题也广泛显现。锥形桩锥角越大, 抗冻拔特性越好, 但施工难度越大, 对环境影响更严重。掌握锥形桩冻拔特性多因素影响规律, 并揭示锥形桩抗冻拔机理, 提出经济合理锥角取值, 对于锥形桩冻拔病害整治及结构优化具有重要意义^[1-2]。

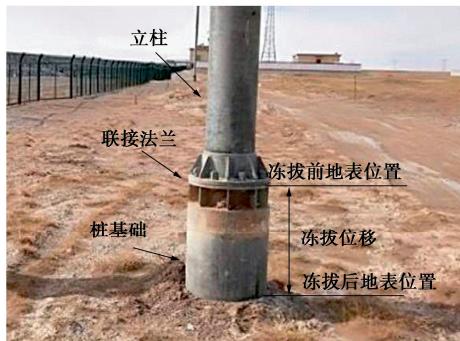


图1 某输电线桩冻拔实景

Fig. 1 Actual frost-jacking scene of a transmission line pile

中国早在青藏公路建设时便针对桩基抗冻拔特性开展了室内外试验及数值模拟研究, 提出了多类抗冻拔桩基结构形式, 包括独立扩大基础、锚固底梁、锚固环基础等, 均通过增加冻胀反力来抑制冻拔。然而, 初期抗拔效果较好, 后期随冻融次数增大, 锚固作用劣化, 抗拔效果大幅衰减, 并出现大范围冻拔病害。鉴于此, 研究人员开始对桩基在冻结过程中受力行为开展研究^[3-5], 初步掌握了桩基冻胀力与桩周土冻胀率、含水率、温度及冻结强度等因素间的影响规律。与上述自锚结构相比, 锥形桩依靠自身几何结构特征, 主动消减法向冻胀力及竖向冻胀力, 有望根本解决冻拔病害。也有学者进行了室外锥形桩冻拔测试, 抗拔效果较好^[6-8]。然而调研发现, 目前锥形桩由于锥角及深度设计不合理, 导致出现较多冻拔病害, 影响线路安全。锥形桩冻拔特性与桩周土土性及含水率、桩体材质、冻结温度等多因素有关^[9-13], 应综合考虑实际工况对锥角进行合理选择。目前冻土区锥形桩锥角多凭经验来设计, 在季节性冻融层较深及强冻胀土质地区轻负荷桩基也不乏较大冻拔位移发生。

目前, 国内外学者针对锥形桩抗冻拔特性虽开展

了一系列研究, 并取得了丰硕成果, 但针对锥形桩基础冻拔特性的多因素影响规律及抗冻拔机理方面仍缺乏系统认识。并且, 针对锥角的合理取值, 众学者并未得到共识。有学者认为锥角为 $2^\circ \sim 3^\circ$ 时, 便可有效防止冻拔, 但也有学者认为锥角大于 9° , 甚至有学者认为锥角大于 17° 时才能抑制冻拔病害的发生^[14]。锥形桩抗冻拔特性的系统揭示对实际工程中桩体抗冻拔措施的决策至关重要, 需进一步开展研究。

鉴于此, 自主研制了锥形桩抗冻拔性能测试装置, 开展了不同锥角、桩周土含水率及桩体材质的一维桩体抗冻拔试验, 分析了锥角、冻融次数、桩周土含水率及桩体材质对反复冻融作用下锥形桩冻拔性能综合影响规律, 讨论了锥形桩抗拔机理。成果将为冻土区桩体冻害防控、抗冻拔桩型优化提供理论及数据支撑。

1 试验设计

1.1 试验用土及试验测试桩

本试验桩周填土取自哈齐客专路基冻胀变形监测基准桩旁, 为验证该填土种类, 结合《铁路工程土工试验规程: TB10102—2023》^[15], 开展了液塑限、击实、冻结温度及冻胀率测试试验。试验结果表明, 试验用土为强冻胀粉土, 具体物性参数如表1所示。

表1 试验用土物性参数

Table 1 Soil property parameters for tests

$w_L / \%$	$w_p / \%$	I_p	$w_{opt} / \%$	$\rho_{dmax} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$T_f / ^\circ\text{C}$
25.1	17.2	7.9	17.9	1.83	-0.34

试验桩以哈齐高铁路基冻胀变形监测基准桩为例进行缩比例模拟, 工程中通常为直径 300 mm, 密度为 $2.2 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ 的混凝土桩, 本次试验中选用几何比例为 1:6 缩小的试验桩。为研究桩体材质及锥角对冻拔的影响, 制备了材料为铝合金和木质, 锥角为 0° , 5° , 7° , 9° 的桩体进行试验。桩顶直径均为 50 mm, 桩高均为 300 mm, 桩体表面喷涂防水涂料, 如图2所示。



图2 试验桩

Fig. 2 Test piles

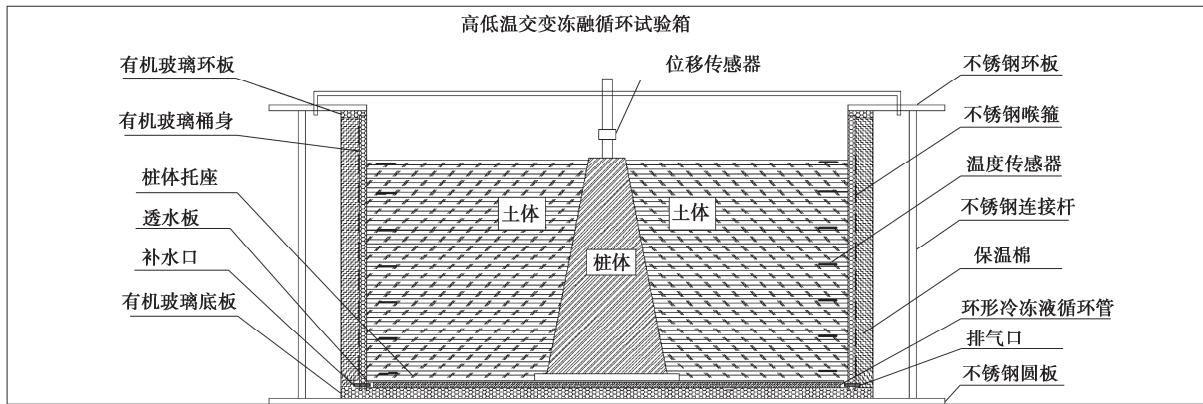


图 3 桩体抗冻拔性能测试装置

Fig. 3 Test devices for anti-frost-jacking properties of piles



图 4 测试装置部分细节

Fig. 4 Part details of test devices

1.2 试验设备

主要包括高低温交变冻融循环箱、桩体抗拔性能测试装置、恒温冷浴、温度/位移传感器及数据采集仪等, 结构布局如图 3 所示, 部分细节如图 4 所示。

结合一维冻结中的边界效应及相似比^[16]设计桩基础抗冻拔性能测试装置, 几何尺寸为 $\phi 350 \times 400$ mm, 由试样筒、底座、固定支架、横梁支架组成。试样筒由高强不锈钢喉箍紧, 限制侧向变形, 保证桩体试样单向冻拔。底座与低温恒温冷浴相连接, 为试样底部提供恒定温度。试验槽外壁包裹 5 cm 厚隔热材料, 保证冷量只能从试样筒上部向下传递, 试验槽内模拟稳定的一维单向冻结温度场。冻结过程中桩体上部为自由约束条件, 上部横梁支架安装位移传感器, 对桩体在冻融循环过程中的位移演变规律进行测试。位移传感器为上海天沐有限公司制造的 NSWY02 型, 量程为 100 mm, 精度为 0.05%。

1.3 试验步骤与方案

将取回土样进行晾晒, 过 2 mm 标准筛。为更好控制试验误差, 配土时采用纯净水, 并将配制好土样静置 24 h, 保证土样内部含水率分布均匀。桩周土分 7 层进行填筑与压实, 第一层填土厚度为 10 mm, 然后将试验桩布置在模型槽中心位置, 桩底与第一层土齐平, 随后进行其余 6 层土的填筑, 每层土填筑高度为 50 mm。同时在填土过程中按照图 3 进行温度传感

器的布置, 且保证桩土间充分接触。每个试样布置 2 列温度传感器, 每列布置 7 个, 间隔为 50 mm, 底层和顶层传感器与桩底和桩头齐平, 共 14 个。前期预试验结果发现本试验条件下桩周不同距离土体温度场只是前期冻结速率和融化速率存在差异, 但温度场的演变特征和最终温度场差别不大。后期正式试验时, 考虑到勿因为温度传感器的存在对桩体冻拔产生影响, 故去掉紧挨着桩周土体温度传感器的布设, 仅布设图 3 所示位置处温度传感器, 以此来表征桩周土体温度场的变化。温度传感器为 PT100 热敏铂电阻传感器, 测试精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。填土压实度结合现场工况选取为 0.95, 每层土填筑前进行刮毛, 且保证桩土间密实。

模型槽底部通过恒温冷浴始终设置 $+1^\circ\text{C}$, 模拟深层地温, 并消除底部法向冻胀力影响。首先, 通过高低温冻融试验箱设置环境温度为 $+1^\circ\text{C}$ 并恒温 24 h, 保证试样内部温度整体达到 $+1^\circ\text{C}$, 随后开展冻融循环试验。冻胀过程中, 将试验箱温度设置为 -20°C , 持续时间为 48 h; 融化过程中, 将试验箱温度设置为 $+20^\circ\text{C}$, 持续 24 h, 共 3 次循环过程。通过位移传感器对桩体位移进行采集, 采集频率为 4 次/h。3 次冻融循环试验结束后, 分层开挖取出试验桩、土及各类传感器, 并烘干测试各土层含水率。部分试验过程如图 5 所示。

设置 A、B 组试验, 为相同材料桩体在不同桩周土含水率条件下的抗冻拔试验, 探究锥角及桩周土含



图 5 部分试验过程

Fig. 5 Part details of tests

水率对冻拔位移的影响规律。设置 A、C 组试验, 为相同桩周土含水率条件下, 不同角度锥形桩的抗冻拔试验, 探究锥角及桩体材质对冻拔位移的影响规律。具体试验方案见表 2。

表 2 桩体冻拔试验设计参数

Table 2 Design parameters of frost-jacking tests on piles

组别	桩体材料	桩周土含水率/%	锥角/(°)
A1-A4	木质	18	0, 5, 7, 9
B1-B4	木质	20	0, 5, 7, 9
C1-C4	铝合金	18	0, 5, 7, 9

2 试验结果与分析

2.1 桩周土内部温度场演变特征

由于各组试验过程中的温度场基本一致, 故笔者仅对 B 组 7° 桩体 3 次冻融过程中土体内部的温度时程变化曲线进行分析, 如图 6 所示。其中 0 cm 为桩底, 31 cm 为桩顶。可以看出, 不同深度土体温度变化趋势基本一致。各层土体初始温度均为 +1°C, 随后经历了 3 次冻融循环, 且温度随时间呈“余弦”状分布, 试样内部明显存在温度梯度。冻结阶段, 试样内部不同土层温度均减小, 但减小幅度随深度增加逐渐降低, 且各土层温度随冻结时间的延长均逐渐趋于稳定; 融化阶段, 土样内部温度迅速升高, 融化速率明显大于冻结速率。且在融化的初期, 试样内部存在冻土核。

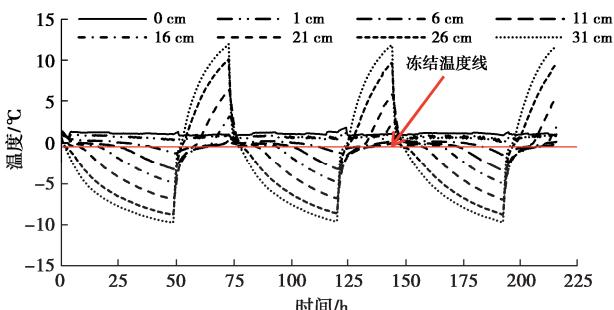


图 6 木质桩 3 次冻融桩周土体温度时程曲线 (18%)

Fig. 6 Time-history curve of soil temperature around wooden pile after three freeze-thaw cycles

由于不同材质桩体导热系数的差异, 造成桩周土温度场存在差异性。为验证该问题开展了预试验, 结果表明两种试样周边土体温度场存在差异, 但差异只存在于冻结和融化初期的速率方面, 后期由于试验设定的外界温度环境一致, 最终温度场分布情况差别较小。且前期冻结速率和融化速率的差异对桩体受力虽有影响, 但对桩体最终冻拔位移的影响很小。

2.2 冻融过程中桩体位移演变规律

图 7 为 A、B、C 三组工况条件下, 桩体在 3 次冻融过程中位移时程曲线。从图 7 中可以看出, 3 组试样均经历了 3 次冻拔融沉过程, 且 A、B 两组试样桩体冻融循环过程中位移演变规律类似, 但与 C 组试样明显不同。A、B 两组试样在冻融过程中位移均呈现增长趋势, 且冻结和融化过程中变化规律类似, 分为快速增长、增长减缓及趋于稳定 3 个阶段。冻结初期, 随温度降低, 冻深发展快, 土体冻胀并与桩体冻结, 作用在桩侧冻胀力大于桩体自重与向下摩阻力合力, 桩体产生冻拔; 随冻深不断发展, 冻结速率逐渐降低, 切向冻胀力增长速率也变缓, 冻拔位移缓慢增长; 随土体内部温度场达到稳定平衡, 冻结锋面不再发展, 冻拔位移趋于稳定; 融化初期, 由于冻结核存在, 且桩体密度较小 (0.7 g/cm^3), 作用在桩侧冻胀力仍大于桩体自重与向下摩阻力合力, 故桩体位移仍在增长; 随温度升高, 冻结核逐渐减小, 作用于桩身上拔力的合力逐渐减小, 故位移增长趋势减缓; 随冻结核消失, 桩体受到向上的摩阻力与桩体自重逐渐达到平衡状态, 桩体位移逐渐趋于稳定。融化阶段冻土核会同时向球面方面产生冻胀力, 以桩体为研究对象, 可叠加分解成桩体受到的垂向力和横向力。由于桩体布置在装置中央, 桩体两侧土体对桩体施加横向力互相抵消。而对于桩体两侧土体对桩体施加垂向力, 可分解为沿桩表面和垂直桩表面两个方向, 这两个方向的力对于 0° 桩而言, 只有垂向上的力, 故 0° 桩在融

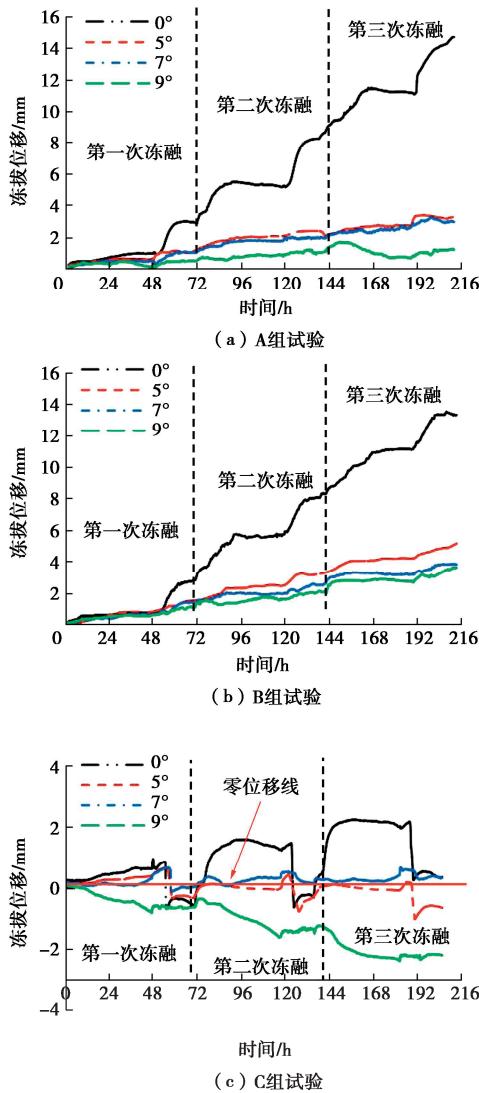


图 7 冻融过程中 3 组工况下不同桩体位移时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of displacement of different piles under three groups of conditions during freeze-thaw process

化阶段由于冻土核存在发生了显著上拔。对于 5° , 7° , 9° 木质桩而言, 所受到的两个方向上的合力, 整体上大于摩阻力和重力之和, 虽也出现上拔现象, 但上拔位移明显小于 0° 桩。 C 组中 0° , 5° , 7° 桩体表现出明显的冻拔融沉现象, 冻结过程与上述A、B两组试样的过程类似, 在此不再赘述。融沉过程中即使冻结核存在, 随着温度的升高, 桩土间的冻结强度降低, 作用于桩身的冻胀力与向上摩阻力的合力小于桩体自重, 故产生向下的融沉位移。 9° 桩不同的是, 表现出冻结过程中桩体产生了向下位移, 融化过程初期出现轻微上拔并逐渐趋于稳定的现象。金属桩体与桩周土温度传递存在差异性, 冻结时, 金属桩侧土比远处土体先冻结, 产生较大冻胀变形; 融化时, 桩侧土先于远处土体融化, 故产生较大融沉。同时, 冻结时桩的温度低于周围土体温度, 水分会向桩侧迁移,

形成高含水率区域, 导致冻结和融化初期出现位移的大起大落。同时, 可明显看出该锥角桩已充分发挥了锥形桩消减切向冻胀力效果, 冻结过程中作用于桩身冻胀力、向上摩阻力与桩体自重达到平衡状态, 但由于冻结过程中水分向上部大量迁移, 桩体下部土体产生较大固结沉降, 故桩体位移表现出向下位移。融化过程中虽然作用于桩身冻胀力逐渐减小并消失, 但未冻区摩阻力增大, 且水分迁移量显著减小, 综合作用下使得桩体位移趋于稳定。

2.3 桩体冻拔特性多因素影响规律分析

为探究锥角、桩周土含水率及桩体材质对桩体冻拔特性的影响, 绘制A、B、C三组试验桩体在3次冻结过程中冻拔位移随时间的变化曲线, 如图8~10所示。

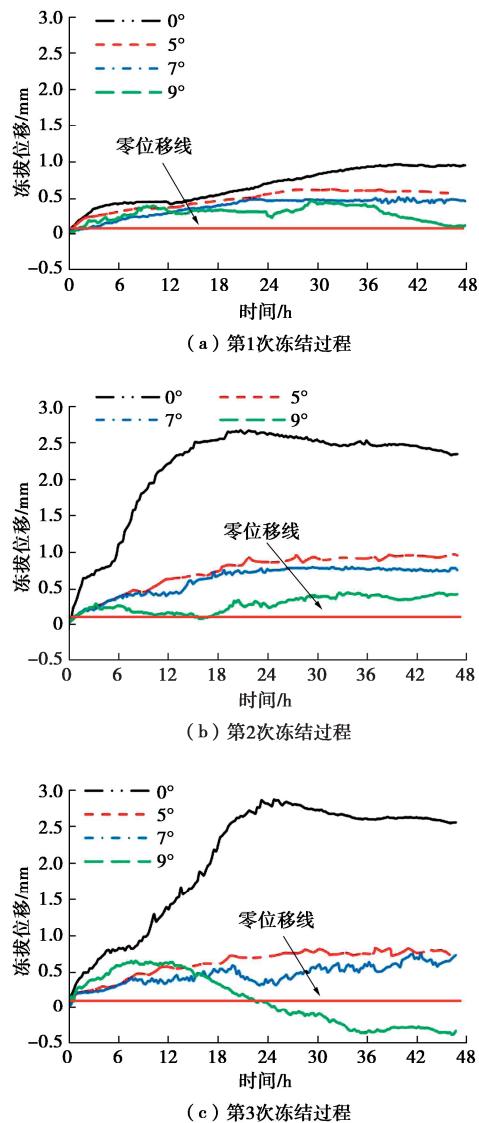


图 8 A 组试验桩体冻拔位移时程曲线

Fig. 8 Time-history curves of freezing displacement of Group A tests piles

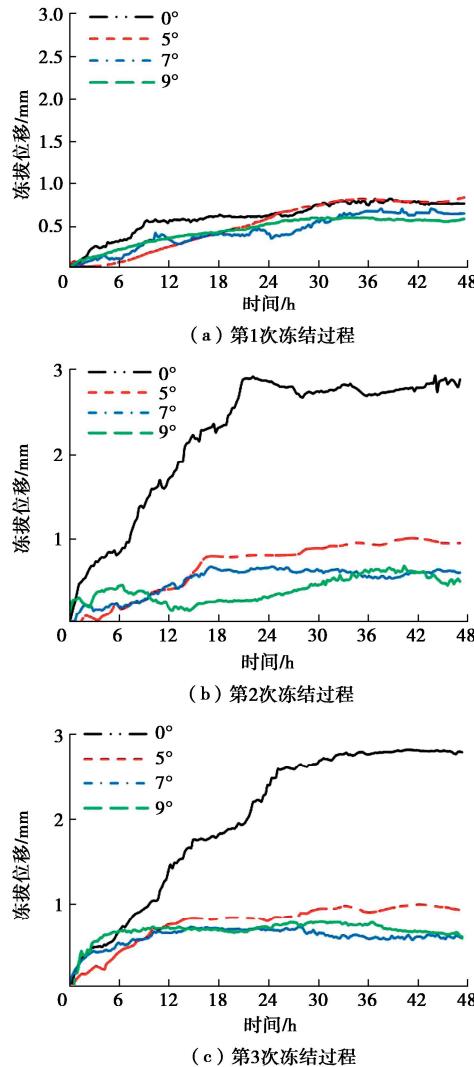


图 9 B 组试验桩体冻拔位移时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of freezing displacement of Group B test piles

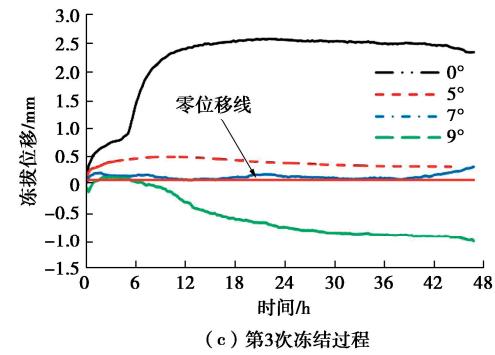
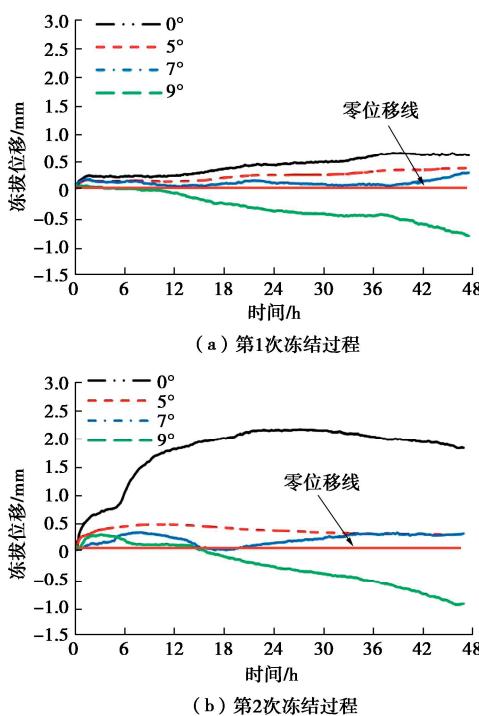
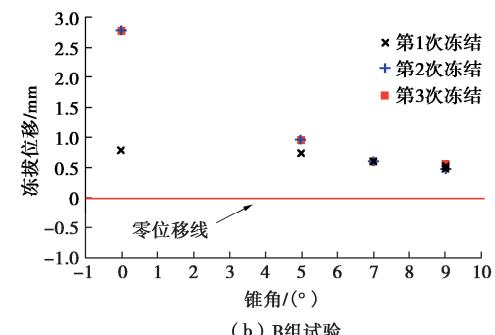
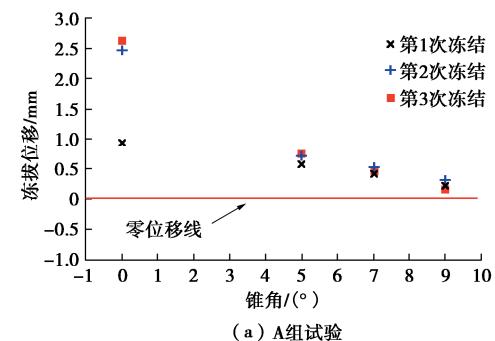


图 10 C 组试验桩体冻拔位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of freezing displacement of Group C test piles

(1) 锥角对冻拔位移的影响

结合图 8~10 数据, 绘制了 3 次冻结过程结束时刻冻拔位移值随桩体锥角变化曲线, 如图 11 所示。3 组试验中不同锥角桩体冻拔位移明显不同, 与锥角近似呈指数函数关系, 且随锥角增大而降低。锥角由 0° 到 5°, 桩体冻拔位移迅速减小, 当锥角大于 5° 时, 衰减趋势渐缓并逐渐趋于稳定。随锥角增大, 由式(1)可知桩体受到的切向冻胀力越小。当锥角较小时, 桩体受到的切向冻胀力大于桩身自重与未冻土层摩阻力合力, 则产生向上冻拔位移。当锥角达到一定角度时, 桩体受到的切向冻胀力小于桩身自重与未冻土层摩阻力合力, 则不会产生上拔位移, 但随土层冻胀过程中水分向冻结锋面迁移, 桩体下部产生较大固结沉降, 故 9° 桩发生了向下位移。相比 0° 直柱桩, 锥形桩具有显著抗冻拔效果, 最小冻拔位移为 0° 直柱桩的 1/6。



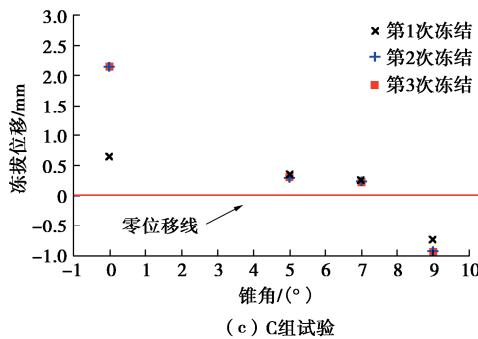


图 11 冻拔位移随锥角的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of frost-jacking displacement of piles with cone angle

(2) 冻融循环对冻拔位移的影响

图 12 为 3 组试验过程中桩体的冻拔位移随冻融循环次数的变化曲线, 可见 0° 直柱桩与 5° , 7° , 9° 锥形桩受冻融循环的影响规律具有显著差别。 0° 直柱桩随着冻融循环次数的增加, 冻拔位移呈半对数型增长, 而 5° , 7° , 9° 锥形桩受冻融循环的影响较小, 且随锥角的增加, 冻融循环次数对冻拔位移的影响程

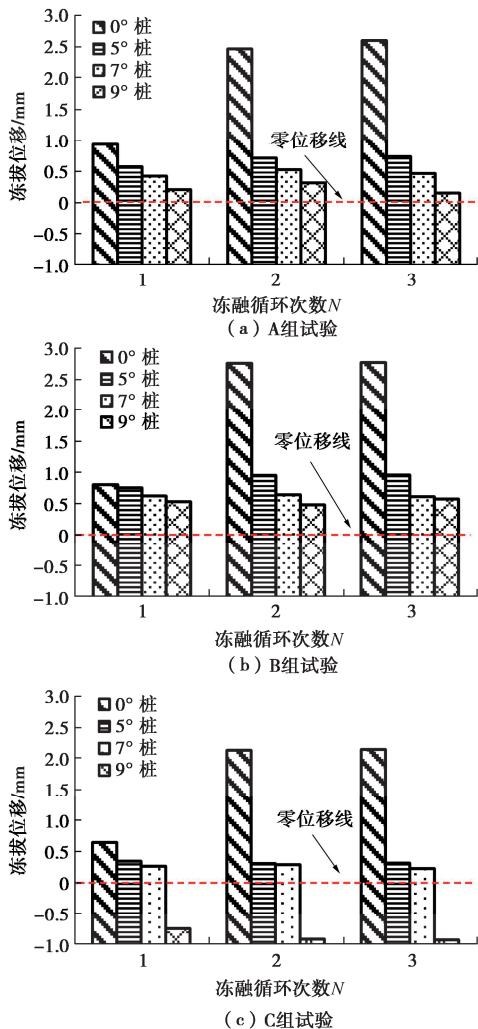


图 12 冻拔位移随冻融循环次数的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of frost-jacking displacement of piles with number of freeze-thaw cycles

度越小。表明锥形桩较直柱桩在抗冻拔方面的稳定性较强, 受冻融循环次数的影响较小, 具有更好的长期服役性。验证了锥形桩抗冻拔不是自锚作用的结果, 由于特殊几何结构, 对作用于桩基表面的切向冻胀力具有分解作用, 能够从受力的角度根本上抑制冻拔的产生。

(3) 含水率对冻拔位移的影响及水分迁移规律

对 A、B 两组试验中 0° 桩及 5° 桩在 3 次冻结过程中的桩冻拔位移试验数据进行对比, 如图 13 所示。可见, 初次冻结过程中桩周土含水率对桩体冻拔位移影响不大, 随冻融循环次数增大, 上述影响愈加显著。其他条件相同时, 桩体冻拔位移与土体含水率呈正相关。由于含水率较大桩周土体冻胀量较大, 且桩土间冻结强度更大, 作用在桩身上切向冻胀力更大, 故产生较大冻拔位移。桩周土含水率 18% 的 0° 直柱桩冻拔位移明显大于桩周土含水率 20% 的 5° 锥形桩冻拔位移, 可见锥角对于冻拔位移影响程度大于桩周土含水率影响, 在此也充分表明了锥形桩较直柱桩具有明显的抗拔优势。

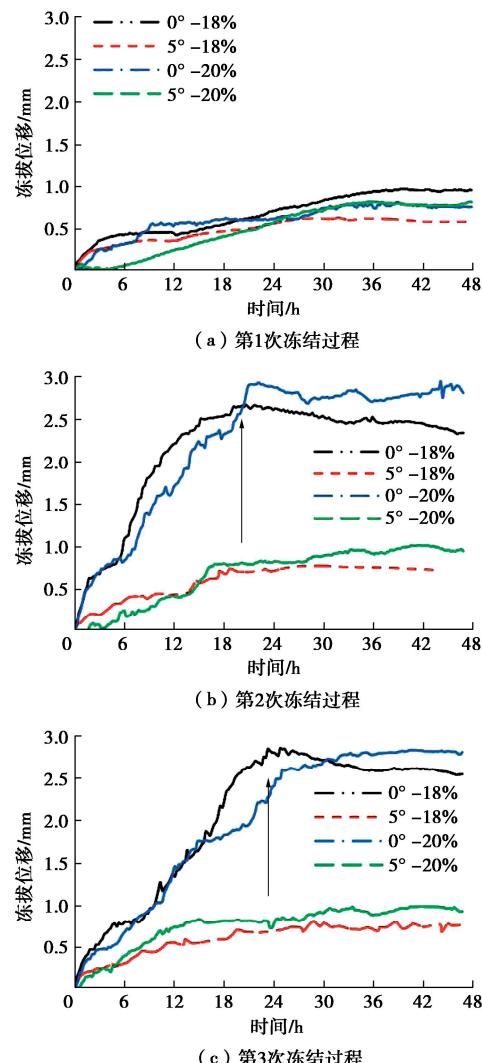


图 13 不同初始含水率木质桩体冻拔位移时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of frost-jacking displacement of wood piles with different initial moisture contents

为探究冻融循环中桩周土内部水分迁移规律, 验证上述冻拔位移演变特征。绘制了 A、B 组试验不同锥角木质桩在不同初始含水率桩周土中 3 次冻融试验结束时不同深度土层含水率分布情况, 如图 14 所示。

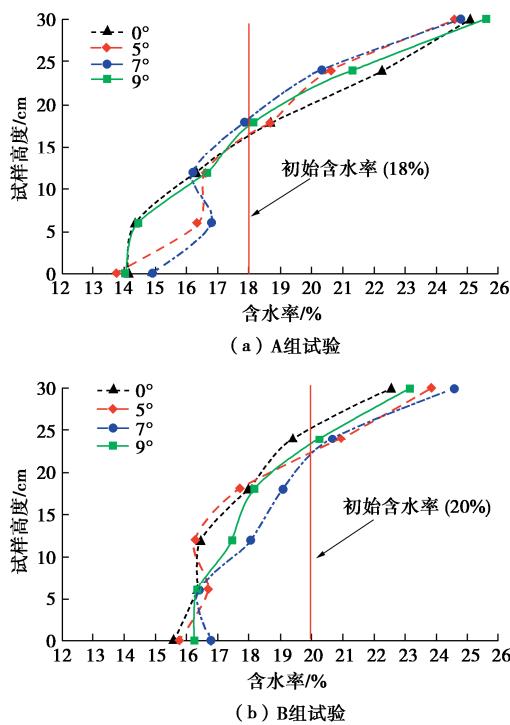


图 14 3 次冻融后木质桩周土体含水率分布曲线

Fig. 14 Distribution curves of moisture content of soil around wooden piles after three freeze-thaw cycles

图 14 可看出不同初始含水率不同锥角试样, 试验结束后含水率分布规律大致相同, 冻融试验过程中发生了水分迁移, 试验结束时上部土体含水率明显大于下部土体。土体在冻结过程中, 由于在冻结锋面处产生的负压作用, 导致土体内部水分向冻结锋面迁移。单向冻结条件下, 由于温度梯度作用, 土体内部水分由下向上发生迁移^[16], 最终导致上部土体含水率大于初始含水率, 下部土体含水率小于初始含水率。

(4) 桩体材质对冻拔位移的影响

由图 7 (a), (c) 可以看出, 相同桩周土含水率条件下, 不同锥角木质桩体和铝合金桩体的冻拔位移曲线有显著不同, 无论是在冻结阶段还是融化阶段, 木桩的位移均表现出增大的现象, 随时间的变化近似呈“台阶”状分布, 且不同锥角的桩体位移变化明显不同。但木质桩体和铝合金桩体在各次冻结过程中的冻拔位移变化规律大致相同, 均表现为 0° 桩的冻拔位移最大, 其次是 5° 桩和 7° 桩, 最后是 9° 桩。木质桩体自重较小, 约为铝合金桩体的 1/3, 融化过程中由于冻土核的存在, 即使锥角较大, 作用在桩侧的切向冻胀力仍大于桩身自重与非冻结层桩体间摩阻力

之和, 故表现出位移始终增大。铝合金桩体随锥角增大, 作用在桩侧切向冻胀力小于桩身自重与非冻结层桩土间摩阻力之和, 且冻结过程中由于土体内部发生向上水分迁移, 导致下部土体产生相应固结位移, 故铝合金桩体产生了向下的负位移。对比可发现, 木质桩体的冻拔位移大于铝合金桩体的冻拔位移。还需要注意的是, 材质不同引起温度场传递差异性也可能会导致不同材质桩体的冻拔差异性。

3 锥形桩抗拔机理讨论

由图 8~10 可知, A、B 两组试验中桩体位移在 3 次冻结过程中演变规律类似, 冻拔位移均随冻结时间增长, 呈现快速增长、缓慢增长及趋于稳定 3 个阶段。C 组试验中 0°、5° 及 7° 桩体位移随冻结时间均表现出冻拔融沉的演变规律, 但 9° 桩体在 3 次冻结过程中均出现了向下负位移。结合图 15 所示斜面基础上切向冻胀力及法向冻胀力受力模型, 分析锥形桩抗拔机理。

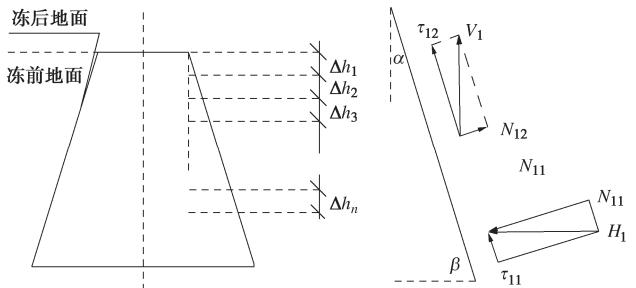


图 15 锥形桩冻拔受力图

Fig. 15 Force diagram of conical piles in frost jacking

假设锥形桩体斜面与竖直面夹角为 α , 并将冻深范围内冻土分为 n 层, 每层高度为 Δh 。假设冻胀率与深度无关, 冻胀一次完成。温度降低同时土体发生冷缩变形, 冻土冻胀系数为 γ , 拉伸膜量为 E 。当温度降低时, 第一层土首先冻结并发生冻胀, 冻胀变形向两个方向发展, 向上冻胀对桩体产生向上作用力 V_1 及水平冻胀对桩体产生水平作用力 H_1 。 V_1 可分解为沿桩体斜面 τ_{12} 和沿斜面法线方向 N_{12} 。 H_1 也可分解为沿桩体斜面 τ_{11} 和沿斜面法线方向 N_{11} 。因此第一层冻土作用于桩体切向冻胀力为 $\tau_1 = \tau_{11} + \tau_{12}$, 压应力为 $N_1 = N_{11} - N_{12}$, 其中 N_{12} 为拉应力, 故 N_{12} 使桩体斜面受到压应力减小。当冻结深度达到第二层时, 第一层冻土不再冻胀, 产生应力不变, 但必须将第二层冻胀对其影响进行叠加。但第一层对第二层冻土向上膨胀产生约束, 假设 V_2 平均作用于两层冻土中, 即作用于第一、二层冻土各为 1/2。同时由于温度的降低, 第一层冻土开始出现冷缩, 使冻土水平冻胀压应力减小,

由于冷缩产生拉应力在斜面法向方向分量为 $E\gamma \sin \alpha$ 。类推, 当冻结深度向下发展到达第 n 层时第一层冻土产生的切向冻胀力 τ_1 和法向应力 N_1 计算公式为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{22} + \tau_{32} + \cdots + \tau_{n2} = \frac{H_1 \cos \alpha}{\Delta h_1} + \\ &\quad \sin \alpha \left(\frac{V_1}{\Delta h_1} + \frac{V_2}{\Delta h_1 + \Delta h_2} + \frac{V_3}{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3} + \cdots + \frac{V_n}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{11} - N_{12} - N_{22} - N_{32} - \cdots - N_{n2} - (n-1)E\gamma \sin \alpha \\ &= \frac{H_1 \sin \alpha}{\Delta h_1} - \cos \alpha \left(\frac{V_1}{\Delta h_1} + \frac{V_2}{\Delta h_1 + \Delta h_2} + \frac{V_3}{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3} + \cdots + \frac{V_n}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i} \right) - (n-1)E\gamma \sin \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

式(1)可知, 每一层冻土产生的切向冻胀力随冻深增加而增大, 但增长速率逐渐变缓。式(2)可知, 由于冻土冷缩产生的拉力分量不断累积, 桩体斜面受到的压应力随冻深增加而逐渐减小。桩土冻结强度随 N_1 不断减小而不断降低, 但锥形柱斜面上切向冻胀力却逐渐增大, 当切向冻胀力大于桩土冻结强度时, 锥形柱便产生冻拔。随温度不断降低、冻深不断向下发展, 此时产生的拉力分量逐渐增大, N_1 便由原来压应力不断减小并最终转换为拉应力。当拉应力大于冻土的极限抗拉强度时便产生裂缝, 导致上层冻土与锥形柱体间出现裂缝, 此时切向冻胀力也相继消失。随着冻结时间增长, 土体内部温度场逐渐趋于稳定, 在土体冻胀产生的水平向冻胀力 H 及竖直向冻胀力 V 的共同作用下, 出现了上述冻胀过程中桩体位移的变化特征。

在各次冻结过程中, 桩周土含水率越大, 桩体冻拔位移较大。桩体的冻拔位移与桩体的锥角成指数函数关系, 锥角越大, 冻拔位移越小。锥角较小时随锥角增大, 冻拔位移迅速衰减, 锥角大于 5° 时, 衰减变缓并逐渐趋于稳定状态。

4 结 论

本文针对锥形柱冻拔病害问题, 开展了一维冻融条件下锥形柱冻拔性能测试, 探究了桩体冻拔特性多因素演变特征, 分析了锥形柱抗拔机理, 提出了合理锥角取值, 得到以下 3 点结论。

(1) 同等条件下, 锥形柱冻拔位移随锥角增大近

似呈指数形式递减; 直柱桩受冻融循环作用影响显著, 随冻融循环次数增大, 冻拔位移增长速率呈半对数形式增长, 而锥形柱受冻融循环次数影响不明显。

(2) 木质桩体由于冻土核的存在, 融化过程中发生融拔现象; 桩周土含水率对桩体冻拔位移的影响弱于锥角。

(3) 桩周土冻深逐渐增大, 作用于桩体表面切向冻胀力逐渐增大、法向冻胀力由压应力逐渐减小并转换为拉应力, 上述两个力分别大于桩土切向冻结强度和极限法向抗拉强度时, 桩体发生冻拔。

(4) 综合考虑抗拔、经济性及冻土保护, 抗冻拔锥形柱锥角宜设计为 $7^\circ \sim 9^\circ$, 但仍需考虑桩深参数。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 杨志浩、岳祖润、赵得杰参与实验设计; 杨志浩、赵得杰、程世奥完成实验操作; 杨志浩、岳祖润、冯怀平、马德良、李同海参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by YANG Zhihao, YUE Zurun, and ZHAO Dejie. The experimental operation was completed by YANG Zhihao, ZHAO Dejie, and CHENG Shiao. The manuscript was drafted and revised by YANG Zhihao, YUE Zurun, FENG Huiping, MA Deliang, and LI Tonghai. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参 考 文 献:

- [1] 许 健, 袁 俊, 管顺清, 等. 多年冻土区锥柱基础抗拔承载性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1): 70-75. (XU Jian, YUAN Jun, GUAN Shunqing, et al. Experimental studies on the uplift bearing capacity of cone-cylindrical foundation in permafrost area[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 70-75. (in Chinese))
- [2] 史向阳, 张 泽, 李东庆, 等. 冻融循环作用下锥柱式桩基础水热及变形动态变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3092-3101. (SHI Xiangyang, ZHANG Ze, LI Dongqing, et al. Study on dynamic change law of hydrothermal and deformation of cone-column pile foundation under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3092-3101. (in Chinese))
- [3] 周亚龙, 王 旭, 蒋代军, 等. 青藏铁路接触网异型桩基抗冻拔模型试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(3):

- 677-684. (ZHOU Yalong, WANG Xu, JIANG Daijun, et al. Experimental of anti-frost jacking model of grotesque pile foundations of overhead contact system mast of Qinghai-Xizang railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, **59**(3): 677-684. (in Chinese))
- [4] 熊维林, 葛洪林, 富海鹰. 考虑非对称冻结的塔杆基础模型实验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, **19**(4): 931-940. (XIONG Weilin, GE Honglin, FU Haiying. Model test study on tower foundation considering asymmetric freezing[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, **19**(4): 931-940. (in Chinese))
- [5] ZHOU Y L, WANG X, NIU F J, et al. Frost jacking characteristics of transmission tower pile foundations with and without thermosyphons in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2021, **35**(2): 04021004.
- [6] SHUA Q Q, LIU K X, LI J K, et al. Time domain nonlinear dynamic analysis of vertically loaded tapered pile in layered soils[J]. Buildings, 2024, **14**(2): 445.
- [7] TRETIKOVA O. Calculation of tangential frost heave stresses based on physical, mechanical and stress-strain behavior of frozen soil[J]. Architecture and Engineering, 2017, **2**(3): 43-51.
- [8] 黄旭斌, 盛煜, 黄龙, 等. 季节冻土区扩底单桩受力性能研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2020, **42**(4): 1220-1228. (HUANG Xubin, SHENG Yu, HUANG Long, et al. Study of mechanical behaviors of pile foundation with enlarged end in seasonally frozen ground regions: progress and review[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, **42**(4): 1220-1228. (in Chinese))
- [9] 王腾飞, 刘建坤, 邵博文, 等. 螺旋桩冻拔特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(6): 1084-1092. (WANG Tengfei, LIU Jiankun, TAI Bowen, et al. Model tests on frost jacking behaviors of helical steel piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(6): 1084-1092. (in Chinese))
- [10] CHURKIN S V, NIKITIN A V, AKSENOV S E, et al. Deformation of building on pile foundation due to frost heave[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, **2**(39): 1420-1423.
- [11] 温智, 俞祁浩, 张建明, 等. 青藏直流输变电工程基础冻结强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2262-2267. (WEN Zhi, YU Qihao, ZHANG Jianming, et al. Experimental study on adfreezing bond strength of interface between silt and foundation of Qinghai-Tibetan transmission line[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2262-2267. (in Chinese))
- [12] 蒋代军, 王旭, 刘德仁, 等. 青藏铁路多年冻土地基输电塔热棒桩基稳定性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊2): 4258-4263. (JIANG Daijun, WANG Xu, LIU Deren, et al. Experimental study on stability of hot rod pile foundation of transmission tower on permafrost foundation of Qinghai-Tibet railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 4258-4263. (in Chinese))
- [13] 史向阳, 张泽, 李东庆, 等. 锥柱式桩基础明挖基坑回填土回冻过程模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, **45**(7): 125-134. (SHI Xiangyang, ZHANG Ze, LI Dongqing, et al. Model test study on refreezing process of backfill in cone-cylindrical pile foundation pit[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, **45**(7): 125-134. (in Chinese))
- [14] ORLOFF B O. Frost Heaving of Soil and Its Effect on Buildings[M]. Leningrad: Leningrad Construction Engineering Press, 1997.
- [15] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2023[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023. (Specification for Soil Test of Railway Engineering: TB 10102—2023[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023. (in Chinese))
- [16] 黄旭斌, 盛煜, 黄龙, 等. 单向冻结条件下扩底桩抗冻拔能力试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(1): 122-131. (HUANG Xubing, SHENG Yu, HUANG Long, et al. Experimental study on the anti-frost jacking ability of belled pile under unidirectional freezing condition[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(1): 122-131. (in Chinese))