

DOI: 10.11779/CJGE2016S2035

全风化泥岩持水特性研究及其预测

牛 庚¹, 孙德安^{1,2}, 韦昌富¹, 颜荣涛¹, 何锦堂¹, 于明波¹

(1. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444)

摘 要: 以全风化泥岩为研究对象, 采用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法 3 种方法研究在全吸力范围内压实样的脱湿阶段持水特性; 压汞试验测试土样的孔径分布, 来解释宏观持水现象, 并用此分布曲线推算持水曲线; 利用瞬态吸湿脱湿系统 (TRIM) 快速测量土水特征曲线; 以 Brooks & Corey、Van Genuchten 和 Fredlund & Xing 模型为基础进行预测, 比较了拟合结果。试验结果表明: 全风化泥岩压实样的进气值约为 75 kPa; 与经典的持水曲线不同, 过度段不是一条直线, 中间出现了水平台阶状。基于瞬态理论的 TRIM 测试方法可以较好地对待水特性进行预测。此外, 饱和样为单峰孔隙结构, 经受过吸力 38 MPa 的土样为双峰孔隙结构; 饱和样孔隙的孔径主要集中在 $10^2 \sim 10^3$ nm 左右, 随着吸力的增加, 这个孔径范围的孔隙量减少最大。Van Genuchten 和 Fredlund & Xing 模型拟合曲线能很好地与试验数据吻合; 其它预测持水曲线在很干和近饱和的状态与试验数据有一定的偏差。

关键词: 土水特征曲线; 全风化泥岩; TRIM; 模型拟合; 压汞试验

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)S2 - 0216 - 06

作者简介: 牛 庚(1991 -), 男, 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学的研究。E-mail: 799728496@qq.com。

Water retention behaviour of complete-intense weathering mudstone and its prediction

NIU Geng¹, SUN De-an^{1,2}, WEI Chang-fu¹, YAN Rong-tao¹, HE Jin-tang¹, YU Ming-bo¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The pressure plate method, filter paper method, vapor equilibrium technique with saturated salt solution, transient water release and imbibition method and mercury intrusion porosimetry (MIP) tests are used to investigate the water retention behaviour and pore-size distribution of compacted complete-intense weathering mudstone specimens taken from Cenxi, Guangxi Province. Based on the results of the MIP tests experiencing two different suctions, a method for predicting the water retention curve is proposed. The test results show that the air entry value of complete-intense weathering mudstone is about 75 kPa, and the water retention curve in the full suction range can be measured by the three methods. There appears a plateau stage in SWCC. The SWCC calculated by TRIM matches the results of conventional tests. The saturated specimen exhibits a unimodal pore-size distribution, and the specimen experiencing suction of 38 MPa has a double-porosity microstructure. There are mainly intergranular pores with diameter of 10^2 nm to 10^3 nm in compacted samples of complete-intense weathering mudstone. With the increase of the suction, the pores in this diameter range decrease. The SWCCs fitted by Van Genuchten and Fredlund & Xing are more close to the measured results accurately, and those fitted by other models cannot match the measured water retention curve correctly in the full suction range.

Key words: soil-water characteristic curve; complete-intense weathering mudstone; TRIM; model fitting; mercury intrusion porosimetry

0 引 言

泥岩属于软质岩石, 泥岩的物质组成成分复杂, 以黏土矿物为主^[1]。泥岩风化物是泥岩暴露于地表、遭受各种风化作用后的产物, 有如下特征: ①黏粒含量高; ②外观坚硬但不致密; ③具有强大的亲水性, 亲水后强度迅速降低。风化物的物理力学性质与母岩

及黏性土有所不同, 一方面有与黏性土相似的组分, 另一方面因夹有碎块而具有混合土的某些特征^[2]。其

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372078, 51309055); 广西自然科学基金创新研究团队项目 (2012GXNSFGA060001); 广西岩土力学与工程重点实验室开放基金项目 (13-KF-03)

收稿日期: 2016 - 05 - 19

风化物的厚度常达几米乃至数十米, 对建筑物影响很大, 且泥岩风化物边坡由于其矿物成分和理化性质在风化过程的特殊性, 含水率的变化所引起的强度改变特点和边坡失稳特点也与一般土质边坡差异较大。土水特征曲线 (soil-water characteristic curve) 是描述非饱和土渗流、力学及耦合过程的关键。非饱和土的渗透特性、强度、变形等力学特性都与土水特征曲线密切相关^[3]。量测土水特征曲线主要有室内直接测量和模拟间接测量两种方法, 目前国内外学者对土的持水性能展开大量的研究, 如 Vanapalli 等用室内试验的方法研究了应力历史和初始含水率对击实粉质黏土持水特性的影响^[4]; 陈正汉等研究了正应力、偏应力及密度对重塑土持水特性的影响及提出广义的持水曲线模型可以间接预测土水特性^[5]。与以上稳态测量不同, 美国科罗拉多矿业大学 Wayllace1 等^[6]提出一种快速测试持水曲线和渗透特性瞬态测量方法。

现阶段基于数学理论考虑土质特性的土水特征曲线模型也倍受青睐, 如经典的 Brooks & Corey、van Genuchten 和 Fredlund & Xing 模型等。近年来, 在这些经典模型的基础上, 国内外学者又加以探讨, 如 Vogel 等^[7]对几种模型各自适用性进行了研究; Leij 等^[8]在大量数据和经典模型的基础上又提出几种模型并加以评价。本质上, 土体孔隙结构特征对持水曲线起决定性作用, 孙德安等^[9-10]进行了一系列的持水特性试验和压汞试验, 探讨了土的孔径分布与持水性能间的关系; 胡冉等^[3]基于孔隙分布的基础上, 建立了考虑土体变形并反映滞回效应的土水特征曲线模型; Romero 等^[11]针对胀缩黏土建立了考虑孔隙变化的土水特征曲线模型。虽然国内外学者对持水性能的测量和预测取得了很大的进展, 但研究工作多数集中在低吸力, 远远不能满足工程需要, 所以本文用常规稳态测量方法量测了全吸力范围内全风化泥岩压实样的持水特性和孔径分布, 也探讨了瞬态测量持水曲线的准确性。全风化泥岩的持水性能可用于滑坡现场非饱和土持水-力学特性的预测。

本文采用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法, 量测全程吸力范围内全风化泥岩压实样的持水特性; 压汞试验测量土体的孔径分布以解释持水性能现象, 并基于此分布预测土水特征曲线; 利用 TRIM 一步流动快速量测土水特征曲线; 运用模型模拟持水曲线并进行比较探讨各模型的影响因素。在试验测得土水特征曲线的基础上, 比较以上这几种快速测量和预测方法的准确性。

1 全吸力范围持水曲线稳态量测方法

1.1 试验材料

本试验所用的全风化泥岩取自广西岑溪一处滑坡现场, 根据野外观察, 该土为全风化泥岩。全风化泥岩的物理性质指标如表 1 所示, 由表 1 可看出该土的液塑限都较高, 属于高液限黏土。

试样制备: 现场取回的土风干捣碎过 2 mm 筛, 调配制成初始含水率为 17% 左右的土样; 控制初始孔隙比约为 0.86, 制备成高为 20 mm、直径 61.8 mm 的标准环刀试样; 进行真空抽气法饱和, 饱和后含水率为 33.58%, 饱和度达到了 99.6%。

表 1 全风化泥岩的物理性质指标

Table 1 Physical property indices of complete-intense weathering mudstone

天然含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
28.1	1.78	17	52.6	25.9	26.7
自由膨胀率/%	天然干密度/(g·cm ⁻³)	天然孔隙比	天然饱和度/%	土粒相对密度	
29.9	1.52	77	98.7	2.70	

1.2 试验方法

压力板试验: 仪器为英国 GEO-experts 公司生产的 1D-SDSWCC 土水特征压力仪, 配有 15bar 陶土板。将制好的环刀试样放入土水特征压力仪的压力室中, 逐级施加吸力至 1 MPa。

滤纸法试验: 取 12 个原状样, 初始含水率和初始干密度都相差不大, 分别对土样进行不同程度的风干, 使其含水率范围在 2%~25% 之间, 分别放进带有滤纸的 Lock&Lock 盒里, 两周后待滤纸与土样中水分达到平衡后, 测量土试样的体积、含水率以及滤纸含水率。试验所用滤纸为 Whatman No.42 号, 其率定曲线和计算公式与文献[12, 13]所采用的方法相同。

饱和盐溶液蒸气平衡法: 将初始状态相同土样(饱和和压实样)切成小块, 放入过饱和盐溶液的上方, 进行脱湿试验, 平衡时间约 40 d 左右; 每种溶液上方放置两小块饱和样, 一块用于测量吸力平衡后的含水率, 另一块用于密度的测量, 其体积的量测参照文献[14]的方法。试验中采用的饱和盐溶液和其对应吸力值是根据全国物理化学计量技术委员会所给出的饱和盐溶液标准相对湿度^[15]。

1.3 全吸力范围内压实样的土水特征曲线

图 1 表示用压力板法、滤纸法和饱和盐溶液蒸气平衡法测得的压实样在初始干密度约为 1.45 g/cm³ 的全吸力范围内全风化泥岩的脱湿土水特征曲线, 分别用吸力与质量含水率、饱和度和孔隙比关系表示。由图 1 可知, 3 种方法测得的土水特征曲线在吸力重合区域能较好地重合。图 1 (b) 可得全风化泥岩压实样的进气值约 75 kPa; 且吸力在 0~75 kPa 范围内质量

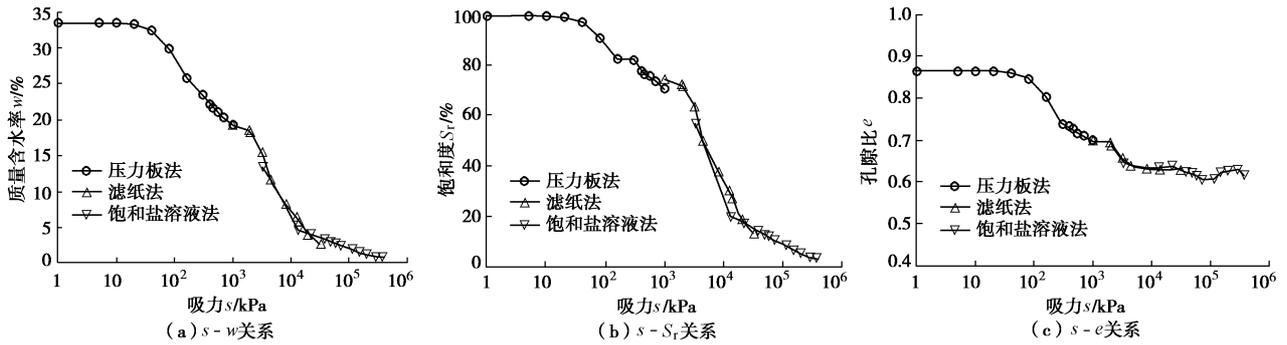


图 1 全风化泥岩压实样全吸力范围内的土水特征曲线及孔隙比变化

Fig. 1 SWCCs and void ratios of compacted specimens in full suction range

含水率和饱和度都随吸力增大几乎不变化，孔隙比也基本稳定（即试样不发生收缩变形）；当吸力在 0.075–0.80 MPa 范围时，随吸力增大质量含水率和饱和度下降明显，孔隙比变化较大（即试样收缩明显）；当吸力在 0.8~5 MPa 范围时随吸力增大质量含水率和饱和度变化不大，孔隙比也几乎不变化；再当吸力在 5~50 MPa 范围时随吸力的增大质量含水率和饱和度也下降比较明显，但孔隙比的变化都很小几乎趋于稳定；最后当吸力大于 50 MPa 时，质量含水率和饱和度变化很小，孔隙比也趋于稳定，且当吸力等于 367.54 MPa 时土体的质量含水率 w 仅为 0.55%，趋近于 0，这与 Fredlund 等^[16]认为当土体的含水率等于 0 时吸力等于 1000 MPa 的结论一致。

图 1 (a)、(b) 可以看出压实样土水特征曲线的过渡段并不是经典的 1 条直线，而是中间出现了 3 条不同斜率的线段，中间一段较为平缓，整体上呈现水平台阶状。图 1 (c) 可以看出滤纸法和饱和盐溶液法测得曲线稍有波动，主要是因为试验不是采用同一个土样，各个土样存在不可避免的差异。

2 瞬态脱湿吸湿系统 (TRIM)

2.1 测试原理和仪器

瞬态脱湿和吸湿系统的优点是其集物理试验和数值演算于一体，其仪器见图 2。其原理是吸力从一个等级到另一个状态时，通过精确量测土样中孔隙水变化量随时间的关系曲线，并以此两个达到稳态曲线作为目标函数，再通过 Richards 方程对试验路径数值模拟，利用 Van Genuchten 土-水特征曲线模型和 Mualem 水力传导函数模型对土样的水-力作用参数进行反演计算得出整段土水特征曲线和渗透系数。

2.2 测试方法与结果分析

饱和土样放进压力室，逐渐施加吸力直到土样失水，此时固定吸力不变，使吸力平衡；再施加一个大吸力 (250 kPa)，直到土样达到平衡；冲刷气泡并记

录。整个过程一直通过软件采集电子称测量水量变。采用 HYDRUS-1D 软件对采集数据进行反演计算，模拟计算结果见图 3。由图 3 可知，推算结果与试验数据比较接近，只是饱和含水率偏低一点、残余含水率偏高一些，但基本上可以吻合，可以用来预测吸力 1 MPa 前此土的持水曲线。

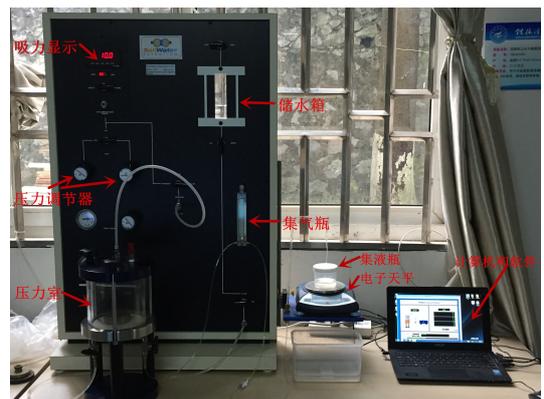


图 2 瞬态脱湿吸湿系统

Fig. 2 Transient water release and imbibition method (TRIM)

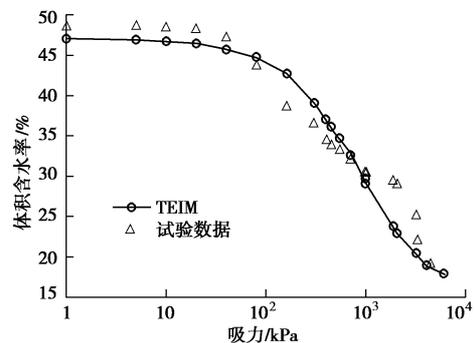


图 3 TRIM 测试拟合土水特征曲线

Fig. 3 SWCCs fitted by TRIM

3 压汞试验结果分析与持水曲线推算

3.1 压汞试验

压汞法是基于毛细管现象设计的，非浸润液体仅在施加外力时方可进入多孔体。在不断增压的情况下，

表 2 全风化泥岩孔隙结构特征参数

Table 2 Characteristic parameters of pore structure

吸力 /MPa	累计进汞量 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	$d > 5 \times 10^3 \text{ nm}$		$10^3 < d < 5 \times 10^3 \text{ nm}$		$10^2 < d < 10^3 \text{ nm}$		$10 < d < 10^2 \text{ nm}$		$d < 10 \text{ nm}$	
		孔隙体积分布 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	孔隙体积百分含量 /%	孔隙体积分布 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	孔隙体积百分含量 /%	孔隙体积分布 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	孔隙体积分布百分含量 /%	孔隙体积分布 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	孔隙体积分布百分含量 /%	孔隙体积分布 / $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$	孔隙体积分布百分含量 /%
0	0.317	0.0485	15.30	0.0415	13.09	0.16	50.47	0.0630	19.87	0.0040	1.27
38	0.222	0.0129	5.81	0.0160	7.21	0.1611	72.57	0.0308	13.87	0.0012	0.54

并且进汞体积作为外压力的函数, 即可得到在外力作用下进入抽空样品中的汞体积, 从而测得样品的孔径分布^[11]。在测试土样孔隙中, 假设孔隙为圆柱形, 为了克服水银和固体之间的内表面张力, 则外加压力 $p(d)$ 和 d 的关系满足著名的 Wash burn 方程^[17], 即

$$p(d) = \frac{-4T_s \cos \theta}{d} \quad (1)$$

式中 $p(d)$ 为外加压力 (Pa); d 为试样孔隙直径 (m); T_s 为汞表面张力 (N/m); θ 为汞与固体表面接触角 ($^\circ$)。

试样用钢丝锯切成约为 1 cm^3 的方块, 然后放进液氮冷冻 15 min, 接着把土样迅速放进冷冻干燥机里, 在 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度和真空状态下抽 48 h。压汞试验仪是 Micromeritics AutoPore IV, 低压范围为 $4 \sim 207 \text{ kPa}$ 和高压范围为 $207 \sim 413700 \text{ kPa}$, 采用连续增压方式。试样选取饱和样和一个经受 37 MPa 后的土样, 2 个压实样孔隙比分别为 0.86 和 0.63。

3.2 压汞试验的结果分析

图 4 给出了 2 个压实样的孔径与相应累计汞压入体积量间的关系。根据 Young-Laplace 方程, 试样的每一个孔径与吸力值存在着对应关系, 给试样施加吸力, 使其增加至某一孔径所对应的吸力时, 此孔径的孔隙水将会排出, 则孔径与土的含水率也存在一定的关系。图 4 中饱和样存在一个明显的上升段, 说明土样的孔隙主要集中分布在一个孔径范围里, 即所谓的单峰孔隙结构; 而经受过 38 MPa 吸力土样有两个不同斜率的上升段, 说明试样的孔隙主要集中在两个孔径区域内, 也就是双峰孔隙结构; 可得出随着吸力的增加, 土中孔隙不断收缩, 使孔隙分布从集中在一个孔径区域转变为分布在两个孔径区域, 也解释了图 1 中 SWCC 在 $0.5 \sim 3 \text{ MPa}$ 段, 存在一个水平阶状。若按 Kodikar 等^[18]对土内部微孔隙的划分: 颗粒间孔隙 ($0.004 \sim 1 \text{ }\mu\text{m}$)、积聚体内孔隙 ($1 \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$)、积聚体间孔隙 ($10 \sim 1000 \text{ }\mu\text{m}$), 则全风化泥岩压实样主要存在颗粒间孔隙和少量的积聚体内孔隙。

图 5 表示孔径分布密度的关系图, 反映了试样中相应孔径的孔隙体积所占的比例大小。饱和样的孔隙分布为单峰孔隙结构, 主要分布在孔径 $10 \sim 5000 \text{ nm}$ 的范围, 且孔径 450 nm 的孔隙最多; 但也看到存在

孔径约为 10^5 nm 的大孔隙, 主要原因是压汞试验时土体表面开放性孔隙所致。经受过 38 MPa 吸力压实样的孔隙分布为双峰孔隙结构, 孔径主要分布在 $10 \sim 500 \text{ nm}$ 和 $500 \sim 3000 \text{ nm}$ 范围内。图中也可得出土样由饱和到吸力 38 MPa 状态时, 孔径 $1000 \sim 5000 \text{ nm}$ 区间和 450 nm 附近的孔隙密度下降, 表现在这两个范围的孔隙发生明显的收缩, 表 2 也更直观地得到这个结论。同时说明随着吸力的增加, 土样 $d > 5 \times 10^3$ 和 $10^3 < d < 10^3 \text{ nm}$ 的孔隙量在减少, 其他孔径的孔隙量几乎不变, 猜想这两个区间的较大孔隙收缩为较小孔隙, 较小孔隙也收缩为更小的孔隙直到试验测不到的孔隙, 所以较小的孔隙量几乎不变化。参考文献^[9]基于压汞试验结果推算土水特征曲线的方法, 采用 2 个不同吸力下土的压汞试验结果推算出持水曲线, 见图 6。可以看出在低吸力段 (小于 1 MPa), 两条推算曲线有明显的差别, 且都低于试验数据, 主要是因为基于进汞量推算持水性没有考虑土样的收缩, 且饱和样的推算曲线更接近试验数据; 在高吸力段 (大于 1 MPa), 两条曲线差别不大, 几乎重合, 也说明这两个土样的相对较小孔隙量几乎一样。采用不同吸力下土样的进汞量推算出的持水曲线有一定的差异, 由饱和样的孔隙分布推算的曲线更加准确。

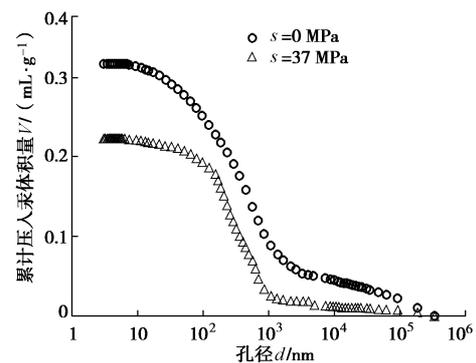


图 4 累计汞压入量关系曲线

Fig. 4 Curves of cumulative intruded volume by MIP

4 SWCC 预测模型

经典模型公式是在大量的试验基础上总结归纳出来的, 可以用来描述土体的持水性能及土的一些特性。经典的持水模型有以下 3 种。

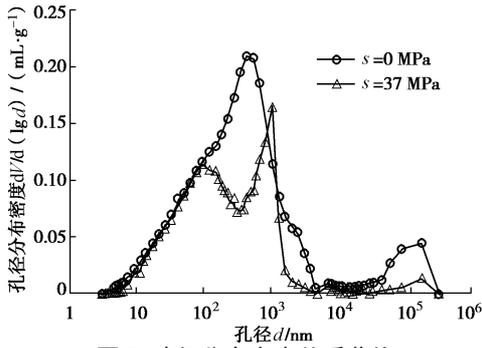


图5 孔径分布密度关系曲线
Fig. 5 Diameter versus density

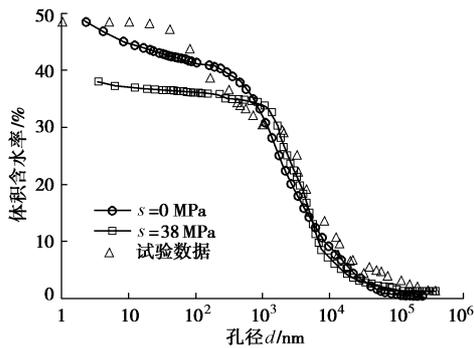


图6 基于孔径分布推算土水特征曲线
Fig. 6 SWCCs calculated by MIP tests

(1) Brooks & Corey 模型

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^n \quad (2)$$

式中, θ 和 θ_s 为非饱和和饱和体积含水率, θ_r 为残余体积含水率, n 为大于 0 的数, 可以反映孔隙大小分布。

(2) Van Genuchten 模型

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (a(u_a - u_w))^n} \right]^m \quad (3)$$

式中, a, m, n 拟合曲线参数。

(3) Fredlund & Xing 模型

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (4)$$

式中, a 是关于进气值的参数, n 是描述土体脱水速率的参数, m 是与残余含水率有关的参数。

表3 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of models

模型	参数			进气值 /kPa	拟合度 /%
	a	m	n		
Brooks & Corey	0.043	—	0.346	230	95.6
Van Genuchten	0.012	0.537	1.005	83	98.2
Fredlund & Xing	2861	3.032	0.625	80	99.8

图7为3种模型拟合的结果。Van Genuchten和Fredlund & Xing模型拟合曲线在高吸力段(大于1 MPa)相差不大, 且与试验数据能很好的吻合, 但曲

线在低吸力段(小于1 MPa)稍有偏差, 且与试验数据也有一定的偏离; Brooks & Corey模型拟合的曲线与试验值吻合度不高。考虑全吸力范围内持水曲线, 根据Van Genuchten和Fredlund & Xing模型拟合的曲线与试验结果更为接近, 表3为模型的拟合参数。

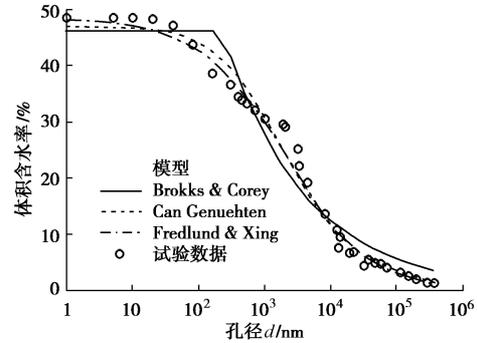


图7 模型拟合土水特征曲线
Fig. 7 SWCCs fitted by models

5 持水曲线预测

图8给出了3种方法对全风化泥岩压实样的持水曲线预测的结果。由TRIM得到的曲线可以和试验数据很好的吻合, 说明基于瞬态理论测量持水曲线是可行的, 但是吸力只能到3 MPa左右; Brooks & Corey模型拟合的曲线在过渡段拟合较好, 在边界效应段和非饱和残余段与试验值偏离较大; Van Genuchten和Fredlund & Xing模型拟合曲线在全吸力范围内拟合地很好, 可以比较准确预测此土的持水特性; 基于孔径分布得到的持水曲线只是在饱和和特别干燥状态下拟合度不是很高, 但所有的模型都不能体现曲线中间的水平阶段。

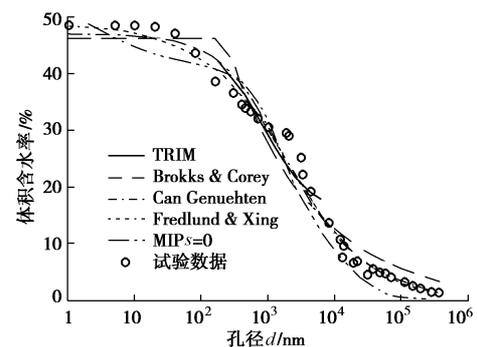


图8 多种方法推算拟合土水特征曲线

Fig. 8 SWCCs fitted or calculated by some methods

6 结论

本文对全风化泥岩压实样进行一系列的持水特性试验和压汞试验研究, 探讨了预测持水特性的方法, 可总结得到以下4点结论。

(1) 全风化泥岩压实样的进气值约为75 kPa; 持

水曲线中间有一小段水平阶状, 这是由于随着吸力的增大, 土中孔隙由集中在一个孔径范围变成分布在两个孔径范围。

(2) 基于瞬态理论的 TRIM 测试方法得到的土水特征曲线可以较好地与常规试验数据吻合, 说明此测试方法是可行的, 且周期短。

(3) 饱和样的孔隙分布为单峰孔隙结构, 而经受过 38 MPa 吸力压实样的孔隙分布为双峰孔隙结构, 这也解释了持水曲线中间出现水平阶状的现象; 吸力从 0 到 38 MPa, 占比例最大的孔隙 (孔径 450 nm 左右) 减少量最大。

(4) Van Genuchten 和 Fredlund & Xing 模型对全吸力范围内全风化泥岩持水曲线拟合较好; 但所有模型拟合结果均不能体现曲线中间水平阶状。

参考文献:

- [1] GB 5007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 2011. (GB 5007—2011 Code for design of building foundation[S]. 2011. (in Chinese))
- [2] 纪文奇, 费涵昌. 泥岩风化物的工程特性与应用[J]. 工程勘察, 1999, 7(2): 8 - 10. (JI Wen-qi, FEI Han-chang. Engineering characteristics and application of mudstone weathering[J]. Engineering Investigation, 1999, 7(2): 8 - 10. (in Chinese))
- [3] 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 pore size[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1451 - 1462. (in Chinese))
- [4] VANAPALLI S K, FREDLUND D, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, 49(2): 143 - 59.
- [5] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [6] WAYLLACE A, LU Ning. A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(1): 1 - 15.
- [7] VOGEL T, VAN GENUCHTEN M TH, CISLEROVA M. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24: 133 - 144.
- [8] LEIJ F J, RUSSELL W B, LESCH S M. Closed-form expressions for water retention and conductivity data[J]. Ground Water, 1997, 35(5): 848 - 858.
- [9] 孙德安, 高 游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 91 - 97. (SUN De-an, GAO You. Water retention behaviour of soils with different preparations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 91 - 97. (in Chinese))
- [10] 孙德安, 高 游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351 - 355. (SUN De-an, GAO You, LIU Wen-jie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 351 - 355. (in Chinese))
- [11] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curve of deformable clays[C]// Proceedings International Workshop on Unsaturated Soils. Rotterdam: A A Balkema, 2000: 91 - 106.
- [12] ASTM Committee D 5298-03. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter[S].
- [13] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, 25(3): 1 - 12.
- [14] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 33(8): 1839 - 1846. (SUN De-an, ZHANG Jun-ran, LU Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 33(8): 1839 - 1846. (in Chinese))
- [15] OIMLR 121 饱和盐溶液标准相对湿度值[S]. 2000. (OIMLR 121 The standard values of relative humidity for saturated salt solutions[S]. 2000. (in Chinese))
- [16] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 521 - 532.
- [17] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921, 7(4): 115 - 116.
- [18] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Change in clay structure behaviour due to wetting and drying[C]// Proceedings of 8th Australian-Zealand Conference on Geomechanics. Hobart, 1999: 179 - 185.