

DOI: 10.11779/CJGE2023S10037

粗粒堆积土土水特征分析及预测方法研究

李 剑¹, 李世昌^{1,2}, 武 贾^{1,2}, 陈善雄¹, 余 飞¹, 戴张俊¹, 张 宇³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 四川省水利发展集团有限公司, 四川 成都 610094)

摘 要: 非饱和状态是影响土体力学性质的重要因素。针对粗粒堆积土土水特性研究的不足, 首先介绍了一种大型非饱和粗粒堆积土三轴试验系统, 在试验研究的基础上, 总结了粗粒堆积土土水特征试验的方法和控制标准; 然后, 总结了不同细粒土含量下粗粒堆积土的 SWCC 变化规律; 最后, 在 AP 模型的基础上, 系统分析了关键参数 α 的确定方法, 给出了利用 AP 模型预测粗粒堆积土 SWCC 的优化方法。

关键词: 粗粒堆积土; 土水特征; SWCC; 预测方法; Arya Paris 模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S1-0050-04

作者简介: 李 剑(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土体力学特性及岩土工程稳定性方面的研究工作。E-mail: lij@whrsm.ac.cn。

Soil water characteristics of coarse-grained accumulation soil and their prediction method

LI Jian¹, LI Shichang^{1,2}, WU Gu^{1,2}, CHEN Shanxiong¹, YU Fei¹, DAI Zhangjun¹, ZHANG Yu³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Water Development

Group Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

Abstract: The unsaturated state is an important factor affecting the mechanical properties of soil. In view of the lack of researches on soil-water characteristics of coarse-grained accumulation soil, a large unsaturated coarse grained soil triaxial test system is first introduced. On the basis of experimental researches, the methods and control standards for soil-water characteristic (SWCC) tests on the coarse-grained accumulation soil are summarized. Then, the variation of SWCC of the coarse-grained accumulation soil with different fine-grained soil contents is summarized. Finally, on the basis of the AP model, the determination method for the key parameter α is systematically analyzed, and the optimal method to predict the SWCC of coarse-grained accumulation soil by using the AP model is given.

Key words: coarse-grained accumulation soil; soil-water characteristic; SWCC; prediction method; Arya-Paris model

0 引 言

非饱和状态是影响土体力学特性的重要因素。基质吸力的增加直接降低了土体的含水率, 提高了土体的抗剪强度和模量, 进而对岩土工程的稳定性产生显著影响。因此, 土水特征研究一直是非饱和土研究的热点。

过去, 人们对细粒土(如黏土、粉质黏土、砂土等)的土水特征进行了大量研究, 但对大颗粒粗粒堆积土的土水特征研究较少, 主要是受限于现有测试设备的尺寸, 它们只能对小尺寸的土样进行测试。然而, 粗粒堆积土含较多 10~60 mm 的颗粒, 因此小尺寸试验设备不能满足大颗粒土体试验的基本要求(试样土样的直径需大于或等于土样最大粒径的 5 倍)。因此, 目前鲜有报道粗粒堆积土土-水特征的研究成果。

而且, 人们普遍认为, 粗粒堆积土的持水能力较弱, 对土体的变形和强度几乎没有影响, 然而, 目前的研究结果表明, 土体的 SWCC 受许多因素的影响, 如密度、干湿循环、应力历史、细粒土含量等^[1-2]。其中, 细粒土的含量对土体 SWCC 有更显著的影响。粗粒堆积土中不仅含有大颗粒, 而且含有大量细粒土。随着细粒土含量的增加, 土体的 SWCC 不可避免地会发生变化, 土体的力学特性将逐渐受到影响。因此, 在细粒土含量增加的条件下, 对粗粒堆积土土水特性的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

土水特性试验是一种耗时的试验, 因为在每个阶

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42172308)

收稿日期: 2023-07-05

段的气体压力下, 土体中的气液平衡时间较长。因此, 一般来说, 研究土体 SWCC 的快速方法是建立 SWCC 的经验公式^[3], 例如 Van Genuchten 公式和 Fredlund 公式属于这种预测方法。这些模型只需要使用少量的试验数据来拟合经验公式中的关键参数, 就可以得到完整的 SWCC。然而, 使用经验公式获得 SWCC 也是基于一些试验数据。为了进一步简化 SWC 的应用, 一些学者在总结了大量土体的 SWCC 后, 建立了与土颗粒分布相关的 SWCC 预测模型。例如, Arya 等^[4]、Tyler 等^[5]、Sweijen 等^[6]都建立了许多基于土颗粒级配的 SWCC 预测模型。这些模型基于细粒土的 SWCC 预测, 其对粗粒堆积土的适用性仍需进一步研究。

针对粗粒堆积土 SWCC 研究的不足, 本文首先介绍了一种新开发的非饱和粗粒堆积土三轴试验系统, 该系统可以对粗粒堆积土进行大尺寸 SWCC 试验。在此基础上, 总结了粗粒堆积土的 SWCC 试验方法和吸力平衡标准, 研究了细粒土含量增加条件下粗粒堆积土 SWCC 的变化规律。最后, 利用经典的 AP 模型, 分析并得出了适用于粗粒堆积土 SWCC 的预测方法。

1 非饱和粗粒堆积土三轴仪

大型非饱和粗粒堆积土动静三轴试验系统由压力控制系统、轴压加载系统、数据采集系统以及软件控制与分析系统组成。其中, 涉及粗粒堆积土 SWCC 试验的主要系统和部件包括: 陶土板底座、气压控制装置和排水测量系统, 见图 1。大型非饱和三轴仪试样尺寸为 150 mm×300 mm, 该试验系统允许的最大颗粒粒径最大可达 30 mm, 这就大大消除了试验时替代大颗粒土所带来的偏差, 使得试验结果更加符合实际。陶土板底座由 3 个具有高进气值的小陶土板构成, 在有效隔绝土样气体排放的同时, 避免了装样过程中陶土板受冲击破裂。

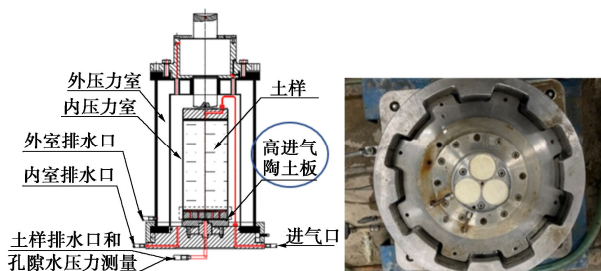


图 1 非饱和粗粒堆积土三轴仪

Fig. 1 Triaxial apparatus for unsaturated coarse-grained soil

2 非饱和粗粒堆积土 SWCC 试验方案

2.1 非饱和粗粒堆积土试样制备

试验土样取自某高铁站粗粒堆积土高填方边坡。为了研究不同细粒料含量 (颗粒粒径小于 0.075 mm) 对粗粒堆积土土水特征曲线的影响, 设计了 3 组细粒

料含量不同的试样, 细粒料质量含量分别为 4.525%, 9.05%, 13.575%, 试样的土颗粒级配见图 2。3 组试样在粒径为 5~30 mm 的占比几乎相同, 颗粒级配差异主要体现在 5 mm 粒径以下部分, 并重点关注 0.075 mm 以下部分的含量。3 组试样的干密度均控制为 1.8 g/cm³。将配置好的试样搅拌均匀, 分 5 次平均加入制样桶中。每次加样后应压实试样, 控制单次加样高度为 60 mm。

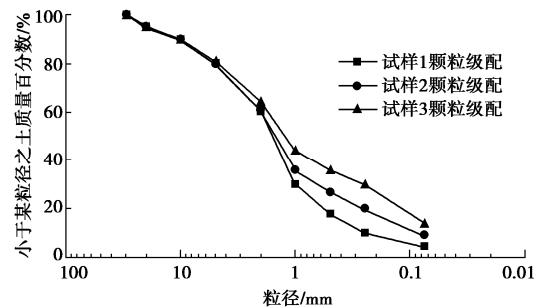


图 2 土样颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of soil particles

2.2 试验步骤与吸力平衡标准

粗粒土 SWCC 试验步骤参考细粒土试验步骤, 不同的是, 由于粗粒堆积土样品尺寸大、饱和含水率高, 试验期间的气液平衡标准不同于细粒土试验。

小颗粒土壤水分特征试验的基质吸力平衡准则大致可分为两类: 第一类是根据排水量与样本量的比例进行控制。例如, 在褚进品等^[7]对黏土水的特性试验中, 平衡标准是每 2 h 排水量小于样品体积的 0.05%。第二类是控制排水量。例如, Pham^[8]采用的平衡标准是, 24 h 内土壤样品的排水质量小于 0.1 g。

由于粗粒堆积土样本的含水率相对较高, 第二类控制标准对于大样本粗粒堆积土来说过于严格, 因此根据第一类平衡标准来判断粗粒堆积土吸力平衡更合适。经过多次试验, 发现以 1 mL/h 的出水速率作为吸力平衡的控制标准更为合理, 即每 1 h 的排量小于样品体积的 0.04%。

3 细颗粒含量对粗粒堆积土 SWCC 影响

3.1 不同细颗粒含量试样试验结果

图 3 给出了不同细颗粒含量试样的 SWCC 试验结果。由于试验数据点略少, 采用经典 VG 模型对测得的试验数据进行拟合, 以研究土壤水分特征参数, 实测数据及拟合曲线见图 3 (a) ~ (c)。

从图 3 可以看出, 与粉质黏土等细粒土相比, 粗粒堆积土的持水能力相对较弱, 土体中的水可以在较小的气压下排出, 土体中的基质吸力相对较小。然而, 随着细粒土含量的增加, 粗粒堆积土的持水能力不断增加, 土壤的进气值也相应增加, 即 $S_{a3} > S_{a2} > S_{a1}$, S_{a1} 趋于 0, 未在图中展出。此外, 随着细土含量的增加, 土体的残余基质吸力也在增加, 即 $\psi_3 > \psi_2 > \psi_1$, 这也表明土壤的持水能力在增加, 土体持水能力的提高必然

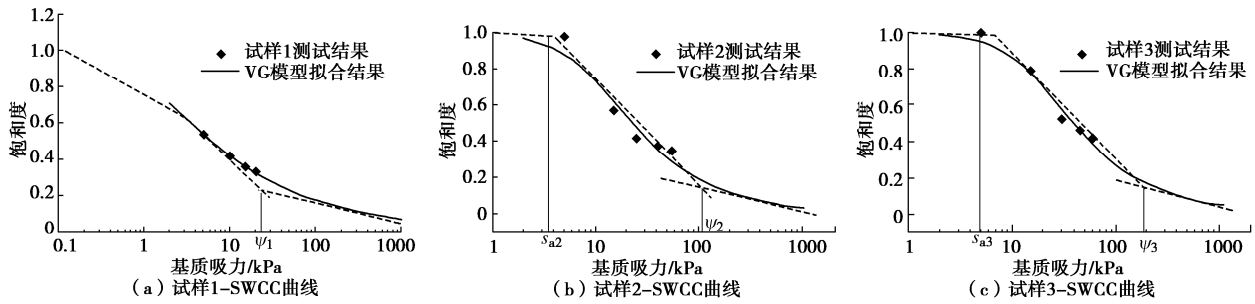


图3 实测数据及 VG 模型拟合的 SWCC 曲线

Fig. 3 SWCCs fitted by measured data and VG model

会影响土体的变形和强度特性。

3.2 试验设备及方法可靠性验证

目前,关于粗粒堆积土土水特征的研究很少,仅通过前人极其有限的研究结果^[9]作为对比数据,验证本文试验数据的合理性。对比试验数据见图4。

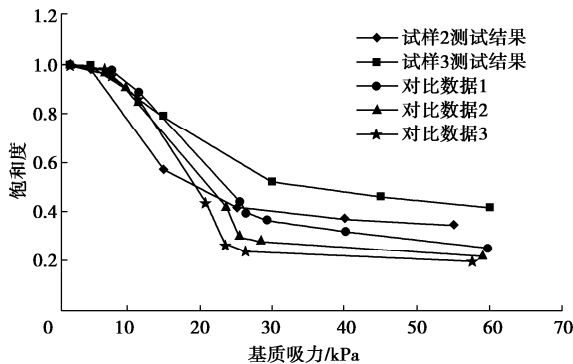


图4 试验可靠性对比

Fig. 4 Comparison of test reliability

通过对比可以发现,尽管土颗粒的分布不同,但粗粒堆积土的土水分布特征曲线具有明显的相似性,基质吸力范围基本相同。随着粗粒堆积土不均匀系数的增加,相同基质吸力下的饱和度逐渐升高,表明土体持水能力不断提高。上述对比结果说明了实验数据的合理性,证明了利用该三轴仪器进行试验的可靠性。

4 基于 AP 模型的粗粒堆积土 SWCC 曲线预测方法

4.1 Arya-Paris 模型

Arya-Paris 模型^[4]从土样土水特征曲线与颗粒分曲线的相似性出发,将土样视为由圆球状颗粒以及圆柱

状孔隙组成的多孔介质,按照试样颗粒组成划定不同的粒组。将不同的颗粒分组视为若干等效粒径为 R_i 的相互独立的独立体,假设各独立体孔隙比与试样整体的孔隙比相同。各个独立体内的孔隙均为开口孔隙,并简化为毛细管通道。经此划分和简化后,结合一定合理化假设,即可求解土水特征曲线。具体过程可归纳为两条关键步骤:①通过求各组孔隙体积 V_{vi} 与总孔隙体积 V_p 的比值,推算各组孔隙充满水后的体积含水率 θ_{vi} ;②通过各组独立体颗粒个数 n_i 和独立体孔隙半径 r_i ,推算各级孔隙充满水后的基质吸力 ψ_i 。

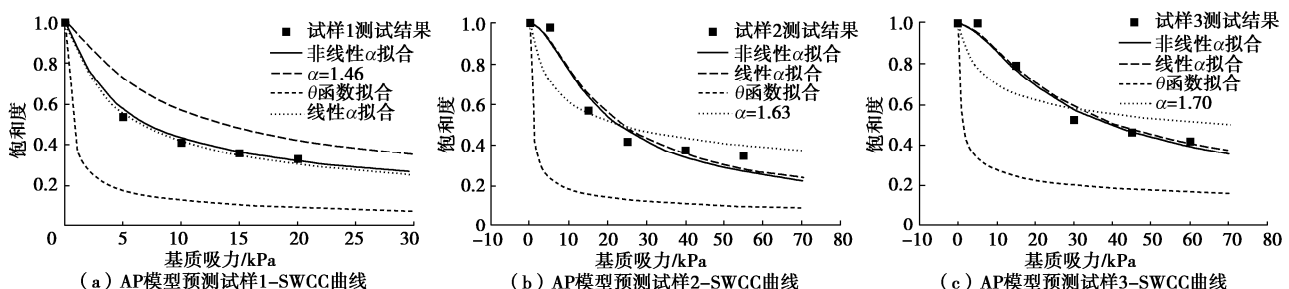
综上所述,根据 AP 理论,在确定好试样颗粒级配后,就可以预测试样的土水特征曲线进行。具体过程可参见文献^[17]。

4.2 Arya-Paris 模型关键参数与预测效果分析

基于 AP 模型预测 SWCC 的过程中,考虑到土样理想孔隙和实际孔隙结构之间的差异,引入了一个经验参数 α ,将每个独立体中的理想球形颗粒数 n_i 转化为更真实的 n_i^α 。这一参数是决定 AP 模型预测土样土水特征曲线实际效果的关键,现对其进行探讨。

关于 α 值, Arya^[4]进行了大量测试后得出结论, α 值在 1.31~1.43,并建议取值为 1.38,适用于大多数土体。随着对 AP 模型越来越深入的研究发现, α 取恒定值并不合理。一些研究人员认为, α 的值应符合土颗粒粒径越大, α 值越大的规则。为了更加准确地预测土-水分布特征曲线,研究者提出了 3 种确定经验参数值的方法^[10-11],即线性拟合法、非线性拟合法及 θ 函数法。

图5比较了基于非线性拟合法、线性拟合法

图5 基于不同 α 取值的 SWCC 预测Fig. 5 Prediction of SWCCs based on different values of α

以及 θ 函数法所确定的试样的 SWCC 曲线, 对比结果总结如下: ①通过 θ 函数法确定经验参数 α 的方式, 最终预测得到的试样土-水特征曲线与实测值偏差最大。②对于常数 α , 当细粒土含量较低时, 预测效果相对较好, 但当细粒土含量增加时, 常数取值的预测曲线与试验数据偏差较大, 细粒土含量越高, 偏差越大。③对于线性拟合方法得到的 α , 当细粒土含量较低时, 预测效果并不理想。但当细粒土含量增加时, 预测效果相对理想, 细土含量越高, 预测曲线越好。④对于非线性拟合方法得到的 α , 无论细粒土含量多少, 预测曲线的方法都与试验数据吻合良好。因此, 建议使用该方法预测粗粒堆积土的 SWCC。

5 结 论

针对目前粗粒堆积土 SWCC 测试设备的缺乏和 SWCC 研究的不足, 本文首先介绍了新开发的大型非饱和粗粒堆积土力学特性测试系统, 并总结了粗粒堆积土 SWCC 的测试方法。然后分析了不同细粒土含量的粗粒堆积土 SWCC 的变化规律。最后, 分析了不同 α 测定方法的 AP 模型对粗粒堆积土 SWCC 预测的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) 对于粗粒堆积土, 建议以 1 mL/h 的出水速率作为更合理的吸力平衡控制标准, 即每 1 h 排水量小于样品体积的 0.04%。

(2) 对于粗粒堆积土, 细粒土含量越高, 迫使试样排水所需的空气压力越高(进气值越高), 土体的残余基质吸力越高。这一规律意味着细粒土含量越高, 粗粒堆积土的保水性能越好。

(3) AP 模型中关键参数 α 的确定方法, 由非线性值得到的粗粒堆积土的 SWCC 曲线与试验数据最为吻合。建议使用该方法, 预测粗粒堆积土的 SWCC 曲线。

参考文献:

- [1] 田湖南, 孔令伟. 细粒对砂土持水能力影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 56-60. (TIAN Hunan, KONG Lingwei. Experimental research on effect of fine grains on water retention capacity of silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 56-60. (in Chinese))
- [2] 陈仁朋, 王朋飞, 刘 鹏, 等. 路基煤矸石填料土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 372-378. (CHEN Renpeng, WANG Pengfei, LIU Peng, et al. Experimental study on soil-water characteristic curves of subgrade coal gangue filler[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 372-378. (in Chinese))
- [3] 戚国庆, 黄润秋. 土水特征曲线的通用数学模型研究[J]. 工程地质学报, 2004, **12**(2): 182-186. (QI Guoqing, HUANG Runqiu. An universal mathematical model of soil-water characteristic curve[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, **12**(2): 182-186. (in Chinese))
- [4] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, **45**(6): 1023-1030.
- [5] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, **53**(4): 987-996.
- [6] SWEIJEN T, ASLANNEJAD H, HASSANIZADEH S M. Capillary pressure-saturation relationships for porous granular materials: pore morphology method vs. pore unit assembly method[J]. Advances in Water Resources, 2017, **107**: 22-31.
- [7] 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. (CHU Jinjing, TIAN Fei, WEN Wei. Experimental research and application of soil-water characteristic curve of cohesive soil in Yangzhou area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, **13**(2): 73-77. (in Chinese))
- [8] PHAM H Q. A Volume-Mass Constitutive Model for Unsaturated Soils[D]. Saskatchewan: University of Saskatchewan, 2005.
- [9] 何忠明, 刘雅欣, 曾新发, 等. 非饱和粗粒土基质吸力与含水率及级配关系试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(3): 712-718. (HE Zhongming, LIU Yaxin, ZENG Xinfu, et al. Experimental study on relationship among matric suction and moisture content and gradation of unsaturated coarse grained soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(3): 712-718. (in Chinese))
- [10] ARYA L M, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M T, et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(3): 510-519.
- [11] VAZ C M P, DE FREITAS IOSSI M, DE MENDONÇA NAIME J, et al. Validation of the arya and Paris water retention model for Brazilian soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, **69**(3): 577-583.

(编校: 孙振远)