

饱和土冻结透镜体生长过程水热耦合分析

周扬, 周国庆, 周金生, 王建国

(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. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对饱和土一维冻结过程中出现的冰透镜体, 从水热耦合的角度建立了描述其生长过程的模型。利用固体表面水膜的热力学理论分析了冻土中未冻水膜厚度及其流动的控制因素, 引入等效压力的概念, 指出主动区内的水流可以看作等效压力控制下的达西流, 并以此为基础建立了主动区内的新水热耦合模型; 透镜体的生长表现为主动区水热耦合过程中透镜体底端在分离压力作用下的抬升及负等效压力作用下的吸水, 对这两种作用的分析表明, 冻结缘的存在是非高胶质性土壤在无压补水条件下活动透镜体生长的必要前提。分别进行了冻胀敏感性土的连续冻结及控制冻深的间歇冻结试验, 以两组试验中末透镜体的生长过程验证了模型及计算的正确性。结果表明: 模型很好的反应了两组试验中末透镜体的生长过程; 间歇冻结模式在间歇阶段锋面退化, 冻结缘消失导致末透镜体生长停止, 其生长曲线呈台阶型, 冻胀由于末透镜体发育较差而受到一定抑制。最后对冻结模式的优化设计以控制冻胀的技术问题进行了进一步的探讨。

关键词: 冻结技术; 冻胀; 冰透镜体; 水热耦合; 间歇冻结; 冻胀控制

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0578-08

作者简介: 周扬(1982-), 男, 江苏扬州人, 博士研究生, 从事矿山建设、冻土物理学方面的研究。E-mail: tod_king@126.com。

Ice lens growth process involving coupled moisture and heat transfer during freezing of saturated soil

ZHOU Yang, ZHOU Guo-qing, ZHOU Jin-sheng, WANG Jian-zhou

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A model is developed to describe one-dimensional growth process of ice lens during freezing of saturated soil. Main factors controlling thickness and movement of unfrozen liquid film in frozen soil are analyzed by use of the thermodynamic theory for the liquid layer near a substratum. Water movement in the active zone is dealt with as Darcy flows controlled by a new concept called equivalent pressure, and a new model of coupled moisture and heat transfer is constructed based on it. The mechanism of ice lens growth process is studied, and the concurrence of uplifting effect caused by disjoining pressure and suction effect controlled by equivalent pressure during coupled process in active zone is indicated. The existence of frozen fringe is regarded as the indispensable condition for active lens growth in non-highly-colloidal soil with no pressure in supply water. Tests on continuous freezing and intermittent freezing are conducted for frost susceptible soil, and experimental results of final ice lens growth in both tests are used to testify the model and computation. The study shows that the calculated results are in agreement with the observation; and for the intermittent freezing, the disappearance of frozen fringe during the intermittent stage prevents the growth of final lens, thus the frost heave is partially controlled because of the deficient growth of final lens. Finally, problems about optimizing cold end temperature in order to control the frost heave are discussed.

Key words: freezing technology; frost heave; ice lens; coupled moisture and heat transfer; intermittent freezing; frost heave control

0 引 言

人工冻结技术对含水、不稳定地层进行加固具有适应性强、可靠性高、无污染、设备简单、技术经济、效果好等优点, 该技术目前已在国内外得到广泛的应

用^[1], 由于地层冻结问题的普遍性及重要性, 对其进

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534040); 国家自然科学基金项目(40471021); 国家科技计划重点项目(2006BAB16B01)

收稿日期: 2009-01-06

行深入研究十分有意义。

冻结法技术在工程应用中,有许多基础理论及技术问题远没有解决,冻胀问题便是其中之一,冻结施工过程中,过量的冻胀使得地表产生不均匀变形,破坏邻近建筑物及设施,造成了巨大的经济损失,甚至影响到工程的成败。

人们对于冻胀问题的研究已有近百年,自 Harlan 提出土壤冻结的水热耦合模型^[2]以来,冻胀的数学模型成为了冻土学领域的一个研究热点,已经建立的模型可以分为两类,一类侧重于计算土壤冻结过程中温度场、水分场及应力场,这类主要包括水热耦合模型、水热力耦合模型^[3]、热力学模型^[4]等;另一类则侧重于描述冻胀的基本特征—透镜体的形成及生长过程,该类包括离散透镜体模型^[5-6]、分凝势模型^[7]、刚性冰模型及其变形^[8-9]等。

土壤冻结过程中透镜体的产生和发展对冻胀起决定性作用,因而后一类机理模型对解决与冻胀相关的理论及工程问题显得更为重要,然而,目前这一类冻胀机理模型的研究还不成熟,许多模型如多孔多相介质模型^[10]、混合物模型^[11]等引入了复杂的理论来建立模型,但缺乏对透镜体演变规律的深入分析,刚性冰模型是描述冻胀机理较为完备的模型,但仍然有一些问题如透镜体的形成、刚性冰的假设等值得商榷,总体而言,关于冻胀机理的认识及冻胀机理模型的建立还需深入。

本文主要分析当分凝温度变化时活动透镜体的生长过程,而暂时不研究透镜体的形成问题。这种仅以透镜体生长规律为研究对象的模型最早由 Konrad 提出,即为描述末透镜体生长稳态阶段的分凝势模型^[7],文献[12]采用一系列稳态代替透镜体生长的实际过程,建立了透镜体生长的广义准静态模型。本文则针对透镜体生长的一般瞬态过程,建立描述该过程的数学模型,采用有限容积法对模型进行数值分析,并与实验结果对比验证模型的正确性,最后对采用变冷端温度的方式(即不同冻结模式)控制冻胀的工程问题进行探讨。

1 模型建立思路

如图1所示,为土壤自上而下一维冻结过程中,活动透镜体出现后的土柱结构图,图中阴影部分为活动透镜体,其底端与冻结锋面之间为冻结缘,这一区域由 Miller^[13]首先发现并提出。

文献[14]中试验表明,活动透镜体以上区域内水分迁移较弱,这一区域被称为被动区,而活动透镜体底端至土柱暖端区域被称为主动区^[7]。被动区所经历

的是一个近似导热过程,土柱冷端温度的变化通过这一过程影响了透镜体底端的分凝温度,本文所研究的是已知分凝温度变化的情况下,在新透镜体出现之前,当前活动透镜体如何生长。随着分凝温度的变化,主动区经历的是一个典型的水热输运过程,活动透镜体正是伴随该过程生长的,因此对透镜体生长过程的认识可以从主动区水热耦合的角度进行。

当冰、水、气三相共存时,从理论上分析主动区内的水热耦合与透镜体的生长存在相当的困难,因而本文研究对象与刚性冰模型相同为刚性孔隙饱和土,刚性孔隙表明不考虑冻结缘内的原位冻胀,而饱和土则简化了相界面的理论分析。下面首先引入固体表面吸附水膜的热力学理论,以此为基础建立主动区内的新水热耦合体系,然后分析透镜体的生长过程。

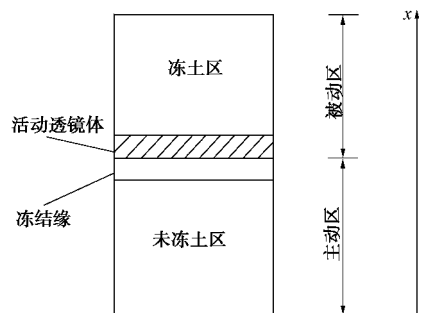


图1 土柱结构图

Fig. 1 Structure of soil sample

2 模型理论体系

2.1 固体表面水膜热力学理论

Gilpin^[5, 15-16]对固体表面的吸附水膜进行了热力学分析,下面作简要介绍。如图2所示,在固体表面(土颗粒壁面)的液态水膜将受到固体的吸引力作用,这种力包括双电层力、分子间的范德华力等等,与溶液中的水分子相似,固体表面水膜由于这种吸引力造成其单位吉布斯自由能的降低。

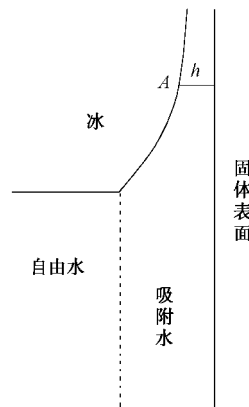


图2 固体表面水膜

Fig. 2 Liquid film near a substrate

于是与壁面垂直距离 y 处吸附水的自由能可以表示为

$$G_L = G_{L0} + v_L P_{Ly} - s_L T_L - g(y) \quad (1)$$

式中 $g(y)$ 为固体壁面对该处自由能的影响, 在自由水中该值为 0; G_{L0} 为参考态的自由能; v_L, s_L 分别为吸附水及参考态水的比容及比熵 (忽略其差别); P_{Ly}, T_L 分别为吸附水压力及温度相对值。

仅考虑非高胶质性土壤^[8], 即存在自由孔隙水的情形, 并以当地自由水作为未冻结区的参考态, 利用吸附水膜与自由水自由能相等, 并忽略越过水膜时相对温度 T_L 的变化, 简单推导得到

$$P_{Ly} = g(y) / v_L \quad (2)$$

式(2)表示的是在吸附水膜内压力相对值随 y 的变化。

在冻结区, 不考虑壁面对固态冰的作用, 则固态冰中的单位吉布斯自由能为

$$G_S = G_{S0} + v_S P_S - s_S T_S \quad (3)$$

式中 G_{S0} 为参考态自由能; v_S, s_S 分别为冰的比容及比熵; P_S, T_S 分别为冰压力及温度相对值。

为了推导方便, 冻结区中未冻水膜及冰的参考态均选择为标准态, 该状态下有

$$G_{S0} = G_{L0} \quad (4)$$

描述冰、水相界面力学平衡的 Laplace 方程为

$$P_S - P_{Lh} = s_{SL} \bar{K} \quad (5)$$

式中 P_{Lh} 为相界面上 (如图 2 中 A 点) 水膜相对压力; s_{SL} 为相界面表面张力; \bar{K} 为相界面曲率, 凸向液态侧时为正。

于是在冰、水界面处应用相平衡条件, 并利用式 (4)、(5) 整理后得到

$$g(h) = -\Delta v P_{Lh} - v_S s_{SL} \bar{K} - LT / T_a \quad (6)$$

式中 h 为局部未冻水膜厚度; $\Delta v = v_S - v_L$; T_a 为 273.15 K。该式表示的是局部未冻水膜厚度的影响因素。

利用未冻水膜内部与相界面处自由能相等, 得到类似式 (2) 的关系:

$$P_{Lh} - g(h) / v_L = P_{Ly} - g(y) / v_L \quad (7)$$

以上所给出的是相平衡所要满足的条件, 在冻结区沿着固体壁面方向, 还将发生未冻水膜的流动, 假设该流动的形式为压差作用下的哈根-泊素叶流, 则流量由 dP_{Ly} / dx 决定, 再利用关系式 (7) 得到

$$q = -k_f d[P_{Lh} - g(h) / v_L] / dx \quad (8)$$

式中 q 为流量; k_f 为流量导湿系数; x 为沿壁面方向。该式表明未冻水膜的流动由相界面压力及水膜厚度决定。

2.2 新水热耦合体系

定义等效水压力 (统一相对标准大气压) 为

$$P = P_0 + P_{Lh} - g(h) / v_L - P_{am} \quad (9)$$

式中 P_0 是 2.1 节中的参考态压力, 在未冻土区中为当地孔隙水压力, 在冻土区中为标准大气压; P_{am} 为标准大气压。

在未冻土区中由式 (2) 及定义式 (9) 容易看出等效水压力即为孔隙水压力; 而在冻土区中, 等效水压力由冰水相界面处 P_{Lh} 及局部未冻水膜厚度 h 决定。等效水压力的物理意义是与之处于相平衡状态的自由水的压力, 即若将某处的水与等温自由水直接相连, 达到平衡状态时的自由水压力即为该处的等效水压力。结合式 (8) 可知, 活动透镜体生长过程中主动区内的水分流动可以视为等效水压力作用下的达西流。

确定了水分流动的描述方式, 由主动区内的水分守恒得到 (未考虑重力)

$$\frac{\partial}{\partial x} [k \frac{\partial P}{\partial x}] = \frac{\partial q_u}{\partial t} + \frac{r_i}{r_w} \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad (10)$$

式中 $k = K / r_w g$, K 为流速导湿系数, m/s; P 为等效水压力, Pa; q_u 为体积含水率; q_i 为体积含冰量; r_w, r_i 分别为水、冰密度, kg/m³; x 为空间坐标 (向上为正), m; t 为时间, s。

主动区热量守恒方程为

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (I \frac{\partial T}{\partial x}) + L r_i \frac{\partial q_i}{\partial t} \quad (11)$$

式中 C_v 为土壤体积热容, J/(m³·K); I 为导热系数, W/(m·K); L 为相变潜热, J/kg; T 为温度, °C。

由刚性孔隙饱和土可以得到

$$q_u + q_i = n \quad (12)$$

式中, n 为孔隙率。

在冻土区中由式 (6) 及式 (9) 可以得到

$$-\Delta v P - v_S s_{SL} \bar{K} - LT / T_a = v_S g(h) / v_L \quad (13)$$

式 (13) 表明未冻水膜厚度取决于温度 T 、等效水压力 P 以及相界面曲率 \bar{K} 。其中 \bar{K} 主要受土颗粒外形影响, 变化较小, 且式 (13) 表明 h 对 \bar{K} 的变化不敏感, 于是可以忽略在冻结过程中 \bar{K} 的变化对 h 影响。式 (13) 中系数表明 T 升高 1°C 与 P 增加 $L / (T_a \Delta v)$ Pa 对 h 的影响是等价的, 在宏观上表现为对未冻水含量 q_u 的影响等价, 于是常压下的冻结特性曲线在考虑压力影响后的变化为

$$q_u = q_u (T + \frac{\Delta v T_a}{L} P) \quad (14)$$

式中, $q_u(\cdot)$ 表示常压下的冻结特性曲线函数。

式 (10) ~ (12)、(14) 构成了活动透镜体生长过程中主动区内的水热耦合方程体系, 主动区温度为第一类边界条件, 土柱暖端一般为无压补水条件, 此时 P 为 0, 下面推导透镜体底端 P 所满足的条件。

图 3 为活动透镜体底端附近示意图, 当该处土体为冻结状态时, 在底端相界面 ABC 上 (宏观一维计算

时被视为平面), 将式 (6) 代入 P 的定义式 (9) 得到

$$P = \frac{v_s}{v_L} (P_{Lh} + s_{SL} \bar{K}) + \frac{LT}{T_a v_L} = \frac{v_s}{v_L} P_s + \frac{LT}{T_a v_L} \quad (15)$$

式中后一个等号是将透镜体向上的运动过程视为了准静态过程而应用了拉普拉斯方程式 (5)。

无外荷载条件下透镜体底端 $P_s = 0$, 此时有

$$P = \frac{LT}{T_a v_L} \quad (16)$$

式 (16) 表明在考虑土颗粒吸引力作用时, 透镜体底端克拉贝隆方程的形式仍然是适用的, 此时的水压力为等效压力 P , 因此以上建立的体系与以往描述透镜体生长稳态的分凝势模型^[7]、准稳态的广义准静态模型^[12]是兼容的。

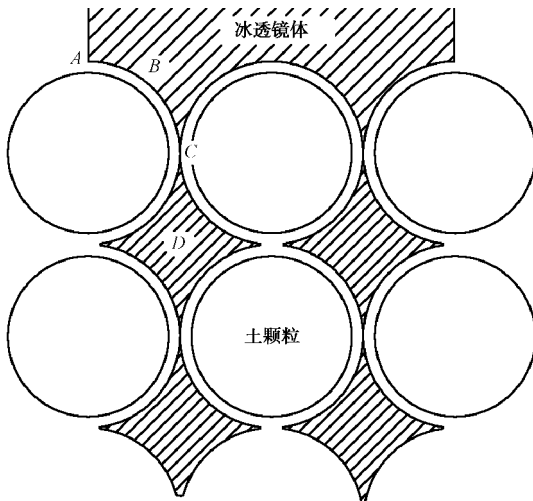


图3 活动透镜体底端附近示意图

Fig. 3 Schematic diagram near base of active ice lens

2.3 透镜体的生长过程

活动透镜体的生长可以看作主动区内水热耦合过程中在透镜体底端同时产生的抬升作用及吸水冻结作用, 抬升作用由透镜体底端相界面上 (如图3中ABC) 的压力 P_{Lh} 产生, 该压力在文献[17]中被称为分离压力, 是两个物体表面相互接近时, 由于表面区域内流体相的重叠所产生的对两个物体的分离作用, 类似于重力场中物体向水中下沉时所受到的浮力; 吸水作用由透镜体底端的等效压力 P 产生, 式 (16) 表明, 透镜体底端处于冻结状态时, 将会产生负的等效压力, 在此负压作用下水分从主动区向透镜体底端迁移, 这种流动类似于重力场中水分从高处流往低处, 而 P 起到了流动势的作用, 迁移到透镜体底端多余的水分由于相平衡作用又凝固成冰, 从而产生了透镜体的生长, 其生长速度由式 (17) 确定:

$$V_H = -k \frac{r_w}{r_i} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=x_b} \quad (17)$$

式中, V_H 为透镜体生长速度, x_b 为透镜体底端坐标。

在透镜体生长过程中, 吸附水膜起到了很重要的作用, 同时产生了透镜体生长所需要的正压及负压。当分凝温度变化, 透镜体底端退化为非冻结状态时, 冻结缘消失, 此时冻胀类型由第二类转变为第一类。由于式 (16) 用到了冻结区相界面条件式 (6), 因而不适用于此时的非冻结状态, 由 P 的定义, 此时的等效压力即为孔隙水压力; 另一方面, 由于透镜体底端与孔隙水相连 (不考虑高胶质性土), 此时相界面上的压力也为孔隙水压力。透镜体的生长需要在其底端同时产生抬升作用及吸水作用, 前者需要有正压, 后者需要有负压 (仅考虑无压补水), 孔隙水无法同时满足这两个条件, 因而此时不能产生透镜体的生长, 此时透镜体底端为封闭水流边界。因此, 对于非高胶质性土壤, 冻结缘的存在是无压补水时透镜体能够生长的重要前提。实际上, 不仅透镜体的生长, 透镜体的产生过程也必须由吸附水膜完成, 文献[18]中砂土冻结过程中的排水就是因为孔隙水无法同时产生推开土层及吸水两种作用, 因而只能被排出土体, 考虑透镜体反复产生及生长过程的完整冻胀模型将另文再述, 本文仅讨论其中的一个环节, 即透镜体的生长过程。

笔者所描述的透镜体生长过程不同于刚性冰模型, 区别在于图3中D处孔隙冰行为。刚性冰模型^[8]认为D处孔隙冰通过复冰机制向上移动, 其速度与其上活动透镜体相同, 两者构成一刚性整体, 这也是刚性冰概念的由来; 而笔者并未考虑这种复冰机制, 因而D处的孔隙冰被视为静止, 它与透镜体的连接处C被视为断裂, 仅活动透镜体向上生长, 文献中分凝势模型^[7]、离散透镜体模型^[5-6]等由于未考虑复冰机制, 其透镜体均是以这种断裂冰方式生长的。

3 模型数值分析、试验对比及讨论

3.1 有限容积离散格式

将式 (12) 代入式 (10)、(11) 中, 并利用式 (14) 将 q_u 的变化率用 P, T 的变化率表示, 整理后得到

$$\begin{cases} a_{11} \frac{\partial P}{\partial t} + a_{12} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (I \frac{\partial T}{\partial x}), \\ a_{21} \frac{\partial P}{\partial t} + a_{22} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial P}{\partial x}), \end{cases} \quad (18)$$

式中系数分别为: $a_{11} = r_i \Delta v T_a q'_u$, $a_{12} = C_v + L r_i q'_u$, $a_{21} = (r_w - r_i) \Delta v T_a q'_u / L r_w$, $a_{22} = (r_w - r_i) q'_u / r_w$ 。

应用有限容积法^[19]对模型进行数值分析, 采用外节点方式均匀网格划分主动区, 自土柱暖端至透镜体底端节点依次为 $1 \sim N$, 对于其中节点 i 的控制容积, 由式 (18) 得到离散方程

$$c_{11} T_{i-1}^{n+1} + c_{12} T_i^{n+1} + c_{13} P_i^{n+1} + c_{14} T_{i+1}^{n+1} = c_{15} \quad (19)$$

$$c_{21}P_i^{n+1} + c_{22}T_i^{n+1} + c_{23}P_i^{n+1} + c_{24}P_{i+1}^{n+1} = c_{25}, \quad (20)$$

式(19)~(20)中系数:

$$\begin{aligned} c_{11} &= -I_s \Delta t / \Delta x^2, \quad c_{12} = a_{12} + (I_n + I_s) \Delta t / \Delta x^2, \quad c_{13} = a_{11}, \\ c_{14} &= -I_n \Delta t / \Delta x^2, \quad c_{15} = a_{11} P_i^n + a_{12} T_i^n, \quad c_{21} = -k_s \Delta t / \Delta x^2, \\ c_{22} &= a_{22}, \quad c_{23} = a_{21} + (k_n + k_s) \Delta t / \Delta x^2, \quad c_{24} = -k_n \Delta t / \Delta x^2, \\ c_{25} &= a_{21} P_i^n + a_{22} T_i^n. \end{aligned}$$

其中 Δx , Δt 分别为空间及时间步长, 下标“s”, “n”表示在控制容积界面上的物性参数^[19]。

3.2 试验及计算参数

试验仪器为中科院冻土工程国家重点实验室三端制冷冻融循环试验箱, 试验系统包括制冷系统、温控系统、补水系统、数据采集系统等, 文献[20]中有详细介绍。试验选用冻胀敏感性土, 表1为土体颗粒分析结果, 土样配至饱和, 含水率约30%, 干密度为1.45~1.51 g/cm³。试样均制成高13.0 cm, 直径10.1 cm的圆柱体。

表1 土样颗粒分析

Table 1 Results of particle size analysis

粒径/ μm	>63	63~50	50~20	20~10	10~5	5~2	2~1
百分比/%	1.65	34.4	7.9	10.95	12.65	22.55	9.9

对试样在开放系统(马廖特瓶无压补水)、无荷载条件下进行了自上而下的连续冻结及间歇冻结试验, 在每组试验进行前, 土样均以+6℃预冷, 待温度稳定后, 将底板温度(暖端)统一恒定于+6℃, 调节冷端温度进行试验。对于连续冻结模式, 冷端温度设置于-12℃, 直至试验结束; 间歇冻结模式下, 开始阶段仍然采用-12℃连续冻结, 在冻结锋面到达预定冻深6.0 cm附近时, 分别以-0.5℃和-12℃交替冻结, 使试样的冻结锋面始终在预定冻深±0.3 cm的范围内波动。

两组试验进行总时长为2500 min, 在冻结初始阶段, 锋面推进较快, 此阶段不断形成新的冰分凝, 而当锋面稳定后, 末透镜体开始生长, 本文利用两组试验中末透镜体的生长过程考察2节中模型的适用性, 下面给出单值性条件及计算参数。

图4为两组试验末透镜体分凝温度变化的实测值, 即为主动区内的冷端温度边界条件, 其中连续冻结模式主动区长度5.7 cm, 间歇冻结模式主动区长度为7.4 cm。

图5为两组试验计算初始时刻主动区内的温度场试验值, 而对于压力初始值, 由于较高负压的存在测试较为困难, 由式(19)、(20)等号右侧 c_{15} , c_{25} 的组成可知, n 时刻压力1 MPa对 $n+1$ 时刻变量的影响仅相当于温度约0.09℃, 而两组试验计算初始时刻末透镜体底端负压均不超过1 MPa, 这说明初始时刻负压较小, 对以后时间步发展的影响不大, 因此不妨假设

计算初始时刻压力分布为稳态。

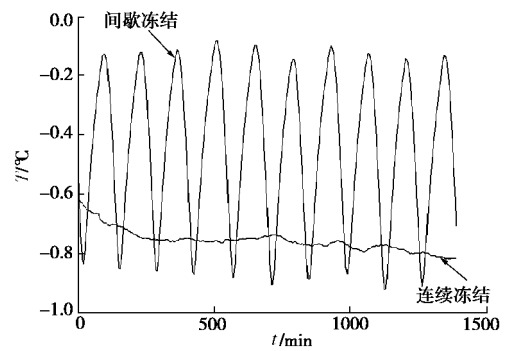


图4 两组中末透镜体分凝温度试验值

Fig. 4 Segregation temperature of final ice lens

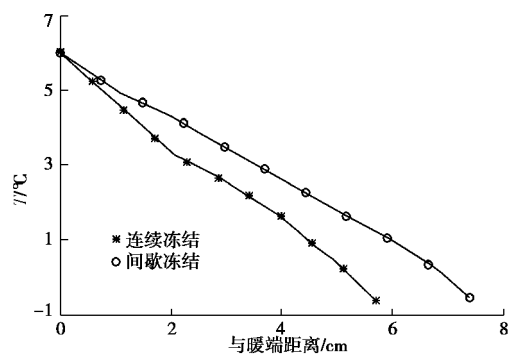


图5 主动区温度场计算初始值

Fig. 5 Initial temperature conditions in active zone
未冻水含量 q_u 与温度 T 之间关系为^[6, 21]

$$q_u = \frac{r_d}{100r_w} \exp(0.2618 + 0.5519 \ln S + 1.4495S^{-0.2640} \ln|T|), \quad (21)$$

式中, r_d 为土体干密度, S 为比表面积, 计算时按式(14)考虑了压力影响。

饱和土导湿系数采用修正Campbell公式^[21]计算:

$$K_u = 4 \times 10^{-5} \left(\frac{0.5}{1 - q_{sat}} \right)^{1.3(d_g^{0.5} + 0.2s_g)} \exp(-6.88m_{cl} - 3.63m_{si} - 0.025) \quad (\text{m/s}). \quad (22)$$

式中 q_{sat} 为饱和体积含水率; m_{cl} , m_{si} 为黏土及粉土质量分数; d_g , s_g 分别为土体颗粒几何平均粒径及标准差。

冻结缘内的导湿系数按文献[8, 9]的建议取为

$$K_f = K_u \left(\frac{q_u}{q_{sat}} \right)^9. \quad (23)$$

导热系数采用几何平均公式进行计算^[8-9]:

$$I = I_i^{q_i} I_u^{q_u} I_s^{q_s}. \quad (24)$$

式中 I_i 为冰的导热系数, 2.32 W/mK; I_u 为水的导热系数, 0.58 W/mK; I_s 为土骨架的导热系数, 参考文献[22]取为0.82 W/mK; q_s 为土骨架体积含量。

土体的热容参数公式^[22]:

$$C_v = [C_s + w_i C_i + w_u C_u] r_d \quad (25)$$

式中 C_s , C_i , C_u 分别为土骨架、冰及水的比热; w_i , w_u 分别为冰及未冻水质量含量。

3.3 结果对比及讨论

由 3.1 节中离散方程式 (19)、(20) 及 3.2 节中初、边值条件计算两组试验主动区内的水热耦合过程, 透镜体底端压力边界在冻结状态时为式 (16), 此时透镜体生长速度由式 (17) 的离散格式确定; 而当透镜体底端处于未冻结状态时, 此时冻结缘不存在, 由于试验条件为无压补水, 2.3 节中分析指出此时透镜体生长停止, 该处为封闭水流边界。

图 6 为两组试验末透镜体生长过程模型计算值与试验值的对比, 从图中可以看出, 两者吻合较好, 模型基本很好的反应了两组试验中末透镜体的生长过程。

试验及数值结果均表明, 两种冻结模式下最终末透镜体生长特性存在较大差异, 连续冻结模式下末透镜体生长速度基本稳定, 其生长曲线呈近似直线型; 而间歇冻结模式下, 间歇过程导致其末透镜生长曲线中出现了许多较长持续时间的无退化且无生长的平台, 其生长曲线呈台阶型, 末透镜体平均生长速度相对于连续冻结模式减小显著。

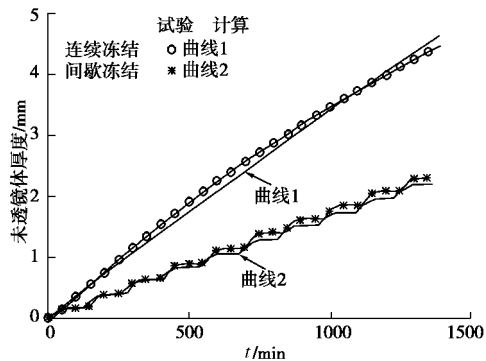


图 6 末透镜体生长计算值与试验值对比

Fig. 6 Comparison between calculation and observation of final ice lens growth

文献[12]对这两种冻结模式下末透镜体生长的差异性进行过分析, 所采用的方法是将末透镜体的实际生长过程简化为由一系列稳态组成, 建立了描述透镜体准稳态生长的模型, 当模型参数及几何尺寸确定时, 透镜体生长速度将由其分凝温度唯一决定, 图 7 中 BAO 为描述这一关系的定性曲线, 图中 T_1 正向为温度降低的方向, O 点温度为 0°C , 其右侧正温区会发生透镜体的退化, 产生融沉作用。当分凝温度 T_1 在负温区降低时, 由于透镜体底端抽吸力的增大, 其生长速度沿 OA 线增加; 随着分凝温度进一步降低, 冻结缘水阻力增大占了主导地位, 此时透镜体生长受抑制,

其生长速度沿 AB 线降低。文献[12]中利用这一生长特性曲线分析了间歇冻结过程中末透镜体的生长, 指出间歇阶段末透镜体分凝温度持续升高, 其生长速度沿 AO 线降低, 末透镜体生长被抑制。文献[12]中的认识并不能很好的解释间歇冻结末透镜体生长曲线中出现的无退化且无生长的平台 (如图 6), 在前文 2.3 节中分析了透镜体的生长过程, 指出了无压补水条件下, 冻结缘的存在对活动透镜体生长的必要性, 因此考虑到透镜体生长的必要条件后, 应将其生长特性曲线近似修正为图 7 中的曲线 $BACDO$, 图中 T_{cr} 为冻结缘消失时的临界温度, 实际并非恒定值, 与土性及冻结缘变温路径有关。模型计算与试验结果的吻合表明, 间歇冻结末透镜体生长曲线中出现的“平台”, 正是分凝温度变化进入 DO 段后冻结缘消失所造成的活动透镜体生长的停止。

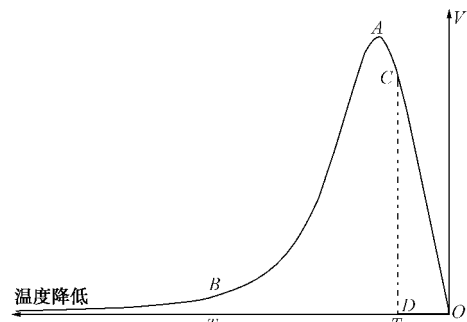


图 7 透镜体生长定性曲线

Fig. 7 Qualitative growth curve of ice lens

冻胀研究一个重要目的是为了有效控制冻胀, 下面简要分析控制冻深的间歇冻结模式对冻胀的抑制作用。Konrad 试验表明^[23]锋面推进较快时, 将不产生明显冻胀, 从图 7 中透镜体生长特性曲线也可以看出, 此时形成的透镜体分凝温度沿 AB 线迅速降低, 透镜体生长被抑制, 控制冻深的间歇冻结模式, 在初始阶段为快速连续冻结, 因而产生了较小冻胀量 (文献[24]中有报道); 达到预定冻深后, 采用间歇的方式促使锋面退化, 冻结缘消失导致末透镜体生长停止, 由于进一步间歇会产生末透镜退化及相应的融沉作用, 影响冻结壁强度, 这里冻结壁强度与冻胀控制之间存在着矛盾, 因而采取了“冻结—间歇”交替的方式控制锋面变化, 最终造成末透镜体呈台阶式生长, 从而冻胀发展受到抑制。

对透镜体生长过程的深入分析, 将利于更有效的控制冻胀, 实际上在初始阶段以快速冻结的方式达到预定冻深后, 监测确定末透镜体位置, 适当提高冷端冻结管温度而不采用完全的间歇, 使冻结锋面退化至冻结缘恰好消失而不过多弱化, 则保证冻结壁强度与

抑制冻胀之间将不存在矛盾,能够同时实现,这方面冻结模式的优化设计及大量试验验证工作仍在进行之中。

4 结论与展望

(1) 针对饱和土一维冻结过程中出现的冰透镜体,建立了描述其生长过程的模型,模型主要包括主动区内的水热耦合及透镜体的生长过程两个方面,采用有限容积法对模型进行了数值分析,与室内试验结果进行了对比,验证了模型的正确性。

(2) 控制冻深的间歇冻结模式,其末透镜生长曲线呈台阶型,因而其总体生长与传统连续冻结模式相比受到抑制;对活动透镜体生长过程的分析表明,在非高胶质性土壤中,冻结缘的存在是无压补水条件下活动透镜体生长的必要前提,间歇冻结末透镜体台阶型生长曲线中出现的平台正是由于间歇阶段锋面退化,冻结缘消失所导致的活动透镜体生长的停止,这也是间歇冻结方式抑制冻胀的机理。

(3) 冻结过程中主动区土体骨架的变形可以通过对孔隙率及有效应力之间本构关系作适当假设后得到;Gilpin对吸附水膜的热力学分析是将冰压力作为“静水压力”处理的,存在较高外荷载时,需要考虑冰所处的实际应力状态进行修正,然后可以建立描述外荷载作用下的透镜体生长过程的模型,这两方面的推广均无实质性困难。

(4) 对冻结模式的优化设计以抑制冻胀的问题进行了进一步的探讨,指出在初始阶段以快速连续冻结的方式达到预定冻深后,监测确定末透镜位置,适当提高冷端冻结管温度而不采用完全的间歇,使冻结锋面退化至冻结缘恰好消失,则保证冻结壁强度与控制冻胀将能够同时得以实现,相关的理论计算及试验验证工作正在进行之中。

参考文献:

- [1] 陈瑞杰,程国栋,李述训,等.人工地层冻结应用研究进展和展望[J].岩土工程学报,2000,22(1):40-44.(CHEN Rui-jie, CHENG Guo-dong, LI Shu-xun, et al. Development and prospect of research on application of artificial ground freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 40-44. (in Chinese))
- [2] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [3] SHEN M, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14: 237-246.
- [4] FREMOND M, MIKKOLA M. Thermomechanical modeling of freezing soil[C]// Ground Freezing'91. Rotterdam, Balkema, 1991: 17-24.
- [5] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980, 16: 918-930.
- [6] NIXON J F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28: 843-859.
- [7] KONARD J M, MORGENSTERN N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17: 473-486.
- [8] O'NEIL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281-296.
- [9] 曹宏章,刘石,姜凡,等.饱和颗粒土一维冰分凝模型及数值模拟[J].力学学报,2007,39(6):848-857.(CAO Hong-zhang, LIU Shi, JIANG Fan, et al. The theoretical study on frost heave for saturated granular soil-numerical simulation of 1-ice segregating model based on equilibrium of force and phase[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(6): 848-857. (in Chinese))
- [10] 陈飞熊,李宁,程国栋.饱和正冻土多孔多相介质的理论框架[J].岩土工程学报,2002,24(2):213-217.(CHEN Fei-xiong, LI Ning, CHENG Guo-dong, The theoretical frame of multi-phase porous medium for the freezing soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 213-217. (in Chinese))
- [11] 苗天德,郭力,牛永红,等.正冻土中水热迁移问题的混合物理论模型[J].中国科学(D辑),1999,29(增刊1):8-14.(MIAO Tian-de, GUO Li, NIU Yong-hong, et al. Modeling on coupled heat and moisture transfer in freezing soil using mixture theory[J]. Science in China (Series D), 1999, 29(S1): 8-14. (in Chinese))
- [12] 周扬,周国庆,张琦.土体冻胀透镜体生长的广义准静态模型研究[J].中国矿业大学学报,2008,37(3):333-338.(ZHOU Yang, ZHOU Guo-qing, ZHANG Qi. Expanded quasi-static model of ice lens growth during frost heave[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 333-338. (in Chinese))
- [13] 李萍,徐学祖,陈峰峰,等.冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J].冰川冻土,2000,22(1):90-95.(LI Ping, XU Xue-zu, CHEN Feng-feng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(1): 90-95. (in Chinese))

- [14] MAGEAU D W, MORGENSTERN N R. Observations on moisture migration in frozen soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, **17**: 54 - 60.
- [15] GILPIN R R. A model of the "liquid-like" layer between ice and a substrate with applications to wire regelation and particle migration[J]. J Colloid Interface Sci, 1979, **68**(2): 235 - 251.
- [16] GILPIN R R. Theoretical studies of particle engulfment[J]. J Colloid Interface Sci, 1980, **74**(1): 44 - 63.
- [17] DERJACUIN B V, CHURAEV N V. On the question of determining the concept of disjoining pressure and its role in the equilibrium and flow of thin films[J]. J Colloid Interface Sci, 1978, **66**(3): 389 - 398.
- [18] MCROBERTS E C, MORGENSTERN N R. Pore water expulsion during freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1975, **12**: 130 - 139.
- [19] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. (TAO Wen-quan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese))
- [20] 商翔宇. 冻土冻胀与冻结模式关系的试验与数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004. (SHANG Xiang-yu. Test and numerical simulation research on relation between frost heave and freezing mode in frozen soil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2004. (in Chinese))
- [21] VLODEK R T, BERNHARD W. On the prediction of hydraulic conductivity of frozen soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**: 176 - 180.
- [22] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Physics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [23] KONARD J M, MORGENSTERN N R. Effects of applied pressure on freezing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, **19**: 494 - 505.
- [24] 周金生, 周国庆, 马巍, 等. 间歇冻结控制人工冻土冻胀的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, **35**(6): 708 - 712. (ZHOU Jin-sheng, ZHOU Guo-qing, MA Wei, et al. Experimental research on controlling frost heave for artificial frozen soil by intermission freezing method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, **35**(6): 708 - 712. (in Chinese))

《岩土工程纵横谈》介绍

《岩土工程纵横谈》作者: 苗国航; 书号: 978-7-114-07557-5; 定价: 50.00 元; 页码: 309 页。

本书荟萃了 34 位岩土工程专家, 钱正英、沈珠江、郑守仁、黄熙龄、孙钧、钱七虎、王思敬、王梦恕、张在明、冯叔瑜、刘宝琛、陈梦熊、刘广志、郑颖人、陈祖煜、李广信、顾宝和、张苏民、张悼元、谢定义、龚晓南、程良奎、王吉望、刘金砺、侯学渊、张旷成、杜嘉鸿、高大钊、殷宗泽、林宗元、史佩栋、欧晋德、陈斗生、莫若楫, 近 50 篇富含哲理和智慧

的访谈、专题文章, 以及他们的小传, 阐述了大师们弥足珍贵的经验和思想方法, 以及他们的岩土人生, 读来必有启迪。

这本书包括三部分内容, 除了专家小传和一部分专家学者

撰写的论文之外, 很大一部分便是《岩土工程界》对专家和大师访谈的记录, 接受访谈和参与撰文的院士有 15 位, 国家工程勘察大师 4 位, 还有一些大家公认的著名学者教授。书中内容丰富, 涉及岩土行业政策变革、新技术发展趋势、重大工程技术成果、理论研究创新、人才培养、成就事业之道、为人的修炼, 等等。书中既有对几十年来历史的反思, 又有真诚的告诫和对未来的展望。

这本书里没有生硬的说教, 有的是利用生动的实例诠释深奥的道理, 有的是探索学科的发展道路, 有的是和大家一起讨论治学方法乃至人生的真谛, 充满了“艺术”的思考。

本书值得所有岩土工程师一读。

(人民交通出版社 供稿)