

深基坑冻结止水帷幕冻胀变形模拟分析与试验测试

黄建华^{1, 2}

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 福建工程学院 土木工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 通过对深基坑冻结止水帷幕工程冻胀特性的模拟分析, 考虑初始应力场平衡及其与温度场、应变场等的耦合分析, 结合试验与测试分析成果验证, 系统研究冻结止水帷幕的冻胀变形特征、冻胀特性与冻土性质和约束条件的关系以及卸压槽的卸荷作用机制与变形控制效果等, 为今后深基坑围护冻结止水技术的合理设计、安全施工和推广应用提供理论基础。

关键词: 土力学; 深基坑; 冻结止水帷幕; 冻胀变形; 冻胀力; 模拟分析

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)12-2554-07

SIMULATION ANALYSIS AND EXPERIMENTAL TEST ON FROST DEFORMATION OF FREEZING WATERPROOF CURTAIN IN DEEP FOUNDATION PIT

HUANG Jianhua^{1, 2}

(1. *Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350007, China*)

Abstract: From the process of frost heaving behaviors of deep foundation pit, the studies including nonlinear finite element simulation analysis, model experiment and in-situ test while considering the balance of initial ground stress and its thermo-mechanical coupling analysis are given. The frozen mechanics and deformation of waterproof curtain including frozen heaving features and its relationships with freezing soil properties and constraint conditions are presented. Also, the unloading mechanism and deformation-reducing effects of stress relief slot in deep foundation pit of soft soil are proposed. Research achievements from calculation analysis of practical projects may provide theoretical basis for reasonable design and safe construction of similar projects in the future dense popularization regions.

Key words: soil mechanics; deep foundation pit; freezing waterproof curtain; frost deformation; frost heaving force; simulation analysis

1 引言

大型地下工程和基础工程中, 由于地质条件的

复杂性、区域性和特殊性, 对围护结构工程技术和隔渗止水提出了更高要求, 同时也产生了多种新技术和工法。对富含水复杂软土地质条件下的深基坑工程, 尤其是常规工法存在一定技术难度和风险

收稿日期: 2009-05-24; 修回日期: 2009-08-06

作者简介: 黄建华(1969-), 男, 博士, 1991年毕业于同济大学岩土工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土与地下结构工程方面的教学与研究工
E-mail: huangjh@mail.tsinghua.edu.cn

时,采用冻结围护技术人工制冷使土中液相水冻结为固相冰,从而提高含水土层强度和刚度,隔绝地下水并加固不稳定土层,因此具有良好适应能力和突出技术优势,适用于特殊地质条件下的深基坑围护以及地铁隧道等工程^[1, 2]。

液相水在冻结为固相冰过程中,不可避免会产生冻胀现象,软土冻结过程发生的冻胀变形对围护结构影响重大,工程应用中冻胀变形的分析和控制对围护工程成败关系重大。相对于常规围护工程技术,冻结围护工程的冻胀变形力学机制复杂、影响因素多样,本文通过模拟分析和试验测试,考虑初始地应力场及其耦合效应,系统研究软土冻胀变形特性,为今后冻结围护的合理设计和安全施工提供理论基础。

作为典型分析对象的深基坑冻结围护止水工程项目,悬索桥锚碇深基坑围护工程紧邻长江堤岸边,土层自上而下包括亚黏土、粉砂、粉细砂、中细砂以及风化基岩等,富含补给水,既有软弱土层又有厚砂土层,且基坑底基岩层面倾斜角度大,因此采用冻结围护结构体系,人工冻结土层形成冻土帷幕止水,解决深基坑开挖过程的隔渗止水难题^[3~5]。

2 冻胀变形特性

土层冻结是人工制冷将天然含水土层变成冻土形成冻结帷幕,增加强度和稳定性,隔绝地下水,便于基坑和地下工程开挖掘砌。冻胀主要为水分迁移引起,冻胀变形是指冻结膨胀后在冻胀力和约束力作用下围护结构和土体的变形,冻胀变形源于土中液相水冻结为固相冰后的体积膨胀。冻胀首先要求土体和围护结构变形,当变形受到约束时即产生冻胀力。围护结构的外荷载主要是冻结帷幕的原始冻胀力和水土压力。

冻胀随土层埋深增加逐渐减小,但冻胀力则随深度加大而增大,当冻胀力不断增大使土体产生剪切破坏而变形时,则同时亦产生新的冻胀。冻胀变形与土的性质(包括颗粒级配、矿物成分等)、含水量、压缩性(弹性模量)、约束条件以及土的冻结程度和冻结时间等因素相关^[6, 7]。

3 冻胀变形数值模拟

3.1 冻结围护工程概况

锚碇深基坑尺寸为 70.5 m×52.5 m×29.0 m,采用冻结排桩围护结构进行挡土和止水。围护桩为钻孔灌注桩,桩径为 1.50 m、桩长为 35 m、桩间距为 1.70 m。排桩外侧布设冻结孔形成等效厚度为 1.30 m 的冻结帷幕,冻结帷幕平均温度为-7℃,深度为 40 m(见图 1, 2)。

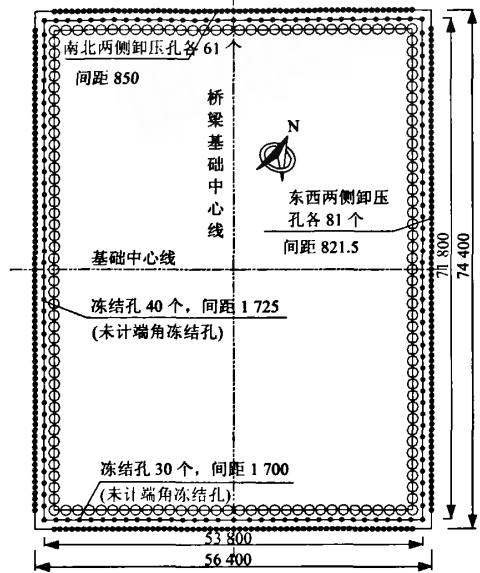


图1 冻结围护基坑平面图(单位: mm)

Fig.1 Plane of frozen deep foundation pit(unit: mm)

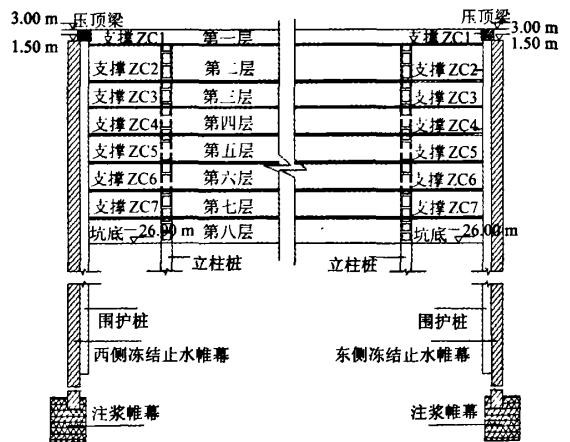


图2 冻结围护基坑剖面图

Fig.2 Profile of frozen deep foundation pit

3.2 模拟分析参数与边界条件

冻胀变形是温度场、湿度场(水分子迁移)、位移场和应力场的多场耦合结果,因此采用非线性数

值模拟软件进行耦合分析, 冻结帷幕冻胀模拟分析网格图见图 3。表 1 给出了土层物理力学参数, 混凝土弹性模量为 3.0×10^{10} Pa, 排桩和冻结帷幕等效厚度为 1.3 m, 卸压槽等效厚度为 0.2 m, 深度为 20.0 m, 场地土层采用莫尔 - 库仑修正本构模型。为模拟地球重力场效应并与试验测试工况一致, 模拟分析首先进行初始地应力场的平衡计算, 再进行温度场、应力场等的耦合分析^[8]。

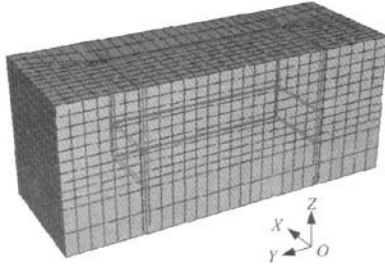


图 3 冻结帷幕冻胀模拟分析网格图

Fig.3 Analytical model and grid of frozen curtain

表 1 岩土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock and soil layers

土层序号	土层名	重度 ($kN \cdot m^{-3}$)	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	压缩模量/ kPa	泊松比	含水量 /%	冻胀系数 λ
1	杂填土	18.6	18.0	25.0	4 270	0.40		
2	淤泥质亚黏土	17.9	21.0	6.3	3 220	0.40	38.4	0.000 212
3	亚黏土夹粉砂	18.5	25.4	8.8	5 320	0.35	29.7	0.000 202
4	粉细砂	19.2	30.0	5.0	10 810	0.35	26.2	0.000 194
5	花岗岩	22.0	50.0		2.4×10^6	0.25		

3.3 冻胀变形模拟分析

有限元分析中引入冻胀系数 λ 并考虑重力场、温度场、应力场、应变场等的耦合效应, 冻结帷幕模拟分析所得到的位移场云图如图 4 所示, 由图 4 可见, 土层位移变形沿矩形周边的分布为中间小, 矩形两端转角处冻胀变形大, 且这种规律在不同深度的土层面变化规律基本一致(见图 5)。竖向剖面上冻胀变形呈现自上而下逐渐小的变化趋势(见图 6)。对于冻结帷幕表层及相同水平面的侧边土层, 冻胀力和冻胀变形在冻结帷幕位置最大, 帷幕两侧土层的冻胀力和冻胀变形随着与冻结帷幕距离增加逐渐递减(见图 7, 8), 其中冻结帷幕处的冻胀变形达到 84.78 mm。在考虑初始地应力平衡的多场耦合情况

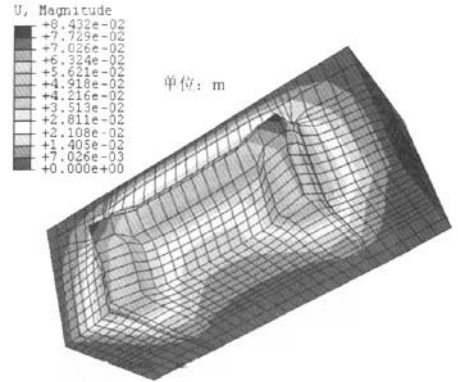


图 4 软土冻胀耦合分析位移场分布图

Fig.4 Field of frozen displacement after coupling analysis

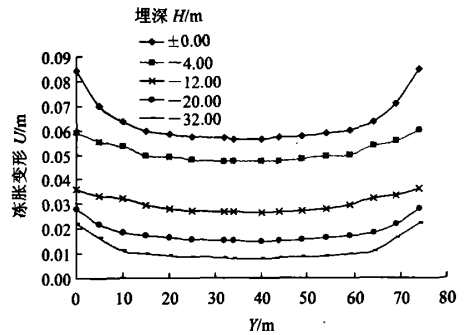


图 5 冻结帷幕不同埋深冻胀变形图

Fig.5 Frozen deformations along freezing curtain

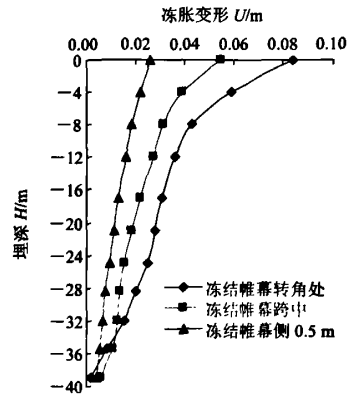


图 6 冻胀变形竖向剖面分布

Fig.6 Frozen displacements along vertical section

下, 冻胀应力沿土层面起自上而下递增而冻胀变形则相反, 但是二者均随温度降低均呈增加趋势(见图 9)。

从图 6 可以看出, 竖向剖面位移的特征, 基坑

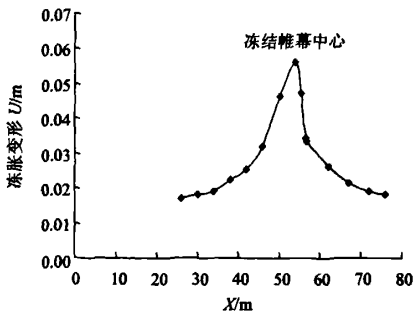


图 7 冻结帷幕表层两侧冻胀变形发展

Fig.7 Displacements along both sides of frozen curtain

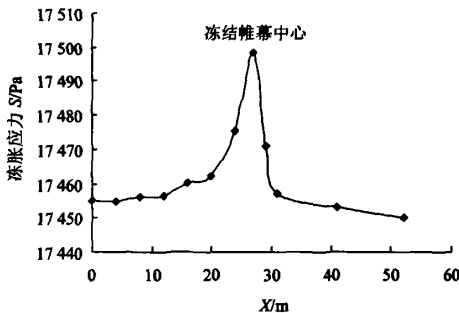


图 8 冻结帷幕表层面两侧冻胀应力发展

Fig.8 Frost stress along both sides of frozen curtain

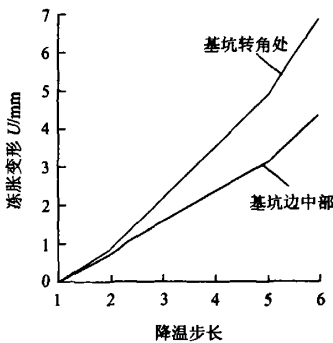


图 9 冻胀变形与降温步长相关性

Fig.9 Relation between frozen deformation and temperature

开挖前, 尽管冻结帷幕侧向分层土层性质不同, 但自上到下总体变形逐渐减小, 即冻结壁两侧土层位移场在竖向剖面整体呈衰减形式, 上部位移变形比下部大, 最大位移发生在冻结帷幕顶端, 且冻结温度变化对土层变形影响显著, 随着温度降低, 土层变形有增加趋势(图 9 中降温步长是模拟从常温 21 °C ~ -7 °C 的变化)。围护结构施工及土层开挖后的最大变形逐渐下移, 开挖后的最大变形位于土层

面下 -13 ~ -15 m, 分析计算所得的冻胀变形量与现场测试结果基本一致。

3.4 冻胀特性讨论

冻胀特性与冻土性质和约束条件等关系密切, 土的压缩模量越大, 则冻胀力越大、冻胀变形越小, 反之则相反。冻胀还与土的冻胀系数及冻结帷幕厚度关系紧密, 随着冻胀系数和冻结壁厚度增加, 冻胀变形和冻胀力也增大。因此, 应严格控制冻结壁厚度, 确保冻胀力和冻胀变形在规定的范围内, 保证冻结围护基坑工程的安全。

沿竖向方向随埋深增加, 围压提高, 冻胀变形减小, 冻胀力上升, 即冻结壁侧面的约束刚度越大, 冻胀变形越小, 冻胀力越大。因此冻结围护工程中, 在刚性支护和内支撑作用下, 可能导致约束增强, 引起冻胀力积聚和增加, 对围护结构不利。在实际工程应用中设置卸压槽(孔)可以降低冻胀力, 起到很好的卸压作用, 同时有效控制围护结构及周边土层与环境变形^[9, 10]。

4 冻胀变形模型试验与现场测试

4.1 冻胀变形模型试验与分析

模型试验根据冻结围护结构对称性特点, 取基坑一半区域进行, 模型几何相似比 $C_l = 20.27$, 尺寸为 2 500 mm × 1 709 mm × 1 430 mm (长 × 宽 × 高) (见图 10)。试验用土选取现场代表性 3 种软土 (见表 1)。试验过程考虑初始重力场平衡条件, 加载采用油压千斤顶; 制冷系统包括冷冻机、盐水泵、冻结管、控制柜等; 测试内容包括温度、应力、应变和变形等^[11~13]。

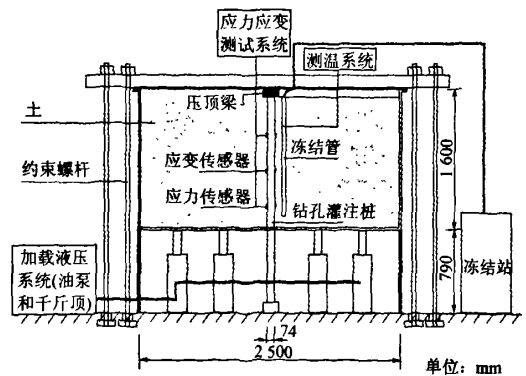


图 10 冻胀试验模型图

Fig.10 Model of frozen test

试验过程随着冻结温度下降,冻胀变形量和冻胀力都呈增加趋势,变化规律基本相似,在 0℃~-4℃之间增加梯度较大,随后趋缓。基坑开挖中冻结土层表面竖向冻胀变形(土层表面隆起)为 58 mm,其变化规律如图 11 所示。

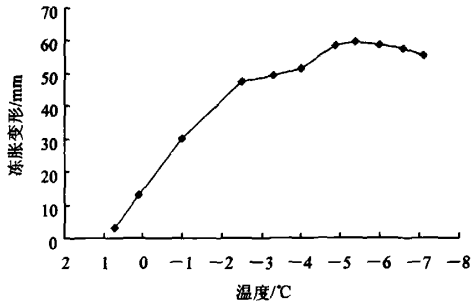


图 11 冻结帷幕表面冻胀变形随温度变化规律
Fig.11 Frozen deformations change with temperature

基坑开挖过程中,冻结帷幕平均温度-7℃,各道腰梁(即桩)的水平位移见图 12。由图 12 可见,随着开挖层数的增加,腰梁的水平位移将逐渐增大,其中最大位移发生在第一道支撑系统中,最大值为 46.216 mm。

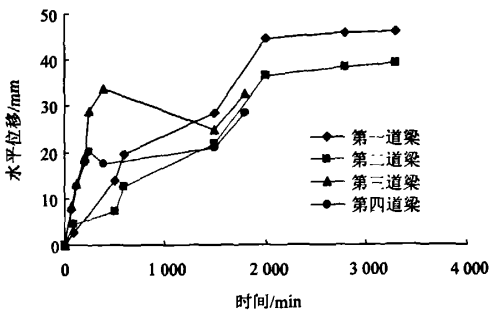


图 12 支撑梁的水平位移

Fig.12 Horizontal displacements of supporting beams

4.2 冻胀变形的现场测试成果分析

冻结围护工程现场测试包括应力、应变、温度、冻胀力和冻胀变形等内容的监测。温度场监控由埋设在冻结管两侧的温度传感器进行量测分析,土层冻结温度控制在-7℃~-13℃,随着开挖的进行,排桩逐段暴露,桩内各测点温度皆有升高,但冷冻管两侧的土层温度控制和维持比较好,与模拟分析采用的温差一致^[14-16]。

冻结围护结构变形主要来源于冻胀力、水土压

力和坑内土体卸荷。冻土帷幕剖面方向冻胀变形量包络图 13 反映了冻胀量大小及变化情况。由图 13 可见,基坑未开挖前冻结土层已产生冻胀变形,其冻胀变形量已达 73.49 mm,与前述模拟分析和模型试验结果基本相符,且冻胀变形在积极冻结期、维护期、甚至停冻期一直在发展。冻胀变形随深度呈上大下小趋势,且随着基坑施工结束基本未改变,与数值分析和模型试验一致。开挖过程中围护桩的最大水平位移点随着开挖深度的加深不断下移,直至土层开挖结束以及底板浇筑完成后,最大位移点降到-13 m 左右,而坑外深层土体最大水平位移点基本维持在地面以下 5.0 m 左右深度处并达 90 mm 左右,且桩侧最大水平位移值均小于坑外深层土体最大水平位移(见图 13)。

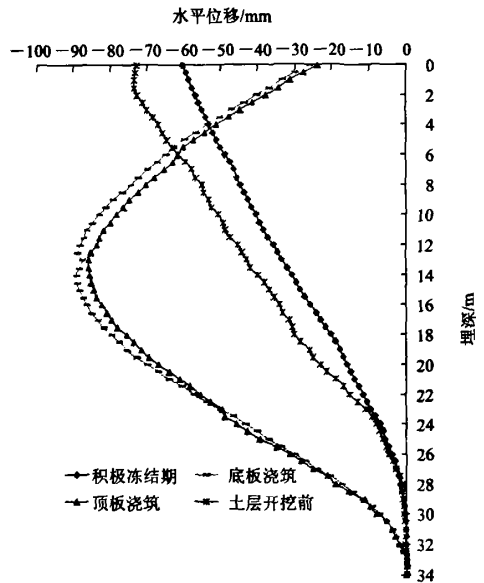


图 13 土体水平位移历时曲线图

Fig.13 Horizontal displacements of soil with time curves

坑外土层在冻胀力和开挖卸荷以及卸压孔作用下,地表总体呈下沉趋势,但在采用盐水的积极冻结期和液氮的冻结补强期间,部分地表表现为向上隆起(见图 14)。立柱桩则在开挖前期,由于坑内土体的卸载、坑底土回弹引起桩侧摩阻力变化等有小幅度隆起,但随着土层的继续开挖,立柱桩下沉,填芯期间,立柱又有所隆起(见图 15)。

冻结围护结构上的侧压力包括水土压力与冻胀力等,且主要是冻胀力,范围跨度大,从积极冻结期到维护期过程,冻胀力随冻结帷幕厚度变化而变

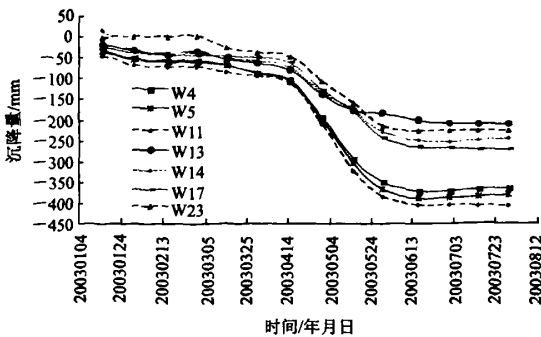


图 14 坑外地表典型观测点沉降历时曲线图

Fig.14 Curves of ground surface settlement vs. time on the side of pit

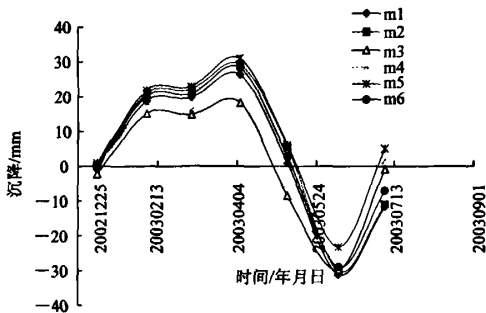


图 15 典型立柱沉降历时曲线图

Fig.15 Curves of column settlement vs. time in foundation pit

化,并在局部地方超过 1.0 MPa,与前述非线性模拟分析及试验基本相符(见表 2)。

表 2 计算分析与试验测试结果比较

Table 2 Comparison of data of analysis, simulation and monitoring

结果类型	弯矩 $M_{max}/(kN \cdot m)$	剪力 Q_{max}/kN	位移 s_{max}/mm
计算分析	-22 927.4~9 693.0	-8 819.3~1 0314.9	84.78
模型试验	-	8 430.0	58.00
现场测试	-	10 940.0	92.20

5 结论

通过数值模拟分析和试验测试的验证,对揭示冻结止水帷幕的冻胀变形特征、合理进行深基坑工程设计施工和安全保障等具有重要意义,通过研究得到以下主要结论:

(1) 深基坑工程人工冻结止水帷幕具有良好止水性能,但过大的冻胀变形与冻胀力会危及围护结

构安全,冻胀与土层性质、约束条件、冻结时间、冻结程度及冻土壁厚度等关系紧密,工程中应减小冻胀与变形,确保工程质量安全。

(2) 考虑初始地应力平衡计算的三维非线性有限元分析,能够较真实模拟重力作用下软土初始应力状态以及人工冻结过程冻结帷幕的冻胀力学特性,准确反映冻胀和约束相互作用下的冻胀与变形特性,并与真实重力作用工况的试验测试结果相符。

(3) 冻胀特性与冻土力学性质及其约束条件等关系密切,随埋深增加,冻胀力递增,冻胀变形减小,同时应严格控制冻结温度和厚度,确保工程安全。实际应用中设置卸压槽(孔)具有良好卸荷作用,有效控制围护结构及周边环境变形。理论分析和试验测试成果对冻胀性状研究、基坑合理设计和安全施工有重要意义。

(4) 深基坑冻结止水帷幕在含水复杂地质条件下,充分利用其良好封水性能并与围护结构有机结合特点,科学经济、合理可靠,环保安全,保证基坑围护工程顺利实施,具有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 程国栋,马巍. 国际冻土工程研究进展——第五届冻土工程国际学术讨论会综述[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 303 - 308.(CHENG Guodong, MA Wei. A research review of international permafrost engineering—the 5th International Symposium on Permafrost Engineering[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 303 - 308.(in Chinese))
- [2] 东兆星,崔广心. 深基坑支护中冻结壁力学特性研究综述[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 622 - 626.(DONG Zhaoxing, CUI Guangxin. Comment on research of mechanical characteristics of frozen soil walls in deep foundation pit support[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 622 - 626.(in Chinese))
- [3] 黄建华. 大型锚碇冻结围护基坑工程数值分析与应用[C]// 第十届岩石力学与工程学术大会论文集. 威海: 中国电力出版社, 2008: 104 - 109.(HUANG Jianhua. Numerical analysis and application on deep foundation pit engineering of anchorage supported by frozen soil technology[C]// Symposium of the 10th Academic Congress in Rock Mechanics and Engineering. Weihai: China Electric Power Press, 2008: 104 - 109.(in Chinese))
- [4] 黄建华. 深基坑冻结围护结构性状研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.(HUANG Jianhua. Study of performance of exterior-

- protected construction with frozen process in deep foundation pit engineering[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese))
- [5] 徐伟, 黄建华, 钟建驰. 深基坑冻结排桩围护结构体系变形分析和应用[J]. 建筑技术, 2003, 34(11): 808 - 811.(XU Wei, HUANG Jianhua, ZHONG Jianchi. Deformation and application of exterior-protected construction system with deep foundation pit frozen row of pile[J]. Architecture Technology, 2003, 34(11): 808 - 811.(in Chinese))
- [6] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1 612 - 1 617.(LAI Yuanming, CHENG Hongbin, GAO Zhihua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 612 - 1 617.(in Chinese))
- [7] 马巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 198 - 221.(MA Wei, WU Ziwan, CHANG Xiaoxiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of tjaeles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 198 - 221.(in Chinese))
- [8] 杨更社, 张晶. 冻土墙围护深基坑开挖的有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 132 - 149.(YANG Gengshe, ZHANG Jing. Finite element numerical imitation of deep foundation pit excavation supported by frozen soil wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(2): 132 - 149.(in Chinese))
- [9] 张树光, 孙利. 深基坑排桩冻结温度场的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增1): 1 510 - 1 514.(ZHANG Shuguang, SUN Li. Numerical simulation on temperature field of freezing piles in deep pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Supp.1): 1 510 - 1 514.(in Chinese))
- [10] 姚直书, 代泽兵, 孙文若. 平面冻土墙围护深基坑的时空效应数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(14): 2 006 - 2 010.(YAO Zhishu, DAI Zebing, SUN Wenruo. Numerical simulation on time-space effects of plane frozen soil wall retaining deep-foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(14): 2 006 - 2 010.(in Chinese))
- [11] 东兆星, 周国庆, 齐燕军. 圆形深基坑中冻土帷幕变形规律试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(2): 137 - 141.(DONG Zhaoxing, ZHOU Guoqing, QI Yanjun. Experimental research on deformation features of frozen wall around circular deep foundation pit[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(2): 137 - 141. (in Chinese))
- [12] 汪仁和, 郁楚候, 熊声誉, 等. 冻土挡墙稳定性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 52 - 57.(WANG Renhe, YU Chuhou, XIONG Shengyu, et al. Experimental studies of stability of frozen soil retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5): 52 - 57.(in Chinese))
- [13] 王文顺, 王建平, 井绪文, 等. 人工冻结过程中温度场的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 538 - 543.(WANG Wenshun, WANG Jianping, JING Xuwen, et al. Experimental study of temperature field in course of artificial freezing[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(4): 538 - 543.(in Chinese))
- [14] YUAN B Y, LIU X G, ZHU X F, et al. Pile horizontal displacement monitor information calibration and prediction for ground freezing and pile-support foundation pit[C]// Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation. [S. l.]: [s. n.], 2008: 968 - 974.
- [15] LU J H, ZHAO Y R, YUAN B R. Monitoring and feedback for ground freezing and pile-support deep foundation pit[C]// Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation. [S. l.]: [s. n.], 2008: 702 - 708.
- [16] JI L, RUAN J, ZHU W B. Application of freezing and row of piles method in great deep foundation pit[C]// Proceedings of the China Association for Science and Technology. [S. l.]: [s. n.], 2004: 314 - 319.