

温度驱动下风积砂毛细现象试验研究

张家甫,黄德文,张健,张超

(河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098)

摘要:为了研究环境温度对毛细水上升过程的影响,进行了室内砂柱模拟试验。设置了两组不同温度下砂柱毛细水上升试验进行对比,分析了风积砂毛细水上升高度随时间的变化规律以及与温度的关系,探讨了毛细水上升的运动机理。试验结果表明:外部条件相同的情况下,较高的温度能够加快湿润锋的迁移速率,然而局部的高温会抑制水分的向上迁移,但温度效应不是特别明显。

关键词:风积砂;竖管法;温度;毛细水;上升高度

中图分类号:TU411

文献标识码:A

Experimental study on temperature driven aeolian sand capillarity

ZHANG Jia - fu, HUANG De - wen, ZHANG Jian, ZHANG Chao

(School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

Abstract: In order to study the process of water movement in soils affected by temperature difference, the indoor sand column simulation experiment was carried. In this paper, there are two groups of different temperature of sand column capillary water rise tests. Through experimental phenomenon and data collected to analyze the change law of aeolian sand rising height of capillary water with time, besides the relationship between rising heights of capillary water with temperature. In addition the movement mechanism of the capillary water rise was discussed. The test results show that, in external condition of the same circumstances, the higher temperature can accelerate the migration rate of the wetted front. However, the local high temperature can inhibit the upward migration of water, but the temperature effect is not obvious.

Key words: aeolian sand; method of standpipe; temperature; rising height of capillary water

毛细水受水与空气交界面处表面张力作用的自由水。其形成过程通常用物理学中毛细管现象解释。分布在土粒内部相互贯通的孔隙,可以看成是许多形状不一,直径各异,彼此连通的毛细管。毛细水是包气带水的重要组成部分,与土壤盐渍化以及工程安全密切相关。因此,毛细现象研究对于农业发展、生态环境保护及工程建设都具有重要意义。对于毛细水上升的问题,前人已经做了大量的研究^[1-11],但他们大多是探讨了土料的颗粒大小、粒径级配、含水率、压实度等因素对土层中毛细水上升高度的影响,而关于温度对毛细水上升高度影响的研究比较少。因此,本文以巴丹吉林沙漠风积砂为研究对象,通过室内竖

管法毛细水上升试验研究,以期揭示毛细水上升高度、上升速度与温度的关系。

1 基本理论

1.1 竖管法原理

竖管法毛细水上升试验原理与毛细水作用机理相同。由固、水、气三相构成的多孔均质颗粒化结构土壤中,有许许多多、大大小小、杂乱无章、随机分布着的各种形状的空隙,这些空隙即是水分运移通道和滞留的场所。固相基质的矿物组成、化学成分、颗粒大小、级配、随机排列等因素决定着这些空隙的大小形状、联通性、毛细管弯曲度等

空间分布特征。这些也是决定毛细水上升高度的主要影响因素。土柱可以被概化为具有统计分布规律的平行毛管束模型其中,毛细力、吸附力及重力的综合作用控制着水分的横向分配,按毛管的统计分布自毛细力大的小空隙依次向毛细力大的大空隙进行,最终形成小空隙充水(微观饱和)状态。水土接触后彼此间产生的毛细力或吸附力使单位重水体能够具有有一种能量,做功后(忽略摩擦损失)转化为等量重力势能,表现为毛细水上升高度^[12]。从而最终达到竖管法试验的效果。

1.2 温度作用机理

在毛细管中,液体的表面呈现弯曲状,通常为弯液面。弯液面的形成主要是液体表面张力作用的结果。由水在土的孔隙中形成的弯液面呈现凹月面,可知表面张力的合力是指向空气一侧的。表面张力的合力也是毛细水上升的动力。

而毛细水上升的最大高度是在此高度处毛细水的重力势与基质势达到平衡。基质势是土壤基质对土壤水分的吸持作用引起的。基质势可理解为非饱和土的一种吸水能力,或者说是一种负压力势。土力学中定义基质吸力为孔隙气压力与孔隙水压力之差。

我们已知表面张力系数随温度的升高而减小,近似线性关系。因此当温度升高时,表面张力系数随之变小,基质吸力将减小,基质势也就会变小,则毛细水上升的最大高度变小。为了验证上述观点,本文设计了如下试验加以印证。

2 材料与方案

2.1 试验材料

试验材料取自巴丹吉林沙漠地表风积砂,其粉粘粒含量少、结构松散、质地均匀,天然含水率很低,密度大约为 1.50 g/cm^3 。材料取回后除去杂质,以防受潮和污染,材料置于室内自然风干,测其含水率为 0.53% 。通过筛分称重得到不同颗粒粒径在所取样品中所占比例,见表1。通过风积砂颗粒级配组成,可以绘制出风积砂颗粒级配累计曲线,试验测得的土体各项参数指标为: $d_{10} =$

表1 试验风积砂颗粒级配组成

Tab.1 Grain composing of aeolian sand

粒径/mm	<0.075	0.075 ~ 0.15	0.15 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~
	0.68	25.69	65.98	3.22	4.43

$0.11 \text{ mm}, d_{30} = 0.16 \text{ mm}, d_{60} = 0.19 \text{ mm}$,由此算得不均匀系数 $Cu = d_{60} / d_{10} = 1.73, Cu < 5$ 所以此风积砂为匀粒土,级配不良。

2.2 试验装置

试验装置如图1所示,该装置主要有3部分组成。

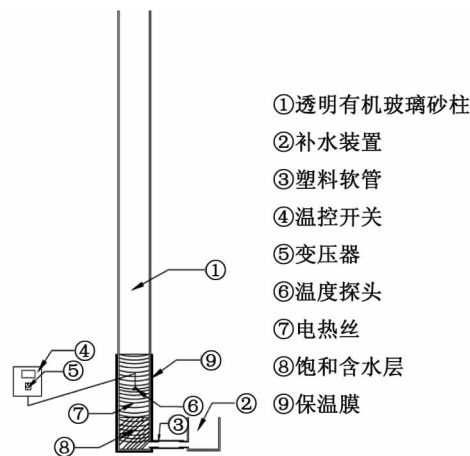


图1 试验装置结构示意图

Fig.1 Device of capillary water rise test

(1)毛细管主体部分见图1①:内径为100 mm,外径为110 mm,壁厚5 mm,高为1 390 mm的透明有机玻璃圆柱。此圆柱是为填装试验所用风积砂样品的容器。

(2)水补给装置:内径为100 mm,外径为110 mm,壁厚为5 mm,高为100 mm的透明有机玻璃圆柱,该圆柱是添加去离子水的补水容器如图1②;内径为20 mm,外径为24 mm,壁厚为2 mm,长为200 mm的塑料软管如图1③,塑料软管是为了连接补水容器和砂柱。

(3)加热装置:温控开关(通过设置启动温度和停止温度,由安放在保温膜中的温度探头可以把加温区域的温度保持在设置温度区间里,本次试验的设置温度区间是 $30^\circ\text{C} \sim 32^\circ\text{C}$),50 m长电热丝(总电阻为 50Ω ,采用双股缠绕的方式绕于加温砂柱的底部,缠绕高度为30 cm)如图1⑦,保温膜(能有效保证加温区域保持恒定的温度)如图1⑨,变压器(可以把220 V电压转化为15 V电压)。

2.3 试验方案

为了研究不同温度下风积砂的毛细水上升高度,共设计了两组试样,一组采用加热装置保持圆柱底部饱和含水层及其之上20 cm砂层的温度稳

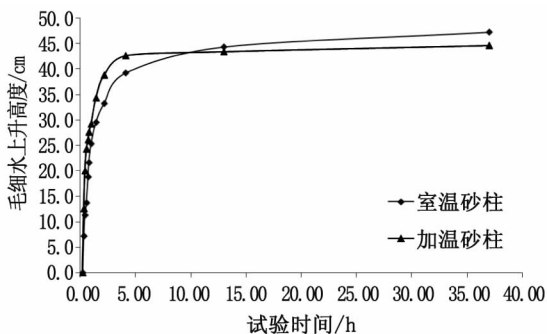
定在 30℃ 左右;另一组置于室内,采用室温,由于是冬季,室温维持在 10℃ 左右。

装样时采用分层击实法,用以控制干密度。圆柱砂样每 10 cm 分层击实,使两根圆柱砂样干密度均为 1.70 g/cm³,且初时含水率相同。圆柱底部 10 cm 的深度内装粒径 2~5 mm 的砂砾石,模拟地下饱和含水层,上部 120 cm 为非饱和层状风积砂,两部分之间垫上一层薄海绵,以免上层风积砂进入砂砾层。

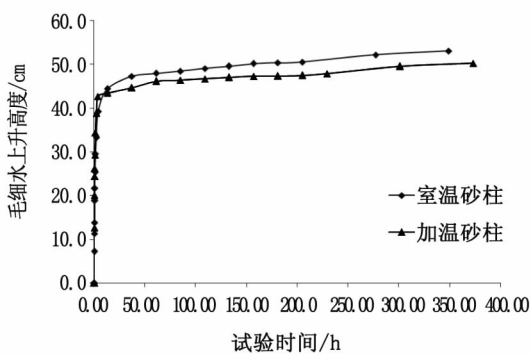
3 结果与讨论

3.1 试验结果

本次试验总共历时 373 h,此时两根砂柱均已停止毛细水的上升运动。绘制得到图 2。



(a) 试验全过程毛细水上升高度曲线



(b) 试验前两天毛细水上升高度曲线

图2 毛细水上升高度随时间的变化关系

Fig.2 Height changes with time of capillary rise

3.1.1 毛细水上升高度与时间的关系

试验测得风积砂毛细水上升高度(即湿润锋距地下水面的距离)随时间的变化关系结果见图 2。由图 2(a) 容易看出,无论是加温砂柱还是室温砂柱,毛细水上升高度都随时间的增长而增加,但增加幅度随时间的增长而减小,即毛细水上升速率逐渐减小。出现这一现象的原因是由于土壤毛细水是在基质势与重力势的作用下向上运

移^[13]。从图 2(b) 可以看出,砂柱毛细水上升高度在 5 h 左右出现拐点,在出现拐点以前的相同时间内,加温砂柱的毛细水上升高度比室温砂柱的毛细水上升高度高的多;出现拐点后,室温砂柱的毛细水上升高度慢慢赶上并超过加温砂柱的毛细水上升高度。

3.1.2 温度对毛细水上升高度的影响

由图 2(a) 毛细水上升高度变化曲线我们可以得到,加温砂柱的毛细水上升的最大高度是 50.2 cm,而室温砂柱的毛细水上升的最大高度是 53.0 cm。在砂柱其他条件相同的情况下,加温砂柱的毛细水上升的最大高度小于室温砂柱的毛细水上升的最大高度,这说明较高的温度对毛细水上升具有抑制作用。由 Young-Laplace 公式知,当加温砂柱温度高于室温砂柱,其毛细水的表面张力系数变小,基质吸力随之减小,则基质势会变小,因此加温砂柱毛细水上升的最大高度将变小。

3.1.3 毛细水上升速度随时间变化关系

由图 3 得到,无论是加温砂柱还是室温砂柱,毛细水上升速度随时间的延长而逐渐减小,在毛细水上升的初期减小幅度比较大,而在后期较稳定;并且一天后两砂柱毛细水上升速度已基本趋近于零。由图 3 可得在试验开始 0.58 h 内,加温砂柱毛细水的上升速度比室温砂柱毛细水的上升速度快;而 0.58 h 之后,加温砂柱毛细水的上升速度小于室温砂柱毛细水的上升速度。

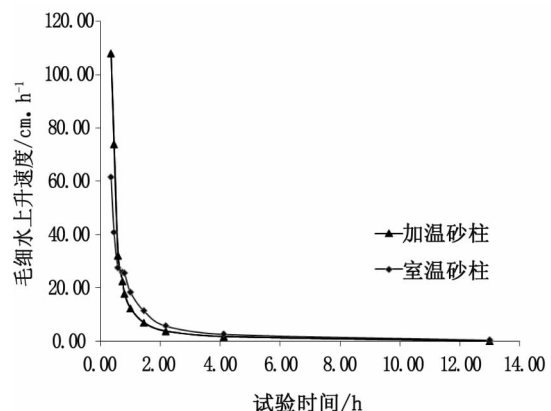


图3 毛细水上升速度随时间变化趋势

Fig.3 The change trend of the speed of capillary rise over time

3.1.4 毛细水上升速度与上升高度关系

由图 4(a) 可以看出,无论是加温砂柱还是室温砂柱,总体而言毛细水上升速度都随着毛细水上升高度的增加而减小,并都是在毛细水上升高度较小时降低幅度大,而在高度较高是降低幅度

小。从图4可知在毛细水上升高度小于43 cm时,加温砂柱的毛细水上升速度大于室温砂柱;而当毛细水上升高度大于43 cm时,加温砂柱的毛细水上升速度小于室温砂柱。这一点也符合图2中加温砂柱毛细水上升高度在达到43 cm时出现拐点的情况。

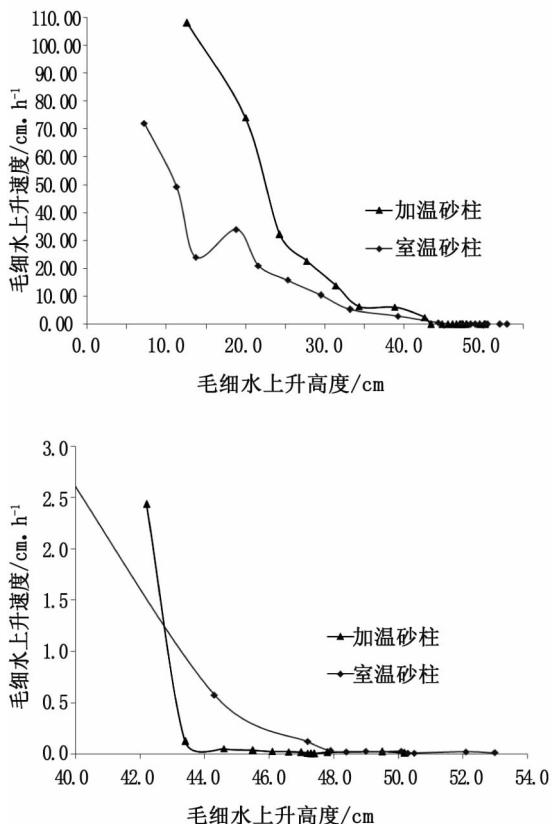


图4 毛细水上升速度与毛细水上升高度的关系

Fig.4 The relationship between the velocity and the rising height of capillary water

3.2 讨论

两砂柱毛细水在上升到43 cm左右时出现上升速度交错的现象,而两砂柱唯一不同在于加温砂柱下部有加热装置,所以只能是温度差异造成了此情况。把加温砂柱里风积砂按温度分成三部分如图5:室温区、降温区、局部高温区。其中局部高温区是电热丝缠绕范围即1-1到2-2面,该区域温度由温控装置保持在设置温度30℃~32℃。而降温区是高温区向室温区过渡的区域即2-2到4-4面,该区域的温度由高温区的设置温度逐渐降为室温区的室温10℃;室温砂柱则全柱均处于室温下。两个砂柱在3-3面毛细水上升速度达到相同。3-3面以下加温砂柱速度快,3-3面以上室温砂柱速度快。加温砂柱的高温区由

于温度相对较高,毛细水粘滞系数较小,导致土粒表面水膜薄,水分子运动速度变快,所以毛细水上升速度更快;降温区2-2到3-3段砂柱温度低于高温区,此段毛细水粘滞系数比高温区大,此段水膜则比高温区水膜厚,毛细水上升速度比高温区慢,该段温度是逐渐降低的,因此越往上水膜越厚。水分子从高温向低温运动,这会促进毛细水的上升,但同时水分子又有从厚水膜向薄水膜迁移的趋势,这却阻碍了毛细水上升速度,因此在此段砂柱毛细水上升速度受温度差异和水膜厚度差异(含水率梯度)的综合作用。

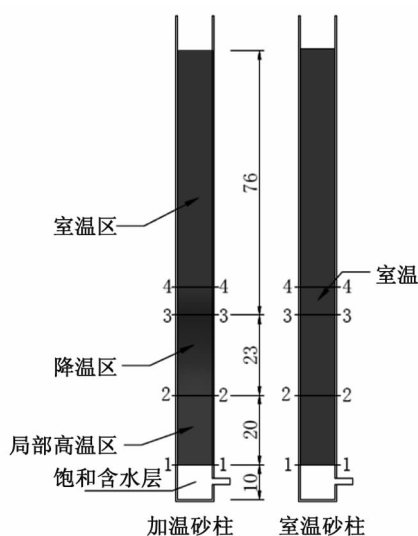


图5 砂柱温度分布示意图

Fig.5 Schematic diagram of the temperature distribution of the sand column

对比加温砂柱和室温砂柱:1-1至2-2段,加温砂柱比室温砂柱温度高,粘滞系数小,水膜薄,毛细水上升速度快。2-2至3-3段,加温砂柱温度逐渐降低却仍比室温砂柱高,但温度的促进作用会越向上越小;加温砂柱此段越往上水膜越厚,所以阻碍作用越向上越大。当毛细水到达3-3面时,加温砂柱温度的促进作用和水膜的阻碍作用达到一个平衡点恰好使得毛细水上升速度等于室温砂柱;3-3面以下,加温砂柱的温度促进作用大于3-3面而水膜的阻碍作用小于3-3面,所以加温砂柱毛细水上升速度大于室温砂柱;3-3以上,加温砂柱的温度促进作用小于3-3面而水膜的阻碍作用大于3-3面,所以加温砂柱毛细水上升速度小于室温砂柱。

4 结论

1) 无论是加温砂柱还是室温(下转第65页)

越细,混凝土拌合物的塌落度增长幅度越小,拌合物的粘聚性和保水性越好。

3)通过对不同龄期混凝土试块抗压强度的测定表明,磨细石灰石粉提高了混凝土抗压强度,并且随着石灰石粉细度的增加,混凝土的抗压强度增大。

参考文献:

- [1]周金钟,郑广军,刘勇彰.石灰石粉在普通混凝土中的应用研究[J].建筑节能,2009,10(6):31-34.
- [2]MENENDEZ G, BONAVENTI V, IRASSAR E F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 25(1):61-67.
- [3]郭育霞,贡金鑫,李晶.石粉掺量对混凝土力学性能及耐久性的影响[J].大连理工大学学报,2009,12(3):266-271.

(上接第61页)砂柱,毛细水都是在开始水补给初期阶段上升速度最快;随着时间的增长,毛细水上升速度越来越小,直至停止。

2)其他条件相同的情况下,加温砂柱毛细水上升的最大高度小于室温砂柱毛细水上升的最大高度,证明局部的高温反而会抑制水分的向上迁移。随着温度的升高,毛细水上升的最大高度将随之降低。

3)两根砂柱毛细水在上升到43 cm时,毛细水上升速度相等;低于43 cm时,加温砂柱毛细水上升速度大于室温砂柱;高于43 cm时,室温砂柱毛细水上升速度大于加温砂柱。

参考文献:

- [1]贝尔.多孔介质流体力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1983.
- [2]刘小平.非饱和土路基水作用机制及其迁移特性研究[D].长沙:湖南大学,2008.
- [3]尹娟,费良军,程东娟.均质土壤毛管水上升特性室内试验研究[J].农业工程学报,2007,6(23):91-94.
- [4]王丁,费良军.层状土壤上升毛管水运移特性实验研究[J].地下水,2009,31(1):35-37.

- [4]岳瑜,张兰芳.磨细粉煤灰与石灰石粉复合配制C80高性能混凝土的研究[J].粉煤灰综合利用,2011,13(4):20-21.
- [5]李晶.石灰石粉掺量对混凝土性能影响的试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [6]何锦云,李云峰,白鲁帅.石灰石粉掺量对混凝土性能的影响研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(3):15-16.
- [7]何锦云,张翠,吕如春.特细砂配制低强度混凝土的试验研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2014,31(1):6-8.
- [8]孙开双,周兴旺,刘桂宾.磨细石灰石粉对混凝土性能影响研究[J].商品混凝土,2010(2):294-298.
- [9]陈剑雄,崔洪涛,陈寒斌,等.掺入超细石灰石粉的混凝土性能研究[J].施工技术,2004,33(4):39-41.

(责任编辑 王利君)

- [5]DULLIEN F A L.多孔介质:流体渗移与孔隙结构[M].北京:石油工业出版社,1990.
- [6]FREDLUND D G, RAHARDIO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley & Sons Inc, 1993.
- [7]李锐,李文光,陈善雄.基于Geo-slope的膨胀土路基毛细水上升分析[J].华中科技大学学报:城市科学版,2006,23(1):36-39.
- [8]魏进,王晓谋,张登良.风积砂的毛细性及其盐胀的室内试验研究[J].内蒙古公路与运输,2005(89):37-38.
- [9]LU N, LIKOSW J. Rate of capillary rise in soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6):646-650.
- [10]董斌,张喜发,李欣,等.毛细水上升高度综合试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(10):1569-1575.
- [11]苗强强,陈正汉,田卿燕,等.非饱和含黏土砂毛细水上升试验研究[J].岩石力学,2011,32(Z1):327-333.
- [12]希勒尔.土壤和水-物理原理和过程[M].北京:农业出版社,1981.
- [13]贾辉.波涌灌间歇入渗氮素运移特性与地下水环境效应试验研究[D].西安:西安理工大学,2004.

(责任编辑 王利君)