

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0101

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. [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.]

季节冻土区扩底单桩受力性能研究进展与展望

黄旭斌^{1,2}, 盛煜¹, 黄龙^{1,2}, 何彬彬^{1,2}, 张玺彦^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在深季节冻土区, 正冻土和桩相互作用时可能会导致桩基的拔断或整体冻拔破坏。在桩周土冻胀过程中, 等截面直桩主要通过桩和未冻区融土间的摩擦力达到锚固效果。而对于端部直径大于桩身直径的扩底桩来说, 当桩基有整体上拔的趋势时, 扩大头会受到上覆土层的阻力而起到锚固/抗冻拔作用。通过回顾国内外研究文献, 介绍了扩底抗拔桩现有的工程背景及应用情况, 并对季节冻土区桩基的受力性能进行了总结和分析, 主要内容包括: 土体冻胀和桩基的相互作用研究, 切向冻胀力试验研究和理论研究, 切向冻胀力作用下扩底桩基冻胀反力试验研究及理论研究, 切向冻胀力作用下未冻区桩-融土间摩擦阻力的研究概况等。最后, 结合现有的研究内容, 对季节冻土区扩底桩的应用及研究提出进一步的展望。

关键词: 季节冻土区; 扩底桩基; 切向冻胀力; 冻胀反力; 摩擦力

中图分类号: P642.14; TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1220-09

0 引言

按照桩的受力情况, 工程中常将桩分为端承桩和摩擦桩。端承桩主要由桩端承载上部的荷载, 而摩擦桩将上部荷载通过桩身和土的接触界面传递至周围土层。为了提高桩的承载性能, 可采用将桩端部扩大的形式来增大与土的接触面积。将这种桩端扩大的桩称为扩底桩, 一般情况下, 扩底桩受到上部建筑物施加的压力而表现出承载性能^[1-3]。然而在很多情况下, 由于工程建筑物经常会受到地震、地下水位上升、风荷载及海平面上升等的作用, 扩底桩将会受到上拔荷载的影响, 因此现有的研究以轴向上拔荷载作用下扩底桩的极限上拔承载性能为主^[4-9]。在上拔力作用下, 当荷载传递至桩端时, 扩大头可通过挤压上覆土层而起到锚固作用^[10], 从而保证了基础的稳定性, 因此扩底桩在上拔荷载作用下是一种可靠的抗拔桩基之一。

随着社会经济的高速发展, 桩基工程的建设范

围已延伸至高寒冻土地区。在多年冻土区和一些深季节冻土区, 桩基由于土体冻胀会产生严重的冻拔破坏^[11], 进而引起的地面建筑物冻害。在工程设计上, 均会考虑基础的冻拔问题^[12-14], 因此如何消减由切向冻胀力引起的桩基冻拔破坏作用已经被很多学者所关注, 现有的工程措施主要有换填桩基周围冻胀敏感性土、结构法、绝缘桩和基土的接触方法以及热棒法^[15-20]。其中扩底桩基是结构法的一种, 因其显著的抗冻拔性能而得到广泛的应用。季节冻土区的扩底桩基础由扩大基础板和桩柱两部分组成, 主要有独立式扩大桩基础、变径桩、锚固环基础及爆扩桩等形式^[20]。根据现场试验资料, 采用扩底桩形式的桩基抗冻拔效果非常显著^[21-24]。

通过回顾国内外研究文献, 主要总结了土体冻胀和桩的相互作用研究、切向冻胀力、冻胀反力及未冻区域桩-融土摩擦阻力等研究情况, 提出了需要进一步解决的问题, 包括对灌注桩冻拔力的研究,

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2020-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(Y711741001); 中国科学院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金项目(Y9510608)资助

作者简介: 黄旭斌(1989-), 男, 甘肃天水人, 2015年在甘肃农业大学获硕士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事岩土及寒区工程研究. E-mail: hxbxmt@lzb.ac.cn

通信作者: 盛煜, 研究员, 从事多年冻土区工程病害机理及防治措施研究. E-mail: sheng@lzb.ac.cn.

考虑桩基冻拔过程中冻胀反力/锚固力及未冻区桩-融土界面摩阻力随着切向冻胀力动态发展而变化, 大直径扩底桩的锚固机理以及不同桩型扩底桩的抗冻拔研究还需进一步的深入。

1 土体冻胀和桩基的相互作用关系

在负温作用下, 桩土接触界面由水膜连接转变为冰膜的胶结/冻结^[25]。当土体中的水分达到起始冻胀含水量时, 土体开始冻胀, 并伴随着冻土以下融土中的液态水向冻结锋面迁移, 加剧了土体的冻胀。在土体冻胀过程中, 由于桩和土自身的性质不同, 桩土界面处的土体冻胀由于桩的存在不能完全冻胀(形成约束冻胀), 且约束冻胀量随着距桩距离的增大而减小, 在距桩一定距离后土体的冻胀为自由冻胀。其主要原因是由于冻胀作用产生的切向冻胀力超过冻结力时, 靠近桩基的土层产生向上位移, 但由于受冻结力的作用, 位移量要比不受此限

制的较远土层小得多^[26]。

在无切向冻胀力时, 由于桩没有上拔的趋势, 桩在上部荷载和自重的作用下桩-土界面的摩阻力方向为垂直向上。只有土体在负温的作用下和桩冻结在一起时, 才能克服桩在自重和上部荷载作用下的沉降, 此时由于桩周土的冻胀, 通过这种胶结作用将冻胀力传递给桩侧面而使得桩发生向上的冻拔位移。当切向冻胀力的大小达到一定程度时, 桩将出现冻拔趋势, 此时摩阻力的方向逐渐转变为垂直向下而起到锚固作用。对于等截面直桩来说[图 1(a)], 桩冻拔的条件为在季节冻土层内形成的切向冻胀力需克服桩和融土间的摩阻力、桩身自重及作用在桩顶的上部荷载。对扩底桩基来说[图 1(b)], 切向冻胀力的作用传递至扩大头时, 桩将出现整体上拔的趋势, 此时扩大头将起到锚固作用, 因此季节冻土层内形成的切向冻胀力还需克服扩大头处的锚固力才能形成冻拔。

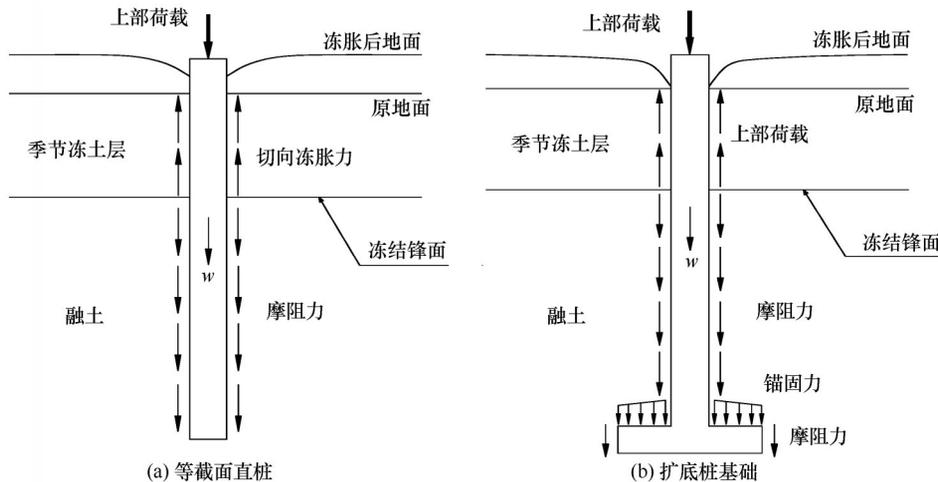


图 1 季节冻土区桩基受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of force analysis of pile in seasonally frozen ground regions: uniform-section pile (a) and pile foundation with enlarged end (b)

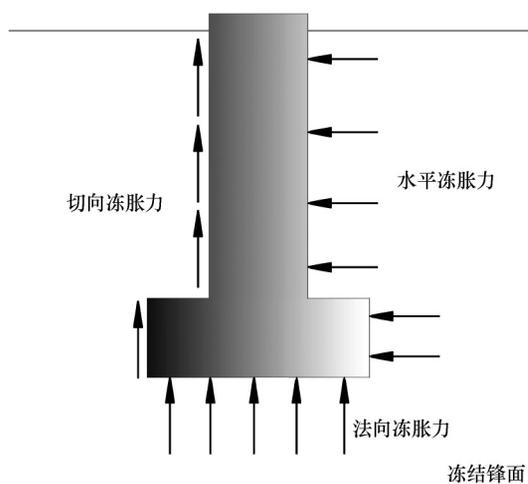
2 切向冻胀力研究现状

在寒区工程建设中, 桩基常会受到土体冻胀施加在桩基上的冻胀力而发生冻拔现象。在工程上, 按照冻胀力和基础的作用方向, 一般将其分为三种类型: 1) 平行于基础表面, 作用在桩身侧面的切向冻胀力; 2) 垂直于冻结锋面, 并直接作用在基础底面的法向冻胀力; 3) 垂直于基础表面或建筑物侧面的水平冻胀力^[27]。如果基础埋深小于季节冻土层/活动层, 基础将受到切向冻胀力和法向冻胀力的双重作用, 加剧桩的冻拔。而在季节冻土区桩基埋深

设计时, 桩的埋深一般均大于设计冻深^[28], 因此造成桩冻拔的主要力是作用在平行于桩身向上的切向冻胀力(图 2)。

2.1 切向冻胀力的试验研究

切向冻胀力的试验研究可分为现场试验和室内模型试验。早在 20 世纪 20 年代初, 苏联学者就观察到了桥梁基础的冻拔现象, 并对冻拔力进行了监测研究。Saltykov^[30]通过室内冻土中桩基冻拔模型试验, 描述了桩侧土的冻胀变形, 并计算了作用在桩身上的冻拔力。Penner 等^[31]通过现场桩基冻拔

图2 基础表面冻胀力示意图^[29]Fig. 2 Schematic diagram of frost heave forces on surfaces of foundations^[29]

试验,连续两年监测了Leda黏土中桩基冻拔力,并建议在无其他资料的情况下可以用Dalmotov公式预测桩受到的最大冻拔力。随后, Penner^[32]通过现场监测试验,对不同形式和尺寸的桩和砖砌混凝土墙进行了单位冻拔力的研究,结果表明作用在小尺寸结构上的单位冻拔力要大于作用在大尺寸上的单位冻拔力。Jonson等^[33]对作用在H型钢桩和管桩上的冻拔力和剪切力进行了连续三年的现场试验观测,试验结果表明作用在H型钢桩上的冻拔力和最大剪切力均大于作用在管桩上相应的力值。周长庆^[34]通过现场桩基试验,对黏土切向冻胀力进行了研究,根据切向冻胀力的发展与地温及冻深的关系,将切向冻胀力的发展分为三个阶段:第一阶段为增长阶段,此阶段随着地温的降低和冻深的发展,切向冻胀力呈显著增长趋势;第二阶段为缓增阶段,其特征是地表处土温度开始回升,冻深尚在继续发展,切向冻胀力增长缓慢;第三阶段地表温度继续回升,冻深达最大值并稳定一段时间后开始回升,切向冻胀力达极值后下跌。丁靖康^[35]通过现场试验研究发现,细颗粒土在冻结前期,切向冻胀力的发展是随着冻深的增大而增大的,在某一冻深下达到峰值;在冻结后期,切向冻胀力随冻深的基础增大而略有减小。而粗颗粒土在整个冻结过程中切向冻胀力随冻深的增大呈增大趋势,且在冻结后期发展快,当冻深达到最大时,切向冻胀力也达到最大值。童长江^[36]通过现场试验发现,切向冻胀力在整个过程中沿基础是变化的,其主冻胀力随着冻结深度的增加而变化,达到2/3时会逐渐降低,

并对不同土质条件下基础冻胀力进行了研究,结果表明冻结时土质对基础产生的冻胀力大小依次为亚砂土、亚黏土、砾石土、中砂和粗砂。孙玉良^[37]根据两处现场试验数据得到了切向冻胀力的发展过程,表明切向冻胀力在冻结初期发展几乎呈直线上升趋势,冻结中期总切向冻拔力继续上升,并能达到最大值,冻结后期随着冻深,冻胀速率的放缓,切向冻胀力逐渐下降直至消失。张玉富等^[38]根据多年现场试验观测资料,提出了切向冻胀力与土的冻胀性最佳曲线模型,并依据该模型推荐切向冻胀力。

一般来说,现场试验所花费的时间较长,需要更多的人力和物力,但得到的数据较为可靠,更加符合工程实际情况。相对于现场试验研究,室内试验研究花费的时间、人力和物力更少,且试验的针对性较强。Penner等^[39]对易冻胀土中小尺寸不同材料的模型桩基和混凝土墙体进行了冻拔力的监测和研究,表明作用在钢桩和混凝土桩上的冻拔力最大,最小的是木桩,混凝土墙体周围土体的冻胀形式和作用在墙体上的冻拔力均与单桩的不同。Domaschu^[40]对作用在水平、垂直和倾斜物体上的冻胀力大型模型试验,试验结果表明,冻结速率在 $4\sim 70\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时的最大冻胀力在 $150\sim 350\text{ kPa}$ 范围内,且冻结速率最小时,得到的冻胀力最大。邵钦林等^[16]对基侧填砂来防控切向冻胀力的方法进行了试验研究,研究表明这一方法仅适用于地下水位以上的基础。袁俊等^[41]通过1:10比例的直柱基础模型试验,对比测定了不同地温和不同含水率的粉质黏土中普通基础与玻璃钢套筒基础的单位切向冻胀力,研究了玻璃钢套筒在不同粉质黏土地质环境中对切向冻胀力的消减作用效率。王腾飞等^[42]对季节冻土区螺旋桩进行了冻拔模型试验,结果表明,在限定桩竖向位移条件下,轴向上拔力与冻深之间存在指数关系。闫晓建^[43]对季节冻土区冻拔作用下锥形桩基础的稳定性进行研究,研究表明锥角达到 7° 时为锥形桩基础利用自身桩体型式发挥防止切向冻胀力优势的最优锥角。戴武奎等^[44]利用室内模型相似试验,得出了黏性土地区桩锚基坑冻胀的力学变形规律。陆建飞等^[45]对单向正冻土和桩的相互作用进行了模拟试验,试验表明不同冻结温度的桩周摩阻力沿桩身变化趋势类似,即摩阻力呈现正、负交替分布的状态。

2.2 切向冻胀力的理论研究

埋置于冻土中的桩会约束桩周土的冻胀, 从而使桩周土的冻胀形成“漏斗”形状, 因此很多学者根据这一现象对桩受到的切向冻胀力进行了研究。起初, Penner^[32]利用 Linell 和 Kaplar 公式(式 1), 对桩周基土影响范围内的土体冻胀率进行分析, 预算了桩受到总的冻拔力的大小。周有才^[47]利用基础约束范围内冻胀减少体积与冻胀地基系数的关系, 简化了上述公式的计算过程, 计算了基础受到的冻胀力。

$$\eta = \eta_0 e^{aP} \quad (1)$$

式中: η 为在压力 P 作用下的冻胀率; P 为作用的压力; a 为根据土壤类型不同给出的常数(负值); η_0 为基础影响范围之外的地面自由冻胀率。

李洪升等^[48]利用叠加法力学模型, 采用弹性理论求解了基础对冻土层的约束冻胀量, 对于集中力 P 作用:

$$\eta = \frac{2P(1-\mu^2)}{\pi E} \ln \frac{s}{r} \quad (2)$$

对于分布力强度为 q 时, 则有:

$$\eta = \frac{(1-\mu^2)q}{\pi E} (C + F_R) \quad (3)$$

其中: $C = 2(\ln \frac{s}{r} + \ln 2 + 1)$, $F_R = -$

$$2 \frac{x}{c} \ln \left[\frac{2 \frac{x}{c} + 1}{2 \frac{x}{c} - 1} \right] - \ln \left(4 \frac{x^2}{c^2} - 1 \right)$$

式中: η 为约束冻胀量; μ 、 E 分别为冻土泊松比和弹性模量; s 为大于有效影响范围的距离。

根据上述公式, 可用试验条件下测得桩侧土体的约束冻胀量来反推处作用在桩上的冻拔力大小。赖远明等^[49]依据利用叠加原理和弹性半空间的 Mindlin 公式, 推导出了切向冻胀力的理论解。何菲等^[50]从桩基冻胀力与桩侧土体冻胀位移的关系出发, 引入经典黏弹性力学理论及 Mindlin 半空间作用集中力的弹性解, 从理论上导出了桩基冻胀力三维黏弹性问题的积分方程表达式。Dalai^[51]通过解析的方法给出了方形桩受到的切向冻胀力进行了解析方法的推导。刘鸿绪^[52]认为土与基侧表面冻结在一起产生冻结强度, 随着土的冻胀, 内力进行着重分布, 即冻结力逐渐取代摩阻力而重分布的结果, 双层地基的应力成分逐渐并最后完全取代单层地基的, 因此季节冻土区桩身受到的切向冻胀力应按照双层地基法来计算。Ladanyi 等^[53]

从环境温度、冻深及冻胀率等关系出发, 引入冻土流变学理论, 推导出了桩-冻土界面切向冻胀力的理论公式:

$$\tau_{ai} = \tau_{c, \theta_i} [(n-1)/\gamma'_c]^{1/n} (s'_i(t)/a)^{1/n} \quad (4)$$

式中: a 为桩半径; n 为冻土流变指数; γ'_c 为冻土剪切应变率; τ_{c, θ_i} 为剪切流变模量。

对于其他对切向冻胀力的计算是通过经验公式得来的, 例如在文献[46]中介绍的 Vialov 经验公式(式 5)和 Dalmatov 经验公式(式 6):

$$\tau = \tau_0 + a \sqrt{|t|} \quad (5)$$

式中: τ 为切向冻胀力; τ_0 为给定温度下的冻结强度; a 为和土体类型及含水量有关的系数; t 为温度。

$$T = \mu h_a (c - 0.5bt_s) \quad (6)$$

式中: T 为总切向冻胀力; μ 为桩和土接触的周长; h_a 为冻土层厚度; t_s 为土表层温度; b 、 c 为相关系数。

除此之外, 吴亚平等^[54]考虑应力场、温度场、水份场三场耦合条件, 建立了冻土区桩土共同作用的黏弹塑性非线性有限元分析计算模式, 揭示和研究了冻结过程中桩土间切向冻胀应力场、冻结应力场及位移场的随时间变化过程。Lu 等^[55]将改进的“虚拟桩”方法应用到桩基的冻拔中, 并得到饱和冻土的简化模型, 简化冻土模型为基础, 利用各向同性层状饱和土的圆形载荷建立了层状冻土与单桩相互作用问题的第二类 Fredholm 积分方程, 得到了冻拔作用下单桩的桩身轴力, 切向冻胀力和桩身位移等。

3 扩底桩基础锚固性能研究

在季节冻土区, 土体冻结时会伴随着未冻结区域水分向冻结区域迁移, 下部未冻土层因含水量的降低而发生固结作用, 当土中水的体积膨胀足以引起土颗粒的相对位移时就形成了冻结时土体的体积膨胀, 称为土的冻胀^[56]。在土体发生冻胀的同时, 会对下部土层产生向下的力^[57]。当扩大式桩基处于季节冻土中时, 位于桩下部的扩展板会接收这部分向下的力(冻胀反力)而达到自锚作用。对于冻胀反力出现的位置, 隋咸志^[58]认为在冻结锋面以下, 在基础约束范围内, 由土体的冻胀而产生于非冻土中的附加应力; 冻胀力与冻胀反力是大小相等方向相反的一对平衡力系。刘鸿绪^[59]认为的冻胀反力不应该出现在冻结锋面处, 而是出现在桩基侧

面处,和切向冻胀力不是平衡力系,虽处于同一作用点,且作用方向相反,但作用于不同的两种材料上。

3.1 扩底桩基试验研究

Saltykov^[30]假设锚固结构和土体是一种完全被约束体,除非在界面处产生挫裂,认为结构和土体之间是不会发生相对位移的。Penner等^[31]对锚固的柱状基础进行了冻胀试验,结果发现锚固的柱状基础并没有明显的消减周围土体的冻胀量。隋咸志^[60]分别以几何比尺为1:4和1:2的模型试验及原型试验,通过扩大式桩基础扩展板处置放土压力盒或水带式土压力计的方式研究了冻胀反力,试验结果表明,冻胀反力沿着扩展板的向外的分布是不均匀的,即靠近桩身侧的冻胀反力越大,距离桩身越远,则冻胀反力越小,并且他认为冻胀反力和切向冻胀力是同时产生,随着冻胀力的增大而增大,且随着冻胀力的消散而减小的。

3.2 扩底桩基理论研究

隋咸志^[58]利用Boussinesq公式的原理,假设在半空间弹性体边界上作用有切向冻胀力合力 $\Sigma\tau$ 时,半空间体内任一深度 h 处的竖向附加应力 P 即可用以下方程求得:

$$P = \frac{3 \sum \tau h^3}{2\pi r_i^5} \quad (7)$$

式中: h 为冻结深度; r_i 为作用力到扩展板上部任意一点的半径。

通过以上公式可求得扩展板处不同位置的冻胀反力。Dokuchaev等^[61]则分别假设作用在桩侧的切向冻胀力沿深度的变化为线性形式及抛物线形式,利用Mindlin公式,求得了距离桩轴不同距离处扩展板上的附加法向应力:

$$Q = 0.5\pi\tau_i U \sum_{i=1}^{i=n-1} \left(\frac{\beta_i}{x_i} + \frac{\beta_{i+1}}{x_{i+1}} \right) (x_{i+1}^2 - x_i^2) \quad (8)$$

式中: τ_i 为切向冻胀力; U 为桩-冻土接触面积; β 为假定系数; x 为扩展板处距离桩轴的距离。

俄罗斯冻土学家Solov'Ev等^[62]对季节冻土区的锚桩进行了理论的推导,考虑了桩端压力和扩大头处的土压力,计算了扩大式桩基础的抵抗冻胀的能力。石胡兆^[63]对比分析了国内外已有的冻胀反力计算理论,通过MATLAB编程运算得到各类工况下扩大式桩基础冻胀反力的计算结果和对比分析结果,给出了在不同活动层深度下和基础宽深比变化时冻胀反力计算的合理化建议。

4 切向冻胀力作用下桩-融土摩阻力研究进展

冬季,随着桩侧土体开始冻结,桩-冻土由于冰晶的作用而胶结在一起,当土体开始冻胀时,冻胀作用在桩上形成垂直向上的切向冻胀力,一方面当土体的冻结强度大于桩体自重和受到的上部荷载时,随着桩-冻土界面的切向冻胀力的增大,桩体会从平衡状态逐渐形成上拔的趋势,此时桩侧摩阻力的方向会由无冻拔状态下的向上发展至冻拔状态下方向向下;另一方面随着冻土层的逐渐变厚,桩与融土的接触面积则减少,桩受到的总的摩阻力会减小。

盛洪飞^[64]分析了冻拔时融土中桩土作用机理与摩阻力分布规律,发现与轴向受压桩类似,从而提出了应按轴向受压桩的摩阻力值进行基桩抗冻拔验算的观点。刘鸿绪^[59]认为桩在进行抗冻拔验算时桩在融土中是受压状态而不是受拉状态,计算摩阻力时不必折减。隋超等^[65]在分析冻拔时桩基的受力问题时,认为桩开始冻拔抬起产生向上的位移的趋势和移动,下部融土中的原为向上的摩阻力减小,直至总切向冻胀力和竖向荷载及桩自重合力等于零时,摩阻力减小到零,总的切向冻胀力继续增大,则摩阻力的方向变为向下。桩基在冻胀作用下融土部分受到摩阻力的大小还需试验来确定,在此基础上,国内一些专家对冻土区的钻孔灌注桩进行了极限抗拔摩阻力值的试验^[66-67],确定了钻孔灌注桩在冻拔时融土部分的极限抗拔摩阻力值。当埋置于季冻区的桩换做是扩大式桩基础或者扩底桩时,随着切向冻胀力的增大和冻结深度的加深,在某一冻深处,当融土层的摩阻力的作用全部发挥时,切向冻胀力的作用会传递至扩展板或者扩大头处,此时由于扩大头处自锚的作用,摩阻力的变化受到的影响因素也变得相对复杂,值得深入研究。

5 结论与展望

随着寒区工程的增多,基础建设的要求也越来越严格,对季节冻土区桩基的稳定性的关注也越来越多。本文介绍了桩-冻土相互的作用,扩底桩基受到切向冻胀力作用时的受力分析,进而对切向冻胀力的试验研究、理论研究等进行总结,以及就扩底桩基冻胀反力和切向冻胀力作用时桩和融土间摩阻力进行了文献综述研究,对扩底桩今后在季节冻土区的应用及研究进行展望。

(1) 关于切向冻胀力的试验及理论方面的研究较为充分, 但对于灌注桩冻结强度、桩土相互作用时切向冻胀力的测量, 包括现场试验及室内模型试验的研究不够充分, 加强对灌注桩的现场及室内试验尤为重要。

(2) 对于桩基在季节冻土区的研究, 单独的对作用在桩-冻土界面的切向冻胀、扩大头的冻胀反力及桩-融土间的摩阻力均有较为深入的研究, 但就整个冻结过程中切向冻胀力、引起的扩大头锚固力及桩-融土界面的摩阻力的动态变化过程研究不够充分, 仍需进一步的研究。

(3) 扩底桩在非冻土区的应用较为广泛, 但在季节冻土区扩底桩的应用及研究均还处于起步阶段, 在冻拔作用下的研究还不足。今后对扩底桩在季节冻土区的研究需借鉴非冻土区扩底桩抗拔研究方法, 并结合土体的冻胀特性进行研究。

(4) 对于短桩基础来说, 冻胀反力可能会作用在扩展板或扩大头上以起到锚固作用, 但对于大直径长桩基础来说, 冻结过程中冻胀反力随着桩的埋深增大而消散在基土中。对于扩底桩来说, 冻拔作用下其锚固机理的研究仍需更进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Gao Guangyun, Jiang Jianping, Gu Baohe. Comparative study on belled and equal-diameter piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 502 - 506. [高广运, 蒋建平, 顾宝和. 同场地扩底桩和直桩的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 502 - 506.]
- [2] Huang Guanglong, Hui Gang, Mei Guoxiong. Comparative experiment study on pedestal piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1922 - 1926. [黄广龙, 惠刚, 梅国雄. 钻孔扩底桩原型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1922 - 1926.]
- [3] Wen Songlin. A discussion on pile-tip bearing mechanism of pedestal pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1970 - 1974. [文松霖. 扩底桩桩端承载机制初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1970 - 1974.]
- [4] Chae D, Cho W, Na H Y. Uplift capacity of belled pile in weathered sandstones[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 2012, 22(4): 297 - 305.
- [5] Nazir R, Moayedi H, Pratikso A, et al. The uplift load capacity of an enlarged base pier embedded in dry sand[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 1 - 12.
- [6] Niroumand H, Kassim K A, Ghafooripour A, et al. Uplift capacity of enlarged base piles in sand[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17: 2721 - 2737.
- [7] Gaaver K E. Uplift capacity of single piles and pile groups embedded in cohesionless soil[J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(3): 365 - 372.
- [8] Kong Linggang, Zhang Geqiang, Chen Renpeng, et al. The influence of water content on uplift ultimate capacity of enlarged base piles in unsaturated silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl 2): 3755 - 3762. [孔令刚, 张革强, 陈仁朋, 等. 土体含水量对扩底桩上拔承载力影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3755 - 3762.]
- [9] Liu Wenbai, Zhou Jian. Prototype tests and particle flow numerical simulation of under-reamed piles on uplift loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Suppl 2): 201 - 206. [刘文白, 周健. 扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 201 - 206.]
- [10] Wang Zhongwei, Gaoyabing. The mechanism analysis of load transfer of pedestal piles[J]. Housing Science, 1998(9): 3 - 6. [汪中卫, 高彦兵. 扩底桩的荷载传递机理分析[J]. 住宅科技, 1998(9): 3 - 6.]
- [11] Yang Jiabin, Liu Zuoshi, Wang Xiuli, et al. Frost damage and prevention of bridge and culvert foundation[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 1996(3): 32 - 37. [杨佳新, 刘柞氏, 王秀丽, 等. 桥涵基础的冻害与防治[J]. 黑龙江水利科技, 1996(3): 32 - 37.]
- [12] Bakholdin B V, Kolesnikov L I, Shikalovich N S. Effect of frost-heave forces of soils on the bearing capacity of pyramidal piles[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989, 26(6): 243 - 248.
- [13] Lyazgin A L, Lyashenko V S, Ostroborodov S V, et al. Experience in the prevention of frost heave of pile foundations of transmission towers under northern conditions[J]. Power Technology and Engineering, 2004, 38(2): 124 - 126.
- [14] Khanin R E. Consideration of frost-heaving forces in designing pile foundations for cellular communications towers[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010, 47(1): 12 - 19.
- [15] Sui Tieling, Na Wenjie. Prevention of pile foundation from frost heave by double layer oil pipe[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985, 36(11): 42 - 45. [隋铁龄, 那文杰. 利用双层油套管防治桩基冻拔[J]. 水利水电技术, 1985, 36(11): 42 - 45.]
- [16] Shao Qinlin, Liu Hongxu. Experimental study on anti-tangential frost heave force of sand filling at side of foundation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 1995, 17(2): 33 - 34. [邵钦林, 刘鸿绪. 基侧填砂防切向冻胀力的试验[J]. 低温建筑技术, 1995, 17(2): 33 - 34.]
- [17] Wang Lisheng, Zhang Yunfang, Liu Hongxu. Stress analysis of anti-tangential frost heave force of inclined foundation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 1995, 17(3): 30 - 32. [王力生, 张云芳, 刘鸿绪. 斜面基础防切向冻胀力的受力分析[J]. 低温建筑技术, 1995, 17(3): 30 - 32.]
- [18] Olga T. Reduction in tangential frost heaving forces by the pile geometry change[J]. Architecture and Engineering, 2017, 2(1): 61 - 68.
- [19] Lyazgin A L, Bayasan R M, Chisnik S A, et al. Stabilization of pile foundations subjected to frost heave and in thawing permafrost[C]//Proc. of 8th Intern. Conf. on Permafrost, Zurich, Switzerland. 2003, 2: 707 - 711.
- [20] Kondrat'Ev V G. Strengthening of supports for contact systems and overhead transmission lines erected on heaving seasonally thawing soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2004, 41(5): 185 - 190.
- [21] Na Wenjie, Yuan Anli. Prevention technology of pile foundation freezing in alpine region[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 124 - 125. [那文杰, 袁安丽. 高寒地区桩基冻拔的防治技术[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 124 - 125.]
- [22] Wang Xiaoli. Research on the anti-pull forces of the pedestal

- pile in permafrost regions[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2005, 2(6): 88 - 91. [王晓黎. 多年冻土区钻孔扩底桩抗拔力研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2005, 2(6): 88 - 91.]
- [23] Sun Xuexian, Zhang Hui, Tian Ming. Experimental study on vertical pullout capacity of cast-in-site pile in permafrost region [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(10): 2110 - 2114. [孙学先, 张慧, 田明. 多年冻土区灌注桩竖向抗拔承载力试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(10): 2110 - 2114.]
- [24] Huang Junheng, Xu Zhenghai, Ge Huanyou, et al. Frost-action design and applications of enlarged type pile foundation bridge in waterlogged area of Songyong[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(2): 387 - 393. [黄骏衡, 许正海, 葛焕友, 等. 松永涝区扩大式桩基桥抗冻设计与应用[J]. *冰川冻土*, 1993, 15(2): 387 - 393.]
- [25] Jiang Daijun. Study on pile-soil interface property and vertical bearing behavior of pile foundation in permafrost [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. [蒋代军. 多年冻土地基桩土界面特性及桩基竖向承载性状研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.]
- [26] Zhou Changqing. Discussion on the mechanism of normal frost heaving force [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(2): 31 - 36. [周长庆. 法向冻胀力作用机制探讨[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(2): 31 - 36.]
- [27] Dai Huimin, Tian Deteng, Yong Zhicheng. Study on tangential frost heave force of reinforced concrete pile on highway bridge [J]. *Highway*, 1986(10): 16 - 25. [戴惠民, 田德廷, 雍致盛. 公路桥梁钢筋混凝土桩切向冻胀力的研究[J]. *公路*, 1986(10): 16 - 25.]
- [28] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region, JGJ 118 - 2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. [中华人民共和国住房和城乡建设. 冻土地区建筑地基基础设计规范 JGJ 118 - 2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.]
- [29] Zhang Xiyan, Sheng Yu, Huang Long, et al. Research status and prospect in tangential heave force [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 865 - 877. [张玺彦, 盛煜, 黄龙, 等. 切向冻胀力的研究现状及展望[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 865 - 877.]
- [30] Saltykov N I. Calculating frost-heaving forces on foundations [R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH, 1945.
- [31] Penner E, Irwin W W. Adfreezing of Leda clay to anchored footing columns [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1969, 6(3): 327 - 337.
- [32] Penner E. Uplift forces on foundations in frost heaving soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1974, 11(3): 323 - 338.
- [33] Johnson J B, Buska J S. Measurement of frost heave forces on H-piles and pipe piles, CRREL Report 88 - 21 [R]. Hanover, NH: CRREL, 1988.
- [34] Zhou Changqing. Experimental study of the tangential frost-heave forces of the clay [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 1979, 1(1): 5 - 14. [周长庆. 黏土切向冻胀力的试验研究[J]. *低温建筑技术*, 1979, 1(1): 5 - 14.]
- [35] Ding Jingkang. Field test of tangential frost heaving force [C]// Proceeding of the Second National Permafrost Academic Conference. Lanzhou: Gansu People's Publishing House, 1983: 251 - 256. [丁靖康. 切向冻胀力的野外试验研究[C]//第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 251 - 256.]
- [36] Tong Changjiang. Frost heaving forces of the foundation [C]// Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, eds. Proceeding of Glaciology and Geocryology, the Geographical Society of China. Beijing: Science Press, 1982: 113 - 119. [童长江. 基础的冻胀力[C]//中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑. 中国地理学会冰川冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1982: 113 - 119.]
- [37] Sun Yuliang. Friction resistance and frost heaving forces of reinforced concrete pile [C]//Proceeding of the Fourth Chinese Conference on Glaciology and Geocryology. Beijing: Science Press, 1989: 114 - 118. [孙玉良. 钢筋混凝土桩的切向冻胀力和摩阻力[C]//第四届全国冰川冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1989: 114 - 118.]
- [38] Zhang Yufu, Shan Wei, Liu Junzhe. Relation between tangential frost-heave forces and characteristics of frost-heave for seasonal frost soils [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2004, 26(5): 70 - 71. [张玉富, 单炜, 柳俊哲. 季节性冻土切向冻胀力与冻胀性关系[J]. *低温建筑技术*, 2004, 26(5): 70 - 71.]
- [39] Penner E, Gold L W. Transfer of heaving forces by adfreezing to columns and foundation walls in frost-susceptible soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1971, 8(4): 514 - 526.
- [40] Domaschuk L. Frost heave forces on embedded structural units [C]//Proceeding of 4th Canadian Permafrost Conference. NRC, 1982: 489 - 496.
- [41] Yuan Jun, Yu Haolin, Guan Shunqing, et al. Study on reduction of tangential frost-heave force on foundation with fiberglass sleeve [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 48(2): 202 - 206. [袁俊, 于皓琳, 管顺清, 等. 玻璃钢套筒基础切向冻胀力消减作用试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 48(2): 202 - 206.]
- [42] Wang Tengfei, Liu Jiankun, Tai Bowen, et al. Model experiment on frost jacking behaviors of helical steel pile [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(6): 1084 - 1092. [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.]
- [43] Yan Xiaojian. Experiment study on tangential frost heave force of anti-heave pile in seasonal frozen regions [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017. [闫晓建. 季节性冻土区抗冻拔桩体切向冻胀力试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.]
- [44] Dai Wukui, Liang Li, Xin Quanming. Frost heaving model test and response analysis of pile-anchor foundation pit in cohesive soil area [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(12): 1785 - 1789. [戴武奎, 梁力, 辛全明. 黏性土桩锚基坑冻胀模型试验及其响应分析[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2017, 38(12): 1785 - 1789.]
- [45] Lu Jianfei, Shuai Jun, Liu Jinxin. Experimental study on the interaction between pile and soil during the unidirectional freezing [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Nature science)*, 2017, 36(11): 56 - 60. [陆建飞, 帅军, 刘鑫. 单向冻结过程中桩土相互作用试验研究[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2017, 36(11): 56 - 60.]
- [46] Penner E, Irwin W W. Adfreezing of Leda clay to anchored footing columns [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1969, 6(3): 327 - 337.
- [47] Zhou Youcai. Calculation of frost heave force based on heave deformation in the scope restrained by foundation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(4): 335 - 346. [周有才. 按基础约束范围内冻胀变形计算冻胀力[J]. *冰川冻*

- 土, 1985, 7(4): 335 - 346.]
- [48] Li Hongsheng, Liu Zengli, Yang Haitian. A calculation model and analysis of frost heave deformation for foundation soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(Suppl 1): 89 - 95. [李洪升, 刘增利, 杨海天. 地基土冻胀位移分析及计算模式[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(增刊1): 89 - 95.]
- [49] Lai Yuanming, Zhu Yuanlin, Wu Ziwang. A simple integral equation method for three-dimensional frost heaving force problem of piles [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1998, 20(6): 94 - 98. [赖远明, 朱元林, 吴紫汪. 桩基冻胀力三维问题的积分方程解法[J]. *铁道学报*, 1998, 20(6): 94 - 98.]
- [50] He Fei, Wang Xu, Jiang Daijun, et al. Research on three-dimensional viscoelastic frost heaving force problem of pile foundation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2510 - 2516. [何菲, 王旭, 蒋代军, 等. 桩基冻胀力的三维黏弹性问题研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(9): 2510 - 2516.]
- [51] Dalai D. Theoretical analysis on distribution of tangential forces of frost heaving over foundation surface [C]//Strategic Technology (IFOST), 8th International Forum on. IEEE, 2013, 1: 598 - 601.
- [52] Liu Hongxu. The calculation of frost heaving force of foundation in seasonally frozen ground regions [J]. *Low Temperature Architecture Technology*. 1983, 5(1): 41 - 46. [刘鸿绪. 季节冻土地基冻胀力的计算[J]. *低温建筑技术*, 1983, 5(1): 41 - 46.]
- [53] Ladanyi B, Foriero A. Evolution of frost heaving stresses acting on a pile [C]//Proceedings of Seventh International Conference Permafrost. Yellowknife (Canada), Collection Nordicana. 1998, 55: 623 - 633.
- [54] Wu Yaping, Zhu Yuanlin, Guo Chunxiang, et al. Multi-field coupling analysis model and application of pile Foundation in cold region [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, 35(4): 378 - 385. [吴亚平, 朱元林, 郭春香, 等. 寒区桩基础的多场耦合分析模型及其应用[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2005, 35(4): 378 - 385.]
- [55] Lu J F, Yin J, Shuai J. A model for predicting the frost-heave effect of a pile embedded in the frozen soil [J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2017: S0165-232X(17)30078-2.
- [56] Qiu Guoqing, Liu Jingren, Liu Hongxu. *Geocryological glossary* [M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1994. [邱国庆, 刘经仁, 刘鸿绪. *冻土学辞典*[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1994.]
- [57] Takashi T. On the stress and displacement in unfrozen soil zone around artificial frozen soil [C]//Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. Japan Society of Civil Engineers, 1972, 1972(200): 49 - 62.
- [58] Sui Xianzhi. Calculating the counter-force of heaving in the foundation of piles in seasonally frozen regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(3): 213 - 220. [隋咸志. 季节冻土区扩大式基础上冻胀反力的计算[J]. *冰川冻土*, 1985, 7(3): 213 - 220.]
- [59] Liu Hongxu. The discussion of several problems of the frost heaving force in process of adfreezing of the soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(3): 269 - 280. [刘鸿绪. 对土冻结过程中若干冻胀力学问题的商榷[J]. *冰川冻土*, 1990, 12(3): 269 - 280.]
- [60] Sui Xianzhi, Zuo Li. The Experimental research of dilatational counter-force [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(2): 19 - 29. [隋咸志, 左力. 冻胀反力的试验研究[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(2): 19 - 29.]
- [61] Dokuchaev V V, Gerasimov A S. Anchoring capacity of column foundations subjected to tangential forces induced by the frost heaving of soils [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1987, 24(6): 252 - 257.
- [62] Solov'ev Y I, Puskov V I. Design of foundations, anchored in unfrozen ground, to resist heaving forces [R]. Technical Translation National Research Council Canada, 1970.
- [63] Shi Huzhao. Comparative analysis of various kinds of standards for design of foundation in frozen soil region [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. [石胡兆. 冻土地质条件下各类基础设计规范对比分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.]
- [64] Sheng Hongfei. The friction drag analysis in checking the ability of resisting frost heaving upswell of foundation pile [J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1984, 17(3): 117 - 124. [盛洪飞. 基桩抗冻拔验算中有关摩阻力的分析计算[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1984, 17(3): 117 - 124.]
- [65] Sui Chao, Liu Qi, Zheng Hong, et al. The problem of counter-force of frost heave and anchored of the foundation in the role of the tangential frost heaving force [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 1997, 19(2): 39 - 40. [隋超, 刘琪, 郑虹, 等. 切向冻胀力作用下基础锚固并兼评“冻胀反力”问题[J]. *低温建筑技术*, 1997, 19(2): 39 - 40.]
- [66] Liu Yingchun, Yang Baisong. Study on the experiment for upward frictional resistance pressure of cast-in-drill hole pile [J]. *Jilin Water Resources*, 2003(2): 8 - 10. [刘迎春, 杨柏松. 钻孔灌注桩抗冻拔摩阻力试验研究[J]. *吉林水利*, 2003(2): 8 - 10.]
- [67] Yu Shengqing, Lu Xingliang, Xu Boyu. The resistance frost jacking design of the cast-in-place pile foundation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1993, 34(2): 18 - 21. [于生清, 卢兴良, 徐伯孟. 灌注桩基础的抗冻拔设计[J]. *水利水电技术*, 1993, 34(2): 18 - 21.]

Study of mechanical behaviors of pile foundation with enlarged end in seasonally frozen ground regions : progress and review

HUANG Xubin^{1,2}, SHENG Yu¹, HUANG Long^{1,2}, HE Binbin^{1,2}, ZHANG Xiyan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In deep seasonally frozen ground regions, the interaction between freezing soil and pile may cause frost jacking or failure of pile. In the process of frost heave of soil surrounding the pile, the anchoring effect is mainly carried out through the frictional resistance of pile-thawing soil interface for a uniform-section pile. However, for a pile with enlarged end, whose base diameter is larger than its shaft diameter, will be subjected to the resistance of the overlying soil and play a role of anchoring or anti-frost jacking characteristic when the pile is tend to be pull up. By reviewing the domestic and foreign research literature, the paper briefly introduces the existing engineering background and application of the pile with enlarged end, and summarizes and analyses the mechanical properties of the pile foundation in the deep seasonally frozen ground regions. The main contents include the interaction between frost heave of soil and pile foundation, the experimental and theoretical research on tangential frost heave force, and the experimental and theoretical research on counter-frost heave force of pile foundation with enlarged end, and frictional resistance between pile and thawed soil under the action of tangential frost heave force, etc. In the end, the application and research of the pile foundation with enlarged end in the seasonal frozen ground regions are further prospected.

Key words: seasonally frozen ground regions; pile foundation with enlarged end; tangential frost heaving force; counter-frost heave force; friction resistance

(责任编辑: 齐吉琳; 编辑: 周成林)