

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1313

锅盖效应的水汽循环规律研究

姚仰平¹, 韦 彬¹, 陈 含², 李 强³

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
3. 北京新机场建设指挥部, 北京 102602)

摘 要: 在已有的锅盖效应研究的基础上, 针对实际工程中由上至下具有覆盖层 (相当于“锅盖”)、碎石层、黏土层结构的路面和跑道等, 研究锅盖效应导致的增水规律。通过开展室内试验, 模拟实际工程中的道基结构, 在开放和封闭两种条件下, 分别分析土层增水规律。试验结果表明: 两种试验条件下存在锅盖效应水汽循环现象, 两者的水头循环峰值不同。对水头进行计算, 解释了两种试验条件下产生水汽循环的内在机制。对封闭系统的循环水量进行计算, 验证了两组试验在半个循环内产生的循环水量大致相等。锅盖效应导致的增水规律与碎石层下部是否平坦有关。若碎石层下部不平坦, 碎石层里的水会不断累积; 若碎石层下部平坦, 当碎石层里的水增加到一定量后, 水量不会再增加, 定量的水在碎石层里进行水汽循环。工程中应该设计有利的道基结构防止道面下大量增水。

关 键 词: 锅盖效应; 水汽循环; 道面结构; 增水规律

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 06-1512-07

Research on the law of water vapor circulation of the pot cover effect

YAO Yang-ping¹, WEI Bin¹, CHEN Han², LI Qiang³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Beijing New Airport Construction Headquarters, Beijing 102602, China)

Abstract: On the basis of the existing research on the pot cover effect, the law of the water accumulation caused by the pot cover effect is studied for the road surface and runway, which have a structure of cover layer (equivalent to "pot cover"), gravel layer, and clay layer from top to bottom in actual engineering. Through carrying out indoor tests to simulate the road foundation structure of the actual project, the law of the water accumulation in soil, under the two conditions of open and closed, was analyzed respectively. The test results show that there is a phenomenon of water vapor circulation of the pot cover effect under the two test conditions, and the peak values of the water head circulation of the two tests are different. The internal mechanism of water vapor circulation was explained by the calculation of the water heads value. Calculating the circulating water volume of the closed system verified that the circulating water volume generated by the two tests in half of the cycle is approximately equal. It is found that the law of the water accumulation caused by the pot cover effect is related to whether the bottom of the gravel layer is flat. If the bottom of the gravel layer is not flat, the water in the gravel layer will keep accumulating. If the bottom of the gravel layer is flat, the water in the gravel layer just increases to a certain amount, the water volume will no longer increase, and a certain amount of water circulates in the form of water vapor in the gravel layer. Favorable road foundation structure should be designed in the project to prevent massive water accumulation under the road surface.

Keywords: pot cover effect; water vapor circulation; pavement structure; law of increasing water

1 引 言

在工程灾害研究中, 发现沈阳机场跑道道面下

出现大量不正常增水现象, 该机场道面下地下水位较低, 毛细水上升高度有限, 不能造成道面下浅层大量积水。该机场跑道的道基由上至下为道面结构、

收稿日期: 2020-08-31

修回日期: 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51979001); 国家重点基础研究发展计划 (No.2014CB047006)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51979001) and the National Key Basic Research and Development Plan (2014CB047006).

第一作者简介: 姚仰平, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土的本构模型和机场高填方等方面的研究。E-mail: ypyao@buaa.edu.cn

碎石层、黏土层。经过综合分析,姚仰平及其团队^[1-2]提出是锅盖效应导致了这一现象。锅盖效应是指土中的水汽在温度梯度驱动下向上迁移,受到地表覆盖层的阻挡,在覆盖层下冷凝或凝华后聚积的现象。

现有研究侧重于锅盖效应的作用机制、造成的危害以及防治方法。锅盖效应会造成道面出现裂缝、变形,道基出现冻胀、不均匀沉降等工程病害^[2-4]。滕继东^[3]、张升^[5-6]等根据浅层土体中是否结冰将锅盖效应分成两类进行分析,并运用室内试验和数值模拟的方法对锅盖效应作用机制进行深入研究。姚仰平等^[2-4]对锅盖效应形成机制、水分来源进行了详尽分析,对锅盖效应的致灾特征进行总结归纳并提出了防治建议。罗汀^[7-8]、王乃东^[9-10]等设计并开展了现场试验和室内试验,研究了土体中的温度分布规律,以及试验时间和初始含水率不同的情况下,锅盖效应的水分迁移规律。张如如等^[11-12]利用数值模拟的方法研究了道面结构和环境温度对锅盖效应下土体中水汽迁移规律的影响。Banimahd 等^[13]通过建立模型模拟了土中水分和热量的传输并计算了水热通量。宋二祥等^[14]建立数学模型并用有限元的方法对土体中的锅盖效应现象进行分析,研究了土质和温度分布对锅盖效应的影响。Krishnaiah 等^[15]研究了土壤中温度梯度对水分运移产生的影响,证明了土壤温度的升高会导致其含水率下降。Andrade 等^[16]利用示踪法研究土体非饱和带的水分运移规

律,了解了土体被垃圾污染过程。姚仰平等^[17-19]基于双锅盖效应的研究成果提出了疏堵结合的防治方法,即在土体中合适位置铺设隔断层以阻断深层土体水分向上迁移,同时在隔断层以上铺设疏水层疏导上层可能积聚的水分,即双锅盖防治法。罗汀等^[20]通过开展现场试验证明了双锅盖的防治效果。

为了分析沈阳机场跑道下锅盖效应导致的增水规律,本文开展室内试验,模拟机场跑道道基结构,在开放和封闭两种条件下,发现两种条件下存在锅盖效应水汽循环现象,通过水头计算说明水汽循环的内在机制,通过计算循环水量验证两种试验条件下存在着一致规律。总结在覆盖层、碎石层、黏土层的道基结构中,锅盖效应导致的增水规律,对工程中的道基结构设计提供参考。

2 试验介绍

2.1 试验装置

室内试验采用如图1所示的由罗汀等^[21]自主设计的锅盖效应试验装置,试验装置主要由土样试筒、控温系统、补水系统和数据采集系统组成。其中土样试筒由透明的有机玻璃制成,呈圆柱形,可容纳直径为30 cm、高度为58 cm的土样。试筒顶部和底部温度都可由控温系统进行调节,由图1左边所示的控温系统控制,土样试筒外部包裹保温材料,防止土样与外界产生侧向的热量交换,尽量保证试验的一维性。试筒中的水分由马氏瓶补充。试验数

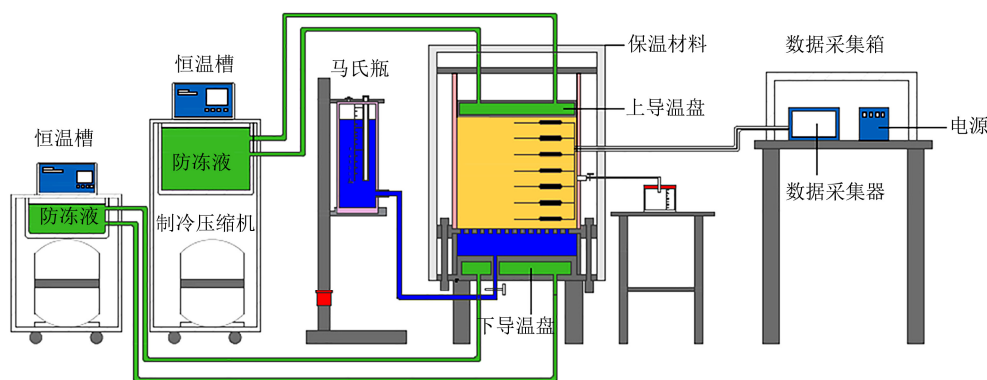


图1 锅盖效应试验装置
Fig.1 Pot cover effect test device

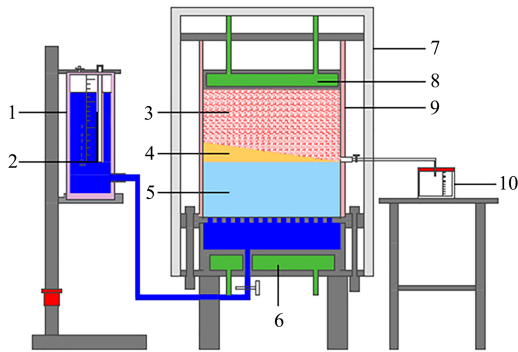
据通过数据采集箱采集记录。

2.2 试验设计

为了模拟实际道基的覆盖层、碎石层、黏土层结构,设计了如图2所示的试验方案。试筒两端固定恒温盘,顶部温度为 0.3°C ,底部温度为 20°C ;顶部是不透气、不透水的金属板,用硅脂密封,相

当于实际工程中的道面结构;上层土是砂土,相当于实际工程中的碎石层;下面一层是黏土,相当于实际工程中的黏土层。在实际工程中,跑道道面设计中间高,两边低,所以该试验设计了一个黏土斜坡。试筒中水位如图2所示,与右边的出水口平齐,试验刚开始时右边出水口不会出水。试筒底部与图

2 左边的马氏瓶相连接, 马氏瓶内进气管底端与试筒内水位平齐, 初始状态马氏瓶进气管水头是 0 cm, 试筒内水位发生变化时, 马氏瓶进气管水头相应发生变化。锅盖效应导致试筒内水汽向上迁移, 水位下降, 马氏瓶向试筒内补水。



注: 1-马氏瓶; 2-马氏瓶进气管; 3-砂土; 4-黏土; 5-饱和黏土; 6-下恒温盘; 7-外保温罩; 8-上恒温盘; 9-试验试筒; 10-烧杯。

图2 试验设计图
Fig.2 Experimental design

根据图2所示试筒右边的出水口是否开放, 模拟实际工程中碎石层下部是否平坦, 设计了两组试验。

3 试验结果及分析

在试筒顶部温度为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 底部温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 根据已有的研究^[2], 试筒内部会产生锅盖效应。锅盖效应的具体现象和规律需要通过具体试验进一步观察和分析。

3.1 开放系统

开放系统水能向一侧流, 模拟实际工程中道基下部碎石层存在坡度的位置。

试验开始后, 记录马氏瓶的补水量, 该值能反映锅盖效应导致的水汽迁移量, 补水速度反映水汽迁移速度。试验进行一段时间后, 试筒出水口开始出水, 同时马氏瓶进气管水头出现有规律地上下波动。记录出水量和马氏瓶进气管水头随时间的变化量, 将记录下的试验数据绘制成曲线, 如图3所示。图中黑色线表示马氏瓶补水量, 红色线表示出水量, 蓝色线表示马氏瓶进气管水位。该图反映了出水口开放条件下, 锅盖效应导致的增水规律。

将试验分为: 水汽单向迁移阶段和水汽循环阶段2个阶段。

在锅盖效应影响下, 试筒内水汽向上迁移, 遇低温后冷凝成水, 水分先在上部砂土中聚集, 当砂土的持水能力达到上限时, 冷凝水就会下落到砂土

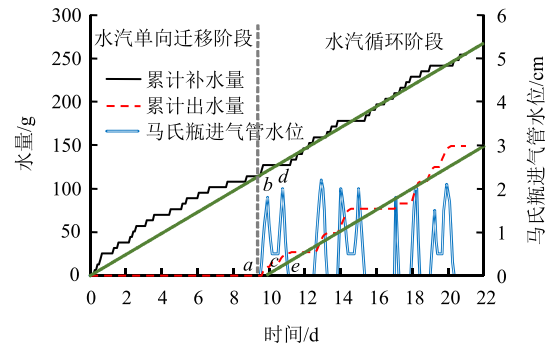


图3 开放系统循环规律
Fig.3 The circulation law of the open system

下部的黏土斜坡位置。

如图3所示的水汽单向迁移阶段中, 向上迁移的水汽冷凝成水在砂土中聚集, 砂土的持水能力未达到上限, 水汽不断向上迁移, 马氏瓶均匀补水。试验进行到约9 d时, 试筒出水口开始出水, 马氏瓶进气管的水头出现波动, 说明上部砂土的持水能力达到了上限, 冷凝水下落到黏土斜坡位置, 试筒内水面发生变化。进气管水头升高, 说明迁移上去的水汽冷凝成水, 水头降低说明水分以水汽形式向上迁移, 随着试验的进行, 发现进气管水头大致在 $0\sim 2\text{ cm}$ 之间波动, 所以将该阶段称为水汽循环阶段。

如图3所示的水汽循环阶段中, *ab* 段马氏瓶进气管水头上升到 2 cm , 上升过程中观察到马氏瓶在继续补水, 试筒出水口开始出水, 说明试筒内冷凝水不断下落到黏土斜坡位置。*bcd* 段, 进气管水头从 2 cm 下降到 0.5 cm 左右, 持续一段时间后, 又上升到 2 cm 。*de* 段水头从 2 cm 下降到 0 cm , 这个波动过程中可以观察到马氏瓶不再补水。水头下降到 *c* 点时, 出水口也不再出水, 说明波动过程中试筒内水的蒸发速度能够满足锅盖效应需要的水汽迁移速度, 不需要外部水分补充。水头下降一方面是出水口出水导致, 另一方面是水汽向上蒸发导致。从整个水汽循环阶段可以看出, 马氏瓶进气管水头出现波动时, 出水口出水, 马氏瓶不补水, 马氏瓶进气管水头是 0 cm 时, 出水口不出水, 马氏瓶补水, 说明锅盖效应导致试筒内水面降低, 需要外部水分的补充。

从图3中可以看出, 随着试验的进行, 马氏瓶持续补水, 出水口的出水量不断累积。试验的两个阶段, 马氏瓶的补水速度没有明显改变, 说明水汽迁移速度与是否在水汽循环状态无明显联系。补水曲线与出水曲线基本平行, 说明出水速度与向上迁移的水汽冷凝速度相同。

由于马氏瓶进气管底端与试筒内初始水位在同一水平面, 所以从试验开始到水汽循环阶段开始前, 试筒内水位如图4所示, 马氏瓶进气管水头是0 cm, 此时砂土的持水能力未达到上限, 没有冷凝水下落, 黏土斜面上处于没有水的状态。

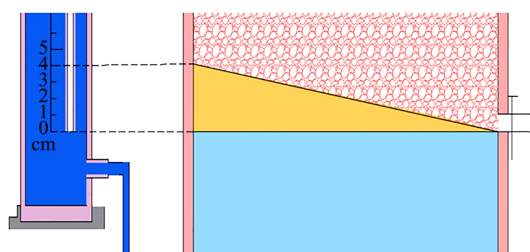


图4 水头为0 cm时试筒内水分布

Fig.4 Water distribution in the test tube when the water head is 0 cm

试筒水位处于如图4所示状态时, 黏土斜坡处于负压饱和状态, 当试筒顶部有冷凝水落下时, 黏土斜坡呈正压饱和状态。试筒内水位发生变化, 导致马氏瓶进气管水头发生变化, 试筒内水位的循环变化, 正是出现图3所示水汽循环状态的内在机制。

根据如图3所示的水头变化规律, 以及马氏瓶进气管水头与试筒内斜面处水分分布的关系, 分析马氏瓶进气管的水头为2 cm时, 试筒内水位如图5所示。由图可知, 斜面上布满水, 此时上部砂土的持水能力达到上限, 再迁移上去的水汽冷凝成水落下, 导致试筒内水位发生变化, 马氏瓶进气管水头上升。

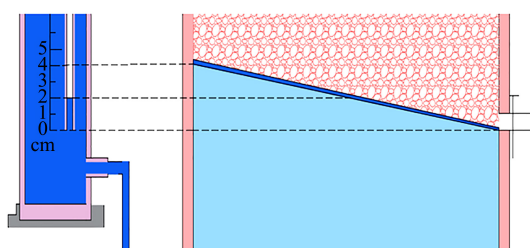


图5 水头为2 cm时试筒内水分布

Fig.5 Water distribution in the test tube when the water head is 2 cm

由于试筒出水口是开放的, 斜坡上的水不断流出, 且在循环状态时, 水汽仍在不断向上迁移, 所以水头到达2 cm之后, 又开始下降, 直到试筒内水位如图4所示。因此, 马氏瓶进气管水头在0~2 cm之间循环。

开放系统试验可以看出, 马氏瓶不断补水, 出水口不断出水, 说明在实际工程中, 碎石层下部有

坡度的位置, 锅盖效应形成的水分就会在碎石层向一侧流, 水分在低处不断累积。

3.2 封闭系统

封闭系统中试筒出水口关闭, 水分不能向一侧流走, 模拟实际工程中碎石层下部平坦的位置, 即坡度一侧的低洼位置, 水分不向一侧流的情况。

在其他试验条件不变的情况下, 关闭试筒出水口, 试验过程中, 同样记录马氏瓶补水量。试验一段时间后, 发现马氏瓶不再继续补水, 其进气管水头和开放系统类似出现有规律的波动。根据试验数据绘制曲线图如图6所示, 试验也分为两个阶段。

水汽单向迁移阶段中马氏瓶均匀补水。试验进行到8 d时, 进入水汽循环阶段。马氏瓶进气管水头上升为3 cm左右, 如图6所示ab段。随着试验进行, 马氏瓶进气管水头持续波动, 且波动范围在1~3 cm, 如图6所示cde段。该阶段马氏瓶不再补水, 定量的水在试筒内循环。

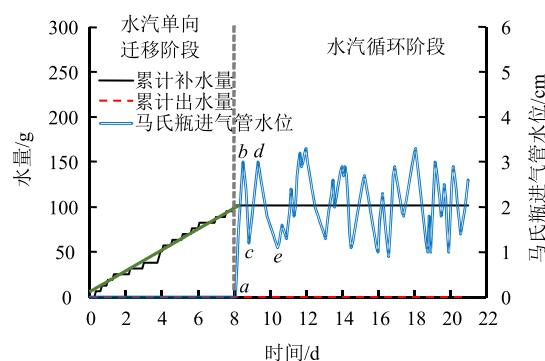


图6 封闭系统循环规律

Fig.6 The circulation law of the close system

封闭系统的试验原理与开放系统相同, 当马氏瓶进气管水头上升到3 cm时, 试筒内水位如图7所示。由图可知, 斜面上布满水, 斜坡右端有一部分积水。

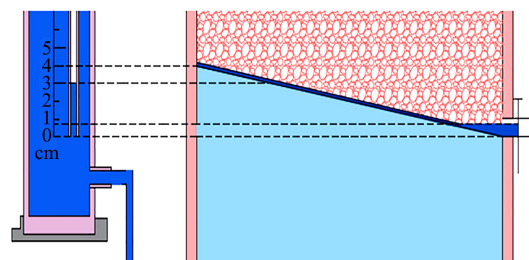


图7 水头为3 cm时试筒内水分布

Fig.7 Water distribution in the test tube when the water head is 3 cm

整个试验过程中, 水汽不断向上迁移, 导致试筒内水位降低, 马氏瓶进气管水头降低, 所以马氏

瓶进气管水头到达 3 cm 之后又开始下降,并最终降低到 1 cm 左右,此时试筒内水位如图 8 所示。斜面上的水一部分向上蒸发,一部分向右边聚积,最终在右边形成高度 1 cm 的积水。

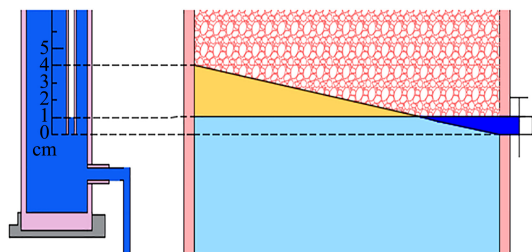


图 8 水头为 1 cm 时试筒内水分布
Fig.8 Water distribution in the test tube when the water head is 1 cm

在该温度梯度下,锅盖效应导致的冷凝水能使试筒内水位最高到 3 cm 左右。随着水汽不断向上迁移,马氏瓶进气管水头最低下降到 1 cm,试筒内水位如图 8 所示,此时上部砂土的持水能力达到上限,上部冷凝水开始下落,所以进入循环状态后,水头在 1~3 cm 之间动态循环。

试验表明,在实际工程中碎石层下部平坦处,水不能向一侧流的情况下,这个地方的锅盖效应不会导致大量增水,而只有定量的水在碎石层中循环。

3.3 两组试验水头计算

两组试验都存在水汽循环现象,具体表现为马氏瓶进气管水头循环波动。开放系统水头波动范围是 0~2 cm,封闭系统水头的波动范围是 1~3 cm。马氏瓶进气管水头与试筒内水位有关。

假设在试筒内黏土斜坡上垂直插 N 个测压管,不同高度的测压管对应的水头都是不同的,而马氏瓶进气管反映的水头是这些测压管水头的平均值。

根据上述思想,针对开放和封闭两种条件下试筒内不同的水位分布,分别计算其平均水头,采用面积加权平均法。

试筒内斜面处的几何尺寸如图 9 所示,斜坡最高点比马氏瓶进气管底端高 4 cm,试筒直径 30 cm。

斜坡的俯视图呈椭圆形,根据如图 9 所示的几何尺寸可知,椭圆的长半轴为 $\sqrt{229}$ cm,短半轴为 15 cm。当椭圆面布满水时,对应表现的总水头采用面积加权平均法计算,在长轴方向上将椭圆面分为 n 份,每一份形状近似看成矩形。水头的计算公式为

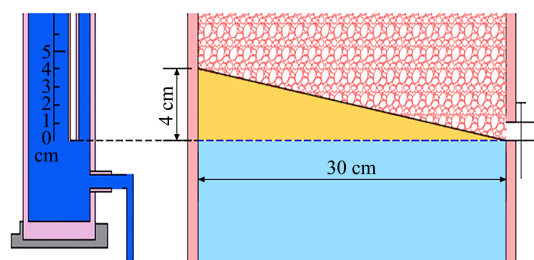


图 9 试筒内斜面处的几何尺寸
Fig.9 The geometric dimensions of the inner slope of the test tube

$$h = \frac{s_1 h_1 + s_2 h_2 + \dots + s_n h_n}{s_1 + s_2 + \dots + s_n} \quad (1)$$

式中: h 为平均水头 (cm); s_i 为第 i 个近似矩形的面积 (cm^2); h_i 为第 i 个矩形的形心位置对应的斜坡高度 (cm)。

根据两组试验中试筒内不同的水位分布,采用式 (1) 进行计算。

开放系统,水头为 2 cm 时,试筒内斜面处水面如图 5 所示,斜面布满水,表现的水头为整个斜面面积的加权平均水头,将斜面分为 50 份,根据式 (1) 计算可得: $h = \frac{s_1 h_1 + s_2 h_2 + \dots + s_{50} h_{50}}{s_1 + s_2 + \dots + s_{50}} = 2 \text{ cm}$ 。

说明开放系统中,马氏瓶进气管水头为 2 cm 时,如图 5 所示的试筒内斜面处的水位情况是正确的。

封闭系统,水头为 3 cm 时,试筒内黏土斜坡处的水面分布如图 7 所示,斜坡右端有一部分积水,斜坡面上布满水,总水头等于斜坡右边积水的水头加左边加权平均的水头。将未积水斜面分为 134 份,根据式 (1),则有

$$h = h_1 + \frac{s_1 h_1 + s_2 h_2 + \dots + s_{134} h_{134}}{s_1 + s_2 + \dots + s_{134}} \quad (2)$$

式中: h_1 为斜面右端的积水深度 (cm)。经试算可得: $h_1 = 0.8 \text{ cm}$ 。

说明在封闭系统中,马氏瓶进气管水头为 3 cm 时,图 7 所示的斜坡右边的积水深度为 0.8 cm。

3.4 两组试验循环水量对比

开放系统,试验时间内累计出水量和累计补水量可以直接测量。根据试验结果,马氏瓶进气管水头从 0 cm 上升到 2 cm 的半个循环内,累计出水量为 22 g。

封闭系统,积水量不能直接测量,可以根据试筒内水分分布情况计算半个循环产生的水量。斜面处的积水示意图如图 10 所示。

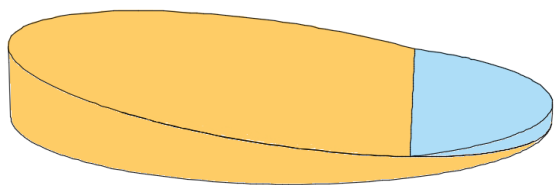


图 10 斜面处积水示意图
Fig.10 Schematic diagram of water accumulation on the slope

将该积水形状放入柱面坐标系中, 利用二重积分计算该形状体积 V , 积分公式为

$$V = \iint_D f(x, y) dx dy \quad (3)$$

水头为 1 cm 时计算得: $V \approx 56.66 \text{ cm}^3$ 。水头为 3 cm 时计算得: $V \approx 32.83 \text{ cm}^3$ 。则水头从 3 cm 变到 1 cm 这半个循环内产生的水量 m 为

$$m = \Delta V \times \rho = (56.66 - 32.83) \times 1 = 23.83 \text{ g} \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度。

可以得出, 封闭系统半个循环内产生的水量为 23.83 g, 与开放系统半个循环内产生的水量 22 g 大致相等, 说明虽然两组试验的水汽循环水头波动范围不同, 但是半个循环过程中产生的水量是相同的。

开放系统, 补水量达到 121 g 时, 马氏瓶进气管水头开始上升, 即进入循环状态时, 马氏瓶进气管水头从 0 cm 上升到 2 cm 的半个循环用了约 1 d 的时间。封闭系统, 根据图 6 所示, 补水量达到和开放系统补水量差不多时, 开始进入循环状态, 在循环阶段, 马氏瓶进气管水头从 1 cm 上升到 3 cm 的半个循环也约用了 1 d 的时间。

综上所述, 两组试验的内在规律是一致的。

4 试验的工程意义

根据沈阳机场跑道覆盖层、碎石层、黏土层的道基结构, 设计了室内试验探究锅盖效应导致的增水规律, 发现土层中存在着水汽循环现象。土层中锅盖效应导致的积水量与土层结构有关。

开放系统, 即碎石层底部有坡度的位置, 锅盖效应导致冷凝水不断产生, 砂土层下的积水能流走, 马氏瓶不断补水。这说明在实际工程中, 碎石层下部的坡度能让水向一侧流, 那么土层中低处积水就会不断累积, 造成工程灾害。

封闭系统, 即碎石层底部低洼位置, 该处锅盖效应产生的水不能流走, 土层中的水积累到一定程

度后, 马氏瓶就不再补水, 一定量的水在试筒内进行水汽循环。这说明在实际工程中, 碎石层下部平坦的位置, 锅盖效应产生一定量的水后, 就不产生更多的积水, 一定量的水在土层下进行水汽循环。

综上所述, 锅盖效应影响下, 实际工程中的道基结构对道基下的积水量有明显影响, 碎石层下部坡度一侧低洼平坦处, 锅盖效应不会造成大量增水, 但是碎石层下部的坡度位置会让积水不断产生, 向低洼处流, 最终积累在低洼处。实际工程中应该设计疏水结构, 防止大量的水在低洼处累积而造成工程灾害。

5 结 论

本文在已有的锅盖效应研究基础上, 针对实际工程中覆盖层、碎石层、黏土层的道基结构, 通过室内试验研究锅盖效应导致的土层增水规律, 主要得出以下结论:

- (1) 锅盖效应水汽迁移速度只与温差和介质有关, 与排水条件、是否在水汽循环状态无明显联系。
- (2) 水汽循环状态的起始含水率是定值, 与排水条件无明显关联。
- (3) 锅盖效应导致的积水速度与迁移水汽的冷凝速度相同。
- (4) 排水条件即土层结构会直接影响锅盖效应产生的积水量。

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.
- [2] 姚仰平, 王琳, 王乃东, 等. 锅盖效应的形成机制及其防治[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 1-5.
YAO Yang-ping, WANG Lin, WANG Nai-dong, et al. Mechanism of forming pot-cover effect and its prevention[J]. *Industrial Construction*, 2016, 46(9): 1-5.
- [3] 滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水气迁移与相变: 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.
- [4] 姚仰平, 王琳, 王乃东. 干寒区锅盖效应致灾特征及案

- 例分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 21-24.
- YAO Yang-ping, WANG Lin, WANG Nai-dong. Analysis of disaster characteristics and cases of pot-cover effect in dry and cold areas[J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(9): 21-24.
- [5] ZHANG S, TENG J D, HE Z Y, et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils[J]. **Géotechnique**, 2016, 66(11): 927-940.
- [6] 张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 961-968.
- ZHANG Sheng, HE Zuo-yue, TENG Ji-dong, et al. Water vapor transfer and phase change in unsaturated soils: experimental study on two types of canopy effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(5): 961-968.
- [7] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 6-9.
- LUO Ting, CHEN Han, YAO Yang-ping, et al. Analysis of water migration characteristics of pot-cover effect[J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(9): 6-9.
- [8] 罗汀, 曲啸, 王乃东, 等. 北京大兴国际机场冬季地温变化分析研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 17-20.
- LUO Ting, QU Xiao, WANG Nai-dong, et al. Geothermal temperature characteristics of Beijing Daxing International Airport in winter[J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(9): 17-20.
- [9] 王乃东, 李成志, 姚仰平, 等. 锅盖效应中土体温度场变化规律的试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 10-12.
- WANG Nai-dong, LI Cheng-zhi, YAO Yang-ping, et al. Research on the variation of the temperature field in soil for pot-cover effect tests[J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(9): 10-12.
- [10] 王乃东, 马梓棋, 姚仰平, 等. 试验时间和初始含水率对土体水气迁移的影响分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 13-16.
- WANG Nai-dong, MA Zi-qi, YAO Yang-ping, et al. Analysis of moisture migration affected by test period and initial water content[J]. **Industrial Construction**, 2016, 46(9): 13-16.
- [11] 张如如. 季节性温度变化引起机场跑道锅盖效应数值及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- ZHANG Ru-ru. Numerical and experimental research on the “pot-cover” effect in airport runways caused by seasonal temperature change[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [12] 张如如, 赵云, 徐文杰, 等. 温度作用下机场跑道土基中水气运移规律分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 822-830.
- ZHANG Ru-ru, ZHAO Yun, XU Wen-jie, et al. Water-gas migration analysis in runway subgrade soil under influence of temperature[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2016, 50(5): 822-830.
- [13] BANIMAHDI S A, ZAND-PARSA S. Simulation of evaporation, coupled liquid water, water vapor and heat transport through the soil medium[J]. **Agricultural Water Management**, 2013, 130: 168-177.
- [14] 宋二祥, 罗爽, 孔郁斐, 等. 路基土体锅盖效应的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1781-1788.
- SONG Er-xiang, LUO Shuang, KONG Yu-fei, et al. Simulation and analysis of pot-cover effect on moisture transport in subgrade soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1781-1788.
- [15] KRISHNAIAH S, SINGH D N. A methodology to determine soil moisture movement due to thermal gradients[J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**. 2003, 27(6): 715-721.
- [16] ANDRADE R, MURALIDHARAN D, RANGARAJAN R. Movement of water flux through unsaturated zones: a transient impact on in situ potential field[J]. **Current Science**, 2018, 114(7): 1414-1422.
- [17] 姚仰平, 王琳, 王乃东, 等. 一种机场跑道“锅盖效应”引起灾害的防治方法: 201510397518.8[P]. 2015-11-18.
- YAO Yang-ping, WANG Lin, WANG Nai-dong, et al. A method for preventing and controlling disasters caused by the “pot-cover effect” of airport runways: 201510397518.8[P]. 2015-11-18.
- [18] 姚仰平, 王琳, 王乃东, 等. 一种防治“锅盖效应”引起灾害的新型道基结构: 201510455311.1[P]. 2015-11-25.
- YAO Yang-ping, WANG Lin, WANG Nai-dong, et al. A new type of roadbed structure to prevent disasters caused by the “pot cover effect”: 201510455311.1[P]. 2015-11-25.
- [19] YAO Y P, WANG L. Double pot cover effect in unsaturated soils[J]. **Acta Geotechnica**, 2019, 14: 1037-1047.
- [20] LUO T, QU X, WANG N D, et al. Pot cover effect and its prevention: an experimental study in the field[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2019, 167: 102845.
- [21] 罗汀, 陈含, 王乃东, 等. 一种“锅盖效应”试验仪: 107063933A[P]. 2017-08-18.
- LUO Ting, CHEN Han, WANG Nai-dong, et al. A “pot-cover effect” test instruments: 107063933A[P]. 2017-08-18.