

# 地裂缝区黄土和充填土持水曲线的测试与计算

蒋明镜<sup>1,2,3</sup>, 胡海军<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>4,5</sup>, 申志福<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 长安大学 地质工程系, 陕西 西安 710054; 5. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为评价地裂缝区域黄土和充填土持水性能差异及微观机理, 实测了两者持水曲线, 根据微观结构计算了持水曲线和进气值, 根据孔隙分布分析了实测持水曲线的特征. 研究表明, 实测的黄土持水曲线在低吸力段位于充填土之上并在高吸力段接近重合, 曲线均存在滞回性; 基于孔隙分布计算得到的持水曲线与实测曲线形状相似, 并能反映一定的滞后现象; 实测和 Schubert 理论所得进气值分别接近于本文公式所得进气值的下限和上限, 而由计算持水曲线间接所得进气值位于上、下限之间; 黄土大孔隙体积较充填土多而微小孔隙分布相近是两者持水曲线产生差异的原因; 双孔隙结构是导致持水曲线中间存在平缓段的微观原因.

**关键词:** 土壤持水曲线; 黄土; 地裂缝; 吸力; 孔隙分布  
**中图分类号:** TU44 **文献标识码:** A

## Measurement and Calculation of Water Retention Curves of Loess and Filling About Ground Fissure

JIANG Mingjing<sup>1,2,3</sup>, HU Haijun<sup>1,2</sup>, PENG Jianbing<sup>4,5</sup>, SHEN Zhifu<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 4. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 5. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to evaluate the water retention capacity of loess and filling about ground fissure and investigate the soil water retention curves (SWRCs) from the micro point of view, the SWRCs of the two soils were measured, and the SWRCs and the air-entry values of two soils were calculated based on micro-structure. In addition, the characteristic of

SWRCs were analyzed from pore size distribution (PSD). The research results indicate that the SWRC of loess lies above that of the filling at low suction range and almost coincides with it at high suction range, and both curves show hysteresis phenomena. The calculated SWRCs based on PSD are similar to the measured in shape and also show hysteresis characteristic. For each soil, the air-entry value of the measured SWRC and that calculated by Schubert's theory are respectively close to the lower limit and the upper limit of calculated value by the proposed formula based on particle arrangement while the air-entry value of the calculated SWRC lie between the lower limit and the upper limit. The main reason for the difference of SWRCs between the loess and the filling is that the loess has more macro-pores and similar distribution of small pores compared with the filling. The middle flat section in SWRC is founded to be caused by the dual-porosity structure.

**Key words:** soil water retention curve; loess; ground fissure; suction; pore size distribution

土壤持水曲线(SWRC)是非饱和土含水率(含水量质量分数)或饱和度与吸力间的关系曲线, 在非饱和土力学中具有重要的理论和实用价值. 例如, 测试非饱和土渗透系数和抗剪强度的试验时间长、费用贵且对仪器测试精度要求较高, 因而常通过 SWRC 预测非饱和土的渗透系数<sup>[1]</sup>和抗剪强度<sup>[2]</sup>.

土壤持水曲线表征土体的持水性能, 通常砂土持水性能差, 粉土中等, 粘土最强, 同时表现出一定的区域性. 已有学者对不同区域土体进行了持水曲线测试<sup>[3-6]</sup>. 本试验针对西北干旱半干旱区地裂缝区后沉积的充填土与先沉积的黄土进行了持水曲线测试, 以了解土体脱湿和增湿过程中持水曲线的差异

收稿日期: 2011-11-03

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51025932); 国土资源大调查项目(1212010914013); 国家自然科学基金(41130753); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 蒋明镜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为原状结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土、深海能源土的宏、微观试验及本构模型和数值分析以及土体逐渐破坏分析. E-mail: mingjing.jiang@tongji.edu.cn

性、2 种土体持水曲线差异和水分入侵及蒸发过程中两者之间的水分迁移规律。另外,持水曲线是土体中毛细水从孔隙中流出或向孔隙充填的微观过程,其与颗粒内的孔隙分布具有重要联系,一些学者基于孔隙分布提出了持水曲线的计算公式<sup>[7-8]</sup>,Schubert<sup>[9]</sup>根据孔隙率、颗粒中值粒径、颗粒级配等提出了进气值的计算公式。为从微观上分析持水曲线,本文根据压汞试验所得 4 种土的孔隙分布计算了持水曲线并解释了实测持水曲线的特征;基于 Young-Laplace 方程<sup>[10]</sup>根据土样的中值粒径和不同颗粒排列形式提出了进气值的计算公式,并与实测、计算持水曲线和 Schubert

理论所得进气值进行了比较。

## 1 土样的物理特性指标

表 1 给出了采自陕西省泾阳县地震台地裂缝附近的原状黄土和原状充填土的物理性质指标。土样为探槽开挖后取出,取样深度约为 10 m,黄土为 Q<sub>3</sub> 马兰黄土,充填土为黑色粘土与黄土混合物。总体上充填土粘粒含量、塑性指数及密度均比黄土高。由于块体样在试验前包裹在塑料袋中,试验前放置时间较长,因此不代表原位取土处土体的含水率。

表 1 原状黄土和原状充填土的物理性质

Tab.1 Physical properties of natural loess and natural filling

土样	含水率/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒比重	孔隙比	颗粒级配/%			塑性指数 I <sub>p</sub>
					大于 0.05 mm	0.05~0.005 mm	0.005 mm	
黄土	16.9	1.53	2.71 <sup>1)</sup>	1.07	12.1	83.1	4.8	14.1
充填土	15.0	1.73	2.71 <sup>1)</sup>	0.80	9.5	84.1	6.4	16.7

注:1)黄土的颗粒比重根据已有试验资料<sup>[11]</sup>采用,因充填土与黄土具有相似的颗粒组成而采用与黄土相同的颗粒比重。

## 2 吸力测试仪器及测试方案

通常测试持水曲线的方法有张力计法<sup>[3]</sup>、轴平移法(如压力板仪<sup>[3,5]</sup>和非饱和三轴仪<sup>[5]</sup>)、气相法<sup>[4]</sup>、渗析法<sup>[4]</sup>、滤纸法<sup>[6]</sup>。持水曲线测试可通过吸力量测或吸力控制得到<sup>[1]</sup>。表 2 给出了各吸力测试方法的吸力量测或控制方式、吸力类型、吸力测试范围。总吸力由基质吸力和溶质吸力组成,基质吸力通常作为非饱和土的应力状态变量<sup>[1]</sup>,已有试验结果<sup>[1,6]</sup>表明溶质吸力随含水率变化较小,在高吸力下基质吸力接近总吸力,因此本文采用渗析法、轴平移法和气相法所测得的持水曲线可认为是基质吸力的持水曲线。另外,本文所进行的各种试验中试样所受的应力均接近无围压状态,暂不研究由于应力状态和应力水平对持水曲线的影响。

表 2 吸力测试方法

Tab.2 Methods of suction measurement

测试方法	量测或控制	吸力类型	吸力范围
张力计法	量测	基质吸力	小于 100 kPa
轴平移法	量测或控制	基质吸力	一般小于 1 000 kPa
渗析法	控制	基质吸力	一般小于 1 000 kPa
气相法	控制	总吸力	大于 1 000 kPa
滤纸法(接触)	量测	基质吸力	全范围
滤纸法(非接触)	量测	总吸力	全范围

### 2.1 测试仪器及测试原理

采用渗析法试验以吸力控制方式测试<sup>[4]</sup>,试验装置参考文献<sup>[4]</sup>。其基本原理是用半透膜将土样与

聚乙二醇(PEG)溶液隔开,当试样内吸力和 PEG 溶液所对应渗透吸力存在差异时,水分子或可溶性盐通过半透膜在土样与 PEG 溶液间交换,直到土样与 PEG 溶液中的吸力达到平衡,然后测试试样的含水率,已有试验证明其与轴平移法基本等效<sup>[12]</sup>。

轴平移法采用的 GDS (geotechnical digital system)非饱和三轴仪如图 1 所示,以吸力量测方式测试。测试某一含水率试样的吸力时,首先使陶土板饱和,然后关闭反压(水)控制器与陶土板的连接阀门,擦去陶土板表面水膜,安装好试样,封好乳胶膜,安装压力室外罩,向压力室注入无气水,为平衡试样内的气压并使土样与陶土板接触紧密,设定的目标围压比气压大 5 kPa;达到目标孔隙气压力和围压

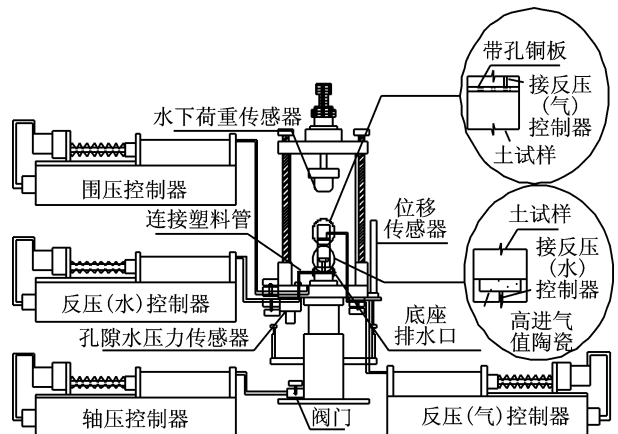


图 1 GDS 非饱和三轴仪示意

Fig.1 Schematic diagram of triaxial apparatus (GDS) for testing unsaturated soil

后,待孔隙水压力稳定时,孔隙气压力减去孔隙水压力即为吸力. 试验中一个重要环节是使陶土板饱和,首先卸掉压力室内的陶土板底座,放置大气中风干,用抽真空设备对陶土板底座抽真空 3 h,然后注水饱和;再把陶土板底座安装入水位高于底座排水口的压力室内,安装过程保证陶土板表面有一层水;在排水情况下,用塑料管连接反压(水)控制器和底座一排水口,设置反压 20 kPa,排水 5 min 后,封闭底座另一排水口,设置反压为 0 kPa,关闭反压(水)控制器阀门,对压力室注入无气水,施加围压,从测试的围压和孔压的关系可得孔隙水压力系数  $B$  值大于 0.99,证明陶土板饱和效果很好.

气相法试验为吸力控制测试,试验装置可参考文献[4]. 不同种类饱和盐溶液内的空气有恒定的湿度,对应某一吸力值,当试样内的湿度和外部湿度达到一致时,试样内水分保持不变,此时试样内的含水率即为该湿度所对应吸力下的含水率. 本试验用于测试吸力大于 4.2 MPa 的持水曲线.

### 2.2 测试方案

表 3 列出了持水曲线测试方案. 重塑土是将原状土碾碎后风干,过 0.25 mm 筛,配置出含水率  $w=15\%$ (接近原状土天然含水率)的土料,然后用击样法<sup>[13]</sup>制取直径 39.1 mm、高度分别为 40.0 mm 和 80.0 mm 的重塑土三轴试样. 对于原状土,根据切样或取样时的实测含水率风干或加水使其含水率为 15%.

饱和土均为 80.0 mm 高的三轴样抽真空饱和得到.

表 3 持水曲线测试方案

Tab.3 Program of soil water retention curve measurement

土样初始状态	增湿/减湿	持水曲线测试方法	
		低吸力段	高吸力段
饱和原状黄土、充填土,饱和重塑黄土、充填土	减湿	渗析法	气相法
原状黄土、充填土重塑黄土、重塑充填土( $w=15\%$ )	增湿或减湿	渗析法	气相法
重塑黄土、充填土( $w=15\%$ )	加水或风干	非饱和三轴仪	气相法

表 4 列出了渗析法采用的 PEG 溶液质量浓度和对应的吸力,所用试样为三轴样中切出 1 块约 10.0 mm×10.0 mm×20.0 mm 的长条形土块;表 5 列出了 GDS 非饱和三轴仪重塑黄土和重塑充填土不同含水率试样的吸力测试方案,所用试样高度为 40.0 mm 的三轴样,含水率大于 15% 和小于 15% 的试样分别通过加水和风干到不同含水率得到,这些试样在吸力测试之前均用保鲜膜包裹放入保湿缸内 2 d 以上,试样的实际含水率按吸力量测之后的含水率为准.

表 4 渗析法测试采用 PEG20000 质量浓度与对应的吸力

Tab.4 Concentrations of PEG20000 solutions and corresponding suctions in osmotic technique

质量浓度/%	吸力/kPa	质量浓度/%	吸力/kPa
6.32	50	11.88	200
8.71	100	23.17	1000

表 5 GDS 非饱和和三轴仪的吸力测试方案

Tab.5 Program of suction measurement by triaxial apparatus (GDS) for testing unsaturated soil

土样	增湿点含水率/%				脱湿点含水率/%	
	试样 1	试样 2	试样 3	试样 4	试样 5	试样 6
重塑黄土	27.0,27.0	25.0,23.6	22.0,21.1	18.0,16.9	15.0,14.1	10.5,11.2
重塑充填土	22.0,21.6	20.0,19.3	18.0,17.8	16.5,16.4	13.5,13.2	10.5,11.1

注:逗号前为预定含水率,逗号后为试样实际含水率.

表 6 列出了气相法采用的不同盐溶液和对应的吸力,所用试样为 2~3 个长、宽、高都为 8.0 mm 的土块. 根据已有资料<sup>[4,12]</sup>,渗析法 7~10 d 试样内吸力可达到稳定,本文采用 14 d. 轴平移法测试时需要逐步调整气压,以使孔隙水压力较快稳定,一般在 24 h 内孔隙水压力能够稳定. 实测表明用气相法进行

吸力平衡的试样 10 d 后质量基本稳定,然后统一测试 14 d 后试样的含水率作为该吸力对应的含水率.

表 7 为高度 80.0 mm 重塑土试样吸力减少到 0 kPa 的方法. 其中抽真空后注水吸湿和吸水无体积变化方法均将试样放在三轴试样夹具中,抽真空后注水吸湿是在真空缸中进行,注水完毕后取样测试含水率;吸水无体积变化和吸水自由变形方法分别将带夹具试样和不带夹具的试样置于托盘中砂垫层上,盘中水位与试样底端齐平. 吸水自由变形试样吸湿 1 d 后表面已接近饱和,并且变形继续发展,试样将不能站立,此时测定含水率. 吸水无体积变化试样吸湿 10 d,测试试样上下部含水率接近,证明吸力已

表 6 气相法测试采用的饱和盐溶液及对应的吸力

Tab.6 Saturated salt solutions and corresponding suctions in vapor phase method

饱和盐溶液	吸力/MPa	饱和盐溶液	吸力/MPa
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.2	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	82.0
NaCl	38.0	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	113.0
NaNO <sub>3</sub>	57.0		

经平衡.

表 7 吸力减少到 0 kPa 的不同吸湿方式

Tab.7 Different moisture absorption methods when suction is 0 kPa

试样	吸湿方式
重塑黄土 ( $w=15\%$ )	抽真空后注水吸湿;吸水无体积变化;吸水自由变形、抽真空饱和和再风干后吸水自由变形
重塑充填土 ( $w=15\%$ )	抽真空后注水吸湿;吸水无体积变化;吸水自由变形

### 3 测试结果

#### 3.1 持水曲线测试结果

测得的持水曲线如图 2 所示,其中图 2b 中渗析法和轴平移法所测增减湿持水曲线中吸力零点对应的含水率,分别采用表 7 中吸水自由变形和吸水无体积变形所得含水率.从图可见不同吸力路径的持水曲线不同,从饱和状态进行的减湿曲线位于从  $w=15\%$  为起点的增湿和减湿曲线之上,并在高吸力部分两者相重合;无论原状土还是重塑土,黄土持水

曲线在低吸力段均位于充填土之上,两者在高吸力段基本重合.从图 2 可以看出,以  $w=15\%$  为起点的重塑土增湿和吸湿持水曲线渗析法测得的位于非饱和和三轴仪测得的之上,且渗析法吸力为 1 000 kPa 时试样吸水而非失水,这可能与渗析法吸力和基质吸力的标定关系不唯一<sup>[12, 14]</sup>、试验中试样不规则和半透膜有间隙以及吸力平衡过程无约束应力<sup>[12]</sup>有关,还有待更多试验积累和研究.从饱和状态进行吸力为 50 kPa 平衡后的含水率大于初始饱和含水率,这与吸力平衡过程中试样膨胀相关.因此在用渗析法测试吸力平衡过程中产生体积变化的土样时需考虑体积变化带来的耦合作用.

用气相法所得各试样在高吸力下的含水率表明,充填土略高于黄土,原状土略高于重塑土,但均相差很小;吸力在 4.2~113.0 MPa 区间时,含水率为 4%~2%.另外,室外风干黄土和充填土土样的含水率分别为 2.24%和 2.25%.可见试样的残余含水率在 2%左右.

#### 3.2 零吸力对应的含水率

用表 7 中的方法测得吸力为 0 kPa 时试样的含水率如表 8 所示.抽真空注水吸湿过程中黄土和充填土由三轴夹具约束,基本无体积变形,其含水率分别与饱和含水率 39.5%和 29.6%相接近,说明抽真空注水吸湿后试样达到了完全饱和状态.采用吸水自由变形的的方法测试,试样会出现底部变粗现象,吸水稳定后对所有土样顶部土体取样进行含水率测试,结果表明试样含水率大于初始饱和含水率,可见吸水自由变形方法出现体积膨胀的现象.采用无体积变形方法测得的水率小于饱和含水率,表明试样内有残余的孔隙未被水充填,说明持水曲线出现滞回现象,这与有关试验现象<sup>[15]</sup>相符.

表 8 不同吸湿方式吸力为 0 kPa 时的含水率

Tab.8 Water contents of samples when suctions reach 0 kPa by different moisture absorption methods

试样	吸湿方式	含水率/%
重塑黄土	抽真空后注水吸湿	41.1
	吸水无体积变化	35.2
	吸水自由变形	52.7
重塑充填土	抽真空饱和,风干后吸水自由变形	56.7
	抽真空后注水吸湿	30.0
重塑充填土	吸水无体积变化	27.2
	吸水自由变形	41.1

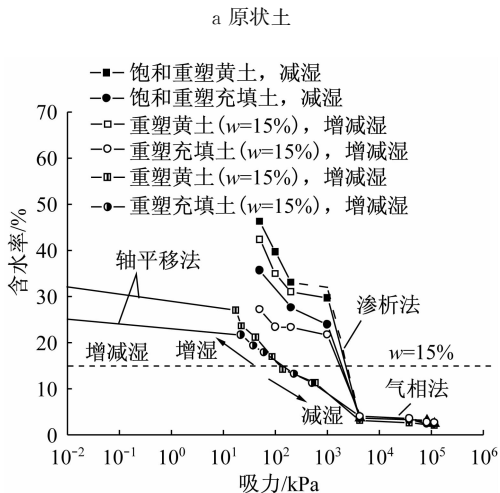
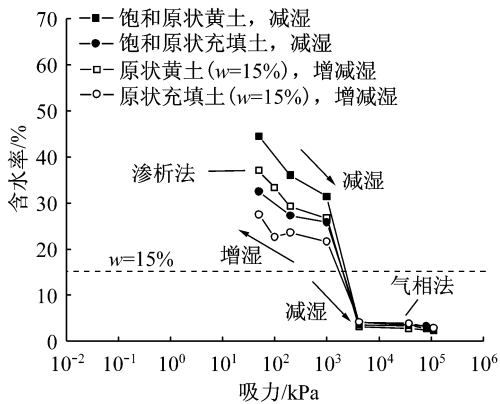


图 2 实测的持水曲线

Fig.2 Measured soil water retention curves

### 4 持水曲线及进气值的计算

#### 4.1 持水曲线的计算

图 3 给出了压汞试验所测得的试样孔隙分布曲

线,图中,  $V$  为注入汞体积;  $D$  为入口孔隙直径. 原状黄土和重塑黄土具有相似的孔隙分布曲线, 呈双峰分布; 原状充填土和重塑充填土具有相似的孔隙分布曲线, 约呈四峰分布. 按进入试样孔隙的总汞体积来计算, 原状黄土、重塑黄土、原状充填土、重塑充填土的孔隙比依次为 0.950, 1.067, 0.600, 0.730. 原状土孔隙比与宏观孔隙比有较大差距, 原因在于原状充填土土样较不均匀, 此压汞样品孔隙比可能偏小; 原状黄土含有孔洞等大孔隙, 在取压汞样时避开了此类孔隙; 另外汞能进入试样内一定孔径范围的孔隙, 封闭孔隙和小孔隙均未能进入.

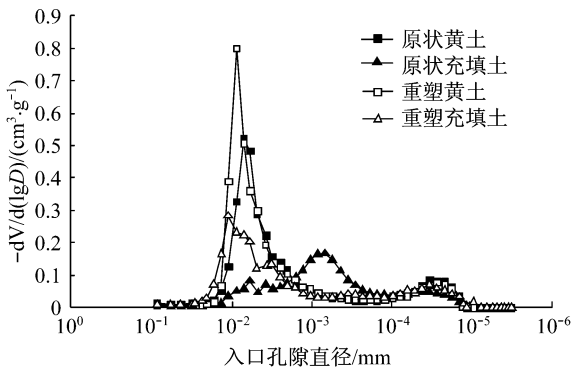


图 3 孔隙体积增量与入口孔径的关系

Fig.3 Incremental volume of pore and entrance pore diameter for sample per gram

根据毛细管假定, 某一吸力下水能进入的毛细管孔径  $d$  可用式(1)表示, 即在该吸力下大于该孔径的孔隙均被水所填充.

$$d = \frac{4\gamma \cos \alpha}{u_a - u_w} \quad (1)$$

式中:  $\gamma$  为孔隙水的表面张力, 15 °C 时为 0.073 5 N · m<sup>-1</sup>;  $\alpha$  为接触角;  $u_a$  为孔隙气压力;  $u_w$  为孔隙水压力.

通常减湿过程中颗粒与水的接触角小于增湿过程中的, 这是造成减湿和增湿曲线不重合的原因之一<sup>[16]</sup>. 根据已有测试结果<sup>[17]</sup>, 假定减湿接触角为 0°、增湿接触角为 30°. 基于式(1)和试样的孔隙分布曲线, 从饱和减湿后再增湿的计算持水曲线如图 4 所示, 其中饱和状态含水率采用初始试样的饱和含水率. 由图 4 可见, 增湿持水曲线位于减湿持水曲线之下, 差异性很小, 并且减湿后再增湿到饱和时含水率与起始点相同, 而不是小于起始点<sup>[15]</sup>, 这是该方法未考虑“瓶颈”效应或“墨水瓶”效应所致. 原状黄土和重塑黄土的持水曲线接近, 2 种充填土的持水曲线有较大差异, 这与孔隙分布的差异性相关.

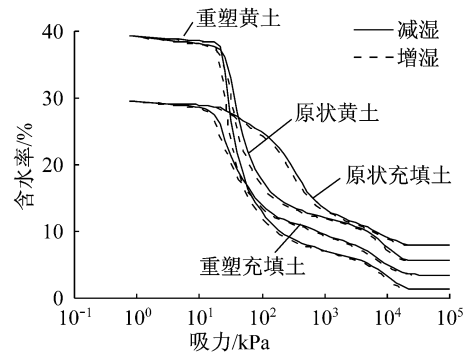


图 4 计算所得持水曲线

Fig.4 The calculated soil water retention curve

图 5 给出了从  $w=15\%$  开始增减湿过程的实测和计算持水曲线, 从图可以看出用轴平移方法所得持水曲线与计算值较为接近, 但由于计算曲线没有考虑瓶颈效应, 在低吸力区间两者差异仍较大.

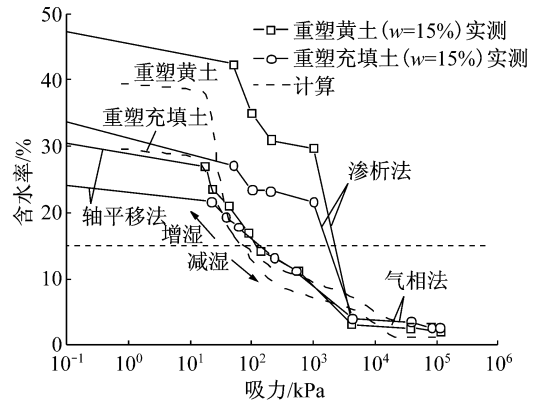


图 5  $w = 15\%$  时增减湿实测持水曲线与计算曲线的对比

Fig.5 Comparison between the measured soil water retention curve and that calculated for the sample wetted and dried from  $w = 15\%$

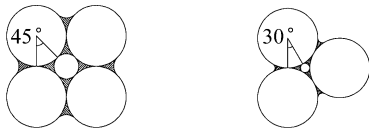
### 4.2 进气值的计算

假定试样颗粒直径均为  $d_{50}$ ,  $d_{50}$  为颗粒中值粒径. 正方形排布和三角形排布分别代表疏松和紧密排列, 如图 6 所示. 对于减湿情况, 当吸力大于某一特定值时, 如图 6a 和图 6b 对应的吸力值, 粒间的气泡突然产生, 饱和度由 1 降低为某一值, 因此该吸力值即为进气值. 该吸力值分别对应持水角 45° 和 30° 时的吸力值, 基于 Young-Laplace 方程<sup>[10,16]</sup>, 可按式(2) (下文简称为本文公式) 计算进气值  $S_u$ :

$$S_u = \frac{2\gamma \cos \theta (\sin \theta + 2 \cos \theta - 2)}{d_{50} (1 - \cos \theta) (\cos \theta + \sin \theta - 1)} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为持水角.

根据 Schubert 理论, 进气值  $S_u$  与孔隙率、颗粒中值粒径、颗粒级配等有关, 可用式(3)表示<sup>[9]</sup>:



a 等直径颗粒正方形排布 b 等直径颗粒三角形排布

图 6 不同排列形式下最大持水角

Fig. 6 Maximum water-retention angles under different arrangement forms

$$S_u = a \frac{1-n}{n} \frac{\gamma}{d_{50}} \quad (3)$$

式中:  $n$  为孔隙率; 对于颗粒级配在窄的空间分布时  $a=6.0\sim 8.0$ , 颗粒级配在宽的空间分布时  $a=1.9\sim 14.5$ . 黄土和充填土的中值粒径分别为  $0.020\text{ mm}$  和  $0.016\text{ mm}$ , 孔隙率分别为  $0.517$  和  $0.444$ , 颗粒主要集中在粉粒区间, 取  $a=7$ .

表 9 给出了不同方法所得进气值的汇总, 根据实测持水曲线确定进气值时均采用增减湿持水曲线, 并优先采用轴平移方法所得曲线, 另外对于原状黄土和原状充填土假定增湿到吸力为  $0\text{ kPa}$  时的含水率与相应重塑土相同. 由结果可见, 基于实测、计算持水曲线和 Schubert 理论所得进气值基本位于本文公式所得的进气值范围内, 且实测方法和 Schubert 理论所得进气值分别接近于正方形排布和三角形排布所得进气值, 计算持水曲线所得进气值介于两者中间.

表 9 不同方法所得进气值

Tab. 9 Air-entry values obtained by different methods

土样	kPa				
	持水曲线 实测	持水曲线 计算	Schubert 理论	本文公式(排布形式) 正方形	本文公式(排布形式) 三角形
原状黄土	4.3	21.7	24.0	5.2	30.1
原状充填土	8.1	15.0	40.2	6.5	37.7
重塑黄土	4.5	19.9	24.0	5.2	30.1
重塑充填土	6.3	12.9	40.2	6.5	37.7

## 5 讨论

### 5.1 持水曲线特征与孔隙分布的联系

对比基于孔隙分布所得持水曲线和实测的持水曲线可以发现, 由于试样具有双峰或多峰孔隙分布, 除原状充填土外, 入口孔隙直径在  $10^3\sim 10^4\text{ mm}$  之间孔隙体积较小, 对应着吸力变化  $10$  倍过程中含水率的变化较小, 因此持水曲线在此区间出现一个平缓段, 这与具有双孔隙结构土样的持水曲线<sup>[18]</sup>相似.

如图 3 所示黄土具有较大孔隙, 因此如图 2

和图 4 所示在低吸力范围内持水曲线位于充填土之上, 两者具有相近的小孔隙体积, 所以在高吸力段两者的持水曲线相近.

### 5.2 黄土和充填土持水性能评价

持水性能用比水容量衡量<sup>[3]</sup>, 比水容量定义为单位吸力改变引起的含水率变化, 比水容量越大, 持水性能越差. 在低吸力段 ( $w>15\%$ ), 黄土持水性能不如充填土, 说明土体在天然水率状态降雨入渗过程中水分迁移主要发生在黄土中, 在高吸力段 ( $w<15\%$ ), 黄土持水性能和充填土差不多, 说明土体从天然含水率状态附近开始的水分蒸发过程中黄土和充填土的水分迁移基本接近.

## 6 结论

(1) 黄土持水曲线在低吸力段位于充填土之上, 两者在高吸力段基本重合. 两者持水曲线均存在一个随吸力增大含水率变化很小的平缓段. 孔径分布为双主峰或多主峰, 中间平缓是导致这一平缓段的原因. 在低吸力段, 黄土持水性能较小而高吸力下两者持水性能相近.

(2) 约束与不约束试样变形吸湿到吸力为  $0\text{ kPa}$  对应的含水率分别小于和大于初始试样的饱和含水率, 说明前者有一部分孔隙未被水充填, 即存在滞回现象, 后者在吸湿过程中产生了体积膨胀.

(3) 根据孔隙分布计算的持水曲线与实测曲线形状相近, 设定增湿接触角和减湿接触角不同可以模拟出滞后现象, 但由于没有考虑“瓶颈”效应, 滞后效应不明显.

(4) 实测和 Schubert 理论所得进气值分别接近于本文计算公式所得进气值的下限和上限, 而由计算持水曲线间接所得进气值在上限和下限之间. 本文方法仅需土样的中值粒径, 应用很简便.

本文研究的黄土和充填土试样在渗析法吸力平衡过程中产生变形, 采用能施加围压约束试样变形的渗析三轴仪<sup>[19]</sup>值得进一步测试研究; 已有研究表明持水曲线与应力状态有关<sup>[5,20]</sup>, 处于原位应力状态下的持水曲线及其与孔隙分布的联系值得进一步研究; 另外根据试样的扫描电子显微镜照片所得的实际颗粒排布和孔隙组成计算试样的进气值也有待进一步研究.

致谢: 感谢法国国立路桥大学崔玉军教授对本文进行了审阅并提出了宝贵意见以及同济大学已毕业本科生唐福源、苏佳兴在试验中的帮助.

## 参考文献:

- [1] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: Wiley & Sons, 1993.
- [2] Fredlund D G, Xing A, Fredlund M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440.
- [3] 赵渭生, 孟赐福, 沈建国. 浙江省金华地区六种红壤持水性能的初步研究[J]. 浙江农业大学学报: 农业与生命科学版, 1989, 15(4): 277.  
ZHAO Weisheng, MENG Cifu, SHEN Jianguo. Study on the water-retention characters of six red soils in Jinhua prefecture of Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 1989, 15(4): 277.
- [4] 郁陈. 非饱和高庙子膨润土的体变特征及其微观机理[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2006.  
YU Chen. Volume change behavior and its micro-structural mechanism of unsaturated Gaomiaozhi bentonite [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2006.
- [5] 李永乐, 刘汉东, 刘海宁, 等. 黄河大堤非饱和土土-水特性试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 347.  
LI Yongle, LIU Handong, LIU Haining, et al. Test and study on soil water curve of unsaturated soil of Yellow River dyke [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 347.
- [6] 白福青, 刘斯宏, 袁骄. 滤纸法测定南阳中膨胀土土水特征曲线试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 928.  
BAI Fuqing, LIU Sihong, YUAN Jiao. Measurement of SWCC of Nanyang expansive soil using the filter paper method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 928.
- [7] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521.
- [8] Kong Lingwei, Tan Luorong. A simple method of determining the soil-water characteristic curve indirectly[C] // Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils. Singapore: [s. n.]: 2000: 341-345.
- [9] Schubert H. Capillary forces-modeling and application in particulate technology [J]. Powder Technology, 1984, 37: 105.
- [10] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的一些思考[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 67.  
YAO Hailin. Some considerations about the concept of matric suction and questions related to matric suction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 67.
- [11] Sun P, Peng J B, Chen L W, et al. Weak tensile characteristics of loess in China—an important reason for ground fissures[J]. Engineering Geology, 2009, 108(1/2): 153.
- [12] Ng C W W, Cui Y J, Chen rui, et al. The axis-translation and osmotic techniques in shear testing of unsaturated soils; a comparison[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(4): 675.
- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.  
Ministry of Water Resources of PR China. GB/T50123—1999 Standard for soil test method [S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [14] Tarantino A, Gallipoli D, Augarde C E, et al. Benchmark of experimental techniques for measuring and controlling suction [J]. Geotechnique, 2011, 61(4): 303.
- [15] Pham H Q, Fredlund D G, Barbour S L. A practical hysteresis model for the soil-water characteristic curve for soils with negligible volume change[J]. Geotechnique, 2003, 53(2): 293.
- [16] 贺炜, 赵明华, 陈永贵, 等. 土-水特征曲线滞后现象的微观机制与计算分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1078.  
HE Wei, ZHAO Minghua, CHEN Yonggui, et al. Theoretical study of microscopical mechanisms and computational method of hysteresis in SWCCs[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1078.
- [17] Woche S K, Goebel M O, Kirkham M B, et al. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2): 239.
- [18] Burger C A, Shackelford C D. Soil-water characteristic curves and dual porosity of sand-diatomaceous earth mixtures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(9): 790.
- [19] Cui Y J, Delage P. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt[J]. Geotechnique, 1996, 46(2): 291.
- [20] 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, 30(3): 610.  
CHEN Cunli, CHU Feng, LI Leilei, et al. Soil-water characteristics of unsaturated undisturbed loess under confined compression condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 610.