

DOI: 10.11779/CJGE201705022

非饱和土水汽迁移与相变：两类“锅盖效应”的试验研究

张 升^{1, 2}, 贺佐跃^{1, 2}, 滕继东^{1, 2}, 刘 岩^{1, 2}, 盛岱超^{1, 2}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

摘 要: “锅盖效应”定义为: 不透水覆盖层下土体含水率大幅提高甚至饱和。最新的理论研究将“锅盖效应”分为两类, 第一类由非饱和土内水汽冷凝引起, 第二类是冻结条件下由气态水迁移引起。为试验验证两类“锅盖效应”, 研究其内在机理, 利用新研制的非饱和冻土水汽迁移试验仪, 对不同初始含水率的试样开展不同温度条件的水汽迁移试验。试验结果表明: 冻结和未冻结两种状态均能使钙质砂试样顶部含水率增加, 但冻结状态下的增加幅度显著。冻结状态下, 含水率峰值位置与冻结锋面大致相同, 且初始含水率越大, 试样顶部和冻结锋面处的含水率增加越显著, 降温速率越小, 气态水迁移越显著; 初始含水率增加也能使未冻结状态下的钙质砂试样顶部含水率增加, 并且温度梯度对气态水迁移有一定的抑制作用, 温度梯度越小, 抑制作用越明显。试验结果很好地验证了两类“锅盖效应”的理论。

关键词: 非饱和土; 水汽迁移; 冻结试验; 锅盖效应

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)05-0961-08

作者简介: 张 升(1979-), 男, 教授, 主要从事计算岩土力学等方面的教学和科研。E-mail: zhang-sheng@csu.edu.cn。

Water vapor transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study on two types of canopy effect

ZHANG Sheng^{1, 2}, HE Zuo-yue^{1, 2}, TENG Ji-dong^{1, 2}, LIU Yan^{1, 2}, SHENG Dai-chao^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High-Speed-Railway Construction, Changsha 410075, China)

Abstract: The canopy effect refers to the phenomenon where moisture accumulates underneath an impervious cover. It can lead to full saturation of the soil immediately underneath the impervious cover. A recent theoretical study separates the canopy effect into two types, the first one is caused by the evaporation-condensation in unsaturated soils, while the second one is induced by the freezing-enhanced vapor transfer in unsaturated soils. In order to experimentally validate these two types of canopy effect and to reveal their mechanisms, water vapor migration experiments are carried out through a newly developed laboratory apparatus for unsaturated frozen soils. Six conditions are performed on a calcareous sand with different initial water contents and boundary temperatures. The results show that the water content in the upper position of the sample increases under an upward temperature gradient, and the increment of water content is greater if the soil is subjected to freezing. For the freezing cases, the depth of a peak water content is in line with the freezing front, and the greater the initial water content, the more the water content accumulated at the freezing front. A smaller cooling rate seems to facilitate the vapor migration. For the unfreezing cases, the water content in the upper position of the sample also increases and the increment becomes more apparent with a higher initial water content. The temperature gradient can inhibit the vapor migration. A smaller temperature gradient always results in a more notable inhibition effect. The test results verify the theory of the canopy effect.

Key words: unsaturated soil; water vapor migration; freezing test; canopy effect

0 引 言

“锅盖效应”定义为地表的隔水层使土体表面蒸发效应受阻, 引起水分在不透气覆盖层下积聚, 导致覆盖层下方土体含水率大幅增加甚至达到饱和的现象^[1]。滕继东等^[2]分析了“锅盖效应”发生机制, 并按照其边界条件和内部机理的不同, 将其分为第一类“锅盖

效应”和第二类“锅盖效应”。

第一类“锅盖效应”即常见的返潮现象, 是指覆盖层下方水汽遇冷凝结集聚的现象, 常发生在地下水

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047001); 国家自然科学基金项目(51508578)

收稿日期: 2016-01-22

***通讯作者** (E-mail: tengjiedong@163.com)

位较浅、毛细较强的土中,水分以液态水补给为主。涉及非饱和土中水分蒸发、冷凝相变及水气耦合迁移,目前国内外开展的试验研究相对较多。例如,Smith^[3]通过试验发现,密封土柱中水分从高温处向低温处迁移,而且液态水迁移量大于气态水迁移量;但Gurr等^[4]得到液态水迁移量小于气态水迁移量的结论,这些研究表明:土壤水分迁移复杂,与其初始含水率等因素密切相关。Jackson^[5]进行的非饱和土蒸汽扩散一吸附试验,在一定程度上发现了蒸汽扩散是土中主要的水分迁移方式。Miyazaki^[6]进行的一维非饱和土柱体蒸汽迁移试验,发现在上部蒸汽补给的条件下,30 d后土柱底部含水率增大约10%。Dobchuk等^[7]通过试验发现影响气态水迁移的因素主要为干密度、孔隙率以及扩散系数等。王铁行等^[8]针对非饱和砂土和黄土开展了等温条件下气态水迁移的试验研究,结果表明土质、含水率梯度和含水率水平等因素对气态水迁移有显著影响。

第二类“锅盖效应”常见于干旱或半干旱地区,该区蒸发量大,地下水位深,但在不透水覆盖层下仍然有水分大量富集,甚至导致土体饱和。第二类“锅盖效应”涉及的物理相变过程包括:水分的蒸发、冷凝、冻结(或凝华)。现有的非饱和土力学角度开展的试验研究,几乎未涉及0℃以下水分的迁移研究;而冻土力学方面,多侧重冻胀过程中液态水迁移的研究^[9-10],在冻土和非饱和土交叉领域,即非饱和冻土内气态水迁移方面,前人研究很少。在仅有的相关研究中,Nakano等^[11]通过试验研究发现,当存在含水率梯度或者温度梯度时,非饱和冻土中均会存在气态水的迁移,并且该迁移现象是非常明显的。Eigenbrod等^[12]曾设计冻结试验研究粗粒料的蒸汽迁移成冰情况,结果发现在纯净的粗粒土中,由蒸汽迁移造成表层含水率由初始6.6%增大至11.1%,含细粒的砂砾土由初始8%增大至22%。Guthrie等^[13]的试验结果表明水气混合迁移导致冻结封面处含水率达到过饱和(115%),相比于初始41.5%的饱和度,试样内含水率大幅度提高。王铁行等^[14]进行了冻结条件下非饱和黄土在封闭柱体内的水分迁移试验,发现当土样初始含水率比较小时,设置格栅阻断液态水通道对冻结作用导致的水分迁移进程影响不大,向冻结锋面迁移水主要来源于气态水迁移;而当土样初始含水率比较大时,水分以液态水迁移为主。

由此可见,目前对冻结过程非饱和土内气态水迁移的试验研究很少,现有试验多从某一方面因素得出直观、定性的结论,虽然描述了试验中气态水迁移的现象,但土体气态水迁移的强弱、影响因素及变化规律等尚未探明。结合文献[2]已阐述的两类“锅盖效应”

的机理,本文将利用一套自行开发的非饱和冻土水汽迁移试验仪,在实验室再现两类“锅盖效应”,阐释冻结条件、温度梯度及初始含水率等对非饱和试样中水汽迁移的影响规律,并进一步揭示两类“锅盖效应”的内在机理。

1 两类“锅盖效应”的数学描述

在非饱和土水热耦合运移的理论研究方面,Philip等^[15]开创性地考虑了水气的相变,建立了基于质能平衡的非等温水热气耦合运移模型(PDV模型)。在PDV模型中,表征液态水迁移的Richards方程同时考虑温度梯度和水头梯度,气态水迁移由Fick定律表示,并考虑等温和非等温两个部分。PDV模型可描述常温条件下非饱和土的蒸发、冷凝过程,即可以描述第一类“锅盖效应”。

为揭示第二类“锅盖效应”的形成机理,文献[2]提出了气态水迁移成冰理论。在冻结条件下,非饱和冻土中水分以3种形态存在,即液态水、气态水和固态冰。三相间的相互转化和迁移,会伴随吸一放热及热传递过程。在非饱和冻土中,冰的形成由液态水和气态水的迁移引起,水分迁移的控制方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta_L}{\partial t} + \frac{\partial \theta_v}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K'_{th} \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) + K_{LT} \frac{\partial T}{\partial z} + K_{vh} \frac{\partial h}{\partial z} + K_{vT} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中 θ 为总含水率 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); θ_L , θ_v 和 θ_i 分别为液态水体积含量和等效气态水体积含量 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); h 为水头高度 (m); T 为温度 (K); z 为空间坐标 (cm), 方向竖直向上为正 (m); t 为时间 (s); K'_{th} 为非饱和冻土渗透系数 (m/s); K_{LT} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 是由温度梯度所导致的等温水力传导率; K_{vh} ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、 K_{vT} ($\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 为分别由水头和温度导致的气体传导率; ρ_w 为液态水密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

非饱和冻土中能量平衡方程可表述为

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} - L_i \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + L_w \rho_w \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda'(\theta) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - C_L \frac{\partial q_L T}{\partial z} - C_v \frac{\partial q_v T}{\partial z} - L_w \rho_w \frac{\partial q_v}{\partial z} \quad (2)$$

式中 C_p 为各相热容的体积平均, 等于固相比热容 C_n ($1.92 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)、液相比热容 C_L ($4.18 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) 和气相比热容 C_v ($6.3 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) 与各组分比例分数的累积和^[16]; L_i 为水的冻结潜热 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ_i 为冰相密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); L_w 为水的蒸发潜热 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\lambda'(\theta)$ 为考虑冰相存在时的热传导系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); q_L ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), q_v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 分别为液态水通量、气态水通量。

在非饱和冻土水热迁移的控制方程(1)和(2)中,存在 θ_i 的未知参量。根据克拉佩龙方程^[17-22],不考虑上覆冰压,可以建立孔隙水压力与温度的关系,进一步将其代入非饱和土SWCC方程可得,非饱和冻土中未冻水含量与温度的关系,表示如下:

$$\theta_L = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \left(-\alpha \frac{L_f T}{g T_0} \right)^n \right]^{-m} + \theta_r \quad (3)$$

式中 θ_s 和 θ_r 分别为饱和含水率、残余含水率; α (m^{-1})、 n (无量纲)和 m ($=1-1/n$)为土水特征曲线拟合参数; g 为重力加速度(m/s^2); T_0 为冻结温度(K)。方程(3)为负温区液态水水含量的表达式,土中总含水率与未冻水含量之差即为冰量 θ_i 的数值。在以上建立的非饱和冻土水热气耦合迁移的数学模型中,当温度大于 0°C 时,模型即退化为PDV模型。

2 试验过程

为进行“锅盖效应”的室内试验研究,笔者开发了非饱和冻土水汽迁移试验仪及其控制系统,如图1所示。顶、底部温控盘温度由循环回路中的冷却液控制,温度控制范围为 $-30^\circ\text{C}\sim+90^\circ\text{C}$,精度为 0.1°C ;温度传感器为PT100热电阻型传感器,直径为 0.5 cm ,长 4 cm ,可实时记录土体温度,精度为 0.1°C ;水分传感器为EC-5传感器,探头长 5.6 cm ,宽 1.5 cm ,厚 0.15 cm ,可实时记录土体中的体积含水率,精度为 0.1% 。试样有机玻璃筒直径 10 cm ,高 20 cm ,周围用泡沫隔热,泡沫导热系数为 0.03 W/m/K ,可有效减少热量的横向损失。试样筒左侧为水分传感器预留孔,尺寸略大于EC-5传感器,间隔 3 cm ;右侧为温度传感器预留孔,尺寸略大于PT100传感器,间隔 1.5 cm 。 2 cm 厚的多孔板使试样底部与液面隔开,形成置空隔离层,液态水与试样不直接接触,只允许气态水迁移至试样土体中。顶部温控盘与试样之间用双层土工膜隔离并密封,以防止外部水汽从上部进入试样中。底部温控盘温度恒定时,装置底部的液态水在这一温度下蒸发,气态水在温度梯度和浓度梯度下从置空隔离层迁移至试样内部,蒸发导致底部水槽损失的水分由马氏瓶实时补给。

2.1 试样制作

试验土样为钙质砂,试样尺寸为 $100\text{ mm}\times 135\text{ mm}$,试样干密度控制在 1.3 g/cm^3 ,渗透系数为 $6.11\times 10^{-4}\text{ cm/s}$,其他基本物理参数如表1所示。首先将钙质砂置于烘箱中烘干,根据试验所需含水率,将钙质砂与水均匀搅拌后装入密封袋中,置于保湿玻璃器皿内静置 24 h 使水分均匀分布;然后,将静置后的

钙质砂放入试样玻璃筒内,分5层压实,试样总高度为 13.5 cm ;最后,将压实好的试样放在试验仪中,设定顶、底部温控盘温度,插入水分传感器和温度传感器,记录马氏瓶水位,启动试验仪进行试验。为防止温控室气态水进入试样,试样制备过程须快速完成。

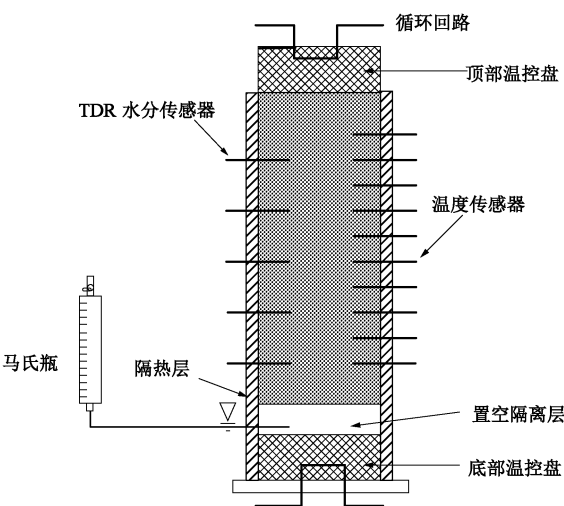


图1 一维非饱和冻土水-汽迁移试验仪示意图

Fig. 1 1D water vapor migration test instrument for unsaturated frozen soils

表1 钙质砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of calcareous sand

e_0	表观密度	堆积密度	D_{60}/mm
	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
1.091	2.635	1.26	1.5
D_{30}/mm	D_{10}/mm	C_u	C_c
1.05	0.53	3.98	0.99

2.2 试验设计

根据文献[2]的理论分析,两类“锅盖效应”有着本质的区别,第一类“锅盖效应”主要涉及气液两相的迁移相变,第二类“锅盖效应”则增加了固相;而对应的边界条件——冻结或未冻,对水分迁移的影响很大。针对两类“锅盖效应”的边界条件,设计了顶部温度为负温和正温两种情况下的试验。同时,也需要考虑温度梯度、降温速率和初始含水率的不同对气态水迁移的影响。考虑到这些因素,本文共进行了6组试验,试验条件如表2所示。前3组试验顶盘为正温,后3组顶盘为负温,分别对应第一类和第二类“锅盖效应”。试验在温控室中进行,温控室环境温度恒定在 20°C ,试验时间均为 7 d 。试验结束后,分层测量土样含水率。顶部温控盘为不透水、不透气的金属板,在试验过程中相当于“锅盖效应”中的覆盖层,试样中的水分向上迁移并以成冰或者冷凝方式集聚在金属板下部且方便最终测定含水率的变化。

表 2 试验条件表
Table 2 Test conditions

编号	初始含水率/%	底部温度/℃	顶部温度/℃
①	0	20.5	0.5
②	5	20.5	0.5
③	5	20.5	10.5
④	0	10.0	-10.0
⑤	5	10.0	-10.0
⑥	5	10.0	-3.0 (2 d)、-6.0 (2 d)、-10.0(3 d)

3 试验结果及分析

3.1 第一类“锅盖效应”

试样①初始含水率为 0%，底部温度为+20.5℃，顶部温度为+0.5℃，温度梯度为 1.48℃/cm，在整个试验期间试样均处于未冻结状态。由图 2 可知，试样①顶部含水率增加量为 7.5%左右。由于试样①初始状态是干燥的，因此顶部含水率增加是由气态水的迁移并冷凝集聚产生的。

试样②初始含水率为 5%，温度边界与试样①相同，其试验结果于图 3 所示。对比图 2，3 可知，初始含水率越大，试样顶部的含水率也会增加，但是增加幅度小；此外，试样下部含水率要低于初始含水率，这是因为在较低温区，水分的自由能较小，水分能够附着在土颗粒表面，而在较高温区，水分自由能较大，液态水由自由能较大区域向较小区域迁移。

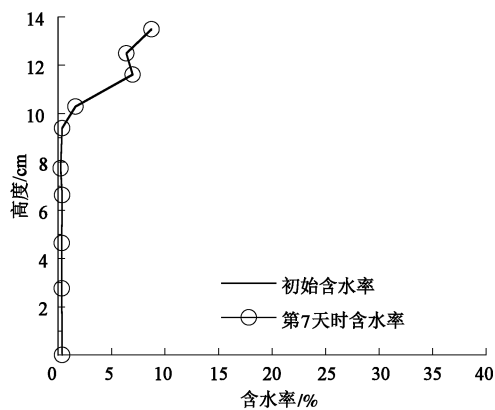


图 2 第 7 天时含水率分布图（试样①）

Fig. 2 Distribution of water content at 7th day (sample ①)

试样③顶部温度为+10.5℃，即温度梯度为 0.74℃/cm，小于试样①和②的温度梯度，初始含水率与试样②相同，其试验结果绘于图 4。对比图 3，4 可知，试样③的顶部含水率与试样②大致相同，且下部含水率也低于初始含水率，原因与前文的分析是一样的。此外，含水率增加的高度范围要小于试样②，因此温

度梯度越小，增加总量也越小。

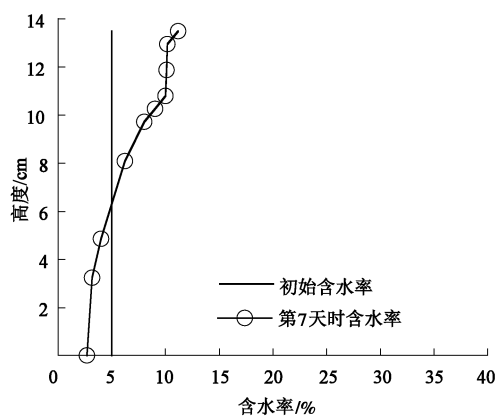


图 3 第 7 天时含水率分布图（试样②）

Fig. 3 Distribution of water content at 7th day (sample ②)

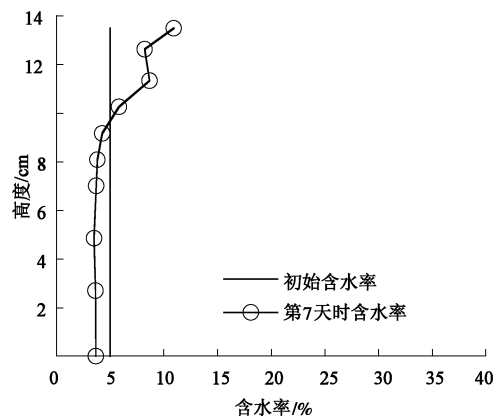
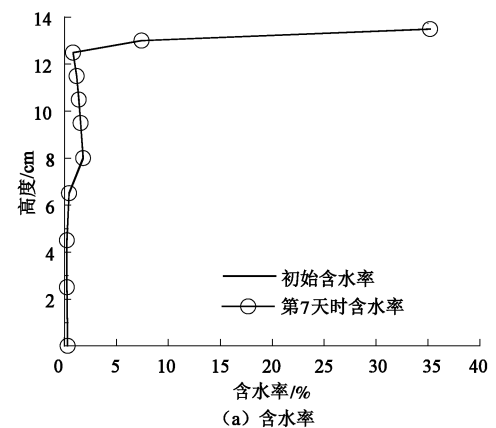


图 4 第 7 天时含水率分布图（试样③）

Fig. 4 Distribution of water content at 7th day (sample ③)

此外，图 2~4 均显示，含水率分布曲线中最大值位于试样顶部，约为 7%~12%。这说明试样处于正温状态时，气态水迁移也能使试样顶部含水率增加，但增加幅度小，顶部土层达不到液限甚至饱和状态，这与第一类“锅盖效应”的理论推断是一致的，即：正温条件下，不透水、不透气覆盖层下部土体含水率的增加量较小，不足以使土体饱和。



(a) 含水率

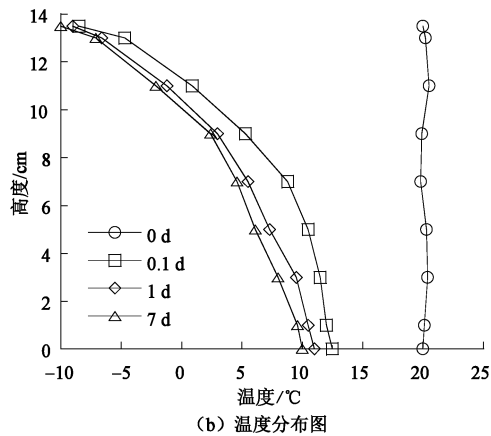


图5 第7天时 (a) 含水率、(b) 温度分布图 (试样④)

Fig. 5 (a) Distribution of water content and (b) temperature at 7th day (sample ④)

3.2 第二类“锅盖效应”

试样④初始含水率为0%, 底部温度为+10°C, 顶部温度为-10°C。由图5可知, 在冻结7 d后, 试样中的含水率均有所增大, 且试样顶部含水率显著增加至35%左右, 远大于非冻结条件下试样①的7.5%, 这是因为试样顶部温度恒定在-10°C, 气态水在整个负温期持续迁移冻结后集聚在试样顶部; 而试样①是由于气态水的迁移并冷凝集聚, 气态水的冷凝, 增大了土体内湿度, 一定程度平衡了土体内部湿度梯度。试验结果表明顶部温度对试样顶部含水率的影响很大, 未冻结状态对含水率的影响较小, 冻结状态会造成含水率显著提高。此外由图5(b)可知, 含水率在8~11 cm高度范围内约为2%, 呈外凸状分布且变化不明显, 对比温度剖面图可知, 在第1天结束时温度已经趋于稳定, 且第7天时的0°C线高度(即冻结锋面)约为10 cm, 这与含水率外凸状分布高度是一致的, 这是因为气态水在冻结锋面位置处持续成冰, 只有部分气态水会越过冻结锋面继续向试样上部迁移。图5结果表明在冻结状态下, 即便是干燥试样, 气态水迁移也会使试样顶部的含水率显著增加, 这与第二类“锅盖效应”的理论推断一致。

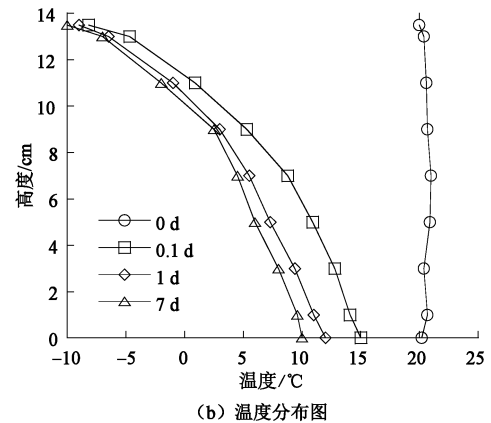
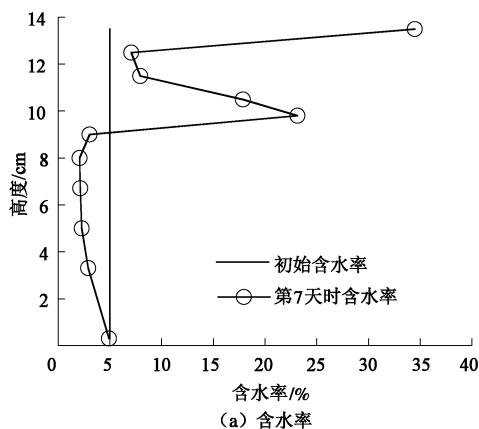


图6 第7天时 (a) 含水率、(b) 温度分布图 (试样⑤)

Fig. 6 (a) Distribution of water content and (b) temperature at 7th day (sample ⑤)

试样⑤初始含水率为5%, 温度边界与试样④相同。由图6可知, 在冻结7 d后, 试样顶部含水率约为34.8%, 远大于初始含水率5%; 在含水率剖面中间也存在峰值, 峰值含水率约为22.5%, 大于初始含水率。然而, 试样下部含水率要小于初始含水率, 由温度剖面图可知, 这段试样温度始终为正值; 冻结作用下, 气态水和液态水均不断向冻结锋面迁移, 造成试样正温区水分减少。另外, 在含水率分布曲线中也存在一个峰值含水率, 约为22.5%, 其位置与第7天时的0°C线位置也是基本一致的。对比图5, 6可知, 试样初始含水率提高时, 冻结锋面处的含水率会显著增加, 而试样顶部的含水率并无明显变化。

试样⑥顶部温度设置为: -3°C (2 d)、-6°C (2 d) 和-10°C (3 d), 底部温度恒定在+10°C, 这种温度设置属于第二种冻结模式^[23], 即对试样两端施加一定的降温速率使试样逐渐冻结, 初始含水率与试样⑤相同。由图7可知, 试样顶部含水率约为35%, 与试样④⑤大致相同; 而冻结锋面处的含水率约为15%, 大于初始含水率, 但与试样⑤相比, 试样冻结锋面处的含水率增加幅度要小, 但冻结锋面上部的含水率降低的趋势要弱, 这是因为在第二种冻结模式下, 温度缓慢下降, 冻结锋面随之也有一个缓慢下降的过程, 这使得冻结锋面会集聚更多的水分; 但是当试样内温度趋于稳定时, 冻结锋面最终保持不变的总时间要少于试样⑤, 即最终冻结锋面处的含水率要较小。

图8是冻结试验结束后试样顶部和冻结锋面的实物图。由图可以看出, 大量水分冻结后集聚在试样顶部, 形成明显的薄冰层, 在冻结锋面, 水分冻结也使钙质砂联结在一起成块状。值得注意的是, 试样④⑤⑥在冻结试验结束后, 均能形成图8所示现象, 表明在整个冻结期间, 气态水从水槽持续迁移并冻结集聚在负温区, 形成第二类“锅盖效应”。

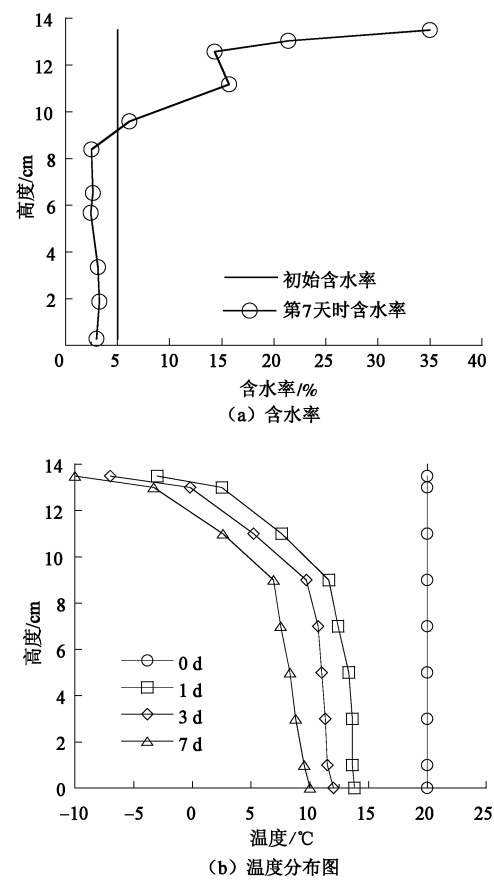


图7 第7天时 (a) 含水率、(b) 温度分布图 (试样⑥)
Fig. 7 (a) Distribution of water content and (b) temperature at 7th day (sample ⑥)

3.3 两类“锅盖效应”对比

表3为两类“锅盖效应”条件下,顶部含水率、冻结锋面含水率和最终平均含水率之间的对比。可以看出,在第一类“锅盖效应”条件下的顶部含水率最

大为 11.8%,试样顶部没有达到饱和状态,且远小于第二类“锅盖效应”(顶部含水率最大为 35%)。并且在第一类“锅盖效应”下,试样并未冻结,因此不存在冻结锋面,即含水率不会在试样中间产生峰值;而第二类“锅盖效应”在冻结锋面处,含水率会形成峰值,峰值含水率也大于试样初始含水率。总之,处于冻结状态时,试样顶部含水率的增加量要远大于未冻结状态时的增加量,即第二类“锅盖效应”比第一类“锅盖效应”所产生的工程危害更为严重,实际工程中在关注液态水防治的同时,也应同时关注冻结状态下气态水迁移对含水率的影响,针对第二类“锅盖效应”的相关防治措施也需进行深一步的研究。

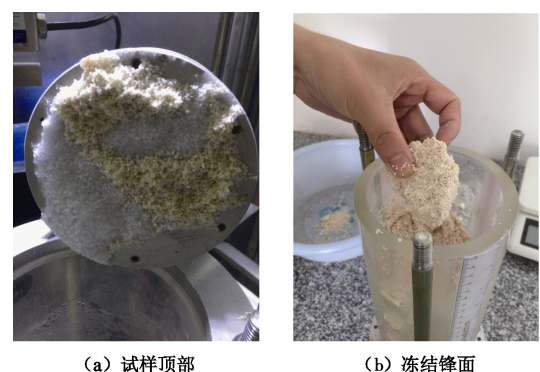


图8 第二类“锅盖效应”冻结结束时实物图
Fig. 8 Actual pictures after freezing

将试样含水率沿深度范围内积分,可得试样内部的平均含水率。图9为试验结束时,试样的平均含水率与初始含水率的对比。由图可知,无论第一类“锅盖效应”还是第二类“锅盖效应”,试验结束时试样的平均含水率均有不同程度的增加,但第二类“锅盖效

表3 两类“锅盖效应”对比

Table 3 Comparison of two types of canopy effect

试验边界条件	编号	初始含水率/%	顶部最终含水率/%	冻结锋面含水率/%	最终平均含水率/%	备注
第一类“锅盖效应” 未冻结	①	0	7.5	—	1.8	1. 与第二类“锅盖效应”相比,顶部最终含水率增加幅度小。
	②	5	11.8	—	5.9	2. 初始含水率增加,顶部最终含水率也会增加,但增加幅度较小。
	③	5	11.8	—	5.6	3. 温度梯度对顶部最终含水率几乎没有影响。
第二类“锅盖效应” 冻结	④	0	35.0	2.0	2.3	1. 初始含水率、降温速率对顶部最终含水率的影响不明显。
	⑤	5	34.8	22.5	6.9	2. 初始含水率增加,冻结锋面含水率增加显著。
	⑥	5	35.0	15.0	7.0	3. 降温速率越小,冻结锋面含水率越小。

应”的增加幅度要更大;而且初始含水率越大,两类“锅盖效应”的最终平均含水率增加幅度均越小(第二类“锅盖效应”试验中的试样⑥之所以比试样⑤增加稍多,主要是因为前者降温速率较小的原因)。此外,在第一类“锅盖效应”下,温度梯度越小,最终平均含水率增加幅度越小,这是显而易见的,因为气态水的迁移受温度梯度的影响很大;在第二类“锅盖效应”下,降温速率越小,最终平均含水率增加幅度越大,这与传统冻胀理论也是一致的。

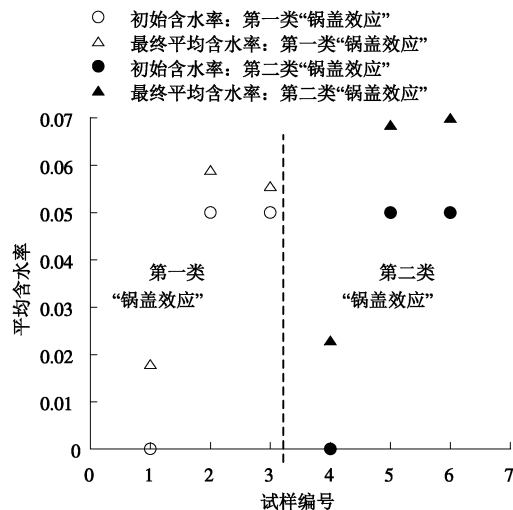


图9 两类“锅盖效应”最终平均含水率与初始含水率的对比
Fig. 9 Comparison between average water content after tests and initial water content

4 结 论

为验证两类“锅盖效应”,并揭示其机理和影响因素,本文利用自行研制的非饱和冻土水汽迁移试验仪,开展了一系列钙质砂试样的冻结试验和冷凝试验,得到以下4点结论。

(1) 未冻结状态下水汽冷凝即第一类“锅盖效应”,气态水迁移也能使试样顶部含水率增加,但增加幅度有限;而在冻结状态水汽迁移并冻结成冰即第二类“锅盖效应”,顶部含水率增加显著。

(2) 第一类“锅盖效应”时,初始含水率增加能使试样顶部含水率增加,但增加幅度有限;而温度梯度对顶部最终含水率几乎没有影响。

(3) 第二类“锅盖效应”时,在冻结锋面位置处存在含水率峰值;初始含水率增加,冻结锋面处的含水率会显著增加;降温速率越小,冻结锋面含水率越小;但初始含水率和降温速率对顶部含水率几乎没有影响。

(4) 试验结束时试样的平均含水率均有不同程度的增加,但第二类“锅盖效应”的增加幅度要更大;而且初始含水率越大,两类“锅盖效应”的最终平均

含水率增加幅度均越小。此外,在第一类“锅盖效应”下,温度梯度越小,最终平均含水率增加幅度越小;在第二类“锅盖效应”下,降温速率越小,最终平均含水率增加幅度越大。

本文试验结果对两类“锅盖效应”进行了室内验证。进一步的研究拟结合实际土性条件和周期性温度边界条件,对“锅盖效应”引起的工程问题进行分析,并提出相应的防治措施。

参考文献:

- [1] 李 强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69 - 71. (LI Qiang, YAO Yang-ping, HAN Li-ming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69 - 71. (in Chinese))
- [2] 滕继东, 贺佐跃, 张 升, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1813 - 1821. (TENG Ji-dong, HE Zuo-yue, ZHANG Sheng, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: physical mechanism and numerical model for two types of ‘Canopy effect’[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1813 - 1821. (in Chinese))
- [3] SMITH W O. Thermal transfer of moisture in soils[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1943, 24(2): 511 - 524.
- [4] GURR C G, MARSHALL T J, HUTTON J T. Movement of water in soil due to a temperature gradient[J]. Soil Science, 1952, 74(5): 335 - 346.
- [5] JACKSON R D. Water vapor diffusion in relatively dry soil: I. Theoretical considerations and sorption experiments[J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28(2): 172 - 176.
- [6] MIYAZAKI T. Condensation and movement of water vapour in sand under temperature gradient[J]. Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, 1976, 61: 1 - 8.
- [7] DOBCHUK B S, BARBOUR S L, ZHOU J. Prediction of water vapor movement through waste rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(3): 293 - 302.
- [8] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 等. 非饱和土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3271 - 3275. (WANG Tie-hang, HE Zai-qiu, ZHAO Shu-de, et al. Experimental study on vaporous water transference in loess and sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(18): 3271 - 3275. (in Chinese))

- [9] NAKANO Y, TICE A, OLIPHANT J. Transport of water in frozen soil: III experiments on the effects of ice content[J]. *Advances in Water Resources*, 1984, **7**(1): 28 – 34.
- [10] 马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 a 回顾与展望[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(4): 625 – 639. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(4): 625 – 639. (in Chinese))
- [11] NAKANO Y, TICE A, OLIPHANT J. Transport of water in frozen soil: IV analysis of experimental results on the effects of ice content[J]. *Advances in Water Resources*, 1984, **7**(2): 58 – 66.
- [12] EIGENBROD K, KENNEPOHL G. Moisture accumulation and pore water pressures at base of pavements[J]. *Transportation Research Record*, 1996, **1546**(29): 151 – 161.
- [13] GUTHRIE W S, HERMANSSON Å, WOFFINDEN K H. Saturation of granular base material due to water vapor flow during freezing: laboratory experimentation and numerical modeling[C]// *Cold Regions Engineering 2006: Current Practices in Cold Regions Engineering*. Orono, 2014: 1 – 12.
- [14] 王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2012, **44**(1): 7 – 12. (WANG Tie-hang, WANG Juan-juan, ZHANG Long-dang. Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Nature and Science Edition)*, 2012, **44**(1): 7 – 12. (in Chinese))
- [15] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradient[J]. *Trans Am Geophys Union*, 1957, **38**: 222 – 232.
- [16] DE VRIES D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media[J]. *Trans Am Geophys Union*, 1958, **39**: 909 – 916.
- [17] WARK K J. *Generalized Thermodynamic Relationships. Thermodynamics*[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Inc, 1988.
- [18] SHENG D, ZHANG S, YU Z, ZHANG J S. Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave[J]. *Cold Region Science Technology*, 2013, **95**: 27 – 38.
- [19] ZHANG S, SHENG D, ZHAO G, et al. Analysis of frost heave mechanisms in a high-speed railway embankment[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015 **53**(3): 520 – 529.
- [20] SHENG D, ZHAO G, ZHANG S, et al. Possible frost heave mechanisms in an unsaturated high-speed railway formation. unsaturated soils: research and applications[C]// *Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014*: 3 – 14.
- [21] SHENG D, ZHANG S, NIU F, et al. A potential new frost heave mechanism in high-speed railway embankments[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(2): 144 – 154.
- [22] ZHANG S, TENG J, HE Z, et al. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, **126**: 1 – 9.
- [23] 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): 594 – 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): 594 – 605. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 南京嘉兆仪器设备有限公司
封 3 南瑞集团水利水电技术分公司
封 4 北京理正软件股份有限公司
后插 1 济南普业机电技术有限公司
后插 2 重庆地质仪器厂