

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.09.015

# 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究

魏厚振, 周家作, 韦昌富, 陈 盼

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 改变边界温度和土样高度, 对饱和粉土进行了冻结试验, 研究其水分迁移、水分重分布、冻胀和冰透镜体的发展规律。试验结果表明: 当温度稳定时, 水分持续迁移到冻结锋面附近, 含水率急剧增大, 易形成冰透镜体。饱和粉土冰透镜体几何形态较为规则, 无枝状交叉结构, 已冻土为整体状且无网状裂隙。冻结过程中存在起始冻胀时间, 在起始冻胀时间之前, 土中水分被排出, 冻胀发生之后水分补给到冻土中, 且补给水分产生的冻胀量和总冻胀量数值接近。土样高度影响水分迁移量和冻胀量, 土样越高, 冻胀量越小, 冻土含水率增量越小, 但水分增量分布区域越分散, 且起始冻胀时间越长。

**关键词:** 冻土; 饱和粉土; 水分迁移; 冻胀

**中图分类号:** TU 445

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2016) 09 - 2547 - 07

## Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil

WEI Hou-zhen, ZHOU Jia-zuo, WEI Chang-fu, CHEN Pan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Freezing tests are conducted on saturated silty soil samples with different boundary temperatures and heights to study water migration, water redistribution, frost heave and ice lens. The experimental results shows that, when temperature becomes steady, water keeps on migrating to freezing front and water content increases sharply near the freezing front and ice lens forms. The geometry of ice lenses in saturated freezing silty soil is regular without dendritic structure and frozen soil has massive structure without network of cracks. There is a starting time for frost heave, before which the water in soil is drained by the sudden freezing of the super-cooled soil water. When the frost heave occurs water from outside supplies to the soil sample and the frost heave amount due to water inlet approximates to the total frost heave. The height of soil sample influences water migration and frost heaving amount. A higher soil sample has smaller frost heaving amount and less water content while water increment distributes more diffuse and the starting time for frost heave is longer.

**Keywords:** frozen soil; saturated silty soil; water migration; frost heave

## 1 引 言

有充分水源补给的细颗粒土在冻结过程中, 未冻区的水分迁移到冻土区冻结, 导致土体产生冻胀。正冻土中的水分迁移可以导致季节性冻土以及人工冻土发生变形甚至破坏<sup>[1-3]</sup>。冻土内的水分重分布还改变了土中各组分的比例, 进而影响了土的物理力学性质<sup>[4-5]</sup>。伴随着水分迁移过程, 冻土层内通常会

形成一系列不连续的分凝冰层即冰透镜体, 它改变了土的内部结构。当冻土融化时, 这些不连续分布的冰透镜体往往成为土体中的软弱结构面, 影响到土体的稳定性<sup>[6-7]</sup>。

自 20 世纪初以来, 众多学者对冻土水分迁移问题进行了广泛而深入的研究。Taber<sup>[8-9]</sup>首先发现了冻胀并非是因为水冻结成冰, 使体积膨胀产生的, 而是由于外界的水源迁移到冻土内导致显著的冻胀

收稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家重点基础研究计划 (973) 项目课题 (No.2012CB026102); 国家自然科学基金项目 (No. 41572295, No. 51239010); 中国科学院青年创新促进会项目 (No.2015272)。

This research was supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2012CB026102), the National Natural Science Foundation of China (41572295, 51239010) and the Youth Innovation Promotion Association of CAS (2015272).

第一作者简介: 魏厚振, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事含天然气水合物土、冻土以及粗粒土工程力学特性方面的研究工作。E-mail: hzwei@whrsm.ac.cn

发生。Harlan<sup>[10]</sup>将土在冻融过程中液态水的变化与非饱和土脱吸湿进行类比,根据水动力学原理,采用 Richards 方程形式的控制方程描述水分迁移,该方程以未冻水梯度作为水分迁移驱动力。在描述冰透镜体生长的刚冰模型中,冻土中水分被认为以重复分凝的形式发生迁移<sup>[11]</sup>。预融动力学 (premelting dynamics) 原理认为,冰水之间的热分子力 (thermomolecular pressure) 推动着孔隙冰的整体移动,使得土体中水分重分布<sup>[12]</sup>。徐学祖等<sup>[13]</sup>对冻土中水分迁移机制、影响因素以及水分迁移过程中的冷生现象等方面进行了系统研究。陈肖柏等<sup>[14]</sup>系统阐述了土在冻结过程中的水分迁移和冻胀的影响因素以及冻胀对工程的影响及其防治措施。赵刚等<sup>[15]</sup>改变初始含水率和温度模式,对原状土进行了一系列试验,研究了单个因素对水分迁移的影响。

本研究依据一系列饱和粉土的冻胀试验,分析其冻结过程中的冷生构造的特点,研究了冻土冻胀产生的时间和条件,对比分析了水分迁移和冻胀的变化趋势和相互关系,并研究了不同高度的冻土样水分重分布特点。

## 2 试验设备、方法和材料

将高度为 55~135 mm 的粉土样放入直径为 100 mm 的圆柱形有机玻璃筒中,侧面由保温材料隔热。顶板和底板由铜制成,通过低温恒温槽循环液控制温度。试验时底板为负温,顶板保持正温,形成从下往上冻结的一维温度场。通过热电偶测得沿着土样高度的温度,热电偶间距为 1 cm,通过顶板的电子尺测得总的冻胀量。顶板有补水孔与外界水源连通,通过人工记录补进的水量乘以水冻结成冰体积增大系数,即可以计算出补水冻胀量。恒水头补水装置较多地使用马氏瓶,为了避免马氏瓶读数不精确、补水反应不灵敏的缺点,本研究采用一种圆形盘管式补水装置,其实物图见图 1。将内径为 4 mm、外径为 6 mm 的塑料管盘绕成环形水平放置,其表面标记有刻度,最小刻度长度为 1 cm,先将塑料管中充满水,一端与冻胀仪进水口相连,另一端与大气相通,实现恒水头补水,通过管中水-气界面读数则可以计算出补水量。试验表明,该补水装置精度较高,计算的水质量最小误差为 0.03 g。

本文试验用土取自黄河冲击平原粉土,其液限为 29%,塑限为 17%,冻结温度为 $-0.2^{\circ}\text{C}$ ,试样干密度为  $1.6\text{ g/cm}^3$ ,初始含水率控制在约 24%,饱和



图1 盘式补水管

Fig.1 Curled tube for supplying water

度约 90%。前人已做较多边界温度恒定的冻胀试验研究,由于冻胀速率与温度梯度和冻结速率有关系<sup>[14]</sup>,因此,本研究改变边界温度进行试验,可以同时改变温度梯度和瞬态冻结速率。另外,试验表明,当温度稳定时,在冻结锋面处易于形成冰透镜体。为了使土样形成多层冰透镜体,本文采用了阶梯型变化的边界温度条件。对高度为 55 mm 土样进行了 10 次试验:在编号为 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup>的试验中,通过调整不同边界温度研究温度梯度和冻结速率对冻胀量和冷生结构的影响;在编号为 S1~S3 的试验中,边界温度条件保持不变,冻结时间分别为 10、22、30 h,研究水分迁移的发展过程;为研究土样高度对冻结速率的影响,分别进行了高度为 75、95、115、135 mm 的试验,编号为 H1~H4,研究在相同温度边界条件下土样高度对水分迁移的影响。

在伴随着水分迁移的冻结过程中,温度梯度引起水分迁移并冻结释放潜热,而且冻胀导致土样高度增大,因此,理论上不存在绝对的稳态温度场。本文中的温度稳定是指边界温度恒定,水分迁移速率趋于恒定,此时冻结锋面上升速率等于冻胀速率,温度梯度变化率很小。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 饱和粉土的冷生构造

在 1<sup>#</sup>~7<sup>#</sup>试验中,均出现了冰透镜体,限于篇幅,本文仅给出 1<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>两种典型结果以示说明。1<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>试验的边界温度条件如图 2(a)、2(b)所示,相应的得到了不同形式的冰透镜体分布,如图 3(a)、3(b)所示。由图 2、3 可以发现,保持边界温度恒定且温度场稳定时,冻土中形成冰透镜体,当边界温度阶梯型变化时,土中形成一系列不连续的冰透镜体层状构造。

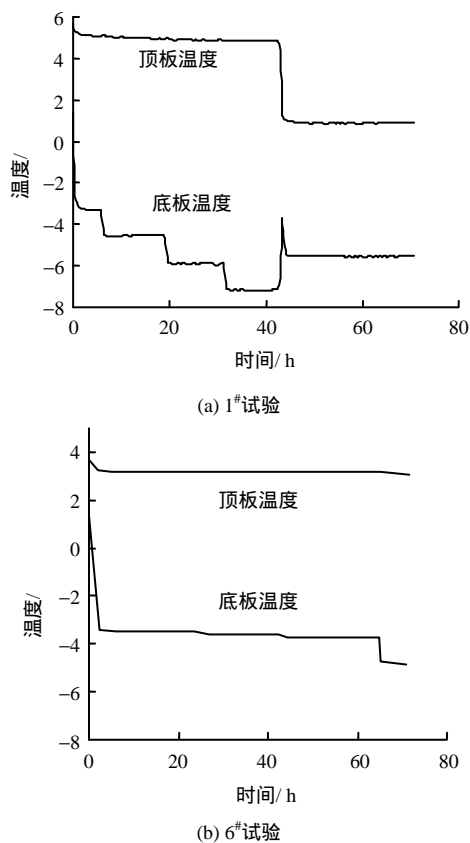


图 2 边界温度随时间变化曲线  
Fig.2 Boundary temperature vs. time

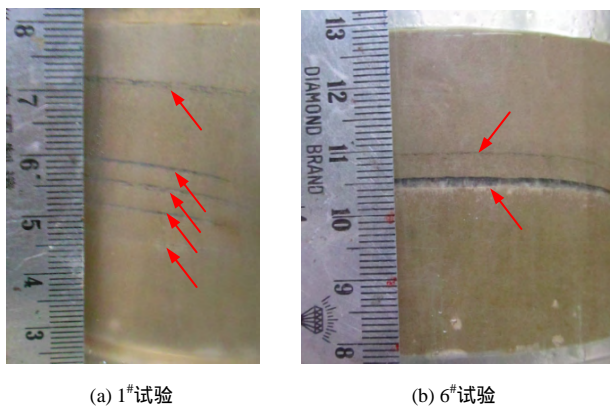


图 3 冻结后的土样(箭头指向为冰透镜体)  
Fig.3 Soil sample after freezing (the arrows point to the ice lenses)

不同于黏土或者粉质黏土在冻结过程中形成网状裂隙和互相交错的分凝冰层<sup>[14-15]</sup>，粉土在冻结后的形成比较整齐的冷生构造：冰透镜体比较平整，无交叉现象，冻土中没有出现网状裂隙。可以用一种简单的方法估算饱和粉土冰透镜体的位置和厚度<sup>[16]</sup>。假设水分迁移只是聚集在冻结锋面附近的狭窄区域，根据冻胀速率和冻结速率计算出不同位置的含冰量分布：

$$\theta_i(X_f) = \theta_o + \frac{v\rho_i}{v_f\rho_w} \quad (1)$$

式中： $\theta_i$  和  $\theta_o$  分别表示冻结后的体积含冰量和初始体积含冰量； $v$  和  $v_f$  分别为水分迁移速率和冻结锋面移动速率； $\rho_i$  和  $\rho_w$  分别为冰密度和水密度； $X_f$  为冻结锋面位置。由于冻结锋面是移动的，根据式 (1) 计算结果可以绘制出冻土中含冰量分布图，如果计算的体积含冰量等于 1，即微小土单元中只有冰，则该处产生冰透镜体。1<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>试验的含冰量计算结果由图 4 给出，并显示了冰透镜体的位置和厚度，图中黑色横线表示冰透镜体。

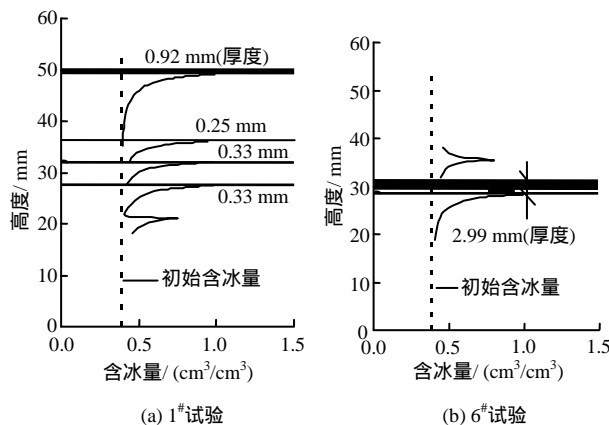


图 4 含冰量和冰透镜体计算结果  
Fig.4 Simulated ice content and ice lenses

### 3.2 冻胀与水分迁移

以 7<sup>#</sup>试验为例，图 5 给出了边界温度的变化曲线，图 6 给出了冻胀量和冻结锋面的变化曲线。对比图 5、6 可以看出，在 10 h 时，底板温度降低，冻结锋面迅速上升，冻土段长度增大，且冻胀量曲线陡增。在 13 h 时，底板温度升高并保持到 24 h，在这段时间内，冻结锋面下移，土样处于融化阶段，此时冻胀量不变，水分不再向冻土中迁移。

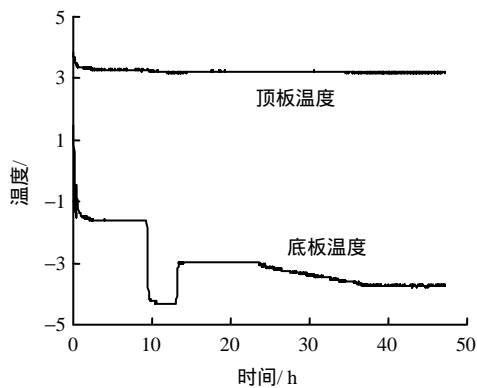


图 5 7<sup>#</sup>试验边界温度随时间变化曲线  
Fig.5 Boundary temperature vs. time in test #7

从图 6 中还可以看出，冻胀并不是从冻结开始就发生的，而是存在一个起始冻胀时间，在冻胀发

生之前,补水冻胀量为负值,表明土中水分被排出。当补水冻胀量降低到最小值时开始回升,说明此时水分被吸入到冻土中(此时宏观上没有冻胀产生);当吸入的水量等于排出的水量时即补水冻胀量恢复到0时,土体开始发生冻胀。

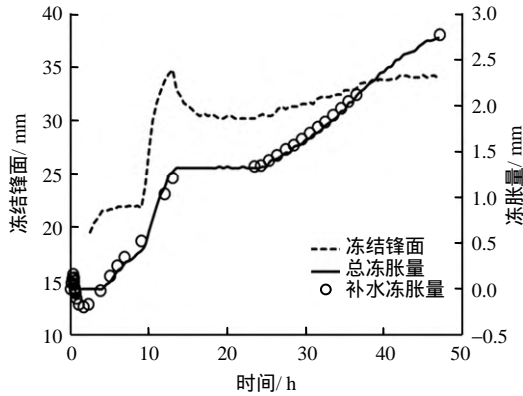


图6 7#试验冻胀量和冻结锋面随时间变化曲线  
Fig.6 Freezing front and frost heaving amount vs. time for test #7

前期研究显示,土在冻结过程中,首先处于过冷状态且温度低于冻结温度,当土从过冷态转变为冻结状态,温度发生突变,过冷土中局部冻结会导致全部过冷土迅速冻结。顶板与侧壁之间存在的摩擦力提供了一定的压力,由于初期冻土的快速冻结,导致未冻土被压缩,进而水分被排出。

另一方面,过冷结束到冻胀发生之前这段时间内,吸入土内的水体积等于该时间段内的平均水分流量与该时间段的乘积。

用开始冻胀时的水分迁移流量近似替代冻胀前的平均水分流量,根据排出的水量与吸入的水量相等可以得到:

$$X\theta(\rho_w/\rho_i - 1) = v_s(t_s - t_c)\rho_i/\rho_w \quad (2)$$

或

$$t_s = \frac{X\theta\rho_w(\rho_w - \rho_i)}{v_s\rho_i^2} + t_c \quad (3)$$

式中:  $X$  为过冷土长度;  $\theta$  为体积含水率;  $v_s$  为起始冻胀速率;  $t_c$  为过冷结束时间;  $t_s$  为起始冻胀时间; 此时  $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$  和  $\rho_i = 0.917 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_w/\rho_i$  即为水冻结体积增大系数。

根据 1# ~ 7# 的试验数据可以计算出起始冻胀时间,表 1 给出了 7 次试验的参数,并给出了计算和实测的起始冻胀时间的对比,  $t_{s1}$  和  $t_{s2}$  分别表示起始冻胀时间实测值和计算值。

表 1 各参数实测值和计算值

试验编号	$t_c$ / h	$X$ / mm	$v_s$ / (mm/h)	$t_{s1}$ / h	$t_{s2}$ / h
1#	0.200	3.790	0.136	1.900	1.240
2#	0.440	4.350	0.156	1.990	1.480
3#	0.230	6.400	0.122	3.800	2.190
4#	0.320	9.850	0.072	5.520	5.410
5#	0.300	9.250	0.161	2.770	2.450
6#	0.230	11.480	0.198	2.960	2.400
7#	0.330	11.430	0.101	4.350	4.550

### 3.3 冻土水分重分布特征

图 7 是试验编号为 S1 ~ S3 的土样在相同边界条件下冻结时间依次增大得到的含水率分布图。可以看到,在冻结区含水率增大,在未冻区含水率减小。在冻结锋面附近含水率变化最为明显。如果保持温度稳定,水分持续迁移到冻结锋面附近,在此处会形成冰透镜体,而已冻土中含水率变化较小。

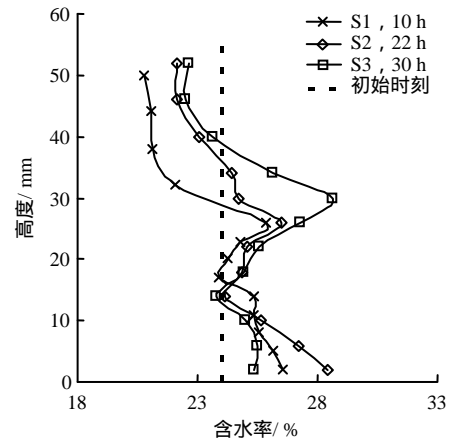


图 7 不同时间含水率分布

Fig.7 Water content distributions at different times

图 8 显示了土样编号为 H1 ~ H4, 高度分别为 75、95、115、135 mm 土样在试验过程中冻结锋面和冻胀量的变化情况。试验中土样顶板温度保持为 2.5, 对底板温度进行 3 级降温, 分别为 -3.0、-4.0、-5.0。由图可知, 随着土样高度增大, 冻结厚度增大, 因此, 冻结速率会相应的增大。冻胀量和冻胀速率随着土样高度增大而减小, H1 ~ H4 土样试验后的冻胀量分别为 3.76、3.37、2.47、1.31 mm。土样高度增大, 导致温度梯度降低, 进而降低了冻胀速率, 所以冻胀量随土样高度增大而减小。起始冻胀时间随着土样高度增大而延迟, 一方面是由于较高的土样中未冻土段较长, 产生较大的压缩量; 另一方面, 土样越高, 过冷结束至冻胀发生之前水分迁移速率较低。由于这两方面的原因, 根据式(3)可知, 起始冻胀时间随着土样增大而延迟。

图 9 是不同高度土样冻结前、后含水率分布曲

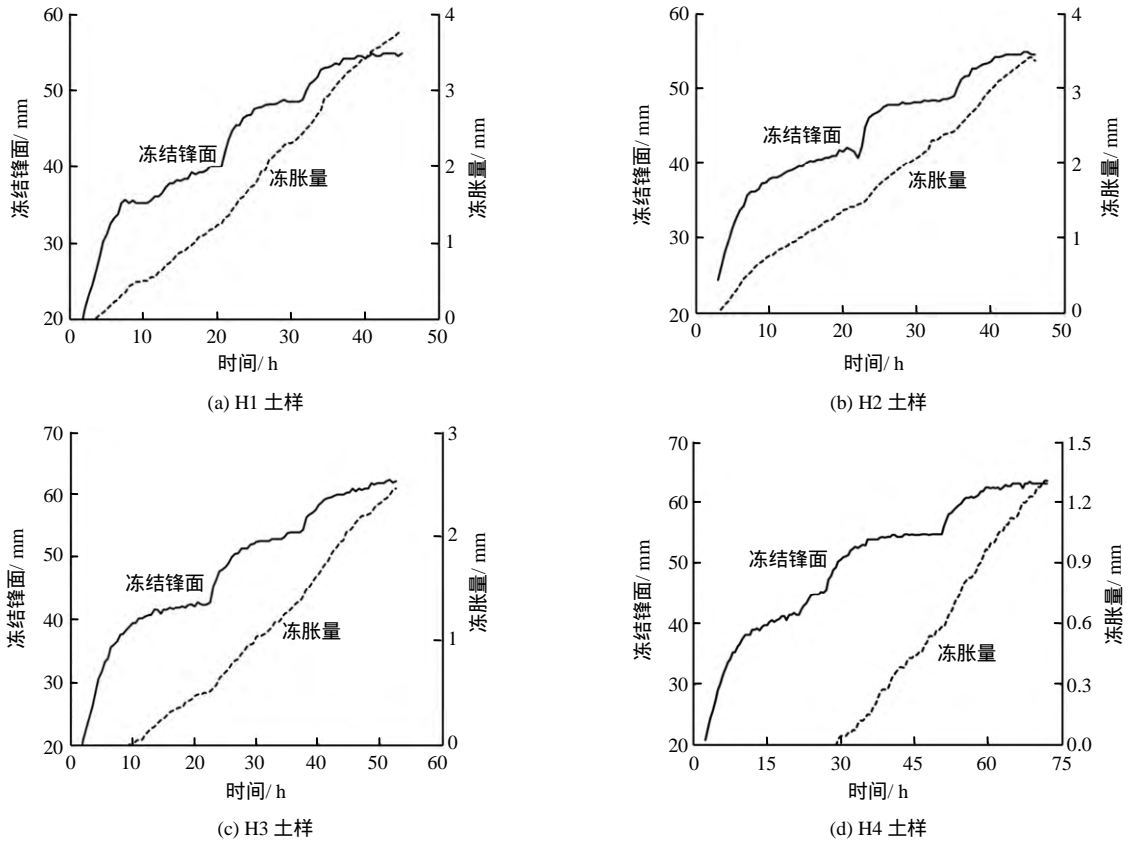


图 8 不同高度土样冻结锋面和冻胀量随时间变化曲线

Fig.8 Curves of freezing front-time and frost heaving amount-time for samples with different heights

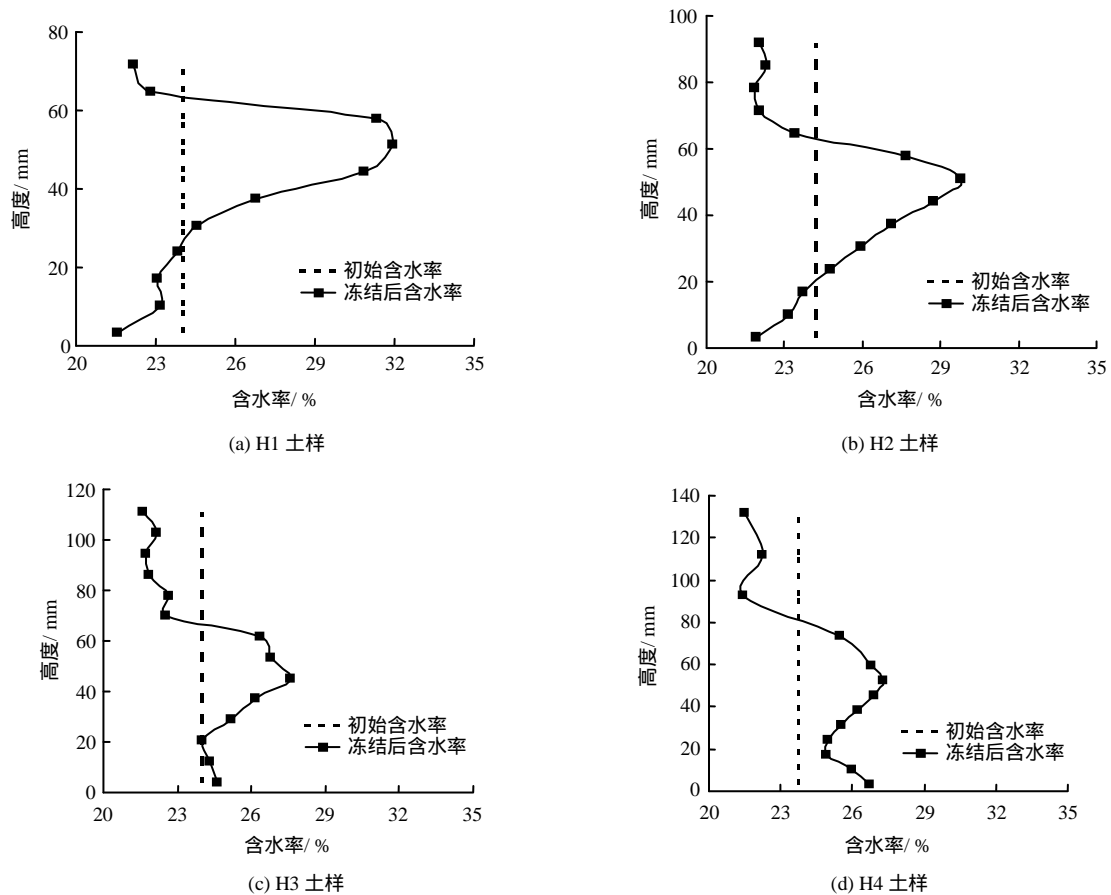


图 9 不同高度土样冻结前后含水率分布曲线

Fig.9 Curves of water content distribution for samples with different heights

线。从图中可以看出,在靠近底板的冻土段内含水率变化规律不确定,甚至可能小于初始含水率,再结合图 7 底板附近的含水率分布情况,可以发现这一区域内的含水率变化差异性较大。冻土段靠近底板附近,是土样最开始冻结的区域,温度梯度和冻结速率都较大,一方面温度梯度大,水分迁移较快;另一方面冻结速率大,则水分聚集在该部位时间较少,因此,容易引起较大的试验误差。结合图 8、9,冻土段内靠近冻结锋面处含水率增量最大,冻土内最大含水率随着土样增大依次减小,H1~H4 土样含水率最大值分别为 31.9%、29.8%、27.6%和 27.3%,这与图 8 中冻胀量的变化规律是一致的。从图 9 还可以看出,冻土中含水率增大的区域与土样高度的关系,在较长的土样中水分增量分布在较宽的区域,反之,则水分增量集中在较小的区域。

## 4 结 论

(1) 当温度稳定时,水分持续迁移到冻结锋面附近,形成冰透镜体。粉土冻结后冰透镜体形状规则、平整,无交叉,且冻结粉土中无网状结构。

(2) 在冻胀发生前,未冻土被压缩,导致土中水分被排出。冻胀发生后,总冻胀量几乎等于水分迁移产生的冻胀量。

(3) 冻胀量随着土样高度增大而减小,起始冻胀时间随高度增大而延迟。在靠近冷端附近的冻土含水率分布形态存在较大差异性,靠近冻结锋面处含水率增量最大。土样高度越大,含水率增大的区域越分散,反之则越集中。

## 参 考 文 献

- [1] 许健,牛富俊,牛永红,等. 换填法抑制季节冻土区铁路路基冻胀效果分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 1 - 7.  
XU Jian, NIU Fu-jun, NIU Yong-hong, et al. Analysis on the effect of replacing-soil method on inhibiting frost heave of railway roadbed in seasonal frozen soil region[J]. **China Railway Science**, 2011, 32(5): 1 - 7.
- [2] 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 of artificial frozen soil with intermission freezing method[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2006, 35(6): 708 - 712.
- [3] 程桦,姚直书,张经双,等. 人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(10): 80 - 85.  
CHENG Hua, YAO Zhi-shu, ZHANG Jing-shuang, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal ground freezing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(10): 80 - 85.
- [4] 李顺群,高凌霞,柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1173 - 1177.  
LI Shun-qun, GAO Ling-xia, CHAI Shou-xi. Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1173 - 1177.
- [5] 霍明,汪双杰,章金钊,等. 含水率和温度对高含冰量冻土力学性质的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1165 - 1172.  
HUO Ming, WANG Shuang-jie, ZHANG Jin-zhao, et al. Experimental study on influences of water content and temperature on mechanical properties of ice-rich frozen soil[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2010, 41(10): 1165 - 1172.
- [6] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [7] 盛岱超,张升,贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 504 - 605.  
SHENG Dai-chao, ZHANG Sheng, HE Zuo-yue. Assessing frost susceptibility of soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 504 - 605.
- [8] TABER S. Frost heaving[J]. **Journal of Geology**, 1929, 37(5): 428 - 461.
- [9] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. **Journal of Geology**, 1930, 38 (5): 303 - 317.
- [10] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. **Water Resources Research**, 1973, 9(6): 1314 - 1323.
- [11] O'NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. **Water Resources Research**, 1985, 21(4): 281 - 296.
- [12] REMPEL A W, WETLAUFER J S, WORSTER M G. Premelting dynamics in a continuum model of frost heave[J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2004, 498: 227 - 244.
- [13] 徐学祖,邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 120 - 121.  
XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental study on water migration in freezing and frozen soils[M]. Beijing: Science Press, 1991: 120 - 121.



- XIN Chun-lei, GAO Bo, WANG Ying-xue, et al. Shaking table tests on deformable aseismic and damping measures for fault-crossing tunnel structures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1041 - 1049.
- [12] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 减震层减震原理及跨断层隧道减震技术振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1086 - 1092.
- WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SUI Chuan-yi, et al. Mechanism of shock absorption layer and shaking table tests on shaking absorption technology of tunnel across fault[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(6): 1086 - 1092.
- [13] 蒋树屏, 文栋良, 郑升宝. 嘎隆拉隧道洞口段地震响应大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 649 - 656.
- JIANG Shu-ping, WEN Dong-liang, ZHENG Sheng-bao. Large-scale shaking table test for seismic response in portal section of Galongla tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 649 - 656.
- [14] 王帅帅, 高波, 隋传毅, 等. 不同地质条件下隧道洞口仰坡地震破坏特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S1): 278 - 284.
- WANG Shuai-shuai, GAO Bo, SUI Chuan-yi, et al. Shaking table test for seismic behavior of upward slope at tunnel entrance in different geological conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(S1): 278 - 284.
- [15] SUN T, YUE Z, GAO B, et al. Model test study on the dynamic response of the portal section of two parallel tunnels in a seismically active area[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26(2): 391 - 397.
- [16] 耿萍, 曹东杰, 唐金良, 等. 铁路隧道洞口合理抗震设防长度[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(6): 942 - 948.
- GENG Ping, CAO Dong-jie, TANG Jin-liang, et al. Rational seismic protective length for portal of railway tunnel[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2012, 47(6): 942 - 948.
- [17] 蒋树屏, 方林, 林志. 不同埋置深度的山岭隧道地震响应分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 211 - 216.
- JIANG Shu-ping, FANG Lin, LIN Zhi. Seismic response analysis of mountain tunnels in different depths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35 (1): 211 - 216.
- [18] 福州市规划设计研究院. 福州市二环路金鸡山隧道拓宽改造工程设计文件[R]. 福州: 福州市规划设计研究院, 2013.
- Fuzhou Planning & Design Institute. Design document of the extension and reconstruct project of Jinjishan tunnel in Fuzhou Second Ring Road[R]. Fuzhou: Fuzhou Planning & Design Institute, 2013.
- [19] 关振长, 龚振峰, 陈仁春, 等. 一种用于振动台试验的拼装式可变刚度模型箱 [P]. 中国专利: ZL2015106565382, 2015.
- GUAN Zhen-chang, GONG Zhen-feng, CHEN Ren-chun, et al. An assembling model box used in shaking table test with variable stiffness[P]. Chinese Patent: ZL2015106565382, 2015.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. GB50011-2010 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

### 上接第 2552 页

- [14] 陈肖柏, 王雅卿, 刘建坤, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 116 - 131.
- CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing, LIU Jian-kun, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006: 116 - 131.
- [15] 赵刚, 陶夏新, 刘兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1952 - 1957.
- ZHAO Gang, TAO Xia-xin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(12): 1952 - 1957.
- [16] ZHOU J, WEI C, WEI H, et al. Experimental and theoretical characterization of frost heave and ice lenses[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2014, 104-105: 76 - 87.