

DOI: 10.11779/CJGE2021S1037

# 不同压实度重塑黄土持水曲线测试及模型预测

王来才<sup>1,2</sup>, 胡海军<sup>\*1,2</sup>, 王晨<sup>1,2</sup>, 康顺祥<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 忻州市城市建设综合服务中心, 山东 忻州 034000)

**摘要:**为了研究不同压实度重塑黄土持水曲线,采用自制低吸力测试装置、张力计和 GDS 非饱和土三轴仪等仪器联合测定不同压实度重塑黄土持水曲线,并应用 VG 模型和基于 VG 模型考虑变形效应的持水曲线模型分别对单一压实度持水曲线拟合和所有压实度持水曲线拟合,得到模型参数并分析了预测精度。结果表明:采用多手段测试持水曲线的方法是可行的;不同压实度黄土 VG 模型拟合函数中进气值发生变化,而控制持水曲线变化速率的参数  $n$  除高压实度外都很接近,为考虑变形效应的持水模型函数形式提供了试验依据;基于 VG 模型考虑变形效应的持水曲线模型在预测不同压实度持水曲线方面具有足够的精度,可以用于具有不同压实度黄土填方中的持水曲线预测。

**关键词:** 重塑黄土; 压实度; 持水曲线; 预测模型

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0204-05

作者简介: 王来才(1990—),男,硕士,主要从事湿陷性黄土方面的研究。E-mail: 979679394@qq.com。

## Measurement and prediction of water retention curve of remolded loess with different degrees of compaction

WANG Lai-cai<sup>1,2</sup>, HU Hai-jun<sup>1,2</sup>, WANG Chen<sup>1,2</sup>, KANG Shun-xiang<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Xinzhou Urban Construction Comprehensive Service Center, Xinzhou 034000, China)

**Abstract:** In order to study the water retention curve of remolded loess with different degrees of compaction, the self-made low suction measurement device, tensiometer and GDS unsaturated soil triaxial apparatus were used to measure the water retention curve of remolded loess with different degrees of compaction. The VG model and the model based on the VG model considering the deformation effect were adopted to fit the water retention curves under a single degree of compaction and all the degrees of all compaction, respectively, and the model parameters were obtained and the accuracy of fitting was analyzed. The results show that the method for measuring the water retention curve by using the multiple methods is feasible. For the fitted VG model, the air-entry value changes with different degrees of compaction, and the parameter  $n$  controlling the rate of change of the water retention curve is almost same except for the high degree of compaction, which provides a test basis for the form of the water retention curve function when considering the deformation effect. The water retention curve model considering the deformation effect based on the VG model has sufficient accuracy in predicting water retention curves of loess with different degrees of compaction, and can be used for the prediction of water retention curves of loess fills with different degrees of compaction.

**Key words:** remolded loess; degree of compaction; soil water retention curve; water retention model

## 0 引言

持水曲线函数是用于描述土体水分与基质吸力定量关系的函数,其与非饱和渗透系数函数是预测水分迁移的两个必要函数。大量黄土地基浸水试验表明增湿过程由于浸润区发生了湿陷变形,造成了土体干密度的增加<sup>[1-4]</sup>,因而其持水曲线和渗透性会发生改变;另外延安新区由于施工差异导致不同区域填方黄土的压实度不同<sup>[5]</sup>,因此有必要考虑变形或压实度对黄土持水曲线的影响。

已有学者对考虑变形效应的持水曲线函数进行了

研究, Huang 等<sup>[6]</sup>在 Brooks-Corey 持水曲线模型的基础上,通过建立进气值与孔隙比的关系、持水曲线形状系数(或孔隙分布参数)与孔隙比的关系,构建了比 Brooks-Corey 多 2 个参数的持水曲线模型; Gallipoli 等<sup>[7]</sup>在 VG 模型的基础上,通过建立进气值和孔隙比的函数关系构建了比 VG 模型多 1 个参数的持水曲线

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(51409220);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-107)

**收稿日期:** 2020-12-15

\* 通信作者(E-mail: hu.hai-jun@163.com)

模型;胡冉等<sup>[8]</sup>基于土孔隙分布对持水曲线的影响出发,建立了统一的持水曲线模型,该模型能较好地预测主脱湿、主吸湿、干湿循环以及在复杂应力路径下包含干湿循环、扫描曲线等过程中的持水曲线,针对增湿过程,模型仅比 VG 模型多 1 个参数。针对考虑变形效应的黄土持水曲线函数,还未有上述统一的模型来描述,但已有测试不同孔隙比下的持水曲线如张昭等<sup>[9]</sup>对不同孔隙比饱和和重塑黄土进行脱湿持水曲线测试,也有用 VG 模型的方程进行了不同孔隙比试样增湿情况下持水曲线的拟合<sup>[10]</sup>,但给出的持水曲线函数是应力的函数,由于地基中应力状态及所受的应力历史比较复杂而地基土的孔隙比较容易测试,如延安新区填方完成后,可较容易测试其孔隙比,因此应用孔隙比作为内变量建立持水曲线很有必要。

本文使用自制低吸力测试装置、张力计、GDS 非饱和土三轴仪、底边界恒水位的土柱等仪器测试了不同压实度非饱和和重塑黄土的持水曲线,应用 VG 模型和已有考虑变形效应的持水曲线模型进行拟合,在此基础上提出了考虑变形效应的持水曲线模型中参数的简化确定方法。

## 1 试验方案

### 1.1 试验土体

本试验所用黄土取自陕西省杨陵区西北农林科技大学北校区新建图书馆地下基坑土体,取土深度为 3~5 m。根据地质勘探报告,确定所取土体为 Q<sub>3</sub> 黄土,其物理性质指标如下表 1 所示。土体最优含水率为 19.1%,最大干密度为 1.73 g/m<sup>3</sup>。

表 1 试验土料物理性质指标

Table 1 Physical properties of test soil

颗粒相对 密度 $G_s$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率 $w_{opt}/\%$
2.71	18.7	35.1	16.4	1.73	19.1

### 1.2 试验方案

首先配置最优含水率土料,制备压实度为 0.75, 0.8, 0.9, 1.0 的试样。为了节约时间,通过水膜转移法或风干的方法配置不同含水率试样,其中水膜转移法配置试样的含水率确定,要依据可增湿的最大饱和度对应的含水率,首先制取 4 种压实度非饱和和重塑黄土环刀试样(直径 6.18 cm,高 2 cm)采用饱和和夹具放入水中浸水饱和 72 h 后,利用烘箱烘干法测得多组浸水饱和和后试样饱和度平均值分别为 89%, 90%, 95% 和 100%,根据浸水饱和和试样和初始饱和和试样等间距的选取所测吸力对应的饱和度;风干法获取低于初始饱和度的试样,需要把试样放在空气中,时刻记录试样

质量,待达到相应饱和度时,停止蒸发。不同含水率试样制备后,薄膜包裹静置 48 h 后应用不同的吸力测试仪器进行持水曲线测试。试验测试仪器有自制低吸力测试装置、2100F 张力计、英国 GDS 公司生产的 GDS 非饱和土三轴仪系统。具体测试方案见表 2。

另外对于压实度 0.75 试样,低吸力段持水曲线不易测准,又采用配置该压实度高度为 1 m 土柱,采用静水平衡原理测试吸力在 9.8 kPa 以内的持水曲线。

表 2 不同压实度黄土吸力测试方案

Table 2 Suction measurement of loess with different degrees of compaction

压实度	饱和度 $S_r/\%$		
	自制低吸力装置	张力计	GDS 三轴仪
0.75	89, 85, 80, 75	70, 65, 60	50, 40
0.80	90, 85, 80	75, 70, 65, 60	50, 40
0.90	95, 92.5, 90	85, 82.5, 80	75, 70, 60, 50
1.0	100, 98.5	95, 92.5	90, 85, 80, 70

### 1.3 吸力测定原理和测试过程

图 2 给出了各种测试不同含水率试样的吸力测试仪器。自制低吸力测试装置原理图如下图 1(a)所示,依据连通器内总水头恒定原理,使用 GDS 压力控制器和带有底座的陶土板组装而成,试样直径为 3.9 cm,高为 2 cm。测试时 GDS 设置为体积不变,试样吸力  $s$  等于 9.8 倍的试样相对于 GDS 压力控制器高度差  $h$  减去压力控制器读数  $p$ ,即  $s = 9.8h - p$ ,其中  $p$  的单位为 kPa,  $h$  的单位为 m。图 1(b)为 2100F 张力计,用于测量负孔隙水压力,张力计实际测试范围为 0~80 kPa,但张力计有气化问题且本试验使用的张力计已使用多年,为了提高试验精度只用来测试 10~60 kPa 土体吸力,此测试阶段取高度 60 mm、直径 39.1 mm 三轴试样。试验时,需要将张力计陶土板头插入试样,为了满足试样不被破坏且试样与张力计陶土棒(直径 6 mm,长度 2.5 cm)接触紧密,测试时需用三瓣膜将试样箍住,并且用直径略小于陶土棒直径的钻头钻出深度和直径分别略大于和略小于陶土板头的孔洞,便于插入。GDS 非饱和土三轴仪系统装置用来测试 60~500 kPa 之间的吸力,根据土体吸力  $s = u_a - u_w$ ,本仪器可通过气压控制器施加给测试试样一定的孔隙气压力,当孔隙水压力读数稳定时即可求得测试试样的吸力,这通常需要 1 d 时间。

为较好测试低吸力下的持水曲线,基于静水平衡原理设计了土柱试验,制备压实度 0.75、高度为 1 m、初始含水率  $w = 19.1\%$  的土柱,然后将试样底部用马氏瓶供水进行浸水饱和,顶端用保鲜膜包裹,待土柱水分不再变化时,土柱不同高度基质吸力不同,即  $s =$

$\gamma_w h$ , 测定不同高度试样的含水率即可得到含水率与吸力的关系, 测试示意图及原理图见图1。

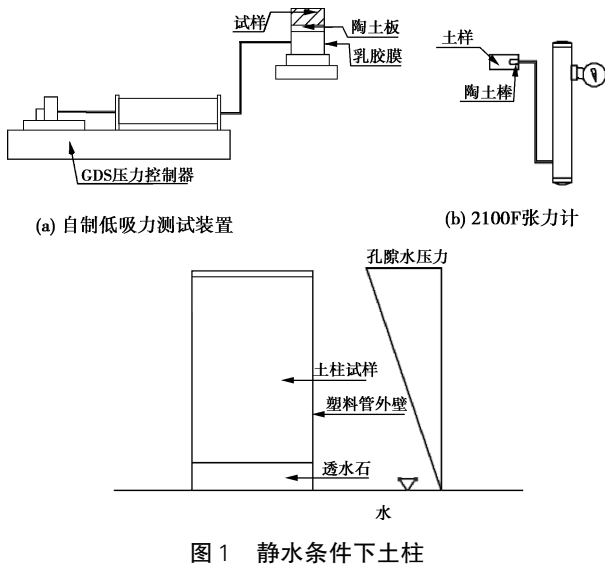


图1 静水条件下土柱

## 2 持水曲线拟合方法

### 2.1 单一压实度黄土持水曲线拟合

应用 RETC 和 Origin 软件, 采用 VG 模型如下式所示体积含水率与吸力关系来拟合实测数据, 获得模型中的参数。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}, \quad (1)$$

式中,  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为残余含水率,  $\alpha$ ,  $n$  为拟合参数, 其中  $m = 1 - 1/n$ 。

### 2.2 不同压实度黄土持水曲线的统一模型拟合方法

Gallipoli 等<sup>[7]</sup>发现应用式(1)对变形土持水曲线拟合时, 不同土体的  $n$  通常不变, 而  $\alpha$  可用下式表示。

$$\alpha = ae^b, \quad (2)$$

式中,  $e$  为孔隙比,  $a$ ,  $b$  为拟合参数。

胡冉等<sup>[8]</sup>提出了考虑土体变形的主脱湿、主吸湿过程的持水曲线模型, 模型表达式相近, 如式(3)所示。对比该表达式与式(1), 可见该模型也认为  $n$ ,  $m$  对不同孔隙比土样差异不大, 而  $\alpha$  可用下式表示:

$$S_e = \{1 + [\beta \exp(k_p e) s]^n\}^{-m}, \quad (3)$$

$$\alpha = \beta \exp(k_p e), \quad (4)$$

式中,  $S_e$  为有效饱和度等于  $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $\beta$ ,  $k_p$  为拟合参数。

针对试验所得持水曲线, 本文参考式(2)和式(4), 提出用三次式即式(5)进行拟合。

$$\alpha = ae^3 + be^2 + ce + d. \quad (5)$$

对于式(2), (4), (5)中的各参数, 可通过两种方法获得。第一种方法拟合所有压实度黄土持水曲线, 得到统一的  $n$  和  $\alpha$  中的参数。第二种方法为简化方

法, 即根据单一压实度持水曲线的 VG 模型拟合, 得到平均的  $n$  和随孔隙比变化的  $\alpha$ , 然后应用式(2), (4), (5)进行拟合。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同压实度重塑黄土持水曲线

试验所得不同压实度重塑黄土持水曲线测试点值和用 RETC、Origin 软件中 VG 模型所得拟合曲线如图2所示。

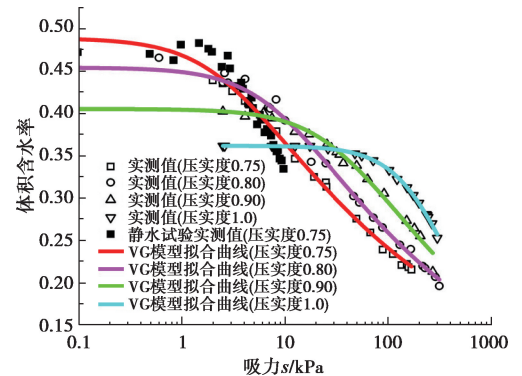


图2 不同压实度重塑黄土持水曲线实测值与 VG 模型拟合值对比

Fig. 2 Comparison between measured data of SWRC and fitting curves using VG model for remolded loess with different degrees of compaction

当吸力较小时, 即低吸力阶段, 不同压实度重塑黄土含水率下降较快, 且压实度越小, 开始下降的含水率越小; 随着吸力增大, 不同压实度重塑黄土含水率下降趋势变缓, 各持水曲线间依然存在差异。分析产生以上原因主要如下: 在低吸力阶段, 吸力变化主要引起土颗粒间宏观孔隙中水的减少, 即大孔隙中水被排出, 压实度越小, 土体大孔隙越多, 因此压实度越小, 吸力对含水率的影响越大。随着吸力增大, 大孔隙中水分变化减小, 中小孔隙中水分开始变化, 中小孔隙中水含量相对大孔隙较少, 水含量随吸力变化变小, 持水曲线变缓; 当吸力较大时, 吸力增大仅仅导致小孔隙中水分减少, 水分吸附作用大于毛细作用, 土体保水能力较强, 含水率变化较小, 持水曲线趋于平缓, 并且水分主要填充于粒内孔隙, 而不同黄土粒内孔隙通常差异不大<sup>[11]</sup>, 不同压实度重塑黄土持水曲线差异变小趋于一致。另外从压实度 0.75 静水平衡土柱测试结果来看, 其增加了低吸力段的测试数据, 并与自制低吸力阶段测试数据接近, 说明了联合方法的可靠性, 增加了低吸力段 VG 模型拟合的数据依据。

拟合参数如表3所示, 对于不同压实度重塑黄土,  $n$  基本不变, 这为用统一函数来描述不同压实度黄土持水曲线提供了试验支撑, 特别是压实度小于1的时候。进气值通常约为  $1/\alpha$ , 随压实度增大, 进气值增加。

压实度 0.75,进气值约为 2.75 kPa;压实度 0.80,进气值约为 8.96 kPa;压实度 0.90,进气值约为 36.50 kPa;压实度 1.0,进气值约为 250 kPa。可以发现,由低压实度到高压实度,进气值差距越来越大。

表 3 不同压实度重塑黄土 VG 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of VG model for remolded loess with different degrees of compaction

压实度	软件	参数			
		$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$
0.75	RETC	0.4885	—	0.3666	1.2024
	Origin	0.4884	0.0417	0.3638	1.2238
0.80	RETC	0.4540	—	0.1131	1.2262
	Origin	0.4534	0.0352	0.1116	1.2545
0.90	RETC	0.4046	—	0.0268	1.2680
	Origin	0.4047	0	0.0274	1.2625
1.0	RETC	0.3615	—	0.0040	1.6479
	Origin	0.3614	0	0.0040	1.6558

### 3.2 不同压实度重塑黄土统一持水曲线预测

本文采用 2.2 所述从整体上拟合的方法,可以得到不同压实度重塑黄土吸湿过程持水曲线统一预测模型。各模型的拟合参数如表 4 所示,需要说明的是拟合数据组为  $(S_e, e, s)$ ,在算  $S_e$  时,应用 VG 模型所得拟合参数  $\theta_s$  和  $\theta_r$  计算。

表 4 考虑变形效应的统一模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters for remolded loess with different degree of compaction using SWRC model considering deformation effect

模型	拟合参数	相关系数 $R^2$
Gallipoli 等 <sup>[7]</sup>	$a = 0.455, b = 7.01, n = 1.25$	0.978
胡冉等 <sup>[8]</sup>	$\beta = 5.13 \times 10^{-5}, k_p = 9.18, n = 1.25$	0.975
本文	$a = 10.01, b = -17.23, c = 10.00,$ $d = -1.94, n = 1.19$	0.957

从拟合结果上来看,各方法均有很高的相关系数。图 3 给出应用 Gallipoli 等提出的模型和本文模型结果,从结果上看 Gallipoli 等提出的模型更准确。

为了简化拟合过程,可以采用单个压实度拟合所得 VG 模型参数  $n$ ,这里取 1.25,然后采用不同数学性质的函数模型拟合得到进气值  $\alpha$  与试样孔隙比  $e$  关系式如式(6)、式(7)和式(8),相关系数  $R^2$  分别为 0.877,0.917 和接近于 1。

$$\alpha = 0.000008886 \exp(11.288e) \quad (6)$$

$$\alpha = 0.566e^{8.4535} \quad (7)$$

$$\alpha = 10.11e^3 - 19.63e^3 + 12.85e - 2.82 \quad (8)$$

图 4 给出应用上述简化方法 Gallipoli 等提出的模

型和本文模型结果,本文模型在压实度 0.9 土样比 Gallipoli 等提出的模型更准确,对于压缩度 1.0 试样, Gallipoli 等提出的模型更准确,总体上各模型对压实度 0.75,0.80,0.90 持水曲线预测效果较好,对压实度 1.0 持水曲线曲线预测略有偏差,但偏差不大。

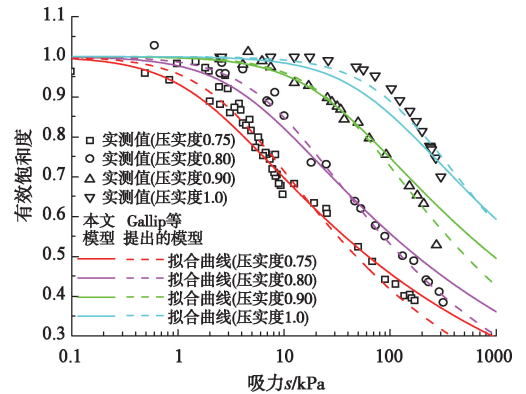


图 3 不同压实度重塑黄土持水曲线实测值与本文统一模型预测值对比  
Fig. 3 Comparison between measured SWRCs and predicted curves using proposed model under different compaction degrees of remolded loess

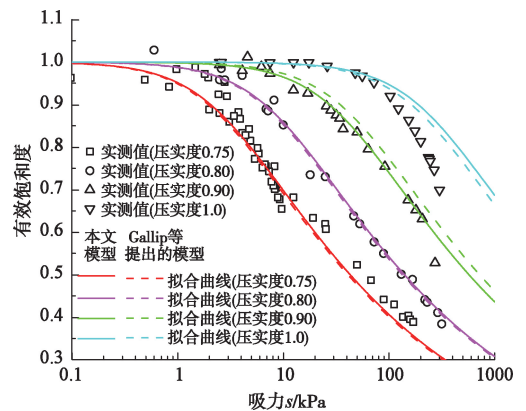


图 4 简化本文统一模型预测值与实测值对比  
Fig. 4 Comparison between measured and predicted SWRCs using proposed unified model

## 4 结 论

(1) 用自制低吸力测试装置、张力计、GDS 非饱和土三轴仪测定了不同压实度重塑黄土持水曲线。特别针对低吸力段不易测准的问题,采用静水平衡原理测试了低吸力段的持水特性。

(2) 应用 RETC、Origin 软件,采用 VG 模型拟合出不同压实度重塑黄土的持水曲线与实测值吻合度较好,不同压实度黄土 VG 模型拟合函数中进气值发生变化,而控制持水曲线变化速率的  $n$  除高压实度外都很接近,为考虑压实度影响的持水模型函数形式提供了试验依据。

(3) 基于 VG 模型考虑变形效应的持水曲线模型

在预测不同压实度持水曲线方面具有足够的精度,可以用于具有不同压实度黄土填方中的持水曲线预测,对于能否应用于发生湿陷变形的黄土地基持水曲线预测还有待进一步试验研究。

### 参考文献:

- [1] 西安冶金建筑学院建工系工民建专业73级队地基实践组. 陕西省焦化厂自重湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 西安冶金建筑学院(自然科学版), 1977(2): 86-118. (Xian Metallurgy Building Institute. Test research of collapse loess under overburden pressure in Shaanxi province coke plant[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 1977(2): 86-118. (in Chinese))
- [2] 建工部建筑科学研究院地基砖木研究室. 西安黄土地基浸水后变形范围的试验研究[J]. 建筑学报, 1961(3): 21-27. (China Academy of Building Research Experimental research on deformation range of Xi'an loess foundation after soaking[J]. Architectural Journal, 1961(3): 21-27. (in Chinese))
- [3] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地基浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74. (in Chinese))
- [4] 罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 87-91. (LUO Yu-sheng. Assessment of collapsible loess foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 87-91. (in Chinese))
- [5] 张沛然. 沟谷填方非饱和黄土填料增湿变形特性、模型及结构性分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018. (ZHANG Pei-ran. Study on the Moistening and Drying Deformation Characteristics, Model and Structural Analysis of the Unsaturated Loess Filling with Gully Fill[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [6] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 411-425.
- [7] GALLIPOLI D, WHEELER S, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Geotechnique, 2003, 53(1): 105-112.
- [8] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1451-1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on the pore size distribution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1451-1462. (in Chinese))
- [9] 张昭, 刘奉银, 赵旭光, 等. 考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 578-585. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yin, ZHAO Xu-guang, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 578-585. (in Chinese))
- [10] 张登飞, 陈存礼, 张洁, 等. 等向压缩应力条件下原状黄土的吸湿持水特性[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1344-1349. (ZHANG Deng-fei, CHEN Cun-li, ZHANG Jie, et al. Wetting water retention behavior of intact loess under isotropic compression stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1344-1349. (in Chinese))
- [11] 孔金鹏, 胡海军, 樊恒辉. 压缩过程中饱和和原状和饱和重塑黄土孔隙分布变化特征[J]. 地震工程学报, 2016, 38(6): 903-908. (KONG Jin-peng, HU Hai-jun, FAN Heng-hui. Pore distribution characteristics of saturated intact and saturated remolded loess under compression [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(6): 903-908. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)