

文章编号: 1000-7598 (2009) 11-3372-08

大型锚碇基础围护工程冻结帷幕力学性态研究

黄建华^{1,2}, 宋二祥¹

(1. 清华大学 土木工程系 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 福建工程学院 土木工程系, 福州 350007)

摘 要: 冻结围护是利用人工制冷技术, 使地层中的水结冰, 将天然土层变成冻土作为围护挡土止水的新技术。依据冻结基本原理, 在大型锚碇深基础中采用排桩内支撑结构并结合冻结帷幕止水是一种新的基坑围护形式, 含水土层冻结后形成的冻结帷幕具有良好的封水性能, 冻土墙刚度和强度较原土层有很大的提高且质量易于控制。相对于常规围护工程, 冻结围护结构的冻胀力学特性复杂且研究资料贫乏, 因此, 其力学性状的研究将进一步完善冻结围护技术理论, 保障基础工程顺利安全进行。通过对锚碇基础围护工程冻结帷幕温度场-应力场耦合的三维非线性数值模拟分析研究, 得到冻结围护工程中冻结帷幕的冻胀力学性状特征, 结合大型锚碇基础冻结围护工程实例的现场测试成果分析, 验证数值模拟分析方法结果的合理性以及冻结围护技术的可靠性, 研究成果将为今后冻结围护技术的工程推广应用提供理论基础。

关 键 词: 冻结帷幕; 围护结构; 锚碇基础; 有限元分析

中图分类号: TU 476

文献标识码: A

Research on mechanical properties of frozen curtain in large anchorage foundation pit engineering

HUANG Jian-hua^{1,2}, SONG Er-xiang¹

(1. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350014, China)

Abstract: Ground freezing enclosure is a new technique that makes water in soil be ice by the way of artificial refrigeration, thus change original soil to be frozen retaining wall and waterproof curtain in foundation pit engineering. Based on the freezing principle, frozen soil curtain formed from aquifer has some super performances such as excellent waterproof, higher rigidity and strength, etc. As a new structure system of deep foundation pit in the large anchorage engineering, its important features include that piles and internal strut are used to be exterior-protected construction while frozen soil curtain hold back ground water. Compared with the conventional supporting projects, previous research data of frost mechanical properties in envelope works are always poor. Therefore frost heave mechanical characteristics of frozen curtain are obtained from simulation of three-dimensional coupling numerical nonlinear analysis of the fields of temperature and stress; and the conclusions are verified by field test data in foundation pit engineering. Research achievements may provide theoretical basis of applications in the future, not only for its rationality in analysis and results but also its reliability in techniques and methods.

Key words: frozen curtain; retaining structure; anchorage foundation; finite element analysis

1 引 言

土层冻结技术源于天然冻结现象, 是人工制冷使地层中的水结冰, 将天然含水土层变成冻土, 形成冻结帷幕, 增加强度和稳定性并隔绝地下水, 方便地下工程开挖掘砌。1862 年英国威尔士的建筑基础施工中首次成功使用人工制冷加固土壤, 1880 年德国工程师 F. H. Poetich 提出人工冻结法原理, 并

于 1883 年在德国阿尔巴里煤矿中采用冻结法建造井筒, 随后该方法被广泛应用到世界许多国家的地铁隧道、基坑边坡、矿井市政等工程中, 成为岩土工程施工的重要方法之一。我国冻结法应用也有 50 多年历史, 主要是用人工制冷技术暂时加固不稳定地层和隔绝地下水, 目前也用于一些深基坑工程和地铁隧道工程^[1-4]。

相对于常规围护工程, 冻结围护结构的冻胀力

学特性复杂且研究资料较贫乏,因此,其力学性状的研究将对今后冻结围护工程进一步的推广应用有重要指导意义。本文在大型锚碇基础中采用冻结围护工程为背景,进行了冻胀力学性态的耦合分析。

润扬长江公路大桥南汊悬索桥南锚碇位于镇江市润州区,锚碇基础中心距江边大堤 540 m。基坑深度大,穿过土层包括亚黏土、粉砂、粉细砂、中细砂以及风化基岩等,地层既有软弱土层又有岩层,且富含补给水。施工难度大、技术要求高,采用排桩内支撑围护与冻结帷幕止水有机结合的技术,成功地解决了围护开挖的难题。冻结排桩围护结构体系是排桩加内支撑作为受力围护结构,同时人工冻结排桩外侧四周土层形成冻结帷幕止水,充分利用人工冻结帷幕良好封水性能、灌注桩和内支撑结构力学体系清晰、施工质量可控等优点,充分发挥两种技术优势,是岩土工程领域的一项技术创新^[5-7]。

2 冻胀力及其特征

2.1 冻胀和冻胀力

冻胀过程最显著的表现是水分的迁移,冻胀力是指土体冻结膨胀受到结构物的约束时冻胀土体对结构物产生的作用力,分为水平冻胀力和切向冻胀力两种。冻胀与冻胀力的关系:冻胀首先要求土体变形,当变形受到约束时产生冻胀力。因此,冻胀和约束是产生冻胀力的两个必要条件^[8-9]。

2.2 冻结围护冻胀力特征

冻胀与土层埋深有关,且随深度逐渐减小。冻胀力的大小与土体的冻胀性以及结构物对冻胀的约束程度有关。当冻胀不断增大,冻胀力足以使土体产生剪切破坏,同时亦产生了新的冻胀变形。人工冻结帷幕可以止水,但无限制冻结导致的过大冻胀及其冻胀力会危及地下围护工程的安全。因此,要合理控制冻结帷幕厚度。

围护结构的外荷载主要是冻结帷幕的原始冻胀力和主动土压力,且原始冻胀力通常比主动土压力大得多。关于天然冻土地区水平冻胀力问题,国内外学者都进行了研究,得到了一些水平冻胀力与冻胀量的回归关系式以及挡土墙水平冻胀力荷载分布与取值参考等。在国内工程应用中,一般依据 GB 50324—2001 和 JGJ118—89 规范进行设计,通常采用现场试验与经验取值相结合的方法确定水平冻胀力值。在工程实践过程中,应采取减小水平冻胀力的措施,确保质量和安全^[10]。

2.3 冻胀力影响因素

影响原始冻胀力主要因素有:①土类与性质(包

括颗粒级配、矿物成分等);②土的起始含水率;③土的冷冻程度;④原始压力;⑤冻结时间等^[11-12]。

3 冻结帷幕力学性态分析

3.1 工程背景

润扬长江公路大桥南锚碇基础工程的基坑平面为矩形,尺寸为 70.5 m×52.5 m×29 m,采用冻结排桩围护结构,冻结帷幕止水封水,排桩内支撑结构挡土受力,解决基坑围护的挡土止水问题。围护结构采用直径为 1.50 m 钻孔灌注桩排桩,桩长 35 m,横桥向间距为 1.70 m,纵桥向为 1.725 m,嵌入基岩约 6 m。排桩外侧布设冻结孔、注浆孔和卸压孔。冻结孔形成等效厚度为 1.3 m 的冻结帷幕,平均温度为 -7°C ,距离排桩中心 1.4 m,冻结管长 40 m。注浆孔布置在冻结孔外侧,距离冻结孔中心 0.6 m,注浆段高 8.0 m ($-32.0\sim-42.0\text{ m}$)。卸压孔直径为 0.25 m,深度为 25 m,距冻结孔中心为 1.30 m,每个冻结孔对应布置两个卸压孔,横桥向间距为 0.85 m,纵桥向间距为 0.86 m,布置在注浆孔外侧,降低冻结帷幕产生的冻胀力,冻结排桩围护基坑平面图如图 1 所示。

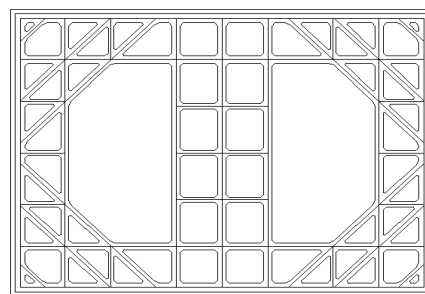


图 1 基坑围护平面布置图

Fig.1 Plan of foundation pit

3.2 计算模型参数与边界条件

冻结帷幕冻胀力的分析是一个关于温度场、应力场等的多场耦合问题,所涉及的材料特性、计算参数、约束条件和边界条件等比较复杂,解析求解困难。下面采用 ABAQUS 非线性有限元软件进行三维实际尺寸和工况的温度应力耦合分析,考虑其对称性,取围护结构的 1/2 进行。采用 Cardisian 坐标系,底边界和侧边界分别取至基坑深度和宽度的 2~3 倍。 X 方向边界为轴对称边界, Z 方向土层顶面为自由面,在远端约束 X 和 Y 方向位移,在土层底部设为固端,开挖前后的计算模型及单元划分网格如图 2 所示。

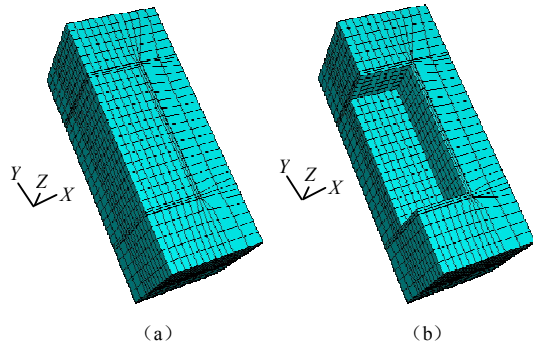


图2 开挖前后冻胀分析模型和网格剖分图

Fig.2 Analysis model and grid around excavation period

土层材料物理力学参数根据勘察报告确定见表1, 混凝土弹性模量为 30 GPa, 混凝土桩采用各向异性本构模型, 水平向弹性模量取为竖直向的 1/2。卸压槽泥浆材料参数取 $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 0.48$, $E = 10 \text{ Pa}$ 。冻结帷幕等效厚度为 1.3 m, 卸压槽等效厚度为 0.2 m, 排桩等效厚度取 1.3 m, 支撑截面为矩形, 土层采用双参数修正的 Mohr-Coulomb 模型。

为真实模拟地球重力场效应, 首先进行 Geostatic 初始地应力场平衡计算, 再进行温度场、应力场耦合分析。分析、计算主要考虑土体自重、冻土引起的冻胀力和基坑周边超载以及土层开挖后的卸载影响等因素。基坑周边地面超载取 20 kPa, 范围为距坑边 1 倍坑深。

表1 土层物理力学性质参数
Table 1 Parameters of physico-mechanical properties of soil layers

土层序号	土层名	重度 /(kN/m ³)	φ /(°)	c /kPa	压缩模量 /kPa	泊松比	含水率 /%
1	杂填土	18.6	18.0	25.0	4 270	0.40	
2-1	淤泥质亚黏土	17.9	21.0	6.3	3 220	0.40	38.4
2-2	亚黏土夹粉砂	18.5	25.4	8.8	5 320	0.35	29.7
2-3	粉细砂	19.2	30.0	5.0	10 810	0.35	26.2
9-1	花岗岩	22.0	50.0		$(1\sim3)\times 10^6$	0.25	

3.3 冻胀特性耦合分析

弹性体温度发生变化时, 由于膨胀或收缩且受到约束时, 弹性体内产生的应力即为热应力或温度应力。含水土层冻结, 由液相变为固相过程中产生的温度应力即为冻胀应力。基于非线性多物理场耦合功能, ABAQUS 软件的模型单元计算引入材料热膨胀系数 $\alpha(\theta, f_\beta)$ 来模拟分析温度应力场的热胀应变变量计算。在物理方程中考虑变温效应, 再利用虚功原理等效为节点荷载(力)向量, 把冻胀应力与

土层初始地应力及外荷载产生应力场进行完全耦合分析, 研究冻结帷幕应力场和位移场特征^[7, 13]。

(1) 冻结帷幕冻胀耦合的应力场特征

相同水平层面的冻胀力在靠近冻结帷幕位置最大, 随着与冻结帷幕距离的增加, 向两侧土层的应力逐渐减小。对于项目中的矩形基坑, 在设计冻结帷幕宽度 1.3 m 时, 基坑顶面土层受到的冻胀力在基坑边的跨中位置比转角处略大, 基坑长边跨中位置土层层面达 0.051 6 MPa。基坑转角处由于冻胀力叠加和相互抵消作用, 冻胀力反而略小, 为 0.044 1 MPa, 但位移变形却增大, 且随温度降低, 冻胀应力不断增加, 如图 3~5 所示。

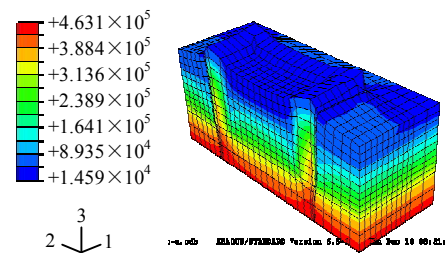


图3 冻结帷幕冻胀应力分布图(单位: Pa)

Fig.3 Distribution of frozen stress around the frozen curtain (unit: Pa)

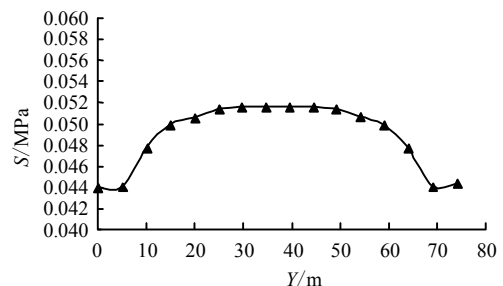


图4 沿基坑长边冻胀应力分布图(Y=0~74 m为基坑转角)

Fig.4 Distribution of frozen stress along the border of pit

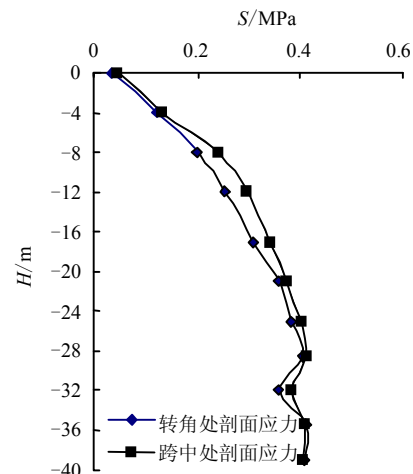


图5 冻胀应力沿冻结壁帷幕竖向分布情况

Fig.5 Distribution of stress along vertical section

(2) 冻结帷幕位移场特征

基坑冻结帷幕温度场与应力场耦合分析所得到的位移场特征如图 6 所示, 由图可见, 土层位移在基坑周边的分布为中间小, 矩形两端转角处位移变形大, 且这种规律在不同深度的土层面变化规律基本一致, 并且自上而下整体呈现由大到小的变化趋势, 如图 7 所示。对于相同水平面上土层断面的位移场情况, 自冻结帷幕向两侧土层的位移发展为逐渐减小的趋势, 且不同深度的土层水平面上位移场曲线变化规律基本相似, 均表现为近冻结帷幕位移大, 向两侧随距离发展渐渐减小。

从图 8 和图 9 可以看出竖向剖面位移场特征。基坑未开挖和支护前, 尽管冻结帷幕侧向土层性质不同, 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。土层开挖及围护结构施工后的最大变形逐渐下移, 开挖结束后最大变形在地面下-13~-15 m 之间^[14], 计算变形结果与现场测试基本一致。

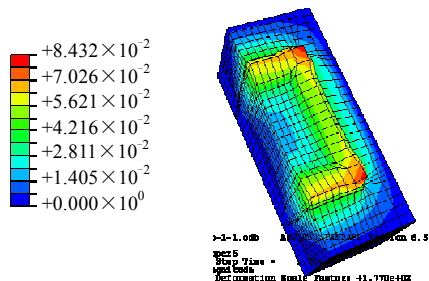


图 6 耦合分析冻胀位移场分布图 (单位: m)
Fig.6 Frozen displacement field of coupling analysis

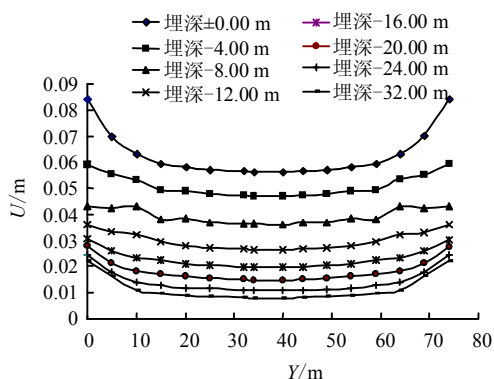


图 7 沿基坑长边不同埋深土层面冻胀变形分布图
Fig.7 Frozen displacements along the vertical section of border

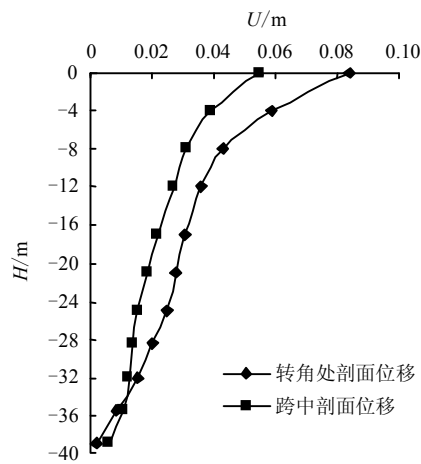
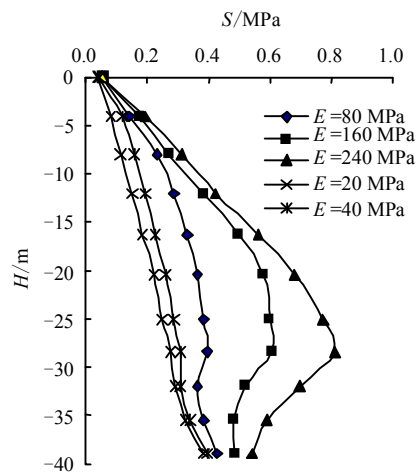
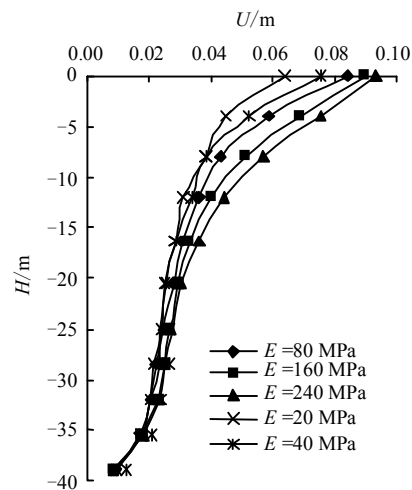


图 8 沿土层剖面冻胀位移分布
Fig.8 Frozen displacements along vertical soil section



(a) 土层剖面冻胀应力-弹性模量关系曲线



(b) 土层剖面冻胀变形-弹性模量关系曲线

图 9 不同弹性模量下竖向土层剖面的冻胀应力和变形
Fig.9 Frozen stress and displacements fields of different elastic moduli

(3) 冻胀应力与变形随温度变化的特征
分别选取代表基坑转角和跨中不同位置单元 (No.952, No.1001) 进行分析, 图 10 中 step 代表

温度降低的步长, 温度依次降低 0、-5、-5、-5、-5、-8℃, 模拟冻结帷幕从常温 21~-7℃的变化, 由图可见, 随温度的降低, 冻胀应力和冻胀变形具有明显增加的趋势。

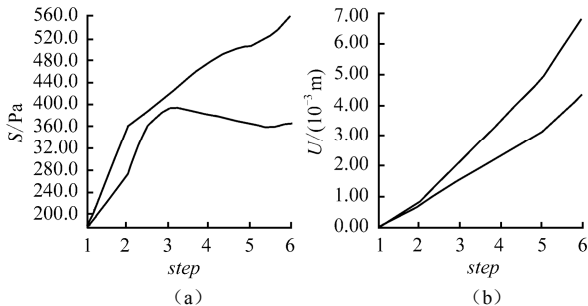
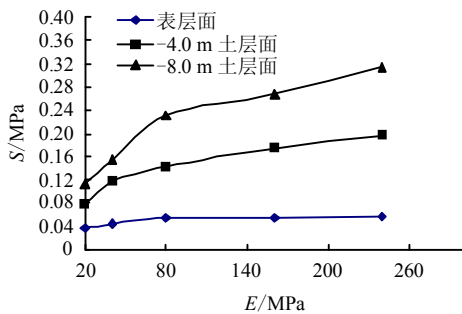


图 10 冻胀应力和变形发展随温度降低变化情况

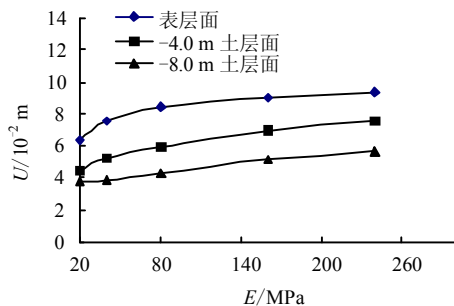
Fig.10 Frozen stress and displacement grow with the change of temperature

(4) 土层性质及约束条件差异的冻胀应力及变形特征

从图 9 和图 11 中可以看出, 沿冻结壁竖向方向随埋深增加, 围压提高, 冻胀变形减小, 冻胀力上升, 且与土层弹性模量以及冻结壁侧面约束条件关系紧密。E 值越高, 侧壁约束刚度越大, 则冻胀变形越小, 冻胀力越大。



(a) 冻胀应力-弹性模量 (冻土) 关系曲线



(b) 冻胀变形-弹性模量 (冻土) 关系曲线

图 11 冻胀应力和变形与弹性模量 (冻土) 关系

Fig.11 Frozen stress and displacements - elastic moduli

因此, 冻胀力大小由土层冻胀特性和约束条件这 2 个因素共同决定, 可以认为与冻结帷幕两侧土的性质关系紧密, 土的压缩模量越大, 则冻胀力越

大、冻胀变形越小。实际冻结围护工程中, 刚性支护和内支撑作用下, 可能导致约束增强, 引起冻胀力的积聚和增加, 对围护结构不利。设置卸压槽(孔)是降低冻胀力, 控制变形的有效措施。冻胀力可以降低到 0.012 MPa 以下, 卸压作用明显, 同时变形也得到有效控制。

(5) 不同冻结厚度的冻胀应力和变形特性

从耦合分析结果可见, 冻胀力大小分布与冻结壁厚度关系紧密, 在冻结壁围护结构中冻胀力大小与冻结壁的厚度关系较大。随着冻结壁厚度增加, 冻胀力也随之增大, 同时冻胀变形也随着冻结壁厚度的增加而增大 (图 12)。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。

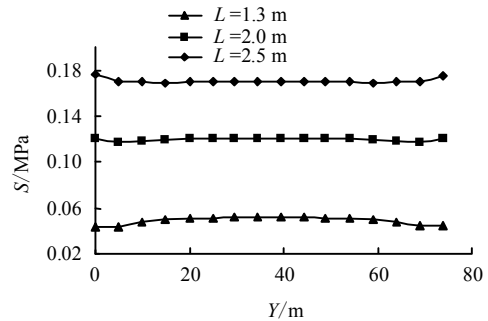


图 12 不同冻结帷幕厚度的土层冻胀力

Fig.12 Frozen stress of different widths of frozen curtain

(6) 不同冻胀系数下的冻胀应力和变形特性

图 13、14 是在不同冻胀系数下计算分析得到的基坑转角处和跨中的冻胀应力和冻胀变形的分布。随冻胀系数增大, 冻胀应力和冻胀变形均有所增加且沿剖面发展趋势基本一致。

4 现场实测成果分析

南锚碇基础工程采用人工冻结围护结构形式, 除常规监测项目外, 还侧重人工冻土温度场的监测以及土体冻胀力和冻胀变形以及围护结构的应力、变形等的监测^[15-16], 表 2 给出了部分监测成果数据。

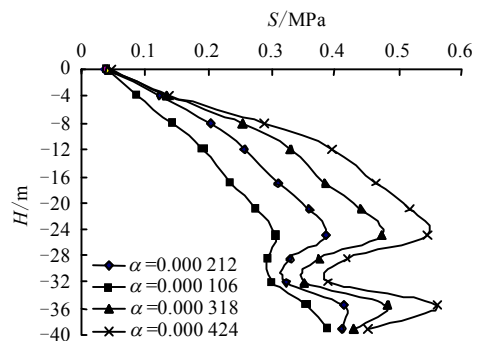


图 13 不同膨胀系数土层剖面冻胀应力

Fig.13 Frozen stress of different expansion coefficients

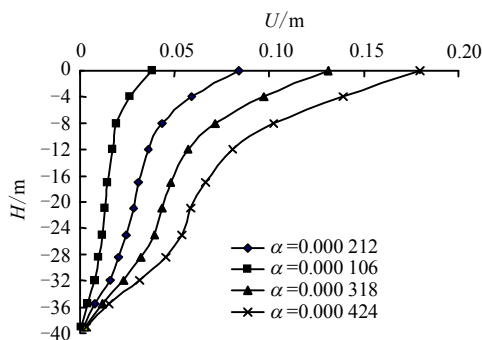


图 14 不同膨胀系数土层剖面冻胀位移
Fig.14 Frozen displacements of different expansion coefficients

表 2 计算与监测结果分析表

Table 2 Data of analysis and monitor

分类比较	弯矩 $M_{\max}$ /(kN·m)	剪力 $Q_{\max}$ /kN	位移 $s_{\max}$ /mm
计算结果	-229 27.4~9 693	-8 819.3~10 314.9	84.0
最大监测结果		10 940	92.2

4.1 温度场监测成果

温度场监控由埋设在冻结管两侧的测温传感器进行量测分析,在积极冻结期,土层冻结温度控制在 $-7\sim-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着开挖的进行,排桩逐段暴露,桩内测点的温度皆有升高,但冷冻管两侧的土层温度控制和维持比较完好,与模拟分析采用的温差一致。

图 15 为 HT-5 土层面典型测温点 HT1-5~HT5-5 在积极冻结期和维持冻结期受环境和水化热影响的温度-时间曲线(其中 HT1-5 为地面参照温度)。

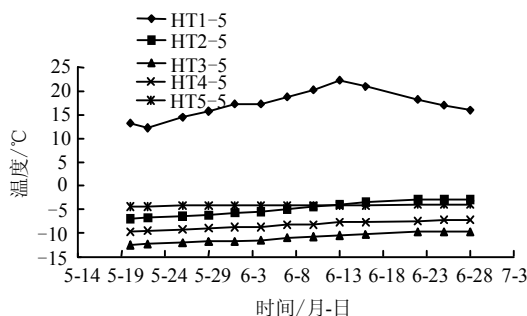


图 15 各测温点温度-历时曲线

Fig.15 Curves of temperature-time among measured points

4.2 冻胀应力场监测成果

本工程作用在围护结构上的侧压力包括土压力与冻胀力两部分,且冻胀力远大于土压力对围护结构影响,是主要影响因素。冻结帷幕产生的冻胀力为方向相反的一对力,一个指向基坑,作用于围护结构上;另一个方向相反,作用于冻结帷幕外侧土体。侧压力观测断面 PJ1 上 3 个和 PJ2 上 5 个测点

的侧压力监测成果如图 16 所示,冻胀力范围跨度大,从积极冻结期到维护期过程,冻胀力随冻胀帷幕厚度变化而变化,并在局部区域超过 1.0 MPa ,与数值耦合分析成果基本相符。

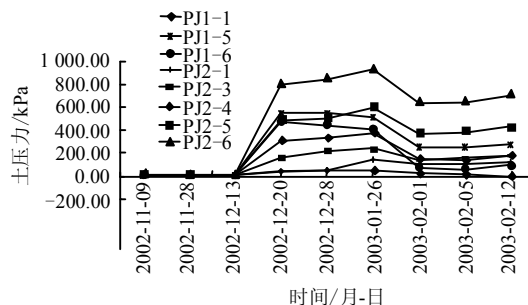


图 16 围护侧壁压力曲线图

Fig.16 Curves of pressure along lateral wall

4.3 冻胀位移场监测成果

冻胀和坑内土体卸荷是引起本工程结构变形的两大因素,其中以冻胀为主。水平冻胀量包络图是冻胀量在同一断面墙体和土体的位移,反映冻胀量的大小及变化情况。图 17 为冻结 40 d 后基坑开挖前的冻胀包络图。从图中可看出,基坑未开挖前排桩围护与土体已产生冻胀变形。包络图中反映的冻胀量已达 73.49 mm 。与前面模拟分析成果(图 7)基本相近,而且在积极冻结期、围护冻结期甚至停冻期冻胀一直在发展。由图还可以看出,冻胀量随深度呈上大下小趋势,且随着基坑施工结束基本未改变,这与耦合分析成果图 8 和图 11 中的情况一致。

桩身侧向位移最大值随着开挖深度加深最大位移点不断下移;坑外深层土体最大位移点基本维持在地面下 5 m 左右深度,且桩身侧向最大位移均小于坑外深层土体的最大位移。如图 18 所示。

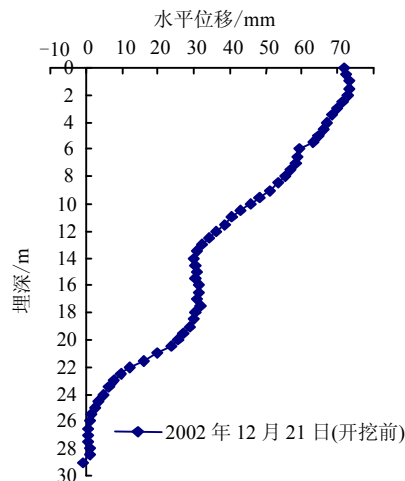


图 17 基坑土层开挖前的冻胀变形包络图

Fig.17 Displacements along lateral wall before excavation

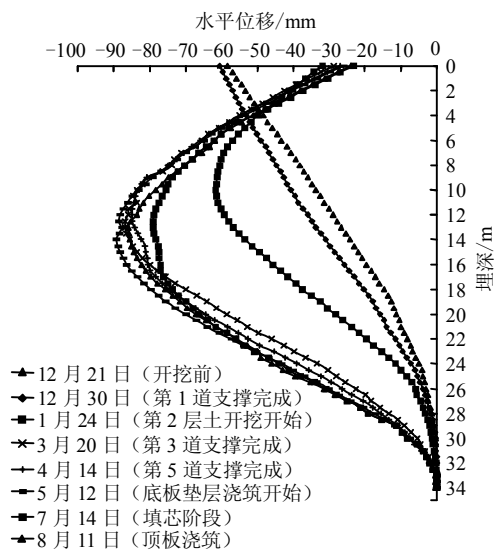


图 18 I2 测斜孔位移-历时曲线图

Fig.18 Deformation-time of I2 hole with clinometers

5 结 论

通过对锚碇基础围护工程冻结帷幕的冻胀应力和位移性态特征分析,可以得到以下结论:

(1)冻胀和约束是产生冻胀力的两个基本条件,对于土层和围护结构,冻胀力和变形其实是动态变化的,冻胀力的作用下土层和围护结构产生变形,土层和围护变形又影响冻胀力的大小。有限元数值模拟有效地反映了冻结帷幕的力学性态特征。

(2)锚碇基础采用冻结围护结构,在特殊地质条件下充分利用冻结帷幕良好封水性能并与围护结构有机结合,工程项目的成功实施也证明冻结围护技术的科学经济、合理可靠。

(3)冻结围护结构所受的冻胀力比水-土压力大很多,通过分析可得冻胀力与冻胀变形和土层性质(压缩模量、含水率、冻胀系数等)、降温程度、冻结时间、冻结帷幕厚度以及约束条件(围护类型、土层围压)等关系密切,工程应用中应严格控制含水率、冻结温度和冻结帷幕厚度,确保工程安全。

(4)卸压槽(孔)技术具有明显卸荷作用,可降低冻胀应力和冻胀变形。1个冻结孔配套2个卸压孔的设计,基本满足冻胀能量的释放,耦合数值分析成果有效地反映了现场实测情况,同时也说明冻结围护技术合理、经济、科学。

参 考 文 献

[1] 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 Zhao-xing, CUI Guang-xin. 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.

[2] 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.

[3] 崔托维奇 H. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985.

[4] 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(03): 303—308.

CHENG Guo-dong, MA Wei. A research review of international permafrost engineering——5th international symposium on permafrost engineering[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2003, 25(03): 303—308.

[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 Jian-hua, ZHONG Jian-chi. Deformation and application of exterior-protected construction system with deep foundation pit frozen row of pile[J]. **Architecture Technology**, 2003, 34(11): 808—811.

[6] 姚直书, 程桦. 锚碇深基坑排桩冻土墙围护结构的冻胀力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1521—1524.

YAO Zhi-shu, CHENG Hua. Study on frost-heaving force in retaining structure with row-pile and frozen soil wall for deep foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1521—1524.

[7] 王金昌, 陈开页. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

[8] 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 Zi-wang, CHANG Xiao-xiao. Effects of consolidation process on stress strain characters of frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 198—221.

[9] 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(12): 2006—2010.

YAO Zhi-shu, DAI Ze-bing, SUN Wen-ruo. 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(12): 2006—2010.

- [10] 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 Zhao-xing, ZHOU Guo-qing, QI Yan-jun. Experimental research on deformation features of frozen wall around circular deep foundation pit[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 36(2): 137—141.
- [11] 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): 129—132.
- YANG Geng-she, ZHANG Jing. Finite element numerical imitation of deep foundation pit excavation supported by frozen soil wall[J]. **Rock and Soil Mechanics** 2002, 23(2): 129—132.
- [12] 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(Supp.): 1510—1512.
- ZHANG Shu-guang, SUN Li. Numerical simulation on temperature field of freezing piles in deep pits[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(Supp.): 1510—1512.
- [13] PAWTUCKET, RHODE ISLAND. ABAQUS Manuals-Version 6.5[M]. Pawtucket: Karlson and Sorensen Inc., 2005.
- [14] 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. Beijin: [s. n.], 2004, 1(1): 314—319.
- [15] YUAN B Y, LIU X G, ZHU X F. Pile horizontal displacement monitor information calibration and prediction for ground freezing and pile-support foundation pit[C]//Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation. Nanjing: [s. n.], 2008: 968—974.
- [16] 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. Nanjing: [s. n.], 2008: 702—708.