

热管解决土壤冻胀问题的数值分析及 应用研究

潘 阳

(土木工程系)

摘 要 根据热管解决土壤冻胀问题,提出并建立了土壤冻胀过程中与热管耦合传热的数理模型,根据初始条件和边界条件,采用 SIMPLE 算法,对模型进行数值求解¹⁹。计算结果和实测值基本吻合且一致性较好¹⁹。经过数值分析,提出了热管解决土壤冻胀的作用机理,并为热管技术解决土壤冻胀的实际应用提供了可靠的设计依据¹⁹。

关键词 热管;土壤;冻胀;冻结;耦合传热

分类号 TK 124

0 引 言

在我国东北地区,冬季土壤冻胀现象常常会导致一些建筑物基础,如输变电设备的地基等,发生上拔、倾斜,造成建筑物的倒塌,东北电业部门,每年都因此发生高压线路故障,严重地影响了沿线人民的生产和生活,同时造成了很大的经济损失¹⁹。近年来,东北电业部门采用热管技术^[1],成功地解决了这一问题¹⁹。

土壤冻胀现象是一个比较复杂的过程,影响的因素很多,其机理涉及到地质学、力学、气象学以及传热学等学科¹⁹。对于饱和水土壤的冻结过程以及饱和水的冻结,文献[2~4]分别进行过数值计算及分析;对热管与相变介质的耦合传热问题,文献[5,6]进行了实验研究和分析¹⁹。土壤埋设热管后,由于热管的作用和边界条件的改变,土壤中的热质传递及冻结过程有其特殊的规律,对此,目前国内外尚少见报导¹⁹。笔者针对这一过程,建立了热管-土壤的耦合传热模型,并就模型的计算结果和实测值进行了比较,计算值和实测值基本相吻合¹⁹。同时,还就热管抑制土壤冻胀的作用机理进行了讨论和分析,并为热管在这方面的应用提供了设计依据¹⁹。

1 理论分析及数值计算方法

1.1 理论分析

土壤的冻结过程实质上是一个传热问题^[13]根据本文的研究对象,可将其归结为热管和土壤冻结的耦合传热^[13]其物理模型如图1所示^[13]

当环境温度低于土壤温度时,热管开始工作^[13]露于地面上的热管冷凝段,受环境冷空气的对流换热作用,使管内工质由饱和蒸汽降温后形成冷凝液,冷凝液靠重力作用回流至埋入地下的热管蒸发段,使蒸发段壁温相应降低,且低于周围土壤温度,由于热管蒸发段和土壤间的温差作用,使土壤中的热量以热传导的方式传给热管蒸发段,再通过管内工质的蒸发相变过程,将热量散发于环境,土壤因散热而使温度降低,如此循环,使土壤热量不断散出,土壤温度逐渐降低且开始冻结^[13]

对于土壤,参照实际情况,作如下假设:

1) 土壤是一种具有各向同性的多孔介质,且土壤处于水饱和状态;

2) 土壤非冻结区内的水分流动是层流,且为不可压缩;

3) 除了浮力项中的密度外,所有物性是常量;

4) 土壤的颗粒是刚性的,且由冻结而导致的体积变化可忽略^[13]

根据以上假设,可得出传热控制微分方程:

连续性方程

$$\frac{\partial(ru)}{\partial z} + \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$z \text{ 方向 } \quad \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\varepsilon} (u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r}) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\varepsilon} (\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2}) + S_z + S_b \quad (2)$$

$$r \text{ 方向 } \quad \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\varepsilon} (u \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial v}{\partial r}) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\varepsilon} (\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2}) + S_r \quad (3)$$

其中

$$S_z = - (B + \frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{K} \frac{\partial u}{\partial \tau}) u; \quad (4a)$$

$$S_b = - \rho_m g \omega |T_f - T_m| - |T - T_m|; \quad (4b)$$

$$S_r = - (B + \frac{\mu}{K} + \frac{\rho C}{K} \frac{\partial v}{\partial \tau}) v \quad (4c)$$

且

$$K = \frac{d^2 \varepsilon}{150(1 - \varepsilon^2)}; \quad C = \frac{1.75d}{(150\varepsilon)^{0.5}};$$

$$B = (1 - f) \times 10^9; \quad \rho_m = 999.972 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

$$T_m = 4.029325, \quad g = 1.894816, \quad \omega = 9.297173 \times 10^{-6} \quad (13)$$

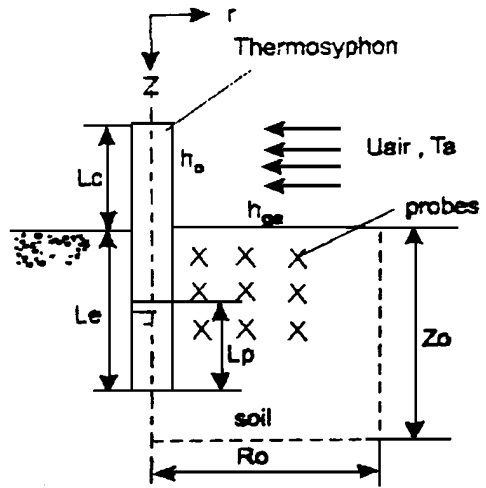


图1 物理模型

能量方程

$$\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho c_l (u \frac{\partial T}{\partial z} + v \frac{\partial T}{\partial r}) = k_{eff} (\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}) + \rho \Delta h \frac{\partial f}{\partial \tau} \quad (5)$$

$$\rho = [f \rho_{cl} + (1-f) \rho_{cs}] + (1-f) \rho_p, \quad (6)$$

$$k_{eff} = [f k_l + (1-f) k_s] + (1-f) k_p \quad (7)$$

以上方程,描述了土壤中水分迁移的过程以及土壤中温度场变化的规律等热质传递的过程^[13]对土壤散热的主要传热元件——热管,根据其特定的用途,作如下假设^[13]

- 1) 热管冷凝段内的工质液膜流动为层流,且不考虑蒸汽流动的影响;
- 2) 热管内的蒸汽呈饱和态,且温度均匀分布;
- 3) 埋入地下的热管蒸发段分为两个部分,即液膜部分和液池部分,在液膜部分,液流为层流,且其温度等于蒸汽温度或饱和温度,在液池部分,其饱和温度沿轴向随水力静压的变化而变化^[13]

对于热管内部的换热规律,采用以下公式,分别计算热管内部冷凝段的冷凝换热系数、液膜蒸发换热系数和液池沸腾换热系数^{[7,8][13]}

冷凝换热系数

$$h_c \left(\frac{\dot{V}/g}{k_l} \right)^{1/3} = (4/3)^{4/3} \text{Re}_c^{-1/3} \quad (8)$$

其中

$$\text{Re}_c = \frac{4q_c L_c}{\lambda_l} \quad (9)$$

液膜蒸发换热系数

$$h_f \left(\frac{\dot{V}/g}{k_l} \right)^{1/3} = (4/3)^{4/3} \text{Re}_f(z)^{-1/3} \quad (10)$$

其中

$$\text{Re}_f(z) = \frac{4q_e(L_e - z)}{\lambda_l} \quad (11)$$

液池沸腾换热系数

$$\frac{h_p d_i}{k_l} = 14.45 \left(\frac{d_i q_e}{\lambda_l} \right)^{0.39} Pr^{0.75} \left(\frac{\rho}{\rho_g} \right)^{0.2} \left(\frac{H_p^* L_e}{d_i} \right)^{0.12} \quad (12)$$

其中

$$H_p^* = \frac{H_p}{L_e} = (1.59 F^{0.95} \text{Re}_f^{-0.35} H_l^{*0.37} + 1) H_l^*; \\ H_l^* = H_p / L_e; \quad (13a, b, c, d)$$

$$F = \frac{4q_e L_e}{\rho_g \lambda_l} [1.53 [\sigma (\rho - \rho_g) / \rho_g]^{0.25}];$$

$$\text{Re}_f = \frac{4q_e L_e}{\lambda_l} \quad (13)$$

热管周围土壤温度的变化或冻结过程,主要决定于热管的散热量大小,对于两者间的传热耦合,采用以下数学描述,

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = h_c (T_s - T_{we}) \quad (14)$$

其中

$$T_{we}(z) = T_s(z) + q_e \left(\frac{\delta A_{ei}}{k_w A_{em}} + \frac{1}{h_e} \right), \quad (15)$$

$$T_s(z) = \begin{cases} T_v, & \text{对液膜部分} \\ f [P(T_v) + \rho g(z - L_e + H_p)] & \text{对液池部分} \end{cases} \quad (16)$$

$$h_e = \begin{cases} h_f, & \text{对液膜部分} \\ h_p & \text{对液池部分} \end{cases} \quad (17)$$

土壤的初始值以及土壤和热管、土壤和系统其它界面的边界条件,是根据被研究对象的实际情况和模型的有关假设来确定的^[13]

初始值

当 $\tau=0$ 时 $T=T_o(z)$, $u=0$, $v=0$

其中 $T_o(z)$ 为土壤不同深度的初始温度^[13]

边界条件

$z=0$ 时 $k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = h_{ga}(T - T_a)$, $u=0$, $v=0$

$z=\infty$ 时 $T=T(\infty)$, $u=0$

$z > L_e$, 且 $r=0$ 时 $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$, $v=0$

$z \leq L_e$, 且 $r=R_o$ 时 $T=T_{we}(z)$, $u=0$, $v=0$

$r=\infty$ 时 $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$, $v=0$

以上数学描述、初始及边界条件构成了热管和土壤冻结耦合传热完整的数学模型,它描述和反映了埋设热管后,土壤的温度场分布规律、土壤的冻结过程、冻结界面的形成和移动的变化规律、土壤中水分迁移和变化的规律以及土壤中其它热质传递的现象和规律^[13]

1.2 数值计算方法

对于上述数学模型中的传热控制微分方程式(1)~(5),其数值计算方法采用有限差分法,将方程化为通用方程的离散形式,并用 SIMPLE 算法进行计算^[9,10]^[13]

数值计算中,对于能量方程(5)中每个节点的含液率 f ,由于受温度场变化的影响,在每次叠代后须对其进行修正^[13]

$$f = f^0 + \left(\sum a_{nb} T_{nb} + a_p^0 T_p^0 - a_p T_p \right) / \left[\epsilon_r \Delta \tau \left(\rho \Delta h \Delta V \right) \right] \quad (15)$$

f 的值域为 $0 \leq f \leq 1$, 故当 $f < 0$ 时,令 $f = 0$, 当 $f > 1$ 时,令 $f = 1$ ^[13]

由于能量方程中的源项,即潜热项 $\rho \Delta h \frac{\partial f}{\partial \tau}$ 并没和动量方程直接耦合,因此,在数值计算中,除了保证其质量平衡外,还须对能量平衡进行监控,以保证运算结果的合理性,对于每一时间步长,能量平衡的方程为,

$$\left| \frac{Q_r - Q_b}{Q_r} \right| < 10^{-3} \quad (16)$$

其中

$$Q_r = \int_0^{f_o} \int_0^{f_o} \left[\rho c (T - T^0) + \rho \Delta h (f - f^0) \right] r dr dz;$$

$$Q_b = Q_w + Q_s + Q_a,$$

Q_w, Q_s, Q_a 分别为热管输出的热量、下边界的热量以及地表面和环境间的换热量^[13], Q_r 为土

壤所释放出的热量^[13]

根据数学模型的离散形式以及相关处理,用 SIMPLE 算法,编制计算机程序,程序框图如图 2 所示^[13]

2 计算结果及分析

根据我国东北哈尔滨地区的土壤特性、气象条件等数据,模型中有关变量的值如表 1 所示,总的计算时间长度为 90 天(从立冬到立春),这期间为土壤冻结期,热管仅在冻结期内起作用^[13]对于不同的地区,可通过调整变量值进行计算^[13]

分析中,为了观察土壤冻结界面的移动规律,本文定义,土壤中的水分在 0℃时开始冻结,凡小于或等于 0℃的区域为冻结区,冻结区和非冻结区的界面为冻结界面^[13]

在图 3 中,根据计算结果以及埋设热管现场的实测数据,描绘了该地区土壤冻结界面的移动规律^[13]随着时间的变化,不仅靠近地表面的冻结区增厚,而且热管周围土壤的冻结区也增厚,冻结区向深度伸展^[13]而无热管布置时,冻结过程仅发生在靠近地表面处,冻结界面与地表面呈平行^[13]显然,布置热管后土壤冻结区的范围更大,且冻结区还形成了一个比较稳定的楔状结构,它对冻胀力起到一定的抑制作用^[13]从图 3 中冻结界面的变化规律以及相同时刻的冻结界面位置来看,计算值和实测值所反映的趋势基本一致^[13]

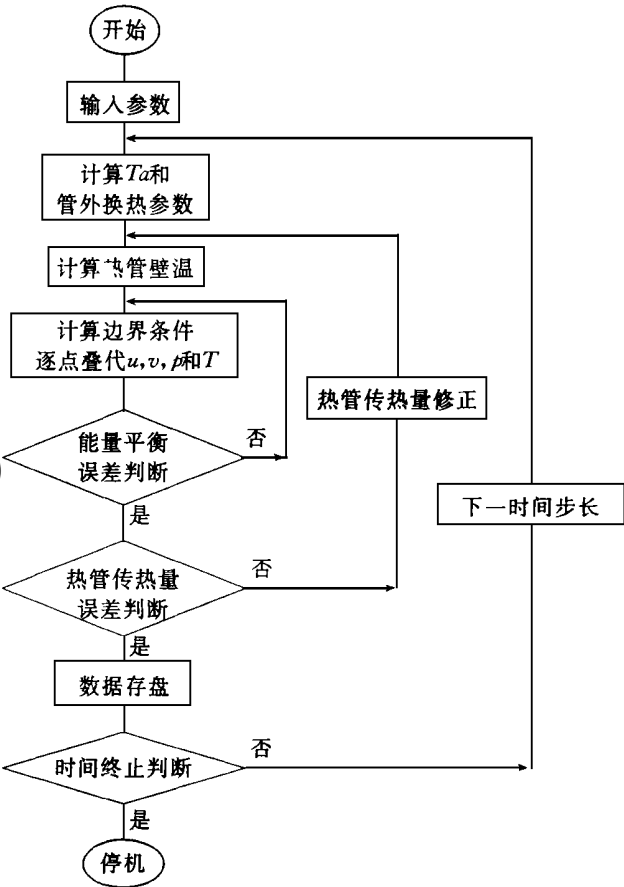


图 2 计算机框图

表 1 主要变量的值

变量名称	符号	单位	值	变量名称	符号	单位	值
热管蒸发段长度	L_e	m	2.7	热管内径	d_i	m	0.054
热管冷凝段长度	L_c	m	1.0	环境对流换热系数	h_{ga}	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	8.5
蒸发段肋高	L_n	m	0.02	平均风速	U_{air}	m/s	2.89
冷凝段肋高	L_{f2}	m	0.05	土壤颗粒直径	d	m	0.002
蒸发段直肋片数	n_{f1}		2	土壤孔隙度	ϵ	%	51.1
冷凝段肋间距	s_f	m	0.025	计算时间步长	$\Delta \tau$	hr	6
肋片厚度	δ	m	0.003	热管外径	d_o	m	0.06

说明:环境温度根据有关气象资料,按不同的时间段线性处理^[13]

埋设热管后,土壤温度场的变化规律如图 4 所示⁽¹³⁾对于同一土壤深度 z , 距热管径向距离 r 不同的点, 其温度变化也不尽相同, 靠近热管点(如 $r=0.25$) 的温度下降速度较快, 远离热管点的温度变化较慢, 且当 $r \gg R_{\max}$ 时, 土壤温度场的变化基本不受热管的影响⁽¹³⁾因而, 在同一深度和同一时刻, 土壤的温度分布不再为一水平等温面, 而与热管间距离的远近出现一个温度梯度(温差), 这样, 对同一深度的土壤来讲, 在同一时刻处在冻胀温区 4°C 左右的区域就小, 即土壤的冻胀区较小⁽¹³⁾对于不同深度的土壤, 由于温度的初始值不同, 对应各深度, 相同径向点的温度变化率也不尽相同(如图 4 所示)⁽¹³⁾因此, 热管的作用, 使土壤的温度场发生了很大的改变, 而这种改变使得土壤的温度在任一时刻处于冻胀温区的范围减小, 从而有效地削弱了由于土壤冻胀而产生的破坏强度⁽¹³⁾这也正是热管解决土壤冻胀的主要机理之一⁽¹³⁾

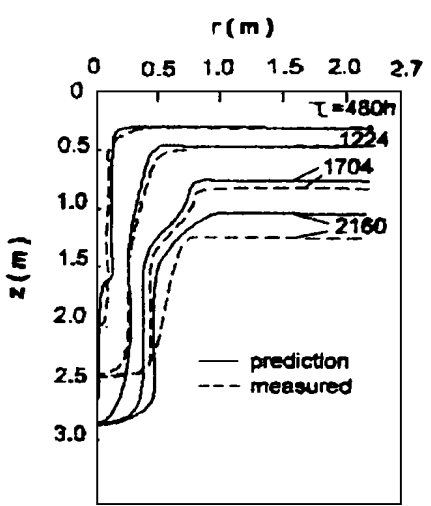


图 3 冻结界面的变化

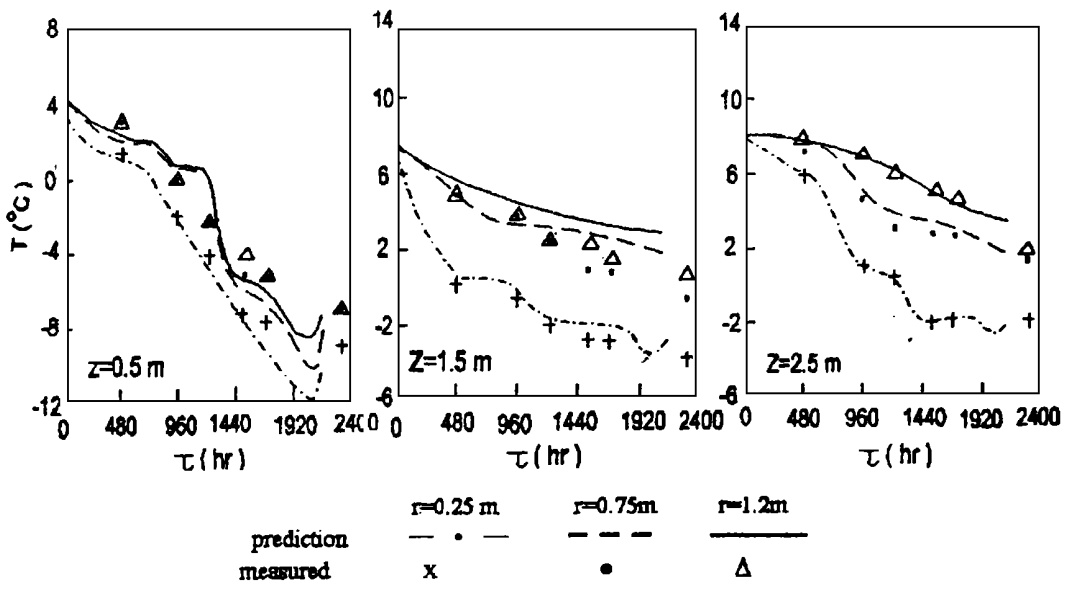


图 4 温度场的变化规律

3 设计及应用依据

如上所述,土壤埋设热管后,土壤的温度场及冻结过程发生了改变,且这种改变有效地抑制土壤的冻胀发生⁽¹³⁾然而,热管的作用范围是有限的,只有确定了热管的作用范围,才可能合理地、有效地布置热管,因而,确定热管的作用范围,是热管应用的主要依据⁽¹³⁾本文根据数值计算

结果,把立春这天沿热管径向的最大冻结半径定义为热管的有效作用半径(r_f)^[13]显然,在有效作用半径以内,热管可起到对地基的保护作用^[13]

在热管布置时,一般要求数根热管的有效作用半径尽量地能包围或覆盖地基的水平截面积,并以此确定热管的根数、热管之间以及热管和地基间的距离,如图 5 所示^[13]热管沿地基周向布置的越多,其冻结范围就越大,基础的稳定性相应就越好,但过多密集地布置热管,势必会增加工程的投资费用,而从技术上来讲,也是没有意义的^[13]相反,热管布置的太少,又难以有效地抑制土壤的冻胀,从而造成基础的稳定性减弱甚至遭受破坏^[13]故而,因视具体的应用对象,根据土壤特性、气象条件以及地基的结构等,由模型计算得到热管的有效作用半径,并以此为依据,确定热管的几何参数^[13]合理地规划和布置热管,以求达到技术性和经济性的统一^[13]

同时,应用模型的计算结果,可对已有的热管用于保护地基的工程项目进行校核,以判断该项目的合理性;还可对该地区恶劣的气象条件以及特殊的土壤环境进行预测,以制定预防措施^[13]

4 结 论

根据我国东北地区的地质特征及水文气象条件,针对热管解决土壤冻胀问题,建立了热管与饱和水土壤的耦合传热模型,模型的计算结果与实测值基本吻合^[13]分析认为,热管抑制土壤冻胀的作用机理主要为:

- 1) 热管改变了土壤的温度场,缩小了土壤的冻胀区;
 - 2) 热管周围所形成的冻结区,构成了一个稳定的楔状,抑制了由冻胀而产生的上拔力^[13]
- 热管的有效作用半径是热管布置和应用的依据^[13]

参 考 文 献

- 1 范长富,宋文华等^[19]热管技术在电力设施冻土基础上的应用,第四届全国热管议论文集,1994,366~370
- 2 S L Braga, R Viskanta, Transient natural convection of water near its density extremum in a rectangular cavity. *Int J Heat and Mass Transfer*, 1992, 35(4), 861~875
- 3 A Sasaki, S Aiba, S Fukusako. Numerical Study on Freezing heat Transfer in Water-saturated Porous media *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1990, 18, 17~32
- 4 Y X Tao, D M Gray. Numerical investigation of infiltration to frozen soil. *Proc 4th Int. Symp on Thermal Engineering & Science for Cold Regions*, 1993, 263~274
- 5 C Z Wu, W B Gu, Y C Hu. coupled Heat Transfer of a Two-phase Closed Thermosyphon with Solidification. *Proc of 2nd Int. Symp on cold Regions Heat Transfer*, 1989, 183~188
- 6 C Z Wu, W B Gu. Heat Transfer Predication of Two-phase Closed Thermosyphon with Freezing. *Proc of 4th Int. Symp on cold Region Heat Transfer*, 1993, 219~297

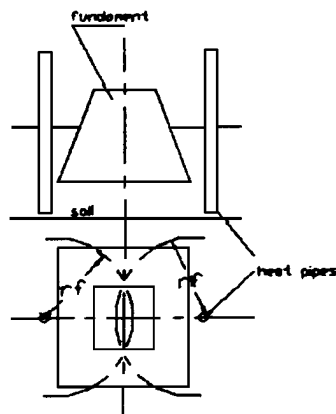


图 5 热管布置图

- 7 He Jialun, Ma Tongze, Zhang Zhengfang. Heat Transfer Characteristics in the Evaporator Section of a Two-phase Closed Thermosyphon. BP-6, 8th Int. Heat Pipe Conf
- 8 He Jialun, Ma Tongze, Zhang Zhengfang. Investigation of Boiling Liquid Pool Height of a Two-phase Closed Thermosyphon. B-24 ibid
- 9 M Lacroix, V R Voller. Finite Difference Solution of solidification Phase Change Problem: Transformed versus Fixed Grids. Numerical Heat Transfer. Part B, 1990, 17: 25~41
- 10 S V Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1980

Numerical Investigation and Application Research on the Freezing Expansion of Soil Solved by the Heat Pipe in the Cold Region

Pan Yang

(Civil Engineering Department)

Abstract In this paper, numerical investigations have been carried out to show that the freezing expansion of soil can be solved by the heat pipe. In combination with the initial conditions and boundary conditions, and by using the finite-difference method and the SIMPLE programs, numerical results are derived for the model. The predictions of the study are in good agreement with the data measured for the soil temperature distribution. According to the results of the model, some mechanisms of the freezing expansion solved by the heat pipe are analysed, and some design foundations are provided for the application of the heat pipe.

Key words heat pipe; soil; freezing expansion; freezing; coupled heat transfer