

文章编号: 1000-7598 (2010) 06-1705-04

模拟季节冻土层影响的冻土墙模型试验

徐学燕, 吉植强, 张晨熙

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘 要: 在季节冻土环境中使用人工冻结法时, 由于季节冻土层与人工冻土共同存在, 在前者影响下人工冻土墙的水平位移和制冷能量消耗与无季节冻土层时有显著不同。在改装的试验台上, 通过使用水平冻结管形成季节冻土, 用竖向冻结管形成冻土墙, 施加水平荷载, 模拟了 6 种季节冻土层温度条件下冻土墙的形成与开挖过程, 以研究季节冻土层对冻土墙耗能、受力和变形性能的影响。结果显示, 与无季节冻土层的情况相比, 季节冻土层温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可减小冻土墙水平位移达 8.79 mm, 约占墙体总位移的 52%, 耗能量可减小 40.4%。试验结果证明季节冻土层对冻土墙的影响不容忽视, 在工程中应充分考虑季节冻土层的节能效应和变形约束能力。

关 键 词: 季节冻土; 模型试验; 人工冻土墙; 水平位移; 制冷耗能

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

Model test of frozen soil wall beneath seasonally frozen soil layer

XU Xue-yan, JI Zhi-qiang, ZHANG Chen-xi

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Due to the existence of the seasonally frozen soil layer, there are significant differences in the horizontal displacement and energy consumption of refrigeration between the conditions with and without it. The refrigeration consumption and deformation performance of the frozen soil wall beneath seasonally frozen soil layer were studied; and the results show that the seasonal frozen soil with temperature $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ can reduce the frozen wall's horizontal displacement by 23.8% and reduce the refrigeration consumption by 40.4%. It is very important to consider the effects of the frozen layer, also the reductions in energy consumption and horizontal deformation of the artificial frozen wall should be considered in engineering.

Key words: seasonally frozen soil; model test; artificial frozen wall; horizontal displacement; refrigeration consumption

1 引 言

我国季节冻土分布在广大东北、华北、西北地区, 其冻结深度由南至北而增加, 最大达 3 m 左右, 在该土层储存了大量天然冷能。目前, 我国尚未开展过利用季节冻土区天然冷能节省人工冻结耗能的试验和实际工程, 因此, 人工冻土墙试验研究具有重要的理论意义和工程实用意义。

国内外学者进行了不同的人工冻结模型试验, 对人工冻土墙的应用前景和设计方法进行了研究, 推动了人工冻结法的应用, 但未见有考虑季节冻土层影响的模型试验^[1-5]。我们对中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室原有试验平台进行了改造, 建立了模拟季节冻土层影响的冻土墙

模型, 并进行了加载试验, 以期得到季节冻土层对冻土墙制冷耗能和水平位移的影响规律。

2 模型试验系统

根据相似理论^[6-8]设计改造了季节冻土条件下冻土墙模型试验台, 如图 1 所示。试验台主要技术特征见表 1。

试验系统包括加载系统、制冷系统、监测系统 and 数据采集系统等。制冷系统包括制冷机、冷媒箱和制冷管。制冷管按照功能不同, 分为水平环形冻结管和竖向冻结管。竖向冻结管用于形成冻土墙, 水平环形冻结管用于形成季节冻土层。测温系统包括监测冻结管循环管路温度的 2 组“铜-康铜”热电偶和监测土体温度的 5 组热电偶 (每组 9 个测

收稿日期: 2008-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40571032)。

第一作者简介: 徐学燕, 女, 1946 年生, 本科, 教授, 博士生导师, 主要从事冻土工程方面的研究。E-mail: xxyan@hit.edu.cn

点,沿冻土墙厚度方向布置),工作温度范围在 $-200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。位移量测系统使用YHD-50型和YHD-10型电阻应变式位移计,量测范围分别为 ± 25 、 $\pm 5\text{ mm}$,量测精度可达 $\pm 0.01\text{ mm}$,共布置12个测点,位移计使用磁性表座固定在位移架上,位移计测点布置如图1(b)黑色圆点所示。压力量测包括冻土与未冻土之间的冻胀力的量测、加载气囊前压力的量测以及加载气囊自身气压压力的量测。冻胀力和囊前压力采用TYJ-21型量程为 $0\sim 0.4\text{ MPa}$ 振弦式土压力计量测,气囊自身气压压力采用德力西公司的 2.5 MPa 压力表量测,精度为 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 。试验中的冻结管盐水流量由流量计监测。

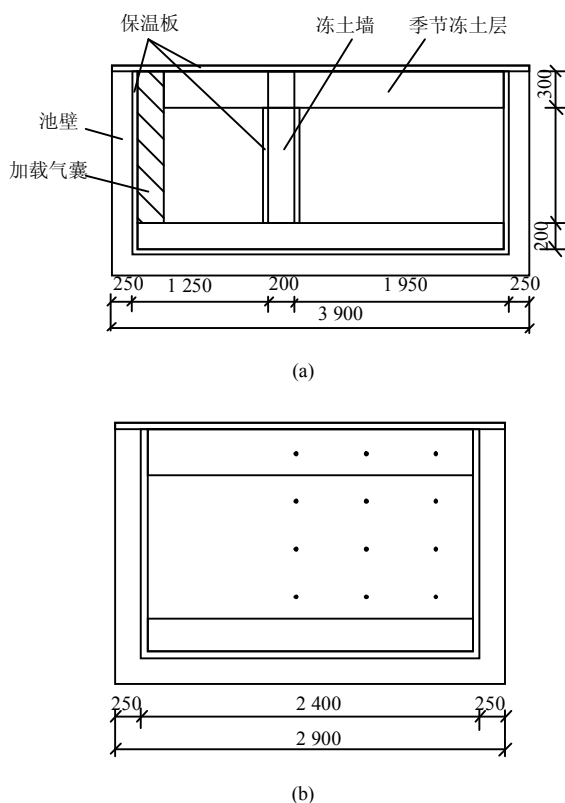


图1 试验台示意图(单位: mm)
Fig.1 Sketch of the test table (unit: mm)

表1 试验台主要技术特征
Table 1 Characteristics of test table

容积 /m ³	模型			有效加载 面积/m ²	加载方法	设计最大侧向 荷载/kPa
	长度 /m	宽度 /m	高度 /m			
12.24	2.4	0.20	1.5	3.12	气囊加压	100

试验过程中,首先放置好竖向冻结管,填土到设计高度后埋设水平环形冻结管。冻结开始时,控制制冷机中盐水温度,采用先水平冻结,后竖向冻

结的操作流程,依次形成季节冻土层和冻土墙。试验过程中数据采集时间间隔为 1 min 。通过对冻土温度的监测,计算冻土墙的平均温度和冻土墙的厚度^[6-7]。当冻土墙的平均温度和厚度达到试验要求后,即转入冻结维护期,模拟基坑开挖过程。

3 试验结果及分析

3.1 季节冻土层对冻土墙温度场的影响

图2是在不同季节冻土层平均温度下竖向冻结管中心距处的温度变化曲线。从试验结果可以看出,季节冻土层温度越低,相同冻结时间下管中心距处温度也越低。在冻结初期不同情况下管中心距处温度下降速度比较快,且相差不多,但温度降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,冻结速度差异显著。试验结束时,季节冻土 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的冻土墙最低温度要较无季节冻土时的温度低 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,季节冻土层能够有效提高冻土墙冻结速度,降低冻土墙的温度,从而起到了减少冻结时间,提高冻土墙强度的作用。

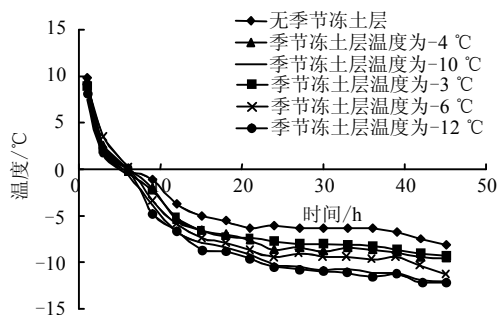


图2 相邻竖向冻结管中心距处温度曲线
Fig.2 Temperature curves at center distance between two adjacent vertical freezing pipes

图3为冻土墙厚度随时间变化曲线,图中3条曲线分别为无季节冻土层及季节冻土温度为 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冻土墙厚度随时间的变化曲线。可以看出,季节冻土层对冻土墙温度场的影响表现为冻土墙厚度的变化,季节冻土温度越低,冻土墙扩展速度越快,冻土墙达到设计厚度的时间越少。

3.2 季节冻土层对冻土墙水平位移的影响

冻土墙墙后采用气囊加载方式分两级加载^[9-10],首先,加载到第1级荷载(0.05 MPa),待压力稳定后再加载到第2级荷载,即 0.1 MPa 后,稳定压力直到位移不再发生变化为止。冻土墙分级加载 0.05 MPa 和 0.1 MPa 时墙顶水平位移随时间变化的曲线如图4所示。

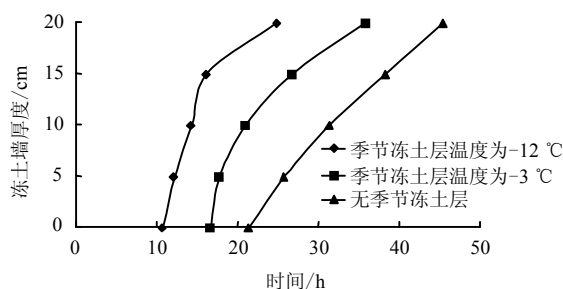
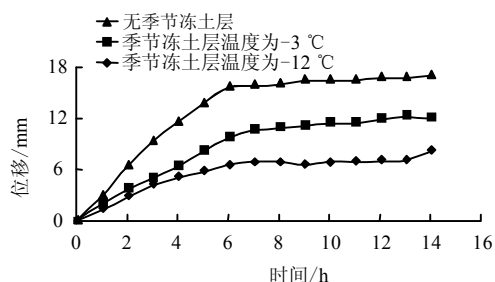
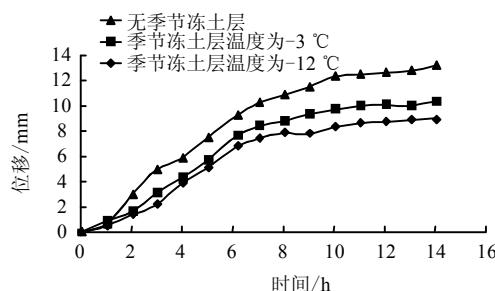


图3 冻土墙厚度随时间变化曲线

Fig.3 Thickness variation of artificial frozen wall beneath seasonally frozen soil layer



(a) 加载 0.05 MPa



(b) 加载 0.1 MPa

图4 不同荷载条件下冻土墙顶水平位移随时间变化曲线
Fig.4 Horizontal displacements of the wall top at different loading conditions

从图中可以看出，冻土墙的变形由两部分组成：①加载过程中的转动和弹性变形；②加载完成后压力稳定时的蠕变变形。对比两组曲线可以看出，加载 0.1 MPa 时冻土墙蠕变变形明显，而加载 0.05 MPa 时蠕变变形不明显；季节冻土层温度越低，加载过程中的转动和弹性变形及加载完成后的蠕变变形越小。季节冻土层温度为 -12°C 时，加载 0.05 MPa 和 0.1 MPa 所产生的总位移量分别比无季节冻土的情况小 8.79 mm 和 4.17 mm，占墙顶最大水平位移的 52% 和 41%。

3.3 季节冻土层对冻土墙耗能的影响

试验中控制制冷盐水流速，通过监测制冷盐水的流量计算冻土墙耗能。各管路制冷盐水流量统计见表 2。可以看出，季节冻土温度越低，试验过程

中消耗的盐水总流量越小，以无季节冻土层时管路中的流量为基准，季节冻土层温度分别为 -3°C 、 -6°C 、 -12°C 时，可以分别节省制冷盐水 2.00、2.24 和 2.73 m^3 ，占无季节冻土层时消耗盐水流量的 29.6%、33.1% 和 40.4%。可见，利用季节冻土层天然冷能对人工冻结的影响，可以节约大量能源，降低工程成本^[11]。同时，也说明在没有季节冻土存在的情况下，如果结合使用水平冻结和竖向冻结的方法，人为形成水平冻土层，对减少人工冻结法的能量消耗也可以起到明显效果。

表2 制冷盐水消耗流量

Table 2 Refrigeration consumption

季节冻土层温度 层温度/ $^{\circ}\text{C}$	季节土冻结管路 流量/ m^3	人工冻结管路 流量/ m^3	节约流量 / m^3
-3	0.56	4.12	2.00
-6	0.57	3.85	2.24
-12	0.78	3.26	2.73
无季节冻土层	0	6.76	0

4 结 论

(1) 本文自行设计了能够模拟季节冻土环境的冻结模型试验台，并进行了模型试验，为人工冻结模型试验提出了新的思路，在西北和东北地区开发的背景下，对合理利用冻土资源是一种有益尝试。

(2) 试验结果表明，季节冻土层能够有效提高冻土墙冻结速度，降低冻土墙的温度，从而起到了减少冻结时间，提高冻土墙强度的作用。季节冻土温度越低，冻土墙扩展速度越快，冻土墙达到设计厚度的时间越短。季节冻土层温度越低，加载过程中的转动和弹性变形及加载完成后压力稳定时的蠕变变形越小，季节冻土层温度为 -12°C 时，加载 0.05 MPa 和 0.1 MPa 所产生的总位移量分别比无季节冻土的情况小 8.79 mm 和 4.17 mm，占墙顶最大水平位移的 52% 和 41%。通过监测冻结过程中的制冷盐水流量，得出季节冻土层可以节约大量能源，降低工程成本。季节冻土层温度越低，人工冻结耗能越小，最高节省耗能达 40.4%，验证了利用天然冷能节省冻结耗能技术的可行性。同时，提出在没有季节冻土存在的情况下，如果结合使用水平冻结的方法，人为形成水平冻土层，对减少人工冻结法的能量消耗也可以起到明显效果。

参 考 文 献

- [1] 金永军, 杨维好. 冻土直墙用于基坑支护的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2280—2285.

- JIN Yong-jun, YANG Wei-hao. Application of linear frozen soil wall to support of foundation pit[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(13): 2280—2285.
- [2] BRAUN B, SHUSTER J, BURNHAM E. Ground freezing for support of open excavation[J]. **Engineering Geology**, 1979, 13(1—4): 429—453.
- [3] JESSBERGER HANS L. Theory and application of ground freezing in civil engineering[J]. **Cold Region Science and Technology**, 1980, 3(1): 3—27.
- [4] 陈湘生. 圆形冻土墙动态设计方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(增刊): 218—222.
CHEN Xiang-sheng. A dynamic design method for deep round frozen earth wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(Supp.): 218—222.
- [5] 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.
- [6] 建井工程手册编委会. 简明建井工程手册(下)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [7] 东兆星, 崔广心. 深基坑支护中冻土墙力学特性研究综述[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.
- [8] 裴颖洁, 郑刚, 刘建起. 两侧铰接地下连续墙的试验研究及数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 279—284.
PEI Ying-jie, ZHENG Gang, LIU Jian-qi. Model test and numerical analysis of diaphragm wall with hinged joints on both sides[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 279—284.
- [9] SANGER F J, SAYLES F H. Thermal and theological computation for artificial frozen ground construction[J]. **Engineering Geology**, 1979(13): 311—337.
- [10] 马巍, 常小晓, 王大雁. 人工冻结竖井中冻土壁强度与变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊): 2871—2874.
MA Wei, CHANG Xiao-xiao, WANG Da-yan. Behaviour of strength and deformation of frozen soil wall in artificially frozen shaft[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.2): 2871—2874.
- [11] 吉植强, 徐学燕. 季节冻土区人工冻土墙的冻结特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 971—975.
JI Zhi-qiang, XU Xue-yan. Thermal analysis of artificially frozen wall in seasonal frozen area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 971—975.

上接第 1704 页

- [7] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil measurement and parameter effect[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, 1972, 98(6): 603—624.
- [8] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress strain curves by three parameters[R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 902, 1943.
- [9] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 等. 地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1566—1570.
TANG Yi-qun, HUANG Yu, YE Wei-min, et al. Critical dynamic stress ratio and dynamic strain analysis of soils around the tunnel under subway train loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(9): 1566—1570.
- [10] 徐干成, 谢定义, 郑颖人. 饱和砂土循环动应力-应变特性的弹塑性模拟研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 1—12.
- XU Gan-cheng, XIE Ding-yi, ZHENG Ying-ren. Elastoplastic modeling for cyclic stress strain behaviour of saturated sands[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(2): 1—12.
- [11] TATSUOKA F. Some recent developments in triaxial systems for cohesionless soils[M]. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication, 1988.
- [12] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [13] 周建. 循环荷载作用下饱和软黏土特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [14] 张勇. 武汉软黏土的变形特征与循环荷载动力响应研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [15] 蔡英, 曹新文. 重复加载下路基填土的临界动应力和永久变形初探[J]. 西南交通大学学报, 1996, 31(1): 1—5.
CAI Ying, CAO Xin-wen. Study of the critical dynamic stress and permanent strain of the subgrade-soil under the repeated load[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1996, 31(1): 1—5.