

# 道路生态滤沟回填黄土毛细持水特性试验研究

南亚林<sup>1,2</sup>, 张晓玉<sup>3\*</sup>, 陈鸿<sup>4</sup>, 安鹏<sup>3</sup>, 刘魁<sup>1,2</sup>, CAMARA, Ibrahima Kalil<sup>3</sup>

(1.信息产业部电子综合勘察研究院, 陕西 西安 710054; 2.陕西省土体工程技术研究中心, 陕西 西安 710054;

3.长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064; 4.西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:**市政道路生态滤沟雨季积水渗透、旱季保墒是基本功能,而黄土生态滤沟回填土的设计无据可依,常导致景观植被雨季渍害或旱季枯死。为此,通过对重塑黄土进行小尺寸毛细水上升高度试验、大尺寸持水特性模型试验以及非饱和和数值分析研究。结果表明:当干密度分别为 $1.3\text{ g/cm}^3$ 、 $1.4\text{ g/cm}^3$ 时,土柱的最终毛细水上升高度均可达到100 cm。土柱高度超过20 cm后,其含水率基本保持稳定,稳定含水率分别为30.0%、28.0%;在重塑黄土毛细水上升过程中,存在一个暂态饱和区,其中干密度越小,孔隙比越大,大孔隙数量增多,毛细吸力减弱,导致水分迁移速率较慢,同时被湿桥封闭的大气泡数量也较多,因此暂态饱和区的持续时间较长。对于 $1.3\text{ g/cm}^3$ 的土柱,其湿润锋时程曲线的模拟值与实测值基本吻合。综合考虑黄土地层稳定的天然平均干密度、毛细水上升高度及其持水特性以及生态滤沟回填土在后期将经历反复的渗透固结与毛细作用,采用 $1.2\text{ g/cm}^3$ 作为回填控制干密度,以确保市政道路生态滤沟中的植土在旱季仍能维持植被生长所需的土壤湿度。

**关键词:**生态滤沟; 回填黄土; 毛细水上升; 模型试验; 数值模拟

中图分类号:U416

文献标志码:A

## Experimental Study on Capillary Water-Holding Characteristics of Loess Backfill in Ecological Ditches

NAN Yalin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoyu<sup>3\*</sup>, CHEN Hong<sup>4</sup>, AN Peng<sup>3</sup>, LIU Kui<sup>1,2</sup>, CAMARA, Ibrahima Kalil<sup>3</sup>

(1.China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2.Soil Engineering Technology

Research Center of Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3.School of Geological and Surveying Engineering, Chang'an University,

Xi'an, Shaanxi 710064, China; 4.Western Superconducting Technologies Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

**Abstract:** The municipal ecological ditches have the basic functions of accumulating water for infiltration in the rainy season and conserving moisture in the dry season. However, the design of loess backfill in ecological ditches is based on no evidence, which often leads to landscape vegetation drowning in the rainy season or dying in the dry season. For this reason, a study was carried out by remoulding loess with a small-size capillary water rise height test, a large-size water-holding characteristic model test, and an unsaturated numerical analysis. The results show that the final capillary water rise height of the soil column can reach 100 cm when the dry density is  $1.3\text{ g/cm}^3$  and  $1.4\text{ g/cm}^3$ , respectively, and the water content of the soil column is basically stable after the height of the soil column exceeds 20 cm, with the stable water content of 30.0% and 28.0%, respectively. In the process of capillary water rise of remoulded loess, a transient saturation zone exists, in which smaller dry density indicates larger pore ratio, increased large pores, and weakened capillary suction,

收稿日期:2023-12-23

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(编号:2024JC-YBMS-314, 2023-YBNY-234);信息产业部电子综合勘察研究院项目(编号:2021-DKY-W01);渭南市海绵城市建设专题研究服务项目(编号:ZCSP-渭南市-2023-00548)

作者简介:南亚林,男,硕士,正高级工程师.E-mail:357442561@qq.com

\*通信作者:张晓玉,女,硕士研究生.E-mail:zxywfm@163.com

resulting in a slower rate of water migration. At the same time, the number of large bubbles closed by the wet bridge is also larger, so the duration of the transient saturation zone is longer. For a soil column of  $1.3 \text{ g/cm}^3$ , the simulated value of the wetting front time curve is basically consistent with the measured value. By considering the stable natural average dry density of loess stratum, the height of capillary water rise, and its water-holding characteristics, as well as the fact that the backfill in ecological ditches will undergo repeated infiltration, consolidation, and capillary action in the later stage,  $1.2 \text{ g/cm}^3$  is adopted as the dry density for backfill control, so as to ensure that the planting soil in the municipal ecological ditches can still maintain the soil humidity necessary for the growth of the vegetation in the dry season.

**Keywords:** ecological ditches; loess backfill; capillary water rise; model test; numerical simulation

## 0 引言

市政道路生态滤沟是海绵城市建设中改善城市内涝,实现道路积水自然渗透积存,植被净化的重要设施<sup>[1-3]</sup>。在干旱半干旱黄土地区,生态滤沟回填黄土的设计无据可依。生态滤沟景观植被常因回填土压实过大导致雨季积水渍害、旱季枯死;压实度过小导致变形过大。这些问题影响了生态滤沟调蓄功能的发挥。因此,寻求合理的上覆回填土压实标准,确保生态滤沟下层砂砾石储水层以上回填土具备较强的毛细上升和持水能力,这也是其设计的关键。

毛细水上升及其持水特性试验是研究回填土旱季保墒能力的主要方法。在毛细水上升高度试验方面,袁玉卿等<sup>[4]</sup>研究表明:豫东黄泛区粉砂土最大毛细上升高度为 285 cm,上升高度随时间而趋稳;张志军等<sup>[5]</sup>、刘迪等<sup>[6]</sup>研究表明:尾矿砂毛细水前 3 d 上升高度占总高度的 50% 以上,后期持续 90 多天才趋稳。同时尾矿砂毛细上升高度与时间呈对数关系,并且与粒径呈负相关关系;于丹等<sup>[7]</sup>研究表明干密度与重塑黄土最大毛细上升高度呈抛物线关系。另外,对于连续级配钙质砂,细粒越多,级配越好,毛细上升高度越高,而单一粒径钙质砂的粒径越小,毛细上升高度越大<sup>[8-9]</sup>。溶液种类及其浓度( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  与  $\text{NaCl}$ )对砂土的毛细上升高度与速率也有显著影响<sup>[10-12]</sup>。可见,干密度、级配和毛细溶液均会影响毛细上升过程。

在毛细持水特性试验方面,郑娟等<sup>[13]</sup>采用压力板仪对非饱和黄土土水特征曲线的研究表明:干密度越小,持水能力越差,含水率随基质吸力增大而减小的幅度逐渐变小并趋缓;李萍等<sup>[14]</sup>针对陇东马兰原状黄土进行了毛细上升试验,根据 Terzaghi 理论及

Lu 等<sup>[15]</sup>提出的方法给出该黄土的土水特征曲线;落宇杰等<sup>[16]</sup>通过压实黄土状粉土的一维土柱毛细模型试验研究表明:截面处的基质吸力先平缓减小,后急剧下降,最后趋稳;徐硕昌等<sup>[17]</sup>通过重塑黄土浸水入渗模型试验研究表明:测点体积含水率都会经历稳定—快增—峰值—快减—再增—趋稳 6 个阶段,同时深度越大,湿润锋发展越滞后;周奇等<sup>[18]</sup>使用竖管法对黄土进行毛细水上升试验,实测基质吸力、含水率和土水扩散系数,并对其进行有限元分析。可见,黄土中水分迁移过程实际上表现为体积含水率与基质吸力之间复杂的负相关变化关系,这一过程对后期持水特性具有显著影响。

因此,本文针对当前黄土区市政道路生态滤沟回填黄土因缺乏压实依据而导致的调蓄功能问题,拟通过重塑黄土的小尺寸毛细水上升高度试验,明确不同于密度毛细水上升高度、上升速率和持水特点,研究干密度对毛细水上升的影响规律。通过大尺寸毛细水迁移试验,研究基质吸力与体积含水率的变化规律,获取回填土的土水特征曲线,并通过数值分析验证不同压实回填黄土的持水特点。最终综合考虑黄土地层稳定的天然平均干密度、毛细水上升高度及其持水特性、回填土后期需要经历的反复渗透固结与毛细作用,给出回填控制干密度,确保生态滤沟具备长期调蓄保墒功能。研究结果将对生态滤沟的建设具有重要实际指导意义。

## 1 试验土样基本特性

选取研究区陕西空港新城市政道路生态滤沟回填所用的  $Q_3$  黄土若干,进行基本物理力学性质试验,轻型击实仪实测土样最大干密度为  $\rho_{d\max}=1.69 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为  $w_{op}=17.32\%$ 。基本物理参数见表 1。

表1 试验黄土的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of loess in test

塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	黏粒 ( $<0.002$ mm)/%	粉粒 ( $0.002\sim$ $0.075$ mm)/%	砂粒 ( $>0.075$ mm)/%
21.7	32.5	10.8	4.36	93.84	1.80

## 2 毛细水上升高度试验

### 2.1 试验设计

毛细上升高度仪通过特制弹簧确保补水桶底面与毛细水上升管底面维持同一高度,沿管壁纵向每隔10 cm预留直径10 mm测试孔,这些孔用于稳定后取样,实测含水率,见图1。

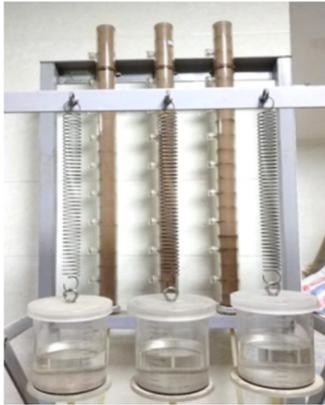


图1 毛细水上升高度试验仪器

Figure 1 Instrument for capillary water rise height test

为确定生态滤沟上覆回填黄土的合理干密度,根据实测自然沉积黄土层的平均干密度( $1.3\text{ g/cm}^3$ )与天然平均含水率( $12.0\%$ ),将 $Q_3$ 黄土风干、碾压、过筛(2 mm),配置土样至目标含水率 $12.0\%$ 并密封静置48 h后,按 $1.3\text{ g/cm}^3$ 、 $1.4\text{ g/cm}^3$ 、 $1.5\text{ g/cm}^3$ 共3个干密度分层刮毛压实制样于玻璃管中,在模拟自然条件下,先将土柱顶部敞口开放,再向供水筒中注满水,确保供水筒水面与玻璃管底部保持齐平,最后开始毛细上升试验。

### 2.2 毛细水上升时程规律分析

毛细上升试验中,根据管中土湿润锋面处颜色差异,实时测记毛细上升高度时程变化,3组干密度含水率时程及其上升速率曲线如图2、3所示。

由图2可知:在200 h之前,干密度越小,毛细水上升高度越大,但 $1.3\text{ g/cm}^3$ 和 $1.4\text{ g/cm}^3$ 土样的毛细水上升锋面最终均达到土柱100 cm的高度,而 $1.5\text{ g/cm}^3$ 土

样在200 h时仅为30 cm,同时最终上升高度仅为55 cm,远小于前两种干密度。由图3可知:毛细水上升速率随着时间而逐渐减小并最终趋于稳定,其中干密度越小,毛细水上升速率越大。

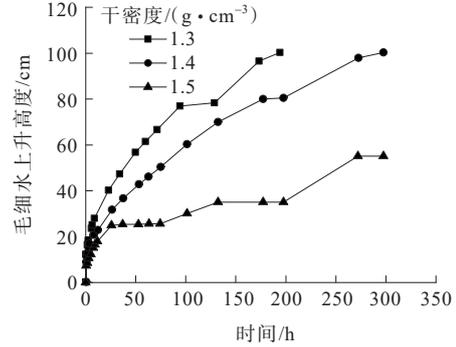


图2 重塑黄土毛细水上升高度时程曲线

Figure 2 Time curves of capillary water rise height of remolded loess

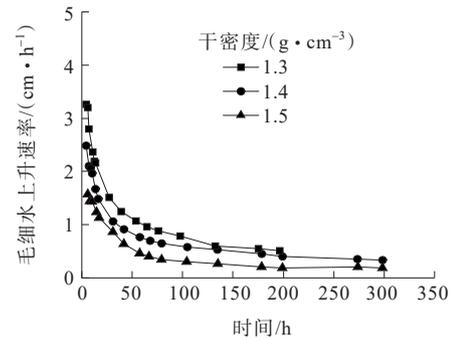


图3 重塑黄土毛细水上升速率曲线

Figure 3 Curves of capillary water rise rate of remolded loess

黄土的毛细水上升速率和上升高度取决于土中的基质势和毛细水通道数量。基质势是黄土中毛细水上升的驱动势,在初始含水率一定时,干密度越大,颗粒接触点越多,收缩膜数量也越多,基质势也就越大。但同时,干密度越大,孔隙比越小,毛细水在土中运移通道的数量和连续性也就越差,反而影响了毛细水的上升速率,加之非饱和渗流还取决于含水率,随着上升高度的增大,形成的死孔隙也就越多,含水率也就越低,上升速率自然也会下降,这就是上升速率随时间与高度逐渐下降并最终趋缓的主要原因。

### 2.3 毛细水上升稳定后含水率分布特征分析

待上升高度不变后,每24 h取有机玻璃管称重,待总质量连续48 h无变化后,即认为毛细上升过程已稳定。随即拧开侧壁开孔处活塞取样,实测获取相应高度处的含水率,见图4。

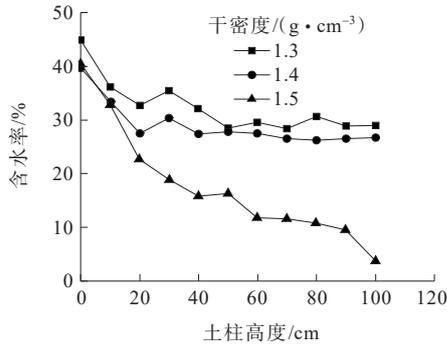


图4 土样最终含水率分布

Figure 4 Distribution of final water content of soil samples

由图4可知:毛细水上升稳定后含水率随高度的增加而减小,其中1.5 g/cm<sup>3</sup>干密度土柱的含水率随高度的增加持续降低,最终仅为3.0%,甚至因顶部水分散失而低于初始含水率12.0%。而1.3 g/cm<sup>3</sup>和1.4 g/cm<sup>3</sup>干密度土柱的含水率在高度为0~20 cm范围持续减小,但在20 cm之后基本趋稳,其中1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱含水率稳定在30.0%,而1.4 g/cm<sup>3</sup>土柱含水率稳定在28.0%左右。综合考虑毛细上升速率、上升高度和旱季持水特性,1.3 g/cm<sup>3</sup>作为市政道路生态滤沟运行期的干密度较合适。

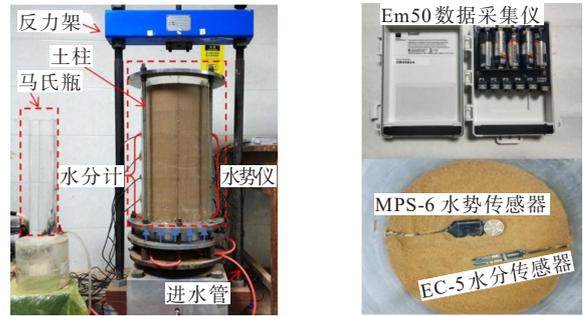
### 3 生态滤沟回填土持水特性试验

上文通过简易毛细上升试验明确了干密度1.3 g/cm<sup>3</sup>在毛细上升与持水特性方面较合适。生态滤沟上覆黄土在经历反复渗透固结、自重作用下,有压密趋势。为保证生态滤沟性能的长期发挥,回填初始干密度应不大于1.3 g/cm<sup>3</sup>。为此本小节拟进行干密度1.2 g/cm<sup>3</sup>与后期稳定干密度1.3 g/cm<sup>3</sup>两种工况的毛细水分迁移试验,土样制备方法与2.1小节相同。不同之处:在土柱底面以上10 cm、20 cm、30 cm和40 cm处分别设置了水分传感器和水势传感器。这些传感器不但可以实测土壤水分和基质吸力,还可以获得土水特征曲线(以下简称SWCC),用于后期多工况数值分析。

#### 3.1 毛细水迁移试验设备

毛细水迁移试验装置由主体装置、补水装置(马氏瓶)和监测装置构成,见图5(a)。主体装置的有机玻璃筒用来观测毛细水上升高度。筒壁两侧预留孔可实测基质吸力和体积含水率。监测装置包括Em 50数采仪、EC-5土体水分传感器和MPS-6土体

水势传感器,见图5(b)。



(a) 毛细水上升迁移试验装置

(b) 土壤水湿监测装置

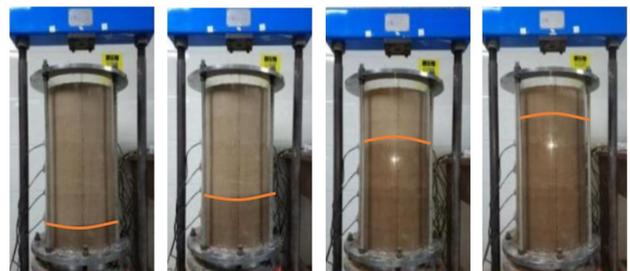
Figure 5 Device for capillary water rise migration test

and Monitoring device for soil humidity

#### 3.2 试验结果与分析

##### 3.2.1 体积含水率与湿润锋变化规律

通过湿润锋观察(图6)和体积含水率实测,得到毛细水上升过程与体积含水率变化时程见图7。



(a) 60 min

(b) 215 min

(c) 1 211 min

(d) 2 833 min

图6 毛细水湿润锋运移图

Figure 6 Capillary water wetting front migration

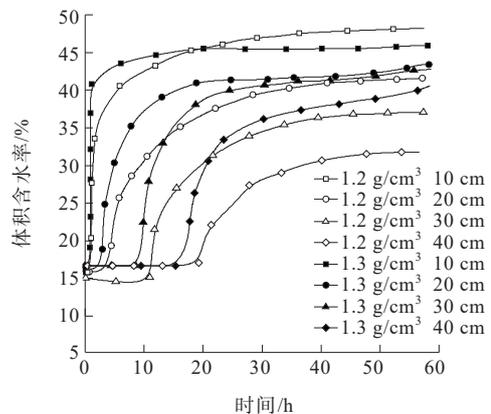


图7 体积含水率时程曲线

Figure 7 Time curves of volumetric water content

由图6、7可知:两种干密度土柱在10~40 cm高度处土样的体积含水率随时间均从初始含水率急速上升并最终趋稳(稳定含水率),大体呈倒“S”形。分

析发现其存在两个特点:①不同干密度土样测点位置越低,稳定含水率越大;②体积含水率的变化可显著划分为4个阶段,即初始平缓段、启动段、弧形段、趋稳段,其中,初始平缓段为毛细水未至时的初始含水率,趋稳段为毛细作用稳定后的稳定含水率,而弧形段特征与干密度有关,具体见表2。

表2 土柱体积含水率时程曲线弧形段特征

Table 2 Characteristics of curved section in time curve of volumetric water content of soil column

干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	位置高 度/cm	时段/ h	持续时 间/h	含水率 变幅/%	含水率 差值/%
1.2	10	5~25	20	38~45	7
	20	5~30	25	25~40	15
	30	13~35	22	25~35	10
	40	22~35	13	23~29	6
1.3	10	3~13	10	42~44	2
	20	8~15	7	35~39	4
	30	13~25	12	33~40	7
	40	23~32	9	33~35	2

由图7和表2可知:1.2 g/cm<sup>3</sup>土柱的弧形段比1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱的历时更长。其中,1.2 g/cm<sup>3</sup>土柱持续13~25 d,而1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱持续7~12 d,另外1.2 g/cm<sup>3</sup>土柱“弧形段”含水率差值为6.0%~15.0%,大于1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱“弧形段”含水率差值的范围(2.0%~7.0%)。说明干密度越小,“弧形段”历时更长,含水率差值越大。

“弧形段”可称之为“暂态饱和区”,土中毛细水上升过程中,水分在吸力的作用下沿着湿桥持续上升,粒间孔隙被湿桥逐渐包围并形成封闭气泡,随着毛细水在上部吸力作用下持续运移,封闭气泡逐渐变小,气泡内气压也持续增大,此时封闭气泡的收缩膜上承受着的孔隙气压力持续增大、而孔隙水压力变化不大,当两者的差值(基质吸力)大于封闭气泡进气值时,气泡破裂产生不同尺寸的气泡,小气泡向上运移排除气体,无法排出的气泡在湿桥的持续增厚下而变小,气压增大,继续重复上述过程,直至水分迁移速率稳定后湿桥不再增厚为止。因此,暂态饱和区的存在机理可解释为:封闭压缩气体上收缩膜承受的孔隙气压力、孔隙水压力和进气值的短暂力学平衡。因此,1.2 g/cm<sup>3</sup>土柱与1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱相比,孔隙比大,大孔隙数量多,毛细吸力小,水分迁移

速率较慢,被湿桥封闭的大气泡数量也较多,因此在暂态饱和区的持续时间也较1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱长。

3.2.2 SWCC与非饱和渗透系数分析

试验过程中实测不同高度处基质吸力变化时程曲线如图8所示。

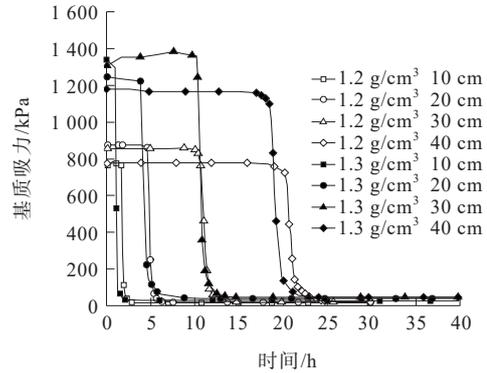


图8 基质吸力随时间变化规律曲线

Figure 8 Variation of matrix suction with time

由图8可知:相同含水率时1.3 g/cm<sup>3</sup>土柱的初始基质吸力显著大于1.2 g/cm<sup>3</sup>土柱,这是因为干密度越大,颗粒接触点位越多,收缩膜数量越多,基质吸力越大。随着毛细水的到达,受浸湿影响,基质吸力大幅度下降,直至接近于零。通过实测体积含水率与对应基质吸力曲线可绘制SWCC,并选取Fredlund-Xing模型进行SWCC拟合,公式如下:

$$\theta = C(\Psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\Psi/a)]\}^m} \quad (1)$$

$$C(\Psi) = \left[ 1 - \frac{\ln(1 + \Psi/\Psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\Psi_r)} \right] \quad (2)$$

式中: $\theta_s$ 为饱和体积含水率(%); $\Psi$ 为基质吸力(kPa); $a$ 、 $m$ 和 $n$ 为模型拟合参数; $e$ 为自然对数常量; $C(\Psi)$ 为修正因子; $\Psi_r$ 为残余含水量对应的吸力值(kPa)。其中,SWCC如图9所示,拟合参数值见表3。

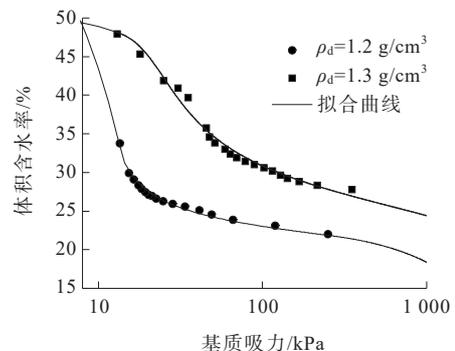


图9 Fredlund-Xing模型拟合的SWCC

Figure 9 SWCC fitted by Fredlund-Xing model

表 3 Fredlund-Xing 模型拟合 SWCC 参数

Table 3 SWCC parameters fitted by Fredlund-Xing model

干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	拟合参数			$R^2$
	$a$	$m$	$n$	
1.2	12.189	0.121	232.879	0.982 6
1.3	18.441	0.220	4.657	0.986 5

非饱和渗透系数是进行非饱和土渗流分析的主要土体参数。根据试验测得多个监测断面瞬时体积含水率和吸力分布,选用瞬时剖面法<sup>[19]</sup>计算土样非饱和渗透系数,将其与体积含水率绘制于图 10。

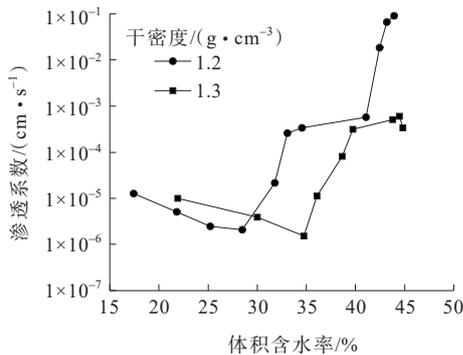


图 10 体积含水率与非饱和渗透系数的关系

Figure 10 Relationship between volumetric water content and unsaturated permeability coefficient

由图 10 可知:1.2 g/cm<sup>3</sup>、1.3 g/cm<sup>3</sup> 土柱体积含水率为 17.0%~45.0%,其对应的渗透系数变化区间分别为:  $2.11 \times 10^{-6} \sim 9.02 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$  和  $1.00 \times 10^{-6} \sim 6.01 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。渗透系数随体积含水率的增大而增大,较大含水率区间内渗透系数随体积含水率增长较快,较小含水率区间渗透系数随体积含水率增长较慢。

#### 4 基于非饱和渗流的生态滤沟数值模拟分析

依据当前生态滤沟的常规尺寸,采用 GEO-SEEP/W 模块进行其毛细上升非饱和渗流分析<sup>[20]</sup>。评价回填前后压实黄土( $\rho_d=1.3 \text{ g/cm}^3$  和  $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ ) 在旱季土壤保墒能力。

##### 4.1 数值模型构建

鉴于生态滤沟属于线性工程,建立二维平面问题,仅对回填土层进行分析。实际工程中,回填土层底部为砂砾石储水层,为定水头无压供水,侧壁外裹防渗材料,顶部大气连通。因此,边界条件为:底部土水接触面设为零水头,两侧设为隔水边界,土表设

为恒温恒湿条件下自然蒸发。SWCC 与非饱和渗透系数曲线采用上节实测数据。

##### 4.2 模拟结果分析

数值分析获得的生态滤沟回填土毛细上升过程中含水率剖面云图如图 11 所示。

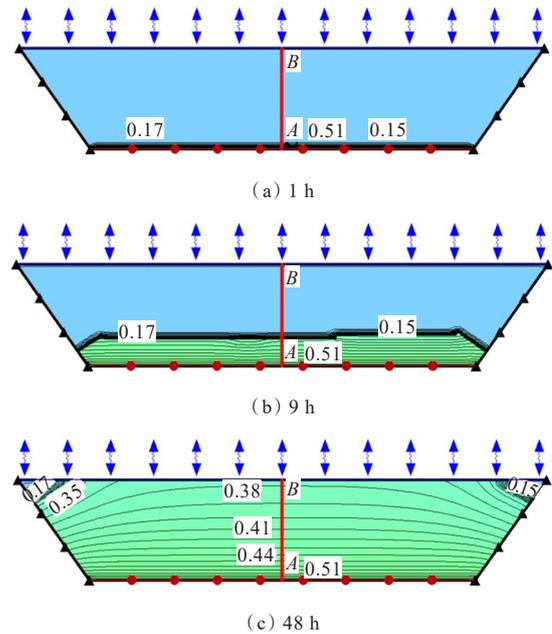


图 11 不同时刻土柱体积含水率等值线图( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )  
Figure 11 Contour map of volumetric water content of soil column at different time ( $\rho_d=1.2 \text{ g/cm}^3$ )

由图 11 可知:随时间推移,毛细水由回填土底部逐渐上升至顶部,在此过程中,湿润锋从 A 处逐渐上升至 B 处,9 h 时,湿润锋约上升至 18 cm,48 h 后,回填土顶部体积含水率为 35%~38%,毛细水基本迁移至回填土顶部,此时湿润锋高度为 60 cm。为分析模拟效果,将两种干密度湿润锋上升高度时程的模拟值(A-B 剖面)与实测值进行对比,如图 12 所示。

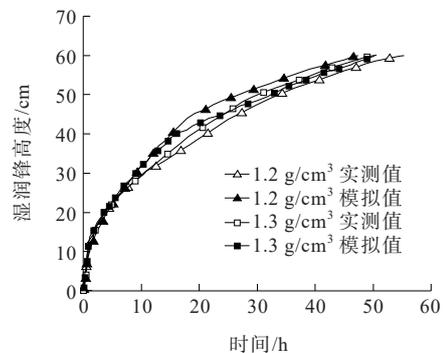


图 12 湿润锋面高度模拟值和实测值  
Figure 12 Simulated and measured values of wetting front height

由图13可知:

(1)  $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱和 $1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱两种干密度毛细水上升实测时程基本一致,其中前者稍大于后者,这是因为前者在基质吸力和孔隙连通性方面较均衡,而后者虽然孔隙连通性较好,但基质吸力较小。

(2) 毛细水上升初期,模拟值与实测值比较吻合,但在约8 h之后,模拟值与实测值出现了偏差。其中, $1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱在8 h左右开始出现偏差,此后模拟值一直大于实测值,18 h时实测值与模拟值的差值最大,两者相差约7.5 cm。而 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱在8~25 h时段模拟值大于实测值,而在25 h之后,实测值始终稍大于模拟值,15 h时,实测值与模拟值的差值最大,两者相差约3.7 cm。

$1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱毛细水上升模拟值时程与实测值差别较大的原因可能是控制干密度较小,土样制样过程中存在轻微的自重压密所致。而 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱的模拟值与实测值差值基本相当,说明该模拟方法是正确的,可用于后期生态滤沟的非饱和数值分析。

## 5 结论

(1) 重塑黄土毛细水上升高度与速率受土中基质势和孔隙连通性的共同影响。试验表明: $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱和 $1.4 \text{ g/cm}^3$ 土柱均可达到100 cm,而 $1.5 \text{ g/cm}^3$ 土柱的上升高度受限,最终仅为55 cm。同时,毛细水上升速率随时间逐渐减小并趋于稳定,其中 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱的毛细水上升速率最大。

(2) 当毛细水上升稳定后,含水率随土柱高度而减小,其中 $1.5 \text{ g/cm}^3$ 土柱的含水率随着土柱高度的增加而持续降低,最终含水率仅为3.0%。而 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱和 $1.4 \text{ g/cm}^3$ 土柱在20 cm高度以上含水率趋于稳定,分别为30.0%和28.0%左右,均可保证生态滤沟旱季的土壤保墒。

(3) 在毛细水上升过程中,某一区域的体积含水率变化曲线存在弧形段,即暂态饱和区。与 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱相比, $1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱孔隙比大,大孔隙数量多,毛细吸力小,水分迁移速率较慢,被湿桥封闭的大气泡数量也较多,因此其暂态饱和区的持续时间也较 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱更长。

(4) 重塑黄土的SWCC可通过Fredlund-Xing模型很好地拟合。非饱和土毛细水上升过程的数值分

析表明: $1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱的毛细水湿润锋面在48 h即可到达黄土60 cm高度处。由于 $1.2 \text{ g/cm}^3$ 土柱干密度较小,土样制样过程可能存在轻微的自重压密现象,导致其湿润锋时程曲线的模拟值与实测值之间存在较大差异,而 $1.3 \text{ g/cm}^3$ 土柱模拟值与实测值的湿润锋时程曲线基本相当,表明该模拟方法可用于生态滤沟运行后期的非饱和数值分析。

综合考虑黄土地层的天然平均干密度、毛细水上升高度及其持水特性、生态滤沟回填黄土后期经历的反复水分渗透固结与毛细作用,推荐采用 $1.2 \text{ g/cm}^3$ 作为回填黄土的控制干密度,并维持干密度在 $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ 范围内长期运行,以维持市政道路生态滤沟植土在旱季仍能维持景观植被所需的土壤湿度。

## 参考文献:

### References:

- [1] 石碧岩.海绵城市在陕西西咸新区市政建设设计中的应用[J].建筑施工,2020,42(11):2152-2154.  
SHI Biyan. Application of sponge city in municipal construction design of Xixian new area in Shaanxi Province[J]. Building Construction, 2020, 42(11): 2152-2154.
- [2] 姜早龙,张伟博,张志军,等.滨海地区海绵城市低影响开发技术优化利用研究[J].中外公路,2023,43(5): 259-266.  
JIANG Zaolong, ZHANG Weibo, ZHANG Zhijun, et al. Research on optimization and utilization of low impact development technology of sponge city in coastal area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 259-266.
- [3] 朱润田,刘珊,张小明,等.海绵城市透水混凝土路面堵塞及渗透性能研究[J].中外公路,2022,42(3):30-35.  
ZHU Runtian, LIU Shan, ZHANG Xiaoming, et al. Study on performance of clogging and permeability of pervious concrete pavement in sponge city[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 30-35.
- [4] 袁玉卿,李伟,赵丽敏.豫东黄泛区粉砂土毛细水上升研究[J].公路交通科技,2016,33(2):33-38.  
YUAN Yuqing, LI Wei, ZHAO Limin. Research of silty soil capillary water rising in Yellow River flooded area of eastern Henan[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(2): 33-38.
- [5] 张志军,李亚俊,刘玄钊,等.某金属矿山尾矿坝中毛细水的上升规律[J].中国有色金属学报,2014,24(5):1345-1351.  
ZHANG Zhijun, LI Yajun, LIU Xuanzhao, et al. Rising law

- of capillary water in tailings dam of metal mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1345-1351.
- [6] 刘迪,卢才武,连民杰,等.基于粒径效应影响的尾矿毛细特性试验[J].中国有色金属学报,2020,30(11):2746-2757. LIU Di, LU Caiwu, LIAN Minjie, et al. Experiment on tailings capillary characteristics based on particle size effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11):2746-2757.
- [7] 于丹,程东会,杨红斌.不同干密度重塑黄土的毛细上升速率和最大高度[J].公路交通科技,2018,35(1):8-13,21. YU Dan, CHENG Donghui, YANG Hongbin. Rate and maximum height of capillary rise for remodeled loess with different dry densities[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(1): 8-13,21.
- [8] 胡明鉴,张晨阳,崔翔,等.钙质砂中毛细水高度与影响因素试验研究[J].岩土力学,2019,40(11):4157-4164. HU Mingjian, ZHANG Chenyang, CUI Xiang, et al. Experimental study on capillary rise and influencing factors in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11):4157-4164.
- [9] 许兆栋,李鸣,洪昌伟,等.含黏粒砂土颗粒级配对渗透性的影响研究[J].中外公路,2022,42(6):179-182. XU Zhaodong, LI Ming, HONG Changwei, et al. Study on effect of particle size on permeability of clay sand[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6):179-182.
- [10] 沈宇鹏,曹权,陈芷航,等.含盐石英砂的毛细上升特性及其影响因素研究[J].铁道工程学报,2022,39(3):13-18. SHEN Yupeng, CAO Quan, CHEN Zhihang, et al. Research on the capillary rising characteristics and influencing factors of salt-containing quartz sand[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3):13-18.
- [11] 姜浩,邴慧.硫酸钠盐渍土-水特征曲线的试验与理论研究[J].冰川冻土,2021,43(2):497-509. JIANG Hao, BING Hui. Experimental and theoretical study on soil-water characteristic curve of sodium sulfate saline soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2): 497-509.
- [12] 马田田,韦昌富,夏晓龙,等.NaCl溶液对土体冻结特征影响的试验研究[J].岩土力学,2017,38(7):1919-1925. MA Tiantian, WEI Changfu, XIA Xiaolong, et al. Experimental study of effect of NaCl solution on soil freezing characteristic[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7):1919-1925.
- [13] 郑娟,赵丽娅,刘保健.非饱和黄土的土水特征曲线试验研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):1138-1142. ZHENG Juan, ZHAO Liya, LIU Baojian. Experimental study on soil water characteristic curves of unsaturated loess[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6):1138-1142.
- [14] 李萍,李同录,侯晓坤,等.黄土中毛细上升速率的现场测试[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(6):503-507. LI Ping, LI Tonglu, HOU Xiaokun, et al. Field experiment on rate of capillary rise in loess[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(6):503-507.
- [15] LU N, LIKOS W J. Rate of capillary rise in soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6):646-650.
- [16] 落宇杰,马富丽,白晓红.压实黄土状粉土毛细特性试验研究[J].科学技术与工程,2017,17(12):234-240. LUO Yujie, MA Fuli, BAI Xiaohong. Experimental study on capillary property of compacted silty soil[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12):234-240.
- [17] 徐硕昌,刘德仁,王旭,等.重塑非饱和黄土浸水入渗规律的模型试验研究[J].水利水运工程学报,2023(1):140-148. XU Shuochang, LIU Deren, WANG Xu, et al. Model test study on infiltration law of remolded unsaturated loess[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(1):140-148.
- [18] 周奇,陈太红,朱振南,等.黄土路基毛细水上升规律试验模拟研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2015,28(1):54-60. ZHOU Qi, CHEN Taihong, ZHU Zhennan, et al. Numerical and experimental study on capillary rise of phreatic water in loess roadbed[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2015, 28(1):54-60.
- [19] 李旭,范一锴,黄新.快速测量非饱和土渗透系数的湿润锋前进法适用性研究[J].岩土力学,2014,35(5):1489-1494. LI Xu, FAN Yikai, HUANG Xin. Applicability of wetting front advancing method for measuring hydraulic conductivities of unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5):1489-1494.
- [20] GEO-SLOPE International Ltd. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M].中仿科技公司,译.北京:冶金工业出版社,2011. GEO-SLOPE International Ltd. Seepage modeling with SEEP/W 2007[M]. Translated by CnTech Co., Ltd., Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.