

DOI: 10.11779/CJGE201812021

# 游离氧化铁对红黏土持水特性的影响

牛 庚<sup>1, 2, 4</sup>, 孙德安<sup>3, 4</sup>, 韦昌富<sup>4</sup>, 邵龙潭<sup>1, 2</sup>

(1. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116085; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085;  
3. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 4. 桂林理工大学广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 分别以红黏土去铁前后的原状样为研究对象, 采用压力板仪和饱和盐溶液蒸气平衡法测得全吸力范围内的土水特征曲线并同时量测体变; 利用压汞试验测量不同吸力下的孔径分布, 以探讨去铁前后红黏土的孔隙结构, 并解释宏观持水特性。试验结果表明: 低吸力范围(0~1 MPa), 去铁前原状样的持水曲线下降较为明显, 而去铁后原状样的持水曲线较平缓, 尤其是吸力-饱和度的关系, 到1 MPa时基本上仍为饱和状态, 所以去铁后土样进气值增大; 去铁后的原状样随着吸力的增大收缩明显, 而原状样的收缩相对较缓, 主要原因是游离氧化铁以包膜和桥的形式分布在颗粒表面, 加强了颗粒之间的连接和包裹作用, 使得土骨架抵抗变形的能力增强。高吸力范围(9~367 MPa), 去铁前后红黏土持水和收缩特性相差不大, 此时游离氧化铁的作用不明显。去铁前后的红黏土原状样基本上存在单峰孔隙结构, 主要原因是在自然经过无数次胀缩变形, 相对较大的孔隙收缩, 最终使孔径分布相对均匀; 随着吸力的增加, 这两种土样孔隙结构基本上不变。

**关键词:** 游离氧化铁; 红黏土; 持水特性; 压汞试验; 原状样

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)12-2318-07

作者简介: 牛 庚(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土力学的研究工作。E-mail: niugeng@mail.dlut.edu.cn。

## Effects of free iron oxide on water retention behavior of lateritic clay

NIU Geng<sup>1, 2, 4</sup>, SUN De-an<sup>3, 4</sup>, WEI Chang-fu<sup>4</sup>, SHAO Long-tan<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Energy Conservation for Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to obtain the soil-water characteristic curve (SWCC) of two types of undisturbed lateritic Guilin specimens with and without free iron oxide in full suction range, two measurement methods are used: the pressure plate method and the vapor equilibrium method with saturated salt solution, and the volumes of specimens are measured during the process. The mercury intrusion porosimetry (MIP) tests are used to investigate the pore-size distributions. The test results show that in the low suction range, the SWCC of undisturbed specimens where the free iron oxide is removed is gentle. Especially in the relationship of suction-saturation, it's still saturated when the suction is 1 MPa. But the SWCC of undisturbed specimens declines obviously. Compared with the undisturbed specimens, the undisturbed specimens where the free iron oxide is removed shrink obviously. The main reason is that the free iron oxide is distributed on the particle surface in the form of film enveloping and bridge, which strengthens the connection and the coat effect between particles, so as to enhance the capability of the soil skeleton to resist deformation. In the high suction range, the water retention and shrinkage characteristics of the two types of undisturbed specimens have little difference, indicating that the absorbed water in the soil is dominant. The undisturbed specimens with and without free iron oxide exhibit a unimodal pore-size distribution, and they are different from the traditional understanding of a double-porosity microstructure. There are mainly intergranular pores with a diameter of 40 nm in compacted samples.

**Key words:** free iron oxide; lateritic clay; water retention behavior; MIP; undisturbed specimen

## 0 引言

红黏土作为一种典型的特殊土, 是不同种类母岩经过风化、红土化和水合化而形成的高塑性土, 主要

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479023, 11372078); 广西建筑新能源与节能重点实验室项目(桂科能17-J-22-1)

收稿日期: 2017-10-17

分布在两广、湖南、贵州和云南等地区<sup>[1]</sup>。红黏土的工程性质与一般黏土有较大的差异, 自然状态红黏土具有高含水率、低密实度等较差的物理性质, 但却有强度高和压缩性低的力学特性<sup>[2]</sup>。已有研究表明, 红黏土的这种特殊性质主要由游离氧化铁所形成的胶结作用和其颗粒间特殊的连接形式所决定<sup>[3-4]</sup>。游离氧化物将黏粒胶结在一起, 显著地影响黏土的许多理化性质<sup>[5]</sup> (如积聚体稳定性提高、颗粒分散性降低、胀缩性减弱等)。近几十年来, 人们对于红黏土进行了很多的研究, 如孙德安等对桂林红黏土原装样和压实样的持水特性和孔径分布进行了对比研究<sup>[6]</sup>; 谈云志等利用改进的装置研究了红黏土的湿化变形规律及其湿化变形模量<sup>[7]</sup>以及基于微观机制红黏土膨胀力的研究<sup>[8]</sup>。

大量研究证明, 红黏土中游离氧化铁含量和存在形式直接影响到工程地质性质<sup>[1,3,9]</sup>。王继庄<sup>[10]</sup>利用选择性溶解法去除红黏土中的游离氧化铁, 证实了游离氧化铁对红黏土特殊工程地质性质所产生极其重要的作用; 王继庄<sup>[10]</sup>、高国瑞<sup>[4]</sup>、罗鸿禧<sup>[3]</sup>也都证实了游离氧化铁在红黏土中的结构胶结作用。已有研究表明, 亚热带地区土壤游离氧化铁含量和存在形态在不同发生层存在着分异, 出露表层的氧化铁含量和分布特性等也不尽相同<sup>[11]</sup>, 刘鹏等<sup>[12]</sup>认为自然环境中铁离子的迁移对黏土的力学性质影响甚大, 并深入研究了水环境条件下红黏土中铁离子的迁移特性和机理。对于高温、潮湿、多雨的亚热带地区, 红黏土边坡由于其矿物成分和理化性质的特殊性, 含水率的变化所引起的强度改变和边坡失稳特点也与一般土质边坡差异较大。造成红黏土物理指标与力学指标相互矛盾的根本原因是土中含有一定量的游离氧化铁, 环境物理化学因素的变化会使起胶结作用的游离氧化铁破坏、变性和迁移, 此时土的物理力学性质也会发生相应的变化。目前, 水环境状态下游离氧化铁的迁移对红黏土持水特性的影响尚未引起岩土工作者的重视, 所以, 游离氧化铁对黏土持水特性的影响需进一步研究。

鉴于以上研究现状, 在发现桂林滑坡土中存在游离氧化铁迁移对其理化和力学特性产生显著影响的背景下, 对红黏土去铁前后的原状样全吸力范围的土水特征曲线和变形进行了量测; 并根据压汞试验得到的孔径分布进行比较和分析。

## 1 土样基本物理指标及试样制备

### 1.1 土样基本物理指标

本试验所用的红黏土取自广西桂林市一处边坡, 取土深度0.5 m。为了减少烘干作用对红黏土颗粒间胶结结构的影响, 所有试样均在自然条件下风干, 经X

衍射分析法知其矿物成分主要为高岭石(56.59%)、三水铝石(11.44%)、针铁矿(15.61%), 还含有一定量的石英(12.45%); 其基本物理指标如表1所示; 颗粒级配分布曲线如图1, 其黏粒含量超过45.6%。按照细粒土的分类标准, 该土样属于高液限红黏土。桂林红黏土全化学元素分析试验结果见表2。

表 1 桂林红黏土基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of Guilin lateritic clay

天然含水率 /%	天然干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然饱和 度/%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
36.8	1.30	91	76.2	41.8	34.4
自由膨胀率 /%	最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	最优 含水率/%	天然 孔隙比	土粒相对 密度	
28.7	1.52	28	1.11	2.74	

表 2 桂林红黏土物质化学组成<sup>[17-18]</sup>

Table 2 Chemical compositions of Guilin lateritic clay

土样	化学成分/%						游离氧化铁	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O		
桂林红黏土	29.85	14.03	38.77	0.08	0.47	1.18	0.092	5.47

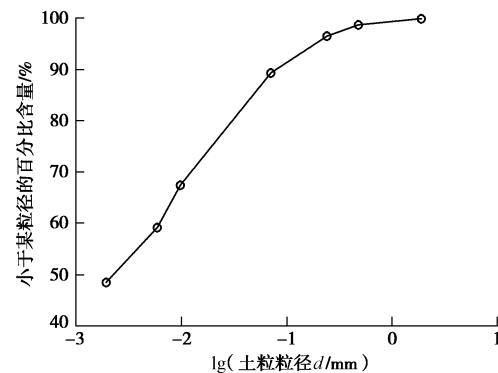


图 1 桂林红黏土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curve of Guilin lateritic clay

### 1.2 试样制备

#### (1) 原装样制备

取土时, 先清除约0.5 m表层土, 用环刀缓慢垂直向下压, 提取原状样, 并用保鲜膜进行包裹。经计算, 其干密度为1.30 g/cm<sup>3</sup>, 天然含水率为36.8%。

#### (2) 去铁原装样制备

利用特制环刀在边坡上取环刀样, 将传统的渗透仪改装成淋滤装置对土中游离氧化铁选择性溶解和去除。参照[13, 14]的方法, 分别用0.1 mol/L的NaCl、0.05 mol/L的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和0.05 mol/L的EDTA-连二亚硫酸钠3种溶液配制成渗透液, 再进行不间断淋滤60d, 然后以蒸馏水作为渗透液继续渗透30 d, 此方法对游离氧化铁去除率可达到85%以上<sup>[15]</sup>。

与此同时, 试验中的另一组原状样则在同样的渗透条件下以水作为渗透液淋滤 90 d, 以排除渗透作用对土样的影响。图 2 与文献[6, 16]未经处理的原状样的孔隙结构相同, 所以此渗透对原状样结构影响很小, 渗透后仍可看作原状样。

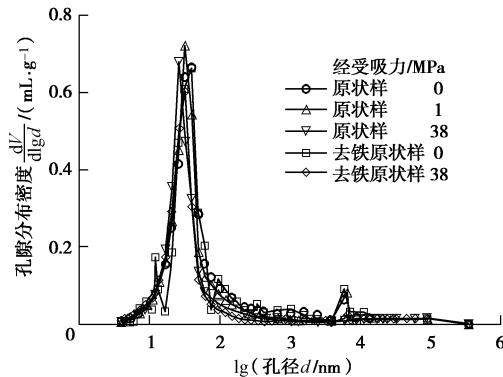


图 2 受过不同最大吸力土样的孔隙密度分布曲线

Fig. 2 Pore-size distributions of specimens experiencing different maximum suctions

## 2 持水特性试验结果比较与分析

### 2.1 试验仪器及试验方法

压力板试验: 所用的仪器为英国 GEO-experts 公司生产的 1D-SDSWCC 压力板仪, 配有 15bar 陶土板。将制好的环刀试样放入压力板仪的压力室中, 不施加竖向应力, 逐级施加吸力至 1 MPa, 每级土样稳定后取出, 称其质量, 并用游标卡尺测其直径和高度。

饱和盐溶液蒸气平衡法: 蒸气平衡法是目前控制高吸力最常用的方法, 相对湿度与吸力之间的关系满足 Kelvin 方程。将土样切成小块, 每种饱和盐溶液的上方放置 2 块土样, 进行脱湿试验, 平衡时间约 40 d; 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, 其体积的量测是基于阿基米德原理, 参照文献[19]的方法。试验中采用的饱和盐溶液种类和其对应的吸力值见表 3<sup>[20-21]</sup>。

表 3 饱和盐溶液及对应吸力值 (20°C)

Table 3 Saturated salt solution and corresponding suction

饱和盐溶液	RH%	总吸力/MPa
LiBr	6.6	367.54
LiCl·H <sub>2</sub> O	12.0	286.70
CH <sub>3</sub> COOK	23.1	198.14
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	33.1	149.51
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.2	113.50
NaBr	59.1	71.12
NaNO <sub>2</sub>	65.6	57.00
KI	69.9	48.42
NaCl	75.5	38.00
KCL	85.1	21.82
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	90.8	13.10
ZnSO <sub>4</sub>	91.3	12.60
K <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	93.7	9.00
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97.6	3.29

### 2.2 压力板试验结果和分析

图 3 为用压力板法测得红黏土原状样的脱湿持水曲线。从图 3 (a) 可以看出, 在饱和状态下, 原状样的质量含水率要比去铁后的原状样大, 主要原因是去铁后土样发生了细小的收缩, 从图 3 (b) 中也可以看出此现象。吸力从 0~1 MPa, 原状样含水率降低得较快, 变化幅度达到 19%; 而去铁后原状样含水率减少得较慢, 变化幅度 12%。比较两者含水率的变化规律, 根据毛细模型可以推测, 原状样含有相对较大的孔隙或者原状样中相对较大的孔隙含量比去铁后的土样多。从图 3 (b) 可以看出原状样失水收缩较小, 变化率为 6%; 而去铁后原状样失水收缩相对较大, 变化率为 11%。通过比较, 可以看出去铁后的原状样更容易收缩。土中含水率和孔隙的相对变化直接导致土中饱和度的状态, 从图 3 (c) 可以很明显地看出, 吸力

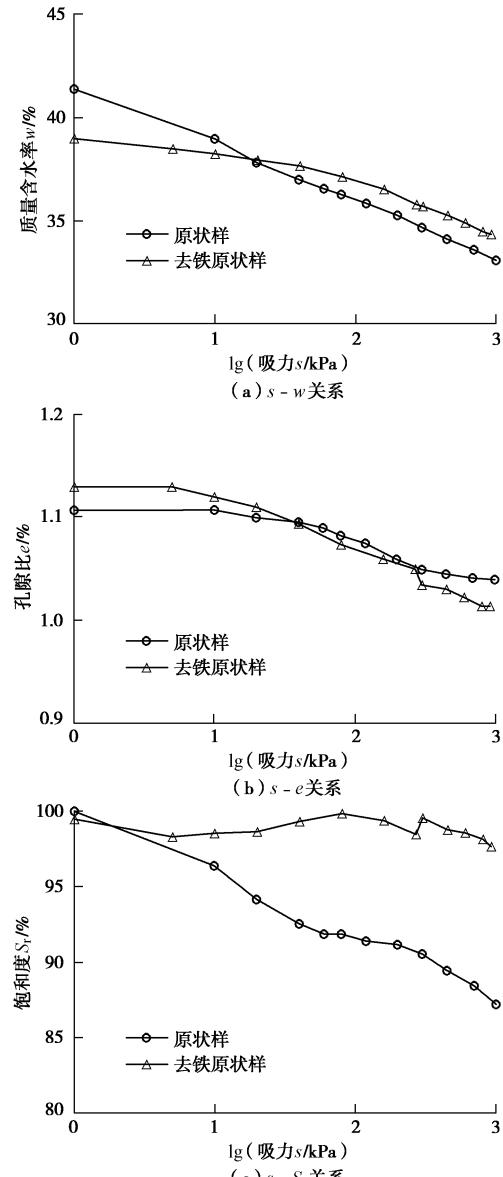


图 3 红黏土的持水曲线 (压力板法)

Fig. 3 Water retention curves of Guilin lateritic clay in drying by pressure plate method

从0到1 MPa, 去铁原状样的饱和度基本上都处在饱和状态; 而原状样的饱和度下降明显, 吸力1 MPa时, 饱和度下降到87%。原状样不易收缩, 孔隙相对较大, 但是孔隙中的水容易排出, 导致在很低的吸力下, 土的饱和度比较低; 而去铁原状样, 土孔隙的收缩量和失水量变化相对一致, 所以在吸力小于1 MPa范围, 土基本上处于饱和状态。

### 2.3 饱和盐溶液法试验结果和分析

图4是用饱和盐溶液蒸气平衡法测得去铁前后原状样在高吸力(3.29~367 MPa)范围的持水特性。在图4(a)中可以看出, 在吸力3~9 MPa范围, 相比

较去铁后的土样, 原状样有更好的持水特性; 在吸力大于9 MPa范围, 去铁前后土样的质量含水率相差不大。从图3(b)可以看出, 在吸力3~367 MPa范围内, 去铁原状样孔隙基本稳定, 没有发生明显的收缩; 原状样只在吸力3~6 MPa范围发生明显的收缩, 其他范围基本上不变。由图4(c)可知, 吸力大约在120 MPa之前, 去铁后原状样的持水曲线高于去铁前原状样, 之后两条曲线基本上重合。

### 3 压汞试验结果与分析

压汞试验法原理是非浸润性液体汞在不断升高压力作用时会流入相应半径的固体孔隙, 圆柱形孔隙注入液体所需压力大小可按 Washburn 公式<sup>[22]</sup>计算。使用的压汞试验仪是 Micromeritics AutoPore IV, 低压范围为4~207 kPa, 高压范围为207~413700 kPa, 采用连续增压的方式进行加压。

试验选取了3个经历不同最大吸力(0, 1, 38 MPa)的原状样和经历2个吸力(0, 38 MPa)的去铁原状样。根据每克样品进汞总体积和样品固体颗粒的体积, 可得到试样的孔隙比:

$$e = G_s V_z (1 + w_r) \quad (1)$$

式中,  $G_s$  为土的相对密度,  $V_z$  为每克样品压入汞的总体积( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $w_r$  为压汞试验时冷干土样的残余含水率, 本试验取0。

表4给出了根据进汞量计算的孔隙比与宏观测试所得孔隙比的比较, 可见, 根据进汞量计算的孔隙要比宏观测试所得孔隙比要小一些, 而且孔隙比越小, 两者相差越大。压汞仪无法测量孔径小于3 nm的孔隙和封闭孔隙的体积, 致使根据进汞量计算的孔隙比与宏观测试所得孔隙比不一致。红黏土多为粒间架空孔隙以及少量的孤立孔隙, 颗粒单元体内还可能有一些密闭孔隙, 孔隙连通性较差<sup>[15]</sup>。通过对比也可以推算, 随着吸力的增大, 土中小于3 nm的孔隙不断增多。

表4 根据进汞量计算与宏观测试得的孔隙比比较

Table 4 Comparison of measured and calculated void ratios

土样	吸力 /MPa	宏观测试所 得孔隙比	根据进汞量计算的 孔隙比
原状样	0	1.10	1.03
原状样	1	1.03	0.90
原状样	38	0.96	0.79
去铁原状样	0	1.12	1.02
去铁原状样	38	0.91	0.75

孔隙变形的产生与颗粒的变形和结构联结的变形密切相关。图5表示原状样与去铁原状样的孔径与相

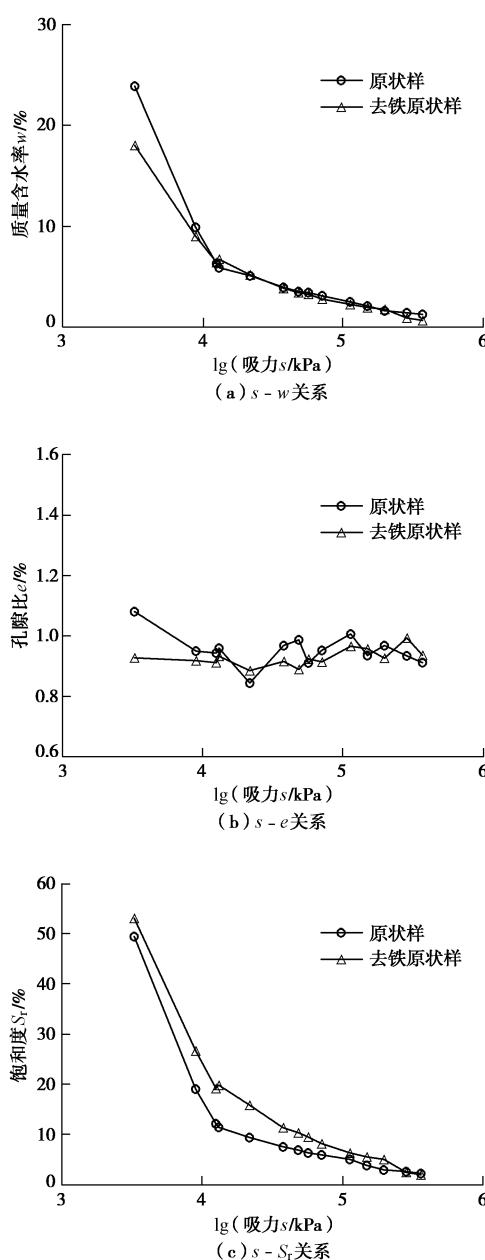


图4 红黏土的持水曲线(饱和盐溶液法)

Fig. 4 Water retention curves of Guilin lateritic clay by saturated salt solution method

应累计汞压入体积量之间的关系曲线, 其中都只有一个明显增加阶段, 即所有土样的孔径主要分布在10~100 nm之间, 按照Kodikara等<sup>[23]</sup>对土体内部孔隙的划分: 颗粒间孔隙(4~10<sup>3</sup> nm)、积聚体内孔隙(10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup> nm)、积聚体外孔隙(10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup> nm), 则红黏土主要存在颗粒间孔隙。

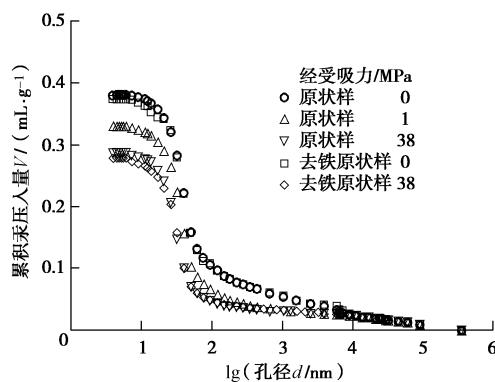


图5 孔径与累计汞压入量关系曲线

Fig. 5 Relationship between diameter and cumulative intruded volume

图5表示土样的孔径分布密度曲线, 反映了试样中相应孔径的孔隙所占的比例。由图可知, 去铁前后原状样的孔径分布基本为单峰孔隙结构, 这主要是原状试样在自然条件下经历了无数次的干湿循环而产生胀缩变形, 使积聚体间孔隙或积聚体内孔隙相对较大的孔隙逐渐消失, 而形成相对均匀的单峰孔隙结构; 但也存在少量孔径 $6 \times 10^3$  nm左右相对较大的孔隙, 主要原因是游离氧化铁的结构连结作用而使土中产生一定量的稳固凝聚体, 此部分微孔隙就存在于此内, 这也解释了红黏土进气值较低的原因。而去除游离氧化铁后, 饱和土样相对较大孔隙( $d=6 \times 10^3$  nm)稍有增加, 但经过吸力38 MPa后, 孔径 $6 \times 10^3$  nm的孔隙消失, 主要原因是去除游离氧化铁后, 其产生的颗粒结构的连接和包裹作用消失, 土骨架抵抗变形的能力减弱, 且使土进一步分散, 且随着吸力的增大, 土孔隙更容易收缩。

#### 4 游离氧化铁对持水特性作用机理探讨

红黏土具有高孔隙比、高含水率, 而抗剪强度偏高, 压缩性偏小等特性, 即呈现物理指标与力学指标相互矛盾, 其根本原因是红黏土中含有一定量的游离氧化铁。土中的游离氧化铁在土中如何分布, 目前尚未完全弄清, 有待进一步研究。但根据现有资料和试验结果证明, 它主要分布在细粒土的表面, 以包膜和“桥”的形式存在<sup>[3]</sup>。氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用的本质并不是通过改变或破坏矿物晶格结构进而

改变黏土矿物性质, 而是通过改变土颗粒间的联结状态及粒间力来控制微观结构形态, 进而影响土的物理、力学行为表现<sup>[15]</sup>。

正是由于游离氧化铁以包膜和“桥”的形式分布在颗粒表面, 加强了颗粒之间的连接和包裹作用, 使得土骨架抵抗变形的能力增强, 土在失水过程中不易收缩; 而去除游离氧化铁后, 其产生的结构连接和包裹作用消失, 土骨架抵抗变形的能力减弱, 宏观上表现为土更易失水收缩, 与图3(b)的结果一致。由于游离氧化铁的存在, 土孔隙不易收缩, 孔隙相对较大, 根据毛细模型, 土孔隙中的水更易排出, 与图3(a)、(b)的现象一致。在高吸力部分(9~367 MPa), 游离氧化铁的作用不明显, 说明吸附水对土的作用占据主导。

到目前为止, 对红黏土的研究已做了大量工作, 但是值得一提的是, 在研究游离氧化铁对红黏土理化-力学性质评价时, 基本上采用的是重塑样, 不能真正地反映自然红黏土的特性。比如, 传统认识中, 由于游离氧化铁的存在红黏土必然含有双峰孔隙结构, 但是从图2可知, 实际自然状态下的红黏土基本上是单峰孔隙结构, 孙德安等<sup>[6, 16]</sup>也有相同的结论。实际上, 桂林地区浅层红黏土在自然环境下的原状样主要存在颗粒间孔隙, 而相对较大的孔隙极少, 主要原因是自然环境下的红黏土不断的经受干湿循环, 使土中积聚体间孔隙和积聚体内孔隙的孔径不断减小, 最终基本形成相对均匀的孔隙分布。

#### 5 结 论

以桂林红黏土为研究对象, 对去铁前后原状样进行持水曲线测量和压汞试验, 对比了去铁前后持水特性和孔径分布的差异, 主要结论如下:

(1) 低吸力范围(0~1 MPa), 去铁后原状样的持水曲线较平缓, 尤其是吸力-饱和度的关系, 到1 MPa时基本上仍为饱和状态; 而原状样的持水曲线下降较为明显。所以, 游离氧化铁的迁移对红黏土持水特性的影响是不能忽视的。

(2) 在低吸力范围, 去铁后的原状样随着吸力的增大收缩明显, 而原状样的收缩相对较小。主要是游离氧化铁以包膜和桥的形式分布在颗粒表面, 加强了颗粒之间的连接和包裹作用, 使得土骨架抵抗变形的能力增强。

(3) 高吸力范围(9~367 MPa), 两种土样的持水和收缩特性相差不大, 此时土中结合水占据主导作用, 游离氧化铁的作用不明显。

(4) 对于浅层桂林红黏土, 去铁前后的原状样基

本上都是单峰孔隙结构, 主要孔隙半径为 40 nm 左右, 为颗粒间孔隙; 随着吸力的增加, 两种土样孔隙结构基本上不变。

红黏土的基本性质对微观结构具有依赖性, 微观结构对环境因素具有敏感性。因此, 进行土体长期力学性能评价时必须考虑环境化学因素对其微观结构的长期作用的影响。

### 参考文献:

- [1] 姜洪涛. 红黏土的成因及其对工程性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2000(3): 33 - 37. (JIANG Hong-tao. Origin of red clay and its effects on engineering property[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000(3): 33 - 37. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 2 - 47. (KONG Ling-wei, LUO Hong-xi, YUAN Jian-xin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 2 - 47. (in Chinese))
- [3] 罗鸿禧. 游离氧化铁对红色黏土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 31 - 38. (LUO Hong-xi. Effect of free ferric oxide on engineering properties of laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 31 - 38. (in Chinese))
- [4] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 10 - 21. (GAO Guo-duan. The micro structures and engineering of red soil in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 10 - 21. (in Chinese))
- [5] ARIAS M, BARRAL M T, DIAZ-FIEROS F. Effects of iron and aluminum oxides on the colloidal and surface properties of kaolin[J]. Clay and Clay Minerals, 1995, 43(4): 406 - 416.
- [6] 孙德安, 高 游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔径分布[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 351 - 356. (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))
- [7] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的湿化变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 483 - 489. (TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study on wetting deformation of compacted laterite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 483 - 489. (in Chinese))
- [8] 谈云志, 胡新江, 喻 波, 等. 压实红黏土的恒体积膨胀力与细观机制研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 653 - 658. (TAN Yun-zhi, HU Xin-jiang, YU Bo, et al. Swelling pressure and mesomechanism of compacted laterite under constant volume condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 653 - 658. (in Chinese))
- [9] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 25 - 39. (KONG Ling-wei, LUO Hong-xi. Effect of the conversion in form of free iron oxide on the engineering property of the red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(4): 25 - 39. (in Chinese))
- [10] 王继庄. 游离氧化铁对红黏土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 147 - 156. (WANG Ji-zhuang. The effects of free iron oxides on the engineering properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(1): 147 - 156. (in Chinese))
- [11] 赵其国, 王振权, 刘兆礼. 我国富铝化土壤发生特性的初步研究[J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 333 - 345. (ZHAO Qi-guo, WANG Zhen-quan, LIU Zhao-li. Preliminary studies on genetic properties of the allitic soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(4): 333 - 345. (in Chinese))
- [12] 刘 鹏, 黄 英, 金克盛, 等. 云南红土铁离子迁移的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(3): 114 - 119. (LIU Peng, HUANG Ying, JIN Ke-sheng, et al. The test study of the iron ions migration in Yunnan laterite[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(3): 114 - 119. (in Chinese))
- [13] WIRIYAKITNATEEKUL W, SUDDHIPRAKAM A, KHEORUENROMNE I, et al. Iron oxides in tropical soils on various parent materials[J]. Clay Minerals, 2007, 42(4): 437 - 451.
- [14] JIANG Z, LIU L. A pretreatment method for grain size analysis of red mudstones[J]. Sedimentary Geology, 2011, 241(1): 13 - 21.
- [15] 张先伟, 孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 65 - 74. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Interaction between iron oxide colloids and clay minerals and its effect on properties of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [16] SUN D A, YOU G, ZHOU A N, et al. Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2016, 75(2): 781 - 791.
- [17] 吕海波, 曾召田, 尹国强, 等. 广西红黏土矿物成分分析

- [J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 651 - 656. (LÜ Hai-bo, ZENG Zhao-tian, YIN Guo-qiang, et al. Analysis of mineral composition of red clay in Gungxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 651 - 656. (in Chinese))
- [18] 王 清, 张庆云, 唐大雄. 游离氧化物对土体工程地质性质的影响[C]// 中国地质学会工程地质专业委员会. 第四届全国工程地质大会论文选集(二). 北京, 1992. (WANG Qing, ZHNAG Qing-yun, TANG Da-xiong. Influence of Free Oxide on Engineering Geological Properties of Soil[C]// The 4th Session of the National Assembly of Engineering Geology. Beijing, 1992. (in Chinese))
- [19] 牛 庚, 孙德安, 韦昌富, 等. 全风化泥岩持水特性研究及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊): 216 - 221. (NIU Geng, SUN De-an, WEI Chang-fu, et al. Water retention behaviour of complete-intense weathering mudstone and its prediction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S2): 216 - 221. (in Chinese))
- [20] OIML R121 饱和盐溶液标准相对湿度值[S]. 2000. (OIMLR121 The standard values of relative humidity for saturated salt solutions[S]. 2000. (in Chinese))
- [21] DELAGE P, HOWAT M, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, 50(1/2): 31 - 48.
- [22] 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.
- [23] 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.

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学理论和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex”数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)