

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2019.0127

金松丽, 邢义川, 张爱军, 等. 原状黄土增湿过程中的土水特征曲线模型[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 194-201. JIN S L, XING Y C, ZHANG A J, et al. Soil-water characteristic curve model for undisturbed loess during humidification[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 194-201. (in Chinese)

原状黄土增湿过程中的土水特征曲线模型

金松丽¹, 邢义川¹, 张爱军², 蔡红¹, 宋建正¹, 孙黎明¹

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100048; 2. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 黄土增湿过程是黄土持水特性与增湿变形特性相互影响的过程。已有的土水特征曲线模型主要描述土体的含水状态与吸力的相关关系, 无法全面反映增湿过程中黄土的持水特性与变形特性。因此在固结仪上开展了新疆原状黄土的分级增湿试验研究, 试验中引入能够全面反映土体含水状态和变形情况的“增湿水平”这一变量, 并用增湿水平和吸力表征黄土土水特征曲线模型。结果表明: 各竖向压力作用下增湿过程中, 半常用对数坐标系下原状黄土增湿水平与吸力关系曲线形状相似, 均明显的分为初期平缓段和陡降段两个阶段; 竖向压力对增湿水平与吸力关系曲线的影响主要体现在初始吸力与陡降段斜率的不同, 可以归一化为幂函数形式; 为此建立了以增湿水平和吸力表征的土水特征曲线模型。并将该模型用于其他地区黄土, 验证了所建模型适用于原状黄土的初始含水率和吸力状态、不同初始含水率的压缩状态, 以及重塑黄土在压力作用下的增湿变形状态。

关键词: 湿陷性黄土; 土水特征曲线模型; 分级增湿试验; 增湿水平; 增湿变形

中图分类号: TU43 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Soil-water characteristic curve model for undisturbed loess during humidification

JIN Songli¹, XING Yichuan¹, ZHANG Aijun², CAI Hong¹, SONG Jianzheng¹, SUN Liming¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydro-power Research, Beijing 100048, China;

2. College of Water Resources & Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In the humidification process, the water retention characteristics and the humidification deformation characteristics of original loess interact with each other. The existing soil-water characteristic curve model mainly describes the correlation between the water-containing state and the suction force. These models cannot fully reflect the water retention characteristics and the deformation characteristics of loess during humidification process. Therefore, the graded humidification tests were carried out in Xinjiang undisturbed loess using consolidation apparatus. Then a soil-water characteristic curve study, characterized by moistening level and suction was conducted. The test results showed that curve shapes of moistening level versus suction during humidification process under vertical pressure were alike in semi-common logarithmic coordinate system, which possessed two sections: flat section and steep drop section. The influence of vertical pressure was manifested mainly by the difference between initial suction force and slopes in the section of steep drop. Relationship curves of moistening level and suction under different vertical stress can be regressed as a power function. On basis of the test results, the soil-water characteristic curve model considered by moistening level and suction was proposed. Finally, the model was applied in the other areas of loess. The results validated the applicability of the model to compression state or unpressurized condition state of

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-05-07 网络出版时间: 2019-05-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190508.1805.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0804607); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室项目(SKL2018ZY09)

作者简介: 金松丽(1987—), 女, 山东德州人, 博士, 主要从事湿陷性黄土与非饱和土方面研究。E-mail: jinsongli87@163.com

通信作者: 邢义川(1956—), 男, 陕西镇安人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水利工程与岩土力学方面研究。E-mail: xingych@iwhr.com

original loess with different initial moisture content as well as humidification process of remolded loess in compression state.

Key words: collapsible loess; soil-water characteristic curve; stepped wetting tests; humidifying level; humidifying deformation

土体的持水特性通常采用土水特征曲线模型(SWCC)进行描述,该模型是土体基质吸力与其含水状态的关系曲线,含水状态一般采用质量含水率、饱和度、体积含水率等变量表征^[1-4]。目前已经建立了多种 SWCC 模型,常用的有 Fredlund Xing 模型、Van Genuchten 模型、Brooks Corey 模型等,这些模型的参数物理意义明确,并且能够描述土体的持水特性^[4-7]。

湿陷性黄土是具有水敏性的特殊非饱和土,一定应力状态下遇水增湿过程中,土体中吸力减小的同时,会产生不可忽略的增湿变形,导致黄土工程的失稳和破坏。以往对黄土增湿特性的研究主要集中于变形方面,对其持水特性的研究相对较少并且主要应用非饱和土力学的研究成果。如邢义川、郭敏霞等^[8-9]基于单线法采用三轴试验研究了原状黄土的增湿变形特性;刘保健等^[10]基于双线法采用侧限试验研究了原状黄土的增湿变形特性;刘奉银等^[11]研究了初始干密度和干湿循环对 Gardner 模型参数的影响;褚峰等^[12]研究了竖向应力作用对黄土持水特征的影响,并提出了幂函数形式的含水率与吸力关系曲线方程。张登飞等^[13]建立的修正 VG 模型,

考虑了力水耦合作用引起的孔隙比变化。

原状黄土在一定应力作用下增湿时,一方面土体的持水状态发生变化,另一方面土体产生不可忽略的增湿变形,并且这两个方面相互影响。因此与一般非饱和土不同,原状黄土的土水特性曲线模型应能够同时反映土体的持水特性和增湿变形特性这两个方面。

本文以新疆原状黄土为对象,开展了侧限情况一定竖向压力作用下的分级增湿试验,并引入“增湿水平”这一变量,建立了以吸力和增湿水平表征的黄土土水特征曲线模型^[5]。此模型能够全面反映增湿过程中黄土的持水特性和增湿变形特性,为湿陷性黄土及其他非饱和土持水特性的研究提供了一种新的途径。

1 新疆原状黄土的分级增湿试验

1.1 试验用土

试验用土为新疆伊犁 Q3 原状黄土,其主要物理力学性质指标见表 1。所制备试样的埋深分别为 8 m(编号 1)和 15 m(编号 2)。为了减小试验误差,同一埋深位置,尽量选择具有相同(或相近)干密度和含水率的试样进行试验^[2-4]。

表 1 黄土的基本物理特性

Tab. 1 Physical properties of loess

试验土样	相对密度	液限/ %	塑限/ %	塑性指数/ %	颗粒组成/%			天然含水率/ %	自然干密度/ (g·cm ⁻³)
					>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm		
伊犁原状黄土 1	2.72	29.2	19	10.2	0.6	76.42	23	6.6	1.21
伊犁原状黄土 2	2.72	29.2	19	10.2	0.6	76.42	23	6.5	1.45

1.2 试验仪器

试验所使用的仪器是由 K0 单杠杆固结仪改制而成的,如图 1 所示:竖向荷载通过加载框架由砝码施加;竖向位移由百分表测量;增湿系统由与试样上端相连的进水阀门和水箱组成;侧向压力由与“O”形环连通的侧压传感器测量;试样上端与大气相通,试验中气压力保持为零,因此基质吸力在数值上与侧压相等,侧压通过底部陶土板连通的水压传感器测得。

1.3 试验方法

开展试验时首先安装仪器底座、试样,并施加预设的竖向压力,两组黄土预设的竖向压力等级相同,分别为 50、100、200、400、600 kPa^[2-4];其次待压缩变形稳定后,通过增湿系统对试样逐级加水直至饱和,



图 1 仪器设备照片

Fig. 1 Photo of instruments and equipment

每级加水 3~5 mL,每级加水应待变形稳定后再进行下一级增湿,过程中记录每级增湿情况下的竖向变形、基质吸力和实际加水体积^[2-4]。

1.4 试验结果

表 2 和 3 为两组新疆原状黄土的增湿试验结果(部分竖向压力作用下的试验结果离散性较大,未全部列出),可见试验过程中,随着进水量的增加,黄土的吸力逐渐减小,增湿变形系数逐渐增大。

2 黄土增湿过程中的土水特征曲线模型

2.1 增湿水平变量

增湿水平的定义为土体当前含水率变化值与最大可能含水率变化值之比,即

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{w_s - w_0} \quad (1)$$

式中: S_w 为增湿水平,在 0~1 范围内取值,天然含水率时取值为 0,饱和含水率时取值为 1; w_0 为土体初始含水率; w_i 为当前含水率; w_s 为土体饱和含水率,黄土在增湿过程中由于增湿变形的影响,其饱和含水率是不断变化的,计算公式^[2-5]为

$$w_s = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dP}} - \frac{1}{G_s} \right) \frac{\delta_u^P \cdot \rho_w}{\rho_{dP}} \quad (2)$$

式中: ρ_{dP} 为加载变形稳定后试样的干密度(g/cm^3); G_s 为试样的比重; ρ_w 为水的密度; δ_u^P 为增湿变形系数^[2-5],其表达式为

$$\delta_u^P = \frac{h_{w_0}^P - h_{w_i}^P}{h_{w_0}^P} \quad (3)$$

式中: δ_u^P 为压力 P 作用下的增湿变形系数; $h_{w_0}^P$ 为压力 P 作用下天然含水率土样变形稳定后试样高度;

$h_{w_i}^P$ 为压力 P 作用下增湿到含水率后变形稳定的试样高度^[2-5]。

将式(2)和(3)代入到式(1)中,得出增湿水平的表达式为

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{\frac{\rho_w}{\rho_{dP}} - \frac{1}{G_s} - \frac{\delta_u^P \cdot \rho_w}{\rho_{dP}} - w_0} \quad (4)$$

式中: $(w_i - w_0)$ 反映了土体含水量的变化; δ_u^P 反映了增湿过程中土体的变形; ρ_{dP} 反映了竖向应力作用所导致的土体压缩变形^[2-5]。

2.2 黄土增湿变形土水特征曲线绘制

增湿试验中测得了压力作用下试样的竖向压缩变形、每级浸水的加水量及增湿变形,数据分析过程如下。

(1)根据试样的初始干密度 ρ_{d0} 与压力作用下试样的竖向压缩变形,计算加载之后试样的干密度 ρ_{dP} 。

(2)根据每级浸水后试样的增湿变形,由式(3)和(2)计算增湿变形系数和相应的饱和含水率。

(3)将每级浸水后试样的含水率、上一步计算所得饱和含水率及初始含水率代入到式(4)中计算每级浸水后试样的增湿水平。

(4)将不同竖向压力作用情况下,每级浸水后的增湿水平与吸力数据点绘制成图。

依据以上方法分析新疆原状黄土的分级增湿试验结果,计算不同竖向压力作用下增湿过程中土体的干密度、饱和含水率、增湿水平等(见表 2 和 3),并将增湿水平与吸力试验数据点绘制成图(见图 2)。

表 2 1 号新疆黄土增湿试验数据

Tab. 2 Humidification test data of #1 loess in Xinjiang

竖向压力/kPa	增湿含水率/%	增湿变形系数	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/%	增湿水平	吸力/kPa
50	6.5	0	1.23	44.6	0	224.4
50	10.8	0.022	1.26	42.7	0.12	172.6
50	13.9	0.029	1.27	42.1	0.21	128.1
50	17.2	0.031	1.27	42.0	0.30	88.6
50	20.0	0.032	1.27	41.9	0.38	55.4
50	22.6	0.032	1.27	41.9	0.45	41.5
50	26.1	0.032	1.27	41.9	0.55	20.7
50	28.6	0.032	1.27	41.9	0.62	13.1
200	5.8	0	1.27	41.7	0	244.2
200	9.9	0.027	1.31	39.5	0.12	210.2
200	13.3	0.036	1.32	38.8	0.23	169.6
200	17.6	0.045	1.34	38.0	0.37	110.2
200	21.6	0.053	1.35	37.3	0.50	71.7
200	25.0	0.065	1.37	36.4	0.63	25.9
200	28.5	0.074	1.38	35.6	0.76	30.9
200	31.9	0.075	1.38	35.5	0.88	10.0
400	5.7	0	1.44	32.5	0	250.5
400	9.7	0.038	1.51	29.4	0.17	189.9
400	14.3	0.064	1.56	27.3	0.40	160.7
400	18.9	0.077	1.59	26.2	0.65	96.4
400	23.0	0.098	1.63	24.4	0.92	38.2

表 3 2 号新疆黄土增湿试验数据
Tab. 3 Humidification test data of #2 loess in Xinjiang

竖向压力/kPa	增湿含水率/%	增湿变形系数	干密度/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	增湿水平	吸力/kPa
50	6.5	0	1.45	32.1	0	188.4
50	9.9	0.005	1.46	31.7	0.13	185.2
50	12.3	0.015	1.47	31.1	0.24	133.2
50	15.5	0.016	1.48	30.9	0.37	105.6
50	18.6	0.018	1.48	30.8	0.5	71.7
50	21.5	0.02	1.48	30.7	0.62	55.8
50	24.7	0.021	1.48	30.6	0.75	33.5
50	27.5	0.023	1.49	30.5	0.88	14.6
50	30.1	0.024	1.49	30.4	0.99	0.1
200	6.5	0	1.48	30.9	0	198.6
200	10.4	0.005	1.49	30.5	0.16	185.7
200	14.1	0.008	1.49	30.3	0.32	130.8
200	16.6	0.008	1.49	30.3	0.42	110.6
200	19.5	0.01	1.49	30.2	0.55	80.7
200	23.0	0.013	1.50	30.0	0.70	50.6
200	26.4	0.018	1.51	29.6	0.86	24.2
200	29.3	0.021	1.51	29.4	0.99	0.3
400	6.5	0	1.52	29.2	0	201.9
400	8.7	0.011	1.53	28.5	0.1	180.6
400	11.3	0.017	1.54	28.1	0.22	160.4
400	14.2	0.02	1.55	27.9	0.36	135.4
400	17.2	0.02	1.55	27.8	0.5	105.3
400	19.6	0.031	1.57	27.1	0.64	80.2
400	22.9	0.036	1.58	26.7	0.81	48.5
400	26.5	0.04	1.58	26.5	1.00	0.1
600	6.5	0	1.52	28.9	0	201.6
600	9.7	0.028	1.57	27.0	0.16	197.7
600	13.2	0.044	1.6	25.9	0.35	160.8
600	16.6	0.048	1.6	25.6	0.53	120.5
600	19.2	0.059	1.62	24.9	0.69	86.4
600	21.9	0.062	1.63	24.7	0.85	61.7
600	24.5	0.065	1.63	24.4	1.00	0.3

2.3 增湿水平与吸力表征的土水特征曲线模型

由图 2 可以看出,在半常用对数坐标系中各级竖向压力的 S_w-s 曲线形状相似,均明显的划分为平缓段和陡降段两个阶段:陡降段发生在浸水初期,此阶段内吸力的减小会导致增湿水平的大幅度增加;转折点之后为平缓段,增湿水平随着吸力减小呈平缓的增加,直至吸力减小至零,土体达到饱和,此时增湿水平取值为 1。

竖向压力对 S_w-s 曲线的影响主要体现在初

始吸力 S_0 与陡降段斜率的不同,并且各曲线边界点均为 $(S_0, 0)$ 与 $(0, 1)$,因此对各曲线进行归一化,建立幂函数形式的土水特征曲线模型^[5]为

$$S_w = 1 - \left(\frac{s}{S_0}\right)^n \quad (5)$$

式中: S_0 为模型参数,物理意义为浸水开始时土体的吸力值,即初始吸力(kPa); n 为模型参数,物理意义为 $\lg s-S_w$ 坐标系中土水特征曲线陡降段斜率的绝对值^[5]。

采用式(5)对图2中 S_w 与 s 试验数据点进行拟

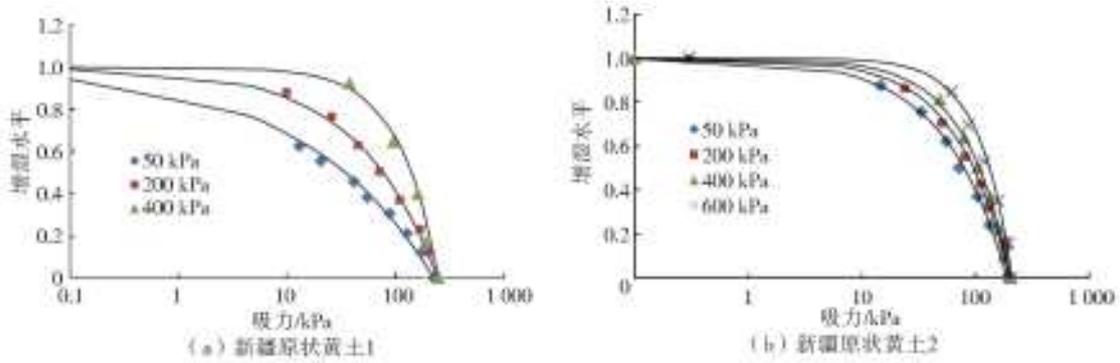


图 2 新疆黄土的土水特征曲线

Fig. 2 Soil water characteristic curve of loess in Xinjiang region

合,得出不同竖向压力下 1 号与 2 号新疆原状黄土的土水特征曲线模型参数,如表 4 所示,拟合曲线同时绘制于图 2 中,可见模型与试验数据点吻合较好。

表 4 新疆黄土的土水特征曲线模型参数

Tab. 4 Parameters of soil water characteristic curve model for loess in Xinjiang

土样类别	竖向压力/kPa	模型参数 S_0	模型参数 n	相关系数
新疆原状黄土 1	50	224.4	0.37	0.99
	200	244.2	0.60	0.98
	400	250.0	1.20	0.97
新疆原状黄土 2	50	188.4	0.80	0.98
	200	198.6	0.95	0.98
	400	201.9	1.10	0.99
	600	210.2	1.50	0.98

另外,通过对比两组新疆黄土的土水特征曲线可以看出,相比 1 号新疆黄土,2 号新疆黄土不同压力作用下的 S_w-s 曲线差别显著减小。这主要是由于 2 号黄土的干密度较大,为 1.45 g/cm^3 ,各级压力作用下试样的压缩变形很小,因此增湿前各试

样干密度差别较小。而竖向压力对土水特征曲线的影响,本质上是由于压力作用下土体初始密实状态的差异所导致的。

2.4 模型检验

2013 年张昭等^[17]在定量评价模型预测效果时,提出了“相关系数”的概念和计算方法,本文应用此方法评价土水特征曲线模型的准确性,即

$$R^2(S_w) = \frac{1 - \sum_{i=1}^n (S_{w_i}^{\text{计算}} - S_{w_i}^{\text{实测}})^2 / \sum_{i=1}^n (\overline{S_{w_i}^{\text{实测}}} - S_{w_i}^{\text{实测}})^2}{n} \quad (6)$$

式中: $S_{w_i}^{\text{计算}}$ 和 $S_{w_i}^{\text{实测}}$ 分别为增湿水平的计算值和实测值; $\overline{S_{w_i}^{\text{实测}}}$ 为增湿水平实测值的平均值; n 为数据点数^[5]。

增湿水平的计算值 $S_{w_i}^{\text{计算}}$ 是将 1 号和 2 号新疆原状黄土在不同竖向压力下的实际吸力值以及表 4 的模型参数,代入式(5)计算得出相应的增湿水平。图 3 为 1 号和 2 号新疆原状黄土在各级压力下增湿水平的实测值与计算值对比,可见计算值与实测值差异较小;相关系数计算结果见表 4,可见 $R^2(S_w)$ 均大于 0.95,验证了模型的准确性^[5]。

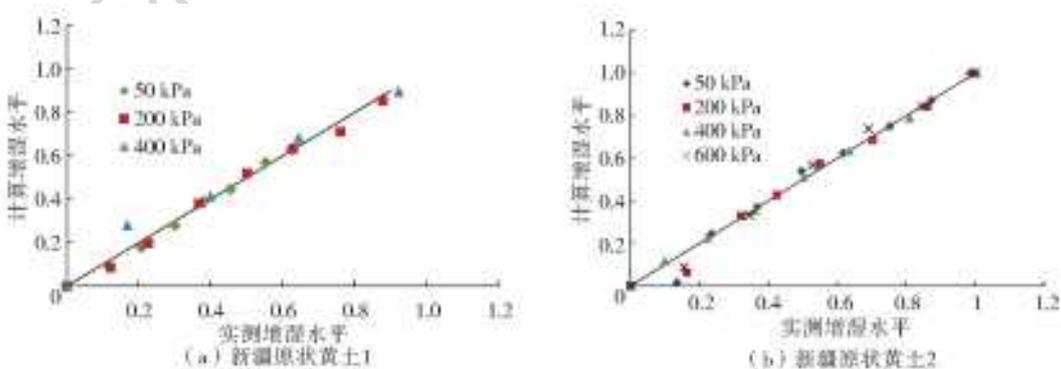


图 3 增湿水平计算值与实测值的对比

Fig. 3 Comparison of calculated and measured values of moistening level

3 模型对各类黄土适用性分析

上述以增湿水平和吸力表征的土水特征曲线模

型,是基于侧限情况下原状黄土分级增湿试验得出的。计算饱和含水率的表达式(式(2))中包括了压缩变形后干密度 ρ_{dP} 和增湿变形系数 δ_u^P 两项,因此

同时考虑了竖向应力和增湿作用的影响。以下探讨所建立的模型对于无压力情况下不同初始含水率原状黄土的持水特性、不同含水率原状黄土在竖向压力作用下的持水特性、以及重塑黄土在竖向压力作用下增湿过程中持水特性的适用性^[5]。

3.1 无压力下不同初始含水率原状黄土的持水特性

由于无应力作用下增湿时,黄土并不会产生增湿变形^[18],因此饱和含水率的表达式(式(2))中的增湿变形系数 $\delta_u^p=0$,并且 ρ_{dp} 采用试样的初始干密度 ρ_{d0} ,代入到式(1)中,得出无压力作用下不同初始含水率原状黄土增湿水平的计算公式^[5]为

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{\frac{\rho_w}{\rho_{d0}} - \frac{1}{G_s} - w_0} \quad (7)$$

2001年邢义川^[19]采用轴平移技术测得了无压力作用下不同含水率杨凌原状黄土的吸力值,含水率取值分别为17.5%、19%、21%、23%、28%、33%、38%。杨凌黄土的基本物理力学性质指标:天然含水率17.5%;干密度1.29 g/cm³;相对密度2.72;液限28.7%;塑限17.5%^[5]。

无压力作用时 $\delta_u^p=0$ 、 $\rho_{dp}=\rho_{d0}$,由式(2)可得杨凌黄土的饱和含水率为40.7%,代入式(7)中计算不同含水率试样所对应的增湿水平,并绘制增湿水平与吸力试验数据点;之后采用式(5)所示模型拟合试验数据点,并采用式(6)计算相关系数,模拟结果见图4和表5。可见模型曲线与试验数据吻合较好,说明模型适用于描述无压力作用下不同初始含水率原状黄土的持水特性。

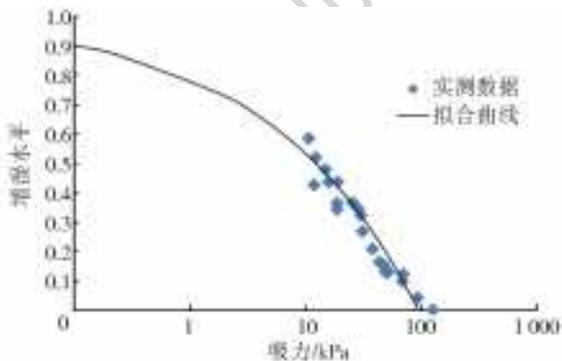


图4 杨凌原状黄土的土水特征曲线

Fig. 4 Soil water characteristic curve of original loess in Yangling

表5 杨凌黄土土水特征曲线模型参数

Tab. 5 Parameters of soil water characteristic curve model for loess in Yangling

土样类别	竖向压力/kPa	模型参数 S_0	模型参数 n	相关系数
杨凌原状黄土	0	95	0.34	0.90

3.2 不同初始含水率原状黄土在竖向压力作用下的持水特性

不同初始含水率的原状黄土试样,在竖向压力作用下产生相应的压缩变形,因此试样干密度发生相应的改变。计算饱和含水率(式(2))时,应采用压缩变形稳定后的干密度 ρ_{dp} ,并且 $\delta_u^p=0$,代入式(1)得增湿水平的计算公式为

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{\frac{\rho_w}{\rho_{dp}} - \frac{1}{G_s} - w_0} \quad (8)$$

2012年董玉柱^[20]开展了子长原状黄土的常含水率侧限压缩试验,测得了各级压力作用时不同含水率试样的吸力值。子长黄土的基本物理力学性质指标:天然含水率6.2%;干密度1.37 g/cm³;相对密度2.7;液限29.6%;塑限18%。含水率分别为6.2%、7.6%、9.5%、13.3%、20.4%、27%,施加的竖向压力分别为400 kPa、800 kPa^[5]。

试验数据分析时,首先计算不同初始含水率试样在压力作用下变形稳定后的干密度,代入到式(8)中计算出增湿水平;其次绘制不同竖向压力作用下的增湿水平与吸力试验数据点;最后采用式(5)所示模型拟合试验数据点,并采用式(6)计算相关系数。结果见图5和表6,可见模型曲线与试验数据吻合较好,说明所建立的模型能够描述不同初始含水率原状黄土在竖向压力作用下的持水特性。

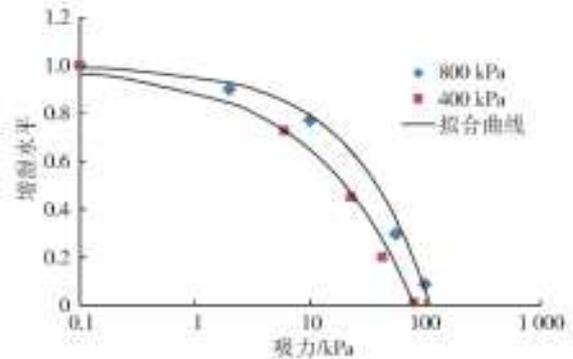


图5 子长原状黄土的土水特征曲线

Fig. 5 Soil water characteristic curve of original loess in Zichang

表6 子长黄土土水特征曲线模型参数

Tab. 6 Parameters of soil water characteristic curve model for loess in Zichang

土样类别	竖向压力/kPa	模型参数 S_0	模型参数 n	相关系数
子长原状黄土	400	80	0.50	0.97
	600	110	0.65	0.98

上述常含水率情况下的土水特征曲线分析过程,在计算饱和含水率时 ρ_{dp} 采用的是在一定含水率土样在竖向压力作用下变形稳定后的干密度。因此,实际上是同时考虑了压力和增湿作用对土体持水特性的影

响。相比而言,本文 2.2 节中土水特征曲线的分析方法实际上是把压力和增湿作用对土体变形的影响分成两项(ρ_{wp} 和 δ_u^p)进行计算^[5]。

3.3 重塑黄土竖向压力作用下增湿过程中的持水特性

2011 年陈存礼^[18]开展了西安重塑黄土在侧限条件下的分级浸水试验,重塑黄土的基本物理力学性质指标:初始含水率 13%;干密度 1.3 g/cm³;相对密度 2.7;液限 30.9%;塑限 19.8%^[5]。

依据 2.2 节中试验数据分析步骤,得出西安重塑黄土的吸力与增湿水平试验数据点,见图 6。可见其土水特征曲线同样可划分为平缓段和陡降段两个阶段,采用式(5)土水特征曲线模型对试验数据进行拟合,并根据式(6)计算相关系数,拟合结果见图 6 和表 7。可见模拟结果与试验数据吻合较好,说明所建模型同样适用于描述重塑黄土在竖向压力作用下增湿过程中的持水特性。

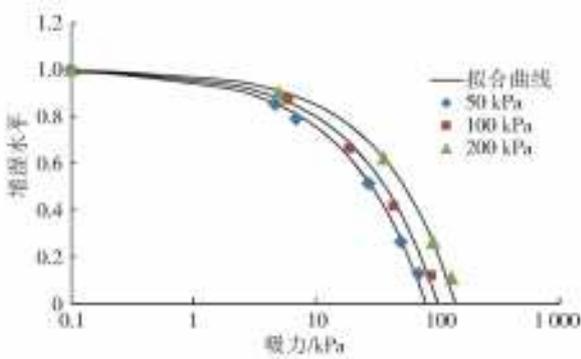


图 6 西安重塑黄土的土水特征曲线

Fig. 6 Soil water characteristic curve of remolded loess in Xi'an

表 7 西安重塑黄土的土水特征曲线模型参数

Tab. 7 Parameters of soil water characteristic curve model for remolded loess in Xi'an

土样类别	竖向压力/kPa	模型参数 S_0	模型参数 n	相关系数
西安重塑黄土	50	80	0.68	0.98
	100	100	0.70	0.99
	200	140	0.72	0.98

4 结 论

以新疆伊犁原状黄土为例,开展了以增湿水平和吸力表征的土水特征曲线模型研究,得出以下结论。

(1)黄土增湿变形过程中的土水特征曲线模型采用增湿水平和基质吸力作为变量描述,比用含水率、饱和度作为变量描述,更能反映黄土的持水特性。

(2)增湿变形的土水特征曲线模型采用初始吸

力 S_0 和陡降段斜率描述,模型简单,反映了初始吸力和增湿过程吸力的共同作用。

(3)将建立的模型应用于杨凌原状黄土的初始含水率和吸力状态,同时将该模型应用于子长原状黄土初始含水率的侧限压缩试验状态,以及西安重塑黄土的侧限分级增湿状态,吻合较好。

表明本文建立的黄土增湿变形土水特征曲线模型适用于原状黄土的初始含水率和初始吸力状态、不同初始含水率的压缩状态、不同竖向压力下的增湿变形状态,同样适用于重塑黄土在竖向压力作用下的增湿变形状态。

参考文献(References):

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西:陕西科技出版社, 1997. (LIU Z D. Loess mechanics and engineering[M]. Shaanxi: Shaanxi Science And Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 金松丽,赵卫全,张爱军,等. 原状黄土增湿过程中的静止土压力系数变化规律试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 63-70. (JIN S L, ZHAO W Q, ZHANG A J, et al. Experimental study of variation rules of the coefficient of earth pressure at rest during wetting for original loess[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 63-70. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.201601112.
- [3] 金松丽,邢义川,赵卫全,等. 基于单线法试验的黄土增湿变形非线性模型研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 710-719. (JIN S L, XING Y C, ZHAO W Q, et al. Study on nonlinear constitutive model for loess moistening deformation based on single-line experiment method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 710-719. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20161231.
- [4] 金松丽,赵卫全,邢义川,等. 侧限条件下原状黄土增湿特性研究[J]. 人民长江, 2017, 48(18): 61-66, 85. (JIN S L, ZHAO W Q, XING Y C, et al. Study on moistening characteristics of original loess under lateral confinement[J]. Yangtze River, 2017, 48(18): 61-66, 85. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.18.013.
- [5] 金松丽. 基于“可能湿陷变形”的黄土渠道地基湿陷性评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2017. (JIN S L. Research on assessment method for loess canal foundation collapse based on possible collapse concept[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. (in Chinese))
- [6] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变

- 化特性[J]. 岩土工程学报, 1999(1): 85-93. (CHEN Z H, Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999 (01): 85-93. (in Chinese))
- [7] 邢义川, 谢定义, 李永红. 非饱和黄土湿陷过程中有效应力变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(7): 1100-1103. (XING Y C, XIE D Y, LI Y H, Effective stress and collapse process of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(7): 1100-1103. (in Chinese))
- [8] 郭敏霞, 张少宏, 邢义川. 非饱和原状黄土湿陷变形及孔隙压力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(6): 785-788. (GUO M X, ZHANG S H, XING Y C. Collapse deformation and pore pressure characteristics of unsaturated intact loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000 (6): 785-788. (in Chinese))
- [9] 邢义川, 李京爽, 李振. 湿陷性黄土与膨胀土的分级增湿变形特性试验研究[J]. 水利学报, 2007(5): 546-551. (XING Y C, LI J S, LI Z, Deformation characteristics of collapsible loess and expansive soil under the condition of wetted in stages[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(5): 546-551. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2007. 05. 006.
- [10] 刘保健, 谢定义, 郭增玉. 黄土地基增湿变形的实用算法[J]. 岩土力学, 2004(2): 270-274. (LIU B J, XIE D Y, GUO Z Y. A practical method for moistening deformation of loess foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(2): 270-274. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2004. 02. 025.
- [11] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011(S2): 132-136. (LIU F Y, ZHANG Z, ZHOU D, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011 (S2): 132-136. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2011. s2. 086.
- [12] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(2): 413-420. (CHU F, SHAO S J, CHEN C L. Experimental research on influences of dry density and vertical stress on soil-water characteristic curves of intact unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014(2): 413-420. (in Chinese)) DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2014. 02. 022.
- [13] 张登飞, 陈存礼, 杨炯, 等. 侧限条件下增湿时湿陷性黄土的变形及持水特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(3): 604-612. (ZHANG D F, CHEN C L, YANG J, et al. Deformation and water retention behaviour of collapsible loess during wetting under lateral confinement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016 (3): 604-612. (in Chinese)) DOI: 10. 13722/j. cnki. jrme. 2015. 0300.
- [14] WIJAYA M, LEONG E C. Equation for unimodal and bimodal soil-water characteristic curves[J]. Soils and Foundations, 2016, 56(2): 291-300. DOI: 10. 1016/j. sandf. 2016. 02. 011.
- [15] ZHAI Q, RAHARDJO H. Determination of soil-water characteristic curve variables [J]. Computers and Geotechnics, 2012 (42): 37-43. DOI: 10. 1016/j. compgeo. 2011. 11. 010.
- [16] 刘新华. 黄土状填土应力相关的土水特征曲线及其强度[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. (LIU X H, Stress state-dependent soil-water characteristic curves and strength of loess-like backfill[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [17] 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(5): 578-585. (ZHANG Z, LIU F Y, ZHAO X G, et al. A soil water characteristic curve model considering void ratio variation with stress [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013 (5): 578-585. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2013. 05. 002.
- [18] 陈存礼, 褚峰, 李雷雷, 等. 侧限压缩条件下非饱和原状黄土的土水特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(3): 610-615. (CHEN C L, CHU F, LI L L, et al. Soil-water characteristics of unsaturated undisturbed loess under confined compression condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011(3): 610-615. (in Chinese))
- [19] 邢义川. 非饱和土的有效应力与变形—强度特性规律的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001. (XING Y C. Effective stress and deformation-strength characteristics of unsaturated soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology. (in Chinese))
- [20] 董玉柱. 非饱和原状黄土增湿变形强度特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012. (DONG Y Z. Experimental study on deformation strength characteristics of unsaturated undisturbed loess [D] Xi'an: Xi'an University of Technology. (in Chinese))