季节冻土层影响下冻土墙温度场模型试验研究

徐学燕^{1,2}, 吉植强^{1,2}, 张晨熙^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:为了研究季节冻土层对冻土墙温度场的影响,基于相似理论开展了季节冻土层影响下冻 土墙温度场模型试验.通过水平冻结管形成季节冻土层,竖向冻结管冻结基坑侧壁土体,进行了 6 种度条件下季节冻土层温的温度场试验.使用无量纲非线性回归公式对试验结果进行了分析, 并推导了季节冻土层作用下冻土墙的厚度扩展速度公式和交圈时间公式.结果表明,季节冻土层 温度为-12 ℃,-3 ℃和无季节冻土层时冻土墙交圈时间分别为 10.2,17.5 和 21 h,而从交圈 到达到设计冻土墙厚度的时间分别为 12.8,14.3 和 24.1 h.说明季节冻土层对减少冻土墙的交 圈时间和增加交圈后冻土墙的厚度扩展速度都起到了有利作用.回归系数与季节冻土层温度之 间具有明显的规律性,能够合理反应和解释试验现象.

关键词:季节冻土层;温度场;人工冻土墙;模型试验

中图分类号: TU 445 **文献标识码:** A **文章编号:**1000-1964(2009)05-0629-05

Experimental Study of the Temperature Field in a Frozen Wall Influenced by a Seasonal Frozen Soil Layer

XU Xue-yan^{1,2}, JI Zhi-qiang^{1,2}, ZHANG Chen-xi^{1,2}

 State Key Laboratary for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract: The temperature field during freezing of a soil wall located below a seasonal, frozen layer was studied by constructing a model. The wall was formed by vertical freezing pipes and the seasonal layer was modeled by horizontal freezing pipes. Six different temperatures of the seasonal layer were tested. A non-linear equation describing the width of the frozen wall is presented and two other equations are deduced. The results for seasonal layer temperatures of -12, -3 and 0 degrees Celsius were: Time for vertical freezing zones to connect, 10.2, 17.5 and 21 hours; Time for the vertical wall to reach its design width, 12.8, 14.3 and 24.1 hours. The temperature in the seasonal layer affects the temperature field in the freezing wall. Regressions of the model's predictions to the test data show a good fit. These observations provide a useful reference for engineering practice.

Key words: seasonally frozen soil layer; temperature field; artificial frozen soil wall; model test

冻结温度场是进行冻土墙设计的重要依据,主要表现在:1)确定冻土墙厚度^[1-4];2)冻土墙平均

温度决定冻土墙力学性能^[5-6];3)温度场与土体热 学参数交互影响,是耗能计算手段之一^[7];4)温

收稿日期: 2008-12-30

基金项目:国家自然科学基金项目(40571032);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUE2008001X) 作者简介: 徐学燕(1946-),女,教授,博士生导师,从事冻土工程方面的研究. E-mail: xxyan@hit.edu.cn Tel: 13303600410

度场为冻土墙积极冻结期和维护冻结期提供判断 依据.

利用天然冷量,减少人工制冷能量的消耗,可 显著提高人工冻结技术的经济指标.国内外众多学 者对冻土墙的温度场进行了大量的研究,文献 [8-9]对单圈、多圈冻结进行了大量细致的研究工 作,文献[10]研究了冻结温度对温度场的影响,文 献[11]对冻土直墙的厚度发展规律进行了研究,但 是均未考虑季节冻土层对冻土墙温度场及墙体形 成时制冷耗能的影响,文献[12]进行了考虑季节冻 土影响下的冻土墙温度场有限元模拟,但其结果未 得到试验验证.

基于对温度场重要性的考虑和推广人工冻结 法的需要,本文拟通过模型试验,对前述工作进行 补充,以期获得更加详实的数据资料,对冻结法及 冻土墙的推广提供支持.

1 模型试验

1.1 冻结温度场的相似准则及模化设计

冻土墙的冻结温度场是一个不稳定的三维温 度场.可用如下的导热微分方程表示为

$$c_n \rho_n \frac{\partial t_n}{\partial \tau} = \lambda_n \left(\frac{\partial^2 t_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_n}{\partial z^2} \right) + q, \quad (1)$$

式中: t 为冻土的温度, C; τ 为冻结时间, s; λ 为导 热系数, W/(m・C); c 为土的质量比热, J/(kg・ C); q 为内热源, W/m³; n 表示土层状态, n = 1 表 示未冻土, n = 2 表示冻土.

在冻结开始前,土层中具有固定的仅随深度变 化的初始温度 *t*,有初始条件

 $t(x,y,z,0)=t_0.$

在土层的无限远处温度不受冻结的影响,其温 度为初始温度,因此有

$$(\infty, \tau) = t_0$$

 $t(\xi,\tau) = t_d.$ 在冻结锋面两侧,有热平衡方程

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial t_2}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \lambda_1 \left. \frac{\partial t_1}{\partial x} \right|_{x=\xi} = \Psi \frac{\mathrm{d}\xi}{\mathrm{d}\tau}.$$

在冻结管内表面,有

$$t(d,\tau)=t_{y}.$$

在冻土墙的上表面,有季节冻土覆盖,本文认 为季节冻土层温度为其平均温度 t_i,有

$$t(x, y, 0, \tau) = t_{j}.$$

根据上述数学模型,并考虑工程参数,列出了 影响冻土墙冻结温度场的因素.

$$f(t, a_n, c_n, \tau, \Psi, t_0, t_d, t_y, t_b, t_j, H_d, M, B, S, r_0) = 0,$$
(2)

式中: a_n 为导温系数, m^2/s ; c_n 为土的容积比热, J/($m^3 \cdot C$); H_d 为冻结管长度,m;M为冻土墙跨 度,m;B为冻土墙厚度,m;S为相邻冻结管的间 距,m; r_0 为冻结管外半径,m; t_b 为冻结管外壁温 度,C, Ψ 为水的结冰潜热,J/kg.

用因次分析法,可得如下准则

几何准则

$$L_1 = rac{H_{
m d}}{r_{
m o}}, L_2 = rac{B}{r_{
m o}}, L_3 = rac{S}{r_{
m o}}, L_4 = rac{M}{r_{
m o}} \, .$$

温度准则

$$egin{aligned} & \Theta = rac{t-t_{\mathrm{y}}}{t_{\mathrm{0}}-t_{\mathrm{y}}}, \Theta_{\mathrm{d}} = rac{t_{\mathrm{d}}-t_{\mathrm{y}}}{t_{\mathrm{0}}-t_{\mathrm{y}}}, \ & \Theta_{\mathrm{b}} = rac{t_{\mathrm{b}}-t_{\mathrm{y}}}{t_{\mathrm{0}}-t_{\mathrm{y}}}, \Theta_{\mathrm{j}} = rac{t_{\mathrm{j}}-t_{\mathrm{y}}}{t_{\mathrm{0}}-t_{\mathrm{y}}}. \end{aligned}$$

傅立叶准则

科索维奇准则
$$K_0 = \frac{\Psi}{c_n(t_0 - t_y)}.$$

 $F_0 = \frac{a_n \tau}{r_0^2}$.

因此可得出用无因次准则来表示的冻结温度 场准则方程

$$\Theta = F(L, F_0, K_0, \Theta_d, \Theta_b, \Theta_j).$$
(3)

本次试验确定几何相似常数 $C_{L} = 18$,温度相 似常数 $C_{t} = 1$,时间相似常数 $C_{r} = 324$.

按照以上模型设计,得到模拟参数见表1.

表 1	模拟	参数	
Sim	lation	narameters	list

ruore i ominimuton p			
名称	原型	模型	
跨度/m	39.6	2.2	
开挖深度/m	23.4	1.3	
嵌入深度/m	3.6	0.2	
墙厚/m	3.6	0.2	
冻结管间距/m	1.44	0.08	
冻结管直径×壁厚/mm×mm	180×8	10×2	
初始地温/℃	12	12	

1.2 模型试验系统

Table 1

本次试验是在深部岩土力学与地下工程国家 重点实验室模型试验台进行的,见图 1.



试验台是由长方形的钢筋混凝土壁及由型钢 焊接而成的顶盖组成的箱形结构试验空间,试验台 主要技术特征见表 2.

表 2 试验台主要技术特征 Table 2 Characteristics of the test table

技术特征	特征指标
容积/m ³	长×宽×高=3.4×2.4×1.5=12.24
模型最大尺寸/m	长×宽×高=2.4×0.20×1.5
有效加载面积/m ²	长×宽=2.4×1.3=3.12
加载方法	气囊加压
设计最大侧向荷载/MPa	0.1

试验系统包括制冷系统、监测系统和数据采集 系统等.制冷系统采用单冷媒双管路制冷系统,包 括制冷机、冷媒箱和制冷管.制冷管除形成冻土墙 所用的竖向冻结管外,还包括形成季节冻土层的水 平冻结管.

1.3 试验方法

试验过程中,首先预先放置好竖向冻结管,在 填土过程中埋入T型铜-康铜热电偶,总共埋有4 串,每串9个测点,共36个测点.在墙体中部的主, 界面各布置2串.填土到设计位置后埋置水平冻结 管,继续填土到最终设计高度,然后盖好试验台顶 盖,开始冻结.冻结开始时,控制制冷机中盐水温 度,打开季节冻土层冻结管循环管路阀门,关闭人 工冻土墙冻结管循环管路阀门,只在季节冻土层冻 结管循环盐水.当季节冻土层达到要求的温度和厚 度时,控制季节冻土层温度保持恒定,开启人工冻 土墙冻结管循环管路阀门,循环盐水,土体开始冻 结.本研究共进行了6次试验,试验工况如表3所 示,冻结时盐水温度均为-25℃,试验采用粉质黏 土,土的物理参数见表 4.

表	3	试验温度		
 0	-		•	

1401	ic J	5 rempature of test			5		
试验编号	1	2	3	4	5	6	
季节冻土层设计 平均温度/℃	-6	-4	-10)-12	-3	无季节冻土层	

表 4 土的物理参数 Table 4 Soil properties

土类	干容重/ (kN・m ⁻³)	湿容重/ (kN・m ⁻³)	含水量/ %	液限/%	塑限/ %
粉质黏土	16.3	19.8	22.62	30.8	21.7

2 试验结果及分析

2.1 季节冻土层温度

试验中季节冻土层控温曲线如图 2 所示.从图 2 中可以看出冻结 10 h 左右季节冻土层温度即达 到设计温度,此后季节冻土温度保持恒定.



2.2 季节冻土层对冻土墙温度场特征的影响

2.2.1 冻土墙温度场

不同工况的冻土墙水平方向温度发展曲线如 图 3 所示,图中以冻土墙中心为原点.





比较 3 种条件下的温度发展曲线,发现在冻结 开始后 10 h内,季节冻土层温度为-12 ℃时冻土 墙温度下降最快,降幅达到了 4.8 ℃,而季节冻土 层温度为-3 ℃时冻土墙温度仅降低了 1 ℃;30 h 到 50 h期间,季节冻土层-12 ℃这组试验温度推 进曲线密集,季节冻土层-3 ℃这组试验温度推进 曲线疏松;随着冻结时间不断增长,冻结 20 h时, 季节冻土层-12 ℃这组最低温度为-5.8 ℃,而 此时季节冻土层一3 ℃这组冻土墙还未交圈.说明 季节冻土层温度越低,冻土墙内的厚度方向的温度 扩展速度越快,在相同时间内形成的冻土墙温度也 越低,即冻土墙强度越大.

2.2.2 对冻土墙交圈时间及厚度发展规律的影响

界面反映了冻土墙的最高温度及最低强度特征^[11],所以采用该处的厚度作为冻土墙计算厚度.

由图 4 发现,季节冻土层对冻土墙交圈时间的影响 是显著的.季节冻土层温度为-12 ℃时的交圈时 间为 10.2 h,季节冻土层温度为-3 ℃时的交圈时 间为 17.5 h,而无季节冻土层时的交圈时间为 21 h,即季节冻土层温度越低,冻土墙的交圈时间越 早.

在相同的冻结管温度下,季节冻土层的温度越低,交圈后冻土墙内的环境温度也越低,低温季节 冻土层的存在对冻土墙的增加扩展速度是有利的.

冻土墙交圈后到冻土墙达到设计厚度的时间 随着季节冻土层温度的降低而减少,图4显示3种 情况下,用时分别为12.8,14.3和24.1h.



图 4 冻土墙厚度随时间变化曲线 Fig. 4 Thickness variation of the artificial frozen wall beneath seasonally frozen soil layer

由上面的分析可知,季节冻土层对冻土墙的交 圈时间和交圈后冻土墙的厚度扩展都起到了有利 作用,即季节冻土层的温度越低,在相同冻结管温 度作用下,形成相同设计冻土墙厚度的时间越短.

3 冻土墙厚度计算公式

在土层性质确定、冻结管直径不变、盐水温度 和流速稳定的情况下,冻土扩展速度主要与冻结时 间相关.采用无量纲公式形式拟合了试验结果,将 冻土墙厚度表示为

$$\frac{H}{d} = A + B \ln F_0, \qquad (4)$$

式中: A, B 为系数; H 为冻土墙厚度; d 为冻结管

直径; $F_0 = \frac{a_n \tau}{r_0^2} = \frac{4a_n \tau}{d^2}$ 为谐时准则.

表 5	拟合结	果
Table 5	Fitness	results

季节冻土层	层温度	А	В	-A/B	R^2
无季节冻土	124	-206.1	25.57	8.06	0.998 9
-3 °C		-188.0	24.37	7.71	0.948 8
−12 °C		-171.3	23.50	7.30	0.927 7

由表 5 可以看出随季节冻土层温度降低,A 值 增加,B 值减小.

图 5 为厚度与冻结时间之间的无因次关系曲线. 纵坐标为冻土墙厚度 H 与冻结管外径 d 的比值, 横坐标为谐时准则 F₀. 计算中取试验土体的导温系数 a_n 为 1.033 km²/s.





式(4)两边对时间求导,得到交圈后的冻土墙 的扩展速度

$$v = \frac{Bd}{\tau} . \tag{5}$$

令公式(4)等于 0,可求得交圈时间为

$$t = \frac{\mathrm{e}^{-\frac{A}{B}}d^2}{4\alpha_n} \,. \tag{6}$$

由表 5 可得, - A/B 随季节冻土层温度降低 而减小,所以季节冻土层温度越低交圈时间越短, 与 2. 2. 2 中的试验现象相符.

综上,使用试验数据建立起来的冻土墙厚度回 归公式,由于采用了无量纲化处理,增加了其应用 范围,能够合理反映季节冻土层对冻土墙厚度扩展 过程中的影响,在厚度、扩展速度和交圈时间三方 面都与试验结果表现出很好的一致性,对不同季节 冻土层温度下冻土墙内的温度场发展过程提供了 参考.

4 结 论

1) 试验表明,季节冻土层温度越低,冻土墙内 的厚度方向的温度扩展速度越快,在相同时间内形 成的冻土墙温度也越低.

2)季节冻土层温度为-12 ℃时的交圈时间为 10.2 h,季节冻土层温度为-3 ℃时的交圈时间为 17.5 h,而无季节冻土层时的交圈时间为 21 h.季 节冻土层对冻土墙的交圈时间和交圈后冻土墙的 厚度扩展都起到了有利作用,即季节冻土层的温度 越低,在相同冻结管温度作用下,形成相同设计冻 土墙厚度的时间越短.

3)使用无量纲化回归公式,对试验资料进行 拟合,得到冻土墙厚度计算公式 $\frac{H}{d} = A + B \ln F_0$, 发现拟合参数随季节冻土层温度变化的规律明显. 进而推导出冻土墙交圈后的厚度扩展速度公式 $v = \frac{Bd}{\tau}$ 和冻土墙交圈时间公式 $t = \frac{e^{-\frac{2}{3}d^2}}{4\alpha_n}$.能够合 理反映季节冻土层对冻土墙厚度扩展过程中的影 响,为研究不同季节冻土层温度下冻土墙内的温度

场提供了参考.

参考文献:

- [1] BRAUN B, SHUSTER J, BURNHAM E. Ground freezing for support of open excavation[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/4): 429-453.
- [2] JESSBERGER H J. Theory and application of ground freezing in civil engineering[J]. Cold Region Science and Technology, 1980, 3(1): 3-27.
- [3] LACKNER R, AMON A, LAGGER H. Artificial around freezing of fully saturated soil: thermal problem [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(2):211-220.
- [4] HOLDEN J T. Improved thermal computations for artificially frozen shaft excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1997, 123(8): 696-701.
- [5] 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.
- [6] WILLAMS P. Thermodynamic of mechanical conditions within frozen soil and their effects[C]//SEN-NESET K. Proc 5th Int Cont on Permafrost. Trondheim: Tapir Publishers, 2001:493-498.
- [7] SANGER F J, SAYLES F H. Thermal and theological computation for artificially frozen ground construction[J]. Engineering Geology, 1979(13): 311-337.

- [8] 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 Ren-he, YU Chu-hou, XIONG Sheng-yu, et al. Experimental studies on stability of frozensoil retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996,18(5):52-57.
- [9] HU Zeng-hui, LI Xiao-zhao, ZHAO Xiao-bao, et al. Numerical analysis of factors affecting the range of heat transfer in earth surrounding three subways[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,18(1): 67-71.
- [10] 胡向东,黄 峰,白 楠.考虑土层冻结温度时人 工冻结温度场模型[J].中国矿业大学学报,2008, 37(4):550-555.
 HU Xiang-dong, HUANG Feng, BAI Nan. Models of artificial frozen temperature field considering soil freezing point[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,37(4):550-555.
- [11] 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.

[12] 吉植强,徐学燕.季节冻土地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.

(责任编辑 王继红)