

非饱和原状和重塑 Q₃ 黄土渗水特性研究

姚志华¹, 陈正汉¹, 黄雪峰^{1,2}, 张世径², 杨校辉²

(1. 解放军后勤工程学院建筑工程系, 重庆 401311; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为研究非饱和 Q₃ 黄土渗水特性, 设计一套原状黄土取样设备, 取得大尺寸原状竖直和水平土柱各 2 个; 并制备 5 个干密度不同的重塑土样。对 9 个试样进行水平土柱试验, 用 TDR 水分计和热传导吸力探头分别检测土样不同断面处的体积含水率和基质吸力。试验结果表明: 土中裂隙的走向和干密度对入渗率均有影响。对于原状试样, 浸水前期竖直试样入渗率要大于水平试样, 湿润锋超过 50 cm 后, 竖直和水平试样入渗率几乎接近一致。竖直与水平原状试样的非饱和扩散率主要差别在饱和度低于 0.6 的区域, 饱和度高于 0.6 两者扩散率差别不大; 对于重塑试样, 低饱和度区域干密度对扩散率影响要大于高饱和度区域。同等干密度和含水率条件下, 低饱和度区域重塑试样非饱和和渗透系数大于原状试样; 而高饱和度区域原状试样非饱和和渗透系数大于重塑试样。取样方法和研究成果对同类工作具有重要参考价值。

关键词: 非饱和 Q₃ 黄土; 竖向和水平试样; 入渗率; 扩散率; 非饱和渗透系数

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)06-1020-08

作者简介: 姚志华(1983-), 男, 甘肃成县人, 博士研究生, 主要从事特殊土地基处理和非饱和土本构关系等方面研究工作。E-mail: lightbright@163.com

Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q₃ loess

YAO Zhi-hua¹, CHEN Zheng-han¹, HUANG Xue-feng^{1,2}, ZHANG Shi-jing², YANG Xiao-hui²

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to study the hydraulic conductivity of unsaturated Q₃ loess, an equipment for sampling undisturbed loess is designed, four vertical and horizontal loess columns are acquired successfully and five remolded soil columns with different dry densities are prepared. The tests on horizontal soil columns of nine samples are carried out. TDR moisture meters and thermal conduction suction probes are embedded to monitor volumetric water content and matric suction in different sample sections. The results indicate that the infiltration velocity is influenced by crack direction and dry density of the soil columns. For the undisturbed loess samples, the infiltration velocity of vertical samples is greater than that of horizontal samples at the beginning stage of soaking tests. When the wetting front exceeds 50 cm, the infiltration velocities of vertical and horizontal samples get close to each other. The differences of diffusion coefficient between undisturbed vertical and horizontal samples exist distinctly below the saturation degree 0.6. When the saturation degree surpasses 0.6, the diffusion coefficients are nearly identical. As to the remolded loess samples, the effect of dry density on the diffusion coefficient mainly exists in the lower saturation degree area. Under the same dry density and moisture content, the unsaturated hydraulic conductivity of the remolded samples is greater than that of the undisturbed samples in the lower saturation degree area, however, in the higher saturation degree area, the unsaturated hydraulic conductivity of the undisturbed samples is greater than that of the remolded samples. The sampling method for the undisturbed loess and the research findings of those tests give some referential values to the same studies.

Key words: unsaturated Q₃ loess; vertical and horizontal sample; infiltration velocity; diffusion coefficient; unsaturated hydraulic conductivity

0 引言

非饱和土的渗水特性是非饱和土研究中的一项重要内容, 渗水特性的研究包括多个水分运动参数的确

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072265); 国家电网公司科学技术项目(SGKJJSKF[2008]656); 重庆市科委自然科学基金项目(2009BB6174)

收稿日期: 2011-06-20

定, 如非饱和和渗透系数、扩散率和容水率等。水分运动参数不是常数, 而是随体积含水率、基质吸力等因素变化的^[1], 通过试验以及理论推导获得非饱和土(特别是原状土)的这些参数均有一定的难度。

许多学者通过理论推导获得确定非饱和土渗透系数, 如: Van Genuchten^[2]、Fredlund 等^[3]、Khaleel 等^[4], Leong 等^[5]、Zhuang 等^[6]以及 Wagner 等^[7]通过土水特征曲线和经验公式等预测非饱和土渗透系数。Marshall^[8]、Mualem^[9]、Toledo 等^[10]和 Xu^[11]利用土体孔隙的分形模型研究了非饱和土的渗透系数。然而利用理论推导得到渗透系数, 这种方法的准确性有待进一步研究。

非饱和土渗透系数可以通过稳态方法和非稳态瞬时剖面法等试验方法获得, 但耗时耗力。Hendrayanto 等^[12]通过现场试验确定非饱和渗透系数; Li 等^[13]对竖直土柱进行毛细水上升试验, 提出“湿润锋前进方法”有效测定了非饱和渗透系数。王文焰等^[14]、陈正汉等^[15]利用伽马射线对水平土柱进行了渗水系数的测定。李永乐等^[16]、高永宝等^[17]、王铁行等^[18]和徐永福等^[19]也对非饱和和渗透系数也进行了一些有益的尝试。

非饱和和渗透系数与土的结构、物理力学指标等因素密切相关, 不同土的非饱和和渗透系数差别很大。前人关于非饱和和黄土渗透系数研究大都基于重塑土样, 而对非饱和和原状黄土渗透系数的研究迄今鲜有报道, 其主要原因在于原状土样较难获得。

为实现非饱和和原状黄土渗透系数的研究, 本文设计了一套简易的取样设备, 成功取得竖直和水平原状 Q₃ 黄土试样, 对非饱和和原状黄土竖直与水平方向入渗率、非饱和和渗透系数等问题进行了研究; 同时, 为了比较考虑干密度对非饱和和黄土渗透系数的影响, 本文也进行了不同干密度条件下的重塑黄土渗透试验。

1 试验概况

试验用土取自兰州市和平镇, 揭露地表 3 m 土层, 测得 2~3 m 之间原状黄土干密度 1.28 g/cm³, 含水率 6.2%, 体积含水率 7.92%, 土粒相对密度 2.71, 液限 28.7%, 塑限 17.6% (以上指标均为 2~3 m 之间均值)。

1.1 试验方案

无论水平原状土样, 还是垂直原状土样, 渗透试验均采用水平土柱试验方法, 以消除重力的影响。共做了 9 个水平土柱渗透试验, 包括 2 个水平原状试样、2 个竖直原状试样和 5 个控制不同干密度相同含水率的重塑试样。土样含水率均为 6.2%, 原状试样干密度为 1.28 g/cm³。

(1) 试验设备加工

设计加工了一套既能取原状垂直试样又能取原状水平土样的装置, 如图 1 所示, 该装置包括钢架和土筒两部分。钢架使用钢材焊接, 土筒为有机玻璃管。钢架采用 5 个半圆形钢环(内径 20 cm)支撑土筒, 前端一个钢环连接支撑杆, 支撑杆镶嵌于套管中; 支撑杆可以在套管中自由滑动。取水平样时有机玻璃管向前滑动, 支撑杆与有机玻璃管齐头并进。钢架 4 条支撑腿用钢筋连接, 起到稳定钢架的作用。钢架高度为 40 cm, 支撑杆可最大伸长量为 70 cm。

土筒采用外径 200 mm、内径 186 mm 的有机玻璃管, 管长 1000 mm。管端头车削成刃口状, 起到类似环刀的作用。刃口磨损后可以打磨, 玻璃管结构如图 2。用亚克力板分别加工 1 个圆盖和 1 个挡板(图 2)。圆盖留孔作为进水端; 挡板上分布许多孔洞, 作为渗水通道。土样装好之后, 土样前端平铺 1 cm 厚型砂作为滤层, 并将堵板压在型砂上, 将其固定; 再将圆盖用 AB 胶粘于有机玻璃管上(图 2 和图 4 (a))。

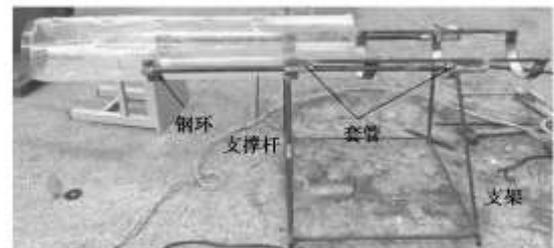


图 1 取样装置

Fig. 1 Sampling equipment

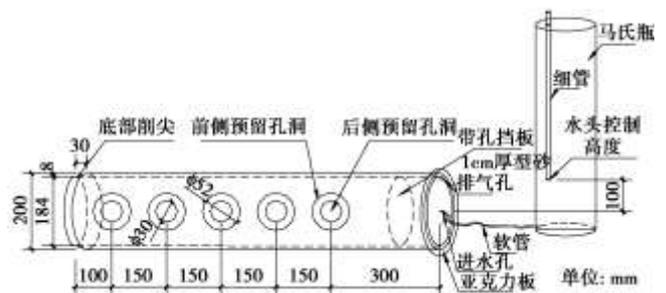


图 2 有机玻璃管加工示意图

Fig. 2 Lucite tube and Mariotte's bottle

(2) 原状试样制备

取竖直试样时, 向下开挖约 3 m 深度, 在 2 m 位置处铲出一土台, 留出一垂直面。将钢架中支撑杆从套管中取出, 只留 4 个半圆套环, 有机玻璃管紧贴 4 个套环(图 3 (a)), 向下逐步削除玻璃管下端口处土体, 用一木板覆盖玻璃管上方, 用木锤轻轻敲打木板, 有机玻璃管前端刃口削除多余黄土, 其原理类似环刀取样, 采用这种方法亦可以有效防止试验过程中边壁

渗漏。竖直试样共取得2个,长度均为95 cm,直径18.6 cm。

水平土样取样点位于地表下2.5 m处(图3(b))。首先在2.5 m处找平,预留40 cm土台,土台两侧开挖土槽,以便于玻璃管向前时削除多余黄土。有机玻璃管前进时,支撑杆也随之前进。当支撑杆伸长量较大时,由于土样较重,可能导致水平土样断裂,将前方半圆钢环下方用木板支撑,并保证玻璃管水平。玻璃管前进,钢环下方支撑也随之前进,采取该措施可以有效保证水平土样取样过程中不断裂。水平土样取得2个,长度均为95 cm,直径18.6 cm。

(3) 重塑试样制备

重塑试样共5个,干密度分别为1.25, 1.35, 1.45, 1.55和1.65 g/cm³。制备重塑用的试样黄土均取自原状黄土取样位置,含水率等指标与原状试样相同。重塑试样制备时,将有机玻璃管按5 cm等距均分,每段按设计干密度装土,夯实至指定位置,两层之间打毛。重塑土样长度均为95 cm,直径18.6 cm。

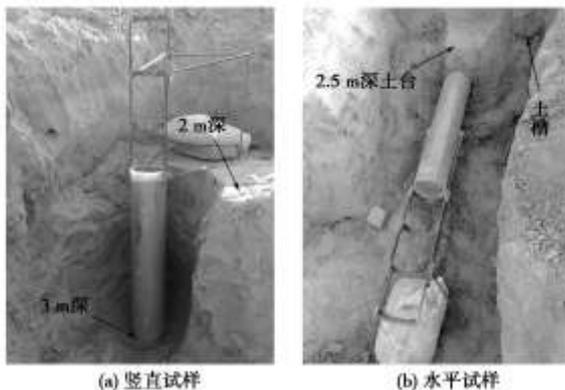


图3 竖直与水平试样取样现场示意图

Fig. 3 Sampling site of vertical and horizontal undisturbed loess

1.2 测试仪器设备

本次试验采用国产TDR-3型水分计(图4(a)),其精度在0~50% (cm³/cm³)范围内为±2%。水分计埋设前先对其进行标定。吸力测量选用美国制造的Fredlund热传导吸力传感器(图4(a))。该传感器的热传导吸力探头用来在现场测试土体吸力和温度,测试精度为5%。土体中的吸力可以根据实测的热传导率和事先在室内标定好的热传导率与吸力的关系曲线获得,吸力标定方法具体参见文献[20]和[21]。每个试样按照一定距离安装了5个水分计和5个热传导吸力探头(图2和图4(a)),可得到每个断面的土水特征曲线。

水分计探头插入土样时,为防止对土样造成扰动、避免土样结构破坏以及裂缝的产生,安装水分计探头探针的位置用钻子预先成孔(直径3 mm);热传导探

头插入土样前预先钻孔,孔洞直径略小于热传导探头直径,使探头更好地与土样接触。水分计和热传导探头与有机玻璃管接触处用石蜡进行密闭处理,防止水分流出。

供水装置采用有机玻璃管自行加工的马氏瓶,玻璃管内部用一较细玻璃管控制水头(图2和图4(b)),本次试验水头高度控制在100 mm。马氏瓶高度为2000 mm,内径107.7 mm,外径112.7 mm,内截面积9110 mm²。

当湿润锋距试样进水端90 cm时,停止供水以及记录数据,敲掉有机玻璃管前端亚克力板,将土柱缓慢从前端倒出;并将土柱切割成3~5 cm的土饼,对每个土饼取5盒土,用微波炉迅速测得含水率,并取其平均值为该段土样的含水率,作为水分校核的依据。

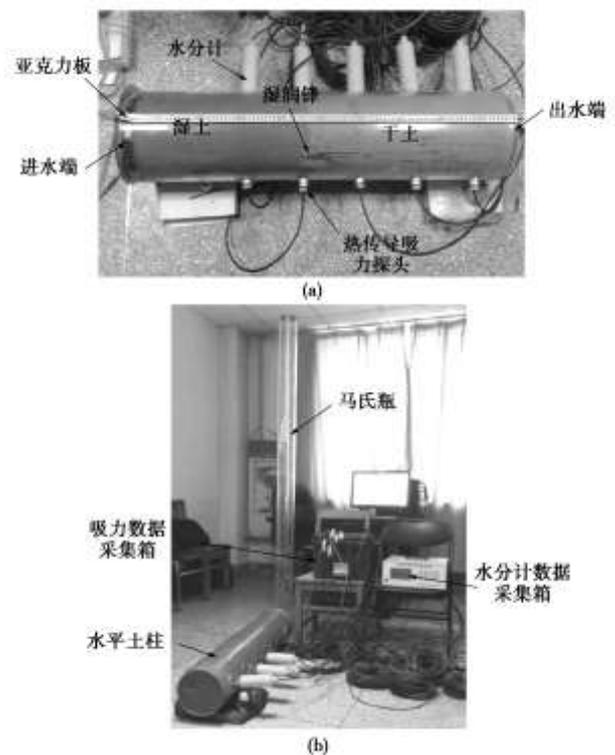


图4 试验场景图

Fig. 4 Photos of test apparatus

1.3 参数计算原理

忽略重力作用下,一维水平流动微分方程和定解条件为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\theta = \theta_a \quad (x > 0, t = 0), \quad (2)$$

$$\theta = \theta_a \quad (x = 0, t > 0). \quad (3)$$

式中 $D(\theta)$ 为扩散率; x 为距离左端土面的距离(cm); θ_a 和 θ 分别为土样起始体积含水率和 t 时刻对应的体积含水率。

该方程为非线性偏微分方程, 求解比较困难, 采用 Boltzmann 变换, 可将其转化为常微分方程求解, 推导过程详见文献[1], 解出 $D(\theta)$ 值计算公式:

$$D(\theta) = \frac{-1}{2(d\theta/d\lambda)} \int_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (4)$$

式中, λ 为 Boltzmann 变换参数, $\lambda = xt^{-\frac{1}{2}}$ (t 为入渗时间 (min)). 在 t 时刻测得土柱含水率分布, 并计算出各测点的 λ 值, 可以绘出 $\theta - \lambda$ 关系曲线. 进而得出 $D(\theta)$ 与 θ 和 λ 的代数表达式:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} \sum_{\theta_0}^{\theta} \lambda d\theta \quad (5)$$

式中, $\Delta\lambda$ 和 $\Delta\theta$ 分别为两测点的 Boltzmann 变换参数和体积含水率之差. 通过式 (5) 可列表计算扩散率 $D(\theta)$.

容水率 $C(\theta)$ 为土水特征曲线的斜率, 其计算式为

$$C(\theta) = -\frac{d\theta}{ds} \quad (6)$$

式中, s 为吸力 (kPa).

非饱和土渗透系数 $K(\theta)$ 、容水率 $C(\theta)$ 和扩散率 $D(\theta)$ 有如下关系:

$$K(\theta) = D(\theta) \cdot C(\theta) \quad (7)$$

求得容水率 $C(\theta)$ 和扩散率 $D(\theta)$ 就可以按式 (7) 计算得到渗透系数 $K(\theta)$.

体积含水率 θ 与饱和度 S_r 在忽略变形情况下两者相互转换, 如式 (8) 所示:

$$S_r = \frac{(\theta / \rho_d) \cdot d_s}{e} \quad (8)$$

式中, d_s 为土粒相对密度, e 为孔隙比.

2 试验结论及其分析

2.1 裂缝方向对水分入渗的影响

原状土样中存在天然裂隙以及能肉眼可见的节理孔隙; 水分计探头探针长度约 7 cm, 及时预先钻孔, 水分计插入土样时难免造成若干横向裂缝的出现, 如图 5 所示.

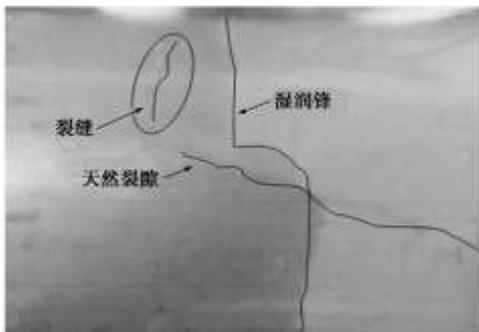


图 5 裂缝影响湿润锋前进示意图

Fig. 5 Sketch map of wetting front advancing

通过试验发现横向裂缝与水流方向垂直则阻碍水

分运移; 如果裂缝与水流方向平行则对水分运移影响不明显, 图 5 可清楚发现这一规律. 裂缝之间存在气体, 水分如果突破裂缝, 必须将多余的气体排出, 以及裂缝周围水分逐步扩散至该裂缝另一侧, 自然引起水分运移速度的降低.

文献[22]认为垂直节理、大空隙在水分入渗过程中起到阻水作用. 然而通过本次渗透试验发现, 阻水作用还与裂缝或者裂隙的走向有关. 垂直节理与水流入渗方向一致, 则对湿润锋前进影响不大; 如果垂直节理与水流入渗方向垂直, 湿润锋则势必受到制约.

应当指出本文出现裂缝阻碍水分运移, 可能由于裂缝太窄, 水以活塞式推进. 若裂缝较宽裂缝则不存在阻碍现象, 而是出现水沿裂缝优先运移.

2.2 入渗率分析

入渗率是水分运移规律研究中的一项重要内容. 入渗率即为入渗界面处水分运动通量, 算法如下式:

$$v_i = \frac{(h_i - h_{i-1})A_1}{A_2\Delta t_i} \quad (9)$$

式中 v_i 为 i 时刻入渗率; h_i 和 h_{i-1} 为 t_i 和 t_{i-1} 时刻对应的马氏瓶中的水面高度; A_1 和 A_2 分别为马氏瓶内截面面积和有机玻璃管内截面面积; Δt_i 为 t_i 和 t_{i-1} 两时刻之差.

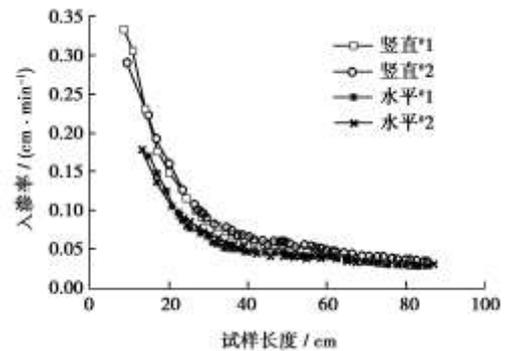


图 6 原状黄土入渗率变化曲线

Fig. 6 Infiltration velocity of undisturbed loess

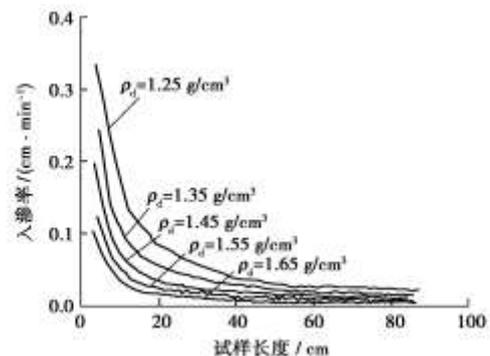


图 7 不同干密度重塑黄土入渗率变化曲线

Fig. 7 Infiltration velocity of remolded loess considering influence of dry density

试验中记录湿润锋前进的距离、马氏瓶水面高度

变化以及距离和高度变化花费的时间,利用式(9)计算得到入渗率变化。图6是原状黄土4个试样入渗率变化曲线。由图6可知,大致以距离入渗端50 cm处的截面为分界面,该断面之前,竖直试样入渗率大于水平试样入渗率;该断面之后,竖直试样的入渗率与水平试样的入渗率几乎相同。这可能与竖直土样与水平土样结构差异有关。

图7为考虑不同干密度重塑黄土入渗率变化曲线。由图7可知,入渗率随干密度增大而减小。干密度越小,入渗率增幅愈大;干密度越大,入渗率增幅愈小。图6和图7均呈现幂函数减小趋势,可拟合得到入渗率与入渗距离之间关系表达式:

$$v_i = a \cdot x^b \quad (10)$$

式中 x 为湿润锋离边界的距离 (cm), a 和 b 为试验参数, a 为浸水初期单位长度单位时间内的入渗率,浸水初期土样界面应处于饱和状态,因此 a 也是饱和状态土样的入渗率。

从表1原状竖直和水平试样参数来看,竖直样与水平样入渗率主要表现在参数 a 的差异;对于参数 b ,竖直试样均值为 1.07,而水平试样均值为 1.02,两者差异不大。

表1 各试样试验参数 a, b 值

Table 1 Values of test parameters of samples

试验类别	原状试样				
	竖直#1	竖直#2	水平#1	水平#2	
a	3.92	3.44	2.48	2.36	
b	-1.1	-1.03	-1.03	-1.01	
试验类别	重塑试样(干密度)				
	1.25	1.35	1.45	1.55	1.65
a	1.15	0.96	0.73	0.52	0.33
b	-0.87	-0.95	-1.01	-1.03	-1.05

对于重塑试样,参数 a 随着干密度的增加逐渐减小。干密度愈大,单位长度单位时间内的入渗率自然愈小,这是符合一般规律的。干密度对参数 b 影响主要表现在低密度试样中,较大密度试样参数 b 降低不太明显。

2.3 非饱和 Q_3 黄土扩散率研究

(1) 非饱和原状黄土扩散率

测得土柱体积含水率分布后,将体积含水率 θ 与 λ 之间关系绘于图8(以竖直#1试样为例),并将实测曲线平滑处理^[1]。在曲线上取点利用式(5)列表计算得到扩散率 $D(\theta)$ 。竖直试样和水平试样扩散率 $D(\theta)$ 与饱和度 S_r 之间关系曲线如图9,10所示。

由图9,10可以得到原状竖直和水平试样扩散率平均值,扩散率平均值与饱和度之间关系如图11所示,拟合式为式(11)。在半对数坐标中,竖直试样与水平试样在饱和度低于0.6区域内扩散率相差较大,

而饱和度高于60%以上,两者扩散率 D 相差较小。竖直与水平试样扩散率在饱和度60%左右,可近似由2条直线组成。

$$\lg D = A + BS_r \quad (11)$$

式中 A 和 B 为试验参数,与土的物理力学指标有关; S_r 为饱和度。对于竖直试样,当 $S_r \leq 60\%$ 时, $A = -2.06$, $B = 3.64$; 当 $S_r > 60\%$ 时, $A = -6.22$, $B = 10.67$; 对于水平试样,当 $S_r \leq 60\%$ 时, $A = -2.82$, $B = 4.38$; 当 $S_r > 60\%$ 时, $A = -6.43$, $B = 10.72$ 。从以上拟合参数来看,饱和度低于60%时,竖直与水平试样主要差别在直线斜率上。

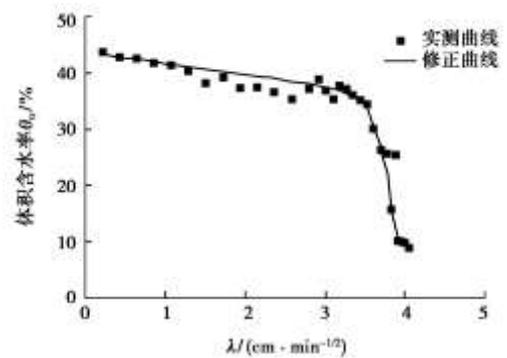


图8 体积含水率 θ 与 λ 之间关系

Fig. 8 Curve of volumetric water content θ and λ

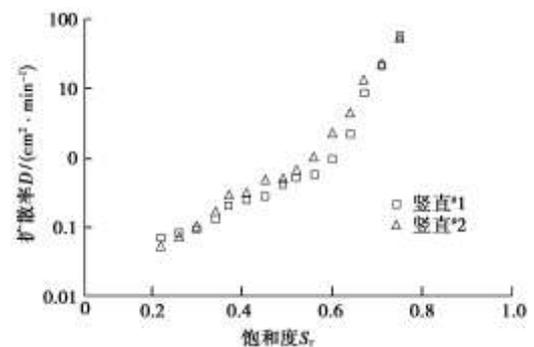


图9 原状竖直试样扩散率 D 随饱和度的变化曲线

Fig. 9 Relationship between diffusion coefficient of vertical undisturbed loess and saturation ratio

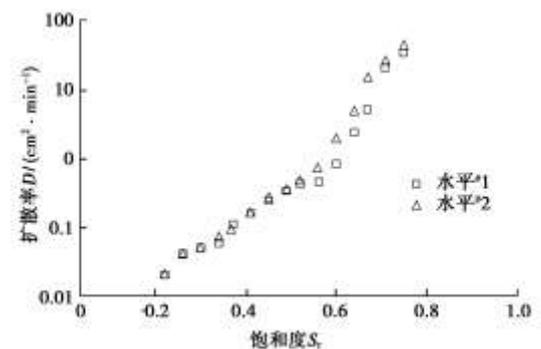


图10 原状水平试样扩散率 D 随饱和度的变化曲线

Fig. 10 Relationship between diffusion coefficient of horizontal

undisturbed loess and saturation ratio

非饱和原状竖直与水平试样扩散率主要差别在饱和度和低于 0.6 的区域, 而且竖直试样大于水平试样。造成这种现象的原因还在于竖直试样与水平试样的结构差异。该现象也可从细观结构上探讨, 这方面工作将在以后研究。

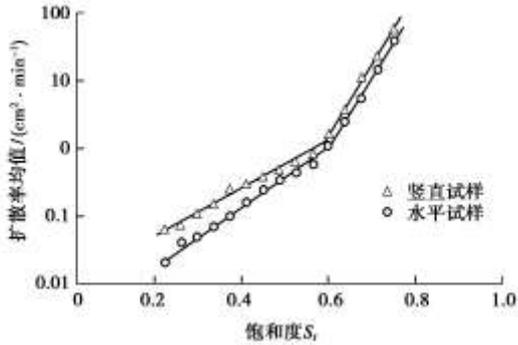


图 11 原状竖直与水平试样扩散率均值随饱和度的变化曲线
Fig. 11 Relationship between mean value of diffusion coefficient of vertical and horizontal undisturbed loess and saturation ratio

(2) 非饱和和重塑黄土扩散率

本文控制 5 个不同干密度重塑黄土试样, 得到考虑干密度影响下扩散率与饱和度之间关系曲线图 (图 12)。不同干密度条件下, 饱和度达到 0.65 左右时, 扩散率近似两条直线段组成, 可由式 (12) 和 (13) 表示:

$$\lg D = A_1 + B_1 S_r \quad (S_r \leq 0.6) \quad (12)$$

$$\lg D = A_2 + B_2 S_r \quad (S_r > 0.6) \quad (13)$$

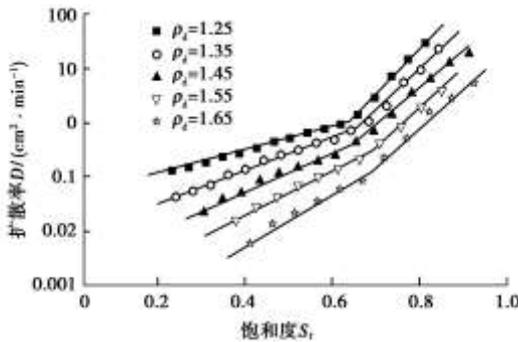


图 12 重塑试样扩散率与饱和度之间关系

Fig. 12 Curves of diffusion coefficient of remolded loess and saturation ratio

文献[15]通过 5 个不同干密度试验发现干密度对渗透系数影响很大。文献[18]认为: 当含水率较小时, 土体水分主要以结合水形态存在, 干密度对黄土扩散率几乎无影响。本次试验 (图 12) 表明, 低饱和度区域干密度对重塑黄土扩散率影响要大于高饱和度区域, 这与文献[18]结论不一致, 而与文献[15]结论相符

合。干密度和饱和度越小, 水分扩散自然较快, 反之水分扩散较慢。

2.4 土水特征曲线的确定

图 13, 14 分别是原状黄土 4 个试样以及重塑黄土 5 个试样土水特征曲线图。采用 TDR 水分计和 Fredlund 热传导吸力探头组合测土水特征曲线, 缺点在于较难测得饱和度大于 0.8 以上和饱和度低于 0.17 以下的数据点。同一试样不同断面测得的土水特征曲线规律一样。

图 13 中 4 个原状试样数据点较为接近, 说明了测试仪器的可靠性。原状黄土中测得最大吸力约为 200 kPa。由图 14 可知干密度对重塑土样的土水特征曲线影响较大, 但曲线总体形状变化规律一致。图 13 和图 14 所示曲线在饱和度 0.2~0.8 之间可用幂函数对其进行拟合, 如式 (14) 所示:

$$S(S_r) = \alpha S_r^\beta \quad (14)$$

式中, $S(S_r)$ 为吸力 (kPa), α 和 β 为拟合参数。

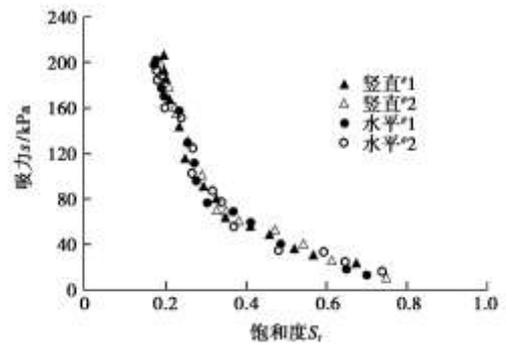


图 13 原状黄土土水特征曲线

Fig. 13 SWCC of undisturbed loess

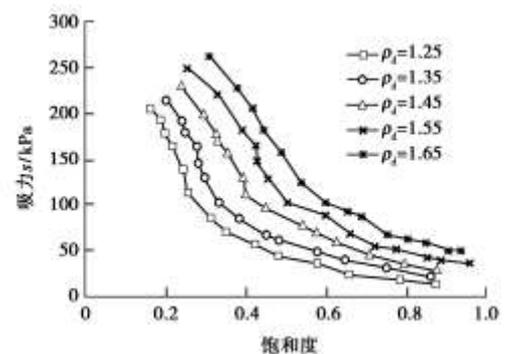


图 14 重塑黄土土水特征曲线

Fig. 14 SWCC of remolded loess

2.5 非饱和原状及重塑黄土渗透系数

通过式 (8), 可将式 (7) 可以写成

$$K(S_r) = D(S_r) \cdot C(S_r) \quad (15)$$

将容水率 $C(\theta)$ 转换为 $C(S_r)$, 式 (6) 则变为

$$C(S_r) = -\frac{dS_r}{ds} \quad (16)$$

利用式(14)可以求得容水率 $C(S_r)$ 。将式(11)~(13)和(16)代入式(15)中,就可以算得非饱和和原状竖直方向和水平方向渗透系数,以及考虑干密度影响的非饱和和重塑黄土渗透系数,如图15,16所示。

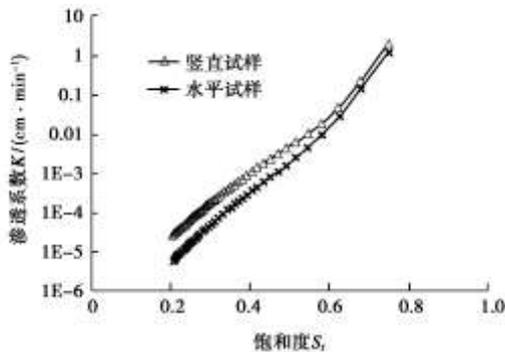


图15 非饱和原状黄土竖直和水平方向渗透系数

Fig. 15 Unsaturated hydraulic conductivity of vertical and horizontal undisturbed loess

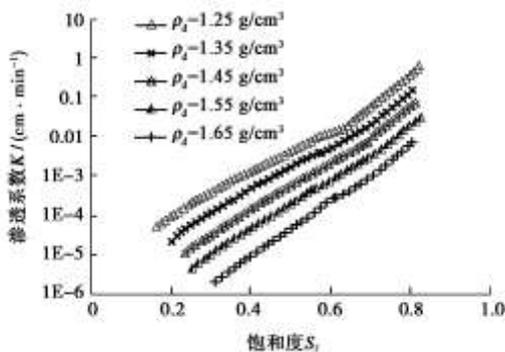


图16 考虑干密度影响非饱和重塑黄土渗透系数

Fig. 16 Unsaturated hydraulic conductivity of remolded loess considering influence of dry density

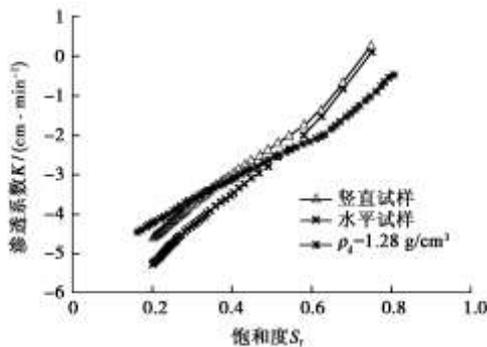


图17 原状和重塑黄土非饱和渗透系数比较

Fig. 17 Comparison between unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed and remolded loess

由图15可知非饱和原状竖直试样渗透系数大于水平试样渗透系数,但两者主要差别在于饱和度低于0.6区域,而饱和度高于此值则差距较小,这与扩散率变化曲线极为相似。图16中显示干密度对重塑非饱和和 Q_3 黄土渗透系数变化影响较大,干密度越小,非饱和渗透系数越大。

图17可知,在相同干密度和初始含水率相同情况

下,原状竖直和水平试样非饱和和渗透系数在低饱和度区域是小于重塑土;而饱和度稍高的区域原状试样是大于重塑试样。原状土中有大孔隙,重塑土中孔隙尺寸比较均匀。饱和度较低时,水分主要在小孔隙中流动;高饱和度区域,水分进入大孔隙中,大小孔隙均成为水的流通通道。

重塑黄土粒间多呈现连通结构,水分迁移过程中排气较为容易;而原状黄土中大孔隙和垂直节理多呈现半封闭结构,这对排气起到了阻碍作用,进而使得水分迁移受阻。因此造成了低饱和度区域重塑土渗透系数大于原状土的现象。干密度 1.28 g/cm^3 重塑黄土土粒相对密度较小,产生湿化变形较为容易。湿化变形后土样原有连通孔隙消失,土样变得密实,进而阻碍了水分迁移;而原状土样中孔隙和节理逐渐充满水的过程也是水分流动逐步加快的过程,所以导致较高饱和度区域原状土渗透系数大于重塑土的现象。

3 结 论

本文对非饱和原状和重塑黄土进行一维水平土柱试验,同时测得容水率和扩散率。试验结果对于黄土的渗水特性研究具有一定的理论与工程应用价值,得到以下5点主要结论。

(1) 设计一套适宜于黄土地区原状试样取样简易装置,并成功取得大尺寸原状黄土竖直和水平土柱试样。

(2) 较窄裂缝与水流方向垂直则阻碍水分运移;较窄裂缝与水流方向平行则对水分运移影响不明显。

(3) 对于原状试样的入渗率,浸水前期竖直样要大于水平样,试样长度大于50 cm后,竖直和水平试样入渗率几乎接近一致;对于重塑试样,入渗率随干密度增大而减小。

(4) 竖直与水平原状试样非饱和和扩散率主要差别在饱和度低于0.6的区域,饱和度高于0.6两者差别不大;低饱和度区域干密度对重塑黄土扩散率影响要大于高饱和度区域。

(5) 相同密度和体积含水率条件下,低饱和度区域重塑黄土渗透系数大于原状试样;而较高饱和度区域原状试样渗透系数大于重塑土渗透系数。

参考文献:

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 21, 92 - 94. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Shen-chuan. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 21, 92 - 94. (in Chinese))
- [2] VAN GENUCHTEN M. A closed form equation for prediction

- the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Sci Am J*, 1980, **44**: 892 - 898.
- [3] FREDLUND D G, XING An-qing, HUANG Shang-yan. Predicting the permeability for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**: 533 - 546.
- [4] KHALEEL R, RELYEA J F. Evaluation of van Genuchten-Mualem relationships to estimate unsaturated hydraulic conductivity at low water contents[J]. *Water Resources Res*, 1995, **31**: 2659 - 2668.
- [5] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soil[J]. *Geotech Geoenviron Eng J*, 1997, **123**(12): 1118 - 1126.
- [6] ZHUANG J, NAKAYAMA K, YU G R R, et al. Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, **59**: 143 - 154.
- [7] WAGNER B, TARNAWSKI V R, HENNINGS V, et al. Evaluation of Pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set[J]. *Geoderma*, 2001, **102**: 275 - 297.
- [8] MARSHALL T J. A relation between permeability and size distribution of pores[J]. *Soil Sci*, 1958, **9**(1): 1 - 8.
- [9] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Res Res*, 1976, **12**(3): 513 - 522.
- [10] TOLEDO P G, NOVY R A, DAVIS H T, et al. Hydraulic conductivity of porous media at low water content[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, **54**: 673 - 679.
- [11] XU Yong-fu. Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution[J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, **31**: 549 - 547.
- [12] HENDRAYANTO, KOSUGI K, MIZUYAMA T. Field determination of unsaturated hydraulic conductivity of forest soils[J]. *Journal of Forest Research*, 1998, **3**: 11 - 17.
- [13] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(12): 1431 - 1445.
- [14] 王文焰, 张建丰. 室内一维土柱入渗试验装置系统的研究及应用[J]. *土壤学报*, 1991, **28**(4): 447 - 451. (WANG Wen-yan, ZHANG Jian-feng. Study and application of infiltration experimental equipment for one-dimensional soil column in laboratory[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 1991, **28**(4): 447 - 451. (in Chinese)).
- [15] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. *岩土工程学报*, 1993, **15**(3): 9 - 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluids motion, suction and pore pressures in unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, **15**(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [16] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (LI Yong-le, LIU Cui-ran, LIU Hai-ning, et al. Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(22): 3861 - 3865. (in Chinese)).
- [17] 高永宝, 刘奉银, 李 宁. 确定非饱和土渗透特性的一种新方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(18): 3258 - 3261. (GAO Yong-bao, LIU Feng-yin, LI Ning. A new method for determination of permeability of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(18): 3258 - 3261. (in Chinese))
- [18] 王铁行, 卢 靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificiality compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(11): 2364 - 2368. (in Chinese))
- [19] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(1): 160 - 164. (XU Yong-fu, LAN Shou-qi, SUN De-an, et al. New apparatus for measurement of stress effect on permeability of unsaturated soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(1): 160 - 164. (in Chinese))
- [20] D G 弗雷德隆德, H 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 114 - 124. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jiong, translators. Beijing: China Architecture and Building Press, 1993. (in Chinese))
- [21] FREDLUND D G, SHUAI F, FENG M. Use of a new thermal conductivity sensor for laboratory suction measurement[C]// *Proc 1st Asian Conf on unsaturated Soils*. Singapore, 2000: 275 - 280.

