

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.001

非饱和重塑 Q_2 和 Q_3 黄土的渗水特性研究

张 龙¹, 陈正汉^{1,2}, 孙树国², 周凤玺¹, 扈胜霞³

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国人民解放军后勤工程学院, 重庆 401331; 3. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘 要: 随着西北大开发战略的实施, 工程中涉及的 Q_2 黄土及其重塑土日益增多。为了研究非饱和重塑 Q_2 黄土的渗透特性及其和 Q_3 黄土渗透特性的差异, 对重塑 Q_2 和 Q_3 黄土分别做了4个干密度的水平土柱入渗试验; 采用 MP-406 水分计及数据采集系统量测不同断面处体积含水率随时间的变化情况。实验研究结果表明: 相同干密度的重塑 Q_2 和 Q_3 黄土渗水特性存在较大差异。在相同饱和度情况下, 重塑 Q_3 黄土扩散率大于重塑 Q_2 黄土, 并且随着饱和度的增大这种差异逐渐减小。不管是重塑 Q_2 黄土还是 Q_3 黄土, 饱和度达到0.6左右时, 扩散率近似由两条直线段组成; 对于重塑 Q_3 黄土, 当饱和度低于0.6时, 干密度的不同对扩散率影响不大; 当饱和度高于0.6时, 扩散率存在较大差异; 但对于重塑 Q_2 黄土, 此规律不明显。

关键词: 非饱和和重塑 Q_2 和 Q_3 黄土; 水平土柱入渗试验; 扩散率

中图分类号: TU411.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0001-05

Permeability of Unsaturated Remolded Q_2 and Q_3 Loess

ZHANG Long¹, CHEN Zhenghan^{1,2}, SUN Shuguo², ZHOU Fengxi¹, HU Shengxia³

(1. School of Architecture and Construction of Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China;

3. Architectural Engineering College, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: With the implementation of the Northwest development strategy, engineering involved Q_2 loess and its remolded loess are increasing. In order to study the permeability of unsaturated remolded Q_2 loess and the differences of permeability between remolded Q_2 and Q_3 loess, four dry density of horizontal soil column infiltration test were performed; MP-406 water meter and remote monitoring system were adopted to monitor volumetric water content in different sections. The experiment results show that: the permeability of the same dry density of Q_2 and Q_3 loess is quite different, in the same saturation, Q_3 loess diffusion coefficient is greater than Q_2 loess, and with the increasing saturation of this difference gradually decreases; for both Q_2 and Q_3 loess, when saturation reached about 0.6, the diffusion coefficient is approximated by two straight segments, for Q_3 loess when saturation is less than 0.6, different dry density has less effects on diffusion coefficient, when saturation is higher than 0.6, there is a large difference in diffusion coefficient. For Q_2 loess, this law is not obvious.

Keywords: unsaturated remolded Q_2 and Q_3 loess; horizontal column infiltration test; diffusion coefficient

非饱和土的渗水特性是非饱和土研究中的重要组成部分, 水分在土体中的入渗涉及到岩土、交通、水利等重要领域, 对于非饱和土渗水规律的研究, 前人已经做了大量研究工作, 并取得了重要研究成果。

Hendrayanto 等^[1]进行了现场试验测定非饱和渗透系数的研究。王文焰等^[2]研制了一套室内一维土柱入渗装置系统。陈正汉等^[3]利用伽马射线对水平土柱进行了渗水系数的测定。魏新平等^[4]运用水平土柱

收稿日期: 2015-11-20

修稿日期: 2015-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272353); 延安新区高填方的渗流-变形研究资助项目

作者简介: 张 龙(1988—), 男, 河北藁城人, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土与特殊土力学。E-mail: 709194126@qq.com

通讯作者: 陈正汉(1947—), 男, 陕西南郑人, 兼职教授, 长期从事非饱和土与特殊土力学的研究。E-mail: chenzhenghan47@163.com

的瞬时剖面法测定了非饱和渗透系数。李永乐等^[5]、高永宝等^[6]、王铁行等^[7]、徐永福等^[8]也对非饱和渗透系数的测定试验进行了很多有益的改进和研究。土-水特征曲线是用来描述非饱和土中基质吸力与体积含水率、重量含水率或饱和度等之间关系的重要曲线。褚进晶等^[9]对不同干密度黏土的土-水特征曲线进行过试验研究。陈正汉等^[10]提出了含水率-净平均应力-吸力的 3 变量形式的土-水特征曲线,能反映基质吸力和净平均应力同时变化对水分变化的影响,苗强强等^[11]进一步对比了考虑净平均应力后土-水特征曲线的差别。方祥位等^[12-13]提出了含水率-净平均应力-基质吸力-剪应力的 4 变量形式的广义土-水特征曲线,能同时反映 3 个变量对土体中水分的影响,宋亚亚等^[14]对考虑 4 变量的广义土-水特征曲线进行了试验研究。扩散率是非饱和土渗水特性的重要参数,结合土-水特征曲线可以得到非饱和土的渗透系数。非饱和土的扩散率随着渗水过程是不断变化的^[15],土的体积含水率、基质吸力等因素都对扩散率有影响。随着我国西部大开发战略的实施,工程规模也在逐步增大,工程中涉及的 Q_2 黄土越来越多,其工程特性越来越受到重视。

众所周知渗透性是黄土的重要特性之一,因此对 Q_2 黄土渗水特性的研究显得很有必要。陈正汉等^[3]对重塑 Q_3 黄土、姚志华等^[16]对原状 Q_3 及其重塑土的扩散率做过研究,但对重塑 Q_2 黄土的扩散率的研究迄今未见报道。本文运用水平土柱试验法对不同干密度的非饱和重塑 Q_2 和 Q_3 黄土扩散规律进行比较研究,揭示了不同干密度的重塑 Q_2 和 Q_3 黄土扩散率的差异,为工程应用提供了重要参数。

1 研究方法

1.1 试验方案

土样取自延安新区某工地,风干后过筛,重塑制样。重塑 Q_2 和重塑 Q_3 分别制备 4 个土样,干密度分别为 1.30 g/cm^3 、 1.40 g/cm^3 、 1.50 g/cm^3 和 1.60 g/cm^3 ;试样直径 100 mm,长 1 000 mm。由于试样的尺寸比较大,在制备土样时分层击实,在土筒侧面按 50 mm 等距离划分,每段按设计干密度装土,用夯锤夯实,分层处打毛以保证土样的连续性。

1.2 试验仪器与设备

非饱和土水平土柱入渗试验装置如图 1 所示。该套系统由 4 部分组成。

(1) 土筒采用外径 120 mm、内径 100 mm 的有机

玻璃筒,筒长 1 000 mm,筒两端有法兰封堵,进水端法兰外接水室,水室内外径与土筒一致并留有进水和出水孔。土筒中间部分开孔以便传感器的插入,孔距 150 mm,两端距筒边缘 200 mm。土筒做完每个试验清洗后可重复使用。

(2) 供水装置用马氏瓶提供稳定水头,水头高度以水平放置土样横截面中心为基准。

(3) 数据采集部分采用 DT80 远程监测系统,如图 2 所示。是由澳大利亚 (ICT) 生产北京数泰科技有限公司组装而成的一套远程监测系统,输出电压量程 ($\pm 30 \text{ V}$),多通道传感器串口可连接不同形式传感器,输出精度高。

(4) 5 支 MP406 水分传感器,探针长度 60 mm,间距 14 mm,可量测范围 0 VSW% ~ 100 VSW%,精度 $\pm 1\%$,反应时间小于 0.5 s,输入电压 7 ~ 18 VDC,输入信号 0 ~ 1200 mV 对应含水率为 0 VSW% ~ 100 VSW%。传感器另一端接入 DT80 远程监测系统。

水分计探针插入土样时,为避免土样产生扰动、结构破坏以及裂缝的产生,安装水分计探针的位置用电钻预先成孔(直径 3 mm);水分计与有机玻璃筒接触位置用石蜡进行密闭,防止水分损失。设备安装完成便可进行试验。

当湿润锋距试样进水端 90 cm 时,停止供水,同时数据采集系统停止采集数据,拔出传感器用专门的取土工具从孔洞取土,测得含水率,与传感器测得计算的体积含水率进行校核。



图 1 非饱和土水平土柱入渗试验装置

1.3 水分传感器标定

试验开始前需对水分传感器进行标定,5 个水分传感器可同时输出电信号,由电信号对应的读数可转化为相应的体积含水率,标定结果如图 2 和表 1 所示。标定结果表明输出电信号和体积含水率的关系成线性,其中 a 为截距, b 为斜率, R 为拟合直线的方差。电信号输出频率间隔为 10 min。

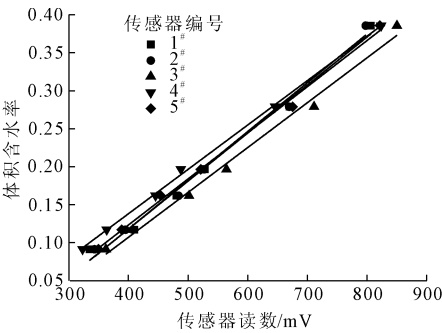


图 2 传感器标定结果

表 1 传感器标定拟合结果

传感器编号	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>
1 [#]	-0.13478	6.32 × 10 ⁻⁴	0.99562
2 [#]	-0.13851	6.41 × 10 ⁻⁴	0.99585
3 [#]	-0.12903	5.90 × 10 ⁻⁴	0.99617
4 [#]	-0.09549	5.84 × 10 ⁻⁴	0.99943
5 [#]	-0.11945	6.07 × 10 ⁻⁴	0.99829

1.4 计算方法简介

忽略重力作用下,一维水平流动微分方程和定解条件为

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

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

$$\theta = \theta_b \quad (x = 0, t > 0) \tag{3}$$

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; θ_b 为土柱进水端土体饱和体积含水率。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:

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

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 $\theta \sim \lambda$ 关系曲线。曲线上取点列表计算得出 $D(\theta)$ 与 θ 和 λ 的代数表达式:

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

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 $D(\theta)$ 。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(6)所示:

$$S_r = \frac{(\theta/\rho_d) \cdot d_s \cdot \rho_w}{e} \tag{6}$$

式中: d_s 为土粒相对密度,试验测定为 2.70, e 为孔隙比, ρ_w 为水的密度。

2 重塑黄土扩散率分析

重塑 Q₂ 和 Q₃ 黄土不同干密度土样 $\theta \sim \lambda$ 关系曲线平滑处理后如图 3 所示。由入渗端到湿润锋, λ 值逐渐增大,随着 λ 值的增大,体积含水率减小,且开始段比较平稳接近饱和体积含水率,随着 λ 的继续增大,体积含水率值发生陡降,且陡降区间很小。这说明湿润锋附近土样体积含水率值变化剧烈,且在渗水过程中某一截面体积含水率达到一定值后,试样的体积含水率急剧降低到初始值,该转变的体积含水率值为 0.325 左右。

曲线上取点通过式(5)列表计算求得的扩散率 $D(\theta)$ 与饱和度 S_r 的半对数关系如图 4 和图 5 所示。其中图 4 为相同干密度的重塑 Q₂ 和 Q₃ 土样扩散率和饱和度关系的对比;图 5 为重塑 Q₂ 或 Q₃ 土样不同干密度扩散率和饱和度关系的变化规律。由图 4 可知,相同干密度的重塑 Q₂ 和 Q₃ 土样扩散率和饱和度关系存在较大差异。相同饱和度情况下,重塑 Q₃ 黄土的扩散率要大于重塑 Q₂ 黄土,并且随着饱和度的增大这种差异在逐渐减小。由图 5 可知,在考虑干密度影响下扩散率与饱和度之间关系时,不管是重塑 Q₂ 黄土还是重塑 Q₃ 黄土,饱和度达到 0.6 左右时,扩散率近似两条直线段组成,可由式(7)和式(8)表示:

$$\lg D = A_1 + B_1 S_r \quad (S_r \leq 0.6) \tag{7}$$

$$\lg D = A_2 + B_2 S_r \quad (S_r > 0.6) \tag{8}$$

式中: A_1 和 B_1 、 A_2 和 B_2 为材料参数,与土的物理力学指标有关; S_r 为饱和度。对于重塑 Q₂ 和 Q₃ 土样,当 $S_r < 0.6$ 和当 $S_r > 0.6$ 时,材料参数取值如表 2 和表 3 所示。

对于重塑 Q₃ 黄土,当饱和度低于 0.6 时,干密度对扩散率影响不大;高于 0.6 时,干密度对扩散率存在较大影响。对于重塑 Q₂ 黄土,此规律不明显。

由于 Q₂ 黄土埋藏于 Q₃ 黄土之下,其密度比 Q₃ 黄土大,其结构性也与 Q₃ 黄土存在较大差异,这也是二者在渗透性方面存在较大差异的原因。

文献[7]认为,当饱和度较大时,干密度对黄土扩散率影响显著;当饱和度较小时,土中水分主要以结合水形态存在,干密度对黄土扩散率影响较小。这与本试验重塑 Q₃ 黄土结果相近。对于能否用统一的曲线描述非饱和土扩散率与饱和度关系有待进一步研究。

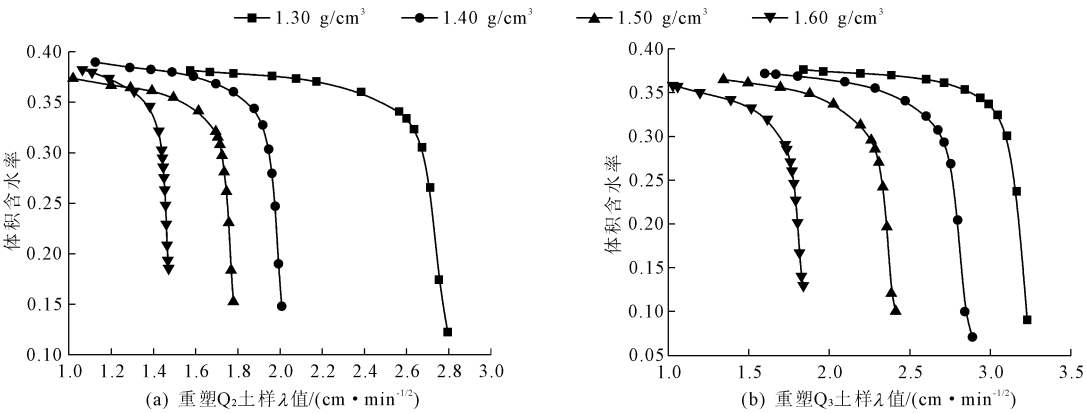


图 3 重塑 Q_2 和 Q_3 黄土 $\theta \sim \lambda$ 关系曲线

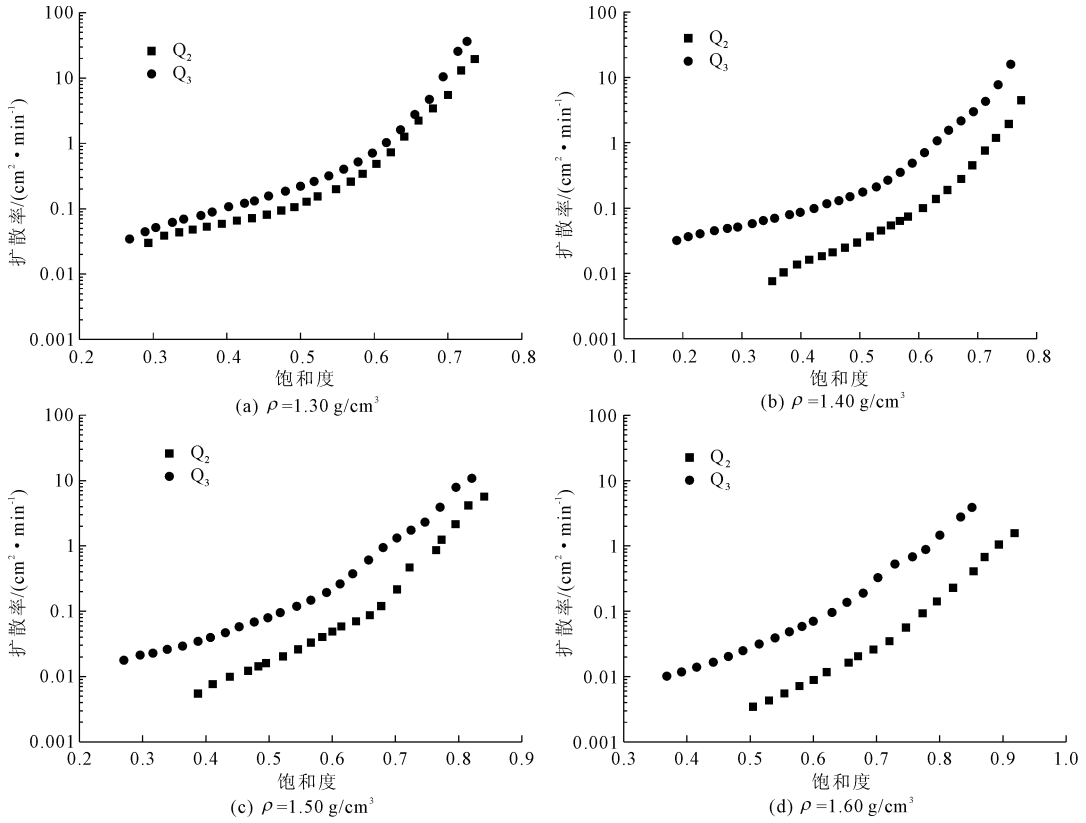


图 4 相同干密度重塑 Q_2 和 Q_3 黄土的扩散率与饱和度关系对比

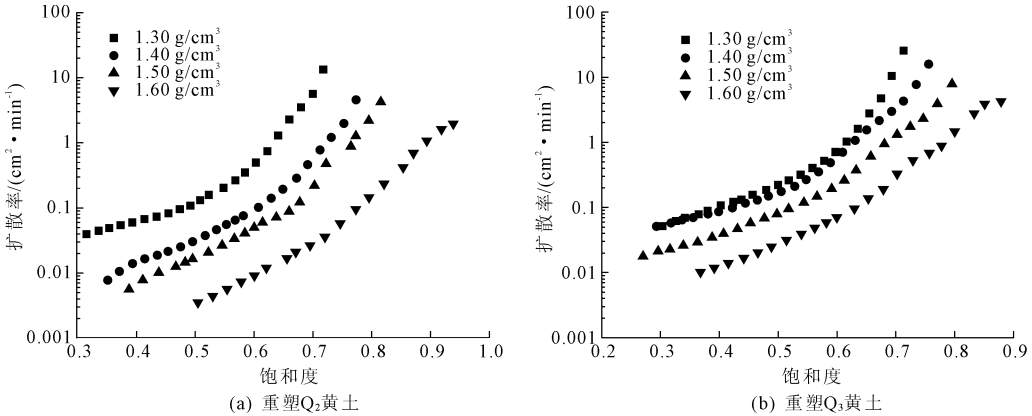


图 5 不同干密度的重塑 Q_2 或 Q_3 黄土的扩散率与饱和度关系

表 2 重塑 Q₂ 黄土材料参数取值

干密度 /(g·cm ⁻³)	A ₁		B ₁		R	
	S _r <0.6	S _r >0.6	S _r <0.6	S _r >0.6	S _r <0.6	S _r >0.6
1.3	-2.48	-7.27	3.18	11.54	0.99	0.99
1.4	-3.48	-7.39	4.01	10.26	1.00	0.99
1.5	-4.09	-7.64	4.63	10.01	1.00	1.00
1.6	-4.83	-7.57	4.67	8.46	1.00	1.00

表 3 重塑 Q₃ 黄土材料参数取值

干密度 /(g·cm ⁻³)	A ₂		B ₂		R	
	S _r <0.6	S _r >0.6	S _r <0.6	S _r >0.6	S _r <0.6	S _r >0.6
1.3	-2.37	-8.14	3.48	13.22	1.00	0.99
1.4	-1.99	-5.26	2.42	8.37	0.99	0.99
1.5	-2.62	-5.19	3.08	7.54	1.00	1.00
1.6	-3.37	-5.54	3.65	7.16	1.00	1.00

3 结 论

- (1) 首次研究了重塑 Q₂ 黄土的渗水特性,揭示了有关规律。
- (2) 相同干密度的非饱和和重塑 Q₂ 和 Q₃ 黄土,在相同饱和度情况下,重塑 Q₃ 黄土扩散率大于重塑 Q₂ 黄土,并且随着饱和度的增大其差异在逐渐减小。
- (3) 对于重塑 Q₃ 黄土,当饱和度低于 0.6 时,干密度对扩散率影响不大;当饱和度高于 0.6 时,干密度对扩散率存在较大影响。对于重塑 Q₂ 黄土,此规律不明显。

参考文献:

[1] Hendrayanto, Kosugi K, Mizuyama T. Field determination of unsaturated hydraulic conductivity of forest soils[J]. Journal of Forest Research, 1998,3(1):11-17.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 魏新平,王文焰.用水平土柱测定非饱和土壤水扩散率的瞬时剖面法[J].水利水电技术,1999,30(9):61-62.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 褚进晶,田 飞,闻 玮.扬州地区黏性土土水特征曲线试验研究及应用[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):73-77.

[10] 黄 海,陈正汉,李 刚.非饱和土在 p-s 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J].岩土力学,2000,21(4):316-321.

[11] 苗强强,张 磊,陈正汉.非饱和和含黏砂土的广义土-水特征曲线试验研究[J].岩土力学,2010,31(1):102-106.

[12] 方祥位,陈正汉,申春妮.重塑非饱和黄土等 p 剪切试验[J].重庆大学学报(自然科学版),2004,27(9):124-128.

[13] 方祥位,陈正汉,申春妮,等.剪切对非饱和土土-水特征曲线影响的探讨[J].岩土力学,2004,25(9):1451-1454.

[14] 宋亚亚,卢廷浩,季李通.应力作用下非饱和土土-水特征曲线研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(6):147-150.

[15] 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.

[16] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.非饱和原状和重塑 Q₃ 黄土渗水特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(6):1020-1027.